

S S N 0386 45873

土木研究所資料第3617号

平成10年度

土木研究所講演会 講演集

平成11年2月10日

建設省土木研究所

Copyright © (1999) 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 Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所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、土木研究所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。

平成10年度

土木研究所講演会 講演集

企画部企画課

要 旨

本資料は、「平成10年度土木研究所講演会」の講演内容をまとめたのである。この講演会は、土木研究所が実施している調査研究の成果や最近の土木技術に関する話題、動向などを各方面に紹介する事を目的として、毎年1回開催している。

キーワード：土木研究所講演会、AHS、建設マネジメント、環境教育、貯水池、
土砂管理、橋梁、耐震

目 次

土木研究所における研究の重点化	研 究 調 整 官	京才 俊則	1
AHS（走行支援道路システム）に 関する研究開発	高度道路交通システム研究室長	上田 敏	5
特別講演「独創人間－閃きの法則－」	東京大学先端科学技術研究センター教授	軽部 征夫	23
建設マネジメント研究の課題と展望	建設マネジメント技術研究官	木下 賢司	25
環境教育に配慮した施設整備手法	生態保全技術研究官	田中 隆	55
貯水池の土砂管理	ダ ム 部 長	上阪 恒雄	75
橋梁の技術基準と安全生	構 造 橋 梁 部 長	岡原美知夫	103
公共構造物の耐震性向上のために 解決すべき課題とその現状	耐震技術研究センター長	保田 雅彦	135

土木研究所における研究の重点化

研究調整官 京才俊則

土木研究所における研究の重点化

研究調整官 京才 俊則

1. はじめに

土木研究所では、より優先度の高い研究課題に、効率的・効果的に取り組んでいくため、これまでの研究体制を改善し、研究の重点化を図るべく検討を行ってきました。平成8年度には「建設省土木研究所研究評価検討委員会」を開き、研究の重点化及びその評価の方法について、また、続く平成9年度には「土木研究所ビジョン懇談会」を開き、研究体制の基礎的方向性について、外部の委員の方々にご提言を頂いてきました。

これらの委員会を通して提案された重点研究プロジェクトを制度として、平成10年度から運用を始めております。

2. 重点研究プロジェクトとは

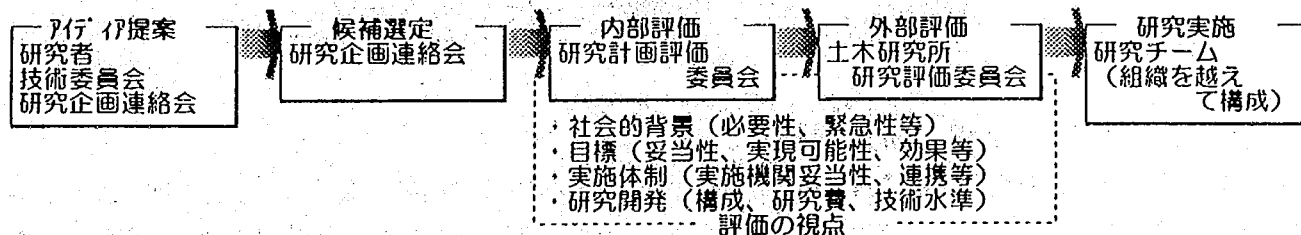
重点研究プロジェクトとは、社会資本整備に対する国民のニーズの多様化、高度化に答え、組織横断的取り組み、学際的な連携の強化、予算の重点配分や多様な人材を投入するプロジェクトです。

重点研究プロジェクトの実施にあたっては、原則的に内部評価・外部評価を経ることとし、適格性・妥当性を十分に評価することとしています。

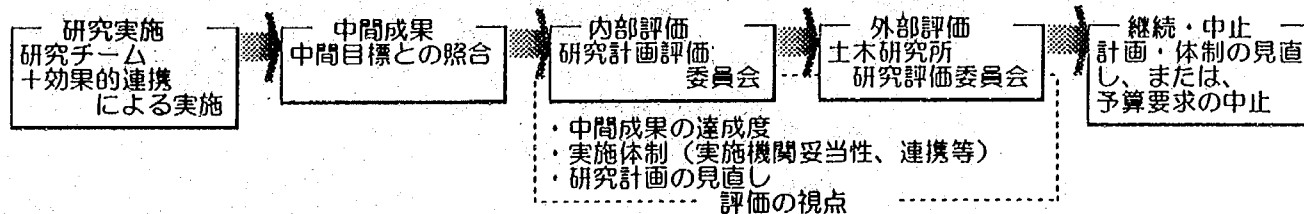
3. 重点研究プロジェクト実施の流れ

重点研究プロジェクトは、評価を受けながら実施します。評価の時期は、原則的に研究課題策定時（事前評価）、研究実施3年目（中間評価）、研究終了後（事後評価）としています。

【課題策定時】



【研究実施3年目】



【研究終了後】

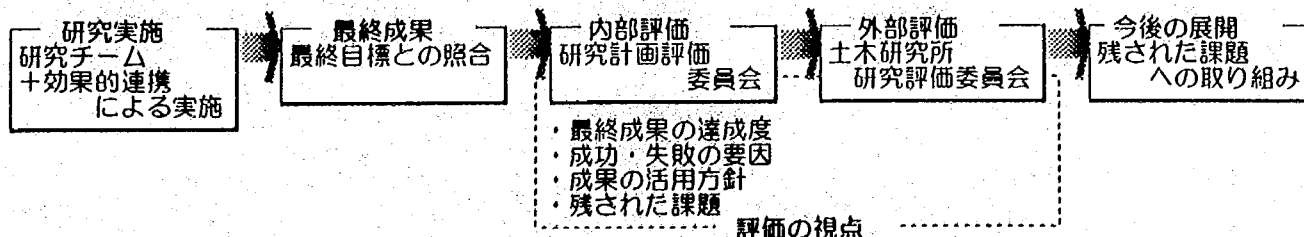


図-1 重点研究プロジェクト実施の流れ

4. 土木研究所研究評価委員会について

「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」（平成9年8月7日内閣総理大臣決定）において、研究開発活動の効率化・活性化を図り、より優れた成果を上げていくために研究機関の研究体制や研究開発課題について厳正な評価を実施することの必要性が指摘されました。

大綱的指針においては、研究開発課題の評価方法を次のように分けています。重点的資金による研究開発課題などについては、その国家的な重要性や資金投入の規模から外部の専門家や有識者等からなる第三者による外部評価を、また、経常的な基盤的資金による研究開発については、研究所内の委員会や学会での発表・討議などを通じて評価を受けることとしています。

これを受けて、土木研究所では、研究開発課題の評価を目的として、今年度より土木研究所研究評価委員会を設立しました。委員は、表-1に示すとおり、土木技術の専門家ばかりでなく、他分野の科学技術の専門家、社会・経済の専門家など、12名の幅広い分野の方々から構成されています。評価対象の研究開発課題は当面、重点研究プロジェクトとしています。

表-1 土木研究所研究評価委員会委員

委員長	虫明功臣	東京大学生産技術研究所教授
委員	石田東生	筑波大学社会工学系教授
	井上孝太郎	(株)日立製作所電機システム事業本部技師長
	片山恒雄	科学技術庁防災科学技術研究所長
	金本良嗣	東京大学経済学部教授
	栗原和男	西松建設(株)技術研究所長
	平島 寛	(株)日経BP日経コンストラクション編集長
	藤井シュン	(株)日本興業銀行産業調査部長
	荻内勝彦	日本大学理工学部教授
	宮川豊章	京都大学工学部教授
	鷲谷いすみ	筑波大学生物科学系助教授
	和田啓輔	(株)三菱化学横浜総合研究所長

(五十音順、敬称略)

5. 重点研究プロジェクト研究課題

これまでに、研究計画評価委員会（内部評価）、及び土木研究所研究評価委員会（外部評価）を経て、平成10年度8課題、平成11年度5課題の新規重点研究プロジェクトが策定されています。これらプロジェクトの概要等は、表-2、3のようです。

表－２ 平成１０年度新規重点研究プロジェクト

	課 題 名	概 要
1	AHS(走行支援道路システム)に関する研究開発 (平成８～１２年度)	・交通事故、交通渋滞、交通環境に関する抜本的改善の要請。 ・先端的な情報通信技術を活用した道路交通システムの世界的な取り組みが進行。 ・AHSは、ITS全体構想(平成８年／５省庁)で「安全運転の支援」等に位置づけ。 ・交通事故、交通渋滞、交通環境の改善を実現するAHS機能の開発のための研究を実施。
2※	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 (平成１０～１４年度)	・近年、都市ではヒートアイランド現象が顕在化。 ・エネルギー消費の悪循環や温度上昇による生活への影響が問題。 ・多くの建設事業で少しずつの対応が可能。 ・そこで、熱循環の各過程を明らかにし、道路・水域などでの気温緩和のための技術開発、効果評価を行い、ヒートアイランド現象の軽減のための研究を実施。
3	河川・湖沼の整備および管理における自然との共生技術の開発 (平成１０～１４年度)	・近年、自然の生物の保全、生物とのふれあひに対する欲求の増大。 ・河川法改正で、河川事業の目的に「環境の保全」が追加。 ・河川・湖沼の整備・管理における自然との共生について、より確かな技術が必要。 ・そこで、河川・湖沼における自然との共生を図るため、生物が生息・生育できる環境を備えた空間を確保するために必要な技術を開発。
4	外部コストを組み入れた建設事業コストの低減技術の開発 (平成１０～１４年度)	・公共工事のコスト縮減と地球環境や生活環境の保全の両立が必要。 ・上記のための技術開発が進んでいるが、事業に当たっての評価手法が未整備で、新技術の活用・普及が進んでいないのが現状。 ・そこで、環境の悪化など、ライフサイクルを通じて外部不経済化する社会的費用を外部コストとして捉え、外部コストも含めた全コストを縮減するための研究を実施。
5	建設事業の品質管理体系に関する研究 (平成９～１２年度)	・WTO(世界貿易機構)の「貿易の技術的障害に関する協定」が発行し、国内規格の国際的整合性を図ることが必要。 ・その中で、構造物の性能を明示して発注する「性能規定」についての検討も求められている。 ・性能規定により、新技術活用などが促進され、民間の創意工夫にインセンティブを与える。 ・そのため、性能規定化した場合の品質管理体系や、検査技術などを開発することが必要。
6	建設事業のコスト縮減に関する研究 (平成１０～１３年度)	・公共工事のコスト縮減は、今日重要な行政課題。 ・現在、個々の要素技術の開発は進んでいるが、全体コストに対する効果がありあまり考慮されておらず戦略的とは言えない。 ・そこで、事業プロセスも含め建設事業のコスト構造の解明を行い技術開発ターゲットを明確にして、重点的な研究を実施。
7※	耐震設計の体系化に関する研究 (平成１０～１４年度)	・兵庫県南部地震のような直下型の大規模な地震に対し、より安全な社会の構築が必要。 ・道路橋やダムなどの各種構造物ごとに設計用入力地震動が異なるとともに、耐震性水準の設定に一貫性がない。 ・より一層のコスト縮減が必要。 ・そこで、設計用入力地震動や耐震性水準など、各種構造物の耐震基準の共通部分を体系的に研究し横断的整合を図るとともに、性能規定型の耐震設計基準を開発することにより、合理的な耐震基準の構築を目指す。
8※	水環境における水質リスク管理に関する研究 (平成１０～１４年度)	・近年、従来の水の安全性指標では対応できない病原性微生物や化学物質の汚染が指摘され、水系リスクが増大。 ・このような病原性微生物や化学物質は下水道から環境中に放出される可能性があるが、その実態は必ずしも明らかではない。 ・そこで、本プロジェクトではこれらの汚染の迅速な検査・監視技術を開発し汚染実態を把握するとともに、汚染によるリスク評価技術の確立を行う。

※なお、土木研究所研究評価委員会においては２，７，８のみ評価、他は紹介だけされた。

表-3 平成11年度新規重点研究プロジェクト(予定)

	課 題 名	概 要
1	公共事業におけるリサイクル材利用技術の開発 (平成11～13年度)	・一般廃棄物、産業廃棄物を問わず廃棄物のリサイクルの推進は、最終処分場の不足、環境破壊等の問題の顕在化から年々重要度が増大。 ・建設分野内でのリサイクルは進んでいるが、建設分野以外からの廃棄物の再利用については課題多。 ・資材としての基本性状、安全性、経済性、法制度などの検討が必要。 ・そこで、リサイクル材の受け入れに対する基本方針を決め、利用促進のための経済的対応、リサイクル材の評価法などを開発。
2	地域のニーズを反映した社会資本整備技術の開発 (平成11～14年度)	・国民のライフスタイルの変化、価値観の多様化等を背景に、社会資本整備に対し量的充足から質の重視への転換が求められている。 ・身近な生活空間を構成する中心的要素である社会資本は、住民の多様なニーズに対応し、地域の特性を活かした将来に継承されるべき。 ・このため、施策立案、事業計画策定段階を中心に住民意見の把握、反映を可能にする新たな事業手法の導入が重要。 ・そこで、地域ニーズの適切な評価を踏まえ、事業プロセスにおける住民とのコミュニケーションの確保を重視し、新たな社会資本整備手法を開発。
3	先端技術の国土マネジメントへの応用に関する研究開発 (平成11～14年度)	・個別事業の整備水準の向上を目指した従来の「国土建設」から、既存の住宅・社会資本のストックの有効活用を図りつつ総合的に国土を整備・利用・保全する「国土マネジメント」への政策転換。 ・「国土マネジメント」の施策展開のためには、国土全体の自然環境、社会状況、災害状況などを迅速に把握することが必要。 ・そこで、リモートセンシング技術等を活用した情報収集基盤、GIS等を応用した統合情報基盤、さらには得られた情報を適切に利活用するための情報分析・予測システムなどを開発。
4	新素材による超ロングライフ建設技術の開発 (平成11～15年度)	・国内的には高齢社会を迎え、低経済成長が見込まれ、将来の維持管理、更新が楽な構造物が必要。 ・米国での建設分野の材料開発プロジェクト、これに対抗した国内での材料開発の進展により、構造物の耐久性の向上ニーズに対するシーズ面の支援体制が整備。 ・そこで、より耐久性の高い新素材を用いて、構造物の寿命を飛躍的に伸ばすことを目的に、材料の開発、評価技術の開発、構造物の計画・設計・施工技術の開発を行う。
5	社会資本整備におけるCO ₂ 削減に関する研究 (平成11～15年度)	・地球温暖化防止のための会議においてCO₂排出量の削減目標が策定。 ・建設事業は、道路、ダムなどの建設時に、資材、建設機械などの使用でCO₂を排出。また、道路の供用時には自動車交通からもCO₂を排出。 ・そこで、CO₂発生量削減技術、CO₂固定化技術の開発、道路交通部門からのCO₂削減を図れる道路交通体系の整備手法の開発により、CO₂発生量のより少ない事業展開を可能にする。

6. 今後の展望

土木研究所研究評価委員会における重点研究プロジェクトの評価結果は、インターネット(URL <http://www.pwri.go.jp>)で広く公開していく予定としております。更に充実した重点研究プロジェクトにしていくため、これをご一読後、積極的な意見やコメントを頂けることを期待しています。

AHS(走行支援道路システム)に関する研究開発

高度道路交通システム研究室長 上 田 敏

AHS(走行支援道路システム)に関する研究開発

高度道路交通システム研究室長 上田 敏

1. はじめに

AHS (Advanced Cruise-Assist Highway Systems : 走行支援道路システム) は、道路・車両の各種センサにより自車周辺の走行環境を把握し、車載の道路交通情報提供装置等によりリアルタイムにドライバーへ走行環境情報の提供を行い、状況によって危険警告や車両制御等の運転支援を行うシステムである。運転を支援するレベルに応じて、AHS-i (情報提供)、AHS-c (車両制御支援)、AHS-a (自動走行) の各機能に分けられ、安全運転の支援、道路利用の効率化を図ろうとする新しい道路交通システムのコンセプトである。

土木研究所では、1995年の土木研究所テストコース、1996年の開通前の上信越自動車道での走行実験を通じてAHSの技術的フィージビリティを明らかにしてきたが、実用化のためにはニーズを踏まえたAHSのユーザサービスを基本に、具体的なシステムの研究開発を進めていくことが重要である。本稿では、先端的なITS技術を統合化して組み込むスマートウェイ計画の中で重要な役割を果たすAHSについて、基本ユーザサービス、リクワイアメントの設定及び評価、導入の考え方について述べる。

2. AHSを取り巻く環境

交通事故の発生件数は増加の一途をたどっている。1997年データでは78万件的事故件数に対して、95万人の負傷者、1万人弱の死亡者といった状況である。特に最近の動向としては、65歳以上の高齢ドライバーの関与する交通事故が年々増えている。高齢者の知覚や反応は、例えば30歳代と比較して、動体視力が50%以上、反応・判断時間が15%低下するという調査結果も出ている。高齢ドライバー(65歳以上)は、現在の約650万人から20年後には約2000万人に増加すると予測されており、交通安全はAHSの重要な目的となっている。

また、自動車の保有台数、走行距離の着実な伸びに伴い、各所で渋滞が引き起こされている。渋滞による経済損失は、年間12兆円(建設省調べ)にも相当すると計算されている。近年の環境問題への関心の高まりとも相まって、道路の使い方を工夫して渋滞を軽減し、交通流の効率化を図り、無駄なエネルギーを削減するシステムの導入が期待されている。

AHSを含めITSは、マルチメディア事業の中核をなす分野として、その市場性が大いに期待されている。約15億円で開発した全国デジタル道路地図データベースが、約6000億円のカーナビゲーションの市場形成に貢献しているが、AHSは道路インフラ、車両並びにマルチメディア社会への大きな波及効果が期待できる。

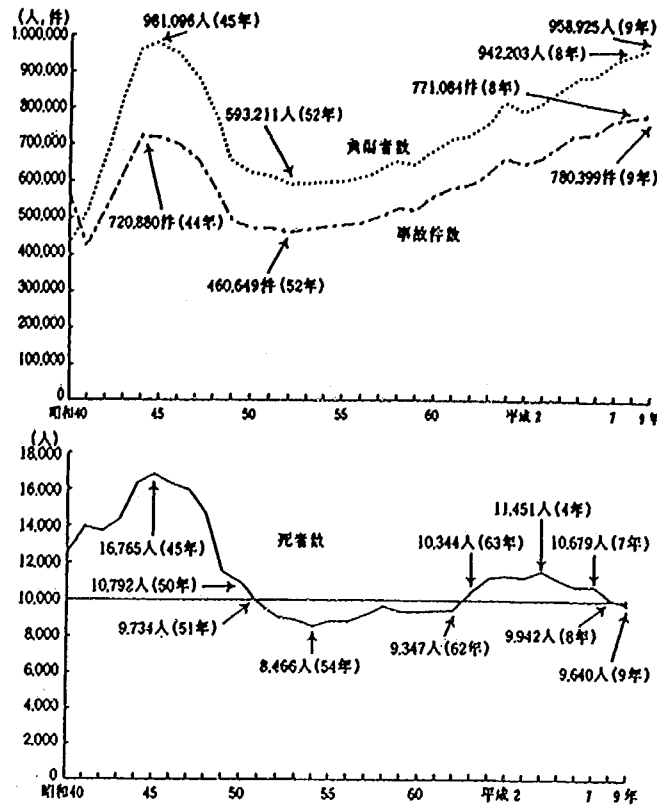


図-1 道路交通事故の現況

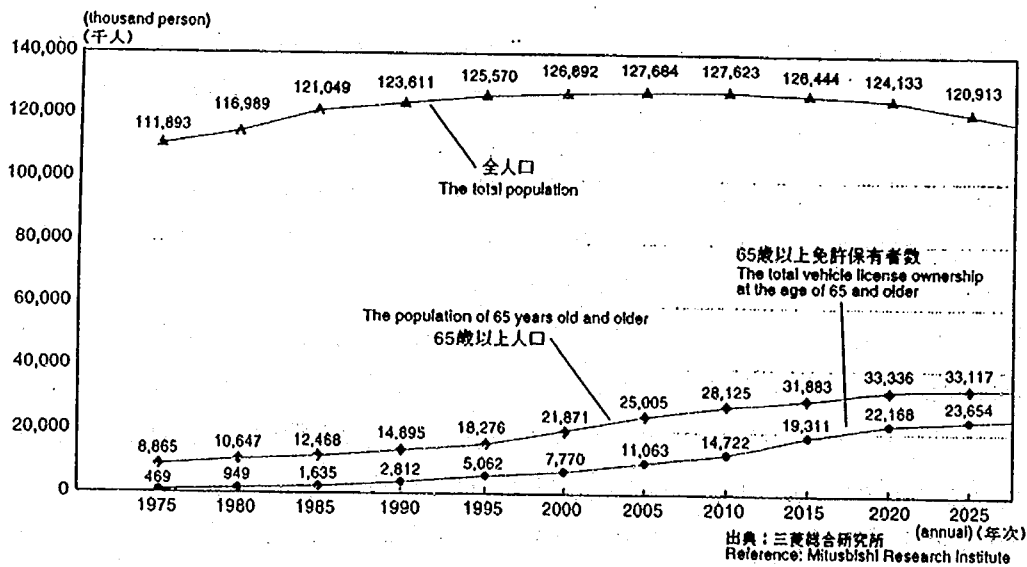


図-2 65歳以上人口と免許保有者数

3. AHS研究開発の経緯

土木研究所では1989年にAHSの研究開発に着手した。路車間連続通信、情報提供、車両制御に関わる民間企業との共同研究を進め、1995年には我が国初の路車間協調による自動運転の車が土木研究所のテストコースを走行した。96年には開通前の上信越自動車道において、車線逸脱防止、前車衝突防止、前方危険警告などの安全走行システム、11台の車による11kmの自動走行システムの実道路実験を行った。これらの実験を通して、AHSの技術的実現可能性を明らかにすることができた。

表-1 日本における AHS 研究開発の経緯

1962～67年	誘導ケーブルによる自動操縦車
1974～84年	マシンビジョンを持つ知能自動車
1989年	土木研究所が AHS 研究開発に着手
1992年	突発事象検出システム試験運用 (阪高阿波座カーブ)
1993年	AHS 技術の段階的進化の考え方(i c a)を道路整備5カ年計画で公表
1995年	世界初の路車間協調による AHS 走行実験 (土木研究所テストコース)
1996年	開通前の上信越自動車道での AHS 走行実験
	AHS 研究組合の設立

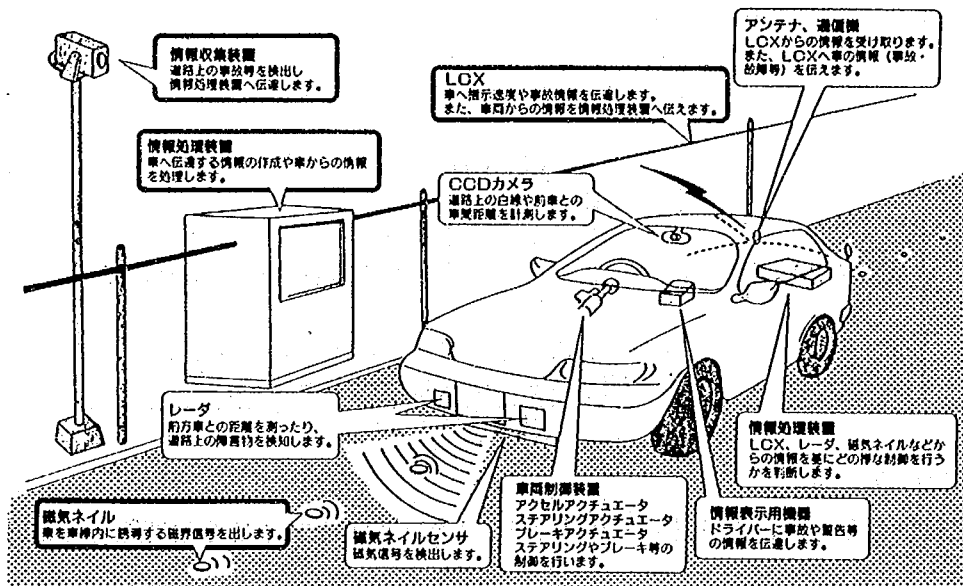


図-3 上信越自動車道でのAHS実験システム

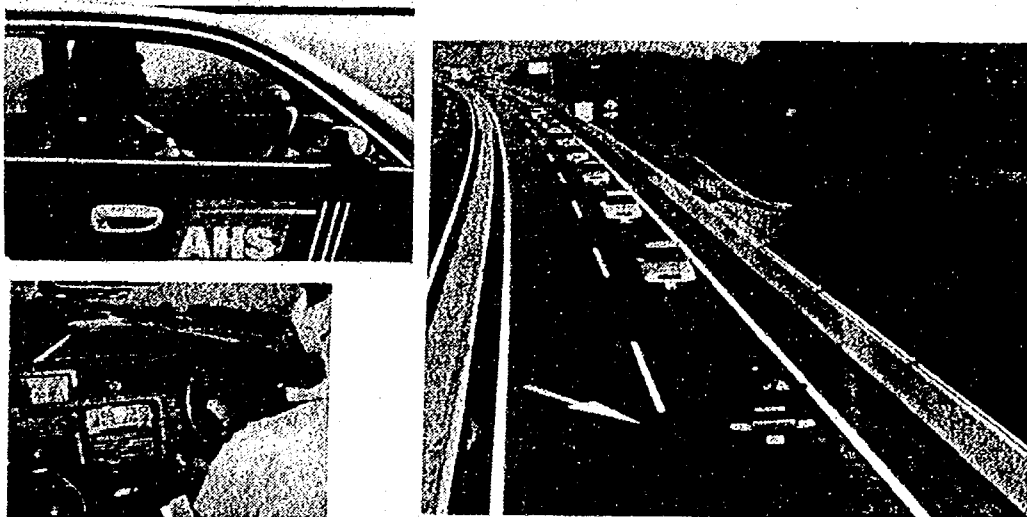


写真-1 上信越自動車道でのAHS走行実験

表-2 上信越道での実験結果

(1) 道路条件	延長：往復約11km (片側1車線) 設計速度：80km/h 線形：半径5000～8000mの曲線と直線 縦断勾配：0.75～3% 構造物：鋼橋、プレストレスコンクリート橋 外乱要因：送電線の横断
(2) 実験内容	安全走行システム 前車衝突防止機能 (アクセルオフ、自動ブレーキ) 隣接車線防止機能 前方道路危険警告機能 パーシャルな自動運転 自動走行システム
(3) 実験結果	道路勾配の影響：縦断勾配データを制御の補正に使用した結果、加減速割合安定 道路線形の影響：横方向の変動幅20cm以内 電力線の影響：路車間、車々間通信とも良好 天候の影響：雨天時、霧走行時 CCD カメラ、レーザレーダは距離計測機能が悪化 太陽光が直接 CCD カメラに入る日没時等はハレーションにより検知不能 ミリ波レーダはやや良好 橋梁の影響：鉄筋による磁束密度分布の乱れを車両側で吸収することにより磁気ネイル検出 車々間通信：車々間通信を遮断すると加減速値の変動幅が $\pm 2 \text{ m/sec}^2$ に拡大 (車々間通信ありの場合は $\pm 1 \text{ m/sec}^2$)

4. 欧米の研究開発動向

AHSの定義や導入の考え方は国により違いはあるが、欧米ともITS研究開発の重点分野として取り組んでいる。

4.1 米国のAHS研究開発

米国のAHS研究開発は、1991年のISTEA (総合陸上輸送効率化法) 成立、94年のAHS研究開発コンソーシアム (NAHSC) 設立の中で進められ、97年にはサンディエゴでデモンストレーションが行われた。

しかし、米国のAHSは自動走行を目指してきた面が強く、その実用化には課題があった。98年のTEA-21 (21世紀交通最適化法) を契機に、米国はIVI (Intelligent Vehicle Initiative) 構想を打ち出した。IVIは自動走行機能に、情報提供や運転制御機能を加えたもので、表-3の計画案が示されている。

表-3 米国のIVI計画

1. 安全のためのサービス	1) 後方衝突防止 2) 道路逸脱衝突防止 3) 車線変更・合流衝突防止 4) 交差点衝突防止 5) 踏切衝突防止 6) 視界向上 7) 特定場所での危険警告 8) 自動衝突通報 9) 高性能衝突制御
2. 安全に効果のあるサービス	10) ナビゲーション・経路案内 11) リアルタイム交通・旅行者情報 12) ドライバー快適・便利サービス
3. 商用車のためのサービス	13) 車両安全警告・アシスト 14) ドライバー状態警告 15) 車両診断 16) 貨物状態確認 17) 自動商取引 18) 安全事象記録
4. 公共輸送車のためのサービス	19) 障害物・歩行者検知 20) 高精度車両ドッキング 21) 公共交通乗客モニタリング 22) 公共交通情報提供
5. 特別な車のためのサービス	23) 専用施設での完全自動制御
6. 支援のためのサービス	24) 低摩擦路面警告・制御支援 25) 縦方向制御 26) 横方向制御

4. 2 欧州のAHS研究開発

EUではITSの研究開発をテレマティックス (Telematics) 計画のもとで実施している。図-4にITSのプロジェクト分野を示すが、AHSに関わるプロジェクトは「車両コントロール」の中で取り組まれている。

OTELMATICS FOR APPLICATIONS FOR TRANSPORT PROJECT SUMMARY

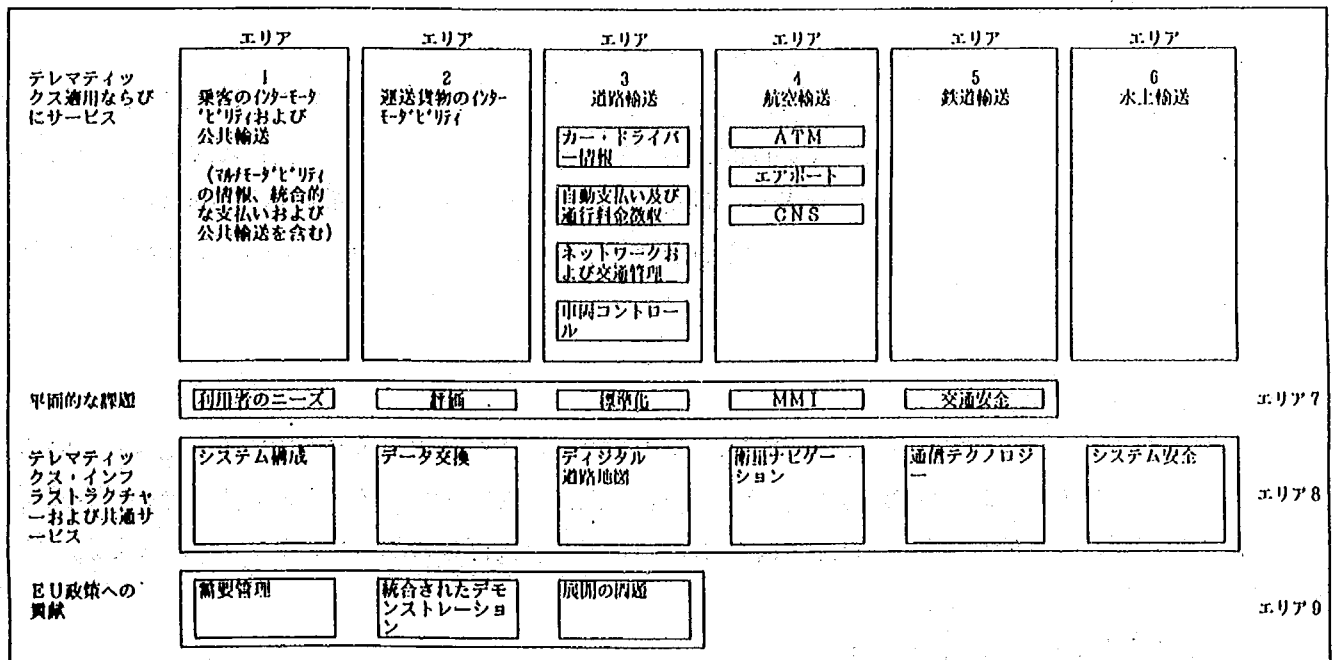


図-4 EUテレマティックスプロジェクト分野

主なプロジェクトとしては、

- ① AC-ASSIST (衝突回避自動援助及び安全車間距離保持システム)
- ② CHAUFFER (トラックのプラトーン走行システム)
- ③ SAVE (緊急事態におけるドライバー状態の効率的アセスメント及び車両コントロールシステム)
- ④ UDC (都市交通コントロールシステム)

が進められている。

また、オランダのAVG (Automated Vehicle Guidance)、スウェーデンのISA (Intelligent Speed Adaptation)、フランスのLa Route Automatisée (自動化された道路) など、各国のAHSプロジェクトも鋭意取り組まれている。

4. 3 AHS 国際会議

世界的なAHS研究開発の取り組みを背景に、1997年に第1回のAHS国際会議が、12カ国の参加のもと、米国サンディエゴで開催された。この会議では、AHS研究開発の関係者が取り組むべき10の課題を以下のプライオリティの順に抽出した。

- ① AHSの定義 (共通の認識)
- ② 便益・効果
- ③ 完全自動運転への展開過程 (制御の程度と対象道路)
- ④ 社会的受容性
- ⑤ ドライバーの役割
- ⑥ 利用できるサブシステム・機能
- ⑦ 機能及び標準化のニーズ
- ⑧ ヒューマンマシンの統合化
- ⑨ 商用車への適用
- ⑩ システムの統合・バックアップモデル

第2回のAHS国際会議は98年にオランダのデルフトで開催され、AHS研究開発における政府の役割は、クライアントとなつての民間との契約締結、プロジェクトの牽引、法規制、新技術促進の充実にあること、優先度が高い機能は、衝突軽減、速度警告・制御、横制御、Stop&Goであり、また早期の実用化(5年以内)が期待できるものとして、ACC (Advanced Cruise Control) が挙げられた。

5. AHSのコンセプト

日本のAHSは、リアルタイムな車両の挙動の改善を目的としたシステムであると定義している。また、システムの段階的な導入および進化を視野に入れ、AHSをシステムの介入度合い、車両を制御する責任という観点から分類し、以下の3つのレベルをAHSの基本コンセプトとして定義している。

① 情報提供レベル (AHS-i)

情報収集の一部をシステムがサポートする。

② 車両制御支援レベル (AHS-c)

情報収集に加え運転操作の一部をシステムがサポートする。

③ 自動走行レベル (AHS-a)

情報収集と運転操作を 100%システムが行い、安全走行の責任をシステムが負う。

このように分類したAHSの各段階での効果を推測すると、情報提供レベルにおいては、ドライバーの視覚支援、注意の喚起などを行うことにより、安全に大きく寄与することが期待できる。車両制御支援レベルにおいては、情報提供レベルにおける効果に加えドライバーの操作ミスのカバーできるため安全面への貢献は更に広がり、また、既に実用化されているアダプティブクルーズではドライバーの制御遅れによる渋滞の低減効果も期待できると考えられる。更に自動走行レベルは、システムがドライバーの運転負担を軽減させることができるようになり快適性に貢献できる。また、理想的な車両の運行を可能にし、輸送効率面、環境面において効果があると考えられる。

また、AHSを情報提供レベルから、車両制御支援レベル、自動走行レベルへと段階的に構築する事により得られる効果としては、安全面でドライバーの習熟が容易であること、情報提供レベルや車両制御支援レベルは自動走行レベルに比べて技術的難易度も低いいため比較的早い時期に実道路へ導入できることが挙げられる。

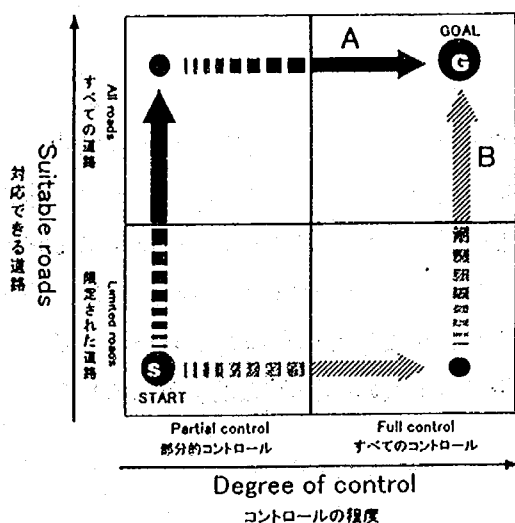


図-5 AHSの進化の道筋 (自動走行に至る道筋)

	現状	AHS-l	AHS-c	AHS-a
情報				
操作				
責任				

図-6 情報・操作・責任の所在

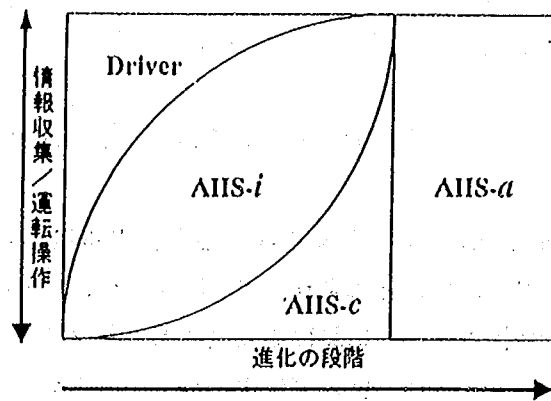


図-7 AHSの進化の段階

6. AHSの基本ユーザサービス

日本のAHS研究開発は、AHS-i、AHS-c、AHS-aの3段階の発展シナリオをロードマップとして進めてきた。この研究開発を効果的、効率的に進め、成果を社会に活かすためには、研究開発が社会やユーザのニーズから導かれ、体系化されたものであることが重要である。

このため、AHSの各機能のサービス展開やその効果、具体のシステム開発に向けての方向を示すことを目的に、ニーズ側の要求を記述するAHSの基本ユーザサービスと基本リクワイアメント(サービスの提供に必要な機能に関する要求性能)の考え方をまとめた。

6. 1 リクワイアメント策定の範囲

ニーズ側からユーザサービスやリクワイアメントを検討する前提として、「リアルタイムな車の挙動の改善」に関する走行支援をリクワイアメント策定の領域とした。「リアルタイムな」とは、事故や渋滞などの事象に直接、実際に関係する時間の範囲を意味し、出発前の道路情報の提供や事故が起こってからからの救急措置など、事前・事後の領域は対象としていない。「車の挙動の改善」とは、車の加速・減速、ハンドル操作の改善であって、自動的にまたは人が介在して車をコントロールするものである。挙動としては、縦方向、横方向、交差(交差点などで車や人の動線が交差するもの)の3つの分類で考えている。

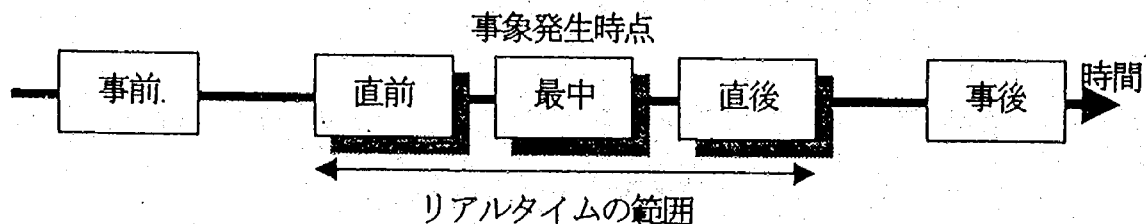


図-8 リアルタイムの範囲

6. 2 リクワイアメント策定の方針

走行支援は、リアルタイムな車の挙動の改善による「安全性の向上」と「効率・環境の改善」を

主な目的とした。次に、各々の目的に対するユーザサービスとリクワイアメントを要素技術やシステムから独立した普遍的な「基本ユーザサービス」と「基本リクワイアメント」に整理し、実際に提供するサービスに関しては、基本ユーザサービス等の組合せとしての「サービスパッケージ」及び「応用リクワイアメント」とした。これにより、AHS研究開発の最も基本的分類となる「基本ユーザサービス」の体系化を図った。

この他にも、i c aの別、車と道路インフラの機能分担、対象とする道路種別、車種など複数の考慮すべき分類があるが、これらはシステムの作り方に属するものであり、副次的な分類として扱うこととした。例えば、i c aはサービスを行う方法や支援のレベルを表すものであり、車と道路インフラの機能分担はサービスを実現する方法の選択の問題である。これらは、システム開発の中で技術水準やコストなどに応じて適切に選択すればよいと考えている。

「基本ユーザサービス」は、個別のプロジェクトによらない共通の土俵として設定するものであり、これによりデータや実験装置の共有、基本リクワイアメントの共通化、標準化が可能になるとともに、国内の関連する開発プロジェクトの整合や国際的な標準化の推進が図られる。

6. 3 基本ユーザサービスと基本リクワイアメント

ニーズから導かれるユーザサービスを表－4に示す軸で分類し、基本ユーザサービスとして体系化を試みたのが図－9である。基本ユーザサービスは、リクワイアメント策定の範囲及び方針をもとに、目的、挙動を主な分類軸とし、時間軸はサービスが扱う時間的範囲を示している。目的の中での利便・快適は、安全や効率が改善された結果として発生する副次的なものが多く、当面その他として扱う。また、「縦方向の挙動」は車の前後方向の挙動で、速度や車間の調整、減速・停止による衝突防止など、「横方向の挙動」は車の左右方向の挙動で、車線保持、車線変更など、「交差挙動」は他車両、歩行者、電車などの動線と交差する挙動で、交差部での右左折、衝突防止、分合流などを含むものである。さらに、安全に関する基本ユーザサービスと交通事故類型との関係を整理すると、基本ユーザサービスで全ての事故を重複なく全てカバーすることができる。

表－4 ユーザサービス体系化の軸

軸	説明	基本	応用
目的	安全性、効率・環境、利便・快適など	○	
時間軸（分野）	事前、直前、最中、直後、事後など	○	
挙動	縦（前後）、横（左右）、交差など	○	
原因・対策	人為エラー、天候、故障など		○
支援レベル	i, c, a など		○
支援方法	インフラ、路車協調、車両自立など		○
場所、適用箇所	単路、交差点など		○
適用部位	速度支援、ハンドル支援など		○
制御方法	自律分散、中央制御など		○

基本：提供される実際のサービスに依存しないで共通的に適用できる軸

応用：提供される実際のサービスに応じた分類として適用される軸

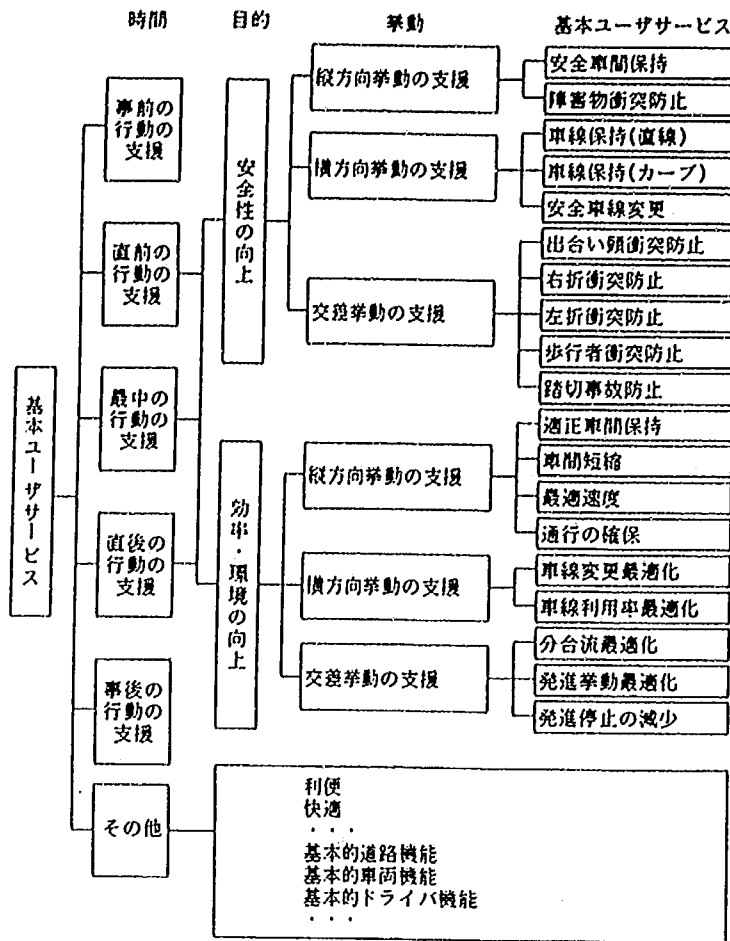


図-9 基本ユーザサービスの体系

表-5 基本ユーザサービスと事故類型の関係

事故類型		基本ユーザサービス										未分類事故
		縦方向	横方向	交差	出会い頭衝突防止	右折衝突防止	左折衝突防止	横断歩行者衝突防止	踏切事故防止	その他		
人対車両	横断中											
	通行中・路上作業中/遊戯中/停止											
車両相互	その他											
	正面衝突											
	すれ違い衝突											
	追突											
	出会い頭											
	追越・道路変更時衝突											
	右折時衝突											
	左折時衝突											
	横断・転回・後退時											
	その他											
車両単独	工作物・路外逸脱・転倒											
	駐車車両											
	落下物											
列車	その他											

また、基本リクワイアメントは、基本ユーザサービスを満たすための要件を定義するもので、ユーザニーズに関わる調査・解析を通して、論理的、普遍的に定義されることが要求される。実際に社会にAHSのサービスを提供する場合は、これらの基本ユーザサービスや基本リクワイアメントの組合せをベースに、実用のサービスパッケージとしてのリクワイアメントが必要に応じて含まれるものと考えている。

次にこれらの定性的な基本リクワイアメントを、道路交通の定量的な把握や道路事象（事故、渋滞等）発生メカニズムの解析を通して、より具体的に定量化していくこととなり、その上で提案するAHSのコンセプトの費用便益評価や、システム開発、キー要素技術への要求仕様の提示を進めることになるが、この流れは一方にのみ進むものではなく、ニーズやユーザサービス、コンセプト提案等のいわゆる研究の上流工程と、システム開発、キー要素技術等の研究の下流工程の間のフィードバックの繰り返しによって実現していくものと考えている。

表－6 安全に関する基本ユーザサービス

挙動	基本ユーザサービス	サービス定義	備考
縦方向	安全車間保持	先行車両に追突しない車間を保持する。	停止車両への追突防止は障害物衝突防止に分類
	障害物衝突防止	道路上にある歩行者、停止車両、落下物等の静止物への衝突を防止する。	
横方向	車線保持（直線）	直線での車線保持を行う。	
	車線保持（カーブ）	カーブでの車線保持を行う。	
	安全車線変更	他の車両との衝突を回避しつつ車線を変更する。	
交差	出会い頭衝突防止	出会い頭の衝突を防止する。	
	右折衝突防止	右折時の衝突を防止する。	
	左折衝突防止	左折時の衝突を防止する。	
	横断歩行者衝突防止	交差点を横断中の歩行者との衝突を防止する。	単路部横断中の衝突防止は障害物衝突防止に分類
	踏切事故防止	踏み切りでの電車との衝突を防止する。	

表－7 効率・環境に関する基本ユーザサービス

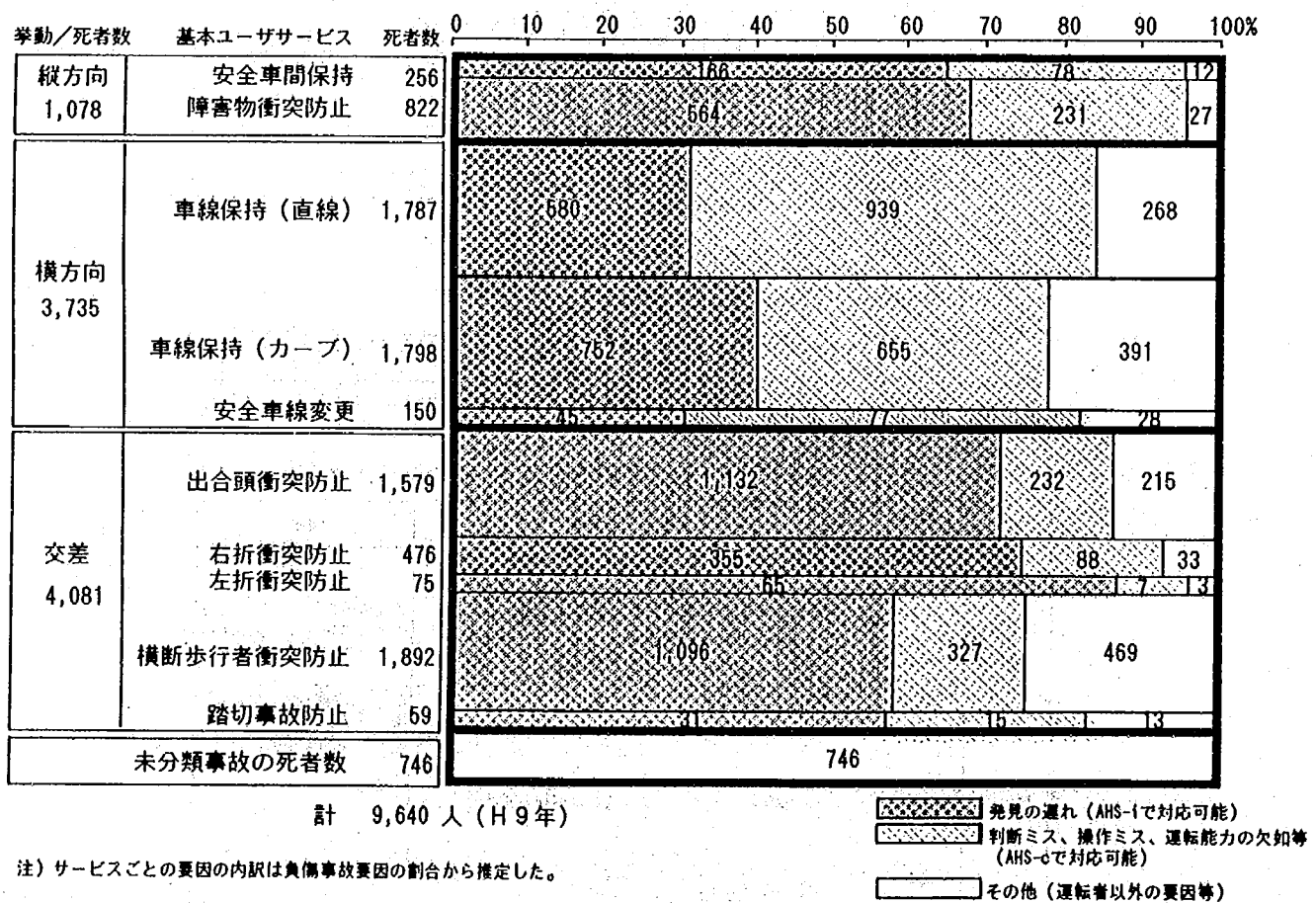
挙動	基本ユーザサービス	サービス定義	備考
縦方向	適正車間保持	交通量が最大になる適切な車間を保持して走行する。	
	車間短縮	車間を許容される範囲まで短縮して走行する。	冗長車間の短縮、車群走行による車間短縮、プライベートな車群走行を含む。
	最適速度	交通流が適正になる速度で走行する。	最大Qに近づく速度Vで走行する
	通行の確保	悪天候による視程不良下でも通行を維持できるようにし、通行止めを減少させる。	濃霧、大雨を想定。
横方向	車線変更最適化	交通流を乱さないように適切に車線変更を行う。	
	車線利用率最適化	交通量が最大になるように車線間の利用率を適正にして走行する。	
交差	分合流最適化	交通の流れに適応し、無理・無駄のない分合流を行う。	
	発進挙動最適化	適切な間隔で発進を行う。発進時の無駄な時間を減少させる。	
	発進停止の減少	平均速度に近い速度で安定して走行し、発進と停止を減少する	

7. AHSの効果（マクロ的分析）

研究開発を効率的に遂行していくためには、開発段階に合わせて適宜評価分析を行うことがきわめて重要である。AHSの基本ユーザサービスについて、主要な効果項目である安全性と効率性の観点から導入効果に対するマクロ的分析を行った。

7. 1 安全性の向上効果

AHS基本ユーザサービスごとに「AHSの支援レベル」と「事故要因」を関連づけて、AHSの事故低減効果の分析を行った。事故要因は大きく「発見の遅れ」「判断・操作上の誤り、運転者自身の運転能力の欠如」「運転者以外の要因」の3種類に分類し、「発見の遅れ」は情報提供によって改善でき、また「判断・操作上の誤り、運転者自身の運転能力の欠如」は運転補助によって改善できると考え、それぞれがAHS-iレベル、AHS-c または a レベルで対応できる可能性があるものと仮定した。そして、AHSの基本ユーザサービスと事故類型を対応させ、各基本ユーザサービスが低減する可能性がある事故死者数および損失額をサービスレベルごとに示した。



図－10 AHS基本ユーザサービスによる事故削減効果イメージ（死者数全体）

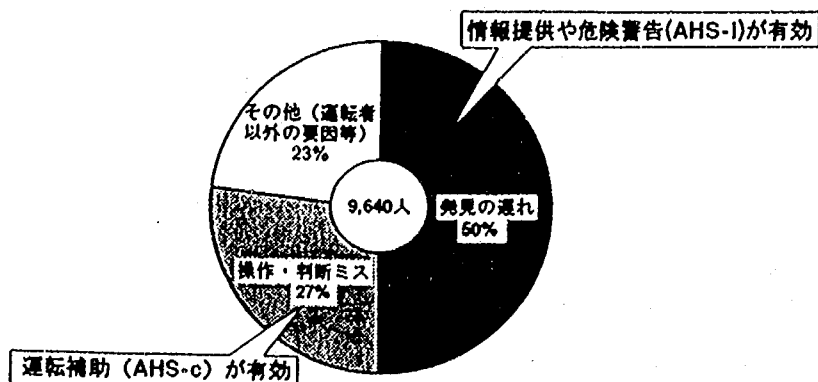


図-11 交通事故死者数の原因別内訳 (1997年)

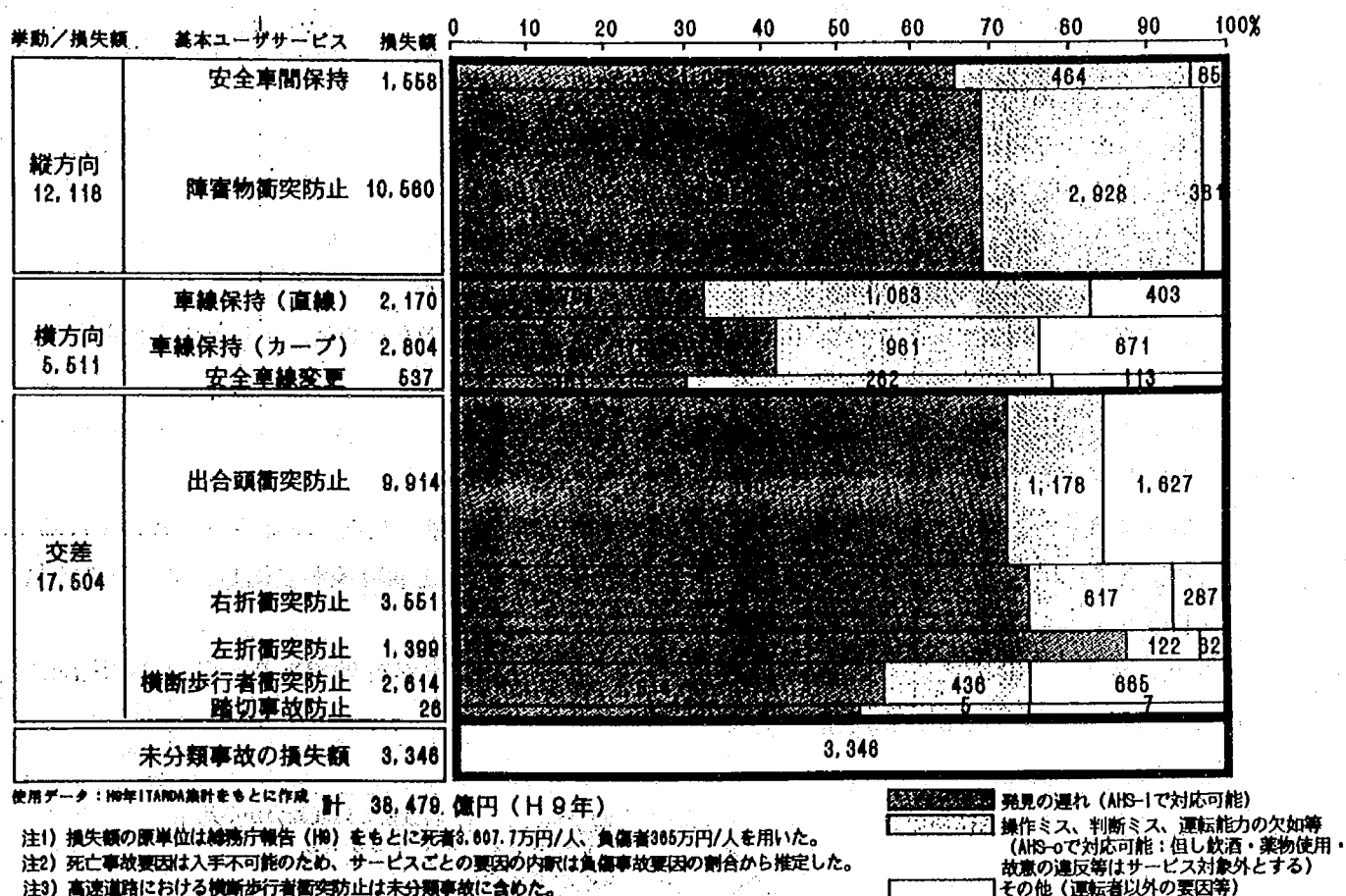


図-12 AHS基本ユーザサービスによる事故削減効果イメージ (死傷者全体損失額)

基本ユーザサービスの中で「車線保持 (直線)」、「車線保持 (カーブ)」、「出合頭衝突防止」、「横断歩行者衝突防止」の4つに関係する交通事故死者数が大きな割合を占めており、全体の73%を占めている。また、原因別内訳を見ると、発見の遅れに起因するものが50%、操作・判断ミスによるものが27%を占めており、前者にはAHS-iが、後者にはAHS-cが有効と考えられる。

また、死傷者全体の損失額でみると、死者数に影響の大きい4つのサービスに加えて、「障害物衝突防止」、「右折衝突防止」が大きなウェイトを占めているのがわかる。

発見の遅れによる死者の割合の高い障害物衝突防止や出会頭衝突防止には、情報提供レベルのAHS-iでもかなり有効であり、車線保持にはAHS-cがさらに有効であることがわかる。

7. 2 効率・環境の向上効果

渋滞原因は、自然現象、道路構造、道路周辺（沿道）状況、交通状況、交通規制（事故、工事等）、交通の集中、交通の偏りから、概ね以下のように整理することができる。

- ① 運転環境の変化による速度の低下、車間距離の冗長化（雨天、積雪時等）
- ② 道路構造の変化による速度の低下（サグ、トンネル等）
- ③ 車両相互の関係から生じる速度の低下、車間距離の冗長化（合流部、織り込み部等）
- ④ 車線数の変化（車線変更）による容量の低下（合流部、規制区間等）
- ⑤ 発進、停止による車頭間隔のばらつき（交差点部等）

一方、AHSの基本ユーザサービスと道路の利用効率の低下要因との対応関係は、以下のように整理することができる。

- ① 適正な車間保持がなされることにより、交通容量の低下が生じなくなることから、サグ部、トンネル部等の隘路における交通現象が変化する。
- ② 車間の短縮が図られることから、単路部、規制区間等における交通容量が向上し、これに伴って、 Q （交通量）- V （平均速度）- K （交通密度）の相関に変化が生じる。
- ③ 最適速度を維持した走行が可能となることから、わずかな交通流の変動により渋滞流に落ち込んでいたものが、容量状態を維持することが可能となる。
- ④ 車線変更の最適化、分合流挙動の最適化がなされることにより、分合流挙動や織り込み挙動が円滑になり、交通流の乱れによる容量低下がなくなる。
- ⑤ 多車線道路の車線利用率の最適化により、道路断面の交通容量が有効に活用される状況となる。
- ⑥ 発進挙動の最適化、発進停止の減少により、交差点における交通現象が変化し、交差点の容量低下等が解消される。

また、マクロ的にみれば、高速道路の渋滞の約36%にAHSが有効であり、CO₂の削減に向けてもAHS機能の活用効果が期待できる。

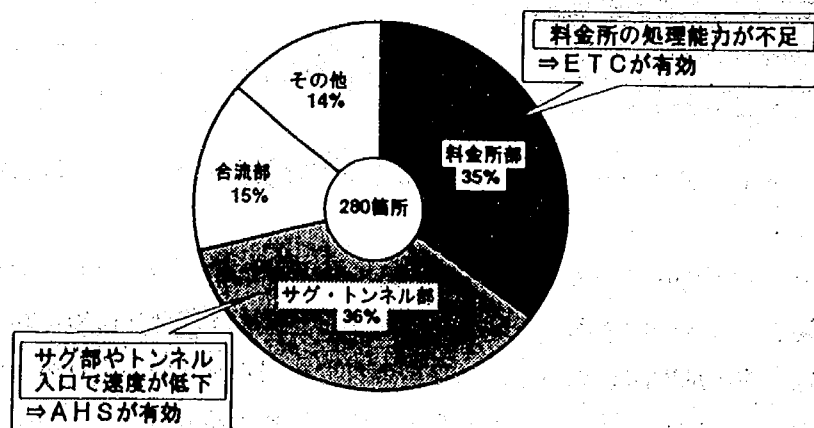


図-13 高速道路の主要渋滞箇所（1995年度）

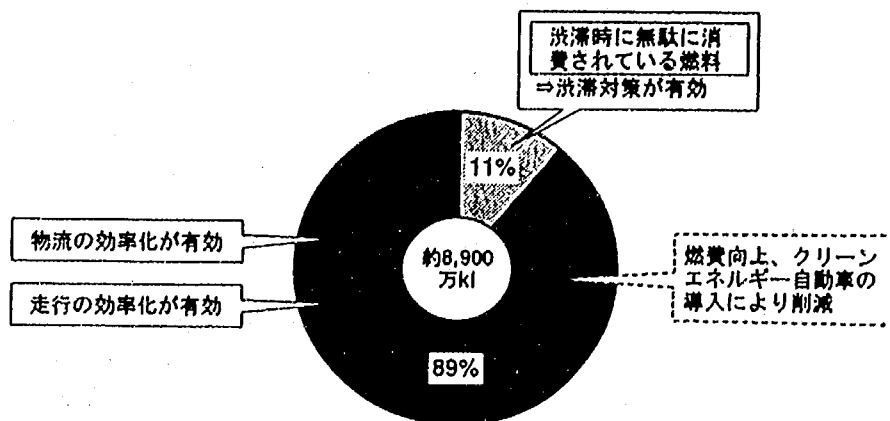


図-14 自動車による燃料消費量（1995年度）

さらにここでは、縦方向の最も基本的なサービスである適正車間保持サービスや車間短縮サービスにおける直接的効果のうち、headway（車頭時間）の短縮、交通流の安定によるAHSの交通流改善効果の定量化について検討を行う。

（1）交通容量に与える影響

交通容量は、一般的には地域の交通事情や地理的要因等の影響を受けるとともに、主に単路部（1車線、多車線）、交差部、ICなどの道路構造によって決まってくる。しかしながら、AHS車両のように車間距離を制御する車両が普及することによって、同じ道路であっても交通容量が変化すると考えられる。

