ＩＳＳＮ　0386 － 5878
土木研究所資料第3870号

土 木 研 究 所 資 料

平成13年度
重点プロジェクト研究報告書

平成14年３月

独立行政法人　土木研究所

Copyright © (2002) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3870号2002年3月

平成13年度
重点プロジェクト研究報告書

独立行政法人土木研究所

要旨

本資料は、現在実施している8課題の重点プロジェクト研究について、平成13年度の研究成果をとりまとめたものである。

キーワード：重点プロジェクト研究、年度報告書、平成13年度

ま え が き

土木研究所は、旧・国土交通省土木研究所の業務のうち、主として土木に係る建設技術の研究開発に係る部分を引き継いで、平成13年4月1日より独立行政法人として新たなスタートを切った。

土木研究所は、その研究成果の社会への還元を通じて良質な社会資本の効率的な整備の推進に貢献することを使命として、国土交通大臣から指示された「独立行政法人土木研究所が達成すべき業務運営に関する目標」(以下、「中期目標」という)を受けて策定した「独立行政法人土木研究所の中期目標を達成するための計画」(以下、「中期計画」という)のもとに、効率的な業務運営にあたっている。

土木研究所が実施する研究は、大きく、我が国の土木技術の着実な高度化のために必要な基礎的・先導的研究と、良質な社会資本の整備、管理のために解決が必要な研究開発に分類されるが、後者の研究のうち、特に現下の社会的要請から早急かつ的確に対応していくことが必要な研究開発については、これを「重点プロジェクト研究」と位置づけ、平成13～17年度までの現中期計画期間中に研究所全体の研究経費の概ね40％を充当し、重点的かつ集中的に研究開発を実施することとしている。現中期計画において、重点プロジェクト研究に位置づけられた研究課題は次の14課題である。

(1) 土木構造物の経済的な耐震補強技術に関する研究
(2) のり面・斜面の崩壊・流動災害軽減技術の高度化に関する研究
(3) 水環境における水質リスク評価に関する研究
(4) 地盤環境の保全技術に関する研究
(5) 流域における総合的な水循環モデルに関する研究
(6) 河川・湖沼における自然環境の復元技術に関する研究
(7) ダム湖及びダム下流河川の水質・土砂制御技術に関する研究
(8) 閉鎖性水域の底泥対策技術に関する研究
(9) 都市空間におけるヒートアイランド軽減技術の評価手法に関する研究
(10) 構造物の耐久性向上と性能評価方法に関する研究
(11) 社会資本ストックの健全度評価・補修技術に関する研究
(12) 新材料・未利用材料・リサイクル材を用いた社会資本整備に関する研究
(13) 環境に配慮したダムの効率的な建設・再開発技術に関する研究
(14) 超長大道路構造物の建設コスト縮減技術に関する研究

重点プロジェクト研究の実施にあたっては、質の高い研究成果と効率的な研究体制が確保されるように、研究者が自ら行う自己評価、研究所内での内部評価に加え、大学、民間の研究者等の専門性の高い学識経験者による外部評価を受けて、その実施にあたることとしている。今年度は、上記14研究課題のうち、(3)、(4)、(5)、(6)、(9)、(11)、(12)、(13)の8課題を開始しているが、これらの研究課題は、旧・国土交通省土木研究所において実施された「土木研究所研究評価委員会」における外部評価、独立行政法人土木研究所において再度実施した「土木研究所研究評価委員会」における外部評価を受け、その指摘や議論を踏まえた上で作成した研究計画のもとに実施しているものである。

本報告書は、現在実施している8課題の重点プロジェクト研究について、平成13年度の研究成果をとりまとめたものである。本研究の内容については、土木研究所研究評価委員会ならびに本書をご覧またはご利用頂く諸兄からのご意見をもとに、今後、より一層充実したものを目指していくこととしているが、本書に示したこれまでの研究成果が土木技術の発展、また、より質の高い国土交通政策の遂行に貢献するものであることを切に願うものである。

平成14年3月

独立行政法人 土木研究所

理事長　坂本忠彦

目　　次

まえがき

Ⅰ　水環境における水質リスク評価に関する研究 …… 1
1.1　都市排水由来の化学物質の水環境中での挙動に関する研究 …… 4
1.2　ダイオキシン類の存在形態とモニタリング・分析手法に関する研究(1) …… 8
1.3　ダイオキシン類の存在形態とモニタリング・分析手法に関する研究(2) …… 10
1.4　ダイオキシン類の存在形態とモニタリング・分析手法に関する研究(3) …… 12
1.5　下水道における微量化学物質の評価に関する評価 …… 14
1.6　病原性微生物の同定方法および挙動に関する研究 …… 18

Ⅱ　地盤環境の保全技術に関する研究 …… 28
2.1　地盤中ダイオキシンの簡易分析手法の開発 …… 30
2.2　建設分野におけるダイオキシン類汚染土壌対策技術の開発 …… 34

Ⅲ　流域における総合的な水循環モデルに関する研究 …… 38
3.1　総合的な水循環モデルに関する研究 …… 40
3.2　都市河川流域における水・物質循環に関する研究 …… 44
3.3　低水管理支援システム開発に関する研究 …… 52

Ⅳ　河川・湖沼における自然環境の復元技術に関する研究 …… 56
4.1　河川環境におけるインパクト・レスポンスに関する調査 …… 58
4.2　変動を加味した河川の正常流量に関する基礎調査 …… 62
4.3　水辺植生帯の環境機能に関する調査 …… 68
4.4　IT を活用した野生生物追跡調査手法の開発 …… 72

Ⅴ　都市空間におけるヒートアイランド軽減技術の評価手法に関する研究 …… 76
5.1　メソスケールモデルを用いた各種対策による気温低減効果の予測に関する研究 …… 78
5.2　ヒートアイランド現象軽減手法の費用対効果に関する研究 …… 84
5.3　都市環境に配慮した舗装構造に関する研究 …… 90

Ⅵ　社会資本ストックの健全度評価・補修技術に関する研究 …… 96
6.1　鋼構造物の劣化状況のモニタリング手法に関する調査 …… 99
6.2　橋梁等の下部構造の健全度評価手法に関する研究 …… 105
6.3　既設コンクリート構造物の補修技術の開発 …… 111
6.4　舗装の低騒音・低振動機能の回復に関する研究 …… 115
6.5　既設トンネルの補修・補強技術の開発 …… 119
6.6　コンクリート構造物の維持管理計画に関する研究 …… 126
6.7　鋼橋塗替え処理技術の高度化に関する研究 …… 130
6.8　橋梁の健全度評価と維持管理システムの高度化に関する研究 …… 134
6.9　舗装マネジメントシステムの実用化に関する研究 …… 140

Ⅶ　新材料・未利用材料・リサイクル材を用いた社会資本整備に関する研究 …… 148
7.1　高強度鉄筋の利用技術の開発に関する研究 …… 150
7.2　FRP の道路構造物への適用に関する調査 …… 154
7.3　再生骨材・未利用骨材の有効利用技術の開発 …… 158
7.4　他産業リサイクル材の利用技術に関する研究 …… 162

Ⅷ　環境に配慮したダムの効率的な建設・再開発事業に関する研究 …… 166
8.1　コンクリートダムの再開発技術に関する調査 …… 169
8.2　フィルダムの嵩上げ技術に関する調査 …… 173
8.3　ダム機能強化のための放流設備設計手法に関する調査 …… 179
8.4　ダムコンクリートにおけるスラッジの有効利用に関する調査 …… 187
8.5　濁沸石等含有岩石のダムコンクリート骨材としての有効利用に関する調査 …… 191
8.6　ダム基礎等におけるゆるみ岩盤の評価に関する調査 …… 195
8.7　ダム基礎グラウチングの合理的計画設計法に関する調査 …… 199

Ⅰ　水環境における水質リスク評価に関する研究

研究期間：平成 13 年度～17 年度
プロジェクトリーダー：水循環研究グループ上席研究員（水質）　田中宏明
研究担当グループ：水循環研究グループ（河川生態、水質）、材料地盤研究グループ（リサイクル）

1.　研究の必要性

近年、水を経由した微量化学物質や病原性微生物などの汚染によって、人の健康や野生生物の生態系への影響が懸念されている。このため、水環境における微量化学物質や病原性微生物の汚染状況の把握、汚染原因の究明、影響の評価、対策の必要性の判断、さらには必要に応じて対策の実施が求められている。

2.　研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では、水環境に含まれるエストロゲン作用をもつ内分泌攪乱化学物質（以下、環境ホルモンという）、ダイオキシン類、および病原性微生物を対象として、その検出試験方法、影響評価方法を開発し、水環境での挙動を解明するとともに下水処理の効果を明らかにすることを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

① 環境ホルモン、ダイオキシン類の挙動の解明とホルモン作用の包括的評価指標の開発
② 環境ホルモン、ダイオキシン類の簡便な試験手法の開発
③ 下水中の環境ホルモンが淡水魚に与える影響と下水処理場における処理効果の解明
④ 下水汚泥の再利用などにおける病原性微生物のリスク評価手法の開発

3.　個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

① 都市排水由来の化学物質の水環境中での挙動に関する研究（平成 13～17 年度）
② ダイオキシン類の存在形態とモニタリング・分析手法に関する研究（平成 12～14 年度）
③ 下水道における微量化学物質の評価に関する調査（平成 13～17 年度）
④ 都市排水に含まれるエストロゲン様物質が魚類に及ぼす影響と指標化に関する研究（平成 14～17 年度）
⑤ 病原性微生物の同定方法および挙動に関する研究（平成 11～17 年度）

このうち、平成 13 年度は①、②、③、⑤の 4 課題を実施している。

4.　研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、これまでに実施してきた研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1)　環境ホルモン、ダイオキシン類の挙動の解明とホルモン作用の包括的評価指標の開発

「下水道における微量化学物質の評価に関する調査」において、環境ホルモンのうち、女性ホルモン（エストロゲン）作用による水環境に棲息する野生生物、特に魚類への影響が懸念されるエストロゲン、ノニルフェノールを対象に、水中での挙動を解明するため、その生成過程を検討した。その結果、これらの前駆体を含めた水、底質試料の高感度で、高分解能な分析方法の確立がまず必要であることが判明した。このため、LC/MS/MS や GC/MS などの機器を用いた分析方法の開発に取り組み、17βエストラジオール、エストロン、エチニルエストラジオール、ノニルフェノール、ノニルフェノールエトキシレート、ノニルフェノールエトキシ酢酸などの分析方法を開発した。なお、今後は、これら分析方法の検出感度の向上と前処理法などの簡易化、およびエストロゲン包合体などの分析方法の開発を進める予定である。

また、「都市排水由来の化学物質の水環境中での挙動に関する研究」においては、複雑な分解経路を有するノニルフェノール類の水環境での挙動を理解するためのモデルの開発に着手した。今後は、作成したモデルの解析精度を高めるため、ノニルフェノール類の分解経路の解明、ノニルフェノール類の分解速度などの物理定数の測定、実際の水環境での挙動との比較などを行う予定である。

「ダイオキシン類の存在形態とモニタリング・分析手法に関する研究」においては、河川底質のダイオキシン類の存在形態を過去に実施した実態調査結果をもとに検討した。その結果、河川ごとに、河川底質に含まれるダイオキシン類の含有濃度（TEQ）とその地点での底質の有機物指標である強熱減量との間に相関性が見られた。ただし、ダイオキシン類が高濃度に含まれると、はずれ値となる場合があるが、限定したエリアで用いれば、代替指標として利用できることが示唆された。今後は、河川中のダイオキシン類の代替指標による簡易モニタリング手法について検討していく予定である。

(2)　環境ホルモン、ダイオキシン類の簡便な試験手法の開発

「下水道における微量化学物質の評価に関する調査」において、環境ホルモンのうち、エストロゲンを対象に、免疫抗体による物質識別と酵素標識による定量化を行う ELISA（enzyme-linked immuno-sorbent assay）による簡易分析方法について民間と共同研究を実施し、下水や河川水などの環境試料に含まれる測定妨害物質を除去できる前処理方法を開発した。また、下水試料中の 17βエストラジオールを簡便に測定するための方法として ELISA キットがあるが、下水試料からの固相抽出方法でメタノール溶出とする場合とジクロロメタン溶出とする場合を比較検討した。この結果、ジクロロメタン溶出の場合の方が交差反応・妨害を示す他の物質を分離することが可能であると判断された。また、従来実態調査で使われていた ELISA キットと共同研究の対象とした ELISA キットとを比較した結果、後者の測定結果の方が機器分析による測定結果に近い傾向が見られたが、依然として、ELISA 法による測定結果は機器分析のそれを大きく上回る結果となった。このため、今後は、さらに一層のクリーンナップを検討していく予定である。

「ダイオキシン類の存在形態とモニタリング・分析手法に関する研究」においては、ダイオキシン類の簡易分析方法を整理し、河川底質に含まれるダイオキシン類の対策実施にあたって必要となる測定系の条件をとりまとめた。また、このうち、ELISA および Ah（aryl-hydro）レセプターを用いるダイオキシン類の簡易分析方法の底質試料への適用するための測定方法について民間との共同研究を開始した。さらに、底質からのダイオキシン類の抽出方法を複数検討した結果、高速溶媒抽出（Pressured Fluid Extraction）法が時間と抽出効率の点から有望な方法の一つであると判断した。今後は、簡易分析方法ごとの特徴と利用法の整理を行うとともに、前処理法を含めた簡易分析方法の改良を進める予定である。

(3)　下水中の環境ホルモンが淡水魚に与える影響と下水処理場における処理効果の解明

「下水道における微量化学物質の評価に関する調査」において、化学物質の下水処理過程での挙動を理解することを目的として作成した土木研究所モデルを用いて、ノニルフェノールのみが下水に含まれる場合で、生分解性を無視した場合について、活性汚泥法における概略の推定計算を行った。この結果、大気、水、汚泥への移行はそれぞれ、10％、1％、89％程度であった。今後は、複雑な分解経路をたどるノニルフェノールエトキシレート、ノニルフェノールエトキシ酢酸類の変化機構を取り込んだ下水処理での機構解明を行う予定である。

(4)　下水汚泥の再利用などにおける病原性微生物のリスク評価手法の開発

「病原性微生物の同定方法および挙動に関する研究」において、下水処理水や再利用水に含まれる病原性ウイルスからの感染リスクを制御するために必要な制御要件と検出レベルの要件を検討した。この結果、これまでの培養法以上に高感度な PCR (Polymerase Chain Reaction) 法を用いることが必要であることが判明した。また、病原性原虫であるクリプトスポリジウムのリアルタイム PCR 法による定量検出方法を検討し、ハイブリダイゼーション法を用いることによって特異性の高い検出が可能であることが分かった。すなわち、本方法は、オーシスト数 20 個以上から検出可能であり、100 個以上から定量可能となることが分かった。今後は、効果的な濃縮精製などの試料前処理方法を含め、PCR 法を適用して極微量ウイルスを確実に検出、測定する手法の開発を目指

し、クリプトスポリジウムについては、リアルタイムPCR法による検出限界と定量限界を向上させるとともに、実試料への適用を図りたいと考えている。

1.1　都市排水由来の化学物質の水環境中での挙動に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 11～平 14
担当チーム：水循環研究グループ（水質）
研究担当者：田中宏明、小森行也、佐々木稔

【要旨】
近年、水環境中での界面活性剤の分解物質や人畜由来のホルモンなどによって野生生物の内分泌攪乱が生じる場合があると報告されている。こうした内分泌攪乱物質について、発生源や排出源などで効率的なリスク削減対策を講じるためには、これら物質の水、底泥などの水環境での挙動を把握し、水域に与える影響を把握することが必要である。本プロジェクトでは、都市排水由来のこれら内分泌攪乱物質の、河川水・底質中などにおける調査分析手法の開発、また水環境中での分解・生成といった変化現象の把握を目的としている。
13 年度は、環境水試料を対象とした、LC/MS/MS によるエストロゲンの分析法の前処理法の簡易化を目的とした改良を行った。ノニルフェノキシ酢酸の分析法に関する検討を実施し、固相カラム及び陰イオン交換樹脂カラムを用いた前処理からの GC/MS による分析手法を確立した。また、水環境中での挙動をシミュレートするための化学物質の挙動モデルの開発に着手した。
キーワード：NP、NPEO、NPEC、エストロゲン、内分泌攪乱物質

1. はじめに

生物の正常なホルモン作用に影響を与えることが疑われている外因性の物質（内分泌攪乱化学物質）による環境汚染問題が顕在化してきているなか、人畜由来のエストロゲンそのものによる環境影響についても、その内分泌攪乱作用の強さから注目が集まり始めている。都市排水を由来とするエストロゲンとしては、17β-エストラジオール（女性ホルモン、以下 E2）、その代謝生成物であるエストロン（E1）、及び経口避妊薬の主成分であるエチニルエストラジオール（EE2）が挙げることができる。

環境中に存在している濃度と内分泌攪乱作用の強さから、エストロゲンに次いで環境に与える影響が大きいと考えられるノニルフェノール（NP）は、都市排水に含まれる非イオン界面活性剤であるノニルフェノールエトキシレート（NPEO）が、下水処理場や河川の中でノニルフェノキシ酢酸（NPEC）等の中間物質を経由して分解されることによって生成しているといわれている。

エストロゲンやノニルフェノール類といった物質による環境リスクを正しく評価するためには、これらの物質の測定法を開発するとともに、水環境中における変化、生成、分解、蓄積、移動といったような挙動を把握することが必要である。

本研究では、適切な前処理、抽出法を用いたこれらの物質の機器分析手法を開発するとともに、生物分解等による環境中での変化現象を調査し、モデルを用いて挙動をシミュレートすることで、環境リスク評価や予測に必要な知見を得ることを目的としている。

2. 研究の内容

2. 1　エストロゲン分析手法の改良

エストロゲン（E2, E2, EE2）の分析手法としては、前処理の簡易化を目的として、エストロゲンを C18 カートリッジで吸着、溶出後のクリーンアップにはフロリジルカートリッジと NH2 カートリッジを用いる前処理手法を採用、分析は LC/MS/MS を用いて行った。標準溶液の繰り返し測定を行った結果、バラツキを標準偏差（σ）で表した場合の 10σ の検出下限値は、実試料で従来法と同等の E2 で 1.3ng/L、E1 で 0.5ng/L、EE2 で 1.6ng/L が得られた。また、河川水への添加回収試験の結果（表－1）では、ほぼ 100%の回収率を得ることができた。

表－1　河川水への添加回収試験結果（ng/mL）

		E2	E1	EE2
河川水	無添加濃度	0.0000	0.0001	0.0000
	添加後の濃度	0.0103	0.0106	0.0105
	回収率(%)	103	105	105

2. 2　ノニルフェノキシ酢酸分析手法の検討

NPnEC 類の分析手法としては、磯部ら[1]の方法を基に検討、若干の変更を加え、n=0,1,2 の NPEC を対象として分析を実施した。固相カラム tC18 及び陰イオン交換樹脂カラム SAX を用いメタノールに溶出させた NPnEC 溶出液に、BF_3/メタノールを加え 90℃で 1 時間加熱してメチル化、ヘキサン抽出後に内部標準物質（ピレン-d_{10}）を加え、GC/MS による定量を行った。

NPEC 標準メタノール溶液を繰り返し分析した結果（表－２）から、実試料の 1000 倍濃縮を考慮した 10σ の定量下限値として 0.03μg/L が得られた。また、精製水、下水二次処理水、同一次処理水への標準物質の添加回収試験からは、77.9%～102%の良好な回収率（表－３）を得ることができた。

表－２　標準試料の繰り返し分析結果　(ng/μL)

	NP0EC	NP1EC	NP2EC
1	0.071	0.045	0.046
2	0.066	0.042	0.041
3	0.065	0.041	0.042
4	0.064	0.042	0.044
5	0.063	0.040	0.040
平均	0.066	0.042	0.043
標準偏差σ	0.0031	0.0019	0.0024
CV(%)	4.7	4.5	5.7

表－３　添加回収試験結果　(%)

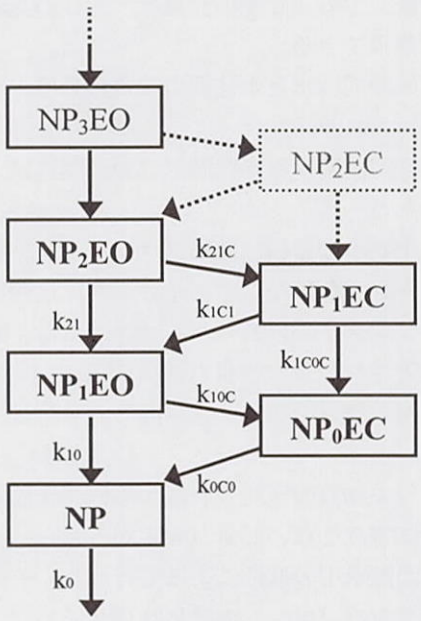
		NP0EC	NP1EC	NP2EC
精製水 (1μg/L)	1	95.8	91.8	87.5
	2	97.3	88.1	78.9
	3	92.6	86.6	77.9
	4	94.4	88.1	79.9
	5	91.0	89.7	82.1
	平均	94.2	88.9	81.3
	CV(%)	2.7	2.2	4.7
二次処理水 (3μg/L)	1	96.7	95.6	89.7
	2	99.6	97.7	90.3
	3	97.8	98.3	94.5
	4	83.1	84.1	80.2
	5	102	102	97.7
	平均	95.8	95.5	90.5
	CV(%)	7.7	7.1	7.3
一次処理水 (4μg/L)	1	98.1	97.2	90.8
	2	97.3	97.9	95.3
	3	99.3	102	102
	4	98.6	100	95.3
	5	98.9	100	102
	平均	98.4	99.4	97.1
	CV(%)	0.8	1.9	5.0

注：(　)内の数値は、標準物質添加濃度

2. 3　環境水中での化学物質の挙動モデルの検討

化学物質のリスクを評価し、将来的にはリスク削減策を立てるのためには、変化、生成、分解、蓄積、移動といった環境中での当該物質の挙動を把握する必要がある。

内分泌攪乱化学物質のなかでも、NP 類は非イオン界面活性剤として NPEO が排出された後、環境水中で図－１に示すような分解経路を経て大きな内分泌攪乱作用を持つ NP が生成するといわれている。また、河川や下水処理場で NP 類が生物学的あるいは、物理化学反応等により変化していく過程で、水との親和性や揮発性といった物性が変化するため、水と大気との間の揮散や吸収、懸濁成分との間の吸着や脱着、吸着した懸濁成分の物理的な沈降、巻上げ等による移動が起こると考えられる。



図－１　NP 類の分解経路

こうした化学物質の水環境中での複雑な挙動を把握するための解析手法として、河川（湖沼を含む）を想定した挙動モデルの作成に着手した。モデルにおける仮定条件を以下に示す。

１）エレメント内は完全混合状態である。
２）流量は一定であり、水の蒸発、降雨、及び地下水流入・流出は無視できる。
３）対象物質は水に溶解している、又は固形成分に吸着しているのいずれかの状態にある。
４）大気と水の間の揮散及び吸収は、ヘンリーの法則に従う。

5）反応には様々な経路があり、反応毎に対象物質や前駆物質が異なる。一つの対象生成物質に複数の前駆物質が存在する場合がある。

6）反応機構としては生化学反応、加水分解、光分解があり、対象物質に対してはいずれも一次反応とする。

7）生化学反応速度は好気反応の速度とする。

8）対象物質の吸着平衡量は懸濁成分の有機炭素量に比例する。対象物質の濃度は十分に低く吸着量は濃度に比例し、また、平衡は瞬間的に達成される（吸着速度は無限に速い）。

9）懸濁成分の沈降速度は流速に依存し、定常状態においては一定である。

１０）底泥表層からの懸濁成分の巻上げ速度は流速に依存し、定常状態では一定であり、かつ沈降速度より小さい。

１１）底泥中の間隙水の流量は、水柱の流れと比較して無視できる。

１２）底泥間隙水と水柱間の物質移動は、拡散によって行われる。

１３）底泥間隙水と底泥固形成分の間には、吸着平衡がある。

１４）生物への蓄積は植物プランクトン、動物プランクトン、魚類などのバイオマスに比例する。植物プランクトン以外のバイオマスには、懸濁成分に吸着された対象物質も蓄積する。

１５）対象物質のバイオマス内での分解は、無視できる。

１６）対象物質の底泥表層部から底泥深層部の物質溶出に寄与しない部分（固定層と呼ぶ）への移動は、間隙水中の拡散によって行われ、その速度は一定である（但し、温度に比例する）。

これらの仮定に基き、実際に河川環境中で起こると考えられる化学物質の反応及び移動のモデルプロセスを整理すると、以下のようになる。

1）流入及び流出

$$In = \frac{F}{V} C^{i}_{\inf} = \frac{C^{i}_{\inf}}{HRT} \qquad Out = \frac{F}{V} C^{i}_{eff} = \frac{C^{i}_{eff}}{HRT}$$

C:濃度，i:対象物質，F:流量，HRT:滞留時間，V:水容積

2）大気への揮散、大気からの吸収

$$AtmExch = \frac{k_L A}{V}(C^{i}_{SAT} - C^{i}) = \frac{k_L}{h}(C^{i}_{SAT} - C^{i})$$

k_L:物質移動係数，A:水表面積，C_{SAT}:飽和濃度，h:水深

3）分解反応

$$Allreact = k_{BF} C^{j} - k_R C^{i}$$

k_{BF}:総括一次反応係数，C^{j}:i の前駆物質濃度

4）吸着平衡

$$C^{i}_{T} = (1 + k_{ad} C_{SS}) C^{i}$$

k_{ad}:吸着平衡係数，C_{SS}:懸濁成分濃度

5）懸濁成分の沈降

$$Ads = \frac{v_{sed}}{h} K_{ad} C_{SS} C^{i}$$

v_{sed}:懸濁成分の沈降速度

6）底泥の巻上げ

$$Rsus = \frac{v_{res}}{h} K_{ad} C_{S-Sed} C^{i}_{PW}$$

v_{res}:巻上げ速度，$C_{S\text{-}Sed}$:底泥中固形物濃度

7）底泥からの溶出（拡散）

$$Dissol = \frac{k_{exch}}{h^{*}}(C^{i}_{PW} - C^{i})$$

k_{exch}:物質移動係数，h^{*}:水柱と底泥表面の距離，

C_{PW}:間隙水中の物質濃度

8）底泥内での拡散

$$Sink = \frac{k_{fix}}{h^{S}}(C^{i}_{PW} - 0) = \frac{k_{fix}}{h^{S}} C^{i}_{PW}$$

k_{fix}:底泥表層から固定層への物質移動係数，

h^{S}:表層と固定層中心の距離

9）植物プランクトンへの蓄積

$$RAl = \frac{dC_{Al}}{dt} BCF_{Al} C^{i}$$

BCF_{Al}:植物プランクトンへの濃縮係数

１０）非脊椎動物への蓄積

$$RInv = \frac{dC_{Inv}}{dt} BCF_{Inv} C^{i}$$

BCF_{Inv}: 非脊椎動物への濃縮係数

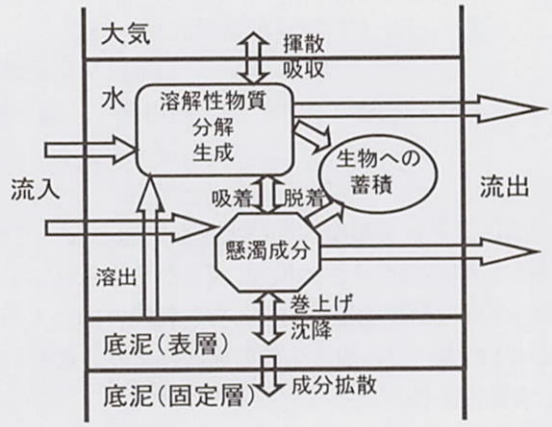
１１）魚類への蓄積

$$RInv = \frac{dC_{Inv}}{dt} BCF_{Inv} C^{i}$$

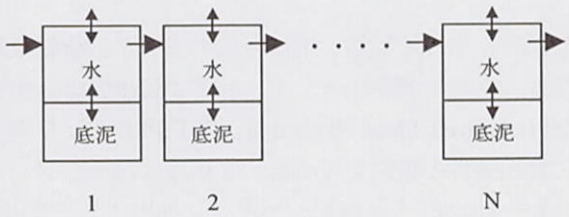
BCF_{Inv}: 非脊椎動物への濃縮係数

各ユニットプロセスを組み込んだ挙動モデルの構造が図－２である。この構造を完全混合の1単位のエレメント（槽）と規定、現実の河川に適用する場合にはエレメントの数を複数（N）個に設定し、図－３

に示すような槽列モデルとして計算することによって、河川の特定部分の押し出し流れをシミュレートすることが可能である。

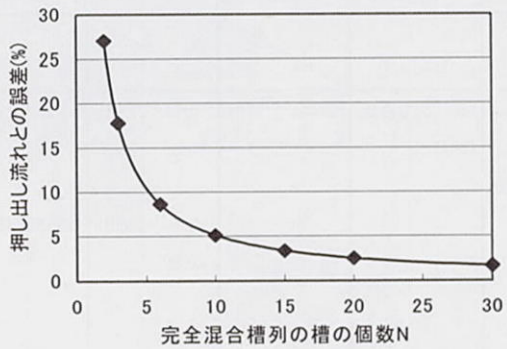


図－２　モデルのエレメントの構造



図－３ 槽列モデルのイメージ

対象物質の濃度分布を、流れ方向の拡散の無い押し出し流れと槽列モデル比較した場合の誤差は、河川の有効拡散係数を 100m²/s、対象河川区間長 20km 以上、流速を 1m/s と仮定した場合で、槽列数 N を 10 とすることで 5%程度（図－４）となった。この結果より、槽列モデルで適切な槽数を設定することよって、河川区間のシミュレートが可能となるという結論に達した。



図－４　槽列の数と押し出し流れとの誤差

4. まとめ

本研究では、内分泌攪乱物質の測定法及び水環境中での挙動をシミュレートするためのモデルについて検討を行い、以下の結果を得ることができた。

1) 簡易化した新しい前処理法により、従来と同等の精度でのエストロゲン測定が可能であることを確認した。

2) メチル化し GC/MS を用いる手法によって、定量下限値 0.03μg/L での NPEC 類の分析が可能なことを確認した。

3) 内分泌攪乱物質を含む化学物質の、水環境中での挙動モデルについて、反応・移動の各プロセス及び完全混合槽列構造による河川のシミュレート法を整理した。

今後は、分析手法に関してはさらなる簡易化、高精度化を図り、モデルに関しては槽列構造での計算を行うための電算化を行っていくことが当面の課題である。また、モデルの各プロセスの反応係数や実際の河川における化学物質の濃度等の情報に関しては、文献調査では不詳な部分も多いため、室内試験による分解速度定数に関する調査や、河川・湖沼等で底泥も対象とした化学物質の実態調査によってデータを蓄積することで、より正確なシミュレートが可能となることが期待出来る。将来的には、内分泌攪乱物質による環境リスクの予測や評価に用いることが可能とするために、モデルの精度を向上し演算結果と実環境の状況との乖離を減らしていくことが課題となる。

参考文献

1) E. Routledge, J. Sumpter:「Estrogenic Activity of Surfactants and Some of Their Degradation Products Assessed Using a Recombinant Yeast Screen」、Environ. Toxicol. Chem. 15-3、p241-248、1996

2) 磯部友彦，高田秀重：「環境試料中のノニルフェノールエトキシカルボン酸（NPEC）の分析」、第 9 回環境化学討論会、p48-49、2000.6

3) 小森行也，田中宏明，竹歳健治：「活性汚泥処理プロセスにおける NP、NPEO の挙動」、第 37 回下水道研究発表会講演集、p713-715、2000.7

4) 小森行也，高橋明宏，矢古宇靖子，田中宏明：「LC/MS/MS による下水試料中のエストロゲンの測定」、第 9 回世界湖沼会議発表文集 Session3-1、p225-228、2001.11

1.2　ダイオキシン類の存在形態とモニタリング・分析手法に関する研究（１）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 12～平 14
担当チーム：材料地盤研究グループ
（リサイクル）
研究担当者：鈴木　穣、南山瑞彦、落　修一

【要旨】
近年、極微量でも高い毒性を持つとされているダイオキシン類による汚染が全国的に大きな問題となっており、建設事業に対応した、迅速に結果が得られる底質中のダイオキシン類の分析手法の検討、開発が求められている。13 年度は、前年度に引き続き、底質試料中のダイオキシン類の分析の迅速化を目的として、乾燥、抽出工程の迅速化に関する比較検討を行った。その結果、高速溶媒抽出法（PFE 法）での抽出条件の検討により、比較的短時間の操作で、多くの異性体で公定法より高めの分析結果を示す抽出条件があることが示唆された。
キーワード：ダイオキシン類、底質、分析、抽出、迅速化

1. はじめに

底質中のダイオキシン類の濃度は位置により大きく変化する可能性があるため、万一その汚染が発見された場合に効率的な対策を行うには、簡易かつ低コストで迅速に概略のダイオキシン類の分布状況を推定し、施工管理や対策評価をより適切に行う必要がある。一方、底質中のダイオキシン類測定に係る公定法[1)]は試料採取から分析結果の解析までに長時間を必要としており、施工管理等の建設事業に対応したより簡易で迅速に結果が得られる分析手法の検討、開発が必要である。

本研究は、底質中に含まれる可能性のあるダイオキシン類の分析にあたり、建設事業に対応するため、より迅速に結果が得られる分析手法の検討、開発を目的としている。底質試料を対象とした公定法では、乾燥工程、抽出工程、クリーンアップ工程に長時間を要する手法が採用されている。これは、底質試料は含水率が高く、有機質が多く含まれる場合が多いことが一因であろうと推察される。本研究では、これらの工程の内、乾燥及び抽出工程の迅速化に関する比較検討を行った。

2. 研究方法

河川の底質試料を採取し、同じ試料を用いて乾燥、抽出手法の違いが分析結果に及ぼす影響を検討した。13 年度は高速溶媒抽出法（Pressurized Fluid Extraction、以下 PFE 法）を用いて抽出条件の検討を行った。12 年度に行ったソックスレー抽出法[1)]と湿泥－ヘキサン抽出法[1)]を含め、検討した抽出手法の主な操作を比較し表－１に示す。ソックスレー抽出法は一般的に用いられている方法であり、湿泥－ヘキサン抽出法はソックスレー抽出法より所要時間が短く、省力化できる可能性のある方法である。PFE 法は、米国環境保護庁で検討されている方法であり、試料と抽出溶媒を高温、高圧条件下で接触させて目的物質を比較的短時間で抽出する方法である[2)]。本研究で設定した PFE 法の抽出操作条件の内、条件Ａはソックスレー抽出法の抽出操

表－１　各抽出法の主な操作と所要時間

	ソックスレー抽出法	湿泥－ヘキサン抽出法	高速溶媒抽出法(Pressurized Fluid Extraction)			
			条件A	条件B	条件C	条件D
乾燥	風乾 （数日～十日）		風乾 （数日～十日）			
抽出	トルエンでソックスレー抽出 （16時間以上）	水酸化カリウムエタノール 溶液を入れ室温放置 （1夜） ＋ ヘキサンで振とう抽出 （10分3回）	トルエンで抽出 （20分2回）	トルエンで抽出 （20分2回）	アセトンで抽出 （20分） ＋ トルエンで抽出 （20分）	20％アセトン含有トルエンで抽出 （20分2回）

作条件を参考として決定した。その他の条件は、乾燥工程を省略することで条件A以上の迅速化を図るために設定した。条件C、Dはアセトンによる脱水を期待して設定した。なお、試料の採取及び抽出工程より後の分析工程は公定法に従って行った。分析対象物質はポリ塩化ジベンゾ-パラ-ジオキシン（PCDDs）、ポリ塩化ジベンゾフラン（PCDFs）、コプラナＰＣＢ（Co-PCBs）とした。

3. 研究結果

PFE 法の各抽出条件で得られた分析結果とソックスレー抽出法での分析結果の比を各異性体毎に図－１に示す。PFE 法の条件 A、条件 C での分析結果は、ほとんどの異性体でソックスレー抽出法での分析結果より高い値を示していた。一方、PFE 法の条件 B、条件 D での分析結果は、ほとんどの異性体でソックスレー抽出法、湿泥－ヘキサン抽出法での分析結果より低い値を示した。

条件Ａは、公定法であるソックスレー抽出法を PFE 法に置きかえたものであることから、高温での有機溶媒（トルエン）と試料との接触により、抽出が促進されたものと思われる。条件 B は条件Ａから風乾を除いた操作条件であり、試料中の水分が残留していることから、有機溶媒が試料に接触できず、抽出が十分行われなかったものと考えられる。一方条件 C では、風乾による乾燥のかわりにアセトンによる脱水を行うことで、有機溶媒との接触が効率よく行われたものと考えられる。条件Ｄは、操作の単純化のため、脱水用のアセトンと抽出用のトルエンを混合したものであるが、十分な脱水、抽出効率の向上には至らなかった。

PFE 法は抽出時間が比較的短かい抽出方法である。特に、抽出操作条件Ｃでは乾燥工程を要さないため乾燥・抽出時間が短かくなるのみならず、ほとんどの異性体の分析結果がソックスレー抽出法での分析結果より高い値を示し、いわゆる安全側の分析結果を得ることができる可能性が高いことが明らかとなった。これらのことから、条件ＣでのPFE法による底質試料からのダイオキシン類抽出は、建設事業に対応した底質中のダイオキシン類の迅速、簡易な分析を行ううえで、有望な手法の一つであると考えられる。

4. まとめ

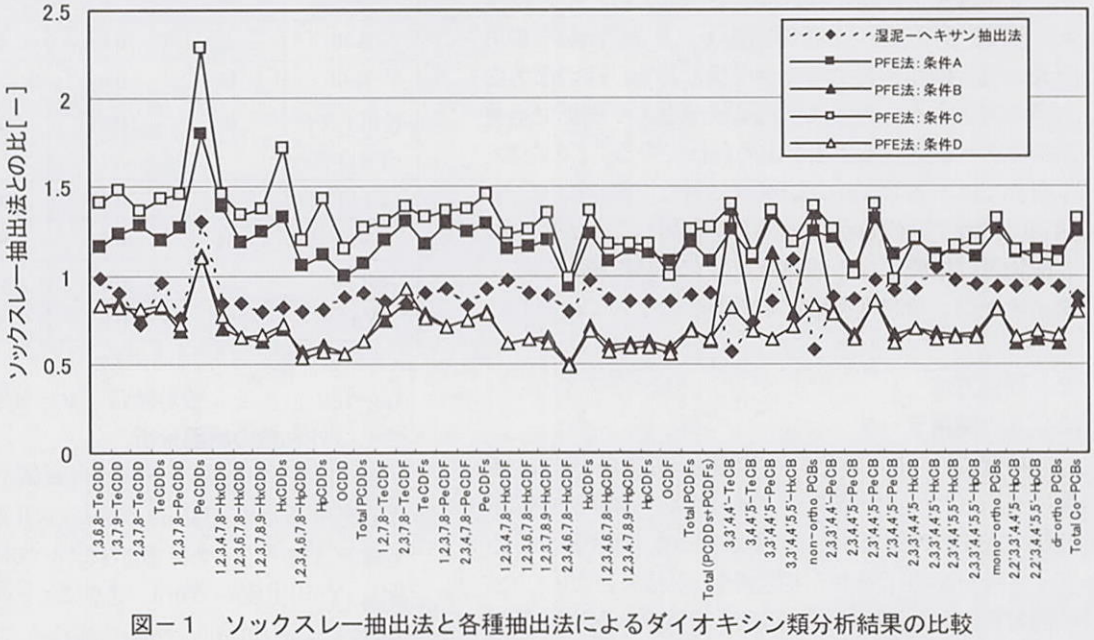
本研究では、底質試料中のダイオキシン類の分析の迅速化を目的として、乾燥、抽出工程の迅速化に関する比較検討を行った。その結果、高速溶媒抽出法（PFE 法）での抽出条件の検討により、比較的短時間の操作で、多くの異性体で公定法より高めの分析結果を示す抽出条件があることが示唆された。

今後、より迅速な乾燥、抽出手法の検討、性状の異なる底質試料を用いた乾燥、抽出条件の検討を進めるとともに、迅速な乾燥、抽出手法により得られる抽出物を簡易な検出手法に適用するための検討を進める必要がある。

参考文献

1）環境庁水質保全局水質管理課： ダイオキシン類に係る底質調査測定マニュアル, 2000.

2）U.S.EPA： Pressurized Fluid Extraction, Test Methods for Evaluating Solid Waste Physical/Chemical Methods, Method 3545A, 2000.



図－１　ソックスレー抽出法と各種抽出法によるダイオキシン類分析結果の比較

1.3　ダイオキシン類の存在形態とモニタリング･分析手法に関する研究（２）

研究予算：運営交付金（一般勘定）
研究期間：平13～平14
担当チーム：水循環研究グループ（河川生態）
研究担当者：尾澤卓思　伊藤弘之

【要旨】
ダイオキシン類は、燃焼過程等で非意図的に生成される化合物であり、その毒性は発がん性や催奇形性等多岐にわたっている。我が国では「ダイオキシン類対策特別措置法」が施行され、ダイオキシン類汚染に対して適切な対応をとることが必要となった。このため、河川管理においても河川水、底質のダイオキシン類の対策実施を判断するための存在形態の解明と、対策実施時の簡便な分析手法およびモニタリング手法の開発が必要となっている。本研究では強熱減量等を代替指標として底質のダイオキシン類汚染状況をモニタリングする手法について検討し、同一の汚染源の影響を受けているエリアを選定すれば、代替指標とダイオキシン類濃度の間に比較的高い相関が成立することを確認した。
キーワード：ダイオキシン類、底質、強熱減量、モニタリング

１．はじめに

ダイオキシン類は、廃棄物焼却等の燃焼過程等で非意図的に生成される有機塩素系化合物であり、その毒性は発がん性や催奇形性等多岐にわたっており、焼却場周辺の土壌汚染等について人々が高い関心を示している。我が国では平成12年1月15日に「ダイオキシン類対策特別措置法」が施行されており、水質、土壌等についてダイオキシン類の基準値が定められ、この基準値を超えた箇所においては、適切な対策をとることが必要とされている。今後、河川･湖沼の底質についても基準値が定められると見られており、基準値を超過した汚染箇所においては河川管理者として適切な対応をすることが求められる。適切な対応を講じるためには、まず汚染状況を十分把握することが必要であるが、ダイオキシン類の分析は公定法によると、1検体あたり20万円以上、分析期間約1ヶ月と、高額な費用と長い分析期間を要するのが現状であり、適切な汚染対策を実施するためには、汚染状況をより安価で迅速にモニタリングする手法が求められている。このため、本研究ではダイオキシン類が水に対して難溶性で、有機物に付着する性質が強いことを利用して、底質中の有機物量の指標となる強熱減量等を代替指標として、ダイオキシン類濃度を推定する手法について検討した。

２．研究方法

２．１　使用データ

本研究では、土木研究所河川環境研究室が平成11年度に実施したＡ川水系でのダイオキシン類調査の結果及び平成12年度に国土交通省が行った「河川におけるダイオキシン類に関する実態調査」の結果を使用した。検討対象とした河川は、Ａ川水系のＡ川、Ｎ川、Ｙ川及びＴ川、YD川であり、ここではＡ川水系のN川及びY川の調査地点のみを図－１に示した。

２．２　相関分析

対象区域を設定し、そのエリア内のデータで強熱減量とダイオキシン類濃度の相関分析を行った。結果は表－１の通りである。いずれの区域においても、強熱減量とダイオキシン類濃度の相関関係は99%以上の信頼性で成立しており、同一の汚染源により汚染されたと見られる区域においては、経験的に「良好な相関関係が成立し得る」ことが考えられる。

ただし、相関関係から大きくはずれるデータ（外れ値）も存在しており、局所的な高濃度汚染箇所等については、さらなる検討が必要である。

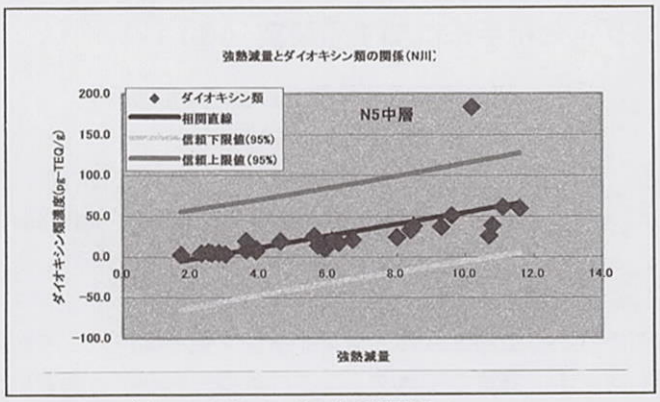
表－１　強熱減量とダイオキシン類濃度の相関

対象区域	N	r	a	b
Ａ川	48	0.84	4.76	−14.88
Ｎ川	27	0.64	7.17	−17.30
Ｎ川下流＋Ｙ川下流	27	0.87	9.20	−25.33
Ｙ川下流	15	0.93	10.02	−23.08
Ｙ川上流	31	0.63	9.11	−14.29
Ｔ川	23	0.77	1.42	0.56
Yd川	25	0.93	3.51	−2.0

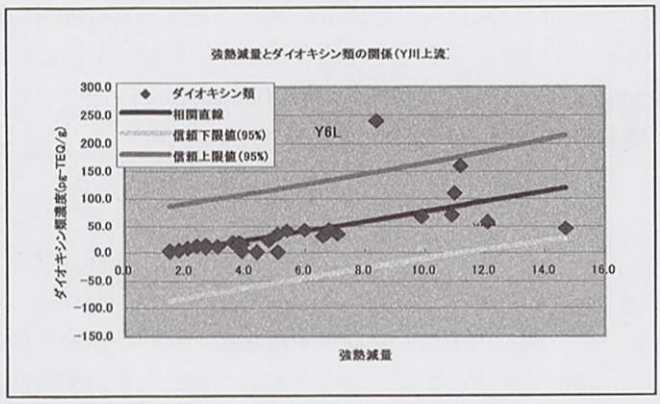
Ｎ：データ数、ｒ：相関係数、ｙ：ダイオキシン類濃度（pg-TEQ/g）、ｘ：強熱減量、ｙ＝ａｘ＋ｂ

２．３外れ値の原因分析

Ｎ川、Ｙ川上流等で大きな外れ値（95%推定区間外）が存在するため（図－2参照）、N川及びY川上流についてダイオキシン類の組成について調べた（表－２参照）。Ｙ川上流のYu6L地点については、コプラナ系PCBによる局所的な汚染が外れ値の原因となってい



図－2(1)　N川における相関関係



図－2(2)　Y川上流における相関関係

表－2　外れ値の特性

対象区域	外れ値	ダイオキシン類の組成
N川	N5 中層	COP-PCB が周辺に比べて多い傾向がある。
Y川上流	Yu6L	COP-PCB が周辺に比べて特に多い。

ることが示唆されたが、その他の地点については原因を明確にすることはできなかった。高濃度汚染箇所が局所的に存在する場合、その局所地域内で数点の調査を行わない限り、その局所地域内での相関関係を知ることは困難である。

3．研究結果

本モニタリング手法については、現時点で以下のように考えられる。

1）同じ汚染源の影響を受けたと見られる区域を限定できれば、強熱減量等指標とダイオキシン類濃度の相関は経験的に成立しており、汚染濃度の平均的分布傾向は把握できそうである。

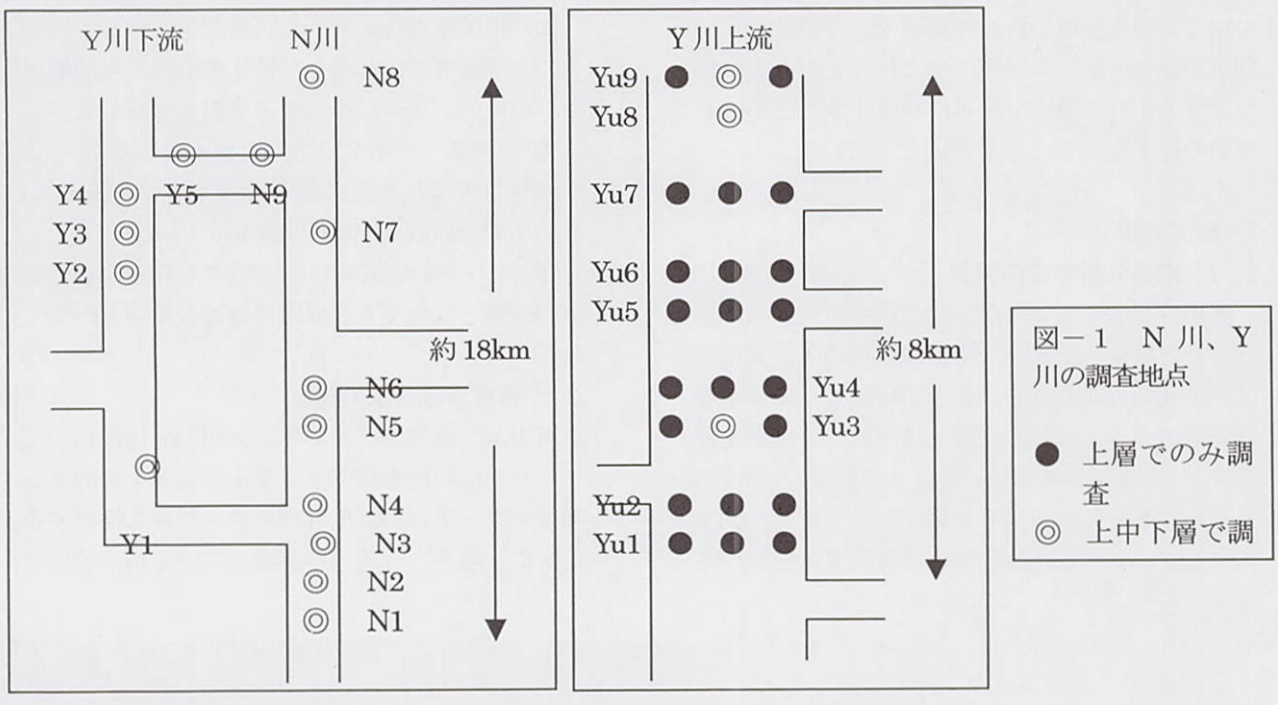
2）ただし、局地的な高濃度汚染の推定は困難であり、本推定法の結果と他の簡易分析法等の結果を同様の精度のものとして扱うことはできない。

4．まとめ

本モニタリング手法の精度は必ずしも高くないものの、同一汚染源の影響を受けたと見られるエリアごとには、平均的な汚染傾向を把握することは可能と考えられ、調査費用が安価、短期間で結果が出るというメリットを考えれば、詳細調査における調査地点の選定のための補助調査、汚染箇所のスクリーニング等における使用が考えられる。今後、実際の対策における適用を念頭に置きながら、さらに検討を進める。

参考文献

1)国土交通省河川局:平成 12 年河川におけるダイオキシン類に関する実態調査等の結果について、2001 年 12 月



図－1　N 川、Y 川の調査地点

● 上層でのみ調査
◎ 上中下層で調

1.4　ダイオキシン類の存在形態とモニタリング・分析手法に関する研究（３）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 12～平 14
担当チーム：水循環研究グループ（水質）
研究担当者：田中宏明、小森行也、岡安祐司

【要旨】
平成１２年１月１５日より「ダイオキシン類対策特別措置法」が施工され、ダイオキシン類汚染に対して適切な対応を取ることが必要となった。河川管理においても河川水・底質のモニタリングは重要であるが、調査試料は膨大でありこれらに対応するため安価でしかも短時間で結果が得られる簡易な分析手法が必要となっている。
水や底質中のダイオキシン類を従来法と比較して簡易で迅速に、試料の前処理から測定まで行う分析技術の開発について民間との共同研究を実施している。また、現在、専門家が実施しているダイオキシン類の分析についての精度管理手法をパターン化、システム化し、比較的簡単に判定できる精度管理手法の検討を行った。
キーワード：ダイオキシン類、底質、モニタリング、簡易分析、精度管理

1. はじめに

河川底質のダイオキシン類汚染対策を実施するために、先ず、どこが最も汚染されていて優先的に対策を講じる必要があるのか見極める必要がある。そのためには、汚染区域を詳細に調査することが重要であるが、既存の分析方法（公定法）では、高価な分析機器が必要であり、分析費用が高額で前処理が煩雑で分析に時間を要する等課題も多い。そのため、公定法と比較して簡易に、迅速に、一般的な実験室、現場にて試料の前処理から測定までできる新たな技術の開発が望まれている。

本研究では、抗原抗体法(ELISA)などを用いた簡易な検出技術の開発を目的としている。また、公定法の精度管理手法は分析同様複雑で、専門家でないと判定が難しいが、本研究ではこれらをパターン化、システム化し、誰でも簡単に判定することができる手法の提案を行うことを目的としている。

2. 研究方法

2. 1　簡易分析手法の開発

河川底質のダイオキシン類対策を実施することを想定した場合、公定法での監視の他に①調査段階では汚染範囲の確認調査、②工事段階では工事境界での底泥の巻き上げ状況把握、上下流への輸送状況の監視、工事区域外の水質、底質への影響、中間処理・処分施設等の監視を行う必要がある。また、③工事終了後においては汚染現場の改善効果の把握、底質処分場の環境影響を監視する目的でモニタリングを実施する必要がある。

これらのモニタリングでは多数の試料の測定、連続的モニタリングが対象となることから、分析時間が短い、あるいは低コストである方法について検討を行うことが必要である。また、簡易分析法であっても分析信頼性の確認は重要であり、その分析方法の特徴を十分把握した上で目的にあった利用が望まれる。表－１に簡易モニタリング技術の検討において優先すべき事項を示す。

本研究では、平成 12 年度より簡易分析法の中で ELISA キットの開発を中心に研究をすすめており、積水化学工業（株）・（株）矢内原研究所・大塚製薬（株）・東洋建設(株)との共同研究を実施している。この共同研究では、新たな抗体の取得から前処理技術、現地対応技術についての検討を実施している。

また、（株）クボタ、第一ファインケミカル（株）との共同研究も平成 13 年度より新たに実施している。この共同研究では環境試料に応用例のある ELISA キットを底質試料に応用するための前処理方法の改善と検出できる異性体特性の整理を行っている。

2. 2　精度管理手法の検討

河川水、底質のダイオキシン類の分析において、データの信頼性を確保する手法の確立を目的とし、既存マニュアルの精度管理手法を整理し検討するとともに、現在、専門家が実施している精度管理手法

表－1　河川底泥のダイオキシン類対策にあたって必要となる調査・工事段階における簡易モニタリング技術の要件

	調査段階		工事段階				工事終了後	
	汚染範囲確認調査	工事の影響範囲調査	工事境界における底泥の巻き上げ、上下流への輸送の監視	工事区域外の水質、底質への影響の監視	中間処理・処理施設での固液分離液、仮置きヤードのモニタリング	底質処分場からの漏出の有無の監視	汚染現場の改善効果の把握	底質処分場の環境影響の監視
分析時間短縮	○	○	○	◎	○	◎		◎
連続モニタリング			◎		◎			
低コスト化	◎	◎		○			◎	
分析信頼性	○	○		○	○	○	○	○

注：簡易モニタリングの検討において考慮すべき事項
◎：最も優先すべき事項　○：優先すべき事項

をパターン化、システム化し、比較的簡単に判定できる手法を提案する。

3. 研究結果

3. 1　簡易分析手法の開発

1）本研究では19匹の家兎に免疫して新たな抗体を作成[1]し、この抗体を用いたELISAキットの作成と標準物質を用いた測定特性の把握を行った。本法の繰り返し試験の精度（CV値）は室内精度8.4%、室間精度11.3%、検出下限値は100pg/mlであった。また、2,3,7-T3CDD、2,3,7,8-T4CDD、2,3,7,8-T4CDFの交差反応性は100%、2,3-D2CDD、2,7-D2CDD、1,2,3,7,8-P5CDD、1,2,3,4,7,8-H6CDD、1,2,3,4,6,7,8-H7CDD、O8CDDの交差反応性はそれぞれ、46%、1.7%、11%、0.3%、0.2%、0.1%以下であった。本法では毒性の少ない2,3,7-T3CDDを標準物質として用いる方法を提案している。

今後は、抽出、濃縮、クリーンナップの手法と組み合わせることにより、環境試料中のダイオキシン類の多量検体を簡便にかつ迅速に測定できるかどうかを、実試料を用いて行う。

2）土壌試料等の環境試料に応用例のあるAhリセプターバインディングアッセイ及びELISAによる簡易分析をダイオキシン類の異性体構成と存在量が分かっている河川底質試料の測定に用い、ダイオキシン類の異性体構成と測定値の関係を調査している。今後は、公定法との相関が得られる試料前処理手法の改良・検討を行う。

3. 2　精度管理手法の検討

河川水、河川底質試料が対象であるが、現在公表されている各種マニュアル（13種類）も参考となることから、これらのマニュアルの精度管理手法について整理した。

4. まとめ

本研究では、ELISAによる簡易分析法と精度管理手法について以下の結果を得た。

1）河川底質ダイオキシン類対策にあたって必要となる簡易モニタリング技術の要件を整理した。

2）新たに作成した抗体を用いたELISAは、抽出、濃縮、クリーンアップの手法と組み合わせることにより、環境試料中のダイオキシン類の多量検体を簡便にかつ迅速に測定出来る可能性がある。

3）商品化されているAhリセプターバインディングアッセイ及びELISAによる簡易分析をダイオキシン類の異性体構成が分かっている河川底質試料の測定に用い、ダイオキシン類の異性体構成と測定値の関係を調査している。

4）13種類の既存マニュアルの精度管理手法について整理した。

今後は、各種のダイオキシン類簡易分析法の利用可能性を時間、コスト、分析信頼性等の視点から公定法と比較検討するとともに精度管理手法のパターン化、システム化を行っていく予定である。

参考文献

1）小平司、加藤郁夫、愈新民、矢内原昇、伊佐野隆、大石和之、川辺俊樹、田中宏明、小森行也、岡安祐司：「非意図的生成物質（ダイオキシン類）の簡易測定法の開発」、第38回環境工学フォーラム講演集、pp.136-138、2001.11

1.5　下水道における微量化学物質の評価に関する調査

研究予算：受託経費（下水道事業調査費）
研究期間：平 13～平 17
担当チーム：水循環研究グループ（水質）
研究担当者：田中宏明、小森行也、岡安祐司

【要旨】
現在、下水中には、人や生物に対して、内分泌かく乱作用や毒性作用を示す微量化学物質が含まれている可能性が指摘されているが、これら微量化学物質が原因物質と疑われる下水処理への影響もいくつか報告されている。我が国の下水処理は生物処理が主体であり、有害性のある微量化学物質の影響評価は重要な課題である。本調査は、下水道に流入する可能性のある微量化学物質の評価手法の開発を目的とし、①微量化学物質の検出方法の簡易化、迅速化、②微量化学物質の下水道での挙動把握と下水処理への影響把握、③下水道での微量化学物質の評価技術の開発を行う。本調査は、H11 年 7 月に公布された PRTR 法で対象となる物質を中心に、種々の化学物質を対象とする。
キーワード：内分泌攪乱物質、ELISA 法、毒物センサ、PRTR、挙動推定モデル

1. はじめに

下水道施設へ流入する有害な化学物質は、下水道法に基づき水質汚濁防止法で規制されている一部を除いて大部分が未規制であり、下水道に流入する可能性があるが、下水処理施設での挙動・運命についての知見は不十分な状況である。これらの化学物質の中には、微量でも、人や生物に対して、内分泌かく乱作用や毒性作用を示す化学物質が含まれている可能性が指摘されている。

現状では、下水中の内分泌かく乱作用を示す化学物質のうち一部は、機器分析に基づく手法により測定されるが、高価な機器、熟練した技術等が必要であり、幅広く下水中での挙動を把握できる状況ではない。そのため、簡易に、迅速に測定できる手法の開発が求められている。

毒性作用を示す物質については、実際に、これら微量化学物質が原因物質と疑われる下水処理への影響もいくつか報告されている。我が国の下水処理は生物処理が主体であり、有害性のある微量化学物質の影響評価は重要な課題である。しかし、発生源の把握、迅速な対処がなされた例は極めて少ない。この理由は、生物処理に対して阻害影響を与える多種多様の化学物質を総括的に、かつ連続的に監視する技術が確立されていないことにある。

一方、規制されている化学物質に目を転じてみると、1999 年 7 月に公布された特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律（PRTR 法）は、下水道事業もその対象となり、下水道管理者は下水処理場からの環境媒体への規制項目の化学物質の排出量、移動量について登録、公表することが必要となる。しかし、規制項目の化学物質の移動・排出量のすべてを実測により求めていくことは困難であり、限られた測定データから年間の推定量を算定することも困難となることが予想されるので、測定とともに、数値シミュレーションなどの新たな効果的な運命予測手法を開発することも有効であると考えられる。

さらに、より積極的に化学物質対策に下水道が取り組む場合には、下水処理場における運転条件が化学物質の環境媒体への移行先に及ぼす影響を予測、評価することも必要となるであろう。

本研究では、以上のような背景を受け、以下の課題を目的とする。

- 下水道における内分泌かく乱物質の迅速測定法を確立し、監視を行う。
- 硝化細菌バイオセンサを毒物モニタレベルに開発・発展させ、下水の迅速な毒性監視を行う。
- 下水道に流入している微量化学物質（PRTR 法の対象物質を含む）の挙動・影響把握とその評価技術をまとめ、下水道における微量化学物質の対策に資する。

2.　研究方法

2．1．下水道における内分泌かく乱物質の迅速測定法の開発

本研究では、下水中の17βエストラジオールを簡易に定量する手法の開発を検討した。迅速測定手法としては定量性に優れるGC－MSやLC－MS/MSの機器分析による測定手法に比較して、簡易に測定可能なEnzyme-Linked Immunosorbent Assay（ELISA）法を選択した。17βエストラジオールに特異的に反応するモノクローナルまたはポリクローナル抗体をマイクロプレートに固定化したELISAキットについては既に複数の民間企業から市販がなされている。しかし、それぞれのキットにおける、抗体と下水中の類似物質との交差反応性、下水中の他の物質による抗体・酵素など活性の妨害の程度については、完全には把握されていない。一般的には、ELISA法による測定結果は、交差反応・妨害等に由来すると考えられる理由により、GC－MSやLC－MS/MSの機器分析による測定手法に比較して過大になることが指摘されている[3]。

本研究では、比較的簡易に、下水試料中の17βエストラジオールを濃縮し、かつ交差反応・妨害等を示す物質を分離できる抽出手法を発見することを目的とした。具体的には、実下水処理場における下水試料を用いて、機器分析手法での測定結果と、武田薬品工業製のELISAキット、Assay Design社製のELISAキット（建設省が実施した「水環境における内分泌撹乱物質に関する実態調査、下水道における内分泌撹乱化学物質(環境ホルモン)に関する調査で使用された」について、設定した各抽出手法によるELISA法の結果の比較を実施した[5) 8)]。

また、同様にエストロンを定量するELISA法の開発にも着手した[11)]。

なお、本研究は、平成11～13年度の期間で、武田薬品工業株式会社、日本ガイシ株式会社との共同研究「水中の微量化学物質の新しい検出技術（その２）の開発」で実施されたものである。

２．２．硝化細菌バイオセンサの開発

これまで、土木研究所および富士電機株式会社が共同で開発した、アンモニア酸化細菌を固定化したバイオセンサの下水道施設への適用性を検討してきた。本装置の下水道施設への適用に関する課題は、

- 濁質を大量に含む下水を連続的に採取・濾過・バイオセンサへ送液する除濁装置の運転が安定して行うことができない。
- 特定のアンモニア酸化細菌に対して阻害を与える化学物質以外を検出することができない。

前者については、随時、除濁装置の改良を実施した[2) 4)]。後者については、固定化する細菌の種類を多様化することで、アンモニア酸化細菌に対しては阻害を及ぼさない化学物質を新たに検出することを試みた。13年度は、亜硝酸酸化細菌を固定化したバイオセンサを開発した[10)]。具体的には、亜硝酸酸化細菌は、*Nitrobactor winogra* IFO14297を用い、バイオセンサの設計諸元（微生物膜製膜、保存条件、センサ試薬組成）を決定した。5種類の有害物質（シアン化カリウム、アセトン、水銀、アジ化ナトリウム）の標準溶液を用いて、用量と呼吸阻害の関係を整理した。

なお、本研究は、平成13年度～15年度の期間で、富士電機株式会社との共同研究「下水道から排出される化学物質の削減手法および下水道へ流入する化学物質の下水処理への影響の判定手法（その１）の開発」で実施されたものである。

２．３．　下水道に流入している微量化学物質（PRTR対象物質を含む）の挙動把握

土木研究所で開発した数値シミュレーションモデル[1)]を用いて、PRTR第一種指定化学物質のうち、揮発性有機化合物33物質について、全国の平均的な下水処理場の運転条件（標準活性汚泥処理法を採用している下水処理場の平均的な運転条件）を設定し、生分解性を考慮しない場合の活性汚泥処理における挙動・運命の予測を行い、排出係数（流入量に対する各環境媒体への移行割合）を算出した。また、異なる運転条件を設定した場合の移行性の違いについても推定、検討した[6) 9)]。

また、上記の検討では生分解性については考慮していない。土木研究所で開発した数値シミュレーションモデルで生分解性を検討する際には、クーロメータを用いて、生分解性パラメータを取得する必要がある。ここでは、クーロメータを用いた生分解試験を実施するに際して、より正確に生分解性を評価するために留意すべき点について検討した。

２．４．下水道に流入している微量化学物質（PRTR法の対象物質を含む）の影響把握

土木研究所が茨城県霞ヶ浦流域下水道湖北処理場内のパイロットプラント内に所有する、実下水処理工程を模した活性汚泥処理実験プラントに、化学物質の流入事故を想定した化学物質の添加を行い、その用量と、下水処理システムに発生する生物処理阻

害の影響の関係を調査した。13 年度は添加する化学物質として、硝化工程へ阻害影響を与えることが報告されているチオ尿素を選定し、検討を行った。

3．研究結果

3．1．下水道における内分泌かく乱物質の迅速測定法の開発[5) 8)]

下水試料中の 17βエストラジオールの抽出方法として、

1）C18 固相抽出＋メタノール溶出

2）C18 固相抽出＋ジクロロメタン溶出

の２つの設定方法を比較した。両手法とも、17βエストラジオールの回収率は確保されていた。結果は、武田薬品工業製の ELISA キット、Assay Design 社製の ELISA キットとも、

[機器分析による測定結果]＜[C18 固相抽出＋ジクロロメタン溶出による測定結果]＜[C18 固相抽出＋メタノール溶出による測定結果]

となり、ジクロロメタン溶出の場合の方が、交差反応・妨害を示す他の物質を分離することが可能であると推定された。武田薬品工業製 ELISA キットと Assay Design 社製の ELISA キットを比較すると、武田薬品工業製 ELISA キットの測定結果の方が、機器分析による測定結果に近い傾向がみられた。しかし、依然として、ELISA 法による測定結果は、機器分析のそれを大きく上回っているため、さらに一層のクリーンナップ等を実施する必要があると考えられた。

3．2．　硝化細菌バイオセンサの開発[10)]

亜硝酸酸化細菌を用いたバイオセンサで呼吸阻害を示した５物質のうち、アジ化ナトリウム、６価クロムは、従来のアンモニア酸化細菌を用いたバイオセンサでは検出することができず、両センサを組み合わせることで、広範囲の有害物質を検出可能であることがわかった。

供試物質	亜硝酸酸化細菌 ﾊﾞｲｵｾﾝｻ 阻害影響濃度 EC10 (mg/L)	ｱﾝﾓﾆｱ酸化細菌 ﾊﾞｲｵｾﾝｻ 阻害影響濃度 EC10 (mg/L)
ｼｱﾝ化ｶﾘｳﾑ	0.06	0.02
アセトン	7.9	0.5
水銀	9.8	1.2
ｱｼﾞ化ﾅﾄﾘｳﾑ	0.06	n.d.
6価ｸﾛﾑ	5.0	n.d.

表１　各バイオセンサ呼吸阻害影響試験結果

3．3．下水道に流入している微量化学物質（PRTR法の対象物質を含む）の挙動把握

標準活性汚泥法での挙動の推定

日本全国の下水処理水量の 82%を占める標準活性汚泥法の平均的な運転条件における、これまでに下水道において調査の実績がある 33 の化学物質について、化学物質の流入濃度を 0.1mg/L に設定した。また、活性汚泥処理における生分解などによる無機化や、他の化学物質の分解過程から生じる中間生成物としての新たな生成効果は無視した。この条件の下で、算出結果から排出係数を整理すると表２のようになる[9)]。

表2　代表的なPRTR第一種指定化学物質の平均的な活性汚泥処理における排出係数の算出結果

政令番号	物質名	排出係数		
		大気	二次処理水	汚泥処理系
7	ｱｸﾘﾛﾆﾄﾘﾙ	0.033	0.939	0.028
8	ｱｸﾛﾚｲﾝ	0.030	0.943	0.028
11	ｱｾﾄｱﾙﾃﾞﾋﾄﾞ	0.020	0.953	0.028
16	2-ｱﾐﾉｴﾀﾉｰﾙ	0.000	0.972	0.028
24	直鎖ｱﾙｷﾙﾍﾞﾝｾﾞﾝｽﾙﾎﾝ酸及びその塩	0.000	0.609	0.391
29	ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙA	0.000	0.439	0.562
37	EPN	0.004	0.079	0.918
47	ｴﾁﾚﾝｼﾞｱﾐﾝ四酢酸	0.000	0.983	0.017
61	ε-ｶﾌﾟﾛﾗｸﾀﾑ	0.000	0.987	0.013
63	ｷｼﾚﾝ	0.705	0.249	0.046
77	ｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ（別名塩化ﾋﾞﾆﾙ）	0.782	0.215	0.003
95	ｸﾛﾛﾎﾙﾑ	0.427	0.563	0.010
96	ｸﾛﾛﾒﾀﾝ（別名塩化ﾒﾁﾙ）	0.571	0.424	0.004
116	1,2-ｼﾞｸﾛﾛｴﾀﾝ	0.267	0.724	0.009
118	cis-1,2-ｼﾞｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ	0.447	0.545	0.009
140	1,4-ｼﾞｸﾛﾛﾍﾞﾝｾﾞﾝ	0.662	0.238	0.100
145	ｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ（塩化ﾒﾁﾚﾝ）	0.380	0.613	0.007
157	2,6-ｼﾞﾆﾄﾛﾄﾙｴﾝ	0.001	0.915	0.084
177	ｽﾁﾚﾝ	0.537	0.419	0.045
200	ﾃﾄﾗｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ	0.817	0.120	0.003
205	ﾃﾚﾌﾀﾙ酸	0.000	0.930	0.070
206	ﾃﾚﾌﾀﾙ酸ｼﾞﾒﾁﾙ	0.081	0.850	0.069
209	1,1,1-ﾄﾘｸﾛﾛｴﾀﾝ	0.737	0.252	0.012
211	ﾄﾘｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ	0.653	0.335	0.012
222	ﾌﾞﾛﾓﾎﾙﾑ	0.195	0.759	0.046
227	ﾄﾙｴﾝ	0.617	0.362	0.021
242	ﾉﾆﾙﾌｪﾉｰﾙ	0.100	0.010	0.890
254	ﾋﾄﾞﾛｷﾉﾝ	0.000	0.988	0.012
266	ﾌｪﾉｰﾙ	0.000	0.972	0.028
272	ﾌﾀﾙ酸ﾋﾞｽ（2-ｴﾁﾙﾍｷｼﾙ）	0.001	0.036	0.963
299	ﾍﾞﾝｾﾞﾝ	0.526	0.464	0.010
307	ﾎﾟﾘ（ｵｷｼｴﾁﾚﾝ）ｱﾙｷﾙｴｰﾃﾙ	0.000	0.275	0.725
310	ﾎﾙﾑｱﾙﾃﾞﾋﾄﾞ	0.000	0.989	0.011

標準活性汚泥処理における運転条件パラメータによる感度解析[6) 9)]

PRTR 第一種指定化学物質の物性の整理を行い、さらに、エアレーションタンクの HRT、送気倍率、MLSS 濃度について、全国データの平均値＋標準偏差の場合、および平均値－標準偏差の運転状況について感度解析を実施し、PRTR 第一種指定化学物質の各媒体への排出係数を算出し、算出結果から求めた等排出係数線を示した。送気倍率および HRT を大きく設定することが、大気側への排出を促進し、ま

た、MLSS を高く設定することが汚泥処理系への移行を大きくすることが示唆された。

処理方式による相違についての考察[6)]

標準活性汚泥法、オキシデーションディッチ法、酸素活性汚泥法の平均的な運転条件の設定における、代表的な化学物質の排出係数をシミュレーションにより推定した。曝気時間パラメータが大気への排出量に対して影響することが推定された。同一の化学物質でも、排出係数は、下水処理施設の運転条件により変化することが推察された。

クーロメータを用いた生分解試験結果

クーロメータは、密閉容器内に対象とする化学物質、活性汚泥、無機培地を添加し、生分解試験を行い、生分解によって生じる二酸化炭素を容器内のソーダ石灰に吸収させ、その結果減圧になった分、容器内で電気分解により酸素を供給する実験装置である。

揮発性有機化合物の生分解性試験を実施する際には、生物分解による酸素消費が観察されないにもかかわらず、容器内の揮発性有機化合物の濃度が減少する現象が観測された。この原因は不明であり、今後詳細について検討する必要があると考えられた。いずれにしても、本装置を用いて生分解性パラメータの取得をする際には、最低限、対照系および実験系における、対象とする揮発性有機化合物の濃度の経時変化を追跡する必要があることがわかった。

３．４．下水道に流入する微量化学物質の影響把握

活性汚泥処理実験プラントのエアレーションタンクの入り口にチオ尿素を200mg添加した場合と、400mg添加したした場合の、二次処理水のアンモニア性窒素濃度の変化を示す。硝化工程がチオ尿素に阻害されることにより、アンモニア性窒素が酸化されずに残留することになるが、低用量では、速やかに硝化活性が回復する（可逆的な現象である）のに対して、ある用量を超えた場合は、速やかに硝化活性が回復しない（不可逆的な現象である）ことが観察された。今後、実験結果を集積し、硝化細菌の活性、個体数を考慮したモデル化を検討する予定である。

参考文献

1) 岡安祐司、小森行也、竹歳健治、田中宏明：「ベンチスケール活性汚泥処理実験装置と数理モデルを用いた揮発性物質の挙動」、環境工学研究論文集, 第37巻,pp. 299-310
2) T. Inui, Y. Tanaka. Y. Okayasu, H. Tanaka、「Application of Toxicity Monitor Using Nitrifying Bacteria Biosensor to Sewerage Systems」、Conference Preprints of the 1st IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, Vol. 2 pp.395-402
3) 田中宏明、岡安祐司：「ELISA 法の水環境でのエストロゲン測定への利用」、免疫化学測定法研究会第６回（２００１年）学術集会講演要旨集、pp.25-26、2001.6
4) 乾　貴誌、田中良春、岡安祐司、田中宏明：「硝化細菌を用いた毒物センサの下水道施設への適用試験」、第３８回下水道研究発表会講演要旨集、pp924-926、2001.7
5) 郷田泰弘、廣部将人、小林綾子、藤本　茂、池道彦、藤田正憲、岡安祐司、田中宏明：「女性ホルモン用 ELISA 試料の前処理法検討」、第３８回下水道研究発表会講演要旨集、pp903-905、2001.7.
6) 岡安祐司、小森行也、田中宏明：「数理モデルを用いた PRTR 指定化学物質の活性汚泥処理における挙動の推定」、第３８回下水道研究発表会講演要旨集、pp163-165、2001.7.
7) OKAYASU, Y., Tanaka, H., Komori, K., Taketoshi, K.：「Behavior of Volatile Organic Compounds in Activated Sludge Process Evaluated by Bench Scale Experiment and Mathematical Model」、Proceedings of Asian Waterqual 2001、Vol. I、pp893-898、2001.9.
8) Y. Goda, M. Hirobe, A. Kobayashi, S. Fujimoto, M. Ike, M. Fujita, Y. Okayasu, H. Tanaka：「Development of the ELISA for Detection of Estrogenic Hormones in Environment」、Preprints of the IWA 2nd World Water Congress P0013、2001.10
9) Yuji OKAYASU, Koya KOMORI, Hiroaki TANAKA：「Estimation of behavior of chemical substances in activated sludge process by the PWRI mathematical model」、Conference Proceedings of 9th International Conference on the Conservation and Management of Lakes、3-1、pp. 233-236、2001.11.
10) 乾　貴誌、田中良春、岡安祐司、田中宏明：「下水用マルチバイオセンサの開発－亜硝酸酸化細菌バイオセンサの開発」、第３６回日本水環境学会年会講演集、194、2002.3.
11) 郷田泰弘、藤本　茂、藤田正憲、田中宏明：「エストロン定量用 ELISA の開発」、第３６回日本水環境学会年会講演集、433、2002.3.

1.6　病原性微生物の同定方法および挙動に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）
研究期間：平 11～平 17
担当チーム：材料地盤研究グループ（リサイクル）
研究担当者：鈴木穣、北村友一、中村みやこ

【要旨】
水系病原ウイルスの検出に PCR 法を適用するのに先立ち、比較対照として、現在一般的に用いられている培養法で得られたウイルスデータより、下水処理水再利用におけるウイルス感染の危険性の現状を把握し、さらにその制御手法の選定方法について検討した。また、クリプトスポリジウムのリアルタイム PCR 法による定量検出方法を検討し、ハイブリダイゼーション法を用いることにより特異性の高い検出が可能となることがわかった。その精度は、オーシスト数２０個以上から検出可能であり、１００個以上から定量可能となることがわかった。

キーワード：ウイルス、クリプトスポリジウム、PCR 法、下水処理水再利用、感染リスク

１．はじめに

下水処理水が関与した病原性微生物による集団感染の未然防止、また、下水処理水や汚泥の再利用にあたり、下水処理水や下水汚泥に含まれる病原性微生物に関する安全性確保が求められている。このため、極微量の病原性微生物を、迅速・簡便・安全に検出できる方法の開発や、下水処理過程や環境水中での病原性微生物の挙動の解明が望まれている。

本研究課題では上記の要請を踏まえ、分子生物学的手法（特に PCR (Polymerase Chain Reaction) 法）により、環境水・下水・汚泥中のウイルスおよび原虫を、迅速かつ高感度に検出する手法を提案する。また、下水処理過程や環境中でのウイルスおよび原虫の挙動を解明する。

水系病原ウイルスの検出に PCR 法を適用する場合、試料の適切な濃縮精製方法の開発と、ウイルスの生死判定が大きな課題となる。そこで PCR 法の適用に先立ち、比較対照として、現在一般的に用いられている培養法で得られたウイルスデータから、下水処理水再利用におけるウイルス感染の危険性の現状を把握し、さらにその制御手法の選定方法について検討した。

原虫に関してはクリプトスポリジウムを研究対象としているが、現在、クリプトスポリジウムオーシストの検出は、蛍光抗体染色を施した後、顕微鏡観察により検出されている。しかし、多くの夾雑物を含む環境水や下水試料中のオーシストを検鏡により検出することは困難であり、簡便かつ迅速な試験方法の開発が望まれている。そこで、本年度は、顕微鏡観察を必要としないリアルタイム PCR 法によるクリプトスポリジウムオーシストの定量検出方法を検討した。

２．下水処理水再利用における病原ウイルスの挙動把握および制御手法の検討

２．１　はじめに

下水処理水は、流量が安定しているので都市における代替水資源として重要視されている。平成 11 年度において、下水処理場外で再利用された下水処理水の量は、全下水処理水量の 1.2%である 1.5 億 m^3 となっている。一方、これまで問題にされてこなかった、ウイルスや原虫などの感染事例が多く報告されている。ウイルスに関しては、海外において処理水再利用の水質基準や処理法ガイドラインの設定例が見られるものの、日本ではまだ対策が検討されておらず、早急な対応が求められている。

以上の背景から、水系病原ウイルスに関する安全性確保の方法を検討することを目的として、土木研究所を主体とする「高度処理会議」の中に、平成 6 年に「再生水質検討小委員会」（２．４末尾の補注参照）が設置された。本委員会では、土木研究所の研究実施計画に基づき、全国下水処理場のウイルス実態調査、および下水中ウイルスの除去不活化実験[1)]

を行った。委員会の調査・実験結果を用いて、幅広い再生水の利用状況に対するウイルス感染リスクを定量的に評価するとともに、より合理的にウイルスを制御する方法について検討した。

2．2　下水二次処理水中のウイルス存在状況

平成9、10年度の2年間、8月から3月にかけての3~4回／年、全国10箇所の下水処理場で行われた病原ウイルス（腸管系ウイルス）の実態調査によると、二次処理水中ウイルス濃度累積頻度の標準偏差を横軸xに、ウイルス濃度実測値を縦軸y（対数軸）にとった場合、$y = 0.9901x - 0.2133$ なる直線関係が得られた。このことから二次処理水中のウイルス濃度全体分布は、平均$\mu = -0.2133$（分散$\sigma^2 = 1$）の対数正規分布に従うと推定された（全国の調査結果を一括してデータ解析しているため、地域の特性は考慮していない）。

2．3　ウイルス感染リスクの算定と制御手法の検討

2.3.1　ウイルス制御手法選定の一般手順

下水および下水処理水中のウイルス濃度を直接測定し、常時監視することは、多大の労力や時間を必要とする。このことから、ウイルス濃度ではなく、再生処理法によってウイルスを制御する方法について検討した。即ち、再生水中のウイルス濃度の分布と、人が誤摂取する再生水量から、ウイルスに感染するリスクを求め、これを目標値以下に抑えるための再生処理法を選定する方法を検討した。

図－2.1に、下水二次処理水を再利用する場合の、再生処理法を選定する手順を示す。

まず、対象とする再利用施設の利用状況を想定して、再生水を誤って経口摂取する年間頻度と、1回あたりの摂取水量を設定する。

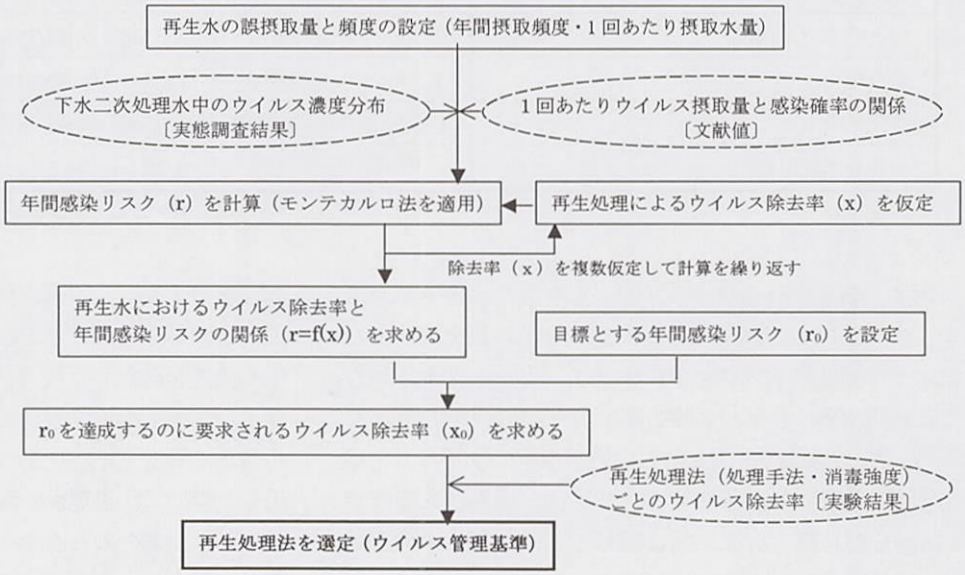
次に、再利用における誤摂取水量・頻度の設定値と、二次処理水中のウイルス濃度（実態調査結果）、および1回あたりウイルス摂取量と感染確率の関係を示す式（文献[2]から引用）から、二次処理水をそのまま再利用した場合の年間感染リスクを計算する。ウイルス濃度が分布を示すので、モンテカルロ法（確率論的問題の処理に乱数を利用する方法）を適用して年間感染リスクの分布を算出し、リスクの上位2.5%値を年間感染リスク（代表値）とする。

さらに、再生処理による二次処理水中のウイルス除去率を複数仮定し（それぞれ新たなウイルス濃度分布となる）、ウイルス除去後の年間感染リスク（代表値）を上記方法に従い各々計算する。これらの計算結果から、ウイルス除去率（x）と年間感染リスク（代表値）（r）の関係（r=f(x)）を求める。

一方で目標とする年間感染リスク（r0）を設定し、これを達成するために要求されるウイルス除去率（x0）を r=f(x)の関係式から求める。そして、別途実験で求められた再生処理法ごとのウイルス除去率と照らし合わせ、要求されるウイルス除去率を達成するための、再生処理法を選定する。

2.3.2　再生処理法選定の具体例

表－2.1に、様々な再生水の用途における誤摂取状況の設定例を、表－2.2に、それに対応した目標年間感染リスクごとの必要ウイルス除去率を示す。また、再生処理法ごとのウイルス除去不活化率を、表－2.3および表－2.4にまとめた（ポリオウイルスワクチン株を対象ウイルスとした実験結果[1]）。



図－2.1　再生処理法を選定するための手順

表－2.1　様々な再生水の用途における誤摂取状況の設定例

再生水の用途	想定した誤摂取状況	
	年間摂取頻度〔回／年〕	1回あたり摂取水量〔mL／回〕
親水施設（全身を浸す可能性がある場合）	8　(2回／週の確率で摂取(真夏のみ))	30　(水遊びによる誤飲)
親水施設（手足を浸す可能性がある場合）	20　(2回／週の確率で摂取(夏季のみ))	0.3　(手についた水の間接経口摂取)
滝・噴水（大規模）	10　(1回／月の確率で摂取(冬季以外))	1　(ミストを吸い込む)
釣り堀	20　(2回／月弱の確率で摂取（通年）)	0.2　(手についた水の間接経口摂取)
芝生の散水	20　(2回／月弱の確率で摂取（通年）)	0.1　(手についた水の間接経口摂取)
トイレ水洗用水	3　(オフィスビルで1回／日，週5日使用。約1％の確率で摂取（通年）)	0.02　(しぶきが口に入る)

表－2.1の「芝生の散水」を例として、再生処理法を選定するまでの具体的な手順を図－2.1に従って示す。

芝生の散水では、芝生上での遊戯や休息における芝生との接触により、年間20回、1回あたり0.1mLを経口摂取すると設定した（表－2.1参照）。これらの値に、二次処理水中ウイルス濃度分布式（平均0.62〔個／L〕の対数正規分布）と、ウイルス摂取量と感染確率の関係式を適用して、年間感染リスクの代表値（r：対数値(log)）を求めた。さらに複数のウイルス除去率（x：対数値(log)）を仮定して、それぞれに対応するrを計算した。その結果、「r=－1.0x－1.2」という関係式が得られた。この式より、目標とする年間感染リスクr0がそれぞれ－2log（$=10^{-2}$、すなわち100人に1人）、－3log（$=10^{-3}$）、－4log（$=10^{-4}$）のとき、要求されるウイルス除去率x0は各々0.84log、1.8log、2.8logとなる（表－2.2参照）。

表－2.2　目標年間感染リスクと要求されるウイルス除去率の関係

再生水の用途	要求されるウイルス除去率		
	年間感染リスク：10^{-2}	年間感染リスク：10^{-3}	年間感染リスク：10^{-4}
親水施設（全身を浸す可能性がある場合）	2.5 log　(=99.68%)	3.8 log　(=99.98%)	5.0 log　(=99.999%)
親水施設（手足を浸す可能性がある場合）	1.3 log　(=94.63%)	2.3 log　(=99.50%)	3.3 log　(=99.95%)
滝・噴水（大規模）	1.5 log　(=97.05%)	2.6 log　(=99.76%)	3.7 log　(=99.98%)
釣り堀	1.1 log　(=92.06%)	2.1 log　(=99.24%)	3.1 log　(=99.93%)
芝生の散水	0.84 log　(=85.55%)	1.8 log　(=98.56%)	2.8 log　(=99.85%)
トイレ水洗用水	(除去の必要なし)	0.43 log　(=62.42%)	1.5 log　(=97.05%)

注）表－2.1の誤摂取状況の設定に基づいた計算結果。

次に、要求されるウイルス除去率を満たす再生処理法を、表－2.3および表－2.4から選択する。例えば芝生の散水で年間感染リスクを10^{-2}にしたい場合、要求される二次処理水中のウイルス除去率は表－2.2より約1logである。表－2.3より、例えば二次処理水中のウイルスを塩素消毒のみで1log除去するためには、塩素注入濃度で15mg/Lが必要である。これに対し、三次処理水中のウイルスを同じく1log除去するためには、2.5mg/Lまで塩素注入濃度が削減可能であることになる。

塩素・オゾン・紫外線消毒のいずれにおいても、二次処理水中より三次処理水中の方がウイルスは不活化しやすい傾向が見られたことから、砂ろ過により下水処理水中の濁度を減らした後で、各消毒方法を適用することがウイルスを不活化するうえで効果的である。表－2.4の砂ろ過水の濁度（1.1～1.2）は、表－2.3の各消毒方法を適用した際の三次処理水の濁度（0.4～0.7）と比較すると少し高い。通常の砂ろ過のみでは濁度が0.5程度まで下がらない場合は、濁度除去率向上のための補助的な方策が必要になると考えられる。

表－2.3　各消毒方法によるウイルス不活化率と消毒強度の関係

消毒方法	原　水		ウイルス不活化率		
	種　類	濁度（－）	1log（90%）	2log（99%）	3log（99.9%）
塩素（mg/L）＊1	二次処理水＊3	3.0～3.5	15	－	－
	三次処理水＊4 ＋NH4-N＊5	0.7	7.0	17	－
	三次処理水＊4	0.4～0.6	2.5	7.9	13
オゾン（mg/L）＊1	二次処理水＊3	3.8	16	－	－
	三次処理水＊4	0.4～0.6	7.6	13	18
紫外線（mWs/cm²）＊2	二次処理水＊3	3.5	980	2,000	－
	三次処理水＊4	0.6	560	1,200	1,800

－：　データなし（実験の消毒強度範囲からは算出できない）。各数値の有効桁数は2ケタ。

＊1　塩素およびオゾンの濃度は注入濃度で、接触時間は15分。
＊2　紫外線照射時間は19～280秒。
＊3　二次処理水：　A2O法（HRT≒8時間）
＊4　三次処理水：　N・P高度処理（HRT≒13時間）＋砂ろ過
＊5　NH4-Nは原水中での濃度が約10mg/Lになるように添加。

表－2.4　砂ろ過によるウイルス除去率および濁度の変化

試　料	ウイルス濃度（PFU/mL）	ウイルス除去率	濁度（－）
原水（二次処理水）	9,000		3.5
ろ過水（100m/日）＊	4,000	0.36 log　(56%)	1.1
ろ過水（200m/日）＊	6,500	0.14 log　(28%)	1.2

各数値の有効桁数は2ケタ。

＊　原水にウイルスを添加したものを，約2～3時間継続ろ過した後，試料を採取した。

2．4　ウイルス制御に求められる測定法の精度と求められる要件

表－2.2において、例えば親水施設（全身を浸す可能性がある場合）での年間感染リスクを10^{-4}にするために必要なウイルス除去率は5logで、このときのウイルス濃度は平均値で10^{-4}~10^{-5}個／Lとなる。ウイルスを完全に制御するためには、この極微量ウイルスを実際に測定して安全性を確認しなければならない。効果的な濃縮精製などの試料前処理方法を含め、極微量ウイルスを確実に検出・測定する手法を開発する必要がある。

2．5　まとめ

本研究では、現在のウイルス濃度測定技術とリスクアセスメント手法を利用し、ウイルス除去技術を評価することにより、ウイルス制御手法の選定方法を検討した。ウイルスを完全に制御するためには、再生水中の極微量ウイルスを実際に測定して安全性を確認する必要がある。効果的な濃縮精製などの試料前処理方法を含め、PCR法を適用して極微量ウイルスを確実に検出・測定する手法を開発することが今後の課題となる。

補注：「高度処理会議」は、下水をより高度に処理し資源の有効利用や環境保全に資することを目的とした会議。土木研究所を主体とし、国土交通省都市局下水道部、日本下水道事業団、および全国17の地方公共団体下水道部局から構成された（平成13年8月に、「下水道技術会議」に改編された）。

3．リアルタイム PCR 法によるクリプトスポリジウムの検出方法に関する研究

近年、ＰＣＲにより増幅されるＤＮＡが蛍光シグナルによりＰＣＲ中にリアルタイムで検出できるようになってきた。このリアルタイムＰＣＲ法を利用することにより、試料中の初期ＤＮＡを簡便に定量することが可能となった。即ち、既知試料についてＤＮＡの対数直線増殖領域の蛍光強度を連続測定し、ある蛍光強度に到達するサイクル数と初期ＤＮＡ濃度の関係をスタンダードとすることにより未知試料中の標的ＤＮＡが,定量される。これまでに、リアルタイム PCR 法によるクリプトスポリジウムの定量検出法は検討されていないことから、本研究ではクリプトスポリジウムをリアルタイム PCR 検出するための基礎的条件の検討を行った。

3．1　クリプトスポリジウムを検出するための標的遺伝子のプライマーとプローブの設計

現在までにクリプトスポリジウムの様々な遺伝子の塩基配列は読み取られ、ジーンバンクに登録されている。その中でもクリプトスポリジウムの熱ショック蛋白質遺伝子の全塩基配列は決定されており、また、様々な株の塩基配列も登録されインターネット上で公開されている。そこで、著者らは、クリプトスポリジウムのＰＣＲ検出には情報量が豊富にあるクリプトスポリジウム熱ショック蛋白質遺伝子を標的とすることとし、ＰＣＲ検出のためのプライマーとプローブを設計した。設計したプライマーとプローブの位置および塩基配列を図－3.1 と表－3.1 に示した。

3．2　実験方法

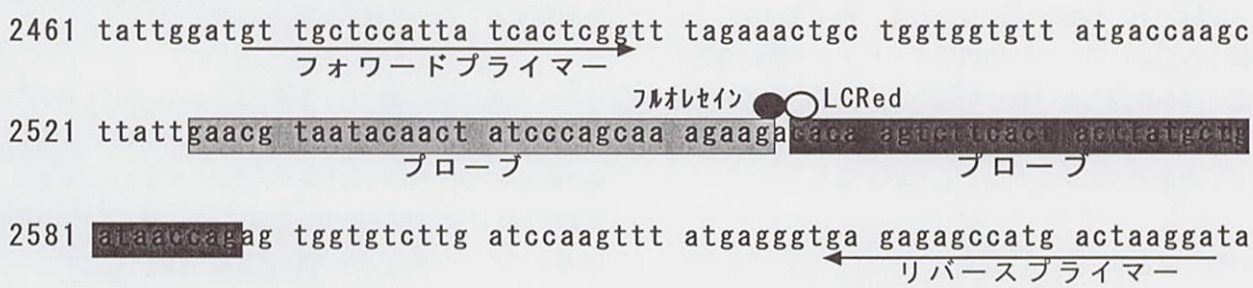
本実験ではロッシュ社製のリアルタイムＰＣＲ装置(lightCycler)を使用した。本装置におけるＰＣＲ中のＤＮＡの蛍光標識方法には２種類ある。２本鎖状態のＤＮＡに特異的に結合するサイバーグリーンという蛍光試薬を利用する方法（以下サイバーグリーン法）と、もう１つは、ＰＣＲにより合成されたＤＮＡの内部の塩基配列に特異的に結合する蛍光標識を利用する法（以下ハイブリダイゼーションプローブ法）である。はじめに、サイバーグリーン法の適用性を検討した。オーシストを 20000 個,6666 個,2000 個,666 個,200 個,66 個,20 個,6 個,2 個,0.6 個の 10 段階の希釈系列を作成し、これらの試料から前報の手順[3] によりＤＮＡを抽出した。抽出されたＤＮＡは 100μl まで濃縮し、このうち 5μl 中に存在するクリプトスポリジウムのＤＮＡについてサイバーグリーン法によるリアルタムＰＣＲ検出を行った。サイバーグリーン法の反応試薬には LightCycler FarstStart DNA Master SYBR Green I kit を使用した。本実験での試薬の濃度を表－3.2 に示す。

次に、同試料を用いてハイブリダイゼーションプローブ法によるクリプトスポリジウムのＤＮＡ検出を行った。ハイブリダイゼーションプローブ法の反応試薬は LightCycler FarstStart DNA Master Hybridization probes kit を使用した。反応試薬の濃度を表－3.3 に示した。サイバーグリーン法、ハイブリダイゼーションプローブ法ともＰＣＲ温度条件は同一とし、熱変成を 95℃で 10 分行った後、ＰＣＲを 95℃15 秒、60℃15 秒、72℃6 秒で 50 サイクル行った。

さらに、従来の電気泳動による増幅産物の検出法とリアルタイムＰＣＲ法の検出感度を比較するため、表－3.1 のプライマーを用いて、ＰＣＲを行い、増幅されたＤＮＡを電気泳動法で検出した。従来法のＰＣＲ条件は、アニーリング温度をリアルタイムＰＣＲ法と同じ 60℃に変更した以外は前報[1] と同じ条件で行った。

表-3.1　クリプトスポリジウムの熱ショック蛋白質遺伝子の PCR検出用プライマーとプローブの塩基配列

プライマーの塩基配列	
フォワードプライマー　：	5'-GTT GCT CCA TTA TCA CTC GG-3'
リバースプライマー　：	5'-TCC TTA GTC ATG GCT CTC TC-3'
プローブの塩基配列	
5'-GAA CGT AATACA ACT ATC CCA GCA AAG AAG-3'フルオレセイン	
5'-LCRed640-CAC AAG TCT TCA CTA CTT ATG CTG ATA ACC AG-3'	



図－3.1 クリプトスポリジウムの熱ショック蛋白遺伝子検出用のプライマー及びプローブの位置
ジーンバンク：登録番号 U11761, Cryptosporidium parvum KSU-1 heat shock 70 kDa protein (hsp70) gene, complete cds.より設計、増幅領域DNAサイズ：171bp

表-3.2 サイバーグリーン法の試薬濃度

試薬の種類	濃度
H_2O	適宜
$MgCl_2$	3mM
Forward Primer	0.5 μ M
Reverse Primer	0.5 μ M
LC FastStart DNA Master SYBR Green I	1×

表-3.3 ハイブリダイゼーション法の試薬濃度

試薬の種類	濃度
H_2O	適宜
$MgCl_2$	3mM
Forward Primer	0.5 μ M
Reverse Primer	0.5 μ M
Fluorescein Probe	0.2 μ M
LCRed Probe	0.4 μ M
LC FastStart DNA Master Hybridization Probes	1×

3．3 実験結果

3.3.1 サイバーグリーン法による クリプトスポリジウムの検出限界

図－3.2 は、サイバーグリーン法によるリアルタイムＰＣＲで検出した結果である。本図はサイクル数と蛍光強度の関係を示している。図よりすべての試料でサイクル数が進行すると共に蛍光強度も増加していることがわかる。蛍光強度の増加は、クリプトスポリジウムを添加していない蒸留水の条件でも観察された。図－3.5 の電気泳動の写真においても、蒸留水の条件（レーン１）において標的ＤＮＡ以外のバンドが確認されていることから、ＰＣＲ中にプライマーダイマー（プライマー同士が結合すること）が形成され、これにサイバーグリーンが反応したためと考えられる。標的ＤＮＡとプライマーダイマーとの判別は、融解温度（ＤＮＡの２本鎖が一本鎖になる温度）から判別が可能となる。サイバーグリーン法によるＰＣＲ終了後、温度を 60℃から 95℃までを徐々に上昇すると、ＤＮＡが一本鎖になる温度域でサイバーグリーン試薬は排除され、蛍光強度が減少する。図－3.3 はこのときの蛍光強度の変化率を示したものである。一般的に、融解温度はＤＮＡの塩基配列が同じであれば同じ温度となり、塩基配列が異なれば融解温度も異なる。図－3.3 より試料中のオーシスト濃度が 20000 個から 66 個までは、83℃付近に融解点が存在しているが、オーシストが 66 個以下では融解点は 81～82℃付近にあることがわかる。融解点は微妙に異なっているが、1℃程度の融解温度の違いから、クリプトスポリジウムのＤＮＡとプライマーダイマーを判別するのは困難であった。このことからサイバーグリーン法の正確な検出限界を把握することは困難であった。

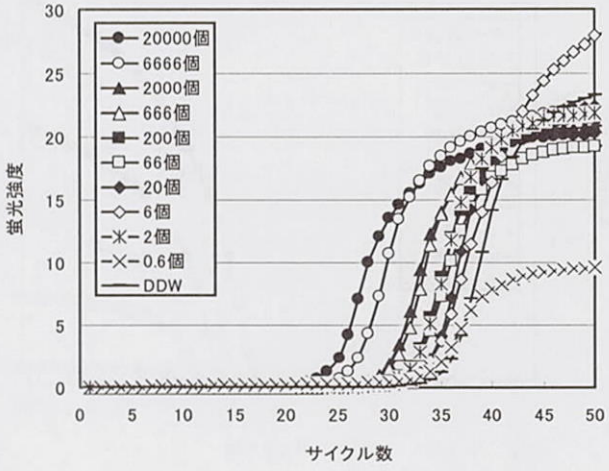


図-3.2 サイバーグリーン法によるクリプトスポリジウムのリアルタイム PCR 検出結果

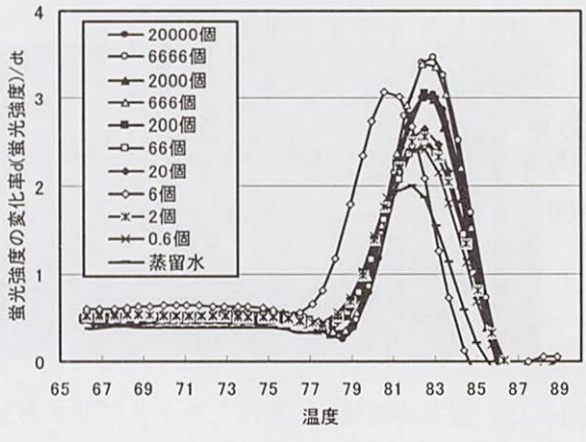
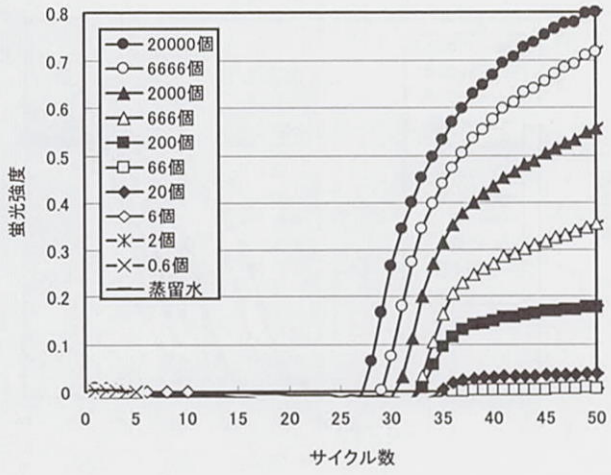


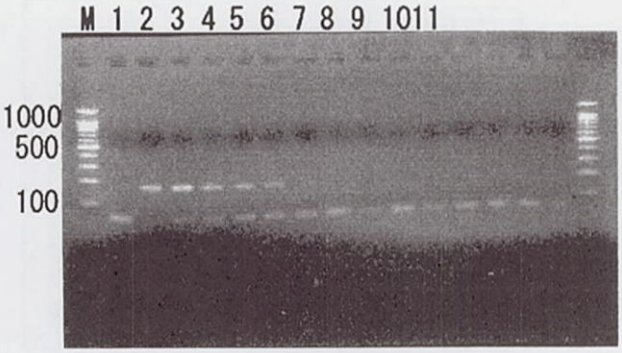
図-3.3 融 解 曲 線
(サイバーグリーン法によるＰＣＲ終了後、温度を 60℃から 95℃まで 1 秒間に 0.2℃で上昇したときの、蛍光強度の変化率)

3.3.2 ハイブリダイゼーションプローブ法 によるクリプトスポリジウムの検出限界

図－3.4 はハイブリダイゼーションプローブ法によるクリプトスポリジウムのリアルタイムＰＣＲ検出結果である。図－3.4 よりわかるとおり、ハイブリダイゼーションプローブ法はサイバーグリーン法より特異性が高く標的遺伝子のみを検出することが可能となる。蛍光シグナルは、オーシスト数 20 個まで検出できたがそれ以下では検出できなかった。このことから、オーシスト数



図—3.4　ハイブリダイザションプローブ法によるクリプトスポリジウムのリアルタイムＰＣＲ検出結果



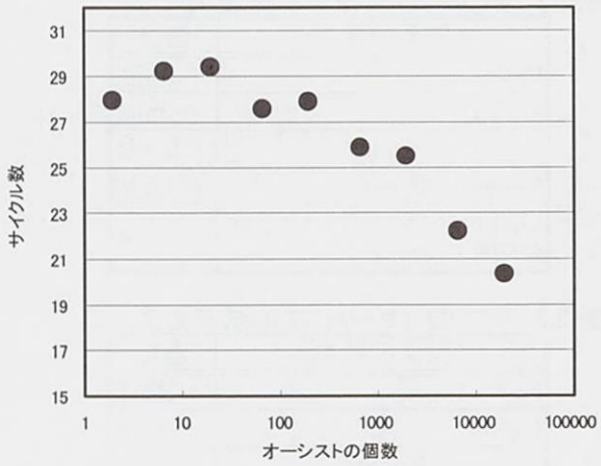
図－3.5　従来の電気泳動法によるクリプトスポリジウムのＤＮＡ検出
M:100～1000bp、ﾏｰｶｰﾚｰﾝ 1:蒸留水、ﾚｰﾝ 2:20000 個、ﾚｰﾝ 3:6666 個、ﾚｰﾝ 4:2000 個、ﾚｰﾝ 5:666 個、ﾚｰﾝ 6:200 個、ﾚｰﾝ 7:66 個、ﾚｰﾝ 8:20 個、ﾚｰﾝ 9:6 個、ﾚｰﾝ 10:2 個、ﾚｰﾝ 11:0.6 個

20 個以上から検出可能となることがわかった。

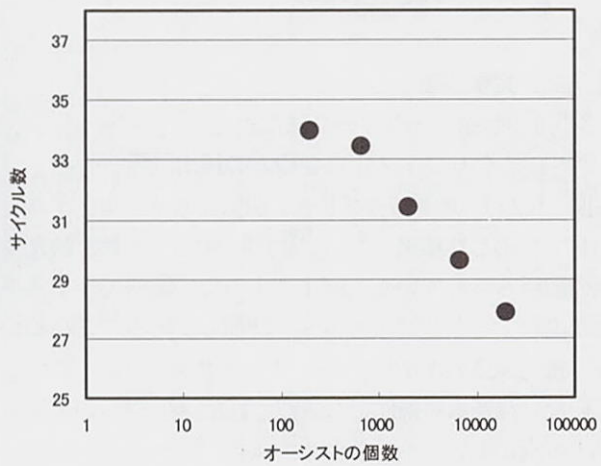
図－3.5 は、同じ試料を従来法である電気泳動により検出したものである。その結果、オーシスト数 66 個の条件が、バンドが確認できるかできないかの境界であった。ハイブリダイゼーションプローブ法によるリアルタイムＰＣＲ法では、従来法の電気泳動法より 3～10 倍高い感度で検出できることがわかった。

3.3.3　リアルタイムＰＣＲ法による定量限界

図－3.6 はサイバーグリーン法により蛍光強度が 0.1 に到達するまでに要したサイクル数とオーシストの個数の関係を示している。オーシスト数 100 個以上で、直線関係が得られることがわかった。図－3.7 はハイブリダイゼーションプローブ法の場合である。ハイブリダイザーション法の場合も、100 個以上で直線関係が得られることがわかった。以上のことから、オーシスト数 100 個以上で定量可能となることがわかる。



図－3.6　サイバーグリーン法による検量線（オーシストの個数と蛍光強度が 0.1 に達するまでに要するサイクル数の関係）



図－3.7　ハイブリダイゼーションプローブ法による検量線（オーシストの個数と蛍光強度が 0.08 に到達するまでに要するサイクル数の関係）

今回の検討では、ＤＮＡを抽出した試料 100μl の内 5μl 中（1/20）にクリプトスポリジウムのＤＮＡが存在するかどうかを見たものである。さらに、検出限界と定量限界を向上する方法としては、抽出されたＤＮＡを 10μl 程度まで濃縮し、これをリアルタイムＰＣＲ検出することにより、検出限界と定量限界は向上するものと考えている。

3．4　生存クリプトスポリジウムオーシストの検出方法の検討

クリプトスポリジウムによる感染リスクを評価する場合、環境水中に存在するクリプトスポリジウムの生死判定は重要である。標的をＤＮＡとしている場合、検出されたクリプトスポリジウムの生死は判断できない。生存クリプトスポリジウムの検出は、mRNA を標的とすることにより可能と考えられている[4]。これは、mRNA は生細胞においてのみ発現されることによる。そこで、リアルタイムＰＣＲ法によるクリプトスポリジウムの熱ショック蛋白質遺伝子（熱ショック蛋白質遺伝子は、細胞が熱や重金属などストレスを受けたときに発現する遺伝子）の mRNA の検出を試みた。

