

平成14年度

土木研究所講演会
講演集

平成15年1月15日

独立行政法人 土木研究所

Copyright © (2003) by P.W.R.I.

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

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

平成14年度

土木研究所講演会 講演集

企画部研究企画課

要 旨

本資料は「平成14年度土木研究所講演会」の講演内容をまとめたものである。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ことを目的として毎年1回開催している。

キーワード：土木研究所講演会、道路橋、耐震性能、疲労、マルチテレメトリシステム、IT施工システム、ダム、水理設計技術

目 次

【一般講演】

1. 道路橋の耐震性能の検証技術 1
耐震研究グループ上席研究員（耐震） 運上 茂樹
2. 道路橋の疲労と対策技術 21
構造物研究グループ上席研究員（橋梁構造） 村越 潤
3. マルチテレメトリシステムを用いた河川事業による影響把握 37
水循環研究グループ上席研究員（河川生態） 尾澤 卓思

【研究成果報告】

4. 都市空間におけるヒートアイランド軽減技術 57
司会：水工研究グループ上席研究員（水理水文） 吉谷 純一
埼玉大学 理工学研究科 環境制御工学専攻 教授 浅枝 隆
東京都環境局 総務部企画課長 村山 崇
基礎道路技術研究グループ主任研究員（舗装） 新田 弘之
水工研究グループ主任研究員（水理水文） 木内 豪

【一般講演】

5. 土木における IT 施工システムの構築 79
技術推進本部主席研究員（先端技術） 吉田 正
6. 時代の要請に応えるダムの水理設計技術 99
水工研究グループ上席研究員（ダム水理） 柏井 条介

[一般講演]

道路橋の耐震性能の検証技術

耐震研究グループ上席研究員（耐震） 運上 茂樹

目 次

1. はじめに	1
2. 平成 14 年道路橋示方書における性能規定型基準体系[1]	1
2. 1 性能規定型基準の意味と定義	1
2. 2 道路橋示方書 V 耐震設計編の改訂	2
2. 3 性能規定型の技術基準	3
2. 4 耐震設計の基本方針	3
2. 5 耐震性能の照査方法	4
耐震性能と限界状態	4
耐震性能の照査方法	6
3. 性能規定化基準に基づく新技術適用	6
3. 1 土木研究所における新技術開発と適用例	6
配筋合理化技術	7
桁端部構造：大変位吸収システム	11
性能検証試験方法	13
4. おわりに	19
参考文献	19

道路橋の耐震性能の検証技術

耐震研究グループ 上席研究員（耐震） 運上 茂樹

1. はじめに

構造物設計における国際的な調和、コスト縮減策などの新技術開発の早期導入を可能にする合理的な設計基準体系として性能を基本とした基準体系が指向されている。我が国の各種の構造物の設計基準においても性能を基本とした基準体系に向けた検討が進められており、例えば、道路橋の技術基準である道路橋示方書においては、①国際化への対応、②多様な構造・工法への対応、③コスト縮減等の成果の早期導入、を念頭に、平成 14 年 3 月に「性能規定型基準」を目指した改訂が行われたところである[1]。「性能規定型基準」としては、「構造物が有すべき性能（要求性能）及び設計された構造物が要求性能を満足することを確認するために照査する項目等を規定する基準」として位置付けられ、要求する事項とそれを満たす従来からの規定とを併記する書式とすることを基本とした体系となっている。したがって、例えば、荷重に対する構造物の応答値の算定方法、新しい材料や新しい構造を用いた部材の仕様等について、要求する性能を満足することの検証を前提として、設計者あるいは所有者がこれを採用することを妨げない基準体系となっている。このため、このような基準体系を背景として有効な新技術の積極的な提案が期待されるところであるが、一方で提案された新技術が所要の性能を満足するかどうかを検証する技術の整備が不可欠となっている。

本文では、道路橋の耐震設計を対象として、改訂された道路橋示方書における性能規定化の意義を解説するとともに、配筋合理化技術、桁端部構造等土木研究所で開発している新しい耐震技術の性能検証事例や実務への反映事例を紹介する。さらに、性能検証技術の 1 つとして現在土木研究所で開発を進めている鉄筋コンクリート構造の耐震性能検証のための標準実験方法とその活用方法について述べるものである。

2. 平成14年道路橋示方書における性能規定型基準体系[1]

2. 1 性能規定型基準の意味と定義

どのような設計法や規制法が性能設計法や性能規定になるのかについては、それぞれ異なった捉え方や理解をされる場合も多い。まず、用語の定義について、「性能規定」、「性能設計」等が用いられているが、一般に、「性能規定」とは、法令の技術基準のタイプや規制手段のことをいい、「性能設計」とは構造物の設計に当たって目標とする性能を明確化した上で、その設定した性能を達成するような設計方法のこととされている[2]。このため、「性能規定」とは、法令が「性能」を規定していることであり、一方、「性能設計」とは目標性能を明確化して性能が実現するような設計をする方法であり、法令の規定とは関係のないことに留意する必要がある。したがって、性能設計法を用いた（性能を明示し、これを評価する手法を示した）法令としての「仕様規定」というものもあり得ることになる。

次に、具体的に性能規定とはどういう規定方法かであるが、構造設計そのものは、もともと、「要求された機能をもつ構造物をいかに実現するか」という行為であるため、本来「性能・機能を実現する観点」で「性能設計」ということができる。したがって、性能設計や性能規定といっても従来にはない何か全く新しい設計規範ではなく、基本的には従来の設計法の延長線上で、従来陰に陽に構造物に要求してきた必要な性能とこれに対する照査項目や照査方法を明確に体系化して規定するというこ

とができる[3]。基準の中でも、規定として必要なものと不要なものを区別し、さらに、技術の進歩に伴い、改良されるものや設計方法など1つの方法に固定する必要のないものは規定からはずし、適合みなし仕様、あるいは標準仕様やマニュアルなどとして別に整理されるものとなる[4]。

性能規定型基準体系を示す際には、一般に図-1に示すような階層化（ピラミッド化）モデルを用いて示されることが多い。「目的」では、コードの社会的目的、「機能的要求」では、目的を実現するための機能的要求、「要求水準」では、機能的要求を実現するための要求水準や検証方法の原則を規定する。一般にはここまでを強制力のある基準と位置付ける。具体的な個々の検証方法や検証を満足する具体的な「解」が適合みなし仕様であり、この部分は強制力を有する基準ではなく、技術の進歩に伴い、見直されたり増強される仕様と位置付けられる場合が多い。

従来用いられてきた多くの基準等は、性能規定と仕様規定が混在して規定されており、いずれか一方の規定とは一概に分類しにくいのが現状である。このため、性能規定化といっても従来の基準が大きく変わるものではなく、要求する性能を明確にし、基準としてこうした階層が明確になるとともに、どこまでが強制力のある規定で、どこまでが設計者が根拠を持って自由に選定できる方法であるかの境界が明確になっていることが性能規定の重要なポイントとなる。

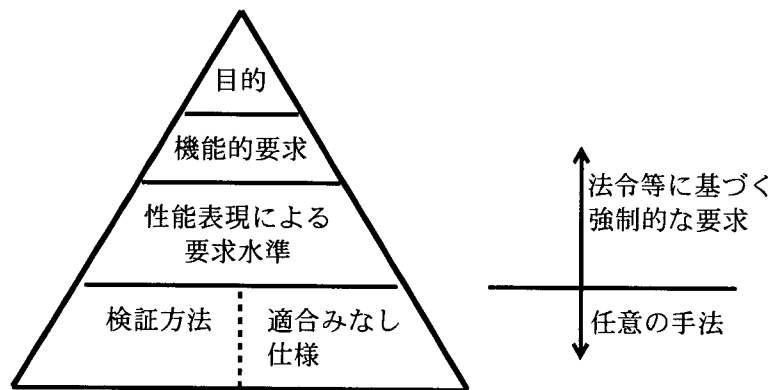


図-1 性能規定型技術基準の階層化モデル

2. 2 道路橋示方書V耐震設計編の改訂

平成14年3月の道路橋示方書の改訂では、性能規定型の技術基準を目指して、要求する事項とそれを満たす従来からの規定とを併記する書式とすることが基本とされ、これに加えて前回の改訂以降の調査研究成果を踏まえて、規定の見直しが行われた。耐震設計編の改訂における主要な改訂点は以下の通りとなっている[1]。

- ①橋の耐震性能、設計地震動の設定方法及び耐震性能の照査に関して、基本的な要求事項が明示された。
- ②橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動、発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動を、それぞれ、レベル1地震動、レベル2地震動と名付けられるとともに、適切に推定できる場合には建設地点の地震情報や地盤条件等を考慮して設計地震動を設定することとされた。
- ③耐震性能の照査方法を「静的照査法」と「動的照査法」に再構成され、橋の構造特性に応じた選定方法が明確にされた。また、動的照査法の適用範囲が広げられるとともに、具体的な照査方法が規定された。
- ④修正物部・岡部式に基づくレベル2地震時の主働土圧の評価式及びレベル2地震時の動水圧の評価方法が導入された。

⑤地震時に液状化が生じる地盤上の橋台について、レベル2地震動に対する照査方法が新たに規定された。

⑥鋼製橋脚の耐力～変形性能の評価法が見直された。

⑦鋼上部構造及びコンクリート上部構造に対する耐震性能の照査の考え方が新たに規定された。

⑧レベル2地震動に対する支承部の耐力・変形性能の評価法が見直された。

⑨示方書の理解、参考となるデータを巻末に添付された。

上記の主要な改訂事項のうち、①については、性能規定型基準体系への変更に伴って明確にされたものであり、②以降については性能規定型基準体系の中で要求する性能を満足する検証方法や適合みなし仕様が見直し、充実されたものである。

2. 3 性能規定型の技術基準

性能規定型基準で最も重要な点の1つとして、前述のようにどこからどこまでが要求事項（基準として遵守すべきことを要求する事項）で、どこからどこまでが性能の検証を前提として設計者あるいは所有者の判断により変更あるいは別の選択を可能とする事項であるのかが明確にされていることが上げられる。道路橋示方書では、このような要求事項と検証方法あるいはみなし適合仕様の区分に関して、表現方法を含めて明確に整理、規定されている。今後、新構造や新工法等の開発やその検証、あるいは解析法等の性能検証方法の高度化、また、そうした技術の一般化の程度に応じて、適合みなし仕様等は順次拡大されていくことが想定されている。

耐震設計に関しては、図-2に示すような基準構成となっており、静的照査法や動的照査法、各部材の限界状態の評価式等は、検証を前提として変更あるいは別の選択が可能な性能検証法あるいはみなし適合仕様といった位置付けとなっている。

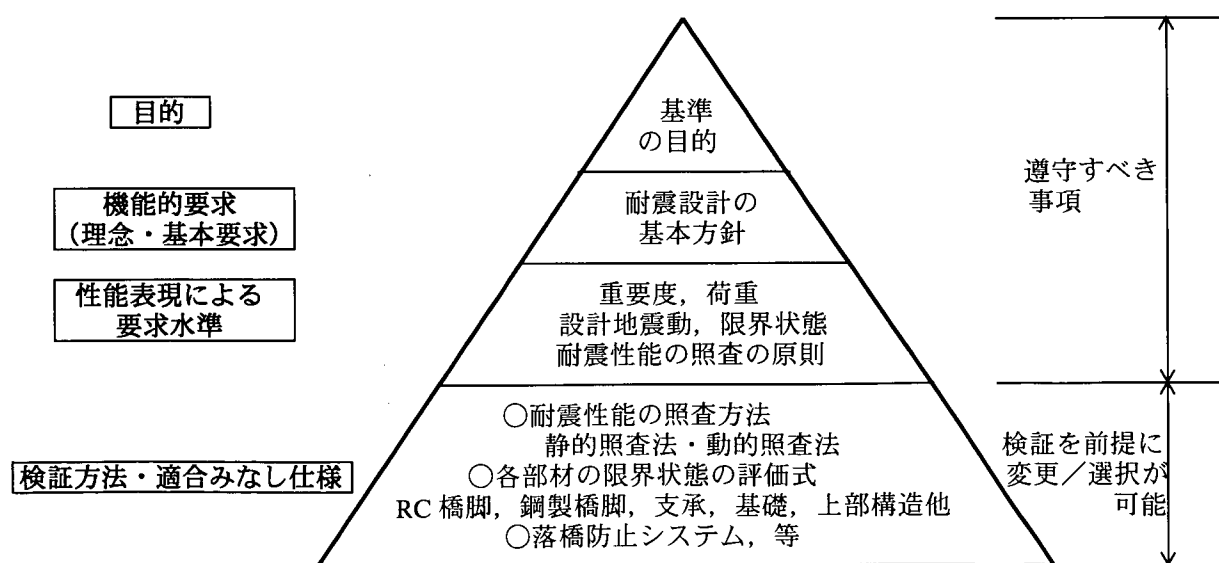


図-2 道路橋示方書V耐震設計編の階層化構造

2. 4 耐震設計の基本方針

表-1は、耐震設計編に規定される耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能を示したものである。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（レベル1地震動）及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（レベル2地震動）

の２段階の地震動を考慮する。ここで、レベル１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が踏襲されている。また、レベル２地震動としては、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と平成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が考慮されている。

なお、今回の改訂では、設計地震動をレベル１地震動及びレベル２地震動と呼ぶとともに、適切に推定できる場合には建設地点の地震情報や地盤条件等を考慮して設計地震動を設定することとされている。設計地震動の設定に関しては、現段階では地震情報や深部地盤構造などの条件が十分に明らかにされている状況ではなく、また、地震動の推定法に関しても現在研究が進められているところであり、今後の調査研究の進展に応じて適切に対応していく必要があることが解説されている。

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表－１に示した耐震性能を確保することを目標として行う。橋の重要度は道路種別と橋の構造・機能により分類され、重要度が標準的な橋（Ａ種の橋）については致命的な被害を防止すること（耐震性能３）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（Ｂ種の橋）では限定された損傷にとどめること（耐震性能２）が目標とされている。

また、耐震性能１から耐震性能３は、耐震設計上の安全性、耐震設計上の供用性、耐震設計上の修復性のそれぞれの観点から３段階のレベルが設定されている。表－２は、３段階の耐震性能について耐震設計上の安全性、供用性、修復性の観点から考慮されている事項を示したものである。

表－１ 設計地震動と橋の要求性能〔１〕

設計地震動		Ａ種の橋	Ｂ種の橋
レベル１地震動		地震によって橋としての健全性を損なわない性能（耐震性能１）	
レベル２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）	地震による損傷が橋として致命的とならない性能（耐震性能３）	地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能（耐震性能２）
	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）		

２．５ 耐震性能の照査方法

（１）耐震性能と限界状態

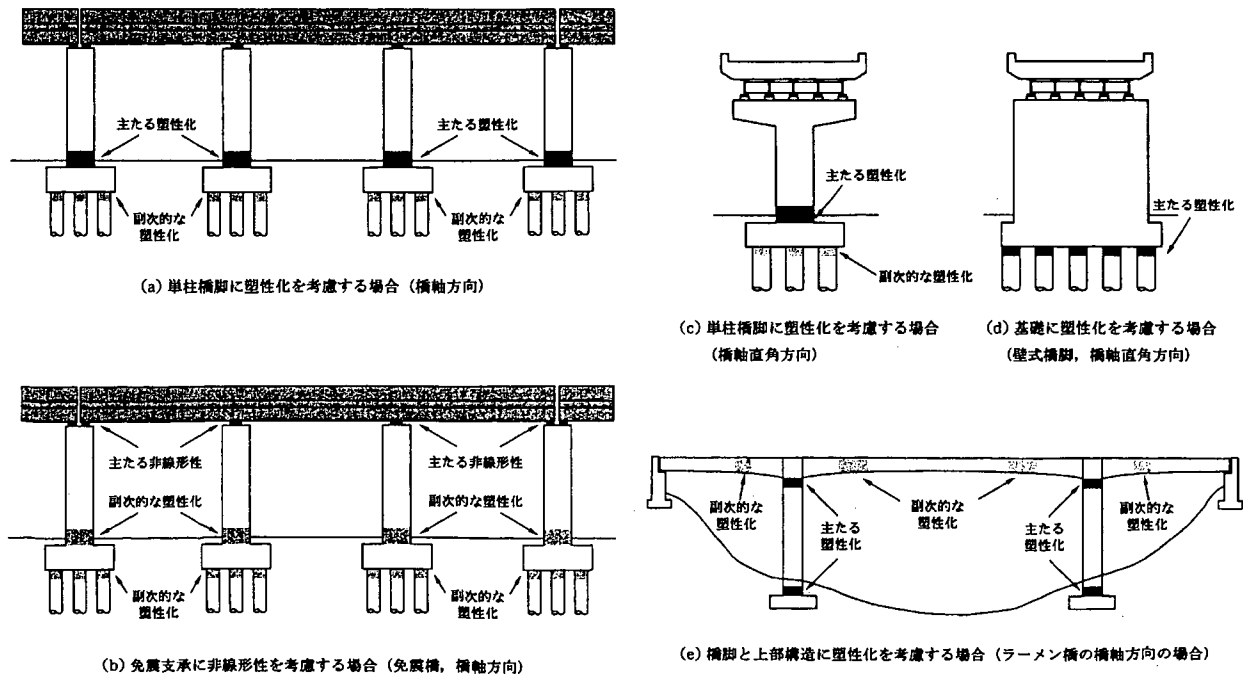
上記のように耐震設計で目標とする橋の耐震性能が明確に示されているが、これを具体的に耐震設計において実現するためには、橋梁の構造条件に応じて耐震性能を満足する限界状態を適切に設定する必要がある。今回の改訂では、限界状態の設定の原則が明確に規定されている。例えば、耐震性能２に対しては、塑性化を考慮した部材にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復が容易に行い得る範囲内で適切に定めるものとする、塑性化を考慮する部材としては、確実にエネルギー吸収を図ることができ、かつ速やかに修復を行うことが可能な部材を選定すること、橋の構造特性を踏まえ、塑性化を考慮する部材を適切に組み合わせるとともに、その組合せに応じて、各部材の限

界状態を適切に設定すること、が規定されている。

このような原則的な考え方のもとで、一般的な橋に対する塑性化を考慮する部材の組合せと各部材の限界状態の考え方の例が解説されている。図－3は、塑性化あるいは非線形性を考慮する部材の組合せの例を示したものである。

表－2 耐震性能の観点[1]

橋の耐震性能	耐震設計上の 安全性	耐震設計上の 供用性	耐震設計上の修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能1： 地震によって橋としての健全性を損なわない性能	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	軽微な修復でよい
耐震性能2： 地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保する	地震後橋としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	より容易に恒久復旧を行うことが可能である
耐震性能3： 地震による損傷が橋として致命的とならない性能	落橋に対する安全性を確保する	—	—	—



図－3 塑性化あるいは非線形性を考慮する部材の組合せの例[1]

(2) 耐震性能の照査方法

耐震性能の照査は、想定する地震時の橋の挙動が(1)に示した限界状態を越えない状態にあることを照査することが基本となる。耐震性能の照査方法としては、「静的照査法」と「動的照査法」の2つに整理され、表-3に示すように橋の地震時の挙動の複雑度に応じて、性能照査方法を選択することとされている。

静的照査法としては、地震時の挙動が単純で主たる振動モードが1つとなるような橋を対象に、構造部材の弾性域を考慮した震度法と構造部材の非線形域のじん性を考慮した地震時保有水平耐力法を用いる。地震時の挙動が複雑な橋に対しては、これらの静的照査法の適用性が限定されてくるために、動的照査法により耐震性能の照査を行う。

従来は、地震時の挙動が複雑な橋に対しては、静的照査法と動的照査法を併用して両者の照査を満足させることとされていたが、動的照査法を適切に適用し、橋全体としての耐震性の確保に十分留意することを前提に動的照査法による照査が中心となることが明確にされた。

表-3 地震時の挙動の複雑さと耐震性能の照査に適用できる耐震計算法[1]

橋の 動的特性 照査 をする 耐震性能	地震時の挙動 が複雑ではな い橋	塑性化や非線形性が 複数箇所を生じる橋 及びエネルギー一定 則の適用性が十分検 討されていない構造 の橋	静的解析の適用性が限定される橋	
			高次モードの影響 が懸念される橋	塑性ヒンジの発生 箇所がはっきりし ない橋、複雑な振 動挙動をする橋
耐震性能 1	静的照査法	静的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能 2	静的照査法	動的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能 3				
適用する橋の 例	右記以外の条 件の橋	・ゴム支承を用いた地 震時水平力分散構造 を有する橋 ・免震橋 ・ラーメン橋 ・鋼製橋脚に塑性化を 考慮する橋	・固有周期が長い橋 ・橋脚高さが高い橋	・斜張橋、吊橋等の ケーブル系の橋 ・上・中路式アーチ 橋 ・曲線橋

3. 性能規定型基準に基づく新技術適用

性能規定型基準の導入の大きな目的の1つとして、新たな技術開発の促進や新しい技術の現場への早期反映が上げられる。新しい技術開発を現場に適用する際には、その技術が要求する性能を満足することを検証した上で採用することが大前提となる。性能検証を行った上で、施工性や性能検証のための試験施工の段階から各種の現場条件に応じた適用などの段階を踏んだ上で一般化された技術として確立されていく流れとなるのが一般的である。

3. 1 土木研究所における新技術開発と適用例

新しい技術の開発や検証に関しては、いうまでもなく産学官の各方面の分野で数多くの検討がなされているところであるが、ここでは、道路橋示方書に関連した検討の事例として、配筋合理化技術、

桁端部構造等土木研究所で開発しているいくつかの新しい耐震技術の性能検証事例や実務への反映事例を紹介する。さらに、性能検証技術の1つとして現在土木研究所で開発を進めている鉄筋コンクリート構造の耐震性能検証のための標準実験方法とその活用方法について述べる。

(1) 配筋合理化技術

1) 開発技術の提案

平成7年の兵庫県南部地震による甚大な被害の経験を踏まえ、鉄筋コンクリート構造においては、地震時における塑性変形性能の向上が不可欠となった。塑性変形性能に優れた鉄筋コンクリート構造を実現するためには、一般にねばり強い破壊モードとなる曲げ破壊型の損傷を確実に誘導し、さらに軸方向鉄筋の座屈を防ぎ、コアコンクリートを適切に拘束することが必要とされる。このため、部材をとり囲む帯鉄筋、軸方向鉄筋や帯鉄筋の外側へのはらみだしを防ぐ中間帯鉄筋、さらには、かぶりコンクリートが剥離したような状態でも帯鉄筋や中間帯鉄筋がコアコンクリートを確実に拘束できるように帯鉄筋の端部を十分に定着することが必要とされるようになった。このため、従来構造に比較して、鉄筋コンクリート部材における鉄筋の配置や定着が量的、質的に多くなっている。

こうした耐震設計上の要求を満足させると、一方では、現場における帯鉄筋や中間帯鉄筋の施工作業が非常に煩雑になるとともに、コンクリートの確実な充填性についても注意が必要となるなど、現場での施工性が従来に比較して低下するなどの課題が指摘されている。このため、必要な耐震性能を確保し、かつ、より合理的な配筋構造の両立を可能とする技術開発が必要とされている。

土木研究所では、このような背景のもとで、(財)土木研究センター、前田建設工業株式会社、戸田建設株式会社、住友建設株式会社、株式会社ピー・エス、東急建設株式会社との共同研究として、平成13年度から3年間の予定で「高じん性鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する研究」を実施している[10]。本共同研究では、鉄筋コンクリート構造の塑性領域における必要な変形性能を確保するとともに、施工の効率化と施工コストの低減を図ることも可能な技術開発を行うことを目的とし、高施工性材料や高強度材料等を活用した耐震構造、従来の配筋構造とは異なる高じん性を発揮する新しい耐震構造を含む実用的な配筋合理化技術の開発を目指している。

共同研究は、現在2年目となっているが、鉄筋コンクリート橋脚のじん性の向上のために配筋されている鉄筋の合理化という観点から、鉄筋量を低減させるための方策ならびに施工性を向上させる新しい配筋方法として、高強度材料の活用、インターロッキング構造、プレストレス導入構造、プレキャスト構造、定着構造の合理化、について研究開発を実施している。

現在研究実施中であるが、ここでは共同研究の中で土木研究所が担当している1つの技術に関して紹介する。本技術は、必要な変形性能を確保するとともに、施工の効率化と施工コストの低減を図ることを可能な技術として、帯鉄筋や中間帯鉄筋の端部における定着構造について新しいアイデアを考案したものである[11,12]。

2) 開発技術

地震時に塑性化することを考慮する鉄筋コンクリート橋脚においては、帯鉄筋は内部コンクリートを拘束する役割、軸方向鉄筋の座屈を抑制する役割ならびにせん断耐力を高める役割があり、中間帯鉄筋は帯鉄筋を補完してこれらの効果を高める役割がある。地震時に橋脚に塑性化が生じるような変形が生じて、これらの役割を確実に果たすためには、帯鉄筋と中間帯鉄筋の端部の定着に十分配慮する必要がある。例えば、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編[1]では、中間帯鉄筋の端部を半円形フックも

しくは鋭角フックとし、そのフックを帯鉄筋にかけた上で内部のコンクリートに定着させることとなっている。中間帯鉄筋の端部を帯鉄筋にかけるのは、大きな塑性変形が生じて軸方向鉄筋の座屈を抑制し、内部コンクリートの拘束効果を高めるためである。

中間帯鉄筋の両端を帯鉄筋にかける場合、両端部のフック形状として半円形フックや鋭角フックを用いると側方からの鉄筋組立が困難になる。しかし、中間帯鉄筋の端部を直角フックとした鉄筋コンクリート柱に対する正負交番載荷実験によると、かぶりコンクリートが剥離すると、帯鉄筋のはらみだしに対して直角フックが十分に抵抗できず、直角に曲げられていたフックがまっすぐに伸びようとする挙動を示し、これによって内部コンクリートが拘束できなくなることがわかっている。このような点を踏まえ、実際の施工では一端に半円形フックを有する2本の鉄筋を断面内部で継いだ中間帯鉄筋とすることが多くなっている。

帯鉄筋や中間帯鉄筋の施工性の向上を図った定着構造については既に幾つかの提案があるが、本研究では、端部のフックとして施工性のよい直角フックを使いながらも、かぶりコンクリートが剥落するような損傷が生じて帯鉄筋との定着を確保し得る単純で簡単な機構の定着構造について提案を行ったものである。

図-4は、開発中の帯鉄筋や中間帯鉄筋の定着構造を示したものである。(a)は、長円形状のリングを用いて中間帯鉄筋を帯鉄筋と定着させる構造の概念図を示したものである。これは、予め中間帯鉄筋にリングを通しておき、直角フックを中間帯鉄筋にかけた後、そのリングの一端を直角フックの足の部分にひっかけて固定した構造である。この時、リングの他端側は内部コンクリートに定着するようにし、かぶりコンクリートが剥落しても、リング自体は抜け出してこないようにする。このリングの定着効果により、直角フックであっても帯鉄筋のはらみ出そうとする変形に対して抵抗できる構造となる。この原理は、(b)に示すように帯鉄筋の軸方向鉄筋への定着にも応用させることができる。

(c)は、2つのリングを鎖状に組み合わせ、予め帯鉄筋にその一方のリングを通しておき、他方のリングに中間帯鉄筋の直角フックを通すことにより帯鉄筋と中間帯鉄筋を定着させる構造の概念を示したものである。この構造では、中間帯鉄筋の端部が直角フックであっても、そのフックはかぶりコンクリートよりも内側のコンクリートに定着されることになるため、軸方向鉄筋の座屈に伴ってかぶりコンクリートが剥落しても、直ちに直角フックがはずれ出すことはない。したがって、適切にリングの構造諸元を設計すれば、端部を半円形フックとした中間帯鉄筋と同等の拘束効果が期待できるものである。

(d)は、端部を直角フックとした中間帯鉄筋の折曲げ部をL型の鋼製アングルで覆うことにより、帯鉄筋と中間帯鉄筋を定着させる概念を示したものである。前述したように、塑性変形が大きくなると、帯鉄筋が外側にはらみだそうとする力によって直角フックにはそれを広げようとする曲げモーメントが作用するが、この曲げモーメントに抵抗すべく、直角フックの折曲げ部の曲げ剛性を高めるように補剛し、直角フックの形状が保たれるようにしたものである。この構造で重要なのは、L型の鋼製アングルの一端側は内部コンクリートに定着させることと鋼製カバーの隅角部に適切な曲げ剛性を確保することとなる。

(e)は、中間帯鉄筋の端部を直角に2回折曲げてU字型のフックとし、帯鉄筋と中間帯鉄筋が平行に重なる箇所において金具によって定着する構造を示したものである。この構造では、中間帯鉄筋の端部は直角フックではあるが、内部コンクリートへ定着されることになるため、かぶりコンクリートが剥落しても帯鉄筋と中間帯鉄筋の定着は確保され、半円形フックとした場合と同等の効果が期待される。