ここでは、適正車間保持サービスや車間短縮サービスは、車間ではなく headway を一定とする制御を行うものとし、目標とする headway を3種類設定した。また、各々のケースにおいて、AHS車両と非AHS車両が混在した場合の交通容量の変化を単路部の多車線道路の交通容量を基本に算出した。

$$Q_d = 3600 / (h_l \times d + h_{\text{manual}} \times (1 - d))$$

ここで、 Q_d : AHS普及率 d %時のAHS/非AHS混在の交通容量

h_l : AHSの目標 headway

h_{manual} : 非AHSの平均 headway

d : AHS普及率

AHS車両は先行車両が非AHS車両かAHS車両であるかに関わらず目標 headway で走行すると仮定している。AHSが100%導入された場合の交通容量を表-8に示す。

表-8 AHSの目標 Headway と交通容量

サービスレベル	目標 headway	単路 (多車線)	倍率
非 AHS	平均 1.6 s / 台	2,200/h/l-γ	—
AHS-c	1.6 s / 台	2,200/h/l-γ	1.0
	0.9 s / 台	4,000/h/l-γ	1.8
AHS-a	0.5 s / 台	7,200/h/l-γ	3.3

(2) 交通流率に与える影響

交差点におけるAHS車両と非AHS車両が混在した場合の交通流率の変化を、交差点の基本交通流率を基本にして算出した。ここで、AHS車両の車両発進時における headway 達成までに生じる交通流の信号制御による損失（発進ロス）を考慮すると、AHSが100%導入された場合の交通流率は表-9の通りである。

表-9 AHSの目標 Headway と交差点交通流率

システム	目標 headway	単路 (多車線)	倍率
	—	—	—
非 AHS 車両	—	2,000/h/l- λ	—
AHS-c	1.6 s / 台	2,159/h/l- λ	1.1
	0.9 s / 台	3,864/h/l- λ	1.9
AHS-a	0.5 s / 台	6,758/h/l- λ	3.4

8. 優先システムの開発（研究開発の重点化）

AHSの導入にあたっては、社会システムとして国民のコンセンサスを得るためにも、効果の大きいユーザサービスから優先的に開発、導入することが望ましい。そこで、前に述べたようにユーザサービス毎に、まずは安全性の効果分析によって定量的に評価し、優先的に検討する6つのユーザサービスを選定した。

- 障害物衝突防止サービス
- 車線保持（直線）サービス
- 車線保持（カーブ）サービス
- 出会い頭衝突防止サービス
- 右折衝突防止サービス
- 横断歩行者衝突防止サービス

これら6つのユーザサービスを実現することにより、事故による損失額を最大約90%まで低減させる可能性がある。

今後は、効率の向上等を実現するユーザサービスの絞り込みやAHSのシステムを導入するための投資効果等の評価を行うとともに、ユーザサービスを機能的に組み合わせたシステムを開発し、基本的には効果の高い場所から順次導入を検討していくことを考えている。

9. AHSと標準化、技術基準の整備

AHSのシステムに対する要求には、高度な要素技術の開発以外にも、ITSの他サービスとの整合性が良いこと、車載装置の多様なシステムレベルに対して互換性が高いこと、支援レベル（i, c, a）の進化に合わせて段階的な構築が容易であること、サービス区間の連続的展開に対応可能なように拡張性が高いことなどがある。したがって、AHSの各ユーザサービスを実現する道路インフラのシステム開発においては、これらの要求を満たすためにシステムの標準化は必須であり、更にイ

ンフラ投資における整備コスト削減のためにも標準化の推進は重要な意味がある。

これまでに、システム設計における標準化推進策としてAHSの各ユーザサービスにおけるシステムアーキテクチャの構築を行いAHSシステムとして標準化すべき機能群とその配置について検討を進めている。

今後のAHSの標準化については、自動車という国際商品が対象となっていることを考慮して、路車間通信、ヒューマンインターフェースなど重点的に国際標準化を進めるべき項目を中心に、ISOなどの国際組織を通じて積極的に貢献をしていく計画である。

また、前述した互換性、拡張性の面から、インフラ設備を道路上に無秩序に配備することは避けるべきであり、配備に際しての制度・基準類の整備を検討していく必要がある。さらに、AHSの導入と普及促進には関係法規の整備や社会的コンセンサスを形成するための、広報、啓蒙、インセンティブの付与、ユーザの教育も今後の重要な課題である。

10. 結びースマートウェイへの展開とAHS実証実験

建設省では、ITSをより総合的かつ効率的に整備するための「スマートウェイ」構想を推進している。この構想は交通問題の解決に加え、生活の質的向上、経済構造改革、国土構造の転換など新しい価値の創造を盛り込んだ、先端的なITSのアプリケーションを実現する21世紀の道路インフラの整備を目指すものである。

スマートウェイでは、ITSサービスを実現する自動車「スマートカー」との協調により、例えば、ETCによる料金所渋滞の軽減効果、ドライバーへの情報提供や、運転補助などの安全運転支援サービスによる交通事故の大幅な減少効果、サグ、トンネルなどでのドライバーの無意識な速度低下を防止する効率向上サービスによる渋滞の軽減効果、さらに渋滞の軽減による燃費の向上と環境保全などの道路交通の質的向上が期待される。中でもAHSは道路交通の質的向上を達成する上で大きな役割を果たしていくと考えられる。2002年のスマートウェイの実現を目指し、産官学の関係者が力を結集して、先端的なITS技術を統合して組み込んだ新しい道路仕様の策定、要素技術開発、制度・基準類の整備を進めている。そして、その過程で2000年のAHS実証実験を運輸省が進めているASV（Advanced Safety Vehicle：先進安全自動車）研究開発と合同で計画している。

また、スマートウェイは、高度情報通信社会を支えるインフラとしての役目も見逃せない。例えば、今のカーナビゲーション車載機は、モバイルメディアとしてインターネット、旅行観光ガイドシステムなどのマルチメディアとネットワークできるなど、新たなライフスタイルを生み出す可能性を持っている。ETCやVICS、AHSといったITSアプリケーションのみならず、その他マルチメディア事業の多くのアプリケーションに利用される総合的なインフラとなることが予想される。しかし、システムどうしが互換性を持ち連携して機能しなければ、サービス毎に異なる機器やインフラが必要となり、車の中も道路も機器が氾濫し、非常に非効率なシステムになることは容易に予想される。各アプリケーションとの調和を保ちつつ、統一的なシステムアーキテクチャを策定して、合理化されたプラットフォームとして形成し、高度情報通信社会を先導していくことが期待されている。

世界最高レベルの安全で円滑な走行環境を実現するために、そして21世紀の豊かな社会の創造に向けて、世界各国の研究者の英知が結集され、AHSの研究開発が実を結んでいけばと思う。

表-10 AHS実証実験に向けたスケジュール

1996年度	基本コンセプト策定と要素技術開発に着手
97年度	AHSリクワイアメントの体系化 開発すべきシステムの粗選定
98年度	ユーザサービスの選定、リクワイアメントの検討 システム設計、要素技術の開発
99年度	リクワイアメントの精査 システム設計、実証実験に向けたシステムの開発
2000年度	実証実験（関係省庁と連携）

参考文献

- 1) AHS研究組合：AHSリクワイアメント（第0次）、1998年2月
- 2) 徳山日出男、岩崎泰彦、加藤恒太郎：知能道路2001、日本経済新聞社、1998年10月
- 3) (財)道路新産業開発機構：ITSハンドブック、1998年10月
- 4) 交通工学研究会：インテリジェント交通システム、1997年9月
- 5) (社)電気学会：道路交通自動化システム、電気学会技術報告第636号、1997年6月
- 6) 津川定之：自動運転システム、交通工学 Vol.31 No.6、1996
- 7) AHS研究組合：AHSRA Report Vol.3、1998年8月
- 8) AHS研究組合：第2回AHS研究報告会資料、1998年9月
- 9) (社)交通工学研究会：ハイテクを利用した道路利用の効率化への取組み、第61回交通工学講習会テキスト、1998年
- 10) 上田敏：第1回AHS国際会議開催される、土木技術資料39-12、1997年
- 11) 上田敏：サンディエゴでのAHSデモンストレーション、土木技術資料40-2、1998年
- 12) 上田敏：オランダAVGデモンストレーション・第2回AHS国際会議に参加して、土木技術資料40-10、1998
- 13) 上田敏、横田敏幸、村田重雄：AHSの研究開発方針についての検討、土木学会年次学術講演会、1998年10月
- 14) 横田敏幸、桑原雅夫：AHSの交通流へ与える影響に関する分析、土木学会年次学術講演会、1998年10月
- 15) 横田敏幸、桑原雅夫、尾崎晴男：AHSのボトルネック解消効果に関する研究、第18回交通工学研究発表会、1998.11
- 16) 横田敏幸、横地和彦：交通流シミュレータSIPAの開発、土木計画学研究講演集、1998年11月

特別講演「独創人間－閃きの法則－」

東京大学先端科学技術研究センター教授 軽 部 征 夫

独創人間－閃きの法則－

東京大学先端科学技術研究センター

教授 軽 部 征 夫

現在ぐらい独創性が議論されている時はないだろう。

独創性が論じられているのは主に科学技術の分野であるがあらゆる分野でもこれが極めて重要であろう。

広辞苑によれば“独創性”とは「模倣によらず自分一人の考えで独特のものを作り出すこと」とある。ものを新たに作るとしても他に類例がないということであり、オンリーワンであるという事である。さて、日本人は独創性がないといわれているのが本当なのであるうか。

独創性は生まれながらにして持っている性格であろうか。

もちろん素質みたいなものがあるかもしれないが、私の経験ではトレーニングによって身につくものである。私は恩師から独創性について多くを学んだ。特に科学者であるから独創性を発揮するとなると発見や発明をすることになる。

私のようなエンジニアの場合には発明するときに独創力を発揮することになる。

アメリカのヤング氏という広告代理会社の副社長にまでなった人が「アイディアの作り方」という小冊子を書いているがそこには「アイディアは既存の知識の組み合わせに他ならない」と述べている。これはアイディアを出す最も簡単な方法であろう。しかし、本当に独創的なアイディアを出すためにはモチベーションが必要であり、このモチベーションとして好奇心、正義感、要請などが考えられる。アイディアを出すためには4つのステップが必要であるが、これについては講演で具体的に述べたいと思う。アイディアが閃いたときの感動はかくべつである。感動が大きければ大きいほどアイディアは素晴らしいものと言える。

- 1) 独創的技術とは何か
- 2) 頭脳のアウトソーシングをする
- 3) ダブルメジャーを志向せよ
- 4) 独創人間のすすめ

参考著書＊ 「独創人間」 悠飛社

「独創力をつける」 日本経済新聞社

「独創力で成功する」 日本能率協会マネジメント

建設マネジメント研究の課題と展望

建設マネジメント技術研究官 木 下 賢 司

建設マネジメント研究の課題と展望

建設マネジメント技術研究官 木下賢司

はじめに

今日、社会資本整備を取り巻く状況は大きく変化し、これまでの取り組みについて抜本的な見直しを迫られる厳しい局面にある。しかし、我が国が豊かで活力のある国でありつづけるためには、社会資本の充実やストックの有効活用による適切な国土のマネジメントが必要であることはいうまでもない。

建設マネジメント研究は、社会資本整備の意義や効果が問われ、また、事業執行の効率性や透明性が問われる中で、どのような「社会資本サービス」をいかなる方法（「事業プロセス」）で提供していくべきか。そのために必要とされる土木技術とはいかなるものか。あるいは、これらに関連して今後の建設産業の課題はいかなるものかなど、今後の Public Works の実施にあたって、そのトータルな生産システムの Management のあり方を研究しようとするものである。そして、その研究を通じて、社会資本整備の取り組みについてのアカウンタビリティを確保し、国民と対話し、共働して国土のマネジメントが進められていく、そんな社会の実現に資することを目的としている。

建設省土木研究所では、平成9年度に建設マネジメント技術研究センター（Research Center for Public Works Management）を開設し、上記の観点からの取り組みをはじめている。ここでは、建設マネジメント技術研究センターの取り組みの現状を紹介し、この新たな研究領域への今後の取り組みのあり方について考察することとする。

1. 建設マネジメント研究の課題と研究の進め方

1. 1 建設マネジメント研究の5つのフェーズ

「建設マネジメント」という用語は、建設工事のマネジメント（いわゆる Construction Management）やプロジェクトのマネジメントなど、用いる場面や立場によってその意味するところが異なる。土木研究所において研究する建設マネジメントとは、社会資本整備（Public Works）に関して、プロジェクトの企画・立案から設計・施工、管理・運用までの一連のプロセスを一つの生産システムとしてとらえ、これをマネジメントの対象としようというものである。

図-1.1 および表-1.1 は、土木研究所において行う建設マネジメント研究を、生産システムとそれが生産する財・サービス、生産システムのアウトソーシング、それが成り立つ社会経済基盤等の観点から5つのフェーズに区分し、それぞれにおける研究対象、視点等を整理したものである。建設マネジメント研究の領域は、我が国の社会経済の将来像から事業実施を支える建設産業のあり方に至るまで、社会資本整備に関係する広範な分野を包含したものとなっている。

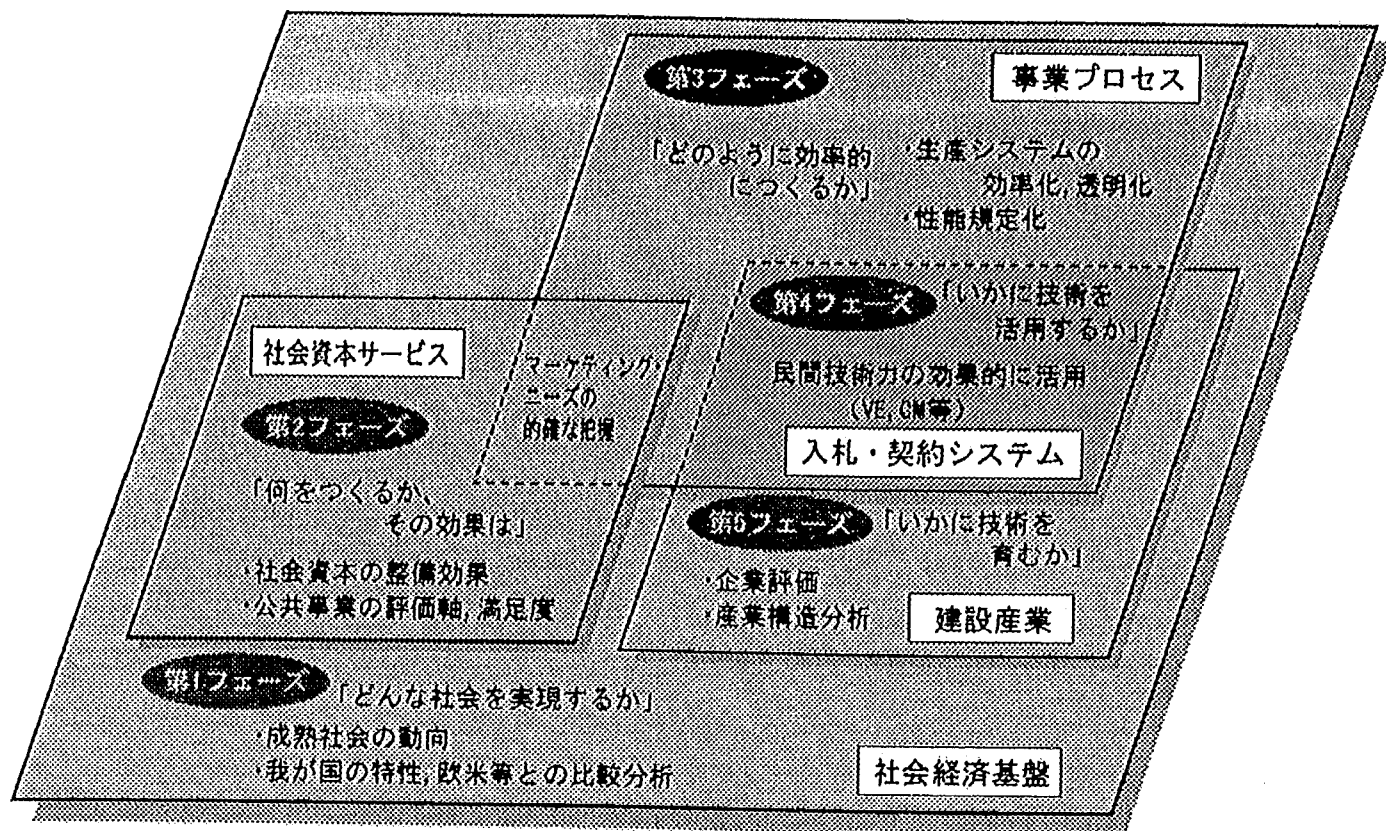


図-1.1 建設マネジメント研究の5つのフェーズ

表-1.1 5つのフェーズと研究対象等

フェーズ	研究対象・視点	研究分野・検討事項
1	社会経済基盤 「どのような社会を実現するか」	- 成熟社会の展望、国民・時代の要請 - 公共事業の整備理念 - 風土・文化等の社会基盤
2	社会資本サービス 「どのようなサービスを提供するか」	- 今後の社会資本サービスのあり方 - 社会資本の評価軸、機能・効果・満足度 - プロジェクト評価（合意形成）
3	事業執行プロセス 「効率的な建設生産システムの構築」	- 合意形成システム（住民参加・情報公開等） - 事業執行システムの分析評価 - インハウスエンジニアリングのイノベーション
4	入札契約システム	- 技術提案総合評価方式の具体化 - CM、PM導入方策 - DB契約とリスクマネジメント
5	建設産業・生産基盤 「いかに技術者を評価し、育成するか」	- 企業の技術（力）評価 - 技術者の技術力評価、育成システム - 標準化の推進（建設CALS、ISO等）

1.2 建設マネジメント研究と政策課題への対応

建設マネジメント研究は政策課題対応型の研究領域である。図-1.2 は現在、建設マネジメント技術研究センターにおいて取り組みをはじめている研究課題と今日の3つの大きな建設行政の政策課題

との対応を示したものである。

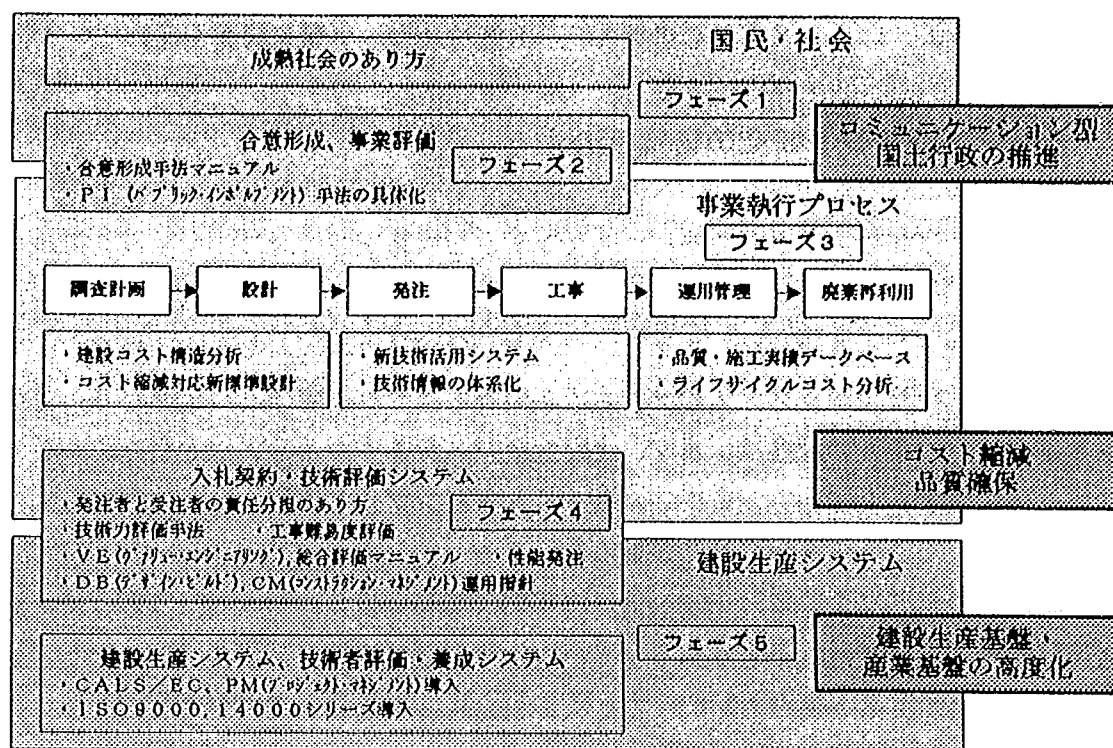


図-1.2 建設マネジメント技術に対する研究領域・研究テーマと政策課題

「コミュニケーション型国土行政の推進」は、国民の参加意識の高まりやインターネットの普及などの技術進歩を踏まえ、行政と国民との間の双方向性の確保を推進し、透明性の確保と国民との対話を重視した建設行政への転換を進め、国民のニーズを的確に踏まえた効率的な国土マネジメントの推進を図ろうとするものである。建設マネジメント研究の観点からは、同じ社会資本を整備するのであっても、合意形成等の整備プロセスが異なれば、住民や利用者には異なった「満足度」が生まれることになるといった仮説に基づき、PI（パブリック・インボルブメント）手法の有効性の検証、運用指針の検討をはじめ、合意形成や事業評価手法の開発、それらの支援ツールの開発に取り組んでいる。

「コスト削減、品質確保」の課題は、今後の少子高齢化社会の到来を控え、公共事業の効率性の向上が喫緊の課題となっていることを背景にしたまさに直面する政策課題である。今日、「発注者責任」とか「エンジニアリングジャッジメント」といった客観性重視やマニュアル依存からの脱却を目指した議論が盛んに行われているが、建設マネジメント研究の立場としては、そのような議論の論理的な支えとなるとともに、建設生産システムにより多くのエンジニアリングを投入し、より高度な生産システムとしていくため、「技術を評価する技術」の開発や日本型プロジェクトマネジメントシステムの開発等、具体的なツール開発を進めている。

「建設生産基盤、建設産業基盤の高度化」の課題は、建設投資の低迷、公共工事のコスト縮減、建設市場の国際化など建設業はかつて見られない大きな構造変化に直面しており、技術と経営に優れた企業が伸びられる透明で競争性の高い市場環境の整備など、新たな企業経営の展開を促進していこうというものである。建設マネジメント研究の立場からは、企業の技術力評価や技術者の技術力評価、技術力の養成システム、CALS/ECの導入促進方策等について研究開発を進めている。

1. 3 建設マネジメント研究の研究手法

建設マネジメント研究の目指すところは、以上のような政策課題に対し、今後の施策のあり方を示す政策提言や、施策の具体的な推進を図るための支援ツールの開発を行うことである。そのためには、マネジメントの対象となる建設生産システムについて、そのメカニズムを十分に解明することが基礎となる。ところが、建設生産システムのメカニズムの解明はこれまでほとんど進んでいなかった。建設マネジメント研究の最大の課題は、まず、建設生産システムへのインプットやそこからのアウトプットを的確に計測することである。そのアウトプットとインプットの統計分析の中で一定の法則性や因果律を見出していくことによって研究が進められることになる。

既に、建設工事の領域については工事工種の体系化に基づく積算体系の構築によって、様々な工事が同じ物差しによって計測されるようになってきている。その積算実績をデータベース化して分析することにより、建設工事のコスト構造の解明やそれに基づくコスト縮減提案等が可能となってきた。これを工事成績や工事の難易度評価等と連動させて分析することにより、工事の品質と施工業者の技術力の関係等の相関関係についても解明が進んでいくものと考えている。さらには、建設プロジェクト全体の執行過程を、建設CALSの導入や、今日、米国等で導入が進み我が国にも導入が検討され始めたPM（プロジェクトマネジメント）の手法によって計測し、プロジェクト間で相互比較する等により、事業執行形態や執行体制の効率性の分析等も可能となるものと考えている。なお、このように建設生産システムを客体化し、自らを計測、評価することは、今日、発注者責任としても強く求められるアカウンタビリティの確保にもつながるものであると考えている。

このように可能な限り現象を計測していくことが建設マネジメント研究の第一歩である。しかし、PIの実践や合意形成の取り組み等の分析についてはそれすら容易ではなく、それぞれの地域で個別に創意工夫されながら行われている取り組みをまずは記述すること、それらの事象を分析しながら分類整理の方法を検討すること、その上でその背後に何らかの法則性のようなものを見出していきたいと考えている。すでに、いくつかの事例収集等も行っているところであるが、従来の土木技術研究とはかなり様相を異にした研究手法とならざるを得ない。いずれにしても、実践の場では既に様々な取り組みがなされている。そのような個々の工夫や知恵を、全体のエンジニアリングとして組み立てていくのが建設マネジメント研究ではなかろうかと考えている。

なお、研究の実施に当たっては研究対象が社会システムそのものであることから、建設省直轄工事事務所長等、建設マネジメント実務の執行現場との連携を図りつつ、合意形成等の新たな手法の試行を社会実験として積極的に実施し、それらの適用性の検証やそれに基づくシステム改良等を進めていくことが極めて重要であると考えている。(図-1.3)

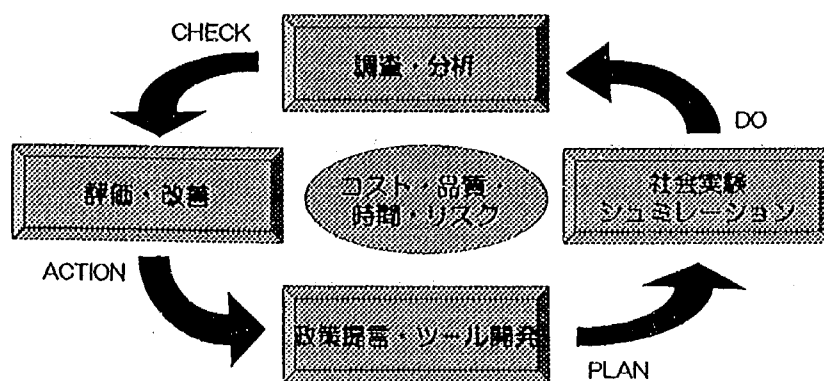


図-1.3 社会実験を組み込んだP D C Aサイクルによる研究開発

2. 合意形成手法の実態分析

～直轄事務所における合意形成の現状調査より～

2. 1 直轄事務所長の問題意識

効率的な社会資本整備システムとその運用のあり方を考えるにあたって、各直轄事務所長がマネジメント業務のどのような分野で苦勞し、どのような課題を抱えているか等の実態を調査する事を目的として、文書によるアンケート調査を行った。全直轄事務所長を対象として、調査票を送付した結果、158事務所長から回答を得た。(回収率 62%)

最もエネルギーを投入しているマネジメント業務(現在の課題)を選択式で回答を求めたところ、住民等との合意形成の課題を挙げる所長が最も多く、事務所の組織運営や職員の技術力向上等に関する事業の効率的実施や予算の確保、配分等の事業展開戦略がこれに続いている(図-2.1)。

特に、関東・中部・近畿等の大都市圏を有する地域では、合意形成や事業の効率的実施の割合が高く、一方、その他の地域では、事業展開戦略の割合が高い結果となっている。

社会資本整備効果の評価システムの確立も含めて、合意形成手法の確立が直轄事務所に於いて望まれている。住民等との合意形成や事業の調整等のマネジメント業務に科学的な分析を加え、広く有効に活用できるマネジメント技術として確立し、これを時間的および空間的に有効に活かされるしるきを構築することがマネジメント研究に期待される大きな課題の一つであると言えよう。

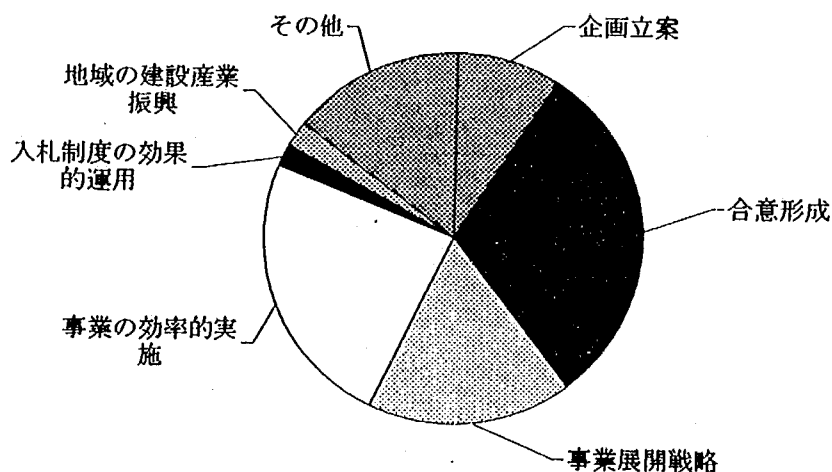


図-2.1 直轄事務所長が最もエネルギーを投入しているマネジメント業務 (平成9年9月)

2. 2 事業プロセスにおける合意形成の位置づけ

事業を企画立案し、実施に移し、完了するまでには、様々な意思決定を行う必要がある。それぞれ

の意思決定の段階では、外部或いは内部の機関・部署・担当者等との協議や調整等の行為を通して、さまざまな合意形成を行っていると考えることができる。さらに、一連の意思決定は、長い事業プロセスの中で、お互いに関連しているはずであり、意思決定の良否が後の合意形成に影響を及ぼすであろうことも容易に想像できる。そこで、事業の計画段階から供用開始段階までの外部機関との協議・調整等と各段階での意思決定の内容を把握するために、直轄の事業を対象に調査を実施した。

ある直轄工事事務所を対象に現在進めている事業で必要となった協議・調整事項（用地買収等を除く）の対象者およびその内容を事業プロセスの段階ごとに過去にさかのぼって調査した結果、事業の特徴や地域の特徴によって、協議・調整事項等の内容や対象者は異なるものと思われるが、事業プロセスの中のほとんどすべての段階で複数の対象者と合意形成のための協議や調整が様々なレベルで必要となっていることが明らかとなった。

2. 3 合意形成手法に関する事例調査

シチュエーションに応じた合意形成手法の特徴を抽出することを目的に、全国の直轄事務所長を対象に合意形成の手法に関する事例調査を行った。調査の結果、回収された事例は、76 事例である。

得られた事例におけるシチュエーションの特徴は、事業の種類でみると、道路事業が 42%、河川事業が 25%、ダム事業が 26%であった。道路事業の合意形成事例では、合意形成の段階として、計画決定時が最も多く、地元協議段階の事例との合計で約 7 割を占め、環境問題や市民生活問題が主な合意形成の課題となっている。河川事業の事例では、基本計画段階の事例が最も多く、34%を占める。

(図-2.2)

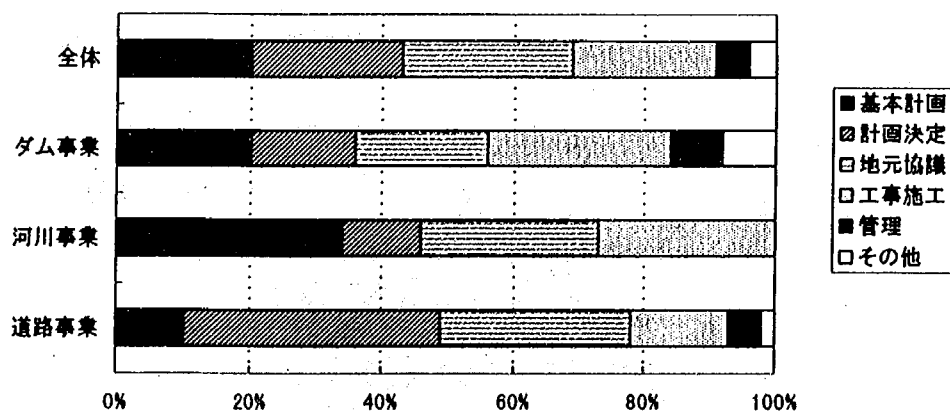


図-2.2 合意形成事例の事業プロセス中の位置づけ

合意形成の課題は、環境問題、市民生活の問題が数多く挙げられている。ダム事業の事例においては、工事施工、地元協議、基本計画の段階で、合計約 7 割を占め、地域振興や環境、補償の問題が課題として多くなっている。合意形成の対象者は、事業の種類による違いはあまりなく、住民が約 4 割、自治体が約 3 割強、ついで、各種団体となっている（図-2.3）。ただし、複数の対象を相手方としている例が多い。

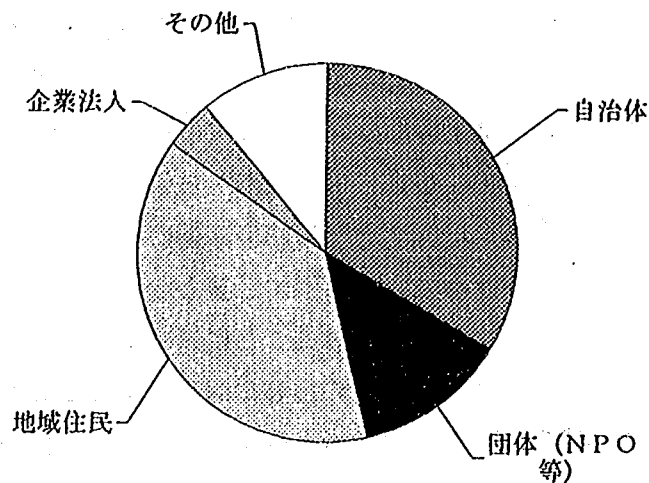


図-2.3 得られた事例における合意形成の対象者

合意形成の手法としては、検討委員会等の場づくりを挙げている事例が全体の約3割で最も多く、個別対応・対話、情報提供、計画調整が約2割となっている（図-2.4）。一つの事例で、複数の取り組みをあわせて実施しているものがほとんどである。自治体が相手の場合には、計画調整の割合が高く、住民が相手の場合には、個別対応や場づくりの割合が高くなる。また、課題で整理すると、環境問題の場合には、場づくりの割合が高く、市民生活の問題では、個別対応の割合が若干高くなる。

今回得られた事例からは、シチュエーションの特徴の中で、事業の種類や地域の特徴、合意形成の時期よりも、合意形成の対象者や課題によって、合意形成の手法を選択しているように思われる。

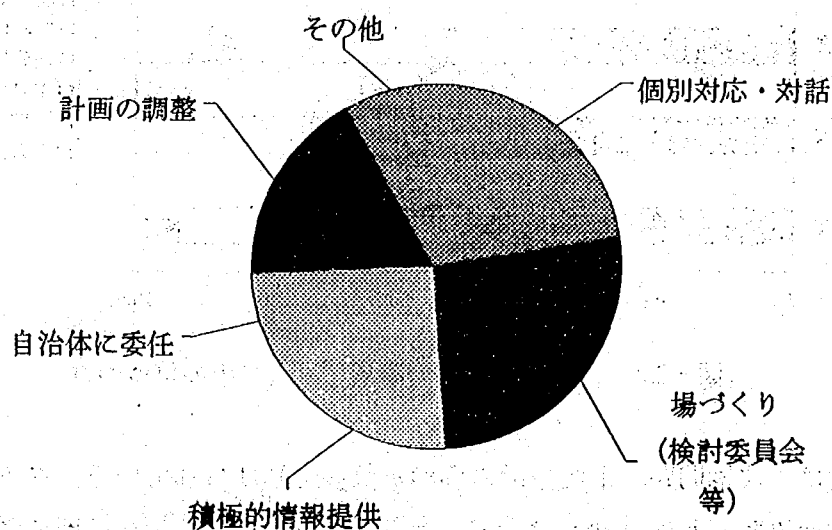


図-2.4 得られた事例における合意形成の手法

3. 建設省土木工事における積算関連業務の合理化

建設マネジメント技術研究センターの前身となった積算技術研究センターであるが、積算技術研究センターの時代から一貫して公共土木工事積算の合理化、工事目的物の明確化、契約の透明性の向上などを目的とした工事工種の体系化を核とする新土木工事積算大系の整備に鋭意取り組んでいる。

ここでは、地方自治体を含めた発注積算業務の実態と問題点を例示した上で、積算の合理化、透明性の確保、積算結果の利用の観点からの取り組みについて紹介すると共に、今後の課題について考察するものである。

3. 1 積算業務の現状と問題点

(1) 積算業務合理化の必要性

現在発注者が積算業務に費やす労力は膨大であり、その改善が急務となっている。積算業務を合理化・省力化していくためには、第1に発注機関における積算システムの利用拡大が不可欠である。建設省では、新土木工事積算大系の中核部分である工事工種の体系化に基づいた新土木工事積算システムを平成8年度より導入しており、システム利用者・管理者双方の視点から利用しやすいシステムとするため、C/S（クライアントサーバ）型のシステムとなっている。都道府県、市町村における積算システム化状況はかなり進んできているものの、システム化が遅れている工種も多い。図-3.1 は都道府県レベルの工種別システム化状況を示すが、使用頻度の高い道路、橋梁、河川などに比べ、使用頻度が低いトンネルやダム、整備が遅れている下水道などは積算システム化が遅れている。図-3.2 は下水道工種の例として、下水道事業着手市町村における積算システム化状況であるが、10万人以上の都市でも全面的にシステム化している自治体は半数であり、都市規模が小さい市町村ほどシステム化が遅れている。

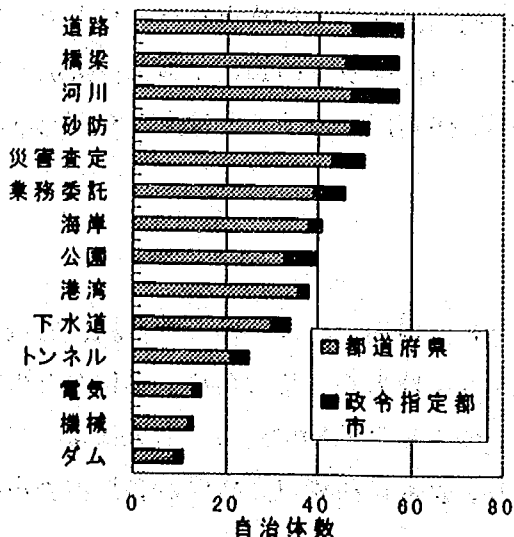


図-3.1 都道府県・政令市の積算システム化状況

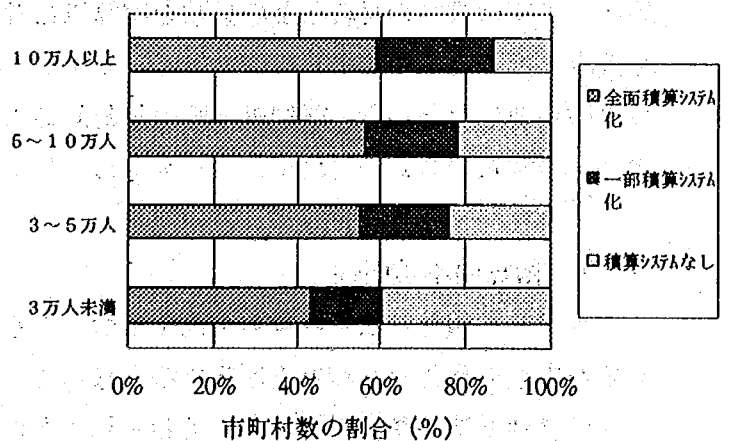


図-3.2 下水道着手市町村の積算システム化状況

第2に積算価格を規定する最小単位である施工歩掛の簡略化、統合化の必要性である。図-3.3は、公表されている範囲内での建設省標準歩掛数の変遷を示したものである。昭和58年度に一般に公表されて以降、平成10年度までの15年間で歩掛数は、2倍以上となっている。これらは各地方建設局間で不統一であった歩掛を統一したことによるものや新規工法による対応を目的とした結果であるが、歩掛数の増大は積算の利便性を向上させる一方、積算のシステム化費用やメンテナンス費用の増加、積算者の適切な施工歩掛抽出の困難さを生じさせている。

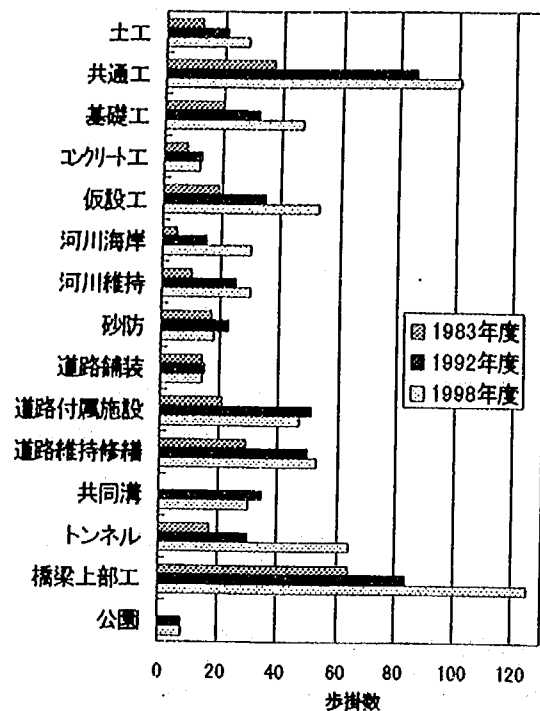


図-3.3 建設省土木工事標準歩掛の年度変化

第3に設計と積算の関連性向上の必要性である。現在の積算体系では詳細設計で算出された工事目的物、工事仮設物の材料などの員数を積算担当者が積算上の施工計画や工程算出を行った上で、歩掛を積み上げていく手法が一般的である。しかし、積算の段階で発注ロットの調整や施工歩掛別の数量算出の必要性などから、詳細設計時の数量計算による数量が直接利用できることは少なく、設計から積算への数量のスムーズな引き渡しが行われている。

(2) 積算の不透明性

土木工事の積算は積算者自らが施工手順・形態などを想定し、現場の条件にあった労務、機械、材料等を下位の代価から積み上げる手法となっている。この積み上げ方や工種の名称、単位などの表示方法は発注機関や積算者の裁量に委ねられてきたため、同一の工事目的物に対しても人によってその認識が異なっていた。表-3.1は地方自治体で作成された工事数量総括表（金抜設計書）の表現の不透明さを示す事例である。

表-3.1 地方自治体の工事数量総括表表現の例

	契約上の表現	積算内容＝用語の意味
A 県	掘削工	掘削工＋積込費
	土砂運搬工	運搬費
	残土処分工	処分料金
B 市	掘削工	掘削費＋積込費＋運搬費
	残土処分工	処分料金
C 市	掘削工	掘削費＋積込費
	残土処分工	運搬費＋処分料金
D 市	掘削工	掘削費＋積込費＋運搬費＋処分料金

従来の積算は、歩掛の積み上げによる工事価格の算出のみが積算の目的であり、契約図書として、取引項目とその数量、施工条件などを明確に明示する目的はほとんど考慮されていなかった。当然、発注者・受注者間の取引項目に対する共通認識は形成されず、契約における透明性の確保は困難となっている。また、任意で施工する山留め工などの仮設構造物や型枠・足場などの工事目的物を施工するための補助的施工方法には各種方法があり、一般的には施工者の裁量に任せられるため、契約項目として明確にされない。このため、積算担当者による差異が生じやすく積算・契約の不透明さの原因の一つとなっている。反対に地方自治体などでは工事内訳書の単価・金額部分のみを消去したいいわゆる金抜設計書を契約図書としている場合も多く、指定仮設、任意仮設の区分けの不明確が見られ、必要以上に受注者の施工の任意性を阻害している例も多く見られる。

(3) 積算データ蓄積の必要性

発注者が積算した工事価格などの結果を利用するためのデータの蓄積はほとんど行われていない。工事目的物毎に整理分類された積算データの蓄積があれば、利用者サイドは計画設計段階での精度の高い事業費の推定、設計時における施工方法のコスト比較、類似設計書を用いた積算業務の容易化など多くのメリットが期待できる。一方、積算システムや施工基準などを管理する管理者サイドは施工歩掛の使用頻度や今後統合・廃止・追加すべき歩掛の把握などが可能となる。このように、積算データの利用用途は多くあるが、ほとんどの発注機関では積算者個々が自分で発注した工事の主要な施工概略単価を記憶している程度が現状であろう。

3. 2 積算合理化への取り組み

(1) 地方自治体に対する積算システム化支援

地方自治体での積算のシステム化は積算の合理化を進める反面、利用度の低い工種については、積算システムの改造や歩掛の改訂による積算データの入力、修正などメンテナンスコストの増大によるデメリットが大きく、この点がシステム化普及の阻害要因と考えている。

建設省では積算システムの改造費やメンテナンス費の低減を図る方策として、関係機関を通じて積算データ（工事工種体系データ、施工歩掛、労務単価、機械経費データなど）の提供を平成9年度より有償で行っている。ただ、今後中小市町村へ工事工種の体系化と積算システム化を普及させるには、

積算データの分割・低価格化により市町村の必要な工種別積算データのみを提供するなどの検討が必要と考えられる。

(2) 工事工種体系の拡充

工事工種の体系化とは契約図書となる工事数量総括表（金抜設計書）について、階層数や階層定義、細分化方法などの構成方法、用語名称や数量単位などの表示方法を工種毎に標準化・規格化する事をいい、これにより契約内容の明確化、積算業務の合理化・容易化などを図るものである（表-3.2）。定義した積算階層を上位から工事区分（レベル1）、工種（レベル2）、種別（レベル3）、細別（レベル4）と呼んでいる。

工事工種の体系化は建設省直轄事業を持つ河川、道路、砂防などの分野を先行的に整備したが、その後地方自治体が事業の主体となっている公園分野及び下水道分野の一部についても整備を進めてきた。工事工種体系が未整備の工種については根底となる積算階層構造が構築されていない点でシステム開発者がシステム構造の検討から始めなければならない点に問題があり、統一した積算のルール化のためにもその整備は急務となっている。

表-3.2 工事工種体系図の例

レベル1 工事区分	レベル2 工種	レベル3 種別	レベル4 細別	レベル5 規格	積算用 単位
道路改良	擁壁工	現場打擁壁工	基礎材	規格、敷厚	m ²
			均しコンクリート	コンクリート規格、敷厚	m ²
			コンクリート	コンクリート規格	m ³
			鉄筋	鉄筋規格	t
			型枠		m ²
			足場		掛m ²
			目地材	目地材の種類、厚さ	m ²
			止水板	止水版の種類、寸法	m
			水抜きパイプ	管径、管種類、フィルター有無	箇所
			有孔管	管径、管種類	m

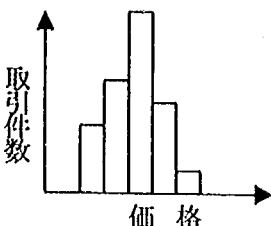
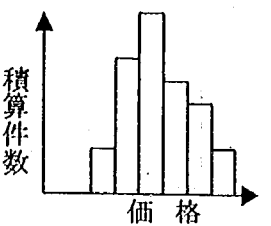
(3) 積算手法の簡素化

工事工種の体系化は下位の施工単価から積み上げをする従来の体系とは異なり、上位の工事区分・工種などから工事目的物を抽出し、その積算に必要な施工歩掛を検索することができる。このツールは膨大な施工歩掛を持つ積算基準を、積算初心者でも比較的容易に利用することを可能とした。しかし、年々増加する歩掛数は積算者にとってより緻密な歩掛選択を求められること、類似施工環境化でのある程度一定した歩掛選択ルールが必要となることなど、積算合理化の流れに逆行する問題が生じる。

積算簡素化の取り組みとして、受注者の外注ロットとしての市場が存在すること、良好な民民（元下）取引が存在することなどを要件とした市場単価が整理されつつあるが、対象とされている工種は限定されており、大規模な歩掛簡素化の流れとはなり得ない。同様な手法として工事工種体系のレベル4の施工単価を代表的な積算単価として利用する方法が考えられる。表-3.3 に市場単価とレベル

4 施工単価との比較を示すが、レベル4 単価は従来同様、施工形態を想定しその行為に必要な機・労・材を積み上げ施工価格を設定するものであり、単品生産物としての1 価格としての意味しかなく、ゾーン的な価格帯は概算価格としての意味しかない。また、価格分布を調査するにはある程度の品質、規格、施工条件などの相違を許容した上での調査となる。

表-3.3 市場単価とレベル4 市場単価

	イメージ	概 要	今後の課題、展望
市場単価		・ 外注ロットとしての市場が存在し、良好な民民取引が存在することが要件。 ・ 施工実態の変化が調査により速やかに反映 ・ 一定規格下での取引価格、件数の分布により価格を決定	・ 市場単価に移行できる工種に限界がある。
レベル4 施工単価		・ 積算で算定されるため、個々の単価が意味を持ち、価格帯(ゾーン)としての意味は概算でしかない。 ・ 単品生産物に対する単価であり、目的物の規格・形状により価格が変動。	・ ある程度の品質、規格、施工条件等を集約しない限り、価格分布が調査できない。 ・ 規格、形状等の相違による価格分布を1つの価格で代表させることの妥当性。 ・ 経年変化による価格変動に対する対応方法が未確立。

歩掛の簡素化・合理化にはレベル4 施工単価の確立が必要であると思われ、規格、形状等の相違による価格の分散を1つの価格で代表させることの妥当性を検討する必要がある。これには、後述するレベル4 工事目的物毎の積算実績価格データをストック分析し、レベル4 施工単価が成立するか否かを判断するツール（データベース）を作る必要があるものと思われる。また、当面の検討として、歩掛適用条件の緩和化や歩掛の入力条件の簡素化などを検討していく必要がある。

4. 実績データベースを活用した建設コストの縮減への取り組み

4. 1 コスト構造の分析

(1) 積算実績データベース

工事工種の体系化により、発注者受注者間において、契約内容の明確化、共通の認識の共有が図られ、積算、見積もり業務の合理化、簡素化が図られるが、副次的に、積算を統計解析する基盤が出来上がった。例えば、レベル4の単価構成が規定されたことにより、コンクリート、型枠といったレベル4やその下位の積算要素について、使用頻度、積算数量、積算額の解析が可能となった。その上位レベルについても同様である。

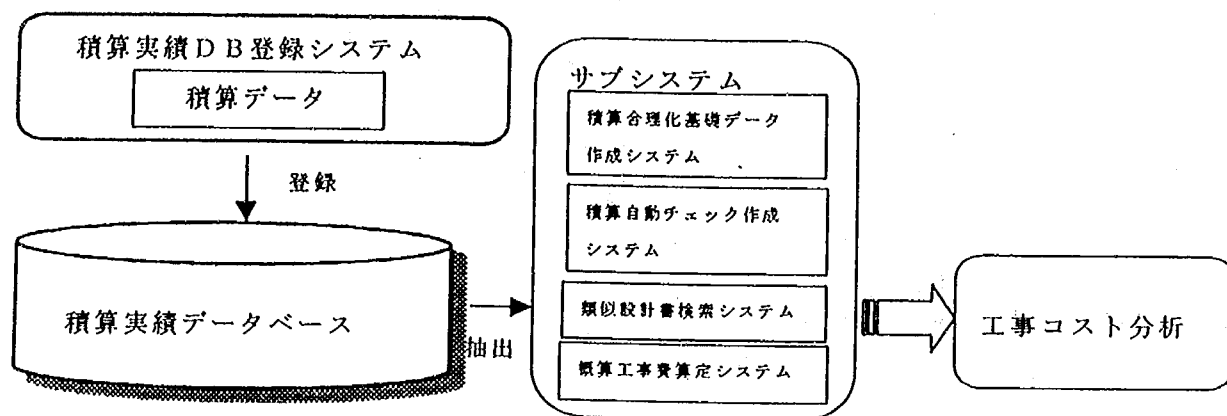


図-4.1 積算実績データベース

積算実績データベースシステムのうち、平成9年度までにデータベースの整備と、登録システムの整備が完了し、登録に必要なサーバー容量が確保された地方建設局から、順次データが登録されている。

(2) コスト構造分析（予備的調査）

積算実績データベースシステムによってどのような分析の可能性があるのか、どのようなシステムを構築したらよいのかを検討するために、実際の設計書のサンプル（264件）を収集し、予備的な分析を行ったので以下に紹介する。

直接工事費は、機械費、労務費、材料費に大別できるがその構成割合の分析結果を図-4.2に示す。これからは、工種ごとに、機・労・材のどの部分がコストに影響を与えているのかが統計的に判断できる。また、その費用の内訳まで分析することにより、より詳細な情報を得ることができる。例えば、河川工事の機械経費では、ダンプトラック10t、バックホウ0.6m³で全体の約5割を（図-4.3）、道路改良工事においては、ダンプトラック10t、バックホウ0.6t、ブルドーザで全体の約7割を占めていることが分かった。実績積算データベースシステムでこの分析がより統計的に実施可能になると、各経費の変動等が全体の工事費に与える影響度合いを、従来のマクロ分析に比較して、精度よく推定することができる。

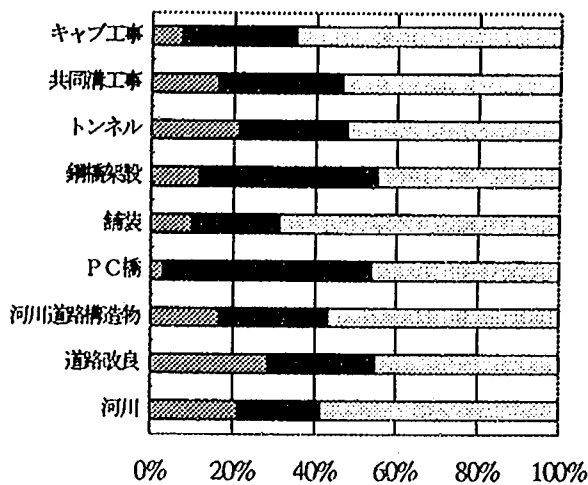


図-4.2 機械、労務、材料の構成割合

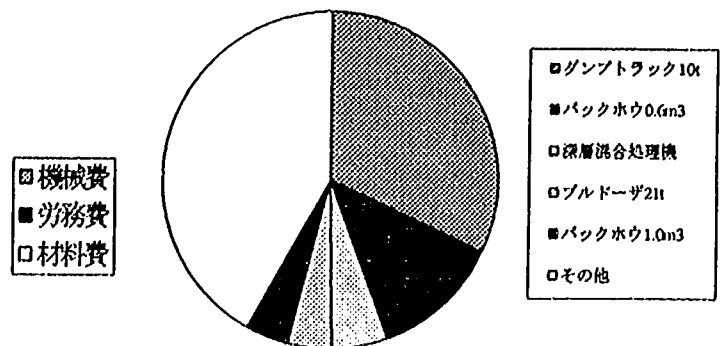


図-4.3 機械費の内訳 (河川工事)

レベル4は表-3.2で分かるように、契約数量を示す単位目的物、単位仮設物である。それぞれが単位を有し、契約上の取引項目、取引レベルとなり得る。レベル6は、レベル4の下位に付随し、レベル4を形造るための歩掛項目である。例えば、レベル4コンクリートに付随しているレベル6は、「コンクリート人力打設、コンクリートポンプ車打設、クレーン車打設、圧送管組立撤去」等、レベル4土砂掘削では、「ブルドーザー掘削押土、バックホウ掘削積込み、人力切り崩し、人力積み込み、ダンプトラック運搬 (2t、10t)」等であり、施工条件や仕様に応じてレベル6が選択される。

図-4.4に河川工事、図-4.5に道路改良工事のレベル6の金額の構成事例を示す。

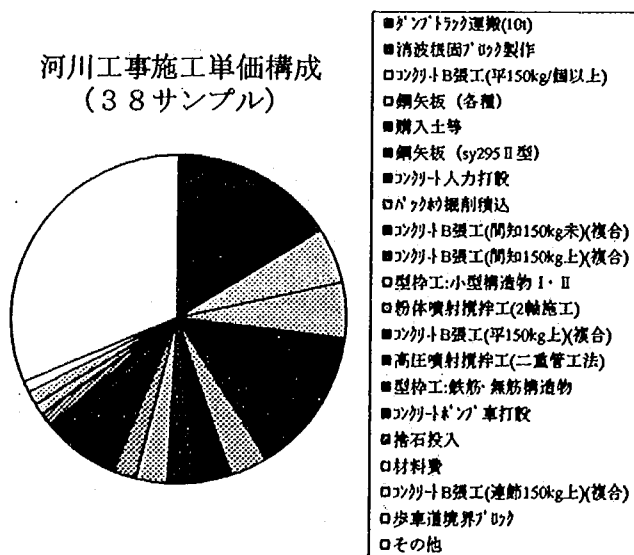


図-4.4 レベル6構成 (河川工事)

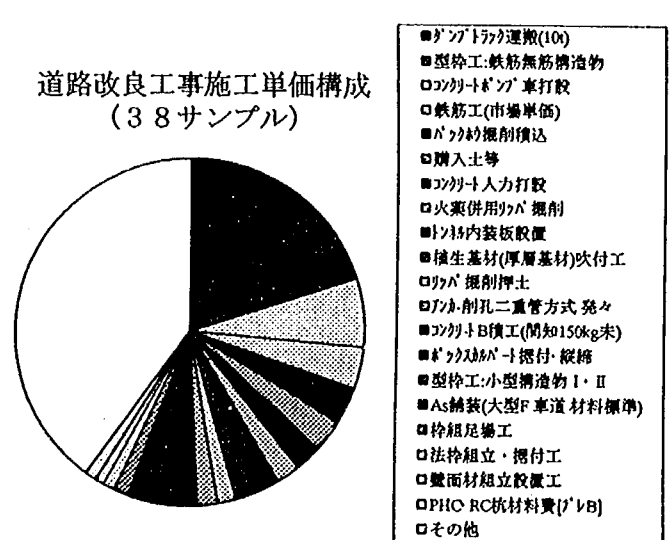


図-4.5 レベル6構成 (道路改良工事)

河川工事の今回の38サンプル工事全体のレベル6の数は232種に及んだが、上位10種で、全体金額の5割を越え、上位60種で全体金額の9割を越えている。同様に、道路改良工事では全367種のうち上位13種で全体の5割、上位86種で全体金額の9割を越えている。このような分析からは、工事工種ご

とに、コスト縮減に効果の大きい施工内容が明らかになり、また、技術開発等によるコスト縮減策の全体への反映度合いが推定できる。

図-4.6に河川工事、図-4.7に道路改良工事のレベル4の金額の構成事例を示す。

河川工事の今回の事例のレベル4の数は94種に及んだが、上位5種で全体金額の5割を越え、上位26種で全体の9割を越えている。同様に、道路改良工事では全111種のうち上位7種で全体の5割、上位33種で全体の9割を越えている。レベル6同様、このような分析から、コスト縮減に効果の大きい施工内容、コスト縮減施策の全体への反映度合いが推定できる。

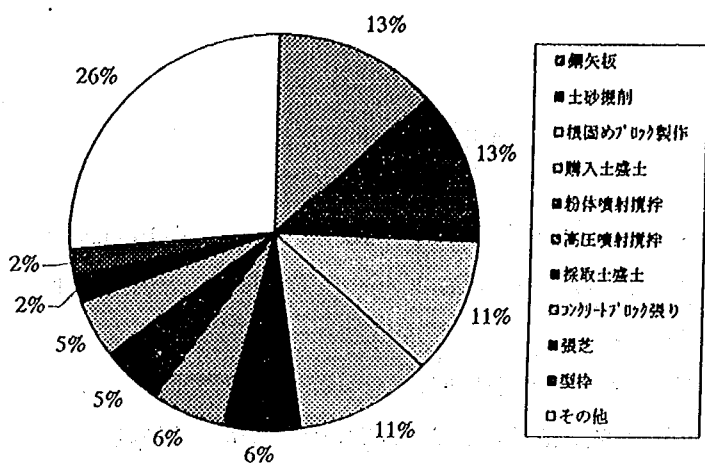


図-4.6 レベル4 構成 (河川工事)

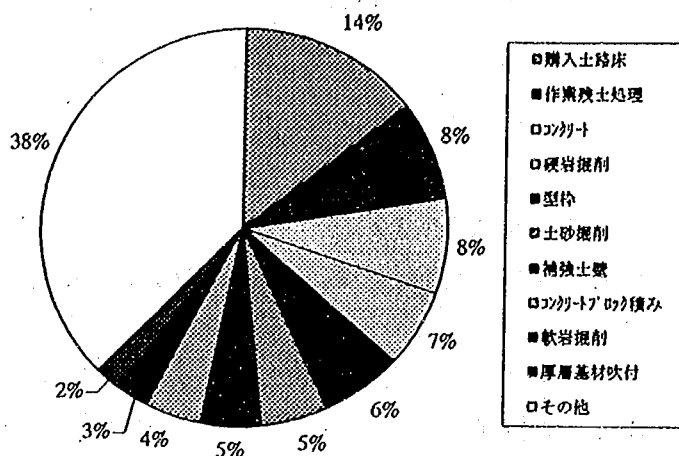


図-4.7 レベル4 構成 (道路改良工事)

4. 2 材料ミニマムから労務量を重視したトータルミニマムへの取り組み

これまでの標準設計は、コンクリートや鋼材等の主要材料を最少にする「材料ミニマム」という設計思想で作成されてきた。これは、材料費が労務費に比べて相対的に高価であった、昭和 40 年当時における施工形態及びコスト構造に基づいたものである。しかし、今日では、材料費は生産技術の向上により相対的に低下し、工事費に占める労務（人件）費の割合が高くなっている。また、施工現場における労働事情に関しては、熟練工（鉄筋工・型枠工等）の高齢化や技能レベルの低下といった問題も懸念されている。

そこで、これまでの材料中心の考え方を改め、コンクリートや鉄筋等の材料が多少増えたとしても、施工に必要となる労力を極力低減し、材料費と労務費のトータルで安価になる「トータルミニマム」という考え方が重要になってきている。

（1）標準設計を三つの視点から抜本的に見直し

現場作業のより一層の省人化・省力化を図るための設計段階での配慮事項として、以下の三つの視点が重要と考えている。

- ①構造物の形状を極力単純化すること
- ②使用材料及び主要部材の標準化・規格化を促進すること（資材等の集約化による生産コスト・流通コストの低減の期待）
- ③構造物のプレキャスト化を促進すること（試験施工では対象外）

（2）試験施工で現場施工の省力化効果を確認

建設マネジメント技術研究センターでは、平成 8 年度より、上記の視点（施工合理化策）に基づく現場施工の省人化及びコスト縮減の効果を実証するための試験施工を、各地方建設局のご協力を得ながら実施してきた。

試験施工における工種別の実施件数は、表－4.1 のとおりである。

表－4.1 試験施工対象工種・件数

工 種		施工件数（件）
土工 構造物	L 型・逆 T 式擁壁	10
	ボックスカルバート	18
橋梁 下部工	逆 T 式橋台	9
	張出し式・壁式橋脚	8
合 計		45

試験施工では、コンクリート、型枠及び鉄筋の各作業に従事した労務人員、施工機械の稼働時間等を調査しているが、その方法及び調査データの分析方法については、土木工事標準積算基準（標準歩掛）を策定するための「機械施工積算合理化調査」に準拠している。

試験施工データの分析結果の概要は、表－4.2 のとおりである。表中における「労務人員削減度合」

とは、施工合理化策を適用することにより、現場施工に要した労務人員がどの程度削減できたかを定性的に表したものである。現行積算基準（鉄筋工は4年度当時）の労務人員を基準として、削減率20%以上を◎印、20%未満を○印、逆に増加率20%未満を▲印で表現している。殆どの作業において現場施工の省人化につながる結果が得られている。

表-4.2 試験施工結果

作業区分		積算基準書の積算区分	労務人員削減度合
コンクリート工 (ポンプ車打設)		打設量 50m ³ 未満	◎
		" 50~100m ³	▲
		" 100~300m ³	▲
型枠工 (鉄筋コンクリート)		設置高 4m 未満	◎
		" 4m 以上	◎
鉄筋工	加工	鉄筋径 13mm 以下	○
		" 16~25mm	◎
		" 29~32mm	○
	組立	鉄筋径 13mm 以下	◎
		" 16~25mm	◎
		" 29~32mm	◎