3.4.1　実験方法

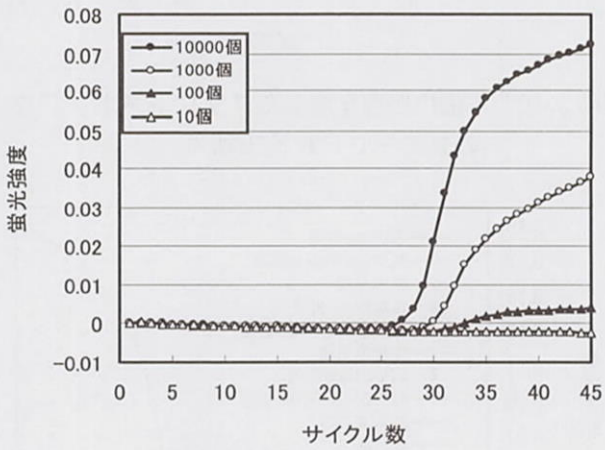
新鮮なクリプトスポリジウムオーシストを 10000 個、1000 個、100 個、10 個の４段階に 10 倍希釈し、それぞれの試料に熱ストレスを 45℃20 分間与えた。その後、凍結融解法でクリプトスポリジウムを破壊し、東洋紡社製の MagExtractor RNA キットによりＲＮＡの抽出を行った。ＲＮＡ抽出液にはＤＮＡの混入もあると考えられるため、DNase（ＤＮＡ分解酵素）でＤＮＡを分解した。その後、逆転写（Reverse Transcription:RT）、つまり、ＲＮＡをＤＮＡに逆転写する反応を行いＰＣＲ法によりＲＮＡの検出を試みた。なお、ＲＴ－ＰＣＲ法においてＤＮＡを検出していないことを確認するため、同試料のＰＣＲもおこなった。

次に、50%のキッチンハイター（主成分は次亜塩素酸ナトリウム）中に一晩（約 15 時間）と 65℃で 30 分間不活化処理を施したオーシストと、さらに、対照として不活化処理を施していないオーシストを 45℃20 分間の条件で mRNA を誘導発現した後、前述のＲＮＡ抽出キットを用い、ＲＮＡを蒸留水 30μl に抽出した。その後、ＲＮＡ抽出液を 10μl ごと 3 等分し、1 つの試料には RNA のみを検出するため DNase 処理を施し、2 つ目の試料には、DNase 処理で陽性になった試料が、RNA であること再確認するため DNase＋RNase（RNA 分解酵素）処理を施し（ＲＮＡならば陰性となる）、3 つ目の試料は未処理とし、それぞれ 3 試料についてＲＴ－ＰＣＲとＰＣＲを行った。なお、ＲＴ－ＰＣＲ法はハイブリダイゼーションプローブ法とし、表－3.1 と同じプライマーおよびプローブを使用した。ＲＴ－ＰＣＲに用いた試薬は、ワンステップ（一本のチューブ中でＲＴとＰＣＲを行う方法）反応試薬である LightCycler RNA Master Hybridaization probe kit を使用した。反応試薬の濃度を表－3.4 に示す。ＲＴ－ＰＣＲの温度条件は、ＲＴ反応を 61℃20 分した後、続けて、熱変成を 95℃ 2 分行い、ＰＣＲを 95℃5 秒,60℃15 秒、72℃6 秒を 45 サイクル行った。

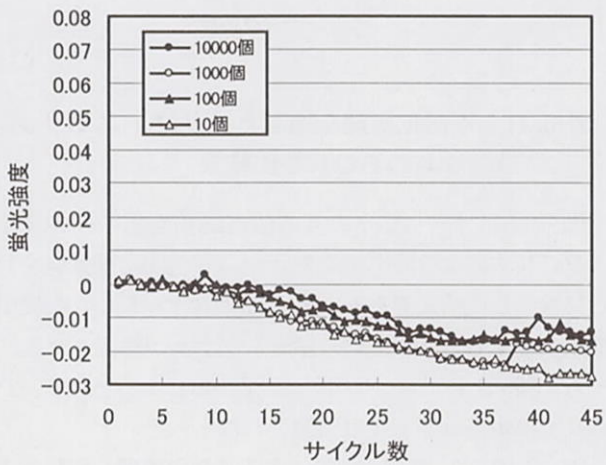
表-3.4　RT－PCR法の反応試薬濃度

試薬の種類	濃度
H_2O	適宜
$Mn(Oac)_2$	3.25mM
Forward　Primer	0.5 μ M
Reverse　Primer	0.5 μ M
Fluorescein Probe	0.2 μ M
LCRed Probe	0.4 μ M
LC RNA Master Hybridization Probes	1×

3.4.2　実験結果



図－3.8　ＲＴ－ＰＣＲ法によるクリプトスポリジウムのリアルタイムＰＣＲ検出結果



図－3.9　ＰＣＲ法によるクリプトスポリジウムのリアルタイムＰＣＲ検出結果

表－3.5　不活化処理を施したオーシストRT－PCRおよびPCR検出結果

	不活化処理方法	DNase	DNase+RNase	未処理
RT-PCR	不活化処理なし	＋	－	＋
	塩素処理（50%のキッチンハイター中で一晩）	－	－	＋
	65℃で30分間加熱	－	－	＋
PCR	不活化処理なし	－	－	＋
	塩素処理（50%のキッチンハイター中で一晩）	－	－	＋
	65℃で30分間加熱	－	－	＋

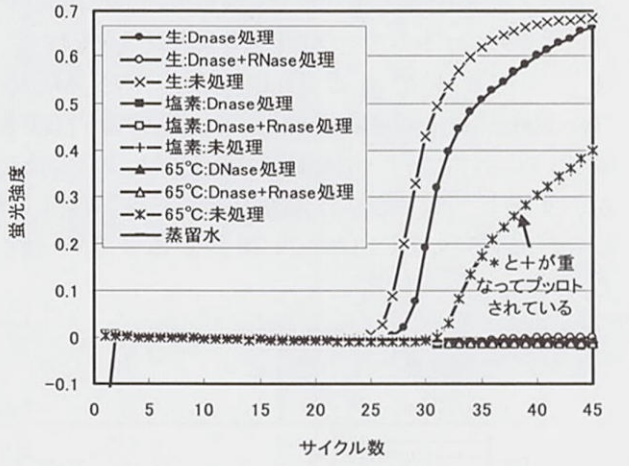


図-3.10　不活化処理を施したクリプトスポリジウムのＲＴ－ＰＣＲ検出結果

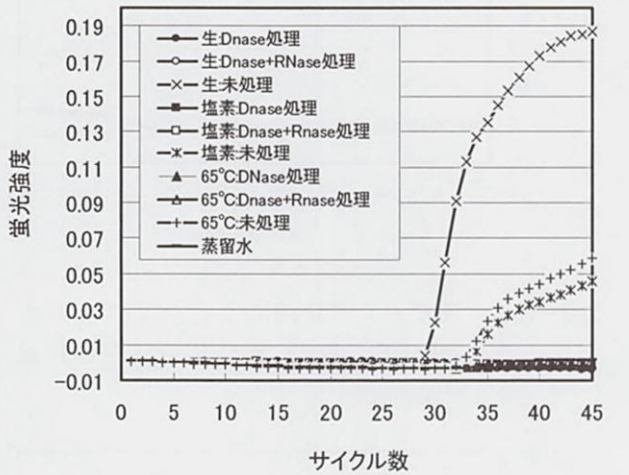


図-3.11　不活化処理を施したクリプトスポリジウムのＰＣＲ検出結果

図－3.8にオーシストの４倍段階10倍希釈系列のＲＴ－ＰＣＲ法による検出結果を示す。図－3.9は同試料をＰＣＲ検出した結果である。図－3.9のＲＴ－ＰＣＲの検出結果より１００個以上から蛍光シグナルが検出された。一方、図－3.9のＰＣＲの検出結果からわかるとおり、ＰＣＲでは蛍光シグナルは検出されなかった。

図－3.10 は、塩素と加熱による不活化処理を施したオーシストおよび不活化処理を施していないオーシストをＲＴ－ＰＣＲにより検出した結果である。図－3.11 は同試料をＰＣＲ検出した結果である。表－3.5 は本実験結果の一覧表である。図および表よりＲＮＡを抽出した試料をＤＮａｓｅ処理し、ＲＴ－ＰＣＲを行うことにより生存オーシストを検出することが可能となることがわかる。以上の結果から、ＲＴ－ＰＣＲ法においてｍＲＮＡを検出していると考えられるが、今後はＤＮＡとｍＲＮＡの区別が付くプライマーやプローブを設計する必要があると考えられる。

４．まとめ

水系病原ウイルスの検出に PCR 法を適用するのに先立ち、現在一般的に用いられている培養法で得られたウイルスデータから、下水処理水再利用におけるウイルス感染の危険性の現状を把握し、さらにその制御手法の選定方法について検討した。ウイルス制御においては、再生水中のウイルス濃度の分布と、人が誤摂取する再生水量から、ウイルスに感染するリスクを求め、これを目標値以下に抑えるための再生処理法を選定する方法を検討した。塩素・オゾン・紫外線消毒のいずれにおいても、二次処理水中より三次処理水中の方がウイルスは不活化しやすい傾向が見られたことから、砂ろ過により下水処理水中の濁度を減らした後で、各消毒方法を適用することがウイルスを不活化するうえで効果的である。なお、ウイルスを完全に制御するためには、再生水中の極微量ウイルスを実際に測定して安全性を確認する必要がある。効果的な濃縮精製などの試料前処理方法を含め、PCR 法を適用して極微量ウイルスを確実に検出・測定する手法を開発することが今後の課題となる。

リアルタイム PCR 法によるクリプトスポリジウムの検出では、ハイブリダイゼーション法を用いることにより特異性の高い検出が可能となることがわかった。ハイブリダイゼーション法では、オーシスト数２０個以上から検出可能であり、100 個以上で定量可能となることがわかった。また、mRNA を標的とすることにより生存オーシストの検出も可能となることがわかった。今後は、検出限界と定量限界の向上を目指すと共に、実試料への適用性を検討したいと考えている。

参考文献

１）鈴木穣、小越眞佐司、諏訪守：病原性微生物の発生源および対策に関する調査、「国土技術政策総合研究所資料　平成 12 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料第 10 号」、pp.145-154、2001

２）Joan B. Rose and Charles P. Gerba: Use of Risk Assessment for Development of Microbial Standards, *Wat. Sci. Tech.*, **24** (2), pp.29-34, 1991

3）北村友一、鈴木穣：ＰＣＲ法による下水中のクリプトスポリジウムオーシストの検出方法の開発、土木技術資料、 43-9、pp.22-27、2001

4）Christine Kaucner and Timothy Stinear: Sensitive and Rapid Detection of Viable Giardia Cysts and Cryptosporidium parvum Oocysts in Large-Volume Water Samples with Wound Fiberglass Cartridge Filters and Reverse Transcription-PCR, Appl. *Envir. Microbiol.*, **64**, pp.1743-1749, 1998

Ⅱ　地盤環境の保全技術に関する研究

研究期間：平成 13 年度～17 年度
プロジェクトリーダー：材料地盤研究グループ長　三木博史
研究担当グループ：材料地盤研究グループ（新材料、土質、地質）

1.　研究の必要性

最近の社会資本整備においては、有害化学物質などによる環境リスクへの対応がこれまで以上に強く求められるようになってきている。このため、建設事業が環境汚染の原因者となるおそれのある建設資材中の汚染物質による地盤環境への影響評価と対策に関する研究や、建設事業が原因者でない遭遇型の地盤汚染への現実的な対処方法に関する研究が必要である。

2.　研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では、汚染物質の環境特性および地盤中での移動特性を解明して地盤、地下水の調査・モニタリング計画手法を開発すること、安全で経済的な恒久対策を確立するまでの現実的な対策技術として、汚染物質の暫定的な安定化手法、封じ込め手法を開発することを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

① 建設資材および廃棄物中の汚染物質の環境特性および地盤中での移動特性の解明
② 地盤、地下水の調査・モニタリング計画手法の開発
③ 汚染物質の暫定的な安定化手法、封じ込め手法の開発

3.　個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

① 建設資材の環境安全性に関する研究（平成 14～17 年度）
② 特殊な岩盤および岩石による環境汚染の評価手法の開発（平成 14～17 年度）
③ 地盤中ダイオキシンの簡易分析手法の開発（平成 12～14 年度）
④ 建設分野におけるダイオキシン類汚染土壌対策技術の開発（平成 12～14 年度）
⑤ 建設事業における地盤汚染の挙動予測・影響評価・制御技術の開発（平成 14～17 年度）

このうち、平成 13 年度は③、④の 2 課題を実施している。

4.　研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、これまでに実施してきた研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1)　建設資材および廃棄物中の汚染物質の環境特性および地盤中での移動特性の解明

本達成目標に対する研究は、平成 14 年度から実施する予定である。

(2)　地盤、地下水の調査・モニタリング計画手法の開発

「地盤中ダイオキシンの簡易分析手法の開発」では、イムノアッセイ法や有機塩素化合物による代替分析手法を組み合わせたダイオキシンの簡易分析手法の開発を目指している。13 年度は、迅速前処理法と代替物質を用いた分析法の適用性を検討した。その結果、① 高速溶媒抽出法と難揮発性ハロゲン化有機物の TOX 計分析を組み合わせた迅速分析法が有効であること、② 代替物質として 8 塩素化ジベンゾジオキシンを四重極 GC・MS で測定してダイオキシン類の含有濃度（TEQ）を推定する方法が有効であることが明らかとなった。

今後は、効率的な前処理法や迅速判定法について引き続き検討を加え、地盤中ダイオキシンの簡易分析手法の

開発を目指していく予定である。

(3) 汚染物質の暫定的な安定化手法、封じ込め手法の開発

「建設分野におけるダイオキシン類汚染土壌対策技術の開発」では、現地で遭遇するダイオキシン類に汚染された土壌および底質を対象に、当面の暫定対策工法として、汚染の二次拡散を防止する原位置処理工法（施工中の排水管理対策を含む）の開発を目指している。13年度は、水域のダイオキシン類汚染底質対策工法として、袋詰脱水処理工法について検討を加えた。その結果、① 土壌の有害物質含有量に関わりなく、99.8 %以上の有害物質を袋内に封じ込めることが可能であること、② 凝集剤の添加により有害物質を比較的多く含む細粒分を凝集させ、袋材のフィルター効果をより効果的に発揮させることができることが分かった。また、陸域のダイオキシン類汚染土壌対策工法としては、「敷土・覆土工法」、「遮水壁工法」、「固化工法」の 3 工法が汚染した土粒子の移動を抑制でき、その適用可能性が高いことが分かった。

今後は、油類などの特殊なキャリアの存在やその影響を調査するとともに、袋詰脱水処理工法の排水管理対策を開発し、汚染拡散防止効果が確実に発揮できる暫定対策技術として提案を行っていく予定である。

2.1　地盤中ダイオキシンの簡易分析手法の開発

研究予算：運営交付金（一般勘定）
研究期間：平12～平14
担当チーム：新材料チーム
研究担当者：明嵐政司、守屋　進

【要旨】
事業を効率的に執行するうえで、土壌のダイオキシン類による汚染状況を迅速にモニタリングするためには、ダイオキシン類の分析測定法の簡易化が必要である。このため、ダイオキシン類の分析法の簡易化として、試料の前処理法の迅速化、および代替物質を用いた測定法の簡易化を検討した。
その結果、難揮発性ハロゲン化有機物（ＮＶＯＸ）のＴＯＸ計による分析および８塩素化ジベンゾジオキシン（８ＣＤＤ）を四重極ＧＣ・ＭＳで測定してダイオキシン類のＴＥＱを推定する方法が、分析の迅速簡易化に有効であることがわかった。
キーワード：簡易分析、ＴＯＸ計、ＮＶＯＸ、８ＣＤＤ、高速溶媒抽出法

１．はじめに

公共事業を執行するうえで土壌のダイオキシン類による汚染状況の把握は事業執行に大きな影響を及ぼすので、事業を執行しながらその汚染状況を随時把握し必要な対策を行うことが効率的に事業を執行するうえで求められている。このため、現在１ヶ月以上要しているダイオキシン類の分析測定時間を短縮したダイオキシン類の迅速なモニタリング技術の確立が必要である。ダイオキシン類の分析測定法の簡易化としては、①サンプリングの簡易化、②前処理、抽出、精製の簡易化、③測定法の簡易化がある。簡易化されたダイオキシン類の測定方法は、公定法による測定が必要か否かを判断するためのスクリーニング方法として位置付けられる。

本課題は、ダイオキシン類を迅速に測定する簡易分析法を確立するため、代替物質による測定法の簡易化及び試料の前処理の迅速化について検討を行ったものである。

２．研究方法

代替物質８塩素化ジベンゾジオキシンの四重極ＧＣ・ＭＳによる分析とＴＯＸ計によるＮＶＯＸの分析時の迅速前処理に関する検討を行った。

２．１　迅速前処理の検討

土壌試料については、公定法「ダイオキシン類に係る土壌調査測定マニュアル」（平成１２年１月環境庁水質保全局土壌農薬課）ではダイオキシン類測定の前処理法として、ソックスレー法を採用している。この抽出法は１６時間程度時間を要するので、ソックスレー法による抽出時間を短縮する迅速前処理法として高速溶媒抽出法（ＡＳＥ抽出法）の適用性について検討した。

２．２　代替物質による分析

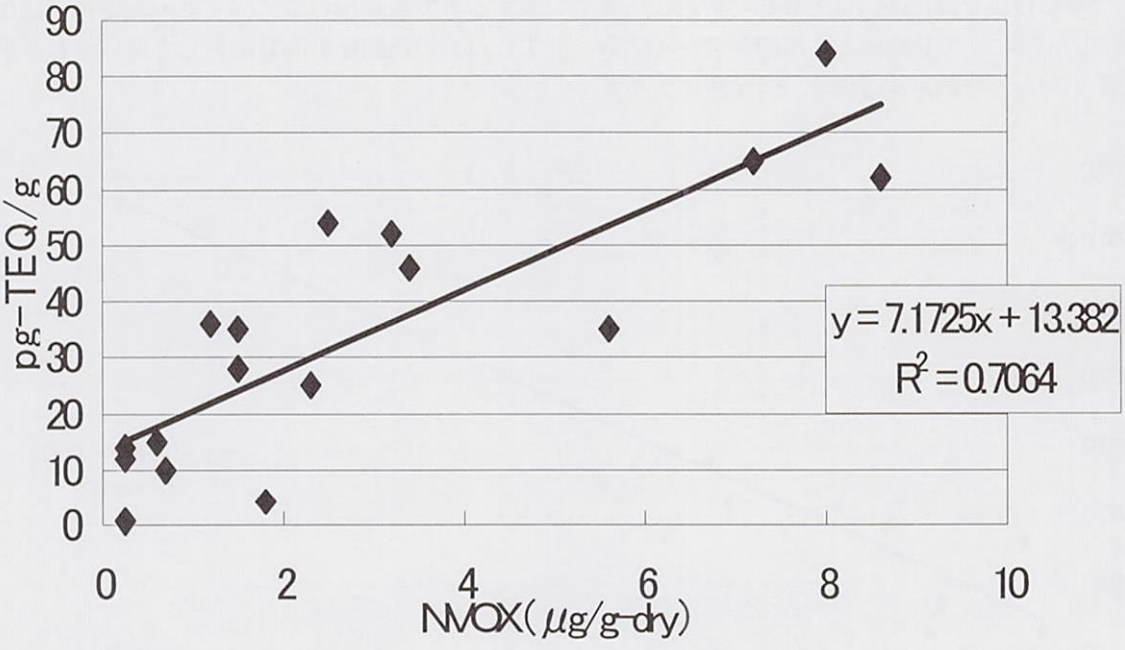
前処理した試料の簡易迅速測定法として、ＴＯＸ計で難揮発性ハロゲン化有機物（ＮＶＯＸ）を分析する測定法の公定法による分析結果との相関について検討した。

また、全異性体を分析する公定法に対して、測定時間の短縮を目的として、ダイオキシン類の代替測定対象物質としてソックスレー抽出法で前処理した試料の８ＣＤＤを四重極ＧＣ・ＭＳで測定した。ＡＳＥ抽出はDIONEX　ASE-200抽出セル３３mlを用い、土壌試料２０ｇにアセトン２００mlを抽出溶媒として用いた。条件は(抽出溶媒；アセトン（残留農薬試験用）、温度１５０℃、圧力２０００psi、static；５分間×２回)とした。

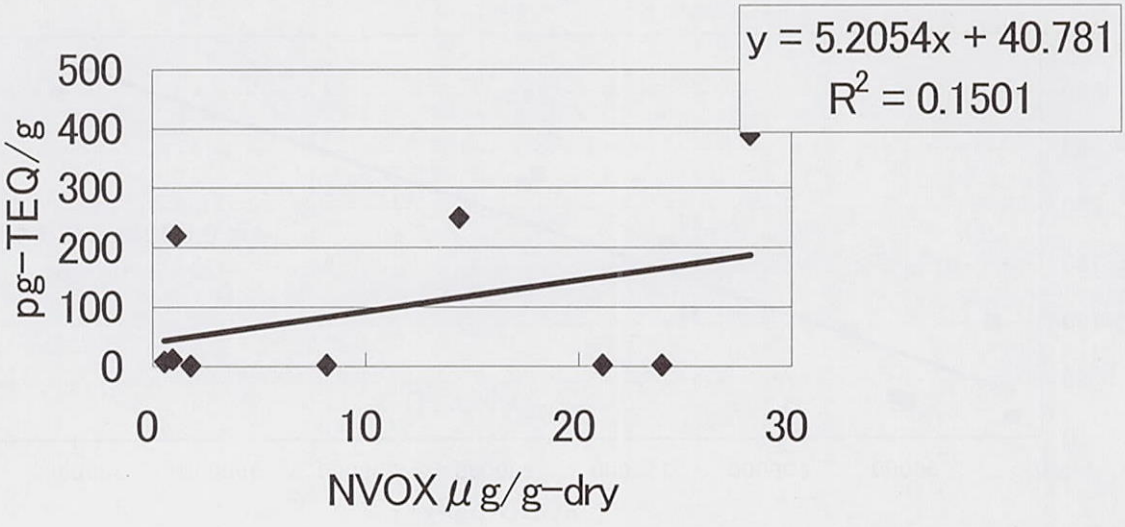
３．研究結果

３．１　迅速前処理の検討

ソックスレー抽出法とＡＳＥ抽出法で前処理を行った土壌試料のＮＶＯＸをＴＯＸ計で測定した結果と、抽出後精製を行い高分解能ＧＣ・ＭＳで分析する公定法でpg-ＴＥＱ/g（ＴＥＱ；毒性等価量）を求めた結果を図－１，図－２示す。相関係数は、R^2=０．７１であり良好であった。ＡＳＥ抽出法は良好な相関は得られなかった。



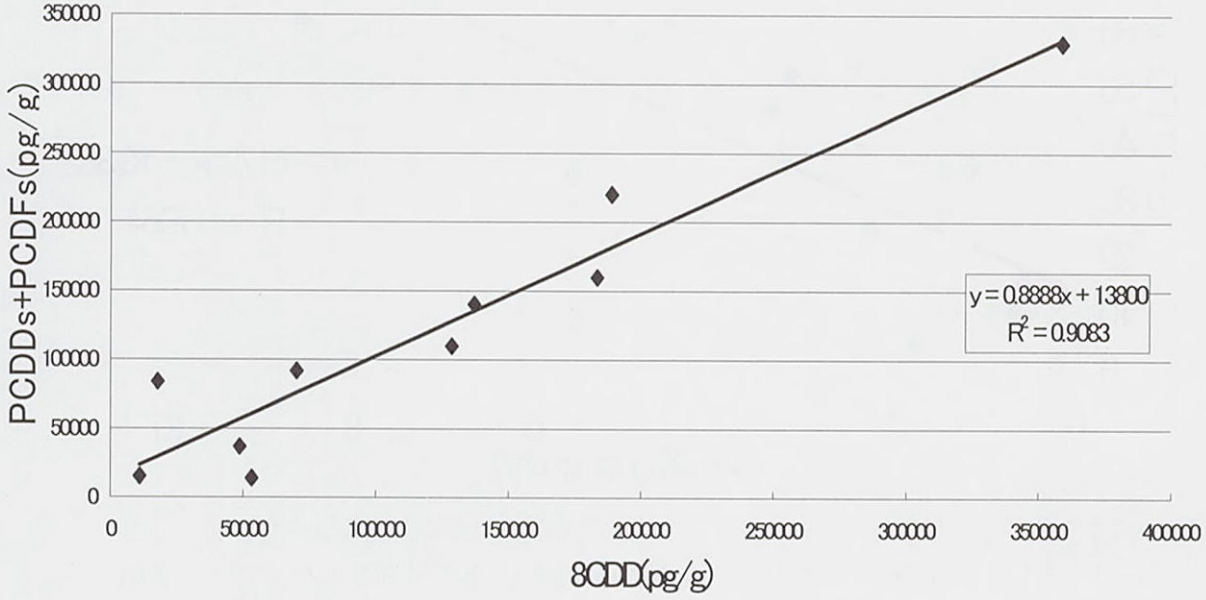
図－１　ＮＶＯＸ測定結果とダイオキシン類（pg-TEQ/g）との相関性（ソックスレー抽出）



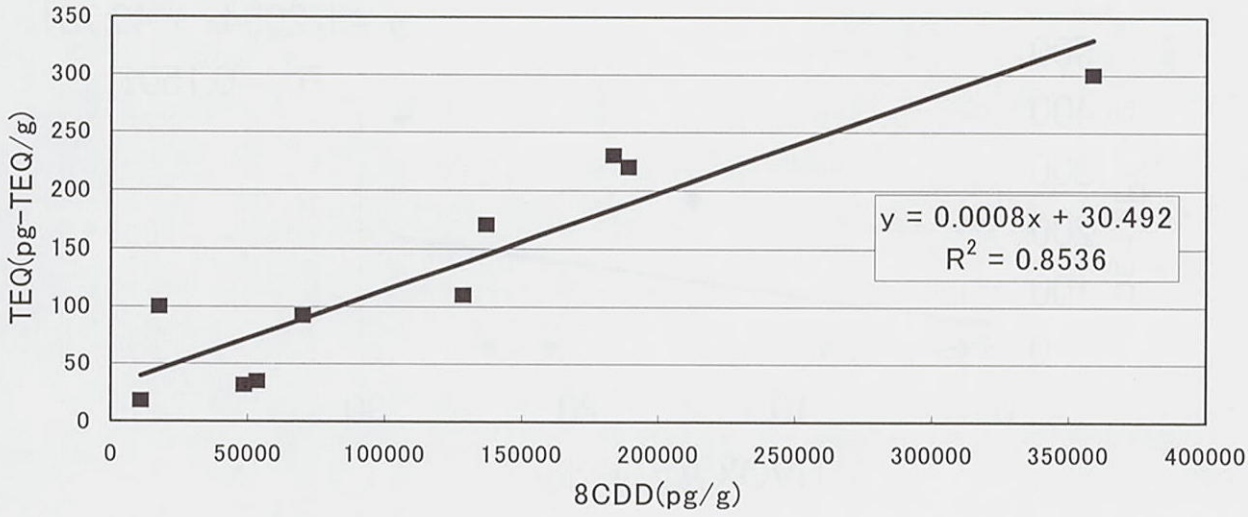
図－２　ＮＶＯＸ測定結果とダイオキシン類（pg-TEQ/g）との相関性（ＡＳＥ抽出）

３．２　代替物質による分析

同一試料を公定法で求めたＰＣＤＤ（ポリ塩化ジベンゾジオキシン）＋ＰＣＤＦ（ポリ塩化ジベンゾフラン）の合計値と、前処理法としてソックスレー抽出法を適用して８ＣＤＤを四重極ＧＣ・ＭＳで測定した場合の相関を図－３に、ＴＥＱ値との相関を図－４に示す。８塩素化物のみを測定する場合、公定法により求めたＰＣＤＤ＋ＰＣＤＦの合計値及びＴＥＱ値との相関係数は、R^2がそれぞれ０．９０８と０．８５４であり、簡易法としては十分に適用可能な値であった。このように８塩素化物は、土壌試料中に比較的多く存在するので四重極ＧＣ・ＭＳでの測定が可能であり、ＴＥＱとの相関性も簡易法として良好であった。



図－３　四重極ＧＣ・ＭＳによる８ＣＤＤ測定結果とダイオキシン類合計との相関性



図－４　四重極ＧＣ・ＭＳによる８ＣＤＤ測定結果とダイオキシン類TEQとの相関性

4．まとめ

土壌の簡易なダイオキシン類測定法としてのＴＯＸ計による測定法は、測定時間を短縮するのに有効である。ＴＯＸ計でのＮＶＯＸの測定に必要な時間は、１試料あたり２０分間程度であることから、１日あたり２０～３０検体の処理は可能であると考えられる。また、ＡＳＥ抽出は、数時間で可能なことから、測定に要する時間は１検体については６時間程度で十分と思われる。ただし、ＡＳＥ抽出（溶媒アセトン）を行いＴＯＸ計で測定した結果が公定法と相関が得られなかったのは、水分の影響を受けたと思われる。

公定法では、ダイオキシン類全種類を分析するためカラムの交換などに時間を要するが、四重極ＧＣ・ＭＳによる簡易分析法は、前処理法としてＡＳＥ法を適用して異性体の個別分析を行わないで異性体のない８塩素化物（ＴＥＦはない）のみを測定するので測定時間の大幅な短縮が可能である。ただし、公定法と同様の精製操作または硫酸処理程度の操作を必要である。

本年度の実験結果より、ＮＶＯＸでは安全側から10μg/g-dryを公定法による試験の必要性の判断基準とし、その値を超える場合は、高分解能ＧＣ・ＭＳでの再測定を実施するというようなスクリーニングとしての適用が考えられる。

今後は、ＡＳＥ抽出法より効率的な抽出法の検討を行い、これまでの簡易測定法や代替物質の測定などを体系的に整理して、土壌中のダイオキシン類を迅速にモニタリングする簡易分析法を提案する。

2.2　建設分野におけるダイオキシン類汚染土壌対策技術の開発

研究期間：平成 12～14 年度
研究担当グループ：材料地盤研究グループ（土質）
研究担当者：恒岡伸幸（上席）、森啓年

【要旨】
本研究は、水域と陸域のダイオキシン類汚染の暫定対策を開発することを目的として、文献調査、実験などを行った結果以下の成果が得られた。(1)水域のダイオキシン類汚染底質対策工法として「袋詰脱水処理工法」の持つ特徴を実験により明らかにした。(2)陸域のダイオキシン類汚染土壌対策工法として「敷土・覆土工法」、「遮水壁工法」、「固化工法」の３工法の適用性と課題をまとめた。
キーワード：ダイオキシン、汚染土壌、対策

1.　はじめに

1.1　背景

湖沼や河川の浚渫事業、工場跡地や不法投棄跡地の再開発などにおいて、ダイオキシン類で汚染された底質や土壌と遭遇するケースが増加している。そのような場合、汚染拡散を防止する適切な対策が必要となるが、ダイオキシン類汚染土壌に対する浄化等の恒久対策は、費用や工期の面から建設工事への適用が難しいのが現状である。このため、恒久対策が早期に実施できない場合、汚染拡散を防止し、環境リスクを低減することを主眼においた恒久対策とは異なる暫定的な対策が必要とされている。

1.2　目的

本研究では、ダイオキシン類汚染の暫定対策技術の開発を目的としている。具体的には「袋詰脱水処理工法によるダイオキシン類汚染底質の封じ込め工法の開発」と「覆土・敷土工法等によるダイオキシン類汚染土壌の封じ込め工法の開発」を目標として、平成 13 年度は平成 12 年度に引き続き文献調査、実験などを行った。

2.　ダイオキシン類汚染底質対策について

2.1　概要

河川や湖沼のような水域においては、底質から農薬等に起因するダイオキシン類が検出され対策が必要となる場合がある。

本研究では袋詰脱水処理工法を用いて、河川や湖沼から浚渫された高含水比のダイオキシン類汚染底質を対象に、脱水減量化させるとともに拡散防止を図り安全に封じ込める工法の開発を目指している(図－1)。

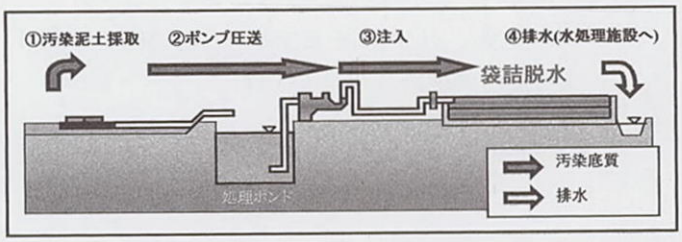
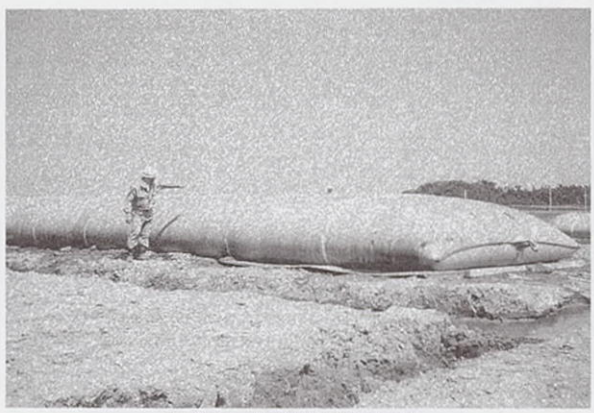


図-1　袋詰脱水処理工法を用いた汚染底質封じ込め工法


写真-1　袋詰脱水処理工法

建設発生土の再利用を計る工法としての袋詰脱水処理工法(写真-1)は、そもそも浚渫土などの高含水比土壌をジオテキスタイル製の透水性袋に注入し、脱水を促進させ、取り扱いを容易にする工法である。このため大掛かりな施工機械を必要としないといった特長がある。封じ込め工法としては、脱水の際に袋から出る排水の濁りが袋の持つフィルター効果によって短時間で非常に小さくなるといった特長が活かされるものである。

平成１３年度は、平成１２年度に引き続き以下の実験を行った。

1.　袋へのダイオキシン類汚染底質の注入実験
2.　袋詰したダイオキシン類汚染底質のタンクリーチング試験

2.2 袋へのダイオキシン類汚染底質の注入実験

(1) 実験方法

実サイトからダイオキシン類汚染土壌を採取し、ふるい (2cm) にかけ礫やゴミを取り除くなどの試料調整を行い、その試料を試料 1 とした。また、試料 1 に真砂を混合し、低濃度のダイオキシン類汚染土壌を作成したものを試料 2 とした。各試料に対して土質試験、含有量分析、溶出試験を行った結果は表-1 のとおりである。

表-1 試料特性

試料 1	土粒子の密度 (g/cm3)	2.665	
	含水比 (%)	66.3	
	液性限界 (%)	51.7	
	強熱減量 (%)	6.63	
	含有量 (pg-TEQ/g) (2 地点平均)	ﾀﾞｲｵｷｼﾝ類	71,500
試料 2	土粒子の密度 (g/cm3)	2.64	
	含水比 (%)	20.96	
	液性限界 (%)	–	
	強熱減量 (%)	1.67	
	含有量 (pg-TEQ/g) (2 地点平均)	ﾀﾞｲｵｷｼﾝ類	3,600

実験は図-2 のような装置を使用し、注入する汚染土壌試料および凝集剤添加の有無が異なる表-2 の 3 ケースについて行った。また平成 12 年度に行った粒度毎の有害物質含有量の把握において細粒分の有害物質含有量が比較的高いことが分かったため、細粒分を凝集しろ過しやすくする凝集剤を幾つかのケースにおいて添加した。

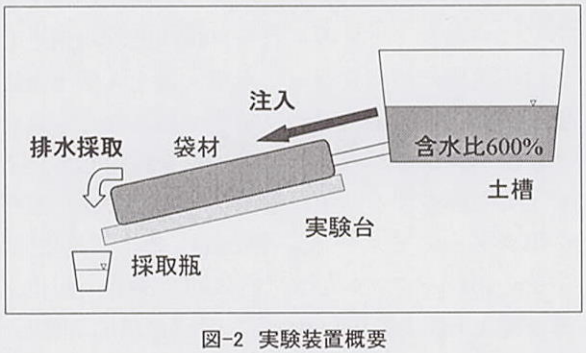


図-2 実験装置概要

表-2 実験ケース

ケース	試料	凝集剤
1	試料 1 (ﾀﾞｲｵｷｼﾝ類、高濃度)	–
2	試料 1 (ﾀﾞｲｵｷｼﾝ類、高濃度)	添加
3	試料 2 (ﾀﾞｲｵｷｼﾝ類、低濃度)	添加

実験手順は以下の通りである。

1) 試料に水道水を加え、含水比 600%に調整し、スラリーを作成する。

2) スラリーを試料を小型袋 (20L) へ自然流下で土槽から注入を行う。

3) 袋からの排出水を採取瓶に採取し、排出水中のダイオキシン類濃度の測定を行う。

(2) 実験結果

図-3 のように全てのケースにおいて排水が進むにつれ、排水中の有害物質濃度は減少していった。ダイオキシン類濃度の減少量は排水の初期において大きく、排水が進むにつれて小さくなっていった。また、凝集剤の添加により排水中のダイオキシン類濃度がさらに減少する傾向がみられた。しかし、ダイオキシン類は排水の最終段階までその濃度は排水基準値以上であった。

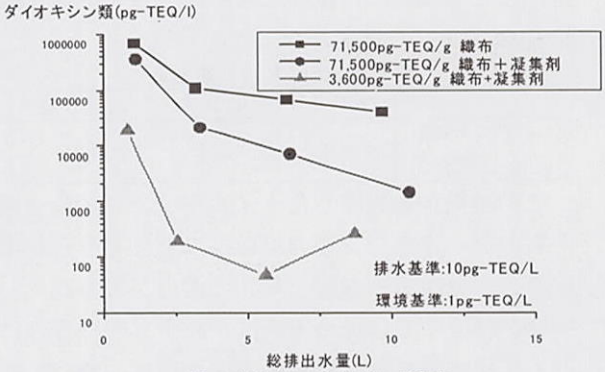


図-3 排出水中のダイオキシン類濃度

(3) 袋詰脱水処理工法の汚染底質封じ込め効果

表-3 のように注入した有害物質量に対する袋内に封じ込められた有害物質量の割合を求めると、凝集剤を加えたケースでは全て 99.8%以上となり、ほとんどの有害物質は袋内に封じ込めることが可能であった。

表-3 封じ込められた有害物質量の割合

ケース	有害物質	袋内に残存 (%)
1	ダイオキシン類	99.51
2	ダイオキシン類	99.83
3	ダイオキシン類	99.82

また、ケース 2,3 で土壌のダイオキシン含有量の封じ込め効果への影響をみてみると、ダイオキシン類について含有量が 20 倍程度異なる試料を用いて実験を行った結果においても、汚染濃度に関係なくほぼ同じ割合でダイオキシン類が封じ込められた。したがって、袋詰脱水処理工法を用いることで、有害物質の含有量に関わりなく汚染底質を効率的に封じ込められると考えられる。

2.3 袋詰したダイオキシン類汚染底質のタンクリーチング試験

(1)実験方法

前述の実験において袋詰したダイオキシン類汚染底質(濃度 71,500pg-TEQ/g)を固液比 1:10 に調整した水槽に入れ(図-4)、所定の日数毎に水槽内の水を採取しダイオキシン類を測定した。

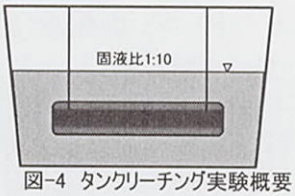


図-4 タンクリーチング実験概要

(2)実験結果

結果は表-4 に示す通りである。浸水直後はやや高い濃度のダイオキシン類が見られるが、日数の経過とともに濃度は減少していき、最終的には環境基準値以下の濃度となった。

表-4 タンクリーチング試験結果

	1 日後	90 日後	365 日後
ﾀﾞｲｵｷｼﾝ類 (pg-TEQ/l)	4.4	3.6	0.35

この結果から袋詰したダイオキシン類汚染土壌からのダイオキシン類の拡散はほとんどみられないことが分かる。なお、最初の濃度が最も高く、時間が経過するに従って濃度が減少しているのは、初めに浸水したときに袋の表面から水へ移行した土粒子が水槽の底へ沈降したためと考えられる。

3. ダイオキシン類汚染土壌対策について

3.1 概要

陸域でのダイオキシン類による土壌の汚染は、ゴミ等の燃焼過程で非意図的に生成されるものや農薬・PCB に起因するものがある。これらの汚染土壌中のダイオキシン類はそのほとんどが土壌中の粒子に強く吸着していることから、その粒子の移動を制限することにより汚染の拡散は防止できると考えられる。

本研究では、二次拡散を防止しつつ汚染土壌を暫定的に封じ込める暫定対策として「敷土・覆土工法」、「遮水壁工法」、「固化工法」の三工法の開発に取り組んでいる。各工法の概要は表-5 の通りである。

3.2 敷土・覆土工法

(1)工法の概要

敷土・覆土工法には、敷土と覆土を併用するタイプのものと、覆土のみを行うタイプのものがある。

表-5 対策工法概要

工法	概要
敷土・覆土工法	現地盤上に地盤中への汚染土粒子の浸入を防止するための敷土を施し、上部を覆土、シート等により降雨による土の流出および風による飛散を防止する工法である。ダイオキシン汚染土壌を掘削した際の封じ込め工法として適用を考えている。
遮水壁工法	遮水壁を汚染区域の周辺に設置してダイオキシン類の汚染経路の遮断および地下水流の制御によりダイオキシン類をその遮水壁領域内に留める封じ込め工法である。ダイオキシン類汚染土壌の掘削を伴わない封じ込め工法として適用を考えている。
固化工法	ダイオキシン類汚染土壌をセメント系の固化材の添加により安定処理実施し、土壌の移動・拡散を防止する封じ込め工法である。セメントで安定処理することにより、土壌の風による飛散や表流水等による流出が防止可能となる。

(2)適用可能性

ダイオキシン類は水に溶けにくく、地盤中の土粒子に付着していることから、吸着性および遮水性等の特性をもつ材料による覆土・敷土工法の適用は可能であると考えられる。

(3)実施例

国内事例としては大阪府能勢町における実施が確認されている。また、諸外国でも数例実施されており、土壌中の移動が少ないため覆土のみで対応しているサイトもみられる。恒久的な対策としては不溶固化処理を行った上で、覆土・敷土を実施しているサイト、粘土ライナーのみならず複合遮水工(コンポジットライナー)を採用しているサイトも存在する。主な事例として、ニューヨーク州ラブ・キャナル(米)(暫定的:覆土工法)、テネシー州ジャクソン(米)(恒久的:不溶・固化工法&覆土・敷土工法)、セベソ(伊)(恒久的:覆土・敷土工法)、マルスベルク(独)等がある。

(4)課題

ダイオキシン類は油類などが浸入・混入している場合に、それらがキャリアになり移動するという報告がある。

3.3 遮水壁工法

(1)工法の概要

遮水壁工法には、以下の 2 タイプがある。特に浮き型遮水壁では、汚染の規模に応じて遮水壁の幅や長さを調整し、土粒子の移動を拘束できるの

で、遮水壁の仕様を合理的に定めることも可能である。

①根入れ型遮水壁：下部の難透水層に遮水壁を根入れする

②浮き型遮水壁：遮水壁を難透水層に根入れさせずに設置し、地下水の動きを制御する

(2)適用可能性

ダイオキシン類は水に溶けにくく、地盤中の粒子に付着していることから、粒子の移動経路を絶つ遮水壁工法の適用は可能であると考えられる。

(3)実施例

現在の所、把握していない。

(4)課題

ダイオキシン類は油類などが浸入・混入している場合に、それらがキャリアになり移動するという報告がある。また、海水が浸入した場合についても検討する必要があると考えられる。さらに遮水壁の耐用年数なども考慮する必要がある。

3.4 固化工法

(1)工法の概要

固化工法には原位置処理工法とプラント処理工法があり、現場の状況に応じた施工法の選択が可能である。前者は掘削せずに地盤中で汚染土壌を固化する工法であり、後者は一旦掘削した汚染土壌をプラントにより安定処理する工法である。

(2)適用可能性

ダイオキシン類は水に溶けにくく、地盤中の粒子に付着していることから、粒子の移動を制限する固化工法の適用は可能であると考えられる。

(3)実施例

敷土・覆土工法と併用された例として、テネシー州ジャクソン(米)がある。

(4)課題

固化処理した場合でも処理土の外部への露出は防ぐべきであり、敷土・覆土工法との併用が望ましい。また、セメントによる水和生成物にダイオキシン類が固定されることにより溶出が抑制される可能性があり、処分地等への保管時にリスクの低減になると考えられるが、同時に浄化処理に移行する時には前処理が必要になる可能性がある。

4. 結論

水域と陸域のダイオキシン類汚染の暫定対策を開発することを目的として、文献調査、実験などを行った結果以下の成果が得られた。

(1) 水域のダイオキシン類汚染底質対策工法として袋詰脱水処理工法は以下のような特徴を持つ。

a. 99.8%以上の有害物質を袋内に封じ込めることが可能

b. 土壌の有害物質含有量に関わりなくほぼ一定の割合での有害物質の封じ込め効果を発揮

c. 有害物質を比較的多く含む細粒分を凝集させることで袋材による細粒分の効率的なろ過を可能にすることから、凝集剤の添加により封じ込め効果は向上

d. 袋詰したダイオキシン類汚染土壌からのダイオキシン類の拡散・再溶出はほぼみられない

(2) 陸域のダイオキシン類汚染土壌対策工法として「敷土・覆土工法」、「遮水壁工法」、「固化工法」の3工法は汚染した土粒子が様々な外力の作用によって移動することを抑制するから、その適用可能性が認められた。一方、課題としては油類などの特殊なキャリアの存在やその影響を調査する必要があることが明らかになった。

参考文献

1) 建設省「官民連帯共同研究『地盤環境保全が他建設技術の開発報告書』」2000.3, pp.1

2) 国土交通省「平成13年度建設技術研究開発の概要」2001, pp.36-37

3) 建設省大臣官房技術調査室「発生土利用促進のための改良工法マニュアル」1997,12, pp104

4) 森、三木、小橋「袋詰脱水処理工法を用いた汚染土壌封じ込めに関する実験」2000.12, 第7回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.173-174

5) 森、三木、恒岡、小橋「袋詰脱水処理工法による汚染土壌封じ込めの適用性に関する一考察」2001.10, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, Ⅲ-B32

6) H.Mori, H.Miki & N.Tsuneoka (2002) "The use of geo-tube method to retard the migration of contaminants in dredged soil", Seventh International Conference on Geosynthetics

Ⅲ　流域における総合的な水循環モデルに関する研究

研究期間：平成 13 年度～17 年度
プロジェクトリーダー：水工研究グループ長　高須修二
研究担当グループ：水循環研究グループ（河川生態）、水工研究グループ（水理水文）

1.　研究の必要性

都市への人口集中や流域の土地利用の変化に伴い、降雨の流出および水利用の形態の変化、水質汚染や水辺の生態系変化など、水循環に関するさまざまな課題が生じている。これらの課題を解決するためには、治水・利水安全度の向上および水環境保全という国土管理上の問題を流域という視点でとらえて評価することが必要であり、そのためのツールとして総合的な水循環モデルの開発が求められている。

2.　研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では、流域で生じている水循環の機構や水循環の中で営まれる生態系の変化などの実態を把握し、その機構をモデル化することにより、流域における人間活動が水循環、水環境へ及ぼす影響を評価できる水循環モデルを開発すること、また、既存のモデルを含めた各種水循環モデルの選定による統合水循環モデルの構築手法を提案することを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

① 流域で生じている水循環の変化を把握するための水循環・水環境モニタリング手法およびデータベース構築手法の開発
② 流域や河川の形態の変化が水循環、水環境へ及ぼす影響の解明
③ 流域で生じている水循環の機構を表現できる水循環モデルの開発
④ 統合水循環モデル構築手法の提案

3.　個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

① 総合的な水循環モデルに関する研究（平成 13～17 年度）
② 都市河川流域における水・物質循環に関する研究（平成 11～16 年度）
③ 低水管理支援システム開発に関する研究（平成 12～15 年度）
④ 流域や河川の形態の変化が水環境へ及ぼす影響の解明に関する研究（平成 14～17 年度）

このうち、平成 13 年度は①、②、③の 3 課題を実施している。

4.　研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、これまでに実施してきた研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1)　流域で生じている水循環の変化を把握するための水循環・水環境モニタリング手法およびデータベース構築手法の開発

本目標に関しては、「都市河川流域における水・物質循環に関する研究」において、首都圏を対象として、水循環解析や物質循環解析に必要となる地形、地質、土地利用、植生、人口、農業、畜産、気象などに関する情報を収集し、GIS プラットホーム上にデータベースを作成した。また、茨城県谷田川流域を対象に、水循環解析用データを収集し、GIS プラットホーム上にデータベースを作成した。

また、「総合的な水循環モデルに関する研究」においては、各種モデルを比較評価するための検証用水文データベースの基本概念を設計し、多摩川水系大栗川流域のデータを用いて具体的な検証用水文データベースを構築し

た。

今後は、これらの成果をさらに発展させ、流域で生じている水循環の変化を把握するためのモニタリング手法およびデータベース構築手法の開発に結びつける予定である。

(2) 流域や河川の形態の変化が水循環、水環境へ及ぼす影響の解明

本目標に関しては、「都市河川流域における水・物質循環に関する研究」において、谷田川流域を事例として地下水位および地下水質の実態分析に着手した。一方、「低水管理支援システム開発に関する研究」においては、滋賀県野洲川流域を事例として、農地に係わる水問題を解決するため、検討すべき項目を抽出、整理した。また、森林の変化と河川流況の関係を把握するため、渡良瀬川草木ダム流域を対象として、関連する水文資料の分析に着手した。

これらの研究はいまだ研究の緒についた段階であるが、次年度以降、さらに研究を推進し、流域や河川の形態の変化が水循環、水環境へ及ぼす影響について明らかにしていく予定である。

(3) 流域で生じている水循環の機構を表現できる水循環モデルの開発

本目標に関しては、「総合的な水循環モデルに関する研究」において、既往の水循環モデルをリストアップし、その水文学的特徴とモデルの内容を整理するとともに、このうち代表的な6モデルについて、多摩川水系大栗川流域のデータより構築した検証用水文データベースを用いて洪水流出計算を実施し、各モデルの精度を評価することで、その適用範囲を明らかにした。今後は、パラメーターおよび計算諸条件の設定・調整方法についてさらに詳細な検討を加え、モデル評価の客観性を高める予定である。

また、「都市河川流域における水・物質循環に関する研究」においては、既往のモデルである分布物理型水循環解析プログラム（WEP モデル）の雨水流出計算・追跡機能を改良して、分布型汚濁負荷流出モデルを構築した。さらに、千葉県海老川流域を対象として本モデルの検証を行い、平常時における河川水中の BOD と T−N の濃度の変動の再現性を確認した。今後は、対象とする汚濁負荷項目を増やすとともに、地下水を含んだ物質循環モデルへと拡張する予定である。

「低水管理支援システム開発に関する研究」においては、河川の取排水系統、貯水池での調整、流域からの流入などのモジュールを統合した低水管理支援システムの開発を目指しているが、今年度は、土木研究所で開発した水配分・水質統合解析シミュレーターを含めて内外4つのツールを比較し、今後のモデル開発にあたっての方向性を定めた。

(4) 統合水循環モデル構築手法の提案

本達成目標は、上記の目標に対する成果を受けて、統合水循環モデルの構築手法を提案するものであり、本重点プロジェクト研究の後半にその実施を予定している。

3.1　総合的な水循環モデルに関する研究

研究予算　：運営費交付金（一般勘定）
研究期間　：平 13～平 17
担当チーム：水工研究グループ（水理水文）
研究担当者：吉谷　純一、深見　和彦、松浦　直

【要旨】
流域の特徴や問題等に応じて、適切な水循環モデルを組み合わせて総合的なモデルを構築する手法の提案に向けて、13 年度は、各種水循環モデルを評価するための検証用水文データベースを開発し、各種モデルの適用範囲や精度などを流量の再現性で評価する手法を提案した。多摩ニュータウンの大栗川流域を対象としてデータベースを作成して複数モデルによる洪水流出計算を行い、評価手法の適用性を確認した。
キーワード：総合的な水循環モデル、評価手法、ガイドライン、データベース

1.　はじめに

都市化や農業形態・流域植被等の変化が進展する流域、あるいは流量データの無い流域での水循環分析のために、国内外でさまざまな解析手法が開発されている。しかしながら、実際に解析を行う際に、どの手法を用いるのが最も適当かの判断材料が存在しない。そこで、各種手法の適用性を評価し、流域の特徴や解析目的、データの制約等に応じて、適切な水循環モデルを連携させた総合的な水循環モデルを提案できるようにすることが必要である。

本研究は、流域の特徴や問題等に応じて各種水循環モデルを選定・組み合わせることにより、総合的なモデルを構築するためのガイドラインを作成することを目的とし、各種水循環モデルを評価するための検証用水文データベースを開発し、モデルの適用可能範囲や精度などを流量の再現性で評価する手法を提案したものである。

13 年度は、最初に、既往解析モデルをリストアップし、その水文学的特徴とモデルの内容を整理して、各モデルの適用範囲等を明確にした。次に、各種モデルを比較評価するための検証用水文データベースを設計し、ケーススタディ流域において代表的な複数モデルによる洪水流出計算を実施して、各モデルの適用性や精度の評価を行った。

2.　研究方法

2. 1　既往解析モデルの調査

国内外の既往水循環解析モデルをリストアップして、モデルの構造や対象水文素過程、適用実績等を調べた。調査対象は、日米を主とする全世界のモデルとし、既存の報告書やインターネットの情報を元に調査した[1)~9)]。また、この種の解析モデルが社会的に広く認知され、公的機関発注の解析などにおいてモデルアプリケーションとして指定されるケースがあるかについても調査を行った。

2. 2　検証用水文データベースの設計

各種モデルの性能、適応性を容易に比較検証することを可能とする水文データベースの設計を行った。データベースアプリケーションには市販のソフトを使用し、サーバー・クライアント方式の利用形態を想定した。また、ケーススタディ流域として多摩ニュータウンの多摩川水系大栗川流域(図－1)を選定し、実際に検証用水文データベースを構築した。



図－1　多摩川水系大栗川流域

2. 3　複数モデルによる洪水流出計算

2.1 で調査した既往の解析モデルの中から、国内において使用実績の高い 6 モデル(合理式合成法、GIS 活用合成合理式、準線形貯留型モデル、等価粗度法、貯留関数法、土研分布モデル)を選定して、2.2 で作

成した水文データベースを利用して試験流域における洪水流出計算を行った。計算は雨量、流量データの揃っている洪水9イベント(表－1)について実施し、その結果を評価した。

表－1 検討対象洪水と雨量データ存在状況

雨量観測所 / 洪水イベント	青木場	別所	霞ヶ関橋	車橋	車橋A	南大沢	長池	永山	大栗川橋	諏訪	多摩斎場	瓜生
1971/8/30	○	○						○				○
1972/7/10	○	○										
1978/7/10	○	○				○						
1979/10/17	○	○	○	○					○		○	
1981/4/19	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	
1981/10/22	○	○	○		○	○	○		○	○		
1982/7/30	○	○			○	○	○			○	○	
1982/11/30			○		○	○			○		○	
1983/8/14	○	○			○	○					○	

3. 研究結果

3. 1 既往解析モデルの調査結果

国内外で開発されている水管理モデル、流出モデル、流量水質モデルをリストアップし、34のモデルについてその概要を整理した。

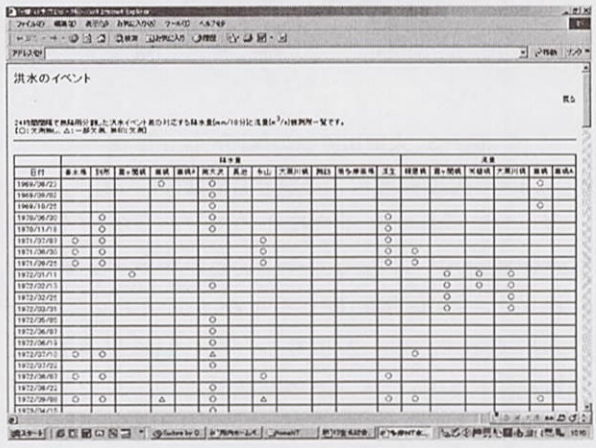
水文流出解析モデルを河川の不等流・不定流計算モデルなどと組み合わせて実務応用を容易にしたアプリケーションソフトの中には、米連邦政府が開発したプログラムエンジンを使用しているものが多い。モデルの頒布形態は、無償もしくは必要経費のみの徴収という形が多く、また、それらのプログラムエンジンに、私企業がGUI部分を付加して有償にて販売しているものも多くあった。

流出の素過程と流域スケール、時間スケール、流域特性を対比して、収集した情報をもとに各モデルの適用範囲を整理した。その結果、多くのモデルは、時空間スケールや流域特性に関して汎用性を持たせてあり、ある対象に特化したモデルは少なかった。

水理水文分野において、特定のモデルを公的機関が認定・推奨している事例としては、米国危機管理局(FEMA)が、洪水ハザードマップ作成に使用するモデルを認定している事例があった。認定要件としては、①政府機関により検査、試験、容認されていること。②ソースコード、マニュアルを含めて十分な解説書が用意されていること。③FEMAおよびハザードマップ策定によって影響を受ける当事者・関係者が利用できること、が示されている[10]。2001年9月現在で、洪水ハザードマップ策定のために適用することが認定された水文解析分野のモデルは12モデルあるが、そのほとんどが米国の連邦機関(USACE,USGS,USDA,USEPA,FEMA)のモデルであり、それ以外のモデルは2つのみであった。

3. 2 検証用水文データベースの構築

水循環モデルの性能評価に必要となるデータの種類を整理し、それらを一元的に管理するデータベースを設計した。データベースはサーバー・クライアント方式の利用形態として、サーバーマシンでデータベース用のWebを発行することにより、クライアントマシンからの閲覧が可能となる様にした。データベースアプリケーションとしてはMicrosoft® Access2000を利用し、データのダウンロードも可能とした。データフォーマットは国土交通省の水文・水質データベースに準拠し、設計したデータベース構造に基づき、多摩川水系大栗川流域(図－1)を対象とした水文データベースを構築した。図－2に構築したデータベースの画面一例を示す。



図－2 検証用データベース画面例

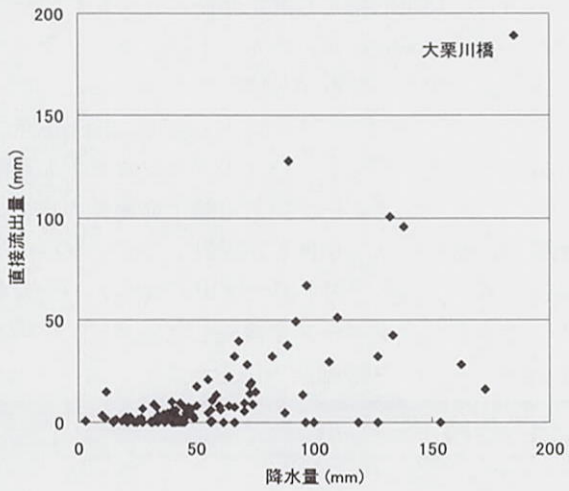
3. 3 複数モデルによる洪水流出計算結果

国内で使用実績の多い洪水流出計算モデル(6モデル)を選定して、3.2で構築した水文データベースを使用して多摩ニュータウンにおける洪水流出解析を実施した。計算結果の客観性を高めるため、各モデルのパラメータ設定にあたっては、各手法においてこれまで確立されてきたパラメータの一次近似値を用いる場合と、本流域においてパラメータの調整を行った場合の2通り実施した。

3. 3. 1 大栗川流域の流域特性

大栗川流域は、多摩ニュータウン開発時に流出試験地が設置され、細密な水文観測が実施された流域である[11]。流出計算を行う前に、3.2で構築した水文データベースの雨量、流量データ等を用いて、対象地域の降雨－流出特性について整理した。図－3に、流域内の5つの流量観測地点のうち、最上流端の大栗川橋について、1969～83年までに観測されたデータから降雨－流出関係を整理したものを示す。図－3および他地点の整理結果より、報恩橋地点では飽和雨量が明確ではないものの、大栗川橋を含む

他の 4 地点では、概ね 40mm 程度の飽和雨量を示すことがわかった。また、飽和雨量に達するまでの一次流出率は 0.1～0.2 程度と見積もられた。



図－3 大栗川流域の降雨～流出関係

3. 3. 2 一次近似値による洪水流出計算

表－1 に示した 9 洪水について、パラメータの一次近似値を用いて各モデルによる再現計算を実施した結果を、誤差関数(表－2)とハイドログラフ(図－4)の形で示す。表－2 より、一次近似値を適用した計算結果においても、誤差関数値は 0.03 を下回る(精度が高い)場合が多く見られた。計算に用いた 6 モデルの、全洪水イベント、全観測地点でのハイドロ再現性を評価すると、最も高い精度を示したモデルは、貯留関数法の 17 ケース(17 ハイドロ)で、次に土研分布モデルの 11 ハイドロ、準線形貯留型の 5 ハイドロ、等価粗度法の 4 ハイドロ、GIS 活用合成合理式と合理式合成法の 2 ハイドロとなった。

パラメータの一次近似値は、過去の適用事例の実績から選定されていることが多いことから、この順番は、各モデルの適用実績の多さによるものと思われる。しかしながら、合理式合成法は実績が多いにも関わらず成績が悪いのは、初期損失雨量の概念が欠けているためである。

3. 3. 3 パラメータ調整後の計算結果

モデルの再現性が向上する様に、各モデルのパラメータを調整して流出計算を行った。ここで、表－2 中のハッチをかけた洪水イベントは、各地点の流出率の関係から観測値の精度が高いと判断された洪水で、パラメータの調整においてはこのハイドログラフに着目した調整を行った。

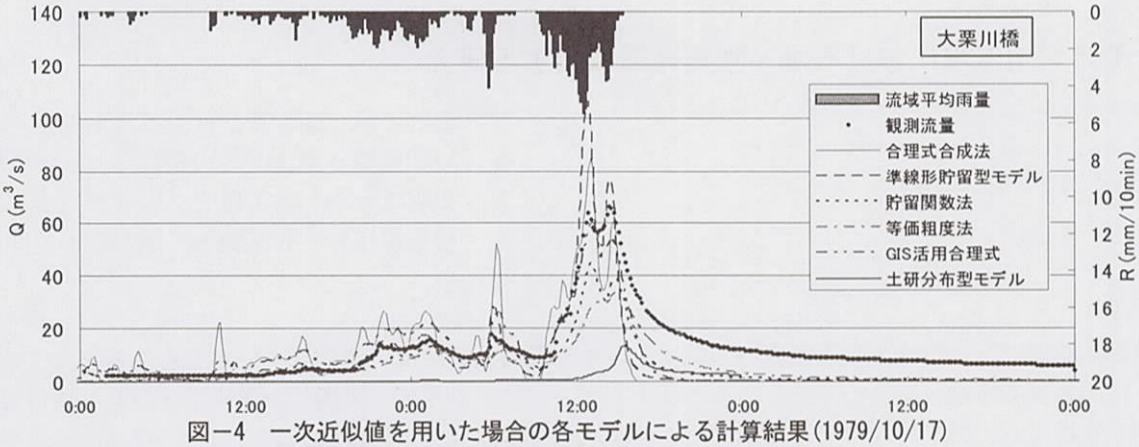
パラメータ調整後では、貯留関数法が最も成績が良く(13 ハイドロ)、次に GIS 活用合成合理式(10 ハイドロ)、準線形貯留型(9 ハイドロ)、合理式合成法(5 ハイドロ)、土研分布モデル(4 ハイドロ)、そして、等価粗度法の 3 ハイドロとなった。以上より、初期損失を考慮しないモデルでも、パラメータの選定次第では良い再現性を発揮することが示された。

一次近似値、パラメータ調整後の両ケースの結果から各モデルの精度、適用性を評価すると以下の様になる。

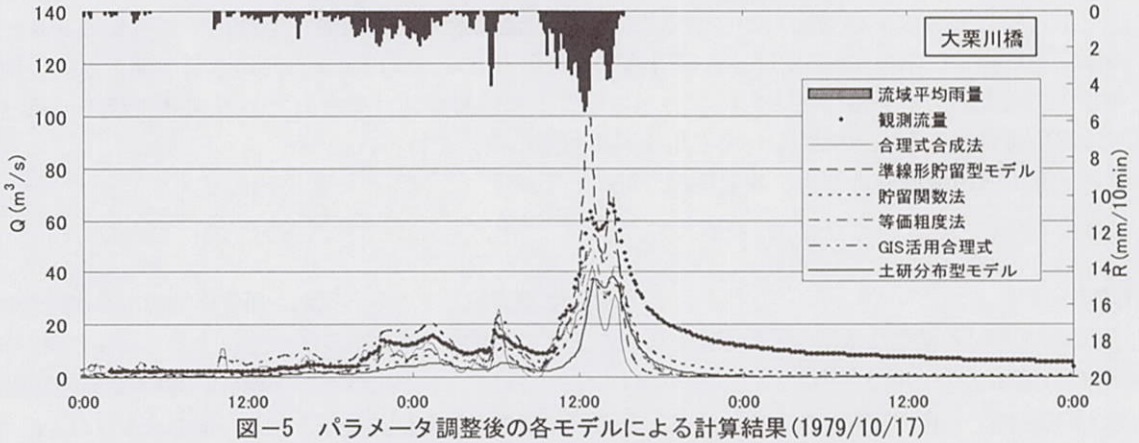
- 降雨の初期損失算定に影響を及ぼす、遮断、窪地貯留を考慮していない合理式合成法、GIS 活用合理式合成法は、二山洪水などの複数のピークを持つ場合に、初期の流量を的確に表現することは困難である。
- 合理式合成法と GIS 活用合理式合成法を除く手法では、降雨損失の算定において、f_1～R_{sa} モデルを採用しているが、イベント毎にその値を変えることなく高い精度を示す。これに対して、合理式で採用した流出率による損失降雨の算定では、降雨規模の異なるイベントでは流出率を変えざるを得ない。
- 表面流出の計算手法として一次貯留効果を表現しにくい手法は合理式合成法であり、次いで準線形貯留型、貯留関数(リザーブ定数)、そして最も貯留効果を表現しやすいのは等価粗度法と土研分布モデルである。

表－2 各モデル計算結果の誤差関数による評価(パラメータ調整は網掛けしたイベントデータで実施)

	イベント生起日	合理式合成法		準線形貯留型		貯留関数		等価粗度法		GIS活用合成合理式		土研分布モデル	
		一次	調整	一次	調整	一次	調整	一次	調整	一次	調整	一次	調整
大栗川橋	1971年08月30日	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
	1972年07月10日	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
	1978年07月10日	0.912	0.912	0.846	0.846	0.211	0.211	0.284	0.284	0.894	0.153	0.057	0.975
	1979年10月17日	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.008	0.005
	1981年04月19日	0.186	0.023	0.040	0.017	0.007	0.008	0.019	0.017	0.201	0.031	0.102	0.033
	1981年10月22日	0.039	0.021	0.027	0.022	0.015	0.014	0.022	0.020	0.044	0.028	0.095	0.016
	1982年07月30日	0.392	0.254	0.216	0.141	0.105	0.093	0.048	0.056	0.369	0.123	0.046	0.058
	1982年11月30日	0.013	0.013	0.011	0.011	0.020	0.020	0.028	0.028	0.013	0.017	0.055	0.029
	1983年08月14日	0.116	0.116	0.045	0.045	0.011	0.011	0.026	0.026	0.142	0.034	0.109	0.034



図－4　一次近似値を用いた場合の各モデルによる計算結果(1979/10/17)



図－5　パラメータ調整後の各モデルによる計算結果(1979/10/17)

・ パラメータの調整においては、流域斜面と河道内遅れ時間を左右するパラメータを変化させても結果に大きな差は生じなかった。これは、流域面積が約 42km^2 と比較的小さいためであると考えられる。

4. まとめ

総合的な水循環モデルを構築するためのガイドラインを作成することを目的として、各種水文モデルの適応性を評価するための検証用データベースの開発、試験流域での洪水流出計算を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 多くの水循環モデルは、時空間スケールや流域特性に対して汎用性を持たせた構造となっている。

2) 米国危機管理局が洪水ハザードマップ策定に使用するモデルアプリケーションを指定している事例があった。

3) 水循環モデルの性能評価に必要となる検証用水文データベースの設計ができた。

4) 合理式合成法、GIS 活用合成合理式、準線形貯留型モデル、等価粗度法、貯留関数法、土研分布モデルによる洪水流出計算では、一次近似値を用いた場合でも精度が高い場合が多くあった。

今後は、モデル評価の客観性を高めるため、パラメータおよび計算諸条件の設定・調整方法について、詳細な検討を行う必要がある。

参考文献

1) 都市小流域における雨水浸透、流出機構の定量的解明研究会:「都市域における水循環系の定量化手法－水循環系の解明－」、2000 年 12 月

2) Office of Technology Assessment : “Use of models for water resources Management, Planning, and Policy”, 1982

3) Ralph A. Wurbs : “Computer Models for Water Resources Planning and Management”, 1994

4) “Benchmarking and Scoping Study of Hydraulic River Models”, University of Bradford R&D Technical Report W88

5) World Bank : “Operational Manual”

6) Asian Development Bank : “Operational Manual –Technical Assistance-“

7) Harry C. Torno : “Computer Applications in Water Resources”, 1985

8) Ven Te Chow : “Handbook of Applied Hydrology”, 1964

9) Danish Hydraulic Institute : “DHI Software”

10) FEMA : “Policy for Accepting numerical Models for Use in the NFIP”, http://www.fema.gov/nfip/summary.htm

11) 都市水文学研究会 :「多摩ニュータウン流出試験地調査報告書」、1986 年 3 月

3.2　都市河川流域における水・物質循環に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）
研究期間：平 11～平 16
担当チーム：水工研究グループ（水理水文）
研究担当者：吉谷純一、木内豪、賈仰文

【要旨】
都市河川流域における健全な水循環系の保全と再生を図るためには、流域スケールで自然系と人工系における水と汚濁物質の移動、循環の実態を明らかにするとともに、汎用的・実用的な予測モデルと各種情報のデータベースを構築し、効果的な対策を提示する必要がある。本研究では、茨城県谷田川、千葉県海老川をフィールドとして水・物質循環の実態を明らかにするとともに、流域水・物質循環を定量化できるシミュレーションモデルの確立を目指す。平成 13 年度は、谷田川流域を対象として、河川流量、河川水質、地下水位、地下水質のモニタリング結果の分析を行うとともに、分布物理型水循環解析プログラムである WEP モデルに組み合わせる分布型汚濁負荷流出モデルを構築し、海老川流域を対象に検証を行った。
キーワード：都市河川流域、水循環、物質循環、WEP モデル

1．はじめに

都市河川流域における健全な水循環系の保全と再生を図るためには、流域スケールで自然系と人工系における水と汚濁物質の移動、循環の実態を明らかにするとともに、汎用的・実用的な予測モデルと各種情報のデータベースを構築し、効果的な対策を提示する必要がある。本研究では、茨城県谷田川、千葉県海老川をフィールドとして水・物質循環の実態を明らかにするとともに、流域水・物質循環モデルの構築を目指す。13 年度は谷田川流域の水循環・物質循環の解明の一環として地下水位、地下水質の実態分析を行った。また、水・物質循環モデルの構築に関連して、非点源汚濁負荷の流出モデルを作成し、海老川流域で検証した。

2．谷田川流域の水循環の実態

谷田川流域（面積約 166km^2）内では、東京とつくばを結ぶつくばエクスプレス（常磐新線、2005 年開通予定）の沿線開発が計画されており、今後、急激な都市化が流域の水循環・物質循環に影響を及ぼすことが懸念される。そのため、開発以前から流域内の水文・気象に関する様々なデータを蓄積しながら、流域条件の変化が水循環に及ぼす影響をモニタリング及びモデリングにより評価する必要がある。

谷田川流域では上水や農業用水として地下水に依存している量がかなりあることや、浅層地下水が河川の基底流量の主たる構成源となっていることから、1999 年より、河川内の流量、水質の動態のみならず地下水の実態調査を実施してきた。また、研究学園都市が建設された直後の 1975 年前後に筑波大学によって同様の調査が行われている。本研究ではこの両時点の調査結果の比較を行い、過去 25 年間の地下水位及び地下水水質の変化の実態を明らかにするとともに流域の土地利用との関係について分析した。



図-1　流域概要及び地下水観測井戸位置図

2．1　谷田川流域の概要

谷田川流域は茨城県の西部に位置し、流域関係市町村としてつくば市、茎崎町、谷和原村、伊奈町、牛久市、龍ヶ崎市がある。このうち、つくば市は流域の約 70%を占め、次いで茎崎町が流域の 12%を占める。

谷田川流域の概要及び地下水観測井戸の位置を図-1 に示す。流域の地形・地質、土地利用及び人口は以下のとおりである。

2.1.1　地形・地質

谷田川流域の地形は、筑波・稲敷台地と台地を刻む谷田川の開析谷によって特徴づけられる。筑波・稲敷台地は、水戸から千葉に広がる常総台地の一部であり、標高は T.P.+30m～+20m である。台地の北～東側を桜川低地、西～南側を小貝川低地に区切られており、北西から南東へ次第に標高が低くなっている。この台地面傾斜に沿って稲荷川、谷田川、西谷田川がほぼ平行して開析谷をつくり、牛久沼に流入している。

表-1　地質層序表

時代			地層名		記号	構成	地下水区分	分布地・分布標高(T.P.m)
現世			－			盛土/埋土		
新生代	第四紀	完新世	沖積層		Ap	腐植土・有機質土		
					Ac	粘土・シルト		
					As	砂	不圧	沖積低地
					Ag	砂礫・礫		
		更新世	新期ローム層（立川，武蔵野相当）		tm	ローム	不圧	台地表層部
			常総層	常総粘土層	tc	凝灰質粘土		
				龍ヶ崎層	Dp-1	腐植土・有機質土		
					Dc-1	粘土・シルト		
					Ds-1	砂	主に不圧	+20m～+10m
					Dg-1	砂礫		
			下総層群	成田層（下総層群上部）	Dc-2	粘土・シルト		
					Ds-2	砂	主に不圧	+20m～+10m
					Dg-2	砂礫		
				下総層群下部（藪層，地蔵堂層）	Dp-3	有機質土		
					Dc-3	粘土，シルト		
					Ds-3	砂	被圧	-20m～-40m
					Dg-3	砂礫		
					Dc-4	粘土，シルト		
					Ds-4	砂		
					Dg-4	砂礫		
	第三紀	鮮新世	上総層群		Dg-5	砂礫	被圧	-70m以深

谷田川流域とその周辺の地質層については、筑波大学構内及び国土地理院地殻活動観測井のボーリング記録によると、それぞれ深度 477m と 487m で基盤岩類に達している。表-1 の地質層序表に示すとおり岩盤からの地層は、上総層群、下総層群、常総層、関東ローム層となっており、谷部には沖積層が分布する [1]。また、表-1 中に主な帯水層を示す。常総層及び下総層群の成田層を帯水層とする地下水は主に不圧であるが、常総層中のシルト層あるいは常総粘土層によって被圧されている場合もある。本研究では、沖積砂層から成田層までの帯水層中の地下水を浅層地下水とし、下総層群下部の砂・砂礫層以下の帯水層中の地下水を深層地下水とする。下総層群下部の砂・砂礫層の帯水層は、筑波地域において比較的浅い位置に存在する被圧帯水層として簡易水道、農業用に広く利用されている [2]。

2.1.2　土地利用及び人口

国土数値情報（1976 年調査）と第五期細密数値情報（1994 年調査）に基づき、谷田川流域における各年の土地利用割合を算定した(表-2)。これより、建物、道路等からなる都市域の面積割合は 9%から 30%へと増加し、森林・荒地の面積割合は26%から16%へと減少している等、流域の都市化が進行していることが分かる。今後は図-1 中に示す総面積約 13km^2（流域面積の 8%に相当）の 5 地区において、つくばエクスプレスの沿線開発が計画されている。

地域メッシュ統計（1995 年国勢調査）で求めた谷田川流域内の現況人口は 12.6 万人であるのに対して、沿線開発計画が検討されている 5 地区のうち、4 地区の計画人口は、合計で 7.5 万人と想定されている。従って今後、谷田川流域の都市化が急激に進展することが予想される。

表-2　谷田川流域の土地利用割合

土地利用	1976年	1994年
田	15%	14%
畑	34%	33%
森林・荒地	26%	16%
都市域	9%	30%
空地・造成中地	11%	2%
河川・湖沼	5%	4%

2．2　地下水観測の概要

2.2.1　地下水位調査

調査は表-3 に示すように 1999 年、2000 年において計 5 回実施した。本調査では当初、1970 年代に筑波大学が調査を実施した井戸 [3]を測定対象とした。しかしながら、上水道の整備の進展や井戸枯れなどにより、当時の調査井戸が現存してない場合もあり、また流域全体の地下水の実態を把握するため、2000 年調査では下流の牛久沼まで網羅できるよう新たに井戸を追加選定している。調査対象井戸 64 地点の内、浅層地下水から取水する浅井戸は 59 箇所、深層地下水から取水する深井戸は 5 箇所である。井戸の種別に関しては、深井戸はボーリング井戸で、浅井戸は主に丸井戸である。

2.2.2　地下水水質調査

地下水水質については、多項目水質チェッカーを用いて水温、pH、電気伝導度、溶存酸素を現地測定するとともに、井戸水を採取し水質分析を行った。水質分析項目は、地下水の水質組成及び地下水に含まれる全窒素の濃度を把握するため Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 、NH_4^+、Cl^-、NO_3^-、NO_2^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-とした。2000年の調査では、新井橋、陣屋橋、中谷原橋の各地点の河川水についても同様の水質調査を行った。

表-3　地下水位調査の概要

調査期間	天候	調査地点
1999.10.6～10.8	曇り	45地点（浅井戸40、深井戸5）
1999.12.9～12.11	晴れ	48地点（浅井戸43、深井戸5）
2000.5.26～5.27	晴れ	63地点（浅井戸58、深井戸5）
2000.7.28～7.29	曇り	64地点（浅井戸59、深井戸5）
2000.11.10～11.11	晴れ	63地点（浅井戸58、深井戸5）

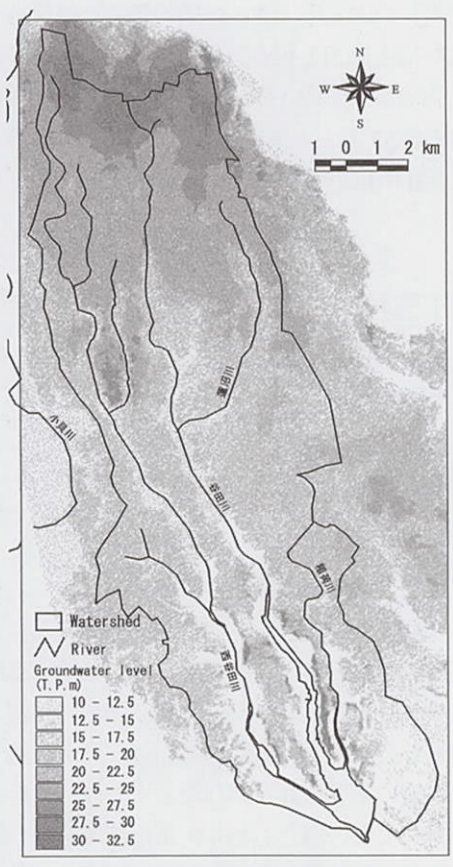


図-2　地下水位分布図

2．3　観測結果と考察

2.3.1　地下水位の変化

浅井戸の地下水位調査結果を用いて地下水位分布図を作成した。地形条件を反映させるため、各井戸の地下水位調査結果を内挿して地盤高から地下水面までの深さのメッシュデータを50mメッシュで作成し、地盤高に関する50mメッシュデータと重ね合わせて地下水位を求め、地下水位分布図を作成した。図-2に2000年11月の例を示す。各調査時期の地下水位分布図より、浅層地下水位は、谷田川流域の北端で高く、徐々に南へ傾斜しており、流域における浅層地下水界は流域界とほぼ一致していると推定された。

次に、人為的な影響が比較的少ないと考えられる非潅漑期を対象に浅層地下水位の経年変化について分析を行った。図-3には1999年12月地下水位から筑波大学の測定[3]による1976年2月地下水位を差し引いた水位変化図を示す。比較したデータには、測定前1週間程度無降雨で地下水位が安定していると考えられるものを採用した。図-3 より、地下水位が全体的に下がっていると共にところによっては1m以上低下している領域も見られる。地下水位の低下量は、平均して0.4m程度である。浅層地下水位は元来降雨等の気象条件に応じて変動するものであるが、このような低下量の面的な違いが生じた要因として、都市化による浸透域の減少、不浸透域の拡大と研究学園都市建設関連による河川・排水路整備が進んだことなどが挙げられる。

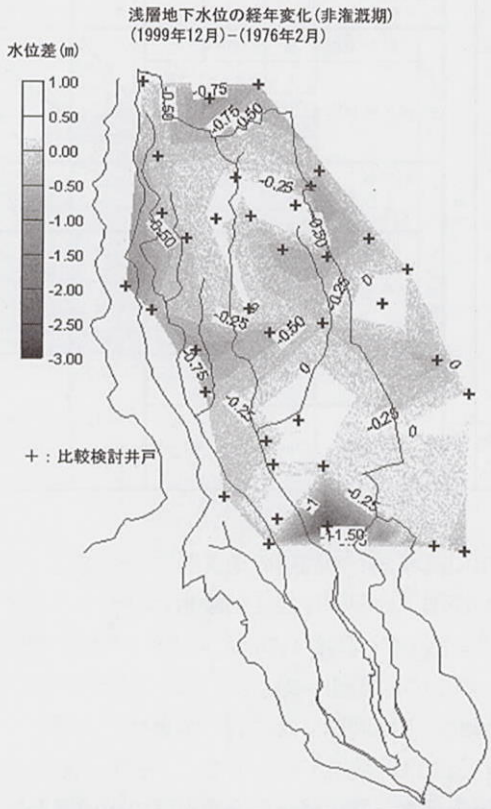


図-3　1999年12月と1976年2月の浅層地下水位の差

表-4 土地利用面積割合の変化

低下量(m)	0未満			0～0.75m			0.75m以上		
検討範囲に占める割合	10%			81%			9%		
土地利用区分	76年	94年	変化量	76年	94年	変化量	76年	94年	変化量
田	9%	9	0	13	11	-2	11	8	-3
畑	42%	37	-5	39	35	-4	39	35	-4
森林・荒地	13%	10	-3	15	12	-3	13	12	-1
空地・造成中地	10%	2	-8	12	2	-10	16	2	-14
都市域	25%	41	+16	20	39	+19	20	42	+22
河川・湖沼	1%	1	0	1	1	0	1	1	0
浸透域（田+畑+森林・荒地+空地・造成中地）	74%	58	-16	79	60	-19	79	57	-22

地下水位の低下量と土地利用変化の関係をみるために、図-3 の地下水位変化図の範囲で地下水位低下量が、0m未満、0～0.75m、0.75m以上の 3 つの領域に区分し、領域毎に 1976 年（国土数値情報）と 1994 年（細密数値情報）の土地利用を算出した（表-4）。表-4 から、地下水位の低下量が大きい領域ほど、田、畑、森林・荒地及び空地・造成中地を合わせた浸透域の面積割合の減少が大きく、都市域の面積割合の増加も大きいことが判明した。

2.3.2 地下水水質及び河川水質の変化

1975 年 11 月調査結果と 2000 年 11 月調査結果を用いて地下水水質（硝酸態窒素）の経年変化を図-4 に示した。図-4 より NO_3^- の増加傾向が読み取れる。

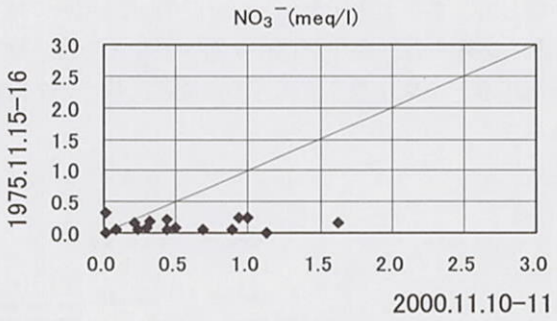


図-4 水質比較図(NO_3^-)

谷田川流域内における農業系の土地利用変化をみるため、図-5 に流域内の作物別収穫面積の経年変化を示す。流域内の作物別収穫面積は、農業関連の統計資料[4)5)6)]に記載の自治体ごとの作物別収穫面積と流域に占める自治体の面積から推定した。図-5 より、稲などの収穫面積は減少しているが、芝畑は増加傾向にあり、1998 年の面積割合は 1975 年に比べ約 2 倍になっている。また、流域全体の森林の面積割合は、1976 年（国土数値情報）は 26%であったが、1994 年（細密数値情報）は 16%へと減少している。NO_3^- の増加は、長年にわたる肥料の土壌中への蓄積や森林・水田の減少に伴う希釈・窒素固定・脱窒作用の低下の影響が考えられる。

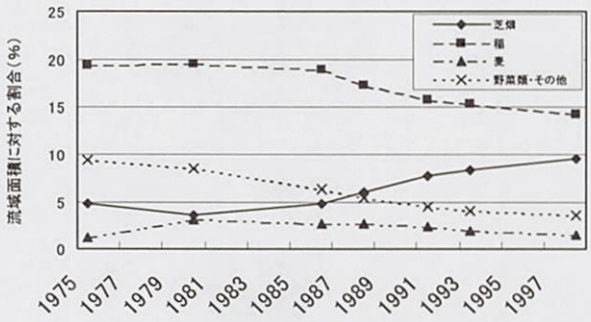


図-5 作物別収穫面積の経年変化

2000 年の調査結果によると、NO_3-N（硝酸態窒素）と NO_2-N（亜硝酸態窒素）の合計が地下水環境基準値の 10mg/l を超えた地点は、潅漑期、非潅漑期を通じて調査地点数の 3~4 割程度と比較的多くかつ広範囲にわたっており、濃度の最大値は 34.3mg/l となっている。図-6 に 2000 年 5 月、7 月、11 月の NO_3-N 濃度分布図を示す。これより、季節を経るに従って NO_3-N 濃度が高い地域が広がる傾向が見られる。また、11 月において NO_3-N 濃度が非常に高い地域が存在しており、これは周辺の土地利用において畑の割合が多く、森林の割合が少ないこと及び潅漑用水による希釈がないことなどが関連していると考えられる。

一方、河川の水質変化に関して、谷田川丸山橋地点(陣屋橋より約 2.7km 下流)の全窒素濃度[7)]の変動状況を図-7 に示した。各年の最大値に着目すると 1977 年から 1991 年ごろまでは増加傾向、それ以降は一定している傾向が見られる。また、季節変化として非灌漑期に濃度が高い傾向が見受けられる。非灌漑期に全窒素濃度が高い要因として、非潅漑期は河川水が農業用水等で希釈されないこと、河川水の反復利用による水田での窒素浄化がないこと、硝酸態窒素濃度が高い浅層地下水がより多く河川へ流出したことが考えられる。別途検討されている谷田川の現況水循環解析結果[8)]では、地下水の河川への流出が低水流量に対して約 6 割あると推定されていることから、地下水の水質の影響が河川に現れやすいと考えられる。

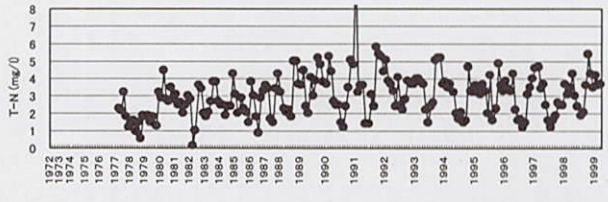
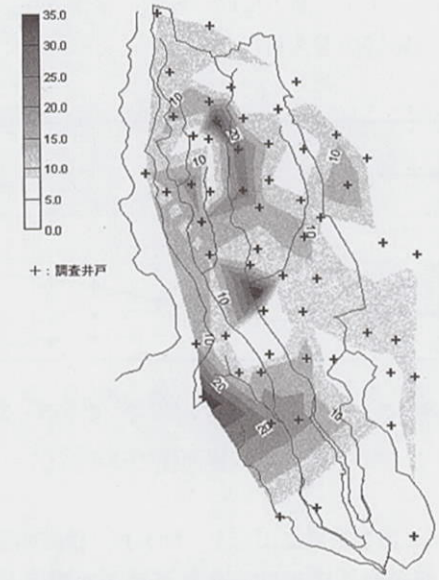
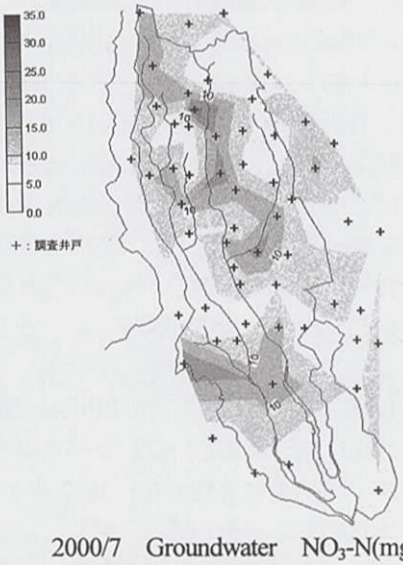


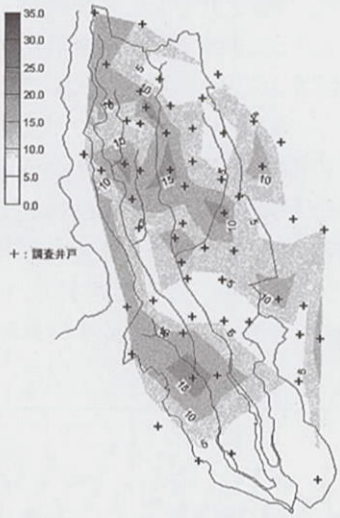
図-7 谷田川 丸山橋地点における全窒素濃度の変動状況



2000/5　Groundwater　NO_3-N(mg/l)



2000/7　Groundwater　NO_3-N(mg/l)



2000/11　Groundwater　NO_3-N(mg/l)

図-6　2000 年 5 月、7 月及び 11 月の NO_3-N 濃度分布

3．分布型汚濁負荷流出モデルの構築

都市河川流域では、都市開発により洪水時の流量が増加し、流出時間が短くなる一方で、平常時の水量が減少し、水質が悪化している。都市化の影響と対策の効果を検討するためには、流域の水量･水質をモニタリングするとともに、都市河川流域の水循環・物質循環を解析できるシステムが必要である。本研究では、水循環解析用分布型物理モデルである WEP（Water and Energy transfer Process）モデルの雨水流出計算・追跡機能を利用して、ノンポイント汚染源の流出解析を行う分布型汚濁負荷流出モデルを構築した。

3．1 雨水流出モデル

WEP モデルを利用する。WEP モデルは複雑な土地利用を有する流域での水・熱輸送過程を解析するための分布型物理モデルである。このモデルは千葉県海老川流域と茨城県谷田川流域の水循環解析に適用しながら、検証と改良を進めている。詳細は文献 8、9 を参照されたい。モデルの鉛直構造と平面構造を図-8、9 に示す。洪水時における表面流出に関しては、地盤高情報から落水線を設定して最上流端メッシュから河川までの追跡計算を kinematic wave 法に基づき行う。河道内の流れは dynamic wave 法により解析する。また、地下水帯水層は地質条件により多層に分け、各帯水層においては表層または上方帯水層からの涵養量、下方への浸透量、井戸の揚水量を考慮して、水平２次元 Boussinesq 方程式を用いて地下水流れを表現した。河川が存在するメッシュでは、地下水と河川水とのやり取りは両者の水位差に基づいて計算される。

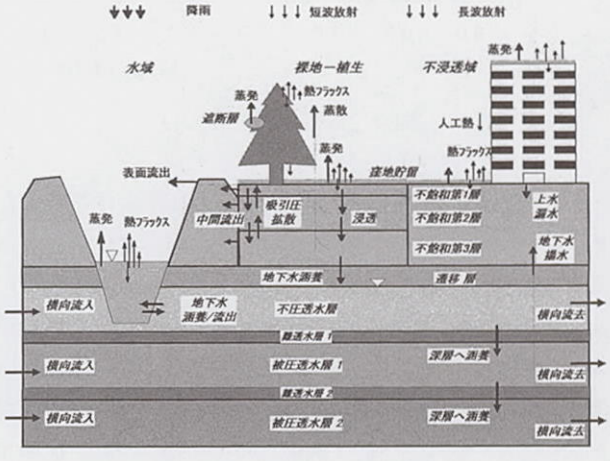


図-8　対象とする水・熱輸送過程とモデルの鉛直構造

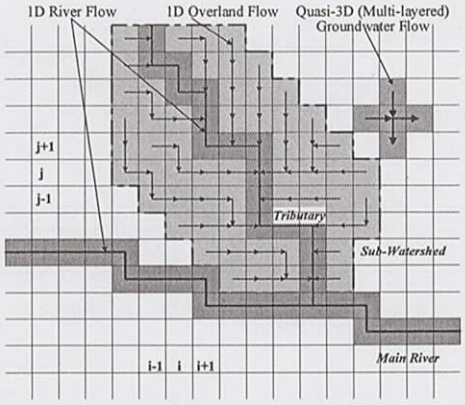


図-9　WEP モデルの平面構造

3．2 汚濁負荷流出モデル

汚濁負荷流出モデルに関する既往の研究を概観すると、土研モデル、和田モデル、STORM と SWMM など、いくつかのモデルが提案されている [10]。さらに、水質改善対策の効果を検討するための分布型土研モデル [11] と和田メッシュモデル [12] が提案されている。本研究では、和田ら [12] 及び渡辺ら [11] を参照し、以下の路面負荷及び生活排水路負荷の堆積・流出モデルを提案する（図-10）。

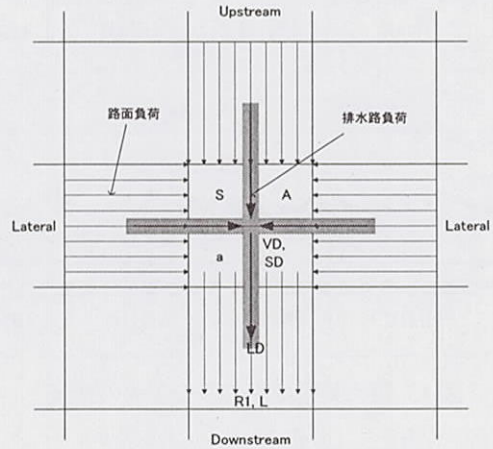


図-10　路面負荷と生活排水負荷の計算

3.2.1 路面負荷堆積・流出のモデル

連続式：

$$dS/dt = -K \cdot S + a \cdot A \cdot F_u \cdot \beta + R1 \cdot A \cdot PU_{rain} + Rp \cdot Ap \cdot PU_{pad} + \sum L_{lat} + L_{up} - L \quad (1)$$

運動式：

$$L = C_R R1 \cdot S^{mR} \quad (2)$$

ここで、S＝路面堆積負荷量（g）、K＝路面負荷減衰係数（1/s）、a＝路面負荷発生量（g/m^2・s）、A＝メッシュ面積、Fu＝都市域面積率、β＝清掃率、R1＝表面流出(mm/s)、PUrain＝降雨の原単位（mg/m^3）、Rp＝水田排水(mm/s)、Ap＝水田面積、PUpad＝水田排水の原単位（mg/m^3）、L＝路面流出負荷量（g/s）、Llat＝横流入負荷量（g/s）、Lup＝上流流入負荷量（g/s）、CR＝負荷流出係数（1/mm）、mR=運動式の係数（＝1）。なお、森林や畑からの表面流出は研究対象流域で少ないため、これらの地表面負荷の流出は無視した。

3.2.2 生活排水路（分流式下水道）負荷堆積・流出モデル

連続式：

$$dSD/dt = -K_S \cdot SD + q_s \cdot D_{popu} \cdot A \cdot PU_{sew} + \sum LD_{lat} + LD_{up} - LD \quad (3)$$

運動式：

$$LD = C_S SD^{mS} \cdot QD \quad (4)$$

ここで、SD＝排水路堆積負荷量（g）、KS＝排水路負荷自浄係数（1/s）、qS＝排水量の原単位、Dpopu＝メッシュ内の人口密度、PUsew＝排水の汚濁負荷の原単位、LD＝排水路流出負荷量（g/s）、CS＝排水路負荷流出係数（1/m^3）、QD＝排水流量（m^3/s）、mS=運動式の係数（＝1）。

3.2.3 河道内負荷流出のモデル

移流拡散方程式：

$$\partial C/\partial t + U \cdot \partial C/\partial x = (1/A) \cdot \partial(DA \cdot \partial C/\partial x)/\partial x + q_L(C' - C)/A - kC \quad (5)$$

ここで、A＝横断面面積（m^2）、U＝横断面平均流速（m/s）、qL＝横方向単位長さあたりの流入量（m^2/s）、C＝汚濁負荷の濃度（mg/l）、C'＝横流入の汚濁負荷の濃度（mg/l）、k＝自浄係数（1/s）、D＝分散係数（m^2/s）である。

3．3 モデルの検証

上述したモデルを千葉県海老川流域（27km^2）に適用した（図-11）。解析対象とする汚濁負荷は BOD と T−N にした。水収支を 1 時間の計算時間間隔と 50m×50m のメッシュサイズで、地表面（路面）及び河道の水量・水質を 10 分の計算時間間隔で 1993 年を対象に通年の解析を行った。下流端の境界には、本町の水位観測データを用いた。生活排水量の原単位は上水使用量データから 286 l/人・日を推定した。ほかのノンポイント汚染源負荷の原単位は和田 [10] と木内 [13] を参照して決定し、表-5 に示す。生活排水量と排水負荷の日変動パターンには木内 [13] の調査結果を参照した（図-12）。

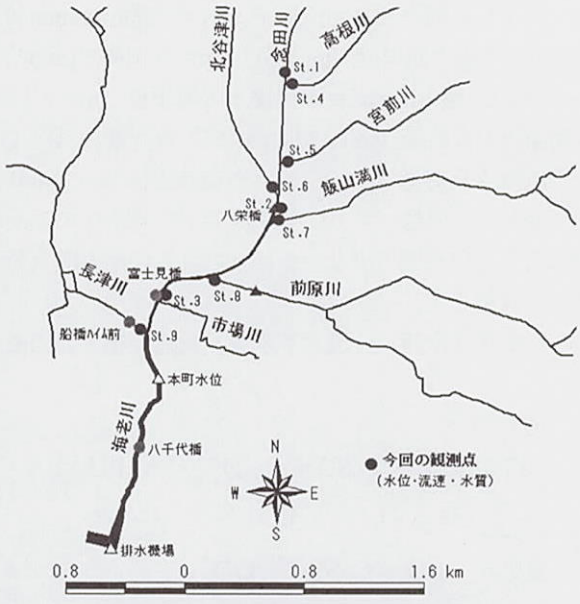


図-11 海老川流域内地点説明図

表-5 原単位

	BOD	T-N	備考
生活排水 (g/人・日)	42	12	
路面負荷発生量 (g/m^2)	0.05	0.0013 ($NH4^+$-N)	住宅地、先期 15 日晴天 [14]
a (g/m^2・日)	6.13E-3	1.59E-4	
降雨 (mg/l)	2.6	2.06	千葉市さつきが丘団地
水田排水(mg/l)	3	2.3	

流量・BOD 濃度・T-N の計算結果と観測結果（海老川本川富士見橋地点の 1993 年 2 月と 4 月の 48 時間の晴天時観測データ [15]）を図-13 に示す。これより、流量、BOD・T-N の濃度レベル及び時間的な変動特性をほぼ再現していることがわかる。

4．まとめと今後の課題

谷田川流域における地下水調査から、地下水の実態について次のことが判明した。

- 谷田川流域における浅層地下水はほぼ地形に沿って流れ、浅層の地下水界は流域界とほぼ一致する。
- 都市化の進展に伴う浸透域の減少率の大きい区域ほど 1976 年 2 月に対する 1999 年 12 月の浅層地下水位低下量が大きい傾向が見られた。
- 浅層地下水水質については、1970 年代と比べ硝酸態窒素濃度が増加している。硝酸態窒素濃度は、1975 年 11 月において調査された全井戸地点で 10mg/l 未満であったが、2000 年調査では採水地点の 30～40%の井戸において濃度が 10mg/l を越え、最大で 34.3mg/l となっている。硝酸態窒素濃度増大の要因としては、長年にわたる肥料の蓄積や森林・水田の減少などの影響が考えられる。

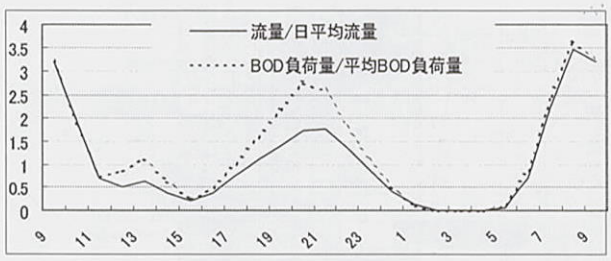


図-12 生活排水量と排水負荷の日変動パターン

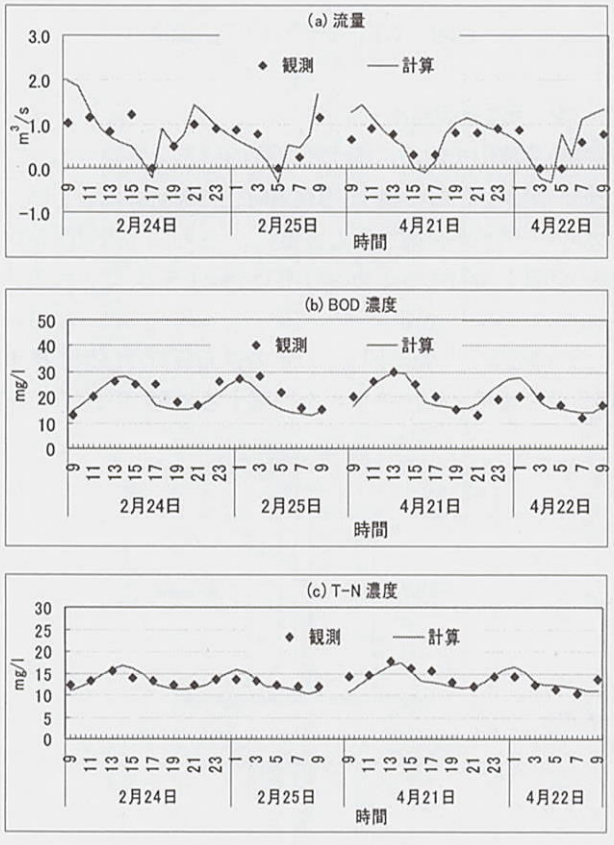


図-13 富士見橋地点でのモデルの検証

また、分布型物理モデル（WEP モデル）と組み合わせ、ノンポイント汚染源からの汚濁負荷流出を扱える分布型汚濁負荷流出モデルの構築と検証を行い、平常時における河川水中の BOD と T-N の濃度の変動を再現できることを示した。今後、雨天時のモデルの検証をするとともに、モデル化する汚濁負荷項目を SS やリンなどへ拡張す

る必要がある。また、河川のみならず、地下水を含んだ流域内の物質循環モデルへと拡張し、都市化等の流域環境の変化が河川水質等へ及ぼす影響や水質浄化策の効果を検討する必要がある。

参考文献

1) 財団法人建築保全センター：筑波研究学園都市地盤図, 1980
2) 地質調査所：筑波研究学園都市及び周辺地域の環境地質図, 1988
3) 筑波大学地球科学系水文学分野：筑波研究学園都市付近の水文資料集 No.1~3, 1976~1978
4) 農林省：1975 年農業センサス茨城県統計書
5) 農林水産省：1980 年世界農林業センサス茨城県統計書
6) 茨城県：茨城の農業（1986、1988、1991、1993、1998 年）
7) 茨城県：公共用水域及び地下水の水質測定結果、1972~1998 年度
8) 賈・倪・木内・吉谷・河原・末次：分布型モデルを用いた都市河川流域における流出抑制施設の効果の比較, 水工学論文集 Vol.45, pp.109-114, 2001.
9) 吉谷・木内・賈・倪・戸嶋：谷田川流域における水循環に関する研究(1), 土木研究所資料第 3782 号, 2001.
10) 和田：ノンポイント汚染源のモデル解析, 技報堂, 1990.
11) 渡辺・永吉・右近：土研モデルと SWMM を組み合わせた下水道流域の汚濁負荷流出モデル, 水工学論文集 Vol.42, pp.199-204, 1998.
12) 和田・三浦：都市化した中小河川の水質に及ぼす下水道等整備効果のモデル解析、土木学会論文集 No.429/II-15,pp.97-105, 1991.
13) 木内：中小都市河川における日周変動と流域状況の対応について, 東京工業大学理工学研究科土木工学専攻修士論文, 1989.
14) 賈・倪・末次・河原：海老川流域での水量・水質観測と解析, 水文・水資源学会 2000 年研究発表会要旨集, pp.212-213, 2000.
15) 船橋市環境部：公共用水域水質測定結果及び地下水の水質測定結果, 平成 4 年度＋平成 5 年度.