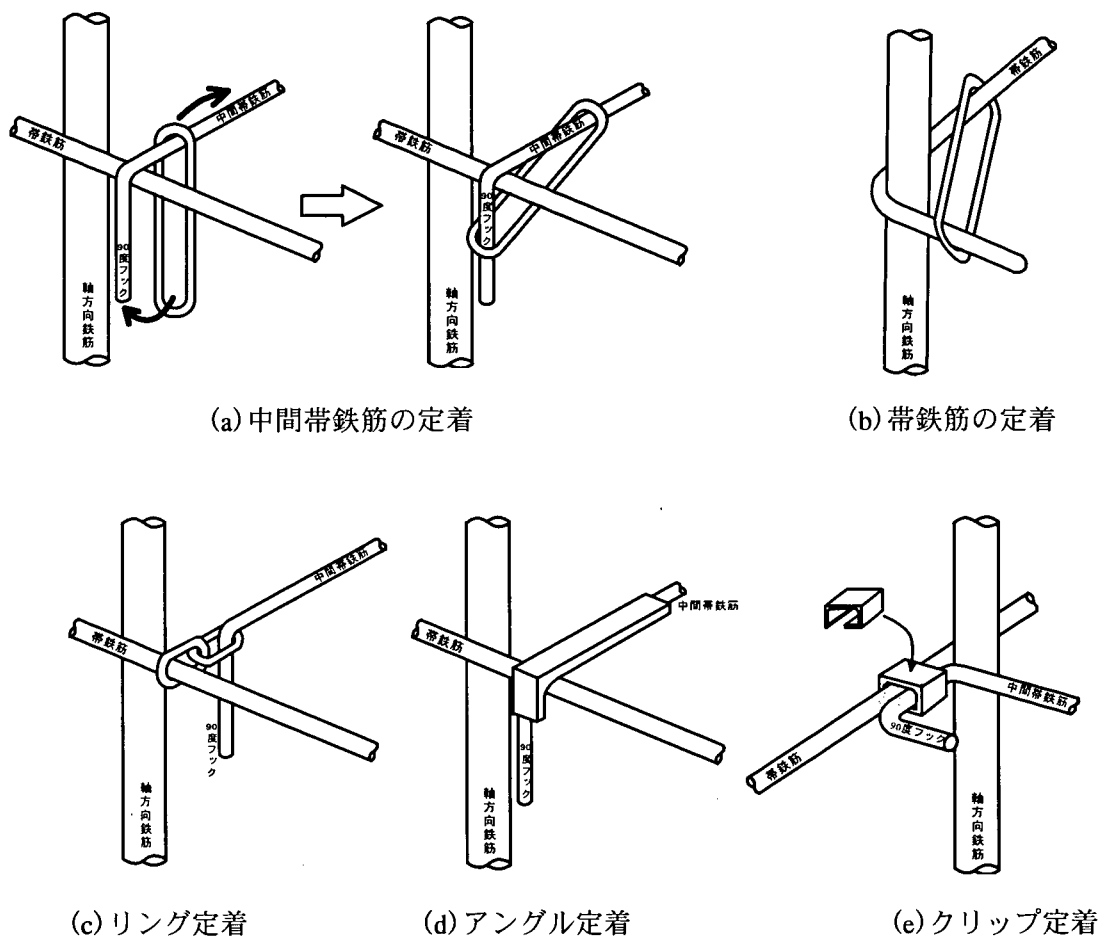


図-4 帯鉄筋、中間帯鉄筋の定着構造に関する提案

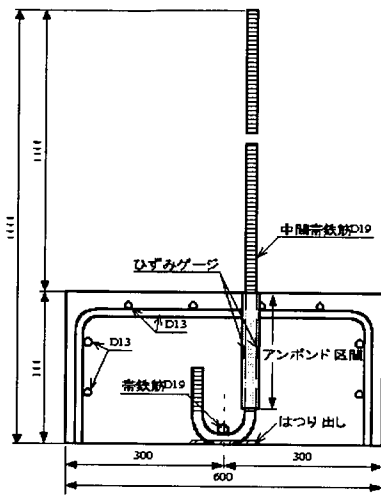
3) 開発技術の性能検証

上記のような新しい開発技術の場合に、これが所要の性能を十分に有しているかどうかという点を検証することが必要とされる。検証方法には、解析的手法、実験的手法、またこれらの組合せ等様々な方法が考えられるが、ここでは、本構造に必要とする性能として、鉄筋コンクリート構造が地震時に塑性変形を受け、かぶりコンクリートが剥離するような状態においても、半円形フック、あるいは、鋭角フックと同等の定着性能を有することを実験的に検証することとした。ここで、標準的な実験手法は存在しないため、各種類似の検討事例[13]等を調査するとともに、帯鉄筋、中間帯鉄筋の地震時の状態を想定し力学的に同等の状況となることを想定して以下のような実験により性能を検証することとした。

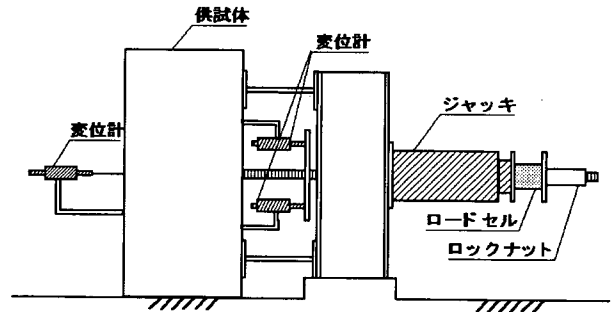
実験に用いた模型供試体の諸元を図-5に示す。本実験では、中間帯鉄筋の定着構造形式をパラメータとして9体の模型供試体に対して引抜試験を行った。定着構造としては、半円形フック、直角フックと、今回提案する鎖状リング式、クリップ式、リング式、鋼製アングル式を用いた6種類とした。中間帯鉄筋は図-5に示す区間をアンボンドとしたD19材を使用し、かぶりコンクリートが全て剥離した状態を想定して、定着部をはつり出している。図-6に示すように模型供試体とジャッキとをセットし、鉄筋の引抜試験を行った。測定データは、引張荷重、鉄筋のひずみ及び変位、定着部の変位である。鉄筋のひずみは、図-5に示す2枚のひずみゲージの値で評価を行った。

図-7は、定着構造を半円形フックとした場合と直角フック、鎖状リング式、及びリング式とした

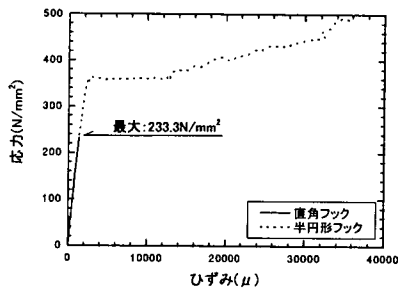
場合の場合の鉄筋の応力度－ひずみ関係の一例を示したものである。これによれば、直角フックの場合には、鉄筋の応力度が降伏前の 233.3N/mm^2 に達したときにフックの端部が開き、その後は引張荷重は低下し、鉄筋のひずみは戻り始め、鉄筋が抜け出し、定着が有効に働いていないことがわかる。鎖状リング式とした場合には、半円形フックとほぼ応力度－ひずみ関係が得られており、中間帯鉄筋の端部定着が十分であることが分かる。今回実験したリング式の場合には、鉄筋に生じる応力度が降伏点まで達しなかった。これはリングの剛性が不足したためにフックの端部が開く力によってリングに曲げが生じ、フックの端部の開き出しを抑えることができなかったためである。フックの端部の開き出しを拘束するリング剛性を確保することにより必要な性能を確保することが可能と考えている。



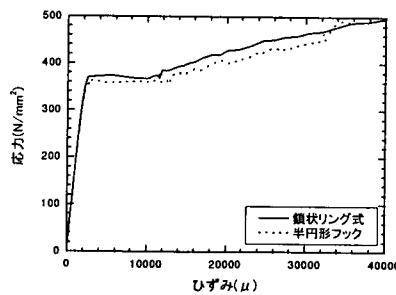
図－５ 性能検証に用いた実験供試体



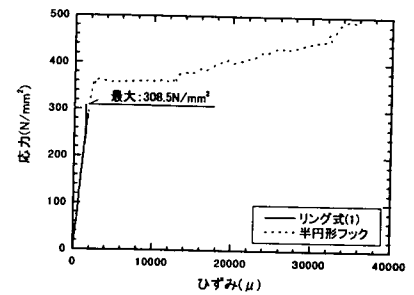
図－６ 性能検証実験



(a) 直角フック



(b) 鎖状リング式



(c) リング式

図－７ 性能検証実験結果

4) 開発技術の現場への適用

本技術に関しては、現在研究中であるが、今後、各構造の詳細構造、設計方法、規格を定めるとともに、施工試験を行い、施工性の向上を確認し、現場条件に応じて各種の施工方法を選択できるように現場への普及を図っていきたい。

(2) 桁端部構造：大変位吸収システム[14～16]

1) 開発技術の提案

耐震安全性の向上のみならず、伸縮装置の数を少なくし、走行性や維持管理性の向上も図ることが可能な橋梁構造として、地震時の水平力を各下部構造に分散する構造とした多径間連続構造が採用される場合が多くなっている。多径間連続構造の場合には、温度変化による桁の伸縮に対応するために、一般に水平力分散支承や免震支承などのゴム系の支承が用いられることが多い。ゴム系の支承を用いた場合には、大規模地震時に支承部に生じる変位が一般に従来に比較して大きくなることから、大きな変位に対応可能な桁端部の構造が重要となっている。

道路橋示方書Ⅴ耐震設計編[1]では、免震設計を用いる場合には、隣接する桁間や桁と橋台間に衝突が生じないように遊間を設けるものとされている。これは、免震設計では、支承に想定する変形が生じることによって、長周期化と高減衰化を期待する構造であるため、桁間等の衝突によって桁の変位が大きく拘束されるなど、設計で想定した状況と異なることを避ける必要があるためとされている。一方、免震設計を採用しない水平力分散構造や他の構造形式の場合には、免震設計と同様に桁間等に衝突が生じないように必要な遊間を設けるか、あるいは、必要な遊間を確保しないで大規模地震時に桁間等に生じる衝突を許容し、衝突によって橋の機能や復旧に影響を与えないことを必要に応じて動的解析も実施して検討することとされている。

以上のようなことから、多径間連続橋では、遊間を大きく確保できる大規模な伸縮装置の設置事例も増加しており、これがコスト高や常時交通に対する維持管理面の課題が指摘されている。また、大型交通荷重に耐え得る頑丈な伸縮装置を設けた場合には、大地震時に適切に損傷して必要な設計移動遊間を確実に確保できるかどうかについても明確ではないことから、伸縮装置の小型化を図るとともに、初期建設コスト及び維持管理コストの縮減を図ることが可能な桁端部構造の検討が必要とされたものである。

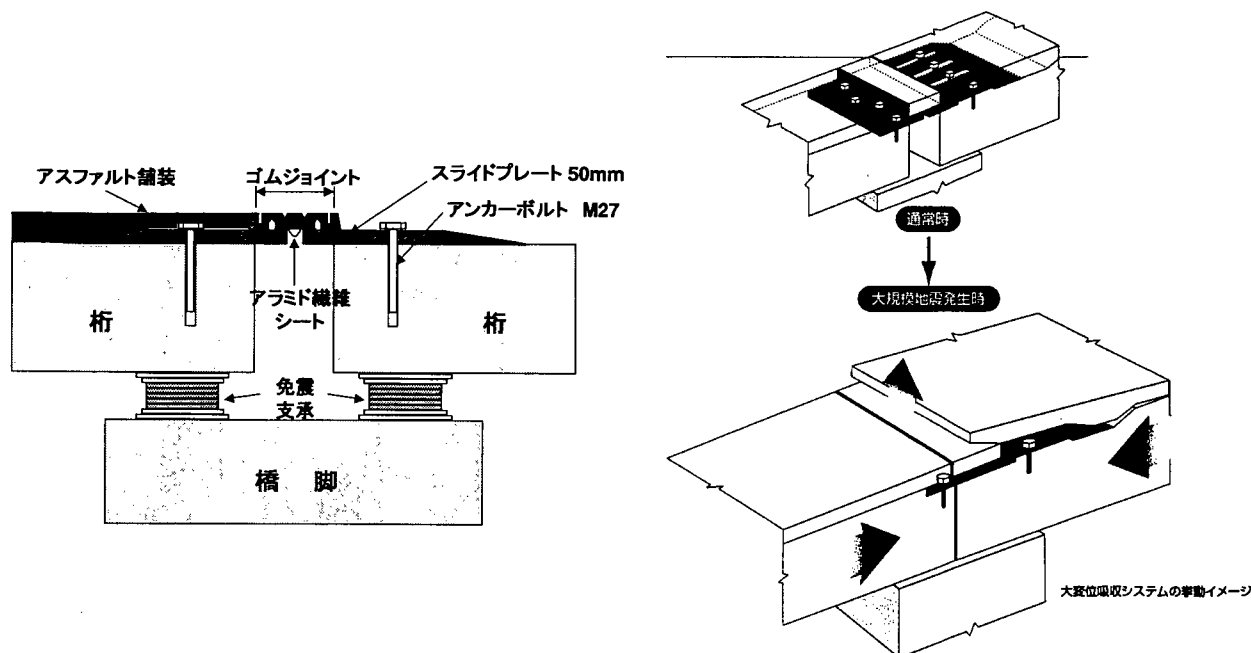
このような地震時の大変位に対応可能な桁端部構造としては、大変位に対応可能な大型の伸縮装置を用いたり、あるいは、橋台のロックオフ構造といったものが上げられる。大変位吸収システムは、このような技術をさらに進めたもので、①常時や中規模地震による変位は通常の伸縮量を有する伸縮装置により対応し、②大規模地震による大きな変位に対しては、伸縮装置の損傷は許容するが、桁端部構造として大変位に対応する構造を実現するものである。

大変位吸収システムの開発に際しては、以下の要求性能を設定した上で検討を行っている。

- ①構造がシンプルで、大規模地震時に確実に作動すること
- ②交通荷重に対して、浮き上がりや滑動を起こすことがなく、長期間にわたって安定した構造であること
- ③保守・点検が比較的容易な構造形式であるとともに、アスファルト舗装のクラック発生頻度の増大等、保守・管理上大きな負担増にならない構造であること
- ④システムの作動時に免震橋梁の免震特性に悪い影響を与えない構造であること
- ⑤システムの作動時に、通行車両等に重大な障害とならない構造であること。ここでは、路面段差を 10cm 以下、路面空間幅を 20cm 以下を目標値とすること
- ⑥大規模地震後も交通を遮断（大型車両規制等を含む）することなく、仮復旧（簡易舗装や踏掛版の設置等）により、通常時に近い交通の確保が可能であり、また本復旧に際しても交通遮断を行わずに（車線規制は可能とする）復旧工事が行えること
- ⑦システムの構造部材として特殊なものを使用していないこと。大規模地震時もしくは保守点検

で交換補修が必要となった場合でも、容易に材料（加工部材を含む）が調達出来るものから構成されていること

以上の要求性能を満足する大変位吸収システムとしては、図－８に示すような構造を考案した。大変位吸収システムは、鋼製のスライドプレートの基本とした構造であり、常時や中規模地震による変位に対してはスライドプレート上に設置した通常の伸縮装置で対応し、大規模地震時にはスライドプレートが桁と舗装間に貫入することにより、大変位を吸収する構造である。なお、スライドプレートとその固定方法によっては、いくつかのバリエーションが考えられる。



図－８ 大変位吸収システムの概要（構造と作動イメージ）[14]

2) 開発技術の性能検証

上記の構造に対して、目標とする性能を有することを検証するために、以下のように検討を行った。

①大変位吸収システムの作動メカニズムの検証

→ フルスケール部分模型を用いた動的載荷実験

②大変位吸収システムの抵抗特性の検証

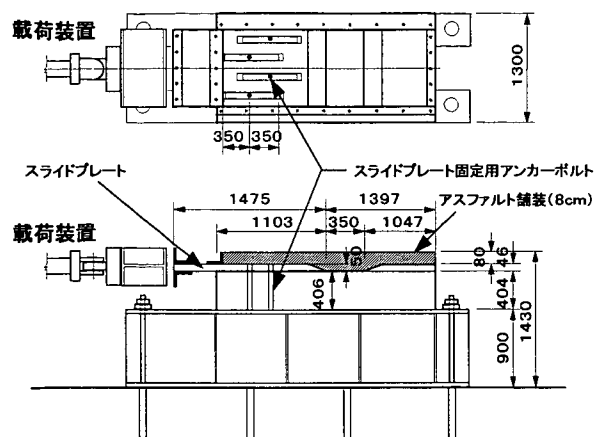
→ 各種パラメータを変化させた実験

③抵抗特性が免震橋梁に及ぼす影響の検討

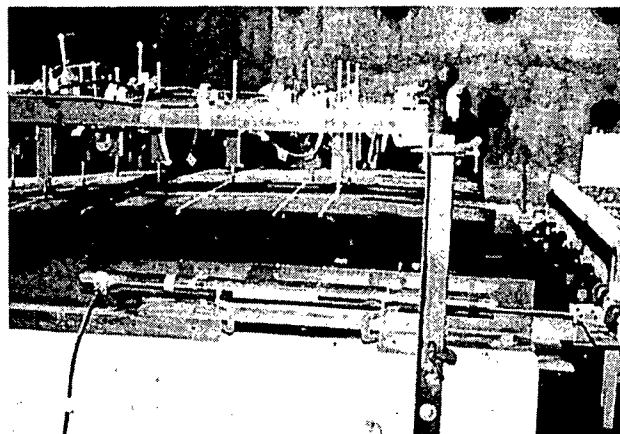
→ 実験データに基づく解析的検討

図－９及び写真－１は、①及び②の検証及び検討のために用いたフルスケールの実験供試体及び実験状況を示したものである。このような実験データをもとに、大規模地震時に確実にスライドプレートが移動、貫入するという作動メカニズムとともに、この抵抗特性が免震効果に及ぼす影響が小さいことを動的解析により検証した。さらに、スライドプレートは、アンカーボルトで固定するが、常時の環境条件や活荷重に十分に抵抗できるように設計することが必要とされることから、プレートとアンカーボルトに関しては、橋の供用期間中に通過する重車両の量を考慮した疲労に対する照査を行う

こととした。



図－９ フルスケール実験による大変位吸収システムの作動特性の検証

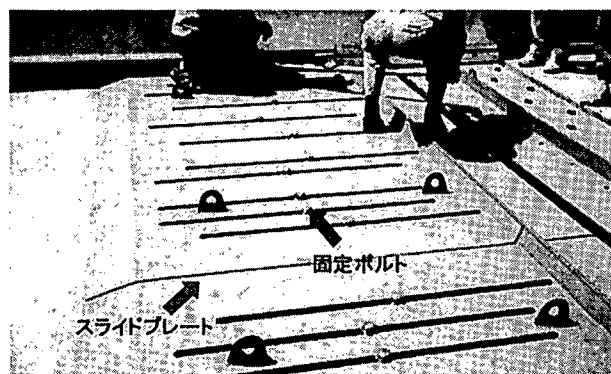


写真－１ 大変位吸収システムの実験検証

3) 開発技術の現場への適用

以上のような実験検証と解析的検討を踏まえて、これに基づく設計法の提案を行い、実際の現場への試験的な採用を行っている。写真－２は、大変位吸収システムが試験的に実際の橋への設置状況を示したものである。こうした試験施工の成果を検証し、本技術の耐久性等を含む性能検証結果を踏まえて今後普及を図っていきたいと考えている。

なお、これらの実験検証や解析的検討などの技術検討に際しては、国土交通省近畿地方整備局により設置された「米原 B.P 天野川高架橋ノックオフ検討会」により検討を行った。



写真－２ 大変位吸収システムの実施工での設置状況

(3) 性能検証試験方法[17]

1) 耐震性能の検証実験

耐震性能の照査に用いる実験としては、応力度－ひずみ関係等の材料の基礎的力学特性を調べるための材料実験や、地盤の土質力学特性を調査するための土質実験等の他に、橋全体系を対象として行う実験や、橋脚、支承、基礎、上部構造、落橋防止構造等の部材を対象とした要素実験等がある。このような実験に基づいて耐震性能の照査を行う場合には、実験の目的やその実験結果の耐震設計への反映方法等に応じて、適切な実験手法を選定しなければならない。また、実験による性能検証を行う

際には、実験手法の選択、模型の製作、載荷方法、実験結果の評価や整理などに十分留意して行う必要がある。

具体的な実験手法としては、振動台実験、正負交番載荷実験等があるが、実験の目的と適用する実験方法の選定の考え方の一例を表-5に示す。実験の目的としては、表-5に示した事項だけでなく、他にも様々な目的で実施される実験があるが、ここでは代表的なものだけを例示した。また、振動台実験の他に、振動台を用いずとも入力地震動に対する橋の応答を解析と実験を組み合わせで検討することができるハイブリッド実験法等が確立されてきているので、このような実験手法についても実験の目的に応じて適用することができる。

橋に要求される耐震性能を実験のみによって照査するためには、地盤の影響を含めた橋全体系のモデルに対して振動台実験等を行う必要があるが、このような実験は一般に非常に大がかりとなる。一方、使用材料の材料実験や部材を対象とした要素実験は、これらの実験による検討だけでは橋の耐震性能を直接的には照査できないが、静的照査法や動的照査法のような解析に基づく耐震性能の照査法に組み入れていくことにより、実験結果を反映させた耐震性能の照査を行うことができる。

なお、実験的な検討は、一般に実験数が限定されており、また、実験結果には様々な要因に起因するばらつきもある。したがって、実験結果の解釈においては、そのような限定された実験結果の妥当性、信頼性についても十分に検討する必要がある。

2) 鉄筋コンクリート部材の性能検証に及ぼす影響

性能検証を実験的に行う場合には、活用可能な施設の制約などから、一般に縮小モデルを用いざるを得ない場合が多い。このような場合には、寸法効果が実験結果に影響を及ぼす場合がある。

鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能に関して断面の寸法効果が生じる要因には、断面の長尺化に直接起因するものと、縮小模型に用いた材料や配筋条件が実橋脚のそれらを完全にスケールダウンしたものとはなっていないことに起因するものの、大きく分けて2つあるものと考えられる。寸法効果の議論をする際には、この2つの要因は切り離して考える必要があり、本来は前者を寸法効果として捉えるべきである。しかしながら、一般にこの種の研究でよく用いられている断面寸法で30～60cm程度の縮小模型において、実橋脚の構造詳細全てを忠実にスケールダウンできないことの方が多い。この場合、縮小模型と実橋脚の実験結果を単純に比較すると、この2つの要因が混在した形で塑性変形性能の違いが表れることになり、これを寸法効果と解釈する考え方もある。しかしながら、縮小模型の設計に当たっては実橋模型を可能な限り忠実にスケールダウンさせてはいるが、材料の規格や模型製作上の制約等からすべての構造諸元を相似則に基づいて完璧にスケールダウンできているわけではない。したがって、スケールファクターの違いに起因して発生する影響が多少なりとも結果に含まれることになる。このような点を踏まえた上で、ここでは、上述の2つの要因に起因して発生する影響を総じて「寸法効果」と呼ばれる。

鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能に関して、寸法効果を引き起こすと考えられる要因としては以下の点が上げられる。

- ①横拘束筋による拘束効果の低下
- ②塑性ヒンジ長
- ③軸方向鉄筋の伸び出し変位
- ④コンクリートの圧縮特性

表－５ 実験の目的と適用する実験手法の選定の例

実験の観点	実験による検討項目の例	適用する実験手法例
橋全体系の挙動	・橋全体系の耐震性能の照査 ・橋全体系の振動特性や減衰特性等の動的特性の検討 ・入力地震動の位相差が橋の地震応答に及ぼす影響の検討	} 振動台実験
部材間の相互作用	・地盤－基礎系の動的相互作用の検討 ・橋脚－支承－上部構造系の動的相互作用の検討 ・橋脚－基礎系の動的相互作用の検討 ・上部構造端部の衝突に関する検討 ・地盤－基礎系における基礎の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・上部構造と橋脚が一体となった構造の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・地盤の液状化時の基礎の地震時挙動	} 振動台実験 ハイブリッド振動実験 } 正負交番 載荷実験 → 遠心力載荷実験
部材の動的特性	・橋脚の地震時非線形挙動の検討 ・上部構造本体の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・橋脚の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・じん性を向上させるための構造細目の検討 ・基礎本体の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 ・支承本体の動的特性の検討 ・落橋防止構造の動的特性の検討	→ 振動台実験 } 正負交番 載荷実験 → 支承試験 → 衝突実験
基礎的力学特性	・コンクリートの応力度－ひずみ関係の検討 ・鋼材の応力度－ひずみ関係の検討 ・コンクリートと鉄筋の付着特性の検討 ・地盤のせん断弾性係数－せん断ひずみの関係の検討 ・液状化の判定に用いる繰返し三軸強度比の検討	→ 圧縮載荷実験 → 引張り試験 → 付着実験 → 繰返し中空ねじせん断実験 → 繰返し三軸試験

ここでは、断面寸法が鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能に及ぼす影響を検討するために行った曲げ破壊型の実大鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験の結果を紹介する[17,18]。この実験では、写真－３に示すように正負交番載荷実験としては世界でも最大級の断面寸法（2.4m × 2.4m）の供試体を用いている。さらに、断面寸法でこの実大供試体に対して 1/4 の縮尺となる小型供試体に対しても同様の実験を行っており、これらの実験結果の比較により、塑性変形性能に及ぼす断面寸法の影響について検討したものである。実験に用いた模型は、実大供試体２体（L 1 及び L 2 供試体）と縮小供試体１体（S 1 供試体）である。ここでは、L 2 供試体が基準であり、これを寸法で 1/4 に縮小させたのが S 1 供試体であり、L 1 供試体は、L 2 供試体の帯鉄筋比だけを小さくした模型となっている。

図－10は、水平カードリフト関係の履歴曲線の包絡線を L 2 供試体と S 1 供試体で比較して示したものである。ここで、小型供試体の水平力は、大型供試体と相対的な比較ができるように補正している。これより、水平カードリフト履歴曲線の包絡線を比較すると、大型供試体と小型供試体の挙動は比較的良好に一致しており、適切な縮小模型化によって実大橋脚の曲げ変形性能を再現できることがわかる。

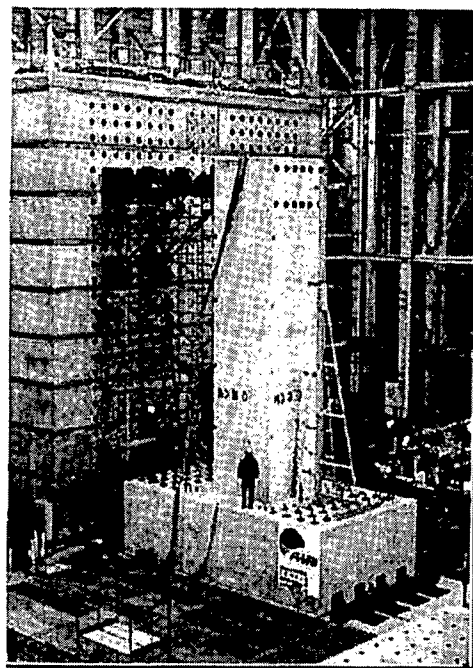


写真-3 実大供試体試験

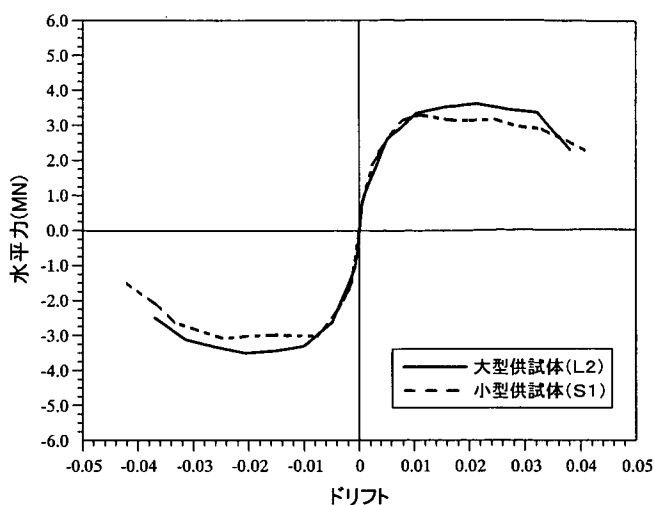


図-10 実大構造と縮小構造の荷重-変形関係の比較

3) 正負交番载荷実験における模型供試体の設計上の留意点

上述した実大規模の実験の結果や寸法効果の影響等を踏まえると、塑性変形性能を検証するために行われる正負交番载荷実験では、その模型供試体の設計段階において、相似則に配慮しておく必要がある。

実構造物の断面寸法が 2.5m、高さが 10m で、軸方向鉄筋径が 35mm、軸方向鉄筋間隔が 125mm、軸方向鉄筋比が 1.0%、帯鉄筋径が 22mm、帯鉄筋間隔が 150mm と仮定する。このような鉄筋コンクリート橋脚の縮小模型を考えると、実験室の性能等の制約から断面寸法を 50cm に設定したとする。これは、断面寸法で 1/5 に縮小したことになる。したがって、相似則に基づけば、配筋条件に関しては、軸方向鉄筋径は 7mm、軸方向鉄筋間隔は 25mm、帯鉄筋径が 4.4mm、帯鉄筋間隔が 30mm とする必要がある。しかしながら、規格鉄筋の径が限られていることや模型施工上の制約等から、このように完璧に全ての構造諸元をスケールダウンさせた縮小模型を製作することは一般に困難である。したがって、できる限りの範囲で相似則に基づいた縮小値に近い配筋条件を再現できるようにする配慮する必要がある。

ただし、軸方向鉄筋径等の配筋条件が著しく相似則に反している場合には、それだけ寸法効果の影響が大きくなるため注意が必要である。これまでの実験によると、同一の軸方向鉄筋比であっても、太径の軸方向鉄筋を用いた方が塑性ヒンジ長が長くなり、その分終局変位が大きくなるという結果が得られている。また、相対的に太径の軸方向鉄筋を用いると、フーチングからの伸び出し変位が大きくなることも知られている。したがって、縮小模型の設計においては、軸方向鉄筋比を実橋脚と一致させることも重要であるが、軸方向鉄筋径についてもできる限り縮小率に応じた適切なものを選定することが重要である。その一方で、縮小率が大きくなると、相似則に基づけば規格にないような細い直径の鉄筋を軸方向鉄筋として用いないといけないような場合も生じる。このような場合には、逆に鉄筋自体の材料特性やコンクリートとの付着特性が実挙動との間で相違が生じることがあり、新たな寸法効果の原因となってしまうため、相似則に配慮したために過度に細い鉄筋を用いることが必ずし

も適切な判断とはならないこともある。したがって、このような問題が生じないようにするために、できる限り大きな供試体で正負交番載荷実験を行うのが望ましい。

このように、縮小模型における配筋諸元が断面寸法の縮小率と一致しないと、実橋脚と縮小模型の塑性変形性能に違いが生じることがある。したがって、縮小模型による実験結果を耐震性能の照査に反映させる場合には、このような寸法効果の影響に配慮する必要がある。

4) 正負交番載荷実験における載荷パターンの設定

鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能を実験的に検証する場合、一般に正負交番載荷実験が行われる。正負交番載荷実験は、当該橋脚がどの程度の塑性変形性能を保有しているのかを検証する手法であり、一般には入力地震動の特性とは無関係に実験が行われている。その一方で、この正負交番載荷実験では、載荷繰り返し回数や載荷履歴によって、終局変位やじん性率等、塑性変形性能を表わす指標に影響が生じることがこれまでの多くの研究で指摘されている。

鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験では、一般に、降伏変位を基準変位としてその整数倍の変位を順次与える方法が採用されているが、各載荷ステップにおける繰り返し回数は、研究者によって異なっている場合がある。また、正負交番載荷実験における載荷繰り返し回数の設定根拠を、入力地震動の特性との関係から明確に説明した研究は、米国では鋼構造の分野で報告例があるが[20]、我が国における地震動の特性を反映して行った研究はこれまでにほとんどない。

このような背景から、振幅の繰り返し特性や継続時間の異なる多くの強震記録を用いた非線形時刻歴応答解析の結果から、鉄筋コンクリート橋脚に生じる塑性応答の繰り返し回数特性について検討している[20]。

本解析では、鉄筋コンクリート橋脚を1自由度系にモデル化し、その基部に地震動を作用させて時刻歴応答解析が行ったものである。履歴構成則としては、鉄筋コンクリート部材の非線形挙動をよく表わすことのできる剛性低下型弾塑性モデル(Takedaモデル)を適用している。解析に用いた入力地震動は、既往の地震により実測された77成分と、耐震設計用として作成された模擬地震動18成分の合計95成分である。ここで、実測波の77成分は、マグニチュードが6.5以上の25の地震により観測されたものであり、震源が海洋のプレート境界付近の地震による地震動(以下「タイプⅠの地震動」という)と内陸直下の地震による地震動(以下「タイプⅡの地震動」という)が含まれている。また、系の固有周期として、0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.95, 1.0, 1.5, 2.0秒の10ケース、また、最大応答塑性率は、3.0, 6.0, 9.0の3ケースをそれぞれ設定している。