(3) 建設コストの縮減効果を実証

場所打ち方式による逆T式擁壁、ボックスカルバート、逆T式橋台及び張出し式橋脚の4工種についてコスト縮減効果を試算した結果、全ての工種において良好な結果を得た。

その中から逆T式擁壁に対する試算結果を表-4.3に示す。

コスト縮減効果は、各試算ケースに対して、現行の設計法と施工合理化策を考慮した設計法によって詳細設計を実施し、それぞれ現行の標準歩掛、試験施工データの分析結果を用いて直接工事費を算出する方法により推定した。

表-4.3 逆T式擁壁のコスト縮減効果の推定結果

試算条件	材料数量の比率(合理化/現行設計)			コストの縮減効果
	コンクリート	型枠	鉄筋	
ケース1 h=9m 砂質土	1.15	1.03	1.25	△
ケース2 h=9m レキ質土	1.22	1.01	1.31	△
ケース3 h=6m 砂質土	1.13	1.02	0.97	○
ケース4 h=6m レキ質土	1.11	1.00	1.06	○
ケース5 h=3m 砂質土	1.12	1.00	1.09	○
ケース6 h=3m レキ質土	1.09	1.00	1.05	○
単純平均	1.14	1.01	1.12	○

(凡例) ○：効果あり、△：現行設計にほぼ同じ

材料数量については、施工合理化を考慮した設計法のコンクリート数量は、たて壁と底版上面のテ

ーパーの廃止により、増加傾向にある。型枠数量は、現行設計と殆ど同じである。鉄筋量は、定尺鉄筋の使用などにより、一般に増加傾向にある。

建設コストの縮減効果は、小中規模のケース3～6で効果が表れているが、大規模のケース1，2においては主要材料の数量の増加量が大きいため、その効果が小さい傾向にある。

4. 3 VE方式の導入効果と今後の運用方策に関する検討

(1) VE方式の試行的導入

VE方式とは、目的物の機能を低下させずにコストを縮減する、又は、同等のコストで機能を向上させる技術と定義づけられている。建設工事でのVEは、設計VE（基本、詳細設計段階）、入札時VE（入札時）、契約後VE（施工段階）の三段階に分類できる。本方式について、建設省では平成9年度より試行的に導入を始めている。

平成9年度には、設計VEは、実施実績20件のうち、営繕は12件、土木は8件であった。土木8件のうち、基本設計段階での実施は5件、詳細設計段階は3件であった。

入札時VEでは35件のうち、VE提案が採用されたのは30件、標準工法を採用したものは5件であった。

契約後VEは101件のうち、提案があった案件（8月時点）は10件であり、採用されたものは5件であった。

コスト縮減効果については、設計VEが最も高い。中でも基本設計段階がより高い効果を上げており、最も効果があった案件では、30%程度の縮減率があると報告されている。入札時VE、契約後VEのコスト縮減率は、その殆どが5%未満である。一般に言われていることではあるが、VE方式ではプロジェクトの上流段階の方がより高い効果を期待できる。

表-4.4 実施件数一覧

	一般競争	公募型指名	計
設計	—	—	20
入札時	29	6	35
契約後	57	44	101

（平成10年8月現在）

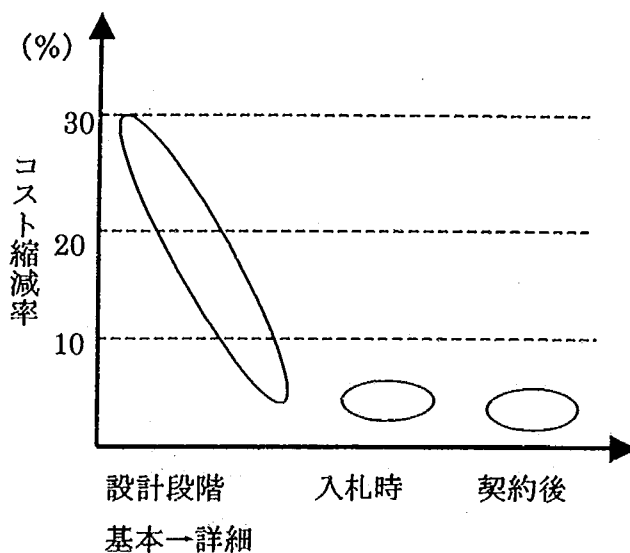


図-4.8 コスト縮減効果

(2) 今後の課題

VE方式は平成11年度以降もさらなる活用が期待されるが、本方式を適用することによりさらなる効果を期待するためには、以下の課題を検討する必要がある。

- ・ VE方式を適用することにより、高い効果が期待できる案件の選択方法の検討
- ・ VE提案者に対するインセンティブの付与方法の検討
- ・ 入札時VEの弾力的な運用方法の検討（例えば、詳細設計付き入札等）

5. 建設CALS／ECにおける技術開発

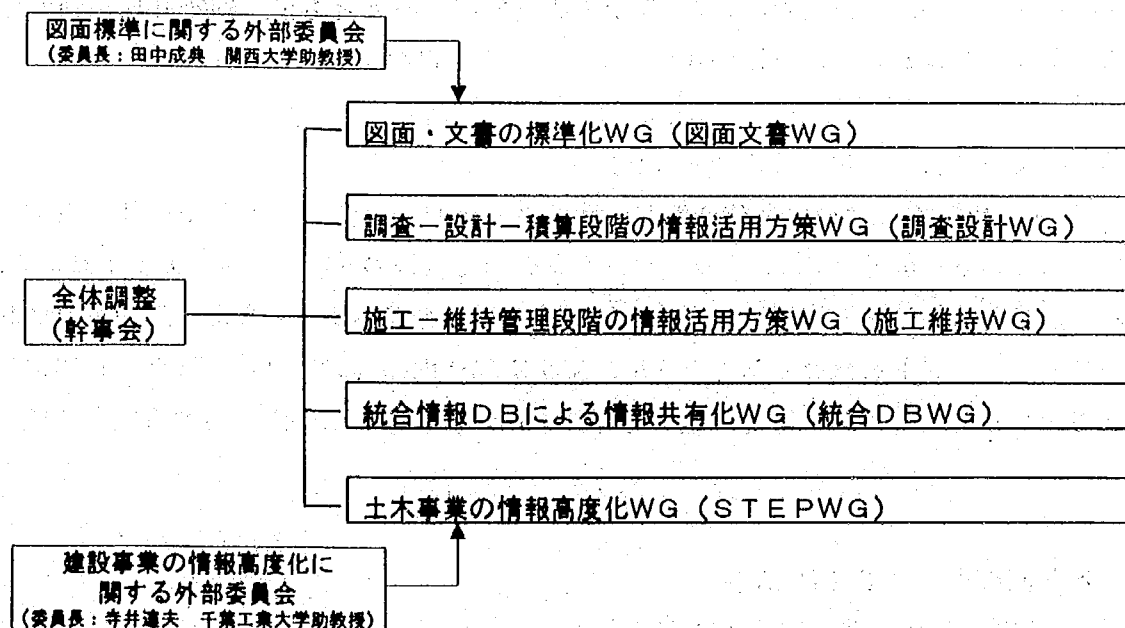
5.1 建設CALS研究の目的

建設事業においては、設計や施工の各段階においてコンピュータ支援での業務の高度化、効率化が行われているが、それぞれの段階を結びつけるところでは、依然として「紙」を介した情報交換が行われている。このため事業全体を通じて電子情報が連携化されず、各事業段階での情報の不整合や作業の重複といった問題が生じている。一方、製造業などでは、各段階での情報を系統的に結びつけた統合情報システムを形成するに至っており、これらが生産性の向上、品質の安定に大きな貢献を果たしている。

公共事業においても、業務の効率化、公共施設の品質確保、適切な維持管理のために、CALSの導入はきわめて有効であると考えられる。建設省土木研究所では、平成8年度からは3カ年の計画で建設省総合技術開発プロジェクト「統合情報システム活用による建設事業の高度化技術の開発」（以下総プロと呼ぶ）を実施し、CALSの技術的な面からの研究開発に取り組んでいる。

5.2 研究体制と分担

建設CALSは、建設産業全体として取り組むことによって大きな効果が発揮されることから、本総プロでは、（財）日本建設情報総合センター及び民間24社の参画を得て官民共同研究を実施している。共同研究の体制を図－1.1に示す。図に示すように、5つのワーキンググループ（WG）に分かれて研究開発を行うとともに、外部専門家を含めた委員会を設置し、研究の進め方や研究成果に関する技術的助言を頂きながら進めている。なお、5つのWGのうち、建設マネジメント技術研究センターは、調査設計WG及び統合DBWGを分担し研究を進めている。



図－5.1 共同研究の体制

5.3 研究概要

本共同研究は、建設事業における情報の標準化技術、CALS導入を前提とした情報活用方策について実証的に検証し、建設事業にCALSを導入する手法の確立を図るものである。各WG毎の研究概要は次の通りである。

① 図面文書の標準化 (図面文書WG)

建設事業で電子標準化される図面、文書を選定し、ライフサイクルにわたって図面・文書データを正確かつ効率的に作成・交換・管理・検索するためのデータ構造と様式の標準形式を提案する。図面は現状CAD技術を活用した図面データ交換の短中期的な標準化を、文書に関してはSGMLを前提にした文書データの構造化・標準化を提案する。

② 調査－設計－積算段階の情報活用方策 (調査設計WG)

調査－設計－積算段階におけるCALSの概念を取り入れた新しい業務モデルシステムを提案するとともに、実証的な検討を行って、それらの実現に向けた技術的課題を検討する。さらに、道路土工および橋梁構造の業務プロセス分析を行い、GIS、CAD、標準設計、CG等の既存システムを活用した新たな標準モデルと情報連携方法を構築する。

③ 施工－維持管理段階の情報活用方策 (施工維持WG)

施工－維持管理段階におけるCALSの概念を取り入れた新しい業務モデルシステムを提案するとともに、それらの実現に向けた技術的課題を検討する。さらに、施工段階では、受発注者間における施工管理情報の電子的交換、共有を図るためのデータベースや、工事写真、計測情報、品質管理情報などの戦略的な情報活用方策を提案する。

維持管理段階では、新しい施設維持管理の実現方法を検討するとともに、維持管理業務の体系的整理をふまえた建設CALSによる維持管理業務システムを提案する。

④ 統合情報DBによる情報共有化 (統合情報WG)

統合情報DBは、発注者、受注者及び一般ユーザがネットワークを通じて情報を利活用するための巨大システムである。本研究では、ネットワークを介して情報の共有・利用を実現するために、情報の伝達および統合情報DBの構築・利用に必要な基盤技術を提案する。また、建設事業における統合情報DBのコンセプトを確立するとともに、工事事務所内の契約納品物の管理・利用に対象を絞った統合情報DBに対して実証実験に基づく評価を行い、工事事務所内における統合情報DBの提言を行う。

⑤ 土木事業の情報高度化 (STEP WG)

公共土木事業で利用される情報のより高度な活用を目指すため、構造物の形状データだけでなく調査、設計、施工、維持管理などで必要な属性データを含む統合データの規格化の方針

を確立する。さらに、情報共有環境における建設事業情報システムの展開方策を確立する。

構造物のライフサイクルにわたる規格化を図るSTEP が今後技術情報のデータ交換規格として最も重要な位置づけになると考えられるため、我が国の土木分野におけるSTEP 導入の基礎を築くとともに、構造物のモデルを作成してISOにおける土木STEP 制定作業に我が国の意見を反映できるようにする。

5. 4 研究成果の建設CALS/ECへの反映

総プロにおける研究は、現場レベルでは当面実施できない建設CALS/ECの要素技術の開発研究に位置づけられている。建設CALS/ECの要素技術は、異なる組織、システム間で電子情報を交換、共有するための標準化、統合化技術研究、またこれらの情報を建設事業の中で連携し活用するための適用技術研究に分けられる。総プロでは、調査、設計フェーズ、施工フェーズ、維持管理及び共通フェーズにおける要素技術開発研究に取り組んでいる。総プロの主な成果と今後の展開を図-5.2 に示す。3年間という限られた期間でそれぞれのフェーズでの研究開発を行ったが、得られた研究成果は今後の建設CALS/ECを実現するための第1歩であり、目標を達成するためにはさらなる技術開発の展開が必要である。また、研究成果には現場での実証実験に供するものもあり、今後積極的に現場への展開を図って行くことを予定している。

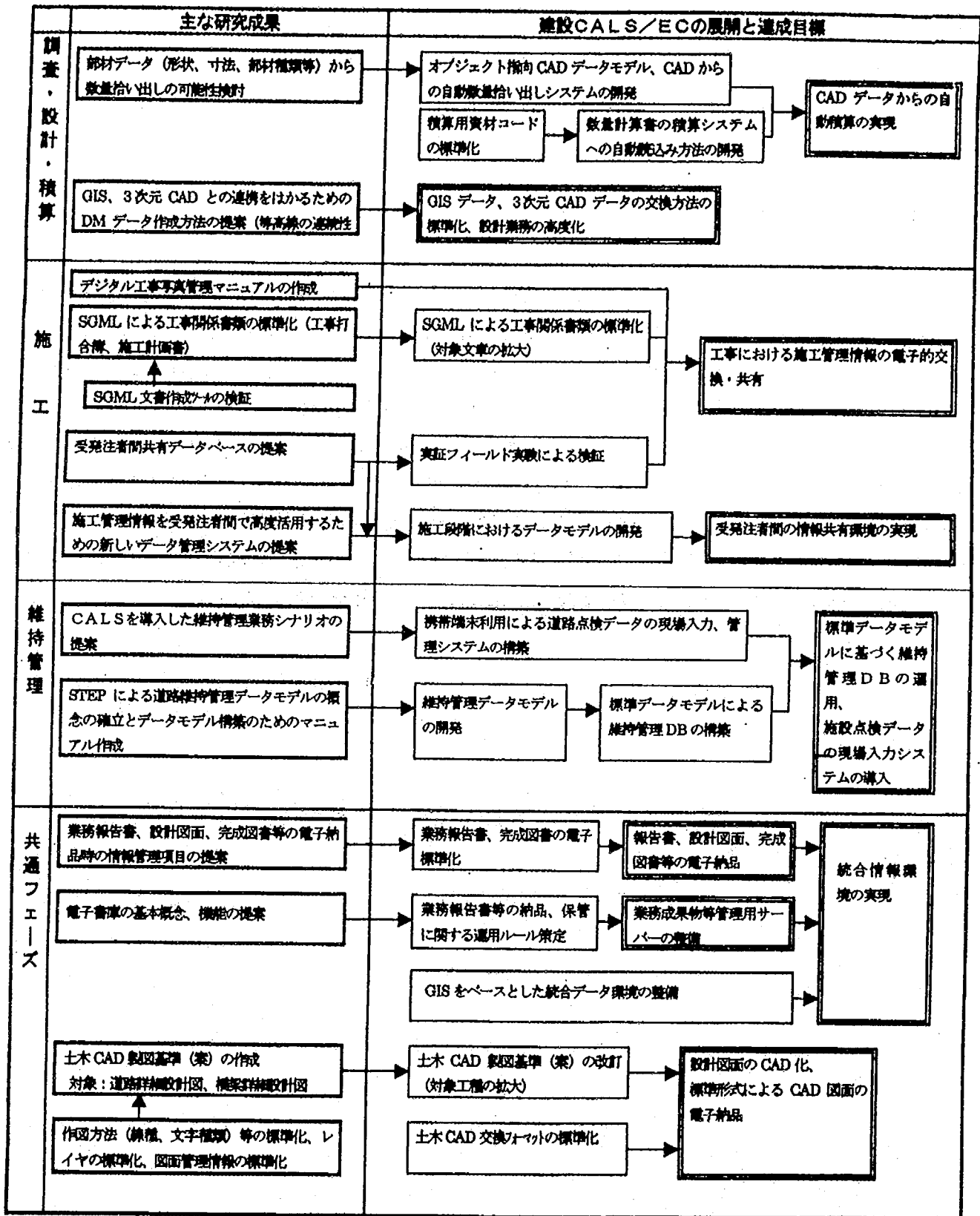


図-5.2 総プロの研究成果と建設CALS/ECへの今後の展開

6. 建設産業の技術力評価システム

6. 1 研究の背景と目的

建設投資の減少・国際標準化・規制緩和や高齢化・少子化などの社会経済環境の変化から、我が国の建設産業にもさらなる国際競争力・建設生産性の向上が求められている。1998年2月の中央建設業審議会の答申である「建設市場の構造変化に対応した今後の建設業の目指すべき方向について」の中でも、技術と経営に優れた企業が伸びられる透明で競争性の高い市場環境の整備が重要であることが示されている。そのための施策として、入札契約制度の更なる改善および建設業の構造改革の推進が示され、公共工事における企業評価のあり方の中では、規模の競争ではなく技術力・質による競争を促すようなしくみが求められており、経営事項審査の見直し、発注者による技術力評価の充実、等級制度の運用の合理化などが進められているところである。

建設生産性システム分析し、企業および技術者の技術力評価システムを開発することにより、インフラ整備の基盤産業である建設産業の将来の発展に資することを目的としている（図-6.1）。

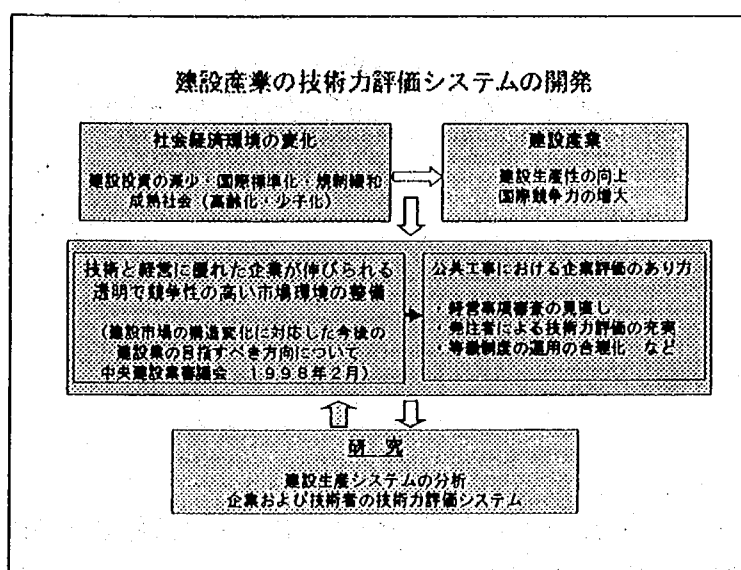


図-6.1 研究目的

6. 2 研究課題

本研究では、以下の三つの研究課題を計画、実施している（図-6.2）。

①建設生産システムにおける技術力の特性分析

工事の難易度分析、建設生産性分析などを行い、建設生産システムに必要な技術力の特性を分析評価することを目的としている。

②企業の技術力と評価システム

企業が提供する技術サービス（品質・環境・安全など）の評価システムを開発することを目的としている。

③技術者の技術力と資格・育成システム

技術者の技術力評価とその資格、CMR（コンストラクションマネジャー）やPMR（プロジェクトマネジャー）などに必要な資格、技術者の育成システムを開発することを目的としている。

これらの成果を活用して、技術力の効果的投入を図れる事業執行体制や制度、新たな建設産業システム論を提言する。

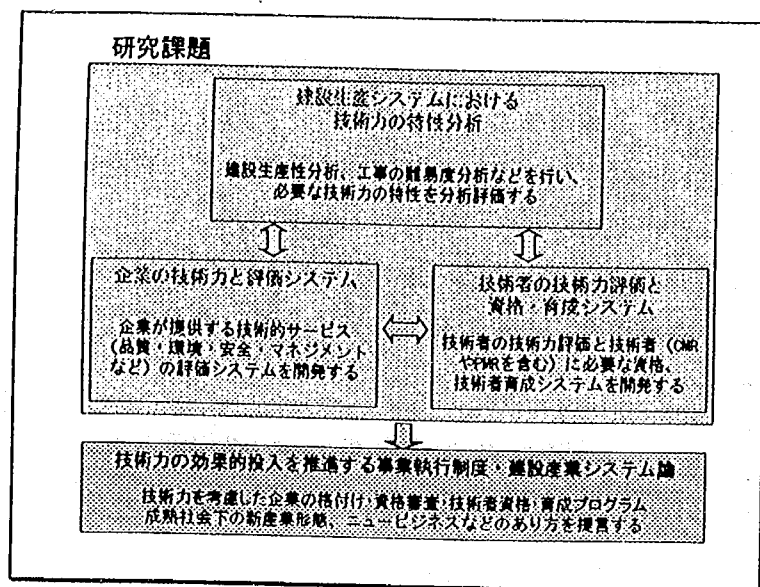


図-6.2 研究課題

6. 3 工事の難易度分析

(1) 工事の難易度とは

建設工事は、構築される目的物、その自然環境条件や社会環境条件などが個々に異なるため、各工事に必要な技術力を適切に、効率的に投入することが重要である。そこで、対象となる工事に投入されるべき技術力の観点から、その工事の技術的難易を示す指標を工事の技術的難易度と定義し、工事規模と併せてその特性を表す指標とすることとした。すなわち、必要な技術力が高度な工事を技術的難易度の高い工事と考えたのである（式（6. 1））。

$$\text{技術的難度の高い工事} = \text{工事に必要な技術力が高度なもの} \quad \cdots \quad \text{式（6. 1）}$$

(2) 評価の基本

工事に必要な高度な技術力には、複雑な施工を管理するための技術と個別の特殊な施工を確実に実施するための技術がある（図-6.3）。これらは、それぞれマネジメント技術力と施工技術力と呼ぶことができる（式（6. 2））。

工事に必要な技術力 = f (マネジメント技術力、施工技術力) 式(6.2)

マネジメント技術力；計画を立案し、リスク（コスト・品質・時間等）に適切に対処しながら、施工を管理するための技術力

施工技術力；要求どおりの品質のサービスを提供するための技術力

したがって、工事の技術的難易度は これら技術力を評価することで算定することが可能となると考えている。一般に、マネジメント技術力は、工事の元請け会社となる総合建設会社が保有していることが期待されるものであり、施工技術力は、専門工事業者に主として期待される技術力である。一つの工事では、これらの技術力がどちらも必要とされており、それぞれに必要な技術力が効果的に投入されることが求められている。

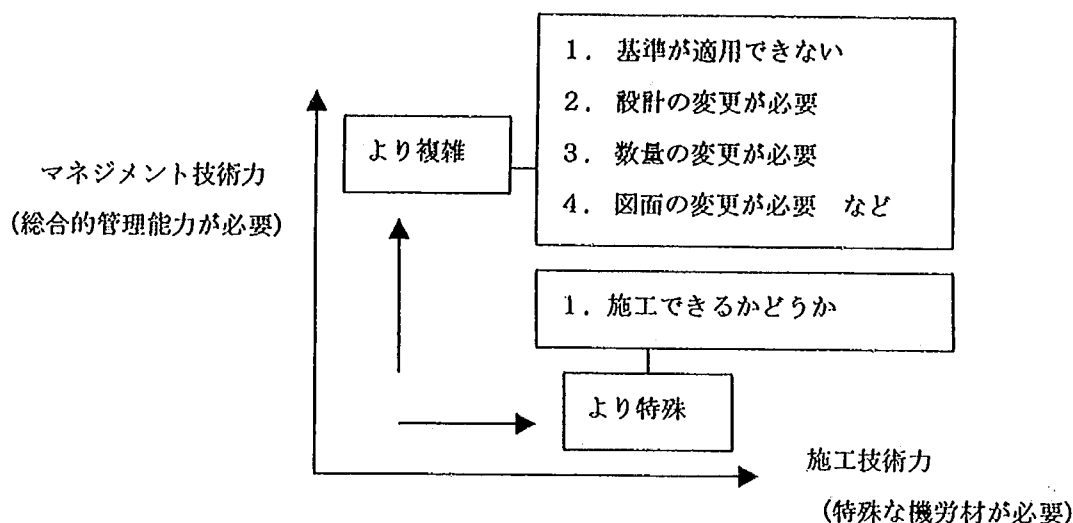


図-6.3 技術力の二つの特性

(3) 評価方法

各工事によって、必要な施工技術力、マネジメント技術力は異なると考えられる。工事の特性を表す指標から工事の技術的難易度を評価する方法を考案する必要がある。工事の特性を表す指標としては、例えば、(a) 規模、形状、構造形式などの工事目的物に関するもの (b) 作業環境、地盤条件などの自然条件に関するもの (c) 環境対策、近接施工、埋設物などの社会条件に関するもの (d) 新工法、新材料など技術的特性に関するもの (e) その他に、工程、調達、安全衛生、組織体制などが考えられる。

そこで、これらの項目と、各工事ごとに必要な技術力の関係を分析し、工事特性から技術的難易度を評価するシステムを構築することを目指している (図-6.4)。

マネジメント技術力は、工事の品質、時間、費用、安全、環境などの確保の観点から必要となる技術力を分析、評価されるものであり、施工技術力は、採用される工法によって異なる能力であり、さらに作業環境に応じて必要な技術力は変化することが想定される。

工事の技術的難易度は、これら必要な技術力の総合評価から判断されるものであり、上記に示され

る工事の説明指標から、評価できるシステムを構築することを目指している。

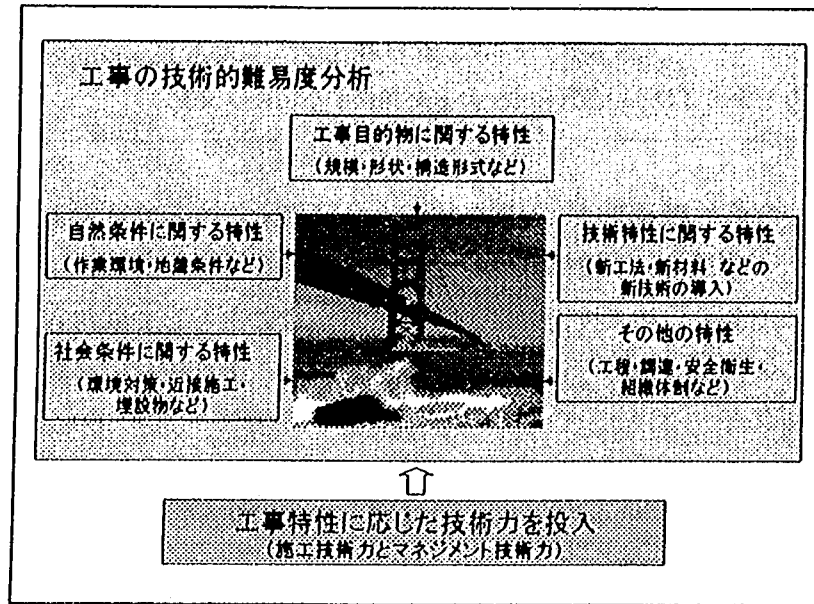


図-6.4 工事の技術的難易度分析

6. 4 調達制度における工事の難易度および企業の技術力評価の活用について

以上の研究成果を活用する重要な局面として、調達制度がある。工事特性に応じた施工能力を有する企業を選定できる調達制度への適用を考えてみたい。

(1) 工事特性の評価

工事特性は、工事の規模および技術的難易度によって評価することができる。さらに、技術的難易度は、実績データを蓄積することにより、工種毎の難易度とその他の条件によって変化する難易度に分けて扱うことが可能である。工事の規模と技術的難易度に基づく、工事特性の明示方法（或いは、新しい発注標準）を作成する必要がある。

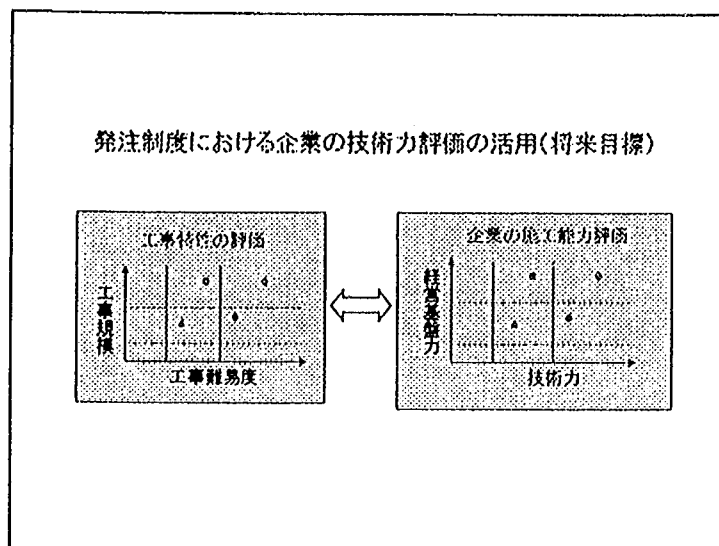
(2) 企業の施工能力の評価

企業の施工能力を、工事特性に対応して、経営基盤力と技術力によって評価することができる。経営基盤力は、資金調達力などの工事を遂行するための経営力を評価するものである。技術力は、過去に発揮された技術力の実績で評価することができる。すなわち、工事で必要となった技術力（技術的難易度）と発揮された技術力（成績などから評価）の関数で表現することが可能である（式（6. 3））。

$$\text{企業の実績技術力} = f(\text{工事難易度、技術力の発揮度(成績)}) \quad (\text{式 6. 3})$$

これらの経営基盤力と技術力に基づく新しい企業の評価システム（或いは、新しい格付け）を開発する必要がある。

以上の成果を活用し、工事特性に対応した施工能力を持つ企業を選定出来る仕組みの構築を考えていきたい（図－6.5）。



図－6.5 技術力評価の活用

環境教育に配慮した施設整備手法

生態保全技術研究官 田 中 隆

環境教育に配慮した施設整備手法

環境部 生態保全技術研究官 田中 隆

はじめに

平成10年6月、河川審議会川に学ぶ小委員会は「『川に学ぶ』社会をめざして」と題する報告（以下「報告」という）を行った。「報告」では、河川を「環境教育の場として最もすぐれたもの」とし、行政に対し「川に学ぶ」社会の実現のための行動を促している。

建設行政が、なぜ環境教育にかかわるのであるのか。一体、建設行政は環境教育など行えるのだろうか。

このような問いに対して筆者は「行えるどころか、建設省は環境教育における大きな責任を負っている」と答えたい。本稿では、このように主張する根拠を示すため、「今日の環境教育の特徴」と「環境教育における建設行政の役割」について考察する。そして、「環境教育に関わる方法」の一部を明らかにする研究として、近年のこの分野における土木研究所の成果の一端を紹介する。

本題に入る前に、まず環境教育に関する基礎的知識を得ておこう。

1. 環境教育の概念と方法

我が国の環境教育は、戦前からの自然保護教育と、1960・70年台の公害教育とがあり、1971年には文部省による教育課程に「公害と教育」が取り込まれ、各地の自治体によって、公害教育用の副読本等が続々と作成された。その後、産業型公害の沈静化とともに、自然環境の保全などに関する本来の環境教育の色彩が次第に強くなって行く。1988年、環境庁は我が国における環境教育のあり方を「みんなで築くよりよい環境を求めて」に示したが、この報告を契機に、全国の自治体で「環境教育基本方針」が策定され、各地で指導書等が創られるようになった。また、文部省は「環境教育指導資料」を刊行しており（3分冊：1991～1995年）、1996年7月の中教審の答申では、社会の変化に対応した教育の4つの課題の1つに国際化、情報化、科学技術と並んで環境教育を挙げている。

上記のような、近年における我が国の環境教育には、諸外国における動きが影響を与えている。

環境教育は、1970年アメリカで環境教育法が制定されたのを機に、世界的に注目されるようになった。その背景には、20世紀初頭より始まった欧米諸国の自然保護、環境保全の潮流と、イギリスのネイチャートレイルやアメリカの国立公園等で実施されてきた自然解説（インタープリテーション）の伝統がある。環境教育法では、環境教育を次のように定義している。

環境教育とは、人間を取り巻く自然及び人為的環境と、人間との関係を取り上げ、その中で人口、汚染、資源の配分と枯渇、自然保護、技術、都市や地方の開発計画などが、人間環境に対して、どのような関わり合いを持つかを理解させるプロセスである。（中略）

そして市民の中に、我々の生存を確かなものにし、生活の質を向上させるには、環境の重要性を認識し、責任ある行動をする必要があるという考え方を広めていくことを目指す教育である。

この定義は、我が国における環境問題の現状と照らし合わせて、我が国のあるべき環境教育の定義としても適当なものであろう（ただ、我が国の場合、国土の可住地面積が少ないことから、廃棄物の処理のスペースに関する大きな問題があるが、上記定義ではその扱いが比較的軽い）。

1972年にストックホルムで開かれた国連人間環境会議で環境教育の重要性が謳われ、1975年にベオグラードで開催された環境教育専門家会議で、環境教育の目的を次のように定義した。

環境教育の目的は、個人と社会集団が、総合的な環境とそれに関わる問題について、関心と感受性を持ち、人類の立場と役割を理解し、環境の保護・改善に参加する意欲と、問題解決のための技能及び評価能力を身につけ、また適切な行動を起こすために、環境問題に関する責任と、事態の危急性についての認識を深めることができるようにすることである。

ここで、環境教育が単に能力や認識を植え付けるだけでなく、意欲までを育てようとしていることに注意を払う必要がある。すなわち、水を汚すことが「環境に悪い」とわかっている人でも、それを止めるために行動しようとするとは限らない。しかし、それでは知識を持っている意味がない。環境教育の目的は、行動する意欲を持つ人間を作ることにある。

また、環境教育の対象者は青少年だけではなく、一般成人が含まれるとされている。

環境教育では、上記の目的を下記のように段階的に目標として掲げている。

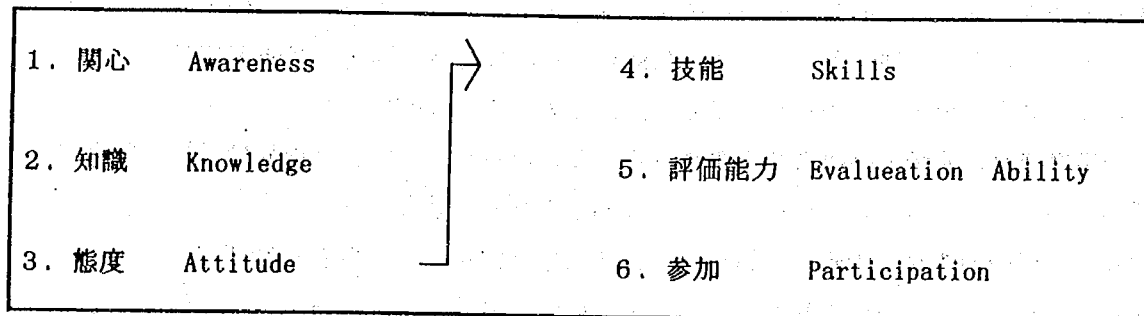


図1. ベオグラード憲章における環境教育の目標段階

環境教育のプログラムの設定は、下表に示すように学習者の経験や要求度で決めることが重要であり、これが、年齢による自然認識の段階に対応した学校教育と異なる点である（下表は自然環境に関する環境教育を念頭に作成したものであり、他分野の環境教育では若干の修正が必要と予想される）。

このように4つものフェーズがあるが、実際には、各地の野外活動施設や環境学習施設においてフェーズⅠの一般利用者が大多数であり、ⅠからⅡへ人々の関心を引き上げることが重要な課題となっている。

表1. 学習者の要求度とプログラムの目標¹⁾

学習者相	学習者の要求度	プログラムの目標
フェーズⅠ	自然への興味は少なく(注) 楽しい体験を求める。	興味を引き出し、関心を 高める。Ⅰ→Ⅱ
フェーズⅡ	自然に興味・関心を持ち 知識を求める。	正確な知識に基づき、 理解を深める。Ⅱ→Ⅲ
フェーズⅢ	自然の知識を持ち 評価能力を求める。	態度、技能、評価能力を 育てる。Ⅲ→Ⅳ
フェーズⅣ	評価能力を持ち、活動へ の参加を求める。	主体的・持続的な活動を 援助する。Ⅳ→

注) 通常、環境学習施設を訪れる人々の多くは、全く自然に興味がないわけではない。しかし、自然を常時趣味としたり、関心を持ったりしてはおらず、また、生物に関する知識も常識以上のものではない。このようなフェーズをここでは「自然への興味は少ない」と表現している。

2. 環境教育における建設行政の役割

では、このような環境教育に関して、今後建設行政はどのように関与するべきなのであろうか。このことを考察するために、河川審議会川に学ぶ小委員会の「報告」の内容を若干分析しよう。

「報告」では、「利水と治水という点で、人類はつねに大きな努力を払い、真剣に川とつきあってきた。しかし、・・・事業が、近年急速に大規模化してくることによって、古来河川が人間にもたらしてきたきわめて多面的な価値が、・・・浮き彫りにされてきた」といっている。その価値とは大きく分けて2つ、「自然環境」「地域住民にとっての貴重な自然体験、交流の場」である。続けて「報告」は、かつては「川の自然や生物と向き合うことで、子供達の感性が磨かれ、創造力が養われた。」また、「様々な年代の人々がひとつ川に遊ぶ中で、・・・地域社会の形成、連帯が促された。」と、人間と河川の交わりを示し、「このように河川は、・・・環境教育の場として最も優れたものであると言ってよい。」と結論を出しているのである。

しかし、次節では「現在このような川の価値は残念ながら、十分活かされているとは言えない。」としている。その原因を「川の水質の悪化や、川へ近寄りにくく生態系を貧弱なものとする護岸構造は人を川から物理的、心理的に遠ざけてしまった。また洪水体験の減少や、川を意識せずに水をいくらかでも使えるような生活様式が普及したため、川に対する畏れや敬いの心が希薄化したことも、人々が川から遠ざかった要因である。」としている。このことは、遠回しながら、川の価値を活かすには、河川管理者と住民との相互の理解と協力が必要であるということの意味していると考えられる。そして、「川に学ぶ」社会を実現するために、「報告」は

- ・環境とそれにかかわる問題、および人間の環境に対する厳しい責任や使命について理解するため、川に関する正しく、広範な知識と情報の提供を行うこと
- ・人間と自然との共生のための行動への意欲を育み、環境問題を解決するための技能・評価を育てるため、川での実践を伴った「川に学ぶ」機会を提供すること

が必要であるとしている。これは建設行政が行う環境教育の一つであろう。

上記の河川事業の例に見られるように、一般に公共施設に係る環境問題は、公共施設の管理者のみで解決できるものではない。公共施設の整備・利用に係る節度（経済性・利便性の追求に対する節度）、公共施設への汚染物質等（騒音、ゴミを含む）の排出抑制、建設副産物のリサイクル等はいずれも国民の理解と協力を必要とするものである。したがって、公共施設に係る環境問題を解決するために、国民に対する積極的な呼びかけが必要となってきたのである。この「呼びかけ」は、環境教育を行おうとする行政自らが反省しつつ国民に同じ方向を向いてくれるよう行うものである。

かつて自然公園において環境教育が開始された時は、「教育をする者」と「教育を受ける者」との間には、「環境を保全する者」と「環境保全に反する行動をとるおそれのある者」という比較的明瞭な境界があった。これに対し、公害や地球環境問題については「教育をする者」も部分的に問題の発生に関与しており、常に反省と自己点検を必要とする。このため、「教育をする者」と「教育を受ける者」との境界が不明確になる。これは今日の環境教育の特徴と考えてよいであろう。したがって、環境問題の発生に関係している者が行う「呼びかけ」も環境教育の一形態と言えるのである。

日頃、環境教育活動を行っている平塚市博物館学芸員の浜口は、

「環境教育って何かうさんくさいぞと思っている人はいませんか。実は私もその一人です。何が気になるかといえば、特に、学校での若い世代への環境教育は、大人のつけを子供に回しているという感じがどうもぬぐえないからです。そう皮肉っぽく考えても前向きではないな、などという思い迷っていて、ふとひらめいたのは、『子供を育てながら大人がいかに変わるか』が大事なのだということです。（下線は田中）」²⁾

と述べている。これも、「今日の環境教育では、教える側と教えられる側との境界が不明確である」という主張につながるものであろう。

さて、自然環境における環境教育と同様、公害や地球環境に関する環境教育においても現状ではフェーズⅠの学習者を対象とした環境教育に力点が置かれることになるだろう。即ち、まず環境問題に対する興味を引き出したり、関心を高めたりすることが主たる目標となるだろう。

自然環境に関する環境教育の場合、対象が人間の興味を引きやすいため、学習者が施設に来てくれればプログラムの目標である「興味を引きだし、関心を高めることは」比較的容易である。ただ、自然が存在する場所は、日常の生活空間から離れている場合が多く、学習者が施設に来てくれない場合、関心を高めることはむずかしい。

これに対し、公害、省資源・省エネ、地球温暖化などの問題は興味を引きにくく、一般の人々の興味を喚起することが容易でない。しかし、これらに関係ある公共施設は都市内でも至る所に存在しており、それらと関連づけて環境問題を紹介することが出来る。このため、一般の人々の意識を高めていく機会は自然環境の場合よりむしろ恵まれているといえる。例えば、リサイクル材料を用いた道路舗装について、そのことを表示することにより、環境保全に対する建設行政の努力に理解を得るのに役立つと同時に、国民の省資源意識を高揚し、リサイクルの推進に寄与することが期待出来る

(これに類似する動きとしては、解体・リサイクル制度研究会の報告に基づく「一般国民等への普及啓発(パンフレット配布)」などがあるが、建設行政自身の努力を現物で示すことが望ましい)。このように、単に国民にお願いするのではなく、自らの環境保全に対する努力を積極的にアピールしつつ環境保全への取り組みを呼びかけていくことは、建設行政の円滑化、国土環境の保全に大いに寄与するであろう。環境教育における建設行政の役割はここにあると考えられる。

また、最近では環境保全に対する寄与の程度が、企業や商品に対する評価を高めており、そのような商品には「これは再生紙で出来ています」などの表示がある。建設行政についても、例えばアスファルト塊のリサイクル実績を、パンフレットではなく、道路の実物でアピールすることにより、そのイメージアップが図られるのではないだろうか。

3. 環境教育に配慮した施設整備手法

環境教育に関わる施設として、これまで特に都市公園などを中心としてビオトープや観察用施設が作られており、これらの整備方法について幾つかの研究が行われてきている。本稿では、生物・生態系だけでなく、公害や地球温暖化まで含む幅広い環境教育分野にも応用可能なものとして、インタープリテーションに用いられる「サイン(解説板)」について、最近の研究成果の一端を披露しよう。

3. 1 インタープリテーションの意味とサインの意義

「Interpretation」は一般的には「解説、通訳」と訳されるが、環境教育の場においては、通常「自分たちを取り巻く環境に注意を向け、それに対する主体的行動を促す活動」³⁾という意味で使われる。インタープリテーションには、インタープリターによる野外指導など直接的なサービスと、展示解説やパンフレットなど間接的なサービスとに区分される。

インタープリテーションの父と呼ばれるFreeman Tildenは、インタープリテーションを「単に事実に基づいて知識を伝えることではなく、直接体験や教材により、実物や事象の背後にある意味と相互の関係を解き明かすことを目的とする教育活動である」³⁾と定義している。環境的配慮がなされた公共施設においては、その環境的配慮を何らかの形で直接体験することが可能であり、インタープリテーションの可能性は大きいと言える。

アメリカの国立公園では、インタープリターたちがネイティブアメリカンの話を聞かせてくれたり、フルートを吹きながら自然の話を聞かせてくれたりするなど、充実したインタープリテーションを見ることが出来る。アメリカの場合、レンジャーの数は国民10万人に対し4人である。しかし、日本の場合、国民10万人に対し0.1人である。このように、公共施設において一般にインタープリターの数はごく少なく、改善が望まれる。

このような不足を補うものとしてサインの役割は大きい。

サインの整備については、内容ばかりでなく、表示場所、表示方法、材質等に関する検討が必要であるが、ここでは内容に関する研究に的を絞って紹介する。

3. 2 サインの分類

環境教育施設のサインにはどのようなものがあるのかを明らかにするため、土木研究所では国内外の30箇所の施設から90枚の解説版の写真を収集し、その内容によってこれらを分類した。その結果、次のように7つの種類が抽出された。

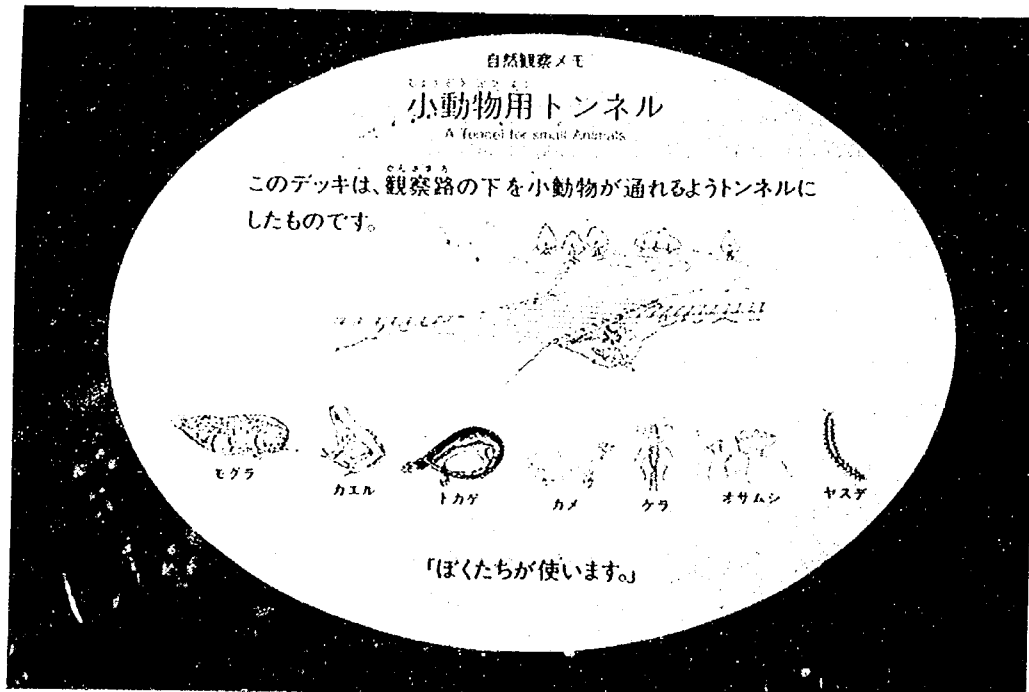
①施設意図紹介型

なぜここにその施設が作られたのか、環境にどんな配慮をしたのか、環境を守るためにどんな配慮がなされているのか、といった“特別”な工夫を紹介することで、環境やその保全への興味や理解を促そうとするもの。

写真1



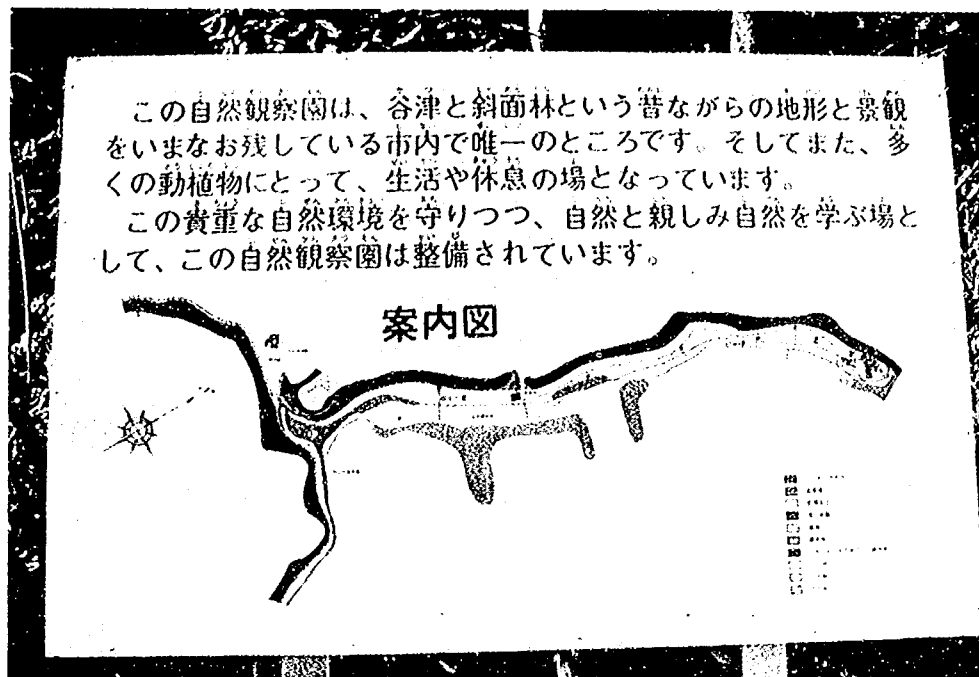
写真2



②立地環境紹介型

作られた施設よりも、その土地の歴史的な事実や地形的な特徴など、その土地の条件と施設との関係を紹介することが主眼となっており、しばしば地図や概念図などの挿入が見られる。

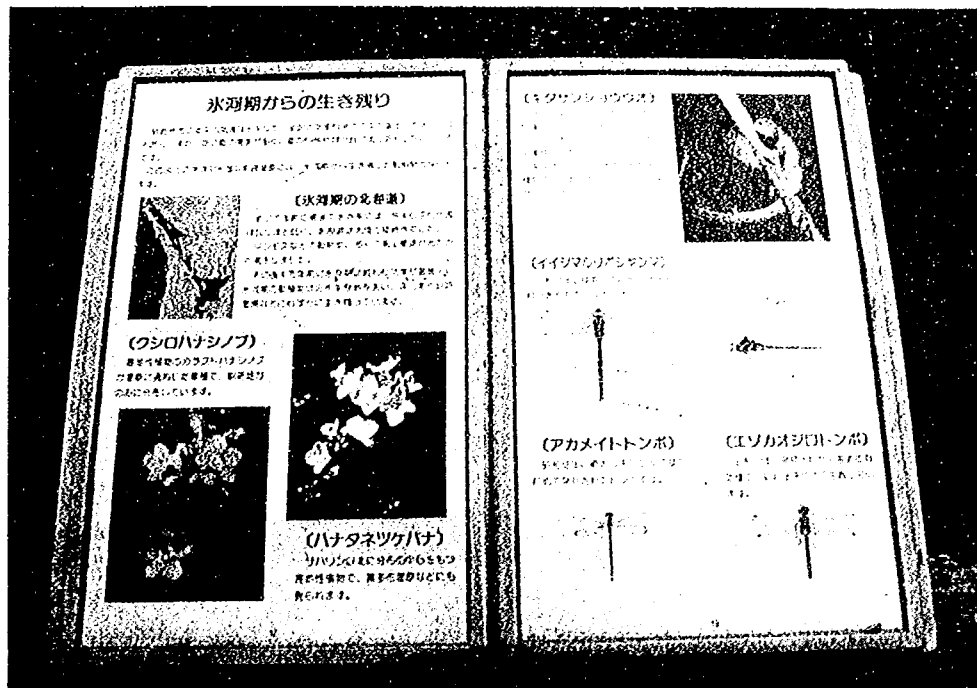
写真3



③環境構成要素紹介型

環境構成要素（例えば生息種・地形）を紹介することにより、間接的にその土地の特徴を紹介するもの。その土地の環境構成要素の独自性や要素間の関係に気づかせたりする機能を持つ。現状ではあまり多くない。

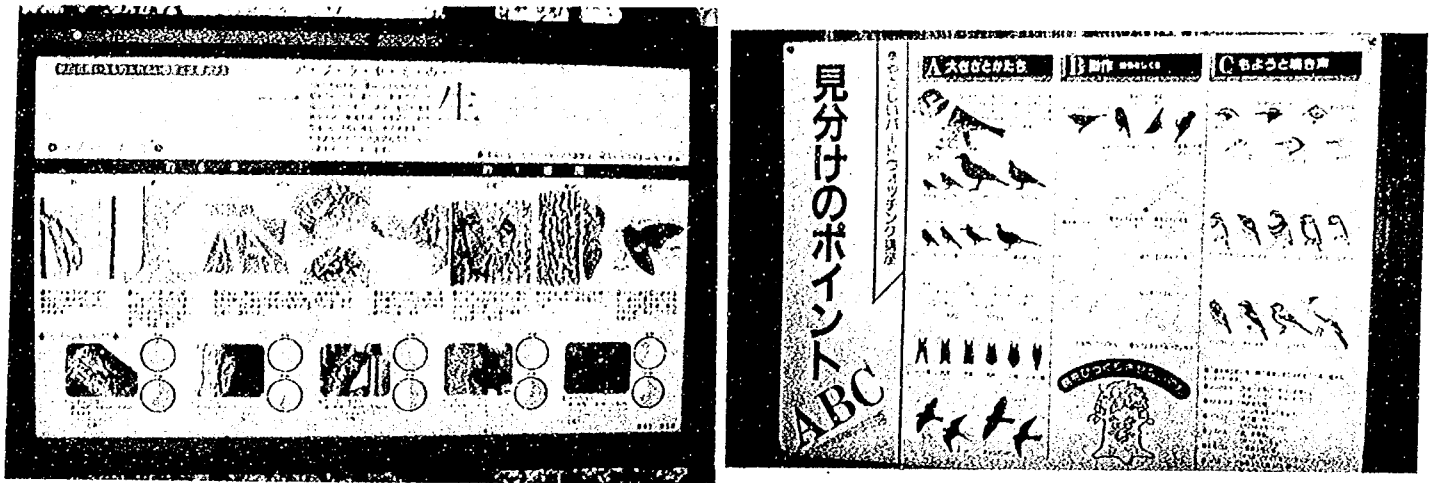
写真4



④観察対象説明型

その土地の環境条件とは関係なく、観察対象となる環境構成要素の名前、特徴・識別方法、性質・生態を説明するもの。

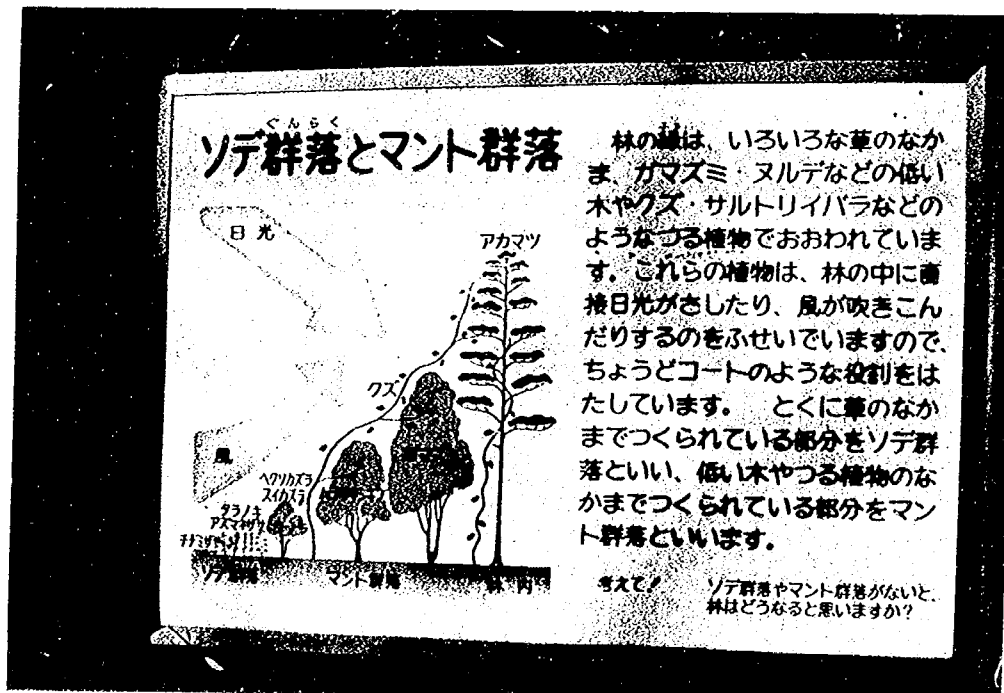
写真 5



⑤環境のしくみ説明型

その土地の環境の独自性には言及せず、環境に関する一般的しくみを説明しているもの。

写真 6



⑥問いかけ・提案型

その場で可能な体験を提案するもの。「匂いをかいでみよう」「なめて見よう」「耳を澄ましてみよう」といった五感を通しての直接体験を呼びかけるものと、「調べてみよう」「考えてみよう」といった知識へのアプローチを呼びかけるものとがある。

写真7



⑦観察方法紹介型

これには、例えば次のようなものがある。

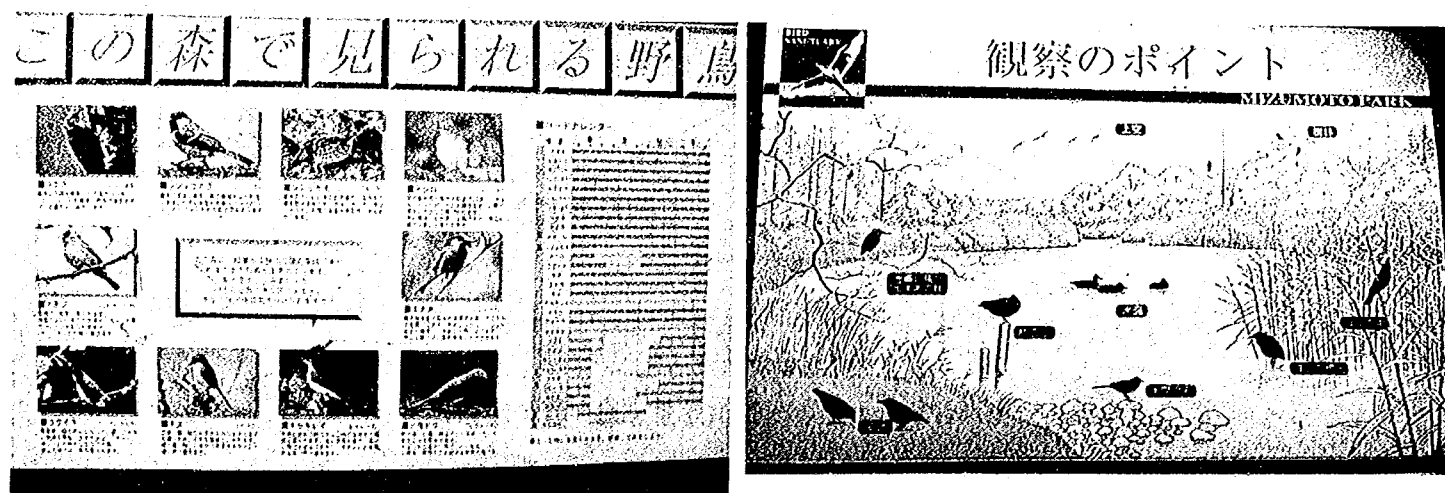
・観察ポイント紹介型

どんなところを探せばよいのか、観察ポイントを教えてくれる解説板。カワセミ、オニヤンマなどふだんあまり見ないものを自分で見つけた時の感動は大きい。

・観察時期紹介型

「バードカレンダー」「花ごよみ」など、いつどんな生き物が見られるかを紹介した解説版。このような季節の変動を紹介することで、環境教育施設は来訪者の再訪を期待できる。

写真8



以上の7つの型は、図2のようなさまざまな観察対象・観察者間の関係に言及しているものである。即ち、①施設紹介型は、その施設を整備した人間の環境（人間を除く）に対する働きかけに関する情報を提供している。

②立地環境紹介型、③環境構成要素紹介型、④観察対象説明型、⑤環境の仕組み説明型は、その施設の立地環境、その構成要素、それらの相互関係などに関する情報を提供している。

以上の①～⑤は、先述のTildenのインタープリテーションの定義に述べられた「直接体験や教材により、実物や事象の背後にある意味と相互の関係を解き明かす」のに役立っていると考えられる。

一方、⑥問いかけ提案型、⑦観察方法紹介型は、観察者が観察対象に関係を持つよう誘導を試みるものである。これらは、先のインタープリテーションの定義「自分たちを取り巻く環境に注意を向け、それに対する主体的行動を促す活動」に直接役立っていると考えられる。

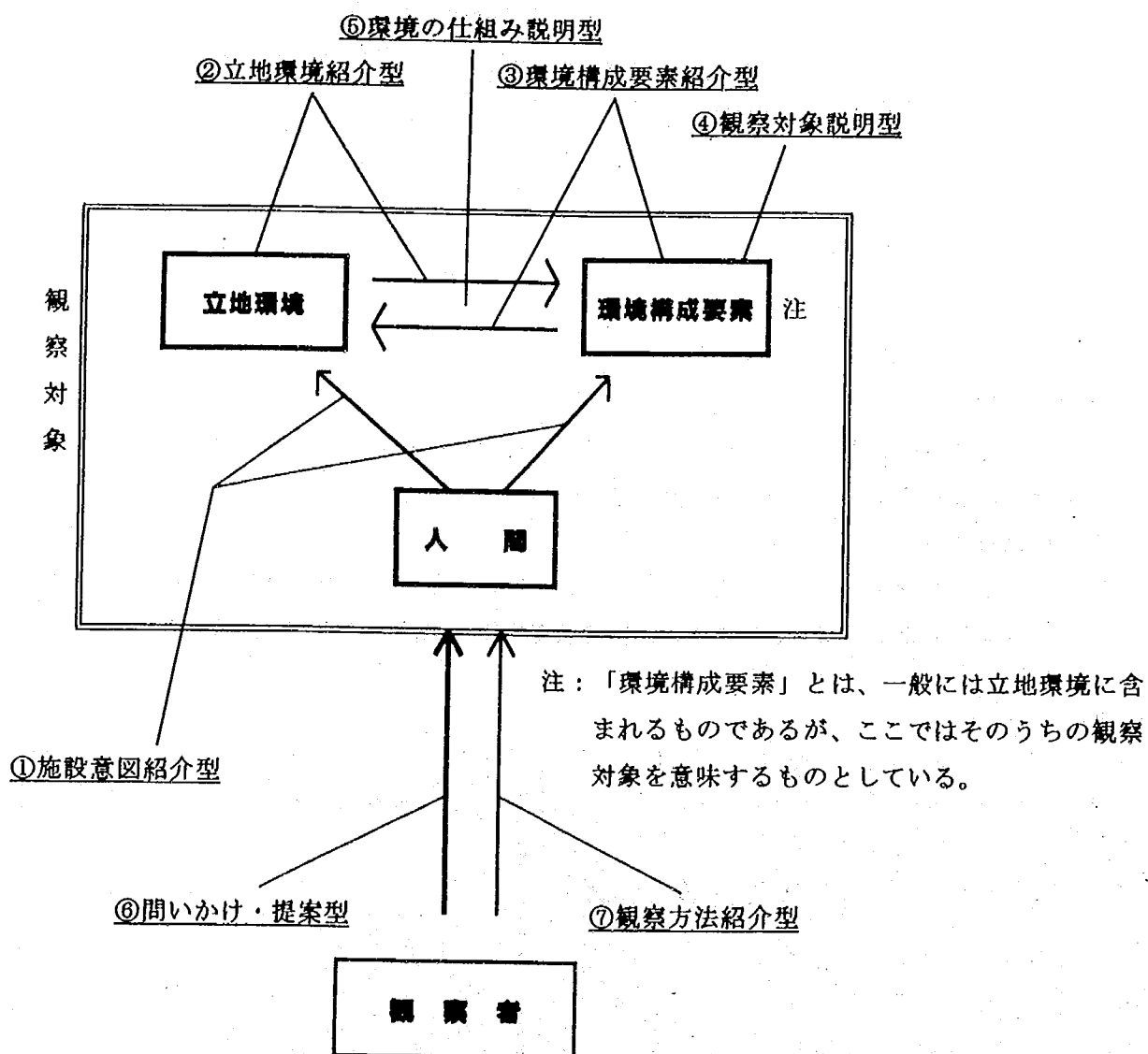


図2. サインの型が言及している「観察対象・観察者の関係」

以上のことから、インタープリテーションは一般に単独のサインで行われるものではなく、複数のサインが一体となって行われるものであると考えられる。

次節に示すように、単独のサインが提供するデータの量には限界がある。したがって多くの場合、環境の全容を観察者に理解させるには、複数のサインが必要であろう。また、環境教育に係るサイン計画の立案にあたっては、このようなさまざまな情報を施設の目的に応じて体系的に提供することが必要であろう。