3.3　低水管理支援システム開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）
研究期間：平１２～平１５
担当チーム：水理水文チーム
研究担当者：吉谷純一、深見和彦、權五益

【要旨】
流域水循環系再生計画の目標のひとつである平常時の流量を確保のため、水の有効利用、再配分、利用ルールの変更等の低水マネジメント代替案の河川流況への影響を解析するツールが必要とされている。本研究は、野洲川流域農地における水利用形態変化の実態をケーススタディとして解明し、この結果を受けて農地の水利用形態変化による河川流況に及ぼす影響の解析手法を開発するとともに、森林の影響解析手法の開発を行い、これらを統合した低水管理支援システムの開発を目的として研究を実施した。本年度は、平成 12 年度までに観測・収集してきた野洲川流域の水文資料の整理・分析を実施し、来年度に実施する農地主体流域の水循環解析の要件と目標を明らかにした。一方、23 年間にわたる渡良瀬川上流の草木ダム流入量データを用い、山地森林流域における長期的な洪水・低水流況の変化に関するデータの整理を行った。
キーワード：低水管理、農地水収支、森林の影響、流域水循環解析

1. はじめに

流域水循環系再生の目標のひとつである平常時の流量確保代替案の影響評価のため、農地や森林の影響評価や、各種の低水マネジメント代替案の河川流況への影響を解析するツールが必要とされている。平成 13 年度は、野洲川流域農地における水利用形態変化の実態解明を中心に研究を行うとともに、森林の違いが河川流量に及ぼす影響解析手法開発のための基礎データの整理、低水管理支援システム開発に向けてのシステム事前検討を行った。

2. 研究方法

2. 1　野洲川流域農地における水利用形態変化の実態解明

2. 1. 1　ケーススタディ対象流域

本研究のケーススタディの対象流域としては、琵琶湖に流入する野洲川を選択した。野洲川は、三重県鈴鹿山脈の主峰御在所山（標高 1,210m）に源を発し、田村川、杣川をあわせたあと、平野部を通じて琵琶湖に注ぐ。流域面積 378km^2、幹線流路延長 65km であり、琵琶湖流入河川の中で、姉川に次ぐ大河川となっている。流域は、滋賀県守山市以下１市 10 町から構成され、流域内人口は約 22 万人であり、山地が 82%、平地は 18%となっている。その少ない平地部で、主に農業による高度な水利用が行われているのが野洲川の最大の特徴である。すなわち昭和 20 年代から開始された国営野洲川農業水利事業により、計画取水量最大 10.3m^3/s に対応した野洲川ダムとともに、上流側から土山合同井堰、水口頭首工、石部頭首工といった３つの農業用取水堰が野洲川本川に設置され、上流で取水された農業用水からの還元水を再度下流側の堰で再度取水する反復利用が行われている。利水目的のダムとして、野洲川ダム直下流に上水・工業用水計 0.15m^3/s と維持流量補給に対応した青

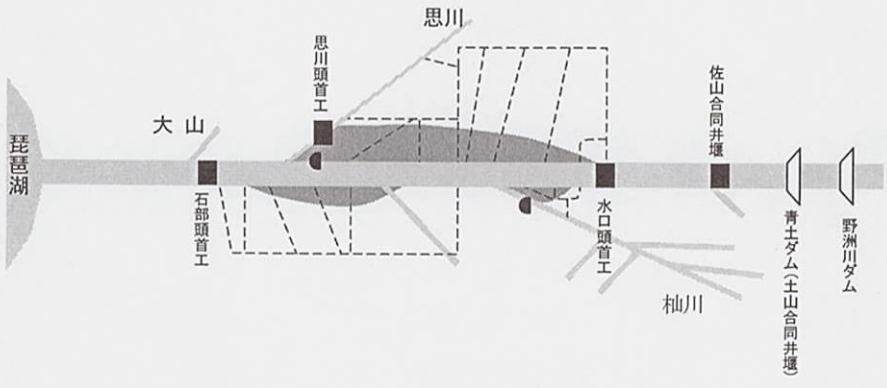


図１　野洲川におけるダム・堰の位置図（赤領域は、水口頭首工の灌漑エリアを示す。水路余剰水・還元水は、石部頭首工において反復利用される。）

土ダムがある。しかし、最下流の堰である石部頭首工では、琵琶湖へ張り出す扇状地の扇頂部に位置し、そこで取水された農業用水はほとんど野洲川本川には還元されないと考えられる上に、渇水期も含めて多量の農業取水が行われるため、石部頭首工下流側の本川部（野洲利水基準点を含む）に瀬切れが発生する事態となっている。それにもかかわらず自然系水循環や、農業用水を主体とする人工系の水利用の実態が流域スケールで十分把握されていないため、野洲利水基準点において必要かつ現実的に確保可能な河川水量が明らかになっていない。

また、野洲川流域における水問題を特徴づけているのは、地域用水需要である。現在、石部頭首工における農業用水の落ち水は、都市・集落住民の地域用水の水源となっている。その地域用水は、より清浄な地下水取水も活用しながら、ホタルやイトヨといった貴重な生物種を保全する役割も果たしている。このため、仮に野洲川本川における正常流量を確保するために石部頭首工における取水量を減じた場合、地域用水の確保に支障をきたすことにもなる。

したがって、野洲川流域を対象として自然水循環のみならず、農地における水利用の実態についても解明を行うことは、現場における調査ニーズにも合致し、現場ニーズに対応できる河川流況変化予測＝水循環予測の研究を行う上で都合がよい。以上のことから、野洲川流域を対象として農地水利用形態に関連した流域規模での水循環実態解明と水循環予測研究を実施することとした。

２．１．２　水文資料・観測データの収集

収集の対象となる資料は、雨量、気温等の気象資料、河川管理者による水位・流量資料、ダムにおける水収支資料、土地利用改良区等による農業用水関連の水運用資料、石部頭首工下流側扇状地を中心とした地下水位観測資料、水利権量といった水文関連資料の他に、土地利用、農地水利用等を示すGIS属性データについても一部収集を実施した。可能な範囲で記録されている期間全ての資料の収集に努めたが、特に網羅的な収集を図り流域スケールでの水循環実態を解明するために整理を行う対象期間は 1996～2000 年の最近５ヶ年とした（琵琶湖で大渇水を記録した2000年を含む）。

しかし、これら既存の定常的な水文資料のみでは、農地を中心とした流域水循環の実態を解明することが困難であるため、国土交通省琵琶湖工事事務所と土木研究所は、大学の研究者とも連携を図りながら共同で、平成11年度から12年度にかけて、灌漑期にのべ５回、非灌漑期にのべ３回にわたって、河道や農業用水路等における網羅的な水収支を調べる集中観測を実施しており、それらの資料についても収集・整理を行った。

２．１．３　水文資料を用いた水循環分析

前節で収集した資料を用いて各灌漑区域における水収支解析を行うとともに、各水文資料の分析から見いだされる流域水循環に関連する知見の抽出を行った。それらの解析の前提として、各水文資料の信頼性に関する予備解析をおこなっている。

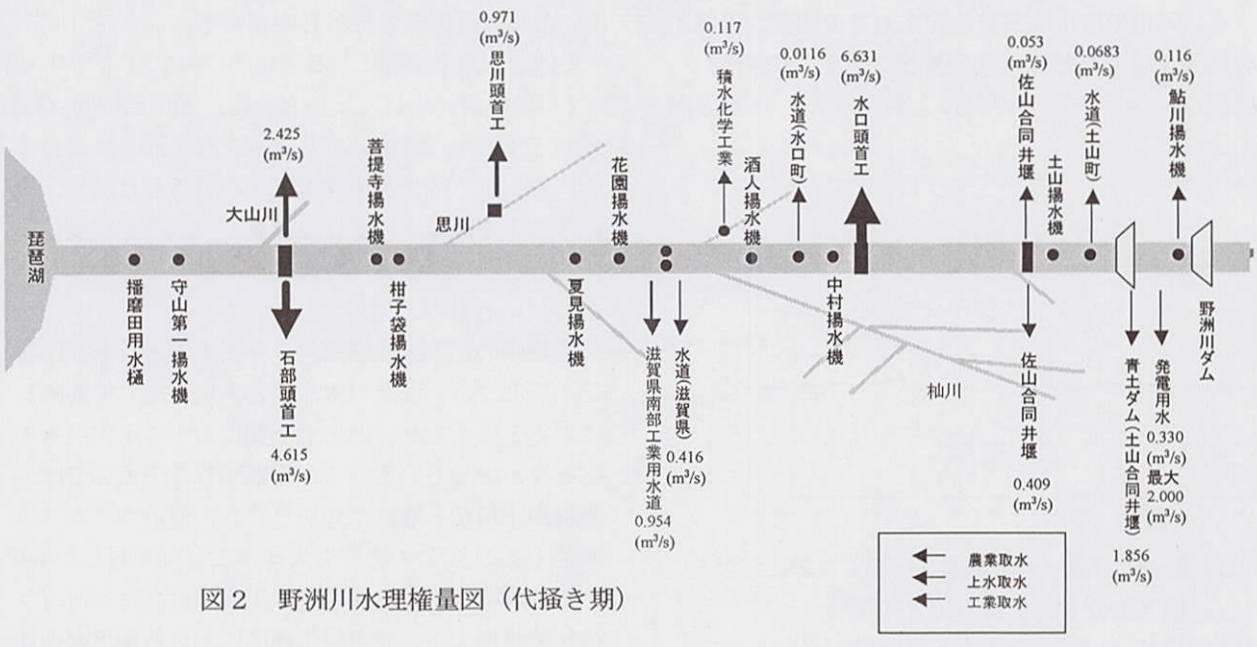


図２　野洲川水理権量図（代掻き期）

2．2　農地の水利用形態の変化が河川流況に及ぼす影響の解析手法の開発

平成12年度に、農地を主体とした河川流域における水循環解析モデルにおいて求められる要素として、河道における洪水流出及び長期流出現象の再現のみならず、広域農業エリア・農地における取水・還元・地下浸透・蒸発散などの現象の再現も必要であることを示し、農地としての土地利用の影響を把握するために、畦畔高さによる農地の貯留効果及び季節ごとに状況が変わる維持湛水深を取り込んだモデル化等の方策が考えられることを指摘した。平成13年度は、平成14年度の流域水循環モデル構築・検証作業へ向けての予備調査として、今回ケーススタディの対象とした野洲川流域における水問題を解決するために必要となる重点解析項目の絞り込みを実施した。

2．3　森林の違いが河川流況に及ぼす影響の解析手法の開発

森林の変化が実際に河川流況に与える影響の実態が、ダム上流域程度以上のスケールの河川流域で十分明らかになっていない現状に鑑み、渡良瀬川上流草木ダム流域（流域面積約254km^2）を対象とした23年間（昭和52年～平成11年）にわたる水文資料に基づく河川流況変化分析を実施した。森林被覆率は約16%程度は増加している。比較対照のため、同じ内容の分析を土木研究所の裏筑波流出試験地（流域面積3.12km^2）に対しても29年間（昭和45年～平成10年）のデータを対象として実施した。森林被覆率の増加率は約6%であるが、大部分の幼齢林が壮齢林に変化している。

2．4　河川の取排水系統、貯水池での調整、流域からの流入を統合した低水管理支援システムの開発

標記のシステム開発の母体として考えられる国内外の流域・水系管理ツールの文献調査を実施し、比較分析を行った。その中から、本研究におけるシステム開発の母体として最も有望視されるシステムについて、開発における利活用事例の追加調査を実施した。

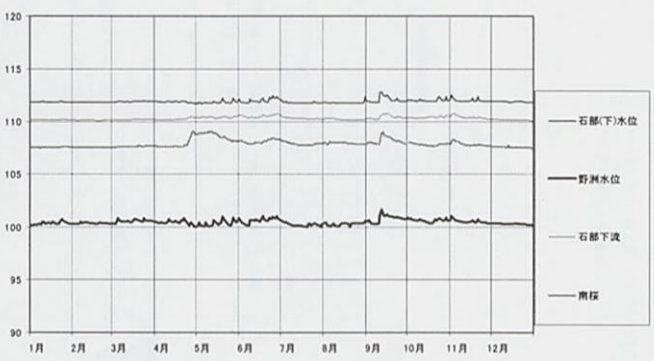


図3　野洲川下流（石部頭首工下流）周辺における地下水位と野洲川水位との関係

※石部（下）水位と野洲水位は、河川水位。石部下流と南桜が地下水位。

3．研究結果

3．1　野洲川流域を対象とした農地における水利用実態解明と河川流況影響解析手法の開発

野洲川流域全体における上水道・工業および農業の各用水の水理権量をまとめた例を図2（灌漑期）に示す。3つの本川取水堰等により反復利用されている量もここには含まれているが、灌漑期で17m^3/s以上に達している。一方、最下流取水堰の石部頭首工について見ると、最大となる代掻き期（4月下旬）で左右岸合わせて約7.0m^3/s、それ以外の灌漑期で約5.3m^3/sとなっている。日本における平均的な年平均比流量とされる2.0m^3/s/100km^{2}をもとにすると、石部地点において期待される平均流量は7.4m^3/s程度となる。図2に示したように石部頭首工上流側で、非常に大きな取水が行われるため、その大部分がある程度還元が期待される農業取水であるにしても、河川流況が平均以下の状況が続く場合に、水需要の充足が極めて厳しいものになる可能性が高いと予想される。しかし、各灌漑区における水収支については、農業用水取水実績報告資料等の信頼性が低く（特に平成11年度以降）、既存資料のみによる定量的分析を行うことは困難であった。従って、例えば石部頭首工に流入する河川流量を定量的に評価するためには、農地における水運用や減水・還元の実態を評価できる流域スケールの水循環モデルを用いた流域水循環解析が必要である。

石部頭首工下流側に着目すると、平成12年8月～平成13年10月にかけて実施された、瀬切れ区間（石部頭首工下流から野洲低水基準点を経て河口に至る区間）における伏没実態調査結果を分析した結果、石部頭首工下流地点における流量が0.3m^3/s程度以下になると、ほぼ確実に野洲地点において瀬切れが発生しているものと推定された。

流域内の地下水位観測データによると、石部頭首工上流部では、農業の水需要と主に対応して変動していると考えられ、地下水涵養に対する水田湛水の寄与を示唆している。一方、石部頭首工下流側では、野洲川本川から離れた地点を除き、河道内における水位（流量）変動の影響も大きいことが判明した（図3）。このことは、石部頭首工下流部における河道水位・流量増大が、周辺扇状地域における地下水の涵

養に結びつくことを示している。

3．2　農地の水利用形態の変化が河川流況に及ぼす影響の解析手法の開発

野洲川における正常流量確保と農業・地域用水の確保の両者を満足させるための水資源確保の代替案として、コストは考慮せず技術的可能性のみを考慮し網羅的に検討しておくべきものを示すと以下のようになろう。

（1）　系外からの資源導入を含む開発代替案
- 1-1）　ダム等の流況調整施設の追加整備
- 1-2）　琵琶湖からの逆水灌漑の増強
- 1-3）　他河川からの導水

（2）　水マネジメント代替案
- 2-1）　節水
- 2-2）　農業用水の再配分・合理化
- 2-3）　ダム運用ルールの改善
- 2-4）　地下水の有効利用
- 2-5）　高度下水処理水の利用

3.1 で収集・分析・考察された結果を合わせて総合すると、上記の代替案を技術的側面から比較・検討する際には、以下の内容の水循環解析を行うことが必要と考えられる。

① 自然系水循環のみならず農業等における人工系水利用形態を考慮できる総合的な流域水循環モデルを用いて、石部頭首工上流域における水確保の残余潜在能力が定量的にどの程度あるのかを明らかにする。

② 石部頭首工下流側の扇状地域における河川水、農業用水、地下水の３者相互の関係を定量的に明らかにし、河川水からの地下水涵養量と、それを見込んだ地下水利用可能量を定量的に明らかにする。

来年度はこれらの項目を重点的に検討することに配慮し、野洲川流域水循環モデルの構築と、収集資料を活用した水循環解析と代替案比較検討への実証的な利活用性能検証を行っていくことが必要である。

3．3　森林の違いが河川流況に及ぼす影響の解析手法の開発

低水流況に対しては、水収支の他に平水・低水流量といった流況指標、流出量頻度曲線、河状係数、日流出量散布度、日雨量散布度に対する日流出量散布度の比、地下水逓減曲線について経年変化を調べた。一方、洪水流況に対しては、洪水事例毎の時々刻々の累加雨量と累加流出高との関係と流出率、総降雨量と総流出高の関係と流出率、飽和雨量、直接流出率と先行降雨指標との関係、雨水保留能曲線（総降雨量と総損失高との関係）、洪水到達時間、ピーク流出高と先行降雨指標との関係、洪水逓減特性といった項目の統計値を整理した。

3．4　河川の取排水系統、貯水池での調整、流域からの流入などのモジュールを統合した低水管理支援システムの開発

土木研究所で開発を実施した水配分・水質統合解析シミュレータを含め、国内外の４種の水系管理支援ソフトウェアを比較した結果、今後の低水管理支援システムの母体として、米国開拓局が中心となって開発したRiverwareが有望であることがわかった。様々な外部ソフトウェアや運用ルールを柔軟に組み込むことができることが最大の利点である。今後、当該システムを我が国に導入するにあたっての課題を明らかにしていく必要がある。

4．まとめ

野洲川流域をケーススタディの対象として選択することにより、農地を主体とした河川流域における水問題とそのために必要な流域水循環モデル構築と解析への要件を明らかにすることができた。また、気象条件・降雨条件が様々に異なる条件の中で森林の変化が河川流況に及ぼす明確な影響を抽出するための基礎データを整理した。来年度以降、農地・森林等の影響を考慮し実流域で検証されたモデルを、河川水系の一貫した低水管理支援システムに組み込んで実利用を図る手法を検討する。

Ⅳ　河川･湖沼における自然環境の復元技術に関する研究

研究期間：平成 13 年度～17 年度
プロジェクトリーダー：水循環研究グループ上席研究員（河川生態）　尾澤卓思
研究担当グループ：水循環研究グループ（河川生態）

1.　研究の必要性

多様な生物の生息・生育地として、また人が自然環境に触れ合える身近な空間として重要な水辺の自然環境を適正に保全するため、事業に伴う自然環境への影響を回避、低減したり、新たに動植物の良好な生息・生育場を維持、形成するなどの自然環境の保全・復元技術の開発が求められている。

2.　研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では、河川、湖沼における自然環境の保全・復元技術のうち、河川におけるインパクト・レスポンスの解明、河川の作用を利用した生物の生息・生育空間の形成手法の開発、湖岸植生帯の保全復元手法の開発、IT を活用した観測技術の開発、水域のエコロジカルネットワークの保全・復元手法の開発を行うことを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

① 人為的インパクトと流量変動が河川の自然環境に及ぼす影響の解明
② 河川の作用を利用した生物の生息・生育空間の形成手法の開発
③ 湖岸植生帯による水質浄化機能の解明と湖岸植生帯の保全・復元手法の開発
④ IT を用いた生物の移動状況の把握手法の開発
⑤ 水生生物の生息、生育におけるエコロジカルネットワークの役割の解明とエコロジカルネットワークの保全・復元手法の確立

3.　個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

① 河川環境におけるインパクト・レスポンスに関する調査（平成 13 年度～17 年度）
② 変動を加味した河川の正常流量に関する基礎調査（平成 13 年度～17 年度）
③ 水辺植生帯の環境機能に関する調査（平成 13 年度～16 年度）
④ IT を活用した野生生物追跡調査手法の開発（平成 13 年度～17 年度）
⑤ 水域の分断要因による水生生物への影響の把握と水域のエコロジカルネットワークの保全・復元手法に関する研究（平成 14 年度～17 年度）

このうち、平成 13 年度は①、②、③、④の 4 課題を実施している。

4.　研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、これまでに実施してきた研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1)　人為的インパクトと流量変動が河川の自然環境に及ぼす影響の解明

「河川環境におけるインパクト・レスポンスに関する調査」においては、河川工事に伴って発生する人為的な高濃度の濁りの影響について実験的研究を行った。Newcombe らは、濁りの影響をランク分けし、濁水の濃度と持続時間が魚類や水生生物に与える影響について関係式を求めているが、この関係をわが国の魚種（アユ、ヤマメ、カジカ）に当てはめて検討を行った結果、濁りの影響は、魚種、濁りの成分によって異なるものの、基本的には Newcombe の考え方が我が国においても適用できることを確認した。

また、「変動を加味した河川の正常流量に関する基礎調査」においては、出水を与えた実験河川 B と流量を一定とした実験河川 C を比較し、流量変動が河川生物に及ぼす影響として、以下の結果を得た。① 出水により植物の繁茂が抑制され、水際および水域における植被が減少した。② 河床付着物の流失とともに流下する底生動物が確認されたが、非常に短期的なものであった。③ 付着藻類への影響は明瞭ではなかった。④ 出水を与えた実験河川 B の方が魚類の生息個体数が多かったが、個体サイズは実験河川 C の方が大型であった。なお、後者については、植生繁茂の違いにより、実験河川 C の水深が相対的に大きかったことが要因として考えられる。

今後は、これらの研究をさらに推進することによって、人為的インパクトと流量変動が河川の自然環境に及ぼす影響を解明し、さらには、河川環境を適切に保全するための流水管理手法の提案を目指す予定である。

(2) 河川の作用を利用した生物の生息・生育空間の形成手法の開発

本目標に対する研究は平成 14 年度より実施する予定である。

(3) 湖岸植生帯による水質浄化機能の解明と湖岸植生帯の保全・復元手法の開発

「水辺植生帯の環境機能に関する調査」において、霞ヶ浦の湖岸植生の減少原因を解明するため、波浪変形モデル、沿岸流モデル、地形変化モデルから構成される湖岸地形変化のシミュレーションを行った。その結果、境界条件として湖岸の反射率を高く設定したケースでは、強い沿岸流が発生し、湖岸侵食が促進されること、一方、反射率を低く設定したケースでは、侵食量が抑制されることが分かった。このことから、湖岸植生の急激な減少要因の一つが湖岸堤の設置にあること、湖岸の反射率を下げるような工夫が湖岸植生の保全に有効であることが明らかとなった。今後は、この成果を踏まえて、湖岸植生帯による水質浄化機能の解明とともに、湖岸植生保全、復元のための具体的な手法についてさらに検討を加えていく予定である。

(4) IT を用いた生物の移動状況の把握手法の開発

「IT を活用した野生生物追跡調査手法の開発」において、野生動物に取り付ける小型発信機を開発し、この発信機を用いて宮崎県の北川において野生動物の行動追跡を行った。北川では河川工事が行われ、振動や騒音が発生している状況であったが、タヌキの行動形態に関するデータ、特に、河川工事に伴ってタヌキの行動圏が狭まったことを示す貴重なデータが得られるとともに、発信機の性能、信頼性が確認された。今後は、3 次元化などシステムの高度化を図るとともに、鳥類など、他の動物種のデータも蓄積していく予定である。

(5) 水生生物の生息・生育におけるエコロジカルネットワークの役割の解明とエコロジカルネットワークの保全・復元手法の確立

本目標に対する研究は平成 14 年度より実施する予定である。

4.1　河川環境におけるインパクトレスポンスに関する調査

研究予算：運営交付金（治水勘定）
研究機関：平 13～平 17
担当チーム：水循環研究グループ（河川生態）
研究担当者：尾澤卓思、伊藤弘之、萱場祐一、
村岡敬子、皆川朋子、林田寿文

【要旨】

本研究では、河道改修等に起因する様々なインパクトによる魚類や河道植生など河川に生息･成育する生物への応答を解明し、インパクトの低減手法や保全手法を解明するために、全国の事例を参考に研究を進めている。例えば河川事業に伴う濁水の発生は、魚類に直接･間接的に影響を与える。平成 13 年度は、濁水の濃度と持続時間が魚類（アユ、カジカ、ヤマメ）にどのような影響を与えるのかについて実験的検討を行った。Newcombe らは、サケを中心とした魚および水生生物を対象に濁りの影響を数式化し、段階的に予測することを可能としており、サケ科であるヤマメについてもこの数式による予測値とほぼ一致した。また、その影響は魚種や濁りの成分によっても異なる結果をもたらすことが明らかとなった。

キーワード：インパクトレスポンス、国土技術研究会、濁水、濁り、致死時間

1.　はじめに

自然環境の保全に対する関心が高まる中、河川事業においても事業に伴う自然環境へのインパクトの回避･低減および劣化した自然環境の復元に対する要請が高まっている。河川管理に伴う物理的なインパクトは、魚類や河道の植生など河川に生息する生物に直接的･間接的に影響を及ぼす。例えば、捷水路の工事に伴う河道勾配の変化は、河床材料・瀬や淵などの河床の構造を変化させ、そこに生息する魚類相や個体数にも影響を及ぼす。このような影響を最小限に抑えるためには、工事による影響を正確に予測することが不可欠であり、そのためには実事例を対象に情報を収集することが必要である。

一方、短期的な水質悪化の影響のように、既存の事例だけでは情報の収集が困難な場合には、実験を組み合わせて予測手法を確立していく必要がある。

本研究では、北海道開発局・8 地方整備局の協力を得ながら実際の事例における河川事業と河川環境の変化に関する情報の収集･分析を行った。また、排砂バイパスシステムが魚類に与える影響について評価するために、魚を使った室内実験を行った。

2.　国土交通省国土技術研究会における取り組み

本研究を進めるにあたり、実事業を対象として事前･事後の環境調査を実施し、河川事業によるインパクトに対する環境の変化（応答）の情報を収集することが重要となる。国土交通省国土技術研究会においても平成 13 年度より「河川事業における環境影響の予測･評価及びその軽減処置に関する研究」として、河川局河川環境課、北海道開発局建設部、東北・関東・北陸・中部・近畿･中国・四国・九州各地方整備局河川部とともに、現在進行中あるいは今後実施される河川事業を対象に、計画立案から事業評価までの一連の考え方の検討を行い、治水･利水・環境が共存した事業の計画･実施を図るとともに、これらの考え方の確立及び普及を目指して研究を行っている。平成 13 年度に研究対象とした事例を表-1 に示す。

このうち、「排砂バイパスシステム」は、人為的にダム貯水池に流入するウォッシュロードや貯砂ダムに堆積した土砂をダム下流に人為的に流すシステムで、自然な状態では起こりにくいような高濃度の濁

りが長時間持続する。これにより魚類が受ける影響については国内での既往事例・研究事例ともに情報が少なく、影響の予測は困難なのが実情である。また、このような人為的な高濃度の濁水により魚類が受ける影響を正確に把握することは重要である。以下、実験的手法を用いた検討について述べる。

表-1「河川事業における環境影響の予測及びその軽減処置に関する研究」対象事業

担当局・地方整備局	対象河川	対象事業
北海道	永山新川	牛朱別川と石狩川を結ぶ分水路
東北	北上川水系砂鉄川	ショートカット
関東	江戸川	老朽化した行徳可動堰の改築
北陸	信濃川	ダム放水による平常時放流量増大
中部	天竜川水系三峰川	美和ダム排砂バイパスシステム
近畿	淀川	淀川大堰上流ワンド群環境改善
中国	斐伊川	斐伊川放水路事業（斐伊川から神戸川への放水路）
四国	仁淀川水系波介川	波介川河口導流事業（河道掘削、付け替え）
九州	加勢川	河道掘削、底水路拡幅、捷水路、築堤

平成13年度　国土交通省国土技術研究会報告書より

3. 高濃度の濁りにより魚類が受ける影響に関する実験的研究

3.1 Newcombeの式

河川には、自然な状態であっても降雨や土砂災害等に起因した濁りが発生する。しかしながら、人為的に発生した高濃度の濁りは、その発生状況においては魚類に深刻な影響を与える。Newcombeらは濁水が魚類に与える影響についての情報を集約し、濁水の状態と魚類が受ける影響について関係式を表わしている。まず、濁水により魚類が受けるインパクトの強さをストレスインデックス：SIとし、濁りの濃度C(mg/L)、濁水の継続時間T(h)により表わした。

$$SI=\log_e(C\cdot T)\cdots(1)$$

さらに、Newcombeは、魚が濁りにより受けた影響を14のラン区分けし(表-2)、ストレスインデックスとの関係を求めた。

$$R=0.738\times SI+2.179\cdots(2)$$

$$N=120, r^2=0.638$$

この関係式により、濁りの発生による魚が受ける影響の予測が可能となる。しかしながら、本式は欧米のサケ科魚種を中心に行った実験結果を集約した結果である。そこで、わが国の河川に適用するためアユ、カジカ、ヤマメを対象に、高濃度の濁りによる生存状況に関する実験を行い、表-2中のR10～14の情報を得ることにより、Newcombeの式の検証を行った。さらに、濁りの成分の違いによる影響についても調査した。

3.2 実験方法

実験は室内で行った。実験対象魚はアユ(*Plecoglossus altivelis*)、カジカ(*Cottus pllux*)、ヤマメ(*Oncorhynchus masou*)の3種で、全て養殖魚である。濁り成分としては5種類の粘土を用いた。水槽は幅

表-2　魚類及び水生生物が濁水により受ける影響の程度

(Newcombe, 1991)

Rank	*Description of effect*
14	>80 to100% mortality
13	>60 to 80% mortality
12	>40 to 60% mortality
11	>20 to 40% mortality
10	0 to 20% mortality
9	Reduction in grown rates
8	Physiological stress and histological change
7	Moderate habitat degration
6	Poor condition of organism
5	Impaired homing
4	Reduction in feeding rates
3	Avoidance response, abandonment of cover
2	Alarm reaction, avoidance reaction
1	Increased coughing rate

61cm、奥行き 41ｃｍ,高さ 31.5cm のポリプロピレン製で、各タンクには溶存酸素(DO)を保つためのエアレーションと、粘土を攪拌するための小型ポンプ 3 台が取り付けられている（図-1）。

表-3 に実験ケースを示す。実験には産地の異なる粘土 5 種類(粒径、成分ともに異なる)と珪藻土を用いた。粘土の種類や水槽に投入した粘土の量によっては粘土の一部が沈殿するため、実験終了後に濁水成分を取り出し、浮遊濁質の濃度を測定した（表-3 中の SS 欄に示す）。

実験の手順を以下に示す。

a. 同じ種の魚 10 尾を、各濁水条件に設定した水槽に投入する

b. 魚の生存を目視により観察する。死亡した魚は速やかに水槽から取り出し、死亡時刻を記録するとともに、エラの写真を撮影する。

c. 実験開始より 1 時間ごとに水温、Ph、DO を測定する。

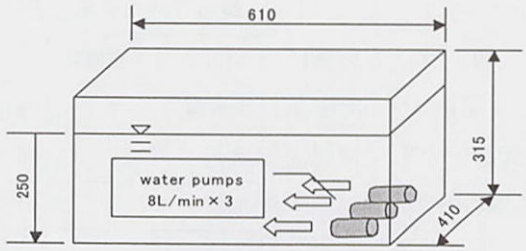


図-1 実験装置(mm)

d. 全ての魚が死亡するか、実験開始より 12 時間が経過した時点で実験を終了する。ただし、ヤマメについては、後述するように死亡個体が少なかったため、さらに 12 時間の観察を継続した。尚、全ての実験を通じて、水温は概ね 23.5℃、pH7.3、DO7.4mg/L に維持された。また、一部の実験ケースについて複数回同じ条件での実験を実施し、その再現性が確認されている。

表-3 実験条件

CASE No.	Laboratory fish	Turbidity material	particle volume(mg/L)	SS (mg/L)
1	ayu	Kao-A	3,200	1924
2	ayu	Kao-A	3,200	1500
3	ayu	Diato	10,000	9157
4	ayu	Kao-B	10,000	7534
5	ayu	Kao-B	10,000	5152
6	ayu	Kao-C	10,000	9039
7	ayu	Kao-A	20,000	9155
8	ayu	Kao-A	20,000	9532
9	ayu	Kao-B	20,000	14006
10	ayu	Kao-B	20,000	14186
11	ayu	Kao-B	20,000	11071
12	ayu	Kao-E	20,000	15401
13	ayu	Kao-G	20,000	13461
14	ayu	Kao-A	32,000	15161
15	ayu	Kao-A	32,000	13047
16	bullhead	Diato	20,000	17652
17	bullhead	Kao-A	20,000	8692
18	bullhead	Kao-B	20,000	14061
19	bullhead	Kao-C	20,000	17724
20	bullhead	Kao-A	32,000	13888
21	masu trout	Diato	20,000	14045
22	masu trout	Kao-A	20,000	8429
23	masu trout	Kao-A+B	20,000	9080
24	masu trout	Kao-B	20,000	10445
25	masu trout	Kao-C	20,000	15293

3.3 実験結果

図-2 は、SS9155mg/L の濁水中で死亡したアユのエラである。エラの表面には粘膜と濁りの粒子が付着している。死亡した個体のエラは、実験条件や死亡までの継続時間に関わらず、図-2 と同様、エラ表面に粒子の付着が認められた。一方、実験終了時に生存していた個体のエラには、粒子は少量しか付着しておらず、さらに清水中に戻すと速やかにエラの汚れが輩出された。このことから、濁りの粒子によるエラの閉塞は魚類の死亡に大きく関係していると考えられる。

図-3 は同じ濁りの成分で SS を変化させたときの経過時間と死亡率の関係を示す。SS が増加するとともに、同じ死亡率に至るまでの時間は短くなるが、SS9200 以上のケースでは同じ結果を示す。

Newcombe の式では SS が大きくなれば大きくなるほど同じ致死率となる経過時間が短くなるが、実際には SS に上限値を与え

る必要がある。

次に、死亡した個体の死亡時間と濁水濃度(SS)をNewcombe の式に当てはめて得られた影響の計算値（表-2）と、そのときの死亡率から得られた実際の影響度のランクとの関係を図-4 に示す。図中の直線は計算値と実験値が一致することを示す。

アユの実験結果について濁りの成分ごとに比較すると、ほぼ直線で示すことかでき、さらにその傾きは濁りの成分によらずほぼ同じである。これらから、影響度を予測するためには濁りの成分を考慮する必要があるものの、アユは Newcombe の推定式よりも短時間で影響度が変化しており、死亡率に関する推定式を得るためには、長時間にわたる濁りの影響など、実験条件を変えたデータの蓄積が必要である。

魚種毎にみれば、実験条件によってばらつきは見られるが、カジカ＞ヤマメ＞アユの順で濁りの影響を受けにくい結果となっており、この並びはこれら3種の酸素要求量の低い順と一致する。

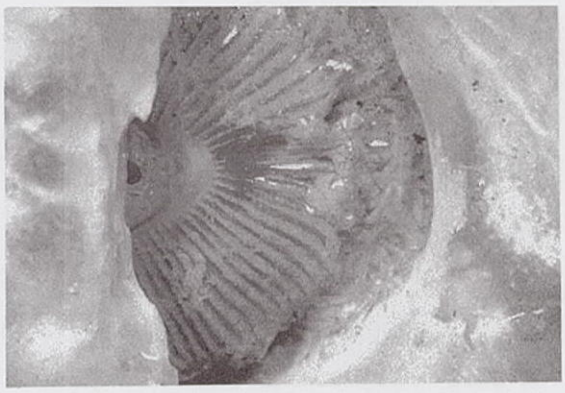


図-2 死亡したアユのエラ(SS9155mg/L, 死亡時

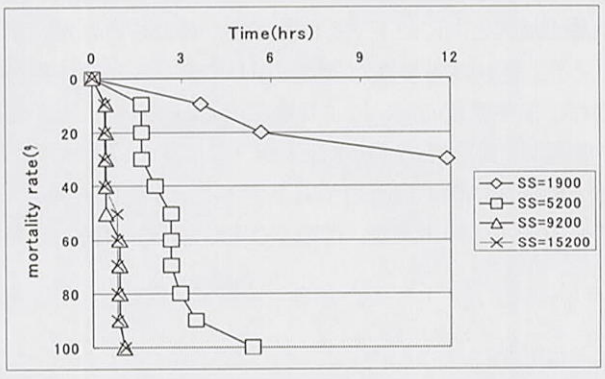


図-3 死亡時間と死亡率の関係

アユ、濁り成分：Kaolin A, SS 単位：mg/ L

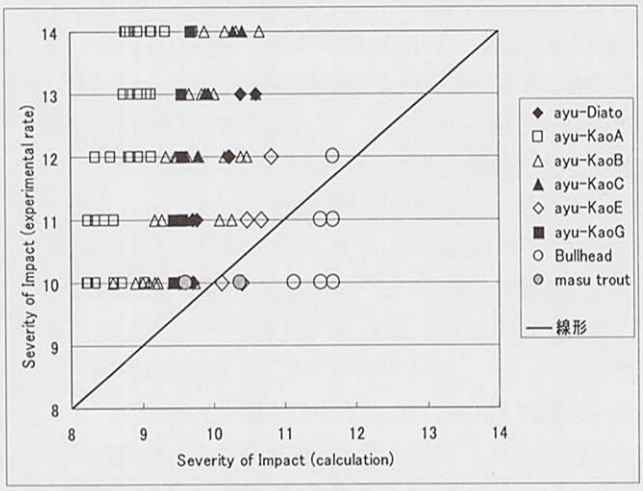


図-4 Newcombe の計算値と実験値の比較

対象魚：アユ、ヤマメ、カジカ

4. まとめ

Newcombe の推定式をわが国の魚種に当てはめて検討するためには、魚種、濁質成分の違いを考慮しなければならないことがわかった。一方、魚種による影響が酸素要求量と深い関係があるとすれば、実験結果から得られた推定式を同様の酸素要求量を有する他の魚種に適用することも可能である。実際に現場で生じる様々なケースに対しても適用することが可能な推定式を得るためには、さらに情報を収集する必要がある。

参考文献

1) C.P.Newcombe and D.D.MacDonald: .Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems: North American Journal of Fisheries Management 11.72-82,1991

2) Erich Staub: Effects of Sediment Flushing on Fish and Invertebrates in Swiss Alpine River: International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management.185-194, 2000

3) G.Merle: Some Environmental Aspects of Flushing: International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management.195-202, 2000

4) Muraoka K, Ozawa T: Effects of Suspended Sediments on Japanese Fish, International Symposium on Fishway and Toropical River Eco-hydraulics, 225-262, Sep.4-5,2001

4.2　変動を加味した河川の正常流量に関する基礎調査

研究予算：運営費交付金(一般勘定)
研究期間：平13～平17
担当チーム：水循環研究ｸﾞﾙｰﾌﾟ（河川生態）
研究担当者：尾澤卓思、萱場祐一、皆川朋子

【要旨】
本研究は、流量変動が河川水質に与える影響、河川生物に与える影響、土砂供給がハビタット及び生物へ与える影響を定量的に明らかにすることを目的としている。13 年度は、出水を与えた実験河川Ｂと常に一定流量の実験河川Ｃを比較し、以下を明らかにした。①出水により植物の繁茂が抑制され、水際及び水域における植被が減少した。②河床付着物の流失と共に流下する底生動物が確認されたが、非常に短期的なものであった。③付着藻類への影響は明瞭ではなかった。④出水を与えた実験河川Ｂの方が生息個体数が多かったが、個体サイズは実験河川Ｃの方が大型であった。後者は、植生繁茂の違いにより水深に差が生じたことが要因として考えられた。⑤以上より、平成 13 年度における出水の影響は比較的小さかったといえる。これは実験河川の川幅が小さいため、水際と河床に繁茂する植物の影響が強く、出水時河床に働く掃流力が低下することが原因と考えられた。14 年度は河岸植生を抑制し検討する予定である。
キーワード：河川流量、変動、生物、水質、出水

1.　はじめに

河川における流量変動、すなわち季節的な流量変化や小・中・大規模出水は、生物のハビタットや自浄作用を維持し、また、河川生物はこれに適応・進化した生活史をもっている等、河川生態系に大きく関与している。しかし現在、ダムや堰等により流量は制御され、出水規模・頻度の減少、流況の安定化、さらに下流への供給土砂量の減少が生じる等、生物及び生態系へ影響を及ぼしていることが指摘されている[1)~3)等]。

これまで河川流量管理については、河川における流水の正常な機能を維持するために必要な流量＝正常流量という考え方に基づき、渇水時に維持すべき流量が定められてきたが、近年、渇水時のみでなく１年365日を通じた流量の変動にも配慮する必要性が認識されるようになってきた[4)]。しかし、河川生態系の保全を考慮した流量管理を行っていくためには、どの季節の、どのくらいの規模・継続時間・頻度の出水が、ハビタットの形成・維持や河川生物の生活史等に寄与しているのか、さらに、流量―ハビタット－生物の関係等、膨大な知見の集積が必要とされる。

流量安定化の改善に対する取り組みとして国土交通省では、平成９年度より、ダムから平常時より大きい規模の流量を一時的に放流する試み（ダムの弾力的管理）を実施しており、放流の規模とハビタット、生物、水質等への影響が検証されている[5)6)]. このような放流は、近年、仮説検証の中から管理方法を導きだすという順応的管理の必要性が指摘されてきている[7)8)]ことからも注目されている。しかしながら実際の河川において出水の影響を定量的に把握することは難しい。

そこで本研究は、流量コントロールの可能な実験河川を用いて、流量変動が生態系に果たしている役割を定量的に明らかにすることにより、今後の河川流量管理に資することを目的とする。13 年度は、常に流量を一定に与える河川（実験河川Ｃ）と出水を与える河川（実験河川Ｂ）を設定し、これらの違いが生物にどう影響を及ぼすかを定性的・定量的に把握することを目的とする。

2.　方法

自然共生研究センターにおける実験河川を用いて、常に流量を一定に与える河川（実験河川Ｃ）と出水を与える河川（実験河川Ｂ）を設定し、これらの違いが、水質、生物にどう影響を及ぼすかを定性的・定量的に把握する。実験河川Ｂに与えた出水は表-1 に示す計４回で、最大流量は2.5m^3/s である。また、実験河川Ｂ及びＣの基底流量は0.05～0.1m^3/s である（表-2)。

調査項目は植生、付着藻類、底生動物、魚類である.

表-1　出水の概要（実験河川Ｂ）

出水日	出水名	ピーク流量(m^3/s)	ピーク継続時間(分)
2001/7/13	第１回出水実験	2.5	50
2001/9/4	第２回出水実験	2.0	180
2001/9/28	第３回出水実験	2.0	180
2001/12/5	第４回出水実験	1.5	10

表-2　基底流量

基底流量	
2001/6/1～2001/12/11	0.1m³/s
2001/12/11～継続中	0.05m³/s

2.1　植生

(1) 河岸植生の調査

ハビタット研究ゾーンの蛇行部堆積側の河岸（以下「蛇行河岸」）、ワンド研究ゾーン河川部分の河岸（以下「直線河岸」）、ワンド研究ゾーンワンド部分の緩傾斜斜面（以下「ワンド岸」）を対象に、夏季（6月）と秋季（10月）に植生調査を行い、優占種に基づく区分による植生図を作成した。2000年と2001年の両年に植生調査を実施した区域を対象に、植被面積を算出して比較した。

(2) 植物相調査

実験河川の特徴を明らかにする基礎調査として、実験河川周辺の植物相調査を6月、7月、10月に行った。10月の調査では、実験河川周辺全体を対象とした調査に加えて、ハビタット研究ゾーン、ワンド研究ゾーン、ワンド脇の直線部（それぞれ重点調査区を含む範囲）の各ゾーンに区別して調査を行った。

2.2　付着藻類

実験河川B及びCのハビタット研究ゾーンにおける早瀬及び平瀬、冠水頻度研究ゾーンにおける平瀬に付着板を設置し、付着藻類の現存量や質の動向を把握する。なお、現存量はChl-a量によって把握し、質の評価には、フェオフィチン率、強熱減量を用いた。

調査は、河床付着物を採集するための付着板（主成分はAl_2O_3 99%、SiO_7 0.6%）を6月5日に設置し、設置5日後から112（9月28日）～142日後（10月25日）まで行った。採取は、各地点において付着板5枚をランダムに取り出し、ブラシを用いて採集し試料とした。分析項目は乾燥重量、Chl.a、強熱減量、フェオフィチン、付着藻類の綱別細胞数の計数及び優占種（3位まで）の細胞数の計数である。また、採取地点の水深、流速の測定、及び実験河川の上下流の水質（pH、EC、濁度、DO）、水温を携帯型水質計を用いて測定した。なお、PO_4-Pについては室内で分析を行った。

2.3　底生動物

7、9、12月において出水中の採集と出水前後の採集を行い、出水中の底生動物に対する影響を明らかにし、その影響がどの程度持続するのかを明らかにすることを目的とした。

調査は出水中の底生動物を採集する流下動向調査と、出水前後の底生動物を採集する流失量調査を行い方法は以下に示す。

(1)　流下動向調査

上流部と中流部にポンプを設置した。河川水の汲み上量は1回につき100Lとし、その100L中に含まれる底生動物を、平常時は2分～5分おきに採集した。出水実験時は1回目の採集から水位がピークになるまでは2分おきに、ピークからは3分おきに5サンプル、5分おきに4サンプル採集した。このサンプルを実験室内で同定後、個体数、湿重量を測定した。同時にサンプル内の藻類等の乾重量も測定した。

(2)流失量調査

石単位調査を用い早瀬と平瀬の各調査地点において流心と岸の石を各10個選定し、その表面に付着している底生動物について採集した。各石については表面積の換算に用いた。採集は出水前日（5日間以内）、出水直後（出水実験当日）、出水2日後を1セットとした。採集されたサンプルは実験室内で同定後、個体数、湿重量を測定した。その値は石の表面積を400cm²に換算した値にし、比較検討に用いた。

2.4　魚類

実験河川における魚類相、現存量を把握し、これらの季節変化を明らかにするため、生息魚類調査を平成13年9月から平成14年3月まで、月一度実施した。調査区間は、各ゾーン間の比較及び、各ゾーン内のハビタットの比較ができるよう、昨年度の調査区間を考慮して実験河川B・Cに19区間ずつ設定した。1区間当たりの延長は原則15mであり、ハビタット研究ゾーン及び河岸開発ゾーンについては、蛇行部の淵・瀬・平瀬のセットを6m・4m・10mの長さで区切った。採捕は、調査区間の上下流をブロックネット（目合5mm）で仕切った後に、電気ショッカーで下流から上流に向かって行った。1区間の採捕回数は3回であり、1回当たりの採捕時間は幅2.5m、延長15mの標準的な区間で60秒を基本とし、調査区間面積に比例して変化させた。ワンドについては、水深を考慮し1回当たり180秒とし、電気ショッカーによる3回の採捕が終了した後、ワンドの周囲から魚を追い込み投網を打つという方法を3回繰り返し、採捕した。採捕した魚類はその場で種の同定、体長及び湿重量の測定を行い、3回の採捕が終了した後に当該区間に再度放流した。

3.　研究結果

3.1　植生へ与える影響

(1)　河岸植生



写真-1　実験河川 C（2001.8.2）



写真-2　実験河川 B 出水 20 日後（2001.8.2）

実験河川BとCでは、河岸に成立する植生が明瞭に異なっており、一定流量の実験河川Cでは、出水がある実験河川Bよりも植被面積が大きい。この傾向は「直線河岸」で特に顕著であり、実験河川Cでは水路の一部を覆うような植生の発達が認められたのに対して、実験河川Bでは、植生は通常の定常流量では冠水しない河岸にのみ成立し、水路上にはほとんど被っていなかった（写真-1、2）。出水を起こす以前の6月と、出水を経験した後の10月の植生を比較すると以下のとおりである。

「蛇行河岸」では、6月には実験河川の水路上には植被がほとんどなかったものの、10月には人工洪水を起こさなかった実験河川Cにおいてヌカキビやコガマが水路上に繁茂するようになった。実験河川Bではそのような水路上の植生の繁茂は認められなかった。

「直線河岸」では、6月には実験河川B, Cともに、アメリカセンダングサなどが一部の水際を覆っているものの、河道を塞ぐような繁茂は認められなかった。10月には、実験河川Cではヤナギタデ、オオイヌタデ、ヌカキビが優占する群落が水路上に繁茂していた。実験河川Bではそのような繁茂は認められなかった。

「ワンド岸」では実験河川B, C間での顕著な違いは認められなかった。

(2) 植物相

植物相の調査の結果、53科137属220種類の植物が確認され、うち外来植物は62種で全体の28.2%を占めていた。また、実験河川Bと実験河川Cの植物相の間には明瞭な違いは認められなかった。しかしゾーン間には植物相の顕著な相違が認められた。各ゾーンの植物相の特徴は以下のとおりである。

①ハビタット研究ゾーン：土壌は円礫の多い砂礫質土壌である。主な植物は低茎の一年草と多年草であった。水辺から離れた乾燥気味の地点には、カワラサイコ、ハタガヤ、オオフタバムグラなどが分布していた。水際にはセリ、タネツケバナ、ヒレタゴボウが多く分布していた。

②ワンド研究ゾーン：土壌は円礫が混じった砂質が基本だが、常に冠水している高さの場所には泥質土が堆積している。この地点を特徴づけているのは、低茎の一年草であるコナギ、ウシクグ、タマガヤツリ、ヒデリコ、ヒナガヤツリ、ヒメクグなど水田雑草ともなる植物である。また、ヒレタゴボウの繁茂が他の地点より顕著である。

③ワンド脇の直線部：土壌は円礫が混じった砂質を基本とし、腐植質が混じっている。主な植物は高茎になる多年草と低茎の一年草である。比較的乾いた法面上部にはススキ、ヨモギ、イタドリ、チガヤ、セイタカアワダチソウなどの高茎の多年草が分布し、低茎の一年草としてはチドメグサ、ハハコグサ、ツユクサ、クルマバザクロソウなどが分布していた。水際にはアゼナルコ、ボントクタデ、メリケンガヤツリなどが分布していた。

(3) まとめ

今回生じた程度の規模の出水でも河川に成立する植生に大きな影響を与えることが確認できた。それは出水がある河川では、河道内あるいは水際の植被が減少するというものだった。出水の時には多くの植物体が水によって押し流されることが観察されており、このような物理的な作用が植被率の相違をもたらしていたと考えられる。本研究で対象とした調査地のうちで「直線河岸」においてそのような影響が最も顕著だったのは、この場所が最も掃流力が強く働く場所であるためと考えられる。逆にワンドでは、出水の有無による植生の相違は明瞭には認められなかった。

本調査では、場所による植生の相違も明瞭に示された。たとえばワンドとその脇の直線部は、位置的には隣り合

っているにも関わらず、植生には明瞭な違いが認められた。特に、ワンドの水際あるいは浅水域に成立していたコナギやキシュウスズメノヒエが優占する群落は、直線部では認められず、直線部の水際あるいは浅水域に成立していたヤナギタデ、オオイヌタデ、ヌカキビが優占する群落は、ワンド内では認められなかった。これらは植物種間の、水流に対する耐性の相違や、種子散布に関わる特徴の相違に起因すると考えられるが、明瞭な答えを得るには今後の研究が必要である。

3.2 付着藻類への影響

ハビタットゾーン早瀬及び平瀬における付着板及び自然石のChl.aは設置から約50日が経過した7月24日に最大値（平均値約100～300mg/m^2）を示した。冠水頻度研究ゾーンの付着板はハビタット研究ゾーンよりもChl.aは小さく、いずれも平均値で50mg/m^{2}であった。強熱減量はハビタット早瀬＞ハビタット平瀬＞冠水頻度平瀬の傾向がみられるが、フェオフィチン率は地点間で異なった傾向はみられない。

出水による河床付着物の影響について出水前後を比較すると、出水日前後において出水を与えた実験河川Bでは出水によるChl.a、強熱減少、フェオフィチン率の変化はみられない。次に、各地点について、実験河川と調査日を要因とする二元配置分散分析を行った結果、河川間ではハビタット研究ゾーン平瀬付着板における強熱減量及びフェオフィチン率、同自然石フェオフィチン率、冠水頻度研究ゾーン平瀬付着板強熱減量で有意差が認められたが、いずれも交互作用が認められた。そのため、河川と調査日の組み合わせによる多重比較検定（sheffe's test）を行った結果、ハビタット研究ゾーン平瀬付着板の7月14日におけるChl.a、ハビタット研究ゾーン平瀬自然石6月12日におけるフェオフィチン率にのみ有意差が認められ、それぞれ実験河川C＜実験河川Bであった。

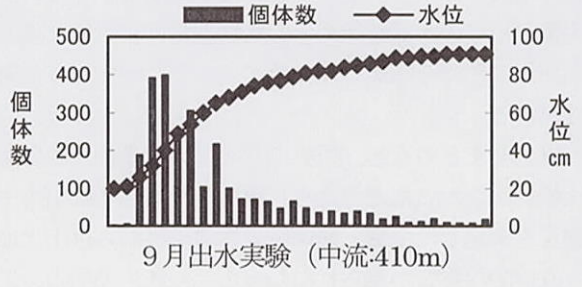


図-1　水位と個体数の関係

以上より、出水を与えた実験河川Bと一定流量の実験河川Cで一部に有意差が認められたものの、その他多くは有意差は認められず、今年度与えた出水によるChl.a、強熱減量（有機物率）、フェオフィチン率の影響はほとんどなく、出水による現存量及び質への影響は明瞭ではなかった。

3.3 底生動物への影響

流下動向調査では、分類群数、個体数、湿重量ともに平常時より出水時のほうが有意に多くなっており、出水によって河川内の底生動物は流失していることが示唆された。図-1に水位と個体数の変化を示す流下した分類群の殆どはハエ目（ユスリカ科）とミミズ目（ミズミミズ科）が占めており、これらは主に水中植物を生息場としている種であった。出水中の水位と藻類乾重量、底生動物個体数との関係では、藻類量と個体数がほぼ比例関係にあることがわかり、底生動物の多くは出水のピークがくるよりも前の時点で流下していることが分かった。

流失量調査では特に個体数において変化が得られ、出水直後に減少するが2日後には戻る傾向が得られた。このような傾向はユスリカ科と一致しており、実験河川におけるユスリカ科の種数や個体数が多いことが影響していると考えられ、流下動向調査においてユスリカ科が流失していることと矛盾していなかった。

以上をまとめると以下のとおりとなる。

①主に小型の底生動物が藻類と伴に流下する。

②流下する底生動物量のピークは出水のピークよりも以前にある。

③主に藻類を生息場とする種が出水による影響を受けやすいが、それらの種の現存量は多く、繁殖力も強いことから、長期的な影響にはならない。

3.4 魚類への影響

実験河川で採捕された魚介類は魚類5目8科25種、甲殻類1目4科5種である。実験河川BとCでは全期を通して確認魚種数には大きな差はないが、採捕個体数では、実験河川Bの方が実験河川Cに比べ多くなっている。図-2に河川別の採捕個体数・湿重量変化を示した。個体数においては、実験河川Bは9月から10月にかけて大きく増加し、その後緩やかに減少している。実験河川Cも9月から10月にかけて大きく増加し11月まで増加を続ける。その後緩やかに減少し始める。湿重量では、9月は実験河川Bで実験河川Cよりも多くなっているが、10月、11月はほぼ横並びになり、12月には、実験河川Cの湿重量がBを上回っている。特徴的な点は、採捕個体数には

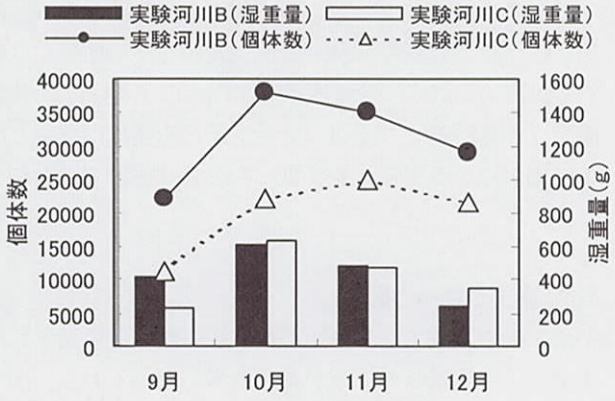


図-2　実験河川B、Cにおける生息個体数と湿重量

表-3　実験河川B、Cにおける1個体あたりの平均湿重量(g)

	9月	10月	11月	12月
実験河川B	11.8	10.0	8.6	5.3
実験河川C	13.0	17.6	11.7	9.8

大きな差があるが、湿重量には差がないことである。このことから、1個体あたりのサイズが実験河川CBとCで異なっていることが考えられる. そこで、1個体あたりの平均湿重量を算出してみると、実験河川Cは、実験河川Cよりもサイズが大きい個体であることがわかる（表-3)。この要因として実験河川CとBの植被の違いと、これに伴う水深及び流速といった物理量の違いがあげられる。一例として、図-2に平成13年10月に測定した実験河川B、Cの河床高と水位の状況を示す。特に中流部において実験河川Cの水深が実験河川Bよりも高くなっている。このような水深の違いは、一定流量の実験河川Cの植生の植被率が出水のある実験河川Bよりも高いことに起因し、水位上昇が引き起こされたものと考えられる。

4.　まとめ

以上の結果より、出水を与えた実験河川Bと常に一定流量の実験河川Cにおける、植物、付着藻類、底生動物、魚類への影響を整理すると以下のようになる。

①植物

出水のあった実験河川Bでは、河道内における植物の繁茂が抑制され、水際及び水域における植被が減少した。また、この結果河道の中央にみお筋が形成され流速の大きい流水域が維持された。この傾向は、河道法線が直線である「直線河岸」で顕著であったことから、直線河道では相対的に掃流力が大きく、これに伴う植生の倒伏や流失がこのような現象を引き起こしたものと考えられる。本結果は希な出水があるだけでこのような植物の繁茂を

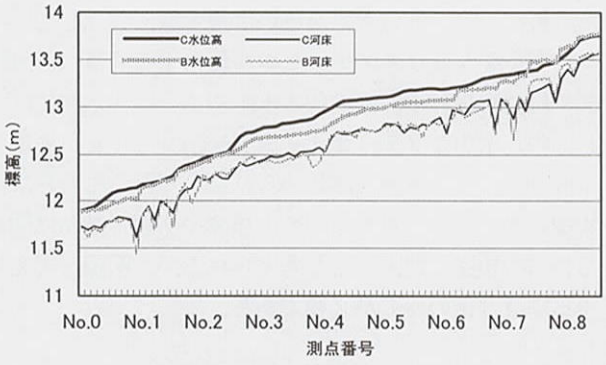


図-3　実験河川B、Cの河床高と水位（H13.10測定）

抑制できることを示唆するものである。

②付着藻類

河床付着物の出水前後調査は植物を刈り取った直後に実施した出水実験を対象としたため河床に働く掃流力は比較的大きかったと考えられる。しかし、平成13年の夏期に実施した調査では出水による影響は量、質とも見られなかった。過去の実験結果を見ると出水後に残存する河床付着物のchl-a量は出水規模に寄らず概ね50～100mg/m²であるが、夏期の出水前のchl-a量はせいぜい100mg/m²程度であった（冬季はこの値より大きくなるケースが見られた)。つまり、今年度夏期に実施した実験では、出水前後の現存量の差が小さく結果として明確な差が見られなかったと考えられる。尚、出水の有無による量、質的な影響は長期的にも見られなかった。

③底生動物

河床付着物の流失と共に流下する底生動物が確認された。しかし、この影響は短期的で比較的早い時期に底生動物相はこの影響から回復することが解った。

④魚類

出水のあった実験河川Bでは実験河川Cと比較して総個体数が多かった。しかし、両河川で総湿重量には大きな変化がないことから、実験河川Cでは相対的に大型の個体が生息していたものと考えられた。この現象がどのような要因により引き起こされたかは明らかでないが、実験河川Cの水深を始めとした物理量の相対的な違いが両河川における魚類の個体サイズの差につながった可能性がある。

以上をまとめると、平成13年度における出水の影響は比較的小さかったと言える。出水前後もしくは出水中に測定を実施した水質、河床付着物の結果からは出水に伴う直接的な影響が見られなかったし、底生動物の結果からは影響が見られたが非常に短期的なものであった。これは、両河川において水際と河床に繁茂する植物が著し

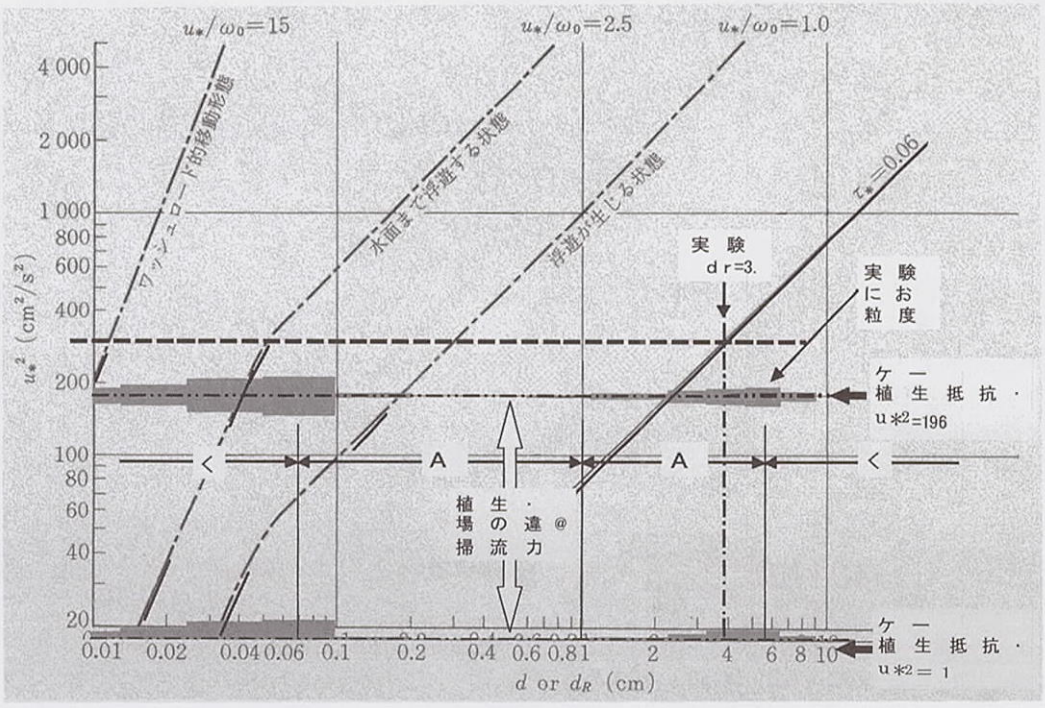


図-4　実験河川における植生の有無と河床に働く力

いこと、また、川幅が小さいこと、により、植物の影響が大きくなり、出水に伴い河床に働く掃流力が著しく低下したことに起因していると考えられる。図-4 は実験河川における河床材料の粒度分布と平成13年度の出水時に測定した水理量を元に、水際の植物の有無による河床に働く掃流力の違いを比較したものである。下の実線は植生がある場合の計算値を、上の実線は植生がない場合の計算値を示す。また、黒塗の範囲が河床材料の分布とこの幅が相対的な量を示す。本図から、平成 13 年の植物の繁茂状態をベースとした河床に働く掃流力は 20(cm/s)^2 であり、ない場合と比較して著しく低いことが解る。また、本図には河床材料が移動する限界値が実線で与えられているが、粒径の大きいモード（このモードの代表粒径は概ね 3cm）に対する、この敷居値が如何に小さいものであるかを理解することができる。また、この値は沈水植物の繁茂を考慮していないことから、実際に河床に働く掃流力は更に小さくなるものと考えられる。このように実験河川においては、川幅に対する植物の繁茂する幅や高さが相対的に大きいことが出水の河床に与える影響を規定する大きな要素になり、出水を与えても、植生の抵抗や場の違いなどにより河床に十分なインパクトが与えられていなかったと考えられる

以上より、流量変動による影響を明確にするためには、法面植生の影響を排除し、流速を増してやることにより河床にかかる掃流力を増すことが必要となる。14 年度は、河岸法面に防草シートを設置し、実験河川の流下能力、河床にかかる掃流力を増加させ検討する予定である。

参考文献

1) 足立敏之・高橋和也：ダム運用に伴う下流河川の河床状態及び底生動物群集への影響と環境影響評価の課題、環境システム研究、Vol.24、pp.336-342、1997.
2) 江村歓・玉井信行・松崎浩憲：生態的フラッシュ放流に関する考察と貯水池の連結操作による流況の改善について、環境システム研究 Vol.25、pp.415-420、1997.
3) 安田実・清水康生・竹本隆之：流量変動が河川環境の維持形成に果たす役割に関する研究、、環境システム研究、Vol.26、pp.77-84、1998.
4) 建設省河川局河川環境課：正常流量の手引き（案）、1999.
5) 角哲也・塚原千明・柏井条介：ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察、ダム技術 No.143、pp.40-51、1998.
6) 辻本哲郎・増田健一・寺本敦子・田代　喬：試験淡水時のダム下流河道の生息環境の変質とその復元のためのフラッシュ流量、河川技術に関する論文集、第 5 巻、pp81-86、1999.
7) 鷲谷いづみ：生態系管理における順応的管理、保全生態学研究 Vol.3、pp.145-166、1998.
8) 中村太士：水辺林の更新動態に与えるダムの影響、応用生態工学 2(2)、pp.125-139、1999.

4.3　水辺植生帯の環境機能に関する調査

研究予算：運営交付金（治水勘定）
研究期間：平 12～平 16
担当チーム：水循環研究グループ（河川生態）
研究担当者：尾澤卓思，中村圭吾

【要旨】
湖岸植生帯の侵食は，波浪，湖岸堤，湖浜地形，湖水位等の相互関係で発生する．ここでは霞ヶ浦の湖岸植生帯の侵食過程を海浜の地形変形モデルを適用して検討した．その結果，湖岸堤の反射率が植生帯と比べて高いことが，植生帯前面の沿岸流を増大させ，侵食を促進していることなどがモデルを使って説明できた．これらの結果より，考えられる植生帯保全策を検討するとともに，その効果を作成したモデルにより検討した．
キーワード：湖沼沿岸帯，霞ヶ浦，侵食，波浪，地形変形

1．はじめに

霞ヶ浦の湖岸植生帯は，水質悪化や湖岸堤建設の影響などによって減少の一途をたどっている [1)~4)]．湖岸植生帯の減少は，生物多様性の保全，湖沼の自浄作用の保全，湖沼景観の保全などの観点から看過できない状況となっている．そこで，霞ヶ浦では国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦工事事務所を中心に湖岸植生帯の復元が始められている．しかしながら，湖岸植生帯の減少機構は未解明な部分が多く，復元に際し，技術的な問題を多く残している．ここでは，霞ヶ浦の植生帯を対象に侵食状況の再現を海浜地形変形モデルにより試みた．また，このモデルを使用して，湖水位や湖岸堤の反射率を変化させた場合の影響を検討した．

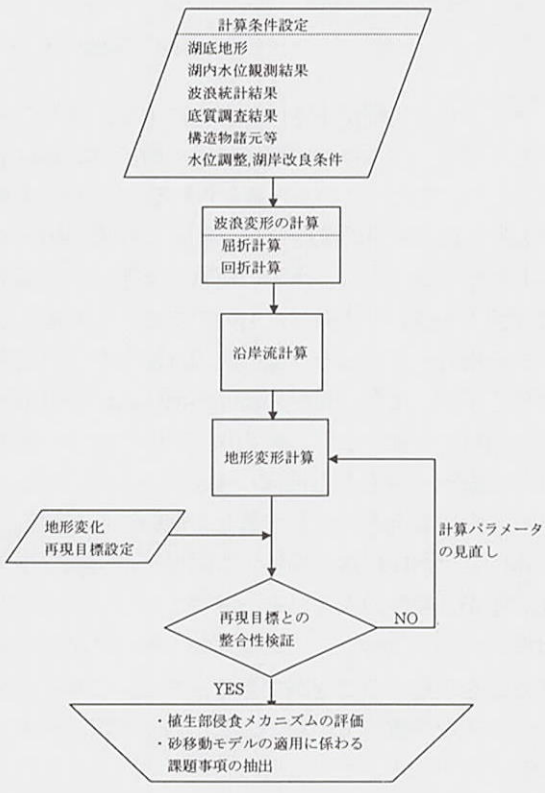
2．対象地域

対象地域は霞ケ浦左岸 6.2km 地点の茨城県麻生町島並地先のヨシを中心とした湖岸植生帯である．1967 年，この地点には岸沖方向幅約 60m の抽水植物帯が，湖岸線に沿って存在していた．しかし現在植生帯は，岸沖方向幅約 10m，沿岸方向約 60m まで減少している [5)]．

3．計算式･計算条件の概要

3．1　計算式の概要

ここでは，波浪変形モデル，沿岸流モデル，地形変形モデルの３つを作成し，植生帯の砂移動モデルシミュレーションとした．シミュレーションの流れを図－１に示す．波浪変形モデルは反射波を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた．沿岸流モデルは波高分布によるラディエーションストレスを考慮したナビエストークス式モデルを用いた．地形変形モデルは波と流れによる漂砂量を推定し，2 次元の地形変化を計算する式とした．



図－１　砂移動シミュレーションの流れ

3．2　計算条件

計算領域は岸沖方向に 160m，沿岸方向に 200m の範囲とした．計算格子間隔は 2m x 2m である．地形条件は 2000 年 3 月の深浅測量結果を用い，測量範囲外は地形図から読みとって測量結果の地形データに補間した．波浪条件としては，1995 年～1997 年の波浪推算結果より地形変形に与える影響が大きいと考えられる上位 1/3 平均波浪を使用した．夏季と冬季に分けて，表－１のような波浪を代表とした．水位は管理水位より夏季 Y.P.1.1m，冬季 Y.P.1.3m とした．夏・冬ともに表－１に示す代表波を 12 時間この計算領域に作用させた場合の地形変形を計算した．波浪変形計算，沿岸流計算，地形変形計算に関わる計算条件は表－２に示すとおりである．

表－１ 波浪条件

検討ケース	波　高 H(m)	周　期 T(sec)	波　向
夏　季	0.41	2.6	N194.6°W (SSW～SW の間)
冬　季	0.45	2.9	N276.4°W (W～WNW の間)

表－２　計算条件

波浪変形計算にかかわる条件	
・周波数分割数	：１０
・方向分割数	：３０
・方向集中度パラメータ	：Smax＝２５
・反　射　率	：直立護岸 K_R＝0.7，植生帯 K_R＝0.1or0.3
海浜流計算にかかわる条件	
・海底摩擦係数	：C_f＝0.01
・水平渦動粘性係数	：A_h＝2.5m²/sec
・タイムステップ	：Δ t＝0.1sec
・計算ステップ	：6,000 ステップ（10min.）
・側方の境界条件	：開境界
地形変化計算にかかわる条件	
・底質の中央粒径	：d_{50}＝0.40mm
・底質の比重	：ρs＝2.65
・流れによる漂砂量係数	：Ac＝1.0
・波による漂砂量係数	：Aw＝0.0，0.1，0.2
・定　数 εs	：εs＝50.0
・限界シールズ数	：Ψc＝0.11
・漂砂の向きを判定するパラメータの限界値	：Πc＝1.0
・タイムステップ	：Δ t＝60sec
・計算ステップ	：720 ステップ(12hr.)

３．３　計算ケース

現況再現のための計算ケースとしては地形変形モデルのパラメータである漂砂量係数（波浪による砂移動分）Aw を変化させたケース１，２，また植生部の反射率を変化させたケース３，４を実施した(表－３)．護岸の反射率は中村ら[5]の結果より 0.7 とした．また，対策効果予測として，護岸の反射率を下げた場合としてケース 5，冬季水位を低下させた場合としてケース６，両方の対策を実施した場合としてケース７を検討した．対策効果は冬季についてのみ検討した．

４．現況再現結果

現況再現の目標としては冬季風浪により植生の北側湖岸側で植生の一部が侵食されることとした．計算の結果，植生帯前面の反射率は 0.1 と 0.3 で計算結果にさほど影響しなかったので，林ら[6]の実験事例よりここでは 0.1 を採用するものとする．また，漂砂量係数 Aw（波浪による砂移動分）については，冬期の侵食状況をよく表現している 0.1 を採用した．つまり冬季は北側に侵食が生じ，南側では侵食も堆積もほとんど生じないという状況である．したがってここではケース３，４が夏季と冬季の現況を再現したケースと考える．現況計算より水位の低い夏季に 10cm 程度波高が低いこと，冬季には護岸の前面が植生帯の前面より 10cm ほど波高が高く 50-60cm となることなどが分かった．

５．対策効果の予測

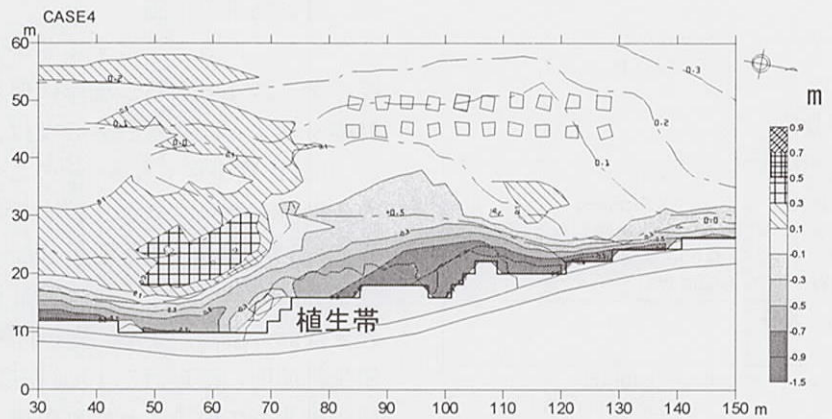
ケース５，６，７は全て冬季の計算となるので対照はケース４となる．護岸に何らかの工夫をして反射率を 0.1 としたケース５では，護岸前面の波高が約 10cm 程度小さくなり，そのことにより植生帯前面の沿岸流もケース４と比較すると 5cm 程度小さくなり，植生帯北側の侵食量も 10cm 程度抑制できた．水位を 20cm 下げたケース６では，植生帯前面で砕波が起き前面の波高が 10cm 程度小さくなった．ただし，植生帯前面の沿岸流は 10cm 程度大きくなった．また，植生帯北側で侵食された砂が植生帯前面に堆積する様子が見られたが，植生帯南岸では侵食量が 20cm 程度大きくなった．ケース５とケース６を組み合わせたケース７では，ケース４より波高が 10cm 程度低く，沿岸流が 5-10cm 早くなった．また，植生帯北側の侵食もケース４より範囲が減少し，植生帯前面では堆積域が存在する．またケース６で見られた南岸の侵食量も 20-40cm 小さいものとなっている．これらのことより，今回対象とした植生帯においては，

表－３　現況再現のための計算ケース

ケース番号	波浪条件	護岸反射率	植生部反射率	水位	漂砂量係数		備考
					Ａｗ	Ａｃ	
ケース１	夏季	0.7	0.3	+1.10	0.1	1.0	
		0.7	0.3	+1.10	0.2	1.0	ｹｰｽ1-2
		0.7	0.3	+1.10	0.0	1.0	ｹｰｽ1-3
ケース２	冬季	0.7	0.3	+1.30	0.1	1.0	
		0.7	0.3	+1.30	0.2	1.0	ｹｰｽ2-2
		0.7	0.3	+1.30	0.0	1.0	ｹｰｽ2-3
ケース３	夏季	0.7	0.1	+1.10	0.1	1.0	
ケース４	冬季	0.7	0.1	+1.30	0.1	1.0	

表－４　対策効果予測のための計算ケース

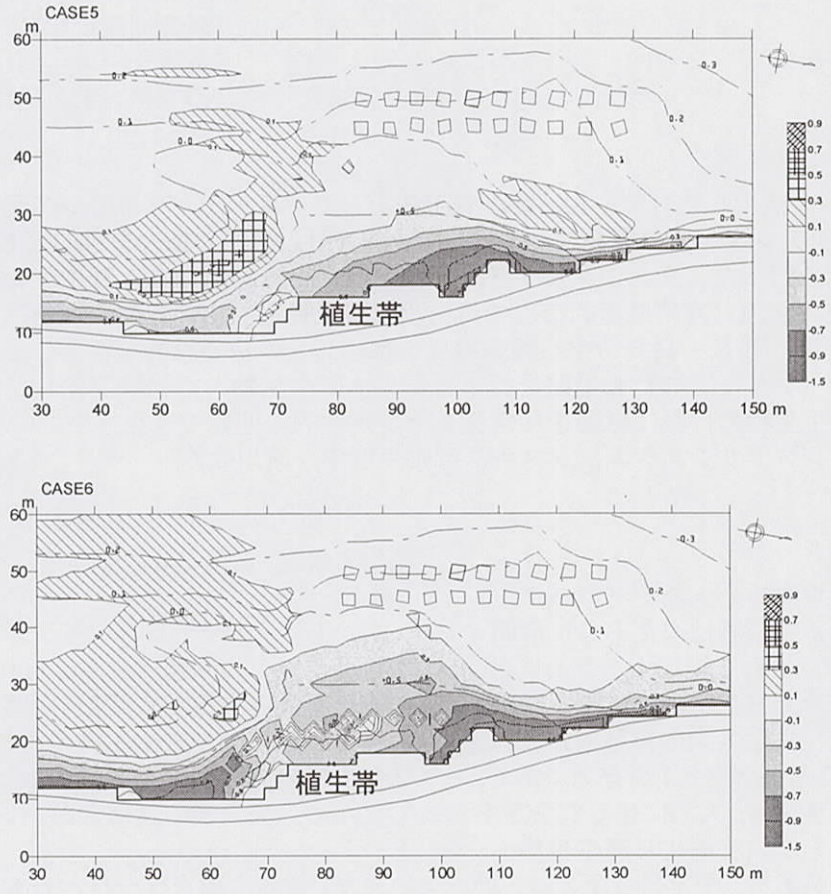
ケース番号	波浪条件	護岸反射率	植生部反射率	水位	漂砂量係数		備考
					Ａｗ	Ａｃ	
ケース５	冬季	0.1	0.1	+1.30	0.1	1.0	反射率低減効果を期待するｹｰｽ
ケース６	冬季	0.7	0.1	+1.10	0.1	1.0	水位調整を行うケース
ケース７	冬季	0.1	0.1	+1.10	0.1	1.0	ケース５と６を組み合わせたｹｰｽ



図－２　地盤変化量（ケース４）

植生帯周辺の反射率の高い護岸は植生帯の侵食を促進していることが分かる．また，水位低下によって植生帯前面の沿岸流速が大きくなり，流れによる漂砂量が増加した．ただし，この現象は現地観測など

によって確認する必要がある．



図—3　地盤変化量（ケース5，6）

6．今後の課題

今回は再現性の検討を定性的な現象に基づいて実施した．今後，地形測量結果などにより再現性を検討し，このモデルの精度を高める必要がある．今回モデルに使用したエネルギー平衡方程式では，植生帯の侵食に大きな影響を及ぼしていると考えられる護岸に沿った波（沿い波）の影響を明らかに出来ないので，今後は反射を直接扱える緩勾配方程式を適用することも検討したい．また，今回のモデルではヨシの波浪に対する応答をモデルにまったく組み込んでいないので，ヨシの侵食機構に基づいたモデルの変更，つまり海浜モデルから湖岸植生帯モデルへの変更を実施する必要がある．

参考文献

1）　Yoshio Sakurai: Decrease in Vegetation Area, Standing Biomass and Species Diversity of Aquatic Macrophytes in Lake Kasumigaura (Nishiura) in Recent Years,　Jpn. J. Limol., 51, 45-48, 1990.
2）西廣淳・藤原宣夫：湖沼沿岸の植生帯の衰退と土壌シードバンクによる再生の可能性－霞ヶ浦を例に－，土木技術資料 42(12)，34-39，2000.
3）中村圭吾，西廣淳，島谷幸宏：霞ヶ浦（西浦）におけるヨシ原を中心とした沿岸植生帯の縮小化と分断化に関する研究，第 28 回環境システム研究論文発表会講演集，pp. 307-312，2000.
4）宮脇成生・西廣淳・中村圭吾・藤原宣夫：霞ヶ浦湖岸植生の変遷とその要因，応用生態工学研究会・第 5 回大会発表要旨集（印刷中），2001.
5）中村圭吾，門倉信行，宗像義之，島谷幸宏，宇多高明：消波浮島による湖岸植生帯の復元に関する研究，環境システム研究－全文審査部門論文－，Vol. 27, pp. 305-314, 1999.
6）林建二郎・萩原運弘・上原正一，藤間功司・重村利幸：水辺植生の水理特性について，海岸工学論文集，45，1121-1125，1998.

4.4　ITを活用した野生生物追跡調査手法の開発

研究予算：一般勘定
研究期間：平13～平17
担当チーム：河川生態チーム
研究担当者：尾澤卓思，傳田正利

【要旨】
本研究では，IT 技術を活用した野生生物追跡調査手法としてマルチテレメトリシステムの開発を行っている．本年度は，マルチテレメトリの開発の一環として，調査対象生物の拡大を目的として発信機の小型・軽量・長寿命化の検討を行った．また，マルチテレメトリシステムを活用した野生生物追跡調査手法の開発として，五ヶ瀬川支川北川（宮崎県延岡市）で河川改修時の野生生物の行動追跡を行った．
その結果，発信機小型・軽量・長寿命化へ開発項目を整理しその基礎設計を行うことができた．また，河川改修時の野生生物（タヌキ）の行動追跡を行った結果，野生生物の行動は変化し，河川改修事業による生息環境の改変が野生生物の行動に影響を与えることが定性的に把握できた．
キーワード：マルチテレメトリシステム，タヌキ，行動生態学，河川改修

はじめに

河川改修事業やダム事業等の人為的インパクトが野生生物の生態に与える影響は未だ十分に解明されていない．このため，これを把握するためには，人為的インパクトを併せて野生生物の行動を詳細に追跡する必要がある．野生生物の行動追跡には，テレメトリ調査手法（発信機追跡法）が有効である．現在のテレメトリ調査手法は，人力に頼る部分が多くテレメトリ調査手法をシステム化し野生生物追跡手法を開発する必要がある．土木研究所では，効率的かつ低コストの調査を実現するためマルチテレメトリシステムの開発を行っている．

マルチテレメトリシステムは，複数生物の位置，行動を同時に追跡できる機能を持っている．同時追跡は，電波発信機の発信を遠隔制御で管理することにより可能になる．また，遠隔制御は，観測者が生物の行動を知りたい時だけ発信機を発信させる観測スケジュール管理も可能にする．これらの機能により必要期間以外の発信機の発信をなくし，電池の消耗を抑え長期間の発信を可能にしている．発信機から発信された電波を複数の受信局により受信し解析することで，発信機の位置を10m×10mの精度で検出することを可能にしている．また，発信機は通信端末の機能を有し，外部に取り付けたセンサー（GPSセンサー，生理情報センサー，物理環境センサー）等の情報を遠隔地に伝送する機能がある．発信機と取り付けた野生生物の情報を離れた場所から観測することが出来る機能は野生生物の移動軌跡情報と照らし合わせると，野生生物が生息空間を利用する時の状態を把握することができ，行動生態学の研究，環境アセスメント等に有効なツールとなると考えられる．

しかし，マルチテレメトリシステムの実用化を考える場合以下の問題点が挙げられる．①発信機の高機能化を実現するため，発信回路が大型化し発信機の重量が重くなり野生生物の行動へ影響を与える．②発信機の高機能化を実現するためＣＰＵを搭載したため，発信機の送信寿命が1ヶ月と短かったこと．

また，実際に調査ツールとしての有効性を実際のフィールドで検証し，実際のデータを解析するマルチテレメトリを用いた野生生物追跡調査手法を開発する必要がある．

このような背景から，本年度は①発信機の小型・長寿命化の設計，②マルチテレメトリを用いた野生生物追跡調査手法を開発として，五ヶ瀬川支川北川（宮崎県延岡市）で河川改修時の野生生物の行動追跡を行った．

２．研究方法

２．１　小型・長寿命化発信機の設計

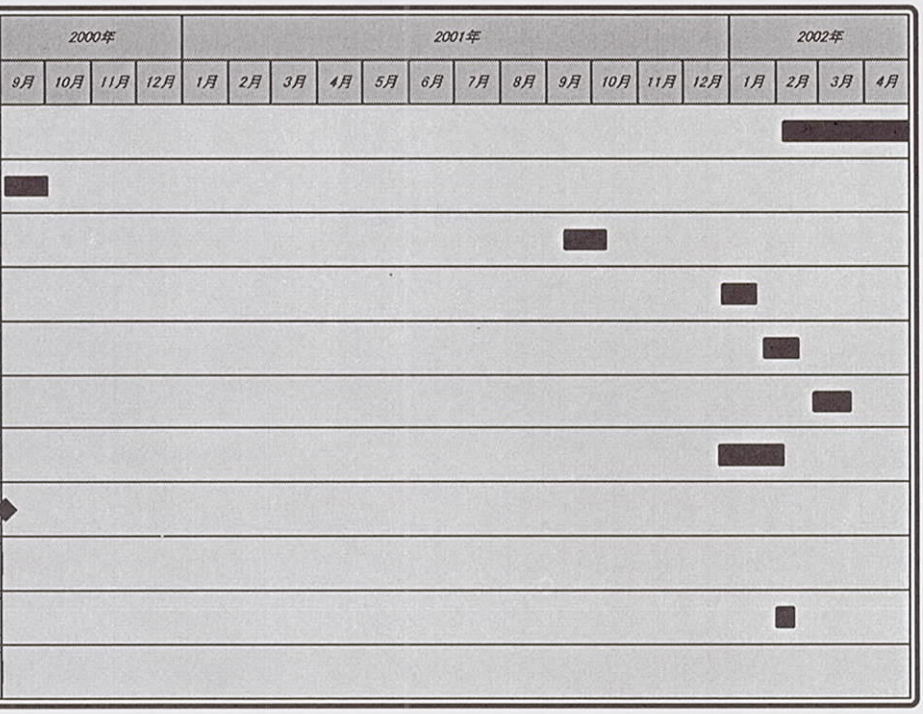
小型・長寿命化の発信機開発のため発信機の回路設計の見直しを行った．小型化は，回路部品としての許容重量算出，配置計画及び部品の開発状況調査を行った．発信機の長寿命化は，従来型マルチテレメトリシステムの発信機の回路設計の論理ブロック図レベルにおいて消費電力の算出を行い，長寿命化を行う上で最も有効な改良部品について考察した．

2．2　マルチテレメトリを用いた野生生物追跡調査手法開発

五ヶ瀬川支川北川（宮崎県延岡市）的野地区において，実際に河川改修事業を行っている現地にマルチテレメトリシステムを設置し，野生のタヌキについて行動追跡を行った．また，河川改修事業が行われる前の追跡調査結果と比較し，河川改修事業実施時のタヌキの行動変化について考察した．タヌキの追跡期間を表．１に示す．追跡したタヌキの個体を図．１に示す．

表．１　タヌキの追跡期間表

ID	工事期間・調査個体	開始	終了
1	工事期間	2002/02/05	2002/09/17
2	Tanu10	2000/09/04	2000/10/02
3	Tanu10	2001/09/12	2001/10/10
4	Tanu10	2001/12/26	2002/01/18
5	Tanu10	2002/01/23	2002/02/15
6	Tanu10	2002/02/25	2002/03/22
7	Tanu12	2001/12/24	2002/02/05
8	Tanu13	2000/09/04	2000/09/04
9	Tanu1*	2000/09/01	2000/09/01
10	Ita 5	2002/01/31	2002/02/12
11	Ita 6	2000/09/01	2000/09/01



3．研究結果

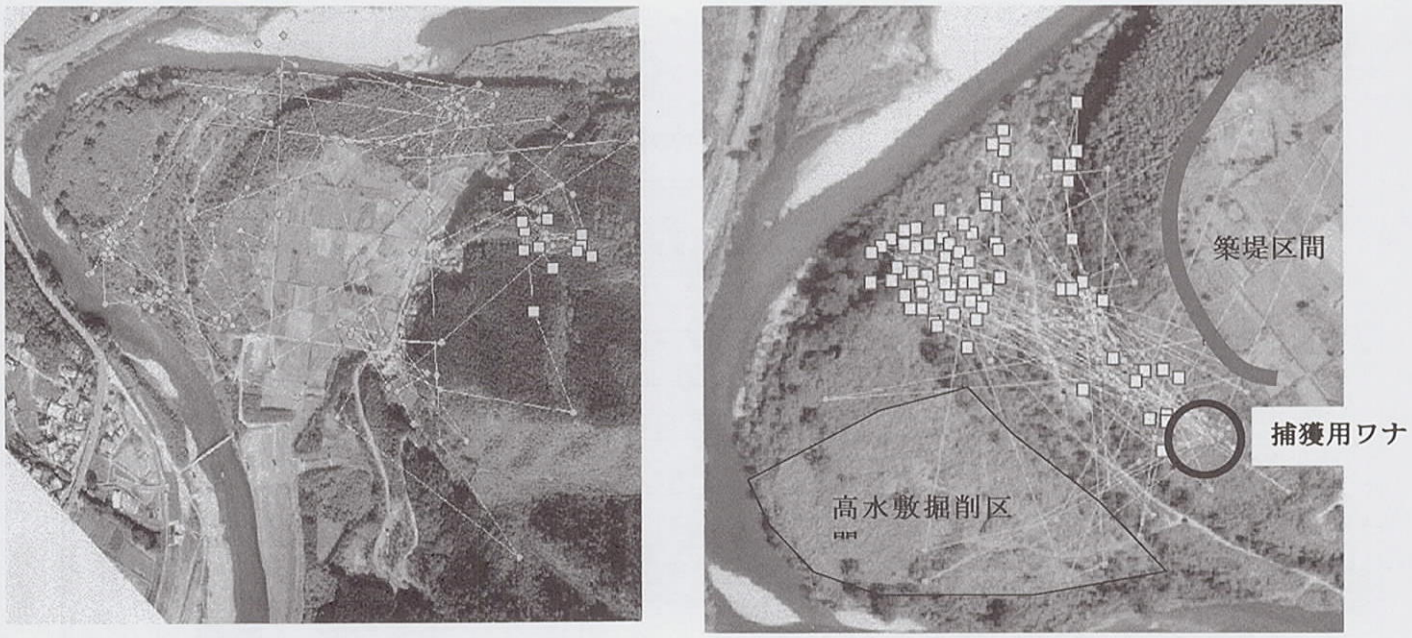
3．１　小型・長寿命化発信機の設計と小型化に向けての準備

小型軽量・長寿命化の発信機開発のため発信機の回路設計の見直しを行った．

発信機の小型軽量化の実現に向けて最も大きな問題点は，トランシーバーモジュールで既存の電子部品では，大型で重量が重く，かつ電力消費量が高いことが明らかになり，改良を行う回路設計を行った．

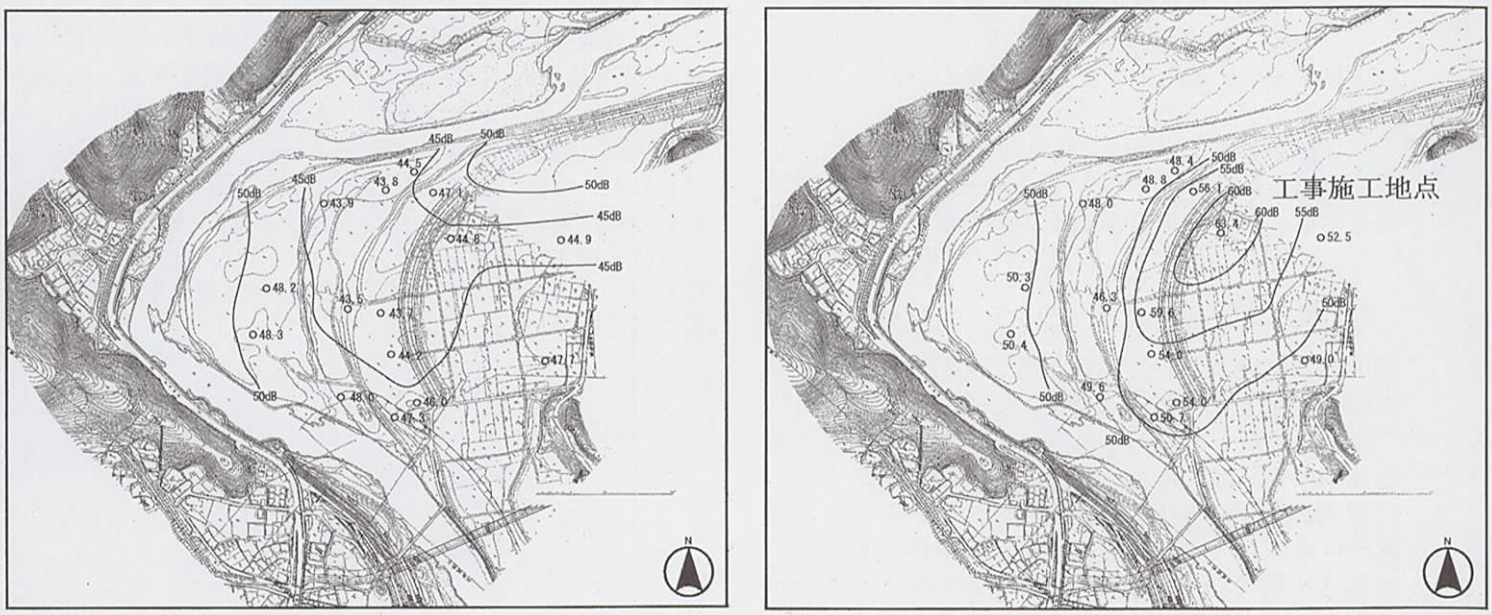
発信機の長寿命化について検討した結果，従来型発信機の問題点は特定省電力対応の仕様にあり，発信機の寿命を短くする原因であることが明らかになった．特定省電力対応仕様（総務省から指定される技術仕様）は，他の無線機器との混線を防ぐため使用周波数域の使用状況を探査する機能の実装が義務付けられている．そのため，発信機本来の目的である電波を送受信する以外の探査用の電気回路が取り付けられて，発信機の送信寿命が短くなることが明らかになった．

改善策としては，探査用回路が不要な特定省電力対応周波数以外の発信機を開発することが必要となり，総務省に無線局免許（総務省が特定の機関に特定周波数の占用使用許可を与える制度）を申請した．平成14年2月1日に無線局免許（周波数406.2MHz，固定局送信出力：1W，移動局送信出力：0.1W）が交付された．今後は無線局免許に対応する発信機を製作し，発信機の長寿命化を行う．また，無線局の周波数で電波伝搬工学研究を行い，その知見を利用して電波発信時に必要最低限の送信出力で電波送信を行う発信回路の設計を行う．



事業実施前（2001 年 9 月～10 月）　　事業実施中（2002 年 2 月～3 月）

図．2　河川改修実施前のタヌキの行動圏



事業実施前（2002 年 1 月）　　事業実施中（2002 年 2 月）

図．3　河川改修実施中の騒音環境の変化

3．2　マルチテレメトリを用いた野生生物追跡調査手法を開発

図．2に河川改修事業実施前のタヌキの行動，河川改修事業実施時のタヌキの行動を示す．

河川改修事業実施前のタヌキの行動は，既往の研究で言われているように，昼，山の中で休息・睡眠し夜，河川高水敷，集落に降りてきて行動していることがわかる．夜，タヌキは河川高水敷上で採餌や他のタヌキ個体の情報収集を行い，集落の周辺を歩き回り山の中へ戻っていく様子がわかる．

一方，河川改修事業実施時，タヌキの行動は依然と比較して変化し行動圏が小さくなり，昼も夜も河川高水敷内に滞留し，夜，捕獲用ワナの場所へ餌をとりに行っている様子を見ることができる．

これらの行動変化は，以下の要因が考えられる．

一つ目は，タヌキ行動圏内の植生状況の改変である．河川改修時，タヌキの行動圏内，特に河川高水敷と山の間に見られる竹林，河川高水敷の植生を大きく改変しているためと考えられる．河川改修事業前，タヌキは山から竹林の脇を移動し，河川高水敷の植生内部を移動し，集落を通り山の中へ戻っていた．しかし，河川改修事業時により竹林・河川高水敷の植生の多くは伐採された．また，竹林に沿うようにして築堤工事が行われ移動経路が分断された．

２つ目は，河川改修事業実施時，大型工作機械・作業人員が工事実施区間内を頻繁に移動することが要因として考えられる．野生生物，特にタヌキは行動圏内の臭気の変化を敏感に察知し警戒行動をとる．そのため，不特定多数の人間，工作機械が行動圏内に入ってくることは大きなストレスとなったと考えられる．

３つ目は騒音振動環境の変化である．特に騒音環境の変化は事業実施前，事業実施時には大きな変化がある．図．３に河川改修事業実施前，河川改修事業実施時の騒音振動の変化を示す．昼間，工事実施区間を中心に約20dBの騒音レベルの上昇がみられる．この騒音振動環境の変化は，夜行性の生態のタヌキへも直接的でないが影響を与えていると考えられる．工事実施区間への移動を警戒させ，タヌキの行動圏変化に何らか影響を与えていると考えられる．

4．まとめ

小型・長寿命化発信機の設計と小型化に向けての準備

小型軽量・長寿命化の発信機開発のため発信機の回路設計の見直しを行った．発信機の小型軽量化の実現の問題点は，トランシーバーモジュールで，大型，重量が重く，かつ電力消費量が高いことが明らかになり改良を行う回路設計を行った．発信機の長寿命化について検討した結果，従来型発信機の問題点が特定省電力対応の仕様であったことが発信機の寿命が短い原因であることが明らかになった．

改善策としては，探査用回路が不要な特定省電力対応周波数以外の発信機を開発することが必要となり，総務省に無線局免許（総務省が特定の機関に特定周波数の占用使用許可を与える制度）を申請し交付された．今後は無線局免許に対応する発信機を製作し，発信機の長寿命化を行う予定である．

マルチテレメトリを用いた野生生物追跡調査手法を開発

五ヶ瀬川支川北川（宮崎県延岡市）的野地区において，河川事業実施前，河川事業実施時の野生のタヌキについて行動追跡を行った．河川改修事業実施時，タヌキの行動は河川事業実施前と比較して変化した．河川改修時，昼，山の中で休息・睡眠し，夜，河川高水敷，集落に降りてきていた．河川改修実施時タヌキの行動圏が小さくなり，昼も夜も河川高水敷内に滞留していた．これは，タヌキ行動圏内の植生状況の改変，河川改修事業実施時，大型工作機械・作業人員が工事実施区間内を頻繁に移動すること，騒音振動環境の変化等が主な要因と考えられる．

参考文献

1）Charles J.Amlaner Jr. and David W.Macdonald:A Handbook on Biotelemetry and Radaio Tracking, PERAMON PRESS, 1995

2）Larry A. Nielsen :Methods of Marking Fish and Shellfish, American Fisheies Society,1992

3）Robert Kenward: Wildlife Radio Tagging, Academic Press,1993

4）河川生態学術研究会：川の自然環境の解明に向けて 河川生態学術研究会の概要

5）奥村義久、進士昌明：移動体通信の基礎、電気情報通信学会，1986.9

6）虫明康人：アンテナ・電波伝搬、コロナ社 1986.2

7）土肥昭夫/岩本俊孝/三浦慎吾/池田啓：「哺乳類の生態学」1997年1月

V　都市空間におけるヒートアイランド軽減技術の評価手法に関する研究

研究期間：平成 11 年度～15 年度
プロジェクトリーダー：水工研究グループ上席研究員（水理水文）　吉谷純一
研究担当グループ：水工研究グループ（水理水文）、基礎道路技術研究グループ（舗装）

1.　研究の必要性

人口の集中とエネルギー消費、緑被や水面の減少などにより、都市域の温暖化現象（ヒートアイランド現象）が進行していることが広く知られている。しばしば、道路舗装がその主原因と思われたり、水循環系再生計画における緑地・水面保全計画がその対策ともなると期待されたりすることがある。このため、社会基盤整備におけるヒートアイランド現象への影響を定量的に把握するとともに、その軽減策を提示することが求められている。

2.　研究の範囲と達成目標

本研究プロジェクト研究では、都市域の気象解析モデルを開発するとともに、都市域のヒートアイランド現象軽減策のうち、社会資本整備の立場からの貢献として、各種対策を講じた場合の必要費用を可能なものについて算出し、対策の効果を都市域の気温低減、地表面付近の気温などの居住環境改善、エネルギー使用量の削減量などで算定することにより、効果的なヒートアイランド軽減施策の推進に資する資料を提供することを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

①　都市域におけるヒートアイランド現象のシミュレーション手法の確立
②　対策技術および対策シナリオの提案
　②-1 温度低減性能に優れた舗装材料の提案
　②-2 各種対策シナリオの開発
③　対策シナリオの費用と気温低減・使用エネルギー削減効果の評価手法の提案
　③-1　社会基盤整備に伴うヒートアイランド軽減対策の効果の解明
　③-2　緑被や水域など気候緩和効果の予測と評価手法の提案
　③-3　排熱対策の効果の予測と評価手法の提案

3.　個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

①　メソスケールモデルを用いた各種対策による気温低減効果の予測に関する研究（平成 11～14 年度）
②　ヒートアイランド現象軽減手法の費用対効果に関する研究（平成 13～15 年度）
③　都市環境に配慮した舗装構造に関する研究（平成 12～15 年度）

なお、平成 13 年度はこれらすべての課題を実施している。

4.　研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、これまでに実施してきた研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1)　都市域におけるヒートアイランド現象のシミュレーション手法の確立

「メソスケールモデルを用いた各種対策による気温低減効果の予測に関する研究」は、旧土木研究所の研究を引き継いで実施している研究であり、ヒートアイランド現象に対する各種対策の気温低減効果を評価、予測できるメソスケールモデルの基本的なモデルはすでに平成 12 年度に開発している。今年度は、人工排熱量変化シナリオの効果をシミュレーションできるように、モデルの改良を行った。ただし、改良したモデルは人工排熱の削

減、気温の低下、排熱量のさらなる減少というフィードバックを表現できるモデルにはなっておらず、そのような改良は、次年度以降に行う予定である。

(2) 対策技術および対策シナリオの提案

「メソスケールモデルを用いた各種対策による気温低減効果の予測に関する研究」においては、東京区部における現実的な人工排熱量変化シナリオを作成した。すなわち、首都圏における民生家庭部門、民生業務部門、運輸部門の排熱量の時空間分布の特徴を明らかにして、各部門の人工排熱量変化シナリオに基づく 2010 年時点における人工排熱量の時空間分布を算出した。これより、積極的な削減策がとられない場合には、現状よりも 40 % 程度人工排熱量が増加する結果となった。しかし、建築物の断熱性能の向上や高効率機器、低公害車の普及、省エネ行動の実践などを行えば、将来の人工排熱量を現状レベルに止めることが可能であることを示した。

また、「都市環境に配慮した舗装構造に関する研究」においては、車道に適用できる保水性舗装、透水性舗装の開発を目標として、保水性セメントを利用した保水性舗装、遮水層を設けた透水性舗装の 2 種について、試験施工によって温度低減効果の機能評価と耐久性評価を行った。温度低減効果については、透水性舗装は、密粒度アスファルトと比較して温度差が小さく、その効果がほとんどないことが分かった。しかし、透水性舗装に白色のトップコートを施工することにより多少の温度低減効果が得られた。これは、トップコートによりアルベード（太陽光の反射率）が変わったためと思われ、今後、さらに検討する予定である。一方、保水性舗装は、密粒度アスファルトと比較して温度低減効果が大きく、特に降雨翌日では、表面温度を 10～15℃程度低減できることが分かった。

なお、荷重車を用いた促進載荷による耐久性試験によれば、両舗装は路面性状に差がなく、良好な表面性状を保持していることが判明した。また、FWD によるたわみ量から判断して舗装構造としての耐久性には問題はないものと思われる。ただし、保水性舗装においては保水剤の流出が見られ、長期的な温度低減効果への影響が懸念されるため、今後の検討が必要である。

(3) 対策シナリオの費用と気温低減・使用エネルギー削減効果の評価手法の提案

「ヒートアイランド現象軽減手法の費用対効果に関する研究」において、東京 23 区内における屋上緑化の普及、河川の水面再生、保水性舗装導入対策に関するシナリオについて、メソスケールモデルを用いて首都圏における夏期のヒートアイランド現象のシミュレーションを行い、対策実施による気温低減効果の予測を行った。この結果、屋上緑化の普及、河川の水面再生、保水性舗装導入のいずれの対策も、最大限の対策シナリオの実施によっても得られる気温低減は都心部で 1℃未満であった。ただし、屋上緑化については、夜間にも一定規模の気温低減効果が期待できること、現行の東京都による 15 年後の緑化目標値では、都心部の気温低下量が 0.15℃程度とわずかであることなどが分かった。また、保水性舗装の気温低減効果は舗装の保水・蒸発性能に大きく依存することが分かった。

なお、対策工の費用算出および使用エネルギー削減効果については、次年度以降に検討する予定である。

5.1　メソスケールモデルを用いた各種対策による気温低減効果の予測に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 11～平 14
担当チーム：水工研究グループ（水理水文）
研究担当者：吉谷純一、木内豪

【要旨】
都市域のヒートアイランド現象を緩和するため、各種対策が提案されているが、実際の都市に活用するには、社会基盤などの実態に即した対策シナリオを提示し、これらの気温低減効果を予測する必要がある。本研究では、東京都区部を対象としたヒートアイランド現象軽減対策シナリオを提案し、これら対策シナリオの地域スケールでの気温低減効果予測のためのメソスケールモデルの開発を行う。平成 13 年度は、人工排熱量の削減効果を明らかにするため、首都圏における民生家庭部門、民生業務部門、運輸部門の排熱量時空間分布の特徴を明らかにするとともに、2010 年時点における各部門の人工排熱量変化シナリオを作成し、削減対策の有無による時空間分布を算出し、積極的な削減策がとられない場合には現状よりも 40%程度排熱量が増加すること、建築物の断熱性能の向上や高効率機器・低公害車の普及、省エネ行動の実践などにより、将来の人工排熱量を現状レベルに止めることが可能であることを示した。
キーワード：メソスケールモデル、ヒートアイランド、人工排熱、時空間分布、将来推計

1．はじめに

都市域のヒートアイランド現象を緩和するため、各種対策が提案されているが、実際の都市に活用するには、社会基盤などの実態に即した対策シナリオを提示し、これらの気温低減効果を予測する必要がある。本研究では、東京都区部を対象としたヒートアイランド現象軽減対策シナリオを提案し、これら対策シナリオの地域スケールでの気温低減効果予測のためのメソスケールモデル開発を行う。平成 13 年度は、人工排熱量の削減シナリオを提案して、その効果を明らかにするため、各種既存データを用いて、首都圏における民生家庭部門、民生業務部門、運輸部門の排熱量の時空間分布を定量化するとともに、2010 年時点における各部門の人工排熱量変化シナリオを作成し、削減対策の有無による時空間分布を算出した。

2．首都圏人工排熱時空間分布の定量化

2．1　民生家庭部門の人工排熱量推計

2.1.1 エネルギー消費量の原単位

住宅で消費されるエネルギーは、通常、暖房、冷房、動力、照明、給湯、厨房によるものに分けられる。このような用途別の住宅におけるエネルギー消費量についてはこれまでにも多くの調査が行われているが、住宅の年間エネルギー消費量が住宅の断熱性や気密性、戸建住宅と集合住宅の別、世帯の人数や構成、ライフスタイルの変化によって左右されることから、都市全体におけるエネルギー消費量を積み上げにより求める場合には、調査時期やサンプル数に注意の上、適切な原単位を使う必要がある。本研究では、将来の人工排熱量予測にも適用できるように、各メッシュ内の世帯数と世帯人数の平均値から次式により各メッシュ内のエネルギー消費量を算出できるように、日本エネルギー経済研究所の調査結果 [1] に基づき回帰式を算定した。

$$1\text{メッシュあたりエネルギー消費量原単位} = \Sigma fi(ni) \times si$$
$$fi = di^* \ (0.193^*ni + 0.422) \ (r2 = 0.9868) \qquad (1)$$

ここで、ni：世帯あたりの人数、fi：1 世帯あたりのエネルギー消費量原単位、si：1 メッシュあたりの世帯数、di：1 世帯あたりのエネルギー消費原単位の平均値である。 i は戸建て住宅と集合住宅の別を意味する。これらの値は文献 1 に従い、表 1 の通り設定した。

表 1　住宅のエネルギー消費量原単位

住宅種別		戸建住宅		集合住宅	
地　域		関東	東京	関東	東京
原単位(MJ/世帯・年)		52898	49499	37042	35535
構成割合 %	照明・動力等	26.6	25.1	28.1	26.2
	厨房・煮炊	7.7	7.7	10.6	9.9
	給湯	35.1	39.8	38.1	45
	暖房	29	25.8	21.5	16.9
	冷房	1.6	1.6	1.7	2

2.1.2 人工排熱時空間分布の算出

民生家庭部門における人工排熱時空間分布の算出にあたっては、次のような手順をとった。

a)３次メッシュあたり用途別エネルギー消費量の算定
b)エネルギー消費量から人工排熱量への換算（エネルギー源構成を考慮）
c)用途別に月別時刻別人工排熱量への換算

a)３次メッシュあたり用途別エネルギー消費量算定

地域メッシュ統計データ(平成 7 年版)に基づき、３次メッシュ単位の世帯数、世帯人員、集合住宅と戸建住宅の存在比率と、式(1)から算出される１世帯あたりのエネルギー消費量原単位に基づき、３次メッシュあたりの用途別エネルギー消費量を算定する。

b)エネルギー消費量から人工排熱量への換算

機器への投入エネルギーのうちのいくらが実質的に人工排熱に変わるかについて、用途毎に換算する。暖房、電力・照明の機器投入エネルギーはそのまま実質の排熱量となる。また、給湯に関しては、投入エネルギー量うち、機器効率分は大気中に排熱として放出され、残りは全て下水等へ排出されるとした。厨房における使用エネルギーについては 100%が空気中への排熱になると仮定した。冷房に関しては、冷房機器の運転に伴い除去される熱量Qは、機器の効率をη、機器投入エネルギー量をＥとすれば、Ｑ＝η×Ｅと表される。これらには、電力・照明や給湯・厨房に起因する熱の一部に加えて、外壁・ガラスを通じて室内に移入する日射や放射熱、外気によりもたらされる熱、人体からの発熱分の一部も含まれる。これらの割合は住宅毎に異なると考えられるが、例えば事務所ビルの冷房負荷の内訳[2]を見ると、約 200MJ/m²/年の熱負荷のうち、取り入れ外気や隙間風により発生するものが全体の 27%、照明が 30%、人体が 36%、外壁やガラスよる侵入する熱が 7%となっている。住宅の場合には構成割合も違ってくると考えられる。また、高気密・高断熱住宅の割合が高まるにつれて、動力・照明や給湯・厨房に起因する内部発熱によるウェイトが高まってくるものと予想される。本研究では、除去熱量Qのうち、人体および外壁やガラスからの侵入熱に起因する量は、事務所の場合よりも少ないと考えられることから、10%と仮定した。また、住宅用空気熱源冷房機器の効率ηの値として３を与える。これにより、冷房による人工排熱量Ｅc＝Ｅ＋Ｑ×0.1 となる。取り入れ外気や隙間風によるものは室内と外部の間を循環しており、正味の排熱量増加には寄与しないと考えた。また、除去熱量の顕熱・潜熱比率は文献３を参考に 9:1 と設定し、投入エネルギーＥは全量顕熱とした。

ｃ）用途別・月別・時刻別人工排熱量への換算

熱需要量に関する用途別、月別、時刻別の変動パターンに関する既往の調査結果[4]を用いて、各メッシュにおける人工排熱量を顕熱分、潜熱分に分けて月別、時刻別にデータベース化した。

２．２　民生業務部門の人工排熱量推計

2.2.1 エネルギー消費量の算定

業務用建物のエネルギー消費量算出にあたっては、建物用途別の延床面積に単位床面積あたりのエネルギー消費量原単位を掛け合わせる手法を用いる。今回対象とする７都県の建物用途別延床面積データは各自治体の生活環境部局やエネルギー担当部局から情報を収集したが、自治体により分類区分、算出方法、算出年に違いがあり、推計精度にも影響があることは避けられない。この点については今後、検討を要する部分である。

各自治体の延べ床面積は表-2 に示す建物用途９分類毎に算出されている場合が多い。そこで、業務部門の建物用途別エネルギー消費量原単位としては、この分類に適合する既存の調査結果を用いた。本研究では、この９分類に適合する調査結果として表-2 に示した報告値[5]を用いる。

表-2　業務部門における建物用途別エネルギー消費量原単位　（単位：MJ/m²/年）

建物用途	照明電力	冷房	暖房	給湯厨房	調査地
事務所ビル	586.2	104.3	98.0	142.4	東京
卸・小売業	912.8	231.5	44.8	321.6	全国
飲食店	739.4	158.3	164.5	1337.3	全国
学校・試験研究機関	173.8	20.9	175.0	103.0	全国
学校	123.1	12.6	174.6	50.2	全国
試験研究機関	549.8	76.6	103.0	280.9	全国
ホテル・旅館	720.2	281.4	157.4	885.1	東名大
病院・医療関連施設	546.0	193.9	232.4	843.3	東名大
その他サービス業	328.3	86.3	144.9	230.7	全国

事務所ビル、卸・小売業、飲食店は 1990 年の調査、それ以外は 1991 年の調査。東：東京、名：名古屋、大：大阪の略

2.2.2 人工排熱時空間分布の算出

民生業務部門における人工排熱時空間分布の算出にあたっては、次のような手順をとった。

a)都県別建物用途別エネルギー消費量の算定
b)建物用途別エネルギー消費量を人工排熱量に換算

c)建物用途別・月別・時刻別の人工排熱量を算出
d)都県別排熱量を各メッシュの排熱量へ配分

b)においては、住宅の場合と同様に考え方に基づき排熱量に換算した。ただし、給湯・厨房原単位に占める厨房の割合は25%、冷房における人体及び外壁・ガラスからの侵入熱の割合は40%、顕熱・潜熱比は1:9、水冷と空冷の比率は1:1と設定した。

c)における用途別・月別・時刻別パターンは住宅と同じく文献4に従った。

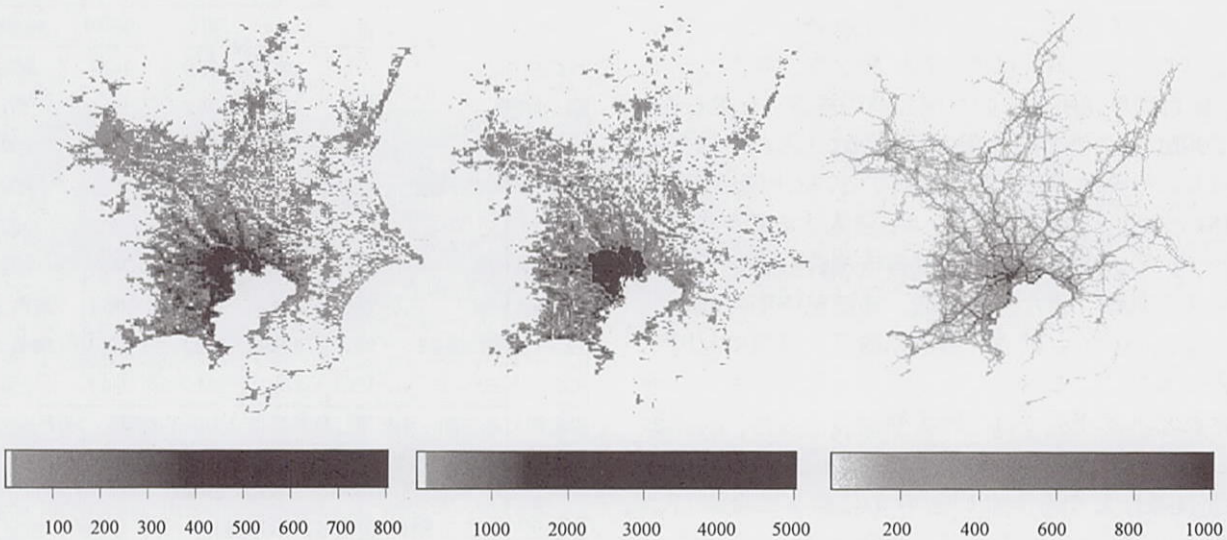
d)において、都県別排熱量を各メッシュの排熱量に配分するに当たっては、細密数値情報と国土数値情報の業務建物に関する土地利用分類（商業・業務用地、公共公益施設用地、建物用地）の存在割合に応じて配分する方法を用いた。ただし、建物の階数に関する情報がないため、文献6の土地利用別の排熱原単位に応じて重み付けをした。このような手法によっても、建物の密集しているところでは排熱量を過小評価し、建物用地に占める建物面積の割合が小さいところでは排熱量を過大評価している可能性が高い。しかしながら、ある程度の領域平均でみれば、平均化されることから、今回入手可能な延床面積データの精度を考えれば、やむを得ない手法である。今後は、各種の統計データにもとづいて、延床面積のメッシュデータ化を検討する必要がある。

2．3　道路交通に伴うエネルギー消費量の推計

道路交通に伴う消費エネルギー量の推定にあたっては、車種別時刻別区間別の交通量と車種別車速別エネルギー消費量原単位が必要となる。交通量の推計にあたっては、6年度の一般交通量調査の交通量データおよび平成6年度センサスベース現況ＯＤ表を用い、幹線道路と細街路にわけて集計を行った。推計手法は文献6に提示されている方法を基本とした。また、二輪車、四輪車のエネルギー消費量に関する原単位（排出係数）は文献 7、8 を参考に定めた。

3．人工排熱量時空間分布の推定結果

以上の方法に基づいて算出した夏期（8月）の代表日における人工排熱量空間分布の算出結果を図-1に示す。家庭、業務、運輸のいずれの部門においても、大まかには東京都区部で最も単位面積あたりの排熱量が大きく、周辺部にいくに従って低減する傾向を示すが、部門によってその特徴は若干異なる。家庭部門では、都心周辺にベルト状に排熱量の大きいエリアが分布しており、都心部の排熱量はそれよりやや小さいことがわかる。業務部門の排熱量は、都区部で周辺よりも非常に大きな値を示しており、家庭部門がなだらかな分布であるのに対して、コントラストが際だっている。これには、都区部を囲む県の業務建物床面積情報がメッシュデータではなく、県一括の数値であることにも原因があると思われる。運輸部門（自動車）の日排熱量は特に都心の幹線道



民生家庭部門
最大値 869KJ/m^2/day

民生業務部門
最大値 9074KJ/m^2/day

運輸部門
最大値 2268KJ/m^2/day

図-1　民生・運輸の各部門からの日排熱量分布（単位：KJ/m^2/day）

路を有するメッシュにおいて高い値を示しており、家庭部門からの日排熱量の最大値より大きな値となっているところも見られる。民生・運輸部門合計の日排熱量分布を図-2 に示す。合計値で見ても、都心部は周辺よりも格段に多量の人工排熱を放出していることが推定された。

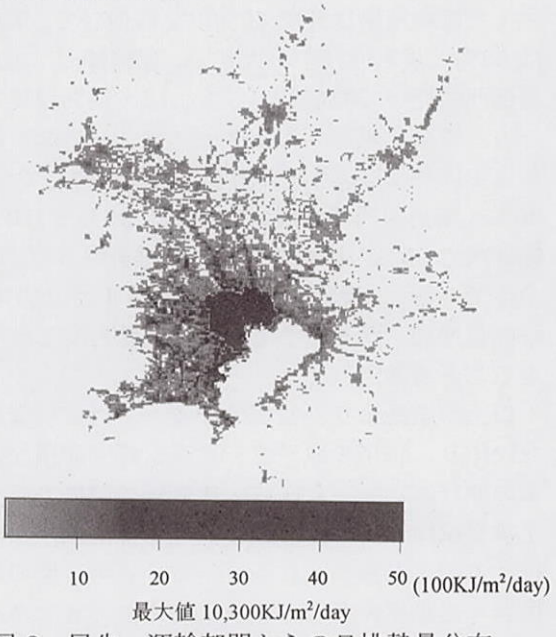


図-2　民生・運輸部門からの日排熱量分布

表-3　各部門からの都県別日排熱量（TJ/日）

	民生家庭	民生業務	運輸（幹線）	運輸（細街路）
茨城県	89.80	411.75	143.25	11.83
栃木県	61.88	281.97	104.69	8.07
群馬県	62.66	291.29	95.92	11.06
埼玉県	206.89	750.86	208.61	25.96
千葉県	178.01	569.67	170.12	23.55
東京都	354.02	2219.33	304.59	32.89
神奈川県	250.94	841.13	204.80	31.90

都県単位で部門別に日排熱量を整理したものが表-3 である。いずれの都県においても民生業務部門の日排熱量が最も大きく、東京都と神奈川県では民生家庭部門が２番目に大きい一方、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県では幹線・細街路合わせた自動車からの日排熱量が家庭部門よりも大きいことがわかる。また、東京都の民生業務部門の排熱量は首都圏全体における夏期の民生・運輸部門排熱量の約３割を占めていることがわかる。

次に、時間変動の特徴について見てみる。もっとも排熱量の大きい東京都区部を対象に、部門別の排熱量の 24 時間変動を示したのが図-3 である。家庭部門では朝と夜間の２つの時間帯でピークが見られる。業務部門では日中ほぼ一定の割合で排熱が発生しており、夜間との較差が非常に大きい。自動車排熱量は家庭、業務に比べてかなり平滑化された時間変動パターンとなっていることがわかる。この時間変動パターンは他県でもほぼ同じであるが、運輸部門では東京都、神奈川県で平滑化の度合いが若干高い傾向が見られた（図略）。図-4 あるいは図-5 に示した排熱量の絶対値で見ると、日中は全排熱量に対してかなりの割合が業務部門に起因しているが、夕方以降、家庭部門、運輸部門の占める割合が増加し、23 時～24 時の時間帯ではいずれの部門も同等程度の寄与度になっている（東京都）か、家庭部門が高い割合を占めている（埼玉県）ことが読みとれる。

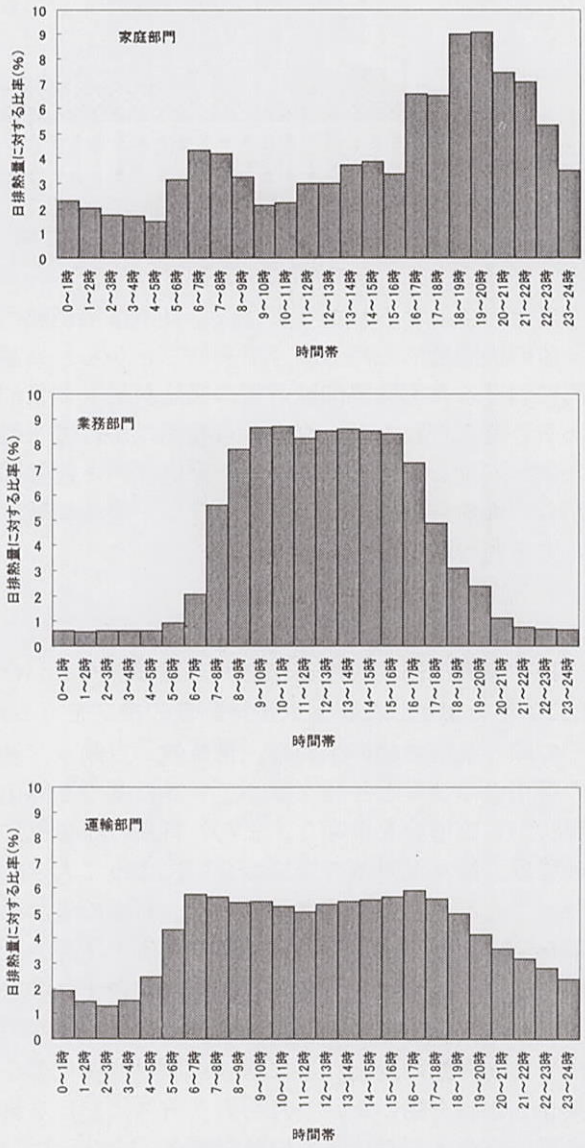


図-3 民生・運輸部門の人工排熱時間変動（東京都）

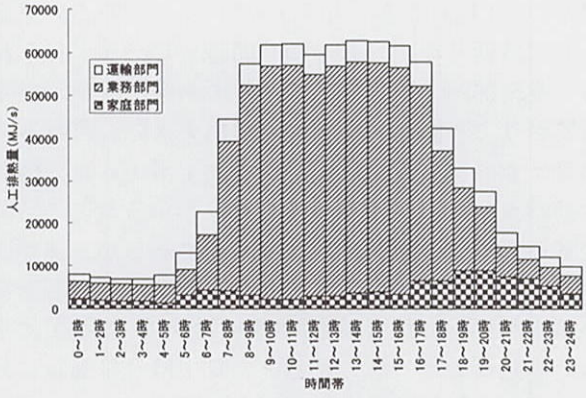


図-4　東京都における人工排熱量の時間変動

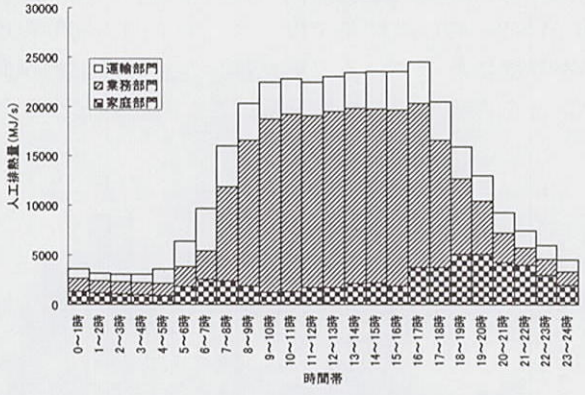


図-5　埼玉県における人工排熱量の時間変動

以上の結果からわかるように、日中は業務部門が全体の排熱量に占める割合が高いことから、当該部門における人工排熱削減対策の実施が最も効果的であると考えられるが、夕方から夜間にかけて（特に大気が安定してくる夜間には）家庭部門・運輸部門からの排熱量削減もヒートアイランド現象軽減にとって重要であると言える。

4．将来の予測

民生家庭部門、民生業務部門、運輸部門における2010年を想定した将来人工排熱量の推定を行った。その際、業務建物の床面積、世帯数、自動車交通量の将来の伸び率を各種文献やデータに基づき算出し、現状からの増分を求めた。また、将来の原単位については、様々な対策の実施度合いによって大きく異なってくることが予想されるため、新規の省エネ対策を全くとらないケースと徹底した省エネ努力を実施するケースの２ケースを想定した。いずれのケースでも、現状の原単位に将来のライフスタイルの変化や業務形態の変化などに基づく原単位変化分を上乗せした値を用いた。これらのケースにおける排熱量算出の考え方や数値的根拠を表-4、5に示す。

ケース１と２における各都県の将来における部門別の日排熱量（８月代表日）を表-6に示す。表-4の現状ケースと比較すると、家庭部門のケース１では各県で40%以上の日排熱量増加となっており、特に埼玉県では60%近い増加率を示した。逆に東京都の増加率が最も小さく28%であった。業務部門のケース１では埼玉県以外で40%以上の伸びで、東京都では53%と最も伸び率が大きい。運輸部門は家庭・業務部門に比べて伸びが小さく、12～14%程度である。一方、省エネ対策の実施ケース（ケース２）における人工排熱量は、家庭部門では現状に対して74%～90%、業務部門では現状に対して99%～110%、運輸部門で95%の排熱量になると推計された。首都圏全体でみると、現状に比べてケース１では約40%の排熱量増加、ケース２ではほぼ現状と同じ排熱量になることが推定された。

以上の結果より、積極的な省エネ対策が実施されない限り、将来の原単位や世帯、延床面積などの総量の伸びにより、今後10年間弱の間にも確実に人工排熱は増え続け、夏期における都市気象環境は悪化することが推測される。一方、省エネ型の建物・機器・自動車の導入・普及に加えて、省エネルギー行動の実践によって、現状ケース以下に排熱量を抑制することも可能であることが示された。

今後は、ここで試算した人工排熱量の時空間分布情報をメソスケールの都市気象モデルに入力して、将来の人工排熱量の変化がヒートアイランド現象に及ぼす影響について定量化をしていく必要がある。

表-6　各部門からの都県別日排熱量（TJ/日）

	ケース１			ケース２		
	家庭	業務	運輸	家庭	業務	運輸
茨城	135.0	596.7	175.7	75.9	430.5	146.7
栃木	90.1	403.8	127.8	50.4	292.7	106.8
群馬	88.6	415.9	121.8	50.0	301.2	101.2
埼玉	329.2	1024.9	265.3	185.4	746.6	222.6
千葉	272.1	829.3	219.4	153.9	598.4	183.3
東京	454.2	3399.9	377.2	260.2	2450.7	319.5
神奈川	362.9	1233.7	266.6	208.1	891.6	224.2

参考文献

1) 榊原幸雄：家庭部門のエネルギー消費実態について、エネルギー経済、Vol.26、No.2、17-35、2000.
2) 建築環境・省エネルギー機構：住宅・建築省エネルギーハンドブック2002
3) 渡辺浩文，尾島俊雄：河川水熱利用地域冷房施設

の大気への熱的影響に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.460，61-69，1994.
4) 日本地域冷暖房協会：プロジェクト2010日本全国地域冷暖房導入可能性調査研究平成6年度報告書、1995.
5) 信澤裕次：業務用エネルギーの消費実態―業種別、地域別、エネルギー源別実態調査―、エネルギー経済、Vol.19、No.1、27-38、1993.
6) 環境庁：窒素酸化物総量規制マニュアル[改訂版]、1993.
7) 環境庁：未規制自動車からの排出実態調査報告書、1995.10.
8) 環境庁：自動車排出ガス原単位および総量に関する調査、平成9年度環境庁委託調査.