図-11は、最大応答変位が生じる前までの時間における応答塑性率の度数分布を全ての解析ケースに対して求め、その平均値と標準偏差を示したものである。ここでは、入力地震動と系の固有周期の特性を全解析ケースで平均化して示している。これより、タイプⅠの地震動では、標準偏差の1倍のばらつきを考慮すると、 $1 \sim 2\delta$ の応答が23回前後作用するが、 $3 \sim 4\delta$ の応答は6回前後、 $5 \sim 6\delta$ の応答は3回前後となっている。これは、繰り返し回数を10回とする正負交番載荷は、タイプⅠの地震動が作用した時の実際の挙動よりも非常に多い繰り返し回数を与えていることを示している。また、応答変位の増大に伴って、その繰り返し回数が徐々に少なくなっている点も特徴的である。一般的な正負交番載荷実験では、載荷変位とは無関係に繰り返し回数は一定とすることが多いが、本解析結果からは、タイプⅠの地震動に対しては、載荷変位の増大に伴って、徐々に繰り返し回数を減らす方が合理的であると言える。

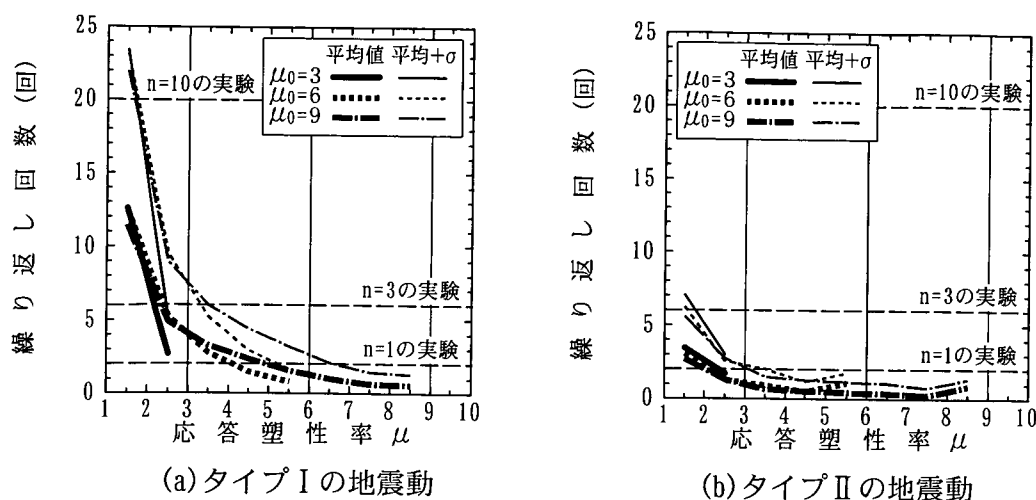


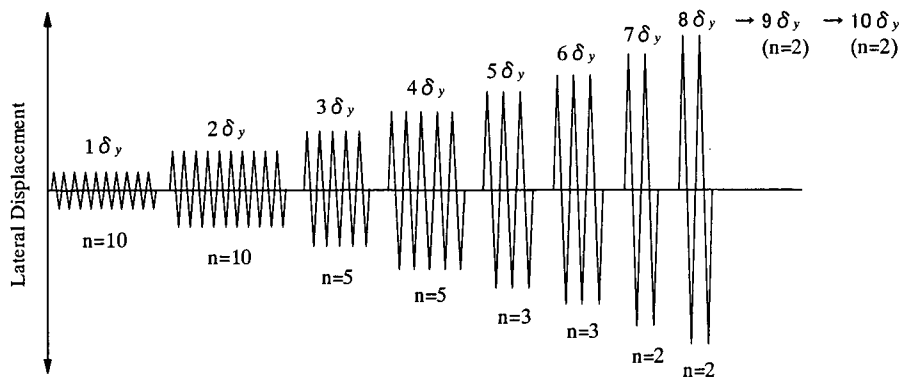
図-11 実地震動の解析に基づく荷重繰返し回数

一方、タイプⅡの地震動に対する繰返し回数は、明らかにタイプⅠの地震動の場合よりも少ない。すなわち、 $1 \sim 2 \delta$ の応答は 6 回前後作用しているが、 3δ 以降の応答変位は、各カテゴリーとも 1 回程度ずつしか作用していない。これは、タイプⅡの地震動に対しては、正負交番荷重実験において、 3δ 以上の荷重ステップの繰返し回数は 1 回でも十分であることを示している。なお、タイプⅠの海洋のプレート境界型地震に関しては、本解析データの中にはマグニチュード 8 クラスの地震による観測記録が含まれていないことについて十分注意する必要があるところである。

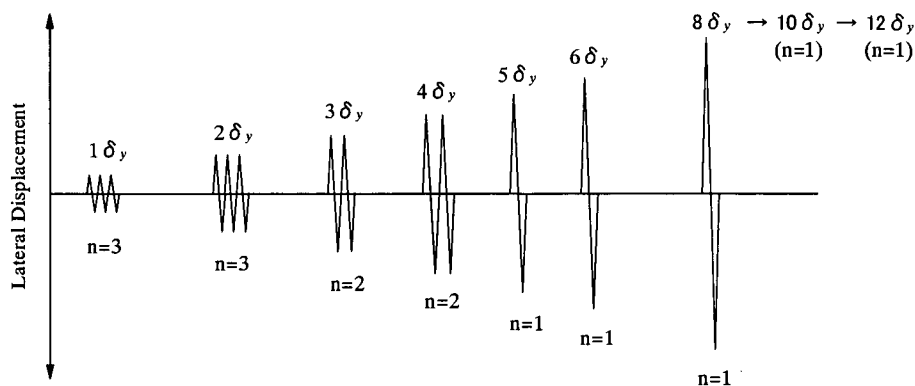
上述したような鉄筋コンクリート橋脚に生じる非線形応答の繰返し回数特性に基づき、単柱式鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番荷重実験における荷重パターンの設定例を図-12に示す[22]。ここでは、タイプⅠの地震動に対する荷重パターンとタイプⅡの地震動に対する荷重パターンの 2 種類を示している。

5) 鉄筋コンクリート構造の耐震性能の検証のための試験法ガイドライン

上記のような研究成果を踏まえて、現在、土木研究所では、米国運輸省連邦道路庁との共同研究として、道路橋橋脚の耐震性能試験法に関する共同研究を実施しているところである。本研究は、日米双方で実施されている荷重実験結果の理解、実験データの共通的な活用を可能にするとともに、今後新しい技術が開発された場合の耐震性能の評価に用いる標準試験法として活用できるようにすることを目的としている。内容としては、上記の研究成果を踏まえて、実験供試体、試験方法、計測方法、試験データの整理方法、等を基本的な内容としている。



(a) タイプ I の地震動に対する荷重パターン



(b) タイプ II の地震動に対する荷重パターン

図-12 鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番荷重実験における荷重パターン

4. おわりに

本文では、平成 14 年 3 月に改訂された道路橋示方書 V 耐震設計編の性能規定型基準体系の意義について解説するとともに、今後の発展が期待される新しい技術開発に関して土木研究所において実施している研究事例に関して紹介した。

道路橋示方書に直接関連する新技術の性能検証のための、審査・認証制度は具体的にはまだ設けられていないが、現在存在する国土交通省の新技術活用システムや個別技術の技術審査証明制度などが活用されながら、今後、道路橋に関する有効な新技術の早期導入を図るための制度、システムについても、上記の既存のシステムと適切に連携しながら実施されていくことになるものと考えられる。

さらに、こうした技術評価制度とともに、ある新技術を技術的な観点で評価する際には、適切な試験、実験あるいは解析により検討することが不可欠となる。こうした性能検証試験方法についても、従来の技術の確立に用いられた試験方法等との整合を図りつつ、技術の特性に合致した方法として確立していくことが必要と考えられる。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編、平成 14 年 3 月
- 2) 建築基準法研究会：建築基準法大改正、日経 BP 社、1997 年
- 3) 堺孝司：性能照査型設計法のゆくえ、橋梁と基礎、97-8、pp.77-83、1997 年
- 4) 岡村甫：性能照査型基準について－耐震設計－、コンクリート工学、Vol.35、No.11、pp.6-7、

1997 年

- 5) 西川和廣：道路橋示方書の改訂－性能規定化への取り組み－、道路講習会、2000 年
- 6) 例えば、日経コンストラクション：性能規定で広がる技術者の裁量、5 月 28 日号、pp.46-54、1999 年
- 7) 五條渉：性能指向の建築基準とその特性、建築研究所、pp.1-8、1998 年
- 8) コンクリート工学 1997 年/11 月号：特集＊仕様規定から性能規定へ、コンクリート工学、Vol.35、No.11、1997 年 11 月
- 9) 運上茂樹：性能規定型基準と新技術の適用、第 5 回橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会、2002 年 10 月
- 10) 土木研究所、(財)土木研究センター、前田建設工業株式会社、戸田建設株式会社、住友建設株式会社、株式会社ピー・エス、東急建設株式会社：高じん性鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究報告書（その 1）、土木研究所共同研究報告書、整理番号第 283 号、平成 14 年 9 月
- 11) 運上茂樹、星隈順一、塩島亮彦：施工性の向上を図った横拘束筋端部の定着構造の提案、土木学会第 57 回年次学術講演会、平成 14 年 9 月
- 12) 塩島亮彦、運上茂樹、星隈順一：施工性の向上を図った横拘束筋端部の定着構造の引抜試験、土木学会第 57 回年次学術講演会、平成 14 年 9 月
- 13) (財)土木研究センター：プレート定着型せん断補強鉄筋「Head-Bar」、土木系材料技術・技術審査証明報告書、1999 年 9 月
- 14) 土木研究所：免震橋梁の変位吸収システムの開発に関する研究、土木研究所資料第 3576 号、平成 11 年 2 月
- 15) 古山多喜男、井上顕史、東口武生：天野川高架橋における大変位吸収システムに関する検討・開発、平成 10 年度建設省技術研究会、1998
- 16) 近藤益央、運上茂樹、大住道生、久保茂己：免震橋梁に適用する変位吸収システムの実施例（天野川高架橋）、第 2 回免震・制震コロキウム、平成 12 年 11 月
- 17) 星隈順一：実験に基づく橋の耐震性能の評価、第 5 回橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会、2002 年 10 月
- 18) 土木研究所、日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に及ぼす寸法効果の影響に関する共同研究、共同研究報告書整理番号第 234 号、平成 11 年 10 月
- 19) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究、土木学会論文集、No.669/V-50、pp.215-232、2001 年 2 月
- 20) ATC24: Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, 1992
- 21) 星隈順一、運上茂樹：鉄筋コンクリート橋脚の地震時非線形応答の繰り返し特性、第 24 回地震工学研究発表会、pp.993-996、1997 年 7 月
- 22) J. Hoshikuma, S. Unjoh: Evaluation of Load Pattern in Bridge Column Testing for Seismic Performance Verification, SEWC, Oct. 2002

[一般講演]

道路橋の疲労と対策技術

構造物研究グループ上席研究員（橋梁構造） 村越 潤

目 次

1. はじめに	21
2. 鋼部材の疲労	21
2. 1 疲労とは	21
2. 1 溶接継手の疲労強度と疲労損傷度	22
3. 疲労損傷事例と損傷原因	23
3. 1 疲労損傷事例	23
3. 2 損傷原因	23
3. 3 疲労損傷と架設時期との関係	26
4. 疲労損傷への対策技術	27
4. 1 損傷発見後の対応	27
4. 2 補修補強対策	29
4. 3 対策事例	33
5. おわりに～対策技術の方向性	34
参考文献	35

道路橋の疲労と対策技術

構造物研究グループ橋梁構造チーム 上席研究員 村越 潤

1. はじめに

過去に建設された構造物の老朽化が進む中で、構造物に生じる劣化損傷を早期に発見し、適切に維持管理していくための点検、診断、補修補強技術が求められている。鋼道路橋に見られる主な劣化損傷としては腐食、疲労等が挙げられるが、疲労に関しては発生メカニズムについて未解明の部分もあり、各橋梁の構造条件等により対処方法が異なる場合もあることから、事例を踏まえた知見の蓄積が重要である。

我が国の鋼道路橋において疲労が顕在化し始めたのは1980年頃からであるが、これまで関係機関において対策技術に関する各種調査研究が行われている。旧土木研究所（現国土技術政策総合研究所、土木研究所）においても各種の損傷・対策事例に関わり、その成果は疲労に対する基本的知識、点検方法、損傷発見後の対応、補修補強方法を取りまとめた「鋼橋の疲労」（（社）日本道路協会、平成9年5月）³⁾等に反映され、同書は道路管理者や橋梁技術者の疲労に対する参考資料として役立てられている。疲労損傷については、最近では鋼製橋脚の隅角部に亀裂が発見されるなど依然として報告されており、鋼道路橋の維持管理において対処すべき重要な課題の一つとなっている。

本文では、鋼部材の疲労について概説した後、これまでに報告されている既設鋼道路橋の損傷事例と補修補強対策技術について紹介するとともに、今後重要と考えられる対策技術の方向性について述べる。

2. 鋼部材の疲労

2. 1 疲労とは

疲労とは、応力が繰返し作用することにより、構造物あるいは部材内の応力集中部から亀裂が発生し、それが進展していく現象であり、一般に外力とその繰返し回数の関係で表現することができる。後述するが、溶接継手試験体に対して一定振幅の応力下で繰返し载荷すると、両対数紙上において一般に右下がりの直線の傾向を示す。右下がりの直線は、破断寿命 N が応力範囲 $\Delta\sigma$ のべき乗（3～4乗程度）と反比例の関係にあり、外力の大きさが寿命に大きく影響を与えることを表している。この直線は $S-N$ 線または疲労寿命曲線と呼ばれ、各繰返し回数に対する疲労強度を表す。

このような鋼材の疲労強度は、実際の構造物のように鋼材表面に切欠きや溶接ビード等の形状が急変する応力集中部が存在すると、鋼素材としての疲労強度に対して極端に低下する。図-2.1.1は、溶接継手部の応力集中の影響を示したものであるが、亀裂の起点となる溶接止端部に作用する応力は、公称応力と比べて、①継手全体の力の流

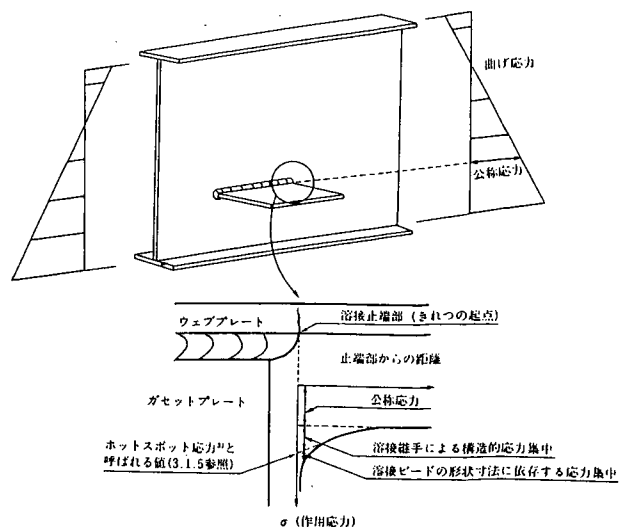


図-2.1.1 溶接継手部の応力集中の影響

れの不連続性に起因する構造的な応力集中と、②溶接部分のごく近傍の溶接ビード形状に起因する局部的な応力集中の影響を受けて高くなる。疲労の場合にはこのような局部的な応力の繰返しが支配的であり、部材の断面積に基づいた静的な強度の評価が意味をなさない場合があることに注意する必要がある。

2. 2 溶接継手の疲労強度と疲労損傷度

溶接継手の疲労強度は、継手形式毎に作用応力範囲 S_r と継手の疲労寿命 N_f を用いて、一般に次式で整理される。

$$S_r^m \cdot N_f = C \quad \cdots \cdots (2.1)$$

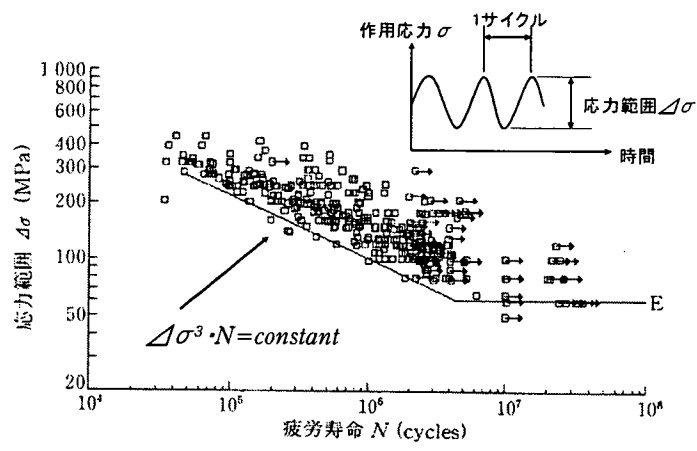
(C : 継手形式毎に一定)

図－2.2.1 は、溶接継手試験体（非仕上げのすみ肉溶接継手）に一定振幅の引張応力を繰返し作用させた場合の応力範囲と破断に至るまでの回数（疲労寿命）を両対数紙上に整理したものであり、図中の線はこの継手の疲労設計曲線⁴⁾を示したものである。鋼構造物の溶接継手の疲労設計では $m = 3$ として与えられている。

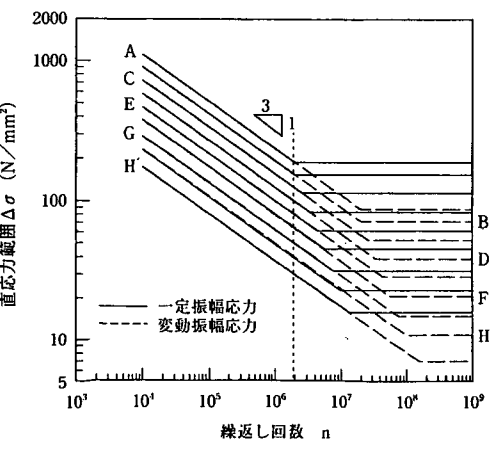
昨年 12 月に改訂された道路橋示方書⁵⁾では、鋼部材の疲労に対する扱いが見直

されたが、それに併せて疲労設計の基本的な考え方や具体の照査方法の例などをとりまとめた「鋼道路橋の疲労設計指針」（社）日本道路協会、平成 14 年 3 月⁵⁾が発刊されている。図－2.2.2 に継手の区分等級に対する疲労設計曲線と溶接継手の疲労強度等級例を示すが、これら疲労強度等級は損傷への対策を検討する上でも基本となるものである。

さて、交通供用下では活荷重等による外力が繰返し作用するが、こうした変動応力下での疲労の影響の評価には、一般に線形累積被害則による評価方法が用いられる。これは部材の作用応力範囲 $S_{r,i}$ に対



図－2.2.1 溶接継手の疲労試験結果と疲労設計曲線⁴⁾



継手の種類		強度等級 $\Delta\sigma_f$ (N/mm^2)	備考
横突合せ溶接継手	止端仕上げ	D (100)	
	非仕上げ	E (80)	
荷重非伝達型十字溶接継手	止端仕上げ	D (100)	
	非仕上げ	E (80)	
	止端破壊	E (80)	
	非仕上げ	F (65)	
荷重伝達型十字溶接継手	すみ肉溶接および部分溶込みすみ肉溶接	ルート破壊 (のど断面)	
		H (40)	
面外ガセット継手	ガセットをすみ肉溶接あるいは完全溶込み開先溶接した継手 ($l \leq 100mm$)	非仕上げ	
		F (65)	
その他の溶接継手	ガセットをすみ肉溶接した継手 ($l > 100mm$)	G (50)	
	カバープレートをすみ肉溶接で取付けた継手 ($l \leq 300mm$)	F (65)	

図－2.2.2 継手の区分等級に対する疲労設計曲線と溶接継手の疲労強度等級の例⁵⁾

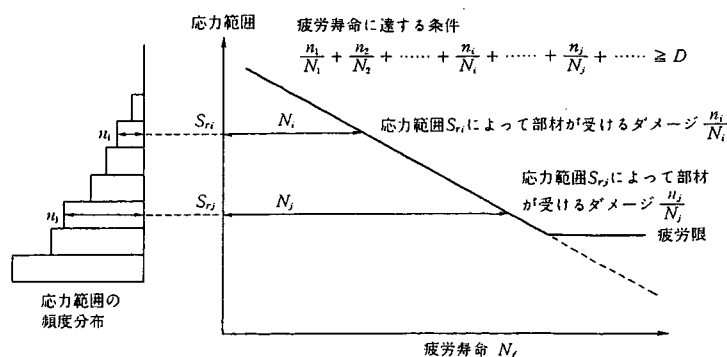
して N_i 回で部材に疲労損傷が生じる場合、応力範囲 S_{ri} の応力範囲1回の繰返しによる疲労損傷の程度を $1/N_i$ とし、変動応力下ではその和がある値 D （一般には、 $D=1$ ）に達した時に疲労損傷が生じると考えるものである（図-2.2.3）。

疲労寿命に達する条件

$$\sum n_i / N_i \geq D \quad \cdots \cdots (2.2)$$

対象とする箇所に作用する応力範囲の頻度分布が得られれば、上式を適用することにより疲労寿命を概略推定することができる。ただし、変動応力下では疲労限よ

り小さい応力範囲も損傷に寄与するため、その影響を考慮するための各種方法が提案されている。実務的には疲労限以下まで $S-N$ 線を延長した形で作用するすべての応力範囲を考慮する方法（修正マイナー則）や、疲労限以下の応力範囲の影響を一定の応力範囲まで考慮（変動応力に対する打ち切り限界を考慮）する方法等があげられる。また、溶接継手の疲労強度や寿命予測には破壊力学を用いた疲労亀裂進展解析が有効とされている。この方法は、亀裂に対する応力拡大係数範囲 ΔK を求め、それを亀裂進展速度との関係式に代入することにより亀裂の進展をシミュレートし、初期亀裂長から限界亀裂長に至るまでの疲労寿命を推定するものである。なお、亀裂が目視で観察できる長さに部材表面に現れるまでの期間は、応力集中の程度によって異なるが、時間軸で見ると疲労寿命の終盤であることが多い。



(注) 修正マイナー則の場合には、疲労限以下の応力範囲の影響も破線のとおりに考慮する。

図-2.2.3 線形累積被害則の考え方³⁾

3 疲労損傷事例と損傷原因

3.1 疲労損傷事例

表-3.1.1に、鋼道路橋においてこれまで報告されている損傷事例を示す。また、図-3.1.1～3.1.3に主な損傷事例を示す。このうち桁端部（桁端、ヒンジ部の切欠き構造およびソールプレート溶接部）の亀裂のように、進展すると主げた、主構の破断に直接つながるおそれのある損傷については特に注意が必要である。鋼床版については、これまで比較的報告事例は少なかったが、活荷重の影響を受けやすい構造であることや、普及し始めたのが昭和40年代後半頃からであり、供用年数を踏まえると、今後、亀裂発生の可能性のある部位を意識した点検を行っていく必要があると考えられる^{6), 7)}。

3.2 損傷原因

疲労損傷への対策を決める上で、まず損傷原因を究明することが必要となる。ここでは、疲労損傷につながる要因の観点から、外力の要因と部材に生じる応力を大きくする設計、製作及び維持管理上の要因により分類してみる。

①荷重要因

- ・活荷重の繰返し载荷
- ・予想していない振動現象（風による部材の振動等）

②設計上の要因

- ・構造的な応力集中を引き起こす不適切な構造ディテールの採用
- ・設計上のモデル化と実際の構造物の挙動との相違に起因する二次応力の発生

③製作上の要因

- ・製作誤差（ルートギャップ等）や溶接品質の不良（われ等の欠陥、形状不良、のど厚不足等）に伴う応力集中

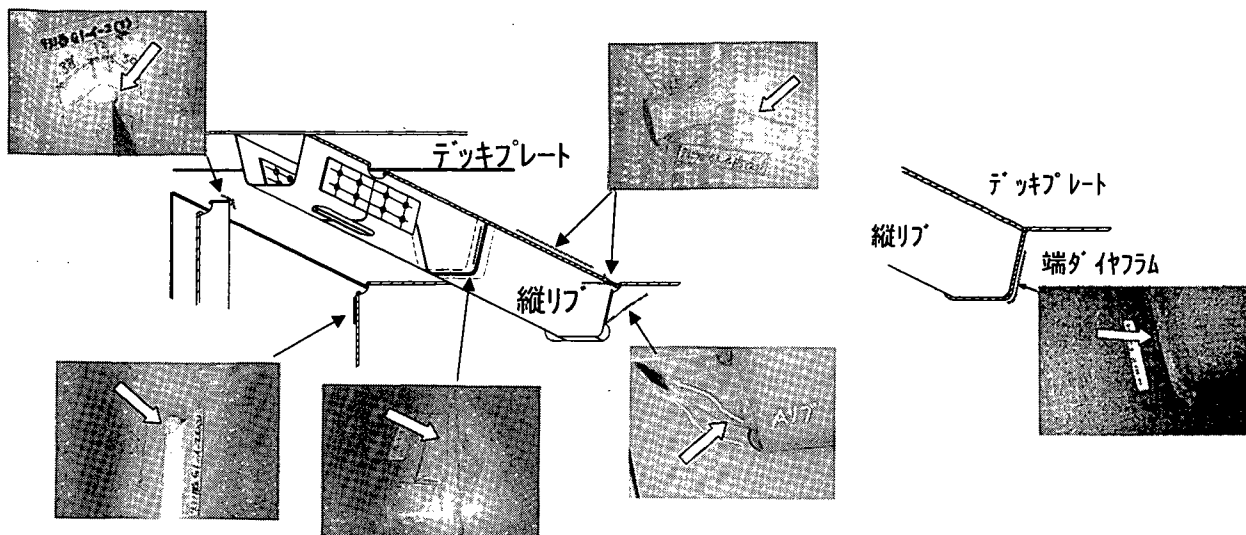
④維持管理上の要因

- ・不十分な維持管理による部材の腐食（断面減少による応力の増加や集中の原因となる）
- ・支承部の腐食や摩耗による機能不全（繰返し拘束応力が生じる）等

疲労損傷の原因は直接的には応力の集中と繰返し作用であるが、近年、鋼製橋脚の隅角部等様々な部位で疲労亀裂の発生が報告されている背景には飛躍的に増加した重交通によるダメージの蓄積が考えられる。構造条件が同じであれば、大型車交通量が多く、かつ長期間供用されている橋梁ほど疲労損傷度は大きくなる。自動車荷重によるダメージは、概ね応力範囲の3乗および繰返し数の1乗で効いてくる。例えば、作用応力範囲が2倍になると疲労寿命は1/8に縮まることになる。また、設計上の要因に関して、既存の疲労亀裂の大部分は橋梁の二次的な部材や構造ディテールに発生している。

表－ 3.1.1 既存の疲労損傷の事例

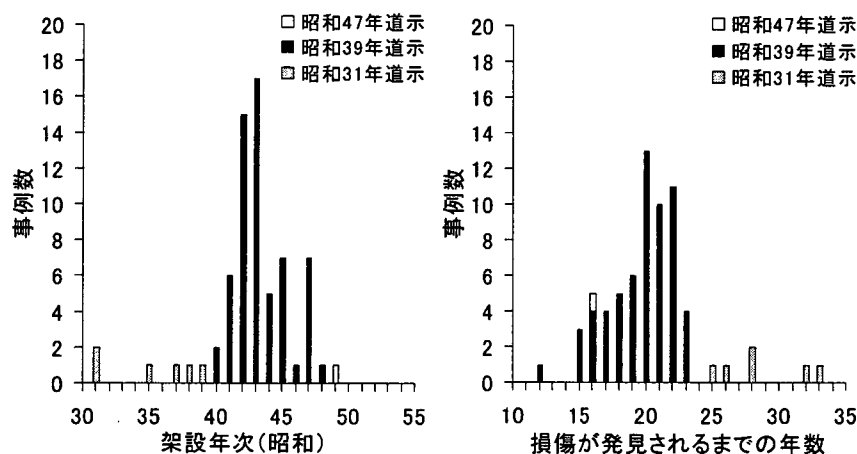
形 式		着 目 部 位	損 傷 箇 所	
I げた 箱げた (RC床版)	I げた	主げた端部	(1) 下フランジと切り欠いたウェブとの溶接部	
		横構ガセットプレート	(2) 横構ガセットプレート取付部	
		垂直補剛材, 対傾構ガセット, 横げた端部	(3) 対傾構, 横げたの取付け垂直補剛材上端溶接部 対傾構弦材取付けガセットの溶接部, 横げた端部 リベット孔部, 横げたフランジの貫通部	
		端横げた端部	(4) 端横げたの端部, 支点上垂直補剛材の上下端溶接部	
		枝げた	(5) 主桁との溶接部, 横げたとの連結部 (リベット孔)	
		下フランジ板継ぎ部	(6) 下フランジ板継ぎ部の突合せ溶接部	
アーチ・ トラス	上路アーチ	垂直材端部	(7) 垂直材の上下端の接合部	
		補剛げた端部	(8) 端支柱上の補剛げたの端部	
	中路アーチ	アーチリブウェブ	(9) アーチリブウェブと横げた接合部	
	下路アーチ	吊材	(10) 吊材の上下端の接合部	
	共通 (床 組)	横げた, 端横げた端部	(11) 横げたの端部 (横げたウェブ面内力に起因) (12) 端横げたおよび横げたの端部 (横げたウェブ面外力に起因)	
		縦げた端部	(13) 縦げた, 補強縦げた端部	
		端横げた	(14) 端横げたウェブと縦げたの接合部 (横げたウェブ面外力に起因)	
鋼床版橋	鋼床版	縦リブ	(15) 縦リブ (Uリブ) 同士の突合せ溶接部 (16) デッキプレートと縦リブ (Uリブ) の溶接部 (17) 端横リブ, ダイヤフラムと縦リブの端部のすみ肉溶接部 支点上ダイヤフラム垂直補剛材と縦リブの溶接部	
		横リブ	(18) 横リブウェブと縦リブとの交差部 (19) デッキプレートとの溶接部 (現場継手部による切欠き部)	
		垂直補剛材上端部	(20) デッキプレートと垂直補剛材との溶接部	
		箱げた部	ダイヤフラム等隅角部	(21) ダイヤフラム隅角部の溶接部 横リブと垂直補剛材, ガセットの溶接部
			コーナプレート (下フランジ側)	(22) コーナプレートと下フランジ, ダイヤフラムの溶接部
	支 承 部		ソールプレート	(23) 支承ソールプレートの溶接部
	ゲルバーヒンジ部		円弧状フランジを有するゲルバー ヒンジ	(24) 下フランジと切り欠いたウェブとの溶接部 I 断面 (I げた, 上路アーチ側径間), 箱断面 (トラス)
鋼製橋脚		隅角部	(25) 柱とはりの溶接部	
吊 橋		ハンガー定着部材	(26) ハンガーを補剛げたに定着する吊ボルト	
付属物	標識柱	標識柱とその取付け部	(27) 箱げたウェブと標識柱基部および柱分岐部の溶接部	
	吊金具	吊金具の取付け部	(28) I げた橋外げた吊金具取付け溶接部	