3. 3 サインのデザインに関する評価

サインは観察者に読まれてこそ意味がある。どんなに情報密度の高いサインでも、来園者の足を止めるだけの魅力があるものでなければ価値を発揮することはできない。このため、どのようなサインが読まれるかを明らかにすることを主目的として、モニターによるスライドテストを行った。

評価対象は、上記の分類に用いた各地の解説板から選んだ44枚と、海外の動物園の解説板で優れていると思われたもの4枚の、合計48枚とした。

被験者は、生き物に特別な関心を持たない一般被験者6人と、生き物や施設に関心の高い専門家7人である。評価は「最も良い1」～「最も悪い6」の6段階とした。また、専門家からは試験終了後、評価対象に関するディスカッション形式により、評価をヒアリングした。

結果は表2のようになった（一般被験者の点数は専門家と同じ7人分に換算してある）。

表2. スライドテストによるサインの評価結果

評価の高いサイン

一般

サイン番号	3	11	21	20	14	32	4
読んでみたいと思う	15	15	15	14	11	17	17
印象的なイラストがある	13	14	14	15	21	12	15
気になるキョウロウがある	15	16	14	19	13	19	23
見て楽しい感じがする	15	14	17	14	18	16	17
合計	58	59	60	62	63	64	72

専門家

サイン番号	48	27	32	11	21	3	13
読んでみたいと思う	8	15	12	16	14	18	22
印象的なイラストがある	8	12	8	14	15	14	14
気になるキョウロウがある	15	9	16	14	12	18	20
見て楽しい感じがする	11	12	14	15	19	20	21
合計	42	48	50	60	60	69	77

評価の低いサイン

一般

サイン番号	30	35	38	46	2	40	34
読んでみたいと思う	28	29	28	28	22	22	28
印象的なイラストがある	30	30	30	28	30	38	38
気になるキョウロウがある	31	30	31	31	34	27	32
見て楽しい感じがする	30	30	30	32	34	33	33
合計	119	119	119	119	120	120	131

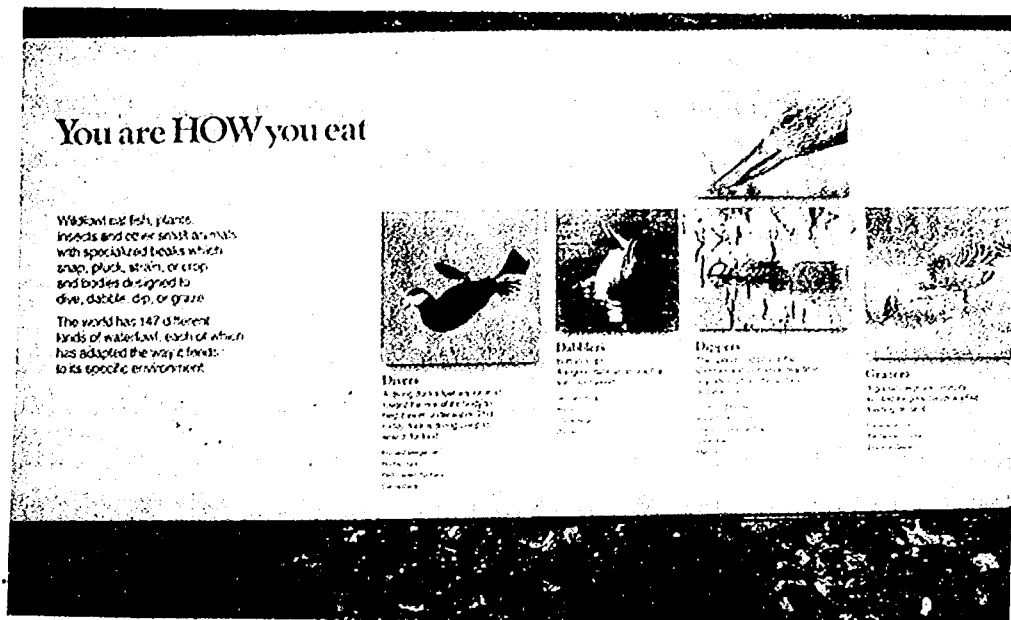
専門家

サイン番号	30	15	42	2	40	33	34
読んでみたいと思う	34	39	34	29	28	36	28
印象的なイラストがある	33	28	32	32	40	30	42
気になるキョウロウがある	34	35	35	39	34	37	36
見て楽しい感じがする	34	34	35	37	35	35	41
合計	134	135	135	137	137	139	146

評価の高いサインは以下のような特徴があった。

写真9

No. 3



「どうやって食べるの」というタイトルで始まるこのサインは、鳥がどのようにして餌をとるかを伝える観察対象説明型サインであり、「食べる」という側面から自然の中の不思議さに気づかせる。とりわけ評価が高かったのは、印象的なイラストであり、中央部のカモの頭のアップは人の目を捉える効果が高いと考えられる。

写真10

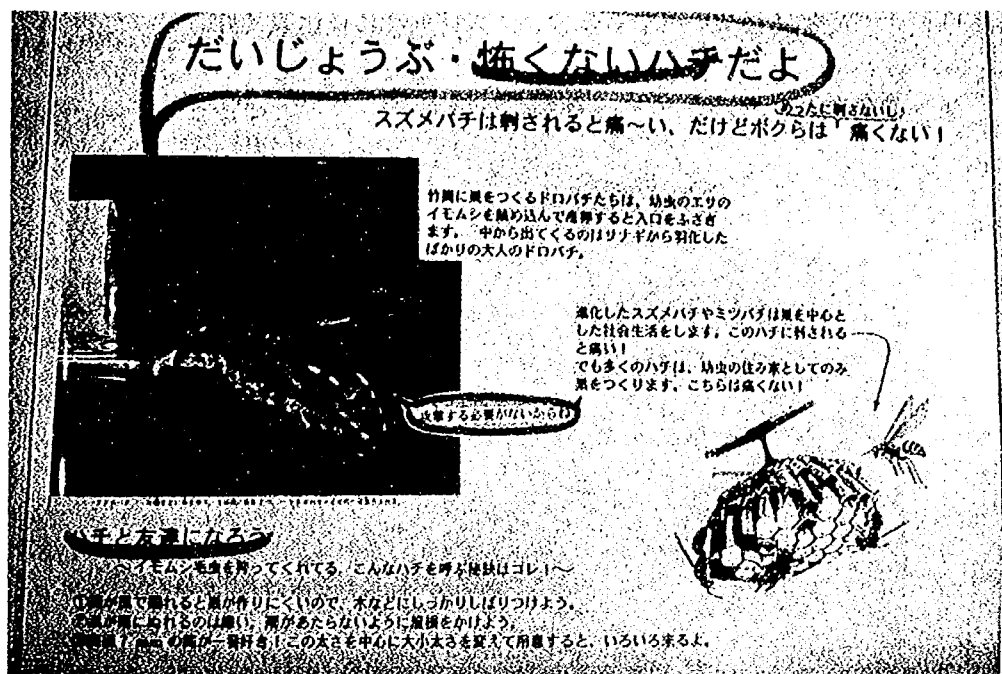
No. 11



説明の内容は、観察対象説明を主体とし、環境構成要素紹介の部分も含むが、キャッチコピーは、「モグラに会える」と、めったに出来ない経験をしてみようというアピールしており提案型に近い。

写真11

No. 21



ハチをテーマにした観察対象説明型と提案型の両者の性格を持っており、一般被験者にはイラストと「楽しい感じがする」点で、また、専門家にはキャッチコピーと「読んでみたい」という点で高い評価を得た。

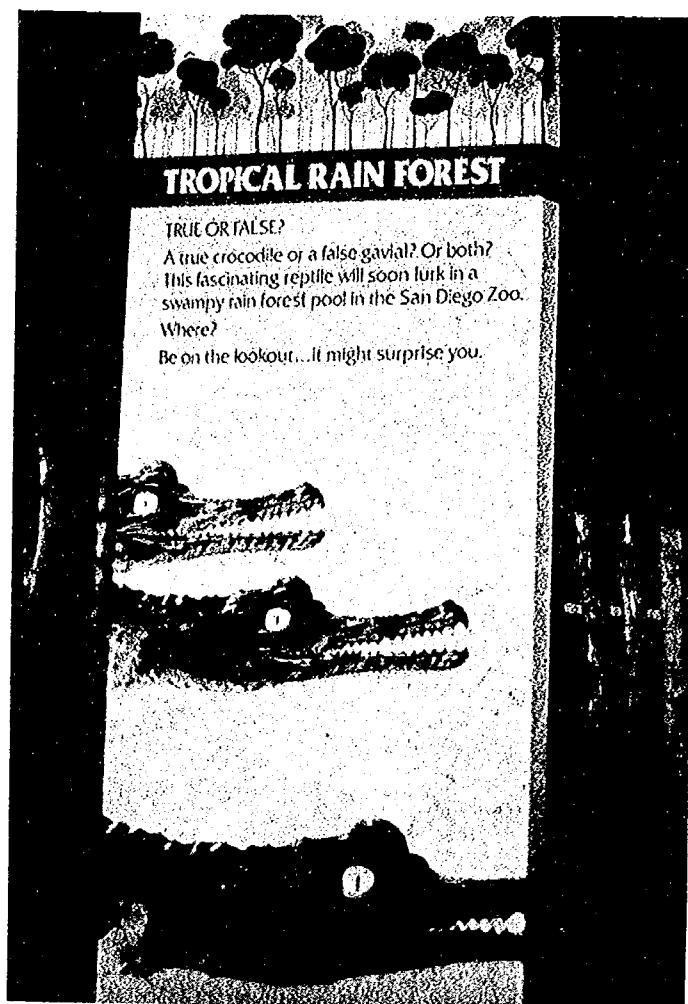


写真12

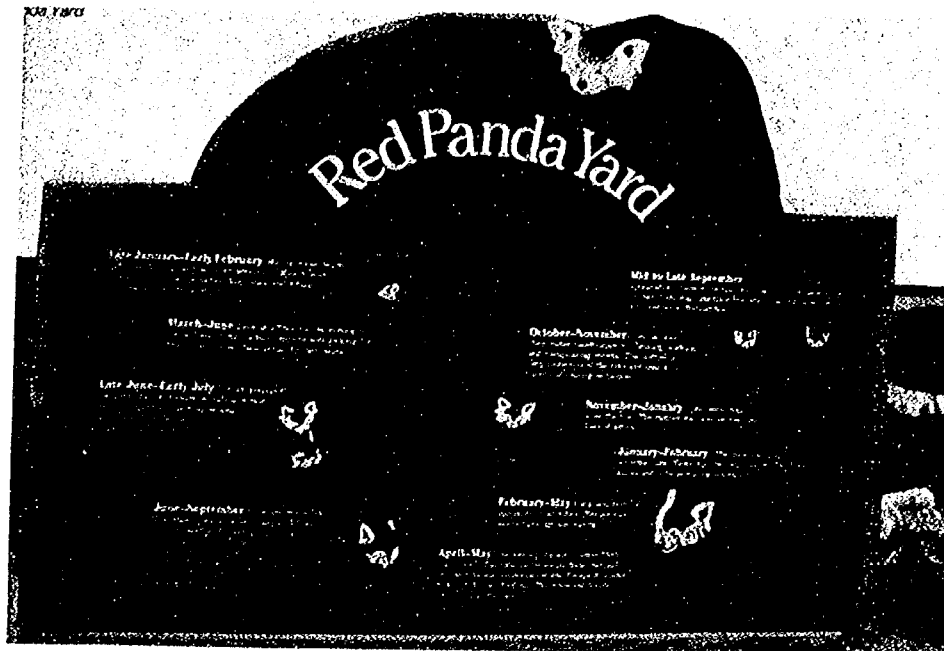
No. 32

「ほんとな、嘘かな」と題されたユーモラスさや、「あなたを驚かすかもしれないよ」という表現によって、観察者に周辺への注意を向けさせている。特に専門家には「印象的なイラスト」「読んでみたい」という点で評価が高い。

専門家にはあまり評価されなかったものの、一般被験者には比較的好評だったサインとしてNo. 14とNo. 20がある。

写真13

No. 14



No. 14はレッサーパンダのかわいらしいイラストとともに、この動物が年間を通じてどんな暮らしをしているかを伝えるサインであるが、「見て楽しい感じがする」「読んでみたい」「イラストが印象的」の点で高い評価が得られた。

No. 20は「読んでみたい」「見て楽しい」の項目で評価が高かった。内容は「この先にネズミの巣穴があります。」というたったひとことのサインであり、何の変哲もない。しかし、一般の来訪者に「ネズミの巣穴が見れる」というめずらしい経験を呼びかけるのには、さまざまな内容を盛り込んだものよりもむしろ効果的なのであろう。

この例や、前のレッサーパンダの例からも一般の観察者には、楽しいイラストや、一目で何があるかわかるようなサインが好評のようであると推測できる。

こうした、知らずに通り過ぎてしまうような些細な自然の現象を一言で伝え、自然とのふれあいのきっかけを作ってくれるサインは一般の来訪者を捉える効果が大きいと思われる。

写真14

No. 15



一方、一般被験者の評価は高くなかったが、専門家の評価が高いものとして次のようなものがあった。

写真15

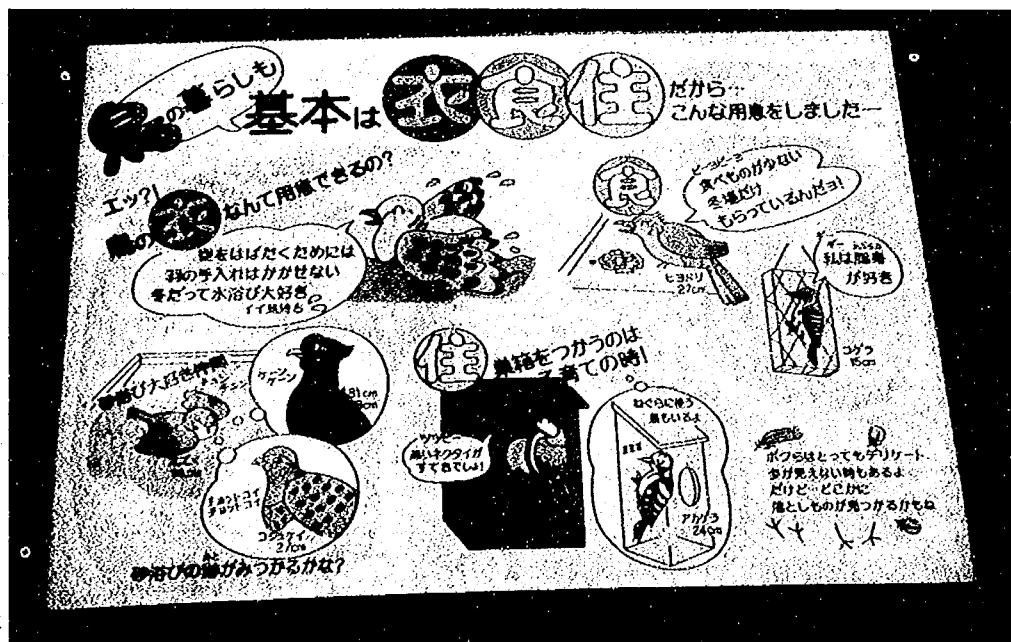
No. 48



No. 48は専門家から圧倒的な支持を得た。理由は「情報の伝え方」に対して工夫がされていることである。手作りサインで洗練されたイラストというわけではないが、背中に荷物を背負って手(?)を振る擬人化されたカモの姿は印象的で、「こういう伝え方もあるんだ!」と評価者は一様に感心していた。タイトルとなるようなキャッチコピーはないが、ユーモアを交えながらのカモの生態紹介は好感が持てると好評であった。

写真16

No. 27



No. 27はキャッチコピーが群を抜いて高く評価された。専門家は文章内容を重視する傾向があり、キャッチコピーの項目に対する評価は全体的に低い、このサインは別格であった。No. 27のキャッチコピーの評価が高かった理由として、専門家にとって興味が深い、施設の設置目的がテーマに取り上げられていたことが挙げられる。

一方、評価が低かったサインには次のようなものがあった。

写真17

No. 30

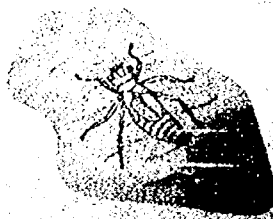
トンボの一生

トンボという名前は、飛んでいる姿の飛ぶ^とからきているそうです。トンボは一生の半分を水中でくらし、卵は水草の茎などに産みつけられ、かえった幼虫はヤゴといいます。ヤゴは肉食で、強いアゴでオタマジャクシなどをつかまえて食べます。ヤゴは成長すると草などによじ登り、羽化します。このようにトンボは、水がないと生きていけません。この小さな池にもトンボは集まってきます。さあ、どんなトンボがきてるかな？

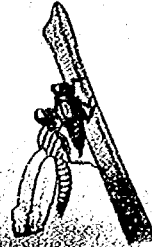
シオカラトンボ



卵を産む



下アゴが発達しているヤゴ



羽化の力をやぶり、親と別れること。

トンボの一生について解説したものだが、「楽しくない」という点で被験者の意見が共通していた。また、「一生」といいながら、時間の経過を追って順に説明されているというようなこともない。イラストが未熟であるという指摘もあった。

写真18

No. 2

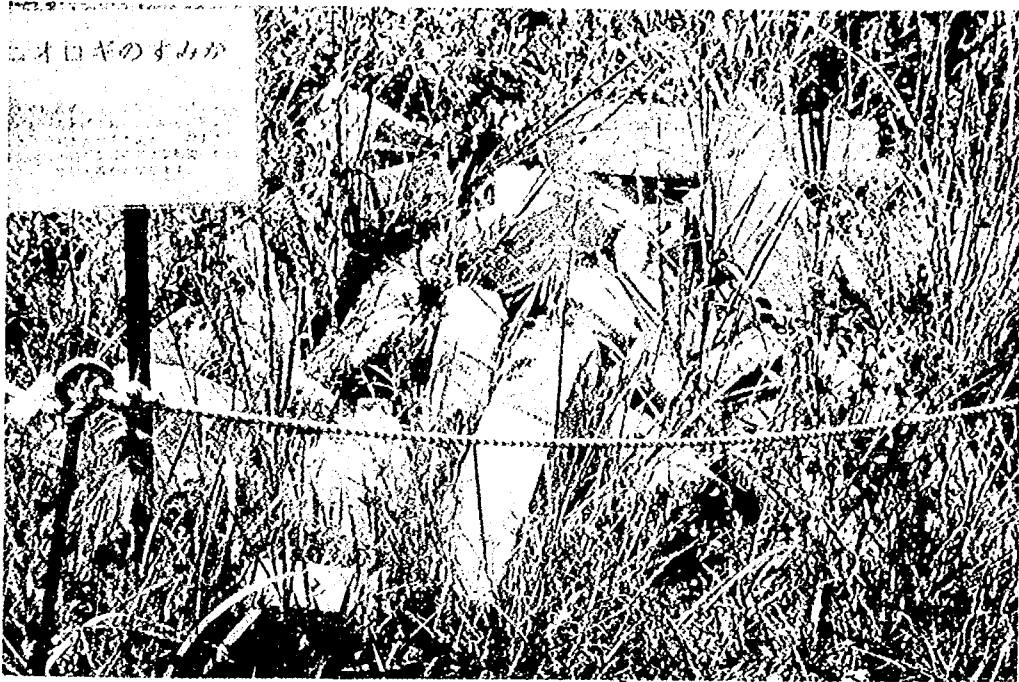


「キャッチコピーが教科書的で工夫がない」「楽しい感じがしない」との指摘がされた。表現方法に工夫が必要との声が多かった。

写真19

オオロギのすみか

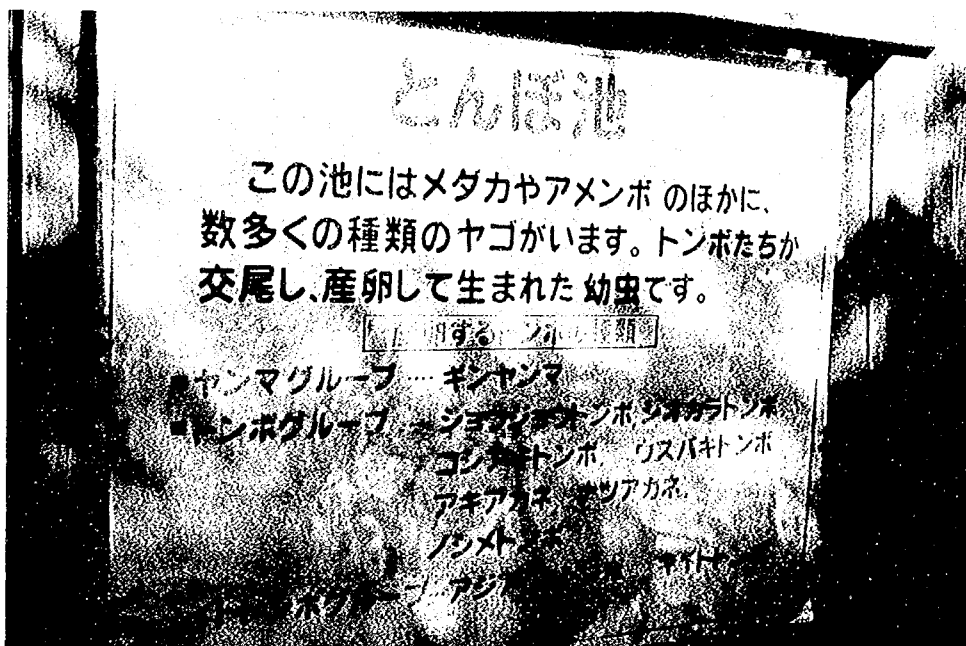
No. 40



「イラストがない」ということで、厳しい評価となった。生き物自体の解説をする場合には、イメージを膨らませるためにもイラストや写真は不可欠の要素と考えられる。また、「楽しい感じがしない」という指摘もあった。

写真20

No. 34



「イラストがない」ということで厳しく評価された。また、「キャッチコピーに工夫が無く、興味を引かない。」「見ていても楽しい感じがしない」との指摘がなされた。前の例でも「楽しい感じがしない」との指摘があったことから、イラストと楽しさとは関連する可能性がある。文章の内容についても、「何も新しい発見がない」「種名ばかり羅列されても興味がわからない。」「抽象過ぎて生き物の解説という感じがしない」等の厳しい指摘がなされた。

この他の評価の低かったサインを参考に掲げる。

一般被験者の評価が低かったもの

写真21

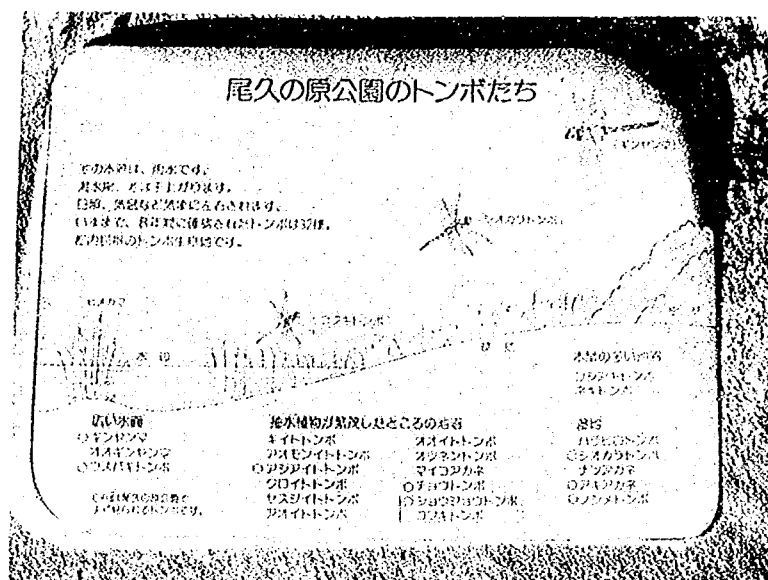


写真22

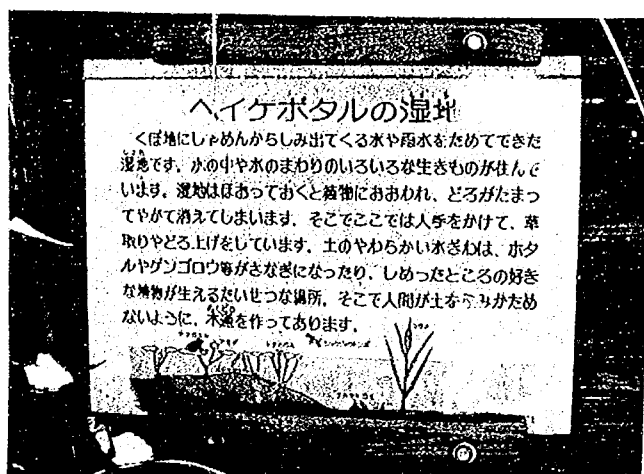


写真23

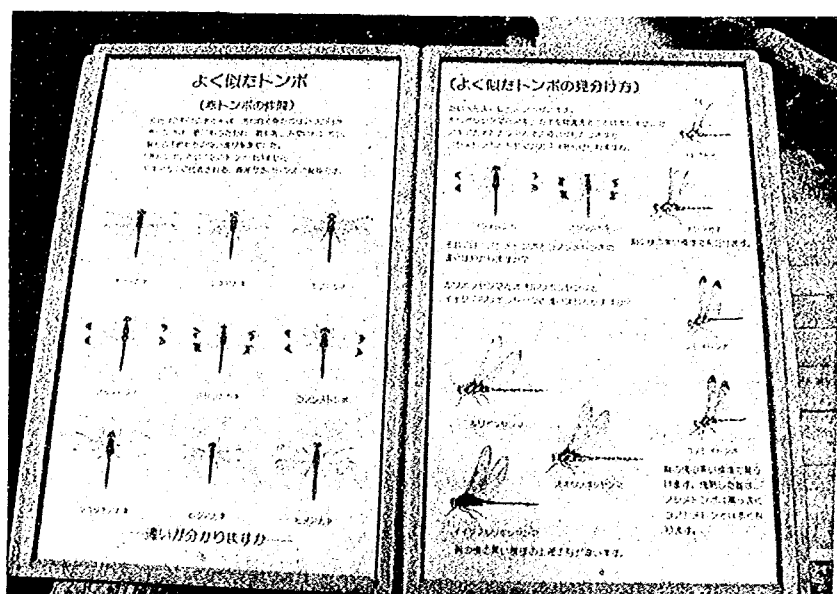
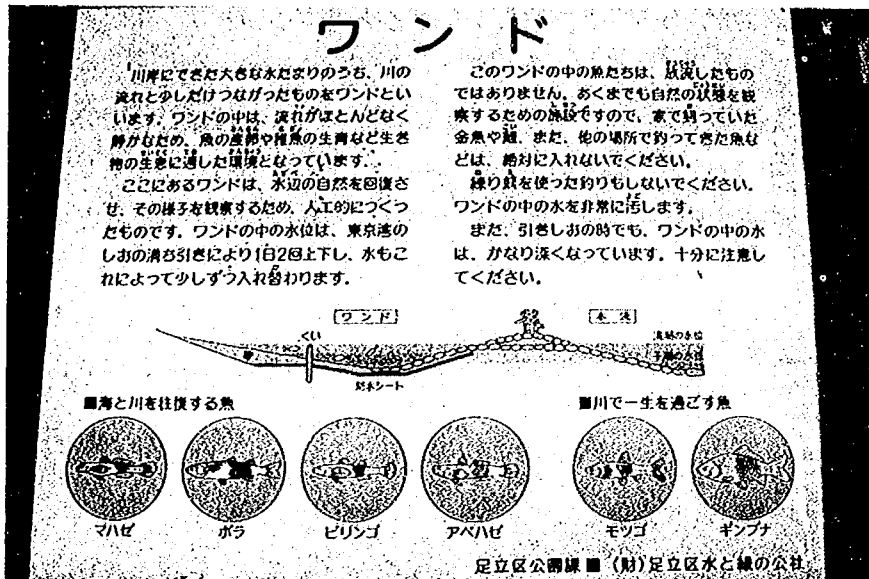


写真24



No. 15は読んでみたいと思わないという点で最も不評であった。文字の読める距離に立ったときに説明文が視野に入る文字数を越えると読むのに苦労すると言われる。No. 15がこれにあてはまる。

写真25



No. 42は、情報がいくつもはいつており、どれも中途半端で知的好奇心を刺激しないという指摘があった。

写真26



No. 33は典型的な図鑑型サインだが、種数が多いために、文字が小さく、読みたいとは思えない内容になっている。多くの種を紹介することがよいのではなく、テーマを絞って紹介する必要がある。

以上の結果から、評価の低いサインの性格として次のような点が指摘される。

- ・キャッチコピーがなく、「トンボの一生」「ホタルの池」のような工夫の無い題が付けられたサイン
- ・写真もイラストもなく、ただ文字ばかりを長々と羅列したようなサイン
- ・イラストで主張しようとする部分が明確でなく、標本箱をそのまま移したようなサイン
- ・さまざまな情報が入っているが、何を言いたいかわからないサイン

まとめ

本稿では、環境教育に対する建設行政の関わり方として、「自らの環境保全に対する努力を積極的にアピールしていくこと」を提案した。

また、建設行政が環境教育に関わる手段であるサインの内容に関する留意事項を明らかにするため、サインの分類、および一般被験者および専門家の評価試験を行った結果について述べた。そして、サインには環境教育の目的にそった種類があることを明らかにするとともに、サイン作成上の留意事項の一部を明らかにした。

本稿で述べたように、自然環境の環境教育に用いるサインにはさまざまな種類と役割分担がある。このことは、建設行政が行う他の分野の環境教育についてもあてはまるであろう。ただし、人間の環境（図2の「立地環境」と「環境構成要素」）に対する働きかけは、建設行政の分野ごとに全く異なるであろうから、それらの分野におけるサイン計画を立案する場合は、各分野に応じ図2を修正することが必要となるだろう。

また、自然環境教育におけるサイン同様、他の環境教育分野のサインについても、作成に当たっては、

- ・キャッチコピーを工夫すること。
- ・意図を明確にした写真、イラストを適宜用いること。
- ・与える情報は多すぎず、また明確な意図のもとに計画すること

などの注意が必要であろう。なお、上記の土木研究所の研究では、サインの作成上の留意事項をさらに詳細に検討しており、それらの結果は手引きとして公表する予定である。

本稿では、環境教育への関与が国土建設行政自身にとっても必要となっていることを提言した。建設行政全体としては比較的新らしい分野であるが、本稿に記した方向に沿い、今後さまざまな事業の分野において、環境教育へのますます積極的な関与が行われることを願ってやまない。

引用文献

- 1) 小河原孝夫：環境教育の目標段階と自然解説施設の展開に関する計画論的考察，日本環境教育学会創立大会研究発表要旨集，P40，1990
- 2) 小野三津子：つながりひろがれ環境学習，p231，1996，（株）ぎょうせい
- 3) グロス M. 他著、日本環境教育フォーラム訳：インタープリテーション入門，1994

貯 水 池 の 土 砂 管 理

ダ ム 部 長 上 阪 恒 雄

貯水池の土砂管理

ダム部長 上 阪 恒 雄

1. はじめに

河川を堰上げ、貯水池を造れば土砂が堆積する。貯水池内の堆砂は、貯水容量を減じダムの貯水機能を損なう。このため、わが国のダム計画においては、100 年間に堆積するであろう土砂量を予めダムの貯水容量に確保することとしている。即ち、貯水容量内に 100 年相当の堆砂容量を設定し、この容量分の貯水機能は当初からないものとして治水・利水計画がなされている。

ダムの堆砂は、貯水容量を減じるものであるが、同時に上流の河床上昇や下流での河床低下の原因ともなる。ダム堆砂の与える上下流への影響は、従来から認識されてきたものであるが、従来の問題の取り上げ方は、治水、利水といった人間活動の視点からのものが主体であった。即ち、上流河床の上昇による治水機能の低下、下流河床の低下による取水機能の低下や橋梁や護岸構造物の根固め部の浮き上がりによる安全性の低下等が主として論じられてきた。近年ではこれに環境機能としての評価が加わってきている。上流域の河床上昇は、それまでの河床を埋没させるものであり、生物の生息環境を変化させる。また、下流域での河床低下は、河床構成材料の粗粒化を伴い、これも生態系に影響を与える。下流への影響は河道域に留まらず、海岸域に達する可能性もある。

一方、土砂の流動という意味では、ダム貯水池は流動に影響する一要素にすぎない。平成 10 年 7 月、河川審議会総合政策委員会の総合土砂管理小委員会¹⁾の報告がなされたが、その中では、流域の安全確保、利活用、環境の保全を適正に実施していくため、森林を含む山地部から海岸域までの土砂の移動領域の全体を「流砂系」という新しい概念で捉えた総合的な土砂管理の推進が謳われている。災害に対する安全を確保し、河川・海岸の適正な利用を行い、かつ良好な水辺環境を保全・創造していくためには、自然状態での土砂の流動及び砂防事業の実施や砂利採取などの人的作用が土砂移動に与える影響を流砂系全体を通じてモニタリングするとともに、新たな土砂管理方策を構築していく必要があると提言されている。

このような流砂系の土砂管理という視点で貯水池の堆砂問題を見直してみると、先に、ダム貯水池は土砂流動に影響する一要素にすぎないとしたが、ダムは巨大な砂防ダムともいうことができ、影響の大きい要素である。多目的ダムの貯水池は、河川流水の循環速度を制御し、利水や洪水調節を行うものであるが、調節できるのは流水のみではない。流砂系の土砂管理の観点から見れば、過剰な土砂の流下を緩和し適切な土砂量を補給するという、流砂量の制御施設ともなる可能性をもつ。堆砂問題は、貯水池のもつ負の現象として捉えられてきたが、土砂管理の観点からみれば積極的に評価することも可能であろう。

しかし、ダム貯水池を流砂量の制御施設として位置づけるための技術的課題は大きい。粒度分布の情報も含めた流入土砂量の推定精度の向上、貯水池利用と調和のとれた下流河道への土砂供給技術の開発など課題は山積している。本稿では、こうしたダム貯水池の土砂量制御施設としての活用を認識の上、ダム貯水池の堆砂の現状を整理するとともに、土砂供給方策としての排砂技術の現状を海外の事例も含めて取りまとめた。

2. 貯水池堆砂量

2. 1 堆砂量の現状と経年変化

貯水池には、流砂系の現状を知るための重要な情報である「堆砂量」が蓄積されている。満砂状態にない貯水池では、当該地点を通過したであろう土砂が堆積している。従って、堆砂量を知ることにより、当該地点でどれだけの土砂が流下しているかを立ち所に知ることができる。ただし、微細粒子については、貯水池を通過して放流される成分がありこの限りではない。

総貯水池容量が 100 万 m^3 以上の貯水池では、毎年 1 回堆砂測量が実施され、堆砂量、掘削排除量等が建設省に報告されている。図-1 は、報告された 782 ダムのうち、堆砂量が零より大きい 709 ダム（零より小さいダムは何れも完成後 10 年未満の経過年）について年平均堆砂量の分布を地図上にプロットしたものである。

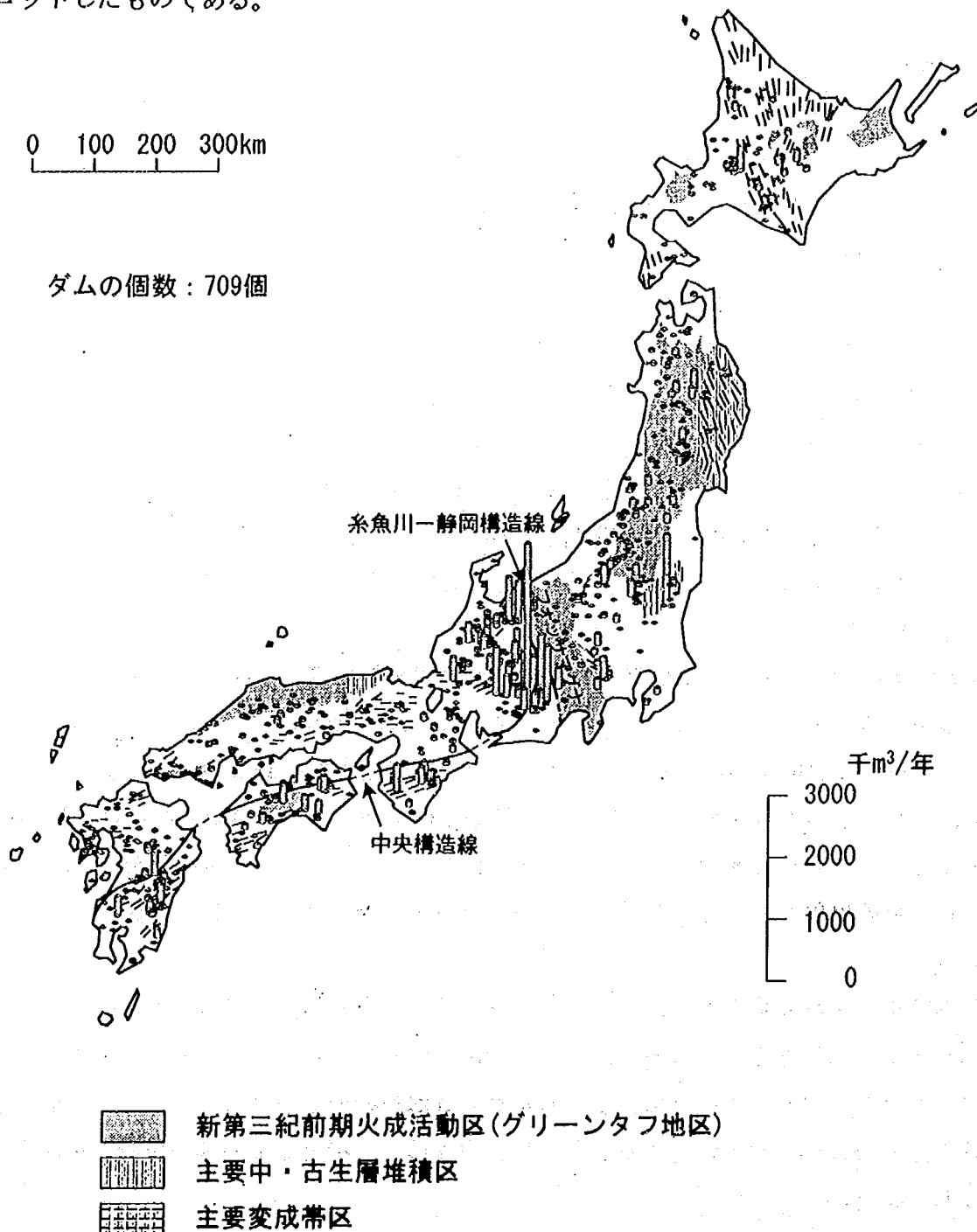


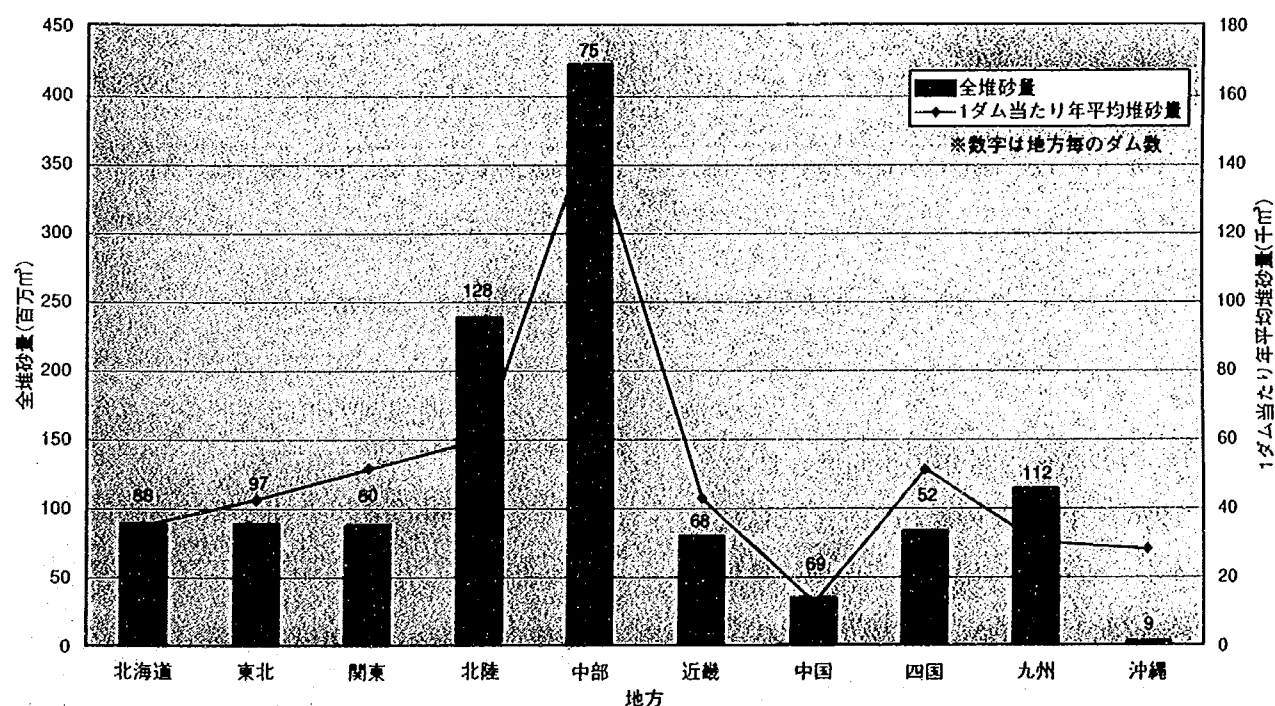
図-1 年平均堆砂量の全国分布

ここに、

年平均堆砂量＝平成8年度現在の堆砂量／ダム完成年からの経過年数

である。図には主要な地質構造を併せて示しているが、年平均堆砂量の大きなダムは、わが国の代表的な構造線である糸魚川・静岡構造線及び中央構造線周辺に分布しており、これら構造線周辺の山体が侵食を受け易いことを表している。これら地域は年間降水量の比較的大きい地域でもある。

図－2は、堆砂量の合計値及び年平均堆砂量の平均値（以下、1ダム当り年平均堆砂量とする。）を地方別に示したものである。全堆砂量は、糸魚川・静岡構造線と中央構造線が交わる中部地方が最も大きく、北陸地方がこれに続く。国全体での堆砂量は約12億 m^3 であり、両地方で全体の約60%を占める。1ダム当り年平均堆砂量についても中部、北陸地方で大きい。中部地方の大きさが際立っており、北陸のそれは、関東や四国での値とそれ程大きな差はない。中国地方では、全堆砂量、1ダム当り平均堆砂量とも非常に小さく、ともに中部地方の1/10程度に過ぎない。中部、中国地方を除けば、1ダム当り年平均堆砂量の平均は、概ね3～6万 m^3 /年の範囲にあり、全国的にはこの程度が標準的な値といえよう。



図－2 地方別の堆砂量（平成8年度）

以上は、平成8年度現在の堆砂量報告に基づくものである。ここで、1977～96年のこの20年間の経年的変化について見てみたのが図-3である。図-3は、地方別の年間堆砂量の経年変化を示したもので、先に述べた中部地方での大きな堆砂量は、1985年以前のものであり、それ以降はそれ程大きくないことが分かる。

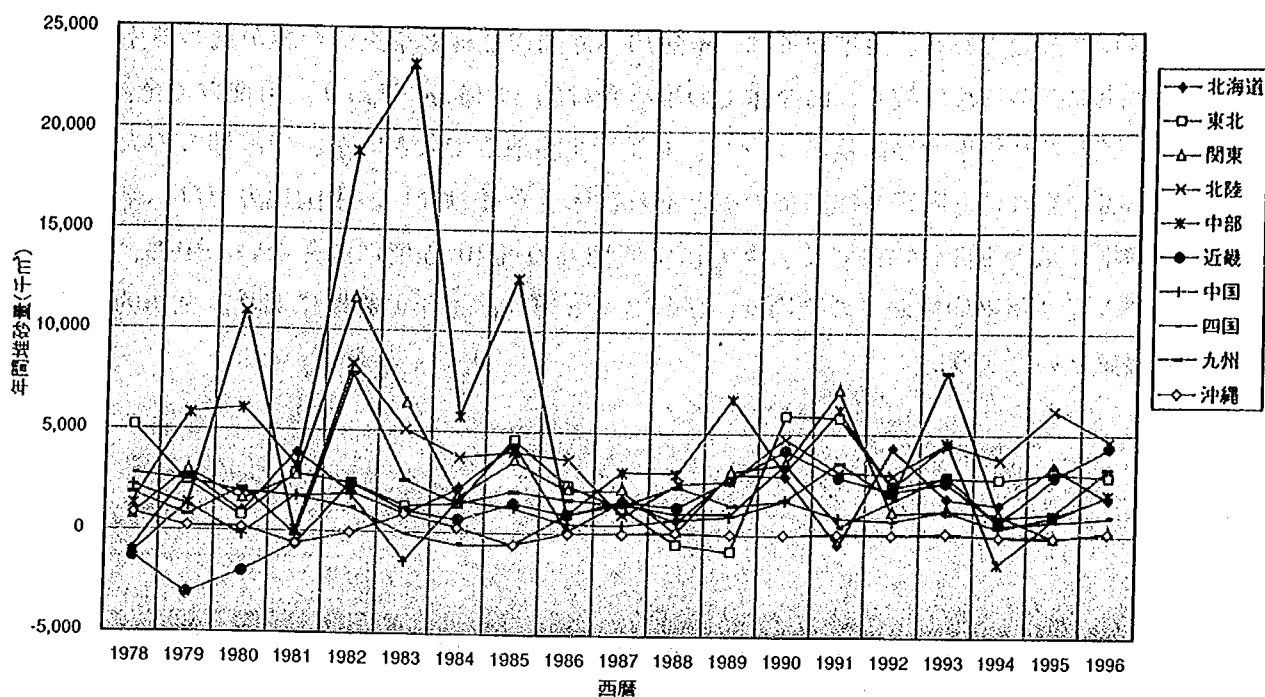


図-3 地方別年間堆砂量の推移 (1978～1996)

表-1は、1978～1985年の年間堆砂量の平均値と1986～1996年のそれとを比較したものであるが、近年では中部地方の堆砂量は非常に小さくなっており、北陸地方より小さい値となっていることが分かる。同様の減少は関東地方でも見られている。一方、近畿地方では増加が見られるが、1978～1985年にはマイナス値となっており掘削等による大規模な搬出又は排出が行われたことが推察される。他の地方では、上記年間による違いは顕著ではなく、年平均堆砂量はここ20年来あまり変わっていない。

表-1 期間別の年間堆砂量の平均値

地方	年間堆砂量(千 m^3)	
	昭和53～60年 (1978～1985年)	昭和61～平成8年 (1986～1996年)
北海道	1,950	1,868
東北	2,575	2,530
関東	3,914	1,988
北陸	4,000	3,592
中部	9,588	2,869
近畿	-226	2,361
中国	982	1,047
四国	1,084	1,387
九州	2,253	2,469
沖縄	118	28
全国	26,237	20,142

堆砂量が年間によって大きく異なっている理由は必ずしも明らかではない。例えば近年の中部地方の堆砂量減少の原因として、土砂流出量の大きい地域において大きな降雨量が発生しなかったこと、堆砂の搬出量が増加したこと、堆砂の進行が進み全体として土砂の捕捉率が低減したこと、砂防等の

治山事業の進展により土砂流出量そのものが低減してきていることなど様々な事象を想定することができる。降雨といった確率的な事象によるものか、治山事業による生産土砂の減少といった状況の変化によるものかは今後の推移を予測する上で重要なポイントである。今後明確にしていく必要がある。

ここで、貯水池容量の損失という意味で表-1を見ると、1986～1996年における全国の年間堆砂量の平均値は約20百万m³/年である。これに対し、調査対象ダムの平均の貯水容量は約23百万m³/ダムである。つまり、1ダム相当の貯水容量が毎年堆砂により埋まっていることになる。近年の年間堆砂量が小さいとはいえ、堆砂対策が貯水池の持続的利用にとって重要な課題であることに変わりはないことが理解されよう。なお、全貯水容量に対する平均の堆砂率は平成8年度現在で約7%であり、貯水容量の損失は、全体としてはまだ切迫した問題とはなっていないが、中部地方等特定の地域においては緊急の課題である。

2. 2 流入土砂量の現状

2. 1で示したデータは、毎年の堆砂量報告によるもので、掘削等により搬出された量は差し引かれた値となっている。ここで、流域からの土砂流出量という観点で堆砂をみる場合、掘削等による搬出量も含めて考える必要がある。また、土砂の捕捉率の影響や上流域でのダム建設の影響についても考慮する必要がある。芦田ら²⁾は、土砂の捕捉が十分になされていると考えられるダムとして、貯水容量が200万m³以上で堆砂率が25%以下のダムを選出し、また、上流ダムの影響については、上流ダムがなければ下流ダムに堆砂したであろうとして、上流ダム群の堆砂量を下流ダムのそれに加えて、単位流域面積当りの年平均流出土砂量（年平均比流出土砂量） q_s を求めている。その結果、同一水系又は類似の水系ごとに

$$q_s = \alpha A^{-0.7} \quad (A: \text{流域面積})$$

の関係群によりマクロ的な分類分けができるとしている。

図-4は、土木研究所の調査結果をもとに、芦田らの行ったと同じ方法によりダムの選定、堆砂データの整理を行った結果を示したものである。図では、芦田らが行った水系区分すなわち、

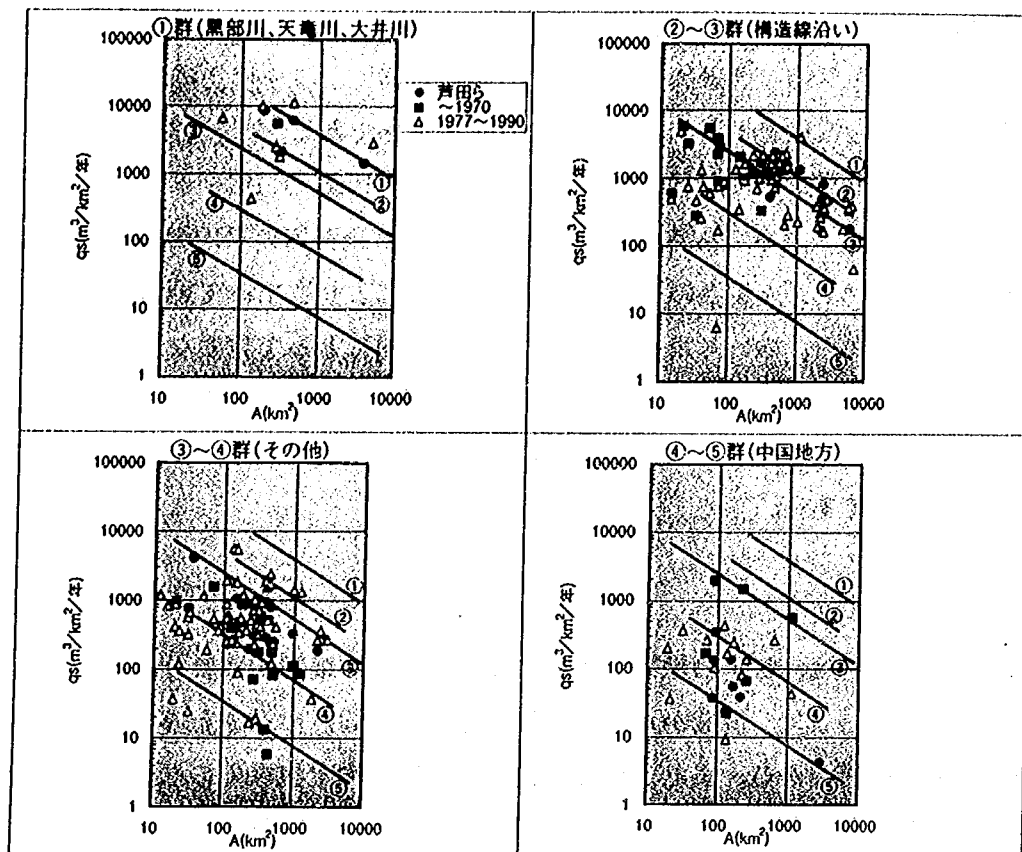
①群：大きな流出土砂量をもつ黒部川、天竜川、大井川

②～③群：構造線沿いで比較的流出土砂の多い只見川、庄川、木曾川、十津川、吉野川、耳川など

④～⑤群：流出土砂量の少ない中国地方の河川

③～④群：上記以外の河川

に分け、芦田らが実施した1970年迄のデータ（芦田らのデータを含む）及び1977～1990年のデータの両者について比較したが、全体的には概ね芦田らのデータと同様の傾向を示すもののダム数の増加により結果のバラツキが大きくなり、必ずしも上記の区分には収まらない結果となった。また、年代の違いによる明確な傾向は得られていない。



図－４ 年平均比流入土砂量と流域面積の関係

表－２ 水系別の α

地方	水系	1977～1990		
		ダム数	流域面積 $A(\text{km}^2)$ の範囲	α
北海道	十勝川	3	388 ～ 533	31,000 ～ 100,000
	石狩川	19	12 ～ 1,779	280 ～ 160,000
東北	赤川	2	148 ～ 162	12,000 ～ 58,000
関東	利根川	11	20 ～ 494	3,300 ～ 50,000
	多摩川	1	263	50,000
	相模川	2	947 ～ 1,201	160,000 ～ 180,000
北陸	黒部川	1	185	380,000
	阿賀野川	17	41 ～ 6,728	3,300 ～ 170,000
	庄川	6	20 ～ 1,100	5,300 ～ 510,000
	三面川	2	234 ～ 306	23,000 ～ 39,000
	信濃川	19	5 ～ 2,787	1,800 ～ 180,000
	神通川	3	128 ～ 2,060	3,100 ～ 54,000
	常願寺川	3	7 ～ 50	3,400 ～ 180,000
中部	大井川	1	459	820,000
	天竜川	5	58 ～ 4,895	13,000 ～ 1,100,000
	木曾川	12	6 ～ 4,632	36 ～ 110,000
中国	旭川	2	255 ～ 1,140	5,800 ～ 6,400
	高梁川	6	22 ～ 631	310 ～ 23,000
	佐波川	2	32 ～ 88	2,400 ～ 4,000
	小瀬川	2	135 ～ 168	280 ～ 8,800
	斐伊川	2	19 ～ 70	1,600 ～ 5,100
四国	吉野川	10	15 ～ 1,904	3,200 ～ 71,000
九州	耳川	4	41 ～ 737	17,000 ～ 100,000
	一ツ瀬川	3	71 ～ 486	3,100 ～ 78,000

表－2は、 $q_s = \alpha A^{-0.7}$ の関係が成立しているものとして、今回の1977～1990年のデータから主要水系の α の範囲を求めたものである。表－2から各水系での凡その年間比流出土砂量を知ることができるが、水系内でもバラツキが大きく、流域面積のみをパラメータとした分類のみでは不十分と考えられる。年間比流出土砂量の精度のよい推定のためには、これに影響する要因について更なる解明が必要である。その際、芦田らが行っている貯水池選出の設定方法や q_s と A の関係の妥当性についての検証が必要なことは言うまでもない。

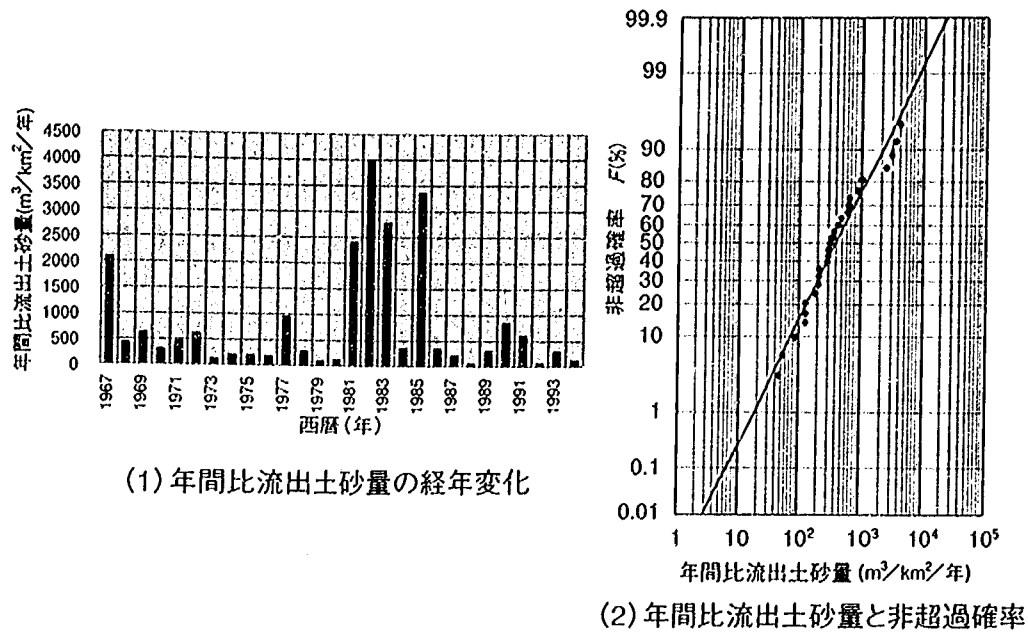
2. 3 堆砂量の年変動

例えば100年堆砂量の推定といった長期間に亘る問題を議論するのであれば、年平均的議論をすればよい。一方、堆砂対策計画や施設の設計を行う場合には単なる平均量の議論では問題が生じる。このことは、例えば貯砂ダムにより土砂を捕捉し、掘削搬出する場合を考えてみれば容易に理解することができる。

貯砂ダム容量を砂礫成分の年平均堆砂量とし、これを毎年掘削する計画を立てたとする。このとき、計画上は毎年の定量掘削により砂礫成分の堆砂をなくすることができる。しかしながら、実際には年変動があり、そうはならない。即ち、大きな土砂流入がある年には土砂が貯砂ダムを超えて貯水池内に堆砂する。また、土砂流入が小さな年には所定の量を掘削することができない。流入土砂量の時間変動は、後に述べる各種堆砂対策の検討において欠くことのできない検討項目である。

図－5(1)は、川俣ダムでの堆砂量の経年変化を示したものである。ただし、図では、堆砂量の替わりに2. 2で示した年間比流出土砂量として表している。図に示されるように、年間比流出土砂量は年により大きく変動しており、上記に例示した貯砂ダム計画等においてこの変動の影響が無視できないことが分かる。

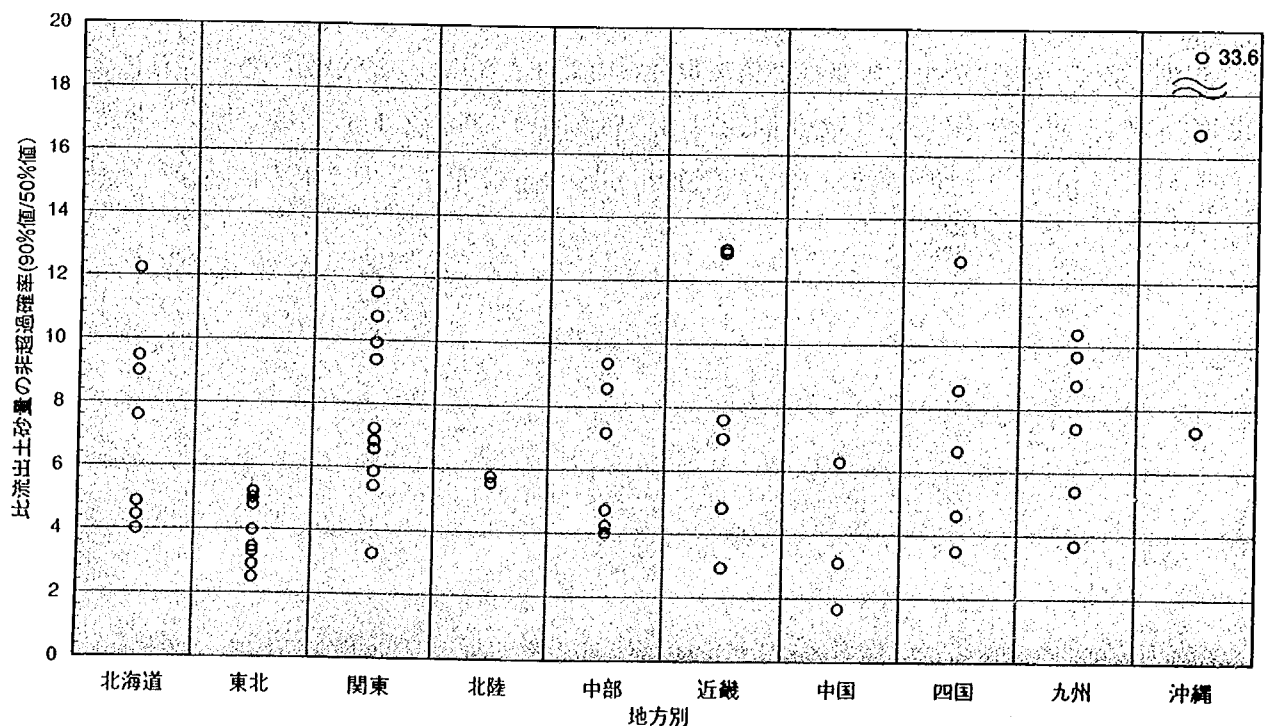
こうした年変動を評価するには確率評価を行う必要がある。図－5(2)は、川俣ダムの年間比流出土砂量の非超過確率との関係を、須賀ら³⁾が試みたと同様に対数正規確率紙上にプロットしたものであり、川俣ダムの年間比流出土砂量が対数正規分布により表されることが分かる。これによれば、非超過確率50%、即ち確率年が2年の年間比流出土砂量は約 $400\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ であり、非超過確率90%、即ち確率年10年の年間比流出土砂量約 $2,000\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ はその5倍の値となっており、年変動が非常に大きいことが窺われる。



図一 5 川俣ダムの比流出土砂量の経年変化と確率評価

図一 6 は、建設省、沖縄総合事務局、北海道開発局及び水資源開発公団ダムを対象に、年間比流出土砂量の非超過確率 90 % と 50 % の値の比を求め、地方別に整理したものである。両者の比は東北、中国地方で小さく、沖縄で大きい傾向が見られるが、概ね 3 ～ 10 の範囲にある。