表5　将来（対策無し）の排熱量増加要因の整理

部門	設定条件
民生家庭	○1995年から2010年までの世帯数の伸びは国立社会保障・人口問題研究所の推計に基づき、下記のように設定。 茨城県：1.21、栃木県：1.17、群馬県：1.13、埼玉県：1.28、千葉県：1.23、東京都：1.03、神奈川県：1.16 ○平均世帯人数の変化による世帯あたりエネルギー消費量の原単位減少は、高齢化の進展による原単位の増加と相殺すると仮定した。 ○アメニティ化やパーソナル化の進展に伴うエネルギー消費原単位の増加を考慮し、冷房で50%の熱需要の増加、給湯・厨房で30%の増加を想定した（桜井・石田、1994）。
民生業務	○将来の排熱量年伸び率＝将来の延べ床面積年伸び率×原単位伸び率　として算出 ○将来の延べ床面積年伸び率は、環境省地球環境局（2001）の数値を利用。 事務所：2.59、店舗：1.15、飲食店：1.05、学校：2.51、ホテル：1.19、 病院：1.36、その他：1.65 ○原単位の伸び率は、大谷・中野（1998）、東京都（2001）を参考に、全建物用途で2010年までの15年間で一様に9.5%とした。
道路交通	○関東甲信地域における過去の交通量実績トレンドから、2010頃には交通量が頭打ちになるという仮定の下、首都圏全体で1995年に比べて15%の増加を想定。車種ごとの伸び率への配分は、環境省地球環境局（2001）による推計値に基づき決定した。 二輪：1.00、軽乗用：1.56、乗用：1.16、バス：1.01、軽貨物：0.98、小型貨物：1.03、貨客車：1.03、普通貨物：1.12、特種車：1.00

桜井・石田：ライフスタイルによる将来のエネルギー消費変化の分析、エネルギー経済、Vol.20、No.9、11-28、1994.
国立社会保障・人口問題研究所：都道府県別将来推計人口－平成9年5月推計－　1995～2025年、厚生統計協会、1997.
国立社会保障・人口問題研究所編：日本の世帯数の将来推計　全国推計／都道府県別推計、厚生統計協会、2000.
環境省地球環境局：温室効果ガス削減技術シナリオ策定調査検討会報告書（第2分冊）、2001.

表6　想定される将来の排熱量削減対策の整理（徹底した省エネ努力による改善効果）

部門	設定条件
民生家庭	○平均世帯人数の減少 高齢化の進展による原単位の変化はないものと想定し、平均世帯人数の減少にともない1世帯あたりの原単位は減少するものと仮定。 ○省エネルギー機器の普及と家屋の断熱化 旧基準以上の断熱住宅の普及率が2010年で戸建て住宅は46%、集合住宅は71%になると想定（環境省、2001）。これらの旧基準以上の断熱住宅で日射遮蔽を行い、日射由来の冷房負荷を削減すると想定。また、省エネ法の改正にともなう省エネルギー機器の普及によって内部発熱量が減少する。以上の対策を総合して、断熱住宅においては、冷房で1日を通して一様に20%削減を想定する。また、高効率給湯器が10%の世帯で導入され、給湯由来の排熱量が減少する。 ○省エネルギー行動の実践 桜井・石田（1994）の試算に基づき、衛生、空調、家電機器の利用における省エネ行動の実践により、給湯・厨房、空調（冷房、上記とは別に計上）、電力・照明で各20%の削減を想定する。
民生業務	○延べ床面積の伸びの鈍化 都心では一時的とみられる建設ラッシュがあるものの、景気の低迷状況が今後も続き、各種業務建物の延べ床面積の伸びはほとんどないものと仮定する。 ○省エネルギー機器の普及と建物の断熱化 事務所を対象とした省エネビルに関する検討結果を踏まえて、現実的、平均的な省エネ率として冷房、電力・照明で30%を想定する。事務所以外の建物用途についての設定根拠に乏しいため、事務所ビルと同じ削減率を想定した。給湯・厨房については削減率をゼロとした。 ○省エネルギー行動の実践 ノーネクタイの実践、フレックスタイムの見直し、残業の削減、サマータイム制の導入などが考えられるが、本研究はこれらを陽的には取り扱っていない。
道路交通	○道路交通量の伸びの抑制 都市部におけるロードプライシングの導入やTDMの実施、公共交通機関へのシフトなどのあらゆる対策を取ることによって、1994年レベルまで交通量が抑制されると想定。 ○交通渋滞の緩和 東京都では、区部の混雑時平均旅行速度を2010年までに現行の18.5km/hから25km/hにすることを目指している。しかしながら、ここでは、環境省地球環境局（2001）にならい、旅行速度は今後の交通量の伸びの影響を受けて、実質的な変化はないものとした。 ○低燃費自動車の普及 環境省地球環境局（2001）の想定に基づく自動車燃料消費率削減量の値を引用（二輪：0.0%、軽乗用：1.1%、乗用：6.9%、バス：2.9%、軽貨物：7.7%、小型貨物：7.85%、貨客車：7.85%、普通貨物：2.3%、特種車：0.0%）

5.2　ヒートアイランド現象軽減手法の費用対効果に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 13～平 15
担当チーム：水工研究グループ（水理水文）
研究担当者：吉谷純一、木内豪

【要旨】
都市の高温化や地球温暖化の抑制を図るためには、各種対策の効果と費用を明らかにし、効果的な対策を提示する必要がある。このため、本研究では屋上緑化、水面の再生、舗装の改善、自動車排熱の抑制などのヒートアイランド軽減対策を実施した場合の省エネルギー効果、大気への負荷削減効果、生活環境の向上効果、対策費用といった社会経済的影響の定量化を行う。平成 13 年度は、メソスケールモデルを首都圏に適用して、各種対策の気温低減効果を定量化した。その結果、屋上緑化の普及、河川の水面再生、保水性舗装導入のいずれの対策も、最大限の対策シナリオ実施によって得られる効果は都心部で 1 ℃未満であることが明らかとなった。また、これらの対策を合わせて実施した場合の効果は各対策の線形和で表された。今後は、組み合わせによる効果の程度と効果の影響範囲、費用対効果についての検討を行う必要がある。
キーワード：メソスケールモデル、ヒートアイランド、人工排熱、時空間分布、将来推計

1．はじめに

メソスケール（1km～1000km オーダーのスケール）の数値気象モデルを用いてヒートアイランド軽減策の効果を試算した報告例は多いが、既往の研究が対象としている対策は屋根面アルベドの増大、地上の緑地面積の増大、人工排熱の削減である[1]。

一方、東京都では、屋上の面積（ビルの管理に必要な設備の設置面積を除いた面積）の 20%以上を樹木、芝、草花等で緑化するというビル緑化を加えた自然保護条例を平成 13 年 4 月から施行している。しかし、これによるヒートアイランド現象の緩和効果がどの程度あるのかについては明らかにされていない。また、近年、使用されなくなった農業用水路を環境用水路として再生する事例や、埋められた河川の水面を蘇らせようと言う気運があるが、都市規模での気温低下に水面がどの程度の効果を発揮するかについて検討された事例は見受けられない。そこで、本研究では都市のヒートアイランド現象の計算が行えるメソスケールモデルを構築し、東京 23 区内における建築物の屋上緑化、河川の水面再生、道路舗装の熱特性改善（保水性舗装導入）による首都圏の夏期晴天日における気温低減効果を推定する。

2．対策の効果定量化用モデルの概要

2．1　基本モデルとその改良

本研究で用いたシミュレーションモデルは MM5[2]を基本にしている。MM5 は非静力学方程式等に基づいて 3 次元の大気流れと圧力、気温、水蒸気量分布等を予測できるメソスケールモデルである。今回、MM5 を直接我が国のヒートアイランド現象のシミュレーションに用いるには不都合な点がいくつかあったため、以下に記す改良を加えた。

・複雑な都市の土地利用に適した地表面フラックスの算定ができるように 1 計算メッシュ内の土地利用の混在をパラメータ化する手法を導入した。
・土地利用情報として国土地理院が整備・発行する国土数値情報（KS-200-1、土地利用分類ごとの面積率データを使用）と細密数値情報（首都圏 1994 年版、解像度 10m）を使用できるようにした。
・地表面モデル[3]（地表面の水分移動モデルと植物生理のモデル）を組み込み、地表面水分量の変化を予測して、地表面の水分量の変化に対応した潜熱輸送量の算出ができるようにした。
・接地層下面に土地利用分類や時間に応じた量の人工排熱を潜熱フラックスと顕熱フラックスの形で与えられるようにした。
・都市キャノピー層の存在は大気下層の熱輸送や放射量に大きく影響を及ぼす．本研究ではいわゆる平板モデルのみとし，建物の存在により大気からの長波放射量が減少し，建物壁面からの放射量が加わる現象を考慮した．

2．2　地表面パラメータの設定

地表面熱収支の計算では、アルベド（日射の地表面反

表-1　本モデルの土地利用分類別の地表面パラメータ一覧

	カテゴリー	アルベド (%)	湿潤度 (%)	粗度 (cm)	熱伝導率 ($Wm^{-1}K^{-1}$)	熱容量 ($Jm^{-3}K^{-1}$)	射出率
1）	田	25	—	5	0.63	4.20E+6	0.92
2）	畑・造成地・その他用地	25	—	5	1.05	1.84E+6	0.92
3）	森林・荒れ地	15	—	95	1.05	1.84E+6	0.98
4）	内水地	8	100	0.1	0.63	4.20E+6	0.98
5）	海浜・海水域	8	100	0.1	0.63	4.20E+6	0.98
6）	公園・緑地	20	—	10	1.05	1.84E+6	0.92
7）	建物用地	12	0	50	1.70	2.10E+6	0.90
8）	一般低層住宅、密集低層住宅	12	0	44	1.70	2.10E+6	0.90
9）	中高層住宅地	12	0	86	1.70	2.10E+6	0.90
10）	商業・業務用地	12	0	107	1.70	2.10E+6	0.90
11）	公共公益施設用地	12	0	22	1.70	2.10E+6	0.90
12）	工業用地	12	0	51	1.70	2.10E+6	0.90
13）	交通用地	14	0	10	0.70	1.40E+6	0.95

表-2　東京都区部における現状と将来のみどり率、緑地率、緑被率の設定値

		みどり率 (1998)	みどり率 (将来)	細密数値情報の土地利用分類	緑地率 (現状)	緑被率 (現状)	緑地率 (将来)	緑被率 (将来)
樹林地		0.4	0.4	山林・荒地等	100	54.5	100	54.5
農地		1.7	1.7	田	100	67.8	100	67.8
草地		1.2	1.2	畑・その他の農地 造成中地 空地	100	29.6	100	29.6
市街地	宅地等	14.7	18.1/ 31.1	工業用地	23.6	100	29.1/ 50	100
				一般低層住宅地 密集低層住宅地	23.6	100	29.1/ 50	100
				中・高層住宅地	23.6	100	29.1/ 50	100
				商業・業務用地	23.6	100	29.1/ 50	100
				公共公益施設用地	23.6	100	29.1/ 50	100
	道路	1.2	1.2	道路用地	7.9	100	7.9	100
	公園	5.1	5.1	公園・緑地等	100	76.5	100	76.5
小計		24.3	27.7/ 40.7	-	-	-	-	-
河川等水面		4.3	4.3	河川・湖沼等	0	0	0	0
みどり率計		28.6	32.0/ 45.0	-	-	-	-	-

みどり率（将来）の値のうち、左側は東京都による15年後の目標値、右側はさらに長期的な期待値

射率)、空気力学的粗度、蒸発効率、熱伝導率、熱容量、反射率の値として土地利用ごとの一定値を与える。表-1で、蒸発効率、熱伝導率、熱容量の記述がない土地利用分類は地表面モデルを適用していることを意味する。

土地利用分類毎の緑被率（緑地面積の中で植生により占められている面積の割合）は、東京23区を対象に東京都都市計画局が算出した値をもとに土地利用分類ごとに推定し、対象領域全域に適用した。なお、東京都では河川等水面の割合を加えて「みどり率」と称している。

この方法による緑被の割合と細密数値情報の土地利用分類との対応関係及び東京都の推定したみどり率の値を表-2に示す。

2．3　屋上緑化の効果に関する計算条件

将来の緑被率は、緑の東京計画[4]に基づき、15年後のみどり率が現状の28.6%から32%に増加するケースと45%となるケース（長期的な期待値）を対象とした。

表-1の分類7～12の土地利用における緑地を屋上緑化により増加させることで23区全体の将来のみどり率が32%あるいは45%になるように緑地率（各土地利用面積に占める緑地の割合）を調整した。分類7～12のいずれでも緑地率は同じと仮定し、緑被率は100%とする。みどり率45%を達成するためには分類7～12の土地利用における緑地率が50%必要であった。

屋上緑化には植物による蒸発散機能の他に、これまでコンクリート等により覆われていた屋上・屋根面が植物により覆われることによる建物内部への熱負荷の減少並びに表面温度や内部温度の低減効果がある。屋上緑化のモデル化にあたっては、分類7～12の土地を地上の緑被部分、屋上緑化部分、緑化されない建物屋上部分、舗装・地面部分に分ける。屋上緑化した面から建物への熱伝導は無視できると想定し、屋上緑化部分と地上の緑被部分をあわせた緑地部分を公園・緑地の分類（分類6）に算入した。地上の緑被と屋上緑地の熱物性値には公園・緑地と同じ値を用いて熱伝導方程式を適用する。このようなモデル化により、屋上緑化による蒸発散の促進と表面温度の低下効果が考慮される。

2．4　水面の再生効果に関する計算条件

現状の水面積に関して、細密数値情報（1994年）では23区全面積に対する「河川・湖沼等」の面積の割合が4.8%となっている。ただし、細密数値情報の分類「河川・湖沼等」には海浜地が含まれているため、純粋な内水面はこの値より小さいと推定される。

過去の河川の実態については、八十川ら[5]が廃止河川の延長を算出し、区部全体の廃止流路は全長の78%にのぼっていることを明らかにしているが、廃止された河川の水面積までは明らかとされていない。松浦・島谷[6]が明治13年測量の第一軍管区地方迅速図を用いて行った試算結果によると、当時の東京の市街地面積 4,046ha（現在の山手線内側面積が 6,200ha）に対して当時の東京の水空間面積は443haであったとしており、水面が市街地に占める割合は10.9%となる。つまり、1世紀以上前の状況としては1割程度が水面であったと考えられる。

将来の水面積のシナリオとしては、蓋掛けされた河川の開渠化、農業用水路等の再生、水循環の健全化による平常時流量増や湧水の復活などの様々な対策により東京23区内で水面積の割合を現状の倍に戻した場合を想定する。土地利用の高度化した東京都区部で建物用地や生活道路を再び河川に戻すにはかなりの困難が伴うものと考えられるが、本研究では仮想的に、水面再生のための用地として公共公益施設用地と道路用地を活用するとし、計算上、各計算メッシュ内でメッシュ面積の最大2.5%分の公共公益施設用地と同じく最大2.5%分の道路用地（いずれも緑被部分は除いた面積）が水面に変わるものと仮定した。これにより、23区内で水面積が5%増加し、約10%になると見込んだ。

2．5　保水性舗装導入に関する計算条件

東京 23 区の全道路に保水性舗装を導入した場合の気温低減効果を計算する。保水性舗装の蒸発効率については土木研究所の実験結果[7]を参考にし、蒸発効率（β法の定数β）の値として0.06、0.15の2通りを与えた。蒸発効率は現実には対象日までの気象条件により異なり、また、連続的に変化するが、ここでは対象期間中、一定値とした。

3．シミュレーション結果

3．1　計算条件

計算対象領域は関東平野を含む 366km 四方の母領域と東京23区を含む114km四方のネスト領域である（図-1）。母領域の解像度は6km、計算メッシュ数は61×61、ネスト領域は2km、57×57とした。鉛直方向は100hPaの等圧面までを25層に分割した。母領域の初期条件、境界条件には計算対象日を含む全球解析データを用いた。ネスティングの手法には2-Way nestingを用いた。雲モデルはなし、放射モデルには気温のみに依存した大気冷却率を用いるSimple coolingを用いた。

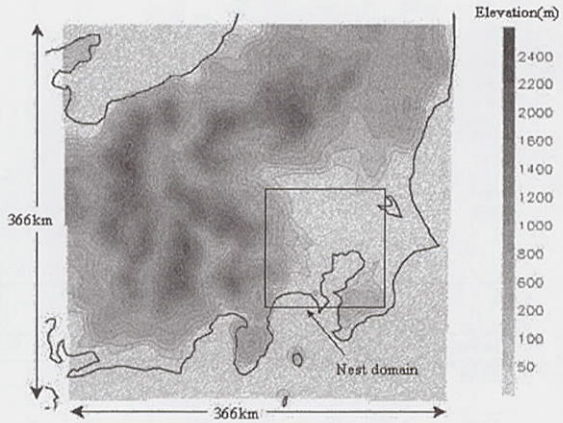


図-1 母領域とネスト領域の計算範囲と標高

以上の条件のもと、現状のヒートアイランド現象をシミュレートする。現状のシミュレーションは、1995年8月23日21時～8月26日5時を対象期間とした。東京大手町地点では8月22日に降雨が観測されているが、計算対象期間中は好天で雲が少なかった。ここには示さないが、東京都のAMeDAS地点全てと埼玉県、千葉県、神奈川県の主要なAMeDAS地点における実測気温と計算結果を比較し、各地点とも気温の絶対値や最高気温の発生時刻、日変動のパターンは概ね良好に再現されていることを確認した[1]。以下においては、前述してきた条件設定により屋上緑化、河川の水面再生、保水性舗装導入による気温低減効果と熱収支上の特徴を定量化する。

3．2　屋上緑化の効果の推定

屋上緑化により東京23区のみどり率が45%まで増大した場合の気温低下量と風系の変化を図-2に示す。日中は気温低減効果が徐々に大きくなりながら、海風により効果の影響範囲が内陸方向に拡がっていく様子を確認した。ただし、緑化域の北側に隣接する埼玉県南部地域では25日正午には気温が0逆に若干上昇している。これは、東京湾からの海風と北側からの郊外風が収束していたエリアが内陸部に移動したことにより、都心部の高温な空気が内陸部に移流されたことによるものであると解釈できる。このように、緑地の増大による気温の変化には、地表面の熱収支が変わり、顕熱輸送量が減少することによる影響と気圧分布の変化による流れ場の変化の影響が複合されていると言える。

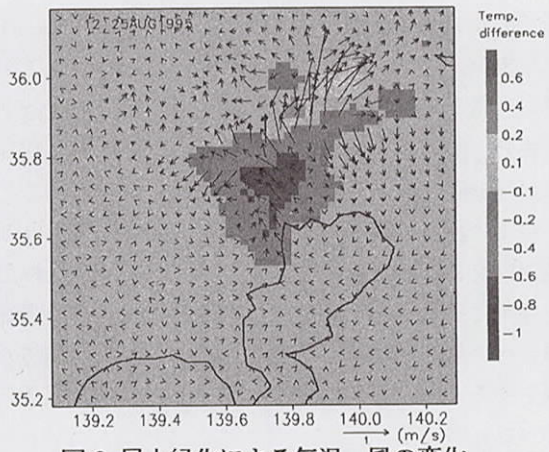


図-2 屋上緑化による気温、風の変化
(緑化後から緑化前の値を引いた結果、12 時)

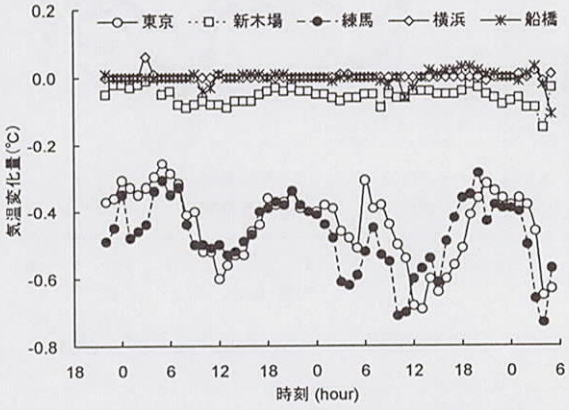


図-3 屋上緑化による気温変化量の時間変動

AMeDAS 測定地点における気温変化量(緑化後の気温から現状の気温を差し引いた値) の時間変動の一例を図-3 に示す。東京 (大手町) や練馬といった緑化対象域内の地点では緑化により最大で 0.7℃程度の気温低下が見られるが、緑化対象域から外れる沿岸部の横浜や船橋ではほとんど気温の変化はみられない。東京と練馬では、日射のない時間帯でも 0.3℃程度気温低下が見られるのは、屋上緑化による屋根面温度の低下に起因する。

このような効果を熱収支の面から見てみると、屋上緑化実施に伴いみどり率が 45%増加した (緑地の面積が 1.57 倍になったことに相当) ことにより、潜熱輸送量の最大値は 50%増加し、顕熱輸送量は緑化実施前の 50%程度に減少していることがわかった (図-4)。

屋上緑化によりみどり率が 32%になった場合の東京と練馬における気温の低下量も算定したが、日中で約 0.1℃と 45%緑化の場合に比べ小さい。これは、45%緑化の場合は現状から緑化増分が 16.4 ポイントであるのに対して、32%緑化の場合は現状から 3.4 ポイント増で、緑化増分が約 1/5 しかないことによる。

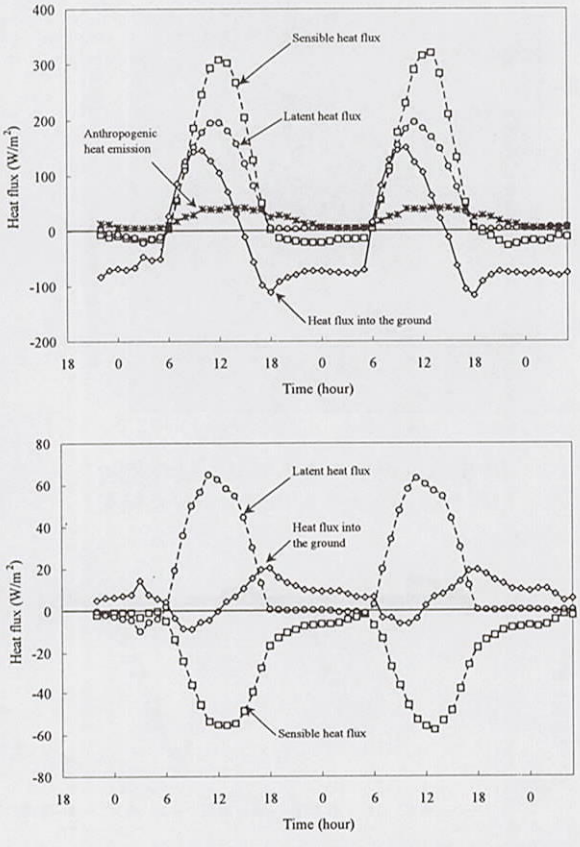


図-4 屋上緑化(みどり率 45%)後の領域平均の熱収支 (上) と各熱収支成分の変化量 (下) : 熱収支成分の変化量は、屋上緑化実施後から実施前を引いた値である。

3. 3 河川の水面再生による効果の推定

河川等の水面再生により水面積の割合が約 10%に増大した場合の気温低下量と風系の変化を図-5 に示す。水面再生の効果は早朝から水面増大域全体に現れ、日中は最大で 0.6℃以上の気温低下が発生しうることがわかった。ただし、緑地増大のケースと同様、23 区の北側の一部には逆に気温が増大するエリアが出現する。

水面再生による気温変化量を地点別に整理したものが図-6 である。水面の増加量が 5%と小さいにもかかわらず、東京 (大手町) と練馬における気温低下量の最大値は屋上緑化の場合とあまりかわらない。水面再生前後における領域平均の熱収支を比較したところ、潜熱輸送量の増加はごくわずかで、水体の貯熱効果により日中の顕熱輸送量を抑えることにより気温が低減されていることがわかった (図-7)。ただし、今回は水温の変化がないと仮定したが、停滞水の場合には水温の変動が無視し得なくなり、貯熱量もかわってくると考えられる。

3. 4 保水性舗装導入による効果の推定

大手町と練馬における気温低下量を図-8 に示す。東京

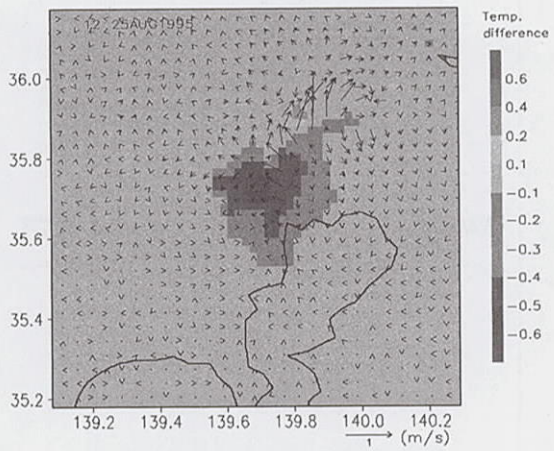


図-5 水面再生による気温、風の変化
（再生後から再生前の値を引いた結果）

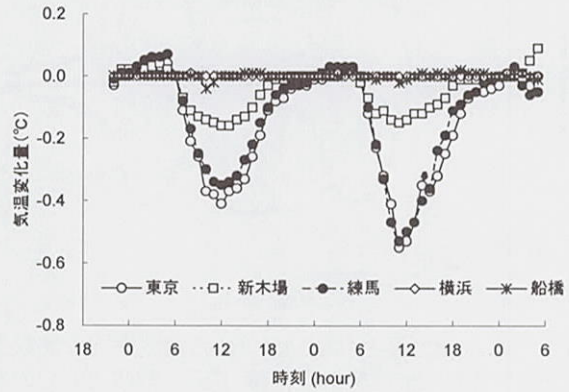


図-6 水面再生による気温変化量の時間変動

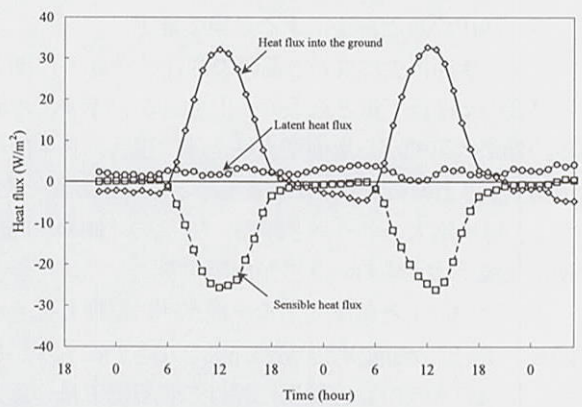


図-7 水面再生による各熱収支成分の変化量（水面再生実施後から実施前を引いた値）

23区の道路面積率は約15%を占めており、仮にこれら道路全てで蒸発効率0.15が常時確保できれば、大手町と練馬の気温の低下量は水面再生や屋上緑化による値と同等程度になることがわかる。また、どちらの蒸発効率のケースにおいても、大手町の方が練馬よりも気温低下の度合いが大きい結果が見られる。千代田区の道路面積率は30%弱、練馬区では約17%である[8]ことから、これは道路面積の割合の違いを反映したものであると考えられる。

熱収支（図-9）で見てみると保水性舗装の導入により顕熱輸送量が大幅に減少し、路面温度も10℃程度低下する。また、潜熱輸送量の増加分は、屋上緑化によりみどり率が45%となった場合の結果（図-4）とほぼ同じとなる。現実の保水性舗装においては表面温度抑制効果の持続期間は2日程度と短い[9]ことから、ここで示された効果を現実に発揮するためには、無降雨期間が長期間続いた場合への対応の検討（人工的な給水）、保水性舗装の性能向上や新たなタイプの舗装の開発が必要である。

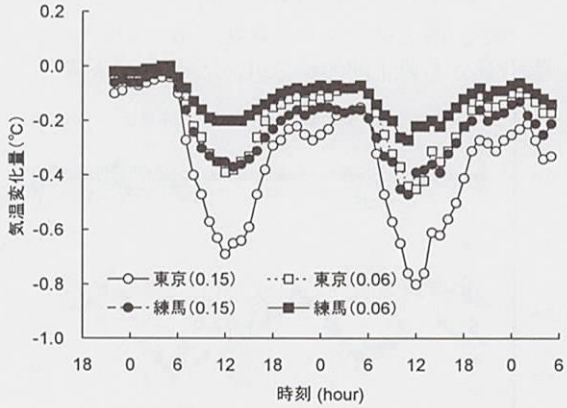


図-8 保水性舗装による気温変化量の時間変動

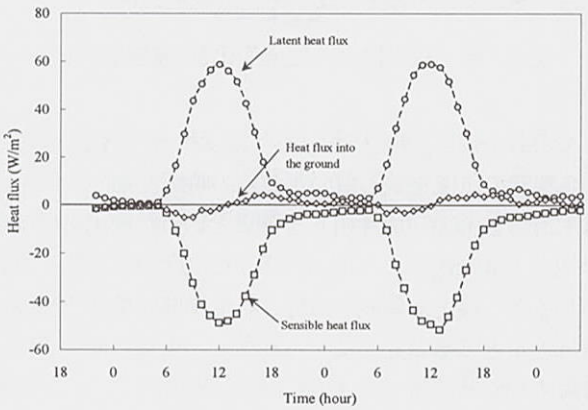


図-9 保水性舗装導入による各熱収支成分の変化量（保水性舗装導入後から導入前を引いた値）

3．5 計算結果の比較

以上の結果を用いて水面再生、屋上緑化、保水性舗装導入の効果の比較を行う。

今回の計算結果を水面10%あたり、緑被率10%あたり、保水性舗装導入面積10%あたりの気温低下量により整理したものが表-3である。また、屋上緑化と水面再生を同時に行い、みどり率を50%（緑被率40%＋水面積率10%）とした場合の計算結果についても同じく表-3に示した。屋上緑化のみのケースと水面再生のみのケースの計算結

果を比較すると、4時では屋上緑化（みどり率32%及びみどり率45%）の単位気温低下量が大きく、水面再生の効果はわずかである。これは、水面や屋上緑化された面の表面温度が従前に較べて上昇したのか、あるいは、低下したのかによる違いである。一方、14時における単位気温低下量は水面が緑地の倍程度の値を示しており、水面再生は、緑地を増やすのに比べて半分以下の面積で同等な効果を得られることがわかる。これは水面温度が緑地や他の地表面温度よりも相対的に低く、かつ、貯熱効果が大きいことによると考えられる。また、水面再生と屋上緑化の両方を実施した場合には、それぞれ単独で実施した場合の気温低減効果を線形的に足しあわせた値とほぼ等しい気温低減効果が計算されることがわかった。

表-3　水面と緑地の増加による気温低減効果

種別	都市名	単位気温低下量（℃/10%）	
		4時	14時
水面再生	東京（大手町）	0.02	0.71
	練馬	0.03	0.72
	領域平均	0.08	0.70
屋上緑化（32%）	東京（大手町）	0.32	0.31
	練馬	0.37	0.32
	領域平均	0.35	0.35
屋上緑化（45%）	東京（大手町）	0.34	0.34
	練馬	0.41	0.32
	領域平均	0.38	0.38
水面再生＋屋上緑化（45%）	東京（大手町）	0.27	0.40
	練馬	0.32	0.41
	領域平均	0.30	0.46
保水性舗装（蒸発効率=0.06）	東京（大手町）	0.09	0.23
	練馬	0.07	0.14
	領域平均	0.08	0.19
保水性舗装（蒸発効率=0.15）	東京（大手町）	0.18	0.44
	練馬	0.15	0.26
	領域平均	0.16	0.35

4．おわりに

ヒートアイランド現象の緩和により、環境負荷の少ない快適な都市づくりを進めていくためには、水や緑の効果を積極的に活用する方策が有効である。本研究では、現実の都市計画上で実施可能な対策として建築物の屋上緑化と河川の水面再生、保水性舗装の導入を取り上げて、それらによる都市のヒートアイランド現象軽減効果（気温低減効果）を定量化した。定量化にあたっては、MM5を基本としていくつかの改良を加えたメソスケールモデルを構築し、夏期晴天時における首都圏を対象に本モデルの適用性を検証した上で、利用した。屋上緑化の効果については、みどり率を45%まで増大させることにより、最高気温に対して都心部で0.7℃程度の気温低下が可能であった。一方、水面の再生については、水面を現状の4.8%から約10%に増大することにより都心部で最大0.6℃程度地上気温が低減すると推定された。保水性舗装についても計算上は屋上緑化や水面再生と同等の効果が得られた。単位面積あたりの気温低減効果で比較すると、日中（14時）の気温に対しては、水面再生が屋上緑化の2倍の気温低減効果があった。また、早朝（4時）の気温に関しては、屋上緑化の方が効果的で、面積率10%あたり0.35℃以上の気温低減効果があると推定された。舗装の熱特性改善は道路面積率の高い都心部で効果的であった。したがって、このような対策毎の特性の違いを考慮しつつ、可能な限りこれらの量を増やしていくことによって、都市のヒートアイランド化を抑制しながら、水や緑の保全・再生による持続的な都市づくりに貢献できると考えられる。なお、気温低下量や気温低下域は総観場の気象条件や対策を行う範囲などにも影響されることから、さらに色々な条件のもとでの計算結果を蓄積する必要がある。

参考文献

1)吉谷純一、木内豪、2001：都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究（その2）—メソスケール気象モデルを用いた都市河川の水面再生と屋上緑化による気温低減効果の推定、土木研究所資料第3783号.

2)Grell, G., J. Dudhia and D. Stauffer, 1994: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR.

3)Noilhan, J and S. Planton, 1989: A simple parameterization of land-surface processes for meteorological models, Mon. Wea. Rev., 117, 536-549.

4)東京都、2000：緑の東京計画—水と緑がネットワークされた風格都市・東京を目指して—.

5)八十川淳、高橋信之、尾島俊雄、1998：東京都区部における中小河川の廃止と転用実態に関する調査研究、日本建築学会計画系論文集、No.508、21-27.

6)松浦茂樹、島谷幸宏、1987：水辺空間の魅力と創造, 鹿島出版会.

7)土木研究所都市河川研究室：都市気候緩和と地下水涵養に効果的な環境共生型舗装に関する研究、国立機関公害防止等試験研究費平成11年度報告書、環境庁、2000.

8)東京都：東京の土地利用（平成8年度東京都区部）、1998.3.

9)徳本行信、岡田恒夫、松下守雄、吉田孝介：都市の高温化の解消を図る保水性舗装の開発、ASPHALT、Vol.42、No.203、34-43、2000.

5.3　都市環境に配慮した舗装構造に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平１２～平１５
担当チーム：舗装チーム
研究担当者：吉田　武、新田　弘之、城戸　浩

【要旨】
都市部では、ヒートアイランド現象や都市型水害などが見られ、これらへの対策が各方面で進められている。舗装ではこれらへの対策技術として保水性舗装、透水性舗装が注目されているが、それらの効果の検証，車道としての耐久性の確認などが課題である。そこで本研究は車道に適用できる保水性舗装，透水性舗装の開発を目標として、機能評価，耐久性評価などを行っている。
平成１３年度は、保水性セメントを利用した保水性舗装、遮水層を設けた透水性舗装の試験施工を行い、各種調査を行った。その結果、保水性舗装の温度低減効果について確認した。また、保水性舗装、透水性舗装とも良好な表面性状を保持しており、現在までに遮水層による差はみられていない。
キーワード：車道透水性舗装、重交通道路、路床、遮水層、ＦＷＤ

1. はじめに

近年、ヒートアイランド現象の緩和，地下水涵養，集中豪雨などによる都市型水害の発生の抑制などへの期待から、保水性舗装や車道における透水性舗装の研究が進められている。保水性舗装や透水性舗装の車道への適用については様々な構造の検討が行われ比較的軽交通での採用例もあるが[1)]、重交通道路への適用には至っていないのが現状である。透水性舗装は一般的に路盤以下に水を浸透させる構造であり、細粒分の流出、路床の泥濘化などが懸念される。
そこで車道で適用可能と考えられる構造の保水性舗装，透水性舗装を試験施工し、自動走行大型車両（以下、荷重車という）による促進載荷試験を実施したのでその結果について報告する。

2. 研究方法

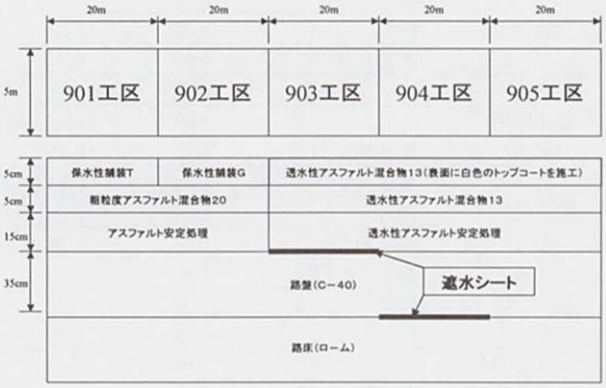
2. 1　荷重車による促進載荷試験

2. 1. 1　舗装構造

試験施工した舗装構造を**図－1**に示す。施工は土木研究所舗装走行実験場において行った。
路床土は関東ロームであり、各工区とも設計 CBR は 3%であった。

１）保水性舗装

保水性舗装は、保水性セメントを利用したものを施工した。構造としては、基層として粗粒度アスファルト混合物 20 を 5 ㎝敷設した後に、排水性混合物 13（空隙率 25%）を 5 ㎝敷設し、空隙に保水性セメントミルクを注入し、半たわみ性舗装に近い構造とした。
保水性舗装Ｔは鉱物質微粉末を混入したセメントミルクを使用し、保水性舗装Ｇは吸水性ポリマーを混入したセメントミルクを使用した。



図－１　舗装構造図


図－２　車道透水性舗装遮水層施工状況

2）車道透水性舗装

遮水層は橋面防水で利用される防水シートを敷設した。(図－２参照)

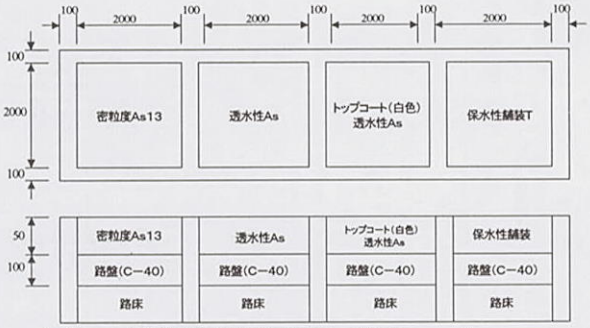
又、各工区の表層上面に路面温度上昇抑制効果を向上させるため白色のトップコートの施工を行った。

2．1．2　耐久性調査

各工区の耐久性を調査するため荷重車を連続走行させ 49kN 換算輪数で 0，6 万輪，15 万輪（B 交通 1.5 年相当）走行時に路面性状調査を行った。路面性状測定として縦・横断凹凸量測定及び、ひび割れ率測定，現場透水試験，すべり抵抗測定（DF テスター），FWD によるたわみ量測定を行った。

２．２　温度低減効果の測定

保水性舗装、透水性舗装の温度特性を把握するため、図－３に示す舗装供試体を施工し、温度特性を調査した。



図－３舗装供試体構造図（単位：mm）

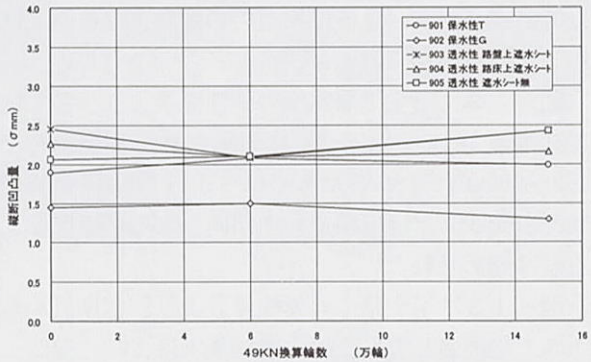
3．研究結果

3．1　促進載荷試験の結果

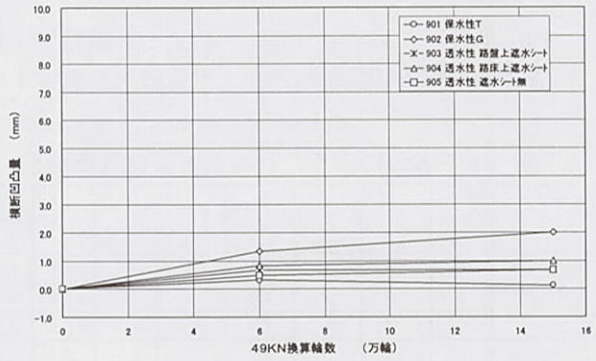
路面性状測定結果から以下の結果が得られた。

1）縦・横断凹凸量測定結果

図－４，５に示す縦断凹凸量，横断凹凸量より、初期値から 15 万輪経過による変位量はほとんど変化がなかった。



図－４　縦断凹凸量測定結果



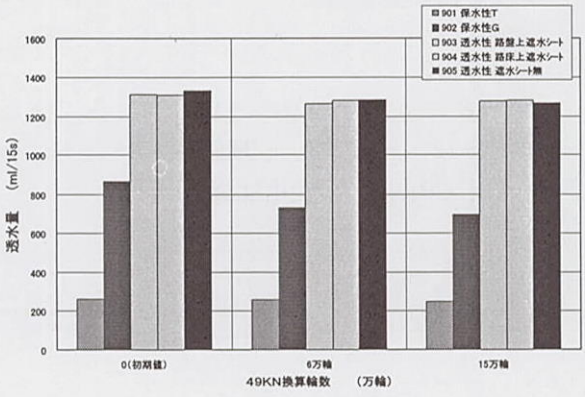
図－５　横断凹凸量測定結果

2）ひび割れ率測定結果

ひび割れ率については全工区すべて 0%であった。

3）現場透水試験結果

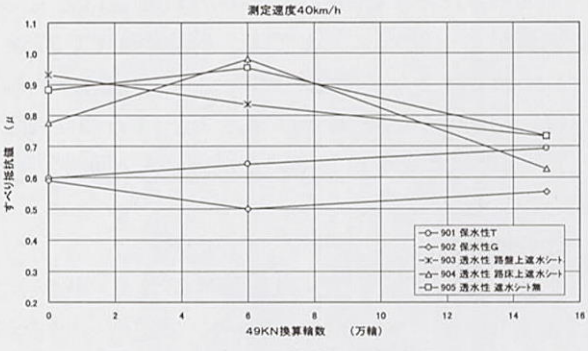
図－６に示す現場透水量より、初期値から 15 万輪経過による透水量の変化はほとんどなく、保水性舗装を除いて透水量 1,200ml/15 s 以上を保持し良好な状態であった。



図－６　現場透水試験結果

4）すべり抵抗測定結果

図－７に示すすべり抵抗値より、初期値から６万輪経過時では、荷重車走行によりトップコートの表面性状がすべりに対して向上する傾向にあるが１５万輪に至るまでには骨材の表面が摩耗していき、すべり抵抗性が低下していくと思われる。



図－７　すべり抵抗測定結果

5）FWDによるたわみ量測定結果

FWD運用マニュアル（案）[2]による計算結果を基に各工区の相対評価を行った。計算結果を**表－1**に示す。

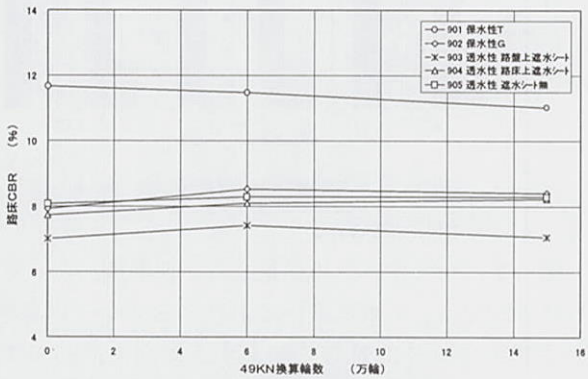
表－１ＦＷＤによるたわみ量および計算結果

工区	４９ＫＮ換算輪数	D0	D0－D200	D0－D1500	D1500	路床ＣＢＲ	残存TA	アスコン層弾性係数
	（万輪）	（μm）	（μm）	（μm）	（μm）	Esg（%）	（cm）	Eas（MPa）
901工区 保水性舗装T	0	319	32	233	86	11.7	27.4	7,074
	6	323	20	235	87	11.5	27.3	12,815
	15	331	20	240	91	11.0	27.1	12,388
902工区 保水性舗装G	0	349	27	222	126	7.9	27.9	8,882
	6	348	16	230	117	8.5	27.6	16,622
	15	365	21	246	119	8.4	26.8	12,215
903工区 下層路盤上遮水シート	0	430	30	296	140	7.0	24.7	7,813
	6	434	29	303	134	7.5	24.5	8,221
	15	483	35	348	140	7.1	22.9	6,464
904工区 路床上遮水シート	0	495	47	383	125	7.8	21.9	4,389
	6	449	29	332	124	8.1	23.5	8,154
	15	462	36	346	122	8.3	23.0	6,166
905工区 遮水シート無	0	478	48	363	122	8.1	22.5	4,315
	6	441	34	325	120	8.3	23.7	6,665
	15	468	38	353	120	8.3	22.8	5,771

注）載荷荷重・温度補正後の値である。

①路床CBR

図－８に示す路床のＣＢＲより、各工区ともCBR=7～12%となった。初期値から15万輪経過しても路床CBRの値に変化はなかった。



図－８　路床ＣＢＲ結果

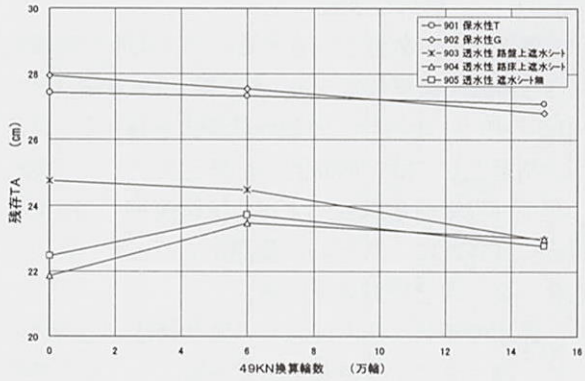
②残存T_A

図－９に示す残存T_Aより保水性舗装はともに初期値が27～28 cmに対して、15万輪経過時で27 cmの1 cm減でほとんど変化が無かった。車道透水性舗装は、初期値が22～25 cmに対して、15万輪経過時で23 cmとバラツキはしているがほとんど変化がないといえる。

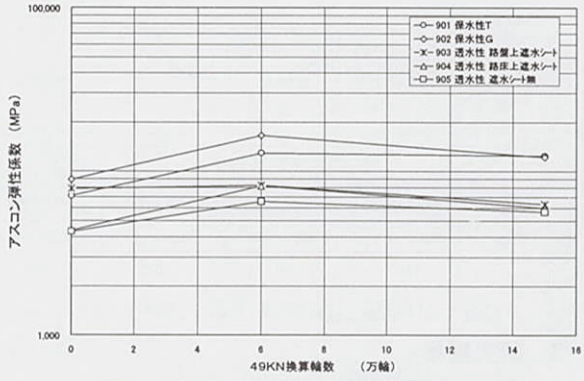
③弾性係数

図－１０に示すアスコン弾性係数より保水性舗装は10,000～20,000MPaであり、車道透水性舗装は4,000～8,000MPa前後の値を示していた。各工区ともに初期値から15万輪経過によるアスコン層の弾性係数に大きな変化は認められなかった。

路床CBR，残存T_A，弾性係数ともに、車道透水性舗装における遮水シートを使用した効果の差は確認できなかった。



図－９　残存T_A



図－１０　アスコン弾性係数

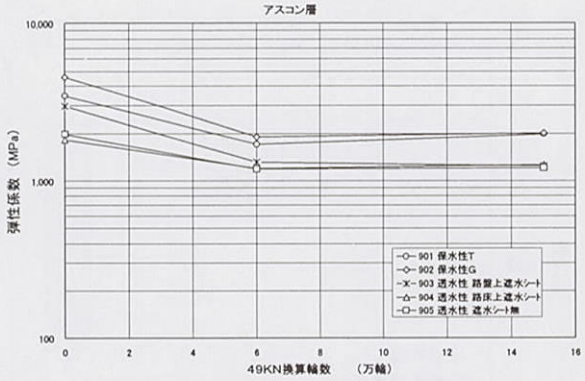
6）逆解析による弾性係数の計算

解析ソフトLMBSを使用し各層の弾性係数を求めた。

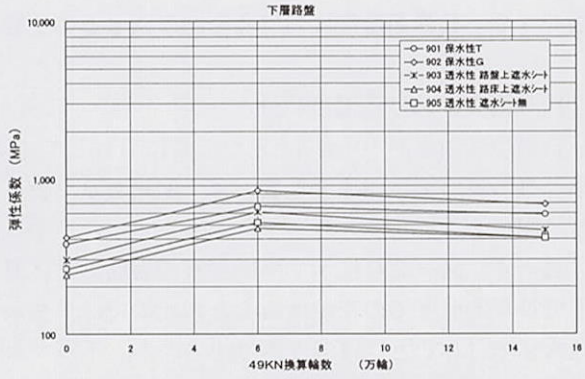
図－１１に示すアスコン層の弾性係数より各工区で初期値が2,000～4,500MPaに対して、６万輪経過時で1,000～2,000MPaと減少し、１５万輪経過時で1,000～2,000MPaとほぼ横這いの傾向となるが工区による差は認められない。

図－１２に示す下層路盤の弾性係数より、各工区で初期値が250～400MPaに対して６万輪経過時で450～800MPaとやや大きくなり１５万輪経過時で400～700MPaとほぼ横這いの傾向となるが工区による差は認められない。

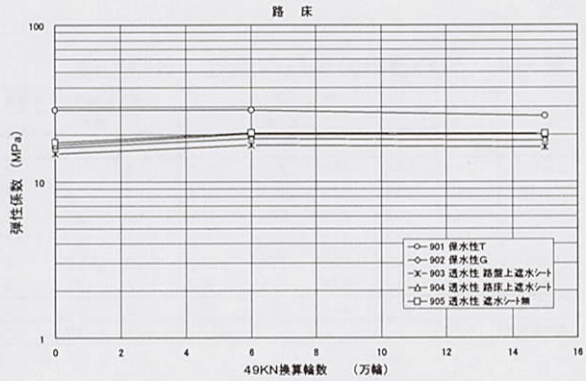
図－１３に示す路床の弾性係数より、初期値から１５万輪経過しても、保水性舗装Tは26～28MPa、その他の工区は15～20MPaであり、路床の弾性係数にほとんど変化が認められなかった。



図－１１　アスコン層弾性係数



図－１２　下層路盤の弾性係数



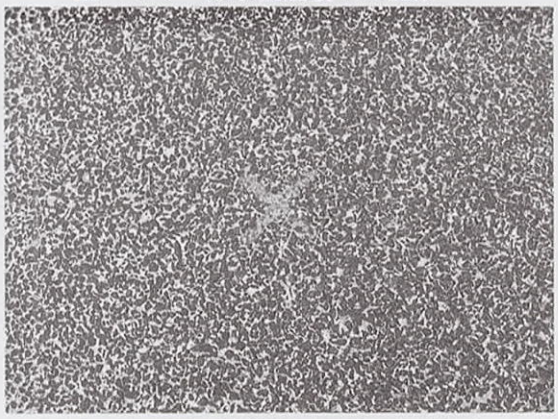
図－１３　路床の弾性係数

7）舗装表面の様子

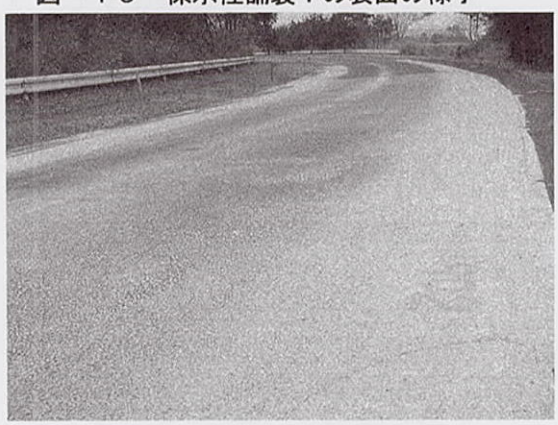
図－１４～１７に促進載荷後の舗装表面の様子を示す。１５万輪走行後の２種類の保水性舗装において保水性セメントの消失状況に違いが見られた。



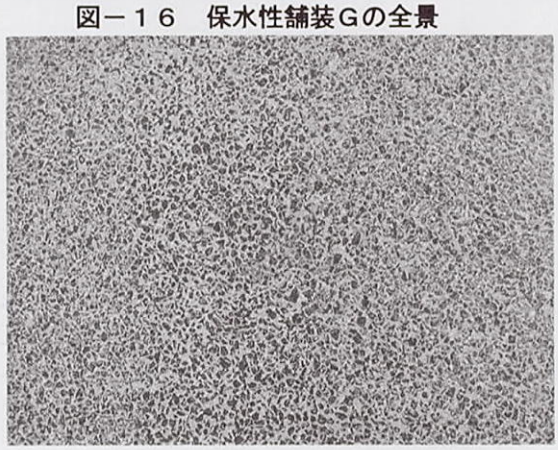
図－１４　保水性舗装Ｔの全景



図－１５　保水性舗装Ｔの表面の様子



図－１６　保水性舗装Ｇの全景



図－１７　保水性舗装Ｇの表面の様子

３．２　温度低減効果の測定結果

１）8,9月における温度特性

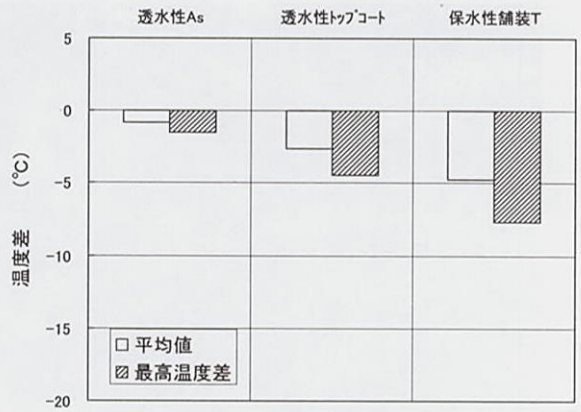
表層供試体温度測定において、密粒度Ａｓとの温度差による比較から、表面温度について平均値、温度差を求めた結果を表－２，図－１８，表－３，図－１９に示す。

これにより、日平均温度での密粒度Ａｓとの比較では、排水性Ａｓで 0.9℃とほぼ温度差はないが、白色トップコート（以下トップコートという）を施工すると 2.6℃低減し、保水性舗装では 4.7℃、最高温度差では 7.7℃低減した。

日最高気温での密粒度Ａｓとの比較では、透水性Ａｓでは温度差はないが、トップコートを施工すると 3.7℃低減し、保水性舗装では 9.4℃、最高温度差では 15.8℃低減した。

表－２　日平均温度における密粒度Ａｓとの比較

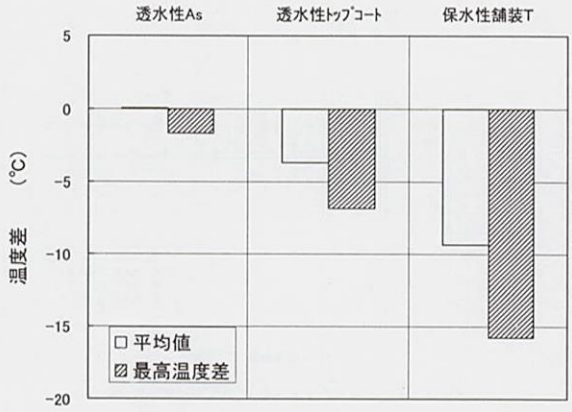
	透水性As	透水性ﾄｯﾌﾟｺｰﾄ	保水性舗装T
平均値	0.0	−3.7	−9.4
標準偏差	0.82	1.65	4.40
最低温度差	1.4	−0.8	−0.6
最高温度差	−1.7	−6.9	−15.8



図－１８　日平均温度における密粒度Ａｓとの比較

表－３　日最高温度における密粒度Ａｓとの比較

	透水性As	透水性ﾄｯﾌﾟｺｰﾄ	保水性舗装T
平均値	−0.9	−2.6	−4.7
標準偏差	0.33	0.94	2.04
最低温度差	−0.3	−0.6	−0.3
最高温度差	−1.5	−4.5	−7.7



図－１９　日最高温度における密粒度Ａｓとの比較

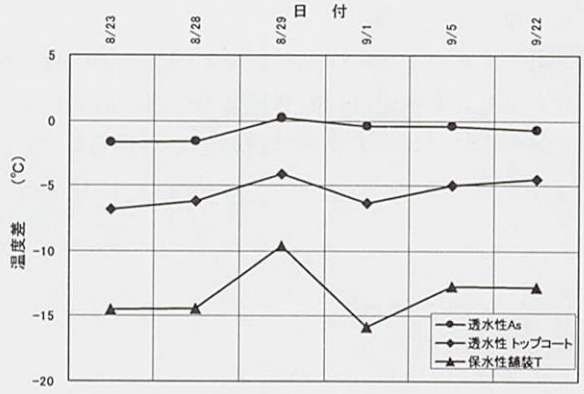
２）降雨後における温度特性

日累積降雨量が 10 ㎜以上となる日に着目して、降雨翌日の表層供試体温度を表－４，図－２０，表－５，図－２１に示す。

表－４，図－２０に示す降雨翌日の表層供試体温度で日平均温度での密粒度Ａｓとの比較では、透水性Ａｓで 1.3℃とほぼ温度差は小さいが、トップコートを施工すると 3.3℃低減し、保水性舗装では 6.1℃、最高温度差では 7.4℃低減した。

表－４　降雨翌日の供試体温度（日平均値）

日　付	外気温	測　定　値				密粒度Asに対する温度差		
	高さ1.5m	密粒度As	透水性As	透水性トップコート	保水性舗装T	透水性As	透水性トップコート	保水性舗装T
8/23	26.9	34.8	33.4	31.3	28.5	−1.4	−3.5	−6.3
8/28	24.3	33.6	32.2	30.1	27.6	−1.5	−3.6	−6.0
8/29	24.1	33.8	32.6	30.4	28.4	−1.2	−3.3	−5.4
9/1	23.3	34.4	33.3	30.7	27.0	−1.1	−3.7	−7.4
9/5	20.7	29.6	28.4	26.4	23.2	−1.2	−3.2	−6.3
9/22	14.5	21.8	20.5	19.1	16.7	−1.2	−2.6	−5.0
平均値		31.3	30.1	28.0	25.3	−1.3	−3.3	−6.1
最高温度差						−1.5	−3.7	−7.4

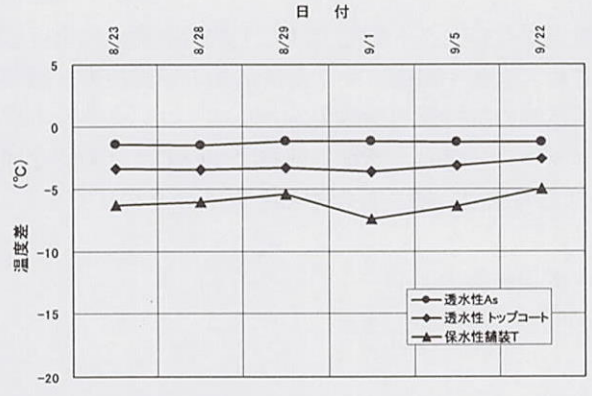


図－２０　降雨翌日の密粒度Ａｓとの比較（日平均値）

降雨翌日の表層供試体温度で、日最高温度での密粒度Ａｓとの比較では、排水性Ａｓで 0.8℃とほぼ温度差は小さいが、トップコートを施工すると 5.5℃程度低減し、保水性舗装では 13.3℃、最高温度差では 15.8℃低減した。

表－５　降雨翌日の供試体温度（日最高値）

日　付	外気温	測　定　値				密粒度Asに対する温度差		
	高さ1.5m	密粒度As	透水性As	透水性トップコート	保水性舗装T	透水性As	透水性トップコート	保水性舗装T
8/23	31.9	51.8	50.1	45.0	37.3	−1.7	−6.8	−14.5
8/28	28.5	50.2	48.6	44.0	35.8	−1.6	−6.2	−14.4
8/29	28.1	47.4	47.6	43.3	37.8	0.2	−4.1	−9.6
9/1	28.0	51.9	51.5	45.6	36.1	−0.4	−6.3	−15.8
9/5	25.3	44.3	43.9	39.3	31.6	−0.4	−5.0	−12.7
9/22	18.5	36.8	36.1	32.3	24.0	−0.7	−4.5	−12.8
平均値		47.1	46.3	41.6	33.8	−0.8	−5.5	−13.3
最高温度差						−1.7	−6.8	−15.8



図－２１　降雨翌日の密粒度Ａｓとの比較（日最高値）

４．まとめ

４．１荷重車による促進載荷試験

今回の荷重車による促進載荷試験結果において路面性状に差が無く各工区とも良好な表面性状を保持している。

又、ＦＷＤによるたわみ量から判断して舗装構造としても現在のところ問題はないものと思われる。

ただし、保水性舗装において保水剤の流出が見られ、温度低減効果への影響が考えられた。

４．２温度低減効果の測定結果

透水性舗装は、密粒度Ａｓとの比較で、温度差が小さく、温度低減効果がほとんどないことが分かった。

しかし、透水性舗装に白色のトップコートを施工することにより多少の温度低減効果があることが分かった。

これは、トップコートによりアルベドが変わったためと思われるため今後検討する予定である。

保水性舗装は、密粒度Ａｓとの比較で、温度低減効果が大きく、特に降雨翌日の温度差では 10～15℃程度低減させることが分かった。

５．今後の課題

施工後１年目（Ｂ交通 1.5 年相当）の供用で経過年数が少なく、引き続き耐久性の調査を行って行く予定である。又、今後の調査においては路盤路床に設置した遮水シートによる効果を調査するために降水量の多い梅雨、夏期に荷重車試験を行う予定である。

又、保水性舗装，車道透水性舗装の温度上昇抑制効果を期待し夏期における舗装の路面温度特性調査も行う予定である。

参考文献

1)　堀越，大竹，木下：『新潟市における車道用透水性舗装について』，第８回北陸道路舗装会議技術報文集，pp151-154,2000
徳本，吉野，松下，井上：『保水性舗装の開発』，舗装，pp8-15，(2001.6)

2)（財）道路保全技術センター：『ＦＷＤ運用マニュアル（案）』，平成８年３月

Ⅵ　社会資本ストックの健全度評価・補修技術に関する研究

研究期間：平成 13 年度～17 年度
プロジェクトリーダー：技術推進本部総括研究官　苗村正三
研究担当グループ：技術推進本部（先端技術、施工技術、構造物マネジメント技術）、基礎道路技術研究グループ（舗装、トンネル）、構造物研究グループ（橋梁構造、基礎）

1.　研究の必要性

少子高齢化による投資余力の減少のなか、安全で快適な社会・経済活動を維持するには、これまでに蓄積された社会資本のストックを有効かつ長く利用し続けていくことが必要である。このため、土木構造物の健全度を正確に評価する技術、評価結果に基づいて的確に補修する技術、さらに、土木構造物のライフサイクルを考慮した戦略的な維持管理のマネジメントシステムの開発が求められている。

2.　研究の範囲と達成目標

社会資本ストックの健全度評価・補修技術に関して、本重点プロジェクト研究では、土木構造物の健全度診断のための非破壊検査・監視技術や損傷評価手法の開発をはじめ、劣化や損傷を受けた構造物の補修技術、舗装の低騒音・低振動性能を回復する技術を開発する。さらに、構造物の維持管理システムとして、コンクリート構造物については健全度診断データベースの作成などの維持管理支援システム、橋梁や舗装については計画的な補修と維持管理を支援する戦略的維持管理手法の開発を行う。以上の達成目標を整理すると以下のとおりである。

①　構造物の健全度診断技術の開発
　①-1　土木構造物の健全度評価のための非破壊検査・監視技術の開発
　①-2　補修の必要性を判定するための損傷評価手法の開発
②　構造物の補修技術の開発
　②-1　コンクリート構造物の補修工法の開発
　②-2　既設舗装の低騒音・低振動性能の回復技術の開発
　②-3　劣化などを受けた構造物の補修技術の開発
③　構造物の維持管理システムの開発
　③-1　コンクリート構造物の維持管理支援システムの開発
　③-2　将来の維持管理を軽減する橋梁の戦略的維持管理手法の開発
　③-3　将来の維持管理を軽減する舗装の戦略的維持管理手法の開発

3.　個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

①　鋼構造物の劣化状況のモニタリング手法に関する調査（平成 12～15 年度）
②　橋梁等の下部構造の健全度評価手法に関する研究（平成 13～16 年度）
③　アースアンカーの健全度診断・補強方法に関する研究（平成 14～17 年度）
④　既設コンクリート構造物の補修技術の開発（平成 12～15 年度）
⑤　舗装の低騒音・低振動機能の回復に関する研究（平成 12～16 年度）
⑥　既設トンネルの補修・補強技術の開発（平成 12～16 年度）
⑦　コンクリート構造物の維持管理計画に関する研究（平成 12～15 年度）
⑧　鋼橋塗替え処理技術の高度化に関する研究（平成 13～17 年度）
⑨　橋梁の健全度評価と維持管理システムの高度化に関する研究（平成 13～16 年度）
⑩　舗装マネジメントシステムの実用化に関する研究（平成 13～15 年度）

このうち、平成 13 年度は③を除く 9 課題を実施している。

4. 研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、これまでに実施してきた研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1) 構造物の健全度診断技術の開発

「橋梁等の下部構造の健全度評価手法に関する研究」においては、平成8年度に実施した道路防災総点検結果と洗掘被災に関するアンケート調査結果をもとに被災要因の分析を行い、架橋条件から変状や被災を予測する手法として、各調査項目に対する重み係数を算出した。今後は、これら分析をさらに進めるとともに、損傷の進行と被災の発生との関係について分析していく予定である。

また、「鋼構造物の劣化状況のモニタリング手法に関する調査」においては、橋梁関係のデータベースであるMICHIに登録されているデータをもとに、橋梁の劣化状況の現況を分類、整理するとともに、文献により、モニタリング技術の現状と課題をとりまとめた。今後は、これらの結果を踏まえ、橋梁の損傷、劣化を把握するためのモニタリング項目ならびにモニタリング手法の開発を目指していく予定である。

(2) 構造物の補修技術の開発

「既設コンクリート構造物の補修技術」においては、劣化部分を取り除いてコンクリートを打ち直す断面補修技術について、打継面の表面処理方法（乾燥、湿潤、プライマー処理）、補修の方向（順打ち、逆打ち）、補修方法（吹きつけ、コテ塗り、注入）、補修材の種類（ポリマーの有無など）などの組み合わせを変えた実験を行い、プライマー処理の効果、逆打継面沿いでの残留気泡による弱点の発生など、それぞれの方法の得失を整理した。今後は、これら結果をもとに断面補修工の選定方法の提案を行う予定である。また、ひび割れ注入工法ついては、今後、材料や注入方法に関する実験を行う予定である。

「舗装の低騒音・低振動機能の回復に関する研究」においては、排水性舗装における騒音低減のメカニズムについて検討し、その機能回復には、現場透水性に加え、路面のテクスチャを考慮する必要があることを示した。また、舗装の振動低減機能の回復については、表層、基層の表面部分に振動低減効果のある材料を用いることで舗装本体および沿道の振動を低減できることを示した。今後は、騒音低減機能の回復については、機能回復方法、回復法の実施時期などの提案を行う予定である。また、振動低減効果の回復については、舗装の耐久性を含めて効果の持続性について検討を行う予定である。

「既設トンネルの補修・補強技術の開発」においては、変状発生メカニズムの解明のため、天端に圧座が発生した変状事例を対象に有限要素法による数値解析を行い、ひび割れ発生パターンの再現および作用土荷重の推定を行った。また、補修工については、L型鋼やボルトなどの代表的なトンネルはく落工について押抜き載荷試験を実施し、取り付け位置による耐荷特性の相違を明らかにした。補強工については、実大規模での覆工の載荷実験により、内面補強工が大きな補強効果が期待できない場合があることを示した。今後は、変状発生メカニズムの検討事例を増やすとともに、補修・補強工については、他の対策工についても載荷試験を実施し、対策工の耐荷力を評価できる解析手法の提案を行う予定である。

(3) 構造物の維持管理システムの開発

「コンクリート構造物の維持管理支援システムの開発」では、実験や既往のデータをもとに、自然電位法による鉄筋腐食度推定方法、反発度法による硬化コンクリートの強度推定方法の現場適用性、特に測定装置や測定方法が測定結果に与える影響を分析した。また、152件の既存コンクリート構造物においてコア採取を行ってコンクリートの品質を調査したデータを分析し、既存構造物のコンクリート品質（圧縮強度、中性化の進行速度、塩分の拡散係数、海砂の使用によるコンクリート中の塩分）についての実態を整理した。

「橋梁の健全度評価と維持管理システムの高度化に関する研究手法」においては、実橋の橋梁点検データベースをもとに各種橋梁マネジメントシステム（BMS）のシミュレーションを行い、各種BMSの特徴や問題点の整

理、ならびに橋梁の健全度評価に大きな影響を与える評価項目を整理した。また、「鋼橋の塗替え処理技術の高度化に関する研究」においては、補修の現状を調査し、素地調整の品質が塗装の耐久性に大きく影響するにもかかわらず、その検査方法が外観目視によって行われていることを示した。今後は、定量的かつ客観的な素地調整の品質検査方法の開発を目指していく予定である。

「舗装マネジメントシステムの実用化に関する研究」では、ライフサイクルコストを構成する費用項目に関する国内外の研究成果をとりまとめた。また、プロジェクトレベルでの道路利用者費用として、米国連邦道路庁の“Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design”に示されている工事区間の道路利用者費用算定法を用いて我が国の道路状況を考慮した試算を行い、工事区間における時間損失費用、特に渋滞の影響が大きな比重を占めることを明らかにした。なお、今後は、健全度の診断技術の精度向上をはじめ、ライフサイクルコスト、管理目標の算定方法についてさらに検討を加えるとともに、診断結果の活用方法を提案する予定である。

6.1　鋼構造物の劣化状況のモニタリング手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平12～平15
担当チーム：構造物研究グループ（橋梁構造）
研究担当者：平原伸幸、森山　彰、高橋　実

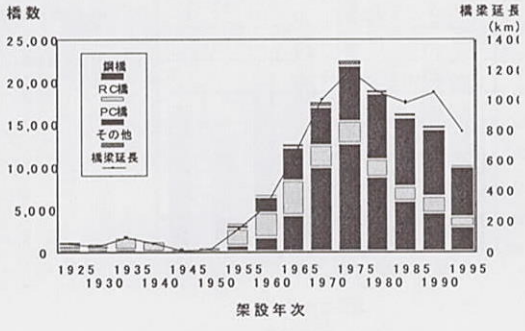
【要旨】
道路橋ストックの老朽化が進展する中で、確実かつ効率的に道路橋を維持管理するためには、構造物に生じている安全性の低下に繋がる現象を正確かつ効率的に把握し、得られた情報をもとに劣化や損傷等の諸現象を解明し適切な対応を図っていくことが不可欠である。本研究では、鋼道路橋を対象として、主桁や床版に生じるひずみや変形等の橋梁の内・外部の状態を計測し、その結果から劣化や損傷現象を効率的かつ的確に把握するための橋梁のモニタリング手法を開発するものである。平成13年度は、鋼道路橋の損傷実態を橋梁点検結果に基づき調査するとともに、各種モニタリング技術について、開発動向、劣化損傷への適用性について調査を行った。その結果、既に現場で用いられているひずみセンサーや変位センサー等の実用性及び光ファイバーセンサー等の新技術の適用可能性及び課題を明らかにした。
キーワード：道路橋ストック、老朽化、劣化、損傷、鋼道路橋、点検、診断技術、モニタリング、維持管理

1．はじめに

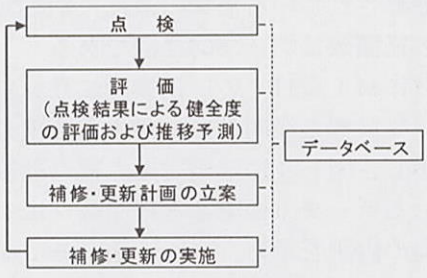
わが国における道路橋ストックは、1960年以降にその多くが整備され(図－１参照)、わが国の経済の発展と国民生活の向上に大きく貢献してきた。その一方で、急速に整備された膨大な数の道路橋ストックは老朽化が顕著となり、補修・更新が大きな課題となりつつある。すなわち、今後の急激な増加が想定される維持管理費を抑制しつつ道路橋ストックの安全性、快適性等を維持するとともに、次世代に良好な資産として引き継ぐための効率的な維持管理手法を早急に確立する必要がある。

図－２に示すように、橋梁の維持管理は、理想的には点検によって現況を把握し、その結果を用いて健全度を評価、今後の劣化・損傷の推移の予測、さらに補修・更新計画の立案及び補修・更新工事の実施という流れに沿って行うこととなる。ここで、橋梁の点検・調査、健全度評価については、基本的に目視による点検・調査に基づくものであるが、近年、膨大なストックの維持管理業務の効率化、結果の定量化・客観性の向上等の観点から、構造物の健全度を診断する各種機械・器具等が数多く開発されてきている。しかしながら、これらのほとんどは確立された技術として定着するには至っていない状況である。

本研究では、鋼道路橋を対象として、主桁や床版に生じるひずみや変形等の橋梁の内・外部の状態を計測し、その結果から劣化・損傷を効率的かつ的確に把握するための橋梁のモニタリング手法を開発するものである。平成13年度は、鋼道路橋の損傷実態を橋梁点検結果に基づき調査するとともに、各種モ



図－１　橋梁建設数の推移[1)]
(1997年現在、橋長15m以上)



図－２　維持管理のフロー

ニタリング技術について、開発動向、劣化損傷への適用性について調査を行った。

２．研究方法

２．１　点検データの整理

鋼道路橋の劣化・損傷現象の実態について、橋梁定期点検データに基づき分析を行った。

（１）橋梁定期点検データの整備状況

平成12年4月1日現在の道路管理データベースＭＩＣＨＩの「橋梁」にデータ登録されている橋梁の数と径間数を整理した。また、このうち、橋梁定期点検（近接）の結果が登録されている橋梁の数と径間数を整理した。

（２）橋梁定期点検データの劣化・損傷現象の整理

(1) のデータを基に、橋種別、部材の種類別および損傷の種類別に、損傷発生径間数と損傷発生率を整理した。

２．２　既往のモニタリング技術の調査

鋼構造物の点検・診断等に用いられる各種モニタリング技術について、国内外の既存の技術を文献等により調査し、また、それらのモニタリング技術の劣化損傷への適用性について整理・分析を行った。調査に当たっては、既存のモニタリング技術について、a）効率性（省力化、省人化）、b）点検・検査結果の信頼性、c）迅速性（点検結果の迅速な収集）の視点を踏まえ、橋梁点検要領（案）における各種の点検項目に対応させて適用性を検討した。

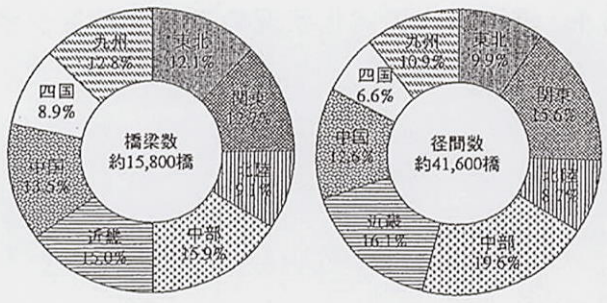
３．研究結果

３．１　点検データの整備状況

（１）橋梁定期点検データの整備状況

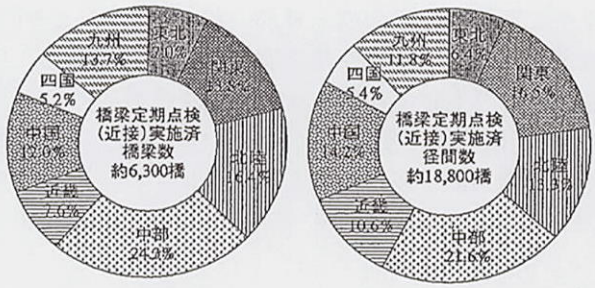
平成12年4月1日現在、ＭＩＣＨＩの「橋梁」にデータ登録されている橋梁の数は、８地方整備局を総計すると、約15,800橋であり、その径間数は約41,600径間である。このうち、橋梁定期点検（近接）の結果が登録されている橋梁の数は、約6,300橋であり、その径間数は約18,800径間である。

図－３にＭＩＣＨＩの「橋梁」に登録されているデータ（橋梁数と径間数）に対する各地方整備局の内訳を示し、図－４に橋梁定期点検（近接）が登録されているデータ（橋梁数と径間数）に対する各地方整備局の内訳を示す。また、図－５に橋梁定期点検（近接）の実施状況を示す。



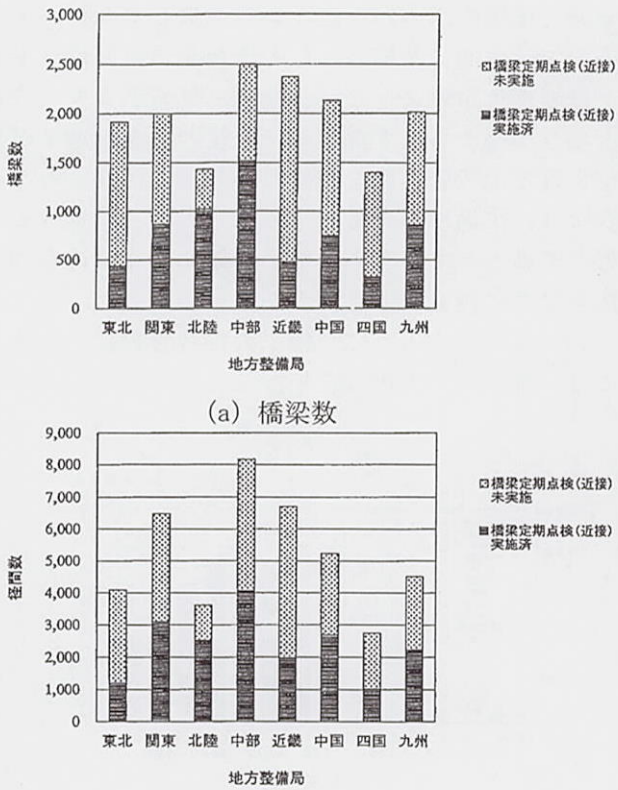
(a) 橋梁数　　(b) 径間数

図－３　ＭＩＣＨＩの「橋梁」に登録されているデータ



(a) 橋梁数　　(b) 径間数

図－４　橋梁定期点検（近接）結果が登録されているデータ



(a) 橋梁数

(b) 径間数

図－５　橋梁定期点検（近接）の実施状況

（２）橋梁定期点検データの劣化・損傷の整理

ＭＩＣＨＩに登録されている鋼道路橋は、18,912径間（4,658橋）あったが、橋梁定期点検結果が登録されている鋼道路橋は、9,159径間（2,559橋）であった。このうち、桁橋は、8,591径間（2,420橋）であり、この8,591径間のうち、部材の種類、架設年次および損傷の種類が記録されているのは、4,914径間であった。ここでは、紙面の都合上、この4,914径間を対象として報告する。

ここで対象とする鋼道路橋の桁橋4,914径間のうち、主桁に何らかの損傷があるのは、3,166径間あり、主桁以外（横桁、縦桁、横構、対傾構）に何らかの損傷があるのは、2,586径間であった。表－１に主桁が損傷している場合の損傷の種類別の径間数を示し、表－２に主桁以外が損傷している場合の損傷の種類別の径間数を示す。なお、損傷度の判定は、橋梁点検要領(案)に示される判定基準（表－３）によっている。表－１、２より、腐食による劣化が圧倒的に多く、鋼道路橋で進行している状況が容易に見て取れる。一方、亀裂や破断といった損傷の事例は少ないものの、腐食に次いで多く発見されている。

３．２　既往のモニタリング技術の調査

過去７年間を目安に、国内を中心に約200件の文献調査を行った。これらの文献で紹介されている各種技術に対して、以下の５項目について整理を行った。

a）特徴（利点と欠点）
b）点検・検査の概要（目的・対象物・方法）
c）使用機器の規模
d）信頼性（点検・検査の使用範囲と能力）
e）概算コスト

以下に、主な損傷として鋼部材の疲労亀裂、腐食及び床版の変状を対象として、モニタリング技術の開発の動向、適用の現状等について述べる。

（１）疲労亀裂

橋梁点検時の亀裂、欠陥等を検出するための方法としては、橋梁製作時、現場施工時において一般的に用いられてきた非破壊検査手法として、以下のものが挙げられる。

・表面欠陥の検出：浸透探傷試験、磁粉探傷試験、渦流探傷試験
・内部欠陥の検出：超音波探傷試験、放射線試験

このうち、浸透、磁粉、超音波探傷試験については、現地での目視点検後における供用下の亀裂検出方法として良く用いられている。

供用下の鋼部材の亀裂発生・進展に対する検知手法として開発が進められているものとして、以下の方法が挙げられる。

・超音波を利用する方法
・ひずみセンサーを利用する方法
・犠牲試験片を利用する方法
・簡易センサー（変位センサー）を利用する方法
・加速度計を用いる方法
・光ファイバーを利用する方法

i)超音波を利用する方法[4)～11)]

亀裂からの反射波より、亀裂の有無、位置及び寸法を把握しようとするものであるが、超音波信号は一般に微弱であり、変化量も微小であることから、微小亀裂の評価や損傷・劣化診断を行うには難点がある。したがって、亀裂からの微小信号を的確に捉えて抽出するとともにノイズ除去などの解析処理を行うためにはシステム高性能化を図る必要がある。近年、高感度・高性能な超音波探傷システムの開発も行われてきているが、亀裂の検出や亀裂長さ計測の信頼性については未だ課題が残されている。また、高性能なシステムについては価格面の課題があり、

表－１　主桁の損傷種類別と径間数

鋼部材損傷の種類	損傷度判定区分				合計
	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	ＯＫ	
①腐食	466	1556	---	2892	4914
②亀裂	36	---	---	4878	4914
③ゆるみ	2	---	9	4903	4914
④脱落	13	22	---	4879	4914
⑤破断	2	---	---	4912	4914
⑥塗装劣化	---	144	1005	3765	4914

表－２　主桁以外の損傷種類別と径間数

鋼部材損傷の種類	損傷度判定区分				合計
	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	ＯＫ	
①腐食	368	1232	---	3314	4914
②亀裂	30	---	---	4884	4914
③ゆるみ	7	---	17	4890	4914
④脱落	28	30	---	4856	4914
⑤破断	4	---	---	4910	4914
⑥塗装劣化	---	95	838	3981	4914

表－３　橋梁点検要領の損傷度判定基準[2)]

判定区分	一　般　状　況
Ⅰ	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある
Ⅱ	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修をするかどうかの検討を行う必要がある
Ⅲ	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある
Ⅳ	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある
ＯＫ	点検結果から、損傷は認められない

鋼道路橋の溶接部への適用に当たっては、さらなる技術開発が必要と考えられる。

ii)ひずみセンサーを利用する方法[12)]

ひずみセンサーを利用する方法は、一般に、鋼部材中に生じるひずみ値の変化を捉えることで、亀裂の発生・進展の有無を検出する方法である。ただし、亀裂の発生・進展に伴う応力の変化は亀裂の極く近傍のみに現れるため、これを捉えるには事前に発生箇所を想定してゲージを添付することが必要となる。現場への適用を考えると、このような利用は現実的ではなく、むしろ亀裂が発見された後（監視箇所が限定された後）の進展性の監視や、あるいは亀裂は発生していないが同一ディテールの発生の監視時に利用するのが現実的と考えられる。

このほか、計測値の変化をモニタリングし亀裂を検知する方法としては、圧電セラミック素子や断線ゲージなどが開発されている。いずれも、モニタリングを長期にわたって行うことができ、亀裂の発生・進展によって生じるひずみの乱れを検知する方法である。

ひずみセンサーについては、亀裂の検知以外に主部材の応力を継続して計測することにより、累積疲労損傷度や活荷重応力の実態などを把握することができる。この方法については、計算上の応力に対して、実際に橋梁に生じる応力を捉えることができるため、計測結果を用いた耐荷力評価や余寿命評価に利用されている。

iii)犠牲試験片を利用する方法[13)～20)]

犠牲試験片とは、主部材の応力が増幅伝達されるように工夫した小型の疲労試験片である。これを主部材に設置し、試験片に生じた疲労損傷状況から設置部位の応力状態や近接部材における損傷の可能性を推定するものである。試験片に適切に損傷が累積されていることや試験片と実際の主部材の疲労損傷とが対応していることが重要であり、累積疲労損傷度の推定に関する信頼性の問題はあるものの、最近では、鉄道橋などにおいて、実橋への適用性を確認するために試験的に用いられ始めている。

iv)簡易センサーを利用する方法[21)～22)]

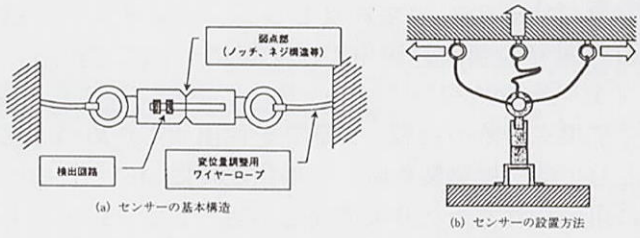
ここでいう簡易センサーとは、異常変位を検知するセンサーのことである。図－６に簡易センサーの適用例を示すが、ワイヤロープから伝達された変位によりセンサーに設けた弱点部が破断し、内蔵された電気回路が反応することで、異常変位を検知するものである。センサーは、ワイヤーロープの取付け方向や長さを調整することで全方向の変位を一センサーで検知可能な構造となっている。センサー設置に当たっては、過去の被災事例などから適切に計測箇所を限定することが重要である。地震等の異常時の橋梁の変位は、支承部付近の変位でほとんど代表できるといわれているが、今後は、検知する変位の値の設定や検知時の変位速度の把握など、実用化のためのさらなる技術開発が必要と考えられる。

v）加速度計を利用する方法[23)]

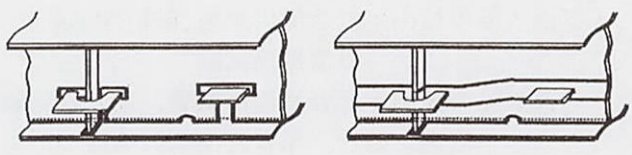
この方法は亀裂のモニタリングに限定するものではないが、構造物の減衰自由振動特性を測定することにより、その健全度あるいは何らかの損傷を同定する方法である。損傷が生じることにより、橋梁の剛性が低下し、固有振動するが小さくなる、あるいは減衰定数が変化する等の構造特性を利用するものである。最近、試験体の測定結果において、低次の卓越周波数を除去し、高次の振動数成分を含む波形の分散値から、二次部材の健全度評価をしている研究事例があるが、いずれにしても、測定値と実際の構造物の損傷との対応など、実際の適用について、さらなる研究開発が必要と考えられる。

vi)光ファイバーセンサーを利用する方法[24)～28)]

これも亀裂のモニタリングに限定したものではないが、光ファイバーは、ケーブル内の散乱光の検出によりケーブルに加わったひずみや屈曲、温度を検知するセンサーとしての機能を有している。図－７に光ファイバーセンサーの設置例を示す。ひずみセンサーと同程度の精度があり、連続した区間の計測が可能であるが、測定器の価格が高価でありコスト的な課題が残されている。現在、開発途上の段階であり、測定値と実際の構造物の損傷との対応など、実際の適用について、さらなる技術開発が必要と考えられる。



図－６　簡易センサーの適用例



図－７　光ファイバーセンサーの適用例

（2）腐食

塗膜劣化については、従来より目視点検・調査が主流であるが、調査の熟練者であっても経験の差や主観により、評価結果にバラツキが生じる。このような課題を解消するために、画像処理による手法が提案されている。CCDカメラ等により塗膜面を撮影し、その画像情報から得られる数値を塗膜劣化基準と照らし合わせることで評価を行うものである。

また、塗膜の劣化現象を遠隔モニタリングする方法として、腐食電流を計測するACM(Atmospheric Corrosion Monitor)型腐食センサーなどのセンサーが開発されており、腐食電流と環境条件との良好な相関性が見出されているものの、腐食速度は部位によって大きく異なることなどから、さらなる技術開発が必要と考えられる。

（3）床版

コンクリート構造物の非破壊試験方法としては、表－4に示す方法が開発されている。また、コンクリート床版に対する非破壊検査方法の研究事例としては、以下のものが挙げられる。

・レーダ法（マイクロ波）を利用する方法
・解析X線写真計測法を利用する方法
・CCD等を利用する方法
・超音波を利用する方法
・赤外線を利用する方法
・光ファイバーセンサーを利用する方法

光ファイバーセンサーについては開発途上であるが、連続性のある光ファイバーを床版下面に縦横に敷設することにより、変形やひずみを面的に計測が可能となるとしている。

以上述べてきた各種モニタリング技術について、現場実務への適用の観点から、想定される適用ケースをイメージすると概ね以下のとおりとなる。

①通常時
・耐荷力不足の橋梁等の供用下における安全性の監視、あるいは補修・補強効果の継続的な監視が必要な場合。

②点検時
・目視点検が物理的に容易でない部位等（目視では見えない部位、近接出来ない部材等）の状態の把握が必要な場合

表－4　コンクリートの点検のための非破壊試験

	試験方法	検査対象および用途
光学的方法	目視	ひび割れ，剥離，錆び汁
	CCD・ビデオカメラなど	上記の欠陥の検出および記録
	レーザ光	表面欠陥部の照射，変位計測
	光ファイバ	変位・ひずみ計測，ひび割れ
弾性波法	打音法	劣化部，内部欠陥，剥離
	超音波法	劣化部，表面ひび割れ深さ
	衝撃弾性波法	劣化部，内部欠陥，剥離
	AE法	内部ひび割れの進展・監視
電磁波法	赤外線法	表層部の内部欠陥
	レーダ法	内部欠陥，鉄筋位置，埋設物
	電磁誘導法	鉄筋位置，鉄筋径
	放射線法	内部の透過画像
電気化学的方法	自然電位法	鉄筋の腐食程度
	分極抵抗法	腐食電流による腐食速度
	その他	アノード分極曲線による不動態判定，カソード分極曲線・定電位法による酸素律速の限界電流の判定など

・目視点検よりも信頼性・定量化の面で優れており、かつ省力化・省人化が図れる場合

③損傷発見後の調査時
・点検によって変状が発見され、対策の要否を判断するためにさらに変状を継続的に把握する必要があると判断される場合
・点検によって補修・補強等の対策が必要であると判断されたが、何らかの制約でただちに実施できず対策を講じるまでの変状の進展性の継続監視が必要な場合。

今後、現場への適用性を踏まえ、モニタリング技術の適用の考え方を整理していくとともに、各種技術の仕様、適用可能性等を検討していくことが必要と考えられる。

4．まとめ

鋼道路橋の損傷実態を橋梁点検結果に基づき調査するとともに、各種モニタリング技術について、開発動向、劣化損傷への適用性について調査を行った。その結果、既に現場で用いられているひずみセンサーや変位センサー等の実用性及び光ファイバーセンサー等の新技術の適用可能性及び課題を確認することができた。

今後は、光ファイバーセンサーなどの現在開発途中のセンサーの適用性について引き続き調査するとともに、既に実用化されている技術について、維持管理業務における適用の考え方（適用条件、位置付

け等）や具体的な適用方法（設置方法、計測結果の評価方法）について整理するとともに、実橋における適用可能性について確認していく予定である。

参考文献

1)建設省道路局:道路統計年報,1998年.

2)建設省土木研究所:橋梁点検要領(案),土木研究所資料第2651号,昭和63年6月.

3)佐藤弘史,荻原勝也,二川英夫:橋梁マネージメントシステムの開発に関する調査研究報告書,土木研究所資料第3633号,平成11年3月.

4)土屋憲一郎,川畑篤敬:橋梁における超音波自動探傷装置の開発,鋼構造論文集,平成12年6月.

5)三木千尋,成宮隆雄, 森下統一, 加藤昌彦:自動超音波探傷システムの板継ぎ溶接部品質保証への適用性の検討,鋼構造論文集,平成6年12月.

6)三上修一,大島俊之,菅原登,山崎智之:エコー波形の詳細解析による超音波探傷法の欠陥検出の定量的評価,土木学会論文集,平成6年10月.

7)高橋政則,劉銘崇,三木千壽,岩立次郎:超音波回折トモグラフィの鋼部材の超音波探傷試験への適用の試み,土木学会論文集,平成6年7月.

8)近藤明雅,菊池洋一,山田健太郎:非破壊試験による１０年間大気暴露された耐候性鋼溶接継手の疲労き裂の検出,土木学会論文集,平成5年　7月.

9)北原道弘,印建華:超音波による界面クラック長の一推定,構造工学論文集,平成8年3月.

10)荒川敬弘,杉崎守,芝田三郎,加藤正実:TOFD-UTの鋼橋への適用検討,橋梁と基礎,平成11年　　4月.

11)村井康生,斉藤賢司,鈴木紀生,杉井謙一:TOFD法による橋梁溶接試験体の超音波探傷試験,鋼構造論文集,平成9年11月.

12)高田直幸,田中秀秋,三上修一,大島俊之,ムハマドＳラーマン,山崎智之:縦横リブ交差部における疲労亀裂進展のモニタリング評価,土木学会年次学術講演会,平成11年9月.

13)阿部充,公門和樹,杉舘政雄,成本朝雄,三木千壽:疲労損傷モニタリングセンサーの開発,土木学会年次学術講演会,平成11年9月.

14)田口達也,堀川浩甫,崎野良比呂:橋梁部材に働く累積疲労荷重の犠牲試験片によるモニタリング,土木学会年次学術講演会,平成11年9月.

15)阿部充,杉舘政雄:鋼橋の疲労診断とシステム化,非破壊検査,平成12年2月.

16)藤本由紀夫,濱田邦祐,新宅英司:構造物の長期応力度モニタリングのための高感度犠牲試験片の開発,藤日本造船学会論文集,平成12年6月.

17)藤本由紀夫,濱田邦祐,波田和寛,佐藤明彦,岩田光正,黄飛,藤井健二:構造物疲労損傷予知のための犠牲試験片の開発,日本造船学会論文集, 平成9年12月.

18)藤本由紀夫,濱田邦祐,波田和寛,佐藤明彦,岩田光正,黄飛:構造物疲労損傷予知のための犠牲試験片の開発(第2報),日本造船学会論文集,平成10年12月.

19)仁瓶寛太:機械・構造物の疲労センサー,メインテナンス工学連合小委員会.

20)阿部充,杉舘政雄,伊藤裕一,成本朝雄,三木千壽:モニタリングセンサーの定ひずみ疲労試験におけるき裂の進展性,土木学会年次学術講演会,平成10年10月.

21)葛守隆,公門和樹,杉舘政雄,成本朝雄:中小橋梁向き異常変位モニタリングセンサーの基本強度試験,土木学会年次学術講演会,平成12年9月.

22)葛守隆,吉池純一,小林俊夫,伊藤裕一:異常検知によるモニタリング手法の検討,土木学会年次学術講演会,平成10年10月.

23)高久達将,渡辺信夫,青木道夫,石原耕司,木村豊吉,村田好康:コンクリート床版のひび割れ診断システム,NKK技報,平成4年.

24)出戸秀明,岩崎正二,大河原正文,倉嶋利雄:光ファイバを用いたひずみ分布計測の既設鋼橋への適用,構造工学論文集,平成13年3月.

25)水ノ上俊雄,三木千壽:ひずみ分布測定型光ファイバセンサの鋼橋梁モニタリング適応性,土木学会年次学術講演会,平成12年9月.

26)藤本由紀夫,宗智,瀧口信次:船舶のヘルスモニタリング・システムに関する研究,日本造船学会論文集,平成5年12月.

27)石塚鐵夫,竹村真考:光ファイバ・センサによる歪とき裂の検知,日本造船学会論文集,平成10年6月.

28)藤本由紀夫,新宅英司,金成燦,高本大世:構造モニタリングによる疲労損傷の検知と予知,日本造船学会論文集,平成7年12月.