図－ 3.1.3 鋼床版の損傷事例⁷⁾

3. 3 疲労損傷と架設時期との関係

図－ 3.3.1 は、I 桁橋の主げたと横げたの接合部の疲労損傷の報告事例について、事例数と架設年次、供用年数および適用示方書の関係を示したものである。昭和 40 年代前半につくられた橋梁の損傷事例が多く、供用年数でみると約 20 年程度で損傷が発見されている橋梁が多い傾向にある。また、適用基準をみると昭和 39 年道示で設計された橋梁が多い。疲労損傷は応力の繰返し数に影響される経時的な損傷であることから、古い基準で設計された供用年数の長い橋梁に損傷が多く発生したことが考えられるが、以下に当時の技術基準の変遷を踏まえて若干の考察を加える。



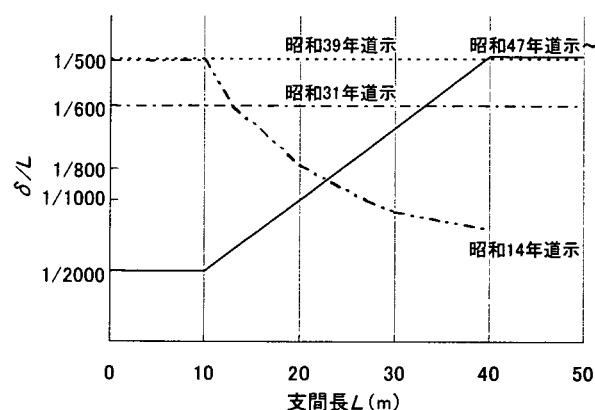
図－ 3.3.1 損傷橋梁の架設年次、供用年数の関係

(主げたと横げたの接合部の疲労損傷を対象)

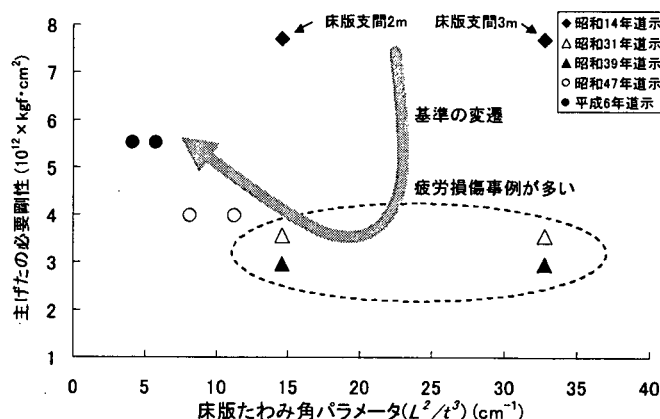
図－ 3.3.2 に道路橋示方書における活荷重たわみ許容値について、プレートガーダー形式を例に整理した結果を示す。溶接構造の採用に加えて、50、60 キロ鋼の導入に伴い、本体の軽量化が図られ、併せてたわみに関する許容値が昭和 39 年道示において緩和された。この結果、昭和 39 年道示でつくられた橋については、相対的に活荷重応力度が高くなり、また橋全体の剛性が小さくなり、相対的にたわみやすい構造となっている。また、RC 床版については、昭和 39 年道示と現在のそれとを比較すると当時の設計の方が床版厚が小さく、剛性が小さい。このように橋全体の剛性が小さくたわみやすいと、活荷重に対して部材間の相対変位を増大させ、部材同士の接合部に応力や変形の集中を招くことが予想される。例えば、プレートガーダー橋の主桁と横桁の接合部の疲労損傷については、主桁上の床版たわみ角と主桁間のたわみ差の拘束に伴う二次応力が主要因と考えられている。図－ 3.3.3 は基準の変遷による主桁と床版の剛性の相対的な変化を示したものである。ここでは床版支間長 2、3 m を例に、床版

の剛性を主桁上のたわみ回転角を表すパラメータ（ここでは床版を単純版とみなし、主桁上のたわみ角を表すパラメータとして L^2/t^3 (L : 床版支間, t : 床版厚) を指す。) と主桁の剛性（ここでは支間 30 m の 1 主桁に 1 車線分の設計活荷重を載荷した場合にたわみ規定を満たすために必要な主桁剛性を指す。）の関係を示しているが、こうした傾向も当時の設計基準で設計された橋梁に損傷が見られる理由の一つと推測される。

また、昭和 30 年代後半頃より、従来のリベット構造に代わり溶接構造が普及してきたが、当時は溶接構造の採用の初期の頃であり、疲労耐久性の観点から材料、溶接技術の面で現在とは相違があったものと考えられる。



図－ 3.3.2 道路橋示方書における活荷重たわみの許容値の変遷³⁾



図－ 3.3.3 鋼 I 桁橋における床版と主桁の必要剛性の変遷

4. 疲労損傷への対策技術

4.1 損傷発見後の対応

点検等によって疲労亀裂を発見した後の対応については、疲労亀裂の発生部位や進展状況に応じて、個別に対策を講じているのが実情である。図－ 4.1.1 に対応の流れを示すが、まず、亀裂がどのような部位にどの程度進展しているのか状況を把握することが対策の出発点となる。早期に疲労亀裂を見つけるためには、亀裂発生の可能性のある部位を既存の事例等により認識した上で、各部材に近接して点検することが重要である。疲労亀裂と疑われる兆候が発見された場合、亀裂の進展状況を把握し、損傷原因を推定するための詳細な調査を行うこととなる。詳細調査には、目視を主体とした損傷状況の調査と応力測定や解析などによる損傷原因の調査がある。

(1) 亀裂の調査

塗膜上からの目視観察は、亀裂の長さなどにある程度の誤差を伴うが、疲労損傷の初期調査としては十分役立つ情報が得られる。塗膜上の目視では亀裂が単なる塗膜われかの判断が難しい場合や、亀裂先端を正確に計測する必要がある場合（たとえば、亀裂の進展長の監視や、亀裂除去のために亀裂先端を正確にとらえる必要がある場合）には、磁粉探傷、超音波探傷等の方法が用いられている。浸透探傷は溶接われの確認には適しているが、シャープでほとんど開口していない疲労亀裂に対しては精度的には劣るので、極力磁粉探傷を行うのがよい。文献 8) では溶接止端部に発生した亀裂について各種非破壊試験の適用性を検討しているが、これによれば塗膜上からの目視検査では 4.0mm 以上、塗膜除去後では浸透探傷試験では 8.0mm 以上、磁粉探傷試験では 2.0mm 以上であり、磁粉探傷試験が亀裂検出には最も優れているとしている。

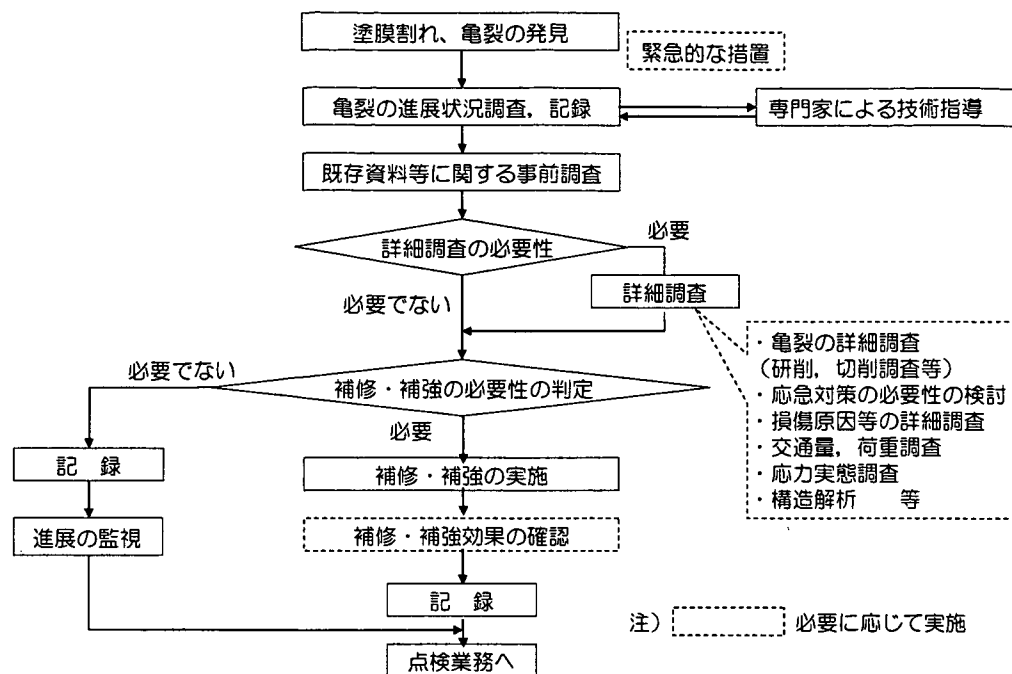


図-4.1.1 疲労損傷への対応の流れ

(2) 損傷原因の調査

損傷原因の調査としては以下の項目があげられる。

① 応力測定

- ・ 橋梁各部位の挙動測定
(荷重車載荷試験等)
- ・ 応力頻度測定

② 変位・変形の測定

③ 活荷重の調査

応力測定は、ひずみゲージを用いて橋梁部材に作用する応力変動やその頻度を把握するための直接的な方法であり、疲労損傷の原因の推定、補修補強対策の検討に有効な手段であり、a) 活荷重に対する橋梁の各部位の挙動を把握することを目的とする場合と、b) 損傷部位の応力頻度を測定することにより、疲労ダメージを推定することを目的とする場合に分けられる。前者については損傷の直

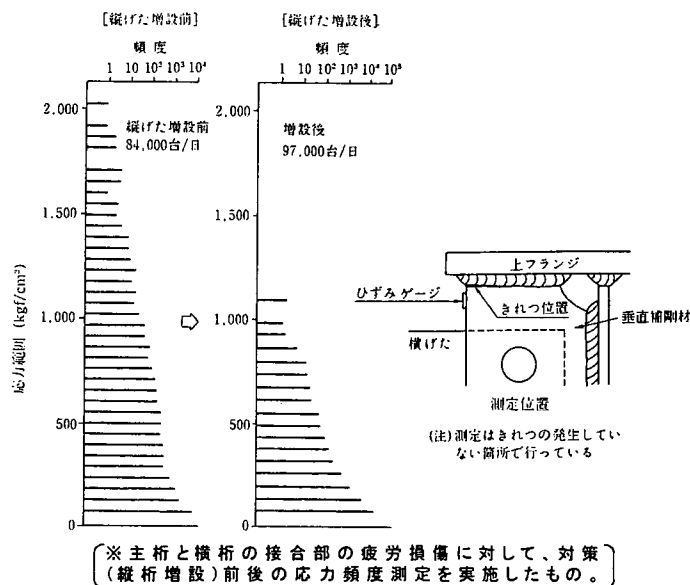
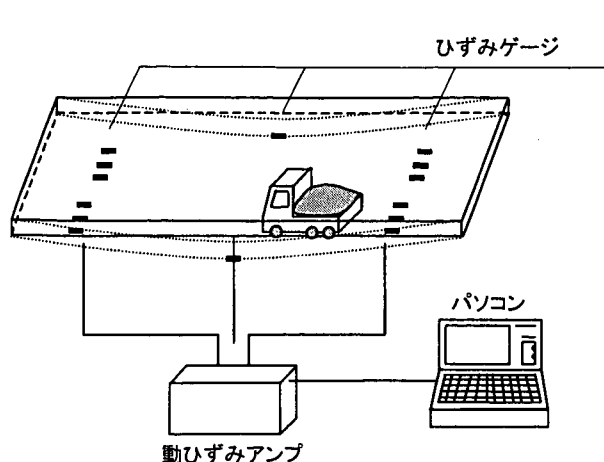
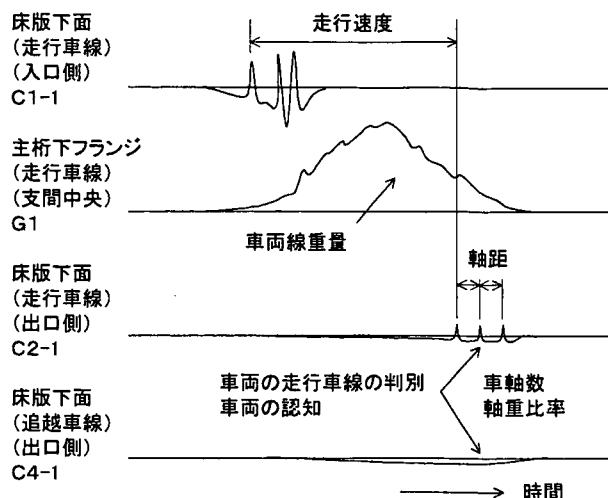


図-4.1.2 応力頻度測定による補強対策効果の計測例³⁾

接の要因となる車両走行に伴う応力変動の成分がわかる。後者については損傷部位の応力状態が疲労耐久性の面から厳しいか否かの相対的な評価に有効である（図-4.1.2 参照）。また、主桁支間中央下フランジ側の応力を併せて測定し、これまでの既設橋の測定結果と相対比較をすることにより、その橋の置かれている疲労環境の厳しさをすることも可能である。大型車の荷重実態を把握することも疲労対策を検討する上で有用な情報を与える。橋梁をはかりに見立て走行中の車両重量を簡易に計測する方法（Bridge Weigh-in-Motion）も開発されている。手法の考え方は1970年代に米国において Moses によっ



(a) システム構成



(b) ひずみ応答による車両判別、重量解析ロジック

図－4.1.3 橋梁を利用した車両重量計測例¹⁰⁾

て提案⁹⁾されたものであるが、原理としては、車両通過時に橋梁部材（主桁、床版）に生じるひずみ応答の特性とその影響線を利用して逆解析により活荷重を推定するものである（図－4.1.3）。現在、国土技術政策総合研究所においてシステム開発が進められており、比較的精度良く車両重量を計測することが可能であるとしている¹¹⁾。

4.2 補修補強対策

(1) 損傷原因から見た対策上の留意点

対策検討に当たっては、損傷の原因を明らかにし、その原因を除去できる方法を選択することが重要である。以下に損傷原因から見た対策上の留意点について述べる。

1) 不適切な構造ディテールの採用あるいは二次応力の発生が原因である損傷

各種損傷事例の中でも、構造ディテールに固有な応力集中が原因で損傷の生じた事例、あるいは設計仮定と実構造との違いや実橋の立体挙動により、部材接合部に設計上考慮されない二次応力・変形が作用し損傷の発生した事例は多い。このような損傷に対して、構造ディテールを改善し、損傷の原因となる応力・変形の発生を低減する必要がある。損傷局所にとらわれ、亀裂の除去と再溶接といった溶接補修のみにより対策を講じた場合には、根本的な原因除去とならないだけでなく解放された応力・変形が再び生じ亀裂が再発生することもある。

構造上の制約から構造ディテールの改善が難しい場合、あるいはそのような対策では応力・変形の低減が十分に期待できない場合には、橋梁全体の剛性を高める等の対策を検討することが必要となる。

2) 製作時の溶接品質が原因である損傷

一般に、製作時の溶接われ、融合不良等の溶接欠陥から生じた疲労亀裂については、部材表面で亀裂が確認された段階では、内部で大きく進展していることが多い。また、このような製作時の初期欠陥については、同一条件に従って製作された部位に同様の欠陥が生じている場合もあるので、外観上、亀裂が確認されなかった同一施工部位についても亀裂あるいは欠陥の有無を確認することが望ましい。

また、道路橋では部材の集成のために溶接継手が多用されるが、溶接止端部、あるいはルート部には局所的な応力の集中が生じやすく、それが著しい場合には損傷の直接的な原因となることがある。この

ような損傷に対しては、継手形式の変更（完全溶込み溶接化）、あるいは止端部の局所的な形状改善により応力の集中を除去、緩和することが第一の対策となる。

(2)対策技術

疲労損傷に対する対策としては、損傷部位について、①疲労強度を改善するか、②作用する応力範囲を小さくすることの2点が対応の基本といえる。これをS-N線図上で説明したものが図-4.2.1である。たとえば、ある継手に対して、応力範囲 S_{r0} が N_{r0} 回繰返される場合

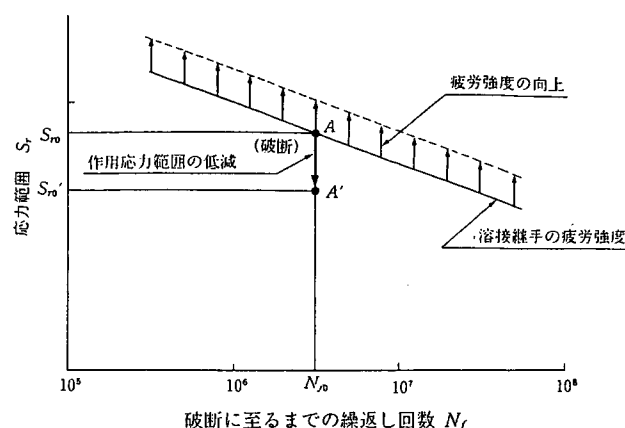


図-4.2.1 作用応力範囲の低減と疲労強度の向上³⁾

(点A)、溶接継手が破断しないようにするには外力の低減あるいは補修補強により作用応力範囲(外力側)を下げるか(点Aを点A'に移動)、あるいは溶接継手の疲労強度(抵抗側)を高くするという2つの対応が考えられる。

疲労損傷に対する具体的な対策方法を大別すると以下ようになる。

a) 亀裂そのものへの対策

- ①ストップホールによる亀裂の進展防止対策
- ②亀裂の溶接補修
- ③添接板による亀裂進展部分の補修

b) 損傷部位の応力軽減または疲労強度改善対策

- ④溶接継手の疲労強度の改善
- ⑤部材接合部の構造ディテールの改良（添接板による剛性向上等）
- ⑥橋梁全体構造の改良

これらの方法は単独で用いられるというより、むしろ損傷の状況あるいは考えられる種々の損傷原因に応じて適宜併用される場合が多い。その際の考え方の基本は、既に進展している亀裂そのものへの対策と損傷部の応力軽減あるいは疲労強度改善を組み合わせた対策である。

①の方法は、亀裂先端部にストップホールと呼ばれる孔をあけ、亀裂先端の応力集中部を除去するものである(図-4.2.2)。亀裂が短い場合には進展を一時的に遅くしたり、応力状態によっては亀裂を停止させることができる。また、亀裂が長い場合には、亀裂の急激な進展による脆性破壊への移行を一時的に停止する効果が期待できる。実際には、他の恒久的な対策と併用して、より補修補強効果を高めることを目的とする場合や補修補強対策の立案のために時間を確保することが必要である場合の応急的な対策として用いられる場合が多い。なお、溶接線が交差し板組が複雑な構造部位やすみ肉溶接のルート部先端から発生している亀裂の場合には亀裂先端位置を見誤らないよう施工に注意する必

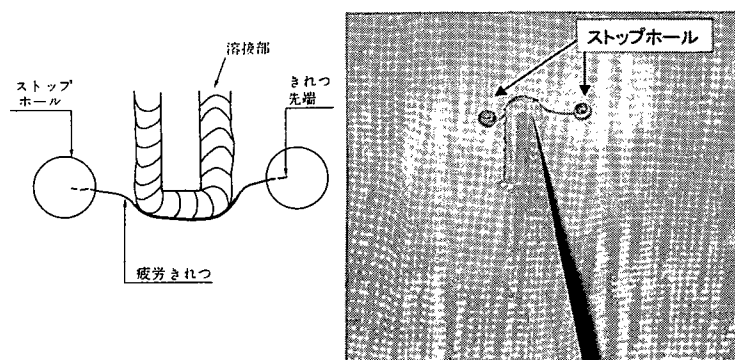


図-4.2.2 ストップホールによる亀裂先端の除去

要がある。

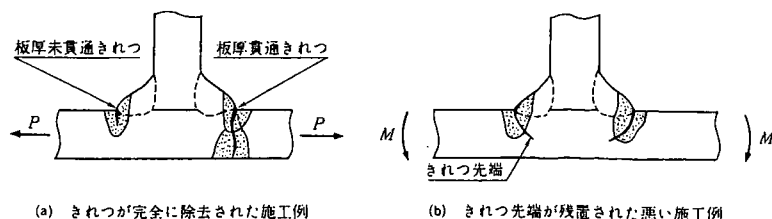
②の方法は、軽微な亀裂をグラインダー、ガウジング等で除去した後に再溶接することで損傷部を補修する方法である（図－4.2.3）。この方法は、損傷の原因が部材中に残された溶接欠陥や工作傷などによるもので、溶接補修によりこれらの原因の除去が可能である場合についてのみ亀裂の再発防止に対して有効な方法と言える。構造ディテールによる局部的な応力集中や変形の発生が主原因であるような損傷に対しては、この方法のみでは不十分であり、④以降の対策との併用が必要となる。また、溶接補修に際しては既設橋の鋼部材の溶接性や供用下での現場溶接という制約条件について十分配慮する必要がある。

③の方法は、亀裂発生部に添接板を接合し亀裂部分を閉じ合せるとともに、亀裂の進展に伴う断面欠損を補うものである。

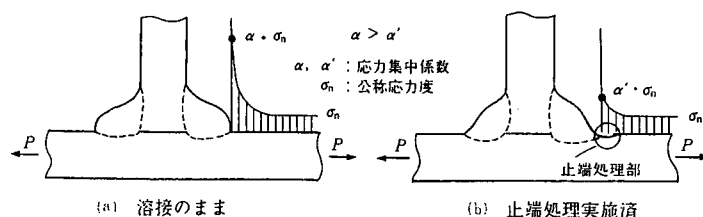
この方法は、亀裂がすでに大きく進展している場合の補修として用いられることが多い。添接板の接合方法としては、高力ボルトによる摩擦接合とすみ肉溶接による方法とがある。すみ肉溶接による接合についてはすみ肉溶接部が新たな弱点となるおそれがあることから、可能な限り疲労強度の高い高力ボルト接合を用いるのが良い。この方法による場合でもシャープな疲労亀裂の先端は出来る限り残さずに除去することが基本と考えられる。

④の方法は、溶接部のビード形状を改良することにより継手の疲労強度を向上させるものである（図－4.2.4 (a)）。形状を滑らかにする方法としては、グラインダーにより切削加工する方法やTIG処理（特殊な溶接により止端部を再溶融し形状を滑らかにする方法）等がある。TIG処理については既存溶接部を再溶融することから、亀裂がまだ小さくその深さが浅い場合には、亀裂を溶かし込むことも可能である。また、すみ肉溶接のルート部から発生した亀裂に関しては、ルート部先端での応力集中を除去し、亀裂の発生点をなくすように完全溶込み溶接（図－4.2.4 (b)）を行うことが必要である。このような溶接継手形式の変更も疲労強度を改善する対策の1つである。

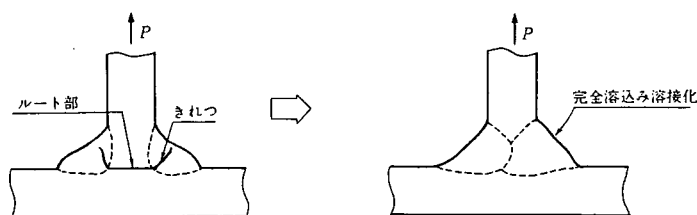
⑤の対策は、損傷の発生した部材接合部あるいは構造細部を対象に、局部的な応力・変形状を改善するものである。一般的な考え方として、応力の伝達がスムーズとなるように構造ディテールを改良する、添接板やリブなどの補強材の添加により接合部の剛性を高め発生する応力、変形を低減させる対策がある（図－4.2.5, 4.2.6）。また、逆に、接合部における変形に対する拘束を解放して二次応力の発生を低減させる方法もある。こうした対策も個別の橋梁の構造ディテールや施工のための作業空間の確保、交通供用下の施工可能性等の対策選定上の制約条件に依存する。例えば、支承部の疲労亀裂に対す



図－4.2.3 溶接継手における補修溶接



(a) 溶接止端形状の改善効果

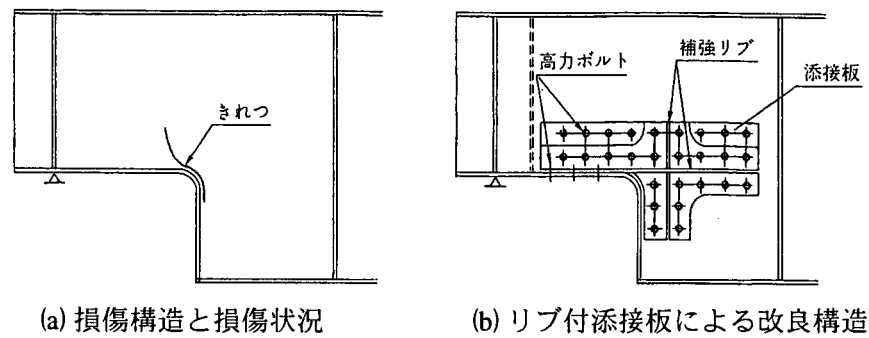


(b) ルート亀裂の発生防止対策

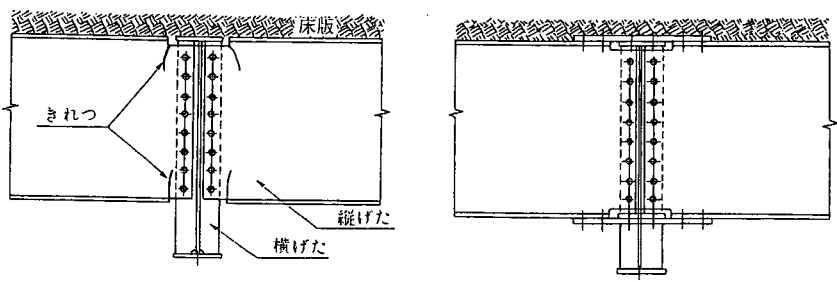
図－4.2.4 溶接継手の疲労強度向上方法³⁾

る補修補強方法を整理すると表－4.2.1に示すとおりであり、どの方法を選択するかは損傷原因を踏まえ、補修補強効果の確実性や施工性の面から検討することとなる。

さらに、このような構造ディテールの局所的な改良では十分な効果が得られない場合の対処として、⑥の橋梁の全体構造を改良し部材に発生する応力自体や部材間の相対的な変位を低減させる対策が採られる場合もある。



図－4.2.5 桁端切欠き部の改良例³⁾

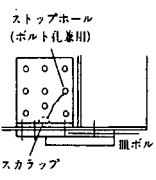
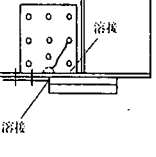


図－4.2.6 縦げたと横げた接合部の改良例³⁾

(3) 対策後の効果確認

実施した補修補強対策がどれだけ有効であったか確認するには、施工後早い時期において変状が生じる場合を除いては、かなりの時間を要する。補修補強対策を決定するための実験や解析的検討に関しては、ある種のモデル化の仮定

表－4.2.1 支承ソールプレートの疲労損傷に対する補修補強方法^{3) 12)}

施工条件 ○：可能 ×：不可	きれつの補修対策	補 強 対 策		補修補強方法の概要	補強効果の確実性
		ソールプレートと下フランジのきれつ部分	ウェブのきれつ部分		
支承取替え ○ ソールプレート取替え ○	フランジ： 溶接による埋戻し ウェブ： 下フランジとの境界にスカ ラップ、きれつはストップ ホール+高力ボルト締めま たは溶接による埋戻し	大きめのソールプレート に取替えて、きれつ部分 を高力ボルト連結	補強板を当てて、きれつ 部分を高力ボルト連結 (下フランジとウェブと 一体化させた型の補強 材を用いるのが良い)	ストップホール (ボルト化兼用)  高力ボルト スカラップ	◎ ○
支承取替え × ソールプレート取替え ×	フランジ： 溶接による埋戻し ウェブ： 下フランジとの境界にスカ ラップ、きれつはストップ ホール+高力ボルト締めま たは溶接による埋戻し	ソールプレート前面に補 強板を高力ボルトにて連 結する。 ソールプレートと補強板 は溶接にて連結する。	補強板を当てて、きれつ 部分を高力ボルト連結 (補強板は下フランジと 一体化させるのが望まし い)	 溶接 溶接	△

◎：良、○：可、△：要検討

れ、仮定内容によっては実際の挙動を的確に再現しているとは言えない場合もある。したがって、補修補強に際しては、①必要に応じて補強前後において応力測定等を実施し、損傷の原因となった作用応力が補強によりどの程度低減されているか等を確認する、②補修補強を行った箇所について、追跡調査を定期的に実施し損傷再発の有無を監視する、また、併せて補修補強箇所の周辺部において新たな損傷の発生の有無を確認する等の配慮が必要である。

4.3 対策事例

以下に、疲労亀裂の調査から原因究明、応急・恒久対策に至るまでの一連の対策検討が行われた最近の2事例について参考を示す。

(1)アーチ橋の損傷事例¹³⁾

1966年に供用が開始された橋長106.6m(9.45+83.0+12.45m)の上路式鋼アーチ橋の事例である。1992年に端柱上の伸縮装置に40mm程度の段差が見られたため、その直下の主桁を調査した結果、端柱上の補剛桁ゲルバーヒンジ部の切欠き部ウェブに大きな亀裂が発見された(図-4.2.7(b))。また、アーチクラウン周辺の円柱垂直材の上下端部にも亀裂が発見された。

損傷発見後、7年間にわたって、架替え案を含め種々のケースに対する検討が行われ、応力計測等により対策効果を確認しながら段階的に補修補強対策が実施されている。以下に対策の経過を示す。

1992年 損傷直後、緊急対策として仮バントの設置及び現場溶接による補強部材取り付け

↓ 詳細検討

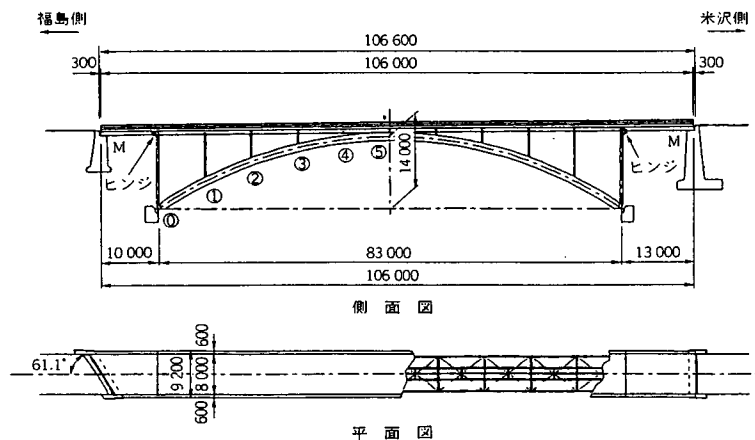
1994年 ゲルバーヒンジ部及び垂直補剛材部の交換、補強

↓ 応力計測による効果確認(ヒンジ部の推定疲労寿命が短い→抜本的な対策検討)

1999年 ゲルバーヒンジ部の交換、桁連続化(図-4.2.7(c))

↓ 応力計測による効果確認(垂直材下端部の補強効果が見られず→追加的な対策検討)