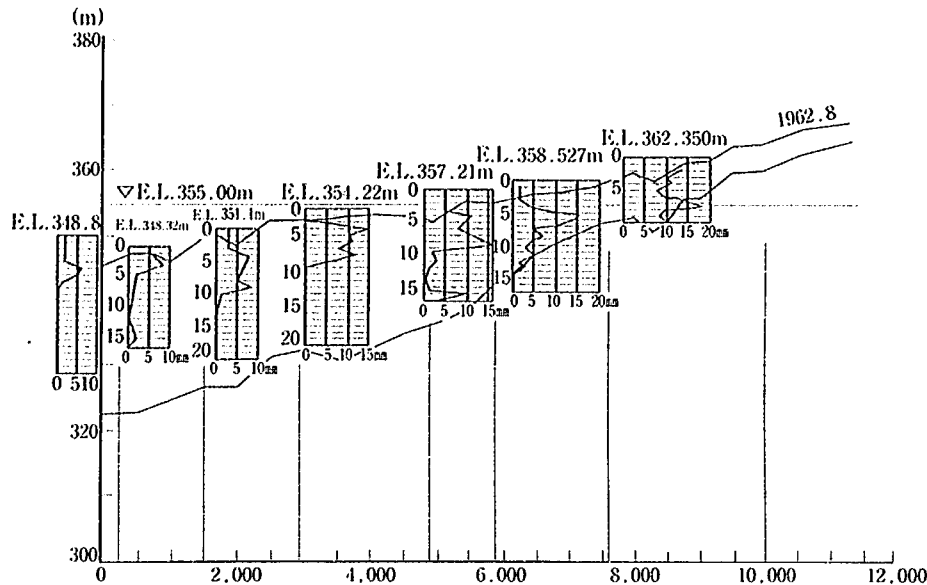
年間堆砂量が対数正規分布に従うものとすれば、堆砂量を非超過確率 50 % 値と図一 5 (2) に示す直線の傾きにて、その変動特性も含めて表示することができる。堆砂対策を論じていくものとする、今後は、2. 1 ～ 2. 2 のような平均量ではなく、このような確率評価による表示を心がけて行く必要がある。100 年堆砂量についても生起確率を用いた期待値による評価により、より精度の高い推定が可能である。



図一 6 比流出土砂量の非超過確立 90 % 値と 50 % 値の比

2. 4 堆積土砂の粒徑

流入土砂は貯水池内で分級作用を受け、この分級作用が堆砂形状に大きく作用する。また、貯砂ダムでは捕捉対象が比較的大きな粒徑に限られるなど、堆砂対策の検討では選定される対策手法や対策の効果が粒徑の影響を大きく受ける。こうした流入土砂の粒度分布に関する情報は、既設ダム堆砂の粒徑分布として存在する。流砂系の土砂管理の視点からは、下流域の河床構成材料と流砂の関係を知ることが必要であるが、貯水池堆砂はその貴重な情報源でもある。ここでは、既設貯水池の粒徑について簡単にみている。



図－7 泰阜ダム満砂時の粒徑分布⁴⁾

図－7は泰阜ダム（天竜川）堆砂のほぼ満砂時の粒度分布を示した⁴⁾もので、土砂の分級効果と堆砂の進行の関係を表す好例としてよく例示されるものである。大きな粒徑の土砂は貯水池の上流端（貯水位と河床の交わる位置）付近に肩を形成して堆積するが、堆砂の進行に伴い、この肩の位置が下流に移動することになる。一方、堆砂の肩の下流側では、粒徑の小さい土砂が貯水池底部に河床に平行、又は水平に堆積する。従って、大きな粒徑の堆砂は、層厚を大きくしつつある小さい粒徑の堆積層の上に被さるようにして進行する。粒徑の大きな土砂の堆砂進行が進めば、小さい粒徑はダムを通過する量が大きくなり、貯水空間が小さくなればもはや堆砂の表面には現れなくなる。図－7の粒度分布は、こうした分級のメカニズムと堆砂の進行の関係を明瞭に表している。多くのダム貯水池では、水位変化に伴う堆砂の移動の影響等の様々な影響があり、例えば、粒徑の大きな層と小さい層が互層をなす等の複雑な粒度分布を示すが、図－7で明瞭に見られるような分級効果による影響が複雑さを解釈する上でも基本的な要因となる。

堆砂の粒徑分布を知るためには、図－7に見られるようにボーリング調査が必要になり、それなりの費用を要するものである。このため、粒徑分布の調査は堆砂量が大きくなんらかの堆砂対策が必要になったダムで実施されている程度で、全国的な情報は得られていないのが現状である。こうした現状を考慮し、現在、建設省直轄ダムを中心に粒徑分布調査を全国的に実施しているところであるが、まだ十分な資料は得られていない。ここでは、全国的な概略値を知るため、2. 1で用いた堆砂量報告から検討を加えてみる。

堆砂量報告では、有効貯水容量内の堆砂量と堆砂容量等の有効容量外の堆砂量をそれぞれ報告することになっている。ここで、多くのダムにおいて有効容量外の容量は水平堆砂を仮定して貯水池底部に水平面をもって設けられている。図-7でも示したように、この容量内の堆砂成分の多くは粒径の比較的小さい浮遊成分と考えてよいであろう。また、肩を形成するような粒径の比較的大きい成分は、貯水池末端付近に堆積し、有効貯水容量内に堆積する成分が多いものと推定される。そこで、全堆砂量に占める有効容量外の堆砂率を求めれば細粒の浮遊成分割合の概略を知ることができるであろうと考え、表-3を作成した。表-3には、地方別の平均値を示したが、関東、中国、四国で50%程度の値を示している他は60~70%の値となっており、全国的にみて堆砂量の半分以上は浮遊成分が占めるものと推察される。因に、堆砂量の多い中部地方ではいくつかのダムで調査が行われており、鈴木²⁾は粒径1mm以下の細粒土砂の占める割合は、満砂しているダムを除き、60~80%であることを報告している。この値は、中部地方の有効容量外の堆砂率65%とほぼ同様のレベルにある。また、四国の大渡、石手川、野村の各ダムの調査結果によればダム位置付近の土砂は90%以上がシルトと粘土で構成されていることが示されており、浮遊成分の多くがシルト、粘土であることが推察される。庄川を対象とした芦田らの研究では、浮遊成分の境界となる粒径として0.1~0.2mmが考えられるとしており、四国での調査結果とも附合するものである。

繰り返しになるが、粒径分布のデータは余り得られていない。また、得られたデータに対する粒径の構成比という整理も十分ではない。流砂系の流下土砂の把握のためにもその体系だった調査が急がれている。

表-3 有効容量外堆砂量の全堆砂量に占める割合

地方	平成8年度 堆砂量(千 m^3)			有効容量外/ 全堆砂量	対象ダム 数
	有効容量内	有効容量外	合計		
北海道	26,200	53,081	79,281	0.67	77
東北	23,035	50,036	73,071	0.68	80
関東	43,765	38,431	82,196	0.47	52
北陸	52,302	140,210	192,512	0.73	101
中部	128,683	240,727	369,410	0.65	66
近畿	30,111	47,907	78,018	0.61	66
中国	13,945	14,099	28,044	0.50	83
四国	42,852	40,541	83,393	0.49	52
九州	41,251	71,624	112,875	0.63	109
沖縄	469	784	1,253	0.63	9
全国	402,613	697,440	1,100,053	0.63	695

3. 貯水池の土砂管理方策

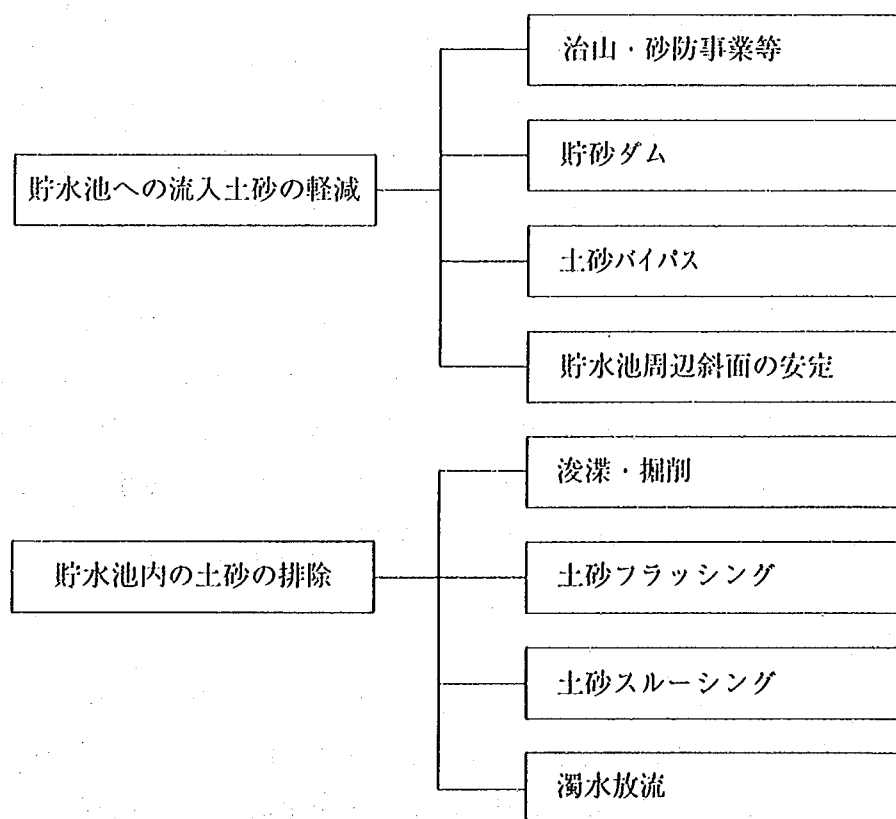
3. 1 土砂管理方策の概要

貯水池の土砂管理方策は、従来、堆砂対策として「貯水池への流入土砂の軽減」及び「貯水池内の土砂の排除」に大別して考えられている。このうち、「貯水池への流入土砂の軽減」のための具体的方策として、治山砂防事業等による生産・流出土砂量の低減、貯砂ダムによる土砂の捕捉と排除、土砂バイパス水路設置による土砂の迂回、貯水池周辺斜面の安定による流入防止がある。また、「貯水

池内の土砂の排除」のための方策として、貯水池内堆積土砂の掘削・浚渫、一時的な貯水位低下操作により流水の掃流力を回復させて土砂を排出するフラッシング、一定期間貯水を行わず、土砂を通過させるスルージング、放流設備等による濁水放流があり、これらをまとめて図－８に示す。このうち、スルージングは、わが国ではあまり用いられていない用語であるが、例えば治水専用ダムの様に、常時貯水する必要のないダムでは、放流設備を低位に設け、常時貯水池を空の状態にして土砂を通過させることができる。フラッシングが堆積土砂の排出の意味合いで用いられるのに対し、貯水池内での堆積防止の意味合いを有しており、その点では濁水放流と同様である。なお、平成８年に実施された貯水池堆砂に関する国際シンポジウム¹³⁾では、スルージングは、土砂流入の多い洪水期に貯水池運用を変更して貯水位を低位に維持してそのまま土砂を通過させる方法として示されており、先に述べた治水専用ダムの場合とは意味するものが若干異なってくる。今後、用語の定義も含め、土砂管理方策としての位置付けを整理していく必要がある。

ここで、堆砂対策としての分類である図－８を、流砂系の保全のための下流への土砂供給という観点でみると、土砂バイパスや土砂フラッシング、土砂スルージング、濁水放流を供給可能な方策として位置づけることができる。また、貯砂ダムや貯水池内の掘削、浚渫では搬出土砂を下流河川に還元することにより供給可能な方策となる。

以下では、貯水池周辺での対策について現況と課題を整理する。なお、土砂スルージングについては、わが国の堆砂対策としての位置づけもまだ明確でなく、また、基本的な現象については、土砂フラッシングにおけるフラッシング時間を非常に長くとしたものとして捕らえることが可能なので以下の詳細な説明については省略する。



図－８ 貯水池の土砂管理方策

3. 2 掘削・浚渫

(1) 掘削・浚渫による土砂採取量

図-8では、貯砂ダムと貯水池内の掘削・浚渫を別分類としているが、貯砂ダムは、陸上掘削を可能にする、また、粒径の比較的大きな土砂の堆砂位置を固定することにより、掘削を容易にするために設置されるものである。従って、捕捉した土砂を掘削排除することを前提に計画されるのが一般的であり、掘削のための補助手段として位置づけることもできる。ここでは、貯砂ダム及び貯水池内の掘削・浚渫を合わせて対象として記述する。なお、貯砂ダムは、平成6年現在、41の建設省所管ダムにおいて設置されており、増加する傾向にある。

掘削・浚渫はいかなるダムにおいても適用可能な最も一般的な堆砂の排除方法ということができる。図-9に、貯水池からの土砂採取量の経年変化を示す。図は、平成9年度に実施したアンケート結果（回答580ダム）を整理したものであり、10年平均で約390万 m^3 、大きな年では500万 m^3 を超える採取が行われていることが確認される。先に示したように、近年の年平均の堆砂量は2,000万 m^3 程度であり、堆積土砂の15%以上が採取されている計算になる。なお、採取経験のあるダムは、回答ダムの25%であった。

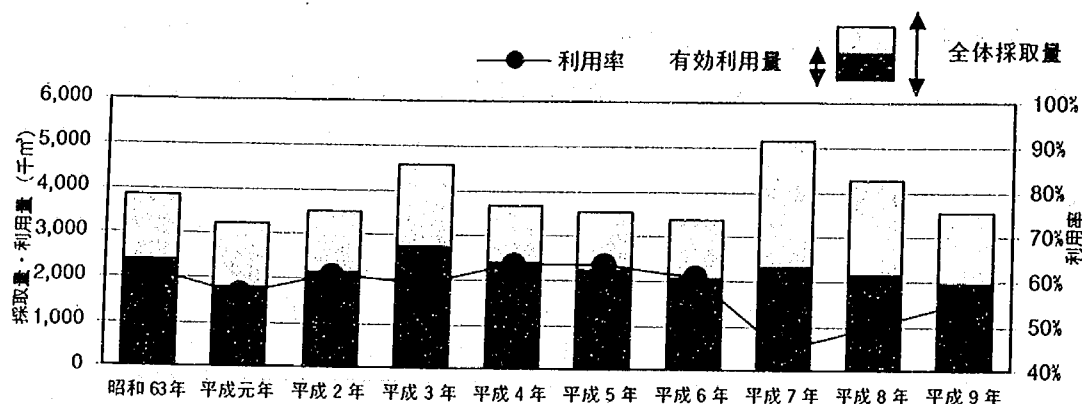


図-9 貯水池からの土砂採取量の推移

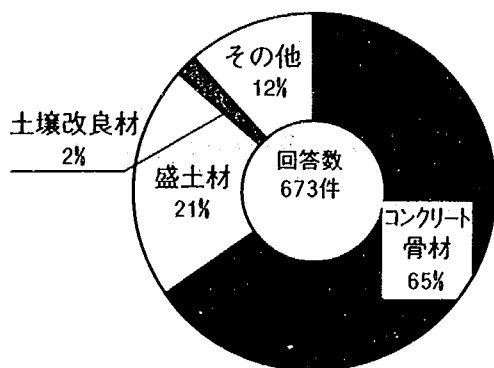
採取した土砂は搬出先が問題になる。流砂系として考えた場合は、下流河道が必要とする土砂量については、これを供給する必要がある。河川への還元であり、常時は冠水しない河床に置土しておき、洪水時にこれをフラッシュさせようという試みが試験的に実施されるようになっている。平成10年度には、天竜川秋葉ダムの堆砂1万 m^3 を下流ダムである船明ダム下流に運搬・置土する試験が実施され、出水による置土の侵食状況、下流河道への影響が調査されている。

(2) 堆砂の有効利用

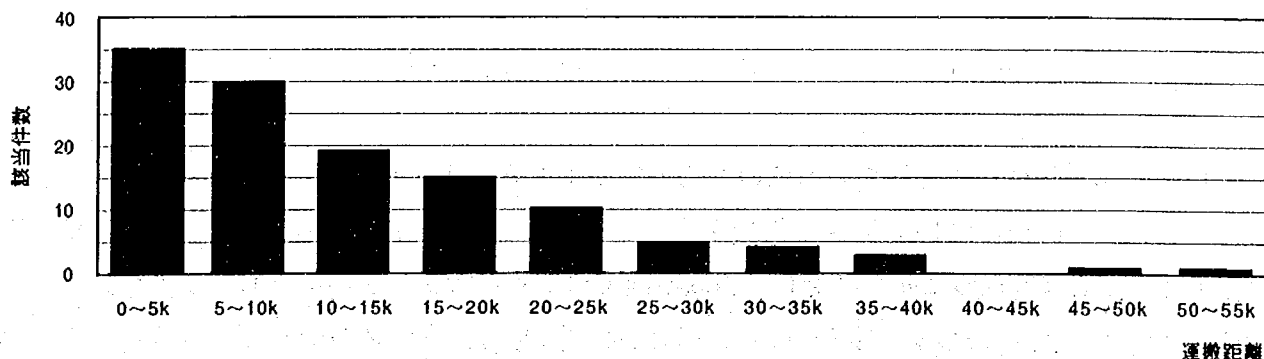
下流への必要供給量以外の土砂については、単に捨土を行うよりは、有効利用することが望ましい。図-9には、有効利用量についても併せて示してあるが、平均で約220万 m^3 、採取量の約60%が有効利用されている。図-10は、有効利用の目的を示したものであるが、コンクリート骨材としての利用が約6割を占め、これと盛土材料としての利用が約85%を占めている。通産省生活産業局窯業建材課の推計²⁾によれば、コンクリート骨材の需要量は平成8年度において約58千万トンであり、

コンクリート骨材としての利用量は骨材需要量のごく僅かを占めるに過ぎない。下流への必要供給量を犯さない範囲内での、利用の一層の推進が望まれるところである。ただし、解決すべき問題も多い。まず、コストの問題がある。ダム貯水池は山深くに存在し、需要地から遠いのが通例である。このため運搬コストが大きくなってしまう。図－11は採取土砂の運搬距離を示したものであるが、大半が20 km 以下となっている。また、材料としての問題もある。即ち、堆積土砂は貯水池末端においてもヘドロや木片等の混入が生じやすく、これらの分別・廃棄が必要になる。こうしたコストに係わる問題のほか、大量の土砂採取を行うためには、ダンプトラックの通行に対する道路整備が十分でないことや、騒音の問題なども解決しなければならない。骨材としての更なる利用のための検討が望まれるとはいえ、これを飛躍的に伸ばす方策が即座には見当たらないのが現状である。

有効利用については、従来の骨材や盛土利用の他、いくつかの新しい分野への試みもみられるようになっている。図－10に示されている土壌改良材としての利用はその一つである。貯水池の堆積土砂は、これまで農耕に利用されたことのない土砂であり、かつ水中に埋没していることから土壌伝染病菌に汚染されていない等農耕用土壌としていくつかの特徴がある。土壌改良材としての利用は現在のところ試験的な事例に過ぎないが、今後の展開が期待される。このほか、家畜飼料としての利用、などが試験的に実施、或いは研究されている。



図－10 有効利用の目的(10ヵ年平均)



図－11 採取土砂の運搬距離

3. 3 土砂フラッシング

(1) フラッシングによる堆砂形状変化

堆砂は、貯水池内の流速が極めて小さいことにより生じる。従って、貯水位を低下し、従来の河川の状態を回復させてやれば、自然の営力である流れの力により土砂を排出することができる。これが土砂フラッシングである（土砂フラッシングについて、わが国では寧ろ「排砂」の用語を用いる場合が多く見られるが、わが国で用いられている「排砂」には、貯水池から土砂を排出すること全般を意味する場合もあり、必ずしも定義が明確でない。このことを考慮し、ここでは、土砂フラッシングの用語を用いて記述を進めることとする）。

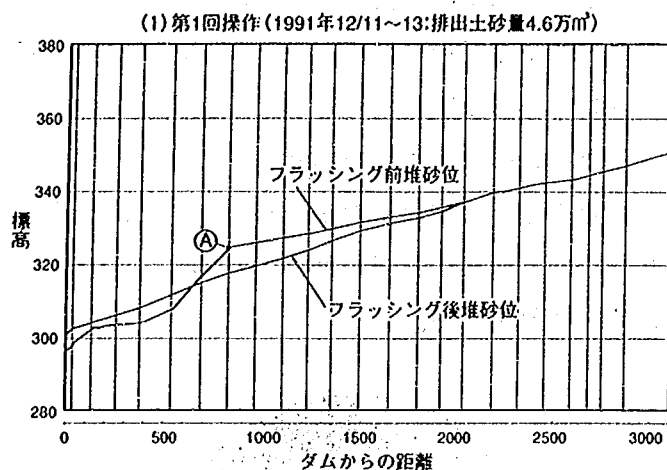


図- 12(1) フラッシングによる堆砂位変化 (出し平ダム)

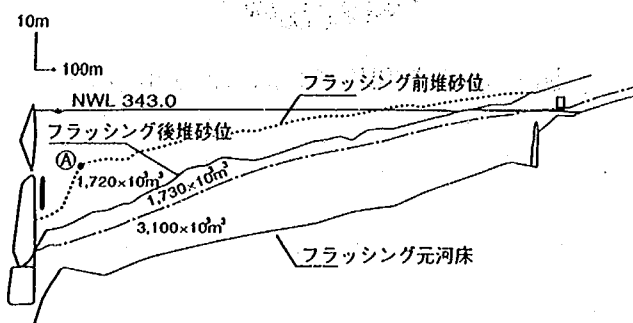


図- 12(2) フラッシングによる堆砂位変化 (出し平ダム)

図- 12 に、黒部川に建設されている関西電力の出し平ダム（堤高 76.7 m、総貯水容量 9.0 百万 m^3 ）でのフラッシング前後の堆砂形状変化例を示す^{6), 7)}。堆砂面の変動は、流下断面間の流砂量の不均衡により生じ、上流からの流砂量に対し、当該断面でのそれが大きければ低下し、小さければ上昇する。図- 12(1)、(2)の堆砂形状変化は、こうした堆砂面変動と流砂量の関係により次のように簡単に理解することができる。今、図中に示した点Aに着目すると、これより下流では勾配が非常に大きく、上流では小さい。従って、点Aより下流での流速は極めて大きく流砂量も大きい。これに対し、

上流での流速は小さく流砂量も小さい。従って、堆砂面の低下は点Aにおいて急激に生じ、これが上下流に伝播していく。ここで、貯水池下流端の水位はフラッシング施設の敷高により固定されるため、堆砂が施設敷高に達していれば、これが堆砂形状の下流端の固定点となる。また、堆砂が達していなければ、フラッシングにより堆砂が下流に移動する、つまり堆砂を引き込む形態となる。最初のフラッシング操作であった図-12(1)には、こうした堆砂の引き込みが僅かではあるが見られている。

フラッシング操作による堆砂形状の変化は概念的には上記のように把握することができる。ただし、実際の問題では、これに上下流方向での粒度分布の変化や三次元的なみお筋の形成が生じ、非常に複雑な問題となる。今後の重要な研究問題である。

水位低下による土砂の排出は、発電ダムの取水工の埋没を防ぐためなどのため、従来から実施されてきたものである⁸⁾。しかし、これらは水位低下規模の小さいものであった。図示した出し平ダムの例は、大規模貯水池の全域に亘り水位を低下させたものであり、わが国最大規模のフラッシング操作といつてよい。同様のフラッシングが、出し平ダム下流に建設中の宇奈月ダム（堤高 97 m、総貯水容量 24.7 百万 m³）でも計画されており、将来的には両者を連携させたフラッシング操作、いい換えると流砂系の管理が必要とされている。なお、図-12 に示した出し平ダムのフラッシング操作実績を図-13¹⁷⁾に示す。図-12(1)、(2)に示したのは、これまでの4回の操作のうち第1（図-12(1)）及び第4回目（図-12(2)）の結果である。172 万 m³を排出した第4回目のフラッシングは、大出水に伴う異常堆砂に対し実施されたもので、約 200m³ / s の流量を用い、12 時間の開水路流によるフラッシングが行われている。

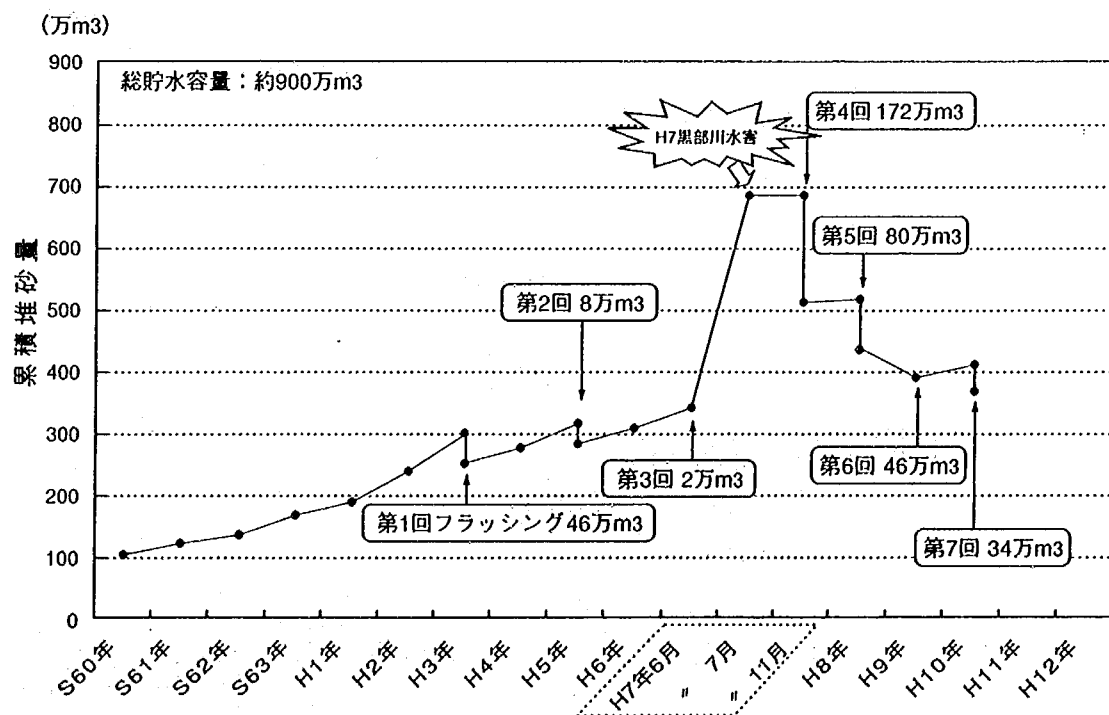


図-13 出し平ダムの堆砂量の推移

(2) フラッシング施設

フラッシング施設はダムの下位部に設けられ、高圧下での止水機能を有する必要があることは勿論であるが、その使用目的から、併せて次のような機能を有しなければならない。

①開水路流にてフラッシング時流量を土砂と一緒にスムーズに排出できる。

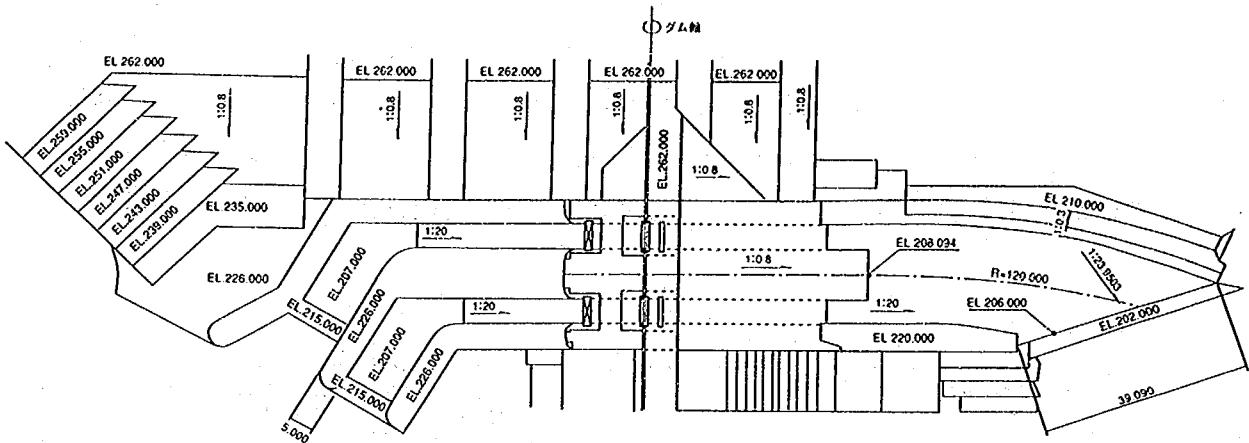
②水位低下操作及び土砂を含む流れの遮断操作が確実にできる。

③土砂の摩耗、損傷に対する耐久性をもつ。

上記について、宇奈月ダムの例により、その対応を見てみる。図-14に宇奈月ダムのフラッシング施設を示す。フラッシング設備は左岸の地山上に2条設けられており、堤体通過部上流には地形形状に沿わせた流入水路が設けられている。これは、上流の地形が湾曲しており、フラッシングのダム位置での流れが左岸に片寄ることを考慮しての設定であり、①の機能確保のための対応である。

②、③は土砂の流下に関係するものである。宇奈月ダムでは年平均流入土砂量が140万 m^3 と推定されており、このような大量の土砂の通過に対し、②、③の機能を保持するため様々な配慮がなされている。

フラッシング設備平面図



フラッシング設備標準断面図

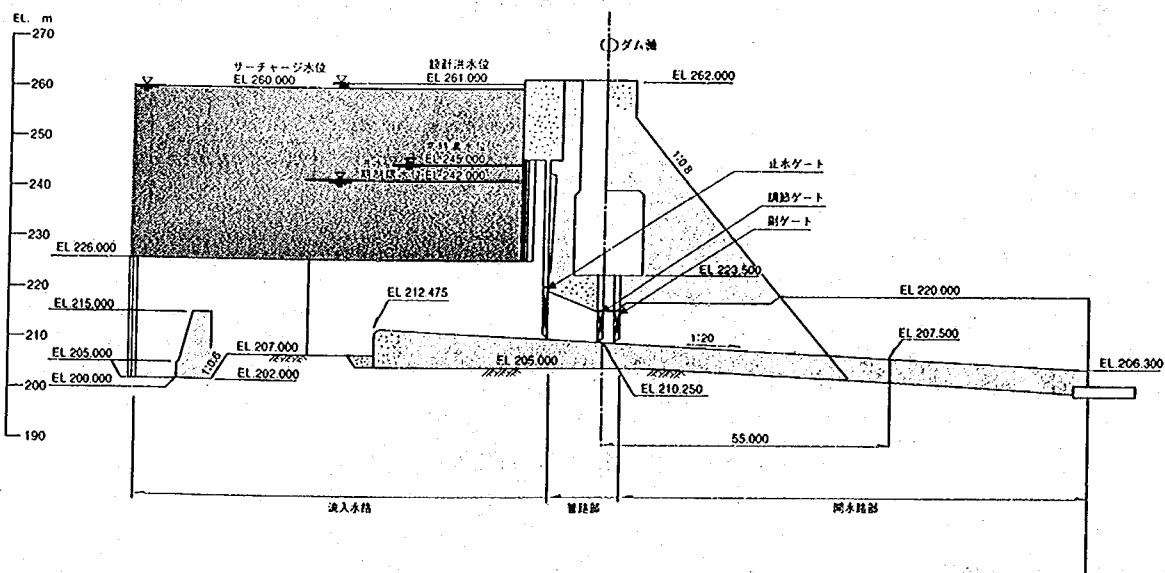


図-14 宇奈月ダムフラッシング施設

まず、流水制御を行うゲート設備であるが、ゲートは堤体内に設けられている調節ゲート、副ゲート及び管路上流端に設けられている止水ゲートの3種のゲートより構成されている。調節ゲートは止水とともに流量調節及び流水遮断を行う主ゲートであり、土砂の噛み込みに強い油圧式のパーティカルゲートを採用している。パーティカルゲートでは、ゲートが移動する際のガイドとなる戸溝が必要になるが、この部分では強い回流が生じ易く、土砂の巻込みによる損傷が懸念される。戸溝内の強い回流を回避するため、強度条件を満足する範囲でできるだけ戸溝幅を小さくする方向で検討がすすめられ、ナロウスロット（小幅戸溝）型のスライドゲートが採用されている。また、副ゲートは、調節ゲートの止水等の補助、損傷を受ける等の緊急時の代替施設として設置されているもので、調節ゲートと全く同じ機能を有している。

止水ゲートは、管路上流の施設の維持管理に用いられる。戸溝部については、調節ゲートと同じ問題を有しているが、ゲートは、維持管理時以外は上方に設置されていることから、通常は戸溝を塞ぐ保護枠を挿入して流れ及び土砂の侵入を防ぐ工夫がなされている。また、ゲートを閉める際には調節ゲートのように流れによる下方の土砂のフラッシュが期待されないことから、ダム水をポンプで加圧し噴流により土砂を掃流させるシステムが設けられている。

次に、水路であるが、宇奈月ダムでは維持補修の容易さに応じたライニングが行われている。まず補修が困難な止水ゲート上流については、耐摩耗性の高いステンレス材である SUS630、SUS304 を長期間の使用に耐えるようにライニング厚を設定して設けている。管路部についても SUS304 を用いているが、この部分については、補修が可能であり、ライニング厚を小さくするとともに、補修が容易なよう、50cm 四方のパネルをボルトにより固定する方式が採用されている。堤体内開水路部は更に補修が容易であり、通常の鋼材である SM41 をパネル状に設置するものとされ、更に最も補修が容易で、堤体への影響もない堤体下流の水路には石材が用いられている。なお、堤体上流の流入水路湾曲部については、流向変化に伴う損傷の影響が大きいと考えられることから、溜み上の施設として底面上に土砂を堆積させるセルフライニング方式を用いている。また、各材料のライニング厚は、各種材料の摩耗試験⁹⁾ 及び水理模型実験による土砂の影響の把握を通じて設定されている⁸⁾。

以上、宇奈月ダムのフラッシング施設を例に、施設の土砂対策を示した。出し平ダムでの対応にはこれと異なる部分もあるが、3枚のゲート配置や、開水路部でのパネル状の鋼板ライニングの使用など基本的な思想は同様である。

フラッシング施設としての最も大きな課題は摩耗・損傷対策である。これは後に述べる土砂バイパス施設についても同様である。出し平ダムでの実績や宇奈月ダムでの試験結果を整理し、他の施設への応用を検討していく必要があるのは勿論であるが、工事用の仮排水路トンネル等土砂の流下が考えられる他の水理構造物による調査等も実施していく必要があろう。その際、従来の素材の摩耗特性等を整理していく作業とともに、より低コストで耐摩耗性の高い素材の開発も必要と思われる。

土砂フラッシングや土砂バイパスの運用において、既に長い歴史を持つスイスにおいても、摩耗対策には依然として苦しんでいるようであり、例えば、スイスの Gebidem ダムではフラッシングを行う底部放流管下流のコンクリート摩耗が激しく、アルミナセメントを用いた耐摩耗コンクリート採用の試みがなされている。また、バイパストンネル¹⁰⁾ における通常のコンクリートライニングから鋼

板ライニングへの切替え (Palagnedra ダム)、種々のコンクリートライニング等の適用の試み (Paffensprung ダム、Runcahez ダム) が近年においても実施されている。摩耗問題は、新技術開発の余地の大きい技術といえよう。

(3) 土砂フラッシングにおける計画・運用上の課題

土砂フラッシングにおける計画・運用上の課題は、貯水池利用との整合性の問題と水質を中心とする下流河道への影響の問題にほぼまとめることができる。

貯水池は水を溜めることをその目的としている。従って、貯水位の低下操作はそのまま貯水池の利用効率を低下させることになる。貯水池利用のためには水位低下時間はできるだけ小さい方が望ましく、そのためには、短時間での効率のいいフラッシング操作とともに、如何にして水位低下後の貯水位回復を図るかが問題になる。フラッシング効果は、堆砂の進行具合、堆積粒径等の堆砂の性状及びフラッシング時の流水量で決まるものと考えられ、計画上は如何にして流水量を確保するかが問題になる。また、水位低下後の水位回復も同様である。宇奈月ダム、出し平ダムでは、貯水池容量に比べて流入流量が非常に大きいという特徴をもつ。宇奈月ダムの例をとれば、中小洪水の末期に水位低下を行えば、土砂排出のための流水量、時間が確保でき、また、ある程度洪水流量が減衰した後にゲートを閉じれば容易に貯水位を回復することができる。つまり、洪水末期の流量により、フラッシング及び水位の回復が可能である。このようなダムは余りないといっていであろう。

下流への影響については、特に出し平ダムの最初のフラッシング操作において暗灰色のヘドロ状の微細土砂が異臭を伴って流出し問題となった。これは、初期に堆積した土砂に含まれる有機物の腐食によるものとされ、フラッシング間隔が短く、土砂の滞留時間の短いその後のフラッシング操作では明確でなくなっている⁷⁾。一方、特に開水路流となるフラッシング開始時を中心に濁度が大きく溶存酸素濃度の小さい水が放流される現象は、フラッシングの宿命として存在しており、モニタリングを介しながら適切な操作方法の確立に向けての検討が継続されている。こうした水質に関連する問題のほか、一時期に大量に放出した土砂の下流河道での影響等も考えられ、今後息の長い調査を実施していく必要があるものと思われる。

大規模な土砂フラッシングに対するわが国の歴史は始まったばかりということができ、ここで、フラッシング計画・運用、特に水質管理を検討していく参考として、比較的長い歴史をもつスイス及びフランスでの事例を見てみる。

スイス¹⁴⁾では、水力発電を目的とする多くのダム建設が行われており、そのうち貯水容量の比較的小さいダムでは、堆砂の進行が早いため土砂フラッシングやバイパス、浚渫が行われている。これらの事例を表-4に示す。スイスにおけるフラッシング操作の詳細については、必ずしも明確ではないが、ダムの貯水容量も小さく、アルプスの豊富な水量によりフラッシング、水位回復が容易なものと思われる。例えば、Verbois ダムではレマン湖の水を用い、平均流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ という大流量を用いたフラッシングが行われている。

表-4 スイスの堆砂対策事例

堆砂対策手法	ダム名	完成年(年)	ダム形式	堤高(m)	満水標高(EL, m)	総貯水容量(百万m ³)	流域面積(km ²)	土砂堆積量(千m ³ /年)	排砂頻度(回/年)	備 考
フラッシングによる排砂	Gebidem	1967	アーチ式	122	1,437	8.7	200	350~400	1/1 (1969~)	流域の65%がスイス最大のアレッチ氷河。氷河の洗掘による揚流土砂(最大粒径30cm)を底部放流管より春~夏の融雪(氷)期に排出。
	Ferden	1975	アーチ式	67	1,311	1.7	139	不明	1/10 (1985)	流域にラング氷河。排砂用底部放流管あり。
	Ferrera	1961	重力式	28	1,443	0.23	160 Valle di Lei 流域除外	8	1/5 (1966~)	最上流に大容量貯水池(Vallo di Lei)があり、直列に並ぶ発電用の調整型貯水池。共に排砂用の底部放流管(Ferreraはカーテンウォールオリフィス形式、Bärenburgは堤体脇の地山に設置)あり。Ferreraは流入土砂量の約90%が排砂され現在の堆砂量は総貯水容量の37%に限定。
	Bärenburg	1960	重力式	64	1,084	1.0	530	20	1/5	
	Vervois	1943	重力式	34	369	12.0	2,000 レマン湖 流域除外	400	1/3 (1945~)	ロース河がレマン湖から流れ出た直後に位置。土砂はレマン湖とは別のアーヴ(Arve)川から供給。粒径は比較的細かい。一回当たり30~40時間、平均流量約500m ³ /sで排砂。貯水池直下流は仏国境。両国で排砂委員会設置。仏側の連続する貯水池も同時排砂実施。
バイパス水路による排砂	Palagnedra	1952 (1978 バイパス 完成)	重力式	72	486	6.0	136	80	1/1 (1980~) (年間5回 140時間)	水力発電用の調整池。底部放流管が当初より設置されず堆砂進行。完成25年後にバイパストンネル設置。トンネルが長く(1,685m)途中で湾曲。当初より水路底部のコンクリート摩耗損傷が発生し、水路入口部を鉄板で保護したが、年間約1mmの摩耗有り。10~15年で取替え必要。
	Rempen	1924 (1984 バイパス 完成)	重力式	32	642	0.36	22 Wägital 流域除外	不明	不明 (1985)	スイスの排砂事例の典型。水力発電用の大容量貯水池(Wägital, 149百万m ³)が上流に位置し、Rempenは調整池。底部放流管が当初より設置されフラッシングによる排砂を実施。排砂機能の増強のためにバイパストンネル新設。Wägitalは貯水容量の50%まで堆砂進行。
機械浚渫による排砂	Solis	1985 (1909)	重力式	61	824	1.5	900	30 (1968~79) 平均浚渫量	連続	既設ニゼラス貯水池(1909)の老朽化に伴い、再開発で下流に新ダムを建設。ニゼラス時代より、貯水池上流端でワイヤーロープ・バケット式の浚渫を実施し、オンサイトで骨材生産。底部放流管あり、将来はフラッシング排砂も実施検討。

表-4からも分かるように、スイスでは土砂フラッシングについてかなり長い経験がある。その中で、フラッシング時の水質についての検討が行われており、Palagnedraダムや Verbois ダム、Gebidemダムでは表-5に示すようなSSに関する管理基準¹²⁾が設けられている。管理基準は、SSの最大値及びSSと継続時間の関係により与えられているが、これは、Newcombeら¹³⁾によるストレス・インデックス(SI)の方法と一致する。即ち、Newcombeらは、魚や水生生物の影響度を表-6のように分類し、これと次のSIの関係を整理することにより、生物への影響度評価を提案している。

$$SI = \ln(SS \text{ 濃度 (ppm)}) \times \text{継続時間 (hr)}$$

土砂フラッシングにおける水質管理の一つの方向性を示唆するものといえよう。

表-5 スイスのフラッシング管理基準と実績値

ダム名(所在州)	排砂管理基準	実績値
Palagnedra (ティチーノ州)	最大 10,000 ppm, 24 hr 5,000 ppm 48hr 2,500 ppm, 48 hr 以上 1,250 ppm	(最大値) 10,000 ~ 40,000 ppm
Verbois (ジュネーブ州)	最大 25,000 ppm 15,000 ppm を長時間超えない	(最大値) 10,000 ~ 35,000 ppm
Gebidem (ヴァレー州)	2時間に限り最大 20,000 ppm まで 常時 10,000 ppm 以下	(最大値) 10,000 ~ 60,000 ppm

表－6 浮遊物が魚類及び水生生物に与える影響度(Newcombe ら¹³⁾)

影響度レベル	内 容
1 4	致死率 80 ～ 100 %
1 3	致死率 60 ～ 80 %
1 2	致死率 40 ～ 60 %、生息空間の重大な損傷
1 1	致死率 20 ～ 40 %
1 0	致死率 0 ～ 20 %
9	成長率の低下
8	生理学的ストレスおよび組織学的変化
7	生息空間の中程度の損傷
6	生物の不健全な状態
5	営巣行動の低下
4	食餌量の低下
3	忌避行動、隠れ場所の放棄
2	警戒反応
1	呼吸回数の増加

フランスでは、ローヌ河、イゼール河のダムにおいて、貯水池堆砂対策として3年に1回の割合でのフラッシングが実施されている。ローヌ河にある Genissiat ダム（堤高 104m、総貯水容量 53 百万 m³）の上流には、表－4 に示すスイスの Vervois ダムがあり、下流の Genissiat ダムにおいて、先行して水位低下を行った後、Vervois ダムの水位低下を行うという、国境を越えた連携操作が実施されている。

フランスでは、上記フラッシングを実施しているダムの他、毎年 10 を越えるダムで水位低下操作が実施されている。これは、10 年に一度、安全点検のため貯水池を空にしなければならないという制度に基づくものである¹⁴⁾。貯水池を空にすることにより、結果として土砂の排出が行われるが、表－7 に示すように、フラッシングとは全く異なる水位低下操作が行われており、興味深い。すなわち、フラッシング操作が、環境への影響が小さく、フラッシング効果の大きい河川流量の大きな時期に、土砂濃度の最大化を目標に実施されているのに対し、点検用の水位低下操作は、流量の小さい時期に、環境への影響が生じないように、浮遊性の土砂濃度が最小になるよう実施されている。

表－7 フランスにおけるフラッシング操作と点検用水位低下操作

操 作	土砂フラッシング	点検用水位低下
目 的	堆積土砂の排出	安全点検、補修
操作の目標	土砂濃度の最大化 (必要流量の最小化)	浮遊土砂濃度の最小化 (環境影響の最小化)
実施時期	冬期（雨期）で河川流量が大	夏季（乾期）で河川流量が小
実施期間	2 ～ 3 日	2 ～ 3 週間

表－7 の操作目標からも推察されるように、ダムの安全点検の制度制定に当たり、水位低下操作による環境への影響が重要な検討課題となった。このため、放流水質のモニタリングとモデル化及び水

質の生物への影響評価に関する多くの調査・研究が実施されているが、その一環として行われた実験では、魚類への影響が SS、DO と接触時間の関係により整理されており、SI と同様の整理が行われている。なお、文献 14) では、各々の貯水池は固有の特性をもっており、一般的な措置は推奨できないとされ、モニタリングによる息の長い逐次修正を含め、貯水池状況に応じた対応が必要であるとされている。点検用水位低下技術のみでなく、フラッシング運用技術確立のための一つの姿勢を示している。

3. 4 土砂バイパス

(1) 土砂バイパスの効果

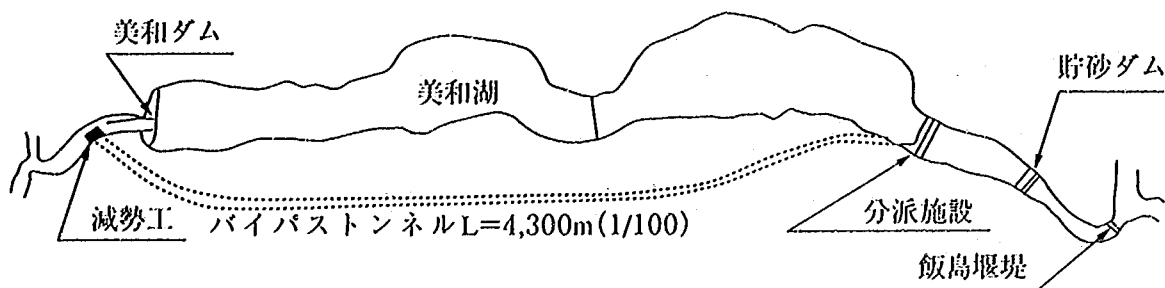
土砂輸送に自然の営力を利用する代表的な方法として土砂フラッシングの他土砂バイパスがある。土砂は流れにより流送され、貯水池に流入すると堆積する。そこで、貯水池に入る前に流れを迂回水路（通常はトンネル）に導き、直接ダム下流に放流すれば、土砂は貯水池には入らず、堆砂をなくすることができる。同時に下流に従前の土砂供給を行うことができる。これが土砂バイパスである。言うまでもなく貯水池は、流水を貯留するために設けられるものである。従って、全ての流水をバイパスすることはできないが、運用方法によってはかなりの土砂の流入を低減することができる。

ここで、土砂バイパスが検討されている天竜川の美和ダム¹⁹⁾（堤高 69.1 m, 総貯水容量 34 百万 m^3 ）の例を見てみよう。美和ダムは、昭和 34 年に完成した重力式コンクリートダムであるが、度重なる大出水により、予想を遥かに上回る堆砂が生じたため、従来よりバックホウによる陸上掘削、ポンプ浚渫船による対策が行われてきた。しかしながら、平成元年の全堆砂量は 11 百万 m^3 と総貯水容量の 30 %を超え、更に増加する傾向も見られたため、7 百万 m^3 の掘削・浚渫及び流入土砂対策を中心とする再開発事業が計画・実施されている。図-15 は、天竜川の美和ダムの土砂対策計画を示したものである。美和ダムでは堆砂実績等から年平均の流入土砂量が 68.5 万 m^3 と推定されており、このうち 77 %に当たる 52.5 万 m^3 が微細なウォッシュロードである。こうした流入土砂の特性を把握の上、土砂対策が検討され、

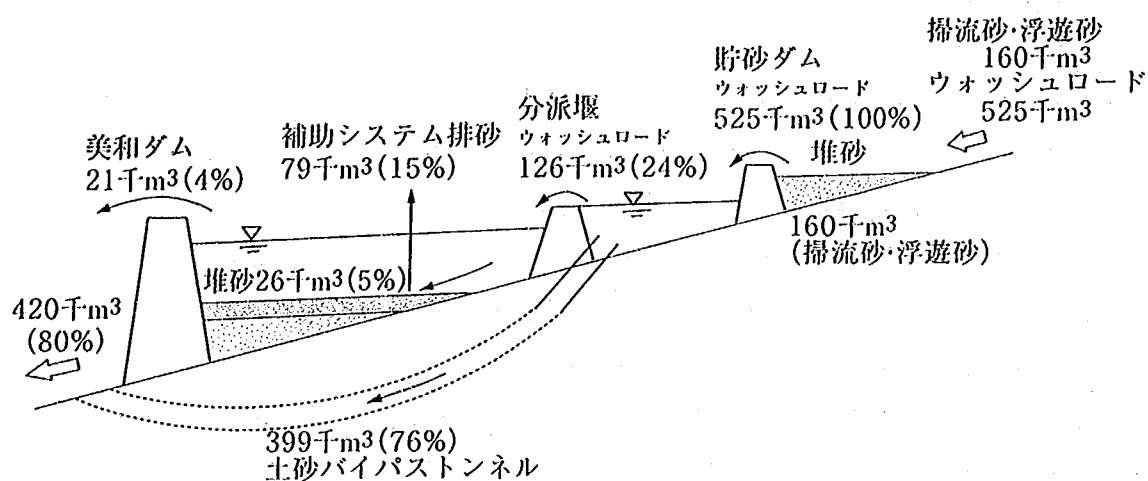
①掃流砂・浮遊砂については、貯砂ダム及びバイパス分流のため設けられる分派堰にて捕捉するとともに従来と同様に有効利用に供する。

②ウォッシュロードについては、土砂バイパスによりバイパスする。

計画が採用されている。土砂バイパスは利水及び洪水処理計画における放流量の範囲内で実施される計画であるが、土砂の流下は出水時になされ、無効放流を伴うことが多いことから、全流入ウォッシュロードの 76 %のバイパスが可能とされている。



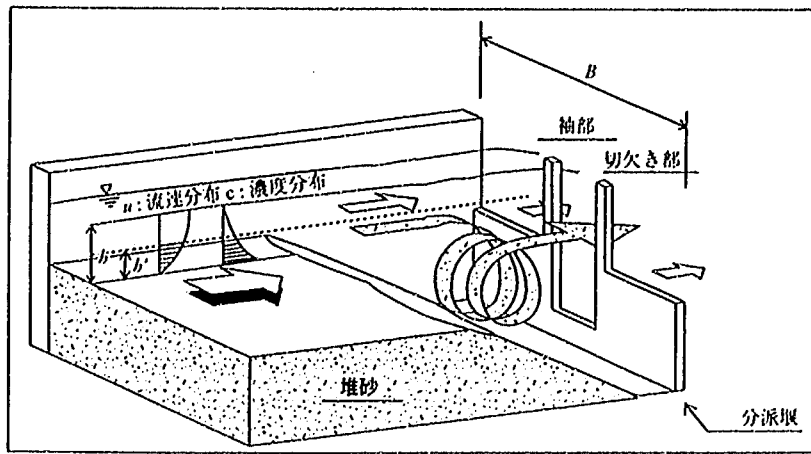
(1) 施設平面



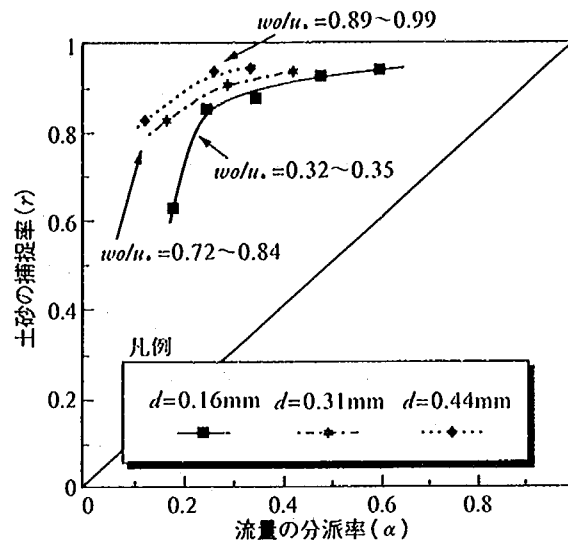
(2) 年平均土砂量収支

図-15 美和ダムの土砂対策計画

美和ダムではウォッシュロード成分が非常に多いこともあり、バイパスの対象はウォッシュロードのみとされている。このことは、トンネルを始めとする各種構造物の摩耗・損傷の観点からも意味のある設定といえることができる。一方、少ないバイパス水量で多くのバイパス土砂量を得るというバイパスの効率の面からは、実は粒径の大きな土砂ほど効率をよくすることが可能である。例を示そう。図-16は、水理実験で得られた分派堰上流の流況例¹⁰⁾である。分派堰上流で回流が生じており、この回流がバイパス水路（図では切欠き部）へと導かれる流況を表しているが、粒径の大きな土砂はこの回流に捕捉されやすく、図のような流況の形成により、土砂のバイパス効率を高めることが可能である。図-17は図-16の流況時の土砂の捕捉率と流量の分派率の関係を w_0 / u_* （ここに、 w_0 ：土粒子の沈降速度、 u_* ：摩擦速度）をパラメータに表したものであるが、粒径が大きく沈降速度が大きいほど土砂の捕捉率が大きくなり、小さな流量のバイパスにより大半の土砂のバイパスが可能であることが分かる。因に、ウォッシュロードのように粒径が小さく、流れとの混合が激しい成分では、土砂の捕捉率は流量の分派率にほぼ等しくなると考えられる。



図一 16 分派堰上流の流況例



図一 17 土砂の補捉率と流量の分派率

(2) 掃流砂・浮遊砂の土砂バイパス

大きな粒径の土砂バイパスは、バイパスの効率を高くすることができ、また、下流への土砂供給の観点からも今後検討を進めるべき課題と考えるが、抱えている課題も小さくない。まず、摩耗問題があり、これについては既に述べた。経験のあるスイス等の海外での事例も含めて実績を整理するとともに、技術開発の一層の推進が望まれる。わが国では関西電力の旭ダム¹⁷⁾が平成10年より運用を始めている。掃流砂も含めての排出が行われており、今後のモニタリングが期待される。また、高いバイパス効率の獲得は、バイパス流れの土砂濃度が大きくなることを意味しており、トンネルの土砂流下能力、下流河道への影響についての慎重な対応が必要になる。この土砂流下能力及び下流河道への影響の問題は、操作の関係からも生じるので注意が必要である。即ち、バイパス水路と貯水池への分流は分派堰により行われるのが通常であり、分派位置の水位は、流量が大きくなると水位が上昇し、小さくなると低下する。つまり、洪水末期の水位低下時には土砂フラッシングと同じ状況が分派堰において生じることになるが、このとき、水位低下初期の堆砂下流端付近の勾配は非常に大きく、大量の土砂流下が生じる可能性がある。トンネル内の土砂の堆積は、土砂フラッシング施設のように管長が短い場合にはそれほど問題にならないが、バイパストンネルのように延長が長い場合には、トンネ

ルの閉塞に伴う流量変動の発生等、著しい流況悪化を生じる可能性があるので注意が必要である。堆積対策については、旭ダムの水理模型実験¹⁰⁾においてトンネル上方からの給気が有効であったとされているが、トンネルの土砂輸送力の解明も含め、今後更に検討していく必要がある。

土砂バイパスは、土砂フラッシングのように貯水位を下げずに、つまり、貯水池の運用ルールを変えずに採用することが可能な方策である。従って、既設ダムでの利用も可能な方策であり、美和ダム、旭ダムともに、既設ダムの堆砂対策施設として考えられている。また、表-4に示したスイスのRenpenダムでは、土砂バイパスのもつこのような利点が着目され、堆砂対策の増強手段としてフラッシング施設に追加して設置が行われている。土砂バイパスは、下流に土砂を供給する機能を有することも含め、発展の可能性を持つ方法であり、計画・設計手法の確立のための一層の研究の進展が望まれる。

3. 5 土砂捕捉量の制御

先にも述べたように、流入土砂の全てが貯水池に堆積するわけではない、微細粒径の土砂は洪水吐きなどの放流により排出される成分がある。こうした放流設備からの排出を積極的に行えば、微細粒子の堆積量を軽減させるとともに、下流への土砂供給にもなる。微細成分の積極的な放出を行う具体的な方策として、選択取水設備を設置し、出水時に貯水池内の濁度の高い標高の水を取水・放流する、或いは、出水時に高濁度な流れが流入すると推定される標高付近に洪水吐きを設ける等の方策がとられてきたが、これらは、寧ろ濁水長期化対策の一環として実施されてきているのが実情であり、今後は堆砂対策としての評価を行っていく必要があるものと思われる。実際、堆砂対策としての効果はほとんど議論されておらず、分かっていない。

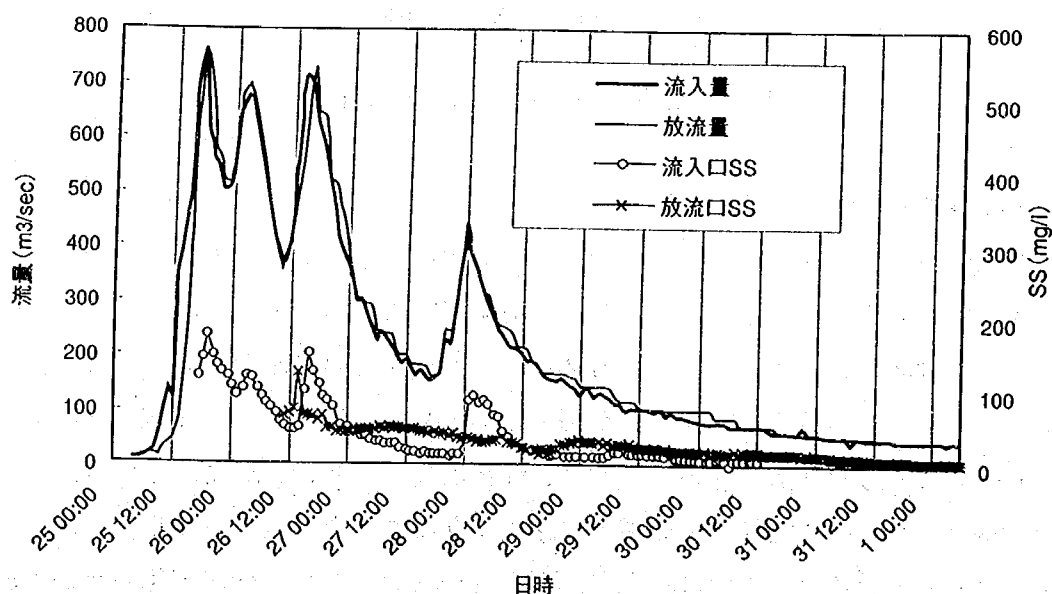
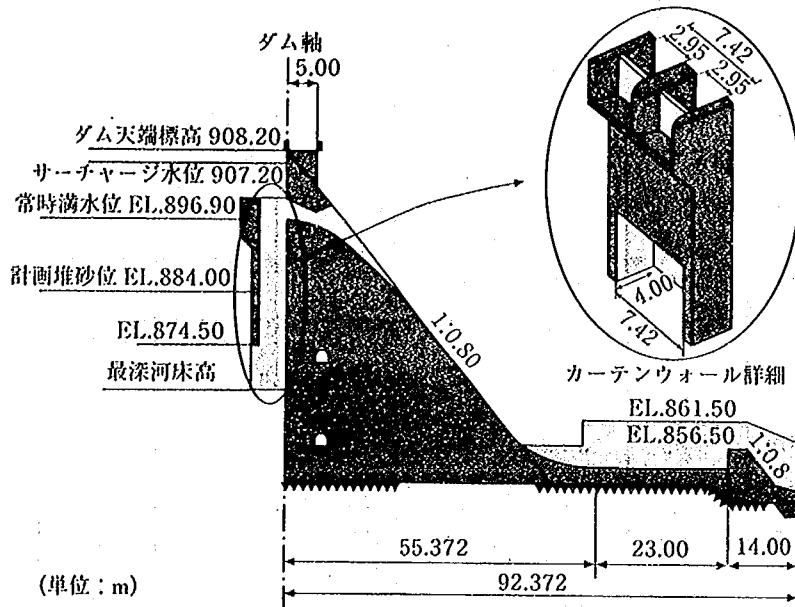


図-18 流入SSと放流SSの例(大渡ダム)

上記状況に鑑み、現在全国の15ダムにおいて、微細粒子の捕捉状況の調査を実施している。図-18は仁淀川の大渡ダム(堤高96m、総貯水容量66百万m³)の貯水池流入口及び放流口でのSS変化を示したものである。図より、流入SSの多くが放流されていることが推察される。平成10年度の大渡ダム及び肱川の野村ダム(堤高60m、総貯水容量16百万m³)の出水時の観測結果によれば、貯

水池に流入する SS 成分の 50 ～ 70% は放流設備により下流に排出されている結果となっており、かなりの土砂の排出が行われている。また、平成 9 年の手取川ダム（堤高 153 m，総貯水容量 231 百万 m³）観測結果を用いた試算によると、平成 9 年の 1 年間の微細粒子の排出量は約 30 % であり、微細成分については、ある程度の量は下流に排出されているといっているようである。



図－ 19 片桐ダムのカーテンウォール式常用洪水吐き

図－ 19 は、積極的な排出を目的とした片桐ダム¹⁹⁾（堤高 59.2 m，総貯水容量 1.8 百万 m³）の洪水吐きを示したものである。片桐ダムは自然調節方式の多目的ダムであり、出水時の水は貯水池の比較的高位標高に設けられたオリフィスより放流される。この高位標高からの放流では、比較的濁度の小さい水の放流がなされ堆砂が進行し易くなると考えられ、濁度が高いと推定される低部の水を放流できるように、上流側にカーテンウォールが設けられている。今後、微細粒子の放出状況を明らかにし、放出に関連するパラメータを整理するとともに、こうした堆砂対策としての放流設備の配置・運用方法についても、その効果を明らかにし、計画手法を提示していく必要があるだろう。その際、堆砂問題のみでなく、貯水池がもつ各種問題を総合的に捉えていく必要があることは言うまでもない。放流設備の配置・運用は、水温や水質にも影響を与えるからである。

3. 6 斜面の安定

堆砂はそのほとんどは上流河道から流入すると考えられるが、貯水池のり面からの流入も存在する。このため貯水池のり面の崩壊地等の保全も貯水池周辺での堆砂対策として位置づけることができる。現在、このための事業としてⅠ種及びⅡ種のグリーンベルト事業²⁰⁾が実施されている。

Ⅰ種事業は、河川区域内ののり面崩壊地等の保全整備が必要な区域において、護岸、板柵工、法枠工、植採、芝付工等を実施する事業であり、早明浦ダム、松原・下笠ダム等で実施されている。また、Ⅱ種事業はダム周辺の概ね 3 km 以内の崩壊地等において、林地所有者と分収林契約を結び、植栽等を都道府県が主体として実施する予算補助事業であり、早明浦ダムや白川ダム等で実施されてきてい

る。表－8にⅡ種事業の実績を示す。コナラ、ブナ等の広葉落葉樹が積極的に導入されており、平成6年度までに植栽面積で約47haの整備が行われている。

これらの斜面对策は、定性的には流入土砂対策としての効果が理解されるが、定量的な効果の把握はなされておらず、今後、この方面での研究が必要であろう。

表－8 グリーンベルトⅡ種事業の実績

ダム名	内容区分	63年度	元年度	2年度	3年度	4年度	5年度	6年度	7年度
早明浦	植栽面積 (ha)	1.33	0.93	6.6	9.8	9.6	11.2	3.75	0.68
	植栽樹種	コナラ ヤシブシ	コナラ ヤシブシ	ブナ ヤマザクラ モミ等	ブナ ヤマザクラ モミ等	コナラ ヤシブシ	コナラ ヤシブシ	コナラ ヤシブシ	コナラ ヤシブシ
白 川	植栽面積 (ha)	—	0.05	0.41	—	0.47	0.22	0.49	1.62
	植栽樹種	—	ヤマハノキ ヤシブシ	ヤマハノキ ミズナラ スキ	—	ヤマハノキ ヤシブシ	ヤマハノキ ヤシブシ ミズナラ	ヤマハノキ ヤシブシ	ヤマハノキ ヤシブシ
九頭竜	植栽面積 (ha)	0.08	0.08	0.07	0.05	—	—	—	—
	植栽樹種	ヤマハノキ ヤシブシ	ヤマハノキ コナラ	ヤマハノキ コナラ	ヤマハノキ コナラ	—	—	—	—
早出川	植栽面積 (ha)	—	0.53	0.25	—	—	—	—	—
	植栽樹種	—	ヤマハノキ ブナ ミズナラ アキグミ	ヤマハノキ ブナ	—	—	—	—	—