6.2　橋梁等の下部構造の健全度評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 13～平 16
担当チーム：構造物研究グループ（基礎）
研究担当者：福井次郎，大塚雅裕，秋田直樹

【要旨】
我が国が保有する橋梁は 13 万橋を超え，近い将来，大規模な更新の時期を迎えることが想定される。これらを限られた予算の中でいかに合理的に維持管理していくかが大きな課題となっている。橋梁下部構造においては，洗掘や地震により機能低下を来しているものの他に，現行の技術基準を満足しないものも相当数存在する。これらの下部構造の健全度を適切に評価し，合理的な維持管理を行うために，下部構造の健全度評価手法に関する研究を開始した。今年度は，重大な被災事例が多く存在する洗掘について，土木研究所が実施した洗掘被災に関するアンケート調査結果に基づき，既に実用化されている道路防災総点検の評価手法の改良を行った。

キーワード：基礎，健全度，洗掘，点検

1．はじめに

橋梁基礎の洗掘による重大な被災事例は多数存在し，下部構造の合理的な維持管理を行う上で洗掘に対する安定性を精度良く評価する手法の開発が不可欠となっている。洗掘に対する安定性評価手法として，平成８年度道路防災総点検(以下「防災点検」と呼ぶ)の調査手法があり，既に実用化されているが，安定性評価の精度は十分検証されておらず，改良の余地が残されているものと思われる。

防災点検の調査手法は，点検の実施に先立ち橋梁の洗掘被災に関するアンケート調査を実施して，点検の調査項目の選定および評価方法が決められた。この時の調査データを基に，架橋条件，構造諸元や河川の状況などと被災の有無の関係について再度分析を行い，防災点検の調査表の改良を行った。また，防災点検の結果を入手し，このデータの分析を開始した。

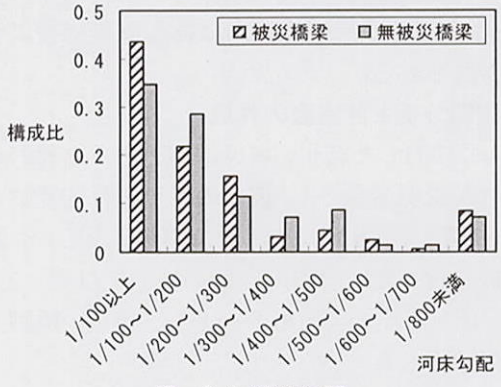
2．アンケート調査による洗掘被災の要因分析

2.1 アンケート調査結果

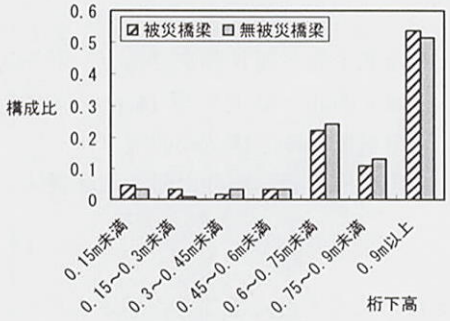
アンケート調査は，平成２年６月～平成７年９月の間に洗掘による被災を受けた橋梁 195 橋およびその隣り合う上・下流側の被災を受けなかった橋梁 390 橋を対象に実施された。調査は，①橋梁一般事項（橋梁名や路線名，架橋位置など），②橋梁一般諸元（橋長，径間数，最小径間長，桁下余裕高など），③上部構造形式，④橋脚構造（躯体形式，基礎形式，根入れ長，対策工の有無など），⑤橋台構造（躯体形式，基礎形式，根入れ長，対策工の有無など），⑥河川一般事項(計画流量，流下能力，河床勾配，最大水深など)，⑦洪水等の履歴，⑧当該洪水の状況(雨量，水位など)，⑨被災状況（上部構造・橋脚・橋台・堤防取付部・護岸・取付道路），⑩復旧方法などの項目について行っている。

防災点検において変状の要因として挙げられている項目および，アンケート調査における被災要因の項目について，被災した橋梁と上・下流の被災しなかった橋梁の構成比を比較し，被災を説明する項目としての妥当性を検討した。構成比は，被災・無被災橋梁それぞれについて，有効回答数に対する各条件の比を示している。検討結果の一部を図－2.1～2.7 に示す。

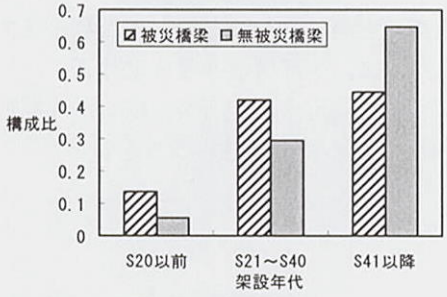
図－2.1～2.5 は，防災点検の調査表[1]（表－2.1）にある変状の要因となる項目であるが，図－2.1 の河床勾配および図－2.2 の桁下高については，被災の有無による傾向の明確な差が見られず，被災はその他の要



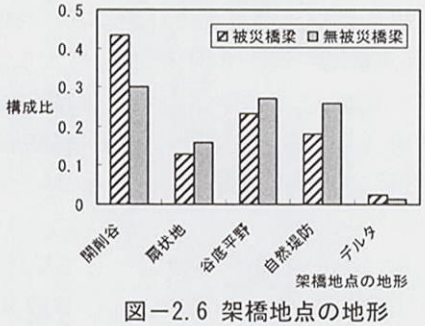
図－2.1 河床勾配



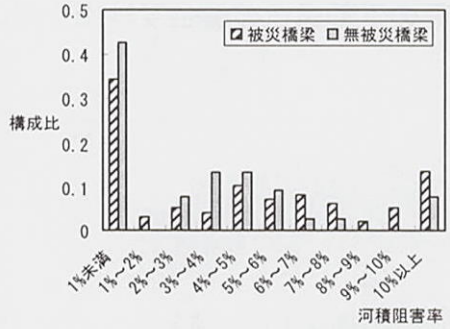
図－2.2 桁下高



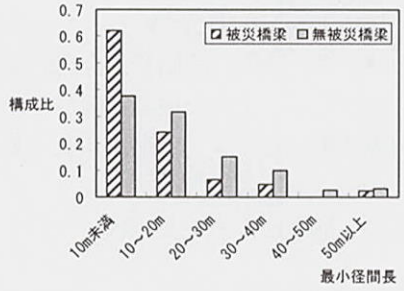
図－2.4 架設年代



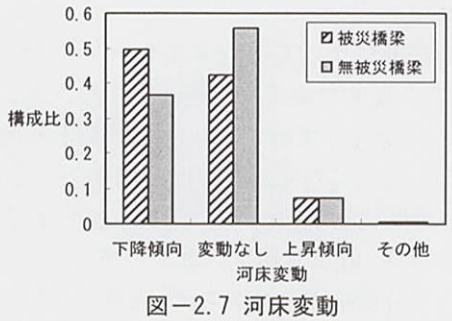
図－2.6 架橋地点の地形



図－2.3 河積阻害率



図－2.5 最小径間長



図－2.7 河床変動

因によると考えられる。

河積阻害率（図－2.3）は，6%以上の場合に被災橋梁の構成比が高い。架設年代（図－2.4）は，S40 年以前について被災橋の構成比が高い。また，最小径間長（図－2.5）は，10m 未満において被災橋梁の構成比が高く，これらの項目は被災の起こり易さを説明できるものと考えられる。

図－2.6 および 2.7 は，防災点検の調査表にはない項目である。架橋地点の地形（図－2.6）は，開削谷の場合に被災し易い傾向が現れている。河床の変動状況（図－2.7）は，下降傾向にある橋梁で被災し易い傾向が見られる。

2.2 相関分析と評点表の作成

2.1 で検討した結果，被災に関連すると思われる調査項目を説明変数とし，被災の有無を目的変数として数量化理論（第Ⅱ類）による相関分析を行い，評点表の作成を行った。なお，今回の検討では表－2.1 の左側［河床・護岸の安定性］のうち，橋台・橋脚共通事項を対象とした。

検討の手順として，説明変数（調査項目）が多いと全体の相関が低下することが予想されるため，まず防災点検の調査表にある項目の相関分析を行い，被災との相関の高い項目を抽出する。これに相関が高いと思われる新規の項目を加えてその項目と被災との相関性を調べる。次に，相関分析より得られる各項目のスコア（洗掘被災に与える影響度合いを表し，説明変数に乗じる重み係数）により点数付けを行い，これをアンケート調査結果にフィードバックさせて相関性の検証を行うものとした。

2.2.1 相関分析

表－2.2 は，各項目に対するレンジおよび偏相関係数を示している。ここで，レンジとはスコアの幅である。既往とは防災点検の調査表の項目であり，新規とはアンケート調査で実施され，防災点検にはない調査項目である。既往項目に対し相関分析を行った結果（ケース 1），桁下高，災害発生頻度はそれぞれ偏相関係数およびレンジが最も低く，低い相関あるいは低い配点となることから，新規項目の検討の際には除外

表－2.2 被災と要因の相関分析結果

項目		カテゴリー	ケース1		ケース2		新規項目検討ケース	
			レンジ	偏相関係数	レンジ	偏相関係数	レンジ	偏相関係数
既往	河床勾配	1/100 以上，1/100 未満 1/250 以上，1/250 未満	0.5045	0.1290	0.1491	0.0412		
	橋梁位置	深掘･水衝部，その他	0.7459	0.2519	0.9903	0.2782		
	架設年代	S20 以前，S21～S40，S41 以降	1.6447	0.4125	1.1137	0.3110		
	最小径間長	10m 以下，10m 超 20m 以下，20m 超	0.4894	0.1336	0.7209	0.1858		
	河積阻害率	7%以上，5%以上 7%未満，5%未満	1.1674	0.3210	0.7557	0.1753		
	桁下高	30cm 以下，30cm 超 60cm 以下，60cm 超	0.3411	0.0243	－	－	－	－
	災害発生頻度	10 年に 1 回，5 年に 1 回，その他	0.1159	0.2092	－	－	－	－
新規	架橋地点の地形	開削谷，扇状地，谷底平野，自然堤防帯，デルタ	－	－	－	－	1.5145	0.4535
	河床変動	下降傾向，上昇傾向，変動なし	－	－	－	－	0.8852	0.2885
	上流側の破堤	直近，上流，距離不明，なし	－	－	－	－	0.9298	0.2011
	流下物ひっかかり(上部)	流木，草類，その他，なし	－	－	－	－	1.2020	0.3352
	流下物ひっかかり(橋脚)	流木，草類，その他，なし	－	－	－	－	0.7203	0.1487
	護岸の被災	上下あり，上流側のみ，下流側のみ，なし	－	－	－	－	1.9528	0.6944

した。ケース2の組合せに新規項目を個々に追加し，個別に分析した結果が新規項目検討ケースの欄に示した値である。新規の項目を一度に加え相関分析を行うと，得られるスコアに異常な傾向が現れるため，ここではそれぞれの新規項目に対し個別に相関分析を行った。

新規項目については，橋台の被災につながると考えられる護岸の被災，架橋地点の地形の相関性が比較的高い結果となった。得られるスコアの傾向なども検討し，これらに加え河床変動，上部構造への流下物のひっかかりを説明変数とすることにした。

表－2.2 に着色したレンジは，2.2.2 において配点の検討に用いる組合せを示している。桁下高および災害発生頻度は，被災のメカニズムから相関を有する項目と考えられるため，これらの項目も 2.2.2 の検討において説明変数として扱うことにした。

2.2.2 評点表の作成

点数付けを行うにあたり，防災点検の調査表では災害発生頻度および架設年代の配点は線形和としているが，ここではこれらを線形和とする場合（式(1)）と重み係数として乗じる場合（式(2)）の2パターンを検討することにした。

$$\text{安定度に関する評点} = \Sigma I_i \qquad (1)$$

$$\text{安定度に関する評点} = \Sigma I_i \times \alpha \times \beta \qquad (2)$$

ここに，

I_i：各項目に対する評点

α：災害発生頻度の補正

β：完成年の補正

検討した配点案およびこれによるアンケート調査結果の評点の頻度分布をそれぞれ表－2.3 および図－2.8，2.9 に示す。ここで，表－2.3 の配点による評点が高いほどその橋梁は被災しやすいことを意味する。

配点案1は式(1)による配点であり，配点案2は式(2)によるものであるが，ともに新規の項目が高い配点となっている。

表－2.3 配点案

項目		カテゴリー	防災点検調査表	配点案1	配点案2
既往	河床勾配	1/100 以上	15	7	8
		1/100 未満 1/250 以上	10	5	5
		1/250 未満	0	0	0
	橋梁位置	深掘･水衝部	20	9	10
		その他	0	0	0
	架設年代	S20 以前	10	5	1.3 倍
		S21～S40	5	2	1.1 倍
		S41 以降	0	0	1 倍
	最小径間長	10m 以下	15	7	8
		10m 超 20m 以下	10	5	5
		20m 超	0	0	0
	河積阻害率	7%以上	15	7	8
		5%以上 7%未満	5	2	3
		5%未満	0	0	0
	桁下高	30cm 以下	10	5	5
		30cm 超 60cm 以下	5	2	3
		60cm 超	0	0	0
	災害発生頻度	橋梁近傍で平均して 10 年に 1 回以上災害が生じる	15	－	－
		当該河川で平均して 5 年に 1 回以上被災が生じる	10	5	1.3 倍
		当該河川で平均して 10 年に 1 回以上被災が生じる	5	2	1.1 倍
		上記以外の場合	0	0	1 倍
新規	架橋地点の地形	開削谷･扇状地	－	13	14
		谷底平野		6	7
		自然堤防帯･デルタ		0	0
	河床変動	下降傾向	－	7	7
		その他		0	0
	流下物ひっかかり(上部)	流木･草類･その他	－	10	11
		なし		0	0
	護岸の被災	あり	－	27	29
		なし		0	0

図－2.8 および 2.9 は，被災橋梁の場合には高い評点に多く分布するほど，無被災橋梁の場合には低い評点に多く分布するほど優れた評価方法といえる。図－2.8 および 2.9 の被災橋梁に対する評点については，両配点案とも防災点検より右側にピークがあり，防災点検の調査表より改善されていると考えられる。配点案2では80～100点の頻度が他の配点方法より高いことから，さらに予測精度が高まっているといえる。無被災橋梁に関しては，両配点案とも 50 点以上の評点が広く分布する傾向がある。これは，架橋地点の地形

など被災橋梁に近い条件を有するデータが多く，潜在的に被災しやすいものが集まったものと考えられる。

3．防災点検結果を含めた分析

3.1 評点表の検証

2.2 で検討した配点案 2 を防災点検結果に適用し，評点と変状の実態との関係を調べた。例として，図－3.1 および 3.2 に，橋脚を対象としたそれぞれ防災点検，配点案 2 による橋脚の安定性の評価（表－2.1 の左側の評点）と防災点検結果の変状の評点（表－2.1 の右側の評点，一部を表示）との関係を示した。この図では，変状の点数が高い曲線ほど評点の高い領域に分布しているのが望ましい。配点案 2 に追加された新規の項目（配点が高い）に対し，防災点検のデータが存在しないこともあり，これらの集計結果からはあまり改善が見られない。

3.2 両調査データによる要因分析

2.2 で検討した評価法が防災点検の調査表からあまり改善されていないことを示したが，この結果を踏まえ，防災点検（約 15,000 橋）およびアンケート調査の両データを用いて被災橋梁の傾向を再度分析した。

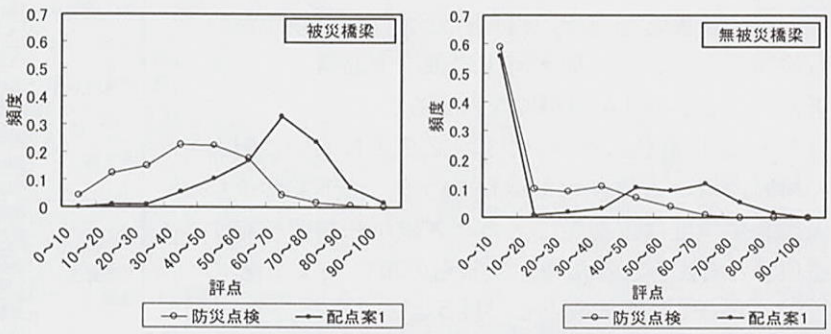
防災点検結果は，Ｈ８時点で供用中の橋梁に対する点検結果であり，被災履歴を持つ橋梁も若干あり，潜在的に被災し易い橋梁を一部に含んでいる。ここでは，防災点検全データの傾向（無被災橋梁の平均的な傾向）に対する，アンケート調査の被災橋梁の傾向の相違から被災と要因との関係を分析した。なお，本来アンケート調査の無被災橋梁のデータを防災点検のデータに足し合わせて分析すべきところであるが，防災点検とアンケート調査のデータの照合が難しく，足し合わせの際にデータが重複する可能性があったため，ここでは分析の対象外とした。

アンケート調査結果については，被災と要因の関係を 2.1 で分析したよりもさらに詳細に検討するために被災部位ごとに集計を行った。図－3.3～3.7 に，いくつかの項目について防災点検結果とアンケート調査結果を比較している。

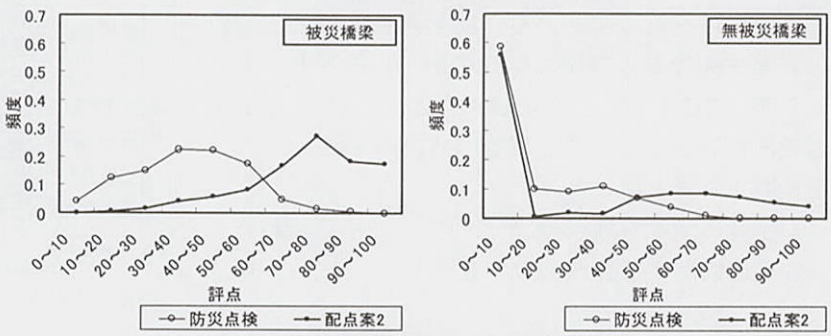
河床勾配については，2.1 において被災の有無による傾向の明確な差が見られないと評価したが，図－3.3 では 1/100 以上の場合に橋台被災の構成比が防災点検結果に比べかなり大きい結果となっている。

架設年代（図－3.4）については，2.1 でも被災有無による傾向の違いが確認されたが，橋脚・橋台被災別に見ると橋脚被災のほうが防災点検結果との傾向の相違が大きい。

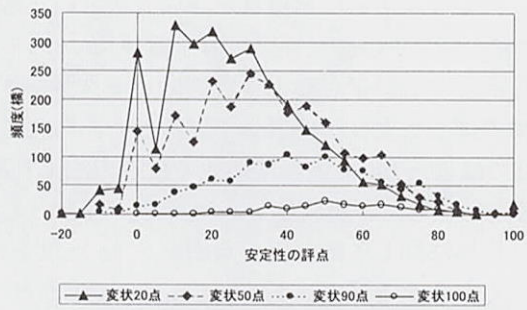
最小径間長（図－3.5）は，防災点検結果の小支間長の構成比が 2.1 で示した無被災橋梁における小支間長の構成比より小さいため，2.2.1 の分析よりも相



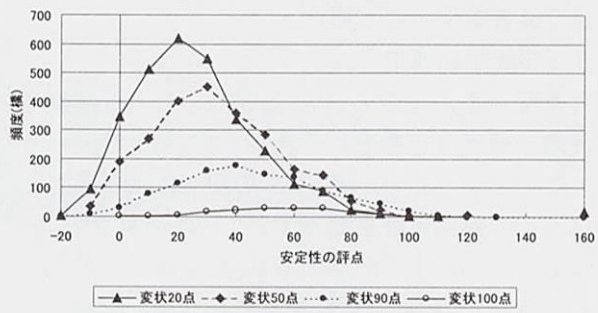
図－2.8 配点案 1 による評点結果



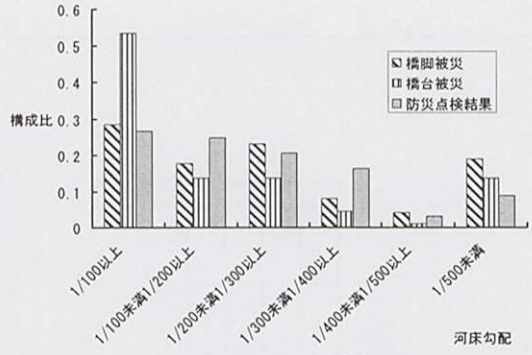
図－2.9 配点案 2 による評点結果



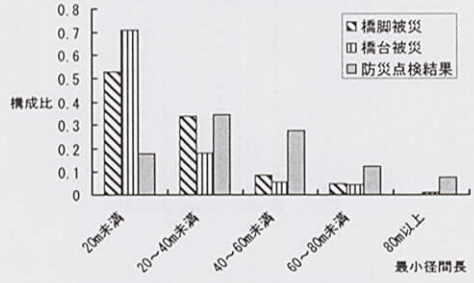
図－3.1 防災点検の評価方法による集計



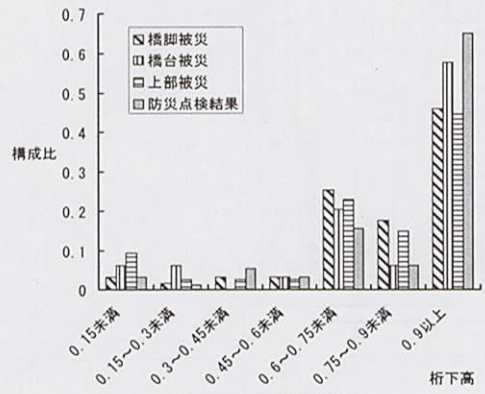
図－3.2 配点案 2 による集計



図－3.3 河床勾配



図－3.5 最小径間長



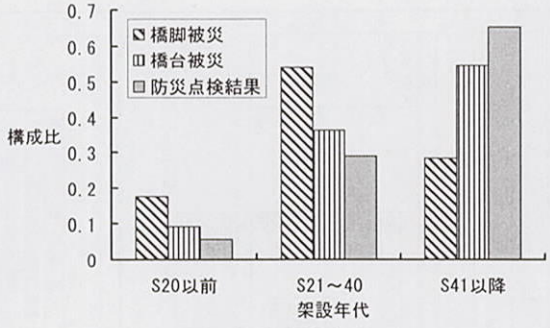
図－3.7 桁下高

関が高くなるものと思われる。

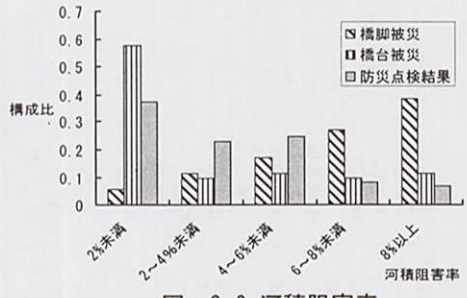
河積阻害率（図－3.6）については，2.1でも被災の有無による若干の傾向の違いは見られたが，橋脚被災の傾向が明らかに防災点検結果と異なっており，部位ごとに整理したことで傾向の相違が明確となった。

桁下高（図－3.7）については，上部構造の被災も集計したが，被災との関係は明確ではない。

以上，防災点検結果を含めて被災要因と被災の発生との関係を再度分析したが，部位によって被災の要因が異なることが点検・調査結果に現れており，2.1において被災との関連が明確でなかった項目についても，被災部位ごとに整理することで被災の傾向が現れる項目があることが判った。また，アンケート調査における無被災橋梁の傾向と防災点検結果の傾向が多少異なる項目も見られる。今後は，共通の要因として扱われていた項目について，被災の種類（被災部位）



図－3.4 架設年代



図－3.6 河積阻害率

に分けて評価する方法についても検討していく必要がある。

5．まとめ

平成 8 年度に実施した洗掘被災に関するアンケート調査の結果を用いて，被災の要因と被災の発生の関係について検討を行い，洗掘に対する評点表の作成を行った。ここには，新たに架橋地点の地形，河床変動といった項目を追加している。これを用いてアンケート調査結果を評価したところ，防災点検の調査表による評価より精度が改善されていることが確認された。しかし，これを防災点検結果に適用した場合，新規に追加した項目に対するデータが得られていないことが影響していると思われるが，あまり改善されていないことが判かり，さらに改良の余地があることが明らかとなった。

そこで，被災要因と被災の有無との関係を，被災橋梁に対し被災の部位ごとに分析した結果，被災部位によりそれらの関係が異なることが判った。

今後，これらの結果を踏まえ，さらに評価表の改良を図る必要がある。

参考資料

1)（財）道路保全技術センター：平成 8 年度道路防災総点検要領〔豪雨・豪雪等〕

表－5．8．3　安定度調査表（橋梁基礎の洗掘）（記入例）

施設管理番号 ＊＊＊＊H＊＊＊

点検者	○○○○○
所属機関	△△△コンサルタンツ㈱

［河床・護岸の安定性］
（橋台・橋脚共通事項）(A)

項目	要因	評点区分	配点	評点
河道の特性と橋梁の構造	河床勾配（急流河川である）	1/100以上	15	
		1/100未満1/250以上	10	
		1/250未満	(0)	0
	架橋位置（水衝部または深掘れ部に橋台・橋脚がある）	該当する	(20)	
		該当しない	0	20
	架設年代	昭和20年以前	10	
		昭和21年～40年	(5)	
		昭和41年以降	0	5
	最小径間長	10m以下	15	
		10m超20m以下	10	
		20m超	(0)	0
	河積阻害率	7%以上	15	
		5%以上7%未満	(5)	
		5%未満	0	5
	桁下高	30cm以下	10	
		30cm超60cm以下	5	
		60cm超	(0)	0

災害発生頻度補正	発生頻度	点数(α)	小計		
	橋梁近傍で平均して10年に1回以上災害が生じる	15点	(15)	合計	(A)　(100～0)
	当該河川で平均して5年に1回以上災害が生じる	10点			
	当該河川で平均して10年に1回以上災害が生じる	(5点)			
	上記以外の場合	0点	5点		35点

［変状］
（橋台［調査橋台：A　/　］）(D)

項目	変状	評点区分	配点	評点	
洗掘・変状	護岸の基礎の洗掘・変状	洗掘や変状が大きい	50		小計(a) max100
		洗掘や変状がみられるが小さい	30		
		変状なし	(10)	10	
	護岸の変状	大きな変状が認められる	50		
		変状がみられるが小さい	(30)		
		変状なし	10	30	
	護岸と堤防との取付部の沈下・変状	沈下や空隙などの変状が大きい	50		
		沈下や空隙などの変状が小さい	30		
		変状なし	(10)	10	50
基礎形式	ケーソン基礎		80	(b)	
	杭基礎		(80)		
	直接基礎		100		
	不明		100		80
合計					(D)＝a×b÷100　(100～24) 40点

（橋台［調査橋台：A　/　］）(B)

項目	要因	評点区分	配点	評点
橋台に対する評価	橋脚と堤防のり先の離れ	5m以内	10	
		5m超10m以内	5	
		10m超	(0)	0
	橋台の設置位置	橋台が河川内に突出している	15	
		橋梁位置の川幅が上下流に比べて狭い	10	
		該当しない	(0)	0
	洗堀に対する安定性（基礎の根入れ）	該当する	(-10)	
		該当しない	0	-10
	橋台の前面・周辺の護岸	範囲・高さのいずれも該当する	(-10)	
		範囲または高さのいずれかが該当する	-5	
		該当しない	0	-10
合計			(B)	(25～-20) -20点

（橋脚［調査橋脚：P　6　］）(E)

項目	変状	評点区分	基礎形式 浅い基礎・不明	基礎形式 深い基礎	小計
洗掘	基礎周辺河床の洗掘	洗掘なし	20	15	
		わずかな洗掘	50	40	
		ﾌｰﾁﾝｸﾞまたは頂版上面の露出	90	(75)	
		ﾌｰﾁﾝｸﾞ下面露出	100	90	75
合計					(E) (100～15) 75点

（橋脚［調査橋脚：P　6　］）(C)

項目	要因	評点区分	配点	評点
橋脚に対する評価	橋脚の構造	パイルベントである	15	
		隔壁のないラーメン構造	10	
		上記に該当しない	(0)	0
	流向と橋脚の交差角	20°以上	15	
		10°以上20°未満	10	
		10°未満	(0)	0
	洗堀に対する安定性（基礎の根入れ）	該当する	(-10)	
		該当しない	0	-10
	洗掘対策工	基礎の補強	-10	
		連続根固め	-5	
		なし	(0)	0
合計			(C)	(30～-20) -10点

橋台に対する評点(G)

河床・護岸の安定性 (A)＋(B) max100	(F)	15点
変状	(D)	40点
(F)と(D)の大きい方	(G)	40点

橋脚に対する評点(I)

河床・護岸の安定性 (A)＋(C) max100	(H)	25点
変状	(E)	75点
(H)と(E)の大きい方	(I)	75点

橋梁全体の評点(K)

(G)と(I)の大きい方	(K)	75点

［総合評価］

対応	判定
対策が必要と判断される。	
防災カルテを作成し対応する。	○
特に新たな対応を必要としない。	

6.3　既設コンクリート構造物の補修技術の開発

研究予算：運営交付金（一般勘定、道路勘定）
研究期間：平 12 ～平 15
担当チーム：技術推進本部（構造物マネジメント技術）
研究担当者：河野広隆、渡辺博志、片平博

【要旨】
本研究では、コンクリート構造物を対象に、ひび割れへの樹脂注入や、劣化部分を取り除いてコンクリートを打ち直す断面補修技術について、その工法選定や施工性、補修結果に対する評価法を提案することを目的に研究を進めている。13年度は、断面補修工法について、打継面の表面処理方法（乾燥、湿潤、プライマー処理）、補修の方向（順打ち、逆打ち）、補修工法（吹きつけ、コテ塗り、注入）、補修材の種類（ポリマーの有無等）の組み合わせを種々に変えた実験を行い、それぞれの得失について整理した。
キーワード：断面補修、補修材、ひび割れ、付着強度

1. はじめに

社会資本ストックを長期間にわたって利活用していくためには、適切な維持管理と同時に、劣化した構造物に対する適切な補修が必要である。しかし、補修材料や補修方法は多岐にわたり、補修工法の選定や補修効果を評価する方法は必ずしも確立されていない。今後、補修を要する既設構造物が確実に増大してくることから、補修技術の評価方法を確立することが求められている。

13年度は、断面補修工法について、打継面の表面処理方法、補修の方向、補修工法、補修材の種類等の組み合わせを種々に変えた実験を行い、それぞれの得失について整理した。

2. 補修材料

補修の工法には吹付け、コテ塗り、注入等の工法があり、それぞれの工法に見合った補修材が市販されている。吹付けとコテ塗りに用いられる材料はタレ落ちを防ぐ目的から流動性の小さい配合となっており、注入用の材料は流動性を高めた配合となっている。材料の成分としてはモルタルまたは骨材径の小さなコンクリートをベースとして、施工性や引張強度を高める目的で繊維が混入されているものや、打設後の収縮を防止する目的から膨張材や収縮低減材（以下、膨張材類という）が添加されているもの、さらにはポリマーが混入されているものなどがある。これらの材料は事前に調合さらたものが市販されており、現場で定められた量の水を混合して使用されている。配合の詳細は非公開のものがほとんどである。

本実験では表－１に示す５種類の補修材を使用した。このなかでＢ～Ｅの材料は市販の材料であり、詳細な配合は不明なため、洗い試験を実施し、0.06mm 以下の粒子をセメント、それ以上の粒子を細骨材を仮定し、推定した配合を（ ）書で示した。

それぞれの材料の特徴は以下のとおりである。

Ａ：水セメント比 40 %の吹付け用モルタルであり、フローが 170mm 程度になるようにセメントと細骨材との混合比を選定した。なお、空気量を７%程度含む配合とした。

Ｂ：モルタルに繊維と膨張材類が混入された吹付け用材料である。

Ｃ：モルタルに繊維と膨張材類、さらにポリマーが混入された吹付け用材料である。

Ｄ：モルタルに繊維と膨張材類が混入されたコテ塗り用材料であり、Ｂと同一材料である。

Ｅ：モルタルに膨張材類が混入された注入用材料である。

3. 実験方法

3.1 実験概要

15 × 15 × 53cm の角柱型枠を使用して 13 × 15 × 53cm の母材コンクリートを打設し、打継面の表面処理を施した後に、表－２に示すＡ～Ｅの各材料を用いた方法で、厚さ２ｃｍの補修材の施工を行った。

打設の翌日に脱型し、３日間の湿潤養生を行った後に気乾状態で 28 日間放置し、その間に発生する

表－1 補修材の配合とフレッシュ性状

補修材の種類	単位量 (kg/m^3)				膨張剤等の有無	ポリマーの有無	練上り温度(℃)	練上り後フロー(mm)	空気量(%)	
	水	セメント	細骨材	繊維					練上り後	吹付け後
A	280	700	1097	0	無	無	21.6	168×167	6.3	2.3
B	335	(980)	(965)	(5)	有	無	23.4	141×141	－	2.5
C	292	(795)	(1025)	(5)	有	有	20	144×142	－	3.4
D	335	(980)	(965)	(5)	有	無	24.1	141×141	2.8	－
E	256	(700)	(1300)	0	有	無	19.5	(0打225×225)	0.45	－

( )内は洗い出しによる推定値。0.06mm以下をセメント、0.06mm以上を細骨材と仮定

表－2 試験条件の組み合わせと供試体本数

材料	A			B			C			D	E
施工法	吹付け									コテ塗り	注入
表面処理	乾燥	湿潤	ﾌﾟﾗｲﾏｰ	乾燥	湿潤	ﾌﾟﾗｲﾏｰ	乾燥	湿潤	ﾌﾟﾗｲﾏｰ	ﾌﾟﾗｲﾏｰ	ﾌﾟﾗｲﾏｰ
逆打ち	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
順打ち	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ひび割れを観察した。また、材齢 28 日経過後に建研式付着強度試験法 [1]によって打継面の付着強度を測定した。

3.2 母材コンクリートの作製

母材コンクリートは粗骨材最大寸法 20mm、水セメント比 40 %の配合とした。

この材料を 15 × 15 × 53cm の角柱型枠に型枠上端から 2cm 低い高さ（底から 13cm）まで打設した。打設した上面（打設面）はコテ仕上げをせず、骨材がやや露出する条件とし、この面を補修材を施工する打継面とした。この打継面に対して、打設した翌日および水中養生終了後にワイヤーブラシによる研磨を行い、レイタンスを除去した。

養生は打設の翌日から材齢 21 まで水中養生を行った。

母材コンクリートの材齢 28 日経過後の圧縮強度は 54N/mm^2，引張強度は 4.7N/mm^2 であった。

3.3 表面処理

補修材を施工するときの打継面の表面処理としては以下の３通りを設定した。

①乾燥状態：70 ℃の乾燥炉において 24 時間乾燥した。

②湿潤状態：20 ℃の水中に 24 時間浸し、コンクリート内部に十分吸水させ、打継面には水が浮いていないこととした。

③プライマーを施工した状態：70 ℃の乾燥炉において 24 時間乾燥した後に、打継面にアクリル樹脂系吸水防止材を霧吹きで吹き付けることとし、吹き付け量は 100 ～ 200g/m^3 とした。

プライマーは打継面に浸透し、薄い皮膜を形成することで、補修材の水分が母材コンクリートに浸透するのを防ぎ、また補修材打設時に皮膜の表面が溶解し補修材と一体化することで付着性を向上させる機能を有している。

補修材Ａ，Ｂ，Ｃの施工に対しては上記の①②③の表面処理を設定し、補修材Ｄ，Ｅに対しては③のみの設定とした（表－２参照）。

3.4 補修材の施工方法

補修材の施工方法としては以下の３通りの方法について、逆打ちと順打ちの施工を実施した。

(1) 吹付け

Ａ，Ｂ，Ｃの材料をポンプで圧送し、これをコンプレッサーからの圧縮空気で吹付けることとした。

逆打ちの方法は高さ約２ｍの架台上に母材コンクリートを設置し、下側から補修材を吹付ける方法とした。順打ちの方法は、母材コンクリートを床に設置し、上側から補修材を吹付ける方法とした。

(2) コテ塗り

Ｄの材料を金コテで塗りつけることとした。

逆打ちと順打ちの母材コンクリートの設置方法は吹付けと同じ方法とした。

(3) 注入

Ｅの材料を注入することとした。

逆打ちは母材コンクリートを型枠内に２ cm 浮かした状態で設置し、母材コンクリートに事前に空けたφ 25mm の注入孔から注入材を注入した。順打ちは母材コンクリートの上面に注入材を２ cm の厚さに打設した。

3.7 ひび割れ観察

補修材の施工後３日間は湿布養生を行い、その後は室温 20 ℃、湿度約 50 %の室内に放置し、ひび割れの発生状況を観察した。

3.8 付着強度試験

材齢 28 日経過後に、建研式付着強度試験によって母材と補修材との付着面の付着強度を測定した。測定に際しては、事前に、補修材面からφ 50mm のコアドリルで深さ約３ cm の溝切りを行い、このφ 50mm の円形面にアタッチメントを接着し、鉛直方法に引張ることとした。

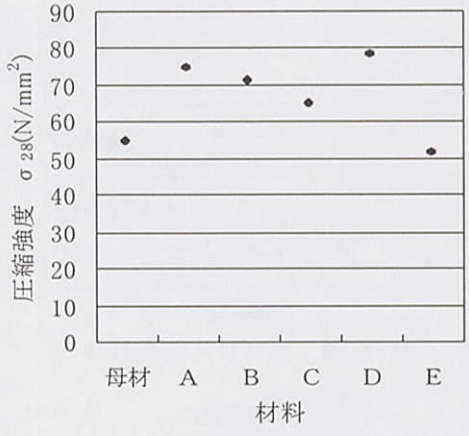
4. 実験結果

4.1 各補修材料の基本性状

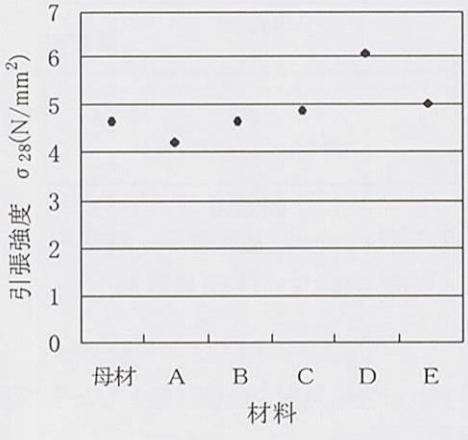
各材料について円柱供試体を作成し、材齢 28 日の圧縮強度、引張(割裂)強度を測定した。

供試体の寸法は母材コンクリートについては圧縮はφ 10 × 20cm、引張はφ 10 × 15cm、補修材については圧縮はφ 5 × 10cm、引張はφ 5 × 7.5cm とした。型枠への材料の打ち込み方法は実際の補修の方法に準拠した。

圧縮強度および引張（割裂）強度を図－１，２に示す。各補修材の強度は母材コンクリートと同程度かそれ以上の値を示した。なお、ＢとＤは練上り時点では同じ材料であるが、施工性に違いによって強度に多少の差が生じたようである。吹付けについては型枠が小さいことから作業が繁雑となり、アバタの発生が認められた。



図－1 各材料の圧縮強度



図－2 各材料の引張強度

4.2 表面処理の施工性

母材コンクリートの打継面の表面処理について、①乾燥、②湿潤、③プライマー処理、の３通りを設定したが、湿潤の状態を長時間保つことは困難であった。これに対してプライマー処理は霧吹きによる噴霧を一度だけ行えば、表面が汚れない限り、性能を長期にわたって維持することが可能で、作業は容易であった。

4.3 補修材の施工性

(1)吹付け

吹付けは、周辺への材料の飛散が多く認められた。吹付け終了後には余分な材料をかき落とし、最終的にコテで仕上げる必要があり、補修する容量の２倍程度の材料を必要とした。

補修材Ｃはフロー値ではＢと遜色無い結果であったが、ポリマーの混入の影響で流動性があり、Ｂに比較してタレ落ちが多い傾向が認められた。

打継面が湿潤状態のものに対しては、表面に水が浮いていると付着しないため、吹付けた補修材料を一度かき落とし、再度、吹付けを行う必要があった。

なお、Ａの材料については練上り直後と吹付け後に空気量を測定した。この結果を表－１に示すが、吹付けによって補修材中の空気（エントレインドエア）はほとんど消滅してしまうことが確認された。

(2)コテ塗り

作業は左官による手作業であり、吹付けに比較すると施工速度は劣るが、材料のロスは少なかった。

(3)注入

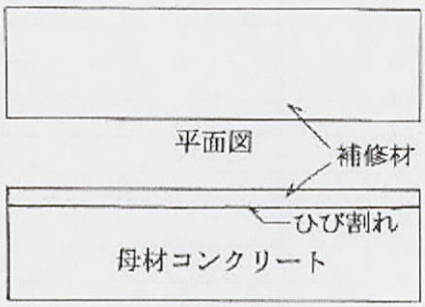
今回の試験では単純に流し込むだけであり、特に問題となることは無かった。

4.4 ひび割れ観察結果

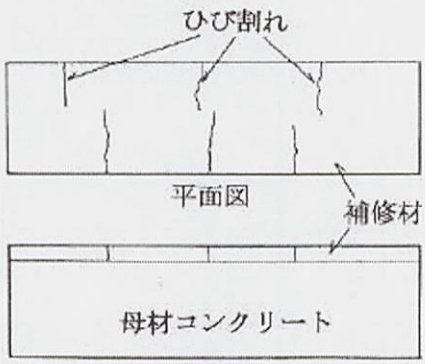
材齢 28 日を経過した段階でのひび割れ発生については、以下の３とおりの状況が確認された。

(1)打継面沿いにひび割れが発生

図－３(1)に示すように打継面沿いに補修材が剥がれるようにひび割れが発生したケースである。こ

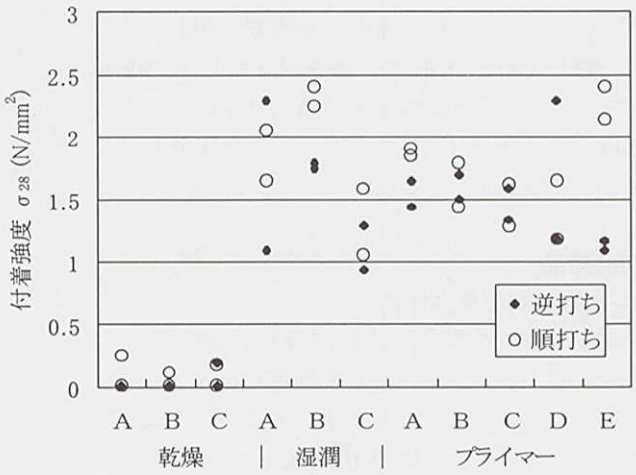


(1)乾燥－補修材Ａ－順打ち



(2)プライマー－補修材Ｄ－順打ち

図－３　ひび割れ観察図



図－４　付着強度試験結果

のひび割れは表面処理を乾燥状態とした全ての供試体で発生した。

(2)補修材の表面にひび割れが発生

図－３(2)のように補修材の表面にほぼ等間隔にひび割れが発生したケースである。このひび割れは表面処理が湿潤かプライマー処理で、A,B,D の補修材を施工した条件で認められた。ひび割れの幅は最大で 0.06 ～ 0.08mm 程度であった。

(3)ひび割れ無し

ひび割れが生じなかったケースであり、これに該当するのは表面処理が湿潤かプライマー処理で、C，Ｅの補修材を施工した条件であった。

4.5 付着強度試験結果

付着強度試験結果を図－４に示す。

表面処理が乾燥状態のものは付着強度はほとんどゼロであった。

表面処理が湿潤状態のものについては、補修材Ａ，Ｂの付着強度が高く、Ｃはやや低い強度となった。

表面処理がプライマー処理のものについては、Ａ，Ｂ，Ｃの強度は概ね同程度であった。ＤはＢと同じ材料をコテ塗りしたものであり、強度はややばらついたが、平均値としてはＢと同程度であった。注入材のＥの結果は順打ちの強度は高く、逆打ちの強度は順打ちの 1/2 程度であった。

Ｅの逆打ちの付着強度が低かった理由については、試験を行った後の破断面に空気泡が多く確認されており、注入時に打継面沿の空気が抜けきらないことが原因と考えられる。Ｅ以外の材料では、順打ちと逆打ちとの強度差は認められなかった。

5．まとめ

(1)表面処理の方法については、プライマー処理が簡便で、かつ安定した付着強度を得ることが可能であった。

(2)吹付けの作業では材料の飛散が多く認められた。

(3)逆打ちの作業性はモルタル系の材料Ｂが優れ、ポリマーを含むＣはタレ落ちがやや多かった。

(4)吹付け用モルタルＡ，Ｂおよびコテ塗り用モルタルＤでは補修材表面にひび割れが発生した。吹付け用ポリマーモルタルＣおよび注入用モルタルＥではひび割れは発生しなかった。

(5)逆打ちで注入する場合は、打継面沿いに空気泡が残り、付着強度が低下する結果となった。

6.4　舗装の低騒音・低振動機能の回復に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平 12～平 16
担当チーム：基礎道路技術研究グループ（舗装）
研究担当者：吉田　武 、新田　弘之、
梁　真二

【要旨】
道路交通による騒音や振動を抑制し、沿道環境を改善するために舗装の機能を向上し、低騒音化、低振動化などの方策をとる場合があるが、供用とともに機能が低下し、機能の回復が必要となる。本研究では、清掃などによる舗装の騒音低減機能の回復に関する研究及び補修などによる振動低減効果の付加に関する研究を行っている。平成１３年度は、排水性舗装の清掃による機能回復を行った場合の透水機能の回復と騒音低減機能の回復についてメカニズムの解明を行った。その結果、効果的な機能回復には路面のテクスチャを考慮することが必要であることが分かった。また、振動軽減効果の高いと考えられる補修工法について、振動軽減効果の評価方法について検討を行った。その結果、平坦性や一定の加振による振動を把握することである程度評価できることがわかった。持続性については、今後さらに検討が必要なことがわかった。
キーワード：排水性舗装、機能回復、路面騒音、振動レベル、振動測定

1. はじめに

交通騒音対策の一つとして、空隙率の高い排水性舗装の利用が進んでいる。しかし、この排水性舗装は、塵埃による空隙詰まりなどにより数年で低騒音機能が低下し、その機能の回復が必要になっている。また、交通振動の発生に対しては、表層の補修などが行われるが振動抑制の持続性が課題となっている。

本課題では、排水性舗装の低騒音機能の回復手法として、空隙中の塵埃などの除去技術を用いた維持管理手法をの検討を行った。また、振動軽減効果の高い舗装を用いて、低振動舗装の振動軽減効果の評価方法についての検討を行った。

2. 低騒音舗装の機能回復に関する検討

2. 1　実験方法

実験に用いた舗装路面は、土木研究所構内ある最大粒径 13㎜ 空隙率 20%の排水性舗装である。供用していない舗装のため、空隙詰まりを人工的に起こした。今回３パターンの空隙詰まりを試みたが、どの工区も空隙詰まり前の舗装の状態はほぼ同じである。空隙詰まり物質としては、Ａ工区：関東ローム、Ｂ工区：スクリーニングス、Ｃ工区：砂＋アスファルト（2㎜ アンダー砂とストレートアスファルト４％を予め混合したもの）の３種類として、水とともに散布を繰り返し十分に空隙に詰まらせた。

洗浄による機能回復は、高圧水を吹き付けながら吸引をする排水性舗装機能回復機を用いて行った。作業は、幅員 4m の舗装上を 2m に分けて行った。路面性能は、テクスチャ、タイヤ／路面騒音、現場透水量などを測定した。路面テクスチャの測定は、回転式テクスチャメータ（ＣＴメータ）によって行った。路面テクスチャの評価方法は接触部分比とした。タイヤ／路面騒音は、乗用車のタイヤ近傍にマイクロフォンを取り付け、50km/h で走行したときの音をサンプリングした。現場透水量は現場透水量試験器による方法で行った。

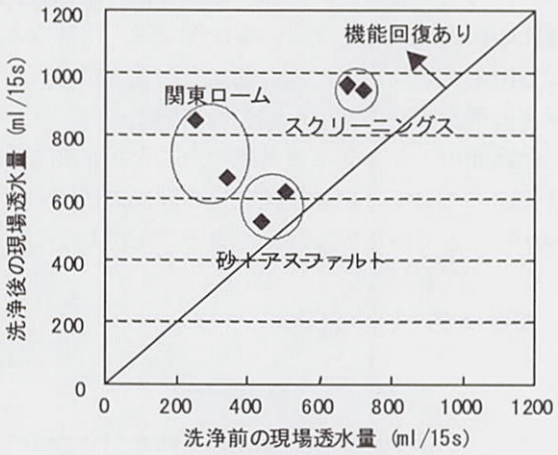
2. 2 実験結果

2. 2. 1　洗浄による機能回復

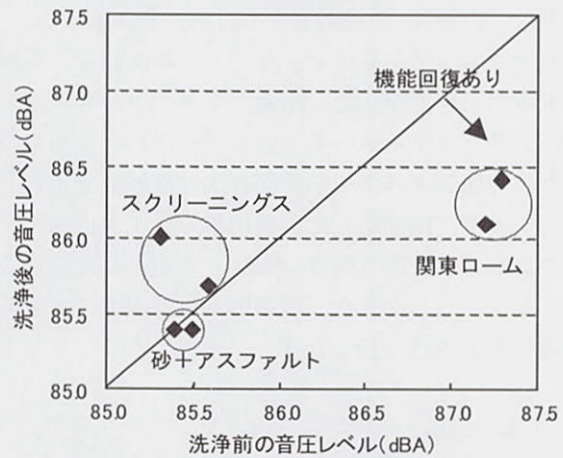
洗浄による機能回復作業の前後で、各種の路面性能を調査した。まず、現場透水量について、図－１に示す。関東ローム、スクリーニングスで空隙詰まりを行ったものは大きく回復をしている。砂＋アスファルトで空隙詰まりを行った工区では回復の程度が小さかった。

次に、タイヤ／路面騒音の測定結果を図－２に示す。洗浄によって透水機能の回復があまり見られなかった砂＋アスファルトの工区では、タイヤ／路面騒音の変化も小さかった。関東ロームの工区では、透水機能の回復と同じようにタイヤ近接音の機能も

回復した。しかし、スクリーニングスの工区は、若干であるがタイヤ近接音の値が大きくなった。
関東ローム工区とスクリーニングス工区では、回復作業後の現場透水量やタイヤ／路面騒音は近い値を示しており、これらの工区の洗浄後の諸性状はあまり変わらないと考えられる。大きな違いはスクリーニングスで空隙が詰まっているにも係わらずタイヤ／路面騒音が低いことであり、以下この点について考察を行うことにした。



図－１　現場透水量の回復効果

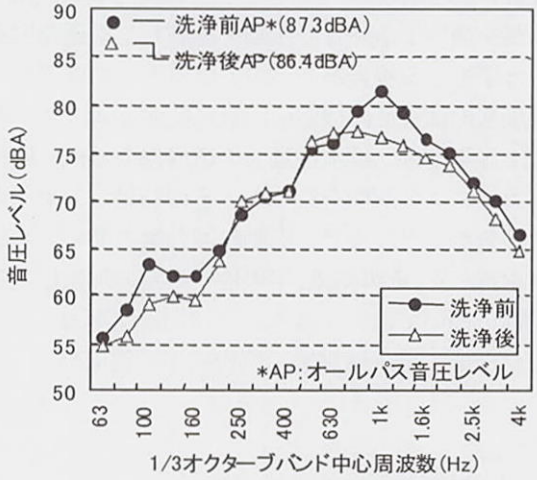


図－２ タイヤ/路面騒音の回復効果

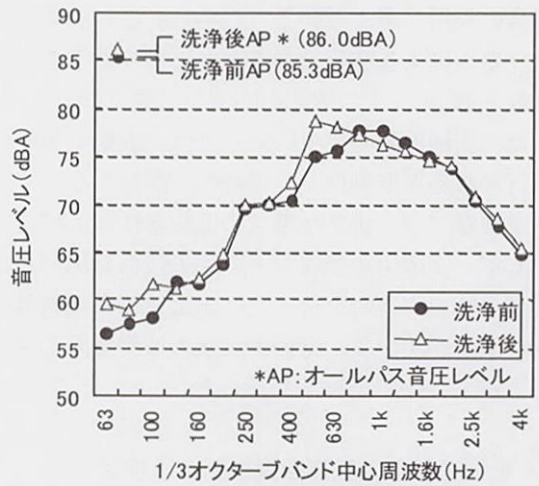
2. 2. 2　周波数分析

図－３，４に関東ローム、スクリーニングス工区の周波数分析の結果を示す。まず、洗浄後のスペクトルに注目すると、若干の違いがあるが、両工区ともエアポンピング音の影響と考えられる 800～1000Hz 付近は小さく、タイヤ加振音の影響と考えられる 500～630Hz 付近で大きくなっている。エアが抜けるのでエアポンピング音は抑えられたがテクスチャの影響でタイヤ加振音は大きくなるという排水性舗装特有な形状をしている。

洗浄前についてみると、関東ローム工区では 1000Hz 付近で大きくなっており、密粒度アスファルト舗装に近い状態になっているものと考えられた。これは空隙が詰まりテクスチャが滑らかになったため、タイヤ加振音が減ったが、エアが抜けにくくなりエアポンピング音が大きくなったものと考えられる。一方、スクリーニングス工区では、500～630Hz 付近が小さく、800～1000Hz 付近もあまり大きくない。従って、タイヤ加振音も発生しにくく、エアポンピング音もあまり発生していないと考えられた。これらの違いはエアの抜けやすさの違いと考えられた。



図－３ 洗浄による周波数特性の変化
（関東ローム）

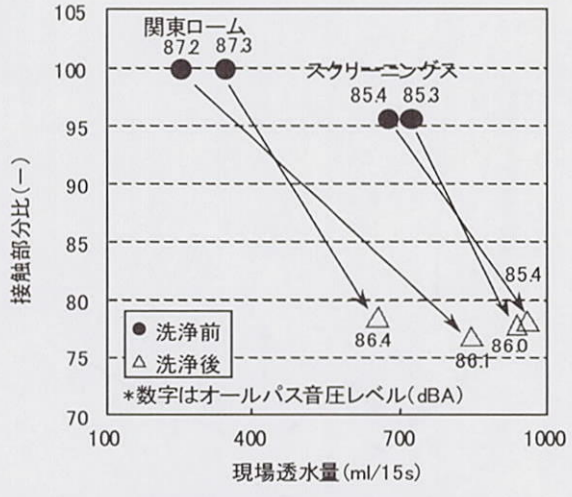


図－４ 洗浄による周波数特性の変化
（スクリーニングス）

2. 2. 3　テクスチャと透水量の関係

エアの抜けやすさは、透水量に関係が深いと考え、テクスチャと透水量の変化について考察した。図－５に透水量とテクスチャの評価値である接触部分比の変化を示す。参考のために音圧レベルも付記した。

洗浄後はテクスチャも透水量も近い状態であり、音圧レベルも近い値を示した。また洗浄前は、両工区ともテクスチャが近いレベルであるが、透水量が大きく違うことがわかる。これらの結果から、スクリーニングス工区では空隙詰まりによりテクスチャが改善される一方で、エアの抜けやすさが確保されたので、タイヤ／路面騒音が小さくなったことが分かった。



図－5 洗浄による現場透水量と接触部分比の変化

2．3 低騒音機能回復のまとめ

今回、人工的に空隙詰まりを起こしているため、現道でも同じような結果が得られるとは明言できないが、テクスチャを考慮することにより排水性舗装の騒音低減機能の回復をある程度説明できることは分かった。

今後は、エアの抜けやすさの指標として透水量ではなくもっと直接的な指標の検討を行うなどにより、さらに機能回復のメカニズムが明確になるものと考えられる。

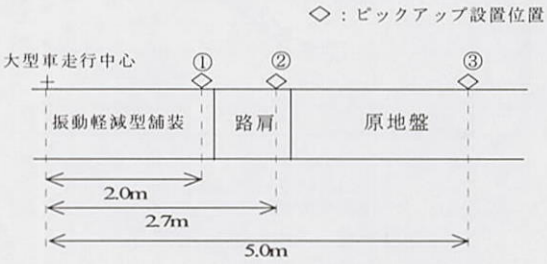
3. 低振動舗装の評価に関する検討

3．1 実験方法

共同研究により開発した3種類の振動軽減型舗装と比較工区として設けた密粒舗装の計 4 種の舗装(工区長 36m×4)を用いて振動測定を行った。

加振源として後軸重117.6kNと58.8kNの大型車による走行と FWD の計3通り用いた。加振源 FWD による測定は、図－6 の大型車走行中心位置に衝撃荷重 49kN を与え、その際に発生する振動を測定するものである。振動測定位置は工区中央の18m地点とし、各測定位置における振動ピックアップの設置場所は図－6 に示す3ヶ所とした。

また促進載荷試験を行い、試験前後における路面平坦性等の路面性状値の変化の確認も行った。

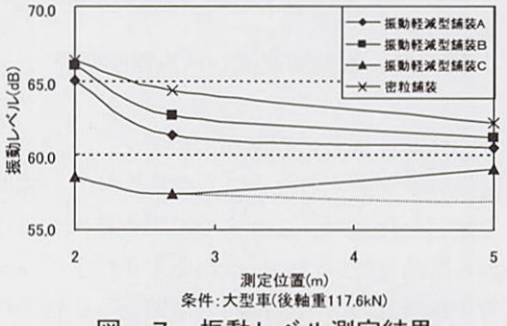


図－6 振動測定位置

3．2 実験結果

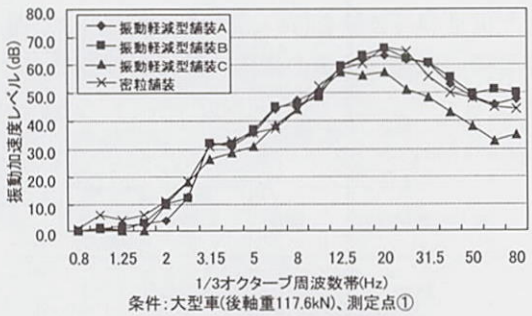
3．2．1 振動測定結果

大型車(後軸重 117.6kN)が走行した時の振動測定結果の一部を図－7 に、図－7 と同条件で測定点①における各振動レベルの周波数分析結果を図－8 に示す。なお振動測定結果は振動レベルピーク値を用いた[2)]。図－7 より、今回使用した振動軽減型舗装は密粒舗装に比べて、2dB 程度の振動軽減効果があることが確認された。また測定点①から測定点②にかけての振動軽減効果は、密粒舗装に比べて振動軽減型舗装 A・B が大きいことがわかる。これは舗装体自体の振動を軽減する性能が高いだけでなく、外部に伝搬する振動を軽減する性能も高いことを示している。なお舗装体自体で振動をかなり軽減する振動軽減型舗装 C の測定点③において、測定点①・②より大きな値が出たのは手前の工区の影響を受けたためと考えられる。また図－8 の結果より、各舗装は 20Hz で周波数が卓越していることがわかる。本来、車軸はバネ下の固有振動数として 15～20Hz で主に振動していると言われている。そのため車軸振動が主に影響していると考えられた。さらに密粒舗装に比べて、各振動軽減型舗装は 20～25Hz で振動加速



図－7 振動レベル測定結果

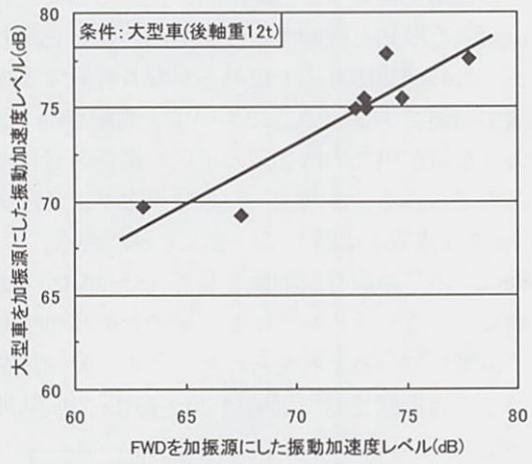
度レベルが軽減していることから、この周波数帯域で評価することが適当であると考えられた。



図－８　周波数分析結果

３．２　加振源に関する検討

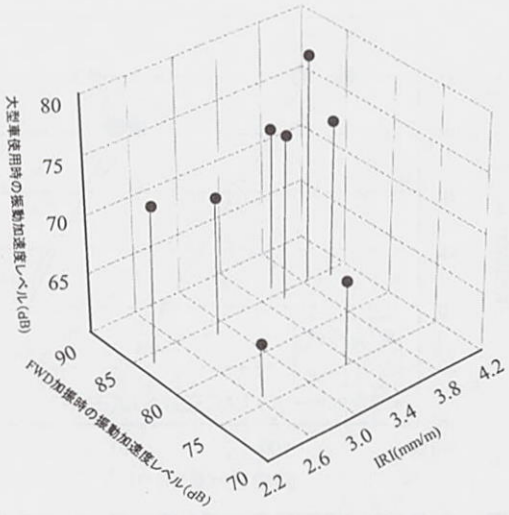
FWD 加振源の振動加速度レベルと、実走行を想定した大型車加振時の振動加速度レベルの２つの振動加速度レベルの関係について検討を行った。図－9 に FWD を加振源にした振動加速度レベル(dB)と大型車を加振源にした振動加速度レベル(dB)の関係を示す。なお、データは全て測定点①のもので、促進載荷試験の前後両方含む。この図－9 より R^2=0.88 程度の相関関係があることが確認できた。この結果、材料特性の定量的データを表す FWD 加振源時の振動レベルが実道における交通振動を予測するための変数として有効であると考えられた。



図－９　振動加速度レベル相関関係

３．３　路面性状との相関について

交通振動の予測をするために、路面性状との相関について検討を行った。これまでの調査結果および文献等から振動発生については路面平坦性と関係が深いと考えられたので、今検討では路面平坦性の指標の一つである国際ラフネス指数(IRI：International Roughness Index)を変数とした。図－10 に IRI(mm/m)、FWD を加振源とした際の振動加速度レベル(dB)、大型車を加振源とした際の振動加速度レベル(dB)の関係を示す。この結果、路面平坦性とほぼ等しい衝撃荷重(FWD を加振源)で得られる振動加速度レベルおよび大型車を加振源とした振動加速度レベルで相関関係があり、路面平坦性は交通振動を予測するための変数として有効であると考えられた。



図－１０　振動加速度レベルと路面性状値との相関関係

３．４　低振動舗装評価法のまとめ

本検討における振動測定結果から、舗装による振動の距離減衰効果および振動加速度レベルと路面性状値との相関関係が明らかになってきた。また振動評価を行う際、周波数帯域 20～25Hz で行うことが適当であると考えられた。しかし、現段階ではデータ数が少ないこともあり、振動予測に利用できる振動レベルと路面性状との相関式が確立されるまでに至っていない。今後データ数を増やすとともに、他の変数として路面温度や弾性係数を加えて検討していく必要がある。

参考文献

1) 戸倉、酒井：低騒音舗装の維持清掃方法について、第 24 回日本道路会議一般論文集、2001.10
2) 徳永, 前川, 西村, 日野：道路交通振動の実態に即した評価のあり方に関する考察, 土木学会論文集, No.615 Ⅶ-10, 1999.2

6.5　既設トンネルの補修・補強技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定、道路整備勘定）
研究期間：平 12～平 16
担当チーム：基礎道路技術研究グループ（トンネル）
研究担当者：真下英人、石村利明、蒲田浩久
森本 智

【要旨】
トンネル変状発生メカニズム関する研究に対しては、天端に圧ざが発生した変状事例を用いて、数値解析による土圧算定を試みた。その結果、解析対象としたトンネルには 9～20m程度の高さに相当する土荷重がトンネル肩部に斜め方向から作用していることが推定できた。補修工に関する研究に対しては、代表的なトンネルはく落工に対して押抜き載荷試験を実施し、耐荷特性を調べた。その結果、各定着方式の構造的特徴とその留意点が確認できた。補強工に関する研究に対しては、実大規模のトンネル覆工の載荷実験により、内面補強工（鉄板接着工、ライナープレート工）の補強効果を調べた。その結果、コンクリートの圧縮破壊で決まるような荷重形態では、従来の内面補強工では耐荷力を向上させる効果があまり期待できない場合があることが明らかになった。
キーワード：トンネル、変状、補修、補強、載荷試験、数値解析

1．はじめに

公共投資財源が制約される中で、増大する老朽化したトンネルの効率的な維持管理を進めるために、変状が発生しているトンネルに対して適切な補修・補強を行うための技術開発が求められている。

トンネル覆工の変状の発生原因は、大きくは過大な土圧の作用とコンクリート覆工の材質劣化に大別され、変状対策として用いられる補修・補強工の適用性や効果も発生原因によって異なる。このため、本研究では、土圧の作用によるトンネル覆工の変状発生メカニズムを解明するとともに、変状発生原因に応じた各種補修・補強工の効果を確認し、合理的な補修・補強工の設計手法の提案を行う。

本年度は、①変状発生メカニズムについて、これまでの変状事例を用いて、数値解析により土圧の大きさ・作用方向の算定を試みた。②補修工について、代表的なトンネルはく落工に対して押抜き載荷試験を実施し、耐荷力を比較するとともに各種定着方式の特徴を調べた。③補強工について、実大規模のトンネル覆工の載荷実験により、内面補強工（鉄板接着工、ライナープレート工）の補強効果を調べた。

2．研究方法

2.1　変状発生メカニズムに関する研究

既往の変状事例から、トンネル天端に圧ざが発生したトンネルを対象に、ひび割れ進展を考慮できる有限要素解析を用い、変状状態と比較することで外力の推定を試みた。

2.2　補修工に関する研究

トンネル覆工からコンクリート片がはく落する場合を想定して図-1 に示す装置を用いて、コンクリートスラブの下面に対策工を取り付けて押抜き載荷試験を行う。1500×1500×150mm のコンクリートスラブの中央部に円孔（φ500mm）を設け、その中にコンクリート製の圧子を挿入し（隙間 5mm）、強制変位を与えた。実験を行ったはく落対策工は、ボルトによる定着方式として当板工（L 形鋼）、接着剤による定着方式として連続繊維シート工およびひび割れ注入工である。図-2 に各対策工の配置図を、表-1 にその仕様を示す。当板工のボルトは金属式拡張アンカーを用い、L 形鋼 1 本当たり 2 箇所で固定し、鋼材交点はずれを防止するためボルトでコンクリート圧子と一体化した。ひび割れ注入工はコンクリート圧子と供試体の隙間 5mm をエポキシ樹脂で充填した。また、連続繊維シート工は、これまでのトンネル覆工補修の実績から最も厚いと考えられる高強度炭素繊維 300g/m^2 を 2 方向および 200g/m^2 を 2 方向とした。載荷方式は変位制御で 0.25mm/min で増加させた。

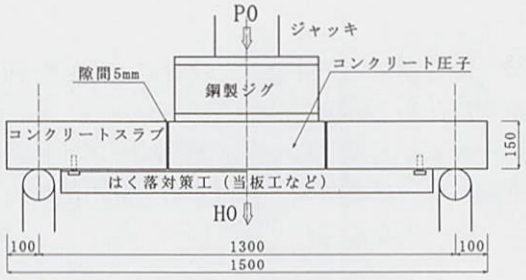
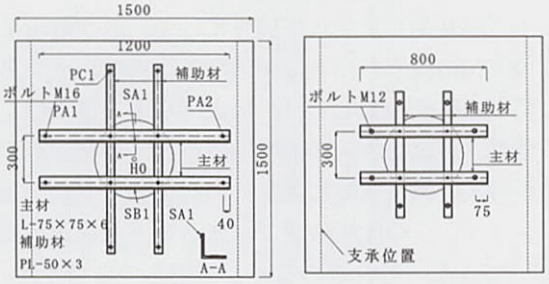
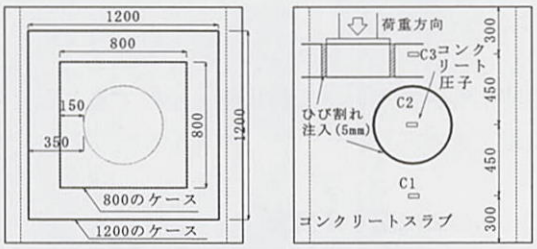


図-1　載荷装置概要



(a) L形鋼（L=1200）　(b) L形鋼（L=800）



(c) 連続繊維シート（L=1200、800）　(d) ひび割れ注入工

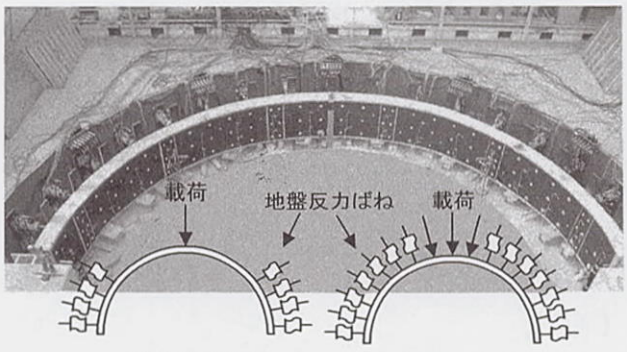
図-2　対策工配置図

表-1　対策工の仕様

No	対策工	材料	コンクリート圧縮強度 (N/mm²)
1	当板工(L形鋼)	L75×75×6(SS400)-1200	17.8
2	当板工(L形鋼)	L75×75×6(SS400)-800	13.6
3	連続繊維シート工	高強度繊維目付300g/m²-1200	15.7
4	連続繊維シート工	高強度繊維目付300g/m²-800	15.7
5	連続繊維シート工	高強度繊維目付200g/m²-1200	17.8
6	ひび割れ注入工	ひび割れ注入用エポキシ樹脂	15.5

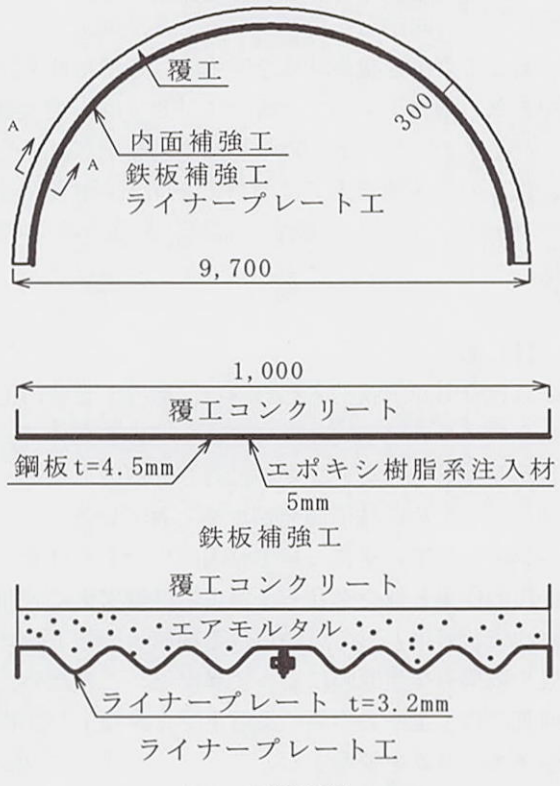
2.3　補強工に関する研究

一度載荷して損傷（ひび割れ）を与えた覆工に補強対策工を取り付け、再度載荷を行い対策工の効果を確認する実験を行った。図-3に載荷実験装置を示す。コンクリート覆工は外径9700mm・厚さ300mmである。なお、写真は内側に鉄板接着工を取り付けたケースである。実験手順は、図中の載荷形式1で健全な覆工を破壊まで載荷して、損傷のある供試体を作成する（一次載荷）。その後、一旦、除荷し、無対策のままおよび対策工を施工して図中の載荷形式2に変更して載荷実験を再開する（二次載荷）。載荷位置以外のジャッキはバルブを閉めることでバネとして働かせた。なお、載荷形式1は、空洞等があり



(a) 載荷形式1　(b) 載荷形式2

図-3　覆工載荷装置と載荷形式



A－A断面図

図-4　内面補強工詳細図

表-2　実験ケース

No	供試体状態	対策工	載荷形式
1	健全	無し	2
2	損傷あり	無し	1→2
3	損傷あり	ライナープレート工	1→2
4	損傷あり	鉄板補強工	1→2

背面拘束の小さい状態で覆工にゆるみ荷重が作用した場合を想定した荷重形態である。一方、載荷形式2は、背面拘束が高い状態で（通常、補強後は背面空洞注入を行うため背面拘束は高くなると考えられる）、覆工にゆるみ荷重が作用したことを想定した荷重形態である。実験ケースを表-2に示すが、No.1は、比較のため、損傷を与えずに健全な状態で載荷形式2で載荷するケースである。No.2は、載荷形式1で

損傷を与えた覆工供試体を無対策のまま載荷形式 2 で載荷するケースである。No.3,No.4 は、対策工として引張補強材（ライナープレート工、鉄板補強工）を内面側に取り付けたケースである。内面補強工の詳細を図－4 に示す。なお、鉄板補強工については、トンネル覆工内側に発生しているひび割れに対しては、その工法の特徴からひび割れにエポキシ樹脂系注入材を完全注入した。

3．研究結果

3.1　変状発生メカニズムに関する研究結果

(1)対象トンネルの概要

対象としたトンネルは、幅 D=約 10m の完成後 30 年以上経過し、ひび割れなどの変状が著しいトンネルである。図-5 に変状および周辺地質状況を示す。変状については、両肩部には背面まで貫通したひび割れ（改築時に確認）が、中央部には圧ざが発生している。また、天井板の吊金具にも変形が見られる。これらの変状および建設当時との比較などから総合

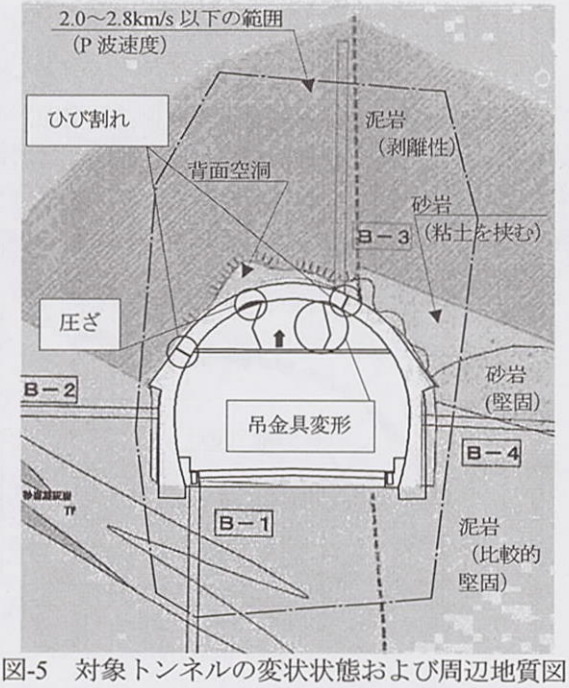
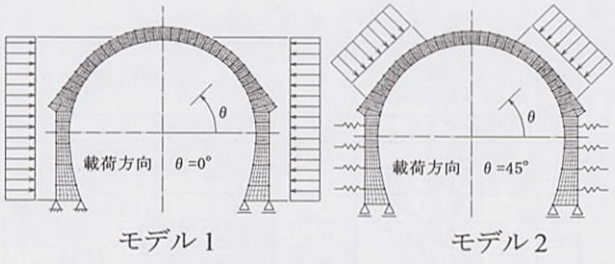


図-5　対象トンネルの変状状態および周辺地質図



モデル 1　　モデル 2

図-6　解析モデル図

的に判断すると、トンネル変形モードは水平内空変位が縮小して、天端部は上方に突き上げられたモードになっていると判断できる。トンネル周辺の地質状況については、ボーリング調査および改築時の観察より、天端部に背面空洞があり、上部は泥岩（頁岩）が主体で、剥離性が強く 1～5ｃｍ間隔で壊れやすい状態であることが、側壁部は亀裂発達の少ない塊状岩盤であることが分かっている。この傾向は、ボーリング位置での速度検層からも確認できＰ波速度 3km/sec 以下の領域が側方はほとんどなく、上方に 1Ｄ、下方に 0.5D 程度広がっている。

(2)　解析モデル

大きなひび割れ、圧ざが発生しているため、ひび割れ進展が考慮できる二次元有限要素法（解析コード:ATENA）を用いて作用外力の推定を行った。解析モデルとしては、①天端に背面空洞がある状態で側壁部から外力を作用させる解析モデル 1 ②側壁部は背面空洞は無く新鮮な岩盤であるため、地盤バネ（圧縮には効くが引張には効かない）を配置し、さらに、アーチ部上部にゆるみ層が確認されているため、これを外力として空洞範囲を除く部分に作用させた解析モデル 2 を考えた。各モデルを図-6 に示す。なお、解析モデル 2 では、土圧の作用方向 θ により変状、最大土圧等が変わるかを確認するため θ =45° と 75° のケースについて計算を行った。また、地盤バネ値は、孔内水平載荷試験より求められた変形係数 E_0=4.4E+6 kN/m^2 を用いて、「トンネル標準示方書[開削工法編]・同解説」　に定められている以下の式から求めた値とした。

$$k_h = \frac{1}{0.3} \times \alpha \times E_0 \times \left(\frac{B_h}{0.3}\right)^{-\frac{3}{4}} = 4.3kN/m^3$$

k_h : 水平地盤反係数　(kN/m^3)

α : 変形係数算定方法による補正係数＝4

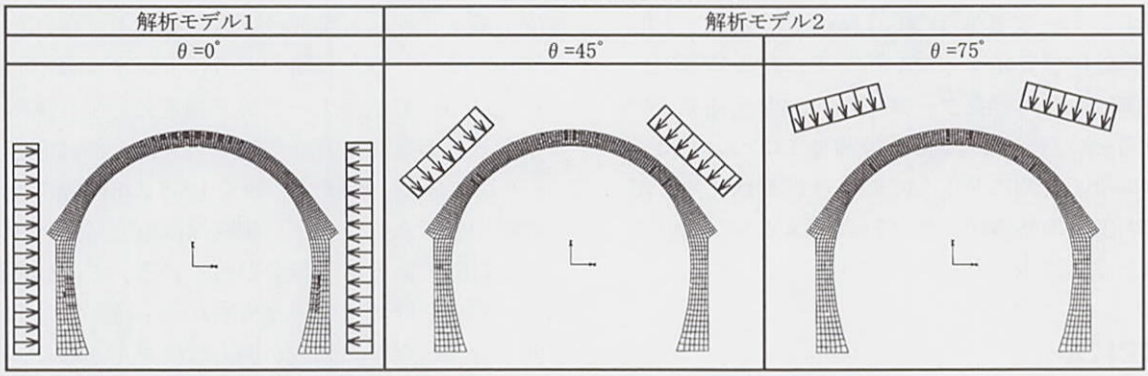
E_0 : 地盤の変形係数　(kN/m^2)

B_h : トンネル高さ　(=10m)

(3)　解析結果

表-3 に各解析のひび割れ発生状況を示す。解析モデル 1 では、ひび割れが側壁部内側と天端部外側に入るモードとなったのに対して、解析モデル 2 では土圧の作用方向が 45° の場合も 75° の場合も、両肩部内側および天端部外側に入るモードとなった。なお、どちらのモデルとも天端に発生するひび割れ位置反対側の覆工内側の圧縮ひずみが増大して、最

表-3　ひび割れ発生状況一覧



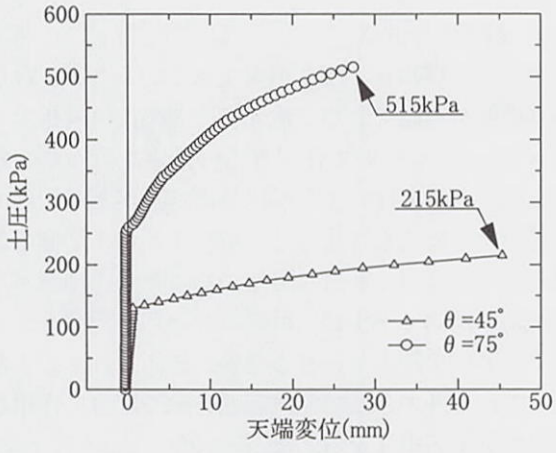


図-7　荷重変位曲線

終的には圧ざに至った。解析モデルのひび割れ発生位置と今回のひび割れ発生位置を比較すると解析モデル2の方が近い結果となっていることが分かる。つまり、今回の変状を説明するためには、解析モデル1のように側壁部からではなく、解析モデル2のようにアーチ部に土圧が作用したと考えるのが妥当であると言える。次に、作用土圧を見てみる。図-7は解析モデル2で土圧の作用方向が45°と75°の場合の天端変位と土圧の関係を示したもので、天端部内側には圧ざが確認されていることより天端部内側のひずみが3000μになるまで解析した結果である。なお、45°のケースで約130kPa、75°のケースで約250kPaで、両肩部内側にひび割れが入り、両ケースともその後ただちに、天端外側にひび割れが入る。そして、それ以降は図に見られるように天端変位が急激に増加した。この図より、内側に圧ざが発生したと考えられる土圧は、45°の場合215kPa、75°の場合515kPaと推定され、単位体積重量γt=25kN/m^{3}とすると、それぞれ高さ約9m、高さ約20m程度の土荷重に相当する。なお、45°の場合はP波速度3km/sec以下の領域と同程度の高さであった。

3.2　補修工に関する研究結果

図-8に全実験結果の載荷荷重P0と中央部の変位H0の関係を示す。また、表-4に各対策工の最大荷重とその破壊形態について示す。今回の実験条件では、L形鋼（1200）の耐荷力（最大荷重）が最大であり、連続繊維シート工の耐荷力がそれに比べ低い値であった。次に、各対策工別の実験結果について述べる。

(1)　当板工（L形鋼）

図-9にL形鋼(1200)の載荷荷重、ボルト荷重－変位および載荷荷重－鋼材のひずみ（図-2(a)参照）の結果を示す。荷重の増加とともに変位H0、主材のひずみ（SA1,SB1）は単調に増加し、さらに、主材を固定しているボルトの軸力PA1,PA2とも載荷荷重

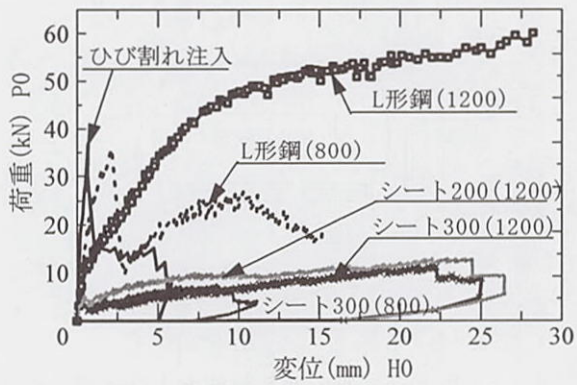


図-8　荷重－変位曲線（全ケース）

表-4　最大荷重と破壊モード

No	対策工 （ ）内は定着長	最大荷重 (kN)	破壊形態
1	L型鋼(1200)	60.1	鋼材の降伏
2	L型鋼(800)	35.8	コンクリートスラブ曲げ破壊
3	シート300(1200)	11.4	端部まで達する剥離破壊
4	シート300(800)	7.3	端部まで達する剥離破壊
5	シート200(1200)	12.9	端部まで達する剥離破壊
6	ひび割れ注入	36.9	コンクリートスラブ曲げ破壊

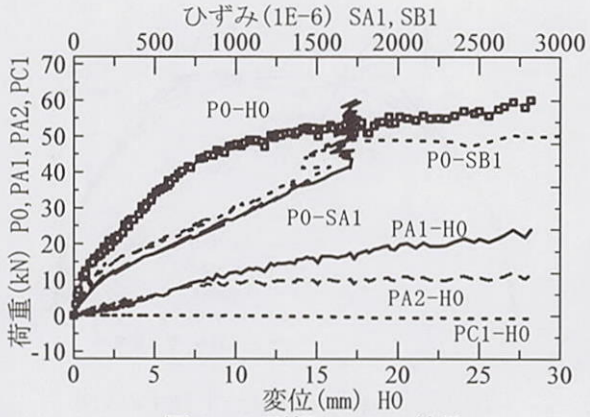


図-9　L形鋼(1200)の結果

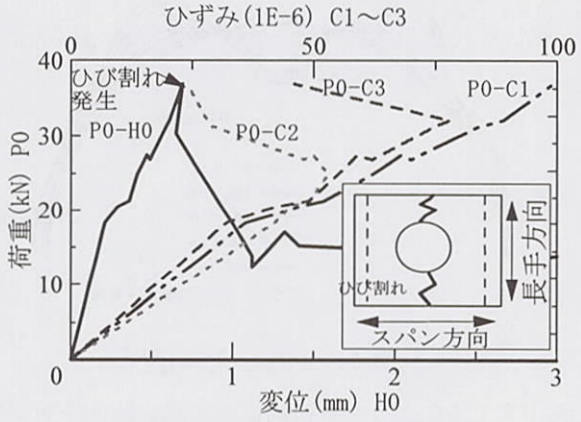


図-10　ひび割れ注入工の結果

P0 の 1/4 程度であり、補助材ボルト PC1 には軸力が発生していないことより、外力に対して主材の曲げ剛性で受けもっていると言える。荷重が 50kN 程度になると、変位 H0 は急激に増加し、それと同時に鋼材の中央部のひずみ(SA1、SB1)にも変化が現れた。SA1 はそれ以上増加しないが、SB1 が急激に増加し降伏していることが分かる。またこの荷重になると、主材のボルト軸力 PA1,PA2 にも変化が現れ、非対称となり PA1 に荷重が集中する状態となった。目視観察からも PA1 のボルト周辺のコンクリートに亀裂が入り出すなど、急激に不安定化した。一方、定着長の短い L 形鋼(800)の場合は、L 形鋼(1200)と同様にボルトを通して軸力が周辺コンクリートスラブに伝達されるが、スパンが短いため L 形鋼材の応力はあまり増加せず、ボルト位置がスラブ中央付近のためコンクリートスラブに変形が加わり、コンクリートスラブの曲げ破壊で最大荷重が決まった。以上のように L 形鋼は、ボルト取付位置を広く取る場合は、最大荷重は L 形鋼の耐荷力で決まり、周辺部材にあまり応力を発生させない。しかし、取付位置が狭い場合は、周辺部材に大きな応力を発生させ、最大荷重は周辺部材の耐荷力で決まるため、周辺部材の耐荷力を別途検討する必要がある。

(2)　連続繊維シート工

定着長の違いについては、図-8 のシート 300g/m^2 の定着長 1200 と 800 の比較から、定着長が長い方が最大荷重は大きくなるとの既往の研究成果 [1]と同じであった。定着長が短い場合も、長い場合の荷重—変位曲線と重なっており、定着長が短い分だけ早く剥離し、低い最大荷重となった。しかし、剛性の違いについては、図-8 の 300g/m^2 と 200g/m^2 の結果から、300g/m^2 の方がシート剛性が高いにも関わらず、最大荷重は低い結果となった。これはコンクリート表面強度の違いも影響したと考えられるが、シートの曲げ剛性の影響もあるのではないかと考えられる。

(3)　ひび割れ注入工

図-10 に、ひび割れ注入工の載荷荷重－変位および載荷荷重－スパン方向のコンクリートひずみ（図-2(d)参照）の結果を示す。載荷荷重 18kN 程度までは載荷位置直下のひずみ C2 が若干ではあるが最も大きく一体的な挙動である。しかし、20kN 程度になると中央部より周辺部のひずみ C1,C3 の方が増加勾配、値が大きくなることが分かる。さらに、最大荷重時（L 形鋼(800)と同程度）のひび割れ位置も図-5 に示すように中央部のコンクリート圧子にではなく、周辺のコンクリートスラブのみに入るため、最大荷重は周辺コンクリートスラブの曲げ破壊で決まったと考えられる。これらから、載荷に対してひび割れ注入したコンクリートでは、一体化した均一なコンクリートスラブの場合の挙動と異なり、健全な周辺のコンクリートスラブ側に大きな応力が発生する場合があると考えられる。

(4)　まとめ

ボルトによる定着方法の L 形鋼では、ボルト取付位置により最大荷重は異なり、取付位置が広い場合は対策工の耐荷力で決まるが、取付位置が狭い場合は周辺部材の耐荷力で決まる。接着剤による定着方式では、ひび割れ注入工は注入部での押抜きせん断破壊は起こらなかったが、周辺部材と完全に一体化したとは言えない挙動を示す場合があることが分かった。

3.3　補強工に関する研究結果

対策工を設置するための損傷を与えた覆工供試体を作るため、載荷形式１により健全な覆工を載荷し

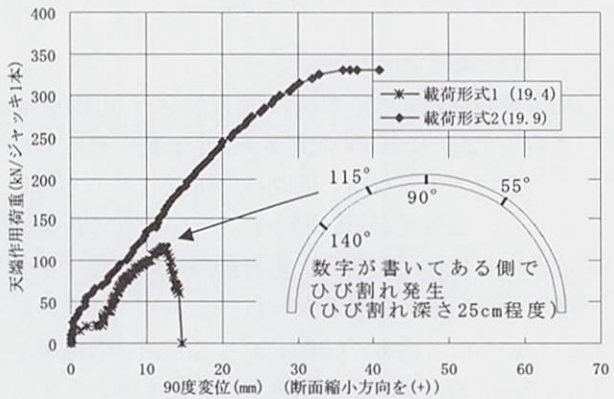


図-11　荷重変位曲線（一次載荷）

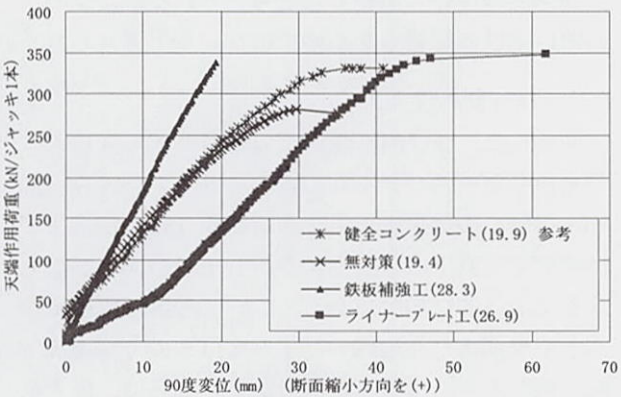


図-12　荷重変位曲線（二次載荷）

た（一次載荷）。図-11 にケース（No.2）の一時載荷時の荷重変位曲線（ジャッキ１本当たりの荷重と覆工内側 90° の変位）を示す。なお、図中に最大荷重時のひび割れの位置を示すが、各ひび割れ深さは 25cm 程度と深く、ひずみの値からも、圧縮破壊ではなく、複数箇所のひび割れの進展により構造全体が不安定化し最大荷重に至ったと考えられる。一方、同図に載荷形式２により健全な覆工を載荷したケース（No.1）の結果を示すが、載荷形式１より最大荷重は大きく、最終的には肩部（70,115 度）の覆工内側の圧縮破壊で最大荷重が決まった。

図-12 に載荷形式１で破壊した覆工供試体に対策工を取付け、載荷形式２で載荷（二次載荷）をした場合の荷重変位曲線を示す。なお、図中の凡例の中の括弧内の数値は、覆工の圧縮強度（N/mm^2）を示す。無対策では、225kN程度までは健全なコンクリートのケース（No.1）とほぼ同様な勾配となっており、最大荷重についても、若干低いもののそれほど大きな違いではない結果となった。つまり、曲げが卓越して複数の大きなひび割れ（ひび割れ深さ 25cm 程度）が進展して耐荷力が無くなった覆工でも、背

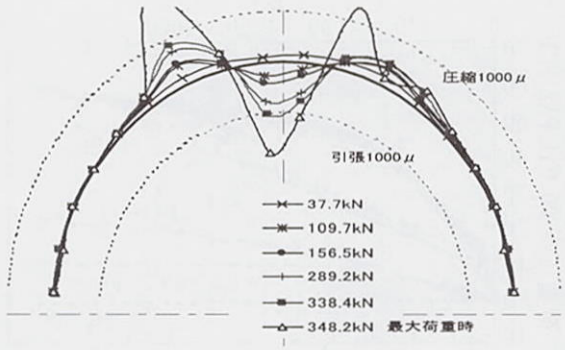


図-13　ライナープレートひずみ分布

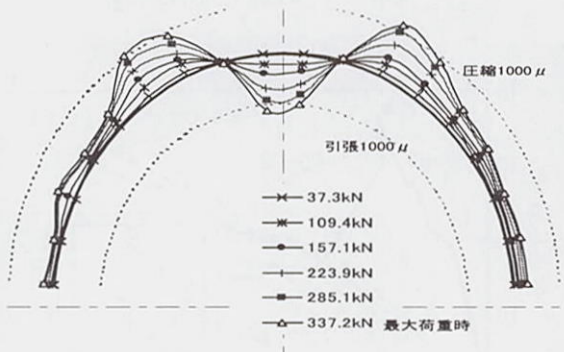


図-14　鉄板ひずみ分布

面注入工後のような背面拘束度が高い状態を想定した載荷形式になると、覆工体に軸力が導入され、耐荷力は大きく向上することが期待できると言える。

次に、各内面補強工の結果について見てみる。ライナープレート工の荷重変位曲線は、初期には無対策に比べ勾配が小さいが、50kN 程度からはほぼ同じような勾配となっている。なお、70kN 程度から、ライナープレートと覆工コンクリート間に充填されたエアモルタル部に円周方向のせん断クラックが入った。図-13 にライナープレートの円周方向のひずみ分布を示すが、天端部から肩部にかけては応力が発生しているものの、肩部から急激に小さくなり、ライナープレートと覆工が一体化して脚部まで力を十分に伝達したとは言えない結果であった。また、最終的にも覆工肩部 65 度付近でコンクリートの内側の圧縮破壊を起こし、同じくコンクリートの内側の圧縮破壊で決まった無対策より若干高い程度の最大荷重で終了した。一方、鉄板補強工の荷重変位曲線は、無対策、ライナープレート工に比べて勾配は大きく、図-14 の鉄板のひずみ分布からも脚部までひずみが連続的に発生していることが分かる。特に、肩部から脚部にかけて圧縮力も発生しており、補強することにより、全体の剛性は高くなり、覆工と鉄板が一体化して外力に抵抗していると考えられる。しかし

ながら、ライナープレート工の最大荷重とあまり変わらない荷重（天端の鉄板のひずみが引張1000μ程度）で、大きな音とともに天端部でコンクリートと鉄板の剥離（コンクリート表面）を起こしたため、この時点で載荷は終了した。したがって最大荷重までは至っていないが、鉄板の剥離後は、覆工自体で外力に抵抗するため、無対策の結果から判断するとこれ以上耐荷力の向上は期待できないものと考えられる。ただし、鉄板の剥離が発生しないように天端の応力集中箇所でボルトの取付けなどを行った場合は最大荷重が増加する可能性はあると考えられる。

以上をまとめると、曲げが卓越して一度損傷を受けた覆工でも、周辺の拘束度を高めることで軸力が導入されると耐荷力が向上する場合がある。また、コンクリートの圧縮破壊で耐荷力が決まるような荷重形態での引張補強材による内面補強工の補強効果に関しては、ライナープレート工は、コンクリートの圧縮破壊で耐荷力が決まり、補強効果はあまり期待出来ない結果となった。また、鉄板補強工では、ライナープレート工と異なり、覆工と一体となって挙動し、圧縮力の伝達も可能なものの、コンクリート表面での鉄板との剥離が発生し、最終的な耐荷力は、無対策やライナープレート工と変わらない結果となった。

4．まとめ

本研究は、土圧の作用によるトンネル覆工の変状発生メカニズムを解明するとともに、変状発生原因に応じた各種補修・補強工の効果を確認し、合理的な補修･補強工の設計手法の提案を行うものである。

本年度は、①変状発生メカニズムについては、天端に圧ざが発生した変状事例を用いて、数値解析による土圧の算定を試みた。その結果、ひび割れ進展を考慮できる有限要素法によりひび割れ発生パターンは概ね再現することが可能で、解析対象としたトンネルには9～20m程度の高さに相当する土荷重がトンネル肩部に斜め方向から作用したことが推定できた。②補修工については、代表的なトンネルはく落工に対して押抜き載荷試験を実施し、耐荷特性を調べた。その結果、L型鋼をボルトにより定着させる工法では、ボルト取付位置により最大荷重（耐荷力）は異なり、取付位置が広い場合は、L型鋼の耐荷力で、狭い場合は周辺部材の耐荷力で決まることが明らかとなった。また、接着剤による定着方式では、ひび割れ注入工は周辺部材と完全に一体化したとは言えない挙動を示すことが明らかとなった。③補強工については、実大規模のトンネル覆工の載荷実験により、内面補強工の補強効果を調べた。その結果、コンクリートの圧縮破壊を起こすような荷重形態に対しては、引張補強材による内面補強工では耐荷力の向上があまり期待できない場合があることが明らかとなった。

今後は、変状発生メカニズムについては、変状事例を増やして検討を加えるとともに、補修・補強工については、他の対策工についての載荷試験を実施し、対策工の耐荷力が評価できる解析手法の検討を行う予定である。

参考文献

1）呉他：連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的･解析的研究　土木学会論文集　No662/V-49　2000/11　P45～58

6.6　コンクリート構造物の維持管理計画に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）
研究期間：平12～平15
担当チーム：技術推進本部（構造物マネジメント技術）
研究担当者：河野広隆，渡辺博志，田中良樹，古賀裕久

【要旨】
本研究では，コンクリート構造物の耐久性を検討する上で特に問題となる鉄筋の腐食度について，非破壊検査を活用して評価する方法やその結果の記録方法を検討している。また，各種非破壊検査の結果等を活用して構造物群の維持管理計画を策定する手法等について検討している。平成13年度は，非破壊検査等を用いて既存の構造物の健全度診断を実施したこれまでのデータを分析し，特に自然電位法による鉄筋腐食度の評価について検討した。また，反発度法によるコンクリートの品質調査について実験を行うなどして検討した。
キーワード：自然電位法，テストハンマー，非破壊検査，コンクリート，維持管理

1．はじめに

社会資本ストックを長期間にわたって利活用していくためには，構造物の劣化の有無やその進行状況を正確に把握し，適切な時期に適切な補修・補強をすることが必要であり，このため土木構造物の維持管理手法の体系化が求められている。特に，鉄筋コンクリート構造物の維持管理では，コンクリート中にある鋼材の腐食の有無やその程度を知ることが重要である。

コンクリート構造物の劣化については，従来は，定期点検時等に外観調査から，劣化の発生や進行が明らかになることが多かった。しかし，外観調査から発見できる程度まで劣化が進行した構造物では，補修を行うことが困難であったり，費用が多くかかってしまう割には効果がない事例もあった。今後，維持管理を必要とする構造物が増大することを考慮すると，外観上劣化が認められない構造物についても，非破壊検査等を活用し，劣化を早期発見したり，今後の劣化可能性を把握して，適切な時期に適切な補修が行われるような維持管理の計画を立てることが重要と考えられる。

現状でも，特に劣化が著しい構造物に対して，各種の非破壊検査を用いた健全度診断が行われる場合がある。しかし，これまでの適用事例が少ないことから，より詳細な調査（部分的な鉄筋のはつり出し等）を実施する前の予備的な試験と位置づけられることが多い。また，各種構造物の管理者が実施した健全度診断の結果については，必ずしも十分には公表されていない場合もあり，実構造物における適用事例が十分に収集・整理されているとは言えないのが現状である。

そこで，平成12年度には，撤去解体される構造物を対象に非破壊検査を用いた健全度診断を実施し，実構造物における適用事例の蓄積を行ってきた。得られた測定データ等は，土木研究所資料[1]および共同研究報告書[2]としてとりまとめた。

平成13年度はこれらの適用事例やこれまでの適用事例をもとに，特に自然電位法を用いた鉄筋腐食度の推定方法について検討した。また，かぶりコンクリートの品質測定方法として，反発度法によるコンクリートの品質調査について実験を行って検討した。

2．自然電位法による鉄筋腐食度の推定

2.1　検討の概要

電気化学的な手法を用いて，コンクリート中の鉄筋の腐食状態を推定する方法としては自然電位法や分極抵抗法があるが，測定の容易さなどから，自然電位法の方が使用実績が多い。自然電位法は，鉄筋の自然電位を測定することで，鉄筋が腐食しうる（イオン化しうる）環境になっているか否かを調べ，その結果から腐食の有無を判定する方法である。

自然電位の測定方法については，2000年に新たに作成された土木学会規準が示されたが，測定方法の詳細や測定装置については測定者によって様々であり，これらの違いが測定結果に与える影響については明確ではない。そこで，本研究では，自然電位の測定方法や測定装置が測定結果に与える影響を検討し，必要に応じてより詳細な測定方法を示すこと，および自然電位の測定結果と実際の腐食状況の関係について明らかにすることを目標に検討している。

2.2　実構造物における測定結果

測定者や測定装置が異なる４つの方法（表－１）で，実構造物の自然電位を測定した結果を整理した結果を表－２に示す。

かぶりが厚く，腐食の進行がほとんど認められない

K橋橋脚での測定結果では，ほとんどの測定結果が腐食がないと考えられる領域にあり，自然電位から推定される腐食状況が実構造物の状況と合致している。しかし，部分的ではあるが明確に塩害による鉄筋の腐食が生じているL橋主桁での自然電位測定結果は，大部分が腐食が生じているかどうか不確定の領域にあり，自然電位の測定だけでは，鉄筋の腐食の開始を明確にできない結果であった。

測定者A，Bの測定結果は，測定者C，Dの測定結果に比べ，測定値の幅が広い。これは，測定者C，Dが筒型の電極を用いて測定範囲の中の限られた点で測定を行っているのに対し，測定者A，Bは回転型（ローラー型）の電極を用いて，面的に測定を行っており，測定点が多いためであると考えられる。ただし，測定者C，Dが用いた装置では，同時に鉄筋の分極抵抗やコンクリートの電気抵抗も測定することができるので，測定点の多少のみで測定装置や測定方法の良否を論じることはできない。

同一の調査箇所を測定した結果を測定者ごとに比較すると，測定者によって自然電位の測定結果が大きく異なっている場合もあった。この原因については明かではないが，測定装置そのものの差異や，測定面の調整方法（コンクリート表面への吸水方法など）の差異，また補正電位の取り扱いの差異などが考えられ

表－1　調査に使用した測定装置

測定者	照合電極／形状	測定点数
A	鉛電極／回転型	5cm四方を単位とし，面的に測定
B	飽和硫酸銅電極／回転型	10cm四方を単位とし，面的に測定
C	飽和カロメル電極／筒型	鉄筋（主鉄筋と配力筋など）が交差している箇所で測定
D	飽和塩化銀電極または 飽和硫酸銅電極／筒型	調査範囲内を適宜分割し，各々20cm程度の間隔をもつ点で測定

※この他，測定前に行うコンクリート表面への吸水操作などが，測定者によって若干異なる。

表－2　自然電位測定結果

測定個所	測定者	測定結果の範囲（CSE基準に換算，mV） -500　-400　-300　-200　-100　0	鉄筋の腐食状況（はつり調査による）	備考
K橋橋脚北側	A		建設当初からのものと考えられるごく表面的な腐食	かぶりが厚い（最小145mm）
	B			
	C			
	D			
K橋橋脚南側	A	測定せず	建設当初からのものと考えられるごく表面的な腐食	かぶりが厚い（最小220mm）
	B			
	C			
	D			
L橋主桁中央部	A		塩害により孔食が生じている箇所が部分的にある	－
	B			
	C			
	D			
L橋主桁桁端部	A		塩害のため孔食や表面錆を生じている箇所が，全体の1/3程度ある。	－
	B			
	C			
	D			
自然電位と腐食度との関係		90%以上の確率で腐食あり　不確定　90%以上の確率で腐食なし	ASTM C876 87による	

る。今後，これらの影響について実験等を行って検討する予定である。

3．反発度法によるコンクリートの品質の調査

3.1　検討の概要

平成13年の４月から，現場打ちコンクリートの品質を確保する観点から，国土交通省が建設する重要鉄筋コンクリート構造物（ただしプレストレストコンクリートは除く）では，竣工時に，テストハンマーを用いた反発度測定を行い，コンクリートの品質の概要を把握することとなった[3]。反発度測定の結果は，新設時のコンクリート品質の判定に用いられるとともに，今後の維持管理においても活用されることが期待される。

一方で，テストハンマーを用いたコンクリートの品質の推定結果（主に圧縮強度の推定結果）は，誤差が大きいことも知られている[4]。また，現場での測定結果でも，測定者によって反発度の測定結果が大きく異なる場合があった[5]。そこで，13年度は，反発度の測定誤差について実験を行って検討した。ここでは，測定装置の個体差に関する調査結果を紹介する。

3.2　測定装置の個体差に関する調査結果

反発度の測定方法については土木学会規準[7]等で定められているものの，測定装置であるテストハンマーの仕様やその整備方法等については，必ずしも詳細には定められていない。そこで，国内に流通するテストハンマー41機を収集し，その性能の比較を行った。

収集したテストハンマーの製造年，整備状態等を表－３に示す。また，テストハンマーの検定用に製造されているテストアンビルa80（反発度80）を打撃した場合の測定結果と，モルタル供試体（工場製品，300㎜×300㎜×61㎜の平板）を打撃した場合の結果を比較して図－１に示す。

アンビルa80を用いた検定では，これを打撃した結果78～82の反発度が得られる場合は，ハンマーの整備状態が適切であると判断される。今回，収集したテストハンマー41機のうち24機では，反発度の測定結果が78～82の範囲に入ったが，16機は78を下回り，１機は82をわずかに上回る結果であった。反発度が78を下回っているものは，多数回使用したにもかかわらず，内部の清掃等の整備が行われていないものと考えられる。また，今回収集したハンマーは，必ずしも日常的に業務に用いられてものではないので，長期間の保管による影響を受けていることも考えられる。

図－１からは，アンビルa80を打撃した際に得られ

表－３　性能を比較調査したテストハンマー

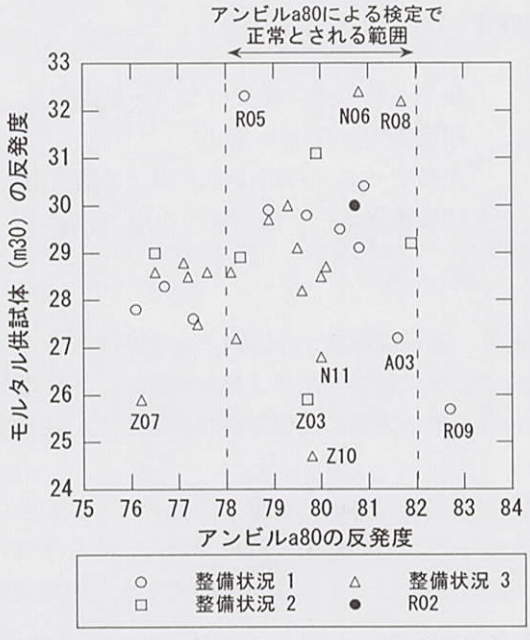
記号	製造者	整備状況	整備者	製造年	測定結果	
					a80	m30
A01	A	1	F	2001	80.4	29.5
A02	B	1	B	2000	80.8	29.1
A03	C	1	C	2001	81.6	27.2
A04	E	1	E	2001	76.1	27.8
N01	A	3	－	1965～70	77.1	28.8
N02	A	3	－	1976	66.6	20.5
N03	A	3	－	1975	71.2	26.8
N04	A	3	－	1969	78.1	28.6
N05	A	3	－	1975	67.1	23.4
N06	A	3	－	1982	80.8	32.4
N07	A	3	－	2001	80.0	28.5
N08	A	3	－	1994	77.2	28.5
N09	A	3	－	1982	77.4	27.5
N10	A	3	－	1982	78.2	27.2
N11	A	3	－	1997	80.0	26.8
N12	A	3	－	1959	73.8	27.2
N13	A	3	－	1969	76.5	28.6
N14	A	3	－	1977	68.2	26.7
N15	A	3	－	1982	72.7	27.0
N16	A	3	－	1994	78.9	29.7
R01	A	2	R	1993	79.9	31.1
R02	A	1	F	1997	80.7	30.0
R03	A	3	－	2001	79.5	29.1
R04	B	2	R	不明	78.3	28.9
R05	A	1	R	2000	78.4	32.3
R06	A	1	F	2000	79.7	29.8
R07	A	1	F	2001	76.7	28.3
R08	A	3	－	1991	81.7	32.2
R09	C	1	C	2001	82.7	25.7
Z01	A	3	－	2001	79.3	30.0
Z02	A	3	－	1992	79.6	28.2
Z03	D	2	G	1987頃	79.7	25.9
Z04	B	2	C	不明	81.9	29.2
Z05	A	3	－	1991	80.1	28.7
Z06	A	2	H	1977	76.5	29.0
Z07	B	3	－	不明	76.2	25.9
Z08	A	1	F	2001	80.9	30.4
Z09	B	3	－	不明	77.6	28.6
Z10	C	3	－	1999	79.8	24.7
Z11	A	1	F	1957	77.3	27.6
Z12	A	1	F	1954	78.9	29.9

※記号：A01～A04は，土木研究所で用意した新品の状態に近いもの。N01～N16は，レディーミクストコンクリート工場が所有するもの。R01～R09は，レンタル業を営む企業９社から賃借したもの。Z01～Z12は，その他の企業等が所有するもの。

※製造者，整備者：Aはスイス国の，Eは中華人民共和国の企業である。B～Dは，日本国内の企業である。Fは製造者Aの国内での総代理店である。GとHは，測定機器の販売や整備等を行う企業である。また，Rはレンタル事業者が自ら整備・点検を行っている場合である。

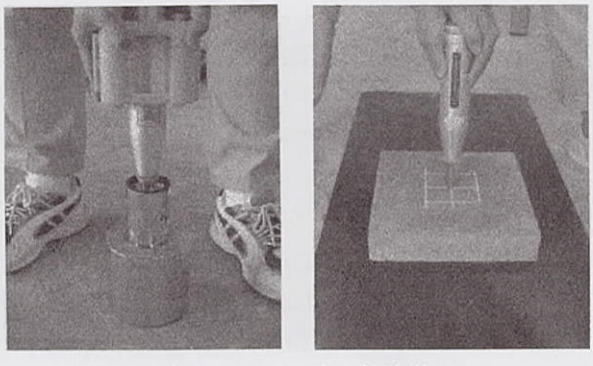
※整備状況：1は今回の試験の直前に整備・点検等が行われたことが明かなもの。2は書類等から購入後も整備・点検等が行われていることがうかがえるが，今回の試験までの間に他で使用されたことも考えられるもの。3は整備・点検等の記録がなく管理の状態が不明なもの。