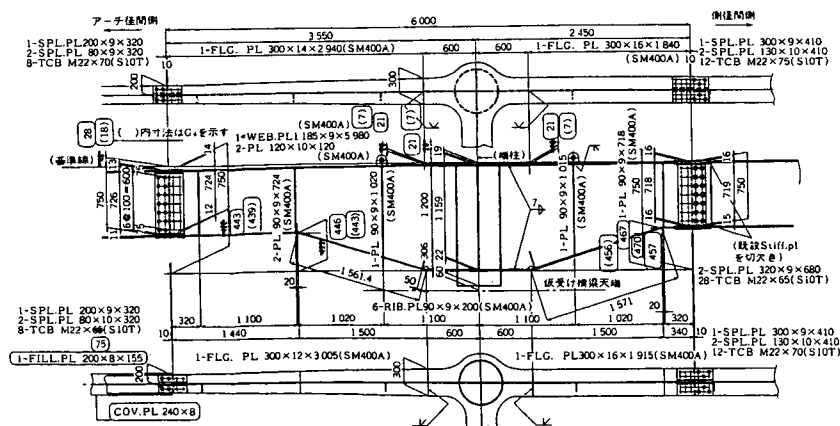
2000年 斜材増設工事(図-4.2.7(d))



(a) 橋梁の概要



(b) ゲルバーヒンジ部の損傷状況



(c) ゲルバーヒンジ部の連続化



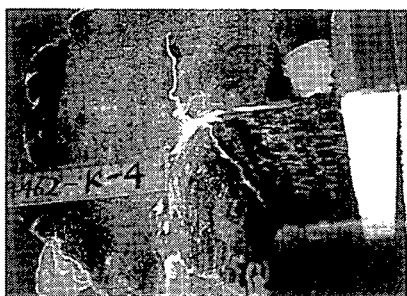
(d) 斜材増設

図-4.2.7 鋼アーチにおける疲労損傷事例と補修補強対策¹³⁾

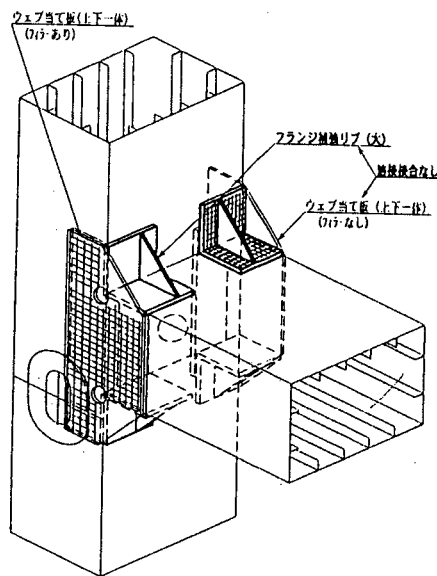
(2) 鋼製橋脚の損傷事例¹⁴⁾

[illegible]

(a) 損傷の発生部位



(b) 隅角部に発生した亀裂



(c) 補強材に補修補強対策

図-4.2.8 鋼製橋脚における疲労損傷事例と補修補強対策¹⁴⁾

5. おわりに～対策技術の方向性

以上、疲労について概説するとともに、鋼道路橋における疲労損傷事例と対策技術の動向について述べた。実際に個別の事例に対する対策を検討する際には、損傷原因の特定や効果的な補修補強対策の選定に苦慮することが多い。今後も、損傷事例、対策事例及び対策効果に関する情報を数多く蓄積し分析することによって、損傷原因の調査、診断から補修補強に至るまでの一連の対応技術の体系化を図っていくことが必要であろう。

—34—

じた効果的で信頼性の高い局部及び全体構造の補強方法の検討や、補強効果を適切に評価するための解析手法（補強構造のモデル化、局部応力の評価手法等）の検討があげられる。その上で、現場施工の容易な標準的な補修補強方法を提案していくことが必要と考えられる。

また、損傷事例に対する対策検討から得られた知見、例えば疲労に配慮した構造ディテールや溶接品質向上のための製作方法等については、既設橋だけでなく新設橋の設計・施工に逐次フィードバックすることも重要である。

土木研究所では、こうした課題の解決に向けて疲労損傷への対策技術に関する調査研究に取り組むとともに、現場への適用等を通じて、道路橋の延命化、維持管理の効率化に貢献していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，1983.8
- 2) 土木学会鋼構造委員会鋼橋の余寿命評価小委員会：鋼構造シリーズ⑦鋼橋における劣化現象と損傷の評価，土木学会，1996.10
- 3) (社)日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.5
- 4) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.4
- 5) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3
- 6) 土木学会鋼構造委員会鋼床版の疲労小委員会：鋼構造シリーズ④鋼床版の疲労，土木学会，1990.9
- 7) 吉川直志，伊藤昇，大塚敬三，町田文孝，三木千壽：Uリブを用いた鋼床版の疲労損傷事例，土木学会第57回年次学術講演会概要集，I-277，pp.553-554，2002.9
- 8) 深沢誠，大畦久雄，加藤昌彦，三木千壽：非破壊試験による表面疲労き裂検出に及ぼす塗膜の影響，土木学会論文集，No.398/I-10，pp.395-404，1988.10
- 9) Moses, F.: Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges, ASCE, Vol.105, No.TE3, pp.233-249, 1979.
- 10) Murakoshi, J., Nishikawa, K. and Cheng, X.: Development of Bridge Weigh-In-Motion System, International Conference on Pavement and Bridge Management System, Beijing, China, 1998
- 11) 石尾真理，中谷昌一，玉越隆史，中洲啓太：影響線の重ね合わせを用いたWIMシステムについて，土木学会第57回年次学術講演会概要集，I-724，pp.1447-1448，2002.9
- 12) 西川和廣，村越潤，佐々木靖雄，広瀬隆宏：鋼桁支承ソールプレート溶接部の疲労に関する検討－損傷事例と補修・補強方法に関する調査結果－，土木技術資料36-1，1994.1
- 13) 西川和廣，松村英樹，大西亘，細井義弘：山神橋（疲労損傷を受けた上路式鋼アーチ）の補修・検討，橋梁と基礎，pp.180-186，2001.8
- 14) 首都高速道路公団 HP (<http://www.mex.go.jp/topics/kyoukyakuhosyu/index.html>)
- 15) 森河久，下里哲弘，三木千壽，市川篤司：箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.177-183，2002.4

[一般講演]

マルチテレメトリシステムを用いた河川事業による影響把握

水循環研究グループ上席研究員（河川生態） 尾澤 卓思

目 次

1. 河川環境研究の動向	37
1.1 はじめに	37
2. 河川環境調査技術の現状と今後求められる方向性	37
2.1 現時点での問題点	37
2.2 物理的に調査・計測が困難な場所での調査手法の不足から来るデータ不足	37
2.3 求められる情報と既存調査手法の精度のギャップ	38
2.4 調査コストの増大	38
2.5 新たな調査技術の必要性	38
3. 野生生物調査のためのマルチテレメトリシステムの開発とその応用	38
3.1 はじめに	38
3.2 テレメトリ調査の現状とマルチテレメトリシステムの開発	39
3.3 五ヶ瀬川支川北川におけるマルチテレメトリシステムの実証実験と哺乳類調査への適用性	40
3.4 本システムの実証と位置特定精度の検証	41
3.5 実際の野生生物行動形態調査への適用実験	44
3.6 今後の本システムの方向性	45
3.7 まとめ	47
4. 北川河川改修工事が野生生物の行動へ与える影響の把握	48
4.1 はじめに	48
4.2 調査と方法	48
4.3 結果と考察	52
4.4 まとめ	56
参考文献	56

マルチテレメトリシステムを用いた河川事業による影響把握

水循環研究グループ河川生態チーム上席研究員 尾澤 卓思

1. 河川環境研究の動向

1.1 はじめに

河川を含む水域生態系の保全は、今後の国土保全の中で重要な課題である。水域生態系について河川を例にとってみれば、河川環境研究の進展に伴い生態学、土木工学において新たな研究課題が根付いてきている。特に興味深いのは、河川の生態系保全機能の評価である。

辻本は、河川の生態系保全機能とは、河相(河川ごとの個性)が生態系をどのように支えているかで、河相が生息場(habitat)を提供状況、河相の様々な側面がどのように様々な生物種・群集に生息場として利用されるかを把握することが必要であると指摘している¹⁾。この概念、類似の概念は生態学、土木工学の分野において浸透し多くの研究がなされている。

生態学では、例えば、自然河川と河川改修が行われた河川の微生息空間(miocrohabitat)の多様性の違いが魚類の生息に影響を与えていることを指摘する研究が行われている²⁾。また、「空間生態学」という新たな研究も始まっている。中越は、個体群や群集の構造、機能及び動態・進化を空間を介して研究する空間生態学は、その研究成果として景観生態学に多大な貢献をし、資料の新鮮さ、貢献度の大きさを指摘している。³⁾⁴⁾

土木工学分野では PHBSIM(Physical Habitat Simulation)や HEP(Habitat Evaluation Procedure)等の物理的環境から生息空間評価を行うような研究が行われている。

実際の河川改修事業という視点では、「多自然型川づくり」として全国において治水利水に配慮しながら環境に配慮した川の整備や各種の環境護岸やせせらぎなどを整備する河川環境整備事業(河道整備)などの取り組みが進められている。また、最近では「自然再生事業」が推進されている。従来の河川環境整備事業の取り組みに加え流域からの物質流入システムや川の攪乱と更新のシステム、すなわち「川のシステム」の再生、健全化・一再自然化を図る事業が行われている。また、多自然型川づくり、自然再生型事業は、複雑で絶えず変化する生態系を対象とした事業であることから、生態系に関する事前の十分な調査を行い、事業着手後も自然環境の復元状況をモニタリングし、その結果に科学的な評価を加えた上で、それを事業にフィードバックするアダプティブマネジメントの手法を採用することの必要性が指摘されている。

このような現状から水域生態系保全を考え実現していくには、河川内の場合を野生動物が生息空間として利用するかを把握・評価する手法が今後必要になってくると考えられる。

2. 河川環境調査技術の現状と今後求められる方向性

2.1 現時点での問題点

1 章で述べたような、研究、事業等を行う上で新たな問題が生じる可能性がある。その問題とは、①物理的に調査・計測が困難な場所での調査手法の不足から来るデータ不足、②求められる情報と既存調査手法の精度のギャップ、③調査コストの増大等の問題が挙げられる。以下にその詳細について述べる。

2.2 物理的に調査・計測が困難な場所での調査手法の不足から来るデータ不足

野生動物の生態と生息空間を結びつける、また関連付ける研究を行う上で重要なデータは野生動物の行動を詳細に把握し、行動特性と生息空間利用を結びつけることが重要である。このデータにより、生活上、重要

なハビタットを把握し体系的に生息空間を保全することが可能になる。しかし、野生動物の行動を詳細に把握するには多くの困難が伴う。

例えば、大型野生動物の場合、その生息地は山間地等が多く、行動圏も広い。また、行動は昼間だけでなく夜間に多く移動する種も存在する。このような野生動物の行動を把握するのは困難で、多大な努力がなされて貴重なデータの収集が実現されている。しかし、各研究事例のデータとして数量が限られる。また、河川河口域での魚類調査のように広い調査域で目視が出来ないような場合、データを十分に得るのは難しいのが現状である。

2. 3 求められる情報と既存調査手法の精度のギャップ

野生動物の生態と生息空間を結びつける、また、関連付ける研究を行う際、関連付ける生息空間の単位が近年、高精度化する傾向が上げられる。研究の進展に伴い従来の景観的な生息空間分類から、ハビタットレベル、詳細な事例についてはマイクロハビタットレベル、スーパーマイクロハビタットレベルまでの研究事例が増えつつある。河川を例にとってみれば、1章で示したように瀬淵構造の生態系保全機能を把握するために、瀬淵を更に詳細なメッシュ単位に分割し、その分布様式、魚類利用から生態系保全機能を論じる研究が行われるなど詳細な研究事例が増加することが予測される。今後、研究の進展に伴い、生息空間評価に関して、野生動物行動データの高精度化の要求とそれに対応できる調査手法との間に大きなギャップが存在してくることが予測される。

2. 4 調査コストの増大

野生動物行動データの高精度化の要求とともに、調査コストの増大が懸念される。野生動物調査は、調査の多くを人力に頼る部分が多く、精度の高いデータを得るためには多大な労力・コストがかけられてきた。

今後、環境保全、環境復元を目的とした事業を行う際には、近年の財政状況を考慮し事業コストの縮減が求められ調査コストに関してもコストダウンが求められる。このような状況に対応するには何らかの方法で安価で良質な情報を提供できる新たな調査手法の開発が必要とされる。

2. 5 新たな調査技術の必要性

以上のような背景を踏まえ、今後、環境保全を行うためには新たな調査技術の開発が必要となると考えられる。特に、①従来の調査手法では十分な調査が行えなかった地点でも可能となる調査手法の開発、②従来の調査手法をより合理的、省力的に行える、調査手法を積極的に開発していく必要がある。

これらに対して現在、水循環研究グループ河川生態チーム(以下、本チーム)では、河川環境調査手法の開発を行っている。本講演では、その1例としてマルチテレメトリシステム(多個体野生動物同時追跡システム)の開発の現状、マルチテレメトリシステムを用いた河川事業による野生動物(タヌキ)への影響把握の事例を紹介する。マルチテレメトリシステムの有効性及び今後の可能性について述べる。

3. 野生生物調査のためのマルチテレメトリシステムの開発とその応用

3. 1 はじめに

バイオテレメトリとは野生生物に発信機を装着し、発信機から発信される信号をもとに生物の位置・行動形態を把握する手法である。その歴史は古く1970年代から広く用いられ⁵⁾⁶⁾⁷⁾、現在ではヨーロッパ、アメリカを中心に野生生物調査のツールとして一般的に用いられている。バイオテレメトリは、発信機から発信される信号に電波、超音波を用いる方式がある。この中で、野生生物調査に最も多く用いられているのは、発信信号に電波を用いた電波テレメトリである。土木研究所では、従来からの電波テレメトリを改良し、マルチテレメトリシステムを開発した。マルチテレメトリシステムは、複数生物の位置、行動を同時に追跡できる機能を持っている。同時追跡は、

電波発信機の発信を遠隔制御で管理することにより可能になる。また、遠隔制御は、観測者が生物の行動を知りたい時だけ発信機を発信させる観測スケジュール管理も可能にする。これらの機能により必要期間以外の発信機の発信をなくし、電池の消耗を抑え長期間の発信を可能にしている。また、発信機から発信された電波を複数の受信局により受信し解析することで、発信機の位置を10m×10mの精度で検出することを可能にしている。本論文では、マルチテレメトリシステムの開発とその適用性検討のために行った実河川における野生生物（中型哺乳類）の観測結果について報告し、マルチテレメトリシステムの適用性とその課題、今後の展望について報告する。

3. 2 テレメトリ調査の現状とマルチテレメトリシステムの開発

3. 2. 1 テレメトリ調査の現状とその問題点

テレメトリ調査は、アメリカ、ヨーロッパを中心に鳥類、陸上哺乳類、魚類等の野生生物の行動形態調査等で多くの実績がある。野生生物に発信機を装着し放した後、人間が探査用アンテナを持って野生生物を追跡し位置を特定するという調査方法である。野生生物の個体位置を特定することにより、野生生物の行動形態の把握には最も有効な方法と考えられている。しかし、従来のテレメトリ調査は公共事業を対象とした環境アセスメント等に用いる場合には多くの問題点を持っている。最も大きな問題は、テレメトリ調査自体が人力に頼る部分が多い調査手法であることである。このような調査方法では位置を特定するのに莫大な時間と労力を必要とし、その位置精度は低く、長期間の継続調査は難しい。複数の種、複数の個体の野生生物の行動を同時に把握することは不可能に近いのが現状である。

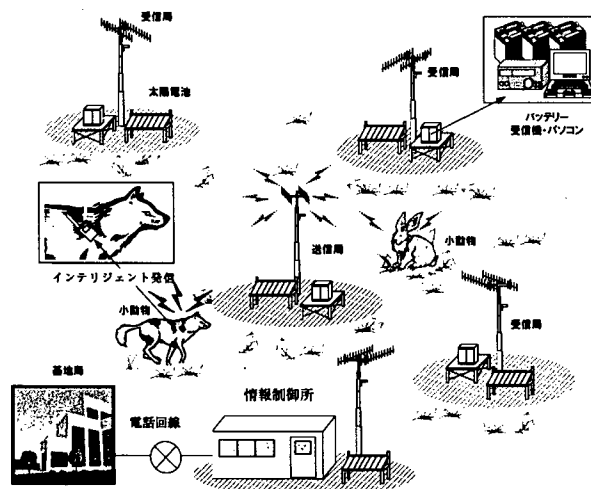


図 - 1 本システムの機器構成図と位置計測原理

3. 2. 2 マルチテレメトリシステムの開発

このような背景から、マルチテレメトリシステムの開発に際し、以下の機能を開発目標として設定した。

- (ア) 複数個体の野生生物の位置を同時に特定できること。
- (イ) 位置特定精度を向上させること。
- (ウ) 長期間の継続的調査を行えること。

(ア)により生態系を構成する野生生物の複雑な関係を把握することが出来る。(イ)により野生生物の行動形態を正確に把握し、野生生物がどのような環境を利用しながら生活しているかの予測が可能になる。(ウ)により短期間の行動では予測できない洪水の影響や季節変動などを把握することが可能になる。

このような開発目標を考慮し開発した本システムの機器構成と位置計測原理を示す(図-1)。本システムは、送信局、インテリジェント発信機、複数の受信局と情報制御所から構成される。送信局はフィールド内の任意の発信機ごとに発信命令を送信する機能を持っている。インテリジェント発信機は、送信局から発信命令が送信された時のみ発信するインテリジェント機能を持ち、発信間隔、発信スケジュール等を遠隔で制御できる。従来型の発信機は生物に装着し、発信機が発信を始めると一定間隔で発信し続けるため、観測していないときでも電池を消費し、発信機の寿命を短くしていた。インテリジェント機能により、余分な電池消費を防ぎ、長期間の連続観測を可能にする。受信局は発信機から発信される電波を受信し、受信した電波の到来角データを無線 LAN を通じて情報制御所に伝送する機能を持っている。情報制御所は受信局からの伝送されるデータを解析し、位置を特定し地図上に表示する。実際の受信局の設置状況を示す(図-2)。

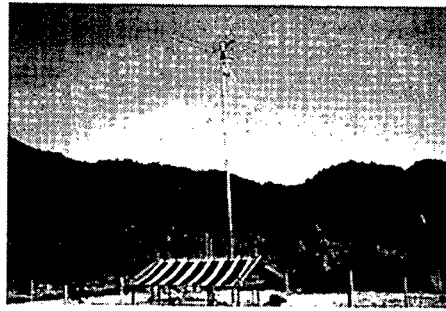


図-2. マルチテレメトリシステム受信局設置状況

本システムは、従来のテレメトリ調査のように、発信機から一定間隔で電波が発信され、その信号をもとに位置を特定するだけでなく、インテリジェント発信機により任意に観測スケジュールを変更し、夜行性の生物には夜間観測の回数を増やす等の柔軟な観測を可能にしている。また、複数の受信局を設置し受信局のデータを解析するプログラムにより、自動的かつ高精度に野生生物の位置を特定することを可能にしている。

3. 3五ヶ瀬川支川北川におけるマルチテレメトリシステムの実証実験と哺乳類調査への適用性

3. 3. 1 北川の概要及び調査地点付近の概要

北川は傾山(1,602m)に源を発し、桑原川、小川などの支川を合わせながら、河口で祝子川、五ヶ瀬川と合流し、日向灘に注ぐ流域面積 587.4km²、流路長 50.9km の 1 級河川である。その流域は宮崎県北部と大分県南部にまたがり北浦町、宇目町、北川町及び延岡市から構成されている。北川沿川においては、平成 9 年9月の台風 19 号に伴う豪雨により、甚大なる被害が発生した。この洪水を契機として、河川激甚災害対策事業が平成 9 年より実施されている。

河川生態学術研究会⁸⁾では北川を対象に、大規模な河川改修が河川生態系に与える影響の把握と評価手法の確立のために調査地区を選定し学術調査を実施している。調査地区の一つとして、五ヶ瀬川分流点から 10km 地点、的野地区(宮崎県東臼杵郡北川町の野地区)を対象に平成 12 年 5 月から実験を開始し、現在も実験を継続中である。北川は的野地区付近で大きく湾曲し、湾曲の内側には植生が発達した河川高水敷が形成されている(図-3.)。

この河川高水敷を生息空間としてアカネズミ、イタチ、ノウサギ、タヌキ、キツネ、アナグマ、イノシシ等の多くの哺乳類が確認されている。的野地区においても大規模な河川改修が行われる予定で、河川高水敷の一部を掘削し切り下げる予定である。これにより、河川高水敷に生息する野生生物にとっても何らかの影響が予測され、現在、河川生態学術研究会で野生生物の生態調査と河川改修工事による野生生物への影響把握の研究が行

われている。

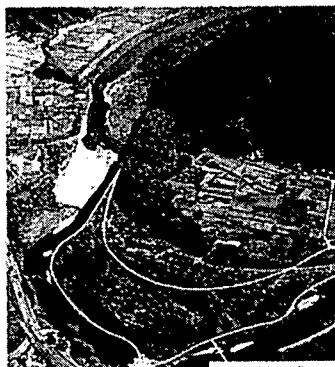


図 - 3 的野調査地区と掘削予定地域⁸⁾

3. 4 本システムの実証と位置特定精度の検証

3. 4. 1 実験の目的と方法

実験は、北川の的野地区の湾曲部で 2 回行った(図-4、表-1)。調査地区内にマルチテレメトリシステムの送信局兼受信局を 1 局、受信局を 4 局及び情報制御所を設置し、以下の 2 点の検証を目的として実験を行った。

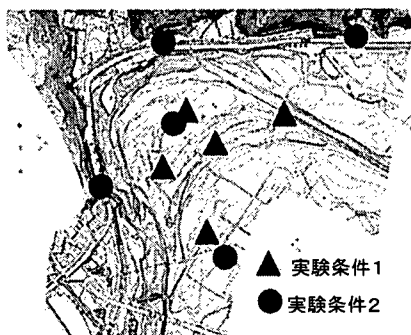


図 - 4. 調査地区における受信局の設置状況

表-1. 位置特定精度検証実験の実験条件

	実験時期	調査地区面積	最大受信距離
実験 1	平成 12 年 4 月 29 日	0.25k m ²	300m
実験 2	平成 12 年 7 月 14 日	1k m ²	450m

インテリジェント機能、発信機からの電波伝搬等のマルチテレメトリシステムの実証

実験に際しては電波工学分野で頻繁に見られる電波伝搬障害について留意し以下の点を明らかにした。⁹⁾

¹⁰⁾

- ①送信局からの遠隔制御により発信機を制御できるか。また、遠隔制御によるスケジューリングにより多個体の同時追跡が可能か。
- ②実際の野生生物調査時、野生生物に装着した発信機は地表面に非常に近い位置で発信することが想定され、植生の中を電波が透過して伝搬し、発信された電波が受信局まで伝搬しない可能性がある。また、野生生物が雨天時に植生内にいる場合、植生に付着した雨滴がシールドとなり、電波が受信局まで伝搬しないことが予測される。このような状況でも十分に発信機の位置を特定できるか。
- ③ 発信機から発信された電波が調査地区周辺の構造物、地形等で反射・回折し位置特定の障害にならないか。

位置特定の精度の検証

精度の検証に関しては、発信機を一点に固定し、発信機の位置を DGPS(デファレンス GPS:1m精度で位

置座標を特定可能な GPS 測量)で特定する。その後、固定した発信機から電波を複数回発信させ、本システムで位置データを収集し、DGPS と本システムによる特定位置の差を検証する方法で行った。なお、実験時、DGPS の衛星捕捉状態は良好で、既知の測量座標との整合性は精度1m以内であった。

3. 4. 2 実験結果

(1)本テレメトリシステムの実証実験結果

①については、2 回の実験ともに全て問題なく機能し、発信機の遠隔制御、測定スケジュールの制御により多個体の同時追跡が可能であることが確認された。②については、地表面、植生内、植生のない窪地、植生のある窪地、雨滴の付着した植生内、雨滴の付着した植生がある窪地等、さまざまな状況で実験した。その結果、2 回の実験ともにすべての状況で問題なく機能し、実際の野生生物調査での使用は十分に可能と考えられる。③については、発信機から発信される電波は受信局に到達するまで多くの影響を受け電波到来角データが大きく変動することが確認された。単純に受信局で受信したデータを解析するだけでは、位置特定の精度は極端に落ちることが明らかになった。このため、位置特定アルゴリズムを作成し、受信局から送信されるデータを複合的に解析することによって位置特定精度は格段に向上することが確認された。

(2)位置特定の精度の検証結果

実験1, 実験2の位置特定の精度の検証結果を示す(図-5, 図-6)。図-5, 図-6は、誤差距離(発信機が固定された位置と本システムが特定した位置の距離の差)を示している。誤差距離は、実験1では $3.87 \pm 0.56\text{m}$ (信頼区間 95%), 実験2では $7.59 \pm 0.4\text{m}$ (信頼区間 95%)である。調査地区面積が小さい実験1では最悪の条件でも10m四方での位置検出、調査地区面積が大きい実験2では20m四方での位置検出が可能であることがわかる。実験1と実験2を比較すると、実験2が位置特定精度が低く、また、本システムでの特定位置のバラツキが大きいことがわかる。これは実験2の方が、発信機から受信局まで電波が伝搬する距離が長く、受信局で得られる電波到来角データの精度が低いことが原因と考えられる。現在、受信局で得られる電波到来角データは市販の無線機器から得られるデータを使っているが、この機器を改良すれば位置特定精度の向上が期待される。

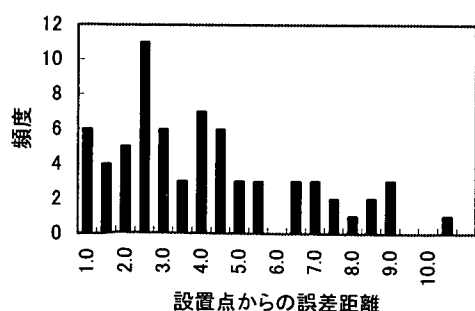


図-5 位置特定精度検証結果 (実験1)

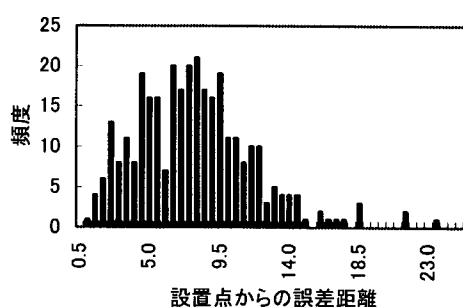


図-6 位置特定精度検証結果 (実験2)

(3)本システムの位置特定の精度の特徴

位置特定の精度の検証結果を見ると一定の傾向が把握できる(図-7.)。本システムでの位置特定では誤差 0m が少ない傾向がある。一般的に測量等の位置特定システムで位置特定する場合、正確に位置特定できる頻度は誤差 0m が最も多く、位置特定誤差が大きいケースは頻度が少なくなる。しかし、本システムの位置特定の精度の傾向は異なる。誤差 0m は少なく、誤差 5m 付近をピークに誤差 3m~10m の範囲の値が多い。本システムは常にある程度の誤差を有する傾向があるといえる。

(4)誤差特性の要因と改善方法

このような誤差は、位置特定の原理に、電波到来角データを用いた 3 角測量を行っていることが原因と考えられる。本システムは複数の受信局を調査地域に設置し、個々の受信局において、八木アンテナを用いて電波到来角(電波を受信する方向)データを収集し、複数局分の電波到来角データを解析し位置特定している。八木アンテナを用いた電波到来角データの収集の際には、八木アンテナの原理上、電波到来角方向を正確に把握することが出来ず、電波到来角データには常に誤差が含まれる。八木アンテナによる位置特定を複数局で行うことで、複数局分の誤差が作用し、位置特定の誤差を増大させていると考えられる。

この特性は、本システムに特化した専用のアンテナを設計することで解決され则认为られる。本システムは、市販されている汎用の八木アンテナを用いているため、電波到来角を正確に把握することが出来ない。位置特定の精度の向上を考える場合には、八木アンテナを本システム専用設計すれば、測定精度が向上すると考えられる。アンテナの特注は低予算的で実現可能で、現実的な解決方法といえる(図-8)。

3.4.3 本システムの機能と位置特定の精度の評価

北川における実証実験で本システムの発信機の遠隔制御、測定スケジュールの制御により多個体の同時追跡が可能であることが確認された。また、実際の調査時に想定される厳しい観測条件でも発信機の位置特定が可能であることが確認された。さらに、発信機の位置特定の精度は受信局の設置位置により異なるが概ね 10m~20m 四方の範囲で特定でき、野生生物がどのような物理的環境を利用しながら行動しているかを把握するには十分な位置特定の精度が確認できた。以上のことから本システムは実際の野生生物調査で十分に使用できると考えられる。

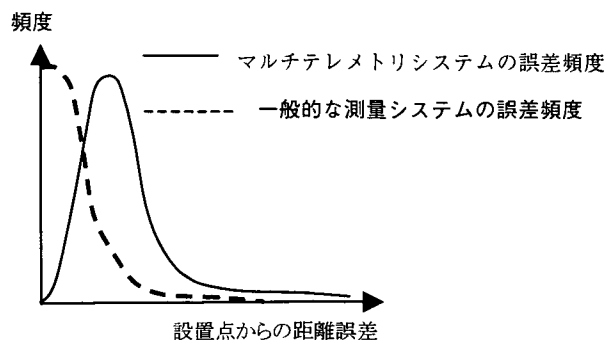
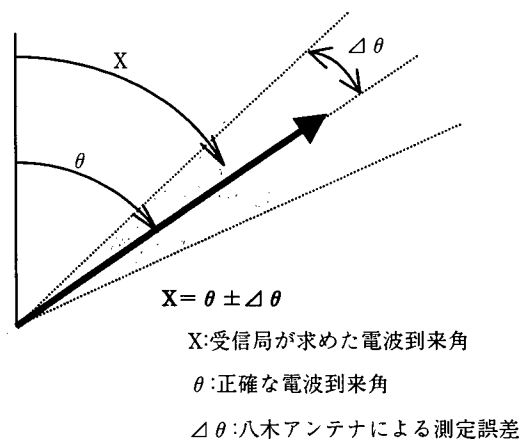