4. あとがき

以上、ダム貯水池の堆砂の現状を整理するとともに、ダム堆砂対策の現状と課題について整理した。

最初にも述べたように、流砂系として河川をみる場合、ダムの堆砂はダムのみの問題に留まらない。

例えば、ここで紹介した土砂フラッシングや土砂バイパス技術を確立していくためには、どのような土砂がどのように排出されるかといった堆砂対策としての知見は勿論、下流に供給された土砂が、どのような影響、或いは効果を有するかの知見も必要となる。こうした知見が整理されていけば、ダムを流水のみならず土砂の調節装置として、より有効に機能させていくことができるであろう。研究の道程はまだ長いが、着実な歩みを期待したい。

参考文献

- 1) 建設省河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会報告：流砂系の総合的な土砂管理に向けて、1998、7月
- 2) 芦田和男、奥村武信：ダム堆砂に関する研究、京都大学防災研究所年度報告、1974
- 3) 須賀堯三、島貫徹、徳永敏朗：全国河川上流部の流出土砂量、土木技術資料、Vol.18、No.2、1976
- 4) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設、昭和62年版、第2巻、調査編、p.316、1987
- 5) 鈴木徳行：ダム堆砂に関する排砂対策について、ダム技術、Vol.4-2、1986
- 6) M.Tezuka, J.Yamamoto: Predicting method of sediment flushing system in reservoir, ICOLD, Q.69, R26, 1994
- 7) T.Kokubo, M.Itakura, M.Harada: Prediction methods and actual results on flushing of accumulated deposits from Dashidaira reservoir, ICOLD, Q.74, R.47, 1997
- 8) S.Takebayasi, S.Takasu: Historical development of reservoir sediment flushing facilities in Japan, ICOLD, Q71, R.28, 1994
- 9) T.Toyoda, S.Takasu: Erosion control for sediment flushing facilities, ICOLD, Q.65, R.20, 1991
- 10) D.L.Vischer, W.H.Hager, C.Casanova, B.Joos, P.Lier, O.Martini: Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation, ICOLD, Q.74, R37, 1997
- 11) 角哲也：流れ下る氷河—スイスにおける貯水池土砂管理—、ダム技術、No.118、1996
- 12) 角哲也：ダム貯水池からの排砂と排砂時の放流水質管理、ダム技術、No.127、1997
- 13) C.P.Newcombe, D.D. Macdonald : Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems, North American Journal of Fisheries management 11, 1991
- 14) J.Rambaud, M.Clair, J.Sandret, J.P.Frau, M.Khalanski, C.Ricard: Experience acquise dans les vidanges de retenues par electricite de France et la compagnie nationale du Rhone, ICOLD, Q.60, R.30, 1988
- 15) 竹林征三、館野悟、高柳淳二、尾作悦男：美和ダム排砂バイパスシステムの計画—美和ダム再開発事業—、大ダム、No.35、1992
- 16) 柏井条介、本田敏也、菅原崇之：ダム貯水池の土砂バイパス施設分派特性、土木技術資料、No.37、Vol.12、1995
- 17) 森本浩：関西電力におけるダムの排砂事例—ダムと河川の新たな共生時代に向けて—、河川、No.628、1998
- 18) 原田稔、森本浩、小久保鉄也：貯水池のバイパス排砂システムに関する実験的研究、ダム工学、No.24、1996
- 19) 塚原千明、角哲也、宮井貴大、柏井条介：カーテンウォール付常用洪水吐きの土砂放流特性、土木技術資料、Vol.40、No.11、1998
- 20) 金蔵法義：ダム貯水池の堆砂対策の現状、ダム年鑑1997年版、(財)日本ダム協会
- 21) 角哲也：世界の堆砂問題—貯水池堆砂シンポジウム—、土木技術資料、Vol.39、No.3、1997
- 22) 工藤勝弘：骨材産業の現状と今後の課題、セメント・コンクリート、No.618、1998

橋梁の技術基準と安全性

構造橋梁部長 岡原 美知夫

橋梁の技術基準と安全性

構造橋梁部長 岡原美知夫

概要：

道路橋示方書を始めとして橋梁に関する技術基準の整備が進められているが、どのような設計を行っても絶対的な安全が実現できないのは事実であり、安全性とコストをどのように社会的に調和させるかが本質的な問題として常に存在する。阪神大震災後、従来の設計実績に従うのがむしろ否定的であり、創造的に安全性レベルを決めなければならない状況である。

橋梁の被害要因として、地震、洪水、地盤変位（地滑り、沈下、側方流動）、船舶の衝突等があるが、過去に起こった橋梁の被害を見てみると、被害橋梁の数から見れば洪水による被害が圧倒的に多く、また阪神大震災では阪神高速道路を始め幹線道路の橋梁に大きな被害が発生した。橋梁の安全性（架設時や常時供用時を除く）に対して主たる影響を持つのは地震と洪水であると考えてよさそうである。日本の基準と海外の基準とを比較しながら、また橋梁の被害例を紹介しながら地震と洪水に対する橋梁の技術基準と安全性について述べる。

1. まえがき

図一1は最近起こった自然災害（地滑り、地震、洪水、雪崩、火山）で大きな被害を道路に与えた災害を示している。この中で道路に限らず人命、社会資本に甚大な被害を与えたのは、1995年1月17日に起こった兵庫県南部地震である。阪神大震災では、土木建築に関するほとんどすべての種類の構造物で大きな被害を受けた。地震直後に出された単なる地震被害報告から被害を詳細に分析・解析した報告書も多く出されている。これらの報告書では、内陸直下型地震、震災の帯、地震動の増幅、衝撃的な地震動、レキ質土の液状化、地盤流動、厚い鋼材の脆性破壊、RC橋脚のせん断破壊、鉄筋圧接部の破断、地下構造物の破壊、基礎構造物の破壊、等々従来あまり見られなかった現象を表現する単語が頻繁に使われている。それだけこの地震は未知のあるいは希な経験を我々に与えたことを示しているといえる。これを契機に地震に対する研究は進展してきており、それを受けて各機関において技術基準の改訂が行われてきている。

最近の洪水による橋梁被害として、例えば福島県・栃木県に於いて、平成10年8月末豪雨により大きな被害が発生している。また最近の海外の例では、平成10年10月末、中米ホンジュラス・ニカラグア等を襲った超大型ハリケーンミッチは多大の被害をもたらし、ホンジュラスでは80以上の橋梁が流失ないし損傷を受けたと伝えられている。このように、洪水により頻繁に橋梁流失の被害が生じている。中小橋梁の被害が多いとはいえ被害橋梁数から言えば圧倒的に洪水が被害要因となっている。ネットワーク上重要な橋梁については洪水に対して十分な対策が必要であることはいうまでもないが、繰り返し被害が発生していることは技術基準の整備が十分でないことも意味している。

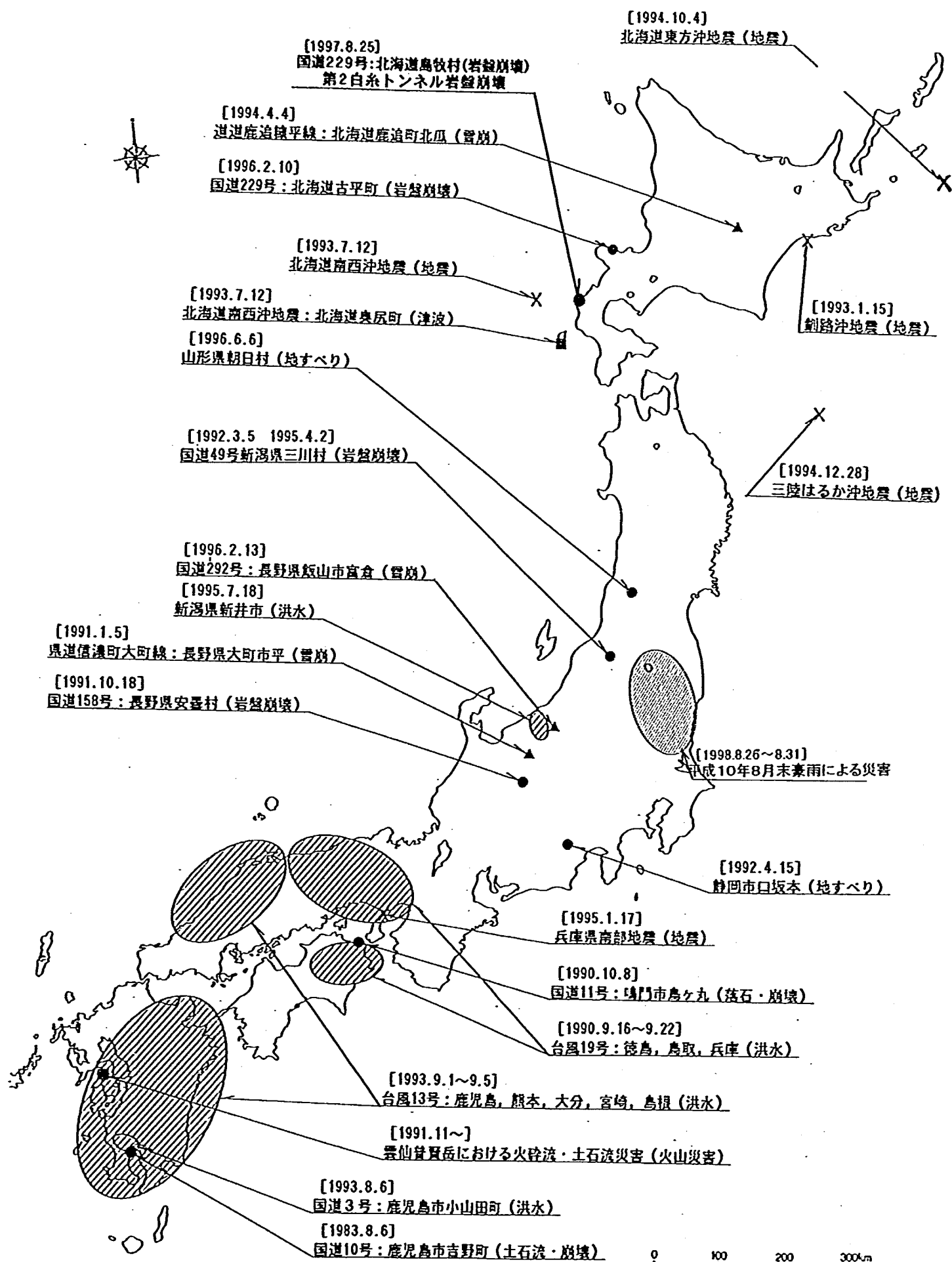


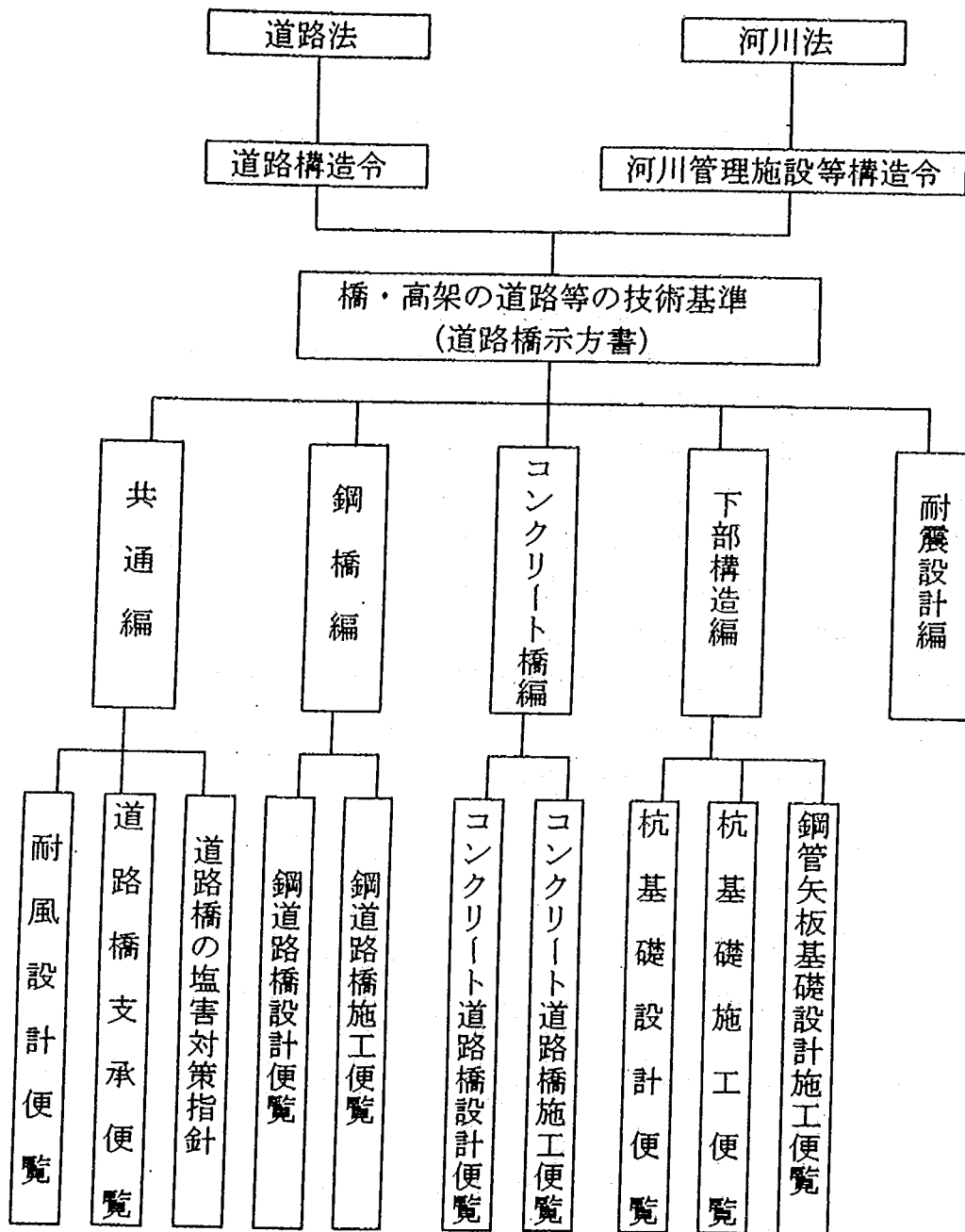
図-1 道路に大きな被害を与えた最近の自然災害

地震による液状化・地盤流動、地滑り、斜面地盤の崩壊、軟弱地盤の沈下など地盤工学的問題に起因する橋梁の被害も少なくない。地盤の挙動は不確定性が大きく正確な予測はきわめて難しいのが現状であろうが、予測精度を上げることにより不確定性に対する安全率を小さくできるので、コスト縮減の面からも地盤工学の問題に対する研究開発の意味は大きい。なお、地盤変状・破壊に対する荷重を見込むと現実的な設計が困難な場合もあることに注意する必要がある。その場合には、ルートやスパンの変更など計画段階に遡っての対応を考える必要がある。

2. 橋梁の技術基準体系

図一 2 に道路橋に関する技術基準の体系図を示すが、道路法、河川法を根拠に道路構造令、河川管理施設等構造令、橋・高架の道路等の技術基準としての道路橋示方書が制定されており、その下に各種指針・便覧が整備されている。道路法からの根拠条項を示すのが図一 3 である。道路橋示方書は、橋・高架の道路等の技術基準として都市局長・道路局長通達により行政に反映される。

河川管理施設等構造令は、河川法第 13 条（河川管理施設等の構造の基準）第 2 項に規定されているとおり、主要な河川管理施設（ダム、堤防、床止め、堰、水門及び樋門、揚水機場、取水塔、橋並びに伏せ越し）について、河川管理上必要とされる一般的技術基準を定めたものである。これによれば、河川区域内に設ける橋台及び橋脚の構造の原則は、計画高水位に対して安全な構造であること、計画高水位以下の水位の洪水の流下を妨げないこと、付近の河岸及び河川管理施設の構造に著しい支障を及ぼさないこと、橋台または橋脚に接続する河床及び高水敷の洗掘防止について適切に配慮されたものであることとされている。現行の河川管理施設等構造令は昭和 53 年に制定され、平成 9 年に一部改正された。



法
政令
通達

指針・便覧

学会基準
(参考)

土木学会 コンクリート標準示方書

地盤工学会 地盤調査法
杭の鉛直載荷試験基準

図ー2 道路橋に関する技術基準の体系

道路法（昭和 27 年法律第 180 号）

第 29 条

「道路の構造は、当該道路の存する地域の地形、地質、気象その他の状況及び当該道路の交通状況を考慮し、通常の衝撃に対して安全なものであるとともに、安全かつ円滑な交通を確保することができるものでなければならない。」

第 30 条第 2 項

「橋その他政令で定める主要な工作物については、前項の規定（注：道路構造令で定める内容）による外、その構造強度について必要な技術的基準を政令で定めることができる。」

第 3 項

「前項に規定する工作物の新設又は改築に当っては、必要な構造計算又は試験によってその構造が安全であることを確かめなければならない。」

道路構造令（昭和 45 年政令第 320 号）

第 35 条

「橋、高架の道路その他これらに類する構造の道路は、鋼構造、コンクリート構造又はこれらに準ずる構造とするものとする。」

「橋、高架の…設計に用いる設計自動車荷重を 25 トンとし、…」

「前 2 項に規定するもののほか、橋、高架の道路その他これらに類する構造の道路の構造の基準に関し必要な事項は、建設省令で定める。」

道路構造令施行規則（昭和 46 年建設省令）

第 5 条

「橋、高架の道路その他これらに類する構造の道路の構造は、当該橋等の構造形式及び構造形式及び交通の状況並びに当該橋等の存する地域の地形、地質、気象その他の状況を勘案し、死荷重、活荷重、風荷重、地震荷重その他の当該橋等に作用する荷重及びこれらの荷重の組み合わせに対して十分安全なものでなければならない。」

橋、高架の道路等の技術基準について（平成 8 年都市局長・道路局長通達）

「今般、橋、高架の道路等の技術基準のうち道路橋示方書Ⅰ共通編、…、Ⅴ耐震設計編を別添のとおり改訂したので、今後はこれによられたく通知する。」

図－3 法令等の規定内容

道路橋示方書は、技術開発の進展、地震などによる被害、経済社会情勢変化などを受けて順次改訂されてきた。道路橋示方書には5編あるが、図-4は道路橋示方書下部構造編の改訂の変遷を示す。当初は、下部構造設計施工指針として各基礎形式毎に分冊で制定されていたが、昭和55年道路橋示方書下部構造編として合本制定された。その後新しい基礎形式として開発された鋼管矢板基礎が平成2年の改訂で、地中連続壁基礎が平成8年の改訂で取り入れられた。

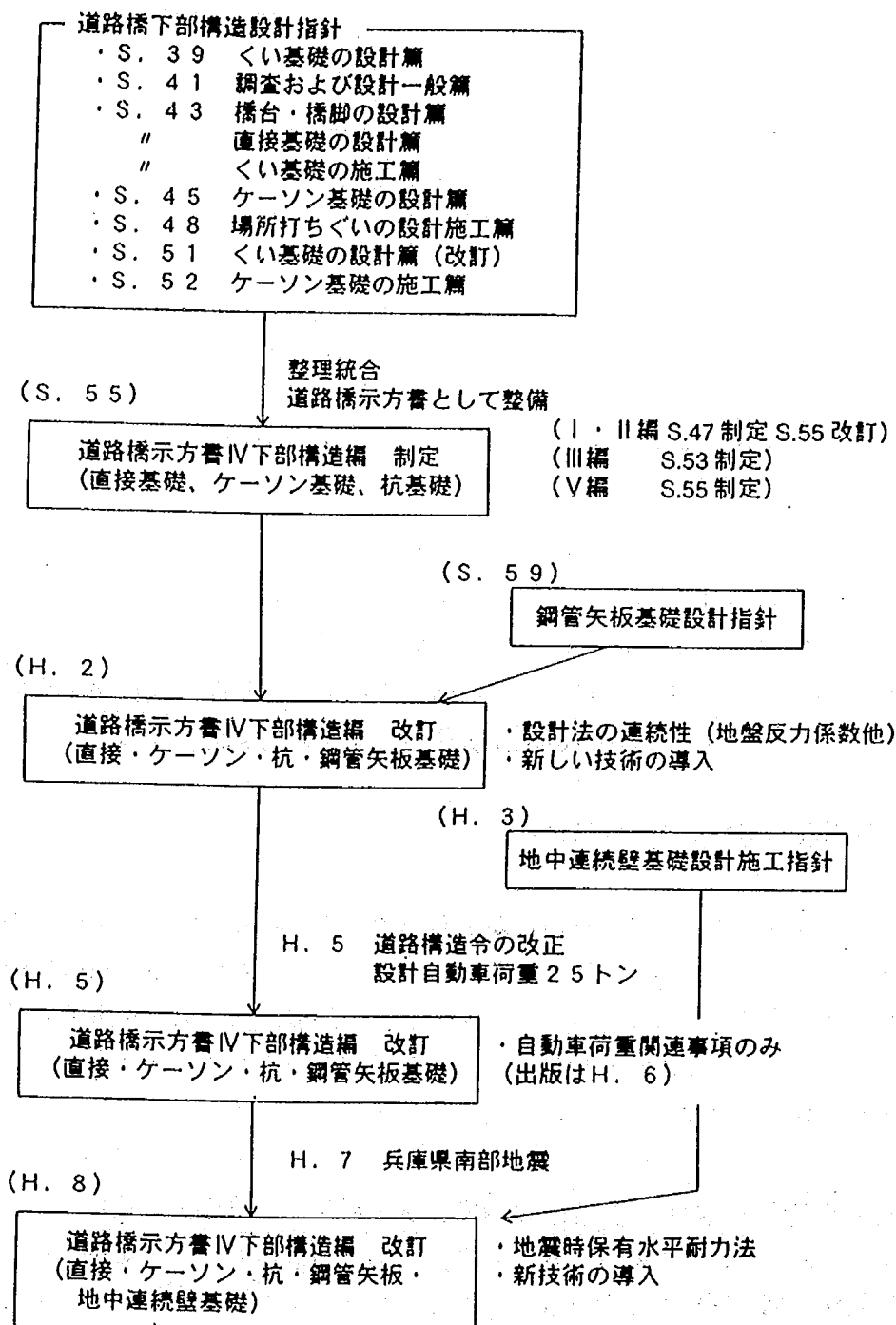


図-4 道路橋示方書下部構造編の制定経緯

道路橋示方書に規定されている荷重及び部材や地盤の安全率、許容（応）力、許容変位等は、橋梁の安全性に密接に関係するのは間違いないが、それらの数値は、常に両方（荷重側と抵抗側）を考えて安全性を議論する必要がある。例えば大きな荷重を採用したとしても、抵抗側の照査レベルを非線形領域まで考えているのであれば必ずしも過大な設計になるわけではない。また基準改訂に当たっても一方の側（荷重側または抵抗側）の数値だけを変更すると設計のバランスが崩れる可能性が高いことを認識しておく必要がある。

阪神大震災による被害・教訓を受けて改訂された現行の道路橋示方書の求めている耐震性水準は世界的に見てもトップレベルにあるといわれている。今後、安全性向上とコスト縮減の両立を計ることが求められるが、技術の進展なくしてはその実現は困難であり革新的な技術開発が強く求められる。例えば、現行の道路橋示方書では高い地震動レベルを一律に近い値で日本全地域に適用しているが、活断層を含めて地震動に関する研究が進展すれば、地震危険度の低い地域については設計地震動の見直しを計ることが可能になる。

3. 地震に対する技術基準と安全性

3.1 道路橋の被害特性と耐震設計法の見直し

道路協会の道路橋震災対策便覧（震前対策編）によれば、昭和 39 年新潟地震、昭和 53 年宮城県沖地震、昭和 58 年日本海中部地震による被災橋梁（通行規制が行われた 31 橋）について橋梁の耐震性に影響を与える要因についてまとめられている（表一 1）。「これによると、橋梁の被害形態と適用示方書には強い相関がある。これは、過去の被害経験を通して徐々に耐震設計法が整備拡充されてきており、これに応じて被害形態も変化してきているためと考えられる」と述べられている。兵庫県南部地震による被害は過去の被害に基づく経験・教訓に対して根本的な見直しを迫ったといつて過言ではない。詳細な被害分析についてはまだ研究途上であると思われるが、橋脚の被害について準拠基準別損傷度を示したのが表一 2 である。これによると大被害は 39 年以前に建設された橋脚に集中して発生していることが分かる。一方新しい基準による橋脚にも中程度の被害がかなり発生している。

兵庫県南部地震まで、過去の地震被害を経験して耐震設計法の見直しを行ってきたが、道路橋示方書における主な項目の変遷を表一 3 に示す。

表-1 数量化理論第1類により求めた各要因が被害度に及ぼす相対的な程度⁶⁾

ア イ テ ム	被害度に及ぼす相対的な程度
① 適用示方書	大正15年細則・昭和14年道示によるものは、相対的に被害度が高くなる。ただし、昭和31年道示・昭和39年道示によるものと、昭和46年道示・昭和55年道示によるものは、予想とは順序が逆転している。
② 上部構造形式	ゲルバーげたおよび2径間以上の単純支持は、相対的に被害度が高くなる。一方、上路・中路アーチ、ラーメン、連続げた橋等は相対的に被害度が低くなる。
③ 平面線形	曲線橋・斜橋は、直橋よりもむしろ被害度が低くなる。
④ 上部構造材料	R C・P Cと鋼との間には大差はないが、ややR C・P Cのほうが相対的に被害度は低くなる。
⑤ 縦断勾配	勾配のあるほうが、勾配のない場合には比較して被害度は高くなる。
⑥ 落橋防止構造	落橋防止がないと相対的に被害度は高くなる。一方、落橋防止があれば相対的に被害度は低くなるが、落橋防止が1種類よりも2種類あるほうが、より被害度は低くなる。
⑦ 下部構造形式	単列パイルベントおよびR Cラーメンは、相対的に被害度は高くなる。
⑧ 橋脚高さ	橋脚高さの高いほうが相対的に被害度は高くなる。
⑨ 地盤条件	地盤が軟弱なほど、相対的に被害度は高くなる。
⑩ 液状化の影響	液状化の生じた場合のほうが、相対的に被害度は高くなる。
⑪ 支持地盤	不均一な場合のほうが、相対的に被害度は高くなる。
⑫ 洗掘	洗掘のある場合のほうが、相対的に被害度は高くなる。
⑬ 下部構造材料	大正15年細則・昭和14年道示による無筋コンクリートのほうが、相対的に被害度は高くなる。
⑭ 基礎工法	木ぐいおよび基礎工法不明のものは、相対的に被害度は高くなる。
⑮ 地震動加速度	地震動加速度が大きいほど、相対的に被害度は高くなる。特に、地震動加速度が400gal以上になると相対的に被害度は高くなる。
⑯ 主鉄筋段落しの影響	主鉄筋段落しの影響は、ここでは検討されていない。

表－２（ａ） 橋脚の準拠基準別損傷度（橋脚数）^{＊）}

構造	準拠基準年次	橋 脚 の 被 災 度					合計
		△s	△	B	C	D	
鋼製橋脚	昭和39年以前	4 (4%)	11 (10%)	9 (8%)	72 (67%)	12 (11%)	108 (100%)
	昭和46年	0 (0%)	0 (0%)	14 (13%)	45 (43%)	45 (43%)	104 (100%)
	昭和55年	0 (0%)	0 (0%)	11 (9%)	19 (15%)	97 (76%)	127 (100%)
	平成2年	0 (0%)	0 (0%)	2 (13%)	2 (13%)	12 (75%)	16 (100%)
	小計	4 (1%)	11 (3%)	36 (10%)	138 (39%)	166 (47%)	355 (100%)
鉄筋コンクリート 橋脚	昭和39年以前	78 (3%)	155 (6%)	143 (5%)	672 (25%)	1600 (60%)	2648 (100%)
	昭和46年	1 (1%)	1 (1%)	15 (8%)	63 (34%)	106 (57%)	186 (100%)
	昭和55年	0 (0%)	0 (0%)	1 (1%)	22 (13%)	144 (86%)	167 (100%)
	平成2年	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	40 (100%)	40 (100%)
	小計	79 (3%)	156 (5%)	159 (5%)	757 (25%)	1890 (62%)	3041 (100%)
合計	昭和39年以前	82 (3%)	166 (6%)	152 (6%)	744 (27%)	1612 (58%)	2756 (100%)
	昭和46年	1 (0%)	1 (0%)	29 (10%)	108 (37%)	153 (53%)	290 (100%)
	昭和55年	0 (0%)	0 (0%)	12 (4%)	41 (14%)	241 (82%)	294 (100%)
	平成2年	0 (0%)	0 (0%)	2 (4%)	2 (4%)	52 (93%)	56 (100%)
	小計	83 (2%)	167 (5%)	195 (6%)	895 (26%)	2056 (61%)	3396 (100%)

表－２（ｂ） 橋脚の被災度の区分

被災度	定 義
△s	倒壊したもの 損傷変形が著しく大きなもの
△	亀裂、座屈、鉄筋の破断等の損傷、または変形が大きなもの
B	鋼材の座屈や部材の変形が部分的にみられるもの 鉄筋の一部の破断やはらみだし及び部分的なかぶりコンクリートの剥離や亀裂がみられるもの
C	鋼材の座屈や変形が局部的かつ軽微なもの ひび割れの発生や局部的なかぶりコンクリートの剥離がみられるもの
D	損傷がないか、あっても耐荷力に影響のないきわめて軽微なもの

表-3 主な地震による道路橋の被害形態と耐震設計法の変遷 ⁷⁾

西暦	地震名	最も特徴的な被害形態	耐震設計法
1920	関東地震 (1923年)	橋梁本体の強度不足による被害	1926「大正15年道路構造に関する細則案」 →地震荷重が初めて制定される 1939「昭和14年鋼道路橋設計示方書案」 →設計震度の標準化
1940	福井地震 (1948年)	基礎を含めた下部工としての強度不足による被害	1956「昭和31年鋼道路橋設計示方書」 →地域、地盤条件に応じた設計震度の補正
1960	新潟地震 (1964年)	液状化による下部工の沈下、傾斜(落橋例=3)	1972「道路橋耐震設計指針・同解説」 ・落橋防止対策の規定 ・液状化判定法の導入
1980	宮城県沖地震 (1978年)	支承部の被害(落橋例=1)	1980「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」 ・液状化に対する設計法の明確化 ・主鉄筋段落し部の設計法の改良 ・動的解析用入力の規定 ・RC橋脚の変形性能照査
	浦河沖地震 (1982年)	主鉄筋段落し部の破壊	
	日本海中部地震 (1983年)	液状化による被害	1990「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」 ・液状化判定法の洗練化 ・設計震度算出法の洗練化 ・動的解析による照査の明確化 ・RC橋脚の保有耐力照査法の明確化
	兵庫県南部地震 (1995年)	RC橋脚の倒壊、損傷 鋼製橋脚の倒壊、損傷 支承部・落橋防止装置の損傷 液状化および液状化による地盤の側方流動(流動化)による被害	1996「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」 ・内陸直下型地震を想定した設計震度の規定 ・RC橋脚の地震時保有水平耐力法の洗練化 ・鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法の規定 ・基礎、支承部、落橋防止に関する地震時保有水平耐力法の規定 ・液状化判定法の見直しと流動化に対する設計法の規定

3.2 道路橋の設計震度の変遷

耐震設計法の見直し規定の中で橋梁の安全性に対して最も影響が大きいと考えられる設計水平震度の変遷を表-4に示す。(注)表-3, 4は平成8年制定コンクリート標準示方書(耐震設計編)改訂資料(土木学会)からの引用に平成8年に改訂された道路橋示方書で規定された分を追加した。)加速度応答スペクトルが初めて規定されたのは昭和46年の道路橋耐震設計指針においてである。レベル2の加速度応答スペクトルが初めて規定されたのは平成2年の道路橋耐震設計編においてである。これは、過去に地震被害例が多いRC橋脚に対して適用される規定であるが、初めて二段階設計法が採用された。レベル2の設計水平震度として1.0gまで引き上げられた。平成8年の改訂では、兵庫県南部地震を経験してレベル2地震の中にタイプ2の加速度応答スペクトルが新たに規定された。このスペクトルの特徴としては、最大値が2gであること、短周期で1種地盤(固い地盤)のスペクトル値が3種地盤(軟らかい地盤)のそれよりも大きいこと、特に3種地盤のスペクトル値が長周期(1秒以上)で大きいこと等などがある。またこのスペクトルが鋼製橋脚や基礎の耐震設計にまで適用されることとなった。

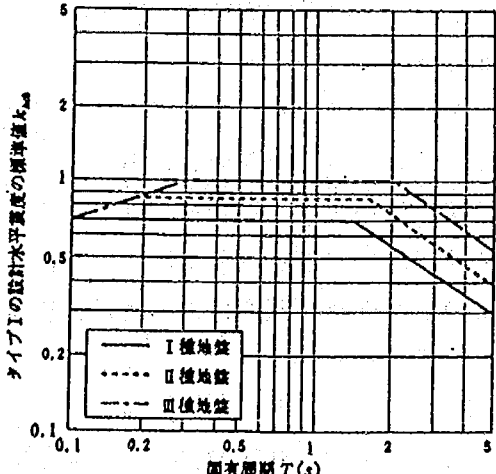
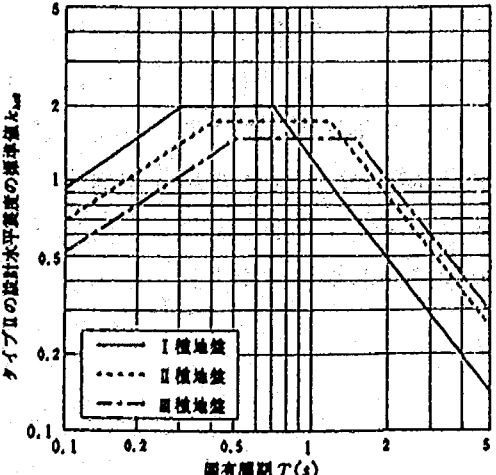
表-4 道路橋の設計震度の変遷-1⁷⁾

制 定 年	規 定 名	設計水平震度の規定			
1926年 (大正15年)	道路構造に関する細則案		沖積層	洪積層	
		古来しばしば大地震に遭遇せし地域	0.30	0.15	
		大地震の記録ある地域	0.25	0.13	
		大地震の記録なき地域	0.20	0.10	
1939年 (昭和4年)	鋼道路橋設計示方書案		沖積層	洪積層	
		古来しばしば大地震に遭遇せし地域	0.40	0.20	
		古来大地震に遭遇せし地域	0.30	0.15	
		その他の地域	0.20	0.10	
1956年 (昭和31年)	鋼道路橋設計示方書		軟弱地盤	やや良好な地盤	良好な地盤
		しばしば大地震が起こった地域	0.35~0.30	0.30~0.20	0.20~0.15
		大地震が起こったことのある地域	0.30~0.20	0.20~0.15	0.15~0.10
		その他の地域	0.20	0.15	0.10
1971年 (昭和46年)	道路橋耐震設計指針	設計水平震度: $k_h = u_1 \cdot u_2 \cdot u_3 \cdot k_0$ k_0 : 標準設計水平震度 (=0.2) u_1 : 地域別補正係数 (=1.00, 0.85, 0.70) u_2 : 地盤別補正係数 (=0.9, 1.0, 1.1, 1.2) u_3 : 重要度別補正係数 (=1.0, 0.8) 修正震度法における設計水平震度: $k_{hm} = \beta k_h$ (橋脚高さ25m以上) β : 構造物の固有周期による補正係数			
1980年 (昭和55年)	道路橋示方書・ 問解説 耐震設計編	1971年道路橋耐震設計指針と基本的には同一、主な改訂点は以下のとおり。 1) 地域区分の境界線を変更した。 2) 地盤種別は地盤の特性値によるものとした。 3) 修正震度法の適用範囲を橋脚高さ15m以上とした。 4) 修正震度法の β について短周期側でのすりつけを考慮した。			

表-4 道路橋の設計震度の変遷-2

制定年	規定名	設計水平震度の規定
1990年 (平成2年)	道路橋示方書・ 同解説V、耐震 設計編	修正震度法と震度法の区別を撤廃し、改めて震度法として一本化した。 その他の地盤による慣性力の算出に関わる改訂点は以下のとおり。 1) 地盤種別を従来の4区分から3区分に変更した。 2) 慣性力の算定を設計振動単位ごとに行うこととし、連続橋の耐震計算法の充実を図った。 3) 設計水平震度の算出は次式によることとした。 $k_h = C_z \cdot C_G \cdot C_I \cdot C_T \cdot k_{h0}$ ここに、 k_{h0}：標準設計水平震度(=0.2) C_z：地域別補正係数(=1.00, 0.85, 0.70) C_G：地盤別補正係数(=0.8, 1.0, 2.0)とし1980年の規定を変更し地盤種別を3つに分類した。 C_I：重要度別係数(=1.0, 0.8) C_T：固有周期別補正係数で新たに下図(a)に示す値とした。 なお、鉄筋コンクリート造の単一柱式の橋脚に対しては極めて大規模な地震に対してぜい性的な破壊を生じないことを確かめるために地震時の保有水平耐力の照査を行うことが望ましいとした。 それに用いる設計水平震度 k_{hc} は次式で求めるよう規定された。 $k_{hc} = C_z \cdot C_I \cdot C_R \cdot k_{h0}$ ここに、 k_{h0}：地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度の標準値(=1.0) C_z：地域別補正係数(=1.00, 0.85, 0.70) C_I：重要度係数(=1.0, 0.8) C_R：振動特性別補正係数で、新たに橋の等価固有周期 T_{eq} に応じて図-1bに示す値とする。 図-1a 震度法に適用する固有周期別補正係数 図-1b 振動特性別補正係数

表-4 道路橋の設計震度の変遷-3

制 定 年	規 定 名	設計水平震度の規定
1996 年 (平成 8 年)	道路橋示方書・ 同解説 V 耐震 設計編	震度法に用いる設計水平震度 平成 2 年道路橋示方書・同解説 耐震設計編と基本的に同一。 ただし、重要度別係数は削除。 地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度 プレート境界型の地震による地震動（タイプⅠ）と内陸直下型地震による地震動（タイプⅡ）を考慮する。 1) タイプⅠ地震動の設計水平震度（図-1） 平成 2 年道路橋示方書・同解説 耐震設計編と基本的に同一。 ただし、重要度別係数は削除。 2) タイプⅡ地震動の設計水平震度（図-2） 設計水平震度 k_h は次式により規定。 $k_{he} = c_s k_{heo}$ ここに、 k_{heo} : タイプⅡの設計水平震度の標準値 c_s : 地域別補正係数 (= 1.0、0.85、0.7)  図-1 タイプⅠの設計水平震度の標準値  図-2 タイプⅡの設計水平震度の標準値

3.3 各国の耐震基準の比較

アメリカ合衆国 (AASHTO)、日本、ヨーロッパ (EUROCODE)、ニュージーランド (TNZ) という耐震設計の先進国における耐震設計基準の比較概要について示す (表-5)。比較結果から重要な項目について要約すると以下ようになる。

(1) 耐震設計の基本方針

耐震設計の基本方針として、どの基準にも共通することは、強震時にも橋全体系が崩壊してはならないとされている点である。

耐震設計の考え方として、各基準いずれも、キャパシティーデザイン、もしくはそれに近いものが採用されている。

また、各国とも、限界状態が規定されており、表現こそ異なるものの、終局限界状態と使用限界状態といった区別がなされている。ただし、日本のみ、限界状態設計法の書式になっていない。

なお、AASHTO と TNZ では、設計で想定する耐震性能と限界状態の定義がなされているが、実際の設計行為は設計地震として定めたひとつのレベル (終局限界レベルに相当) についてのみ実施され、それを満足することで、他のレベル (使用限界レベル) の安全性は確保できるとされている。すなわち、厳密に2段階設計法を採用している基準は EUROCODE と日本 (日本は地震荷重で区分すると3段階設計法になる) と考えられる。

(2) 設計地震荷重

日本以外の基準では、設計地震荷重は確率論的に再現期間 475 年の地震動として設定されている。日本の基準では再現期間について述べられていない。

また、ニュージーランドを除く基準では、減衰定数 5 % の加速度応答スペクトルによって設計地震荷重が与えられている。ニュージーランドでは、非線形応答スペクトルが用いられており、6 種類のじん性に対する設計スペクトルが規定されている。

各国とも、設計で想定する地震荷重は、地域区分、地盤条件、構造物の固有周期、さらには設計で想定する構造物のじん性率 (基準によっては、震度低減係数、応答低減係数といった表現がとられている) などに応じて設定される。

(3) 耐震設計法

各基準とも、耐震計算は、基本的には、橋脚基部に塑性ヒンジを形成することによるエネルギー吸収を期待し、非線形応答を考慮した静的荷重計算法により行われる。ただし、日本は、エネルギー一定則によって構造物のじん性率を計算し、非線形応答を考慮した設計地震力を求める、という手順を踏んでいる。これに対し、AASHTO と EUROCODE では、構造物のタイプやじん性率に対して、地震時に許容される被災度レベル、重要度、地震動の最大加速度レベル等に応じた荷重低減係数が設定されており、その係数を用いて弾性応答地震力を低減し、非線形応答を考慮した設計地震力を求めるといった、よりシンプルな方法が採用されている。なお、ニュージーランドでは、構造物のじん性率に応じた非線形スペクトルが設定されている。

表-5 各国耐震設計基準の比較 (その1)⁹⁾

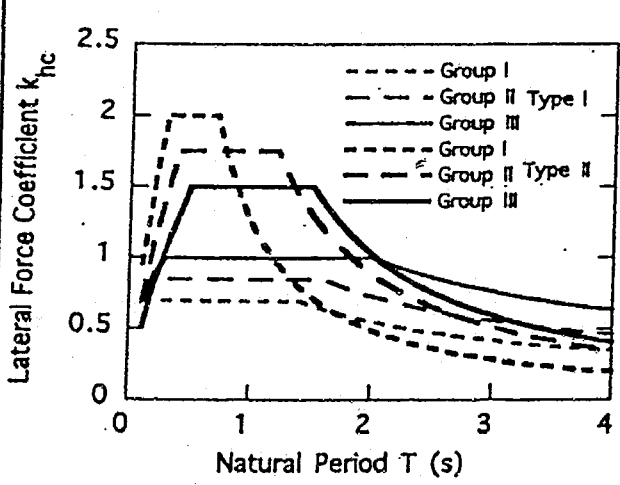
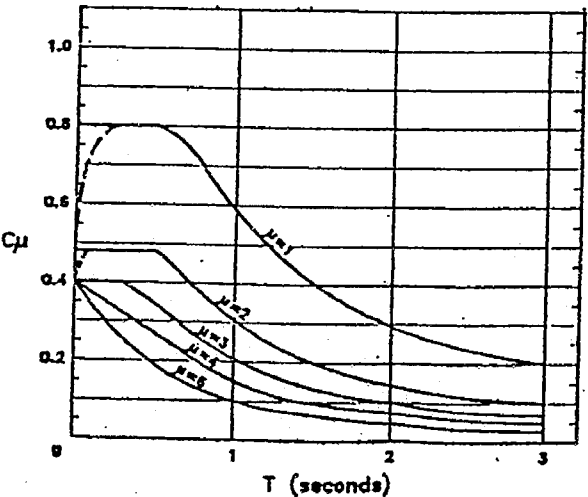
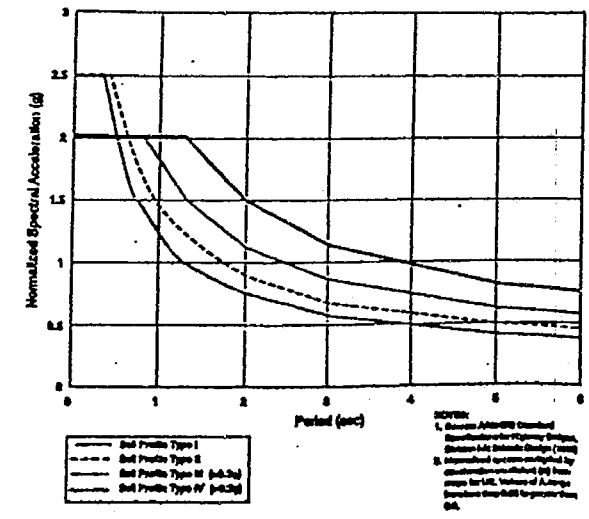
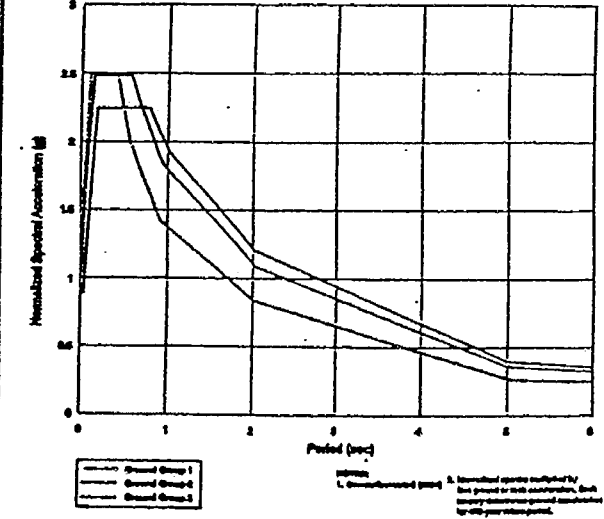
項目	JAPAN	New Zealand	AASHOTO	EC-8
1.耐震設計の思想				
(a)耐震性能の考え方の整理	橋全体系として地震に耐える構造を目指し、大地震時にも崩壊を防止する。	構造的な完全性を保持し、強震時に崩壊を防ぐこと。	中小規模地震に対して機能を損なわないこと。大規模地震に対して橋梁全体系の崩壊を防ぐこと。	安全性照査において、破壊を防ぐ。より発生確率の高い状態において損傷させない。
(b)耐震設計の基本方針	構造部材の強度を向上させると同時に、変形性能を高める。	主要構成部材は十分なじん性能を備えること。じん性のない部材や容易に点検出来ない部材、あるいは補修できない部材は破壊を防ぐ。	中小規模地震に対しては弾性挙動するよう強度を確保し、大規模地震に対しては、構造物の変形性能を高め変形性能に期待した設計を行う。	弾性部材は、損傷しないよう十分な耐力を有する。脆性的な破壊を防ぐ。
(c)設計法	2段階設計(荷重は3段階設計)	大規模地震動に対する1段階設計(中小規模地震の設計は包括されると仮定)。	大規模地震に対する1段階設計(中小規模地震の設計は包括されると仮定)。	2段階設計
2.地震荷重				
(a)耐震性能の考え方の整理	地震の規模に応じて3種類の弾性設計震度を規定。	3つの地盤条件に対する降伏震度スペクトルを標準化。	最大地盤加速度と地盤種別による弾性応答スペクトルで定義。	弾性応答スペクトルを標準化した。数値は各国内機関が定める。パワースペクトル等も使用可能。
(b)設計地震の再現周期	明確ではない。	475年	475年	475年
(c)地域別補正係数	地域別補正を考慮。	地域係数で補正(地図で図示)。	国内の最大地盤加速度分布図で提示。	国内機関が定める。
(d)重要度の与え方	道路種別および橋の機能・構造に応じて2段階に分類。	交通量と重要性に基づいた3段階に分類。	構造物の重要度は2段階を考慮。設計においては、さらに地盤最大加速度を考慮した4段階の耐震性能分類にしたがって耐震設計を行う。	国内機関において、3段階に分類。
(e)地盤条件の与え方	3つの地盤種別を考慮。	3つの地盤条件に対する降伏震度スペクトルを提示。	4つの地盤種別を考慮。	3種類の地盤種別が定義。
(f)設計スペクトルの例		 軟弱あるいは層厚の大きい地盤	 加速度応答スペクトルの形状	
3.耐震解析法				
耐震解析法の選定法	地震時の橋の挙動の複雑度に応じて選定。	構造物のじん性を考慮している。	橋梁の径間数、および橋梁の直線性を考慮して4種類の解析法を選択。	3種類が定義されている(じん性に富む、限定されたじん性、弾性)。
地震入力方向	水平2方向における解析(支承部は3方向)。	水平2方向を基本。ただし、水平方向の地震力載荷は、100%を対象とする方向に、30%を対象方向と直角方向に同時載荷。	水平2方向を基本。ただし、水平方向の地震力載荷は、100%を対象とする方向に、30%を対象方向と直角方向に同時載荷。	水平2方向と鉛直方向を組合せる。対象とする他の方向は30%。
荷重組合せ	結果の組合せは考慮しない。	結果の組合せは必要としない。	温度の影響は考慮しない。	温度変化、収縮等と組合せない。

表-5 各国耐震設計基準の比較 (その2)

項目	JAPAN	New Zealand	AASHOTO	EC-8
4.設計地震力				
(a)設計地震力	震度法による設計では弾性地震力を与える。地震時保有水平耐力法による設計ではじん性を考慮。	じん性を考慮する。	変形性能を考慮し、弾性設計地震力を修正して設計地震力を与える。	変形性能を考慮し、弾性設計地震力を修正して設計地震力を与える。
・粘りのある構造物	震度法による設計では弾性地震力を与える。地震時保有水平耐力法による設計ではじん性を考慮。	地震力は非弾性応答スペクトル解析で規定する。しかし1次固有周期に基づく等価静的解析による地震力の80%を下回らない。	弾性設計地震力を修正係数Rで除した値で部材の設計を行う。	弾性設計地震力を応答低減係数qで除す。
・粘りのない構造物	震度法による設計では弾性地震力を与える。地震時保有水平耐力法による設計ではじん性を考慮しない。	キャパシティーデザイン	キャパシティーデザイン	キャパシティーデザイン
(b)地震時変位	地震時保有水平耐力法による設計では残留変位応答スペクトルにより考慮。	非弾性応答スペクトル解析の変位はじん性係数によって割り増される。	変形量に関する規定は、桁かかり長の設計のみに反映。	最小桁かかり長の算定において、地盤変位の影響を考慮。
5.コンクリート橋脚の設計	十分な変形性能を有するように地震時保有水平耐力法により設計。	他の基準で規定している。	帯鉄筋量等変形性能を向上させる構造細目が、構造物の重要度にしたがって規定。	部材係数(1.15)で除して設計抵抗力を評価。じん性部材では、構造細目を規定。
6.鋼製橋脚の設計	コンクリートを充填した鋼製橋脚は地震時保有水平耐力法により、コンクリートを充填しない鋼製橋脚は動的解析により設計。	他の基準で規定している。	コンパクト断面についてのみ設計の考え方が規定。P-Δ効果を考慮した設計が必要。	じん性部材では、建築の構造細目を適用。
7.基礎構造物の設計				
(a)基礎の設計	橋脚躯体と同等以上の耐力を有するように地震時保有水平耐力法により設計。	直接基礎では、基礎の回転を許容する。滑動に対する最小安全率1.2。杭基礎では、液状化層、杭径の2倍の深さにおける地盤の杭・地盤の剥離に対する許容値を示している。	重要度が小さい基礎には変形性能を考慮した耐震設計を行うが、重要度が大きい基礎については原則として変形性能を期待した設計を行ってはならない。	エネルギー消散を期待せず、塑性域に入らないように設計する。ただし、杭の一部で塑性ヒンジが生じる場合はじん性を確実にする。
(b)液状化(流動化含む)	沖積層の飽和砂質土層においては液状化の判定を行う。液状化すると判定され、偏土圧が作用する土層においては流動化の影響を考慮。	杭基礎の設計で考慮。	液状化については経験的な判定法が示されている。流動化の影響については具体的に記述されていない。	Eurocode8 Part5の付録に液状化判定のための簡易チャートが示されている。
8.その他				
(a)桁かかり長	けたかかり長 $u_R + u_G \geq SEM$ けたかかり長の最小値 $SEM = 70 + 0.51(cm)$	落橋防止装置無し: $2.0 \times \text{変位} + 100mm$ (最小400mm) 緩い落橋防止装置有り: $1.5 \times \text{変位} + 100mm$ (最小300mm) 頑丈な落橋防止装置有り: 200mm	重要度が大きい橋梁 $(305 + 2.5L + 10H) (1 + 0.000125S2) mm$ 重要度が小さい橋梁は上記の2/3	地盤の弾性波速度等を基に、地震時地盤変位の影響を求め、算出。最小長さ40cm。
(b)落橋防止システム	想定を越える地震力や変位に対し、けたかかり長、落橋防止構造、変位制限構造および段差防止構造の設置を規定。	耐震連結装置がない場合の桁かかり長を規定している。	上部構造間に相対変位が想定される場合は適切な遊間を設置。耐震連結装置は、隣接桁のうち軽い上部工重量に最大地盤加速度を乗じたものを設計力として用いる。	耐震連結装置は、全設計地震力を伝達できるように設計する。最小桁かかり長も規定。
(c)免震設計法	免震設計法が具体的に規定。	一般的な基準のみ。細目が他の基準により規定されている。	1990年に免震設計法が規定された。	免震設計法を具体的に規定(完全免震と部分免震)。

4. 洪水に対する技術基準と安全性

4.1 道路橋の被害特性

平成2年の梅雨前線による記録的な豪雨が九州北部地方を襲った。そのため各地の河川が氾濫した他、土石流、地滑り等も発生して大きな被害が発生した。表一6に示すように多数の道路橋が流失した(37橋)。被災橋梁のうち下部工が変状して流失した例が非常に多い。また土石流や流木等が上部工や橋脚に引掛かった結果、桁下の閉塞が原因で溢流が発生して橋台取り付け部盛土に被害が生じた例も多い。平成10年の8月末豪雨においても大きな被害が生じたが、この内、建設省土木研究所が調査した²⁾ 栃木県、福島県の被災橋梁について同様に被害内容を整理すると表一7となる。栃木県の余笹川水系では、氾濫した洪水流により橋梁の取り付け道路が流失した事例が多く、そのうち3橋では橋台が流失し、それが支持していた上部工も流失した。上部工が流失していない橋でも流木が橋脚や桁への掛かり、高欄に被害が生じている。ただし、これらの橋梁では下部構造の沈下や桁本体に大きな被害は生じていない。一方、福島県の阿武隈川水系では、被災橋梁のほとんどで洗掘による橋脚や橋台の沈下が発生しており、高欄の被害も、下部構造の沈下に起因するものである。このように、同じ豪雨に対しても、河川の特長により橋梁の被害状況は大きく異なっていた。

表一6 平成2年7月九州北部集中豪雨における道路橋被害内容の内訳

県名	橋数	落橋		落橋せず				被害不明
		下部工 変状	下部工 変状なし	下部工 流失・沈下	下部工 洗掘	高欄等へ の被害	橋台取付部 盛土流出	
佐賀県	3(1)	3(1)	—	—	—	—	—	—
福岡県	26(9)	9(8)	1(0)	3(0)	—	5(0)	1	7
熊本県	12(4)	7(3)	—	—	2(0)	2(0)	1	—
大分県	28(18)*	15(13)	2(1)	—	—	2(2)	2	7
合 計	69(32)*	34(25)	3(1)	3(0)	2(0)	9(2)	4	14

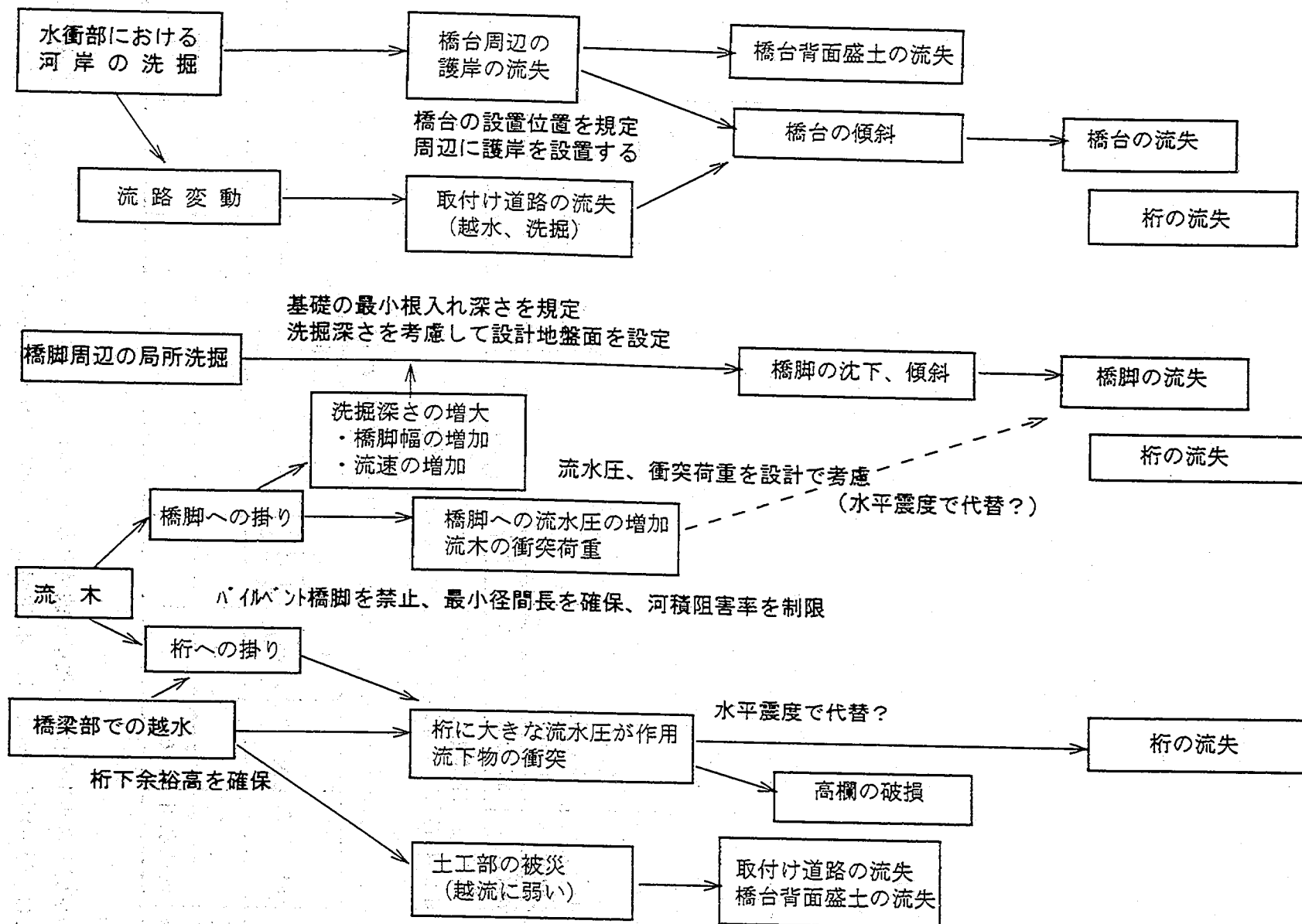
() 内は橋台取付部の被害を伴うもの

* 橋台取付部盛土流出2橋(大渡橋・猿飛橋)を含む

表一7 平成10年8月末豪雨における道路橋被害内容の内訳(土木研究所調査橋梁)

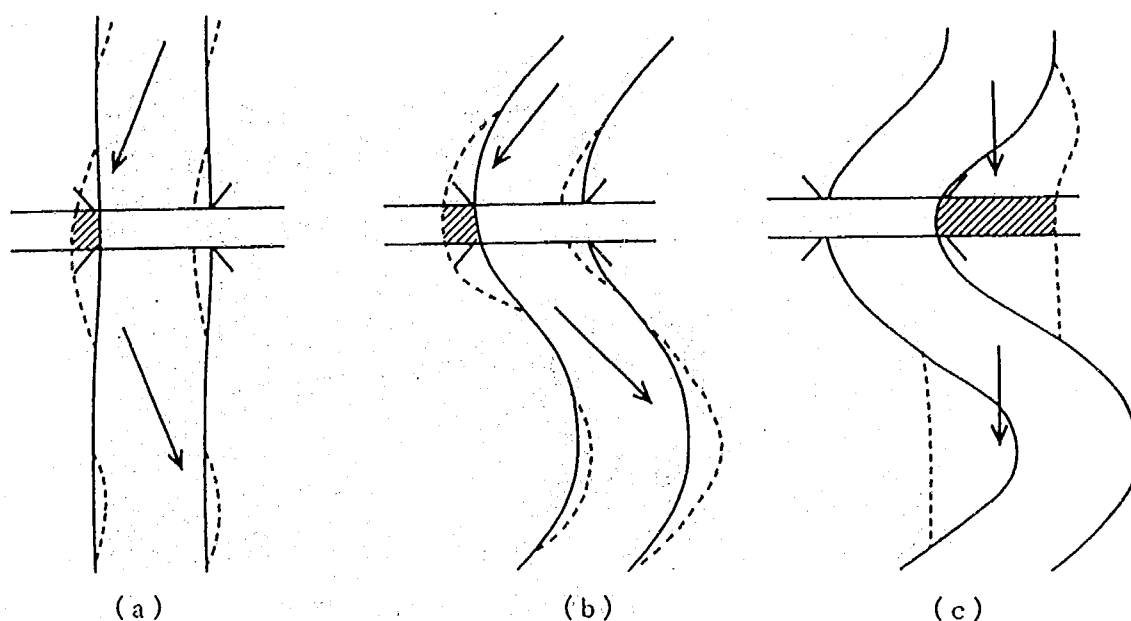
県名	河川名	橋数	上部工流失		上部工流失せず				取付道路 流失
			下部工 変状	下部工 変状無	下部工 沈下	下部工 洗掘	高欄等へ の被害	橋台背面 盛土流失	
栃木県	余笹川	6	3	—	—	—	3	3	6
福島県	阿武隈川	6	1	—	4	—	2	2	1

以上の事例も含め洪水による橋梁の被災内容を分類すると、図一5となる。洪水による被災の主要因としては、図中に示したように、水衝部における川岸の洗掘、橋脚周辺での局所洗掘、流木そして、橋梁部での越水があげられる。



図－5 洪水による橋梁の被害内容および技術基準における規定事項

水衝部における川岸の洗掘の進行は図－6のように模式化される。図の(a)のように直線であった河道でも何らかの原因により河川水流は蛇行する。橋台がその水衝部に位置する場合は、橋台周辺の護岸が洗掘・流失し、橋台背面盛土などが流失する。それが進行すると橋台基礎地盤が洗掘し、ついに橋台の傾斜、流失につながる。これは同図(b)のように湾曲部に位置する橋梁でも同様である。この様な被災事例として、橋台背面盛土が流失した事例を写真－1に、橋台が傾斜した事例を写真－2に示す。河岸の洗掘が進行すると河川は曲率の大きい蛇行河川となるが、この様な蛇行河川で大きな洪水が発生すると、湾曲部で氾濫し、そのままショートカットするように流下する。その際、取り付け道路を含め背後地が流失し、場合によっては橋台およびそれが支持する上部工も流失する。その事例を写真－3に示す。