※測定結果：a80は，正しく整備されたテストハンマーで打撃すると反発度80が得られるテストアンビル，m30はモルタル供試体である。



※図中には示さなかったが，アンビルa80の反発度が75を下回るテストハンマーが４機あった。
※正しく整備されたテストハンマーを使用した場合の反発度として，（財）日本品質保証機構にて整備状況が確認されたテストハンマーR02の測定値を明示した。

図－１　反発度の測定結果



写真－１　反発度の測定状況
（左：アンビルa80，右：モルタル供試体）

る反発度が小さいテストハンマーほど，モルタル供試体m30を打撃したときに得られる反発度も小さくなる傾向が見られる。しかし，一部には，アンビルa80による検定では良好な整備状態にあると判断されるにもかかわらず，モルタル供試体を打撃した場合には，他のテストハンマーと比較して大きい（N06，R05，R08），あるいは小さい（A03，N11，Z03，Z10）と反発度が測定されるハンマーもあった。この原因としては，製造者以外の者によって整備・点検がなされていること（R05，Z03）や，製造者によってテストハンマーの性能が異なることが考えられるが，明確ではない。

新設の構造物等で測定を行った場合に得られる反発度は30～40程度であることが多く，従来から用いられているアンビルa80等を用いた検定だけでは，ハンマーの性能を正しく評価できず，異なるテストハンマーを用いた測定では，測定される反発度に最大８程度の差異が生じる可能性が明らかになった。今後は，よりコンクリートに近い反発度30程度の材料でテストハンマーの性能を確認する方法等について検討を行う予定である。

４．まとめ

自然電位法についてこれまでに得られた調査結果等の整理を行った結果，測定方法の違いや測定装置の違いにより，自然電位の測定結果が異なる場合があることが明らかになった。

また，反発度法で使用するテストハンマーの個体差について実態を調査した結果，コンクリート強度の推定精度向上のためには，テストハンマーの整備方法を改善することが重要であることが明らかになった。

上記以外の検討項目では，腐食速度に与えるひび割れの影響評価に関して，コンクリート供試体を作成し塩水中などの各種環境への暴露を継続しているところである。また，今後の維持管理計画のモデル作成などの検討に資するために，既存構造物の健全度やコンクリート品質に関する実態調査のデータを整理し，報告を行った[6)7)]。

参考文献

1) 土木研究所：非破壊検査を用いたコンクリート構造物の健全度調査，土木研究所資料No.3791，2001.3
2) 土木研究所，日本構造物診断技術協会：コンクリート構造物の鉄筋腐食技術に関する共同研究報告書－実構造物対する適用結果－，共同研究報告書No.269，2001.3
3) 土木研究所，国土交通省：テストハンマーによる強度推定調査の６つのポイント，http://pwri.go.jp/など，2001.12
4) 古賀裕久，河野広隆：テストハンマーによるコンクリート強度の推定調査について，コンクリート工学，Vol.40，No.2，pp.3～7，2002.2
5) 前掲，共同研究報告書No.269，pp.45～47など
6) 古賀裕久ほか：「平成11年度実態調査結果に基づく実構造物中のコンクリート品質に関する検討」，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.599-606，2002.2
7) Hirotaka KAWANO, Hiroshi WATANABE, Hirohisa KOGA: “Nationwide Survey on Soundness of Concrete Structures”, 2001 Second International Conference on Engineering Materials, Vol.1, pp.93-100, 2001.8

6.7　鋼橋塗替え処理技術の高度化に関する調査

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 13～平 17
担当チーム：技術推進本部（先端技術）
研究担当者：吉田　正、田中　和嗣

【要旨】
鋼橋は、塗装等によって耐久性を確保している社会資本であり、適切な塗装がなされる必要がある。塗装の耐久性は、塗料の防食性能と下地処理の品質によって決まる。特に、既設鋼橋の塗替え補修時には、素地調整の影響が大きいといわれている。本課題は、鋼橋の塗替え補修における素地調整の品質管理技術として、素地調整程度の判定技術を開発するものである。
13 年度は、鋼橋塗装の現状と、素地調整による塗装耐久性への影響を具体的に把握するために、文献及び橋梁上部工の塗装仕様や塗装の維持管理データに基づく実態調査を行った。その結果、維持管理の必要な鋼橋件数の推移が把握できた。また、塗装の塗替え補修間隔が補修を繰り返す毎に短くなることが確認でき、素地調整が塗装の耐久性に大きく影響していることが推定できた。
キーワード：鋼橋、塗装、素地調整、品質管理

1. はじめに

我が国の社会資本ストックは、その増加に伴い、維持管理の合理化や長寿命化が求められている。鋼橋等の鋼構造物は、塗装などの防食処理による耐久性確保が不可欠な社会資本である。そのため、既設鋼橋は、塗替え補修の高度化により維持管理の合理化や長寿命化を図ることが必要となっている。

本課題は、鋼橋塗替え補修技術の高度化のために、素地調整程度の判定技術の開発を行うものである。13 年度は、社会資本の維持管理における本技術開発の必要性を確認しつつ、具体的技術開発目標の設定を行うために、鋼橋の現状を調査した。

2. 調査方法

2. 1　文献資料に基づく鋼橋の現況調査

全国の鋼橋に関する規模や防食処理の概略状況を把握するために、道路統計年報と文献資料に基づく調査を行う。

2. 2　道路維持管理データに基づく鋼橋の実態調査

鋼橋の規模や塗装方法の実態について、その詳細を調査するために実態調査を行う。調査は、管理情報が整備されている一般国直（指定区間）の橋梁上部工を対象に行った。調査資料は、道路管理者から提供を受けた塗装仕様や塗装の維持管理の記録をもとにした。

3. 調査結果

3. 1　文献調査結果

3．1．1　道路橋の実態

現在、全国の道路総延長は 120 万 km を超え、橋長（全長）15m以上の道路橋は、13.6 万橋を超えている。このうち、鋼橋は 40.0%である[1)]。鋼橋の件数は、1970 年代に急激に延びており「団塊世代」を形成している。今後、これら「団塊世代」の鋼橋が老朽化する結果、現在約 22 年程度である橋梁の平均供用年数は、21 世紀初頭に約 35 年程度となると予想されている[2)]。

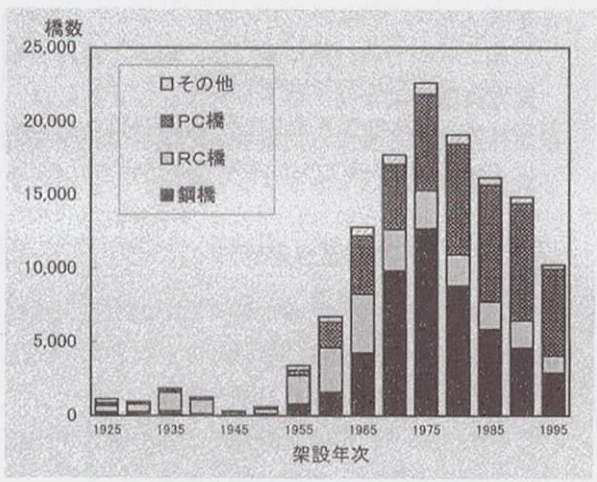


図-1　架設年次別橋梁数の推移[2)]

3．1．2　防食処理の実態

鋼橋の主な防食処理を塗装で行っている日本道路公団（JH）では、総塗装面積が約2,000万m^2を超えており、年当たり8％強を塗替え補修している。塗替え費用は、1995年時点で約70億円（JHによる道路維持管理費の7％）となっており、増加を続けている[3)]。

近年、鋼橋は、より防食性能の高い塗料や溶融亜鉛めっき、耐候性鋼が適用されつつある。しかし、根本的に鋼橋の有する防食処理上の問題点も多い。藤原は、以下のように問題点を示している[3)]。

① 維持管理体制上の問題
② 検査・点検上の問題
③ 鋼橋の構造上の問題
④ 架設環境上の問題
⑤ 素地調整の品質管理上の問題

①、②は維持管理上の問題である。鋼橋の増加は、維持管理体制の確保や維持管理費増大の問題につながる。これに対応するために、ＬＣＣを考慮した橋梁マネジメントシステム（BMS）の研究開発等が盛んに行われている[4)]。また、検査・点検上の問題として、塗膜調査が、外観目視を主体とした官能検査で行われていることがある。これらの検査・点検結果は、定量的な評価が困難で、ばらつきも多い。

一方、③、④、⑤は塗装そのものに直接関連している。近年、鋼橋の構造や架設環境上の問題を克服するためにも、新しい塗料の開発等が盛んに行われている。しかし、塗料が塗装として十分に性能を発揮するためには、素地調整の品質が大きく関与する。A塗装系の例として、塗替えを繰り返すごとに塗替え周期が短くなることが確認されている[5)]。この原因として、素地調整（ケレン）の品質の問題が指摘されている[3)]。

3．1．3　塗装の耐久性に与える素地調整の影響

素地調整が塗装の防食性能に与える影響については、以前より指摘されている。JASS18は、塗装の耐久性に及ぼす各種要因の影響を、表-1のように示している。

また、既述の塗替え補修を繰り返すごとに塗替え周期が短くなる理由ついて、素地調整の品質管理の課題が指摘されている[3)]。素地調整の種別は、塗膜の劣化程度に応じて選定されるが[6)]、3種または4種ケレンが適用される場合が多い。3種または4種ケレンは、劣化した塗膜（死膜）だけを除去して、健全な塗膜（活膜）を残す素地調整である。この時、死膜と活膜の判断が作業者の経験的判断に依存しているため、残った死膜上に再塗装が行われた結果、塗装の耐久性が劣化することが予想されている[3)]。

表-1　塗装の耐久性に及ぼす各種要因の影響
（JASS18）

要　因	寄与率（%）
素地調整程度の差	49.5
塗替え回数の差	19.1
塗料種類の差	4.9
その他	26.5

3．1．4　塗替え補修時の素地調整施工技術

一般に、塗替え補修時の素地調整は、1種ケレンではブラスト法を、2，3，4種ケレンでは、ディスクサンダー等の動力工具と手工具を用いるが、近年、素地調整の品質向上を目的とした新しい素地調整技術が開発されている。その例を表-2に示す。それぞれの方法は、一長一短があるものの、実用性の高いものも多い[7)]。

表-2　新しい素地調整技術の例

素地調整程度	素地調整技術
1種ケレン	モイスチャーブラスト
	バキュームブラスト
2種ケレン	超音波はく離装置
3種ケレン	不織布サンダー
4種ケレン	ロータリブラシ
	はつり研磨機
	ボルトブラッシャー
	はく離剤

3．2　実態調査結果

3．2．1　データ概要

実態調査の対象とした鋼橋件数は、7,218件（長大橋2,087件を含む）である。一般国道（指定区間）に設置されている橋梁件数は、9,732件（長大橋2,666件を含む）である[1)]。調査対象鋼橋の桁形式別内訳を図-2に示す。Ｉ桁と箱桁がほとんどである。塗装実績データについては、このうち2,231件より得る

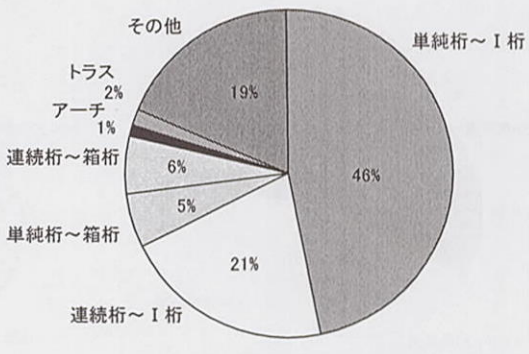


図-2 調査対象内訳（桁形式）

ことができた。この塗装実績データは、一般国道（指定区間）の全容を示しているとはいえないが、塗装系や維持管理の状況についての傾向を把握できるものであると考えている。

3．2．2　塗装仕様

鋼橋に適用されている塗装系の種類を調査した。塗装系をA，B，C-1とC-2、C-3とC-4に分類調査した。その結果を表-3に示す。塗付作業の容易なA塗装系の適用実績が74.5%と最も多い。塩害の観点から架設地域別に適用実績を分類した結果を表-4に示す。海岸に近づくに従って、A塗装系よりもB塗装系やC塗装系の適用実績が多くなっている。しかし、飛来塩分の影響が最も懸念される地域においても、C塗装系の適用は20%以下となっている。

表-3　鋼橋の塗装実績

塗　装　系	橋梁件数（　%）	備　考
A塗装系	1663（74.5）	
B塗装系	445（19.9）	
C塗装系（C-1，C-2）	105（4.7）	
C塗装系（C-3，C-4）	18（0.8）	
小　計	2231（100）	

3．2．3　塗替え補修周期

鋼橋の塗替え補修周期について調査した。鋼橋は径間別に塗替え補修されることがあるため、調査は径間別に行った。その結果、塗替え周期は、新設から第1回塗替えまでで21年以上のものが34%あるが、第2回塗替えでは、わずか3%しかないことがわかった。また、第3回塗替えでは、全て20年以下であった。この傾向は、既報[5]と類似している。

また、塗替え周期の推移は、地域的に相違がある。例として、第2回塗替えまでの経過年数の地域別実態を図-4に示す。これは、塗替え補修時期の判断が、塗膜劣化程度の官能検査の結果に基づいているために、技術者の主観的判断が一要因として影響しているのではないかと予想している。

3．2．4　塗装色

鋼橋の塗装色について、地区別に適用実績を調査した。塗装色は、地区別ではばらつきがあるものの、全国では青色系と緑色系の塗装色が50%以上を占めている。

既述のとおり、塗替え補修時の素地調整は、3種ケレンまたは4種ケレンの適用が多く、その品質検査は、塗膜劣化程度の判定と同様に外観目視による官能検査となっている。鋼道路橋塗装便覧やISO8501-1、その他の資料は、代表的写真を示しているが、写真例は、赤色系や青色系、グレー系の上塗り塗装の場合が多い[6) 8) 9)]。これら写真例と、塗装色の適用実績の相違は、塗膜劣化程度の判定と同様に、素地調整の品質管理を困難にする原因となっていると思われる。

表-4　鋼橋の設置環境別の塗装実績

塗　装　系	海岸から0.5km以内	0.6km～1.0km	1.km以上	備　考
	橋梁件数（　%）	橋梁件数（　%）	橋梁件数（　%）	
A塗装系	30（26.8）	30（47.6）	974（79.8）	
B塗装系	62（55.4）	25（39.7）	211（17.3）	
C塗装系（C-1，C-2）	16（14.3）	5（7.9）	29（2.4）	
C塗装系（C-3，C-4）	4（3.6）	3（4.8）	7（0.6）	
小　計	112（100.0）	63（100.0）	1221（100.0）	

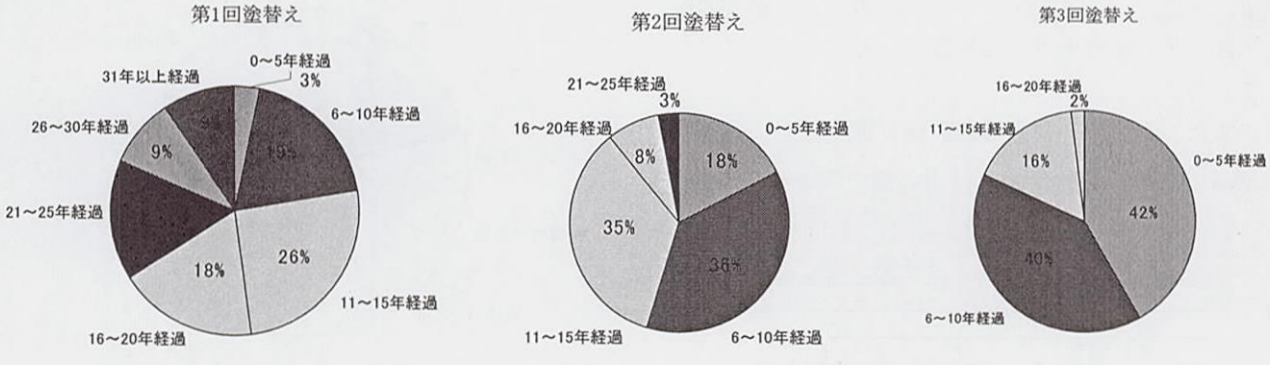


図-3　鋼道路橋の塗替え補修間隔の実態（全国）

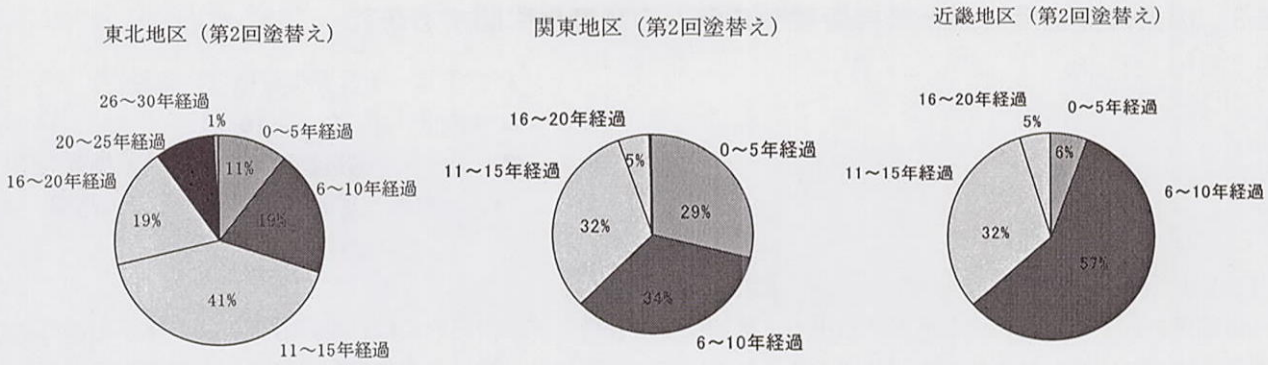


図-4　鋼道路橋の塗替え補修間隔の地区別実態（第２回塗替え）

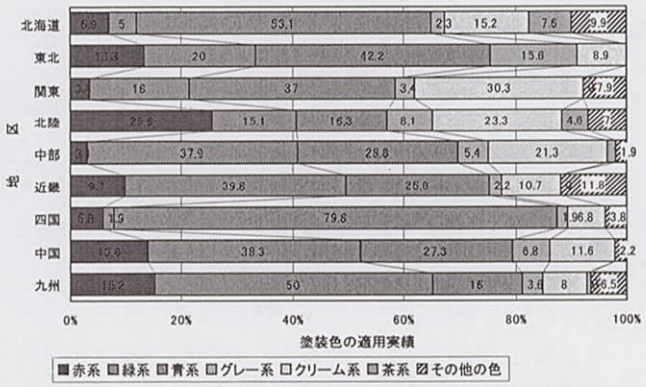


図-5　鋼橋塗装色適用実績（地区別）

4．　まとめ

鋼橋の実態に関する本調査により、社会資本ストックとして、鋼橋の件数が増加しており、1970 年代に架設された「団塊世代」の橋梁が今後老朽化する状況を踏まえ、既設鋼橋の維持管理の合理化を図りつつ、供用期間の延命化に貢献する技術を開発する必要性が確認できた。また、鋼橋に用いる塗装の耐食性は、塗替え補修を繰り返す毎に補修間隔が短くなっていることから、素地調整が影響していることが推定できた。素地調整の品質に関わる技術として、新しい施工技術が開発されている。しかし、素地調整の品質に関する問題が依然として残っている。この現状を踏まえると、今後、素地調整の品質検査の高度化、精度向上に資する技術を開発する必要があると考える。

5．　今後の調査開発予定

本調査結果を踏まえ、素地調整の品質検査に関する技術開発を行っていく予定である。現在、素地調整の品質は、外観目視による官能検査で確認されている。しかし、この検査方法は、定量的評価が困難で、作業者の経験的判断に依存しており、客観性にも乏しい。また、判断の基本となる写真見本等が現在の鋼橋塗装色の実態を一致していないことが、判断を困難にしている一因となっていると推察する。以上のことから、鋼橋塗装の実態を踏まえた、素地調整の写真見本や素地調整の定量化、客観性確保を図った素地調整の品質検査方法の検討開発を行う予定である。

参考文献

1）建設省道路局企画課編：道路統計年報（2000 年度版）、2000.10.

2）八木：道路橋ストックの現状と課題、第 24 回日本道路会議特定課題論文集、pp.68-69、2001.10.

3）藤原：鋼橋の防食保全技術、材料と環境[Zairyo-to-Kankyo (Corros. Eng.)]、45、pp.439-446、1996.7.

4）例えば、萩原・佐藤・鳥海：橋梁マネージメントシステムの開発、土木学会第 51 回年次学術講演会、Ⅰ-A401、1996.9.

5）松田・藤原・佐久間：鋼橋塗装の実態調査－全国の塗膜劣化データの統計処理の評価－、日本道路公団試験所報告、28、pp.97-106、(1991).

6）（社）日本道路協会編：鋼道路橋塗装便覧、1990.6.

7）守屋：現場素地調整方法の検討、鋼橋塗装、27-3、(1999).

8）ISO and SIS：塗料及びその関連製品の施工前の鋼材の素地調整－表面清浄度の目視評価－、ISO8501-1:1988(E/F/R) SIS055900、(1988).

9）（財）鉄道総合技術研究所編：塗膜劣化状態およびケレン程度見本帳、(1989).

6.8　橋梁の健全度評価と維持管理システムの高度化に関する研究

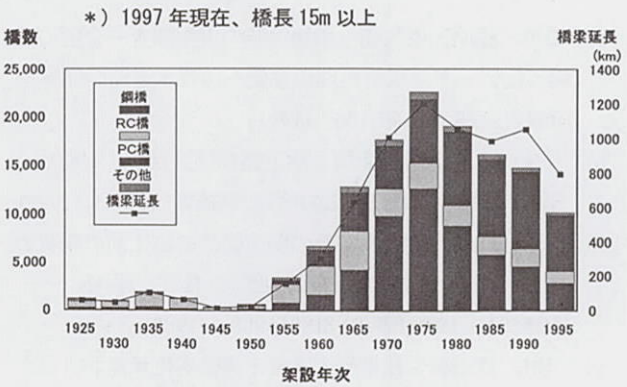
研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 13～平 16
担当チーム：構造物研究グループ（橋梁構造）
研究担当者：平原伸幸、森山　彰、高橋　実

【要旨】
道路橋ストックの老朽化が進展する中で、適切な維持管理と補修のためには、維持管理方法の体系化と劣化した構造物の効率的な補修技術の開発が求められている。本研究は、橋梁の劣化現象を踏まえた健全度の評価技術を開発し、橋梁に求められる健全度を明確にした上で、健全度に応じた補修対策が可能な維持管理システムの開発を行うものである。平成 13 年度は、現在提案されている各種の橋梁マネージメントシステム(BMS)における健全度評価手法や劣化予測手法の特徴等について整理するとともに、実橋の橋梁点検データベースを基にテストランを行い、各種 BMS の健全度評価結果について比較・分析を行った。その結果、各種 BMS による橋梁の健全度評価手法について、評価の考え方や評価結果に違いが見られることが明らかとなった。
キーワード：道路橋、維持管理、マネージメントシステム、健全度評価、劣化予測

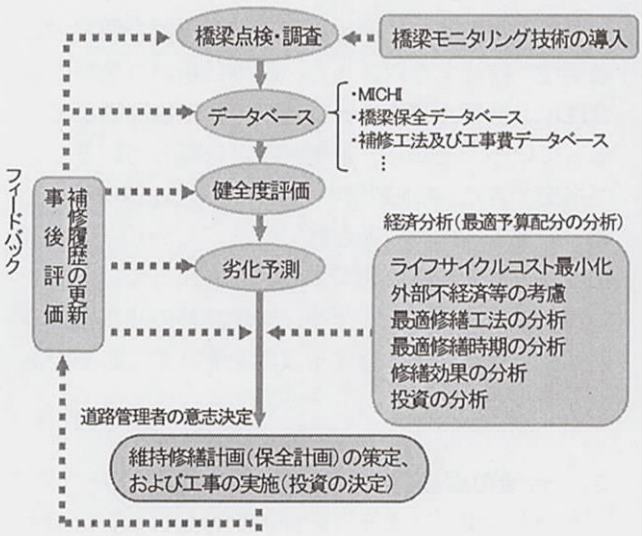
1．はじめに

わが国における道路橋ストックは、1960 年以降にその多くが整備され(図－１)、わが国の経済の発展と国民生活の向上に大きく貢献してきた。その一方で、急速に整備された膨大な数の橋梁ストックは老朽化が顕著となり、補修・更新が大きな課題となりつつある。すなわち、今後の急激な増加が想定される維持管理費を抑制しつつ、橋梁ストックの安全性・快適性等を維持し、次世代に良好な資産として引き継がなければならない。このためには、効率的な維持管理手法を早急に確立する必要がある。

橋梁ストックをはじめとする構造物の維持管理は、理想的には図－２に示すように、点検によって現況を把握し、その結果を用いて健全度を評価、今後の劣化・損傷の推移の予測、さらに補修・更新計画の立案及び補修・更新工事の実施という流れに沿って行うこととなる。また、各段階で得られる情報はデータベースとして蓄積し、その充実を図ることで更なる維持管理の合理化が可能となる。これに対して、現状の維持管理業務では、点検により発見された劣化・損傷箇所について対処療法的に対策を講ずるという手順が一般的であり、劣化・損傷の推移を予測し、適切な時期に補修等を行い、中・長期的な視点で維持管理費用を縮減するといった、計画的な維持管理が必ずしも行われているわけではない。



図－１　橋梁建設数の推移
（建設省道路局　道路統計年報 1998 年より）



図－２　維持管理のフロー

本研究は、計画的な維持管理の実現のための支援システムの構築を目指すものであり、平成13年度は、旧土木研究所で開発した橋梁マネジメントシステム（以下、BMSという）をはじめとした、現在提案されている主なBMSを対象に、健全度評価手法や劣化予測手法の特徴等について整理するとともに、テストランを行い、各種BMSの健全度評価結果について比較・分析を行った。

2．研究方法

2．1　健全度評価手法の調査

橋梁の健全度を評価する際の評価項目を整理するために、各種BMSを対象に健全度評価手法の特徴を比較するとともに、橋梁の点検データを用いたテストランにより健全度の評価を行い、各種BMSにおける健全度評価結果について比較・分析を行った。

2．2　劣化予測手法の調査

今後のＢＭＳ構築に向けて、必要不可欠である劣化予測手法及び補修・補強優先度の評価手法について、各種BMSの特徴を調査し整理を行った。

3．研究成果

3．1　健全度評価手法の調査

調査対象としたBMSは、旧土木研究所で開発したBMS[3]（以下、PWRI-BMSという）、米国(AASHTO)で開発されたBMS[4]（以下、Pontisという）、山口大学で開発されたBMS[5]（以下、J-BMSという）、北見工業大学で開発されたBMS[6]（以下、SAMという）の４システムである。

ここでは主に、各BMSにおける健全度評価手法の調査結果を以下より述べる。

（1）PWRI-BMS

PWRI-BMSでは、減点法により橋梁部材の健全度を評価するものとし、減点数は点検結果に基づく各部材の損傷度から、損傷度に応じて算出することとしている。各部材の損傷度は、橋梁点検要領（案）[2]（以下、点検要領という）に示す損傷度判定基準（表－１）を基本とし、減点数は専門家の評価と比較しながら各部材や損傷種類別の重み付けを決定している。

例えば、表－２に示すように、第１統合で床組の減点数の上限値は50点で、縦桁、横桁とも減点が50点であった場合、単純に床組の減点数を計算すれば第１統合で100点になるが、この上限値の条件より50点となる。なお、この減点数については、損傷ランクⅡ、Ⅲ、Ⅳに対しそれぞれ18点、12点、6点を基本としているが、致命的な損傷ランクについては高く、そうでないものについては低く設定している。

表－1　点検要領における損傷度判定基準

判定区分	一　般　状　況
Ⅰ	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある
Ⅱ	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修をするかどうかの検討を行う必要がある
Ⅲ	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある
Ⅳ	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある
ＯＫ	点検結果から、損傷は認められない

表－２　PWRI-BMSにおける減点法による健全度評価例

部位	上部工					下部工		
	主桁	支承	床組		床版	躯体		基礎
			縦桁	横桁		橋台	橋脚	
減点数	50	15	0	0	0	0	3	0
第１統合（上限値）	65（100）		0（50）		0（70）	3（60）		0（90）
第２統合（上限値）	65（100）		0（70）			3（90）		
上下部工統合（上限値）	65（100）					3（90）		
橋全体統合（上限値）	68（100）							
橋全体の健全度	100−68 = 32							

（2）Pontis

Pontisでは、健全度指数BHI(Bridge Health Index)を用いて健全度を評価しており、式(1)、(2)により表される。

BHIとは、橋梁の状態を表す指標として米国で活用されているものであり、州毎にBHIの管理基準を設定している。BHIの管理基準を満たさない橋梁の数を知ることにより、補修費の投入すべき路線や、維持管理の目標達成度の判断、さらにBHIの推移を予測することで余寿命の推定や事業の目標達成度の評価等に用いられている。

①各部材（床版、主桁、橋台、橋脚等）の健全度指数

$$BHI = \frac{\text{各部材の現有資産価値}(\Sigma(B \times Wf) \times C)}{\text{各部材の総資産価値}(A \times C)} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここで、B：各 State の数量（例えば床版の場合は m^2）

Wf: 重み係数（表－５参照）

C：部材単価

A：各部材の全数量

②橋梁全体の健全度指数

$$BHI = \frac{\Sigma(\text{各部材の現有資産価値})}{\Sigma(\text{各部材の総資産価値})} \quad \cdots\cdots(2)$$

表－３に損傷ランクの例を示すが、基本的には鋼部材では腐食、コンクリート部材ではひび割れにより損傷ランクを設定するものであり、表－４に示す損傷が発見され危険な状態にある場合には、補修・補強等の対応を行うこととしている。損傷のランクは部材別に３～５段階（各部材別に段階数を変えている）で評価することとしている。

表－５に各 State の数量に乗じる重み係数 Wf を示す。

表－３　Pontis における損傷ﾗﾝｸ例（鋼主桁の腐食）

損傷ランク	損　傷　状　態	対応選択
State 1	錆はなく、塗装も健全	何もしない 表面洗浄
State 2	錆はないかほとんどない状態である。塗膜の劣化の兆候はあるが、鋼材表面は露出していない状態。	何もしない 表面洗浄
State 3	全面に錆が分布しているが鋼材の露出はない。錆による断面欠損もない状態。	何もしない 部分塗替え
State 4	腐食しているが、断面欠損に至っていない状態。	何もしない 部分塗替え 塗替え
State 5	腐食が進行しており、断面欠損による影響が生じている状態。	何もしない 断面補修 部材交換

表－４　要注意損傷項目

鋼部材の疲労、腐食、舗装割れ、床版ひび割れ、支承部の沈下、洗掘、衝撃による損傷、断面欠損

表－５　各 State に対する重み係数

	State1	State2	Steta3	State4	Steta5
5 段階評価	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00
4 段階評価	1.00	0.67	0.33	0.00	
3 段階評価	1.00	0.50	0.00		

（３）J-BMS

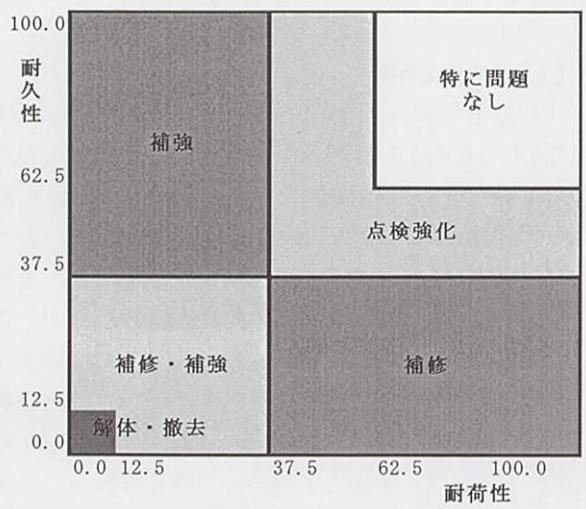
J-BMS は、コンクリート橋の主桁と床版のみを対象としたシステムであり、本システムでは専門家による診断の経験的な知識をコンピュータ上に移植したエキスパートシステムを用いて、橋梁諸元と点検結果から橋梁の総合的な健全度評価を行うものである。

橋梁諸元として部材寸法の他、完成年（適用示方書）、交通量、環境条件（市街地、田園地区、寒冷地区等）を入力する。また、点検データとして床版では、床版中央、支点付近等の箇所毎にひび割れの状況、ひび割れ幅、遊離石灰の有無、コンクリートの欠落等を、主桁については曲げとせん断に分類して床版の場合と同様にひび割れの状況を入力する。

健全度については、床版と主桁の耐荷性、耐久性及び耐用性を 100 点満点の健全度として評価し、表―６の基準表の値を基本として、図－３に示すとおり耐久性と耐荷性の２軸での対策の評価を行っている。

表－６　J-BMS における健全度評価基準表

0.0	≦	P	＜	12.5	danger	供用すべきでない状態
12.5	≦	P	＜	37.5	slightly danger	補修・補強が不可欠になる状態
37.5	≦	P	≦	62.5	moderate	劣化は見られるが、特に補修・補強を考慮すべき状態ではなく、良くも悪くもない普通の状態
62.5	＜	P	≦	87.5	slightly safe	僅かに劣化しているがなんら憂慮も無く健全な状態
87.5	＜	P	≦	100.0	safe	全く問題のない状態



図―３　耐久性及び耐荷性の評価に基づく対策分類

J-BMSは、環境条件や使用条件を踏まえた評価を行うことが可能な上に、損傷の状況をその発生要因を考慮して入力するため、的確な健全度の評価が可能である。ただし、１橋単位の解析を対象としており、ネットワークレベル（地域毎、路線毎など）の解析はできない。

（４）SAM

SAMでは、点検要領の損傷度判定基準（表－１）を基本として、各点検項目の相対的重要度を重みとして客観的に設定することにより、橋梁全体の健全度(S_T)を次式(3)のとおり与えている。

$$S_T = \frac{\Sigma WiSi}{\Sigma Wi} \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで、Wi：各項目の重み係数

Si ：各項目の損傷ランク（５段階の評価値）

重み係数については、橋梁各部に対する点検項目を表―７の１４項目にまとめ、この１４項目に対して数量化理論Ⅱ類により求めている。具体的には、専門家による橋梁全体の健全度評価を参考とし、表―８の４分類に設定し、これを外的基準として前述の１４点検項目に対する判定結果と結びつけることを数量化理論Ⅱ類を適用し、重み係数Wiを算出している。

各部材の重み係数を図―４に示す。

表－７　SAMにおける14点検項目

部　材		鋼　橋	ｺﾝｸﾘｰﾄ橋
上部構造	主桁　１	腐食	剥離・鉄筋露出
	主桁　２	亀裂・破断	ひび割れ
	主桁　３	脱落・異常音等	遊離石灰・漏水等
	２次部材（横桁、縦桁、対傾構、横構）		
	床版　１	剥離・鉄筋露出	
	床版　２	ひび割れ	
	床版　３	遊離石灰・抜け落ち等	
下部構造	躯　体（橋脚、橋台）		
	基　礎		
その他	支　承		
	高　欄		
	地　覆		
	舗　装		
	伸縮装置		

また、SAMでは健全度指数BHIを用いた橋梁各部材の資産価値に着目した健全度評価も可能で、健全度指数は、Pontisと同様に初期の資産価値に対する現有の資産価値の比で表される。現有資産価値の算出にあたっては、表－９に示す各部材における資産価値の低下率を用いている。

今後は、健全度指数BHIを用いた健全度評価を適用し、劣化予測も可能なシステムを開発する予定である。

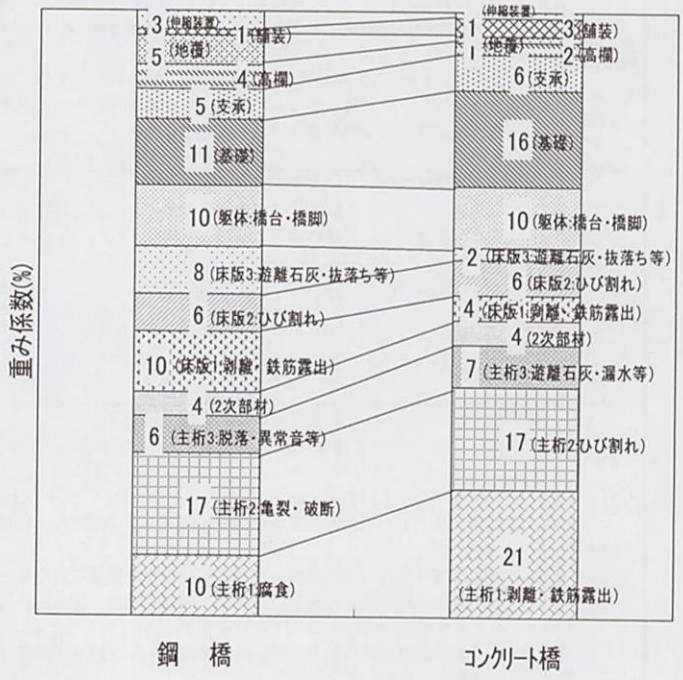
表－８　判断基準

損傷ランク	総合評価（外的基準）
Ⅱ	補修より架け替えを薦める
Ⅲ	大掛かりな補修を要する
Ⅳ	軽い補修を要する
ＯＫ	現状維持

注）ランクⅠは即時対応を行うので評価しない。

表－９　各部材における資産価値の低下率

部材損傷度	資産価値低下率
Ⅱ	0.75
Ⅲ	0.50
Ⅳ	0.25
ＯＫ	0.00



図―４　SAMの健全度評価における重み係数(%)

以上述べてきた各種 BMS による健全度評価の概要を、表－１０に示す。

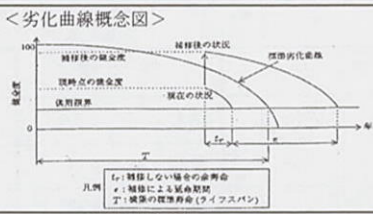
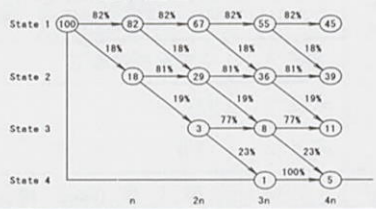
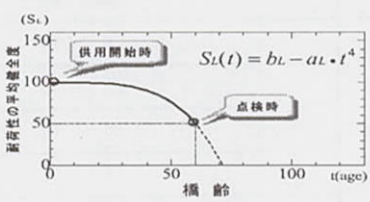
３．２　劣化予測手法の調査

表―１１に各種BMSの劣化予測手法の概要を示す。

表－１０　各 BMS における健全度評価手法の概要

		健全度の評価指標及び評価手法
PWRI-BMS （旧土木研究所）	入力データ	■橋梁諸元、構造形式、橋梁点検結果を利用。（道路管理データベースMichiより取り込まれる） ・補修計画作成のため損傷数量および交通量をシステム内で入力。これらは保存されないため、その都度入力必要。 ・管理年数（任意）、予算計画を入力。
	健全度評価手法	■「減点法」を使用。Michi内の点検データから損傷種類に応じた減点数を求め、100より引いた値が健全度として算出。 （減点数は、損傷ランクⅡ＝１８点、Ⅲ＝１２点、Ⅳ＝６点を基本値として設定） ・健全度は鋼桁、コンクリート桁、下部工、支承それぞれで算出。（橋全体としての健全度は算出されない） ・減点数は専門技術者の経験値を採用。 ・支間内で最も大きい損傷で算出された減点数が最後まで残るため、健全度は低くなる傾向にある。
Pontis （米国）	入力データ	■橋梁諸元、構造形式はNBIから取り込み、橋梁点検に関するデータは別途DBに保管。 ・点検結果は、部材毎に損傷ランク(State)とその数量を入力。 ・要素ごとに環境区分を設定可能。 ・管理年数（任意）、予算計画を入力。
	健全度評価手法	■健全度＝Σ（Stateの数量×重み係数×要素単価）／全資産価値 ・要素ごとに状態（State)が３～５段階に基本設定され、損傷の大きさに対して重み係数を持たせている。 ・５段階で評価する場合の重み係数は、State1＝1.0　State2＝0.75　State3＝0.5　State4＝0.25　State5=0.0
J-BMS （山口大学）	入力データ	■橋梁諸元、目視点検結果、非破壊検査試験結果等を入力。（Michi等データは取り込めない。データは全て手入力。） ・データベース管理機能により、各種点検で得られた写真、図面などの各種情報が保存可能、かつ出力可能。
	健全度評価手法	■コンクリート橋専門技術者の橋梁診断における経験的な知識をコンピュータ上に移植し、橋梁諸元、各種点検から総合的な診断を実施。 ・主桁と床版のそれぞれについて、耐荷性、耐久性、耐用性毎に100点満点健全度を算出。
SAM （北見工大）	入力データ	■Michiデータ内の橋梁の諸元、履歴、点検データ等を利用。基本的に手入力は不要。 ・システムの向上のため、入力項目が追加される予定。
	健全度評価手法	■健全度は、Pontisと同じ手法で資産価値の比率により表現。 ・鋼橋とコンクリート橋それぞれに対して代表部材を14項目選定。 ・数量化理論Ⅱ類により部材毎の重み係数値を算出し、判定指標を設定。

表－１１　劣化予測手法の概要

	劣化予測手法
PWRI-BMS	■健全度が時間とともに劣化していく標準的な状況を、ある同一基準における橋梁群に対して健全度評価し、縦軸に健全度指数、横軸に期間とし、供用年別にプロットしたデータの平均値を結んだ曲線（標準劣化曲線と呼んでいる）をベースに対策の評価を実行。 ・健全度が100から供用限界に達する時間を標準寿命(T)とし、ある橋梁の健全度をプロットし、その健全度の点を通るように標準劣化曲線を水平に移動させることにより、その橋梁の余寿命(tr)を推測する。 ＜劣化曲線概念図＞ 
Pontis	■マルコフ連鎖を用いた劣化予測を適用。 ・横軸のｎ年については、４つの環境区分毎に基本値が設定されている。 また、ユーザーが任意に指定することも可能。 ＜マルコフ連鎖概念図＞ 
J-BMS	■実験データを基に劣化曲線式を設定。 ・劣化曲線式(補修・補強以前)　$S_L(t)=f_{(0)}(t)=b_{L(0)}-a_{L(0)}t^4$　$S_D(t)=g_{(0)}(t)=b_{D(0)}-a_{D(0)}t^3$ ・劣化曲線式(補修・補強以後)i回目後　$S_L(t)=f_{(i)}(t)=b_{L(i)}-a_{L(i)}t^4$　$S_D(t)=g_{(i)}(t)=b_{D(i)}-a_{D(i)}t^3$ ここで、SL（ｔ）：耐荷性平均健全度、SD（ｔ）：耐荷性平均健全度、a，b：定数、t：橋梁（年） ・定数に関しては、健全度として先に解析された橋梁ごとの数値によりそれぞれ異なった劣化曲線が求められる。これは、同様に補修・補強後の劣化曲線においてもその工法や組み合わせによってそれぞれ求められる。 ＜劣化曲線概念図＞  ・健全度診断機能から対象橋梁各部材に関する耐久性及び耐荷性の最終診断結果、ユーザからの対象橋梁各部材の予定供用年数を入力し余寿命を検討。
SAM	■既存のMichiデータを用いて劣化因子ごとの影響分析を行い、マルコフ連鎖を用いた劣化予測を適用。 ・コンクリート橋における評価方法は完成しているが、システム化は現在構築中。

3．3　各 BMS における健全度評価結果の比較

上記 BMS の比較検討を行うにあたり、直轄の４道路工事事務所における全３４橋分の橋梁点検データを用いて、各 BMS による健全度評価結果の比較・分析を行った。各 BMS で入力データの項目等に差異があるため、Michi に蓄積されたデータだけでは不足が生じることとなる。そこで、不足データについては、一般図、写真、スケッチ等の資料からそれぞれ必要なデータを作成した。

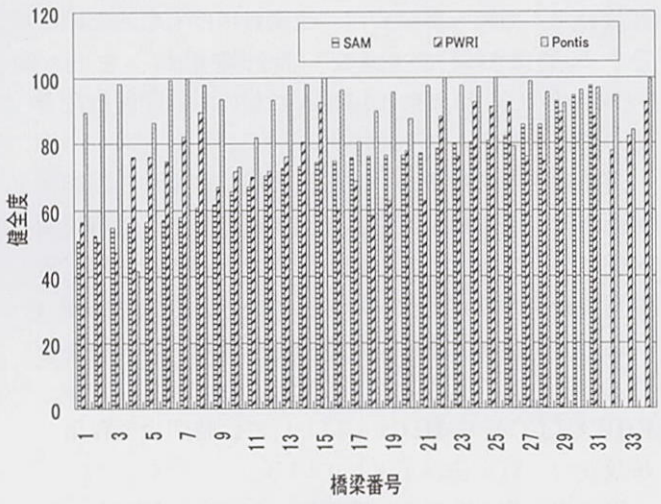
健全度評価結果を表―１２及び図－５に示す。各 BMS 間で、評価結果に大きなバラツキが見られる。

表－１２　各 BMS における健全度評価結果

橋梁番号	橋梁名	橋長(m)	PWRI-BMS 健全度指数	PWRI-BMS 順位	PONTIS 健全度指数	PONTIS 順位	J-BMS 健全度指数	J-BMS 順位	SAM 健全度指数	SAM 順位
1	A1 橋	16.9	56.50	3	89.50	9	74.58	14	50.63	1
2	B1 橋	27.3	50.50	2	95.10	16	62.98	6	52.45	2
3	C1 橋	42.4	47.50	1	98.00	7	-	-	54.84	3
4	D1 橋	5.9	76.00	21	41.70	1	-	-	56.10	4
5	E1 橋	4.6	76.00	20	86.30	6	68.84	9	56.49	5
6	F1 橋	16.7	74.50	14	99.10	26	77.26	17	57.22	6
7	G1 橋	16.7	82.00	15	99.80	34	79.21	19	57.88	7
8	H1 橋	4.7	89.50	30	97.70	22	32.13	3	60.48	8
9	I1 橋	23.0	67.00	8	93.30	10	76.25	15	61.60	9
10	J1 橋	22.0	71.50	11	73.00	2	-	-	65.44	10
11	K1 橋	22.0	70.00	10	81.80	12	-	-	67.02	11
12	L1 橋	15.8	71.50	12	93.20	13	77.10	16	70.24	12
13	M1 橋	214.3	76.00	24	97.60	28	69.99	10	72.71	13
14	N1 橋	30.9	80.50	26	97.70	20	85.77	21	72.77	14
15	O1 橋	19.8	92.50	33	99.80	31	87.11	22	74.28	15
16	P1 橋	320.0	59.50	5	96.10	17	-	-	74.63	16
17	Q1 橋	165.4	68.50	9	80.50	4	85.40	20	75.80	17
18	R1 橋	21.9	58.00	4	89.90	8	48.26	5	75.89	18
19	S1 橋	11.6	62.50	6	95.40	15	71.07	13	76.18	19
20	T1 橋	9.2	77.50	25	87.30	14	65.45	7	76.45	20
21	U1 橋	543.0	62.50	7	97.50	23	-	-	77.00	21
22	V1 橋	21.1	88.00	27	99.80	32	71.04	11	78.48	22
23	W1 橋	122.0	76.00	23	97.40	21	-	-	79.89	23
24	X1 橋	76.8	92.50	31	97.30	25	-	-	80.48	24
25	Y1 橋	21.1	91.00	28	99.80	33	71.04	12	80.83	25
26	Z1 橋	13.9	92.50	32	79.00	5	-	-	82.08	26
27	A2 橋	-	76.00	16	98.70	3	-	-	85.58	27
28	B2 橋	865.4	74.50	13	95.30	18	-	-	85.63	28
29	C2 橋	5.9	89.50	22	92.10	11	-	-	92.67	29
30	D2 橋	22.0	-	34	96.10	19	28.04	1	94.57	30
31	E2-1 橋	3.8	88.00	29	96.70	29	28.71	2	97.54	31
32	E2-2 橋	-	77.50	17	94.50	24	46.60	4	-	-
33	E2-3 橋	650.3	82.00	18	83.90	27	65.77	8	-	-
34	E2-4 橋	-	92.50	19	99.40	30	77.36	18	-	-

※1：J-BMSでは、コンクリート橋についてのみ評価を実施。

※2：No32～34の橋梁は上部工が4連に分かれており、SAMでは4連を総合し橋梁１橋として、ランク付けされている。



図－５　各橋梁の健全度指数の比較

PWRI-BMS では、主桁、床版、下部構造、支承の４部材毎の損傷度に対する減点値により橋梁の点数付けが行われるため、Pontis 及び SAM のように各部材を資産価値として評価する際の経済的な重み付けがなされた評価結果とは大きな違いが生じている。

Pontis と SAM 両者は、同様な考え方に基づく健全度指数 BHI を用いているが、Pontis が全体的に高い健全度を与えている。これは、実際の橋梁では同一部材において損傷ランクの重なる部分が存在し、Pontis ではこれが考慮されているのに対し、PWRI-BMS では各部材中の損傷の大きい箇所のランクにより、部材全体が評価されるため、結果的に健全度指数が低くなることが理由の一つと考えられる。

4．まとめ

実橋の橋梁点検データベースを基に、現在提案されている各種の橋梁マネジメントシステム(BMS)における健全度評価手法や劣化予測手法の特徴等について整理するとともに、テストランを行い、各種 BMS の健全度評価結果について比較･分析を行った。その結果、各種 BMS による橋梁の健全度評価手法について、評価の考え方や評価結果に違いが見られることが明らかとなった。

今後、橋梁の適切な健全度の評価を行う上で必要な評価項目の整理、絞り込みを行うとともに、可能な限り定量的な健全度評価手法、劣化予測手法およびこれらを活用して補修計画策定のための手法等の提案を行っていく予定である。

参考文献

1）川間重一,西川和廣,廣松新,上仙靖：橋梁の架替に関する調査結果（Ⅲ）,土木研究所資料　第 3512 号,平成 9 年 10 月

2）建設省土木研究所：橋梁点検要領（案）,土木研究所資料第 2651 号,昭和 63 年 6 月

3）佐藤弘史,荻原勝也,二川英夫：橋梁マネージメントシステムの開発に関する調査研究報告書,土木研究所資料　第 3633 号,平成 11 年 3 月

4）http://aashtoware.camsys.com/information.htm

5）宮本文穂,河村圭,中村秀明：Bridge Management System(BMS)を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定,土木学会論文集 No.588/IV-38, pp.191-208, 1998.3

6）大島俊之,三上修一,山崎智之,丹波郁恵：橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析,土木学会論文集 No.675/ I -55, pp.201-217, 2001.4

6.9 舗装マネジメントシステムの実用化に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平 13～平 15
担当チーム：基礎道路技術研究グループ（舗装）
研究担当者：吉田武、寺田剛、谷口聡

【要旨】
ライフサイクルコストを構成する費用項目について検討するとともに、プロジェクトレベルでの道路利用者費用の算定方法について検討を行った。ライフサイクルコストの費用項目については、国内外の研究成果を整理統合する形で費用項目のとりまとめを行った。また、米国連邦道路庁の”Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design”に示されている工事区間の道路利用者費用算定法を参考に、算定法に関する検討を行うとともに、道路利用者費用について試算を行った。その結果、工事区間における時間損失費用、特に渋滞の影響が大きな比重を占めることがわかった。
キーワード：ライフサイクルコスト、道路利用者費用、車両走行費用、時間損失費用、工事規制

1. はじめに

本研究は、

1) 道路管理者、道路利用者、沿道住民などの視点からの舗装の管理目標の提案
2) 道路管理者、道路利用者、沿道住民などの視点からのライフサイクルコスト（以下、LCC）の算定方法の提案
3) 舗装の管理目標と LCC を考慮した戦略的維持管理手法の提案

を目標に研究を実施している。

平成 13 年度は、道路管理者、道路利用者、沿道住民などの視点からの LCC の算定方法の提案を目的に、LCC を構成する費用項目について検討するとともに、プロジェクトレベルでの道路利用者費用の算定方法について検討を行った。

2. 研究方法

ライフサイクルコストの費用項目については、米国連邦道路庁(ＦＨＷＡ)の ”Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design”（以下、FHWA-LCCA）[1]、世界銀行で開発した HDM-III を PIARC（世界道路協会）が中心となって改良した HDM-4[2]、日本においては LCCA の先進事例である東京都の長期供用舗装導入に関する調査（以下、東京都 LCCA）[3]といった、国内外の研究成果を整理統合する形で費用項目のとりまとめを行った。

また、道路利用者費用の算定法を検討するため、FHWA-LCCA に示されている工事区間の道路利用者費用算定法をレビューし、日本で収集されているデータや文献をもとに算定するためのアルゴリズムの検討を行うとともに、道路利用者費用について試算を行った。

3. 研究結果

3.1 ＬＣＣの算定項目

「舗装の構造に関する技術基準・同解説」[4]では、主な費用項目として、道路管理者費用、道路利用者費用、沿道および地域社会の費用を取り上げている。これらの費用項目のブレイクダウンを行うため、FHWA-LCCA、HDM-4、東京都 LCCA をもとに LCC の算定項目についてとりまとめを行い、整理した結果を表－1 に示す。

道路管理者費用については、舗装の工事に関連する建設費用、維持・修繕費用、改築費用はもちろんのこと、米国においては調査・設計費用が、また、FHWA-LCCA や東京都 LCCA においては関連行政費用が算定項目として列挙されている。

道路利用者費用については、費用が発生する要因を路面劣化、工事規制区間、迂回に整理した。工事規制区間についてはすべての調査研究で車両走行費用、時間損失費用の算定方法が示されている。また、HDM-4 においては路面劣化による車両走行費用、時間損失費用の算定法が示されている。迂回についても、FHWA-LCCA や HDM-4 において、時間損失費用と事故費用の算定法が示されている。

沿道および地域社会の費用については、HDM-4 お

表－1　LCC の算定項目

費用算定項目	FHWA	HDM-4	東京都
道路管理者費用			
調査・設計費用	○		
建設費用	○	○	○
維持・修繕費用（廃棄処分費用含む）	○	○	○
改築費用（廃棄処分費用含む）	○	○	○
関連行政費用	○		○
道路利用者費用			
路面性状悪化			
車両走行費用		○	
時間損失費用		○	
工事規制区間			
車両走行費用	○	○	○
時間損失費用	○	○	○
迂回			
時間損失費用	○	○	
事故費用	○	○	
沿道および地域社会の費用			
環境費用			
大気汚染(NO_x)		○	○
騒音		○	○
地球温暖化(CO_2)		○	○

よび東京都 LCCA において、大気汚染、騒音、地球温暖化といった環境費用が算定項目として示されている。

したがって、表－1 の項目を LCC の費用算定項目案とする。

3.2 工事規制区間における道路利用者費用

3.2.1　算定手順

FHWA-LCCA の第 3 章"Work Zone User Cost"に示される算定手法を参考に、図－1 のとおり、工事規制区間の道路利用者費用算定手順を設定した。

3.2.2　算定方法

1) 年平均日交通量の設定

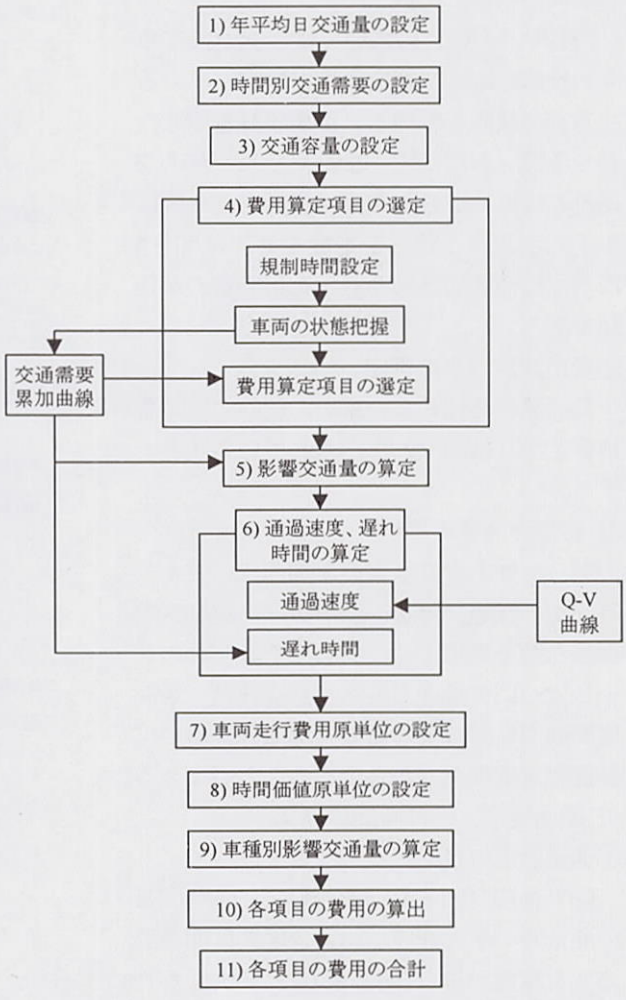
FHWA-LCCA においては、車種区分毎（乗用車、トラック、トレーラー）に年平均日交通量(AADT)を設定している。日本においては、常時観測調査の結果から AADT を算出するか、道路交通センサスの 24 時間交通量を AADT とみなす方法が考えられる。

2) 時間別交通需要の設定

FHWA-LCCA においては、各州で研究された時間別交通分布の初期設定値が示されている。日本においては、実測や常時観測調査の結果の利用等が考えられる。

3) 交通容量の設定

FHWA-LCCA においては通常時、規制時、規制解除による渋滞解消時の交通容量が示されている。工事



図－1　工事規制区間の道路利用者費用算定手順

表－2　工事車線規制時の交通容量(FHWA-LCCA)

通常時車線数	規制時車線数	1 車線あたり交通容量（台/時間/車線）
3	1	1,170
2	1	1,340
5	2	1,370
4	2	1,480
3	2	1,490
4	3	1,520

車線規制時の交通容量は表－2 のとおり示されている。日本においては、通常時は「道路の交通容量」[5]に示されているが、規制時、渋滞解消時についての交通容量について示されたものがないので、規制時および渋滞解消時における交通容量設定法の確立が課題である。

4) 費用算定項目の設定

①規制時間の設定

規制時間の設定は、施工時間と時間別交通分布を勘案し、渋滞の影響が小さくなるように設定する。

②車両の状態の把握

FHWA-LCCA においては、交通流や車両の状態に応じて算定項目を設定している。交通流の状態を整理し、算定項目を示したものを図－2 に示す。また、それぞれの交通流の特性に応じた車両の状態を表－3 に示す。なお、これらを把握するには図－3 に示す交通需要累加曲線 [6]を用いるのが便利である。

③費用算定項目の選定

交通流の特性および車両の状態に応じ費用算定項目は図－2 に示されている項目とする。

5) 影響交通量の算定

図－3 に示す交通需要累加曲線により、時間毎の減速、停止、渋滞抜け、規制区間通過台数を算定する。なお、それぞれのケースについて減速、停止、渋滞抜け、規制区間通過台数は交通需要累加曲線あるいは交通容量累加曲線から求めることができる。

6) 通過速度、遅れ時間の算出

①通過速度

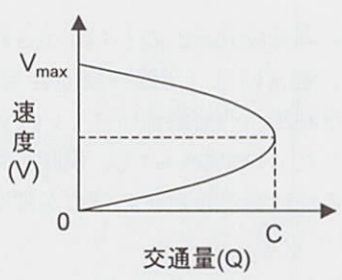
Q-V 曲線（図－4）[7]を用いて、各時間帯の通常時の走行速度、および規制区間通過速度を算定する。交通容量 C と Vmax が判明していれば、Q-V 曲線は式－1 のとおり表される。

$$Q=-\frac{4C}{V_{max}^2}\left(V-\frac{V_{max}}{2}\right)^2+C \quad (1)$$

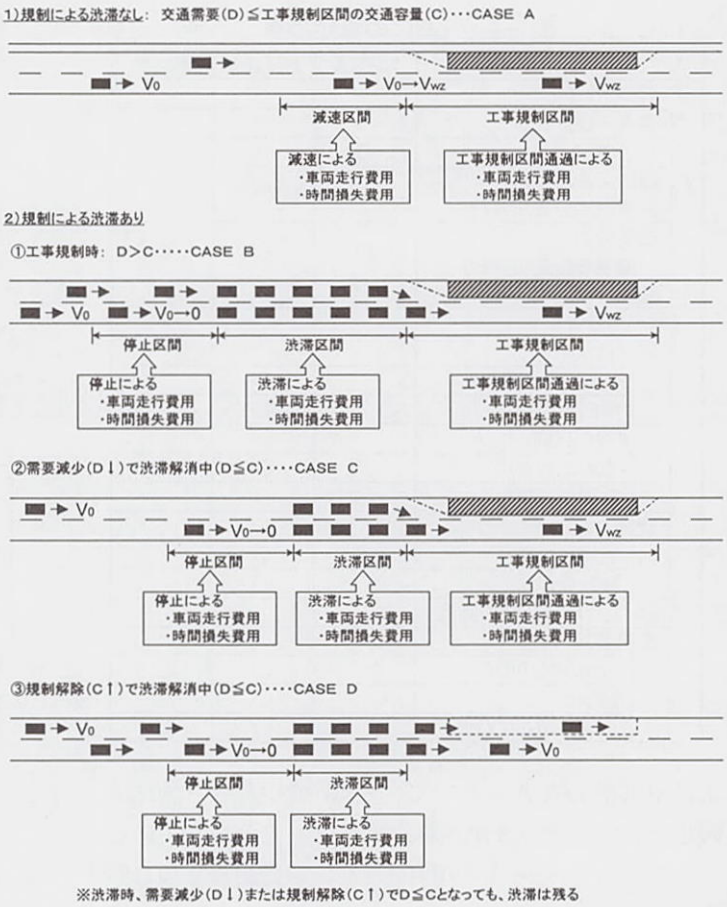
また、交通需要(D)が、D≦C を満たすとき、工事区間の通過速度は

$$V=\frac{V_{max}}{2}\left(1+\sqrt{\frac{C-D}{C}}\right) \quad (2)$$

で表される。



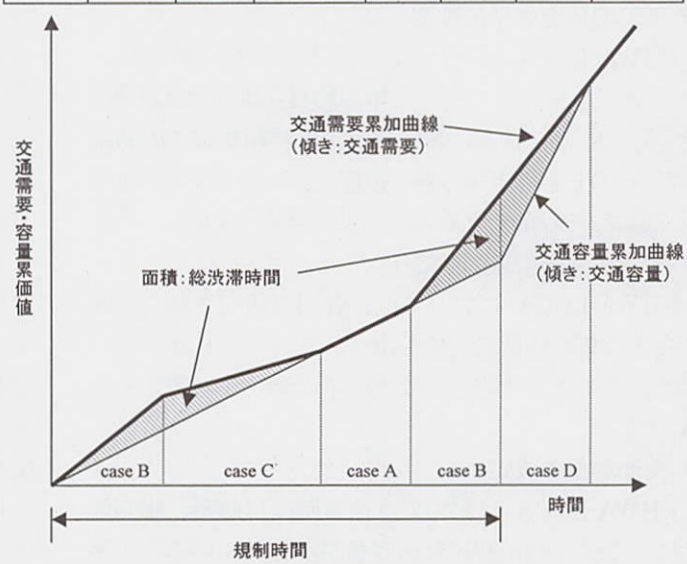
図－4　Q-V 曲線



図－2　交通流の特性および考慮すべき費用

表－3　交通流の特性および車両の状態

CASE	交通流の特性			車両の状態			
	渋滞	規制	需要と容量の関係	減速	停止	渋滞待ち	規制区間通過
A	なり	あり	D≦C	○	×	×	×
B	あり		D＞C	×	○	○	○
C	解消中		D≦C	×	○	○	○
D		なし	D≦C	×	○	○	×



図－3　交通需要累加曲線

ただし、渋滞時における工事区間の通過速度は、Q=C であることから、

$$V=\frac{V_{max}}{2} \quad (3)$$

とする。

②遅れ時間

・減速、停止

FHWA-LCCA に示されている停止による遅れ時間（km/h 単位に変換したもの）を表－4 に示す。

減速については、初速における停止遅れ時間と工事規制区間通過速度における停止遅れ時間を表－4 より求め、差を算出する。

表－4　停止による遅れ時間

初速(km/h)	小型車	大型車
10	1.14	0.91
20	1.75	1.82
30	2.36	2.73
40	2.97	3.65
50	3.56	4.56
60	4.16	5.47
70	4.76	6.38
80	5.34	7.29
90	5.93	8.20

・渋滞による総遅れ時間

図－3 に示す交通需要累加曲線により、渋滞による総遅れ時間を算出する。なお、渋滞による総遅れ時間は、交通需要累加曲線と交通容量累加曲線で囲まれる面積で算定される。

・工事区間通過による遅れ時間

工事規制区間長を L_{wz}、渋滞区間の平均速度を V_{wz}、初速度を V_0 とすると、工事規制区間通過による遅れ時間 Δt_{wz} は、

$$\Delta t_{WZ}=\frac{L_{WZ}}{V_{WZ}}-\frac{L_{WZ}}{V_0} \quad (4)$$

で表される。

7)車両走行費用原単位の設定

・停止、減速

後述のアイドリング費用の日米価格差（小型車：¥124.11/$1、大型車：¥189.32/$1）を用いて、FHWA-LCCA に示されている、停止による車両走行費用原単位を日本の価格に換算したものを表－5 に示す。

・アイドリング

自動車交通局の資料 [8]および「物価資料２月号」の燃料費単価（全国平均）[9]より表－6 のとおり設定した。なお、FHWA-LCCA および日本の価格を FHWA-LCCA で除した日米価格差を併せて示す。

表－5　停止による車両走行費用原単位(円／台)

時速(km/h)	小型車	大型車
10	0.52	2.28
20	1.48	5.13
30	2.48	8.42
40	3.53	12.03
50	4.69	15.86
60	5.96	19.82
70	7.35	23.71
80	8.90	27.46
90	10.64	31.09

表－6　アイドリング費用原単位

		小型車	大型車
アイドリング費用（円／台・時間）		85.97	145.42
（参考）	FHWA-LCCA（$／台・時間）	0.6927	0.7681
	日米価格差（円／$）	124.11	189.32

・工事区間通過

「道路投資の評価に関する指針（案）」[9]を用いて算定する。ここでは、市街地における走行費用原単位を表－7 に示す。

表－7　走行費用原単位（市街地）

速度(km/h)	乗用	バス	小型貨物	大型貨物
10	27	81	28	55
20	20	71	21	43
30	17	67	18	39
40	16	66	18	38
50	16	66	18	38
60	17	66	18	39

8) 時間価値原単位の設定

「道路投資の評価に関する指針（案）」に示されている時間価値原単位は表－8 に示す。

表－8　時間価値原単位

	乗用	バス	小型貨物	大型貨物
平日	56	496	90	101
休日	84	744	90	101

9) 車種別の影響交通量の算定

5)で算出した影響交通量に、車種別の構成比を乗じて、車種別の影響交通量を算定する。

10) 各項目の費用の算出

①～⑧に示される式によりの各項目の費用を算出する。

①減速による車両走行費用

減速台数×車両走行費用原単位

②減速による時間損失費用

減速台数×遅れ時間×時間価値原単位×60／1,000

③停止による車両走行費用
　停止台数×車両走行費用原単位
④停止による時間損失費用
　停止台数×遅れ時間×時間価値原単位×60／1,000
⑤渋滞待ちのアイドリング費用
　渋滞による総遅れ時間×車種別構成比
　×アイドリング原単位
⑥渋滞待ちによる時間損失費用
　渋滞による総遅れ時間×車種別構成比
　×時間価値原単位×60
⑦規制区間通過による時間損失費用
　規制区間通過台数×車両走行費用原単位
　×規制区間長
⑧規制区間通過による時間損失費用
　規制区間通過台数×遅れ時間×時間価値原単位
　×60
11) 各項目の費用の合計
　10)の①～⑧を合計する。

3.3. 道路利用者費用の試算結果

3.2 の算定手順を用いて、実道における工事規制区間の道路利用者費用の試算を行った。

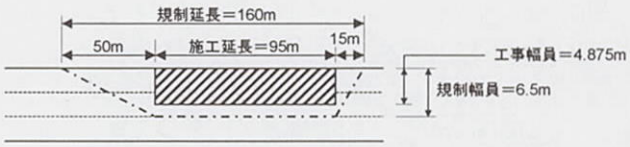
3.3.1 試算条件

(1) 対象区間
　国道１号　9.17KP～9.645KP
（下り、高輪台－東五反田１丁目、L=475m、図－５）



図－5　対象区間

(2) 沿道状況　DID
(3) 道路条件（幅員、側方余裕、勾配、駐車の影響等）
　幅　　員：　3.25m／車線
　側方余裕：　左側　広幅員の路肩あり
　　右側　0.75m
　勾配、勾配長：　i=5%、L=500m
　駐車の影響：　考慮しない
(4) 規制延長・幅員（図－6）
　規制延長：　160m
　規制幅員：　6.5m（1.5 車線分）
　規制時側方余裕：　左側　0m
(5) 施工延長・幅員・面積（図－6）
　施工延長：　95m（1 ロット）
　施工幅員：　4.875m（1.5 車線分）
　施工面積：　463.125m²（1 ロット）



図－6　規制延長、施工延長、幅員

(6) 有効車線数
　通常時　3 車線、規制時　1 車線
(7) 希望速度
　55km/h　（現地走行速度調査による）

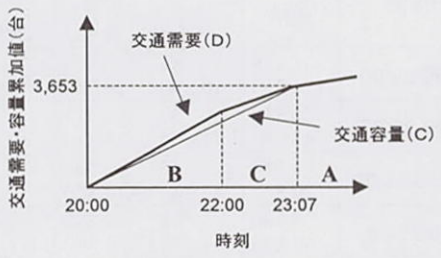
3.3.2 試算

3.2 の手順により試算を行う。
(1) AADT
　22,716 台とする。
(2)時間別交通量
　表－9 のとおり設定。

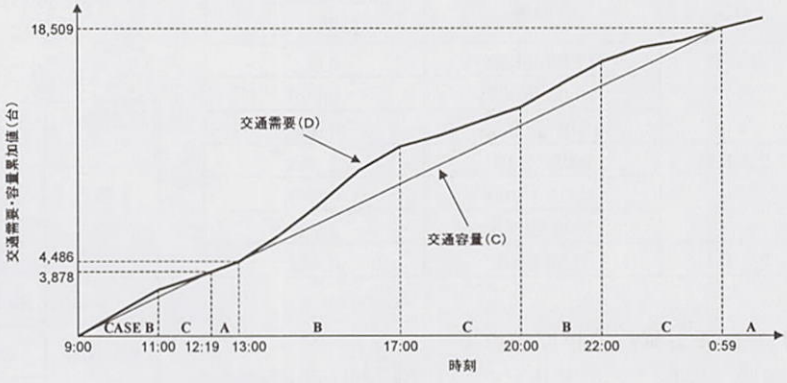
表－9　時間別交通量布

時間帯	乗用	バス	小型貨物	大型貨物
0-1	670	1	67	16
1-2	522	0	42	12
2-3	475	6	20	27
3-4	306	2	6	15
4-5	172	1	23	28
5-6	155	2	38	50
6-7	360	2	99	194
7-8	531	15	103	67
8-9	710	14	124	75
9-10	829	16	432	121
10-11	771	14	397	202
11-12	476	7	244	90
12-13	626	4	195	62
13-14	1,045	5	419	116
14-15	1,168	11	559	161
15-16	1,325	20	580	97
16-17	876	14	463	87
17-18	454	12	161	52
18-19	677	6	138	19
19-20	640	3	168	21
20-21	1,157	6	153	41
21-22	1,157	21	162	34
22-23	755	8	96	17
23-24	358	3	12	3

1) 1 日目 20 時～24 時



2) 2,3 日目 9 時～25 時



図－7　交通需要累加曲線

(3) 交通容量

通常時は「道路の交通容量」と 3.3.1(3)の条件より、5,610pcu/時と算出される。また、規制時は表－2 より、1,170 台/時と算出される。

(4) 費用算定項目の設定

①規制時間の設定

既設断面の打換えた場合を想定し、工事規制時間を 1 日目の 17 時から 4 日目の 9 時

②交通状態の把握

規制時について交通需要累加曲線を作成すると図－7 のとおりである。

③費用算定項目　表－10

表－10　費用算定項目と時間帯

CASE	算定項目	日次	時間帯
A	減速、規制区間通過による車両走行費用、時間損失費用	1 日目	17:00～20:00
			23:07～翌 9:00
		2,3 日目	12:19～13:00
		3,4 日目	0:59～9:00
B	停止、渋滞待ち、規制区間通過による車両走行費用、時間損失費用	1 日目	20:00～23:07
		2,3 日目	9:00～12:19
			13:00～翌 0:59

(5) 影響交通量の算定　表－11

表－11　影響交通量算定結果

減速	停止、渋滞抜け	規制区間通過
12,446	21,554	34,000

(6) 平均通過速度、遅れ時間

①平均通過速度

各時間帯の交通需要、容量の累計値と式(2)～(3)より、表－12 のとおり算定した。

②遅れ時間

表－12 の平均通過速度から、減速、停止、工事規制区間通過による遅れ時間を算定した結果および図－7 の交通需要累加曲線から渋滞による遅れ時間を算出した結果を表－13 に示す。

表－12　平均通過速度

日次	時間帯	平均通過速度(km/h) 通常	規制
1 日目	17:00-20:00	52.8	43.3
	20:00-23:07	51.8	27.5
	23:07-翌 9:00	53.4	47.8
2,3 日目	9:00-12:19	51.2	27.5
	12:19-13:00	52.4	41.0
	13:07-翌 0:59	51.7	27.5
3,4 日目	0:59-9:00	53.4	47.9

表－13　遅れ時間計算値

a) 減速

日次	時間帯	小型車 (時間/千台)	大型車 (時間/千台)
1 日目	17:00-20:00	0.57	0.87
	23:07-翌 9:00	0.34	0.51
2,3 日目	12:19-13:00	0.67	1.04
3,4 日目	0:59-9:00	0.32	0.50

b) 停止

日次	時間帯	小型車 (時間/千台)	大型車 (時間/千台)
1 日目	20:00-23:07	3.67	4.72
2,3 日目	9:00-12:19	3.63	4.67
	13:07-翌 0:59	3.66	4.71

c) 渋滞待ち

日次	時間帯	総遅れ時間（時間）
1 日目	20:00-23:07	632.4
2,3 日目	9:00-12:19	728.5
	13:07-翌 0:59	14,551.0

d) 工事規制区間通過

日次	時間帯	総遅れ時間（時間/千台）
1日目	17:00-20:00	0.665
	20:00-23:07	2.729
	23:07-翌 9:00	0.351
2,3日目	9:00-12:19	2.693
	12:19-13:00	0.849
	13:07-翌 0:59	2.723
3,4日目	0:59-9:00	0.344

(7) 車両走行費用原単位の設定

減速、停止、アイドリング、工事規制区間通過について、表－5～表－7をもとに、車両走行費用原単位を表－14のとおり設定する。

表－14　車両走行費用原単位の設定

a) 減速

日次	時間帯	小型車（円/台）	大型車（円/台）
1日目	17:00-20:00	1.14	3.69
	23:07-翌 9:00	0.69	2.21
2,3日目	12:19-13:00	1.35	4.39
3,4日目	0:59-9:00	0.67	2.15

b) 停止

日次	時間帯	小型車（円/台）	大型車（円/台）
1日目	20:00-23:07	4.91	16.56
2,3日目	9:00-12:19	4.85	16.35
	13:07-翌 0:59	4.90	16.52

c) アイドリング

小型車(円/台)	大型車(円/台)
85.97	145.42

d) 車両走行費用

日次	時間帯	工事区間通過（円／台／km）			
		乗用	バス	小型貨物	大型貨物
1日目	17:00-20:00	-0.28	0.00	0.00	-0.28
	20:00-23:07	1.57	2.00	0.75	1.82
	23:07-翌 9:00	-0.34	0.00	0.00	-0.34
2,3日目	9:00-12:19	1.63	2.00	0.75	1.88
	12:19-13:00	-0.24	0.00	0.00	-0.24
	13:07-翌 0:59	1.58	2.00	0.75	1.83
3,4日目	0:59-9:00	-0.34	0.00	0.00	-0.34

(8) 時間価値原単位

表－8のとおりとする。

(9) 車種別の影響交通量の算定

車種別の影響交通量を算定した結果を表－15に示す。

表－15　車種別影響交通量の算定結果

日次	時間帯	乗用	バス	小型貨物	大型貨物
1日目	17:00-20:00	1,770 (75.3%)	21 (0.9%)	468 (19.9%)	92 (3.9%)
	20:00-23:07	3,112 (85.2%)	37 (1.0%)	413 (11.3%)	91 (2.5%)
	23:07-翌 9:00	4,213 (79.8%)	48 (0.9%)	533 (10.1%)	486 (9.2%)
2,3日目 (2日分)	9:00-12:19	4,546 (58.6%)	78 (1.0%)	2,272 (29.3%)	860 (11.1%)
	12:19-13:00	856 (70.4%)	6 (0.5%)	268 (22.0%)	86 (7.1%)
	13:07-翌 0:59	20,558 (73.3%)	224 (0.8%)	5,946 (21.2%)	1318 (4.7%)
3,4日目 (2日分)	0:59-9:00	6,160 (73.2%)	100 (1.2%)	1,194 (14.2%)	960 (11.4%)

(10) 各項目の費用の算出および合計

各項目の費用算出結果を表－16に示す。

表－16　各項目の費用算出結果

費用項目	費用
1) 減速による車両走行費用	33,100
2) 減速による時間損失費用	30,591
3) 停止による車両走行費用	446,350
4) 停止による時間損失費用	628,869
5) 渋滞待ちによるアイドリング費用	2,838,338
6) 渋滞待ちによる時間損失費用	65,878,209
7) 工事規制区間通過による車両走行費用	8,221
8) 工事規制区間通過による時間損失費用	479,579
計	70,343,258

3.3.3 試算結果の考察

表－16に示すとおり、工事区間における道路利用者費用で大きなウエイトを占めるものは渋滞待ちによる時間損失費用であり、次いで渋滞待ちによるアイドリング費用である。これは、渋滞待ちによる時間損失が大きかったためと考えられる。

なお、図－7によると、最大渋滞待ち時間は約2時間と算出される。現実には2時間の渋滞待ちを行うことは稀であるため、迂回について考慮する必要があるが、迂回の考慮については今後の課題である。

したがって、工事区間の道路利用者費用については、工事区間の渋滞時間に大きく左右されるため、表－16の項目のうち、渋滞待ちによる時間損失費用および渋滞待ちによるアイドリング費用を考慮し、特に渋滞時間については精度良く算定する必要がある。

4. まとめ

表－1 の項目のうち、工事区間における車両走行費用および時間損失費用の算定法が明らかとなった。これにより、平成 13 年度は 1. の「2) 道路管理者、道路利用者、沿道住民などの視点からの LCC の算定方法の提案」の一部が達成できたものと考えられる。

今後は、工事区間の道路利用者費用以外の費用算定法について検討を行うとともに、路面の機能、路面への具体的なニーズ、路面の要件を踏まえた管理目標の設定法や、管理目標とライフサイクルコストを考慮した戦略的維持管理手法について検討を行っていく予定である。

参考文献

1) J. Walls III and M. R. Smith: Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design, FHWA-SA-98-079, 1998.9
2) シンほか：HDM-4 の概要、舗装、Vol36. No.3、pp.33-37、2001.3
3) 東京都ほか：長期供用舗装導入に関する調査検討報告書、2001.3
4) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説、2001.7
5) 日本道路協会：道路の交通容量、1984.9
6) 赤羽：道路交通の渋滞対策、交通工学、1990.2
7) 米谷ほか：交通工学、オーム社、pp.121-123、1965.3
8) 自動車交通局技術安全部環境課：『自動車燃費一覧 12.燃料消費効率向上のための「エコドライブ⑩のおすすめ」』、http://www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpilist/nenpilist.html
9) 道路投資の評価に関する指針検討委員会：道路投資の評価に関する指針（案）、1998.6

Ⅶ　新材料・未利用材料・リサイクル材を用いた社会資本整備に関する研究

研究期間：平成 13 年度～17 年度
プロジェクトリーダー：材料地盤研究グループ長　三木博史
研究担当グループ：技術推進本部（構造物マネジメント技術）、材料地盤研究グループ（新材料、リサイクル、土質）、基礎道路技術研究グループ（舗装）、構造物研究グループ（橋梁構造）

1.　研究の必要性

これからの社会資本整備においては、新材料、新工法による土木構造物の高性能化やコスト縮減、ならびに、従来は使われずに廃棄されていた、または利用率の低かった未利用材料や各種廃棄物のリサイクル材の有効利用による循環型社会形成への貢献がこれまで以上に強く求められるようになってきている。

2.　研究の範囲と達成目標

新材料、未利用材料、リサイクル材の利用技術のうち、本重点プロジェクト研究では、高強度鉄筋、FRP などの新材料の土木構造物への利用技術、規格外骨材などの未利用材料の有効利用技術、建設廃棄物のうち技術開発の余地が多く残されている再生骨材や有機質廃材のリサイクル技術、および公共事業においてユーザーが安心して使える指針の作成が強く求められている他産業廃棄物のリサイクル材の利用技術の開発を行うことを研究の範囲として、以下の達成目標を設定した。

① 高強度鉄筋、FRP などの土木構造物への利用技術の開発
② 規格外骨材などの未利用材料、有機質廃棄物の利用技術の開発
③ 他産業廃棄物のリサイクル技術とリサイクル材利用技術の開発

3.　個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

① 高強度鉄筋の利用技術の開発に関する研究（平成 13～16 年度）
② FRP の道路構造物への適用に関する調査（平成 13～17 年度）
③ 再生骨材・未利用骨材の有効利用技術の開発（平成 13～17 年度）
④ 下水汚泥を活用した有機質廃材の資源化・リサイクル技術に関する調査（平成 14～17 年度）
⑤ 他産業リサイクル材の利用技術に関する研究（平成 11～17 年度）
⑥ 他産業リサイクル材の舗装への利用に関する研究（平成 14～16 年度）

このうち、平成 13 年度は①、②、③、⑤の 4 課題を実施している。

4.　研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、これまでに実施してきた研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1)　高強度鉄筋、FRP などの土木構造物への利用技術の開発

「高強度鉄筋の利用技術の開発に関する研究」では、兵庫県南部地震を契機として見直された耐震設計基準によって過密な配筋が要求されている鉄筋コンクリート（RC）の柱部材の施工性を向上させる方法として、約 1400 MPa の降伏点を持つ高強度鉄筋をせん断補強鉄筋として用いた RC 部材のせん断載荷試験を行い、高強度鉄筋によるせん断補強効果について検討した。その結果、普通強度の鉄筋を用いた RC 部材ではぜい性的なせん断破壊形態を示していたものが、高強度せん断補強鉄筋を用いることにより、曲げ降伏が先行し、じん性の向上に効果

があることが分かった。ただし、いずれの供試体も高強度せん断補強鉄筋が降伏する以前に破壊が生じており、従来のせん断強度評価式の見直しが必要なことが判明した。

今後は、高強度鉄筋を用いてせん断補強した鉄筋コンクリート構造物の耐荷力算定手法（耐荷性能の評価手法）についてさらに検討を進め、高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート部材の設計方法の開発を目指していく予定である。

「FRP の道路構造物への適用に関する調査」では、海塩による厳しい腐食環境に置かれている沿岸地域の道路構造物に対し、耐食性に優れた FRP（繊維強化プラスチック）材料の適用性を検討した。FRP を構造部材として道路構造物へ適用するにあたっては、接合箇所の力学特性がとくに重要となる。そこで、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）を対象に、ボルト接合について静的引張試験および疲労試験を行い、接合部の力学特性について検討を行った。その結果、① ボルト軸力の増大とともに接合強度が増加すること、② 疲労試験の荷重振幅を大きくすると疲労破壊に至る回数が小さくなるが、実際の安全率を考慮した設計では、その影響はほとんど現れないことなどが分かった。

今後は、接合箇所の長期強度について、樹脂クリープによる軸力抜けの検討などを行い、FRP 材料を用いた床版構造の力学特性の解明、構造物としての利用性の評価、さらには FRP 材料の床版への適用方法を提案していく予定である。また、研究期間の後半では、FRP 材料の車道橋への適用方法も提案していく予定である。

(2) 規格外骨材などの未利用材料、有機質廃棄物の利用技術の開発

「再生骨材・未利用骨材の有効利用技術の開発」では、再生クラッシャーランで製造した再生骨材を使用してコンクリートの凍結融解耐久性を検討した。この結果、空気量、水セメント比、単位水量の調整だけでは凍結融解耐久性の改善は難しいことが分かった。

今後は、再生骨材、規格外骨材がコンクリートの性能に及ぼす影響について引き続き検討を進め、再生骨材を使用する場合の品質評価規準案の提案、再生骨材、規格外骨材を有効利用するために必要な各種要素技術の開発を行っていく予定である。

(3) 他産業廃棄物のリサイクル技術とリサイクル材利用技術の開発

「他産業リサイクル材の利用技術に関する研究」においては、公共事業への適用可能性が高いと考えられる他産業リサイクル材を 40 種程度抽出し、工学的性能、環境安全性、施工実績などからその適用性（利用可能分野、用途など）の評価を行った。

今後は、これらの検討結果をとりまとめて「他産業リサイクルの利用技術マニュアル」を作成するとともに、新しいリサイクル材料についても、評価の固まったものから順次、利用技術マニュアルに採り入れ、マニュアルの充実を継続的に図っていく予定である。

7.1　高強度鉄筋の利用技術の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平 13～平 16
担当チーム：技術推進本部（構造物マネジメント技術）
研究担当者：河野　広隆、渡辺　博志

【要旨】
今年度は、せん断補強鉄筋として約 1400MPa の降伏点を持つ高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート(RC)部材のせん断載荷試験を行い、高強度鉄筋によるせん断補強効果について検討した。その結果、普通強度の鉄筋を用いた RC 部材では、ぜい性的なせん断破壊形態を示していたものが、高強度せん断補強鉄筋を用いることにより、曲げ降伏が先行し、じん性の向上に効果があることが分かった。ただし、いずれの供試体も高強度せん断補強鉄筋が降伏する以前に破壊が生じていて、従来のせん断強度評価式において単純に鉄筋の降伏強度を用いることができないことが判明した。
キーワード：鉄筋コンクリート、せん断、高強度鉄筋、じん性、終局強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚など地震荷重の作用する RC 部材では、耐震性能を確保するため、ぜい性的なせん断破壊を防止し、変形性能に優れた曲げ破壊型の破壊形態になるように設計することが重要である。このためには、せん断補強鉄筋を十分に配置する必要がある。しかし、一方では大量のせん断補強鉄筋を配置することは配筋の作業を煩雑にし、施工効率が低下することにもなる。

ここで、せん断補強鉄筋として降伏点の高い高強度鉄筋を用いることができれば、耐震性を向上しながら、同時にせん断補強鉄筋量を減らして施工の効率化を図ることが可能となる。

ところが土木の分野では、高強度せん断補強鉄筋の有効性について十分に実証されていないことから、実用化には至っていないのが現状である。

今年度は、高強度せん断補強鉄筋の効果について概略を把握するため、小型 RC 部材の載荷試験を実施した。以下にその結果と検討内容を報告する。

2. 研究方法

2. 1　実験概要

供試体は全部で 4 体とし、せん断補強鉄筋の強度と、せん断スパン比をパラメータとした。供試体の概略を図-1 および表-1 に示す。なお、コンクリート強度および部材断面形状と主鉄筋配置は全供試体を通じて同一とした。

使用したせん断補強鉄筋の応力ひずみ関係を図-2 に示す。なお、今回用いた普通強度の D6 鉄筋は降伏点の明確な定義が出来なかったため、ここでは降

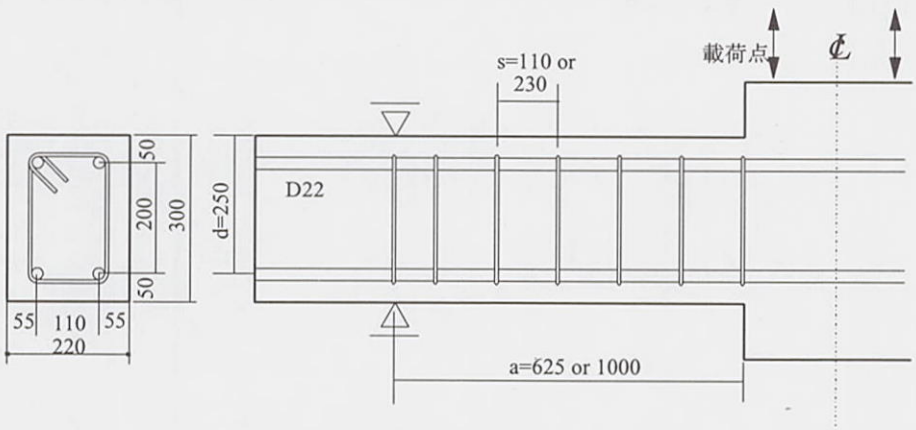


図-1　供試体寸法（単位:mm）

表-2　供試体条件一覧

供試体番号	No.1	No.2	No.3	No.4
a/d	4	4	2.5	2.5
せん断補強鉄筋の種類[1]	N	H	N	H
せん断補強鉄筋の配置間隔(cm)	23	23	11	11
コンクリート強度(MPa)[2]	24.6	25.0	26.1	26.1

注 [1]せん断補強鉄筋の種類はNが普通強度、Hが高強度鉄筋を表す

注 [2]コンクリート強度は、載荷試験当日実施した圧縮強度試験結果を表す。

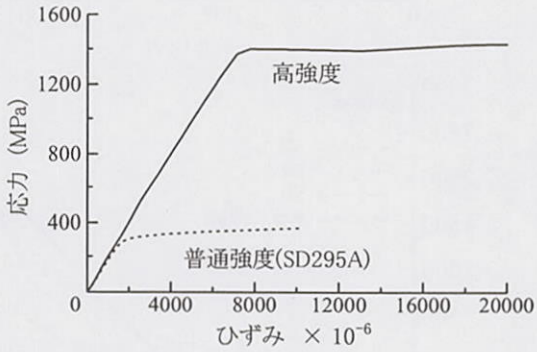


図-2　せん断補強鉄筋の応力ひずみ関係

伏点として規格値（295MPa）を用いて、せん断強度の計算を行うこととした。

2. 2　供試体の曲げ・せん断強度の計算結果

各供試体のせん断終局強度ならびに曲げ終局強度の計算結果を表-3に示す。ここで、せん断終局強度の計算において、せん断補強鉄筋の応力度としては降伏値を用い、トラス理論に従うこととした。曲げ終局強度の計算にあたっては、主鉄筋の応力度として降伏値を用い、鉄筋降伏後のひずみ硬化の影響は考慮しなかった。

この結果によると、計算上はいずれもせん断終局強度が曲げ終局強度を上回り、単調載荷ではせん断破壊が生じないことが予想される。ただし、供試体No.3 では曲げ終局強度に対するせん断終局強度の比が1.14倍とかなり近い値になっているため、破壊形態の判定は微妙であり実際の曲げ強度が計算値を上回った場合には、せん断破壊が生じる可能性もある。

次に、正負交番荷重の作用を想定し、コンクリートの負担するせん断強度が60%に低下した場合を想定してせん断強度を計算した。これによると、供試体No.1 および供試体No.3 はせん断強度が曲げ強度を下回り、正負交番荷重作用時にはせん断破壊することが予想される。これに対し、供試体No.2 およびNo.4 では、高強度せん断補強鉄筋が計算上の仮定通りの性能が発揮されれば、正負交番荷重が作用してもせん断破壊が生じないと判定される。

表-3　供試体の曲げおよびせん断強度計算結果

供試体番号	No.1	No.2	No.3	No.4
曲げ(kN)	113	113	181	181
せん断 1(kN)	147	275	207	473
せん断 2(kN)	103	231	154	420

注）せん断 1 は単調載荷を想定したせん断終局強度であり、せん断 2 は正負交番載荷を想定したせん断強度を表す。

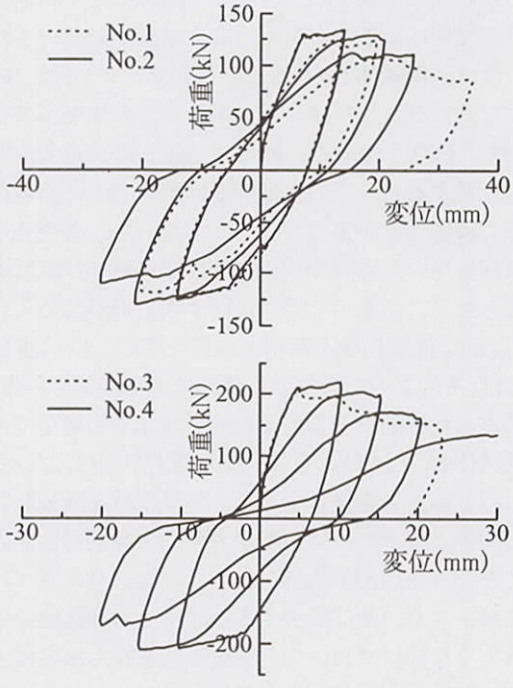


図-3　荷重変位関係の履歴

3. 実験結果

3. 1　供試体の破壊状況について

図-3 に各供試体の荷重変位関係の履歴を示す。主鉄筋降伏前にせん断破壊を生じた供試体 No.3 を除き初回の繰り返しは、主鉄筋の降伏が確実にわかるよう±２δy で繰り返し、その後、荷重低下が明確になるまで、順次δy ずつ振幅を増加させながら繰

り返し回数を一回として載荷を継続した。

まず、高強度せん断補強鉄筋の効果が顕著に認められた供試体 No.4 と No.3 を比較した結果について述べる。

供試体 No.3 は主鉄筋が降伏する直前で荷重が低下し始め、せん断破壊が生じた。最大荷重は 210kN に達していた。表-3 に示すせん断終局強度の計算値を上回る荷重が作用したこととなり、せん断破壊が生じたのは妥当であったと考えられる。

一方、供試体 No.4 ではせん断破壊を生じることなく主鉄筋の降伏が生じていて、高強度せん断補強鉄筋の使用によるせん断耐力向上効果が確認できた。

次に、供試体 No.1 および No.2 については、いずれも曲げ降伏した後、コンクリートの損傷が著しくなり、破壊に至った。No.1 と No.2 の荷重変位関係を比較すると、その差は少ないが、3δy の載荷時点で両者の差が生じている。すなわち、普通強度の鉄筋を用いた供試体 No.1 では、せん断ひび割れが顕著となり、荷重が一時的に低下する点が認められるものの、高強度せん断補強鉄筋を用いた供試体 No,2 では、そのような荷重の一時的な低下が認められず、安定した挙動を示した。しかし、4δy の載荷では、供試体 No.2 においても荷重の低下が明確になった。

以上の結果を総合すると、高強度せん断補強鉄筋の配置によって、せん断耐力の向上や変形性能の向上といった効果が認められる。特に、せん断スパン比が小さく、曲げ降伏する以前にせん断破壊を生じるような部材において、破壊形態をせん断破壊から曲げ破壊に変えることが可能となる。ただし、高強度せん断補強鉄筋を用いた供試体 No.2 では正負交番載荷の条件で計算上せん断破壊を生じないはずであったが、実際には普通鉄筋を用いた供試体 No.1 に比べて、じん性の改善はわずかであり予想通りの効果が認められない場合もあり得る。

3．2　せん断補強鉄筋の効果と部材の損傷状況について

次に、実際にせん断補強鉄筋が負担していたせん断力の大きさと部材の変形状況から、高強度せん断補強鉄筋のもつ高い降伏強度が RC 部材としての性能に十分に生かされていたかどうか確認することとした。

図-4 は供試体 No.3,No.4 のせん断補強鉄筋のひずみと荷重の関係を示したものである。図中には、トラス理論に基づくひずみの予測結果を示している。この結果によると、供試体 No.3 はほぼトラス理論に

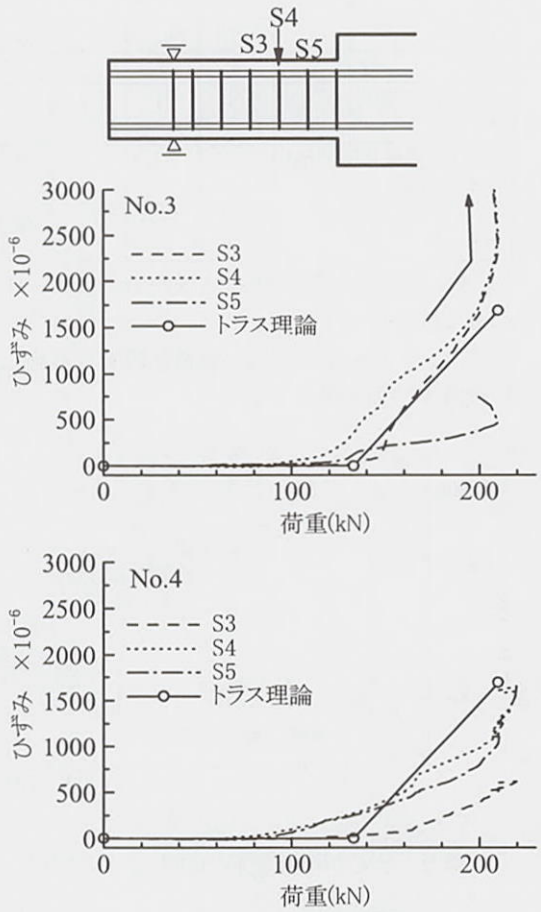


図-4　せん断補強鉄筋のひずみ測定結果

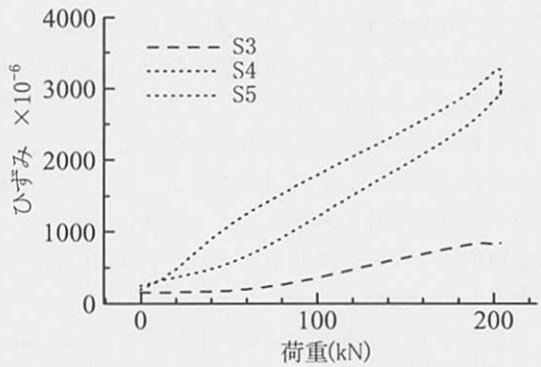


図-5　3δy 載荷でのせん断補強鉄筋ひずみ測定結果(No.4 供試体)

従ってひずみが増加しているが、荷重が 200kN を超えた段階でせん断補強鉄筋の降伏による急激なひずみ増加が認められた。

これに対し、供試体 No.4 もほぼトラス理論に近いひずみ増加が生じていた。ただし、荷重がピークに達した時点でのひずみは鉄筋の材料試験で得られた

降伏ひずみ(0.7%)に対しかなり余裕があることが分かる。

次に、供試体 No.4 の交番載荷後の状況について検討を行う。図-5 は荷重 0 から＋３δｙまでの載荷過程で測定したせん断補強鉄筋ひずみの関係を示したものである。変位が３δｙに達した時点でせん断補強鉄筋に作用する引張応力度は降伏点の 44%に達していた。これは、通常使用する SD295A 相当の鉄筋では負担し得ない量であったことが分かる。ただし、更に載荷振幅を増加させ、＋4δｙのピーク時において測定されたせん断補強鉄筋の引張ひずみは±3δｙ 載荷時点とほぼ同じであり、せん断補強鉄筋に作用する引張応力の増加は認められないにもかかわらず、供試体に作用するピーク時荷重は明らかに低下傾向を示していた。すなわち、せん断補強鉄筋の引張応力度の余裕が有効に活用されないまま、供試体が破壊した。

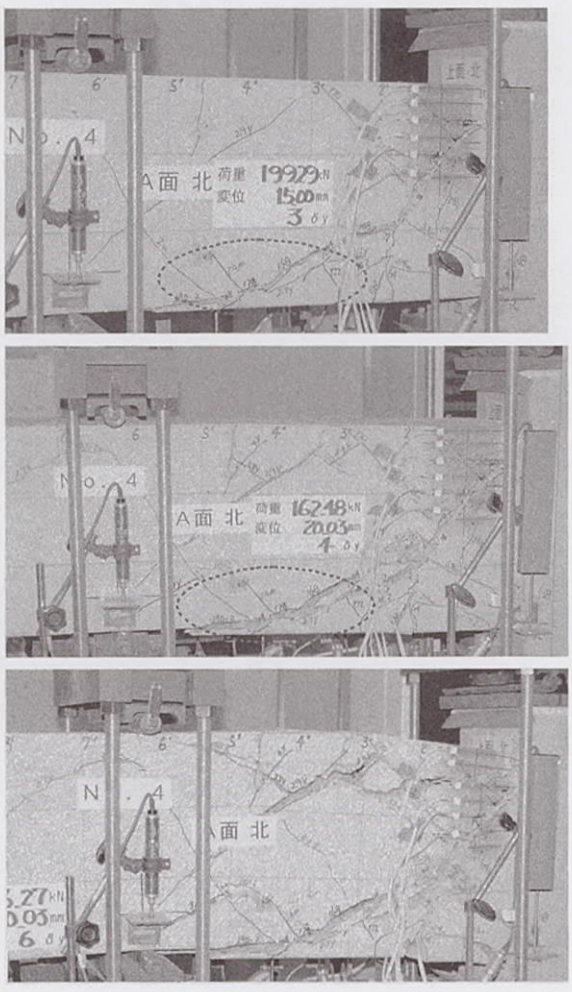


写真-1　供試体 No.4 の３δy, 4δy, 6δｙ載荷時の変形状況

写真-1 は供試体 No.4 において３δｙ、4δｙ、6δｙの載荷での供試体の損傷状況を示したものである。3δｙから 4δｙ間の変形状況の変化を見ると、写真中の青で囲んだ領域あるいは供試体に描かれているけがき線の状況からして、コンクリートの損傷が顕著となる一方、主鉄筋のダウエル作用が損なわれ、主鉄筋とコンクリートの一体性が失われてきていることが予想される。このような状況まで部材の損傷が進行した段階では、主鉄筋を取り囲むように配置されているせん断補強鉄筋へのコンクリートからの応力伝達も不充分なものになっている可能性が高い。すなわち、荷重繰り返しによるコンクリートの損傷が先行したことが、高強度せん断補強鉄筋のもつ引張強度を生かしきれなかったと考えられる。

供試体 No.2 も供試体 No.4 と類似した破壊性状を示していて、せん断補強鉄筋が降伏に達する以前に鉄筋コンクリート構造の基本であるコンクリートと鉄筋の複合作用が機能しなくなったことが、十分な効果が得られなかった理由であると考えられる。

なお、今回実験を行った供試体は断面寸法に比べて主鉄筋径が大きく主鉄筋間隔が狭かったことが、このような結果につながった原因であることも予想される。従って、コンクリート断面を拡大し、相対的な鉄筋径を小さくして、再度検証を行う必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、高強度せん断補強鉄筋の使用によるせん断補強効果の向上について実験的検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

1) 高強度せん断補強鉄筋を用いることによりせん断破壊する RC 部材を、じん性に富む曲げ破壊型に変えることが可能であり、高強度せん断補強鉄筋の効果が認められた。
2) ただし、せん断補強鉄筋のもつ降伏点の高さを十分に生かしきることができず、せん断補強鉄筋が降伏点に達する以前にコンクリートの損傷が大きくなり、部材耐力が失われる場合があることが明らかとなった。

今後は、特にせん断耐力が不足しやすいせん断スパン比の小さい RC 部材を主な対象として、せん断補強鉄筋の有効性を検証するとともに、せん断補強鉄筋の引張強度を有効に活用できる引張強度の上限やせん断補強鉄筋の配筋細目を明らかに必要がある。

7.2 FRPの道路構造物への適用に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平13～平17
担当チーム：材料地盤研究グループ（新材料）
研究担当者：明嵐政司、木嶋　健、西崎　到

【要旨】
沿岸地域の道路構造物は海塩の影響による厳しい腐食環境におかれており、防食対策にかかる費用は膨大なものとなっている。このため、高耐食性構造物の構築技術の一つとして、耐塩害性能に優れた新しい構造材料の開発・導入が求められている。本研究では、耐塩害性能に優れた構造材料として FRP（繊維強化プラスチック）を取り上げ、床版および車道橋等の道路構造物へ構造部材として適用することを検討した。FRP を構造部材として道路構造物へ適用する場合には、接合箇所の力学特性が非常に重要となる。本稿では、FRP の接合箇所に関して、基礎的な実験を行った結果を報告する。
キーワード：FRP、接合、ボルト軸力、静的引張試験、疲労試験

1. はじめに

FRP を構造部材として道路構造物へ適用するにあたっては、接合箇所の力学特性が非常に重要となる。鋼構造物の接合方法としては、摩擦ボルト、リベット、ビス及びピンによる機械的接合が一般的であるが、FRP を構造部材として橋梁へ適用する場合、接合方法の検討は十分になされていない。本研究では、一般的に用いられている GFRP を対象に、ボルト接合について基礎的な静的引張試験および疲労試験を行い、接合部の力学特性について検討を行うこととした。

2. 研究方法

一般的に用いられている GFRP を対象に、ボルト接合に関する静的引張試験および疲労試験を行い、接合部の力学特性を実験的に検討した。静的引張試験については、接合部の基本的な力学特性を把握することを目的として実施した。また、疲労試験については、実際の橋梁では交通荷重により繰り返し載荷されることを考慮して実施することとした。

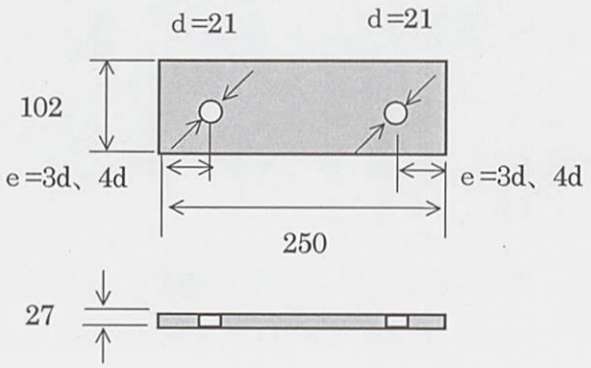
3. 研究結果

3.1 試験体

本研究で用いる FRP 試験体は、構造部材として十分な引張特性（弾性率、強度）を有するものとし、ロービング層（一方向層）の体積比率を高くしている。FRP 試験体は、コンティニュアスストランドマット（CSM）、バイアス、クロス、ロービングの４種類の基材で構成されており、樹脂としてはビニルエステル樹脂を用いている（表－１参照）。ここでは、タイプ１とタイプ２の２種類の FRP 試験体を作成しているが、その違いはタイプ２の試験体については、バイアスの体積比率を増大させて（タイプ１はバイアスが８層、タイプ２はバイアスが 12 層）、せん断強度を増大させた点にある。試験体の外形は、図－１に示すように、厚さ 27mm、長さ 250mm、幅 102mm、孔径 21mm で、縁端距離は 63mm あるいは 84mm である。

表－１　FRP 試験体の基材構成

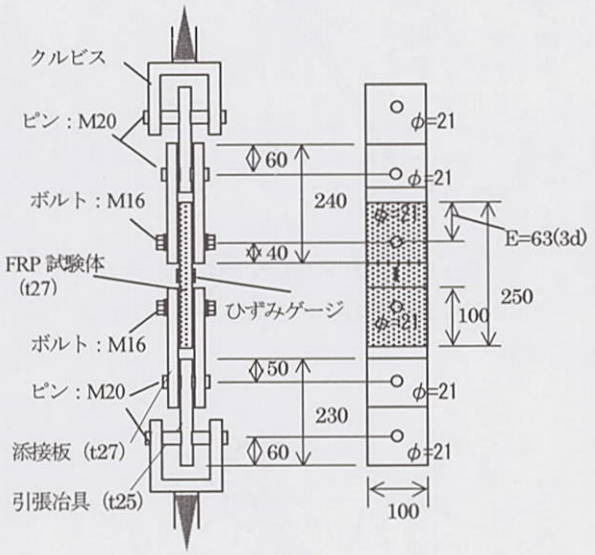
タイプ１		タイプ２	
基　材	体積比率	基　材	体積比率
CSM	1.6%	CSM	1.6%
バイアス	9.4%	バイアス	12%
クロス	2.1%	クロス	2.1%
ロービング	39%	ロービング	36.4%



図－１　試験体の外形

3.2 静的試験

図－２に示すように試験体を設置した。試験体と添接板は軽くボルトで手締めを行っている。添接板はSS400、厚さ 27mm、ボルトは高力ボルト M16（F10T）である。また、添接板と引張治具、引張治具とクルビスはM20 のピンで連結した。引張部材はSS400、厚さ 25mm で、クルビスはSCM440 で製作した。添接板と引張治具、引張治具とクルビスの間にはスペーサは設置されていない。試験体設置後、引張荷重を与え、荷重、試験体中央部のひずみ、破壊形態を調べた。ひずみゲージはFRP 試験体中央の表裏に貼っている。



図－２　試験体の設置状況

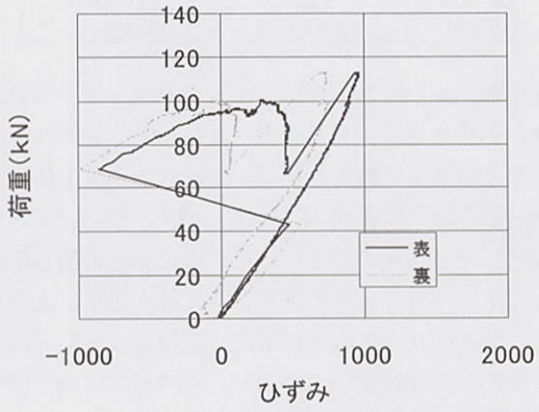
3.2.1 ボルト軸力のないケース

タイプ１及びタイプ２の両方について、縁端距離が大きくなると最大荷重は増大した。また、縁端距離が同じであれば、タイプ２の方が最大荷重は大きくなった。試験結果は表－２に示す通りである。最大荷重を示した破壊モードはボルト穴周辺の圧壊と考えられる。