図-7 マルチテレメトリシステムの誤差特性



八木アンテナによる電波到来角の測定誤差

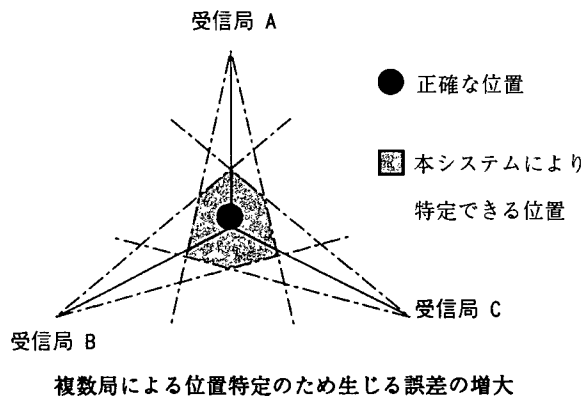


図-8 マルチテレメトリシステムの誤差特性

3.5 実際の野生生物行動形態調査への適用実験

3.5.1 実験の目的と方法

土木研究所では、宮崎大学教育文化学部生態学研究室と共同で、本システムを用いた的野地区の野生生物、主に中型哺乳類の行動形態調査を行っている。本実験の目的は、実際の野生生物調査を通して、本システムの適用性を検証することである。動物捕獲罠により動物を捕獲し、発信機を装着し本システムによって生物の行動を追跡することによって行った。ここで捕獲したウサギとタヌキには表一2. のように異なる仕様の発信機を用いて行った。ウサギには、リチウム電池を用いた発信機、タヌキにはリチウム充電池を用いた発信機を装着して実験を行った。

3.5.2 実験結果

図一9にウサギの3分に1回の行動プロット結果とタヌキの30分に1回の行動プロット結果を示す。▲は昼間、□は夜間の行動圏を示す。ウサギ、タヌキともに昼間は植生が密度が高い地点から大きく移動せず、夜間に活発に活動していることがわかる。



図一9. 野生動物の行動軌跡

3.5.3 本システムの野生生物行動形態調査への適用性の評価

本システムにより野生生物の行動形態を正確に把握することができ、野生生物の行動形態調査への適用性は十分にあることが明らかになった。しかし、本実験には表 2. に示す電池の異なる発信機を用いたが、充電池を用いた発信機は野生生物の行動を追跡するのに十分な期間の発信を続けることが出来なかった。これは、以下の原因が考えられる。

(1) 発信機回路が1回の発信に使う消費電力が大きいこと

(2) 電池の包埋技術(発信機回路を樹脂等で防水防塵処理すること)が未熟であるため、野生生物が植生内を行動した場合、雨天時に行動する場合に発信機回路とアンテナの接合部等が故障する。

(1)は発信機の回路をマイクロチップ化し回路自体を完成した形に改良することで、(2)は従来のテレメトリ調

査時に培われた包埋技術を適用することにより解決されと考えられる。特に発信機の小型化、長寿命化は、直接生物の行動にも影響を及ぼすため、更なる改良が必要であると考えられる。

3. 6 今後の本システムの方向性

開発した本システムでは、従来のテレメトリ調査手法と比較して革新的に調査効率が向上し、収集されるデータの量、精度ともに向上している。しかし、本格的な IT 技術の導入等により今後更なる発展が期待される。図-10に本システムの将来的な開発イメージを示す。現在、本システムの開発は大きく分けて2つの方向性に従って開発を行っている。一つは現在の本システムへ通信基盤の機能を付加する開発、もう一つは現在の本システムの機能アップを行う開発である。以下に開発の具体的な内容を示す。

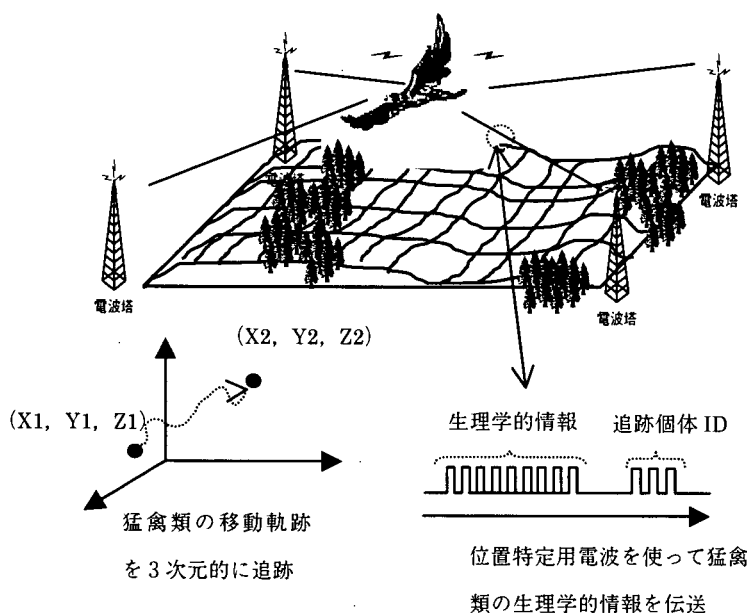


図-10. マルチテレメトリシステムの将来的な開発イメージ

3. 6. 1 本システムへの通信基盤機能の付加

開発の方向性の一つとして、本システムの通信基盤としての利用を考えている。これは、現在、位置特定のために使用している電波を情報伝送路として使い、生物の生理学的情報(心拍数等)の情報を伝送する機能、生物が本システムのエリア外に移動した場合等のために情報を蓄積するタンキング機能等通信基盤として利用することである。以下にその詳細を示す。

3. 6. 1. 1 発信機から遠隔計測機能発信機へ

Telemetry の日本語訳の多くは遠隔測定法とされている。テレメトリの観測ツールとしての歴史・発展過程をみると、生物に発信機を取り付け位置特定するという機能のほかに、生体、例えば人間の筋肉組織にセンサーを取り付け、筋肉の運動状態を把握する等、遠隔測定ツールとして使われている事例が多く見受けられる。

現在、生物調査で生物の位置特定ツールとしてよく使われる「テレメトリ」という言葉は、本来の機能の一部だけを指して使われている場合が多いと思われる。これは、生物に発信機を取り付けようとした場合、発信機を自作しなければならないという背景や発信機の軽量化のために機能を限定しなければならないという制約から最も基礎的な位置特定の機能に特化していったためと考えられる。

しかし、現在の IT 技術に代表される情報通信技術の発展が発信機の高度化を現実のものにしている。今後は、現在の位置特定に加えて生物の生理学的情報を遠隔観測する機能をテレメトリ発信機に付加し遠隔計測機能をテレメトリシステムの中に組み込んでいく予定である。

表 - 3 発信機の開発スケジュールと実際の開発状況

		Phase1 (2000)	Phase2 (2001～)	Phase3 (2002)
発信機重量 (無線部 + 制御部)	目標値	100(g)	20(g)	2(g)
	実現値	85(g)	9(g)	—
発信機期間 (リチウム単 3 電池 3 本)	目標値	3 ヶ月	1 年	2 年
	実現値	20 日	3 ヶ月	—
開発コンセプト		・マルチテレメトリシステムに対応する発信機の基本回路の製作・実現性の検証	・発信機の省電力化・小型化の検討 ・省電力化・小型化した回路の製作 ・発信機の高機能化	・最終的な回路製作・IC 化 ・回路設計・実装技術の体系的整理
開発の結果		・基本回路の製作の実現 動作の実証	・発信機の省電力化・小型化の実現 (省電力化に問題あり) ・発信機の高機能化	—

3. 6. 1. 2 発信機への情報タンキング機能の付加

データタンキング機能とは、発信機にメモリ装置を付加し、GPS データや生理学的情報等の観測データを一時的にメモリし、生物が本システムのエリア内に移動した時に発信機から受信局へデータをまとめて伝送する機能である。

このタンキング機能により、発信機を装着した生物がエリア外に移動した時、補足として DGPS データを蓄積し移動軌跡を補完し、リアルタイムで観測する必要がない生理学的情報を蓄積、観測することが可能になる。現在開発中のマルチテレメトリの発信機にはタンキング機能の増設が可能なインターフェイスの増設を検討中である。

3. 6. 2 本システムの機能アップ

3. 6. 2. 1 発信機の更なる小型化

3. 3 節で示したとおり、発信機については実用上多くの問題を抱えて、発信機の改良を早急に行わなければならないのが現状である。現在の問題点は、①発信機の重量、②発信機の発信期間、③発信機の信頼性の 3 点である。特に①、②はテレメトリ調査結果に直接影響を与えるもので、現在も優先的に改良中である。

表 - 3 に開発スケジュールと実際の開発状況を示す。開発は 3 段階のフェーズに分け高機能化している。現在は第 2 フェーズの段階にあり、2002 年の 1 月に第 2 フェーズの試作機第 1 号を宮崎県北川のフィールドで使用した。その結果、重量については目標値 20g に対し 9g を実現できた。しかし発信期間については十分な期間を実現していない。現段階では発信期間に大きな課題がある。発信期間を実現できなかった原因は、本シス

テムの特徴である遠隔制御機能を実現するために、発信機に CPU を搭載しているため CPU の待機電力が電池を消耗し、結果として発信期間を短くしているためである。野生動物調査において、長期間の発信は必要最低条件のため早急に解決する必要がある。

長期間の発信実現のためには、①本システム対応発信機の電気容量削減技術、②従来型発信機使用のための受信システム改良技術が必要になる。

①本システム対応発信機の電気容量削減技術

問題となる CPU の電池消耗を軽減するためには CPU 等電子回路・部の消費電力管理・制御技術が必要になる。この技術は携帯電話等の電子回路分野で最も注目される技術で、革新的技術が供給される可能性が高い。今後は電子回路分野の技術を積極的に取り入れることを念頭に発信機改良の検討を進めていく予定である。

②従来型発信機併用のための受信システム改良

実際の野生動物調査においてマルチテレメトリシステムの利用を考える場合、従来型テレメトリ発信機(以下、従来型発信機)とマルチテレメトリシステム用発信機(以下、MTS 用発信機)との併用が必要になってくると考えられる。調査対象動物、調査目的により、これらを使いわけの必要性がある。受信システムは現在の物を利用して野生動物調査を行えるようにする必要がある。

従来型発信機は、位置特定しか行えないが、電波を間欠的に発信する電子回路を持ち、小型、軽量、長寿命を実現し広く普及している。また、実際の野生動物調査においての実績が多く信頼性が高い。従来型発信機を用いれば、長期間の使用が可能になる。一方、MTS 発信機は、多個体同時追跡を実現し、生理情報等の遠隔観測、GPS との併用等も実証実験直前までできている。このため野生動物について位置特定だけでなく高度な情報の収集が可能となる。対象となる野生動物、調査の目的に応じて、発信機を選択できるシステムとして本システムを変更する予定である。

ただし、発信機の併用を実現するには本システムの位置特定原理を改良する必要がある。本システムでは、各受信局が八木アンテナの受信指向性を利用しアンテナを 360 度回転させ電波到来角データを同時に算出し 3 角測量を行って発信機の位置を特定している。この位置特定原理を行うには複数受信局が同じ電波信号を受信し、電波到来角を算出する必要がある。従来型発信機を本システムに用いる場合、従来型発信機の実時間(約 5mS)が MTS 発信機の実時間(約 120 秒)に比べてきわめて短いため、複数受信局が同じ電波信号を受信するのは難しい。つまり、電波到来角データを算出するために各受信局においてアンテナを 360 度回転させるには最低約 120 秒を必要とし、ある受信局では電波を受信できるが、ある受信局では電波を受信できないという状況が生じ位置特定が不可能になる。

本システムに従来型発信機を用いるためにはアンテナを回転させない位置特定原理が必要である。今後は、アンテナを回転させず位置特定を行う位置特定原理、装置の開発を積極的に行っていく必要がある。

3. 6. 3 本システムの汎用化への取り組み

本システムの導入コストは高く一般的な調査への普及には導入コストを低減する必要がある。現在の本システム導入コストで最も高いのはシステム設置時の受信局設置条件の選定、位置特定アルゴリズムの校正に多くの時間が必要であるためである。今後は効率的に受信局設置の場所を決定するための電波伝搬技術の体系化、位置特定アルゴリズムの校正の簡便化を図る予定である。

3. 7 まとめ

今回、自動的かつ高精度に野生生物の位置を特定するマルチテレメトリシステムを開発し、さらにその適用

性の検討のために、実河川における実証実験を行った。その結果により、以下のことが確認された。

- (1) 本システムは野生生物の位置を自動的かつ高精度に追跡でき、またインテリジェント発信機の機能により、その観測スケジュールを変更し、多個体の同時追跡が可能である。また、3. 2で示した通り、実際の野生生物調査で想定される厳しい条件においても十分に発信機の位置特定が行え、十分な適用性を持っている。
- (2) 本システムの位置検出精度は受信局の設置位置により異なるが最大受信距離が 450m 以内の場合、概ね 10m～20m四方の範囲で特定できる。
- (3) 実際の野生生物を本システムで追跡した結果、その行動形態を詳細に把握することができた。しかし、発信機の信頼性には改良の余地があり、技術的な改良と従来からの包埋技術等を活用した発信機の改良を行う必要がある。
- (4) 今後、マルチテレメトリシステムの開発が進むと行動形態に関する情報の他に生理学的情報も遠隔測定できるようになり、動物生態学研究の更なる発展を資する調査ツールとなると考えられる。

4. 北川河川改修工事が野生動物の行動へ与える影響の把握

4. 1 はじめに

河川改修事業やダム事業等の人為的インパクトが野生生物の行動に与える影響の把握には、既往研究・調査において多くの努力がなされてきた。しかし、野生動物の行動を定量的に把握する調査は難しく、その因果関係を把握することは非常に難しいのが現状である。

河川生態学術研究会北川グループでは、五ヶ瀬川水系北川において大規模な河川改修工事が河川生態系に与える影響を把握する研究を行っている。土木研究所水循環研究グループ河川生態チームでは、この研究の一環として、五ヶ瀬川水系北川の野地区(宮崎県東臼杵郡北川町の野地区、以下、調査地区)において、河川改修工事が野生動物の行動に与える影響をマルチテレメトリシステムを用いて調査する研究を行っている。本章では、北川での調査結果の概要を紹介し、マルチテレメトリシステムを用いた野生動物(タヌキ)の行動追跡結果を示す。本調査は、①北川の河川改修前後により野生動物の行動変化を比較する、②河川改修工事時の野生動物の行動と河川改修工事範囲、騒音、振動環境の変化との関係を把握することを目的とする。

4. 2 調査と方法

4. 2. 1 調査地の概要

3. 1において五ヶ瀬川支川北川の野地区の概要を示したが、ここでは野地区での河川改修工事の概要と実施状況を整理する。

4. 2. 1. 1 河川改修工事の背景

平成 9 年 9 月 13 日～16 日にかけて九州地方を縦断した台風 19 号に伴う豪雨により、宮崎県北部に位置する五ヶ瀬川水系北川の沿川においても、河川の氾濫による家屋・事業所などの流出や浸水、交通網の寸断等広範囲にわたる激甚な被害が発生した。この豪雨による出水規模は、北川の河川流量観測が開始された昭和 30 年代以降最大規模となり、熊田地点の流量は約 5,000m³/S と推定される。

平成 9 年 9 月 16 日の大出水により、洪水流は北川沿川の多くの区間で堤防を越え、堤防 2 箇所まで破堤を生じさせ約 878ha におよぶ浸水被害をもたらした。調査地区も浸水被害を受けた。国土交通省及び宮崎県では、再度災害防止の観点から共同で河川激甚災害対策特別緊急事業において大規模な河川改修を平成 9 年～平成 13 年度の期間行った。

4. 2. 1. 2 河川改修の概要

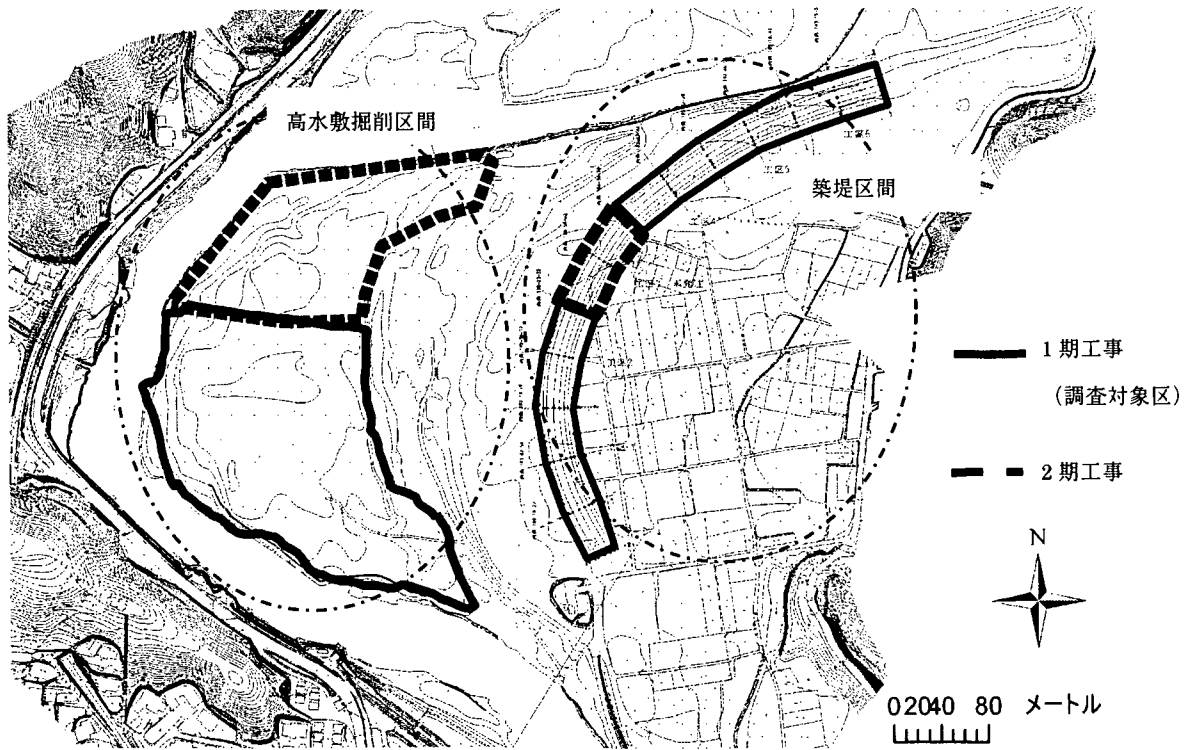
北川には良好な自然環境・野生動物の生息空間が残され、多様な生物群集の生息が確認されている。北川の河川改修は、良好な自然環境・野生動物の生息空間の保全を前提に必要な最小限の改変のみを行うことを理念として行われた。河川改修は流下能力不足の解消、河道断面積の確保を目的として行われた。具体的な方法としては、①高水敷の樹木の伐採、②高水敷の掘削、③低水路の部分的な掘削、④引堤による川幅の拡幅を組み合わせで行われた。調査地では①高水敷の樹木の伐採、②高水敷の掘削に加えて新規築堤を組み合わせ河川改修が進められた¹¹⁾。

4. 2. 1. 3調査地での河川改修工事の概要

図一11に調査地周辺の対象とした工事区間を示す。河川改修工事は2期に分けて行われた。1期(2002年1月～2002.9月)では調査地高水敷の下流部の樹木の伐採、掘削と築堤、2期(2002年10月～)では高水敷上流部の樹木の伐採、掘削と築堤が行われた。本講演では1期工事実施時のデータを主に示す。1期工事では、築堤区間が2002年の1月15日から着手され、高水敷の掘削が2002年の2月10日前後から開始されている。工事の概要を表一4に示す。

表一4 河川改修工事のスケジュール

工区		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
高水敷掘削区間	植生伐開		→							
	掘削			→	→	→	→	→	→	→
築堤区間	植生伐開	→								
	築堤		→	→	→	→	→	→	→	→



図一11 調査地周辺の概要

4. 2. 2データ収集

4. 2. 2. 1 野生動物の行動追跡

野生動物の行動追跡は調査地周辺に生息するタヌキにマルチテレメトリシステム用発信機を装着し追跡を行った。河川改修工事による影響を見るために河川改修工事前(2001年10月)と河川改修中(2002年2月)に追跡を行った。野生生物の捕獲については野生動物の大型捕獲装置及び箱ワナで行った。大型捕獲装置による捕獲については、平成12年度から餌付けを行い夜間大型捕獲装置内部に侵入したタヌキを捕獲した(図-12)。捕獲したタヌキにマルチテレメトリ用発信機を装着して放逐しその行動を追跡した(図-13)。タヌキに装着した発信機はマルチテレメトリシステム用発信機にニッケル水素電池を接合したものをエポキシ樹脂で包埋したもので行った。その発信機をタヌキの首に首輪をして装着した(図-15)。上記の作業により、発信機を装着したタヌキの行動を概ね30分に1回の割合で追跡を行い、マルチテレメトリシステムの中にその移動軌跡を記録した。

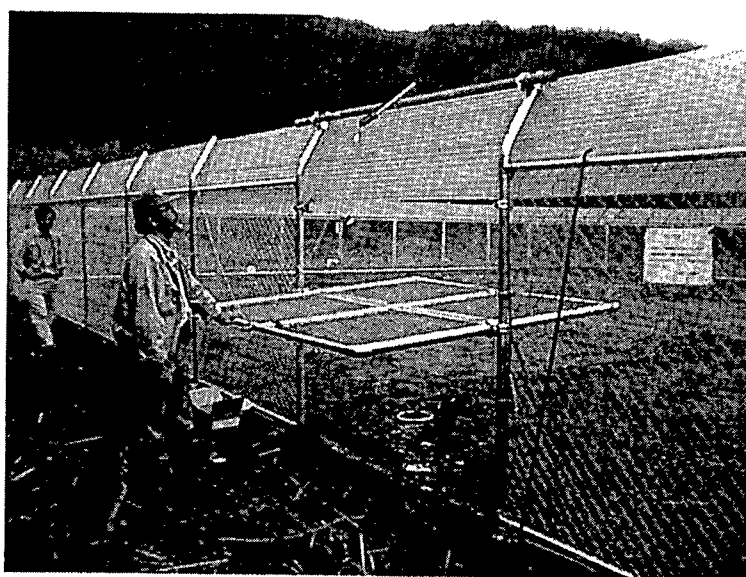


図-12 大型捕獲装置



図-13 タヌキへの発信機装着状況

4. 2. 2. 2 工事記録の作成

河川改修工事による環境の変化が野生生物に及ぼす影響を把握するための基礎的な資料を得ることを目的に、調査地区における北川河川改修工事の実施状況について記録した。記録した内容は、①各工区内での施工内容、②各工区内で作業した調査員人数、③各工区内で稼動した建設機械の機種と台数、④各工区内における調査員、建設機械の作業位置(概要)である。記録は工事が実施されている全ての日について行った。また、工作機械、作業員の動きと野生動物の行動の関係性を把握するため工作機械、作業員にポータブルGPS(SONY POCKET GPS)を取り付けて、その行動を記録した。

4. 2. 2. 3 騒音と振動の測定

河川改修工事の進捗状況により、主な騒音・振動源である工作機械の機種、台数及び稼働位置に変化が見られること、地表を被う植生の伐採や、掘削工事による地形の改変等により、騒音の伝播特性に変化が予想されることから、河川改修工事の状況を考慮して4回の現地調査を行った。調査地における騒音・振動レベルの測定地点の位置を示す(図-14)。騒音と振動の測定に関しては、普通騒音計(リオン社製NL-06)を用いて8:00~17:00の間の計測を行った。調査時間帯の間を200msのサンプリングレートで連続して記録した。普通振動計(リオン社製VM-06)とレベルレコーダー(リオン社製LR-04)を用いて8:00~17:00の間測定を行った。各測定地点につき、10分間の測定×3セット以上測定し、レベルレコーダーを用いて記録した。騒音の評価量として、等価騒音レベル LA_{eq} (単位: dB, 以下 LA_{eq} とする。)を用いた。振動の評価量として、80%レンジの上端値 L_{10} (単位: dB, 以下 L_{10} とする。)の測定値を利用した。対象とする動物によって可聴音域等の周波数特性は異なるが、本調査では対象とする動物の可聴音域等の周波数特性が人間に等しいと仮定し LA_{eq} 、 L_{10} を用いて評価を行う。

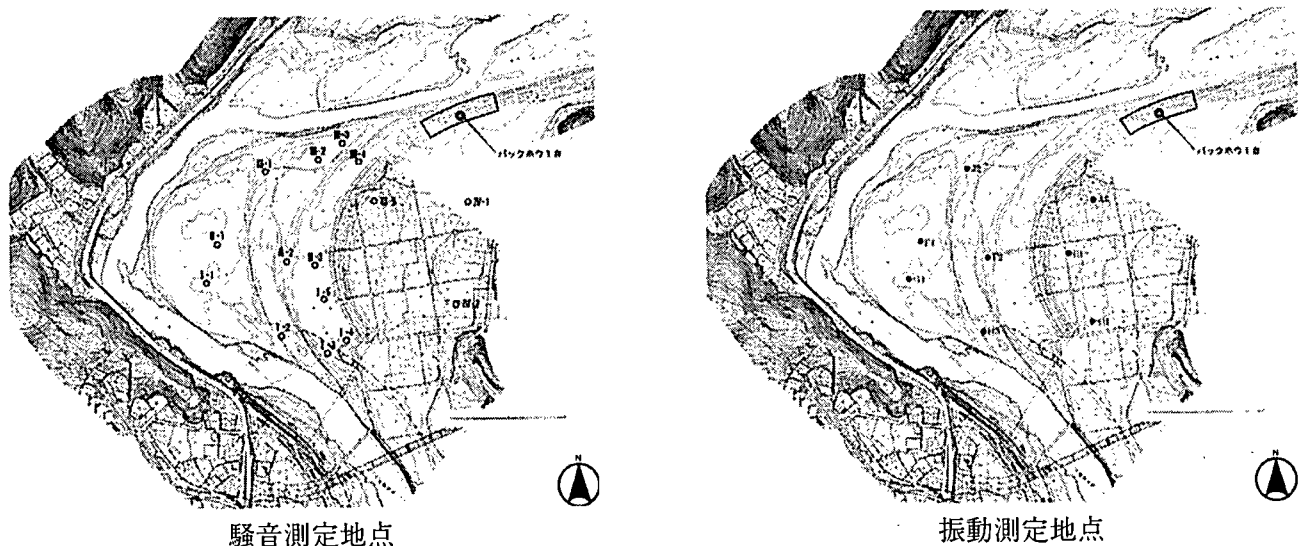


図-14 騒音と振動の測定地点

4. 2. 2. 4 データ解析

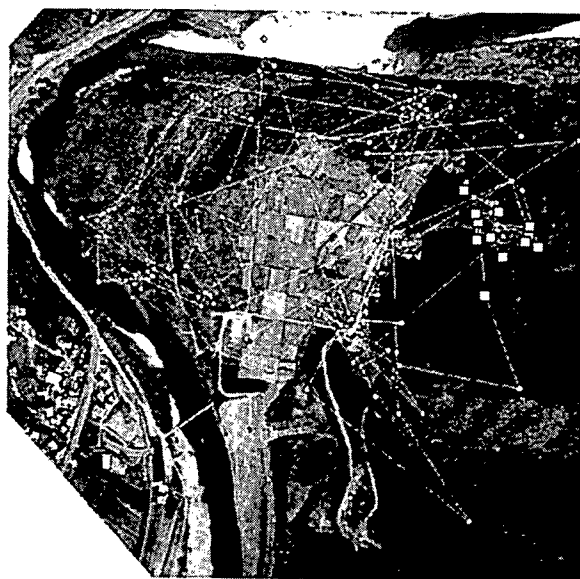
データ収集により得られたタヌキの行動追跡データ、河川改修工事記録、騒音・振動データの関係性を把握するため、調査データをGIS(ESRI社ArcGISVer8.2)に入力し解析した。タヌキの行動追跡データはポイントデータとして入力した。河川改修記録については調査地をカバーする16m解析ポリゴンを設定し、記録日ごとの工種を記録した。工種については工期全体の工事内容を分析し類別した。騒音・振動データについては、調査地内での詳細な騒音・振動分布を得るために現地調査データをもとにTINによる内挿計算を行った。

4.3 結果 と考察

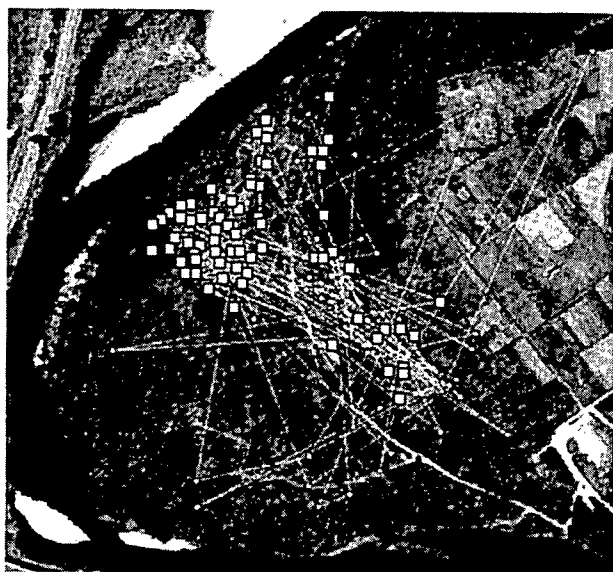
4.3.1 北川の河川改修前後によりタヌキの行動変化

図一18 に河川改修事業実施前のタヌキの行動、河川改修事業実施時のタヌキの行動を示す。河川改修工事前のタヌキの行動範囲は山から河川高水敷にかけて広く行動している。一方、河川改修工事実施中のタヌキの行動範囲は河川高水敷及び周辺部に縮小していることがわかる。

河川工事が行動範囲の縮小に与えた影響も少なくないと推定されるので次項以降に河川改修工事，騒音・振動との関係を整理する。



河川改修工事前



□ 昼

○ 夜

河川改修工事中

図一15 河川改修前後のタヌキの行動変化

4. 3. 2 河川改修工事時範囲とタヌキの行動変化との関係

図一16に河川改修工事範囲とタヌキの行動追跡結果(2002.2.24-2002.3.24, 各日 AM7:00~PM5:00)との関係を示す。タヌキの行動範囲は高水敷掘削区間, 築堤区間から離れた場所をタヌキが利用していることがわかる。河川改修工事前のように山から河川高水敷にかけて行動していない。山と河川高水敷の移動路であった竹林が河川改修による伐採されたため, タヌキの移動路になんらかの影響を与えたと考えられる。1 期工事実施時, 着手されていない河川敷上流部は工事前の植生が保たれていて, その植生の中をタヌキが利用していたことがわかる。また, 発信機回収のため定期的に餌付けを行っている大型捕獲装置周辺には近づいて採餌を行っていることがわかる。