図－6 河岸の洗掘の進行

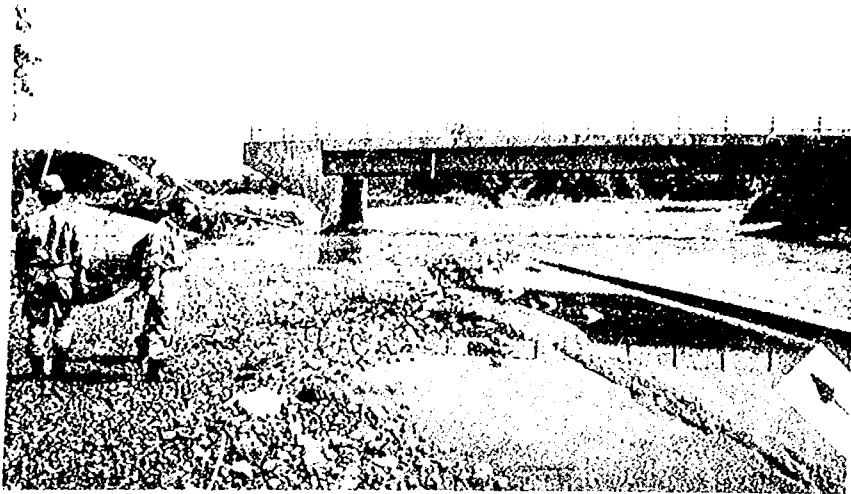


写真-1 橋台背面盛土の流失

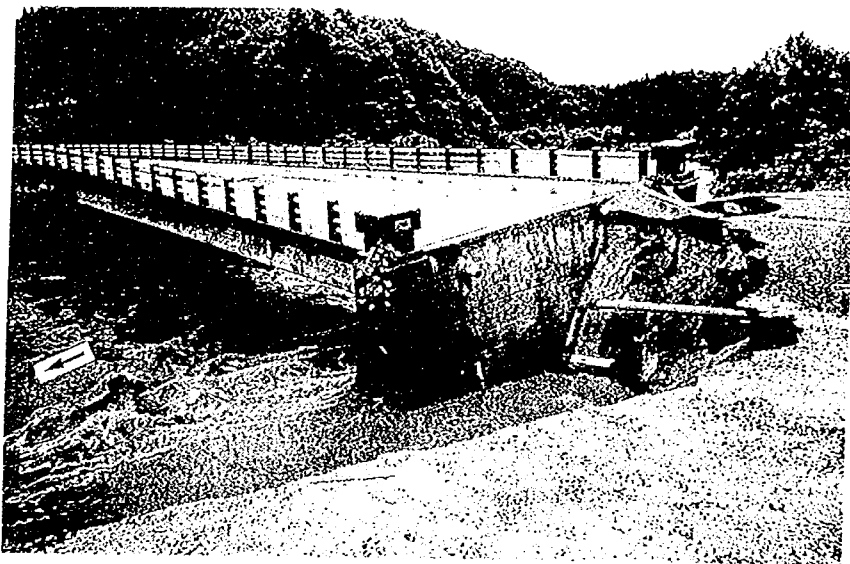


写真-2 下流側へ沈下・傾斜した橋台

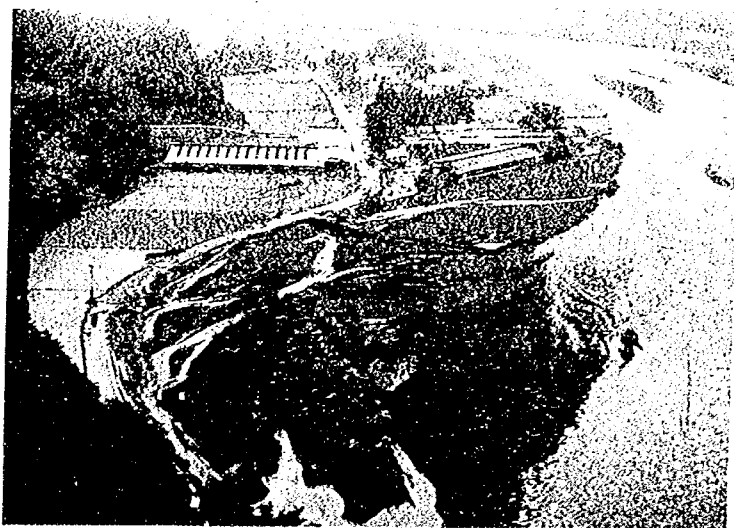
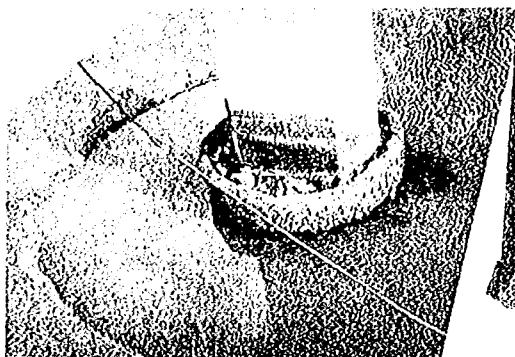
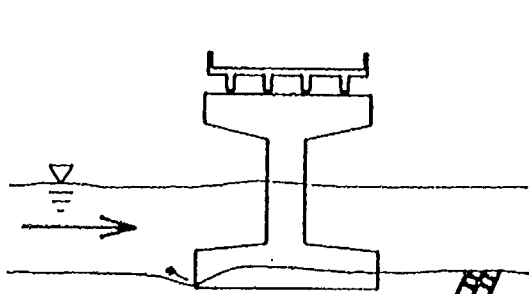
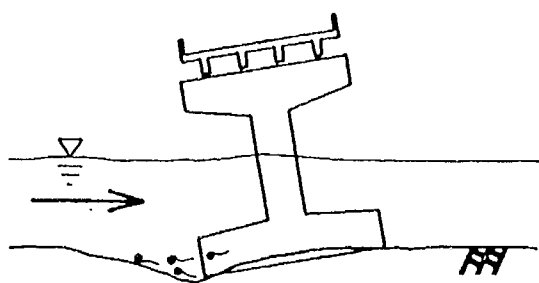


写真-3 湾曲部のショートカット

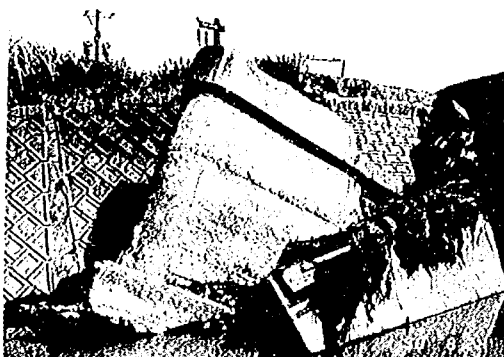
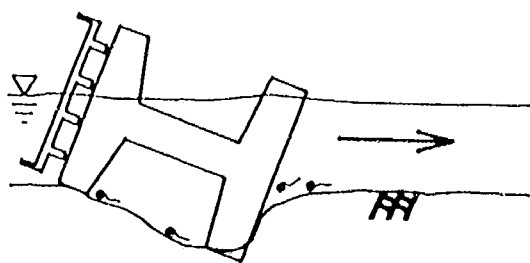
河川中に位置する橋脚周辺では、局所洗掘が発生しやすい。これによる被災の模式図および具体的事例を図－7に示す。流水中に橋脚が存在すると、その周辺で水流が乱される。特に、上流側では橋脚面に沿って下方へ潜り込む流れが発生し、それによる渦流で河床に堆積している土砂が流失することとなる（図－7(a)）。そのような局所洗掘が進行し、同図(b)のように直接基礎を支持する地盤の一部が流失すると、橋梁自体の自重により橋脚が傾斜する。更に進行すると同図(c)のように橋脚が転倒し、それが支持していた上部工が流失する。



(a) 洗 掘



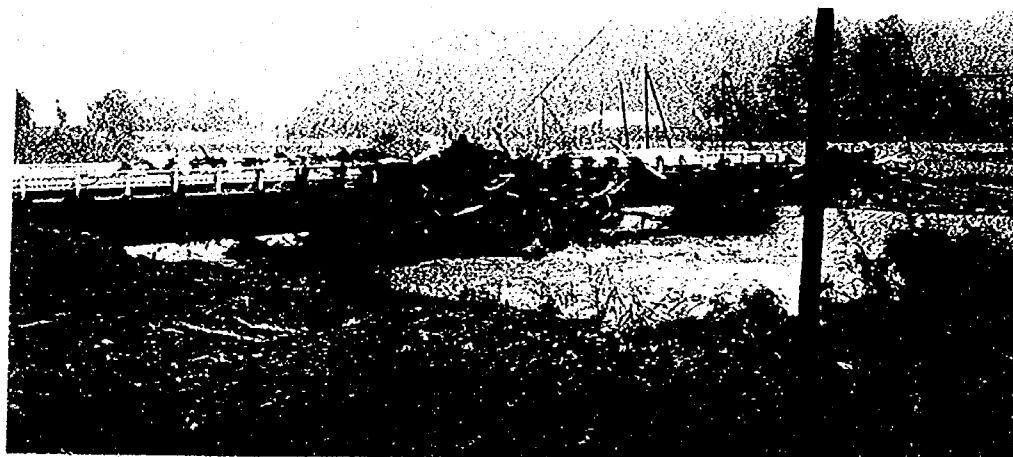
(b) 橋脚の傾斜



(c) 橋脚の転倒

図－7 橋脚周辺の局所洗掘の進行状況

洪水時発生した大量の流木は、流下の途中各種の河川構造物を破損させ、災害を激化させる。特に、橋梁に対しては、衝突時の衝撃による破損ばかりでなく、橋脚にせき止められた流木が積み上げられ、洪水の疎通を阻害することが大きな問題である。その結果、橋脚に対しては流水圧が増加することともに橋脚周辺の洗掘深さを増大させるなどの被害を生じさせる。写真－４では、流木が橋脚及び上部工にかかり、洪水の疎通を阻害している。



写真－４ 流木による橋梁の被災

4.2 技術基準に於ける規定事項

上記のような洪水に対して河川（堤防）及び橋梁の安全性を確保するために設けられている記述基準の規定事項を、前出の図－５に合わせて示した。

河川管理施設等構造令において、橋梁に関して規定している事項を整理すると、図－８および表－８となる。河川管理施設等構造令は、主として洪水流を安全に流下するという視点に立っており、これまでの被災事例を整理して各種事項が規定されている。橋台については洪水の流下断面を阻害しないようその前面位置が規定されており、また橋台の変状により堤防が影響を受けないようその底面位置は地盤高あるいは計画河床以下としている。さらに、堤防を保護するため橋台の周辺には護岸を設けるものとし、堤防法線と橋台前面が並行でない場合には裏腹付により堤防を補強している。橋脚による流水阻害や流木などの掛かりを防ぐため、橋脚形式としてパイルベント形式を禁止するとともに、最小径間長や河積阻害率、桁下余裕高の下限値が定められている。また、橋脚周辺での局所洗掘に対する安全性を確保するため、橋脚フーチングの最低根入れ長を定め、また橋脚は堤防のり先から原則として10 m以上離すようにしている。

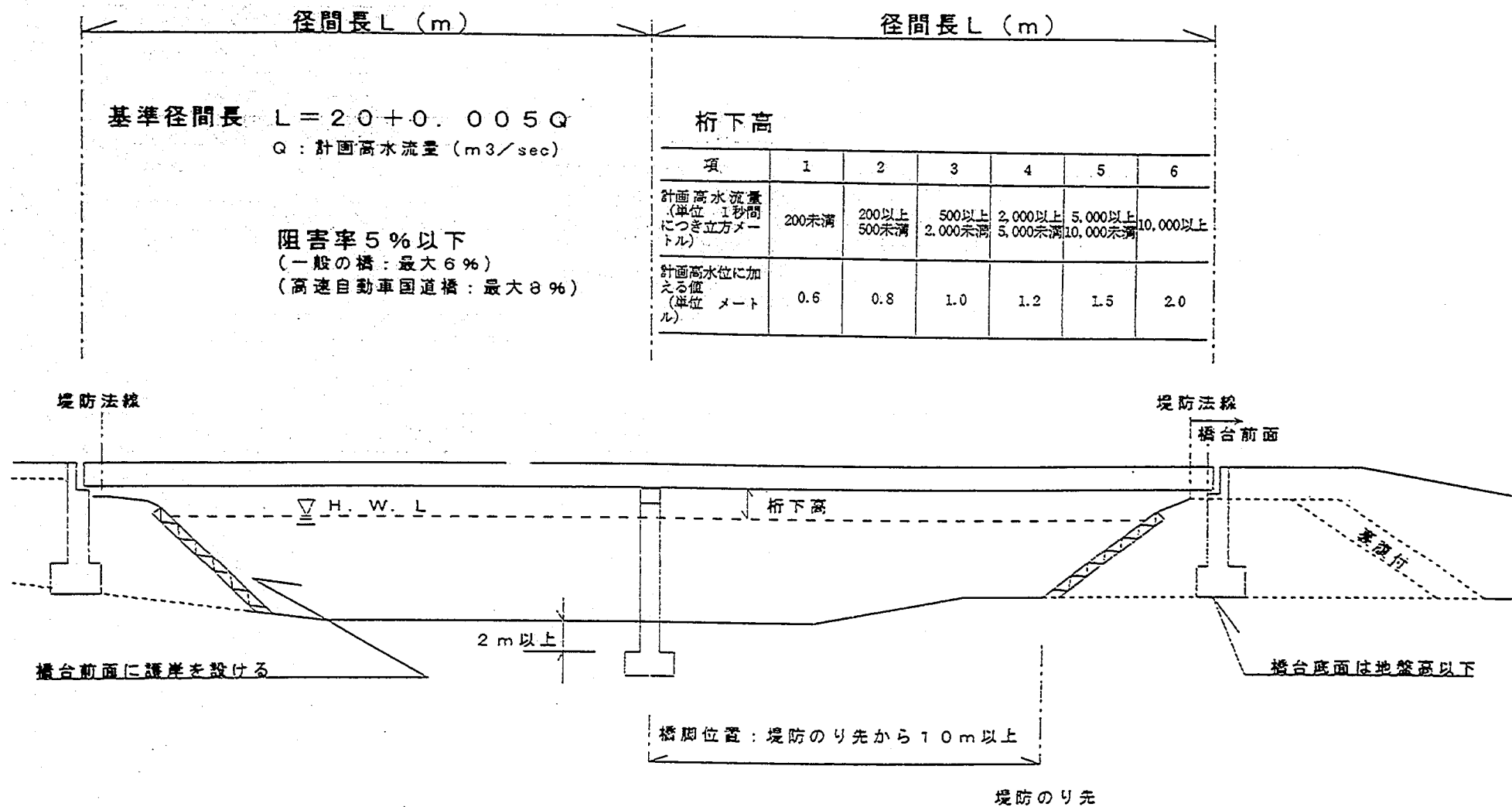
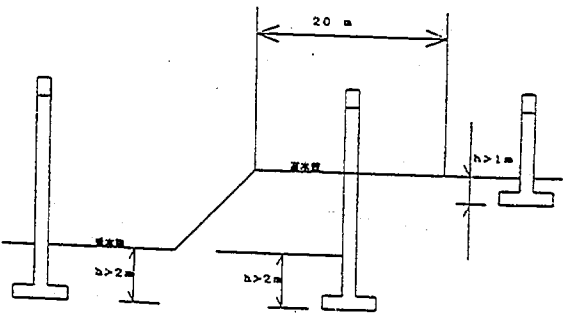
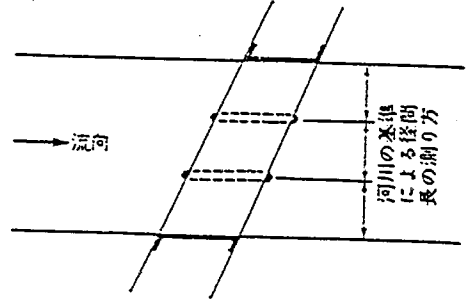
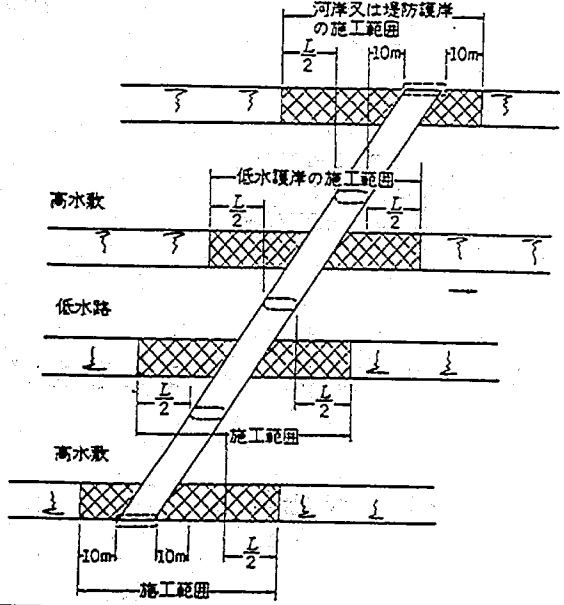
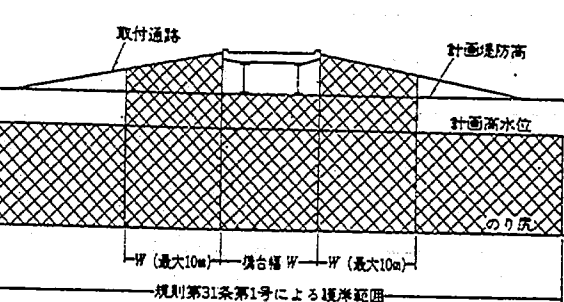
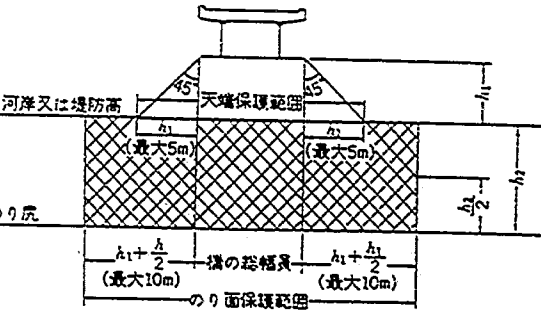


図-8 河川管理施設等構造令における橋梁関係規定事項

表-8 河川管理施設等構造令における橋梁関係規定事項 (その1)

河積阻害率	橋脚の根入れ	径間長の定義
・河積阻害率は原則として5%以内を目安とする。 *橋の構造上、河積阻害率が5%を超える場合。 ①一般の橋は6%以内とする。 ②高速自動車国道橋は8%とする。	・河道内に設ける橋脚基礎の根入れは以下とする。 ①低水路・低水路の河岸の法肩から20m以内の高水敷：低水路の河床の表面から深さ2m以上。 ②その他の高水敷：高水敷の表面から深さ1m以上。 	・河川管理の実務上、橋梁の径間長は「橋脚の中心線間の距離」と定義する。  斜橋の径間長
橋の設置に伴い必要となる護岸長	橋の設置に伴い必要となる堤防護岸の高さ	橋の下河岸または堤防を保護する範囲
		

表－8 河川管理施設等構造令における橋梁関係規定事項（その2）

堤防に設ける橋台前面の位置（川幅 $\geq 50\text{m}$ ）	堤防に設ける橋台前面の位置（川幅 $< 50\text{m}$ ）	橋台が堤体に著しく食い込む場合の措置
・河岸または川幅が50m以上の河川に設ける橋台は、流下断面内に設けてはならない。 橋台の位置（川幅50m以上）	・川幅が50m未満の小規模な河川については、橋台の前面が表のり屑より流下断面側に出てはならない。 橋台の位置（川幅50m未満）	・橋台の一方側が堤体の中に著しく食い込む場合には、堤防の構造に支障を及ぼさないよう、裏腹付け等により補強を行う。
斜橋となる場合の措置	堤防に設ける橋台の底面（1）	堤防に設ける橋台の底面（2）
・堤防に設ける橋台の前面は堤防の法線に平行とすべきであるが、やむを得ず斜橋となる場合には斜角を60°程度以内とし、堤防への食い込みについては下記を標準とする。 ① 食い込み角度は20°以下とする。 ② 食い込み幅は堤防天端幅の$1/3$以下（2mを超える場合は2m）とする。	・堤防に設ける橋台の底面は、地盤高以下とする。 (a) 地盤が岩盤等であり、堤防地盤とが明確に区分できる場合 (b) 堤防と地盤とが明確に区分できない場合	・やむを得ず橋台が水衝部に位置する場合等で、洪水時に河岸の洗掘が予想されるときには、橋台の底面は計画河床または最深河床以下とする。

一方、道路橋示方書で規定されている事項を整理すると、表－９となる。道路橋示方書では洪水時における各種の現象に対し、橋梁自体の安全性を確保できるよう各種事項が規定されている。洪水が橋に及ぼす影響として、流水圧、洗掘による地盤低下、流木などの衝突荷重をあげ、その影響を荷重あるいは設計上の地盤面として考慮している。また、設計に際しては水位や流量、流速の他、過去の流心や河床変動、洪水の記録などといった河相について十分調査し、設計に反映させるよう示している。

表－９ 道路橋示方書における規定事項

項 目		記 述 内 容
荷 重	流水圧	- 流水圧 $P = K \cdot v^2 \cdot A$ (K：抵抗係数、v：最大流速、A：橋脚の投影面積) - 橋脚の投影面積は、洪水時の水位の増加と洗掘深さを考慮して、算定する。
	地盤変動の影響	河川の流れによる洗掘や河床低下が予想される場合は、その影響を考慮する。
	流木などの衝突荷重	- 流木などの衝突の恐れがある場合には、水面位置に衝突力を作用させる。 $P = 0.1 \cdot W \cdot v$ (W：流送物の重量、v：表面流速) - 流送物の重量は、架橋地点付近の住民の経験談、上流の橋、河川構造物、山地の状況などを調査のうえ、適切な値を設定する。
調 査	河相、利水状況等の調査	- 河相調査：水位、流量、流速、過去の流心、河床変動、洪水の記録等。河川改修計画（計画高水位、計画河床） - 必要に応じ、橋脚の背水作用、洗掘、流木、土砂流等を調査
設 計	設計上の地盤面	- 洗掘による地盤面の低下を考慮して、常時における設計上の地盤面を設定する。 - 将来の洗掘が予想される場合には、橋梁の新設時点からあらかじめ洗掘防止工を施工するのが望ましい。根固めブロック等。

4.3 海外基準

海外においても洪水による橋梁の災害は重要な事項であり、橋梁に関する基準類でその影響を考慮して設計することとしている。例えば、アメリカ合衆国の AASHTO では、橋梁の計画時には河川の流況に十分配慮し、必要に応じて水制の設置など河川面からの対策も検討することとしている。また、橋梁設計においては水理検討が必要であり、そのために必要な情報を収集し、洪水流の流出解析や流速や橋脚周辺での洗掘の評価等を行うこととしている。橋脚に作用する外力としては道路橋示方書と同様流水圧と流下物の衝突をあげており、直接基礎の設計では洗掘深を考慮して基礎の根入れを設定するとともに、必要に応じ適切な洗掘対策を行うこととしている。また、橋台背面土の吸出しを防ぐた

め、ジオテキスタイルや粒度を調整したフィルター層の設置なども示している。

上記のように、アメリカ合衆国においては技術基準における記述事項はほぼ日本の道路橋示方書と同程度であるが、道路関係の機関であるFHWAにおいて橋梁周辺の河床変動や洗掘について精力的に水理実験などの研究を行ってきたことが特徴としてあげられる。それらの成果は、例えば文献 13)～15) としてまとめられている。

5. 今後の道路橋の技術基準の方向

(1) 耐震設計基準

海外基準の比較結果及び現行耐震基準を踏まえて、今後の耐震基準の方向において重要と考えられる事項を述べると、確率論に基づいて地震力を設定しかつ大規模地震（レベル2地震）を考慮すること、2段階設計に合理性があること、理想と実務のギャップを解消するための合理性を追求すること、部門別設計の寄せ集めでなく全体でコーディネートした設計に転換すること、耐震性向上とコスト縮減の両立を目指すこと、そのためには新技術が必要であること、耐震性能に対する国民的合意を得ること、そのためにはわかりやすい説明が必要であること等がある。

(2) 洪水に対する技術基準

洪水に対する橋梁設計については、主に河川管理施設等構造令により規定されているが、洪水に対してより安全な橋梁構造を目指して、特に洗掘に対する効率的な調査手法、洗掘を受けにくい基礎構造、低コストの洗掘対策手法等について技術開発を行うことが必要であり、その成果を道路橋示方書の中に新たな規定として反映させるべきではないかと思われる。さらに、平成10年8月末豪雨では特に水衝部の橋台で変状や流失した事例が多くあり、早急に被災原因を調査し適切な対策法を検討する必要がある。

(3) 性能規定型基準

ISO、欧州コード等では次世代の基準として性能規定型基準の整備が進められつつある。日本においても建築分野では性能を基盤とした設計体系が整備されつつある。土木分野においても、性能規定型基準に移行すべく基礎的な検討が始められている。性能規定型基準の利点としては、設計の自由度が大きいこと、新技術の適用が容易であること、コストダウンを可能にすること、景観設計を可能にすること等がある。標準的な設計を目指す使用規定型基準に対して、性能規定型基準は自由な発想を生かし、景観、感性、環境等への配慮も可能とする総合的な設計システム体系を目指すものである。性能規定型基準への移行を計るためには、特に性能（安全性など）を確認するための試験あるいは解析による検証方法の整備が重要である。

(4) 維持管理に関する基準

現在供用年数50年以上の橋梁が橋梁全体に占める割合は6%であるが、2020年には30%近くになり、事業費に占める橋梁維持管理費の割合は年々上昇していくと予測される。既設橋梁をできるだけ長持ちさせ、維持管理費の低減を計ることがきわめて重要になる。これに対応するため、ライフサイクルコストを最小にするための考え方を導入した技術基準の整備が必要になる。

また、阪神大震災後、高速道路の橋脚については計画的に耐震補強が行われてきたが、社会資本全体から見ればごく一部耐震補強されたにすぎない状況である。社会資本全体の耐震性水準を上げてい

くためには、既設構造物を評価し、耐震補強を計画的に着実に実施していく必要がある。そのためには、低コストの補強法、補強のプライオリティの設定手法を含めた耐震補強に関する基準の整備が不可欠である。

同様に洪水に対しても、既存の橋梁のなかには現在の規定を満足しないものも多くあり、これらについてその安全性を照査し、順次計画的に補強等の対策を講じる必要がある。

6. あとがき

次の道路橋示方書の改訂の方向について、(社)日本道路協会橋梁委員会企画調整小委員会の中で検討されている。性能規定化への対応、限界状態設計法による書式、新技術への対応、現行基準をわかりやすくすること等が改訂のポイントになると思われる。また改訂作業の中で、安全性とコストのバランスをどこに設定するか、国際整合性をどこまで求めるかについても掘り下げた議論が必要であろう。

参考文献

- 1) PIARC Working Group 2: International Survey on Natural Road Disasters, September, 1997
- 2) 建設省土木研究所・福島県・栃木県豪雨災害現地調査団：平成 10 年 8 月末豪雨による福島県・栃木県河川・道路災害現地調査速報、土木技術資料 11 月号、1998 年
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、平成 8 年 12 月
- 4) 河川管理施設等構造令研究会編：解説・河川管理施設等構造令、(社)日本河川協会、昭和 53 年 3 月
- 5) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧（震前対策編）、昭和 63 年 2 月
- 6) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、平成 7 年 12 月
- 7) 土木学会コンクリート委員会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書（耐震設計編）改訂資料、(社)土木学会、平成 8 年
- 8) C.Rojahn, R.Mayes, D.G.Anderson, J. Clark, J.H. Hom, R.V. Nutt and M.J. O'Rourke: Seismic Design Criteria for Bridges and Other Highway Structures, April 30, 1997
- 9) Michio Okahara: Seismic Codes and Guidelines for Bridges in Various Countries, International Seminar on Natural Disaster Reduction for Roads, Istanbul (Turkey), 14-16 October, 1998
- 10) Michio Okahara, Masahiro Ishida: Retrofitting of Bridge Substructures in Japan, International Seminar on Natural Disaster Reduction for Roads, Istanbul (Turkey), 14-16 October, 1998
- 11) 土木研究所：九州中北部梅雨前線豪雨による橋梁の被害調査、土木研究所資料第 2964 号、平成 3 年 3 月
- 12) Federal Highway Administration: Stream Stability at Highway Structures, FHWA-IP-90-014, February 1991.
- 13) Federal Highway Administration: Evaluating Scour at Bridges Second Edition, FHWA-IP-90-017, April 1993.

15) Federal Highway Administration: Underwater Inspection of Bridges, FHWA-DP-80-1, November 1989.

公共構造物の耐震性向上のために
解決すべき課題とその現状

耐震技術研究センター長 保 田 雅 彦

公共構造物の耐震性向上のために解決すべき課題とその現状

耐震技術研究センター長 保田雅彦

1. はじめに

兵庫県南部地震が発生して以来、四年になろうとしている。その間、各種施設の耐震基準の改定や、多くの機関や地域で地震防災計画の策定が行われ、既存構造物においても耐震点検と耐震補強が全国的に展開され、耐震性の向上が図られつつある。しかし、公共構造物の耐震性向上のためには、まだ、多くの解決すべき課題が残されている。ここでは、社会的ニーズもあり、地震工学の分野でも話題となり、土木研究所耐震技術研究センターとしても重点的に研究を進めている次のような研究課題について現況を述べる。

- (1) 土木構造物の耐震性水準の横断的整合
- (2) 断層を直接的に考慮した高レベルの設計地震動
- (3) 橋梁の耐震設計（性能規定化に向けての課題）
- (4) 土構造物の耐震設計（高レベル地震動に対する設計法）

2. 耐震性水準の横断的整合

2.1 背景

1995年1月に発生した兵庫県南部地震においては、従来の予想をはるかに上回る強い地震動によって、公共構造物に大きな被害が生じた。これを受け、主だった公共構造物の耐震基準の改定が進められ、各々の施設の耐震性は向上しつつある。しかしながらその後、それらの基準における設計地震動のレベル、設定方法や、設計内容を定める際の施設の重要度の考慮方法が施設ごとにまちまちなのではないかとの指摘がなされた。

その後、建設省が設置した「構造物の耐震安全性向上に関する技術検討会」（座長：岡田恒男芝浦工大教授）において検討が行われた結果、同一地域内において同種の公共施設を設置する際の一貫性を有するように横断的調整を図る必要があると結論づけられた。¹⁾

このような考えは、社会基盤システムとしての耐震性やそのなかの個々の構造物のプライオリティづけに関する問題であるが、その議論は日本のみで行われているのではなく、たとえばアメリカ合衆国連邦道路庁（Federal Highway Administration: FHWA）による耐震補強マニュアル²⁾では、複数の道路橋の耐震補強を計画する際に、橋梁自体の重要度や想定地震動のほかに、道

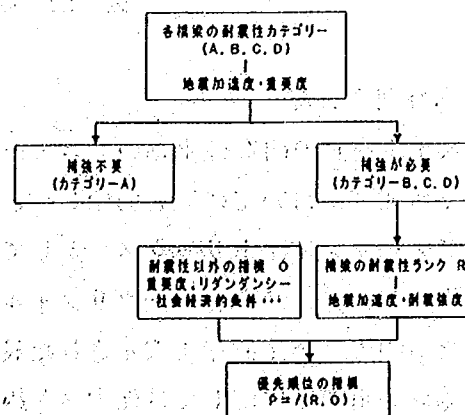


図-2.1 FHWA のマニュアルの流れ

路のネットワーク性等を考慮したリンダダンシーや社会経済的条件等を加味して補強の優先順位を定めることとしている。

上記のような背景を受け、建設省土木研究所では重点研究プロジェクト「耐震設計の体系化に関する研究」を開始し、公共構造物の耐震性水準の横断的整合に関する研究開発を開始したところである。

2.2 耐震性水準の一貫性に関する課題

複数の施設間で耐震性の一貫性を保ち、整合させるためには、施設の耐震性が定量的に表示されている必要がある。ここで、「耐震性」という概念には、ある施設が構築された時点でその施設が潜在的に有している耐震性と、実際に地震が発生したときに施設が発揮する耐震性の二つが含まれ得るが、ここでは前者を「耐震性水準（あるいは設計水準）」、後者を「(地震時)性能」と使い分ける。耐震性水準は、施設を構築した時点で定まってしまうが、地震時に発現する性能は入力地震動のレベルによって変化する。また、地震時性能は、周囲や施設利用者に対する安全性(safety)、地震時(後)の施設本来の機能(serviceability)、被災後の修復の容易さ(reparability)によって表現される。

このような定義に基づいて公共構造物の耐震性水準の横断的整合を一貫させるための表現は、地域で想定されるいくつかの地震動に対して、各施設の重要度に応じた地震時性能が発現されるように設計水準を決定することとなる。したがって、公共構造物の耐震性の一貫性を検討・検証するためには、入力地震動～地震時性能の関係がメニュー化されて明示されている必要がある。

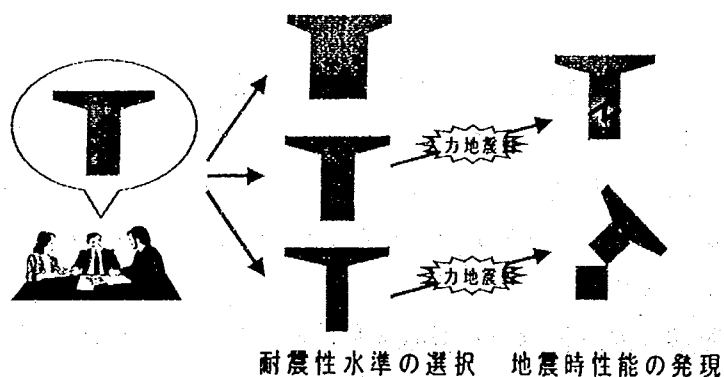


図-2.2 耐震性水準と地震時性能の違い

2.3 研究開発状況

公共土木施設の耐震性水準のメニュー化については、重点研究プロジェクト「耐震設計の体系化に関する研究」において研究を開始したところであるが、そこでは、入力地震動～地震時性能の関係を「パフォーマンスマトリックス」として表示する技術を確認しようとしている。パフォーマンスマトリックスは、アメリカ合衆国カリフォルニア州における建築物の性能基盤設計の検討過程において示されたもので、発生確率で表示された設計地震動レベルと要求性能レベルによるマトリックス中を示し、施設の重要度に応じて確保すべき線を表示している(*)。

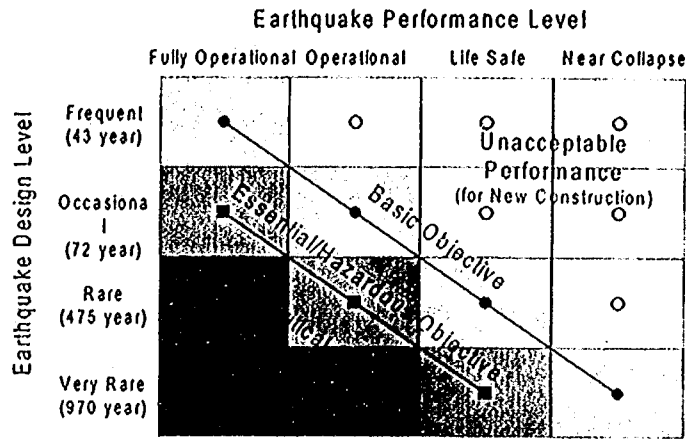


図-2.3 VISION-2000 におけるパフォーマンスマトリックス

図-2.3 の縦軸は設計地震動レベルであり、発生確率で表示されている。また横軸は設計地震動に対して要求される建築物の地震時性能のレベルで、Fully Operational（ほとんど無被害で機能に影響がない）、Operational（非構造部材や内装に被害はあるが建物の安定性に影響はない）、Life Safe（構造部材にある程度の被害があるが人命が損なわれることはない）、Near Collapse（建物の安定性に大きな影響が生じ余震等によって大被害を生じる可能性がある）といったカテゴリーで区分されている。この図の使い方は、あらかじめ構造物の重要度を定め、その重要度において、各設計地震動に対して要求される地震時性能を確保するよう設計を行うものである。図には三つの重要度すなわち Basic Objective（一般的な施設）、Essential Hazardous Objective（緊急活動に必須のあるいは危険物を収容した施設）、Safety Critical Objective（危険物を大量に収容した施設）に応じた線がひかれており、各重要度の施設は与えられた設計地震動に対して対応する性能以上の水準で（すなわち各線の左下側で）設計することが要求される。

すなわちこれらの線は、あらかじめ決定された施設の重要度に応じて確保すべき耐震性水準を示した線であり、要求水準線ともいえるものである。ところが実際の構造物では、一旦設計、構築を終えると各入力地震動に対して発現する性能は定まってしまうので、パフォーマンスマトリックス中の線が定まってしまう。先の要求水準線に対して、この線は実現水準線ともいうべきもので、あるいはこの線は、ある設計水準において一つ定まることから「等設計線」とも呼ぶことができる。

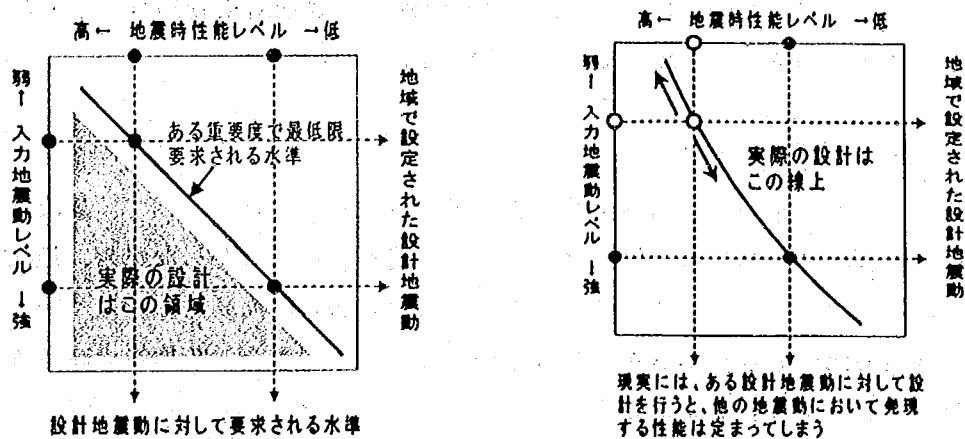


図-2.4 要求水準線による表示（左）と等設計線による表示（右）

理想的な設計の場合は、ある重要度の要求水準線と等設計線が一致するが、一般には、各要求性能を満足するように設計すると、多くの点で実現性能が要求性能よりも高くなる。地域によって、ある地震動レベルで性能を落としてある施設にかかるコストを下げたり、別の施設については意図的に性能を上げたい場合があるかもしれないが、従来のパフォーマンスマトリックスでは最適な計画は得られない。

すなわち、要求水準線で描かれたパフォーマンスマトリックスは政策的なリミットを規定するものであり、実際に地域で複数の施設を計画し、それらに関する（耐震対策の）投資配分を最適化する際には、等設計線で表示されたパフォーマンスマトリックスに基づいて各施設の設計水準を検討しなければならない。現在土木研究所においては、このような考え方で拡張されたパフォーマンスマトリックスの導出技術について研究開発を進めている(*)。

ここでさらに、パフォーマンスマトリックスの各等設計線上の設計水準に必要なコストを計算し、それが図-2.5のようなグラフ（曲面）で与えられているとする。

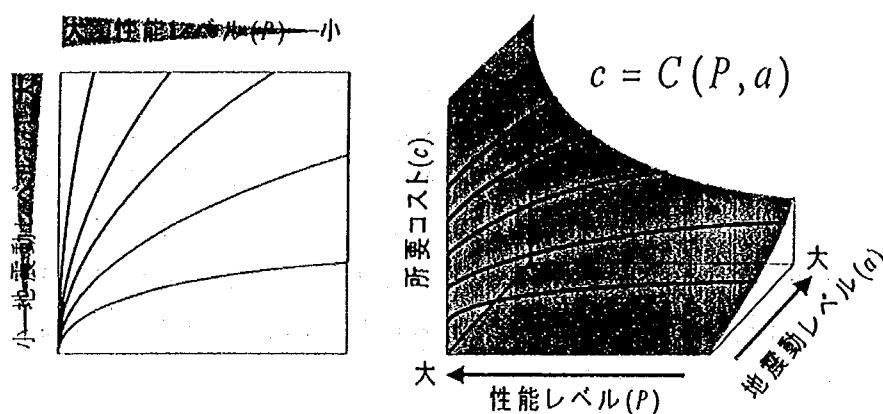


図-2.5 IOC 曲面の概念

もし、複数の施設の各々についてこのような曲面が得られていれば、地域において想定される地震動レベル、地域において各施設に求める性能、地域において全施設に支出が可能な耐震対策費用を勘案しながら、各施設の耐震性水準を選ぶ場合の有用な材料となる。図-2.5の曲面は、入力地震動 (Input)、地震時性能レベル (Output)、耐震性水準の確保に必要な対策費用 (Cost) を表したものであり、以後、Input-Output-Cost 曲面 (IOC 曲面) あるいは IOC 関数と呼ぶ。

2.4 耐震性水準の合理的な設定技術

複数の施設に関してパフォーマンスマトリックスが明示されることによって、施設間の地震時性能を比較しながら、重要度に応じた整合性を保つことが可能となる。しかしながら、地域によっては政策的に要求される性能よりも高い性能を欲したり、あるいは非常に簡易な施設については、性能を下げてでも費用を切り詰めたい場合があるかもしれない。このような場合、各施設の耐震性水準の絶対的なレベルを合理的に設定する必要が生じる。

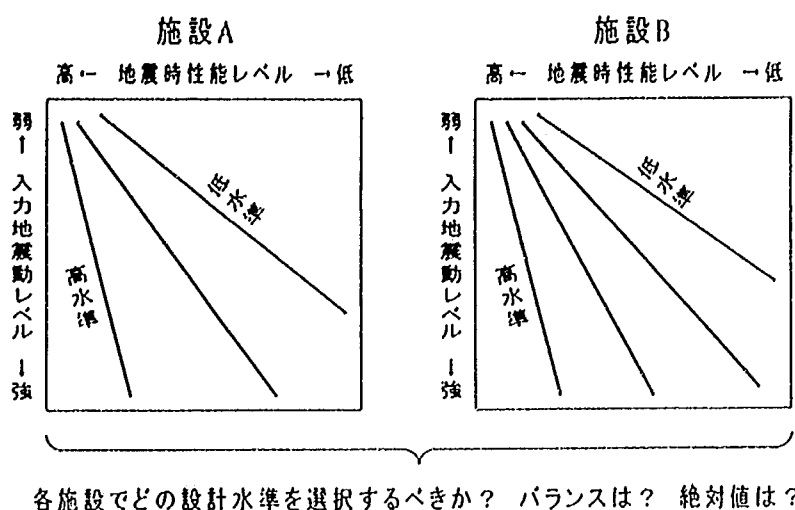


図-2.6 最適な設計水準の選択

有限の予算・資源によって、複数の施設の耐震性水準を確保することは、予算制約の下での投資配分として捉えることができる。このような問題は、通常、予算等の制約式の下で、何らかの目的関数を最大化（あるいは最小化）するという手順で解かれる。

$$\begin{aligned} \max \quad & Z(x_1, \dots, x_n) \\ \text{s.t.} \quad & f_1(x_1, \dots, x_n) = 0 \\ & f_2(x_1, \dots, x_n) = 0 \\ & \dots \end{aligned}$$

この式は、制約条件式 $f_i(x_1, \dots, x_n) = 0$ 等を満足しながら (with Subject To) 目的関数 Z を最大化する (MAXimize) ような $x_1, \dots, x_n$ を求めよ、ということを表しており、式形が与えられれば数学的に解くことが可能である。地震災害の場合、震災による損失を目的関数とし、これを最小化すればよい。その結果得られる解 $(x_1, \dots, x_n)$ は、各施設の想定地震に対する地震時性能で、それらから各施設の設計内容、対策費用が得られる。制約条件式については、「全施設の耐震対策費用の和が一定の予算制約額に等しい」ことや、「同一の施設で実現できる設計水準は一通りだけである」といった条件を等式として準備すればよいが、その際に地震動レベル（あるいはこれに対応した発生確率）、地震時性能レベル、耐震対策コストの関係を表した IOC 関数が必要となる。IOC 関数は、それ自体でも耐震対策投資の判断材料として有用であるが、このように解析的な問題に利用可能なことも利点の一つである。

ここで施設の地震時性能と地震時の損失を結びつけるために、各施設が社会・経済に与える影響を評価しなければならないが、土木研究所においては、たとえば河川堤防や道路施設の震災による経済的な影響の評価、緊急活動に影響を与える道路ネットワークの耐震性評価といった具体的な課題についても取り組んでいる。

2.5 まとめ

耐震性水準の地域における整合性の確保、合理的な水準の設定といった課題は、ハードウェアとし

ての工学のみならず、経済学、意思決定学といったソフトウェアの領域にも踏み込んで考える必要があり、一見すると難解である。また、このようなアプローチには、様々な関数の決定方法をどうするか、IOC 曲面を有意な精度で得ることができるかといった実用上の課題を解決していかなければならない。しかしながら、公共構造物を構築する際の効果の測定、事業の評価は時代の趨勢であり、耐震対策についても、その妥当性のチェックが求められている。このため、土木研究所においては、重点研究プロジェクトによって、平成 14 年度を目途として本章のような課題を含む耐震設計の体系化に向けた研究開発を進めているところである。

【参考文献】

- 1) 構造物・施設等の耐震安全性向上に関する課題と今後の取り組みについて構造物の耐震安全性向上に関する技術検討会、1998 年 2 月
- 2) Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges, U.S. DOT, Federal Highway Administration, May, 1995
- 3) VISION 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California Vision 2000 Committee, April 1995
- 4) 社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定法に関する基礎的研究土木技術資料、1999 年 1 月
- 5) 上田孝行：「防災投資の便益評価－不確実性と不均衡の概念を念頭に置いて－」，土木計画学研究・講演集 No.19(2)，pp17，1996 年 11 月

3. 断層を直接的に考慮した高レベルの設計地震動

3. 1 設計地震動に関する課題

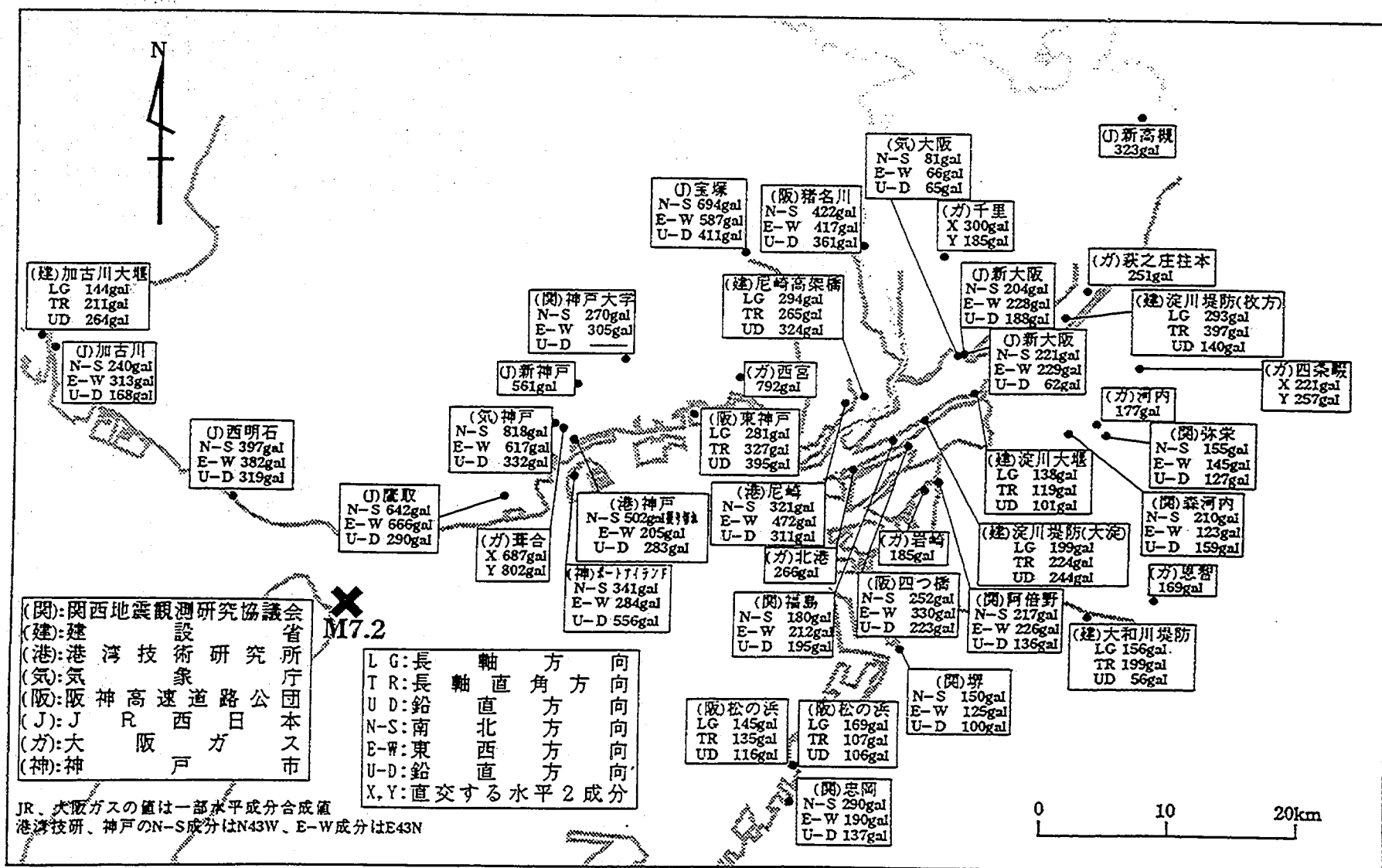
平成 7 年兵庫県南部地震では種々の機関により多数の貴重な強震記録が得られ、従来我が国ではほとんど観測されることがない極めて大きく、かつ、短時間に衝撃的な地震動が生じたことが明らかにされている。図-3.1 は、各機関により発表された最大加速度を示したものであるが¹⁾、これによれば、地盤上の観測記録の水平成分の最大加速度が 600gal を越えた地点は、神戸海洋気象台（気象庁）、鷹取（JR 西日本）、葦合（大阪ガス）、宝塚（JR 西日本）及び西宮（大阪ガス）の 5 箇所あり、広範囲な地域において大きな最大加速度が生じている。

従来、一般に、土木構造物の耐震設計において考慮されていた地震動は、大正 12 年の関東地震に代表されるようなプレート境界型の地震により震源からある程度離れた地点に生じる地震動であり、兵庫県南部地震のような内陸直下型地震による地震動は考慮されていなかった。兵庫県南部地震を契機に、実測された強震記録、既往の研究成果等をもとに、種々の耐震設計基準類が改訂されたが^{例えば、2)、3)}、断層近傍における強震記録の数は限定されており、その地震動特性については依然として未解明な点が多いのが現状である。

以上のような背景のもと、強震記録、距離減衰式等に基づく地震動の既往の推定手法に加え、断層を直接的に考慮することが可能な断層モデルを用いた地震動の推定手法に関する研究が精力的に進められている。断層モデルによる地震動の推定手法は地震学の分野で開発され^{例えば、4)、5)}、従来、耐震

図-3.1

兵庫県南部地震による最大加速度の値 (文献1) による)



JR、大阪ガスの値は一部水平成分合成値
 港湾技研、神戸のN-S成分はN43W、E-W成分はE43N

工学では活用された事例は少ないが、最近では、その適用が積極的に検討されている。また、距離減衰式についても、内陸直下型地震による強震記録を加え、断層近傍にも適用可能な手法の検討が進められている。さらに、活断層及び地震発生地域性を考慮した地震危険度解析に関する研究も行われている。

一方、地震動と構造物の損傷という観点からは、兵庫県南部地震で生じたような非常に強い地震動に対しても、構造物の強度を向上させることによって全く損傷を生じさせないような設計を行うことには限界があり、構造物に一定の損傷、すなわち、塑性化が生じることを許容した設計を行うことが合理的である。構造物の塑性化を考慮した耐震設計とは、構造部材の変形性能を高めることにより、全体として地震に耐える粘りのある構造系を形成しようとするものであり、例えば、地震後に改訂された道路橋示方書では、地震時保有水平耐力法によりこのような耐震設計法が取り入れられている²⁾。構造物の塑性化を考慮した非線形挙動は、地震動特性によって複雑に変化するため、それを適切に評価するための非線形応答スペクトルに関する研究が進められている³⁾。

3. 2 断層モデルを用いた地震動の推定

断層モデルを用いた地震動の推定手法は種々提案されているが、代表的な手法としては、図-3.2に示すように、解析対象とする断層面を適当な大きさの小領域に分割し、各小領域から発生する地震動を重ね合わせるものがある。ここで、各小領域から発生する地震動としては、前震または余震による実測強震記録が用いられる場合が多い。また、断層モデルによる地震動推定では、地震波の伝播経路及び表層地盤内の増幅の影響が数理モデルとして取り込まれる。

断層モデルを用いた地震動の推定手法は、断層の破壊メカニズムを考慮できるとともに、例えば、既往の距離減衰式では適用が困難であった震源近傍における地震動の評価が可能であるといった長所を有する。一方、本手法を用いるためには、断層の位置、大きさ、破壊の進行状況等、種々の断層パラメータを設定することが必要であるが、その多くは十分な精度で調査することが非常に困難であり、また、設定されたパラメータにより地震動の推定結果が大きく異なるという問題がある。一例として、兵庫県南部地震の断層パラメータを種々変化させて、神戸海洋気象台地点における地震動を加速度応答スペクトル（減衰定数 0.05）で

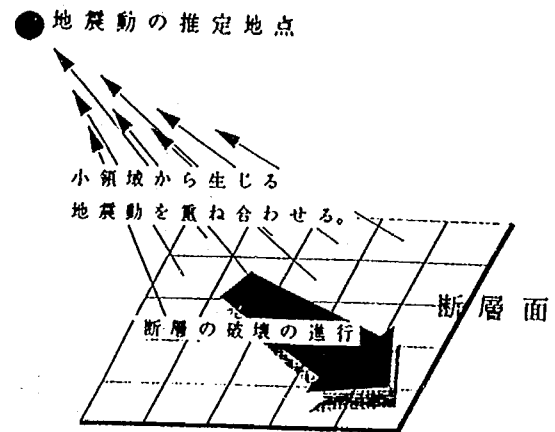


図- 3.2 断層モデルを用いた地震動の推定

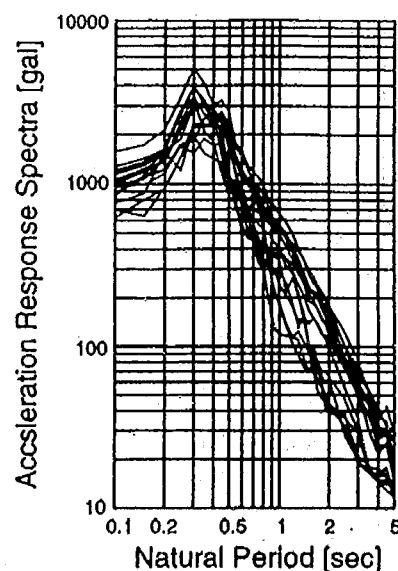


図- 3.3 神戸海洋気象台における
加速度応答スペクトル

表した結果を図-3.3 に示す。この図より、固有周期によっては、断層パラメータの設定により推定された加速度応答スペクトルは5倍程度以上異なる場合があることがわかる。

現在、各所にて断層の調査が進められるとともに、断層モデルを用いた地震動の推定手法についても高度化が図られているところであり、さらに今後は設計実務等に向けた実用化が期待されているところである。

3. 3 構造物の塑性化を考慮した設計地震動

平成8年に改訂された道路橋示方書では地震時保有水平耐力法により構造物の非線形域の変形性能及び耐力を考慮した設計が行われているが、構造物の非線形応答を評価する際には簡便なエネルギー一定則が仮定されている。エネルギー一定則とは、弾塑性復元力特性を有する1質点系構造物が地震動を受けた場合には、弾塑性応答と弾性応答の両者の入力エネルギーがほぼ同量となるという考え方に基づく近似的な解析法であり、構造物の実際の非線形応答は、地震動特性により変化することが知られている。

地震動の特性が構造物の塑性化に伴う非線形応答に与える影響の評価法として、リダクションファクターを用いる方法がある⁹⁾。図-3.4 に、リダクションファクターの概念を示す。リダクションファクターは、構造物がある地震動に対して弾性域内で応答するために必要な降伏耐力 F_e と、構造物にある一定の塑性化（じん性率 $\mu = \delta_{max}/\delta_y$ ）を許容した場合に必要な降伏耐力 F_y の比 F_e/F_y で表現されるもので、構造物に塑性化を許容することにより降伏耐力をどの程度低減できるかを表す1つの指標である。このリダクションファクターを異なる固有周期の構造物に対して算出したものをリダクションファクター・スペクトルという。

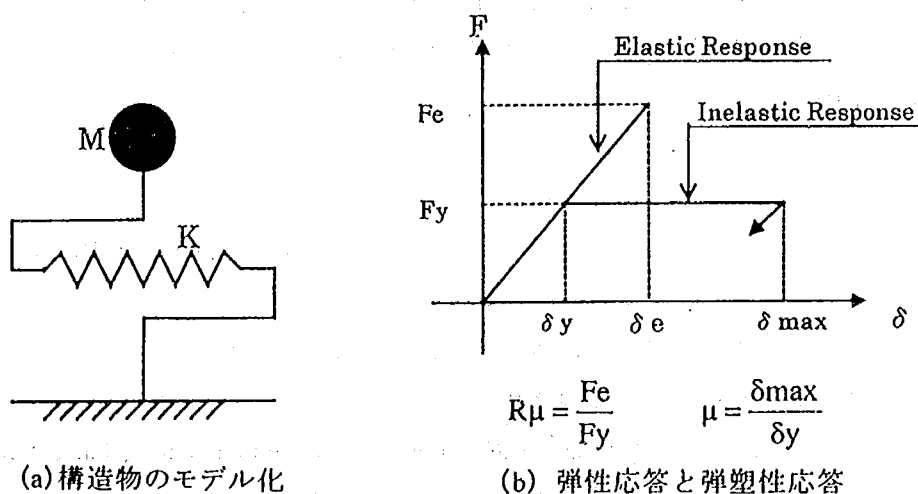


図-3.4 リダクションファクターの概念

プレート境界型地震による地震動（以下、タイプⅠ地震動とする）と内陸直下型地震による地震動（以下、タイプⅡ地震動とする）に対してリダクションファクター・スペクトルを算出した例を図-3.5 に示す。ここでは、タイプⅠ地震動としては昭和53年の宮城県沖地震による開北橋記録（橋軸直角

方向成分)を、タイプⅡ地震動としては兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録(南北方向成分)を用いた。タイプⅠ地震動の場合、広い周期帯においてリダクションファクターの値が比較的大きいとともに、じん性率への依存が大きくなっている。一方、タイプⅡ地震動では短周期領域においてはリダクションファクターの値が小さいとともに、じん性率への依存が小さいが、固有周期が長くなるとリダクションファクターが急激に大きくなるとともにじん性率への依存が大きくなっている。図-3.5 から、地震動の特性の違いにより、地震動が構造物の非線形応答に与える影響も異なることがわかる。

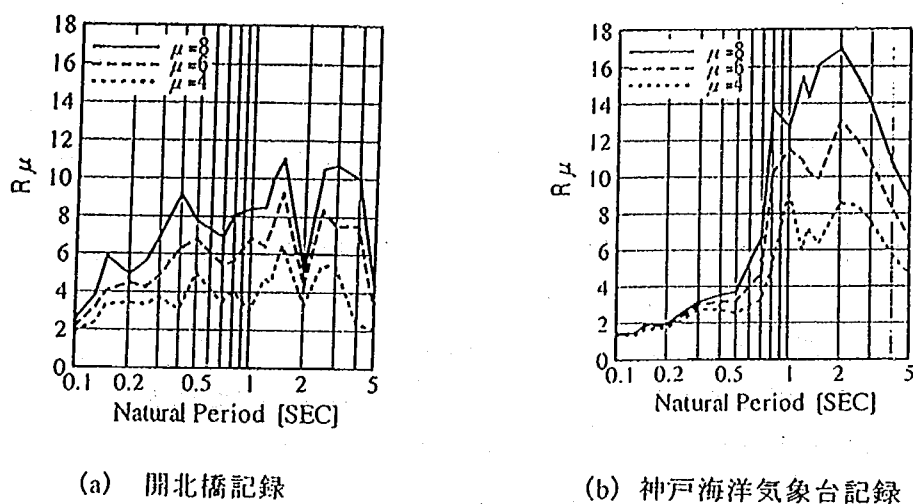


図-3.5 リダクションファクタースペクトル

現在、構造物の非線形応答に影響を及ぼす地震動の特性を解明するための研究が進められており、さらに、その結果をもとに、構造物の非線形応答に影響を及ぼす地震動特性を適切に考慮した設計地震動の設定が可能になる。

【参考文献】

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、1995
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅴ耐震設計編）、1996
- 3) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説、1997
- 4) Kojiro Irikura : Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquakes, Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol.33, No.298, 1983
- 5) 翠川三郎、小林啓美：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定、日本建築学会論文報告集、第282号、1979
- 6) 山本浩一、田村敬一、本田利器：直下型の地震動が非線形系の応答に与える影響について、第24回地震工学研究発表会、1997

4. 橋梁の耐震設計

4. 1 概要

本節では、橋梁構造物を対象に耐震設計法の現状について整理するとともに、耐震設計法の海外基準との比較を行い、将来の耐震設計体系の開発の方向と研究課題について述べる。

4. 2 橋梁構造物の耐震設計法の現状

(1) 橋梁構造物の耐震設計の基本思想

橋梁構造物は、上部構造、支承、橋脚、基礎、ケーブルなどの各種の構造部材で構成される。地震時には、これらの構造部材は、相互に影響しないながら地震力による様々な作用力を受ける。また、橋梁構造物を構成する構造材料としても、コンクリートと鉄筋、P C鋼材、鋼板、ゴム、さらには、FRP等の新素材など多くの材料が用いられている。表4.1は、橋梁構造物の構造特性や材料特性などを分類したものである。部材の中にも柱部材や梁部材、版部材など様々な部材があるとともに、これらの部材を組み合わせて構造物が構成される。さらに、通常の鉄筋コンクリート部材やプレストレストコンクリート部材といったコンクリート部材及び鋼部材の他に、合成構造やコンクリート充填鋼管部材などコンクリートと鉄筋のみならず鋼部材と組み合わせる部材もある。また、材料特性として高強度材料や低降伏点材料が用いられる場合もある。一方、こうした構造部材は地震時の構造物全体の挙動の中で、軸力、曲げ、せん断、ねじりが単独でまたはこれらが組み合わさって作用する。地震時の作用力の特徴として重要であるのは、地震力が繰返し作用する点にある。

表4.1 橋梁構造物の構造特性と地震力の作用

構造部材	構造特性	材料特性	強度・変形特性	地震力の作用	作用特性
上部構造 支承構造 橋脚構造 基礎構造 ケーブル	柱部材 はり部材 版(面)部材 壁部材 柱梁接合部 杭部材 フーチング部材 ラーメン部材 アーチ部材 シェル部材 支承部材	R C部材 P C部材 鋼材 S R C部材 充填鋼管部材 ゴム材 FRP等の新素材	普通強度材料 高強度材料 低強度材料 高じん性材料	軸力 曲げ せん断 ねじり これらの組合せ 作用レベル ・線形域 ・非線形域	繰返し載荷 一方向載荷

橋梁構造物に関する我が国の主要な耐震基準等に規定される耐震設計の基本思想を以下に示す。例えば、表4.2は、道路橋の耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能、およびこれを検討するための耐震計算法を示したものである¹⁾。道路橋の耐震設計で考慮する地震動としては、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動および供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動の2段階の地震動を考慮することとされている。ここで、橋の供用期間中に発生する確率が高い

地震動としては、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震による地震動とし、従来の耐震設計において震度法に用いる設計震度として規定されてきた地震力を踏襲している。また、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動としては、平成2年の耐震設計編において規定されていた大正12年の関東地震の際の東京周辺における地震動のように発生頻度が低いプレート境界型の大規模な地震による地震動に加え、平成7年兵庫県南部地震のように発生頻度が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震による地震動を考慮することとされている。

表4.2 耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能

耐震設計で考慮する地震動		目標とする橋の耐震性能		耐震計算法	
		重要度が標準的な橋 (A種の橋)	特に重要度が高い橋 (B種の橋)	静的解析法	動的解析法 (地震時の挙動が複雑な橋)
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動		健全性を損なわない		震度法	
橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動	タイプⅠの地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	致命的な被害を防止する	限定された損傷にとどめる	地震時保有水平耐力法	時刻歴応答解析法
	タイプⅡの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)				応答スペクトル法

これらの地震動に対して、橋の耐震設計は、橋の重要度に応じて必要とされる耐震性能を確保することを目標として行うこととされており、重要度が標準的な橋については、致命的な被害を防止することを目標とし、また、高速道路、一般国道、緊急輸送道路等における特に重要度が高い橋では、限定された損傷にとどめることを目標としている。

構造物の耐用期間中にまれに起るような大地震に対しても全く損傷を受けないような構造物を作ることは技術的にも、また、コストなどの面でも必ずしも現実的な対応とはいえない。このため、大地震に対しては、多少の損傷を許容し、これによって地震のエネルギーを適切に吸収することができれば、致命的な損傷を防ぎ、構造物として安全かつ合理的な設計が可能になる。このため、道路橋の耐震設計では、構造部材の強度を向上させると同時に変形性能を高めて橋全体として地震に耐える構造系を目指すために、耐震設計は震度法だけではなく地震時保有水平耐力法によっても行うこととされている。

表4.3は、土木学会コンクリート委員会によりまとめられた各種構造物の耐震性能と限界状態の定義を示したものである²⁾。ここでは、土木学会コンクリート標準示方書、建築、道路橋、水道タンク、鉄道橋、LNG 地下タンクなどに対する耐震性能と限界状態がまとめられている。表4.3に示されるように、いずれの構造物に対しても、基本的には、レベル1地震動（構造物の耐用期間内に数回発生す

表4.3 耐震性能と限界状態の定義 (参考文献 [2] による)

耐震性能		耐震性能 1		耐震性能 2		耐震性能 3		
		レベル 1 地震動		レベル 2 地震動				
		地震後にも機能は健全で、補修をしないで使用可能		地震後に機能が短期間で回復出来、補強を必要としない、		地震によって構造物全体系が崩壊しない、		
示方 解説	限界状態	地震後の残留変形十分に小さい		耐荷力低下せず、 残留変形が限度以下 せん断破壊回避、 応答塑性率が靱性率以下		せん断に対して十分な安全性を確保		
	照査項目	鉄筋降伏以下、 圧縮破壊に対して十分安全						
Priestley の定義*		Serviceability Limit State		Damage-Control Limit		Survival Limit State		
建築分野 総プロ中間		使用性 (Serviceability Limit) 使い易さ、住み易さ		修復性 (Assigned Damage) 損傷の制御		安全性 (Ultimate Limit) 人命の危険の回避		
道路 橋	耐震性能	健全性を損なわない (高確率で発生する地震)		限定された損傷に止める (大地震+重要度:特に高い)		致命的な被害を防止する (大地震+重要度:標準的)		
	照査項目	許容応力度以下 震度法・弾性理論で算出		耐力照査+残留変位(1/100) 応答塑性率より算出		耐力照査 許容塑性率・等価震度で算出		
水道 タンク	耐震性能	液密性を維持+補修不要 (高確率で発生する地震)		液密性を維持 (大地震:プレート境界型)		崩壊防止+液密性維持不要 (大地震:内陸直下型)		
	照査項目	ひび割れ幅+コンクリート応力		残留ひび割れ幅+ひずみ		急激な破壊防止 2次被害を起こす漏洩防止		
鉄道用橋梁	走行性	耐震性能	通常走行可能、損傷無し (列車走行安全性)		不明 (脱線する可能性の大小で分類可能)			
		照査項目	走行性に対する変位の制限値 支承部+躯体は降伏以下					
	復旧性	耐震性能	損傷無し (支承、躯体、基礎、安定)		支承	躯体	基礎	安定
		照査項目	降伏耐力以下		補強が必要 落下防止工	補強が必要 応答塑性率以下	補修必要 降伏耐力以下	基礎に残 留変位 許容塑性 率以下
L N G 地下タンク	耐荷性能 (躯体)	ひび割れを許容 鉄筋降伏以下		全体変形として、崩壊に対して 安全率を確保		構造系として崩壊しない		
	止水性能 (躯体)			ひび割れが貫通しない		保持の必要なし		
	気密性能 (マンダレン屋根)			マンダレンの破断回避 屋根と躯体の相対変位規定				
	液密性能 (マンダレン配管)			マンダレン・配管の破断回避 配管と躯体の相対変位規定				
	剛体安定 (躯体)	照査不要		地盤が液状化しない		躯体が転倒しない		
	手法毎の照査項目	応答変位法:現状	鉄筋降伏以下		曲げ破壊、せん断破壊に対して 十分な安全率、全断面引張		曲げ破壊、せん断破壊に対して適切な安全率	
		3次元動的応答	未使用		面部材の応答塑性率 せん断破壊		面部材の応答塑性率 せん断破壊	
		理想非線形	未使用		せん断破壊に対して十分安全		計算が途中で発散しない	

注) M.J.N.Priestley, F.Seible, G.M.Calvi: SEISMIC DESIGN AND RETROFIT OF BRIDGES, John Wiley & Sons, INC.