表－２　接合試験結果

	最大荷重 (kN)	
縁端距離	3d	4d
タイプ１	74.7	112.9
タイプ２	107.1	133.0

荷重とひずみの関係は図－３に示す通りである。載荷と共にゲージの値も線形的に大きくなり、その後、若干の凹凸を描きながら最大荷重を示した。最大荷重の前にグラフが若干の凹凸を示しているのは、ボルト穴周辺で圧壊が部分的に生じたためと考えられる。ボルト穴周辺の圧壊が部分的に生じた後、荷重とひずみが増大し、最終的に試験体の全面的な圧壊に至ったと考えられる。



図－３　荷重－ひずみ線図

3.2.2 ボルト軸力のあるケース

ボルト軸力をかけた試験においては、FRP 試験体としてタイプ１の試験体を用いた。検討した接合方法は、①高力ボルトのみによる接合方法、②高力ボルトと粘着テープを併用した接合方法、③高力ボルトと接着剤を併用した接合方法、の３種類である。それぞれの接合方法の内容は、下記に示す通りである。

①高力ボルトのみによる接合方法

FRP 試験体と鋼板の表面に特別な処理をしないままで試験を行う。

②高力ボルトと粘着テープを併用した接合方法

ボルト軸力のみで十分な摩擦力を得ることが困難と考えられるため、粘着テープを併用した高力ボルト接合について試験を行う。粘着テープは、住友スリーエム社 VHB-V-45 を使用した。なお、粘着テープの機械的性質は表－３に示す通りである。

③高力ボルトと接着剤を併用した接合方法

接着剤を併用した高力ボルト接合について試験を行う。接着剤としては、一般的な接着剤であるセメダイン社製の EP-007 と高強度接着剤である富士インダストリー製の HYSOL-EA-9309A を用いた。価格は、HYSOL-EA-9309A が EP-007 の約７倍となっている。EP-007 と HYSOL-EA-9309A の機械的性質は表－４に示す通りである。

表－３　粘着テープの機械的性質

	せん断接着力 (MPa)	引張接着力 (MPa)
VHB-V45	1.0	1.18

表－４　接着剤の機械的性質

	せん断接着力 (MPa)	弾性係数 (MPa)
EP-007	22.0	3000～5000
HYSOL	34.5(25℃)	2069(25℃)

ボルト軸力をかけた接合試験ケースを表－５、各試験ケースに対応する最大荷重を表－６に示す。各ボルト軸力での最大荷重を比較すると、接着剤（HYSOL）併用が最も大きく、次に接着剤（EP-007）併用、高力ボルトのみ、粘着テープ併用の順となった。また、どの接合形式に対しても、ボルト軸力の増加と共に最大荷重は大きくなった。高力ボルトのみと粘着テープ併用については、ボルト軸力が 80kN 以上の場合に、最大荷重は余り増大しなかった。

表－５　ボルト軸力のある接合試験ケース

軸力	高力ボルトのみ	粘着テープ併用	接着剤併用	
			EP-007	HYSOL
172kN	○	－	－	－
115kN	○	○	○	○
80kN	○	○	○	○
57kN	○	○	○	○
0kN	○	－	－	○

表－６　ボルト軸力のある接合試験結果（単位：kN）

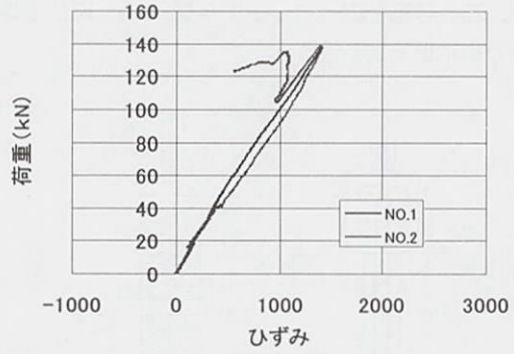
軸力	高力ボルトのみ	粘着テープ併用	接着剤併用	
			EP-007	HYSOL
172kN	151.4	－	－	－
115kN	141.4	134.7	220.7	273.2
80kN	138.9	132.5	198.9	258.7
57kN	125.1	113.1	196.7	247.4
0kN	74.7	－	－	217.3

高力ボルトのみの場合には、円孔のみで荷重を受ける支圧接合の結果（表－６中のボルト軸力 0kN）と比べて最大荷重は大きくなり、基本的にボルト軸力を増大させると最大荷重も増大する結果となった。なお、高力ボルトのみの荷重－ひずみ線図は図－４に示す通りである。

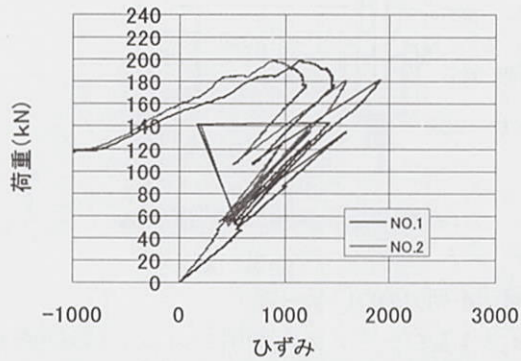
粘着テープ併用の場合には、高力ボルトのみの場合に比べて最大荷重が低下した。これは、テープがせん断変形を起こすため、軸力のないケースと同様に FRP が直接ボルトにより引っ張られたためと考えられる。

接着剤併用について見ると、ボルト軸力が 57kN の場合には、ピーク荷重まで荷重の低下は殆どなかった。つまり、接着剤の部分的剥離などの影響は余りなかったと考えられる。一方、ボルト軸力が 80kN および 115kN の場合には、ピーク荷重の前に接着層の剥がれるような音がした。また、ボルト軸力が 80kN の荷重－ひずみ線図（図－５参照）を見ると、直線的に荷重が上がり、その後曲線的な挙動を示し、最大荷重となったことが分かる。なお、いずれのボルト軸力に対しても接着剤の層で破壊を起こしていた。

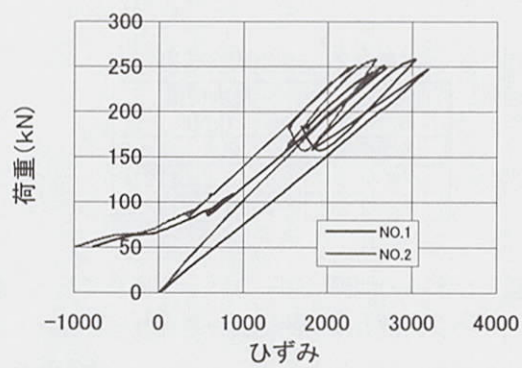
接着剤として HYSOL を用いた場合には、ボルト軸力が 0kN、57kN、80kN、115kN のいずれのケースにおいても、最大荷重が EP-007 よりも大きかった。破壊様式も EP-007 とは異なり、接着層の剥離以外に FRP 内部における層間剥離も見られた。荷重－ひずみ線図を図－６に示す。



図－４　軸力が 80kN における接合（高力ボルトのみ）の荷重－ひずみ線図



図－５　軸力が 80kN における接合（高力ボルトと接着剤 EP-007 併用）荷重－ひずみ線図



図－６　軸力が 80kN における接合（高力ボルトと接着剤 HYSOL 併用）荷重－ひずみ線図

3.3 疲労試験

試験体としてはタイプ 1 を用いた。試験体の外形は、厚さ 27mm、長さ 250mm、幅 102mm、孔径 21mm で、縁端距離は 63mm である。疲労試験は、静的引張試験の場合と同様に図－2のように試験体をセットし、繰り返し荷重を与えて試験を行った。添接板と引張治具、引張治具とクルビスの間にはスペーサを設置していない。また、周波数は 6Hz として試験を行った。

3.3.1 ボルト軸力のないケース

試験結果は表－7に示す通りである。静的破壊荷重の 35%、47%においては、300 万回を超えても疲労破壊を生じなかったが、静的破壊荷重の 54%においては 143 万回、68%においては約 16 万回で疲労破壊を生じた。

表－7　ボルト軸力のない接合疲労試験結果

	最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)	荷重振幅／静的最大荷重	破壊回数
静的最大荷重 (74.7kN)	27.0	1.0	0.35	3,120,000 以上
	36.0	1.0	0.47	4,000,000 以上
	41.0	1.0	0.54	1,430,000
	52.0	1.0	0.68	159,000

3.3.2 ボルト軸力のあるケース

ボルト軸力をかけた場合には、添接板と FRP 母材とが滑らない限りは、FRP 母材の疲労破壊が生じないため、ボルト軸力のないケースに比べて疲労強度は大幅に向上すると考えられる。従って、ここでは添接板と FRP が滑るまでの回数を求めた。なお、粘着テープ併用試験体 1 体に関しては、添接板と FRP が滑った後の母材せん断破壊までの回数を求めた。検討を行った接合方法は、静的引張試験の場合と同様、①高力ボルトのみによる接合方法、②高力ボルトと粘着テープを併用した接合方法、③高力ボルトと接着剤を併用した接合方法、の 3 種類である。ただし、接着剤については、EP-007 のみを使用した。

試験結果は表－8に示す通りである。

高力ボルトのみによる接合のケースについては、静的最大荷重の 21%～85%にある荷重範囲に対して、繰り返し数が 200 万回を超えても添接板と FRP 試験体との間にずれは生じなかった。

高力ボルトと粘着テープを併用したケースについては、静的最大荷重の 74%に対して約 3500 回で破壊を生じた。しかし、静的最大荷重の 30%に対しては、200 万回以上繰り返しても滑りは生じなかった。

表－8　ボルト軸力のある接合疲労試験結果（軸力：115kN）

	最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)	荷重振幅／静的最大荷重	滑動回数
高力ボルト (141.4kN)	31.0	1.0	0.21	2,000,000 以上
	41.0	1.0	0.28	2,295,000 以上
	61.0	1.0	0.42	2,000,000 以上
	121.0	1.0	0.85	2,000,000 以上
粘着テープ (134.7kN)	41.0	1.0	0.30	2,000,000 以上
	101.0	1.0	0.74	3,590
接着剤 (180.8kN)	81.0	1.0	0.44	2,000,000 以上
	101.0	1.0	0.55	2,000,000 以上
	121.0	1.0	0.66	2,000,000 以上
	141.0	1.0	0.77	438,500

高力ボルトと接着剤を併用したケースについては、静的最大荷重の 77%に対して約 44 万回で添接板と FRP 試験体が滑った。静的最大荷重の 66%以下では、200 万回以上繰り返しても破壊は生じなかった。

4. まとめ

1）ボルト軸力のあるケースとないケースについて静的引張試験を行った結果、ボルト軸力のあるケースの接合強度が高くなることが確認された。また、接合強度については、基本的にボルト軸力を増大させると、増加していくことが確認された。今後、長期強度を検討する場合には、樹脂クリープによる軸力抜けを把握することが重要である。

2）疲労試験を行った結果、今回検討を行った試験体については、荷重振幅を大きくすると疲労破壊に至る回数が小さくなることが分かった。しかし、実際の設計では安全率を考慮するため、その影響は殆ど現れないと考えられた。

7.3 再生骨材・未利用骨材の有効利用技術の開発

研究予算：運営交付金（一般勘定）
研究期間：平 13 ～平 17
担当チーム：技術推進本部（構造物マネジメント技術）
研究担当者：河野広隆、片平博

【要旨】
本研究は、コンクリート解体材および従来廃棄されていた規格外骨材をコンクリート用骨材として有効利用するための要素技術の開発と品質評価規準の提案を目指すものでる。13年度は、一般的に生産される再生クラッシャーラン程度の品質の再生骨材を使用したコンクリートの凍結融解耐久性について検討した。一般に再生骨材を使用したコンクリートは凍結融解耐久性が劣るが[1)]、これに対して空気量、単位水量、水セメント比等の配合条件を工夫することによって凍結融解耐久性の改善が可能かどうか、実験的な検討を行った。この結果、今回の配合の範囲では凍結融解耐久性の改善は見られなかった。
キーワード：再生骨材、凍結融解耐久性、圧縮強度、長さ変化、空気量

1. はじめに

自然環境の保全、資源の有効利用の観点から、建設廃棄物の削減や建設廃棄物のリサイクル利用が求められている。このため、コンクリート解体材においても、その再利用技術の確立が望まれている。また、骨材採取場等における環境改変を極力抑制するため、規格外骨材として廃棄される岩石の有効利用方法が求められている。

本研究は、コンクリート解体材および従来廃棄されていた規格外骨材をコンクリート用骨材として有効利用するための要素技術の開発と品質評価規準の提案を行うことを目的としている。

コンクリート解体材の再利用の現状としてはそのほとんどが道路路盤材である再生クラッシャーランとして再利用されている。この理由としては、再生クラッシャーランはコンクリート用再生骨材に比べて要求性能レベルが低く、生産コストが低く押さえられるためである。一方、コンクリート用再生骨材についての現状の要求性能基準は厳しく、それを満足するためには多大な処理コストが必要である。

13年度は、一般的に生産される再生クラッシャーラン程度の品質の再生骨材を使用したコンクリートの凍結融解耐久性について検討した。すなわち、これまでの研究から、再生骨材を使用するとコンクリートの凍結融解耐久性が低下することが分かっている。これに対して空気量、単位水量、水セメント比等の配合条件を工夫することによって凍結融解耐久性の改善が可能かどうか、実験的な検討を行った。

また、これにあわせて、再生骨材コンクリートの圧縮強度および長さ変化試験を実施した。

2. 実験方法

2.1 再生骨材の物性

今回の実験では粗骨材のみを再生骨材とし、細骨材には川砂を使用した。

再生粗骨材には一般的に普及している再生クラッシャーランを使用した。再生クラッシャーランをフルイにかけ、粒径 5 ～ 10mm と 10 ～ 20mm に一度分類し、これを3：5の割合で混合したものを再生骨材として使用した。それ以外の粒度の材料は廃棄した。

再生骨材に対して、密度試験、吸水率試験、安定性試験を実施した結果を表－1に示す。再生骨材の基準については平成6年に建設省大臣官房技術調査室長より「コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準（案）」が出されているが、この基準（案）のコンクリート用骨材の基準に当てはめると、今回の再生骨材は3種に該当し、構造用のコンクリートには適用できない品質である。

表－1　再生骨材の品質試験結果

粒　　度　　(mm)	5 ～ 10	10 ～ 20
密　　度　　(g/cm^3)	2.44	2.46
吸 水 率　　(%)	4.58	3.77
安定性損失質量(%)	10.6	20.6

表－2　再生骨材以外のコンクリート材料の物性

比較用粗骨材	最大粗骨材寸法 20mm，硬質砂岩，密度: 2.67g/cm^3，吸水率: 0.61 %
細骨材	川砂，密度: 2.61g/cm^3，吸水率: 1.05 %
セメント	普通ポルトランドセメント，密度: 3.16g/cm^3，比表面積: 3,230cm^2/g
混和剤	AE減水剤:リグニンスルホン酸塩，AE剤:界面活性剤

表－3　コンクリート配合

配合 No.	粗骨材 種類	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m^3)	セメント量 (kg/m^3)	粗骨材量 (kg/m^3)	細骨材量 (kg/m^3)
①	比較	18	4.5	55	185	336	922	833
②	再生	18	4.5	55	185	336	844	835
③	再生	18	7.0	55	170	309	844	830
④	再生	18	7.0	50	168	336	851	806
⑤	再生	8	4.5	55	160	291	932	840

2.2 再生骨材以外の材料物性

再生骨材以外のコンクリート材料の物性は表－2に示すとおりである。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合は表－3に示す5配合を設定した。各配合の設定条件を以下に述べる。

配合①:比較用の普通骨材を使用した配合であり、スランプ 18cm 、空気量 4.5 %、水セメント比 55 %とした。

配合②:粗骨材に再生骨材を使用し、その他の配合条件は配合①と同一とした。

配合③:配合②に対して水セメント比一定の条件で空気量を 7.0 %とした。

配合④:配合③に対して、水セメント比を 50 %まで下げた。

配合⑤:配合②に対して水セメント比一定の条件で単位水量を減少させ、スランプを8 cm とした。

2.4 試験内容

表－3に示す配合のコンクリートを練り上げ、フレッシュ性状としてスランプと空気量を測定した後、以下の試験を実施した。

(1)圧縮強度試験

φ 10 × 20cm の円柱供試体を各配合ごとに3本ずつ作製し、水中養生を行い、材齢 28 日で圧縮強度試験(JIS A 1108)を実施した。

(2)凍結融解試験

10 × 10 × 40cm の角柱供試体を各配合ごとに3本ずつ作製し、水中養生を行い、材齢 28 日から凍結融解試験を実施した。

試験方法は JIS A 1148 の水中法に従い、供試体中心温度が＋ 5 ℃～－ 18 ℃で1サイクル4時間の条件とした。測定は0, 10, 25, 40, 60, 80, 100, 140, 180, 220, 260, 300サイクルにて一次共鳴振動数および質量を測定し、相対動弾性係数および質量減少率を式(1), (2)から算出した。

$$P_n=(f_n^2 / f_0^2)\times 100 \qquad (1)$$

ここに、P_n :凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数(%)

f_n :凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)

f_0 :凍結融解0サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)

$$W_n=(w_0 - w_n)/ w_0 \times 100 \qquad (2)$$

ここに、W_n :凍結融解 n サイクル後の質量減少率(%)

w_n :凍結融解 n サイクル後の供試体の質量(g)

w_0 :凍結融解0サイクルにおける供試体の質量(g)

(3)長さ変化試験

10 × 10 × 40cm の角柱供試体を各配合ごとに1

本ずつ作製し、水中養生を行い、材齢7日から室温20 ℃、湿度 50 %の条件で6ヶ月間、長さと質量の変化を測定した(JIS A 1129)。長さの測定はダイヤルゲージ法によって行い、長さ変化量を基長(400mm)で除して長さ変化率を求めた。また質量の測定結果から質量変化率を求めた。質量変化率の求め方は基本的に式(2)と同じである。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

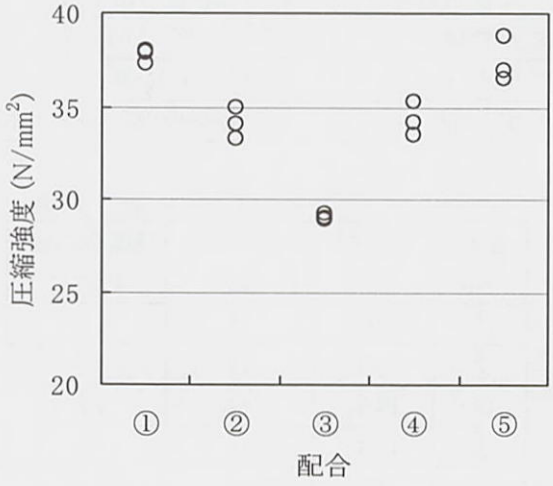
圧縮強度試験結果を図－1に示す。各配合ごとの強度の違いは以下のとおりであった。

配合①は比較用粗骨材の配合である。配合②は配合①と同じ配合で粗骨材のみを再生骨材に置き換えた配合であるが、圧縮強度は配合①に比較して4 N/mm^2 程度低下した。

配合③は配合②に対して空気量を増加させた配合であるが、空気量の増加によって圧縮強度は配合②に比較して 5N/mm^2 程度低下した。

配合④は配合③に対して水セメント比を下げた配合であるが、圧縮強度は配合②と同程度となった。なお、配合④は配合②の単位水量の一部を空気量に置き換えた配合に近いものでもあり、このような配合変更を行っても強度は変化しないものと考えられる。

配合⑤は配合②に対して単位水量を減少させ、スランプを8 cm とした配合であるが、圧縮強度は②配合よりも若干高い値を示した。

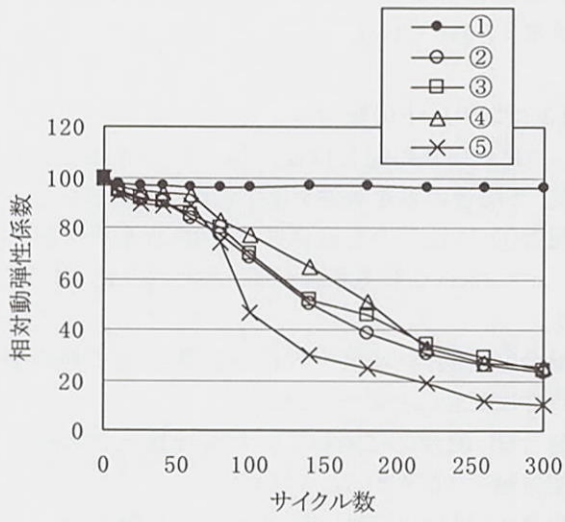


図－1 圧縮強度試験結果

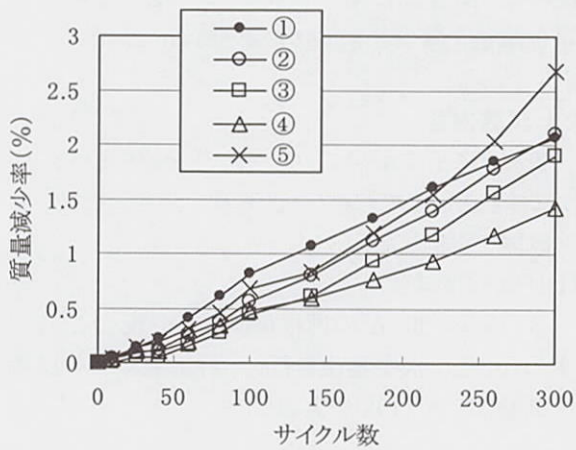
3.2 凍結融解耐久性

相対動弾性係数を図－2に示す。比較用骨材を使用した配合①は 300 サイクル終了時点でも 100 %に近い値を示し、良好な結果であったが、配合①と同じ配合条件で粗骨材のみを再生骨材とした配合②は相対動弾性係数が大きく低下し、 300 サイクル終了時点の値(耐久性指数)は 21 %となった。配合②に対して空気量を増加させた配合③についても耐久性の改善は見られなかった。配合③に対して水セメント比を下げた配合④でも耐久性の向上はほとんど認められなかった。配合②に配合に対して単位水量を低下させた配合⑤では相対動弾性係数はさらに低下する結果となった。以上の結果から、今回の配合の範囲では凍結融解耐久性の向上は見られなかった。

配合⑤の耐久性が配合②よりも低くなった点については、一般的なコンクリートでの「水セメント比一定の条件では単位水量が少い配合ほど耐久性は高い」



図－2 凍結融解試験結果(相対動弾性係数)



図－3 凍結融解試験結果(質量減少率)

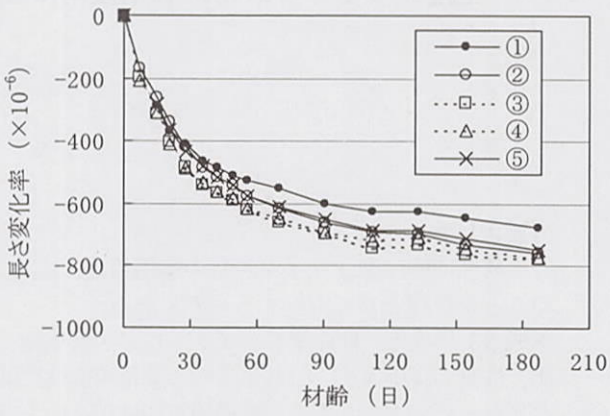
とう定説に反した結果であった。この理由については、再生骨材コンクリートの場合は、モルタルよりも粗骨材の耐久性が低いことが考えられ、このために、再生粗骨材量の多い配合⑤のほうが耐久性が低くなったと考えられる。

質量減少率を図－3に示す。質量減少率は配合④でやや小さく、それ以外の配合では概ね同程度の結果となった。この理由としては、質量減少はおもにモルタル部分の剥落によるものと考えられ、モルタル部分の耐久性は水セメント比に依存するためと考えられる。

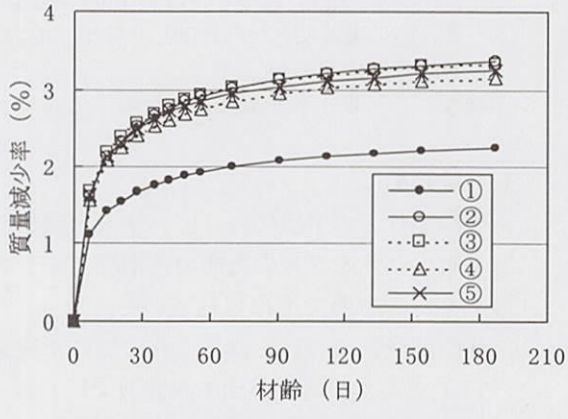
3.2 長さ変化

長さ変化試験結果を図－4に示す。材齢 182 日経過時点の長さ変化率は比較用骨材を使用した配合①で約 650 × 10^{-6} 程度であり、再生骨材を使用した配合②～⑤では 750 × 10^{-6} 程度で、配合①よりもわずかに大きい程度であった。配合②～⑤のなかでは空気量を増加させた配合③④がわずかに大きかった。

長さ変化試験中の供試体の質量減少率を図－5に示す。比較用骨材を使用した配合①に比較して、再生骨材を使用した配合②～⑤の質量減少率は約1％大きい結果となった。この量は概ね粗骨材の吸水率の違いに相当する量であった。



図－4 長さ変化試験結果(長さ変化率)



図－5 長さ変化試験結果(質量減少率)

4. まとめ

(1)再生骨材コンクリートの凍結融解耐久性の改善を目指し、空気量、単位水量、水セメント比等の配合条件を変化させたが、今回の配合の範囲では凍結融解耐久性の改善は見られなかった。

(2)今回検討した配合における再生骨材コンクリートの強度特性として、①再生骨材を使用すると低下する、②空気量を増加させると低下する、③配合中の水の量を空気に置き換えても強度は変わらない、という傾向が認められた。

(3)長さ変化試験の結果、乾燥に対する収縮量は普通骨材を使用した配合に比較して再生骨材を使用した配合では僅かに大きくなる傾向が認められた。また乾燥による質量減少量の違いは概ね粗骨材の吸水率に違いに相当する量であった。

参考文献

1)片平博:再生骨材の品質がコンクリートの性能に与える影響, セメント・コンクリート, No.654 , pp.38-44 , 2001

7.4 他産業リサイクル材の利用技術に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）
研究期間：平 11～平 17
研究担当グループ：材料地盤研究グループ（新材料）
研究担当者：明嵐政司（上席）、中村俊彦

【要旨】
本研究は他産業リサイクル材の適用用途に応じた評価手法を提案するとともに公共事業への適用性を評価することを目標として実施するものである。
平成 13 年度は、他産業リサイクル材の公共事業への利用可能性を明らかにするため、他産業リサイクル材の抽出、性質の評価方法、公共事業への適用可能性に関する検討を行った。本検討の成果として、以下のことが明らかとなった。①公共事業への適用可能性が高いと考えられる他産業リサイクル材を 40 種程度抽出した。②各他産業リサイクル材の「工学的性能」については従来の建設材と同様の試験法により適用可能であるものが多かったが、「環境安全性」については適用前に確認が必要なものが多く使用には留意が必要なことが明らかになった。③性質と施工実績などから評価した結果、検討対象とした多くのリサイクル材は公共事業への適用可能性が高いことが明らかになった。
キーワード：リサイクル材、他産業、評価

1. はじめに

循環型社会の実現にむけて、建設副産物や産業廃棄物のリサイクルのための技術開発やシステムづくりが各方面で進められている。

建設副産物については、これまでに参考文献[1)~5)]に示すような研究が土木研究所で行われ、マニュアルの作成など研究結果が社会へと還元されている。一方、他産業からの産業廃棄物も処分場の逼迫や処分費の高騰を背景に、そのほとんどが土木材料への適用性を模索しており、各種の再生資材の開発や新しい利用法の検討が活発に行われている[6)]。

本研究では、他産業リサイクル材の種別ごとに適用用途に応じた性質の評価手法を提案し、他産業リサイクル材の公共事業への適用性を評価することを目的としている。さらに、評価の固まったものから順次、利用技術マニュアルをとりまとめ、建設分野への他産業リサイクル材利用技術の確立を図る。

平成 13 年度は、公共事業における他産業リサイクル材の試験施工及び施工後の調査結果、あるいは他産業リサイクル材を開発した機関による取得データを文献調査などによりとりまとめ、表-1に示す、3項目に関する検討を行った。

2. 検討結果

2.1 公共事業への適用性の高い他産業リサイクル材の抽出

表-1 平成 13 年度検討内容と方法

検討内容	検討方法
公共事業への適用性の高い他産業リサイクル材の抽出	文献検索やヒアリングなどにより抽出
公共事業への適用性の高い他産業リサイクル材の評価方法の検討	他産業リサイクル材の製造方法や性状、性能と適用用途から検討
公共事業への適用性の高い他産業リサイクル材の適用可能性の検討	他産業リサイクル材の公共事業におけるパイロット事業や現場での追跡調査あるいは開発者の提供データをもとに検討

文献検索や聞き取り調査などにより公共事業への適用性が高いと考えられる他産業リサイクル材を抽出した。

その結果、以下の 8 種類の廃棄物を原材料としたリサイクル材が既に実用化もしくは公共事業への適用を目指して開発中であり、公共事業への適用性が高いと判断された。

① 一般廃棄物、一般焼却灰
② 下水汚泥
③ 石炭灰
④ 廃ガラス
⑤ 古紙
⑥ ゴム(廃タイヤ)
⑦ プラスチック
⑧ 廃木材

これらの各廃棄物を原材料としたリサイクル材の処理技術と想定される適用用途については別表

-1 に示した。

なお、ここで抽出された他産業リサイクル材の他にも多くの公共事業へ適用可能なリサイクル材が存在すると考えられる。そのため、次年度以降も引き続き情報収集を進める予定である。

2.2 公共事業への適用性の高い他産業リサイクル材の評価方法の検討

前節において抽出した他産業リサイクル材を対象に製造方法や性状、性能、適用用途について文献調査などにより調査を行い、強度や耐久性などの「工学的性能」と有害物質の溶出可能性などの「環境安全性」の二つの側面から各他産業リサイクル材を評価する方法について検討した。

その結果は、別表- 1 に示す通りである。平成 13 年度に検討の対象とした他産業リサイクル材のほとんどは、「工学的性能」に関しては現在公共事業において使用している他の建設資材と同様の試験方法により使用可能であるが、「環境安全性」の確認のため溶出試験などを行う必要があることが明らかになった。

しかし「環境安全性」の確認手法は、製造方法や適用用途から評価方法がある程度絞られるため、今後体系化を行いマニュアルに反映させたいと考えている。具体的には、製造過程において 800℃以上の高温処理された他産業リサイクル材からはダイオキシン類がその製造過程で分解されるため試験する必要がないことなどが挙げられる。

2.3 公共事業への適用性の高い他産業リサイクル材の適用可能性の検討

前節において検討した「工学的性能」や「環境安全性」といったリサイクル材の持つ性質と、各地で行われてきた施工実績などをもとに、各他産業リサイクル材の公共事業への適用可能性の評価を行った。

評価の結果は別表-1 の通りである。平成 13 年度に検討した他産業リサイクル材のうち半数以上が、公共事業への適用可能性が高いと考えられることが明らかになった。

今後、適用可能性が高いと評価された他産業リサイクル材については、現場施工データの収集等を行うとともに、利用技術マニュアルのとりまとめを行う予定である。一方、平成 13 年度に適用可能性が高いと評価された他産業リサイクル材以外のものについても、引き続きデータの蓄積を行い、利用技術の検討を継続する予定である。

3. 結論

平成 13 年度の成果は以下の通りである。

① 公共事業への適用可能性が高いと考えられる他産業リサイクル材を 40 種程度抽出した。

② 各他産業リサイクル材の評価方法について検討した結果、「工学的性能」については従来建設材と同様の試験法により適用可能であるものが多かったが、「環境安全性」については適用前に確認が必要なものが多く使用には留意が必要なことが明らかになった。

③ 検討対象とした他産業リサイクル材の公共事業への適用可能性について、リサイクル材の性質と施工実績などから評価した結果、多くのリサイクル材の公共事業への適用可能性が高いことが明らかになった。しかし、長期の安全性などまだ明らかになっていない点が多いため、引き続きデータの収集を行う必要があると考える。

なお、今後は引き続きデータの収集を行うとともに、他産業リサイクルの利用技術マニュアルのとりまとめのため、さらに検討を加える必要がある。

参考文献

1) 三木博史：建設発生土の有効利用の現状と課題、地質と調査、2000.3、pp.2-5.
2) 建設発生土利用技術マニュアル検討委員会：建設発生土利用技術マニュアル（第 2 版）、（財）土木研究センター、1997.10.
3) 建設発生土利用促進検討委員会：発生土利用促進のための改良工法マニュアル、（財）土木研究センター、1997.12.
4) 小橋秀俊・三木博史・山田哲也・藤井厚企・小畑敏子：建設発生土のリサイクル技術とコスト縮減、土木技術資料、Vol.42、No.5、pp.40-45、2000.5.
5) 三木博史・古本一司：流動化処理土による地中埋設管の施工コスト縮減効果、土木技術資料、Vol.42、No.5、pp.46-51、2000.5.
6) 建設省土木研究所材料施工部新材料開発研究官：公共事業における試験施工のための他産業再生資材試験評価マニュアル案、土木研究所資料第 3667 号、1999.9.

別表－1　他産業リサイクル材に関する検討結果

リサイクル材	処理技術	適用先	評価方法		適用可能性
			工学的性能	環境安全性	
一般廃棄物、一般焼却灰	溶融固化	舗装の路盤材料	◎	○	◎
		アスファルト舗装の表基層用骨材	◎	○	◎
		コンクリート用骨材(現場施工)	◎	○	◎
		コンクリート用骨材(工場製品)	◎	○	◎
		埋め戻し材	◎	○	○
	焼結・焼成固化処理	舗装の路盤材料	◎	○	◎
	焼成処理によるセメント化	普通エコセメント	◎	◎	◎*
		速硬エコセメント	◎	◎	◎*
下水汚泥	溶融固化処理	舗装の路盤材料	◎	○	◎
		アスファルト舗装の表基層用骨材	◎	○	◎
		コンクリート用骨材(現場施工)	◎	○	◎
		コンクリート用骨材(工場製品)	◎	○	◎
	焼結・焼成固化処理	工場製品	◎	○	◎
石炭灰	溶融固化	工場製品(ブロックなど)	◎	○	△
		アスファルト舗装の表層骨材	◎	○	◎
	粉砕処理	アスファルト舗装用フィラー	◎	○	○
	セメント混合固化	盛土・人工地盤材料	◎	○	◎
	セメント固化粉砕	路盤材	◎	○	◎
		地盤改良材	○	○	○
	石灰混合固化	路盤材	◎	○	◎*
	水熱固化	舗装の路盤材料	○	○	○
	焼成	人工軽量骨材	◎	◎	◎
		セメント原料	◎	◎	◎
	無処理	セメント混合材	◎	◎	◎
		フライアッシュセメント	◎	◎	◎*
		盛土材	◎	○	○
		中詰め材	○	◎	○
		裏込材	○	○	○
		土質改良材	○	○	○
		路盤材	◎	○	○
		路床材	◎	○	○
		コンクリート混和材	◎	◎	◎

別表—1　他産業リサイクル材に関する検討結果(つづき)

リサイクル材	処理技術	適用先	評価方法		適用可能性
			工学的性能	環境安全性	
廃ガラス	粉砕処理	舗装の路盤材料	◎	○	◎
		アスファルト舗装の表層用骨材	○	○	◎
		樹脂系舗装の表層用骨材	◎	○	◎
		インターロッキングブロック用骨材	○	○	○
	粉砕焼成処理	建築資材(タイル・ブロック)	◎	○	◎
	溶融・発泡	緑化保水材	◎	○	○
		湧水処理材	◎	○	○
		地盤改良材	◎	○	○
		盛土材	○	○	◎
		軽量骨材	◎	○	○
		軽量ポーラス骨材	◎	○	○
古紙	粉砕熱圧処理	コンクリート型枠	○	◎	○
ゴム(廃タイヤ)	粉砕処理、ゴム再生処理	アスファルト舗装用骨材(添加材)	◎	○	◎
プラスチック	プラスチック再生処理	工場製品(擬木、杭)	○	○	○
廃木材	無処理	永久型枠材	△	△	○
		土木用資材	△	△	○
	チップ化	緑化基盤材	◎	○	◎
		マルチング材	○	○	◎
		歩行者用舗装	○	○	◎
	チップ化堆肥化	緑化基盤材	◎	○	◎
	木粉＋プラスチック	型枠材	△	△	○
	炭化	土壌改良材	△	△	○
		護岸用土留め材	△	△	○
		油吸着材	△	△	○

※　凡例については別表-２を参照

別表-2　別表-1の凡例

	◎	○	△
工学的性能	性能が規格により規定されている、または一般的な建設材と同様の試験を行えばよい。	利用する際にはそのリサイクル材独自の方法での性能の確認が必要である。	データの蓄積が不十分なため引き続き検討が必要である。
環境安全性	安全性が既往の調査などにより規定されている。	利用する際には所定の方法での安全性の確認が必要である。	データの蓄積が不十分なため引き続き検討が必要である。
適用性	公共事業への適用可能性が高い。(*がついているものは一部用途に制限のあることを示す)	試験施工などにより工学的性能及び環境安全性を確認して利用する必要がある。	データの蓄積が不十分なため引き続き検討が必要である。

Ⅷ　環境に配慮したダムの効率的な建設・再開発技術に関する研究

研究期間：平成 13 年度～17 年度
プロジェクトリーダー：水工研究グループ長　高須修二
研究担当グループ：技術推進本部（構造物マネジメント）、材料地盤研究グループ（地質）、水工研究グループ（ダム構造物、ダム水理）

1.　研究の必要性

環境保全の重要性に対する認識の高まりとともに、社会資本の整備にあたって、事業の効率を高めると同時に、自然環境や地球環境に及ぼす影響を極力回避、軽減することが求められている。このため、これまで整備されてきた社会資本ストックを有効に活用する方策を立案するとともに、新規の社会資本整備においても環境に及ぼす影響を極力軽減できるような技術の開発が求められている。本重点プロジェクト研究ではダム事業を対象として、上記の要請を踏まえて、既設ダムの有効活用技術の開発、自然環境へ及ぼす影響を極力回避できるような新規ダムの建設技術を開発する。

2.　研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では、既設ダム、貯水池の有効活用を図るため、既設ダムの嵩上げ設計手法、放流設備の機能増強技術の開発を行う。また、新規のダム建設にあたっては、堤体材料を採取する原石山の改変を最小限に抑えるために、規格外骨材の有効利用方法の開発、およびダムサイトの掘削法面を最小化するために、ダム基礎岩盤の力学設計の高度化技術、貯水池法面の斜面対策を最小化するために、貯水池斜面の安定性評価技術の提案を行う。あわせて、自然環境への影響を軽減するため、従来よりも柔軟にダムサイトが選定できるように、ダム基礎岩盤の止水設計の高度化技術を提案する。これらの達成目標を整理すると以下のとおりである。

① ダムの嵩上げ設計手法の開発
② ダムの放流設備増強技術の開発
③ 規格外骨材の品質評価および有効利用方法の開発
④ 複雑な地質条件に対応した基礎岩盤、貯水池斜面の評価と力学設計技術の開発
⑤ 岩盤性状に応じた透水性評価と止水設計技術の開発

3.　個別課題の構成

本重点研究プロジェクトでは、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

① コンクリートダムの再開発技術に関する調査（平成 13～17 年度）
② フィルダムの嵩上げ技術に関する調査（平成 13～17 年度）
③ ダム機能強化のための放流設備設計手法に関する調査（平成 12～15 年度）
④ トンネル内放流設備の水理設計手法に関する調査（平成 16～17 年度）
⑤ ダムコンクリートにおけるスラッジの有効利用に関する調査（平成 12～14 年度）
⑥ 濁沸石含有岩石のダムコンクリート骨材としての有効利用に関する調査（平成 12～15 年度）
⑦ 低品質細骨材の有効利用に関する調査（平成 15～17 年度）
⑧ 複雑な地質条件のダム基礎岩盤の力学的設計の合理化に関する調査（平成 14～17 年度）
⑨ ダム基礎等におけるゆるみ岩盤の評価に関する調査（平成 11～17 年度）
⑩ ダム基礎グラウチングの合理的計画設計法に関する調査（平成 13～17 年度）

このうち、平成 13 年度は①、②、③、⑤、⑥、⑨、⑩の 7 課題を実施している。

4.　研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と

達成目標」に示した達成目標に関して、これまでに実施してきた研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1) ダムの嵩上げ設計手法の開発

「コンクリートダムの再開発技術に関する調査」では、嵩上げダムの弾性体応力解析を実施し、施工時の貯水位、基礎岩盤の変形性が堤体応力に与える影響について整理した。今後は、温度応力解析や動的解析も含めてさらに詳細な検討を進め、コンクリートダムの嵩上げ設計方法の提案へ結びつける予定である。

また、「フィルダムの嵩上げ技術に関する調査」では、嵩上げ事例の分析のほか、モデルダムに対する浸透流解析、すべり安定解析を行い、旧堤体の透水性が嵩上げダムの安定性に及ぼす影響を整理した。今後は、既設堤体と基礎地盤の物性調査、水みち探査法として電気探査の適用性について検討を進めるとともに、動的解析によって耐震性の検討を行い、既設フィルダム堤体および基礎地盤の性状に応じたフィルダムの嵩上げ設計方法の提案へ結びつける予定である。

(2) ダムの放流設備増強技術の開発

「ダム機能強化のための放流設備設計手法に関する調査」において、既設ダムに新たな放流設備を設置する手法として湾曲エビ継ぎ管の水理模型実験を行い、管路内の水理特性、側方から空中放流によって減勢する場合の減勢特性をとりまとめた。今後は、さらに実験を追加するとともに、現地観測および数値シミュレーションによる検討を加え、エビ継ぎ管路流の水理設計手法、空中放流減勢工の水理設計手法の開発に結びつける予定である。

(3) 規格外骨材の品質評価および有効利用方法の開発

「ダムコンクリートにおけるスラッジの有効利用に関する調査」では、RCD、ELCM 用コンクリート、外部コンクリート、高流動コンクリートの 4 種類のモルタルを用いて、単位水量一定のもとで微粒分率を変化させたときの性状調査を行った。この結果、ワーカビリティーは低下するものの、コンクリート組織が緻密になることによって、強度は増加し、乾燥収縮や中性化速度は低減することが分かった。今後は、ワーカビリティーの改善を図るため、混和剤の使用について検討を加え、スラッジ混入コンクリートの配合設計方法の提案に結びつける予定である。

「濁沸石含有岩石のダムコンクリート骨材としての有効利用に関する調査」では、濁沸石によるモルタルの劣化原因について検討した。その結果、劣化モルタル中の濁沸石の化学組成は濁沸石の理想的な化学組成と変わりなく、また、濁沸石周辺に異常膨張を起こすような物質、水和物の生成は認められないことから、濁沸石によるモルタルの劣化の原因は、化学反応ではなく、物理的な作用であると推定された。今後は、劣化モルタルの化学分析を追加するとともに、濁沸石－レオンハルダイト転移に伴って発生する膨張圧についても検討し、濁沸石によるコンクリートの劣化機構の解明および濁沸石含有岩石の有効利用法の提案へ結びつける予定である。

(4) 複雑な地質条件に対応した基礎岩盤、貯水池斜面の評価と力学設計技術の開発

「ダム基礎等におけるゆるみ岩盤の評価に関する調査」において、ゆるみ分布の的確な把握を目的として「地中風速測定」、ゆるみ領域のマイクロゾーニングと変形性の把握を目的として「高精度傾斜変動測定」の 2 つの新しい調査方法を開発した。また、これらの手法を現地に適用した結果、十分な精度でゆるみ領域を把握することができた。今後は、これらの調査機器を高度化し、測定の安定性を向上させるとともに、解析方法や試験値の解釈方法を提案する予定である。さらに、これらの成果を踏まえて、ゆるみ岩盤の発生機構の解明およびゆるみ岩盤に対する地質調査方法の提案に結びつける予定である。

(5) 岩盤性状に応じた透水性評価と止水設計技術の開発

「ダム基礎グラウチングの合理的計画設計法に関する調査」において、三次元模型を用いたグラウト注入実験を行い、注入圧力や配合の変化によるグラウトの注入特性の変化を整理した。また、浸透流解析によって、コンソリデーショングラウチング、ブランケットグラウチングの施工範囲、改良目標値が浸透流量に及ぼす影響をと

りまとめた。今後は、原位置試験も含めて引き続き実験的検討を行うとともに、解析的な検討により基礎岩盤の改良と浸透状況の関係を定量的に示し、ダム基礎岩盤の透水性状とその分布特性を考慮したグラウチングの計画・設計方法の提案および透水性の改良度の空間分布を考慮したグラウチングの効果判定法の提案に結びつける予定である。

8.1 コンクリートダムの再開発技術に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）
研究期間：平 13～平 17
担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）
研究担当者：山口嘉一、佐々木隆、町田宗久、金縄健一

【要旨】
治水・利水上の理由からダムの運用は今後も必要とされるが、高齢化に伴う投資余力の減少、自然環境の保全の点から、既設コンクリートダムの効率的な利用が求められている。ダムの効率的利用を目的とした再開発技術としては、①貯水容量を増やすための既設ダムの嵩上げ、②貯水容量の有効利用を目的とした放流設備を増設するための堤体穴開けがあげられる。

本研究では、今後のダムの再開発の需要増加に対応するため、再開発技術の合理化を図る目的で、ダム高、施工時水位等に着目した嵩上げに関する数値解析的検討をおこなった。検討結果から、これらが嵩上げ時の打ち継ぎ目沿いの応力分布に及ぼす影響について明らかにした。
キーワード：コンクリートダム、再開発、嵩上げ、穴開け

1. はじめに

水資源の安定した確保や、治水上の要請からダムの運用は今後も必要とされる。一方で、高齢化に伴う投資余力の減少や、自然環境の保全に対する社会的要望の高まりから、既設コンクリートダムの効率的な利用が求められている。

こうした要望に応えるためのダムの再開発技術としては、①貯水容量を増やすための既設ダムの嵩上げ、②貯水容量の有効利用を目的とした放流設備を増設するための堤体穴開けがあり、今後の社会的要望の高まりにあわせて、これらの再開発技術の合理化が求められている。

平成 13 年度は、ダム高、施工時水位等に着目した嵩上げに関する数値解析的検討を実施した。

2. 研究方法

現在コンクリートダムの嵩上げは、諸外国を含めて種々の方法が実施されているが、日本においては旧堤体と新堤体の上流面を一致させ、旧堤体の下流面側に新コンクリートを打設する方式が一般的である。その際に用いる設計理論は、垣谷によるいわゆる「嵩上げ公式」[1]と呼ばれるもので、これは以下の仮定を前提としたものである。

① 新コンクリートの硬化収縮による容積変化を無視する。
② 新コンクリートの物理的性質の相違等を無視する。
③ 新旧コンクリートは一体で剛力学的に扱うことができる。
④ 新コンクリートは自重の他には外力を受けずに硬化するものとする。

上記については、a)基礎岩盤の影響、b)堤体の弾性係数の影響、c)貯水位の影響、d)新旧堤体打ち継ぎ目の影響、e)地震力の影響について既に検討されている[1]が、堤体形状を限定した検討であるため、モデルダムの断面形状を変えてより詳細に検討を行う必要がある。そこで、旧堤高、嵩上げ高および荷重条件を変えたモデルダムを数ケース設定し、打ち継ぎ目に発生する直応力、堤敷に発生する鉛直応力について検討を行った。

垣谷による嵩上げ公式では、嵩上げ前の旧堤体に作用する荷重は、静水圧、水重のみで、嵩上げによって新たに加わる荷重は静水圧（嵩上げによる増分）、堆砂圧、地震時動水圧、地震時慣性力、水重、揚圧力、堤体自重である（図-1、荷重条件①）。本検討では嵩上げ前の旧堤体部に自重を作用させた実際的な荷重条件（図-1、荷重条件②）でも解析をおこなった。

図-2 に解析モデルを示す。堤体の形状は上流面が鉛直の直角三角形形状とし、下流面勾配は 1:0.85 とした。図-3(a)に全体の有限要素分割図、(b)に堤体部の有限要素分割図を示す。解析に用いた物性値を表-1 に示す。材料物性については、一般的なダムコンクリートの物性値を想定して設定した。境界条件については、岩盤底面は剛結、側方は鉛直可動水平固定、上面は自由とした。解析ケースについては、表-2 の（ ）内の値を基本ケースとして、

検討項目を変化させて解析を実施した。

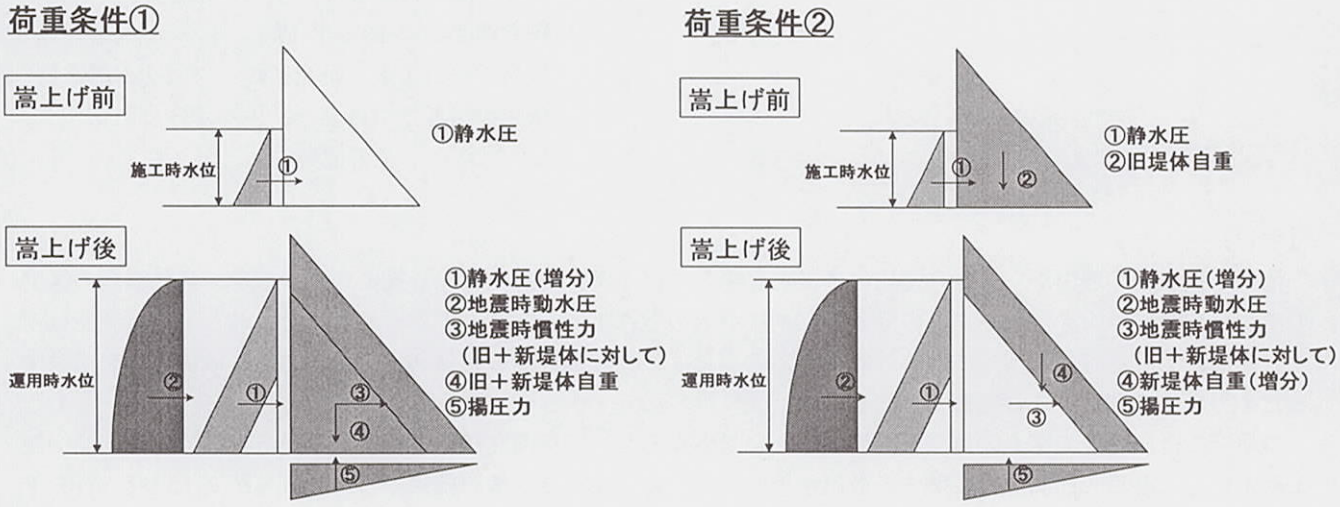


図-1　嵩上げ設計荷重条件の比較

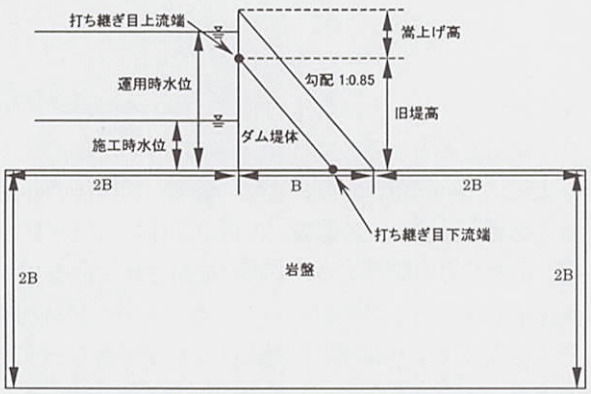


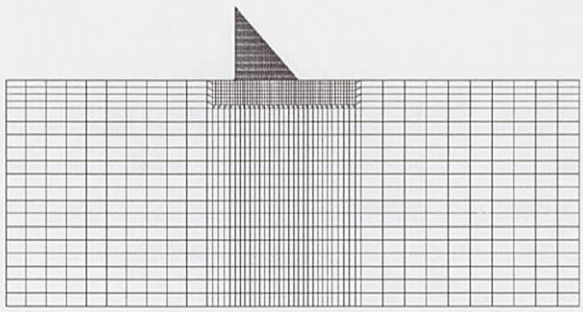
図-2　解析モデル

表-1　材料物性値

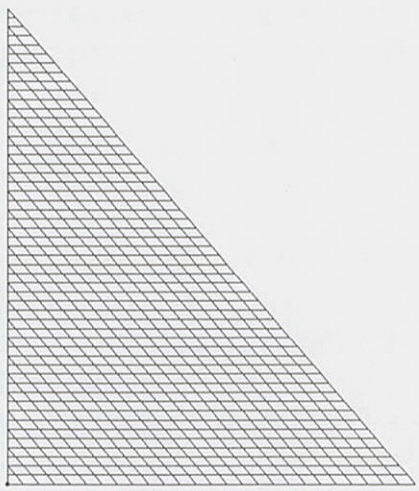
対象箇所	弾性係数(MPa)	ポアソン比	単位容積質量(t/m³)
堤体部	25,000	0.2	2.3
貯水部	∞	—	1.0
岩盤部	下記参照	0.2	—

表-2　解析ケース

旧堤高(m)	嵩上げ率(%)	施工時水位(旧堤高に対する割合%)	運用時水位(m)	岩盤の弾性係数(MPa)
30、50、(100)	(30)、50、100	0、(50)、90	(新堤高−10)	1,000、(2,500)、9,000



(a)　全体



(b)　堤体部

図-3　有限要素分割図

3. 研究結果

3.1 解析手法の影響（剛体計算とFEM解析との比較）

図-4は、堤踵部からの距離と堤敷での鉛直応力との関係であり、旧堤高100m、施工時水位50mで嵩上げ高が30、100%の2ケースのそれぞれにFEM解析値と嵩上げ公式に基づく計算値（剛体計算値）を示している。鉛直応力については引張側を正（プラス）とし、圧縮側を負（マイナス）とした。図より、全体的にFEM解析値の方が圧縮応力は小さくなっているが、旧堤高下流端ではFEM解析値の方が多少大き目の値となる。剛体計算では、全体的な堤敷沿の鉛直応力は捉えることはできるが、旧堤体下流端での局所的な応力の変化は捉えられない。ただし、旧堤体下流端での応力の変化幅は嵩上げ率の影響は小さく、またその変化幅の絶対値は小さい。

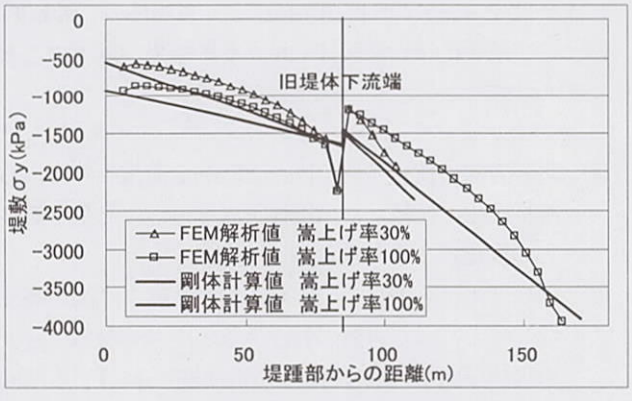


図-4　FEM解析値と剛体計算値の比較

3.2 荷重条件による影響

図-5は堤踵部からの距離とFEM解析によって求めた堤敷での鉛直応力との関係であり、嵩上げ率30%、施工時水位50%で、堤高が100、50、30mのケースそれぞれに荷重条件①と荷重条件②の場合の解析結果を示している。堤踵部と堤趾部ではFEM解析特有の局所的な応力値が出ている。図より、旧堤体下流端より上流側では荷重条件②で解析した堤敷鉛直圧縮応力が大きくなり、旧堤体下流端より下流側では荷重条件①での堤敷鉛直圧縮応力が大きくなっている。荷重条件①では堤敷に発生する鉛直応力を平均的に捉えることはできるが、旧堤体下流端付近で発生する応力値の変化を小さく評価することとなる。

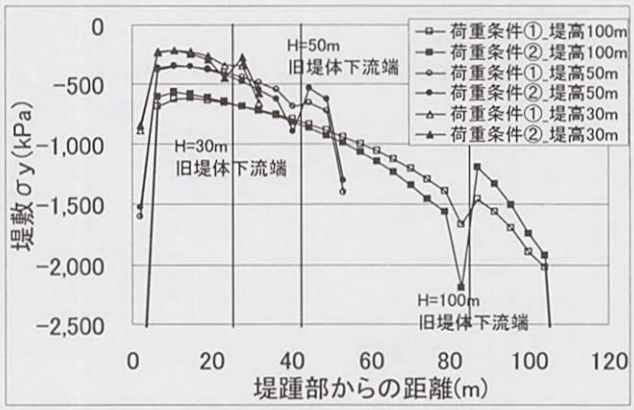


図-5　荷重条件による影響（堤敷鉛直応力）

図-6はFEM解析によって求めた打ち継ぎ目沿い直応力を示したもので、嵩上げ率30%、施工時水位50%で、堤高が100、50、30mのケースそれぞれに荷重条件①と荷重条件②の場合の解析結果を示している。打ち継ぎ目上流端、下流端近くでは荷重条件②で圧縮応力が大きくなり、中央付近では荷重条件①で圧縮応力が大きくなる結果となった。しかし、荷重条件の違いが打ち継ぎ目沿い直応力に及ぼす影響は小さい。

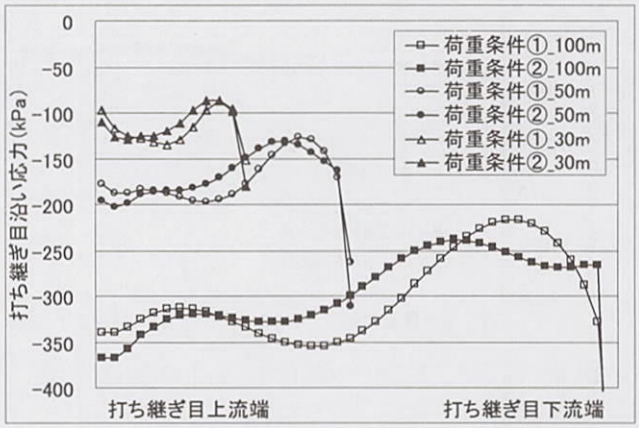


図-6　荷重条件による影響（打ち継ぎ目沿い応力）

3.3 嵩上げ高の影響

図-7は、荷重条件②、旧堤高100m、施工時水位50%の場合のFEM解析によって求めた打ち継ぎ目沿いの直応力を示したもので、嵩上げ率が10、30、50、70、100%の場合を示している。旧天端側では嵩上げ高が高くなると圧縮応力が大きくなっているが、ダムコンクリートの圧縮強度として20,000kPa程度を期待できることを考えると問題になるような圧縮応力とはならない。旧堤高下流端に近い打ち継ぎ目では嵩上げ高が大きくなるにつれて発生する直応力は引張側に移行し、嵩上げ高が100%のケースでは引張応力が発生している。

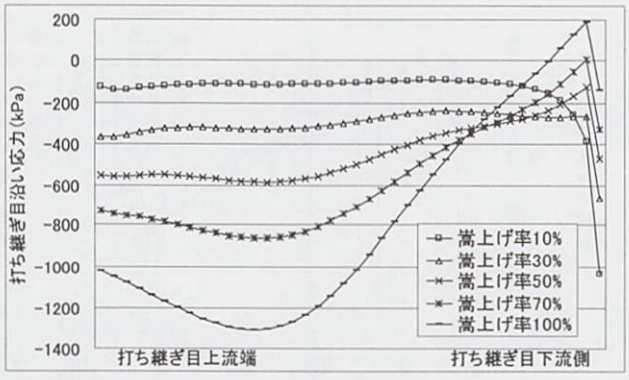


図-7　打ち継ぎ目沿いの直応力（嵩上げ率の影響）

3.4　施工時水位の影響

図-8 は、荷重条件②、運用時水位(新堤高－10m)で FEM 解析によって求めた打ち継ぎ目沿いの直応力を示したもので、旧堤高 100m、嵩上げ率 30%で、施工時水位が 0、50、90%の場合を示している。図より、今回設定した運用時水位での応力状態に関していえば、施工時水位が打ち継ぎ目の直応力に与える影響は小さいと考えられる。

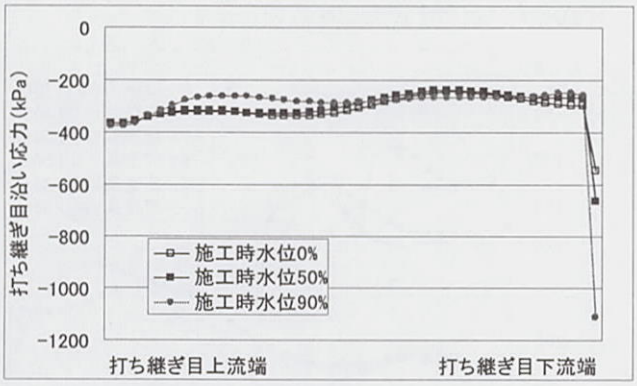


図-8　打ち継ぎ目沿いの直応力（施工時水位の影響）

3.5　岩盤の弾性係数の影響

図-9 は、荷重条件②、旧堤高 100m、嵩上げ率 30%の場合の FEM 解析によって求めた打ち継ぎ目沿いの直応力を示したもので、岩盤の弾性係数が 1,000、2,500、9,000MPa の場合を示している。岩盤の弾性係数が小さくなると旧堤体下流端に近い打ち継ぎ目沿いでは直応力が引張側に移行する。

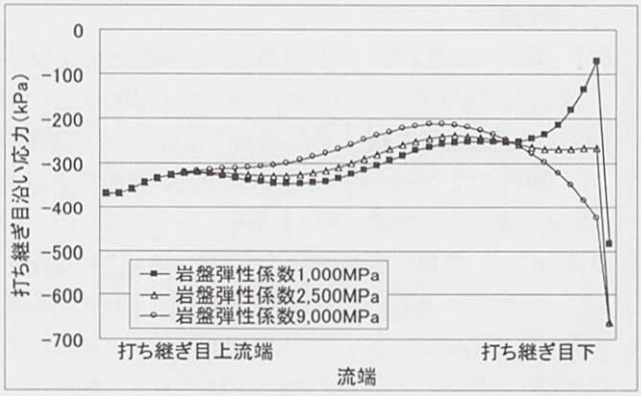


図-9　打ち継ぎ目沿いの直応力
（岩盤の弾性係数の影響）

4.　まとめ

本研究では、ダムの再開発技術として堤体の“嵩上げ”について解析的検討を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

① 垣谷方式の荷重条件では、実際的な荷重条件による解析結果に比較して旧堤体下流端付近に発生する応力の変化が小さく現れる。

② 旧堤体の打ち継目沿いの直応力は、嵩上げ高が高くなるほど、また岩盤の弾性係数が小さくなるほど、旧堤体下流端付近の直応力が引張側へ移行する傾向にある。なお、施工時水位の影響は小さい。

今後は、今年度の検討で影響の大きかった因子等についてさらに検討を進めるとともに、“穴開け”についての解析的検討を開始する必要がある。

参考文献

1)　水野光章・安田成夫：コンクリートダムの嵩上げに関する研究，建設省土木研究所資料，第 1663 号，1981 年 2 月.

8.2　フィルダムの嵩上げ技術に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）
研究期間：平 13～平 17
担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）
研究担当者：山口嘉一、佐藤弘行

【要旨】
自然環境保全に対する社会的要請の高まりから、治水整備、水資源開発においては、新規ダムの建設に頼るだけでなく、既設ダムの効率的な利用、そのために必要な既設ダムの改造技術開発が求められている。
本課題では、フィルダム嵩上げを採り上げ、その事例資料を収集、整理、分析し、既設堤体および基礎地盤の漏水等探査方法と物性評価方法を検討した。さらに、既往嵩上げ事例が多いアースダムについて、嵩上げ規模、既設ダムと嵩上げ部の透水性、ドレーンの構造を変化させた浸透流解析を行い、すべり安定性に大きな影響を与える浸潤線の形状、浸透流量などを分析した。また、浸透流解析と併せてすべり安定解析を実施し、アースダムの嵩上げ設計上の留意点について考察した。
キーワード：アースダム、嵩上げ、浸透流解析、浸潤線、透水係数、ドレーン

1. はじめに

本課題は、既設フィルダム貯水池の有効利用方法として、フィルダムの嵩上げを採り上げ、嵩上げしたフィルダムの安全性を確保するために必要な既設堤体および基礎地盤の漏水（集中浸透）等探査方法と物性評価方法、遮水構造および施工手順を考慮したうえでの新旧堤体境界面でのすべりや両堤体内の応力変位分布などに着目した嵩上げ設計方法、嵩上げダムの安定性を確認するための挙動監視方法の提案を行うものである。

平成 13 年度は、フィルダム嵩上げ事例の資料を収集、整理、分析する。また、これらの収集資料を基に既設堤体および基礎地盤の漏水等探査方法と物性評価方法を検討する。

さらに、既往嵩上げ事例が多いアースダムについて、嵩上げ規模、既設ダムと嵩上げ部の透水性、ドレーンの構造を変化させた浸透流解析を行い、すべり安定性に大きな影響を与える浸潤線の形状のほか、最大流速、浸透流量などを分析する。また、浸透流解析より得られた堤内浸潤線を用いてすべり安定解析を実施し、アースダムの嵩上げ設計上の留意点について考察する。

2. 研究方法

2. 1　フィルダム嵩上げ事例の整理・分析

2. 1. 1　フィルダム嵩上げ事例の調査・整理

既往のフィルダムの嵩上げ事例（耐震補強事例などを含む）に関する資料を調査し、堤高や嵩上げ規模などのダム諸元、透水・不透水ゾーンなど堤体材料の物性値、既設堤体および基礎地盤の漏水等探査方法と物性評価方法などを整理・分析する。なお、調査対象としたダムの型式は、アースダムと内部土質遮水壁型のロックフィルダムである。

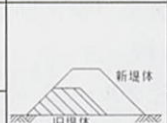
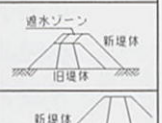
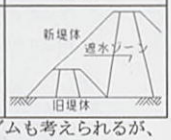
2. 1. 2　既設堤体および基礎地盤の漏水等探査方法と物性評価方法の検討

ある程度以上の規模の嵩上げの対象となるダムは、基礎地盤の状況が比較的良好な地点に建設されているものが多くなると考えられるが、現行の設計基準[1)]とは異なる手法で設計されていることも多く、かつ、既設ダムの調査・設計時の探査法や調査法などの技術レベルも現在に比べると低いものが多いといえる。このため既設堤体やその基礎地盤について、現行基準に基づいて所要の精度で設計するのに必要なデータが質量ともに十分でなく、追加の調査・評価が必要となるが、既設堤体そのもの、および既設堤体下の基礎地盤の調査・評価は新設ダムのそれに比べて困難となることが予想される。

また、表-1 に示すとおり、ダムタイプや嵩上げの規模によって、嵩上げダムが既設堤体やその基礎地盤に依存する割合が異なる。

以上を考慮して、前項で求めたフィルダム嵩上げ事例の整理・分析結果を基に、既設堤体および基礎地盤の漏水等探査方法と物性評価方法についても検討する。

表-1　ダムタイプと嵩上げの規模

タイプ		アース→アース	アース→ロック	ロック→ロック
嵩上げ規模	Aタイプ			
	Bタイプ			

注 1）ダムタイプの組合せには、ロックからアースダムも考えられるが、アースダムにおける堤高の制約などから省略する。
注 2）表中のAタイプは、比較的に嵩上げ規模が小さい場合を示し、Bタイプは、比較的嵩上げ規模が大きい場合を示す。

2. 2　嵩上げアースダムの安全性評価に関する基礎的な検討

2. 2. 1　検討概要

アースダムでは、新規ダム、嵩上げダムにかかわらず、堤体内浸潤線の形状が堤体のすべり安定性に大きな影響を与える。すなわち、新規ダム、嵩上げダムに配置されるドレーンの形状が堤体のすべり安定性に極めて重要な役割を果たすものと予測される。

したがって、嵩上げアースダムの安全性に関する基礎的な条件を把握してアースダム嵩上げ設計上の留意点を整理するため、モデルダムを用いて、浸透流解析とすべり安定解析により、以下のような目的の数値実験を行う。

① 新規ダムを例にとり、堤高、ドレーンの配置（水平・立上り）、各ゾーンの透水係数などを変化させ、それぞれの条件における浸潤線形状を求め、新規ダムにおけるドレーンの配置や堤高と浸潤線形状などの関係を把握する。

② あわせて不透水ゾーン（ドレーン以外の堤体に対応）における浸透流速（パイピングの評価）や浸透流量についても定量的に評価する。

③ 浸透流解析から求めたそれぞれの浸潤線を用いて、すべり安定解析を実施し、新規ダムにおけるドレーンの配置とすべりに対する安定性の関係を把握する。

④ 次に、新規ダムにおける解析で得られた結果をもとに、嵩上げダム固有の課題について検討を進める。具体的には、旧堤体の存在によるドレーン配置の制約の影響、旧堤体のドレーン機能が残存することによる影響、旧堤体の物性が新堤体と異なることによる影響などについて評価する。

2. 2. 2　解析モデルおよび解析条件

解析モデルは、図-1 に示す新規および嵩上げダムの２次元横断面とし、上下流面勾配は、既設アースダムの調査結果や参考文献 2）に示される堤高と法面勾配の関係などから標準的な値を採用した。また、解析条件として表-2 に諸物性を示す。表中の値は、参考文献 1）～4）などから標準的な値を採用した。

なお、ダムの嵩上げ方法には、既設堤体の上流側に新設堤体を置く場合と下流側に置く場合があるが、下流側に新設堤体を置く場合について検討した。

解析ケースは、表-2 に示すとおり、堤高 15～30 mの 5m間隔で設定し、ドレーンの配置を水平 3 パターンと立上り 3 パターンの組合せとした（図-1 参照）。さらに、透水係数は、新堤体 1.0×10^{-5}cm/s、旧堤体 1.0×10^{-3}、1.0×10^{-4}、1.0×10^{-5}cm/s、ドレーン 1.0×10^{-2}、1.0×10^{-3}cm/s の組合せとした。

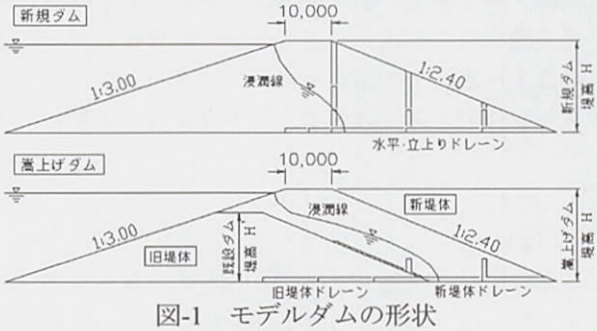


図-1　モデルダムの形状

表-2　　基本断面形状と諸物性

項　目			モデル条件	
堤高	新規ダム		15、20、25、30 m	
	嵩上げダム	旧堤体	15、20、25 m	
		嵩上げ高	5、10、15 m	
勾配	上流面		1 : 3.00	
	下流面		1 : 2.40	
堤頂幅			10 m	
貯水池水位			ダム高の 96%	
浸潤線形状			浸透流解析結果を適用	
計画すべり安全率			1.20	
設計地震係数			0.15（現行基準の地震帯区分：強震帯）	
密度	湿潤密度		1.80 t/m³	
	飽和密度		1.90 t/m³	
間隙率			0.30	
強度	粘着力		27.6 kN/m²（2.81 tf/m²）	
	内部摩擦角		25.0 °	
透水係数	新堤体（新規ダム、嵩上げ部）		1.0×10^{-5} cm/s	
	旧堤体（既設ダム）		1.0×10^{-3}、1.0×10^{-4}、1.0×10^{-5} cm/s	
	ドレーン		1.0×10^{-2}、1.0×10^{-3} cm/s	
ドレーンの配置	種類		水平	立上り
	新規ダム		下流法面敷の 1/3、2/3 と全面	配置断面の 5m、1/2 と全面
	嵩上げダム	旧堤体		
		新堤体		

注）強度は、不透水ゾーンとドレーンで同じ値とした。

3. 研究結果

3. 1　フィルダム嵩上げ事例の整理・分析

3. 1. 1　フィルダム嵩上げ事例の調査・整理

フィルダムの調査、耐震補強、嵩上げなど再開発事例について、ダムタイプ、堤高（既設、嵩上げ後）および資料の掲載概要などを整理すると表-3 のとおりとなる。

表-3 に示すとおり、14 フィルダムの再開発事例のうち、詳細な資料が存在する事例は、D、E、Lの3ダムであった。また、嵩上げの範囲は、数 m～24.5m と幅広く、既設ダムの堤高に対する嵩上げ高の割合も同様に 10～70%程度と広範囲に渡る。なお、世界的に見ても嵩上げ高が突出するHダムの事例[5]を除くと、嵩上げ高の範囲は、10m程度以下に収まる。

代表的な嵩上げの事例として、Dダム、Hダムの標準断面図を図-2、図-3 に示す[5]。

表-3　国内のフィルダム再開発事例

ダム名	資料の有無				再開発の概要	
	諸元	物性	調査	止水	ダムタイプ	堤高（m）
A	○	○	×	×	アース → アース	23.4 → 26.0 (嵩上げ：2.6)
B	△	○	×	×	アース → アース	不明 → 24.0 (嵩上げ：約3)
C	○	○	×	×	アース → アース	15.0 → 23.0 (嵩上げ：8.0)
D	○	○	○	○	アース → アース	27.6 → 30.0 (嵩上げ：2.6)
E	○	○	○	○	アース → アース	17.4 → 18.5 (嵩上げ：1.1)
F	△	×	×	×	不明 → アース	不明 → 26.8 (嵩上げ:不明)
G	△	×	×	×	アース → 不明	不明
H	○	○	△	○	アース → ロック	37.4 → 61.5 (嵩上げ:24.5)
I	△	嵩上げより新規に近い			アース → アース	4.5 → 26.8 (嵩上げ:不明)
J	△	嵩上げより新規に近い			アース → アース	6.0 → 15.3 (嵩上げ:不明)
K	○	○	－	－	ロック → ロック	35.2 → 50.2 (嵩上げ:15.0)
L	○	○	○	○	アース → アース	34.6 → 33.5 (補強：-1.1)
M	○	○	○	－	アース	18.2 (調査)
N	○	○	○	－	アース	21.8 (調査)

注）資料の有無の各項目は、以下の記述の有無を示す。
諸元：既設・嵩上げダムの諸元、物性：堤体材料の諸物性値、
調査：既設堤体と基礎地盤の調査方法、止水：止水処理方法

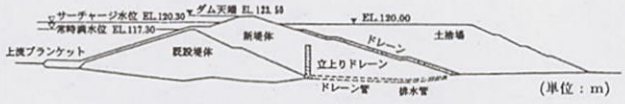


図-2　フィルダム嵩上げ事例（Dダム）

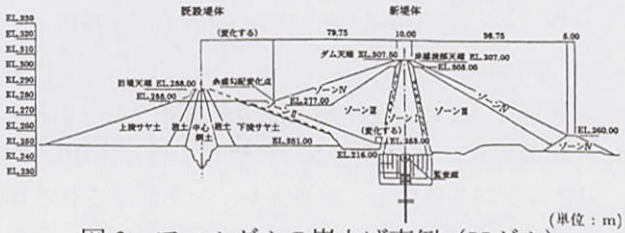


図-3　フィルダムの嵩上げ事例（Hダム）

一方、フィルダムの再開発における調査数量が判明しているD、E、Lの3ダムについて整理すると表-4のとおりとなる。表-4 に示すとおり、調査法は、ボーリングによる孔内および採取コアを用いた調査が主体となっている。

表-4　調査の種類と数量

ダム名	既設堤体と基礎地盤の調査の種類と数量						嵩上げ後のダムの概要	
	既設堤体			基礎地盤			堤高 (m)	堤頂長 (m)
	ボ	電	ト	ボ	電	ト		
D	(7)	実施	(3)	(30)	－	－	30.0	516
E	(18)	592 (4)	(3)	(62)	－	－	18.5	725
L	785 (18)	実施	－	1221 (29)	－	－	33.5	691

注1）ダム名称において、下段()内は、既設ダムの名称を示す。
注2）調査の種類の各項目は、以下を示す。
ボ：ボーリング（総延長(m)と孔数）、電：電気探査（総延長(m)と本数）、ト：トレンチ（総掘削量(m^3)と数）

3．1．2　既設堤体および基礎地盤の漏水等探査方法と物性評価方法の検討

嵩上げフィルダムの設計に必要な既設ダムの物性については、前述のボーリングやトレンチ調査により基本的に対応できるものと考える。しかし、これらの情報は、既設ダム物性の点的な情報であり、適切な設計値を設定するためには、数多くの調査・試験が必要となる。そこで、これらの作業を効率的に進めるために、調査精度という点ではボーリングやトレンチ調査には及ばないが、各種物理探査を用いた面的な調査により補充し、全体としての調査精度の高度化を図る必要がある。

特に、既設ダムにおける水みちや弱部といった安定性に大きな影響を与える箇所の抽出が重要となる。フィルダムの水みち探査として電気探査が用いられた事例[6]もあり、今後の本課題においては、電気探査によるフィルダムの水みち探査を中心に研究を進める。

3．2　嵩上げアースダムの安全性評価に関する基礎的な検討

3．2．1　浸透流解析

ここでは、主に、新規ダムの堤高 20m と嵩上げダムの堤高 20m（旧堤高 15m、嵩上げ高 5m）の場合の結果について比較・考察する。

1）浸潤面の形状

新規ダムにおいて、堤体の透水係数を不透水ゾーン 1.0×10^{-5} cm/s とし、ドレーン 1.0×10^{-3}cm/s とした場合、ドレーンの形状・配置による浸潤線の形状は、図-4 に示すとおり、ほぼ水平ドレーンの下流法面敷に対する長さにより決まる。つまり浸潤線の形状は、水平ドレーンの配置に主に支配され、これに立上りドレーンを接続しても、ドレーン周辺の形状が若干変わるだけで、全体としてはほとんど変化しない。なお、この傾向は堤高によらない。

また、水平ドレーンの上流端が下流法面敷の全面よりさらに上流側に伸ばした場合の解析も実施した。図-4 に示すとおり、下流法面敷全面の場合と浸潤線

形状はほぼ同じであることが確認される。

次に、堤体の不透水ゾーンの透水係数は前述と同様とし、ドレーンの透水係数を 1.0×10^{-2}cm/s とした場合の浸潤線形状を図-5 に示す。図-4 に示したドレーンの透水係数が 1.0×10^{-3}cm/s と比較して、ドレーン上流端付近の浸潤面が若干低下することと、水平ドレーン設置部の水位がドレーン内におさまっていることがわかる。特に後者についてはドレーンの排水能力にかかわる問題である。ただし、全体的な浸潤線形状には大きな差はないと考える。

一方、嵩上げダムにおいては、新・旧堤体およびドレーンの透水係数を新規ダムの場合と同じ組合せとし、旧堤体のドレーン機能が残存しない場合、浸潤線は新規ダムの場合とほぼ同様な形状となる。すなわち、嵩上げダムでは、新規ダムの水平ドレーンと同じ投影位置まで旧堤体下流法面沿いにドレーンを配置することで、浸潤線の形状を新規ダムの場合とほぼ同様にすることができる（図-4、図-6 参照）。

また、旧堤体にドレーンが配置され、その機能が残存する場合、浸潤線の形状は、新・旧堤体ドレーンが接続する場合と接続しない場合で大きく異なる。新・旧堤体ドレーンが接続する場合、図-7 に示すとおり、水平方向のドレーン長さが長くなることで、かなり浸潤線を低下させることができる。

逆に、新・旧堤体ドレーンが接続しない場合、旧堤体に配置されたドレーンの影響でその付近の浸潤線は低下するが、下流法面付近では上昇する結果となった。この傾向は、旧堤体でのドレーン配置が長いほど顕著である（図-8 参照）。すなわち、旧堤体のドレーン機能が残存する場合、これと新堤体に配置するドレーンを接続させ、下流への排水ルートを確保しなければ、下流法面のすべり安定性を損なうことが予測される。

さらに、旧堤体の透水係数を新堤体より大きくした場合、浸潤線がかなり高くなる。この場合は、たとえ、ドレーンを新堤体の下流法面始点から配置し、旧堤体と接続させても下流法面付近の浸潤線が低下しない（図-9 参照）。すなわち、下流側に新堤体を設けるアースダムの嵩上げでは、新・旧堤体の透水係数が異なり、かつ、旧堤体の透水係数の方が大きい場合、この差が 1 オーダ程度であっても、下流法面付近の浸潤線が低下せず、下流法面のすべり安定性を損なう可能性がある。このような場合は、下流側に新堤体を設けるよりも上流側に設ける方が有効であると考えられる。

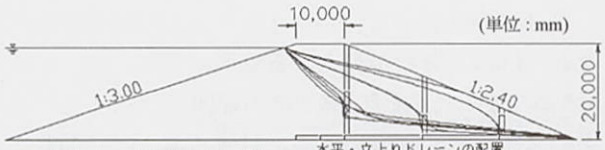


図-4　新規ダム①
（ドレーン透水係数 1.0×10^{-3}cm/s）



図-5　新規ダム②
（ドレーン透水係数 1.0×10^{-2}cm/s）

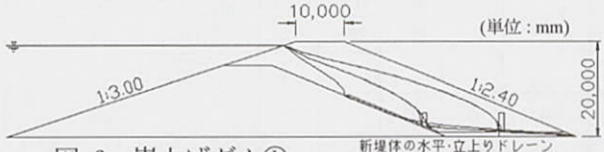


図-6　嵩上げダム①
（ドレーン透水係数 1.0×10^{-3}cm/s）

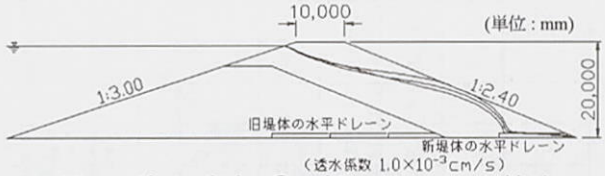


図-7　嵩上げダム②：新旧ドレーンが接続
（ドレーン透水係数 1.0×10^{-3}cm/s）

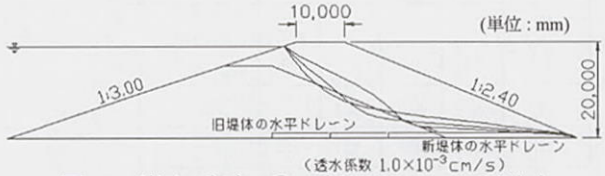


図-8　嵩上げダム③：新旧ドレーンが独立
（ドレーン透水係数 1.0×10^{-3}cm/s）

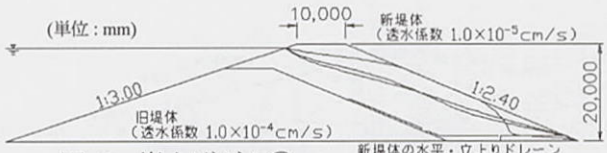


図-9　嵩上げダム④
（旧堤体透水係数 1.0×10^{-4}cm/s）
（ドレーン透水係数 1.0×10^{-3}cm/s）

2）最大流速

新規ダムにおいて、最大流速を水平、立上りドレーンの配置により堤高ごとに整理すると図-10、図-11 のとおりとなる。水平ドレーンが配置される場合では、各堤高に対して図-10 に示すとおり、その配置長さが長くなると若干最大流速が大きくなるものの、大きな変化ではない。

また、立上りドレーンと最大流速の関係では、図-11 に示すとおり、その配置高さが高くなると若干最大流速は低下し、配置断面に対する立上り比率が 30～50%を超えると値が変化しない傾向にあった。

これは、立上りドレーンを配置する場合、配置断面の 1/3～1/2 より高く配置しても、浸潤線の形状がほとんど変化しないことに対応している(図-4 参照)。なお、不透水ゾーンにおける最大流速の発生位置は、水平ドレーンの直上流部であった。

次に、発生した最大流速から不透水ゾーンのパイピングに対する安全性の評価を行った結果を示す。図-10、図-11 に示される最大流速の値は、見かけの最大流速であることから、式（1）により補正する。

$$V_r = V_a / n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

ここに、V_r：最大実流速(m/s)

V_a：見かけの最大流速(m/s)

n ：間隙率＝0.30(表-1 参照)

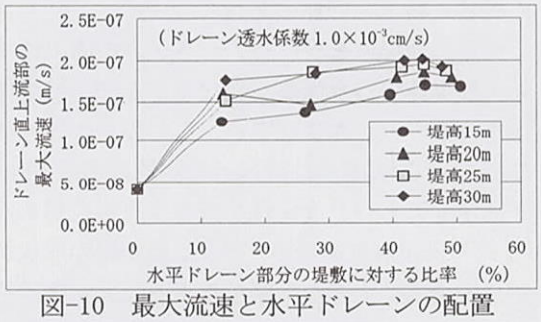


図-10　最大流速と水平ドレーンの配置

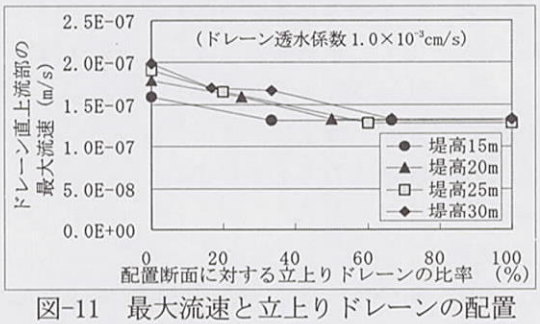


図-11　最大流速と立上りドレーンの配置

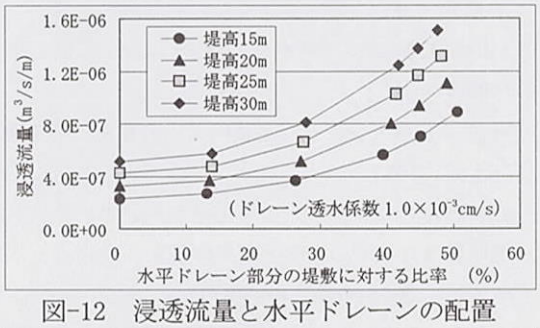


図-12　浸透流量と水平ドレーンの配置

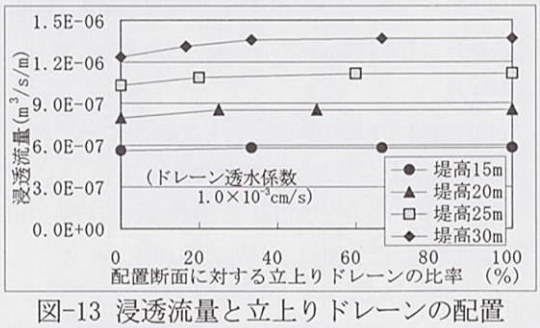


図-13 浸透流量と立上りドレーンの配置

見かけの最大流速が $V_a = 2.0 \times 10^{-7}$m/s 程度であることから、最大実流速は $V_r = 6.7 \times 10^{-7}$m/s となる。この値は、全く粘着性がない砂の最小粒径 0.074mm の土粒子に対する限界実流速（$= 1.0 \times 10^{-4}$m/s 程度）[7] と比較して、十分に小さい値で、パイピングに対しては大きな安全性がある。

2）堤内浸透流量

新規ダムにおいて、堤内浸透流量と水平・立上りドレーンの配置の関係を検討する。図-12 に示すとおり、堤高によらず、水平ドレーンが長くなると浸透流量が大きくなる傾向があるものの、図-13 に示すとおり、立上りドレーンが高くなった場合の変化は小さい。この傾向は、ドレーンと浸潤線の関係のそれに対応している。

次に、モデルダムの浸透流量について考察する。表-3 の事例によると、堤内浸透流量はDダムで 10 ﾘｯﾄﾙ/min、Eダムで 2 ﾘｯﾄﾙ/min と最大でも 10 ﾘｯﾄﾙ/min 程度であった。解析結果は、単位奥行き当りの浸透流量であることから、これに奥行き（表-4 から堤頂長＝600m と仮定）をかけて、浸透流量を求めた。図-12、図-13 より単位奥行き当りの浸透流量の最大値は 1.5×10^{-6}m³/s 程度である。したがって、浸透流量は 54 ﾘｯﾄﾙ/min となり、既往実績より大きいが、実ダムの透水係数が浸透流解析の入力物性値である 1.0×10^{-5}cm/s より小さいと考えられることから、概ね両者は整合がとれているものと考える。

一方、嵩上げダムにおいて、最大流速、堤内浸透流量は、新規ダムと同様、ドレーンと浸潤線の関係に対応し、ドレーンの堤敷投影長さが長くなると浸透流量が大きくなるが、立上りドレーンが配置されてもその変化は小さい傾向を示した。

3. 2. 2　すべり安定解析

浸透流解析から求めた堤内浸潤線を用いて上下流法面に対し円弧すべり解析を実施し、最小すべり安全率とその安全率を与えるすべり円弧半径について整理するとそれぞれ図-14、図-15 のとおりとなった。

最小すべり安全率は、図-14 に示すとおり、水平ドレーンの配置によって上流面でほとんど変化しないのに対し、下流面では水平ドレーンが下流法面始点位置より短くなると、急激に低下する。これは、堤体内下流側の浸潤線が高くなることが原因である。

一方、下流面では水平ドレーンの配置が下流法面始点よりも上流側に配置されても最小すべり安全率の増加にはほとんど効果が発揮されないことが確認できた。これも堤体内下流側の浸潤線形状に対応し

ている。

また、最小すべり安全率を与える円弧半径については、図-15 に示すとおり、最小すべり安全率の変化を反映する結果となった。すなわち、最小すべり安全率がほとんど変化しない上流面と水平ドレーンの配置が下流法面始点よりも上流側に配置される場合の下流面では、すべり円弧半径もほとんど変化しないのに対し、水平ドレーンの配置が下流法面始点よりも下流側に配置される場合の下流面では、水平ドレーンの長さが短くなるほど最小すべり安全率が小さくなり、すべり円弧半径が短くなる。これは、水平ドレーンが下流法面始点まで設置されている場合には、最小すべり安全率を与える円弧が上流側法面を切るのに対し、水平ドレーンが短くなり、堤体内浸潤線が上昇すると、この円弧が天端中心部を切ることによる。

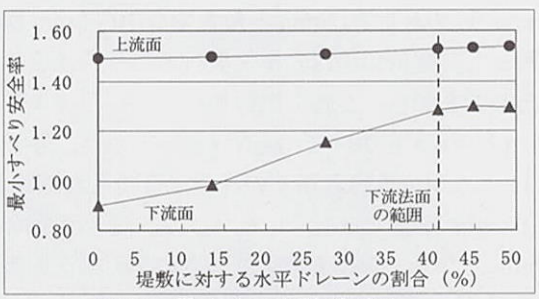


図-14　最小すべり安全率と
水平ドレーンの配置

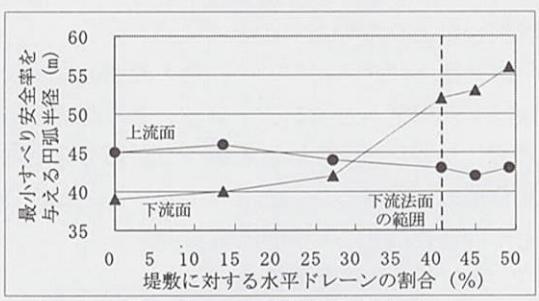


図-15　最小すべり安全率を与える
円弧半径と水平ドレーンの配置

4. まとめ

本課題では、フィルダム嵩上げ事例を収集、整理、分析した。また、これらの収集資料を基に既設堤体および基礎地盤の漏水等探査方法と物性評価方法を検討した。さらに、嵩上げ事例の多いアースダムについて、嵩上げ規模、透水性、ドレーンの構造などを変化させ、浸透流解析およびすべり安定解析を行い、アースダムの嵩上げ設計上の留意点について考察した。その結果、以下のことがわかった。

1) フィルダムの嵩上げ事例調査によると、既設堤体やその基礎地盤に対する調査法は、ボーリングによる孔内および採取コアを用いた調査が主体となっている。

2) 各種物理探査による面的な調査を行うことで、ボーリングやトレンチによる調査の補完という目的だけでなく、既設ダムの安定性に大きな影響を与える水みちや弱部の探査にも利用することができる。

3) モデルアースダムの浸透流解析結果から、堤体のすべり安定性に大きな影響を与える浸潤線の形状は、ほぼ水平ドレーンの下流法面敷に対する長さにより決まることが確認された。なお、この傾向は堤高によらず、新規・嵩上げダムで同じ透水性の場合、結果も同様であった。

4) 下流側に新堤体を設けるアースダムの嵩上げでは、新・旧堤体の透水係数が異なり、かつ、旧堤体の透水係数の方が大きい場合、この差が 1 オーダ程度であっても、下流法面付近の浸潤線が低下せず、下流法面のすべり安定性を損なう可能性がある。

5) すべり安定解析を行った結果、浸潤線の形状がすべり安全率に大きな影響を与えることを確認した。

今後は、既設堤体と基礎地盤の調査および水みち探査方法として、電気探査による方法を検討するとともに、嵩上げフィルダム設計上の留意点をさらに追求するために、嵩上げフィルダムの築堤湛水解析および動的解析を行う必要がある。

参考文献

1) (社)日本河川協会：改定 解説・河川管理施設等構造令、2000 年 1 月.

2) (社)地盤工学会:フィルダムの調査・設計から施工まで、1988 年 4 月.

3) (財)ダム技術センター：多目的ダムの建設、第 3 巻、設計 I 編、1987 年 9 月.

4) 松本徳久、山口嘉一、弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈、建設省土木研究所資料、第 2518 号、1987 年 11 月.

5) 山口嘉一：フィルダムの嵩上げ事例と調査・設計上の留意点、土木技術資料、Vol.43、 No.4、pp.10-11、2001 年 4 月.

6) 物理探査学会：物理探査ハンドブック ケーススタディ編 第 6 章土木調査、1999 年 3 月.

7) (社)日本河川協会：改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説 設計編[I]、1997 年 10 月.