タヌキは, 河川改修工事の影響が少なく伐採されていない植生内に生息し, 必要に応じて採餌場所へ移動する様子が示唆されている結果となっている。

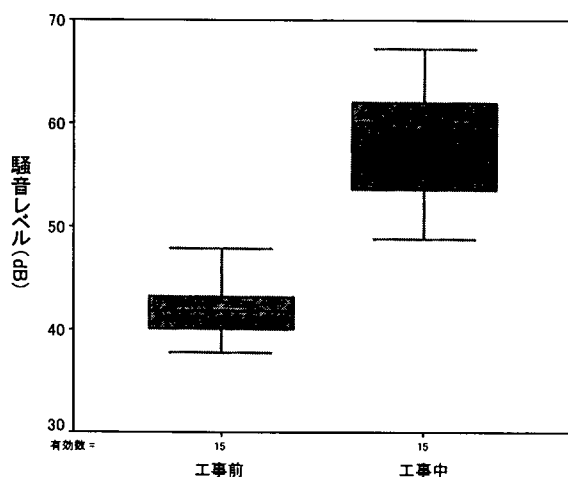


図一16 河川改修工事範囲とタヌキの行動追跡結果との関係

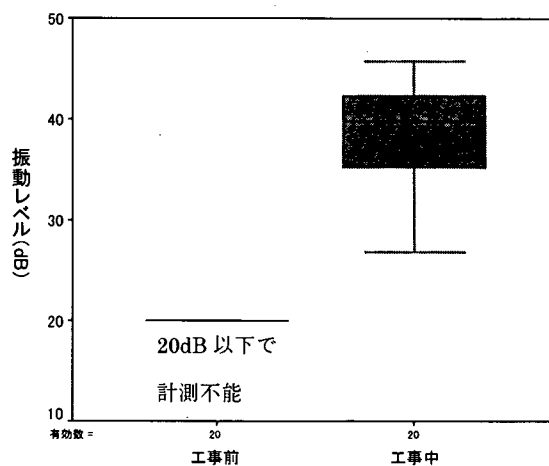
4. 3. 3 河川改修工事による騒音・振動の変化とタヌキの行動変化との関係

河川改修工事により調査地の騒音・振動環境は大きく変化した。騒音は工事前平均 40dB から工事中平均 60dB、約 15dB 上昇し、振動は工事前平均 20dB 以下から工事中平均 40dB、約 20dB 上昇した(図一17)。河川改修工事前、調査地周辺は騒音・振動源が調査地から約 100m 離れた国道 10 号線の通過交通量程度で騒音・振動は少なかった。河川改修工事と同時に的野地区内で多数の工事車両(工作機械,トラック,作業関係車両)の移動が多くなった。

GIS を用いて算出した騒音・振動分布の形態とタヌキの行動追跡結果を示す(図一18)。調査地内の騒音振動の分布とタヌキの行動との関係を示す。調査地内の騒音・振動の分布は河川改修工事区間(高水敷掘削区間,築堤区間)を中心に高くなっていることがわかる。タヌキは調査地内の騒音・振動の少ない地点を中心に利用していることがわかる。騒音についてはもっとも少ない 32dB 前後の利用が多い。振動については 55dB 前後の場所を利用していることがわかる(図一21)。騒音については調査地内で最も低いレベルの場所、振動については、調査地で工事箇所から離れた最も振動が少ない箇所を選択していることが示唆される結果となっている。

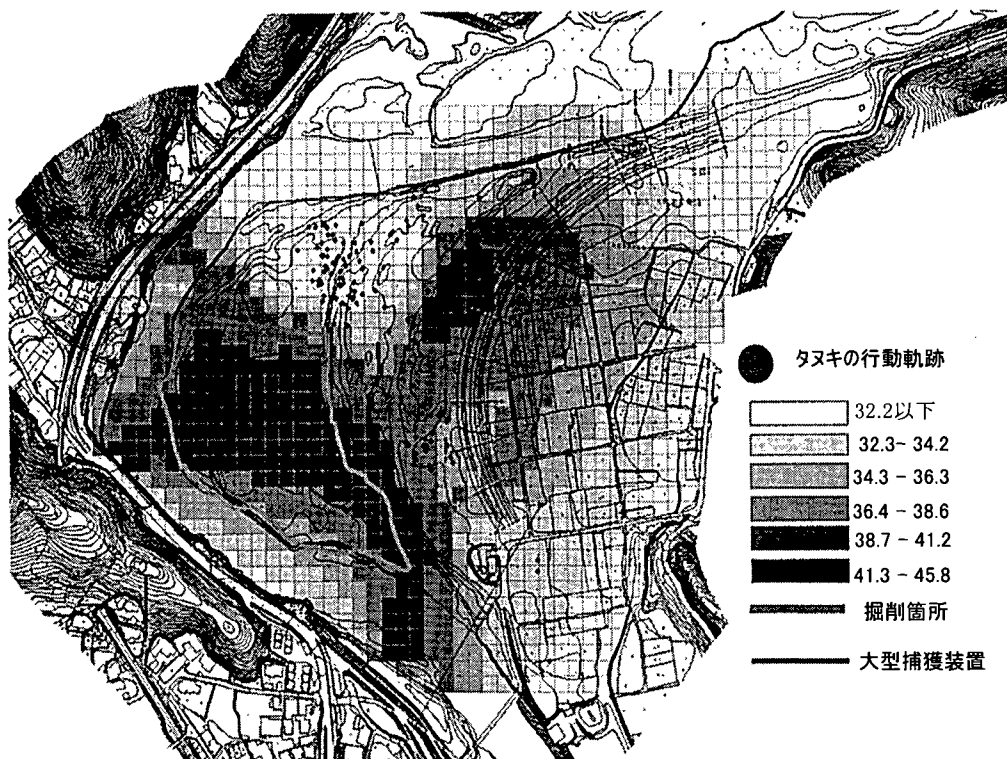


調査地区内の騒音の変化

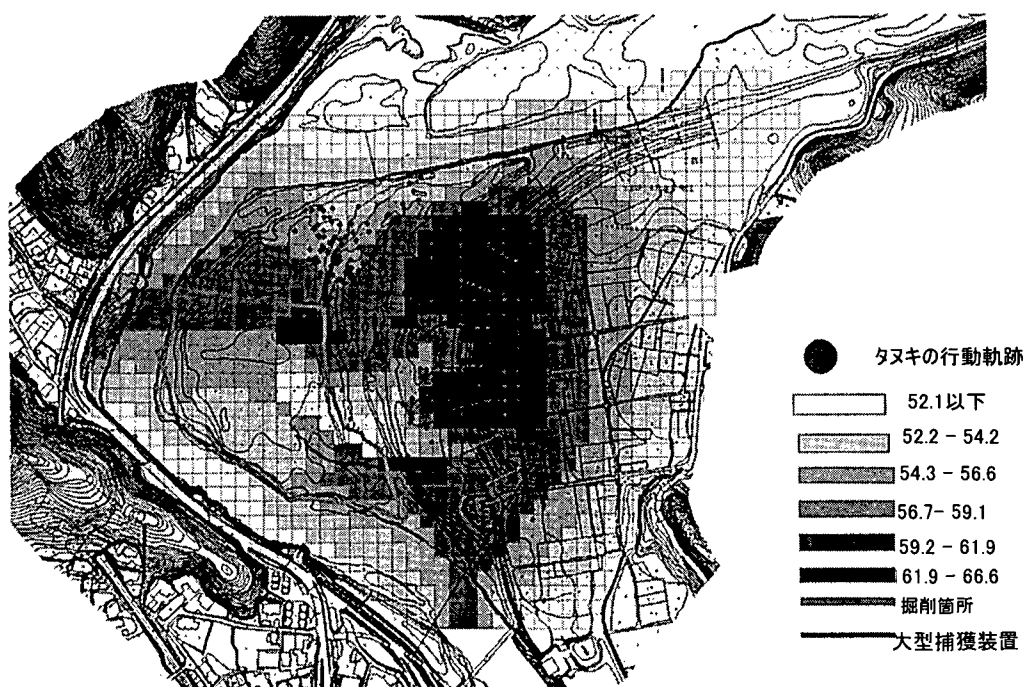


調査地区内の騒音の変化

図一17 河川改修工事前と河川工事中の調査地区内の騒音・振動の変化



タヌキの行動と騒音分布



タヌキの行動と振動分布

図-18 タヌキの行動と騒音・振動の関係

4.4 まとめ

五ヶ瀬川支川北川の野地区において①河川改修前, 河川工事中により野生動物の行動変化を比較する, ②河川改修工事時の野生動物の行動と河川改修工事範囲, 騒音, 振動環境の変化との関係を把握することを目的として, マルチテレメトリシステムを用いてタヌキの行動追跡を行った. その結果, 以下のことが確認された.

(1) タヌキの行動範囲は河川改修前, 河川工事中で大きく変化した. 河川改修以前は山に生息し山と河川高水敷の間を移動していたが, 河川改修中は河川工事区間内に残された植生内を多く利用していることが示唆された.

(2) タヌキの行動範囲は河川改修工事の区間を避けるように移動している.

(3) タヌキの行動範囲は, 調査地区の騒音, 振動が低い箇所を利用している傾向が示唆された.

今後は, タヌキが場所の選択をした因果関係について, 植生の選好度, 騒音・振動データ, 工事による人為的インパクト(工作機械の移動, 調査員の移動)との関係を統計的に解析し因果関係の整理を行う予定である.

5. 参考文献

- 1) 辻本哲郎: 流水と生態系 その1ー河川, 水域生態系保全創造のコンセプトと展開技術 平成12年講演集, pp80-pp109, 2001
- 2) 井上幹生・中野繁: 小河川の物理的環境構造と魚類の美生息場所, 日本生態学会誌, 44号, pp151-160, 1994
- 3) 佐竹暁子・原登志彦・根平邦人: 空間生態学: 空間パターンのダイナミクス, 日本生態学会誌, 50号, pp253- pp254, 2000
- 4) 中越信和: 景観生態学: 空間の入ったエコロジーの展開, 日本生態学会誌, 50号, pp253- pp254, 2000
- 5) Charles J. Amlaner Jr. and David W. Macdonald: A Handbook on Biotelemetry and Radio Tracking, PERAMON PRESS, 1995
- 6) Larry A. Nielsen: Methods of Marking Fish and Shellfish, American Fisheries Society, 1992
- 7) Robert Kenward: Wildlife Radio Tagging, Academic Press, 1993
- 8) 河川生態学術研究会: 川の自然環境の解明に向けて 河川生態学術研究会の概要
- 9) 奥村義久、進士昌明: 移動体通信の基礎、電気情報通信学会, 1986.9
- 10) 虫明康人: アンテナ・電波伝搬、コロナ社 1986.
- 11) 九州地方整備局, 宮崎県, 財団法人リバーフロント整備センター: 北川「川づくり」検討報告書(概要版), 1999

[研究成果報告]

都市空間におけるヒートアイランド軽減技術

司会：水工研究グループ上席研究員（水理水文） 吉谷 純一

【 個 別 課 題 】

- ヒートアイランド現象発生メカニズムと対策技術の現況 57
埼玉大学理工学研究科 環境制御工学専攻 教授 浅枝 隆
- 東京都におけるヒートアイランド対策の取り組み 59
東京都環境局 総務部企画課長 村山 崇
- 舗装における対策技術・波及効果・性能評価 61
基礎道路技術研究グループ主任研究員（舗装） 新田 弘之
- ヒートアイランド現象軽減のための各種対策の提案とその効果 65
水工研究グループ主任研究員（水理水文） 木内 豪

ヒートアイランド現象発生メカニズムと対策技術の現況

埼玉大学理工学研究科・環境制御工学専攻・教授 浅枝 隆

1. はじめに

都市のヒートアイランドは、都市周辺の大気が周囲より高いことから命名されたものであり、当初、人工排熱が原因と考えられてきた。しかし、近年の研究では、この他にも様々な要因が指摘されかつ定量的な検証がなされている。例えば、①路面の舗装や非透水性の建造物の占める割合が増加したことによる蒸発量の低下、水分の減少による比熱の低下、アルベドの低下による地面の温度上昇。②建物の密度の増加、高層化によるビルキャノピーにおけるアルベドの減少、風道の遮断。③風道の減少によるビルキャノピー内への熱の蓄積、路面からの顕熱輸送量の減少。④高濃度の二酸化炭素による温室効果、などである。都市のヒートアイランド現象は、一般に気温の低い冬季に顕著であり、ほとんどは都市の中心の一地域にみられるもので、これが深刻な社会問題になる都市は世界にそう多くない。わが国の都市でヒートアイランドが問題となる背景には特有の事情が潜んでいる。そこで、まずわが国の都市で特に問題となる原因を考えてみよう。

2. わが国の都市に内在するヒートアイランドに対する脆弱性

社会的要因：わが国の都市人口は、統計上は同じ程度でも他の国の都市と比較すると実質は桁外れに多い。わが国の都市では狭い土地という制約された中で高度な土地利用を求められたこと、また、中央集権政策の元、集積化を求めてきたわが国特有の伝統、一日のうちで都心に生活する時間が長い日本人特有の生活パターン、等の社会的な問題がある。それと同時に、社会基盤に関して以下のような大きな問題があると考えられる。

河川や海岸の位置づけの差：わが国の河川は、従来、特にヨーロッパの河川と比較すると圧倒的にその地位が低かったといえる。その大きな原因が、明治以降、陸上交通の普及によって水上交通が減少し、そのため、それまで存在していた様々な運河が埋め立てられ、より一層その地位が低下してきたといえる。海岸も様々な形で埋められ都市化が進んだ。最近、河川法の改正とともに、河川もややその地位を回復しつつあるものの、都市内における川の地位は依然低い。河川を中心としたビオトープづくりも欧米の都市では都市の内部にも造られるのに対して、わが国の場合は、主として河川敷を利用することが考えられるのが普通である。しかも、日本の都市河川の多くは兩岸に高い堤防を有しており、よほど大きな河川でない限り、水面と都市内の街路との間の連続性は保たれない。また、両面張りの河川は、側岸が風道をブロックすることなど、横断方向の風の流れを大きく阻害している。これらは都市内の街路に冷気が届かない大きな要因となっている。また、都市化された海岸によって海風の影響が弱められることは言うまでもない。



図1. シドニー市中心にある池の風景

都市公園：わが国の都市内にも大小の公園が点在するが、多くは近所の子供たちのプレイグランド程度で、十分な大きさも備えておらず、十分な自然度も備えていない。こうした公園内でも多少の気温の低下は観測されているものの、ヒートアイランド問題を抱えない欧米の都市にみられる森林で覆われウェットランドや池等の様々な水面が存在する広大な公園と比較すると、全体の面積が等しくても全体としての効果に大きな差がある（図1）。

中高層建物の連続性：欧米の都市では、極めて高い高層建築がダウンタウンの一地区にのみ集中しているものの、それ以外の地域の建物は比較的低く、わが国の都市で見られるような5階以上のビルが密に広い地域に林立していることは稀である。この連続したビル群は風道の閉塞、ビルキャノピー内への蓄熱、アルベドの上昇の大きな原因になっている。一般に、高層ビルが十分な間隔をおいている場合には風道に関する問題は少ないが、密に立ち並ぶとその影響は極めて大きい。

建材・舗装の特性：最後に、欧米の家屋が保湿性にすぐれたレンガで造られるのに対して、わが国では木造以外ではコンクリート造が一般的である。また、瓦を利用した家屋が多いなど、欧米の家屋と比較すると大気に対する顕熱輸送量が極めて大きい。また、舗装に関しても水密性の極めて高い舗装材が主流であり、ヨーロッパの石畳等に比較して表面の温度上昇は大きい。

3. ヒートアイランド対策と将来的課題

ヒートアイランド対策は、大きく、排出エネルギーの軽減対策と再自然化・近自然化対策に分けられよう。排出エネルギー軽減対策はエネルギー利用の効率化、車の規制、電力需要の自粛等、様々な政策、自己努力の上に成り立っていずれも具体的に省エネルギー化を目指すものであり、都市政策の中で、社会構造や個人の生活パターンの変革とともに実現されるべきものと考えられる。

再・近自然化対策は、より具体的に個々の工学技術者が関われるものも多い。舗装材・建材の改良、植生の普及、建物や自然地の配置等、比較的身近に行われてきた対策がこれにあたる。ところが、こうした対策は、温度を低下させることのみに焦点が当てられている。しかし、ヒートアイランド自体、従来の都市化の中で人工化の副産物として現れてきた現象であり、その対策も、単に物理的な技術的対策としてではなく、その土地の特性自体を元あった土地に戻す、あるいは近づけるものでなければならない。そのためには、それぞれの対策に対し、単に物理的指標だけでなく様々な指標を通して考えていく必要がある（表1）。近年、ヒートアイランド対策に屋上緑化や水を配したガーデニングが都市内でも行われてきており、これらが熱対策には効果があることは言うまでもないが、こうした場合にも、固有種を用いたり在来の風景をつくるなど、わが国固有の自然を意識したものが求められる。

表1. 道路舗装材・建材の特性の比較

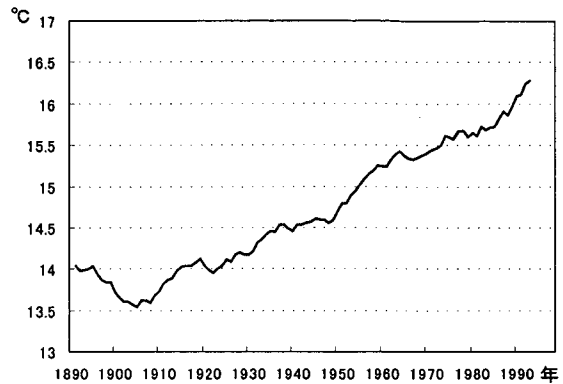
	アスファルト	コンクリート	マカダム、石張り	透水性舗装	保水性舗装	遮熱塗料	植生付建材	自然土
温度	高い	中	中・低い	高い	低い	低い	低い	低い
アルベド	低い	高い	自然	調節可能	調節可能	高い	低い	自然
水分特性	無し	無し	透水保水	透水	保水蒸発	無し	保水蒸散	保水蒸発
強度	高い	高い	低い	中	中	中・高い	低い	極めて低い
走・歩行性	良い	良い	中	良い	良い	良い	中	悪い
ハビタート性	無し	無し	ややあり	ややあり	ややあり	無し	高い	良い
生態系へのインパクト	大きい	大きい	ややあり	あり	あり	水分面では大きい	外来種の場合大	良い
人間の受ける印象	人工的	人工的	やや自然懐古	人工的	人工的	人工的	自然	自然・懐古

東京都におけるヒートアイランド対策

東京都環境局企画課長 村山 崇

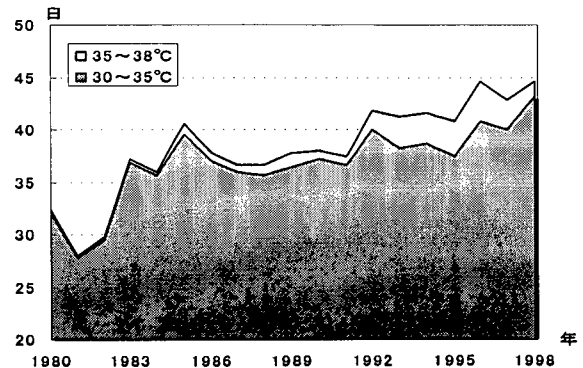
1. 深刻化する東京のヒートアイランド現象

東京の年平均気温は、過去100年で3℃近い上昇を記録しており、他の大都市の平均上昇気温2.4℃、中小規模の都市の平均上昇気温1℃に比べて大きな上昇である。気温上昇の一部には、地球温暖化の影響もあるが、都市温暖化の傾向は顕著といえる。また、夏場の最高気温が30℃以上の日数も、近年の増加傾向が明らかである。特に90年代にはいつてからは、35℃以上の日数も増加するなど、東京の夏は、ますます暑くなってきている。



2. ヒートアイランド現象による問題

ヒートアイランド現象により、様々な問題が誘引される。熱帯夜の増加は、睡眠障害を招き、その解消のために冷房需要が増加する。また、近年の熱中症等による搬送人数の増加もこうした都市温暖化の影響を疑わせる。さらには、ヒートアイランド現象と集中豪雨の頻発化の関係も研究者の注目するところとなっている。



ヒートアイランド現象は、かように都民の生活環境を悪化させ、その緩和は、都市行政の大きな課題となった。

3. 東京都の政策展開

東京都は、平成14年1月、東京都環境基本計画を策定し、ヒートアイランド対策を東京都の環境施策の重要な柱の一つと位置付けた。「2015(平成27)年までに、熱帯夜の発生を現状の30日/年程度から20日/年程度に減少させる」ことを目標として掲げ、様々な政策を展開している。

さらに、11月には、ヒートアイランド現象による都市温暖化と、地球温暖化の「2つの温暖化」をターゲットに、「都市と地球の温暖化阻止に関する基本方針」を発表、より積極的な施策を打ち出していることとしている。

4. ヒートアイランド現象の原因と対策

対策を展開していく上で、原因を明確化していくことが重要である。一般には、次のような要因がヒートアイランド現象を悪化させているわけだが、まさしく東京の都市化そのものが原因といっても過言でない。これらの要因に加え、都市構造が、東京湾からの海風を始め、ヒートアイランド現象の緩和に大きく寄与している風を活用できるようなものになっているかどうかという課題もある。

	要 因
地表面被覆の人工化	緑地、水面、農地、裸地の減少による蒸散効果の減少
	舗装面、建築物（アスファルト、コンクリート面等）の増大による、熱の吸収、蓄熱の増大、反射率の低下
人工排熱の増加	建物（オフィス、住宅等）の排熱
	工場等事業活動による排熱
	自動車からの排熱

今後、都市レベルから個々の建築物における対策まで、あらゆるレベルにおいて、①水や緑の蒸散効果を回復する被覆対策、②人工排熱の抑制を目指す省エネルギー対策など、着実な取組を進めていく。また、③東京湾からの海風や川沿いの風を生かし都市を冷やしていくための施策についても検討していく。加えて、ヒートアイランド現象は、まだまだ地域的に詳細な現象の把握や現象の解明が不十分であり、より効果の高い施策を検討していくには、今後の調査研究を待たねばならない。その第一歩として、今夏、従来より密度の高い、区部 120 箇所でのモニタリングを開始している。

これらの施策の方向性をまとめると以下のとおりである。

	施策の方向性	内 容（実施中は網掛け）
街区、建築物での対策	建物敷地の被覆対策	敷地の緑化（新築建築物の緑化義務付）、敷地の舗装改善などの推進
	道路の被覆対策	道路舗装の保水性舗装化（試験施行中）、遮熱塗装の活用、道路散水、道路緑化の改良など
	建築物の被覆対策	屋上等緑化（新築建築物の屋上等緑化義務付）、遮熱塗装の活用等の推進
	建築物・産業からの人工排熱対策	省エネルギー対策（新築建築物への建築物環境計画書制度、事業所に対する温暖化計画書制度）等の推進
都市レベル	モニタリングの強化	東京区部を中心に 120 箇所で、温湿度等を観測するヒートアイランド現象観測網の設置
	クールスポットの拡大	大規模な緑地、水面など都市を冷やす機能を持つ場所の拡大、ネットワーク化の検討、推進、残された自然環境の確保
	風の道への配慮	東京湾からの海風や、川沿いの風を生かし都市を冷やしていくための施策検討
	自動車からの人工排熱対策	燃費改善、交通量抑制の推進

5. おわりに

ヒートアイランド現象は、環境への配慮が不十分だったこれまでの都市づくりの結果生まれている。東京では、原因として挙げられているどの要素も改善に向かっておらず、今、政策の転換が強く求められているところである。

ヒートアイランド現象の緩和に効果があると考えられる対策は、地球温暖化対策や都市緑化など、他の施策目標にも寄与するものであり、ヒートアイランド現象を緩和する都市づくりは、そのまま、環境に対する負荷の少ない持続可能な都市づくりに通じる。東京都は、都市温暖化の対策を進めることを通じて、よりサステナブルな都市東京の実現を図っていく所存である。

【参考文献】

- 1) 東京都環境基本計画（平成 14 年 1 月）
- 2) 東京都環境局ホームページ <http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/>

舗装による対策技術・波及効果・性能評価

基礎道路技術研究グループ（舗装チーム）

1. はじめに

ヒートアイランド現象抑制の対策の一つとして地表面被覆状態の改善が上げられ、地表面を被覆している舗装による対策が検討され始めている。舗装における対策技術としては、路面温度の低減効果のある舗装が注目されているが、路面温度の低減効果が高いことが重要であるとともに、より広い面積での施工を可能にするためには車道としての耐久性が確保されていることも重要となる。

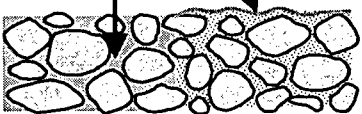
そこで本研究では、舗装からのヒートアイランド現象抑制対策として、路面温度低減効果が高い舗装の機能評価及び車道としての耐久性評価を行った。さらに、路面温度低減がもたらすヒートアイランド現象抑制以外の効果についても検討を行った。

2. 路面温度低減型舗装

一般的に舗装は、アスファルトをバインダに用いたアスファルト舗装が主流であり、表面の色はアスファルトの色である黒色である。このため、反射率が低く蓄熱しやすく、夏期には60℃以上を示すこともある。また、舗装は水に弱く、通常は表面から中に水を浸入させないようにしているため、土などが持つ蒸散作用が期待できない。従って、路面温度低減化を図るには、このようなアスファルト舗装が従来持っていなかった機能を工夫して付加することが必要である。表－1に路面温度低減型の舗装として考えられるものを示す。

明色化舗装は、従来からあった技術であり、バスレーンなどの区分の明確化や景観へ配慮した舗装として用いられてきた。しかし、表面を黒色以外に変えることができ、反射率を高くすることができるため、路面温度の低減が期待できるものである。保水性舗装は、開粒度アスファルト混合物の空隙に保水

表－1 路面温度低減型舗装の例

種 類	概 要	イメージ
明色化舗装	アスファルト合材製造時に着色、あるいは舗装施工後に表面に着色することにより明色化した舗装。従来よりバスレーン、景観舗装などに利用されている。	バインダ等を着色 or 着色した表面材 
保水性舗装	舗装表層材に保水機能を付加した舗装。いくつかのタイプがあり、開粒度アスファルト混合物の空隙に保水能力を持たせたセメントミルクを注入したものが多い。その他、微細な空隙をもたせたものやブロックにしたもの、土を用いたものなど様々なものが考案されている。	保水機能のあるセメント材 
熱反射舗装	舗装の表面に熱反射作用のある材料を塗布して、アスファルト混合物内に蓄熱させないようにした舗装。	熱反射作用のある表面材 

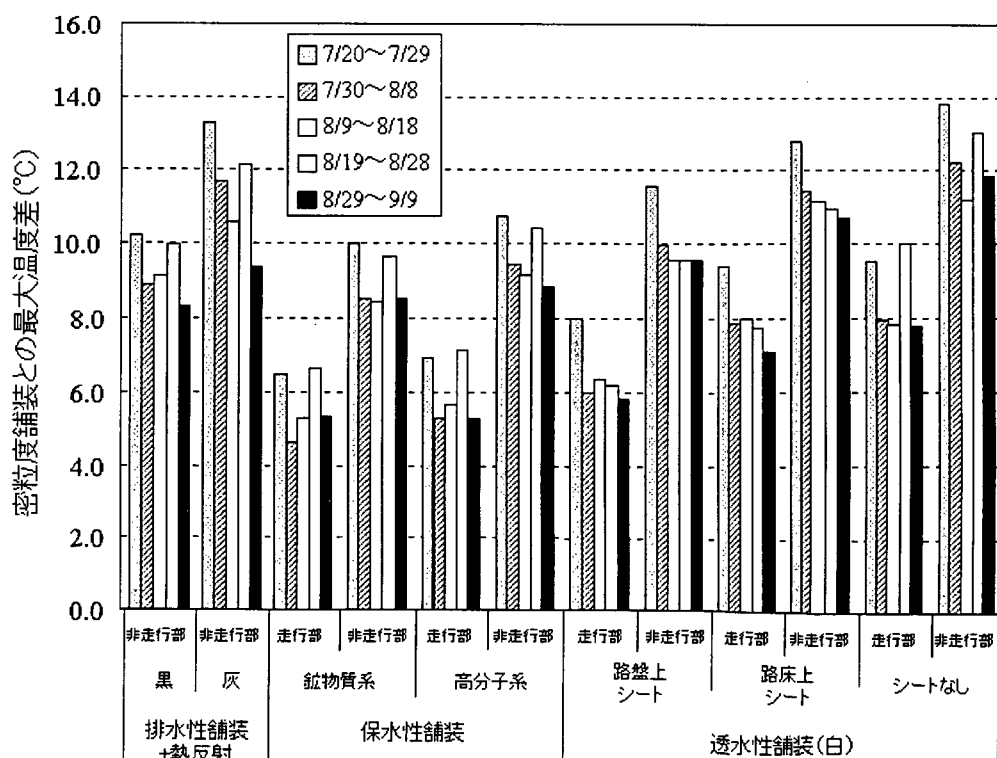
能力を持たせたセメントミルクを注入したもので、雨水の一部を舗装表面に貯めておくことで、蒸散作用が生まれ、水分が蒸発するときの潜熱により路面温度が下がる仕組みである。熱反射舗装は、舗装の表面に主に可視光線以外の光を反射させる特殊な材料を塗布し、見た目の色を大きく変えることなく温度低減をさせるものである。また、これらの他に排水性舗装や透水性舗装など、空隙を有する舗装にも表面積が増えることにより熱放散がよくなり、通常の舗装より若干低温化すると考えられている。

これらの舗装は、温度低減効果が高いことはもちろんであるが、耐久性が高く、温度低減効果の持続性が高いこと、また安定して効果が得られることも必要である。さらには、舗装としての機能の向上が可能となれば、ライフサイクルコスト低減にも寄与できるようになり、大きな効果が期待できる。

3. 温度低減効果の検討

舗装走行実験場内に各種の温度低減効果のある舗装を試験施工し、温度を測定するとともに、促進載荷用の荷重車（総重量約 18t）を走行させた。荷重車の走行は 49kN 換算輪数 21 万輪（排水性舗装+熱反射だけは 15 万輪）となるように走行させ耐久性を調査した。舗装の種類は、排水性舗装上に色の異なる熱反射材を塗布した熱反射舗装、開粒度アスファルト混合物の空隙に種類の異なる保水材を充填した保水性舗装、路床・路盤上の遮水シートにより水の移動に制限を設け、さらに表面を白色に明色化した透水性舗装の 3 種 7 工区とした。温度低減効果としては、日最大温度差を約 10 日間平均して比較した。ただし、雨天には温度差が小さくなるので、雨天のデータは除いた。

まず非走行部だけで比較を行うと、“透水性舗装（白色）シートなし”と“排水性舗装+熱反射（灰）”が最も温度低減効果が高いことが分かる。この両者はアルベド（日射反射量/日射量）で同程度であったため同じような効果となったとも考えられるが、熱反射舗装と構造的に近いのは“透水性舗装（白）”