る大きさの地震動)とレベル2地震動(構造物の耐用期間内に発生する確率が極めて小さい強い地震動)の2段階の地震力を考慮することとされ、これらに対して、所要の耐震性能を満足させることを目標としている。耐震性能としては、いずれの基準に対しても地震後にも機能は健全で補修をしないで使用可能な性能レベル、地震後に機能が短期間で回復でき補強を必要としない性能レベル、地震によって構造物全体が崩壊しない性能レベルの3種類に大きく整理されている。

(2) 橋梁構造物の終局状態の評価法の現状

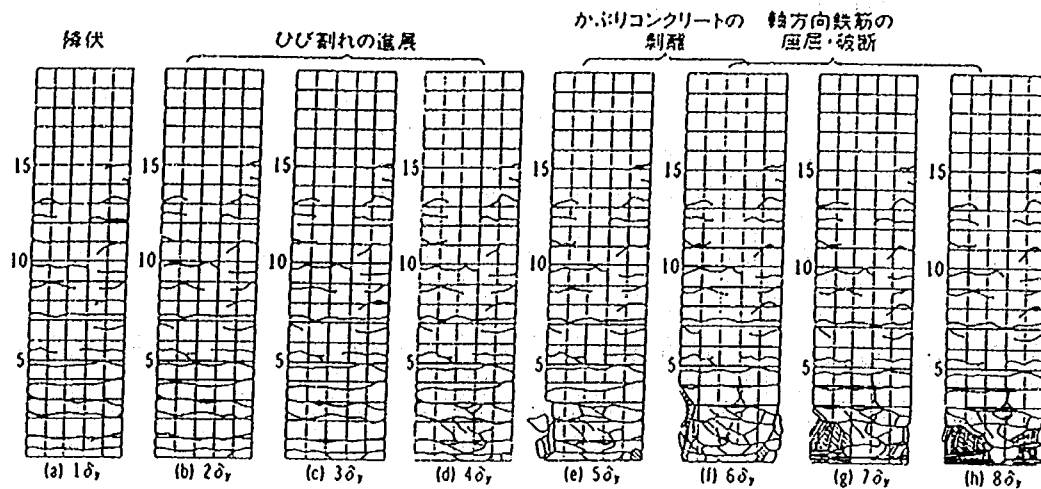


図4.1 鉄筋コンクリート橋脚の損傷の進展の一例

図4.1は、橋梁構造物を構成する構造部材の損傷の一例として、鉄筋コンクリート橋脚模型の正負交番繰返し載荷実験による橋脚の水平変位と損傷の進展状況を示したものである。ここで、 $1\delta_y$ は橋脚の降伏変位で、橋脚基部の鉄筋が降伏する時に橋脚天端に生じる変位である。震度法では許容応力度法で設計することから、降伏変位はほぼ震度法で生じる変位に相当する。実験では、一般にこの変位の整数倍で載荷変位を漸増させながら損傷状況や耐力特性等を調べる。これによれば、曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚の損傷は、ひびわれの発生、ひびわれの進展、かぶりコンクリートの剥離、軸方向鉄筋の座屈・破断によって最終的に破壊に至る過程をたどる。曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚の水平耐力と水平変位の関係は、一般に図4.2に示す通りとなり、弾性状態から、軸方向鉄筋の降伏により水平耐力が一定になり、その後のかぶりコンクリートの剥離や軸方向鉄筋の座屈・破断等により水平耐力が低下するというように、損傷の進展とともに水平抵抗が変化する。

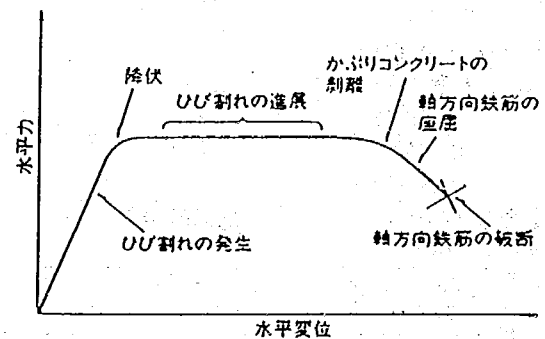


図4.2 鉄筋コンクリート橋脚の水平耐力と破壊モードの関係

大規模地震に対して、構造物に損傷が生じることに立ち入って耐震設計を行うためには、このような

構造物の挙動（損傷の進展、水平耐力～水平変位関係）を適切に把握することが必要不可欠である。上部構造、支承、橋脚、基礎といったそれぞれの構造部材について、非線形域の破壊に至る挙動特性を十分に理解する必要がある。例えば、上記の鉄筋コンクリート橋脚の損傷モードは、大きくは曲げ破壊型とせん断破壊型に分類することができ、これらの破壊モードは、橋脚の有している曲げ耐力やせん断耐力の大きさによって定められる。曲げ破壊型では、非線形域に入っても水平耐力を保持できるが、せん断破壊の場合には脆性的な破壊をするので、非線形域のじん性を期待できない。このため、基本的には曲げ破壊モードとなるように必要なせん断耐力を向上させることが重要となる。また、損傷の進展とともに、破壊モードが変化することが知られており、図4.3に示すように曲げ耐力とせん断耐力の大きさによってさらに曲げ損傷からせん断破壊移行型の破壊モードがある。同様に、支承部材や鋼製橋脚、基礎などについても破壊モードと破壊モードに応じた非線形域の挙動特性、終局状態の決定要因などについて実験的な研究が、特に兵庫県南部地震以降積極的に行われてきている。

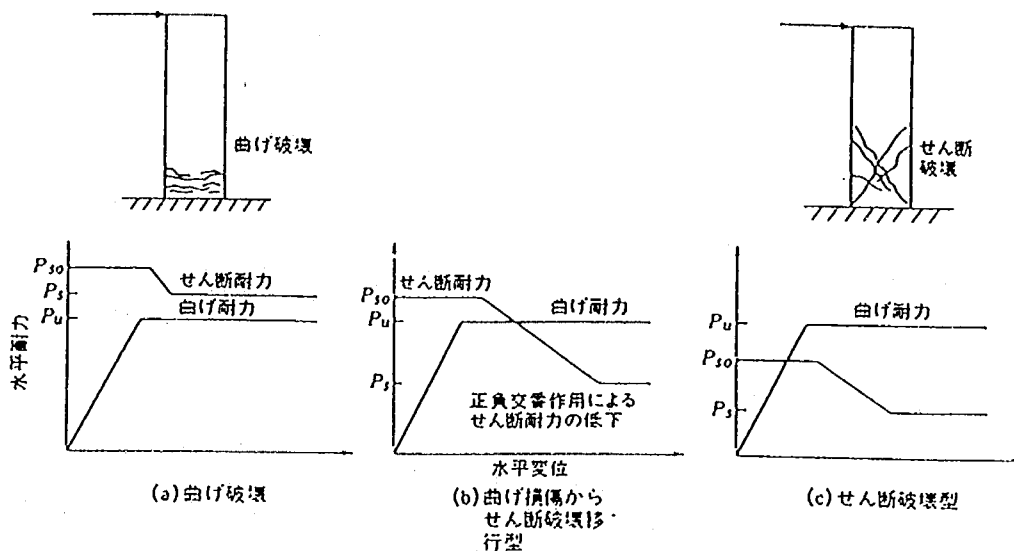


図 4.3 鉄筋コンクリート橋脚の水平耐力と破壊モードの関係

表4.4は、橋梁構造物の終局状態の評価法の現状をまとめたものである。鉄筋コンクリート部材の場合には、破壊モードについては、前述のように大きくじん性を期待できる曲げ破壊型とじん性を期待できないせん断破壊型、さらにこれの中間に分類される場合が多い。せん断耐力は、一般にトラス理論に基づき、コンクリートの負担分と鉄筋の負担分の和により算出する方法が一般に用いられている。降伏後の曲げ終局については、構造細目を規定し一律にじん性を与える方法、コンクリートの応力～ひずみ曲線を定義し、圧縮縁のコンクリートの終局ひずみにより終局状態を与える方法がある。また、破壊モードが曲げ損傷からせん断破壊に移行するという現象に着目し、曲げ耐力とせん断耐力の比により終局状態を評価する手法がある。

表4.4 橋梁構造物の地震時の終局状態の評価法の現状

項 目			地震時限界状態の評価法
支 承	金属系 支承	耐力	・ 水平地震力に対するせん断耐力 ・ 鉛直地震力に対するアンカー耐力
	ゴム系 支承	変形性能	・ 水平せん断ひずみの限界値 ・ 局部せん断ひずみの限界値 ・ 大変形時の支承の座屈安定評価
橋 脚	鉄筋 コン クリ ート 橋 脚	破壊モードの評価法	・ 曲げ破壊型、せん断破壊型：コンクリート標準示方書 ・ 曲げ破壊型、曲げ損傷からせん断破壊移行型、せん断破壊型 ：道路橋示方書
		せん断耐力の評価法	・ トラス理論に基づき、コンクリートの負担するせん断力とせん断鉄筋が負担するせん断力の和として評価 ・ コンクリートの負担するせん断力については、一般に梁の試験データに基づく評価式が一般的に用いられている。載荷方法は、一般に一方向載荷
		曲げ終局の評価法	・ 構造細目を規定し一律にじん性率を与える方法：米国基準 ・ 圧縮縁のコンクリートひずみにより終局を評価 ① 帯鉄筋による拘束効果を評価する方法：道路橋示方書 ② 帯鉄筋による拘束効果を評価しない方法：ユーロコード ・ 曲げ耐力とせん断耐力の比により評価 ：コンクリート標準示方書
	鋼製 橋脚	じん性評価法	・ 構造細目を規定し一律にじん性率を与える方法 ・ 鋼製橋脚のパラメータに基づくじん性率の実験推定式 ：道路橋示方書
基 礎	杭基礎のじん性評価		・ 杭～地盤モデルのプッシュオーバー解析による荷重～変位関係の評価：道路橋示方書 ・ 杭本体及び支持力の終局、地盤の破壊による終局評価
全 体 系	変位制限		・ 全体系の変形制限 ・ 残留変位の制限：道路橋示方書，コンクリート標準示方書

支承部材については、金属支承やゴム支承などさまざまな支承構造が用いられているが、一般に金属系支承の場合には終局耐力が、ゴム系支承の場合にはせん断ひずみ、局部せん断ひずみ、大変形時の安定など変形性能が重要となる。弾性ゴム系支承は、ほぼ弾性特性を有する状態から、あるい変位を越えるとハードニング特性を有し、変位を拘束する効果を有する。

鋼製部材については、兵庫県南部地震において初めて鋼製橋脚の被害が発生し、その後多くの研究が進められてきている。円形断面を有する鋼製橋脚では円環型の大きな座屈破壊を、矩形断面ではコーナー部の溶接部で破断が生じることが脆性的な破壊に結びつきやすい。兵庫県南部地震で崩壊した鋼製橋脚、大きな残留変位を生じた鋼製橋脚はいずれもこのような破壊モードが原因となっている。

これに対して、コンクリートを内部に充填したり、コーナー部の溶接部の破断を防止するようにコーナー部を補強することにより、鋼製橋脚ねばり強さを向上させることが可能になる。現在、鋼製部材の終局状態の評価法としては、鋼製橋脚の幅厚比パラメータなどのパラメータと実験から求められたじん性率の間の関係式を求めた実験式が提案されている。しかしながら、まだ、1本柱形式の鋼製橋脚を中心としたものであり、今後不静定構造系への適用を含めてさらに研究が必要とされている。

4. 3 海外の耐震設計基準の現状

(1) 海外の耐震設計基準の現状

表4.5は、米国、ニュージーランド、ヨーロッパ、日本の耐震設計法の概要を比較したものである。耐震設計の基本的な思想は同様ということが出来るが、以下の2点が大きく我が国とは異なっている。

1) キャパシティデザイン

海外の基準では、通常の単純な橋梁構造の場合には、損傷をどこに誘導するかを明確に想定している。損傷の発見しやすさと復旧しやすさを考慮して損傷位置を特定している。想定した位置に確実に損傷を誘導し、ここにねばりを確保することによって大規模地震の際にも想定しない致命的な被害を防止しようという考え方である。例えば、簡単な例では1本柱に対する曲げ破壊とせん断破壊モードであり、せん断破壊を避け、粘り強い曲げ破壊にするために、せん断耐力の算定においてこうした影響を考慮している。我が国の耐震設計法でも暗にはこうしたことが考慮されているが、例えば、材料の過強度の影響などは明確に設計の中で取り扱われていないのが現状である。

2) 地震動の作用方向

我が国では、長大橋など特別な場合を除いて橋軸方向と橋軸直角方向の2方向にそれぞれ独立に地震力を作用させて耐震照査を行うのが一般的である。しかしながら、例えば、米国では、橋軸方向に地震力を作用させて生じる断面力と橋軸直角方向に地震力を作用させて生じる断面力がある割合で重ね合わせて設計断面力を求める。実際の地震力は、2次元、3次元的作用であり、地震動の3次元的作用が構造物に及ぼす影響を明らかにしていく必要がある。米国では、一般に円形断面が用いられる場合が多く、こうした設計の考え方が影響している。

(2) 性能設計法の開発に関する現状

将来の耐震設計の方向として、性能設計法が指向されている。既に建築基準法については、建設費の縮減や新技術の開発促進、国際貿易の振興の観点から性能設計に移行している。土木構造物に対しても同様であり、耐震性能の明示のため、また、コスト縮減や耐震性の向上のための新技術の開発促進のために、構造物に対する要求性能を明確にし、要求耐震性能を実現するために必要とされる土木構造物の機能や限界状態を明確にするとともに、これを具体的に耐震設計法として表現する方法を確立していくことが必要とされる。

表4.6は、各国の性能設計に関する現状と基本的な考え方について整理したものである。海外では、NKB（ノルディック建築基準委員会）が1972年から始めており、建築分野を中心に性能設計法の導入が進められてきている。土木構造物に関しては、これからという段階にあり、積極的な研究が進みつつある。

表4.5 橋梁構造物の耐震設計思想の国際比較

項 目		米国 (ASSHTO-LRFD)	ニュージーランド	欧州 (ユーロコード8)	日本 (道路橋示方書)
耐震設計法	耐震設計の基本方針	・ 構造全体系として地震に抵抗し、強振動時に崩壊を防止する	・ 同左	・ 発生頻度が高い地震に対しては被害を生じないこと ・ 安全性を評価する地震に対しては崩壊しないこと	・ 橋の供用期間中に発生する確率が高い地震に対しては健全性を損なわないこと ・ 橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を有する地震動に対しては致命的な崩壊を防止すること
	耐震設計法	・ 1段階設計 (最大級と考えられる大規模地震に対する耐震設計を行う)		・ 1段階設計 (安全性を評価する地震に対する耐震設計のみを行う。中小地震は、前者に包括されるという考え方)	・ 2段階設計 (震度法と地震時保有水平耐力法)
	重要度の考え方	・ 3段階 (設計地震力の割り増しに反映)	・ 3段階 (設計地震力の割り増しに反映)	・ 3段階 (詳細は各国で設定)	・ 2段階 (構造物の限界状態に反映)
耐震解析法	解析法の選定 ・ 静的・動的解析 ・ 線形・非線形解析	・ 最大設計震度および構造物の重要度を考慮して選定	・ 構造物のねばり強さを考慮して選定	・ 構造物のねばり強さを考慮して選定	・ 構造物の特性、複雑度によって選定
	地震動の方向性	・ 水平2方向を重ね合わせ (100%橋軸方法+30%橋軸直角方向)	・ 水平2方向を考慮 ・ 2方向を独立に照査	・ 水平2方向、鉛直1方向を考慮 ・ 各方向を重ね合わせ	・ 水平2方向を考慮 (特殊構造では鉛直も考慮) ・ 2方向を独立に照査
設計地震力		・ 弾性震度スペクトルの値を低減係数Rで除した値を等価設計地震力 ・ 設計地震力の最小値 (0.1~0.2W)	・ 降伏震度スペクトル ・ 設計地震力の最小値: 0.05W	・ 弾性震度スペクトルを低減係数qで除した値を等価設計地震力 ・ 最小値の規定なし	・ 弾性震度スペクトルを許容塑性率を用いたエネルギー一定則で低減して等価設計地震力を算定 ・ 設計地震力の最小値: 0.4W (地域別による補正)

表4.6 性能設計法の開発の現状

対 象		建築 (一般)					建築 (耐震)					橋梁 (現行基準: 耐震)	
国 名		ノルディック5ヶ国	イギリス	オーストラリア	ニュージーランド	USA	USA	EU	ISO	日 本	USA	日 本	
基準名		アクションプログラム 1972	建築規則(1984, 1985, 1991)	オーストラリア性能建築 コード 96(BCA96)	ニュージーランド建築 コード 1992(BIA92)	Vision 2000 Report (SEAOC, 1995)	EERI/FEMA Action Plan(1996 - 2005)	European Prestandard Eurocode 8 Part 1-1 構造物の耐震設計基準	ISO3010 (3rd Draft, Sept, 1997) - Seismic Actions on Structures	建築基準法	ATC-32	道路橋示方書 (耐震設計編) (1996 年)	
責任機関名		NKB(ノルディック建築基 準委員会)	環境省(担当国務大臣)、 管轄地方行政庁	ABCB (オーストラリア建築コード委員会)	建築産業機構 BIA	SEAOC Seismic Committee	BSSC, NEHRP(FEMA, NIST, NSF, USGS)	CEN(欧州標準化機構)	国際標準化機構(ISO)	建設省	ATC(Applied Technology Council)	建設省	
性能規定 移行の動機		ノルディックメンバー5ヶ 国間の建築基準の調和、特 に技術革新と通商の広域化 を促進し、産業も活性化	1970 年代後半、建築規制が 複雑かつ激しすぎ、産業界 の活力を抑制しているとい う批判に対処する中央政府 の動き	WTO の技術障壁に関する 合意書(2.4 節) 「どの関係国も設計つまり 記述的(仕様)特性でなく、性 能により技術的な規則や標 準を規定するものとする」	WTO の技術障壁に関する 合意書(2.4 節) 「どの関係国も設計つまり 記述的(仕様)特性でなく、性 能により技術的な規則や標 準を規定するものとする」	設計基準が複雑になってき たため、よりわかりやすく 性能を明記するため。 1994 年以降、明確に性能表 記に移行。	設計者が Performance Level を選択できるように するため。 施主が耐震性を規定できる ようにする。	EC 委員会 (CEC) は、建 築物及び土木構造物のため の鋼和のとれた一連の技術 基準を策定する作業を開始 した。この基準は、各 EC メンバー国で使われている 各種基準にとって変わる。	物質及びサービスの国際交 換を容易にし、知的、科学 的、技術的及び経済的活動 分野の協力を助長させるた めに世界的な標準化及びそ の関連活動の発展開発を図 ることを目的とする。	・建設費の削減 ・新技術の開発推進 ・国際貿易の振興	通常の基準の改訂	兵庫県南部地震における被 害に基づいて基準を改訂。	
基 準 の 体 系 概 要	① 目 的	①建築物のあり方の全国的 目標・目的 (Overall Goals) (例)破壊による人命や近隣 への危害防止	①目 的 利用者の衛生、安全、福祉、 利便性の確保(建築工事は 適切な材料と工法で施工す ること)	①建築規定の目的 (Objective) 「住民の期待を説明」	①コードの目的 (a)危害からの保護、 (b)快適性 (c)財産の保護			①目的 ・人命を守る、 ・被害を限定する、 ・市民保護のために重要な 構造の機能を確保する。	①目的 ・人的被害を防止 ・生命維持に必要なサービス を維持 ・財産被害を最小化	①目的 ・人命保護 ・損害防止	①目的	①目的 震後の避難路や救助・救 急・医療・消火活動および 避難者への緊急物資の輸送 路としての役割を確保する	
	② 機 能	②機能項目・機能的要求 (Functional Areas) 一地震・風作用に対する変 形制限	②機能的目的 別に掲げる関連要求(機能 的要求または性能要求)に 適合すること	②機能要件 (Functional Requirement) 「目的達成の仕方を記述」 ある規定された終局限界状 態や使用限界状態を生起さ せる確率 (危険度) で定義 する。	②機能的要求 中程度ないし頻繁に起こる 荷重作用に対して建築物は 快適性を失わないこと。さ らに最大作用荷重を受けた 時にも安定で破壊しないこ と。	②機能 建築物の性能、設計地震、 重要度の3つのマトリッ クスで表現。 【建築物の性能】 ○完全に機能、○機能 ○生命の安全、○崩壊寸前 【設計地震】 ○度々起こる(30年で10%) ○時々起こる(50年で50%) ○まれに起こる (50年で10%) ○非常にまれに起こる (50年で5%) 【重要度】 ○通常の建築物 ○重要な建築物 ○特に重要な建築物	②機能 1997 NEHRP Provisions 建築物の性能、設計地震、 重要度の3つのマトリッ クスで表現。 【建築物の性能】 ○完全に機能、○機能 ○生命の安全、○崩壊寸前 【設計地震】 ○度々起こる(50年で50%) ○時々起こる(50年で50%) ○まれに起こる (50年で10%) ○非常にまれに起こる (50年で5%) 【重要度】 ○I 種: 通常建物 ○II 種: 高密度建物 ○III 種: 最重要建物	②機能 【破壊防止要件】 設計地震作用に対して局所 的な又は全般的な破壊なし に耐えうる。 【被害制限要件】 設計地震作用よりも発生確 率の高い地震作用に対して 被害発生による使用制限	②機能 【終局限界状態】 起こりうる強地震に対して 構造物崩壊、人命損失がな いこと。 【使用限界状態】 中程度地震動に耐える(構 造被害がないこと。	②機能 【地震レベル】 ○想定すべき最大級の地震 (記録、地震地体構造、活 断層) ○一度以上遭遇を想定 (再現期間概ね 10 年~50 年程度)	②機能 【地震レベル】 ○安全性評価地震 発生最大地震として定義 したもので、供用期間中 の発生確率は小さい。 ○機能評価地震 橋梁の寿命中の非超過確 率がある合理的な数値を もつ地震として定義。 【地震直後の構造物の サービスレベル】 ○直ちに ○制限される 【物理的損傷の程度 (復旧性)】 ○最小の損傷 ○修復可能な損傷 ○重大な損傷 【重要度】 ○普通、○重要	②機能 【地震レベル】 ○供用期間中に発生する確 率が高い地震動 ○供用期間中に発生する確 率は低い大きな強度を もつ地震動 ・プレート境界型地震 ・内陸直下型地震 【橋の耐震性能】 ○健全性を損なわない ○致命的な被害を防止する ○限定された損傷にとどめ る 【重要度】 ○標準的、○重要度が高い	
	③ 性 能	③機能項目ごとに性能要求 水準 (Operative Requirement) 一上記機能の実現されるべ きレベル	③性能要求レベル (機能的目的を実現するた めの性能要求レベルの記 述はない。)	③性能要件 (Performance Requirement) 「目的・機能明細を満足す るための性能レベル」 建築物の設計コードに用い る、材料、荷重、建物形状、 利用者の反応等の特性。	③性能要求 (a)建物・敷地は、破壊・不 安定・使用性の喪失、崩壊 のおそれが小さいこと。 (b)建物、敷地は使用状態時 に大きな変形、共振等によ り快適性を損なうおそれが 小さいこと。 (c)自重、用途に基づく荷重、 仮設支持材撤去等を考慮す ること。			③性能 各国の責任機関が実情を考 慮して決定する。	③性能 規定なし。	③性能 規定なし。		③性能 規定なし。	
	④ 照 査 手 法	④照査(検証)方法 (Verification) 一性能要求水準の達成を評 価するための(a)計算法、ま たは(b)試験法。 ④適合みなし仕様 (Deemed-to-Satisfy) (とりうる解決策の例) 一承認可能な技術手法によ る、基準の補足	④承認規準書 (任意適用) 建築規則の要求を満足する 具体法を例示した基準で強 制的ではない。 照査方法及び適合みなし仕 様(BS, BBA アグレマン認 証等)からなる。	④「順守規定基準 (Compliance Criteria)」 適合みなし仕様(deemed- to-comply solution)の使用。 つまり、目標性能でなく解 決策が示されている。 ④「性能規定基準 (Performance Criteria)」 目標性能及びそれを達成す る方法を記述。 (a)実験的方法 (b)解析的方法	④承認規準書 適合みなし仕様(構造順守 規定) ニュージーランド 荷重標準 NZS4203(SNZ 1992) BIA が作成/承認する「承認 規準書」は、「機能性要求」及 び「性能」を満たすためのガ イド(多数の規格 NZS): ・適合みなし構造法の仕様 ・材料の規格 ・工学的な代替設計法等。	④照査手法 Capacity Design をベース にした従来手法で整備。 (将来的にはきちんとした コードで整備する。) 非線形性を考慮した耐力 設計法が示されている。 上記3クラスの建物に対する 地点選定制限、構造システム、 形状、解析方法、変形限界 及び強度レベルが規定され ている。	④照査手法 実験、解析に基づいた計算 法を与える予定。	④照査手法 耐力設計法を提示。	④照査手法 【計算法】 ・照査項目一ねじり、強度、 じん性、変形等 ・荷重一基本、静的解析法、 動解用、応答制御シス テム(免震)用 【解析法】 ・等価静的解析 ・動的解析 ・応答スペクトル 動的解析	④照査方法 【計算法】 ・応答スペクトル法 ・静的弾塑性解析	④照査手法 上記分類に応じて下記解析 法を選定する。 ○等価静的解析 ○弾性動的解析 ○非弾性静的解析	④適合みなし仕様 中小橋梁では標準設計が適 用可能。 ④照査手法 ○静的解析法 ・震度法 ・地震時保有水平耐力法 ○動的解析法 ・時刻歴応答解析法 ・応答スペクトル法	

4. 4 今後の方向と研究課題

上記の橋梁構造物の地震時限界状態設計法及び海外の耐震基準と性能設計法に関する現状をもとに、これらに対する今後の課題をまとめると以下のとおりとなる。

(1) 耐震設計体系

1) 性能規定型耐震設計法の指向

今後の耐震設計法として、従来の基準にあるように仕様により構造特性を決定し、これを満足すれば所要の耐震性能を満足するという仕様規定型から、どのような地震力に対して構造物のどのような性能を期待するのかといったことを明確にして、これを満足する解を求める性能規定型の設計法が指向されている。従来のような仕様規定型の場合には、全てその仕様により構造が決まり、仕様に記述されていない、または、仕様を満足していない新しい材料や新しい技術を活用することが困難な設計体系であった。しかしながら、性能規定型に改めることにより必要な性能を満足できれば、これを証明することによりいろいろな新しい技術を導入できることになる。さらに、耐震性能を明示することにより耐震設計の基本的な考え方を国際的に相互に理解することができるという観点で、国際的なグローバルスタンダードの方向性に合致する設計体系とするためにも性能規定型の設計法が必要とされている。

もちろん、性能規定型設計法の場合には、新しい技術や提案をどのようにそれが必要な性能を満足しているかを証明するための解析方法や試験方法、あるいは、検証制度など制度的な側面の整備も必要とされる。いずれにしても、各種の構造物の重要度や果たす機能に応じて、要求される耐震性能を明示していくことがまず第一に必要となり、さらに、要求される耐震性能に対して、これをどういう評価指標により実現していくかを明らかにしていく必要がある。

土木構造物に対する要求耐震性能は、単純明解でわかりやすく表現する必要がある。例えば、レベル2地震動を受けた場合の道路構造物を例にとると、人命に影響を与えない安全性を確保、一般車両は無理であるが緊急車両は通行可能であるレベルの使用性を確保、1ヶ月以内かつある費用以下での復旧・補修可能性を確保、などの表現が理解しやすい。しかしながら、不確定性を有する地震動に対してこれを具体的に構造設計で実現するためには、かなりの困難が伴うのが実状と考えられる。こうした目的・機能を実現するために、構造物としての必要な損傷モードや限界状態を明確に設定するとともに、これを確実に誘導できるような地震時挙動の評価方法や構造設計手法、さらには施工方法の確立が必要とされる。

2) 変位ベース設計法

性能設計を具体的に行っていくために必要とされるのが、構造物のどういう状態が構造物の性能に影響を及ぼすかを明確にすることである。従来は、作用力と耐力といった力を指標とした設計法が用いられてきたが、力自体の釣り合いでは構造物の状態、すなわち、変形状態を直接的に考慮しないため性能を明示することが困難となる。変位ベース設計法とは、構造物の変形状態を耐震設計の指標として具体的な設計を行うという考え方である。通常、構造物の性能は、前述のように構造物の変状に強く関与し、また、こうした変状は変位やひずみといった指標で表される。このように変位ベース設計法が将来の性能設計体系の中で重要な位置を占めるようになる。

3) キャパシティデザインと信頼性設計

従来の構造物の耐震設計では、その計算法の簡便さなどから各部材別に設計する方法が用いられてきた。しかしながら、特に地震荷重を受ける場合には、部材別に力が作用するのではなく、構造物全体として地震荷重に抵抗するものであり、構造物全体がどのように挙動するかを十分に把握するとともに、復旧や損傷発見が容易な部材に損傷を誘導し、エネルギーを適切に吸収して地震力に抵抗することが必要とされる。こうした設計法はキャパシティデザインと呼ばれる。例えば、橋梁を例にとると、橋梁は上部構造、支承、橋脚、基礎、地盤から構成される。このような構造物が地震力を受けた場合に、十分な変形性能を確保可能な部材に損傷を誘導して、構造物全体としての挙動をコントロールしようという設計の考え方である。例えば、橋脚基部に損傷を誘導するものとするれば、上部構造や支承などの他の部材への損傷の発生を橋脚基部の耐力でコントロールすることが可能になる。ただし、この場合、従来は部材の耐力はある下限値で設計上考えられてきたが、キャパシティデザインではこれによって他の部材の損傷もコントロールするために、部材強度の上限値も制限する必要がある。このため、設計上、材料強度のばらつきや過強度を適切に評価していくことが必要とされる。

4) 耐力とじん性のバランス

耐力を大きくするためには、部材断面を大きくしたり、鉄筋量を増加させる必要がある。このため、構造物自体が大きくなり、これに伴って構造物の建設費用が増加することから、どこまでも構造物を強く造るという設計法は現実的ではない。このため、一般に、比較的生じる可能性の高い地震に対しては何度も構造物の復旧を必要としないように損傷を受けないようにし、生じる可能性は低い強度の強い地震動に対しては、損傷の発生を許容するが、比較的短期間で復旧可能な損傷レベルに制御したり、重要度の低い構造物では崩壊を防ぐ損傷レベルに制御するものである。

一方、じん性をどんどん大きくすると、作用する地震力は小さくできるが変位が大きくなる。このため、残留変位が大きくなるとともに、このようになると軸力による $P \sim \delta$ 効果が無視できなくなる。従来、ニュージーランド、米国の耐震設計法は、じん性の確保に重点が置かれたものであり、 $P \sim \delta$ 効果に対する照査も1つの設計指標とされている。一方、日本では耐力に重点が置かれた設計法であり、一般に $P \sim \delta$ 効果は大きな影響を及ぼさない。今後、必要とされる耐震性能を満足させるために、こうした耐力とじん性の適切なバランスが重要となる。

5) 地震時挙動の評価法の高精度化

現在、耐震設計では各種の耐震計算法が用いられている。静的計算法及び動的計算法、線形域の計算法及び非線形域の計算法などがあり、各限界状態の評価において、構造物の地震時の挙動を正確に把握していくことが重要となる。特に、非線形域の耐震計算法に関しては、柱部材のみならず各種の部材に対する剛性や減衰特性を適切に表わすことができる非線形履歴モデルの開発やより簡単に解析が可能な動的解析法や解析プログラムの整備が必要とされる。

(2) 地震時限界状態の評価法

1) 破壊メカニズムと非線形域の力学的挙動の解明

これまで、柱部材や梁部材に関しては数多くの実験データが蓄積され、破壊メカニズムや非線形域の挙動に関して明らかにされてきている。さらに、今後は、載荷実験や振動台実験により強震動を受

ける各種の構造部材及び橋梁全体系に対する破壊メカニズムを解明していく必要がある。地震力を受ける場合には、その作用が繰返し生じることから、繰返しを受ける場合の構造物の破壊特性を明らかにする必要がある。さらに、従来の実験は実験施設の制約から縮小模型を用いた模型実験を基本に行われているが、せん断耐力など寸法がその挙動に大きく影響する場合もあり、大型模型を用いた実験データの蓄積も必要と考えられる。

さらに、地震力による作用としては、従来は、水平方向のみに着目されることが多かったが、今後は、上下動の影響や水平2方向のカップリングの影響、高軸力や変動軸力を受ける場合など各種の地震力の作用条件に応じて破壊メカニズムを明らかにし、耐震設計上支配的となる条件を明確にしておく必要がある。

2) 終局状態の評価方法

終局を定める指標としては、耐力と変形性能があるが、耐力は一般にかなりの高精度で評価可能である。ただし、変形性能については、これは変形の増大に伴う破壊メカニズムを明らかにすることであり、大型橋脚を用いた実験を含む実験データを蓄積してさらに高精度化を図る必要がある。さらに、こうした研究成果を踏まえ、実務設計レベルで活用できるような一般性を有する評価式を開発することが必要とされる。

(3) 新技術の活用

従来型の鉄筋コンクリート構造や鋼構造のみならず、インターロッキング方式やスパイラル筋の活用などの新しい構造や高強度コンクリートや高性能の鋼材などの新材料を採用することにより、従来の構造では実現できなかった高じん性を発揮できる可能性がある。また、免震構造を始めとする高耐震化を図ることが可能なさらなる新しい構造の開発が必要とされる。

(4) まとめ

耐震設計は、一般に、設計外力すなわち地震力の評価、地震時の応答計算、そして安全性の照査という3つの段階を踏んで行われる。これらの3つの段階それぞれに対して、設計パラメータのばらつきや不確定性、精度といった問題を総合的に考慮して耐震設計が行われる。今回は、この中でも部材特性の観点から見た安全性の照査法について検討すべき課題を考察した。今後、大型模型を用いた実験データを蓄積しつつ、こうした課題を1つ1つ解決していくことが必要とされる。

さらに、最も不確定性の大きい地震力というものをどのようにとらえていくか、地震力の推定精度を高めていくとともに、こうした不確定性に対して構造設計の観点からどのように配慮しておく必要があるかといったことを検討する必要があると考える。また、設計がどれだけ優れていても実際に施工される橋梁構造物が設計通りにできないならば意味のないことであり、材料強度や施工誤差など設計時にもできるだけ施工に配慮することが重要となる。

【参考文献】

- 1) (社)土木学会：土木学会耐震基準等に関する提言集、1996年5月20日
- 2) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編、1996年7月

- 3) (社)土木学会：コンクリート構造物の耐震技術－現状と将来展望－、コンクリート技術シリーズ、平成1997年7月
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、1996年12月
- 5) M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi : Seismic Design and Retrofit of Bridges, 1996
- 6) CALTRANS : Bridges Design Specifications, 1990
- 7) Transit New Zealand : Bridge Manual, 1995
- 8) P. E. Pinto : Eurocode 8, Part 2, Earthquake Resistant Design of Bridges, Proc. of the First Japan-Italy Workshop on Seismic design of Bridges, 1995

5. 土工構造物の耐震設計

本章では、土工構造物の耐震設計技術の現状と主な技術的課題、さらに今後取り組むべき技術開発の方向性について述べることにする。なお、土工構造物の範疇に含まれる構造物の種類は幅広いが、ここでは河川堤防、道路盛土、擁壁を念頭に置いて述べる。

5. 1 従来の耐震規定と兵庫県南部地震以後の対応

まず、河川堤防については、その構造は「河川管理施設等構造令」および「河川砂防技術基準(案)」に規定されている。従来、一般堤防については、「地震による外力については、地震と洪水が、同時に発生する可能性が少なく、また地震によって、土堤が被害を受けても、復旧が比較的容易であること等の理由により、特別な場合を除き一般に考慮しない」とされていた。ただし、「地下水位の高い緩い砂質地盤や軟弱な沖積層の悪い地盤上の堤防で、津波の影響が考えられる堤防又は0 m地帯の堤防等については、地震時の堤体の沈下やのり面の亀裂の発生について既往地震時の堤防の被害状況等を調査して、対策の必要性等について検討する。」とされていた。ただし、特殊堤防および、平成3年の河川法の一部改正により正式に位置づけられた高規格堤防については、地震に対する安定性を照査することが規定されている。

兵庫県南部地震において、淀川下流部堤防が基礎地盤の液状化により大きな被害を被り(写真-5.1参照)、背後地が家屋・工場等の密集地帯であったことから、ゼロメートル地帯での耐震対策の必要性が強く認識された。地震発生直後に、建設省河川局の下に「河川堤防地震対策技術検討委員会」(委員長：山村和也日本大学教授)が設置され、堤防の耐震性のあり方に関する検討報告書が1996年3月にとりまとめられた。行政的な対応として、平成7年3月にゼロメートル地帯等に位置する河川堤防の耐震強化対策を進めることが決定され、以後、既設堤防の耐震評価、耐震対策が進められている。基礎地盤の液状化対策が主体であり、固化工法、矢板工法、締固め工法など、各種の工法が現場条件等により使い分けられている。



写真-5.1 兵庫県南部地震における淀川左岸西島堤防の被害状況

道路盛土、擁壁等の道路土工構造物についても、従来より、一般には地震時の設計を規定していない。ただし、万一崩壊すると隣接物に重大な損害を与える場合や、復旧に長期間を要し道路機能を著しく阻害する場合、あるいは高さが 8 m 程度を超える擁壁等では耐震設計を行うことを規定している。

兵庫県南部地震では、道路土工構造物の被害は目立つものではなかった。これは、激震地帯ないしは臨海部の軟弱地盤に位置するものが少なかったことが幸いしたものと推定される。ただし、三木市等で山岳部を走る道路盛土（地方道）に被害が生じた（写真-5.2 参照）。

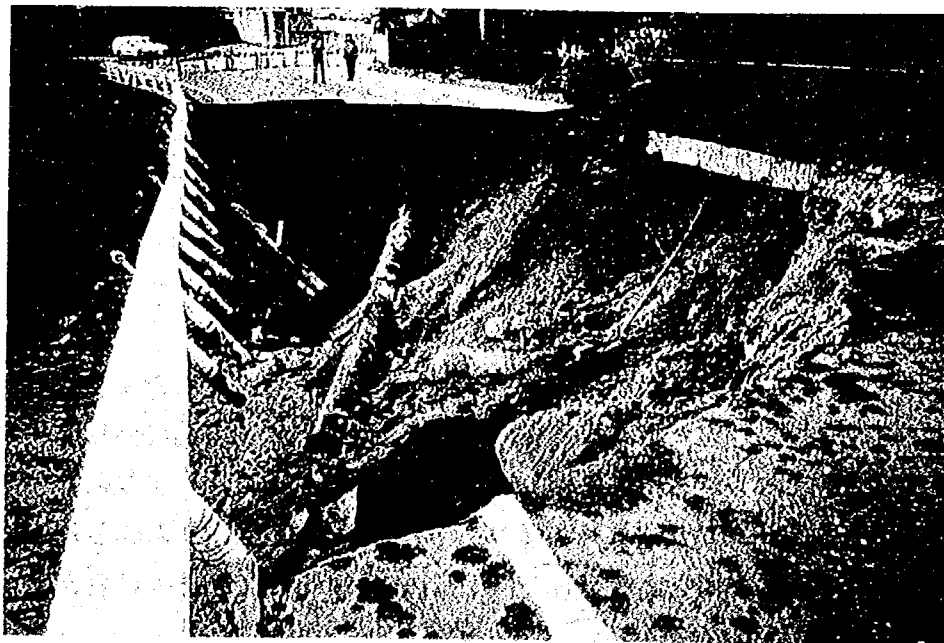


写真-5.2 兵庫県南部地震における道路盛土の被害事例

地震の後、日本道路協会土工委員会内に「道路土工震災対応WG」（座長：古賀泰之土木研究所地震防災部長（当時）」が設立され、道路土工構造物の耐震性、耐震基準のあり方についての検討が進められた。

その結果として以下のような結論が得られた。

- (1) 道路は本来ネットワークとして機能するものであるため、橋梁などと同じく耐震性のバランスを確保する必要がある。したがって、従来一般的には耐震設計がなされていなかった盛土等についても今後耐震設計を行っていく必要がある。
- (2) 確保すべき耐震性については、路線の重要度、復旧の難易度等を考慮して設定するのが望ましい。
- (3) 耐震性照査法としては当面震度法を用いる。

5. 2 主要な技術的課題

以上に述べた兵庫県南部地震以後の取り組みにおいては、地震被害事例の詳細調査解析、模型実験による検討などが多くの研究者や実務家により進められてきている。しかしながら、土工構造物の耐震評価・対策技術については課題が山積している。特に、従来の土工構造物の設計では想定していなかった大規模地震動への対応に関係する技術課題が多い。

まず、土工構造物の耐震技術が橋梁等の他の構造物に比べて定量的評価において遅れているところが多いことを認めざるを得ない。これには以下に述べる構造物の力学的な複雑さが関係していることを認識しておく必要がある。

- ・ 構造物の主要構成材料である土の地震時挙動が複雑であること。特に液状化現象は地盤が土と間隙水の2相により構成されていることから、その定量的な評価を難しくしている。また、盛土材料についても、その力学特性は経時的に変化する含水比に強く影響されるため、定量的な評価を難しくしている。
- ・ 土工構造物は連続体であり、橋梁等のように線部材で構成されるものでないため、破壊モードを特定しづらい。
- ・ 土工構造物を支持する地盤材料が多様であり、その力学特性を地盤調査試験により定量化する際の評価の幅が大きい。

当面の技術的課題として以下に主なものを列挙する。

(1) 震度法に基づく従来設計法の改良

震度法と極限釣り合い法を組み合わせた耐震計算法は従来より用いられ、これに代わる実用的な手法が開発されるまで、少なくとも当面は用いざるを得ないと考えられるものである。この手法は変形の程度を評価する手法ではないが、得られる安全率と変形量の間にある程度の相関性が存在することが、これを使用することの妥当性の根拠となる。これまで、事例解析等によりある程度の相関が認められており、改訂された河川砂防技術基準（案）（平成9年）等にも採り入れられている。しかし、大規模地震時においてもこれが成立するか否かは十分に確かめられているとは言えない。

(2) 変形量照査法の開発

大規模地震動を設計で想定する場合には、他の構造物と同様に、被害程度（変形量）の予測評価が

必須である。これを可能にする実用的な手法の開発が必須である。

上述した従来の耐震評価手法は、地震時安定性を安全率により評価するものであり、変形の大きさについての情報を与えるものではない。大規模地震においては土工構造物に何らかの永久変形を生じることが避け得ないことが多いと考えられ、それが構造物の特性に応じて定められる許容変形量に比べて大きい小さいかを直接に評価できる手法が望まれる。これまでに、変形量を評価する手法がいくつか提案されているが、未だに実用化に至っているものはない。最も合理的でありかつ適用範囲が広い手法は弾塑性有限要素地震応答解析法であるが、実用化のためには、土の構成モデルの妥当性、解の安定性など検証すべき点が残されている。

(3) 経済的な耐震対策工法、および、そのための力学的に合理的な設計法の開発

土工構造物の耐震対策工法としては、地盤改良、補強土工法など、既に多くの工法が提案されている。しかし、大規模地震時におけるそれらの工法の耐震効果を定量的に評価した事例は少ない。また、設計法については、従来のレベル1地震動を対象とした、震度法による手法が提案されているが、これをそのまま拡張してレベル2地震動に対して用いることは困難であろう。ここでも変形量を考慮した設計法の開発が必要である。

加えて、既設の土工構造物の耐震対策には、本体構造物と同程度の費用を要することが稀ではないことを認識する必要がある。したがって、経済性を追求するためには、被害を最小限に抑えるよりも、被害を許容値以内に抑えるような工法ないしは設計法の構築も必要とされるところである。

(4) 簡易かつ実用的な地盤調査法の開発

既に述べたように、土工構造物の耐震性は基礎地盤の良否に強く支配されていることから、耐震評価における地盤調査の役割は極めて大きい。他方、土工構造物はその延長が膨大であることから、簡易、安価かつ信頼性のある地盤調査法が望まれる。標準貫入試験は液状化の判定を始め、各種の設計定数を得るのに広く用いられてきているが、必ずしも安価でない、精度が良いとは言えない面があるなどの課題がある。したがって、電気式コーン貫入試験など、安価であり、かつ研究が進捗してきている手法の実用化のための開発研究が必要である。

5. 3 最近の研究事例と今後の方向

ここでは、上に述べた技術課題に対応して最近土木研究所で実施しているいくつかの研究事例を紹介するとともに、今後の取り組みの方向性について述べることとする。

(1) 耐震評価・設計技術に関する取り組み事例

従来法である震度法と極限釣り合い法を組み合わせた手法の適用性については、兵庫県南部地震を含む過去の被害・無被害事例に対する事後解析を行い、被害・無被害を区別できるような震度の大きさの設定法を見出している。盛土構造物に対して得た結果の一例を図-5.1¹⁾に示す。

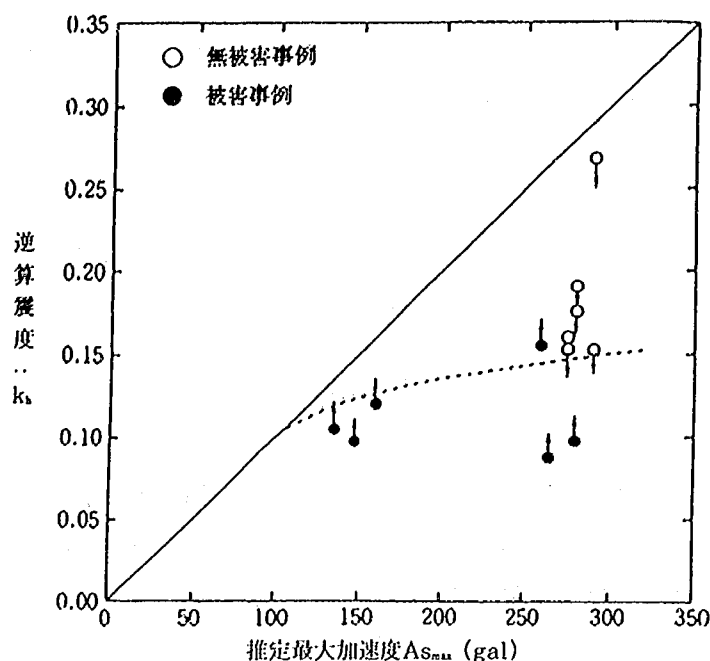


図-5.1 震度法すべり面法における震度と地表面最大加速度の関係

同図の意味するところは、安定計算に用いる震度は、最大地震動加速度を重力で除した値よりも小さいということである。もとより、土工構造物の地震被害の程度は最大加速度のみにより支配される訳ではないこと、さらに極限釣り合い法自身がきわめて単純化した破壊モードを仮定していることから、被害・無被害の予測精度は必ずしも良いとは言えない。

そこで、動土質研究室では、被害量の予測可能な手法を比較検討し、最も合理的と考えられる弾塑性有限要素地震応答解析法の適用性に関する研究を開始している。具体的には、遠心力模型実験や地震被害事例を対象に解析を実施し、その予測精度の評価、種々の解析条件が予測値に及ぼす感度分析などを行っている。図-5.2²⁾は、兵庫県南部地震で被災した淀川左岸西島堤防を対象に、砂の液状化や粘性土の弾塑性特性を組み込んだ弾塑性有限要素法により数値シミュレーションを実施して得られた地震後変形結果を示している。これは最もよく合った事例であり、実際の沈下量2.7 mに対し、計算では2.9 mであった。また、地盤上部のメッシュが大きく変形した部分が砂質土層であり、これが液状化して支持力を失い、堤防の沈下に至っていることが示されている。

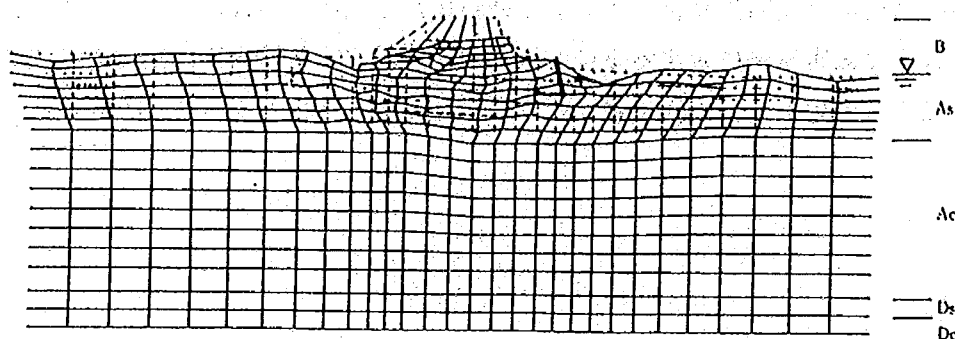
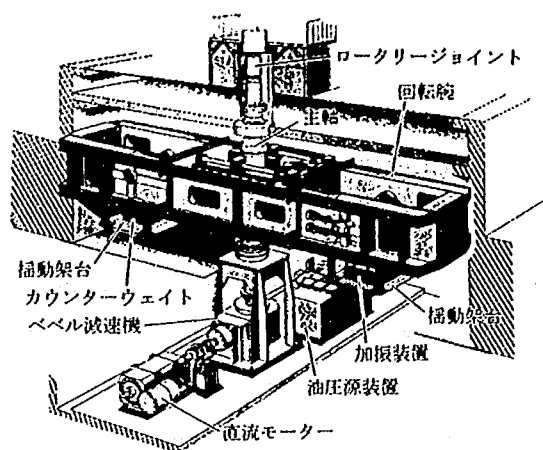


図-5.2 淀川左岸西島堤防の数値シミュレーションの結果

このような解析手法が研究レベルを脱して実務にも適用できるようになってくれば、直接的な変形照査が可能になり、同時に性能設計への移行も容易になる。

土構造物の耐震技術を構築するためには、ここに述べたように、被害事例の分析、模型実験による被害メカニズムの解明、さらには模型実験、被害・無被害事例に対する数値解析等をバランスよく組み合わせて研究を進めていくことが肝要である。特に、模型実験は被災現象の理解を助け、同時に解析・設計手法の妥当性の検証材料ともなる、重要な役割を持っている。平成9年から運用を開始した大型動的遠心力試験装置は、規模の大きさもさることながら、兵庫県南部地震で観測された地震動を再現できる程度の加振能力を備えていることから、各種実験が行われ、フル稼働している。図-5.3³⁾に装置の概要図と主な仕様を示す。

b) 主な仕様



遠心力被荷装置	有効回転半径	6.6m
	最大遠心加速度	静的: 150G 動的: 100G
	最大積載質量	5ton
	最大積載容量	400ton・G
	揺動架台	2台
加振装置	最大加振加速度	40G
	最大速度	90cm/s
	最大変位量	±5mm
	最大加振容量	40ton・G
	加振周波数	10~400Hz
計測機能	測定点数	静的: 100ch 動的: 80ch

(a) 概要図

図-5.3 大型動的遠心力試験装置の概要

(2) 補強土工法の耐震性に関する研究

補強土工法は比較的最近の工法であり、通常の盛土構造に比べて用地幅を大幅に縮小できることが大きな特徴の一つであり、かつ安定性が高い工法である。兵庫県南部地震で高い耐震性を示したことが報告された。しかしながら、これまで築造された補強盛土はせいぜい中規模地震動を考慮した設計法が用いられており、このことと兵庫県南部地震で高い耐震性を示したという事実とのギャップが技術課題として生じた。このギャップを解明することが、すなわちレベル2地震動対応の設計法の構築につながるものであり、研究を進めているところである。

図-5.4⁴⁾は、従来設計法で設計震度 $k = 0.15$ の下で安全率が 1.35 (許容安全率は 1.2) の補強土模型に対して、特性の異なる地震動で加振することにより得られた、最大入力加速度と補強土壁の残留変位の関係をプロットしたものである。最大加速度が 300 gal 程度以内の地震動のもとではほとんど変位が生じていないこと、神戸海洋気象台 (兵庫県南部地震) や青森 (十勝沖地震) の地震動記録波形を入力した場合には、最大加速度が 600-800 gal 程度であっても補強土壁の水平変位は盛土高さの 5% 程度であり、致命的な被害には至っていないことがわかる。すなわち、従来の震度法による設計法は

やや安全側の設定がなされていたが、この結果によればかなりの程度の安全余裕が含まれていることになる。

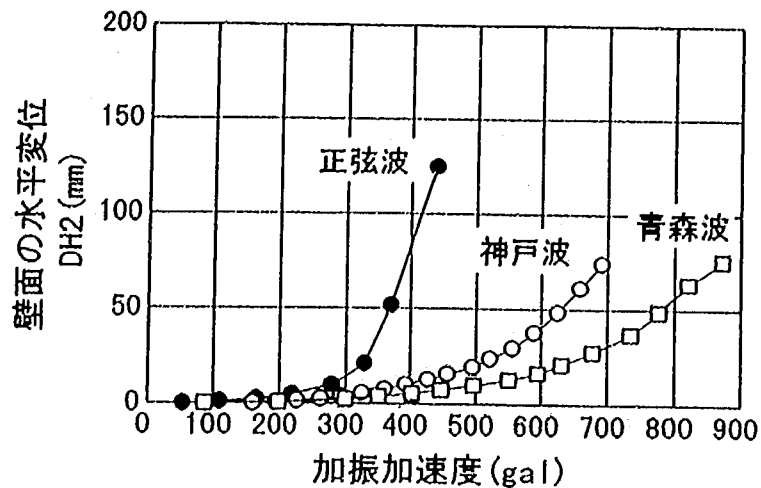


図-5.4 補強土壁の最大加振加速度と水平変位量の関係³⁾

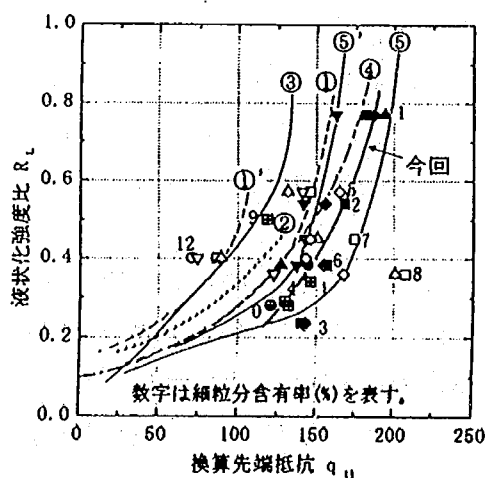
このような検討により、従来設計法をレベル2地震動対応の設計法へ拡張すべく見直しを続けており、併せて変形量照査の開発にも取り組んでいるところである。

(3) 地盤調査法に関する研究

標準貫入試験を補完する地盤調査法として電気式コーン貫入試験に着目した研究を行っている。この試験法の標準貫入試験と比べての利点は以下のとおりである。①単位貫入長当たりの単価が概ね3分の1程度である、②深さ方向に連続的にデータが得られる。欠点は、③土試料を採取できないので、測定値から土質を推定しなければならない、④礫混じり地盤には貫入できない、等である。

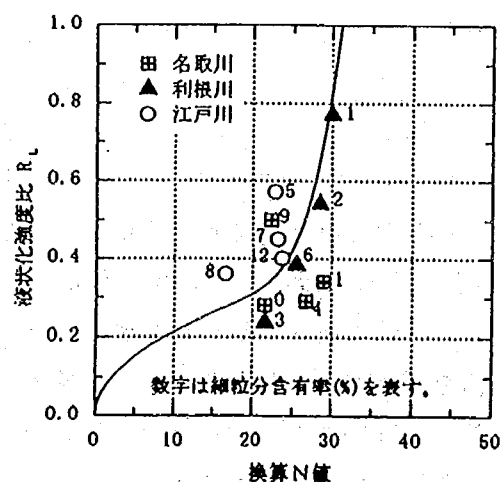
図-5.5(a)は、地盤の液状化抵抗の簡易推定手法としての適用性を見るために試験結果をプロットしたものである。比較のために、同図(b)に標準貫入試験の結果を示している。これより、コーン貫入試験により得られる先端抵抗と液状化抵抗の間には有意な相関があること、および、標準貫入試験のN値の図に比べてばらつきはやや大きい程度であること、がわかる⁵⁾。

この調査法の使用を広めてバックデータを蓄積して精度向上に努めること、これ以外の調査手法についても開発改良を進めることなどが今後の課題である。



(a) コーン貫入試験

- ① Robertson et al.
- ② 石原
- ③ Seed et al.
- ④ 柴田ら
- ⑤ 鈴木ら



(b) 標準貫入試験

図-5.5 貫入抵抗と液状化抵抗の関係

【参考文献】

- 1) 松尾修：液状化・流動による構造物被害現象の分析（土木構造物）、地盤の液状化および流動講習会講演資料、地盤工学会、pp. 31-41, 1998.
- 2) 松尾修、岡村未対、島津多賀夫、西邦夫：地盤液状化問題における弾塑性有限要素解析法の適用、土木技術資料 40-8, pp. 50-55, 1998.
- 3) 松尾修、堤達也：大型動的遠心力載荷試験装置、土木技術資料 39-6、p11、1997
- 4) 斉藤由紀子、松尾修、堤達也：補強土壁の耐震性に関する振動台実験（その6）、第33回地盤工学研究発表会講演集、pp.2389-2390, 1998.
- 5) 堤達也、松尾修：静的コーン貫入試験による密な砂地盤の液状化強度評価に関する現場試験、第33回地盤工学研究発表会講演集、pp.83-84, 1998.