8.3　ダム機能強化のための放流設備設計手法に関する調査

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 12 ～平 15
担当チーム：水工研究グループ（ダム水理）
研究担当者：柏井条介，小野雅人

【要旨】
増設放流設備設計手法の開発のため、13 年度は、①水平エビ継ぎ湾曲管路の圧力特性、②側方から空中放流により流入する減勢工の減勢特性に関する調査を行うとともに、③天ヶ瀬ダムにおいて、空中放流された放流水脈の減勢音特性に関する現地観測を実施した。①では鉛直に湾曲させた場合の実験結果との比較を行いエビ継ぎ管の圧力特性の傾向を示した。②では減勢工内の側壁沿いの最高水位とその位置及び露出射流の発生条件の傾向を把握した。③では天ヶ瀬ダムコンジットの減勢音特性の推定を行うとともに、水平水叩き式減勢工における放流音特性との比較を行った。
キーワード：増設放流設備、エビ継ぎ管、圧力特性、空中放流減勢工、減勢音特性

1. はじめに

管理ダム数の増加に伴い、より効率的な貯水池の運用のために、放流設備を増設する例が見られるようになっている(図-1)。このような放流設備においては、放流水を既設の減勢工に導くための湾曲導水路が必要であり、湾曲導水路の設計手法の確立、既設減勢工を利用した減勢工の水理設計手法の確立が求められている。

本研究は、湾曲エビ継ぎ管路流の水理設計手法の開発、湾曲高速開水路流の水理設計手法の開発、側方から空中放流により流入する減勢工の減勢特性及び減勢音の解明と水理設計手法の開発を目的に実施するものである。

13 年度は、①水平エビ継ぎ湾曲管路の圧力特性、②側方から空中放流により流入する減勢工の減勢特性に関する調査を行うとともに、③天ヶ瀬ダムにおいて、空中放流された放流水脈の減勢音特性に関する現地観測を実施した。

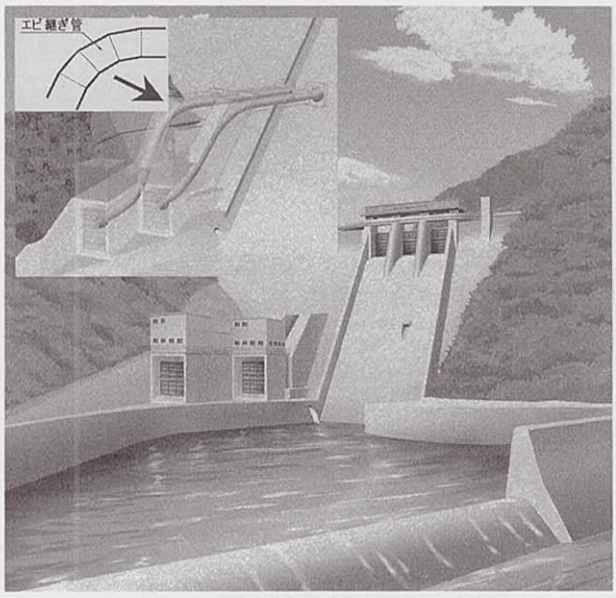


図-1　増設放流設備のイメージ

2. 調査概要

2.1　水平エビ継ぎ湾曲管路の圧力特性に関する調査

大規模な放流管の湾曲部は、高周波による曲げ加工が困難であることから、エビ継ぎ管（両端を斜めに切断した直管を連結させることにより、曲管を近似したもの）として製作されるのが一般的である(図-1)。エビ継ぎ管では、それぞれの管接合部において壁面が不連続に変化し流れの剥離を伴う大きな圧力降下の発生が懸念されるが、その影響についての知見は少なく、適切な水理設計のための圧力特性の把握が急がれている。

鉛直に湾曲させた場合のエビ継ぎ管の圧力特性については既に検討が行われており[1)]、本調査では重力の作用方向が異なる水平に湾曲させた場合の影響について検討を行った。

実験は、図-2 に示すように、水槽に取り付けた長さ 10D(D：管径)の水平直管部の下流に、中心角 60 度のエビ継ぎ湾曲管路を取り付けて実施した。湾曲部の下流には、湾曲部圧力に管路出口の影響が生じないよう 20D の直管部を設けた。実験ケースは、表-1 に示すように、管径 D=25.1cm、

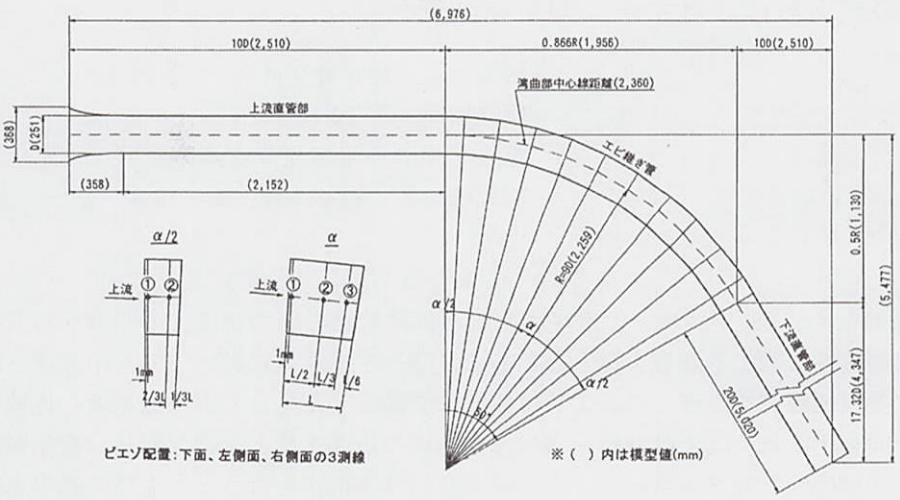


図-2　水平エビ継ぎ湾曲管路模型形状図

表-1　実験ケース

ケース	α(度)	Re 数
CASE1-1	6	6.39×10^5
CASE1-2		9.58×10^5
CASE1-3		1.53×10^6
CASE2-1	15	6.43×10^5
CASE2-2		9.58×10^5
CASE2-3		1.52×10^6

※ D=25.1cm, R/D=9

曲率半径 R と管径 D の比 R/D=9、エビ継ぎ管の屈折角αを 6 度と 15 度の 2 通りとした。圧力測定位置は、下面、左側面、右側面の 3 測線であり、湾曲部では左側面は外周部に、右側面は内周部に相当する。また、エビ継ぎ管では、各直管部毎に設定した上流端直下流、中央、下流側の 3 断面(測点①,②,③)について圧力測定を行った。

2.2　側方から空中放流による流入する減勢工の減勢特性に関する調査

既設ダム洪水吐き横に新たに設置する放流設備では、既設ダム洪水吐き減勢工を利用して減勢させるのが効率的であるが、洪水処理のための放流設備を設置する場合には、利水放流設備と比較してかなり大きな流量を放流することが想定される。洪水吐き減勢工を利水放流設備減勢工として利用する場合、その常時水深のあり方などは特に決まった方法はないようで、両者の対象流量の違いから、減勢池にさえ放流してしまえば安全であろうとの考えのもとに放流位置が配慮されている程度である。

そのため、本調査では既設ダムに設置するある程度の洪水処理機能を持たせた放流設備を念頭に、減勢工側方から空中放流する場合における減勢特性の検討を行った。

実験模型は、図-3 に示すように幅 1.5m、上下流長さ 4.7m(底面)の減勢池と放流管からなり、放流管は管径 D=100,150mm、設置位置は平面及び高さ方向にそれぞれ 2 ケースとした。実験は、図-3 に示す落下目標位置(減勢池に水がない状態)に、放流水脈の上端が着水するように放流量を決定した後、放流量は固定したままエンドシルの高さを 100～400mm(100mm 間隔)間で変化させて、放流管と反対の導流壁面上の最高水深とその位置を測定した。また、露出射流が発生するエンドシル高さの調査を別途行った。

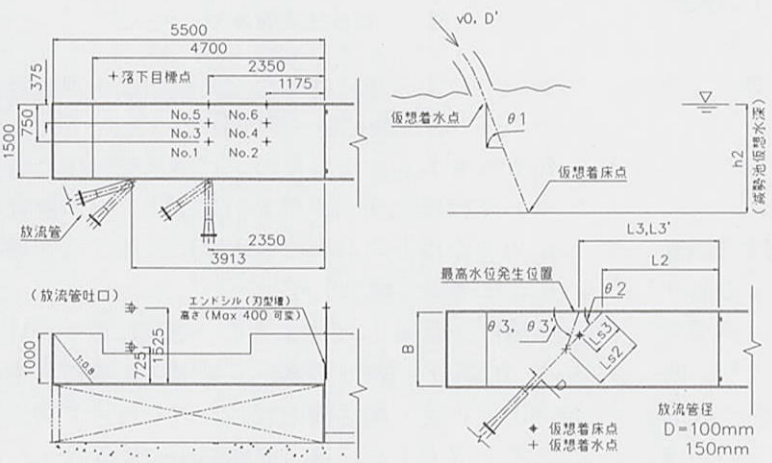


図-3　空中放流減勢工実験模型概要図

2.3　天ヶ瀬ダム(アーチ式ダム)の減勢音特性に関する現地観測

ダム減勢音は低周波音の卓越した音であることが現地観測等から知られているが、音の発生メカニズムや発生音と放流量等の水理学的条件との関係について系統だった検討は行われておらず、減勢音の予測手法及び低減対策の確立が求められている。

本調査では空中放流式の減勢工を有する天ヶ瀬ダム(写真-1)を対象に減勢音の現地観測を行い、減勢音の推定を行った。

放流音の観測は、図-4 に示すとおり、主としてダム提体付近及びダム下流河川沿いの地域で実施した。特に、ダムから見通しがきく下流河川沿いの地点については、距離減衰式の適用を考慮して、各観測点の間隔が概ね等間隔になるよう配置した。また、放流音の計測には 1～1000Hz の間で歪みのない測定が可能な低周波音レベル計を用いた。

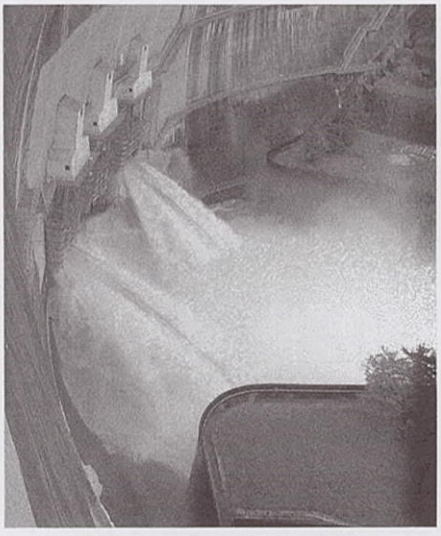


写真-1　天ヶ瀬ダム放流状況

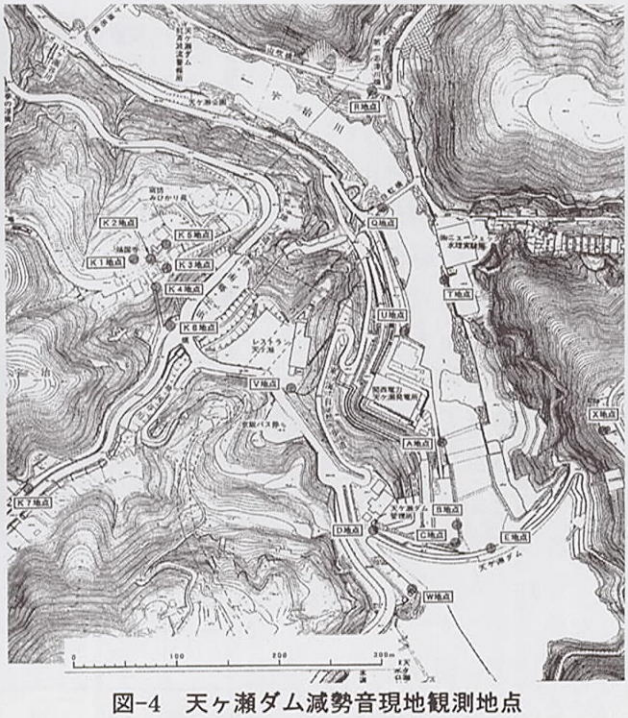


図-4　天ヶ瀬ダム減勢音現地観測地点

3. 調査結果

3.1　水平エビ継ぎ湾曲管路の圧力特性に関する調査

図-5 に湾曲部のピエゾ水頭 $p/\gamma+z$ （p：圧力,γ：水の単位体積重量,z：ピエゾ位置の位置水頭）の分布例を示す。下面については、ややバラツキはあるもののほぼ直線的に降下しているが、左側面、右側面ではエビ継ぎ管の影響が顕著に現れていることが分かる。

ここで、曲がりによる損失や二次流、エビ継ぎ管の影響による圧力降下係数の成分をεとすると、εは次式で計算される[1)]。

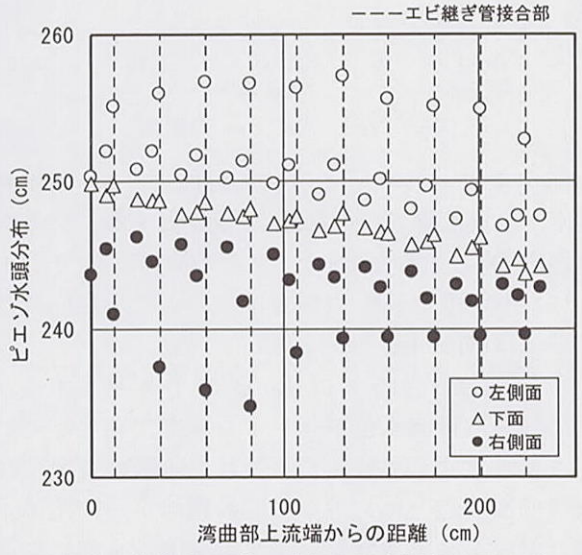


図-5　湾曲部のピエゾ水頭分布例(CASE1-1)

$$\varepsilon=\frac{H-(p/\gamma+z)}{v_m^2/2g}-(f_e+f\cdot L/D)-\left[\frac{D}{8r\{R/D-\sqrt{(R/D)^2-1/4}\}}\right]^2 \quad (1)$$

ここに、H：貯水池での全水頭,f_e：入口損失係数,f：摩擦損失係数,L：流下距離,v_m：断面平均流速,r：ピエゾ位置の曲率半径,g：重力加速度であり、右辺第 1 項は実験値の圧力降下係数、第 2 項は圧力降下係数の内、入口および摩擦損失による成分、第 3 項は遠心力による成分（平均流速位置で 1 としている）を表している。

なお、各形状毎に Re 数を変化させた 3 ケース（例えば、CASE1-1～1-3）のε値は、鉛直曲がりの場合と同様にほぼ同じ値になることが確認されたことから、以下の検討におけるε値はこれらの平均値として評価を行った。

図-6,7 にエビ継ぎ管のαとεの関係を、鉛直エビ継ぎ湾曲管路の結果と合わせて示す。測点①では、エビ継ぎ管接合部の不連続性により、左側面（鉛直曲がりの場合は上面）では圧力上昇が、右側面（鉛直曲がりの場合は下面）では圧力降下が生じており、εの絶対値はαが大きいほど大きくなっている。また、鉛直、水平曲がりとも、εの絶対値が最大となる管部は同じであるが、鉛直曲がりよりも水平曲がりの方が圧力降下の程度はやや大きく、圧力上昇の場合にはその逆となっている。このような傾向を示す要因の一つとして、重力の作用方向の違いによる影響が考えられる。

測点②では、測点①と逆の傾向を示しており、絶対値そのものも小さくなっている。εの符号が逆になる理由として、例えば右側面(鉛直曲がりの場合は下面)では剥離流れの再付着(左側面または上面ではその逆)による影響が考えられる。また、測点②では、水平曲がりと鉛直曲がりの両者間に明確な差異は見られなかった。

なお、ここでは示していないが、測点③におけるεはどの断面でもαによらずほぼゼロの値となっている。

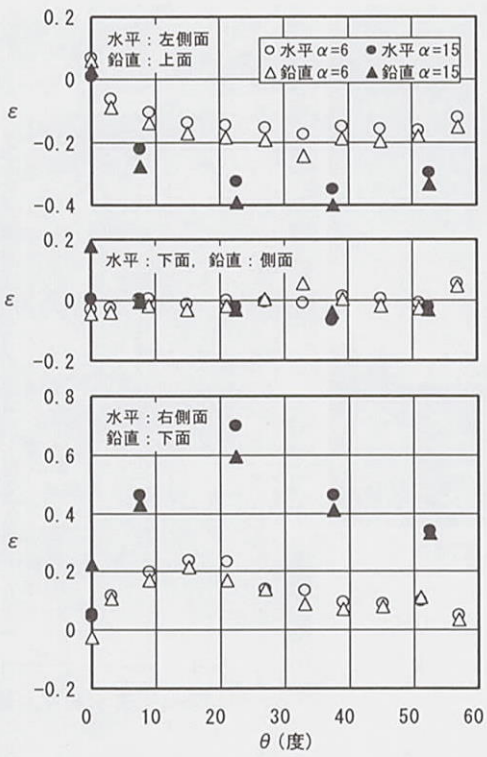


図-6　測点①のεとαの関係



図-7　測点②のεとαの関係

図-8 に測点①におけるεの絶対値の最大値とαの関係を、鉛直曲がりの結果と合わせて示す。鉛直曲がりでは、εの絶対値はαに対し直線的に増加しており、水平曲がりの場合も同様の傾向を示しているが、先に示したように、水平曲がりの方が圧力降下量が若干大きくなる傾向にあるので注意が必要である。また、図には、今回実施した水平曲がりの場合について、Re 数を変化させた 3 ケースにおけるデータのバラツキ程度も併せて示している。α=15(度)の右側面のバラツキが比較的大きいことから、αを大きく取る場合は、このバラツキを考慮して多少安全側に設計しておく必要がある。

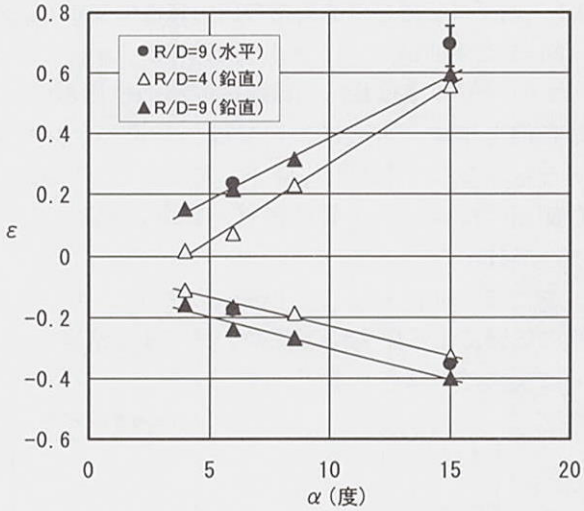


図-8　αとε_{max}, ε_{min}の関係

なお、αを大きくできれば管の製作が容易になるが、管接合部直下流の右側面での圧力降下量及び左側面での圧力上昇量が大きくなる。これは、管胴に不均一な荷重が作用することを意味しており、管構造としての検討も別途必要になる。

3.2　側方から空中放流による流入する減勢工の減勢特性に関する調査

3.2.1　最高水位の発生位置

図-3 に示すように放流管軸の延長線と導流壁との交点とエンドシルまでの水平距離を L2、実験における最高水位の発生位置とエンドシルまでの水平距離を L3、仮想着水点と最高水位発生位置を結んだ線と導流壁とのなす角度をθ3、仮想着水点から導流壁までの距離を Ls2 とする。突入水脈径を D' とすると L2 と L3 との関係は図-9 のようになり、θ2=90° の場合は、およそ想定位置と実験値はほぼ一致する。

また、L2/D'<15 では L3/D' ≒ 0 が発生する。この部分は最高水位がエンドシル部で発生していることを意味しているが、これは水脈の着水及び導流壁衝突点とエンドシル間の距離が短いため、流れが十分減勢されないままエンドシル部に到達し、再度エンドシル部で盛り上りが発生すること

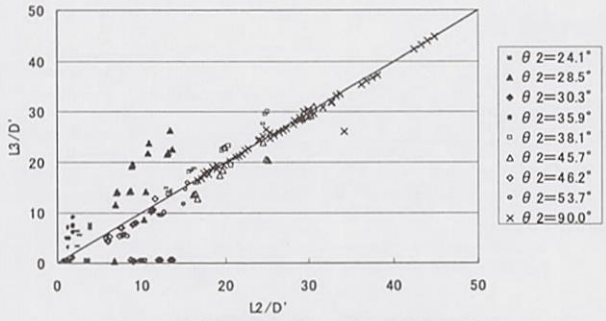


図-9　最高壁面水位の発生位置の関係

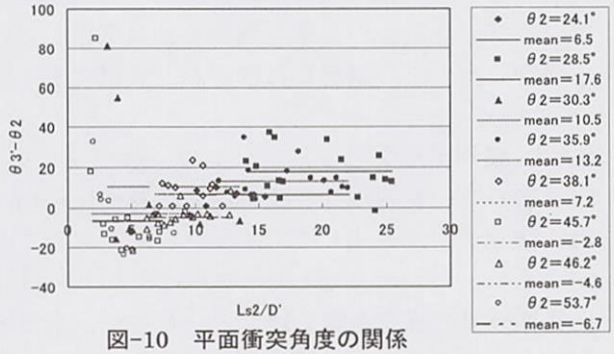


図-10　平面衝突角度の関係

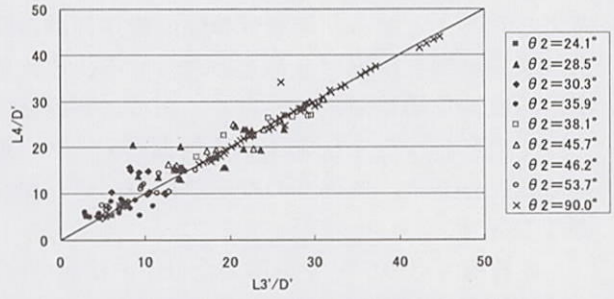


図-11　最高壁面水位の位置(実験値と推定値の関係)

による。次に導流壁面部のみに注目してみる。エンドシル部で最高水位が発生している場合において、導流壁面部でも水面の盛り上りがある場合、その最高位置を導流壁面部の最高水位とし、全データを再整理した諸量を L3', θ3' として、(θ3'-θ2)と Ls2/D' との関係を整理したものを図-10 に示す。(θ3'-θ2)は Ls2/D' によって多少のバラツキはあるが、θ2 毎に一定と考えて平均値をとり、この(θ3'-θ2)の平均値を用いた最高水深が発生する推測位置とエンドシルまでの水平距離を L4 として、実験値 L3' との関係を比較すると図-11 のとおり、ほぼ一致する結果となった。

3.2.2　最高水位について

最高水位は仮想着床点から導流壁までの距離 Ls3 を 3 つに分類し、(h3'-h2)/D' と h2/D' の関係を図-12a～12c に示す。

ここに、h3' は導流壁面部での最高水深、h2 は

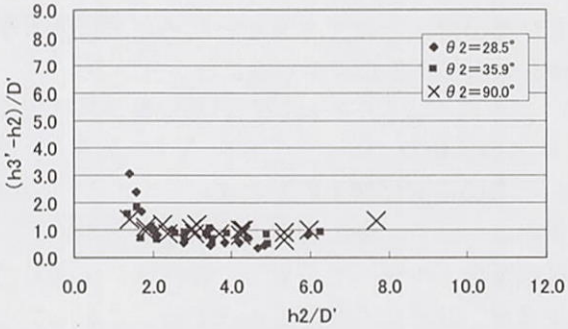


図-12a　最高水位と水深条件(Ls3/D'=9.5～22.0)

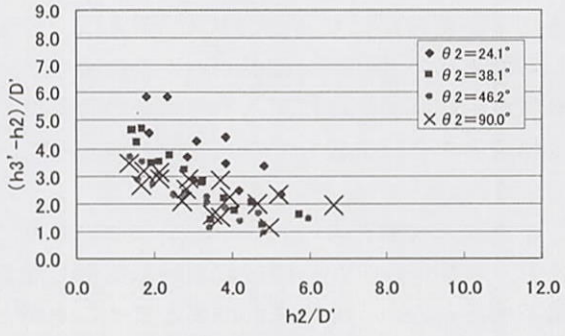


図-12b　最高水位と水深条件(Ls3/D'=3.6～11.0)

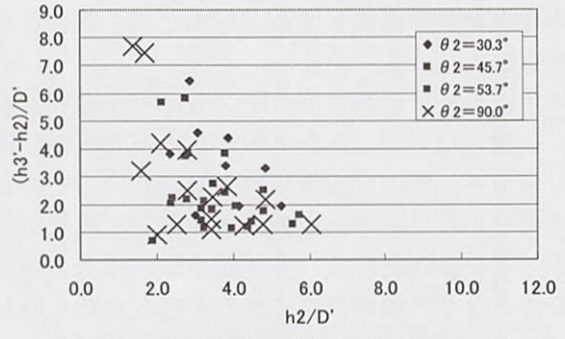


図-12c　最高水位と水深条件(Ls3/D'≒0)

放流水脈がエンドシルの越流特性から求められる仮想減勢池水深である。θ2=90° の場合、仮想着床点が導流壁から遠いと、(h3'-h2)/D' は水深条件によらず一定となる傾向を示し、Ls3/D' が小さくなるにしたがい、水深条件 h2/D' による(h3'-h2)/D' の変化が大きくなる。一方、θ2 ≦ 53.7° の場合、Ls3/D' が大きい場合でも h2/D' が小さいケースで(h3'-h2)/D' が大きくなる傾向がみられた。また、Ls3/D' が小さくなるにしたがいθ2=90° の場合と同様に(h3'-h2)/D' は h2/D' により変化するが、その傾きは大きいようである。

3.2.3　露出射流の発生条件について

落下目標点 No.1～4 のケースについて、露出射流の発生する条件を調査し、その結果を図-13 に

示す。$\theta 2=90^\circ$ と $\theta 2 \leqq 46.2^\circ$ を比較すると、後者の方が露出射流を発生させないために減勢池水深条件を大きくする必要があることが分かる。

3.3 天ヶ瀬ダム(アーチ式ダム)の減勢音特性に関する現地観測

3.3.1 音の伝搬に関する基本式

音源が小さく、その音響出力がどの方向にも一様な音響エネルギーを放射して球面状に伝搬していく場合、音源は点音源とみなせる。これまでの水叩き式減勢工における減勢音の検討から、跳水音の発生音は跳水始端部からの発生音が支配的であることが明らかになっており[2)]、例えば、放流管からの流れのように、幅が制約されたまとまった水脈が広い減勢池内に突入する場合の音源は、跳水始端部を音源位置とする点音源と考えることができる。

ここで、天ヶ瀬ダムのコンジットについて見てみると、コンジットからの放流水脈は拡散しながら落下するものの、その主流はまとまった水脈として減勢池に突入していることから、音源は跳水式減勢工の場合と同様に、放流水脈の減勢池への突入地点を音源位置とする点音源と考えることができる。

また、天ヶ瀬ダムは 3 門のコンジットを有するが、複数のコンジットから放流した場合には、各コンジットからの放流水脈の主流は互いに干渉し合うことなくそれぞれ単独の水脈として減勢池に突入していることから、各放流水脈の突入地点が点音源となり、観測値はこれらが合成したものとして与えられる。

音源を点音源、空間を半自由空間とし、各コンジットから放流した場合の音響パワーレベルを PWL_j(dB)とすれば、合成音響パワーレベル PWL(dB)と地点(i)での音圧レベル SPL_i(dB)の関係は次式で与えられる。

$$SPL_i = PWL - 20\log r_i - 8 - \alpha_d - \alpha_e \quad (2)$$

$$PWL = 10\log\left(\sum_j 10^{\frac{PWL_j}{10}}\right) \quad (3)$$

ここに、r_i：音源から地点(i)までの距離(m)，α_d：回折減衰値(dB)，α_e：超過減衰値(dB)である。

なお、超過減衰には、主として空気吸収による減衰と地表面の吸収による減衰があるが、ダム放流音のような低周波音が卓越している場合には、その減衰量はほとんど無視できるほど小さい。

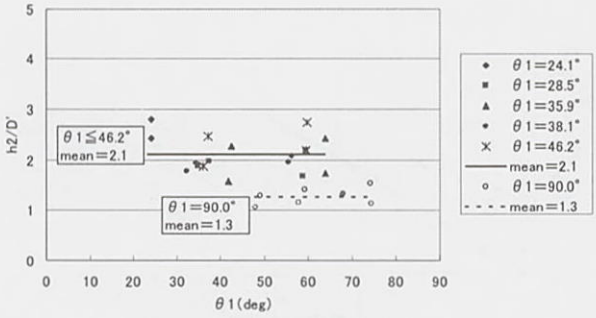


図-13 露出射流の発生条件

3.3.2 使用データ

音響パワーレベルや音源の周波数特性については、観測データを用いて(2)式から推定することができる。しかし、(2)式の適用に当たっては、回折減衰量の推定が難しいこと、音源を点音源と仮定しているため、音源近傍では適用できないと考えられることから、減勢音特性の推定には、回折減衰の影響を無視できると考えられる、放流地点から直接見通しのきく地点で、かつ、音源近傍を除く地点として A,D,Q,R,T,U 地点のデータを用いることとした。放流音の推定に用いたデータを表-2 に示す。

上記観測地点のデータを用いた以下の検討では、放流音特性の推定を(2)式において $\alpha_d=\alpha_e=0$ とした次式により行った。

$$SPL_i = PWL - 20\log r_i - 8 \quad (4)$$

表-2 減勢音特性の推定に用いたデータ

放流条件	コンジット放流量(m^3/s)				地点名	音圧レベル
	1 号	2 号	3 号	合計		
放流パターン①	37	36	30	103	A 地点	93.6dB
放流パターン②	—	17	—	17	D 地点	84.6dB
放流パターン③	52	—	54	106	A 地点	96.1dB
					D 地点	97.4dB
					Q 地点	87.7dB
					R 地点	85.0dB
					T 地点	91.3dB
					U 地点	91.8dB

3.3.3 音響パワーレベル

表-2 の 3 放流パターンについて、(4)式より音響パワーレベルの推定を行った。

なお、音源位置である放流水脈の減勢池への突入地点は、ゲート出口で貯水位との水位差による初速を与えた自由落下式により計算を行った。また、複数のコンジットから放流している場合は、各音源の重心を音源位置とした。

(a)パターン①における音響パワーレベル

簡単のため 1 門当たりの放流量は 103m³/s を 3 等分した 34.3m³/s とし、A 地点での観測値を用いて(4)式より音響パワーレベルを求めると 143.1dB となる。この値は 34.3m³/s×3 門放流の場合の合成音響パワーレベルと考えられ、これを 1 門当たりに換算すると 138.3dB となる。

(b)パターン②における音響パワーレベル

D 地点での観測値を用いて(4)式より音響パワーレベルを求めると 134.4dB となる。

(c)パターン③における音響パワーレベル

簡単のため、パターン①と同様 1 門当たりの放流量は 106m³/s を 2 等分した 53m³/s とする。このパターンでの観測データは複数あるため、各地点での観測値と距離との回帰式より音響パワーレベルを求めると、音響パワーレベルは 147.6dB となる。この値は 53m³/s×2 門放流の場合の合成音響パワーレベルと考えられ、これを 1 門当たりに換算すると 144.6dB となる。

コンジット 1 門当たりの放流量 Q_j(m³/s)と音響パワーレベル PWL_j(dB)の関係は図-14 に示すとおりであり、回帰式を求めると次式のようになる。複数のコンジットから放流している場合は、各コンジットについて音源のパワーレベル PWL_j(dB)を求め、(3)式により合成すればよい。

$$PWL_j = 8.6188 \ln(Q_j) + 109.41 \quad (5)$$

これより、音響パワーレベルは ln(Q)(Q：放流量)に比例することが分かる。これは、水叩き式減勢工の場合と同様の傾向であるが、大流量の場合もその傾向に従うかどうか、さらに現地観測による検証が必要である。

なお、音響パワーレベルの推定には、放流地点から直接見通しのきく地点で、かつ、音源近傍を除く地点のデータを用いたが、ここでダム周辺の地点の観測値と推定式の関係を示すと図-15 のようになる。V,W,X 地点では回折の影響を受け、観

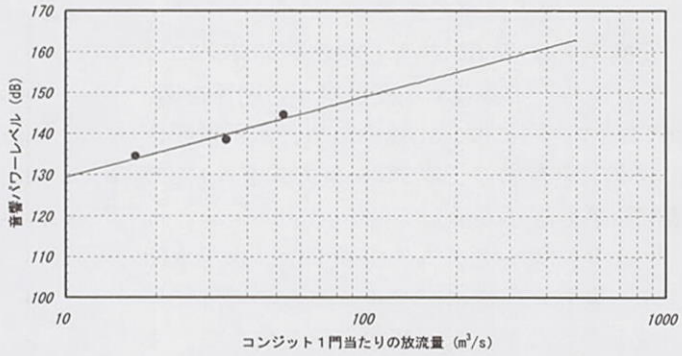


図-14 コンジット 1 門当たりの放流量と音響パワーレベルの関係

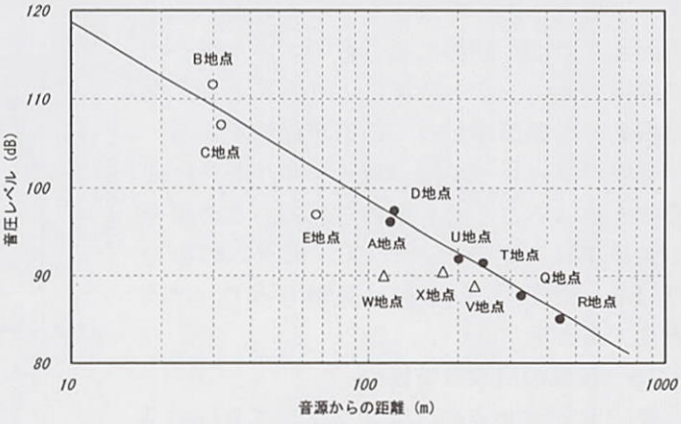


図-15 観測値と推定値の比較

測値は推定値より小さい値となっている。特に、W 地点では、ダム提体が大きな障壁となっていることが分かる。音源近傍では、音源より下流側の B 地点で観測値は推定値よりやや大きめの値となっているが、音源より上流側の C,E 地点では逆に観測値は推定値より小さくなっている。これは、ダム提体や減勢工の複雑な形状の影響によるものと考えられる。

3.3.4 音のエネルギーへの変換率

これまでのダム放流音に関する検討から、音響出力は流入エネルギーに概ね比例する(比例定数は音のエネルギーへの変換率と考えられる)ことが明らかとなっている[2)]。

音響出力 W(w)と音響パワーレベル PWL の間には次の関係がある。

$$PWL = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (6)$$

ここに、W_0：音響出力の基準値(10^{-12}w)である。

また、流入エネルギー E(w)は次式で与えられる。

$$E = \frac{\rho_w Q v^2}{2} \quad (7)$$

ここに、ρ_w：水の密度(kg/m³),Q：放流量

(m^3/s),v：流入流速である。

変換率をα=W/E とし、現地観測結果について、フルード数 Fr と変換率αの関係を図-16 に示す。図には、比較のため、水平水叩き式減勢工を有する三春ダム(重力式ダム)での観測結果も併せて示している。

図より、天ヶ瀬ダムの変換率は、水平水叩き式の場合と同様に、フルード数の増加に伴い減少する右下がりの傾向を示している。また、アーチ式ダムの変換率は、水平水叩き式ダムの場合と比べて大きくなっている。この要因としては、減勢による音のエネルギーへの変換の他に、空中放流により誘発された空気振動の影響が加わっている可能性がある。

音響パワーレベルは、流入エネルギーに変換率を乗じることでも求められる。この場合の変換率は、やや大きめ(天ヶ瀬ダムの場合は 1.5～2×10^{-3} %程度)に見積もっておけば安全である。

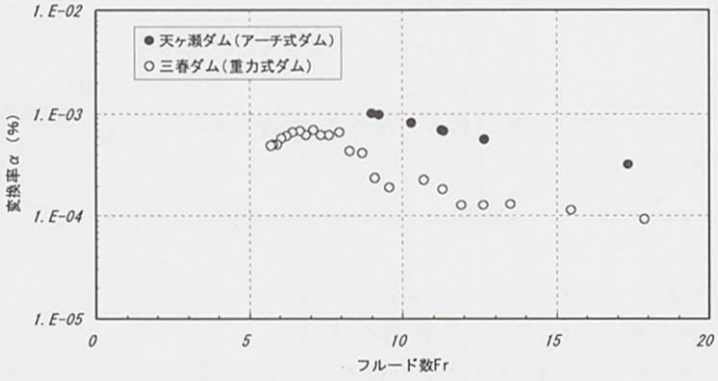


図-16　フルード数と変換率の関係

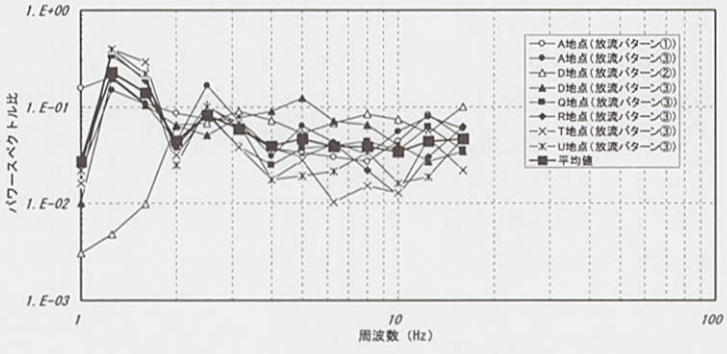


図-17　1/3 オクターブ分析結果

3.3.5　音源の周波数特性

表-2 に示す地点の 1/3 オクターブ分析結果を図-17 に示す。縦軸は各バンドの音圧レベルをオーバーオール値で無次元化したパワースペクトル比で表している。

図より、パワースペクトル比はどの地点でも概ね同じ形状となっている。これまでの水平水叩き式減勢工の検討でも、音源のパワースペクトル比は一定の減勢工形状に対して流況に依らない固有の特性をもつことが明らかとなっている[2)]。天ヶ瀬ダムのように空中放流の場合も同様であり、音源のパワースペクトル比は、各観測地点の平均的な形状として与えられると考えられる。

4. まとめ

13 年度に実施した調査の主な検討結果をまとめると以下の通りである。

a) 水平エビ継ぎ湾曲管路の圧力特性に関する調査

エビ継接合部の不連続性により、接合部直下流の内周部で生じる圧力降下量は、鉛直曲がりの場合よりも若干大きくなる。エビ継ぎ管部の中央及び下流側では、水平曲がりと鉛直曲がりの両者間に明確な差異はなく、ほぼ同様の圧力特性を示す。今後は、数値シミュレーションによる検討も行い、エビ継ぎ湾曲管路流の水理特性の解明を行っていく必要がある。

b) 側方から空中放流による流入する減勢工の減勢特性に関する調査

ある程度大きな流量を側方から空中放流した場合について、減勢工内の側壁沿いの最高水位とその位置及び露出射流の発生条件の傾向を把握した。今後は、減勢池全体の流況や底面に作用する動水圧等の整理を行っていく必要がある。

c) 天ヶ瀬ダム(アーチ式ダム)の減勢音特性に関する現地観測

アーチ式ダムにおける流入エネルギーの音のエネルギーへの変換率は、水平水叩き式減勢工の場合よりも大きい。また、音源のパワースペクトル比は、水平水叩き式減勢工と同様に一定の減勢工形状に対して流況に依らない固有の形状をもつ。今後は、さらに現地観測データの蓄積を図るとともに、水理実験による検討も行い、より精度の高い減勢音の予測方法や低減対策の確立を目指して検討を進めていく必要がある。

参考文献

1) 柏井条介，宮脇千晴：円形放流管湾曲部の圧力特性，ダム工学,Vol.9,No.4,1999.4

2) 桜井力，柏井条介，櫻井寿之：天ヶ瀬ダム水理模型実験報告書(その 2)，土木研究所資料第 3817 号, 2000.3

8.4　ダムコンクリートにおけるスラッジの有効利用に関する調査

研究予算：運営費交付金(治水勘定)
研究期間：平 12 ～平 14
担当チーム：技術推進本部(構造物ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ技術)
研究担当者：河野　広隆，森濱　和正

【要旨】
ダム現場では，骨材製造時や，ダム堤体のグリーンカット時に大量のスラッジが発生する。スラッジは，産業廃棄物として多額の費用をかけて処分されているのが現状である。環境保全およびコスト縮減の観点から，スラッジの有効利用が求められている。本研究は，スラッジをコンクリートに混入して有効利用を図るために，①スラッジの品質評価方法，②スラッジを混入したコンクリートの配合設計方法の確立，を目標に実施している。
キーワード：砕石スラッジ，品質評価，配合設計，環境保全

1．はじめに

12 年度は，スラッジの各種品質を把握した。また，ダムの内部用コンクリートである RCD・ELCM 用コンクリート，外部用コンクリート，高流動コンクリートの４種類の，モルタルを用いてスラッジの混入率を変化させたときのワーカビリティーに及ぼす影響を確認した。

13 年度は，４種類のコンクリートを用いてスラッジの混入率を変化させたときのワーカビリティー，強度，耐久性に及ぼす影響を確認した。

2．研究方法

2.1　使用材料の品質

使用したスラッジは，ダム建設現場の骨材製造プラント用濁水処理設備から採取した脱水ケーキ(以下スラッジａ，「Sa」)と，基礎掘削ずりやグリーンカットによる濁水などを集めたダムサイト濁水用処理設備から採取した脱水ケーキ(以下スラッジｂ，「Sb」)の２種類である。

スラッジの組成分析と，粒度分布，かさ密度，比表面積，密度など物理的試験，メチレンブルー吸着量，ゼータ電位の化学的試験の結果は，表-１のとおりである。表-１には比較のため，セメントとフライアッシュの結果，以前実施した石粉の結果も示した。

スラッジは，平均粒径が小さく比表面積が大きいこと，メチレンブルー吸着量が大きいことがわかる。さらに Sb は，実積率が小さく充填性が劣っていて，ゼータ電位が小さく分散性に劣っている。

2.2　基本配合

スラッジを混入していないときのコンクリートの基本配合を表-２に示す。

基本配合は，ダム現場の粗骨材最大寸法 150mm のフルミックス配合から，40mm 以上の粗骨材を取り除き，目標のコンシステンシー，空気量が得られるように試験練りを行なって決定した。

2.3　実験方法

スラッジは細骨材に置換した。細骨材量に対する微粒分量(スラッジ量＋細骨材に含まれている 0.15mm 以下の微粒分の量)の割合を「微粒分率」と定義し，微粒分率を変化させることによりスラッジ混入率を変化させた。なお，細骨材には 0.15mm 以下の微粒分が９％含まれているので，微粒分率９％はスラッジ無混入である。

４種類のコンクリートに微粒分率を変化させたときのコンシステンシー，強度，乾燥収縮試験などを行なった。

コンシステンシー試験は，表-２に示すとおりコ

表－1　粉体の試験結果

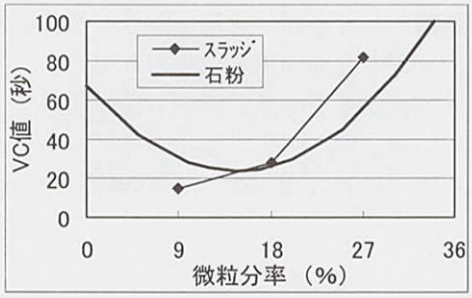
ｺﾝｸﾘｰﾄの種類	材料の種類	記号	密度 g/cm³	かさ密度 g/cm³	実積率 %	平均粒径 μm	比表面積 cm²/g	ﾒﾁﾚﾝﾌﾞﾙｰ吸着量 mg/g	ゼータ電位 mV
RCD ELCM 外部 高流動	ｽﾗｯｼﾞ	Sa	2.70	1.275	47.2	9.1	9050	9.68	11
		Sb	2.53	0.912	36.1	5.9	13750	8.94	3
	ｾﾒﾝﾄ	C	3.21	1.757	54.7	10.7	3210	－	14
	ﾌﾗｲｱｯｼｭ	FA	2.10	1.838	65.9	12.5	2950	0.07	9

表－2 コンクリートの基本配合

コンクリートの種類	粗骨材最大寸法(mm)	コンシステンシー 評価方法	コンシステンシー 目標値	空気量 目標値(%)	水結合材比(%)	FA置換率(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m³) 水W	セメントC	フライアッシュFA	細骨材S	粗骨材G	混和剤	*3 AE剤
RCD	40	VC	20秒	—	94.0	30	47.4	133	99.0	42.4	1005.4	1129.9	0.35*1	—
ELCM	40	スランプ	5cm	4.5	73.6	30	40.0	154	146.5	62.8	769.0	1168.4	0.52*1	0.031
外部	40	スランプ	5cm	4.5	50.0	30	37.4	146	204.4	87.6	698.5	1181.9	0.73*1	0.029
高流動	20	SF	62.5cm	1.5	33.1	60	49.1	155	187.2	280.8	834.0	875.0	8.66*2	—

*1 AE減水剤(C+FA)*0.25%　　*2 高性能AE減水剤(C+FA)*1.85%　　*3 (C+FA)*0.015%

ンクリートの種類によって異なる。強度試験は，圧縮強度，割裂引張強度，乾燥収縮試験用供試体の曲げ強度である。乾燥収縮試験は，水中養生を７日および 28 日行なった後から開始し，長さ，質量，動弾性係数を測定した。材齢６ヶ月，１年で曲げ強度試験を行ない，破断面の中性化深さを測定した。水中養生終了後と中性化深さ測定後には細孔径分布を測定した。



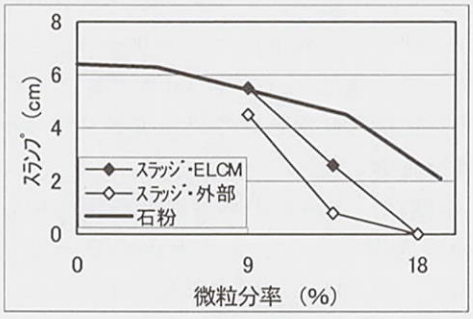
図－１　RCD用コンクリートのVC試験結果

３．研究結果

3.1　コンシステンシー試験結果

3.1.1　RCD用コンクリート

微粒分率と VC 値の関係を図-１に示す。以前に行なった石粉混入の実験結果も比較に入れてある。スラッジを混入すると，石粉を混入した場合よりも微粒分率が小さくても VC 値が大きくなっており，コンシステンシーが低下している。

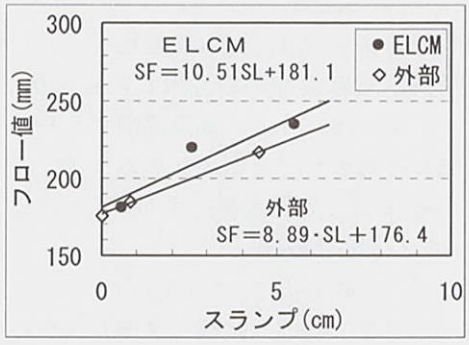


図－２　ELCM、外部コンクリートのスランプ試験結果

3.1.2　ELCMおよび外部用コンクリート

有スランプコンクリートである ELCM，外部用コンクリートの微粒分率とスランプの関係を図-２に示した。この場合も石粉の結果と比較すると，微粒分率の増加によりスランプの低下が大きくなった。

12 年度に実施したモルタルのフロー値と今回得られたスランプの関係を求めると，図-３のように良い相関関係があった。有スランプコンクリートにスラッジを混入したときのコンシステンシーの評価は，モルタルのフロー試験で予測できる可能性がある。



図－３　スランプとモルタルのフローの関係

3.1.3　高流動コンクリート

高流動コンクリートの微粒分率とスランプフロー(SF)，スランプ(SL)の関係は，図-４のとおりである。微粒分率を 4.5 %増加させただけで SF は測定できず，SL も急激に低下した。今回使用したスラッジは，高流動コンクリートの流動性に大きな影響を与える。

3.1.4　コンシステンシーに及ぼすスラッジの影響

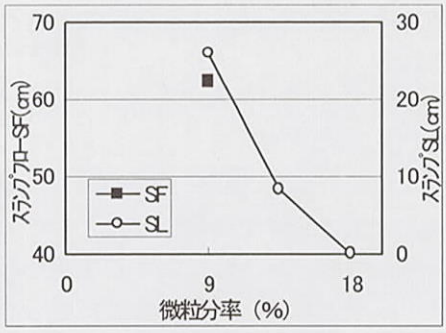
微粒分率が増加するとコンシステンシーは急激に低下した原因は，①比表面積が増加することにより拘束される水の量が増えること，②ゼータ電位も小さかったので分散性が低下したこと，③メチレンブルー吸着量が大きかったことから混和剤の効果が十

分発揮されなかったことが考えられる。また，今回は調査していないが，④スラッジ処理に用いる凝集剤も影響していることが考えられる。

3.2　強度試験結果

図-５～７に強度結果を示す。(a)は材齢と強度の関係，(b)は微粒分率９％(スラッジ無混入)に対する微粒分率 18 ％のときの強度比である。

高流動コンクリートを除くと，スラッジを混入すると圧縮，割裂引張，曲げ強度とも初期の強度比が大きく，長期材齢になるとしだいに一定値に収束する傾向がある。



図－４　高流動ｺﾝｸﾘｰﾄのSF、SLの結果

3.3　耐久性試験結果

3.3.1　乾燥収縮試験結果

長さ変化，質量変化の結果を図-８および９に示す。長さ変化率は，１年で 600 ～ 700 × 10^{-6} であり，ほぼ通常のコンクリートと同等である。微粒分率の影響は明確ではない。

質量変化率は１年で３～４％である。微粒分率の影響は明確ではないが，水中養生期間が 28 日の方が７日よりも質量変化がわずかに小さく，緻密になっているものと考えられる。

相対動弾性係数も微粒分率の影響は明確ではなく，いずれも 90 %程度でほぼ一定であった。

3.3.2　中性化深さ試験結果

中性化深さの測定結果は図-10のように，微粒分率が大きいほど大きくなっている。また，水中養生期間が長いほうが小さくなっている。

3.3.3　細孔径分布

各細孔径と細孔量の関係は，図-11のとおりであった。微粒分率が大きいほど，また，水中養生期間が長いほど，細孔量がピークになる細孔径は小さい方へ異動している。

スラッジを混入することにより，コンクリート組織が緻密にな

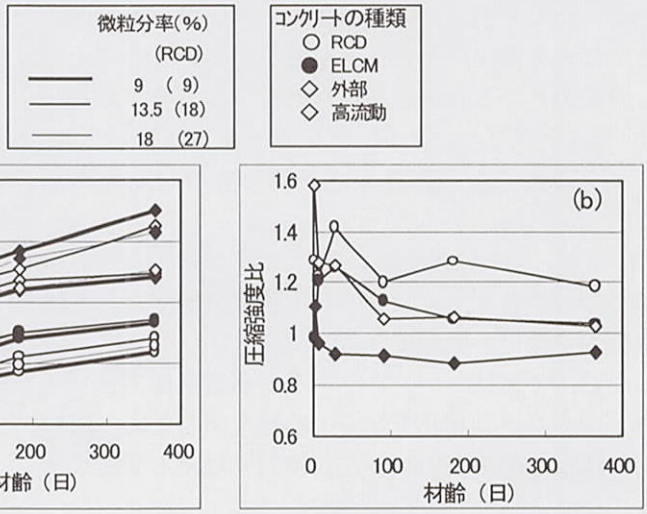


図-５　圧縮強度

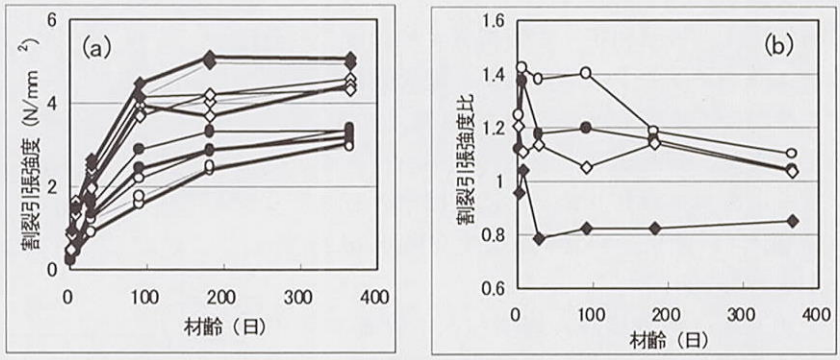


図-６ 割裂引張強度

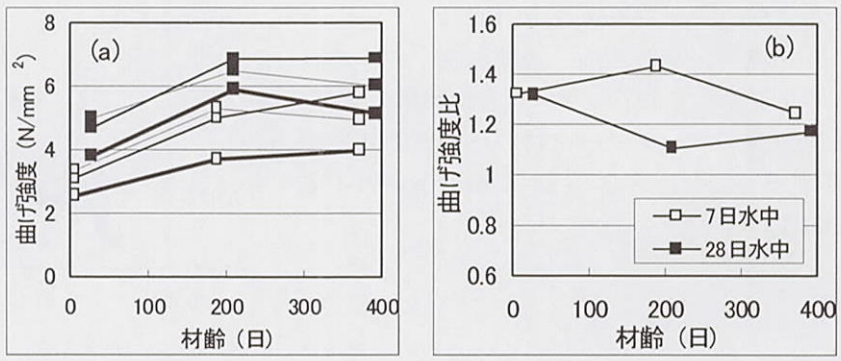


図-７　曲げ強度

り，強度増加や収縮の低減，中性化が抑制されたものと考えられる。

4．まとめ

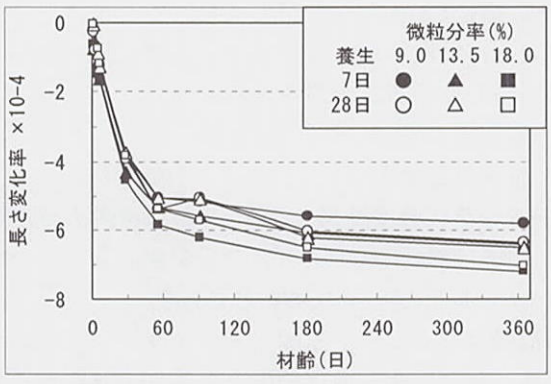
今回は，４種類のコンクリートについて，単位水量一定のもとで微粒分率を変化させたときの，ワーカビリティー，強度，耐久性に関する実験を行なった。本実験の成果として、以下のことが明らかとなった。

① スラッジを混入するとワーカビリティーは低下する。その原因は，スラッジの比表面積が大きいこと，ゼータ電位が小さく分散性が小さいことによるものであり，これらの品質を把握する必要がある。

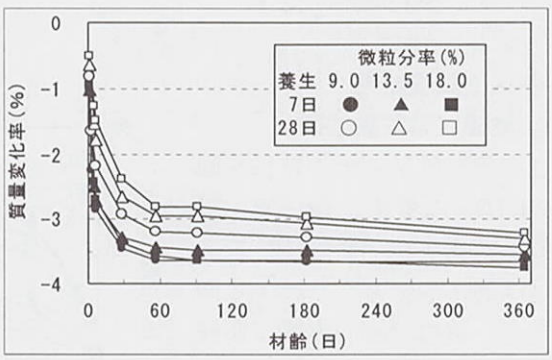
② 有スランプコンクリートのワーカビリティーは，モルタルのフロー試験から予測できる可能性がある。

③ スラッジを混入することによりコンクリート組織が緻密になり，コンクリート強度は増加し，乾燥収縮や中性化が低減できる。

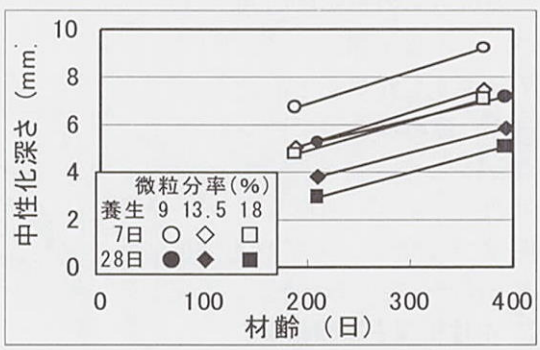
なお，今後は，コンクリートの品質を低下させることなくワーカビリティーの改善を図るため，混和剤の種類と使用量について、検討を加える必要がある。



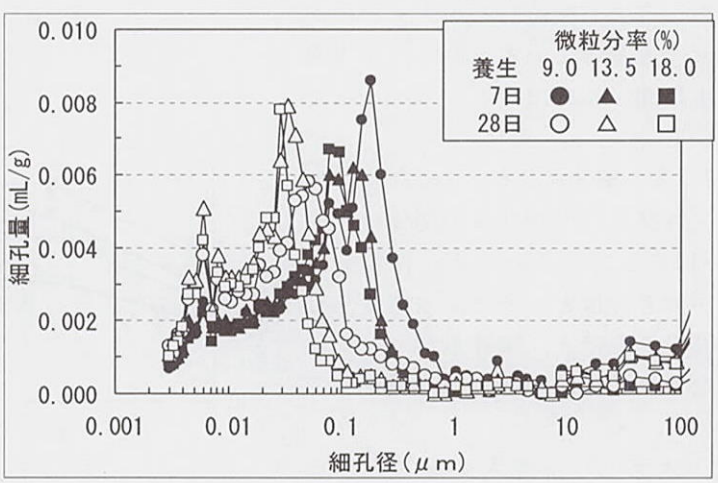
図－８　長さ変化



図－９　質量変化



図－１０　中性化深さ



図－１１　細孔径分布

参考文献

1) 河野広隆，森濱和正，古賀裕久，加藤俊二：微粒分混入コンクリートの品質および配合設計方法に関する検討，土木研究所資料第 3710 号，2000.2

2) 土田克美，河野広隆，森濱和正：モルタル・コンクリートのワーカビリティーに及ぼす砕石スラッジの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.1, pp.193-198, 2001.7

3) 土田克美，河野広隆，森濱和正：砕石スラッジを使用したダム用コンクリートのワーカビリティーと圧縮強度，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp.368-69, 2001.10

4) 土田克美，河野広隆，森濱和正：ダム建設工事で発生する砕石スラッジ有効利用の検討，廃棄資源のコンクリート材料への有効利用に関するシンポジウム論文集，pp.191-198, 2001.11

8.5 濁沸石等含有岩石のダムコンクリート骨材としての有効利用に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）
研究期間：平12～平15
担当チーム：材料地盤研究グループ（地質）
研究担当者：脇坂安彦、阿南修司

【要旨】
濁沸石によるモルタルの品質低下現象は、硬化モルタルでの亀裂、剥離、ポップアウト発生などの劣化現象であり、劣化は乾燥湿潤の繰り返しが生じる場合に起こるものと考えられる。劣化したモルタルでは濁沸石からセメントペーストに向かって複数の放射状割れ目が認めれた。劣化モルタル中の濁沸石の化学組成は濁沸石の理想的な組成と変わりなく、また、濁沸石周辺に異常膨張を起こすような物質、水和物の生成は認めれなかった。したがって、濁沸石によるモルタルの劣化の原因は、化学反応ではなく、物理的な作用であると考えられる。
キーワード：コンクリート骨材、濁沸石、曝露試験、モルタル

1. はじめに

ダム用コンクリート骨材の原石山の環境保全や資源の有効利用の観点から、原石の廃棄量を押さえることが望まれている。廃棄される原石には大きく、骨材としての物理的条件を満足しないものと、物理的条件を満足していても鉱物学的な要件によってコンクリート骨材として望ましくないものとがある。後者のような鉱物には、アルカリ骨材反応を生じるシリカ鉱物、スメクタイト、黒雲母、黄鉄鉱、濁沸石などがある。そこで本研究課題では濁沸石を取り上げ、濁沸石によるコンクリートの品質低下現象の把握とそのメカニズムの解明を行った上で、有効利用法の提案を行うために、モルタルの曝露試験および曝露によって劣化したモルタルの形態・化学分析を行った。

2. 既往の研究

濁沸石がコンクリートにとって好ましくないことは、1923年にPearson & Loughlin[1]によって初めて報告された。その後、1969年にASTM C 294[2]（天然鉱物質骨材の構成物の標準記載用語）のなかで、濁沸石とその脱水物であるレオンハルダイトは乾燥湿潤に伴う体積変化があり、要注意であることが記載された。我が国では、1979年に有泉[3]が既述のPearson & Loughlin[1]の報告を引用するとともに、濁沸石を膠結物として含んだ砂岩によるコンクリートの劣化の事例を紹介している。また、劣化の原因は濁沸石とレオンハルダイトの転移時の1.5%の体積変化であると推定している。このほか、重倉[4]、丸・柳田[5]、日本コンクリート工学協会[6]、藤井・小林[7]、川村[8]などによっても、濁沸石はコンクリートに有害であることが述べられている。しかしながら、これらの文献では濁沸石の有害性の確認は、Pearson & Loughlin[1]では劣化コンクリートの観察結果、その他の文献では既存の文献に基づいており、いずれも実験的には確認されていない。

3. 研究方法

2.1 実験用骨材

実験に使用したのは、濁沸石含有骨材（L）として熊本県産の閃緑岩、濁沸石非含有骨材（S）として広島県産の花崗岩である。閃緑岩中に濁沸石は脈状に存在したり、斜長石を置換して存在している。これらの岩石を5mm以下に粉砕し、細骨材を調製した。濁沸石含有骨材は濁沸石非含有骨材と表-1に示す割合で混合した。なお、表-1にはあげていないL0骨材はSとは混合しておらず、純粋なLのみで構成されている。

2.2 曝露試験

上記の調製骨材を用いてモルタルを作製し、作製したモルタルを土木研究所孔内にて曝露した。曝露は降雨がモルタルに当たる条件（降雨条件）と当たらない条件（非降雨条件）に分けておこなった。曝露期間中の任意の材令において質量、共鳴振動数、長さの測定を行った。また、粒度調製をしていないL骨材を使用してコンクリートも作製し、曝露した。

表-1　骨材の調整粒径と割合（表中の単位はWt%）

調製骨材名		粒径(mm)					
		5-2.5	2.5-1.2	1.2-0.6	0.6-0.3	0.3-0.15	0.15
L1	L	15.94	35.68	-	-	-	-
	S	-	-	16.48	16.48	10.03	5.39
L2	L	-	-	26.55	34.48	-	-
	S	6.86	16.60	-	-	10.10	5.41
L3	L	-	-	-	57.69	-	-
	S	5.22	12.64	12.64	-	7.69	4.12
L4	L	-	-	-	42.87	19.24	-
	S	5.71	13.83	13.83	-	-	4.52
L5	L	-	-	-	-	-	-
	S	9.01	21.82	21.82	21.82	13.28	12.25

2.3　偏光顕微鏡による形態観察

モルタルおよびコンクリート供試体の劣化状況を偏光顕微鏡にて観察した。

2.4　SEMによる形態観察および元素分析

モルタルおよびコンクリート供試体について、走査型電子顕微鏡（SEM）により形態観察とSEM付属のエネルギー分散型分析装置により元素分析を行った。

2.5　X線回折による劣化部の生成物の分析

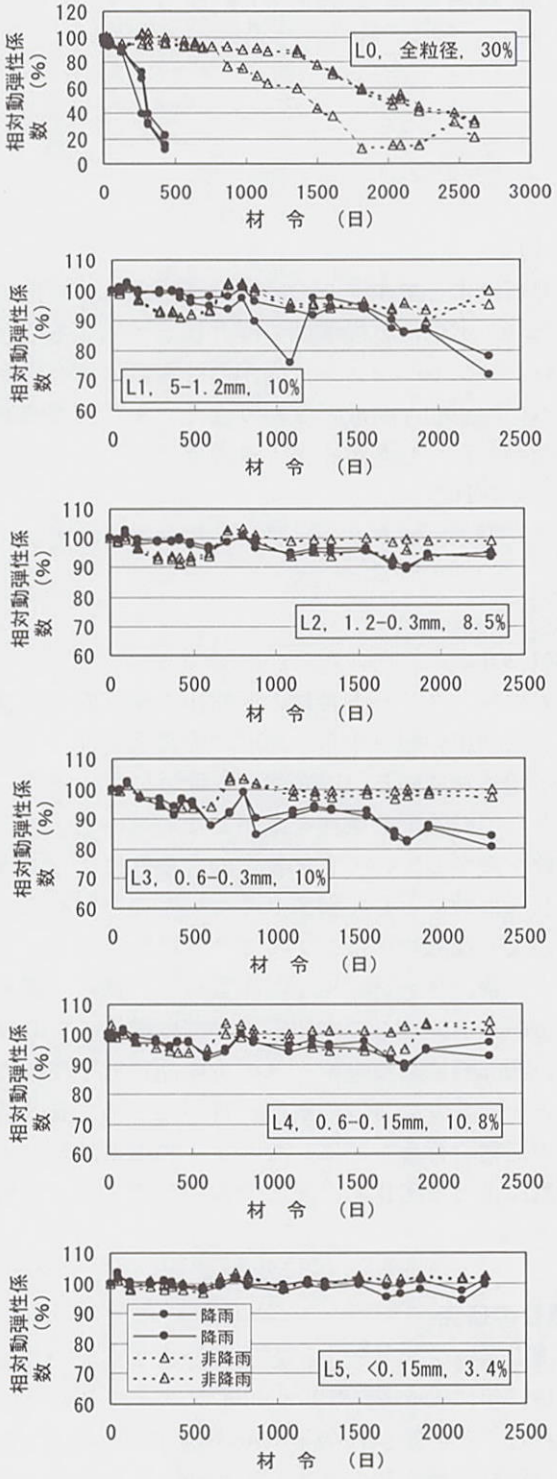
モルタルの劣化部の生成物の分析をX線回折によって行った。

4. 研究結果

4.1　曝露による劣化の状況

曝露開始から平成14年3月31日現在でL0は3,034日、L1～L5は2,732日経過している。降雨条件下にあるL0モルタルでは、曝露開始後約50日位から、モルタル表面の劣化が認められるようになった。劣化は亀裂、剥離、ポップアウトとして現れている。他方、非降雨条件下にあるL0モルタルでは、材令1,500日においても劣化は認められなかった。

図-1は曝露による相対動弾性係数の経時変化を示したものである。降雨条件下のL0モルタルでは、既述のように相対動弾性係数は急速に低下し、材令500日以前にモルタルは崩壊し、測定不可能になっている。一方、非降雨条件下のL0モルタルでは、材令1,000～1,500日位までは相対動弾性係数は、80%以上であるが、その後、徐々に低下している。L1～L5モルタルでは、降雨条件下での相対動弾性係数の低下が若干認められ、他方、非降雨条件下では全く変化が認められない。このように劣化の程度は、



図－1　曝露によるモルタルの相対動弾性係数の経時変化

降雨条件と非降雨条件とで大きく異なっている。

L0モルタルとL1～L5モルタルの相対動弾性係数の低下度の違いは、L0モルタルが全粒径にわたって、約30%の濁沸石を含んでいるのに対し、L1～L5モルタルでは特定粒径に約10%以下の濁沸石しか混

合していないことに起因していると思われる。すなわち、濁沸石によるモルタルの劣化の程度は、濁沸石の含有量と混合粒径が関係していると考えられる。

そこで、L1～L5モルタルの濁沸石含有量と材令2,300日前後における相対動弾性係数（降雨条件のみ）との関係をみてみた（図-2）。図のように濁沸石含有量と相対動弾性係数との関係は、あまり明瞭ではない。しかし、L4モルタルを除くと、相対動弾性係数は濁沸石含有量の増加によって減少する傾向がある。

図-3は濁沸石含有量が約10%であるL1，L3，L4モルタルの濁沸石混合粒径と図-2と同材令における相対動弾性係数（降雨条件のみ）との関係を示したものである。粒径が大きいものほど、相対動弾性係数の減少も大きいことがわかる。

4.2　劣化モルタルの形態・構成物および化学組成

4.2.1　偏光顕微鏡・SEMによる観察・分析結果

偏光顕微鏡による観察では、モルタルやコンクリートの劣化部では、濁沸石を含む骨材からセメントペーストに向かって放射状のひび割れが複数形成されていることが観察された。ペースト中のひび割れは内部が空隙であり、特別な反応生成物は認められなかった。

電子顕微鏡による形態観察と拡大元素マッピング

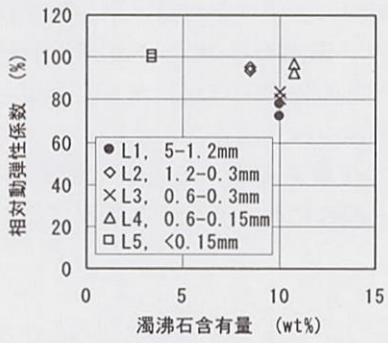


図-2　濁沸石含有量と相対動弾性係数との関係

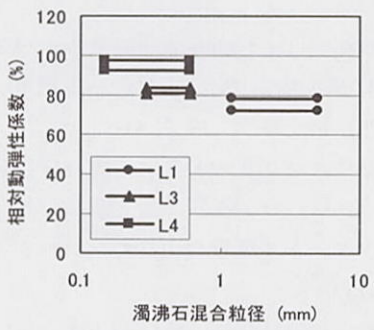


図-3　濁沸石混合粒径と相対動弾性係数との関係

によると、モルタルやコンクリートの劣化部では、濁沸石の結晶自体がへき開面に沿って粉状化し、その間隙に微細な方解石やCSHゲル(Alを含み一部炭酸化している)が侵入している。

元素分析の結果、上記の濁沸石骨材中の大きなひび割れ内部には、セメントペーストが侵入し、モノサルフェートや方解石が生成していることが確認された。また、骨材表層で粉状化した濁沸石とセメントペーストとの界面には、方解石やCSHゲル（Al含有）は認められたが、異常膨張の原因となりうる物質（アルカリシリカゲル・エトリンガイト・タウマサイト）や特殊な水和物（ハイドロゲーレナイト・ハイドロカルマイト・モノカーボアルミネート）は検出されなかった。

劣化モルタル中の濁沸石は、粉状化したもの（結晶間隙に方解石やCSHゲルが侵入）も、モルタル内部の比較的健全なものも、元素分析によると界面を除けば化学組成に変化がなく、理想化学式の組成（$CaAl_2Si_4O_{12}・4H_2O$）を保っている。すなわち、濁沸石の組成が、セメントペースト中のCaとのイオン交換によって変化したものはほとんど見出されなかった。

濁沸石とセメントペーストとの界面には、劣化の有無にかかわらず、CSHゲル（Al含有）が認められた。

4.2.2　X線回折により同定された生成物

X線回折分析によると、モルタルやコンクリートの劣化部には特別な水和物（エトリンガイト、タウマサイト、モノサルフェート、ハイドロカルマイト、モノカーボアルミネート、ハイドロゲーレナイト）は検出されず、ポートランダイトおよび方解石の通常の生成物が認められた。

5. 考　察

5.1　濁沸石によるモルタル劣化の条件

濁沸石による硬化モルタルでの亀裂、剥離、ポップアウト発生などの劣化現象は、降雨条件下の曝露試験において認められたが、非降雨条件下での劣化現象はL0モルタルを除くと認められていない。非降雨条件下のL0モルタルで材令1,000日以降に劣化が始まったのは、毎年の台風時に蓋が取れて、降雨に曝されたことと、蓋をしていても湿度変化があったためであると考えられる。このように、劣化は乾燥湿潤の繰り返しが生じる場合に起こるものと考えられる。また、劣化は濁沸石含有量が多いものほど、

濁沸石の混合粒径が大きいものほど顕著に生じる。

5.2 濁沸石およびその周辺の形態から考えられる劣化機構

偏光顕微鏡による形態観察では、濁沸石からセメントペーストに向かって複数の放射状割れ目が認めれれた。ペースト中のひび割れは内部が空隙であり、膨張性を持つような反応生成物は認められなかった。

電子顕微鏡による形態観察と拡大元素マッピングによると、モルタルやコンクリートの劣化部では、濁沸石の結晶自体がへき開面に沿って粉状化し、その間隙に微細な方解石やCSHゲル(Alを含み一部炭酸化している)が侵入している。このことは濁沸石周辺で膨張性の物質が生成していないことを示している。

したがって、濁沸石を中心として存在するひび割れは、濁沸石の膨張により生じたものと推定される。

5.3 濁沸石およびその周辺の化学組成から考えられる劣化機構

元素分析の結果、上記の濁沸石骨材中の大きなひび割れ内部には、セメントペーストが侵入し、モノサルフェートや方解石が生成していること部分があることが確認された。また、骨材表層で粉状化した濁沸石とセメントペーストとの界面には、方解石やCSHゲル（Al含有）は認められたが、異常膨張の原因となりうる物質や特殊な水和物は検出されなかった。この方解石はセメントペーストに由来するカルシウムを含んだ雨水起源などの間隙水が、濁沸石の結晶内のひび割れに沿って侵入し、乾燥した際に二次的に生じたものと考えられる。したがって、方解石や炭酸化したCSHゲルは、供試体の劣化の原因ではなく、ひび割れの劣化が発生した結果、生成したものと考えられる。

劣化モルタル中の濁沸石はいずれも元素分析によると、界面を除けば化学組成に変化がなく、理想化学式の組成（$CaAl_2Si_4O_{12}・4H_2O$）をよく保っている。すなわち、濁沸石の組成が、セメントペースト中のCaとのイオン交換によって変化したものはほとんど見出されなかった。これは、①使用した濁沸石が純粋で、セメントペースト中のCaとイオン交換するほどNaやKが多く含まれていない（93%以上がCa）ためであり、また②濁沸石がセメントペースト中で活発な化学反応（溶解・溶脱・ゲル化・反応リム・新たな結晶相への変態など）を生じていないことを示唆している。

さらに、SEMによる元素分析では劣化モルタル中の濁沸石の周囲には、CSHゲルが認められるのみで、膨張性の水和物は確認されなかった。なお、異常膨張の原因となりうる物質や水和物が劣化モルタル中に認められないことは、X線回折によっても確認されている。

以上のように濁沸石やその周辺には異常膨張の原因となるような物質・水和物は存在せず、劣化の原因は化学反応ではないと結論される。

5.4 濁沸石によるモルタルの劣化機構

以上のことから劣化の機構は、次のように考えられる。

①劣化には濁沸石とセメントペースト間の化学反応による膨張性の水和物の生成は関与していない。

②劣化は濁沸石の粒径が大きい場合ほど顕著であるので、物理的な作用で生じていると考えられる。物理的な作用としては、有泉[3]が述べているような濁沸石-レオンハルダイト転移の際の体積変化が推定される。

6. まとめ

濁沸石含有岩石を骨材としてモルタルに使用すると、亀裂、剥離、ポップアウトが発生し、劣化が生じる。この劣化の機構は、劣化が濁沸石の粒径が大きい場合ほど顕著であることと、劣化モルタル中の濁沸石の周囲に膨張性の物質・水和物が認められないことから、濁沸石-レオンハルダイト転移に伴う体積変化などの物理的作用であると推定される。今後、この機構を検証するためには、さらに劣化モルタルの化学分析を追加するとともに濁沸石-レオンハルダイト転移に伴い発生する膨張圧を計測する必要がある。

参考文献

1) Pearson and Loughlin（1923）*Proc. Am. Con. Inst.*, 19, 142- 154.

2) American Society for Testing and Materials（1969）*1969 Book ASTM Standards Related Material*, Pt.10, 219-229.

3) 有泉（1979）粘土科学、19, 2, 41-55.

4) 重倉（1981）コンクリート工学、19, 11, 105-108.

5) 丸・柳田（1981）コンクリート工学、19, 11, 85-89.

6) 日本コンクリート工学協会（1988）コンクリート工学, 26, 7, 125-137.

7) 藤井・小林（1991）材料、456, 99-104.

8) 川村（1991）材料、459, 87-93.

8.6　ダム基礎等におけるゆるみ岩盤の評価に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）
研究期間：平 11～平 17
担当チーム：材料地盤研究グループ（地質）
研究担当者：脇坂安彦、佐々木靖人、阿南修司

【要旨】
ダムの基礎掘削などに伴って生じる長大のり面が環境上の問題となっている。長大のり面を縮小したり、大規模なのり面対策工を回避するためには、ゆるみ岩盤の的確な調査・評価手法を開発する必要がある。13 年度は、ゆるみ岩盤の範囲や性状を的確に把握するため、地中風速測定、ならびに高精度傾斜変動測定の２つの新しい調査方法を開発した。地中風速測定は、外気温と岩盤内温度の差により岩盤内に発生する空気の流れを測定して、風速分布からゆるみ領域を把握するものである。高精度傾斜変動測定は、錘による地盤の傾斜変動を観測して、ゆるみ岩盤の原位置での変形特性を迅速に把握するものである。これらの手法を現地適用し、ゆるみ領域の把握に関して良好な結果を得た。
キーワード：ダム、ゆるみ岩盤、地中風速計測、高精度傾斜変動測定、変形特性

1. はじめに

ダムの基礎掘削などに伴って生じる長大のり面が環境上大きな問題となっている。この原因の多くはゆるみ岩盤である。ゆるみ岩盤は地すべりと異なり、調査・評価・対策方法が未確立のため、これらを早急に確立することが本研究の目的である。12 年度はゆるみの微地形や地質特性の事例調査ならびに横坑エアートレーサー試験を開発したが、13 年度は、ゆるみ分布の的確な把握を目的として「地中風速測定」、またゆるみ領域のマイクロゾーニングと変形性の把握を目的として「高精度傾斜変動測定」という新しい２つの地質調査法を開発した[1),2)]。本調査法をダムの原石山に適用し、あわせてゆるみ機構を検討した。

2. ゆるみ岩盤の調査方法の開発

2.1 地中風速測定

地中風速測定は、調査坑やボーリング孔口より深度別に風速を測定し、深度別の風速分布から、坑孔内におけるゆるみ領域を推定するというものである。開発の契機となったのは、本課題に関連して既に開発したエアートレーサー試験[3)]において、ゆるみのある多くの岩盤内で、外気温と岩盤内温度の差による自然の空気の流れが発生していることを見出したことによる。おそらく、ある程度ゆるみが進行した岩盤では開口亀裂が連結して空気が流れやすくなるものと考えられる。したがって地中の風速分布を把握することにより、間接的にゆるみ領域が把握できると考えた。

風速の測定方法は横坑とボーリング孔で異なり、横坑では市販の高精度風速計を使用できる。今回用いた風速計はテスト一社製 400 シリーズ、計測範囲 0～20m、分解能 0.01m である。一方ボーリング孔では、通常の風速計では狭い孔内で地中深く測定できる機種がないため、新たに設計・開発を行った。なお、本報告では横坑での試験結果のみを述べる。

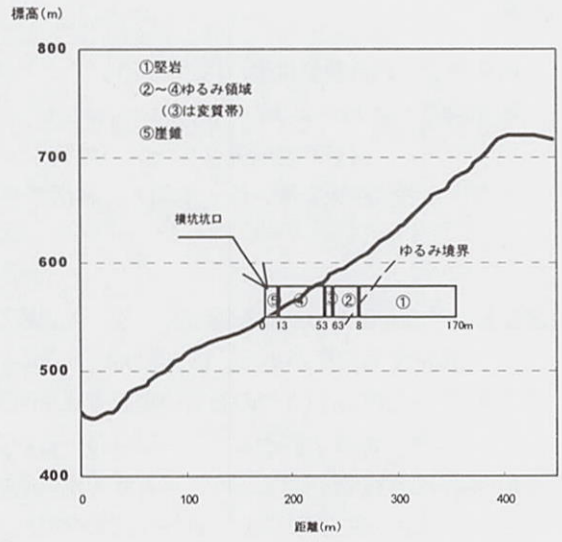
2.2 高精度傾斜変動測定

開発した手法は、ダム基礎の調査横坑底面や地表面で測定することを想定したもので、測線上の１点に高精度傾斜計を設置し、傾斜計より遠方から一定重量の錘（著者らは錘として「人間」を用いている）を段階的に近づけ、錘の荷重による傾斜変動を観測し、その後有限要素法などで測点付近の変形性を推定するものである。傾斜計を順次ずらして繰り返し測定することで、測線沿いの変形性の分布を短時間に測定できる。傾斜計は、通常の土木分野で使用されるもの（傾斜分解能 1～10 秒）より高精度のものを用いる。今回は、傾斜分解能１ナノラジアン（約 2×10^{-4} 秒）のもの（米国 Pinnacle 社製 5500 シリーズ）[4)]を用いている。本機器は±10° の大変動までを一連で測定でき、機器内部で A/D 変換と多量のデータ記録ができる。

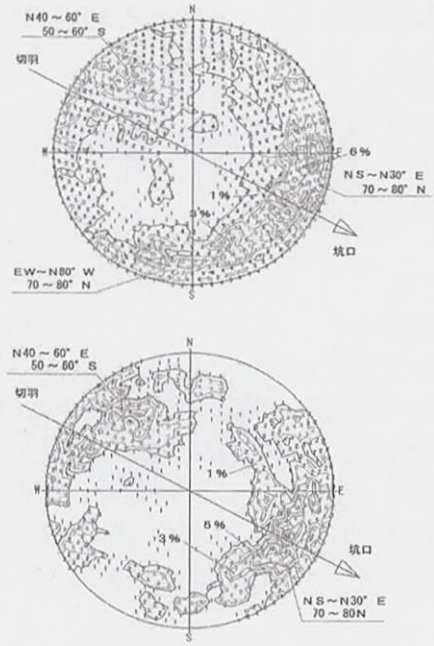
3. 開発した調査手法の適用性調査

3.1 調査地の状況

今回、ダムサイトの原石山調査横坑を用いて上記の測定を実施した。調査地は岩手県に計画中のＩダムの原石山調査横坑（全長 173m）である。地質は新第三紀中新世～鮮新世の石英安山岩からなる。原石山の岩



図－１　調査地の断面図



図－２　左側壁測線の全亀裂（上）と開口幅 5mm 以上の亀裂（下）のステレオネット

石は堤体材料としては問題ないが、横坑の坑口付近から 80m 付近までの岩盤は柱状節理沿いに開口亀裂が発達したゆるみ岩盤の様相を呈する。

3.2 調査方法

まず、調査地の亀裂観察（走向傾斜、開口量、亀裂充填物など）、及び岩級区分を行い、ゆるみ領域の状況を把握した。

次に、地中風速測定については、夏期（８月）と秋期（10 月）に、坑口から５m毎に１回ずつの風速測定を行った。また横坑奥において空気の流れが小さい場合は、１０m毎の測定とした。なお１断面上の測定位置は横坑の中央部（高さ 0.9m）とし、１分間平均値を代表値とした。

高精度傾斜変動測定は、坑口から 45m 付近のゆるみの著しい箇所の短い枝坑と、ゆるみの見られない 150m 付近の 2 個所に傾斜計が埋まる程度に埋設して傾斜変動を測定した（ここでは主に 45m の傾斜計の変動について述べる）。試験時の傾斜計は地球潮汐による地盤変動が十分観測できるほど安定していた。試験方法は、設置された傾斜計に、5.5m の距離から３人の人間（計約 200kg）が約 1m 毎に２分間隔で近づき、最小 0.7m まで近づいて３分経過した後に、再び２分間隔で遠ざかるというものである。

4. 適用性調査の結果

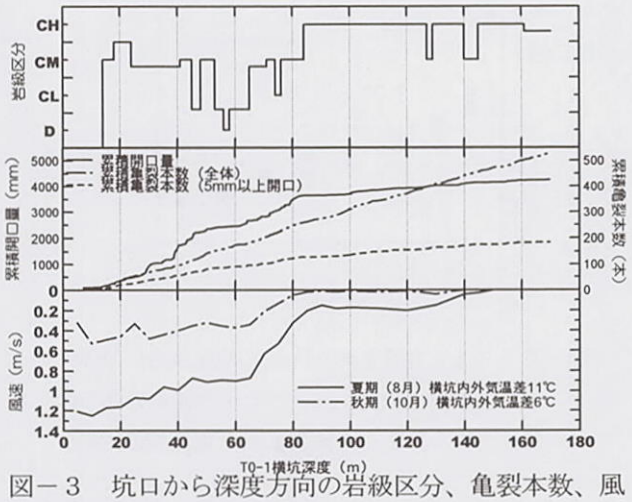
4.1 亀裂の状況

横坑内の亀裂を計量し、亀裂の統計処理を行った。全体的に、傾斜 70～80° を呈する高角度節理が多く分布する（図―２）。高角度節理は広範囲の走向を呈するが、ＮＳ～N30° Ｅ、ＥＷ～N80° Ｗの２箇所に、やや明瞭な集中点が認められる。更に、このような高角度節理に直交して、比較的低角度の傾斜を呈する節理（N40～60° Ｅ 50～60° Ｎ）が多く存在する。なお、開口亀裂（開口幅 5mm 以上）の頻度分布図では、高角度節理の走向がＮＳ～N30° Ｅに集中し、ＥＷの走向を有する亀裂が少ない。このことからゆるみ機構はトップリングまたはクリープを基本とする。ただし詳細に見るとすべりなどのモードも観察され、実際のゆるみ機構や挙動は複雑と考えられる。

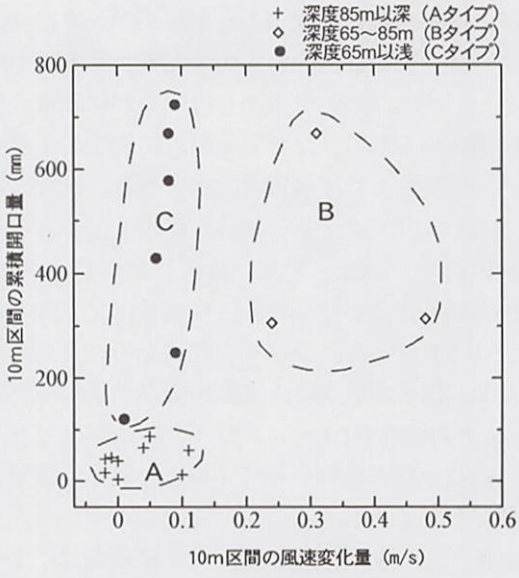
また、図－３に示すように、全体の累積亀裂本数については、どの深度においてもほぼ一定の数が分布する傾向がみられ、浅部と深部に極端に大きな違いはない。しかし、5mm 以上の開口量を有する累積亀裂本数では、深度 80～85m 付近に大局的な累積曲線の変曲点が認められ、深度 80～85m 以深では亀裂本数が減少する。更に、累積開口量については、深度 80～85m 付近での累積曲線の変化がより顕著に認められる。

4.2 横坑内の岩級区分

横坑内の岩級は、深度 85m までは岩片自体は硬質であるがやや亀裂が多くＣＭ 級を主体とする。また所々で劣化が著しくＣＬ～Ｄ級を示す。特に深度 40～85m 区間は、変質の影響などにより岩盤劣化が激しく、ＣＬ～Ｄ級が主体となる。とりわけ深度 53～63m 付近には強変質帯（粘土化したゾーン）が存在する。深度 85m 以深は、非常に良好な岩盤であり、ＣＨ級主体と



図－３　坑口から深度方向の岩級区分、亀裂本数、風速の各結果



図－４　10m区間毎の風速変化量と累積開口量の関係

なる。以上のように、開口亀裂と岩級それぞれの分布より、深度 85m 以浅が主たるゆるみ領域を形成していると考えられる。

4.3　地中風速

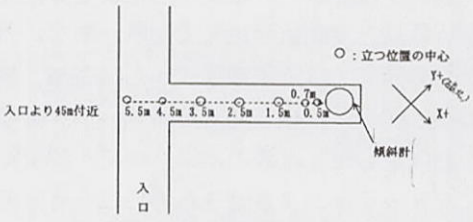
図－３に示すように風速は深部ほど低下している。また、秋期の測定結果は、夏期の測定結果に比べて、全体的に約半分以下の風速である。これは、秋期は横坑内外の気温差が小さいためと思われる。深度別の傾向をみると、深度 40m 以浅は、風速はばらつきながらも徐々に低下する。深度 45～65m ではほぼ一定の値であり、深度 65～85m の区間で大きく降下する傾向がみられる。深度 85m 以深ではほぼ一定の低い値であり、140～150m 付近よりほぼ無風状態となる（測定限界以下）。夏期と秋期の測定結果は、絶対値は異なるが、全体的な傾向はほぼ一致している。

風速と開口亀裂累積量の曲線は非常に類似している。岩級区分と風速ではあまり明瞭な関係はみられないが、深度 85m 付近の変化は一致している。また、浅部で岩級が特に低下する深度 0～15m 付近や、深度 45～65m 付近では、風速の変化はむしろ小さい。

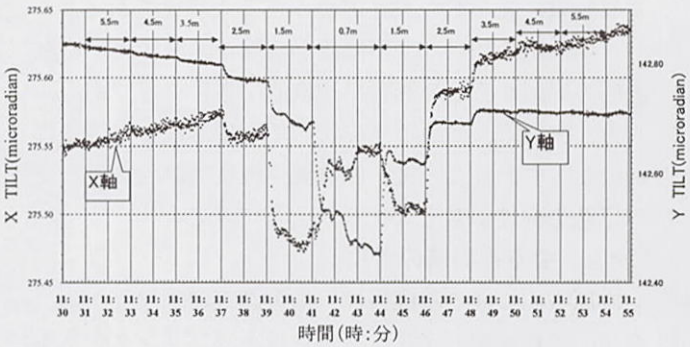
図－４に 10m区間毎の累積開口量と風速変化量の関係を示す。ここで、プロット位置により、大きく３タイプに区分できる。Aタイプは風速、開口量ともに小さいタイプで、良好な岩級を呈する深度 85m 以深に相当する。Bタイプは累積開口量および風速変化量ともに大きいタイプで、強変質帯以深の岩盤の緩み部（深度 65～85m）に相当する。Cタイプは、累積開口量に対し風速変化量が小さいタイプで、深度 65m 以浅に相当する。当区間においては、深度 53～63m 区間に存在する強変質帯が空気の流れを遮断する原因となっているか、または区間に分布する開口亀裂が変質帯に起因した土砂により一部充填され、区間内の空気の流れが悪くなっている可能性が考えられる。このように、亀裂の連続性を遮る要素が存在すれば、必ずしも風速と開口量が比例関係を示さない場合も考えられる。

4.4　高精度傾斜変動測定

傾斜変動測定は、図－５のように横坑 45m の枝坑に傾斜計を設置し、段階的に３人の人間が近づき、また離れる方法で実施した。試験結果を図－６に示す。試験以外の変動としては地球潮汐によるなだらかな変動とノイズ状の微小変動（常時微動？）が認められる。



図－５　調査個所と測線の位置関係



図―６　試験による傾斜変動の結果

同図によると、載荷位置 5.5m 付近のデータは 0.005 マイクロラジアン程度のわずかの変動があるが不明瞭である。しかし 4.5m 付近からは明らかに載荷点に傾く変動が認められる。ただし傾斜計に近接しすぎると埋設穴の影響を受けて複雑な挙動となる。また、載荷点が 1.5m 以内ではクリープ的な累積変動がある。

試験の結果、200kg 程度の荷重でも、4.5m 程度の距離から傾斜変動が認められ、変動量はY方向のみでも総計 0.25 マイクロラジアン程度あることがわかった。なお、横坑深度 150m で類似の試験を行った結果では、Y 方向総計 0.04 マイクロラジアン程度であったので、ゆるみ部とそれ以外で 1 桁近く異なる傾斜変動が観測されたことになる。

試験値からの変形性算出法としては理論式による計算と有限要素法による解析が考えられる。例えば荷重 P が地表の 1 点に作用する場合に距離 r 離れた地表面の深度方向の変位量 Z は、ポアソン比 ν、弾性係数 E として Boussinesq により次式のように与えられる[5]。

$$Z=P(1-\nu^2)/(\pi Er) \qquad (1)$$

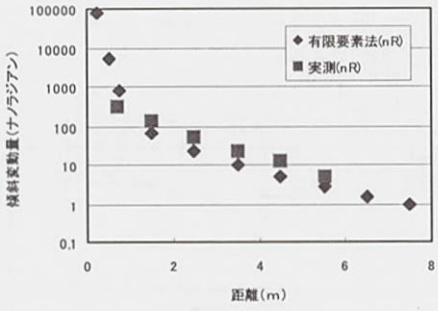
式を r について微分すると傾斜量となり、傾斜量は r の 2 乗に反比例する。ポアソン比を仮定すれば傾斜量から弾性係数が求まる。また傾斜量と E は反比例するので、同じ r で比較すれば傾斜量が 1 桁違う時は E も 1 桁異なるといえる。横坑 45m 付近の E は、ポアソン比を平均的な 0.2 としたとき 2〜4 GPa 程度で、軟岩レベルの静弾性係数である。また横坑 150m 付近の E はこれよりほぼ一桁高いと判断できる。

一方、図－7 は三次元有限要素法による弾性体モデルでの解析結果と実測値の比較である。モデルの弾性係数は、岩盤深部では上記理論式から 4GPa、横坑表面から厚さ 50cm は横坑掘削時のゆるみを考慮し 0.5GPa と仮定した。比較の結果、モデル解析結果を実測値にフィッティングさせるためには、有限要素法の弾性係数を横坑表面付近ではより硬質に、深部ではより軟質に設定しなおす必要があると考えられる。

本試験法の利点は、原位置平板載荷試験に比べると表層の掘削ゆるみの影響が比較的小さいことである。一方、欠点は、微小ひずみ状態での変形性しか得られないことであり、今後、原位置平板載荷試験による変形係数や弾性係数との比較が必要である。

4.5 ゆるみ機構の考察

本原石山のゆるみ機構は、亀裂調査結果などから、高角の柱状節理のクリープまたはトップリングを基本とし、ミクロに見るとすべり等のモードも持つ複雑な



図－7　三次元有限要素法（横坑周囲 50cm の弾性係数が 0.5GPa、その他が 4GPa の弾性体モデル）による傾斜変動と実測値の比較

機構である。新しい試験の結果、ゆるみ領域は深度 65〜85m の深いゆるみと、それ以浅の浅いゆるみに分けられる。この成因は変質帯によるほか、深いゆるみと浅いゆるみの形成時期が異なる可能性や、境界部で微小なすべりが発生している可能性も考えられるので、これらについて詳細に検討する必要がある。

5. まとめ

ゆるみ岩盤の新しい地質調査法を開発し、現地適用するとともに、ゆるみ機構を検討した。地中風速測定は、ゆるみ範囲を把握できるだけでなく、風速分布からゆるみ領域のゾーニングも可能であることがわかった。高精度傾斜変動測定は、多地点で簡易かつ迅速に変形性を推定できることがわかった。今後は調査機器を高度化し測定の安定性を向上させるとともに、測定値に及ぼす諸条件の検討、他の試験結果との比較等を行って解析方法や試験値の解釈の方法を確立し、マニュアル化を図る必要がある。

参考文献：

1) 佐々木靖人、阿南修司、片山弘憲、柴田光博：高精度傾斜変動測定によるゆるみ岩盤の変形性推定法の開発、第 29 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、426-427, 2002. 3.

2) 片山弘憲、佐々木靖人、阿南修司、柴田光博：地中風速測定によるゆるみ岩盤の調査技術の開発、第 29 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、510-511, 2002. 3.

3) 大谷知生・佐々木靖人・脇坂安彦（2000）：現地実験によるエアートレーサー試験の活用法の検討，日本応用地質学会平成 12 年度研究発表会講演論文集，pp.189-192.

4) 地熱エンジニアリング㈱(2001):ピナクル社製高精度傾斜計取扱説明書.

5) 土木学会(2000)：原位置岩盤試験法の指針,p.160.

8.7　ダム基礎グラウチングの合理的計画設計法に関する調査

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究機関：平13～平17
担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）
研究担当者：山口嘉一、佐藤弘行、安田裕一

【要旨】
環境に配慮したダム建設を行う場合、環境保全上の制約から複雑な地質条件を有する地点をダムサイトとし、かつ、従来は掘削除去されていた岩盤も基礎とせざるを得ない場合がある。このため、ダムの安全性を確保するうえで、複雑な地質条件に応じた基礎岩盤の合理的、経済的な止水設計方法の開発が求められている。平成13年度は、基礎岩盤の性状に応じた透水性評価方法について検討するとともに、基礎岩盤の性状に応じたグラウチングの計画設計の検討として、グラウトの最適注入圧力・配合設定を目的とした三次元模型を用いたグラウト注入実験およびコンソリデーショングラウチング・ブランケットグラウチングの効率的な施工範囲・改良目標値設定を目的とした浸透流解析を行った。
キーワード：ダム、グラウチング、透水試験、模型実験、浸透流解析

1．はじめに

環境に配慮したダム建設を行う場合、環境保全上の制約から複雑な地質条件を有する地点をダムサイトとし、かつ従来は掘削除去されていた岩盤も基礎とせざるを得ない場合がある。このため、ダムの安全性を確保するうえで、複雑な地質条件に応じた基礎岩盤の合理的、経済的な止水設計方法の開発が求められている。

ダム基礎グラウチングを合理的かつ経済的に実施するためには、ダム基礎岩盤の透水性を精度よく評価する必要がある。ダム基礎岩盤の透水試験としてはルジオン試験が一般的に用いられ、この試験方法については「ルジオンテスト技術指針・同解説」[1]という指針が発刊されており、統一された仕様で試験が実施されている。しかし、指針で規定されているこの試験の仕様は、本来、亀裂性の硬岩地盤を対象に設定されたもので、軟岩や砂礫地盤のように亀裂が存在しないか未発達で強度が小さい地盤や、硬岩地盤ではあるが開口亀裂を有するため極めて高透水性の岩盤においては、必ずしも適切ではない場合がある。そこで、これまでの土木研究所におけるダム基礎岩盤の透水試験に関する研究成果をとりまとめて、ダム基礎岩盤の性状に応じた透水性評価方法として提案する。

また、グラウチングは岩盤内に存在する多様な性状の亀裂を対象とするため、その注入圧力、配合等の注入仕様は、既往の施工事例から経験的に決定されたものが多く、対象岩盤に適した注入仕様を合理的に決定する手法の確立が強く望まれている。そこで本調査では、岩盤亀裂内のグラウト流動特性を明らかにするための基礎的検討として三次元模型を用いたグラウト注入実験を行う。

さらに、コンクリートダムの堤敷にはコンソリデーショングラウチング（以下、コンソリ）が、またフィルダムのコア敷全面（一部フィルタ敷きを含む場合がある）にはブランケットグラウチング（以下、ブランケット）が基礎浅部を対象に施工される。しかし、コンソリやブランケットの施工深度（場所によらず一定／変化）や改良目標値は既設ダムの事例から経験的に設定されてきた経緯がある。そこで、コンソリの施工深度と改良目標値が重力式コンクリートダムの基礎岩盤の浸透状況に、またブランケット施工深度と改良目標値がフィルダムのコアおよび基礎岩盤の浸透状況に与える影響を浸透流解析により検討し、効率的なコンソリやブランケットの施工深度や改良目標値について考察する。

2．　基礎岩盤の性状に応じた透水性評価方法の検討

2．1　対象岩盤

前述したように、ダム基礎岩盤の透水試験としてはルジオン試験が一般的に用いられ、「ルジオンテスト技術指針・同解説」[1]に基づいて、統一された仕様で試験が実施されている。しかし、指針で規定されているこの試験の仕様は、本来、亀裂性の硬岩地盤を対象に設定されたもので、この仕様をそのまま適用すると透水性を適切に評価できない可能性のある地盤として、軟岩や砂礫地盤、および開口亀裂を有する高透水性岩盤があげられる。そこでここでは、この両地盤に対する適切な透水性評価方法について、既往の土木研究所の研究成果をとりまとめることで提案する。

2．2　軟岩・砂礫地盤を対象とした試験

軟岩や砂岩地盤の強度は小さいため、上載荷重の小さい基礎浅部において高圧注入あるいは脈動の大きいポンプを用いてルジオン試験を実施すると、設定最小注入圧力時点で限界圧力を越え、試験区間内周辺の岩盤が破壊され、それ以後の透水性を測定し、結果として透水性を過大評価してしまうことがある。そこで、軟岩や砂礫地盤浅部では、注入圧力を小さく、かつ低脈動に制御して試験が実施する必要がある。脈動を制御するためには、スクリューポンプなどの脈動の小さいポンプを使用するか、脈動の大きいピストンポンプを使用する場合には大容量のアキュムレーターを取り付けるなどの対策が必要である。また、試験位置より十分高い位置に水槽を設け、この水槽からの静水圧を利用した注水方法を採用する場合もある。また、軟岩は割れ目が未発達であることが多く、巨視的にはDarcyの法則が成立すると考えられる。そこで、ピット法などの他の原位置透水試験を併せて実施し、ルジオン試験の精度を検証することも重要である。[2)~4)]この際、ルジオン値と透水係数の関係は、概ね1Lu=1×10^{-5}cm/sが目安となる。

一方、上載荷重が大きい軟岩・砂礫深部においても、地下水位が極めて低い場合に浅部と同様の事例が見られる場合がある[5)]。つまり、地表において厳密に注入圧力を制御しても、注水管に水を満たすだけで試験対象区間にかなり大きい有効圧力がかかる。さらに、試験孔削孔時にもスライム除去のための送水により大きな水圧がかかることから、試験区間周辺の岩盤が破壊された後の透水性を評価してしまうことがある。このような問題に対する具体的な対策としては、①既存の横坑内から試験の実施（地下水位が高い状態での試験実施が可能）、②気泡ボーリングを用いたりボーリング送水量を減じた試験孔の掘削のほかに、図-1に示すように試験孔内で水位を調節して小さい有効注入圧力域から試験を実施することなどがあげられる。

2．3　高透水性岩盤を対象とした試験

高透水性岩盤においてルジオン試験を実施すると、試験孔周辺の流況が乱流となり、図-2に示すような、注入圧力が大きくなるにつれて、測定点と原点を結ぶ直線の勾配が大きくなる逐次流量減少型のp-q曲線が得られることが多い。この型のp-q曲線が得られると、指針で規定されている（p、q）データの直線近似あるいは外挿により一義的にルジオン値を決定することが困難となる。低圧注入によるルジオン試験においても乱流が発生する場合、注入する流体を水ではなく高粘性の流体とすることで層流状態を達成し、水と粘性比で水を注入した場合に層流状態が達成したと仮定して層流換算ルジオン値Lu'lを求めることができる[6)、7)]。Lu'lは注入圧力に依存しない岩盤固有の値である上、地質状況によっては透水係数に換算できる有効な指標である。

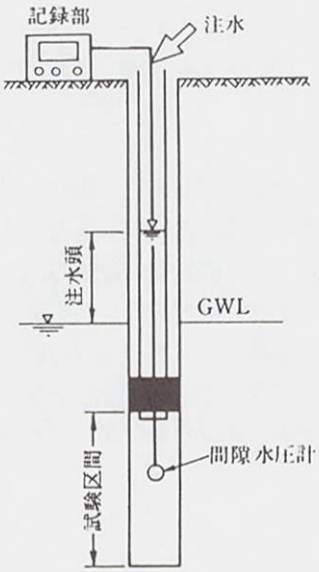


図-1　孔内水位調節型のルジオン試験

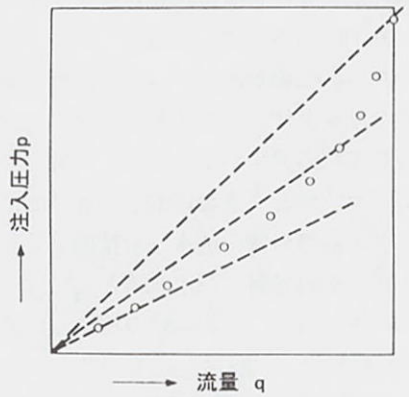


図-2　逐次流量減少型のp-q曲線の例

3三次元岩盤亀裂網模型を用いたグラウトの流動特性の検討

3．1　亀裂模型および実験装置

図-3に亀裂模型と実験装置の概要を示す。亀裂模型は内径3mm、長さ100mmの透明アクリル管を網目状に接続することにより600×600×600mmの立方体を作製し、岩盤内の流路網を表現したものである。亀裂模型の中心部には注入口、模型外側の6面の各接点には開閉可能な流出口バルブ、注入口及びアクリル管が交差する部分の一部（全体数の1/4箇所）には圧力計を設置した。なお、実験は、上下面の流出口バルブを全て閉じる条件で行った。

3．2　疑似グラウト

一般的に、ダム基礎岩盤のグラウチングにはセメント

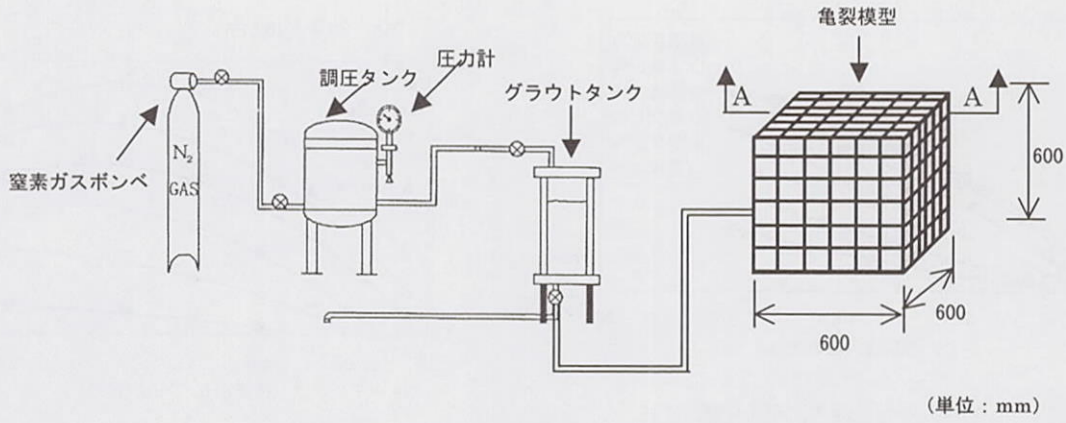


図-3　亀裂模型と実験装置の概要

表-1　換算水セメント比

メチルセルロース系増粘剤水溶液		換算水セメント比(W/C)
濃度(%)	粘度(mPa･s)	
0.0	2.00	∞
0.5	6.67	2.9
1	15.5	1.7
1.5	31.2	1.3
2	85.5	1.0
2.5	168	0.8

表-2　実験ケース

グラウト材料	水およびメチルセルロース系増粘剤水溶液
濃度（%）	0.0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5
注入圧力（kPa）	20、40、60、80、100、200、300、400、500

懸濁液が使用されている。しかし、本実験では同一模型に対してグラウトの粘性や注入圧力を変化させ繰り返し実験を行う必要があるため、水硬性がなく、セメント懸濁液の粘性を模擬できる増粘剤（メチルセルロース系）水溶液を疑似グラウトとして用いた。なお、粘度に基づく増粘材水溶液とセメント懸濁液の濃度の対応[8]から、各種濃度の増粘剤水溶液の換算水セメント比を表-1 に示す。

３．３　実験方法と実験ケース

表-2に実験ケースを示す。実験ケースは、増粘剤水溶液の濃度を0.0～2.5％の範囲で6種類、注入圧力20～500kPaの範囲で9種類設定した。

各ケースにおいて、予備注入を行い可能な範囲で透明アクリル管内を増粘剤水溶液で満たした後、注入実験を行った。注入実験は、１分間の注入を２回実施し、全てのデータはその２回の平均値とした。なお、２回のデータの差はほとんど無かった。注入圧力は、調圧タンクの圧力計で目視により管理し、有効注入圧力である注入口の圧力およびアクリル管が交差する部分の一部の圧力は自動計測した。注入流量はグラウトタンクに設置した水位計の計測値を目視で読みとり計算により求めた。また、模型外側の6面の内1面については流出口の流量を計測した。

３．４　実験結果

３．４．１　有効注入圧力と注入流量の関係

図-4に有効注入圧力と注入流量の関係を示す。図-4によると、同一の有効注入圧力では、濃度が低くなるほど粘性が低くなるので注入流量が大きくなる傾向が見られる。また、濃度が薄い場合には、上に凸の曲線が得られており流況が乱流になっていることがわかる。

３．４．２　換算水セメント比とグラウタビリティの関係

効果的なグラウチングとは短時間に効率的にセメントを注入することであると考えられる。図-5に換算水セメント比とグラウタビリティの関係を示す。ここで、グラウタビリティは、次式(1)のように、単位時間あたりの注入セメント量として定義する。

$$\text{ｸﾞﾗｳﾀﾋﾞﾘﾃｨ}\left(\frac{g}{s}\right)=\text{注入流量}\left(\frac{cm^3}{s}\right)\times\text{換算ｾﾒﾝﾄ量}\left(\frac{g}{cm^3}\right) \quad (1)$$

図-5 によると、換算水セメント比が一定の場合、有効注入圧力が高いほどグラウタビリティが高くなった。また、有効注入圧力が一定の場合に換算水セメント比とグラウタビリティの関係は上に凸の曲線で近似でき、最もグラウタビリティが高くなる換算水セメント比、つまり効果的に注入が行える配合が存在することがわかる。この時の換算水セメント比を効果的配合と呼ぶ。

３．４．３　有効注入圧力と効果的配合の関係

図-6に有効注入圧力と効果的配合の関係を示す。図-6によると、有効注入圧力が高くなると効果的配合が濃くなる結果となった。

３．４．４　各流出口の流動特性

図-7に有効注入圧力と流出率の関係を示す。なお、流出率とは、流出流量計測を行った面の各流出口

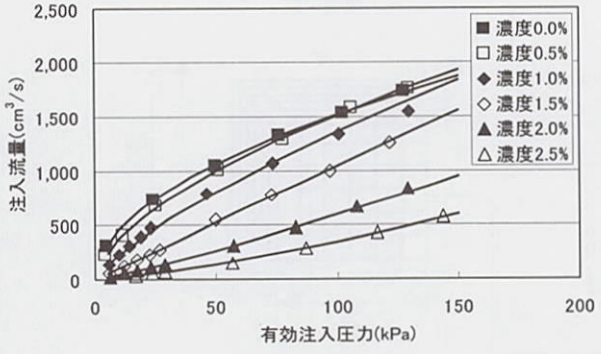


図-4　有効注入圧力と注入流量の関係

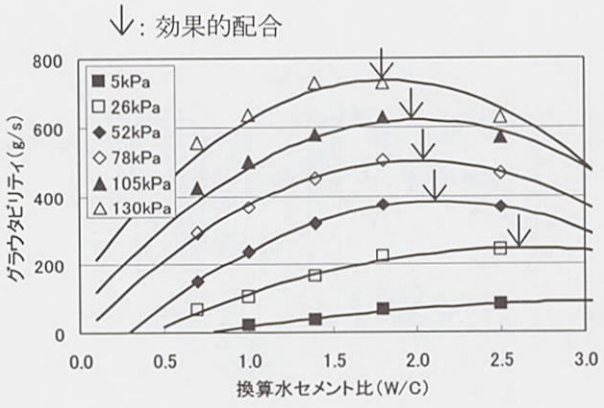


図-5　換算水セメント比とグラウタビリティの関係
(矢印は各注入圧力における効果的配合)

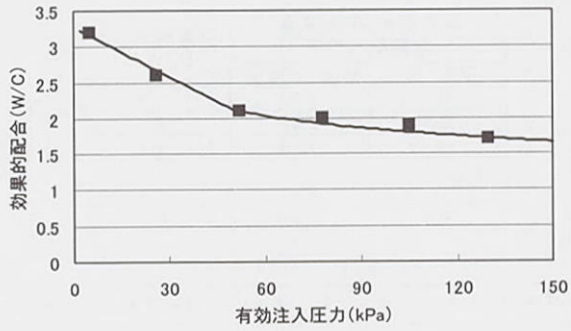


図-6　有効注入圧力と効果的配合の関係

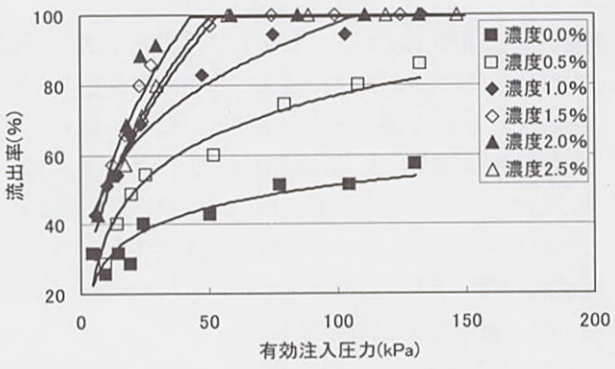


図-7　有効注入圧力と流出率の関係

数（35 箇所）の内、流量が計測された流出口の数の割合として定義する。図-7 によると、当然のことではあるが、同一の濃度では有効注入圧力が大きくなるほど流出率が高い。また、同一の有効注入圧力では濃度が薄く流れが乱流状態であると流出率が悪く選択的な流れが発達し、濃度が濃く流れが層流状態であると流出率が良好になる。

4　浸透流解析によるブランケットグラウチングの施工範囲および改良目標値に関する検討

4．1　解析条件

浸透流解析を用いた施工深度や改良目標値に関する検討は、コンソリとブランケットの両方について実施しているが、ここではブランケットの結果についてのみ報告する。

浸透流解析は、図-8 のように堤高 100m のフィルダムのコアと基礎岩盤の上下流方向二次元鉛直断面をモデル化して行った。貯水位は 95m とした。解析メッシュについては、着目するブランケット付近は 1m×1m の正方形メッシュとした。

ここでは、図-9 のように、カーテンに近い部分のブランケットの深度と、カーテンから遠いブランケットの深度を変化させた。ブランケットの深度は、カーテンに近い方から、ブランケット[1]の深度を 20m、ブランケット[2]の深度を 10m、ブランケット[3]の深度を 5m とした。解析ケースを表-3 に示す。また、ブランケットがない場合（深度 0m：Case0）、図-9 のブランケット[1]の深度を[2]の深度と同じ 10m とした Case1-1、Case1-2、Case1-3 を対照ケースとして実施した。なお、コアの透水係数（飽和）は 1×10^{-7}m/s、基礎岩盤の透水係数は 20×10^{-7}m/s、カーテンの透水係数は 2×10^{-7}m/s とした。また、不飽和浸透が発生するコアには一般的な不飽和浸透特性 [9] を与えた。

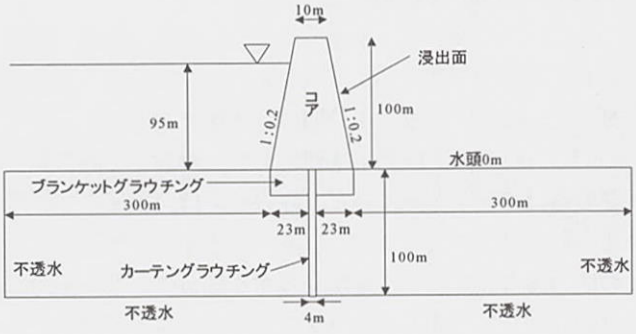


図-8　解析モデル

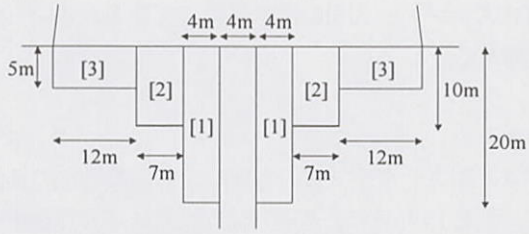


図-9　解析モデル（ブランケット近傍）

表-3　解析ケース

Case#	ブランケット[1] 深度(m)	ブランケット[1] 透水係数 ($\times 10^{-7}$m/s)	ブランケット[2] 深度(m)	ブランケット[2] 透水係数 ($\times 10^{-7}$m/s)	ブランケット[3] 深度(m)	ブランケット[3] 透水係数 ($\times 10^{-7}$m/s)
Case3-1	20	5	10	5	5	5
Case3-2	20	10	10	10	5	10
Case3-3	20	5	10	5	5	10
Case3-4	20	5	10	10	5	10
Case0	0	–	0	–	0	–
Case1-1	10	5	10	5	5	5
Case1-2	10	10	10	10	5	10
Case1-3	10	5	10	5	5	10

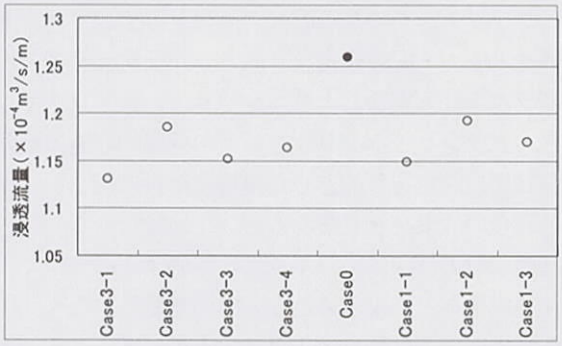


図-10.1　浸透流量

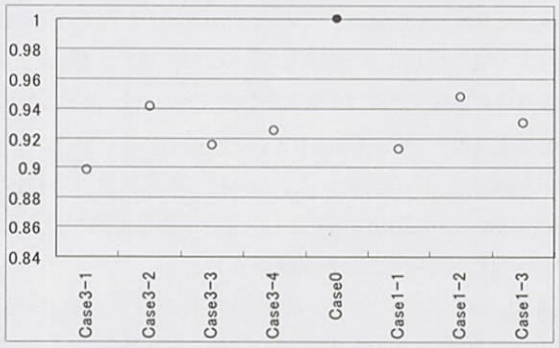


図-10.2 ﾌﾞﾗﾝｹｯﾄがない場合に対する割合

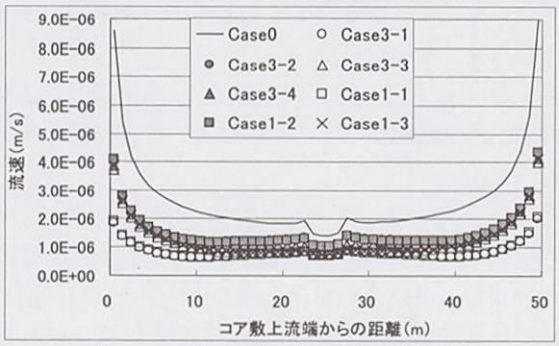


図-11.1　ﾌﾞﾗﾝｹｯﾄ最上部要素の流速分布

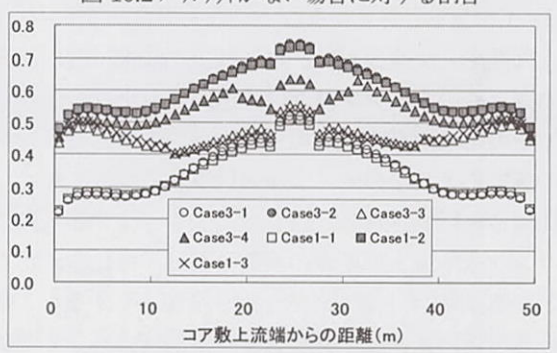


図-11.2 ﾌﾞﾗﾝｹｯﾄがない場合に対する割合

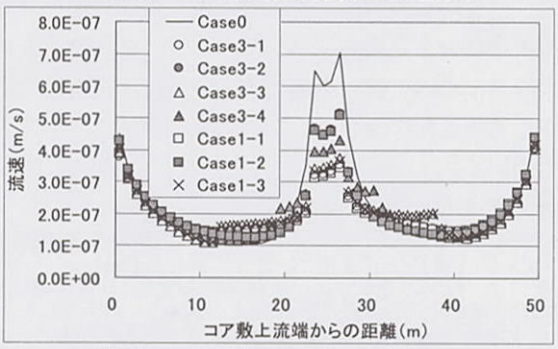


図-12.1　コア最下部要素の流速分布

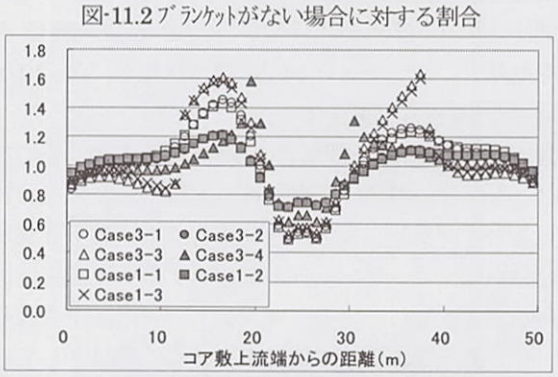


図-12.2 ﾌﾞﾗﾝｹｯﾄがない場合に対する割合

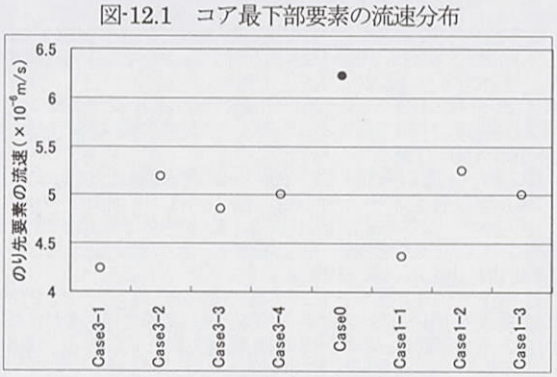


図-13.1　のり先要素の流速



図-13.2 ﾌﾞﾗﾝｹｯﾄがない場合に対する割合

3．2　解析結果

解析結果については、(1)浸透流量、(2)ブランケット最上部要素流速、(3)コア最下部要素流速、(4)のり先要素の流速、に関して各解析条件の影響を検討した。

図-10.1 に各ケースの浸透流量（コア＋基礎岩盤：前者は後者の約 1/10）、図-10.2 にブランケットがない場合に対する浸透流量の割合を示す。図を見ると、Case3-1 と Case3-2 の浸透流量は、それぞれ Case1-1 と Case1-2 のそれより 1%程度しか減少していない。また、Case3-3 と Case3-4 の浸透流量は Case3-1 と Case3-2 のほぼ中間の値を示しているが、Case1-3 の浸透流量よりも 1～2%程度しか減少していない。これより、ブランケット[1]の深度を 10m から 20m に深くしても、浸透流量の低減に及ぼす影響は小さいことがわかる。

図-11.1 にブランケット最上部要素の流速分布、図-11.2 にブランケットがない場合の流速に対する割合を示す。図-11.1 を見るとブランケットがない場合、ブランケット最上部要素の流速分布は、コア敷上下流端付近の流速が最も大きく、カーテン付近の流速が最も小さくなっており、その比は 6 倍程度になっている。しかしブランケットの施工により全体的に流速が低下するだけでなく、その比は 2～4 倍程度に低下し、ブランケットの施工によりブランケット最上部要素の流速分布は一様化されることがわかる。図-11.2 を見ると、大きな値を有するコア敷上下流端付近の流速は、ブランケット深度にあまり関係なくブランケット[3]の透水係数が 5×10^{-7}m/s の時は 8 割弱程度減少、ブランケット[3]の透水係数が 10×10^{-7}m/s の時は 5～6 割程度減少する。

図-12.1 にコア最下部要素の流速分布、図-12.2 にブランケットがない場合の流速に対する割合を示す。図-12.1 を見ると、ブランケットがない場合、コア最下部要素の流速分布は、カーテン上部およびコア敷上下流端付近の流速が大きくなっている。ブランケットの施工により、カーテン直上部の流速の低減が大きく、結果として流速が一様化する。図-12.2 を見ると、カーテン直上部の流速はブランケット深度にあまり関係なく、ブランケット[1]の透水係数が 5×10^{-7}m/s の時は 5 割程度減少、ブランケット[1]の透水係数が 10×10^{-7}m/s の時は 3 割程度減少する。また、ブランケットの透水係数の変化する[1]と[2]の境界付近や[2]と[3] の境界付近で流速の変化が大きくなっているが、その箇所の流速の値は相対的に小さい。

図-13.1 に各ケースののり先要素の流速、図-13.2 にブランケットがない場合の流速に対する割合を示す。図を見ると、Case3-1・1-1、および Case3-2・3-3・3-4・1-2・1-3 がそれぞれ同じような値を示しており、のり先要素の流速はブランケット[3]の透水係数の影響が大きいものと考えられる。

4．まとめ

ダム基礎グラウチングの合理的な計画設計法の検討として、平成 13 年度は、基礎岩盤の性状に応じた透水性評価方法について検討するとともに、基礎岩盤の性状に応じたグラウチングの計画設計の検討として、グラウトの最適注入圧力・配合設定を目的とした三次元模型を用いたグラウト注入実験およびコンソリデーショングラウチング・ブランケットグラウチングの効率的な施工範囲・改良目標値設定を目的とした浸透流解析を行った。以下にこれらの成果をとりまとめる。

①基礎岩盤の性状に応じた透水性評価手法について、既往の成果をとりまとめたうえで提案した。

②各注入圧力では最も注入セメント量が多くなる効果的配合が存在することを示すとともに、効果的配合となる注入条件を検討した。

③コンソリ・ブランケットについて、施工深度・改良目標値が浸透状況に与える影響について定量的な評価を行った。

今後は、実際のグラウチング時に得られた注入データから効果的配合についての分析を行うとともに、基礎岩盤の性状および効果的配合を考慮した配合設計に関して試験条件を変えた室内試験・原位置試験を引き続き行う一方、解析的な検討により基礎岩盤および堤体が許容できる浸透状況を定量的に示したうえで、グラウチングの計画設計について検討を進める。さらに、透水性の空間分布を考慮したグラウチングの効果判定法についての検討も進める。

参考文献

1) 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説、（財）国土開発技術研究センター、56p.、1984.
2) 柴田功：軟岩の透水性と止水設計法に関する研究、建設省土木研究所報告、第 153-1 号、56p、1980.
3) 松本徳久・池田隆：「軟岩基礎の原位置透水試験方法に関する調査」、建設省土木研究所資料、第 2071 号、90p、1984.
4) 松本徳久・山口嘉一：「軟岩基礎の原位置透水試験方法に関する研究」、第 17 回岩の力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.201-205、1985.
5) 山口嘉一・松本徳久：「低地下水域におけるルジオンテスト」、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.406-410、1989.
6) 山口嘉一・澁市秀雄・松本徳久：高透水性岩盤に対する透水試験、建設省土木研究所報告、第 180-1 号、33p.、1990.
7) 山口嘉一・安仁屋勉・澁市秀雄・松本徳久：高透水性岩盤の層流および乱流抵抗則の原位置測定、土木学会論文集、第 454 号/III-20、pp.27-36、1992.
8) 安田裕一・山口嘉一・佐々木隆・佐藤弘行：「三次元岩盤亀裂網模型を用いたグラウトの流動特性に関する検討」、第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、CD-rom、2002.
9) 山口嘉一・弘末文紀・松本徳久：「ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈」、建設省土木研究所資料、第 2518 号、1987.