図－1 各種舗装の温度低減効果（7/20～9/9）

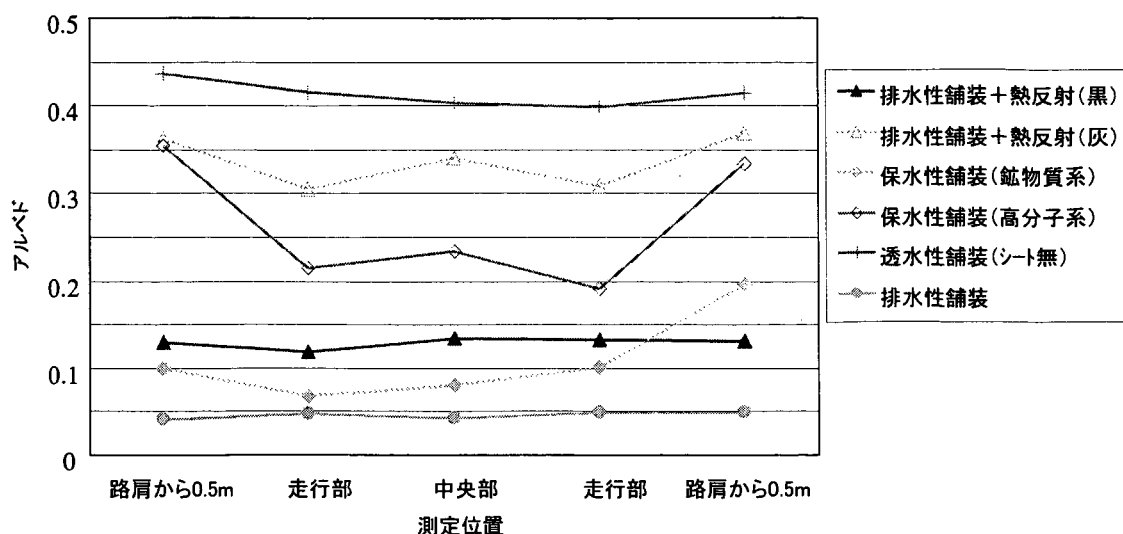


図-2 各種舗装の測定位置毎のアルベド値

路盤上シート”であり、これとの比較から表面の特性では、熱反射舗装（灰）の方が温度低減効果が高いと考えられた。また、透水性舗装で行った白色化は実際の道路では眩惑などの影響や白線が引くことができないなど実用上の問題があるため、極端な白色化をせずに高い温度低減効果が得られる熱反射材料がこの点でも優位と考えられた。

走行部、非走行部を比較すると、いずれの場合も走行部は非走行部より温度低減効果が小さくなっている。走行部は車両の走行によりダメージを多く受けたためと考えられる。ダメージの程度を見るため、図-2に21万輪載荷後の舗装位置によるアルベド値を示す。多くの舗装でタイヤ走行部のアルベド値が低下していることが分かる。この原因は、保水性舗装では車両の走行により保水材料が徐々に損失していくことにより、また熱反射舗装・透水性舗装（白）はタイヤ走行による汚れ、剥がれによるものであった。

構造の違いの影響については、透水性舗装において3タイプを施工し比較した。図-1から分かるようにシートをしないものが最も温度低減効果が高く、シートが表面に近づくほど効果が小さくなっている。これより、路盤、路床などの水分の蒸散の影響があることが考えられた。

4. 流動わだち掘れへの影響

舗装は、アスファルトをバインダとして用いているため、高温になると塑性変形をしやすくなる。このため、夏期の高温時には流動わだち掘れの進行が見られる。これに対し、これまではアスファルトに熱特性を改善させる材料を添加するなどして対応してきた。しかし、アスファルトは感温性の高い材料であるので、路面温度を下げることによってこの流動わだち掘れが減少させられることが考えられる。そこで、今回用いた温度低減型の舗装の流動わだち掘れへの影響を検討した。

流動わだち掘れ量の推定には、土木研究所のこれまでの研究²⁾から作成した(1)式を用いた。

$$D = 0.679 \times Y \cdot L \cdot W \cdot V \cdot T / DS^{0.98} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、D：わだち掘れ量（mm）、Y：供用期間（日）、L：日大型車交通量（台／日）

W：輪荷重補正係数、V：走行速度補正係数、T：温度補正係数、DS：動的安全度

(1)式は、一般道で作成された式であるので、本試験で用いた荷重車の荷重条件と異なるため、荷重補正係数を通常の1.5倍とした。また、温度補正係数は、本実験の実測値から計算した。

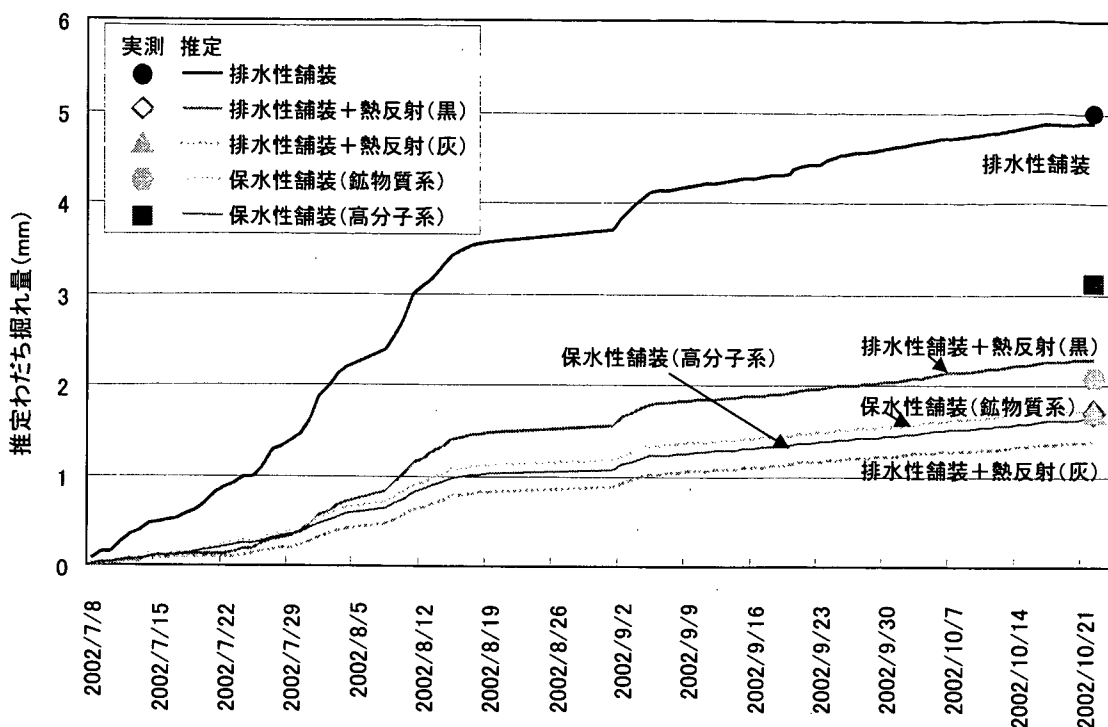


図-3 各種舗装の流動わだち掘れ量の推定（舗装走行実験場）

計算の結果を図-3に示す。荷重車による載荷は10月23日まで行われ、それ以降にわだち掘れ量を測定している。排水性舗装では7月8日からの増加量が5mmであり実測と良く合っているが、その他の舗装では若干実測とは異なっている。これは、わだち掘れ量の測定が数mm程度を評価するには精度が若干低いことと、わだち掘れは流動だけでなく、沈下などもある場合があり、このために計算とは異なったものと思われる。しかし、いずれにしても温度低減型の舗装はわだちが少ない傾向にあり、舗装の耐流動性向上に効果があることが分かった。

5. まとめ

- 1) 熱反射舗装（灰）と透水性舗装（白）の温度低減効果が優れていた。しかし、構造の影響、明度からの実用性を考慮すると、熱反射舗装が最も効果が高いと考えられた。
- 2) 車両の走行により温度低減型舗装の効果は徐々に低下していく。今後は、効果がより高い材料の検討や効果の持続性の高い材料の検討により、さらなる機能向上が期待できる。
- 3) 透水性舗装は通常の舗装よりも水分の蒸散などの影響により路面温度を低減させている可能性がある。
- 4) 舗装の路面温度を低減させることにより、耐流動性向上に大きな効果が期待できることが分かった。

【参考文献】

- 1) 城戸、新田、吉田：遮水層を設けた車道透水性舗装に関する検討、第57回年次学術講演会、土木学会、V-453、2002。
- 2) 伊藤、近藤、池田：アスファルト混合物の動的安定度の目標設定手法の提案、土木技術資料、31(1)、1989

ヒートアイランド現象軽減のための各種対策の提案とその効果

水工研究グループ（水理水文チーム）

1. ヒートアイランド現象の発生原因と軽減対策

都市中心部の大気とその周辺部よりも高温となる現象（ヒートアイランド現象）を引き起こしている原因は、都市の成長による土地利用の変化・地表面の人工化と、人口の集積・社会経済活動の拡大によるエネルギー消費量の増大に大別される（図1）。また、それぞれが複数の異なる要因から成っているため、単一の対策だけでは問題が解決されないのが特徴であり、どのような対策を組み合わせれば原因をどの程度取り去ることができるかを明らかにする必要がある。

本研究では東京23区を中心とした首都圏におけるヒートアイランド現象軽減策の提案と効果の定量化を行うが、その前に、問題の主たる原因について整理しておく。図2は既存の情報（細密数値情報）をもとに、東京23区の土地利用の変遷を示したものである。1974年から1994年までの20年間で大きく変化したとは言えないが、農地や水・緑といった自然の占める面積割合が減少している。東京都の推計²⁾では、1974年から1998年までの間に樹林、草地などの緑と河川、水路、湖沼などの水面が都全体で約70km²（山手線の内側を超える面積に匹敵）失われており、非常に大きな熱的インパクトを大気に及ぼしてきたことが想像できる。土地利用の変化として表面的には現れないものの影響が大きいと考えられる要因として不浸透面積（人工被覆）や建物高さの増大が挙げられる。一方、人工排熱の原因となるエネルギー消費量全体では1970から1998年の間に東京都全体でおよそ1.8倍に増加してきている³⁾。特に、身近な生活空間への影響が大きいと考えられる家庭・業務部門や自動車部門におけるエネルギー消費量はそれぞれ2.8倍と2.4倍の伸びを示している。このように、土地利用とエネルギー消費の両方における過去数十年

の変化によって、都市特有の気象現象の問題が顕在化してきたと言える。また、今後は地球温暖化との相互作用の影響解明も重要であろう。

このような原因を踏まえた上で、ヒートアイランド現象軽減のための有効な対策を考える必要がある。本研究でこれまでに効果の試算を行った対策は、土地利用に関するものとして、水面の再生と屋上緑化の推進といった自然環境の復元対策と、道路や建物などの人工地覆面の改善であり、エネルギー消費に関するものとしては、家庭、業務、

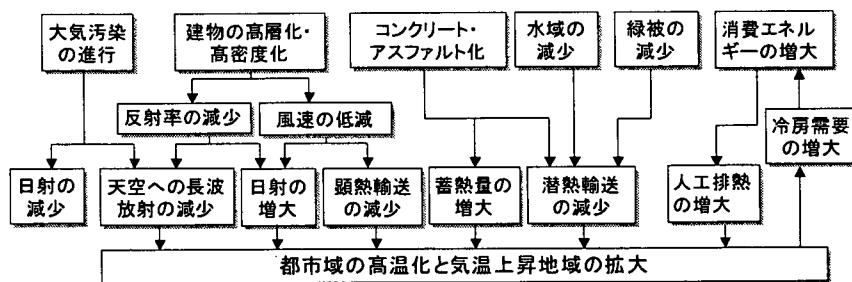


図1 都市におけるヒートアイランド現象の形成要因¹⁾

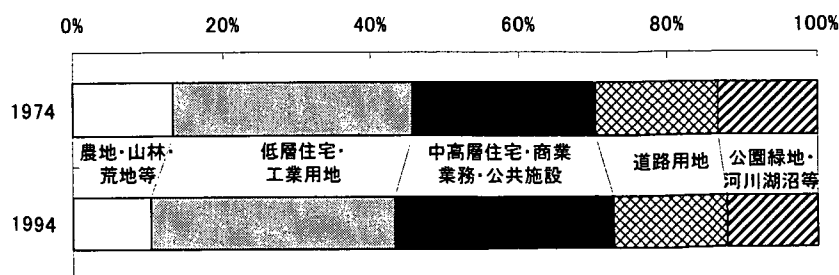


図2 東京都区部における土地利用の変化

運輸部門における省エネルギー対策や、未利用エネルギーの活用などである。

2. ヒートアイランド軽減対策を考えるための視点

ヒートアイランド現象軽減対策の検討にあたって重視されているのは、対策による気温低減あるいは大気への熱負荷の削減による夏期の熱環境の改善効果である。気候はエネルギー消費量を左右することから、年間を通したエネルギー消費への影響も視野に入れる必要があるし、ある対策の実施が逆に自然、人体、生態系などに悪影響を及ぼすことがないようにすることも求められる。

次に考えるべきは、対策の実施費用、広い意味での便益、速効性、持続性、実現可能性であろう。費用に見合う便益があるのならば、上記を考慮の上、ある対策をヒートアイランド軽減のためだけの単目的で実施することもあり得るだろうし、その対策が多くの副次的効果をもたらすのであれば、複合的な価値を評価して、積極的にその対策の導入を図るべきである。しかし、現状のヒートアイランド対策の研究は夏期の気温低減効果の提示に止まっているため、本当にその対策を普及させてよいものかどうか判断できない状況にあると思われる。

速効性や持続性は便益や費用にも影響する重要なファクターである。なぜなら、早く実施できて（速効性）、途中で不具合が生じることなく（持続性）長期間供用できれば、それによる便益も長く享受することができるからであり、時間の概念を取り入れることにより、対策間の優劣も異なって見えてくるものと考えられる。実現可能性というのは、効果や環境影響、費用、便益、速効性、持続性などを総合的に考えて導かれる答えであるが、最初から実現が難しいと判断できる対策もあるだろう。

3. メソスケールシミュレーションモデルを用いた都市スケールの効果の定量化

都市特有の高温化を抑制するための対策には様々なスケールでの評価が求められる。局所的な対策の効果を詳細に把握するには街区スケールの気象シミュレーションが必要であるが、対策が広域的に普及したときの社会全体への影響・効果を評価するという観点からは、都市スケールでのシミュレーションによって全体像が見えてくると考えられる。本研究では都市全体としてヒートアイランド現象を緩和させるという対策提案を目的にしていることから、後者のアプローチにより検討を進めてきた。以下では、効果定量化のツールとなるメソスケールシミュレーションモデルの概要を説明する。

1) モデルの概要

これまでに都市特有のヒートアイランド現象を解明するとともに、ヒートアイランド現象軽減策の効果を推定するため、様々な数値モデルが開発・利用されてきたが、必ずしも気象観測結果を十分な精度で再現できるまでには至っていないと考えられる。その理由は色々考えられるが、複雑な土地利用、人工排熱、都市キャノピーといった都市特有の気象形成要因の存在とそのモデル化の難しさが一因として挙げられる。

本研究で用いたシミュレーションモデルは、米国ペンシルバニア州立大学で汎用の気象計算モデルとして開発され、その後、NCAR（米国大気研究センター）においてさらに改良されたMM5を基本にしている。MM5は非静力学方程式等に基づいて3次元の大気流れと圧力、気温、水蒸気量分布等を予測できるメソスケールモデルで⁴⁾、対流システムや前線、海陸風循環や山谷風循環などの再現が可能である。今回、MM5を首都圏のヒートアイランド現象のシミュレーションに用いるにあたって、以下の修正を行った。地表面フラックスの算定部分には、サブグリッドのパラメータ化手法を加えるとともに土壌水分量を予測する地表面モデル⁵⁾を組み込んだ。地表面の土地利用や標高には細密数値情報、国土数値情報、

数値地図情報を利用した。また、接地層下面に人工排熱量の時空間変動値を潜熱フラックスと顕熱フラックスの形で与えた。都市キャノピー層（建築物等が存在する大気下層）の存在は大気の熱輸送や放射量に大きく影響を及ぼすと考えられることから、キャノピー内で長波の大気放射が抑制される現象を考慮した。

2) モデルの適用性

首都圏を対象にモデルの適用性を検証した。計算対象領域は関東平野を含む366km四方の母領域と東京23区を含む114km四方のネスト領域である（図3）。母領域の解像度は6km、計算メッシュ数は61×61、ネスト領域は2km、57×57とした。鉛直方向は100hPaの等圧面までを25層に分割した。母領域の初期条件、境界条件には計算対象日を含む全球解析データを用いた。ネスティング手法には2-Way nestingを用いた。雲モデルはなし、放射モデルには気温に依存する大気冷却率を用いるSimple coolingを用いた。

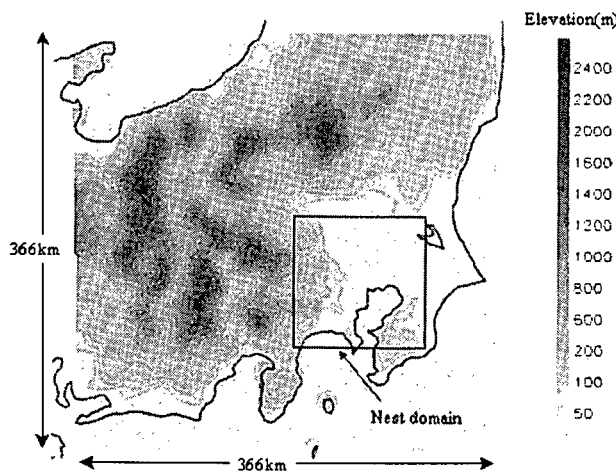


図3 母領域とネスト領域の計算範囲と標高

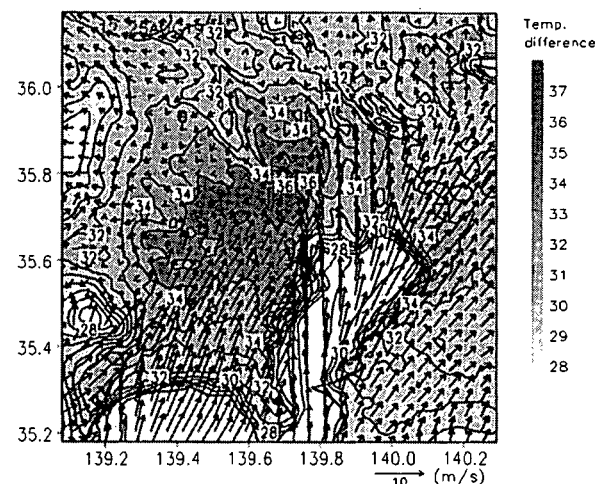


図4 ネスト領域の風と気温場の計算結果

まず、現状のヒートアイランド現象を対象にモデルの検証を行う。シミュレーションは、1995年8月23日21時～8月26日5時を対象期間とした。ネスト領域における地上1.5mの気温と地上10mにおける風速ベクトルの計算結果を図4に示す。この日の計算結果では、東京都心部を中心とする高温化により北よりの郊外風が発生して、海風の侵入が遮られている様子が確認された。また、東京都のAMeDAS地点全てと埼玉県、千葉県、神奈川県的主要なAMeDAS地点における実測気温と計算結果（地上1.5m）を比較し、各地点とも気温の絶対値や最高気温の発生時刻、日変動のパターンは概ね良好に再現されていることを確認した（図5）。

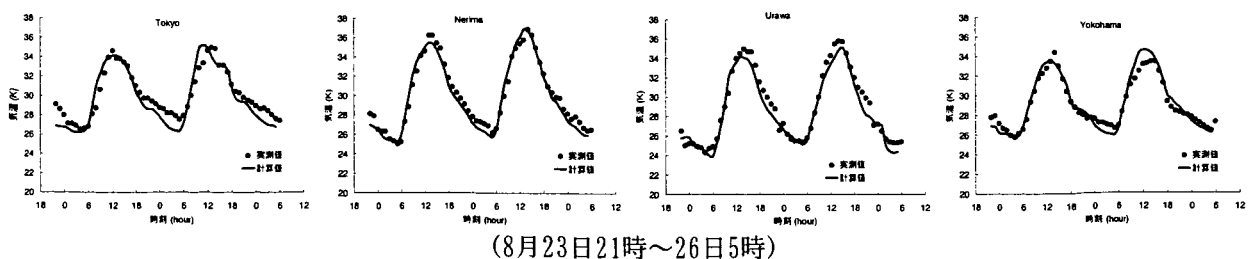


図5 AMeDAS地点における計算結果と実測値の比較例

4. 水と緑を活用したヒートアイランド現象軽減策の提案

水面や緑地が大気を冷却する作用は我々も身近に経験することであるが、水と緑は、微気象緩和ばかりでなく、都市景観の向上、騒音低減、大気汚染物質の吸着などの様々な環境的価値を有しており、都市の空間形成にとって重要な役割を果たしている（図6）。

このような期待と裏腹に、都市の発展に伴って水面や緑地が減少した結果、欧米諸都市に比べてこれらの自然が量的に不足している。前述のように、東京では、1974年から1998年までの25年間で樹林、草地などの緑と河川、水路、湖沼などの水面が都全体で約70km²失

われた。都市計画区域内人口に対する都市公園面積は、昭和1967年に2.4m²/人であったものが1998年度末には7.7m²/人と3倍以上にのびているものの、欧米諸国の約1/3と大きく立ち後れている⁶⁾。全国20都市の水面積の変遷に関する調査結果⁷⁾によると、水面積は江戸時代末期で平均10.9%であったが、現況（調査時点）では7.6%に減少し、水面積が10%を超える比較的水辺の豊富な都市の数も11から6に減少している。

最近になってこのような状況を改善して、水と緑を活かした都市づくりが叫ばれるようになってきている（例えば⁸⁾）ことから、今後、ヒートアイランド現象の緩和により環境負荷の少ない快適な都市づくりを進めていくためには、水や緑の効果を積極的に活用する方策が有効であると考えられる。

1) 屋上緑化の推進

東京都では、屋上の面積（ビルの管理に必要な設備の設置面積を除いた面積）の20%以上を樹木、芝、草花等で緑化するというビル緑化を加えた自然保護条例を平成13年4月から施行している。農地・草地が減少していることや地上の緑化可能地が少ないことから、屋上緑化によるヒートアイランド現象の緩和が期待されるが、屋上緑化の効果が都市スケールでどの程度あるのかについては十分に解明されているわけではない。そこで、緑の東京計画²⁾に基づき、15年後のみどり率が現状の28.6%から32%に増加するケースと長期的な屋上緑化の普及によりみどり率（水面と緑被の占める面積率）が45%となるケースを想定して、広域的な気温低減効果を試算した。なお、みどり率45%を達成するためには建物用地において50%が緑で覆われている必要がある。

屋上緑化のモデル化の詳細は省略するが、基本的には、屋上緑化面を地上の緑地と同様に扱う。屋上緑化には植物による蒸発散機能の他に、これまでコンクリート等により覆われていた屋上・屋根面が植物・土壌により覆われることによる表面温度の低減、建物内部への熱負荷の減少や室内温度の低減効果があるが、本モデルでは、屋上緑化による蒸発散の促進と表面温度の低下効果が考慮されている。

屋上緑化により東京23区のみどり率が45%まで増大した場合の気温低下量と風系の変化を図7に示す。日中は気温低減効果が徐々に大きくなりながら、海風により効果の影響範囲が内陸方向に広がっていく。AMeDAS測定地点における気温変化量（緑化後の気温から現状の気温を差し引いた値）は、東京（大手町）や練馬といった緑化対象域内の地点では緑化により最大で0.7℃程度の気温低下が見られ

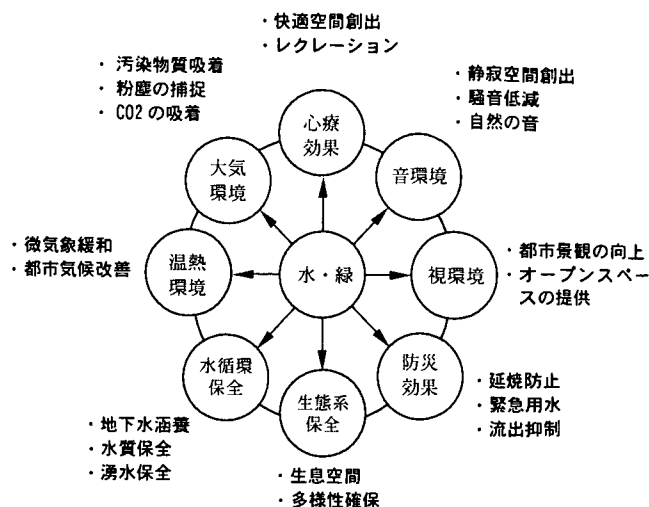


図6 水と緑がもたらす様々な効果

るが、緑化対象域から外れる沿岸部の横浜や船橋ではほとんど気温の変化がみられない(図8)。東京(大手町)と練馬では、日射のない時間帯でも0.3℃程度気温低下が見られているが、これは屋上緑化による屋根面温度の低下に起因するものである。図9には屋上緑化実施前の顕熱輸送量、潜熱輸送量、地中伝導熱量(水中、建物への伝導熱量も含む)及び人工排熱量の計算結果を示す。また、図10には屋上緑化実施後のそれぞれの熱量から実施前の熱量を差し引いた値を示す。これらの値は東京23区内の一定範囲(北緯35.7~35.8, 東経139.75~139.85)の領域平均値である。みどり率が約16%増加した(緑地の面積が1.57倍になったことに相当)ことにより、潜熱輸送量の最大値は50%増加し、逆に顕熱輸送量は緑化実施前の50%程度に減少しており、これが気温低下の要因になっていると言える。

15年後、屋上緑化によりみどり率が32%になった場合の東京と練馬における気温の低下量は日中で約0.1℃と非常に比べ小さい。これは、みどり率45%の場合は現状から緑被率が16.4ポイント増すが、みどり率32%の場合は現状から3.4ポイント増で、緑化増分が約1/5しかないことによる。既往の研究によると、東京23区の屋上緑化可能地(荷重に耐える建物の屋根面積の総計)はおよそ43km²と推定されている⁹⁾(緑被率に換算すると約7ポイントの増加)ことから、屋上緑化以外の緑化対策(壁面緑化、住宅での緑化など)も組み合わせていくことを考える必要がある。

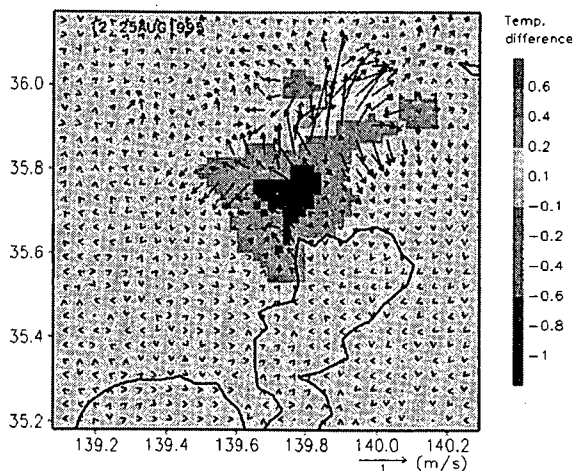


図7 屋上緑化による地上気温と風速ベクトルの変化量の計算結果(8月25日12時)。対策後から対策前の値を差し引いた結果を示す。

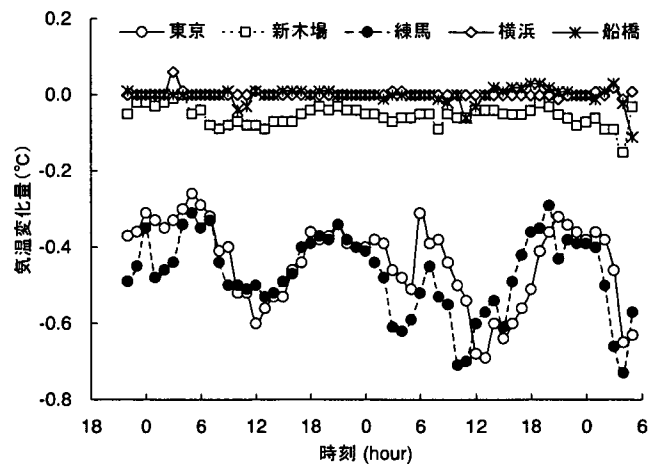


図8 屋上緑化実施による代表地点における気温低下量の計算結果

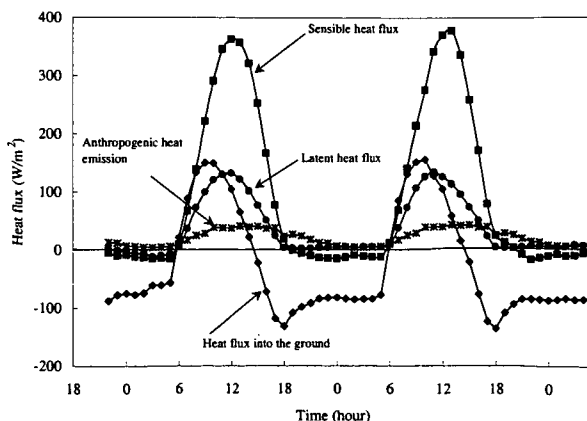


図9 現状における領域平均の熱収支

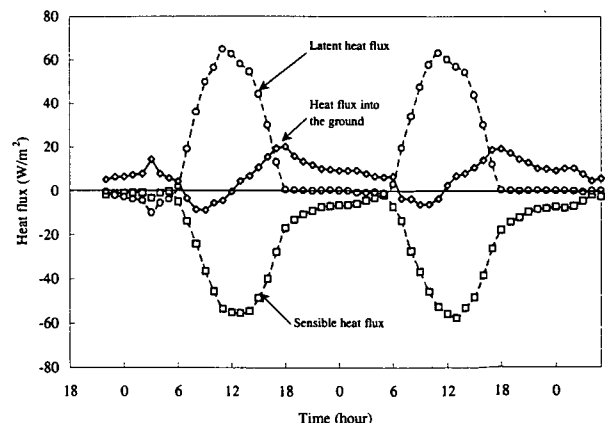


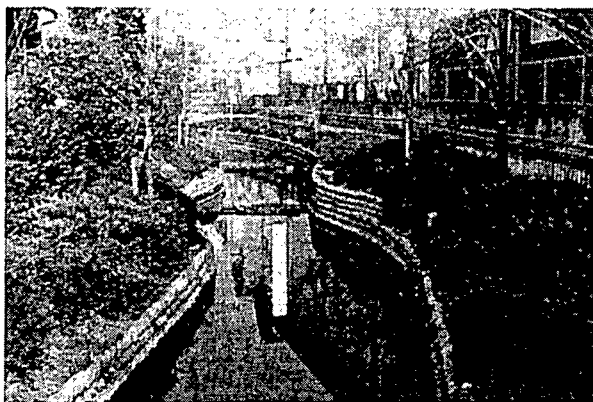
図10 屋上緑化(みどり率45%)による領域平均の熱収支の変化(緑化後の地表面熱収支各項の値から緑化前の値を差し引いたもの)

2) 水面の再生

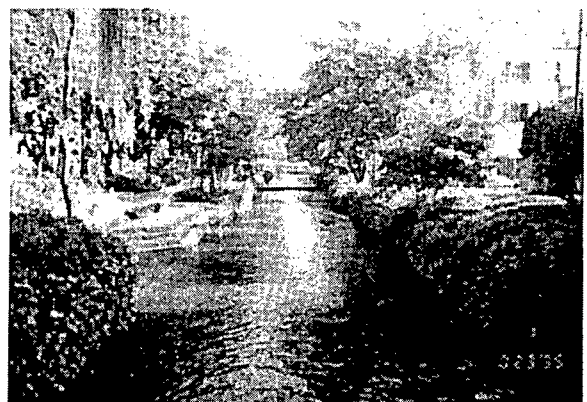
昔の東京（江戸）の水面積について、松浦・島谷⁷⁾が明治13年測量の第一軍管区地方迅速図を用いて行った試算結果がある。これによると、当時の東京の市街地面積4,046ha（現在の山手線内側面積が6,200ha）に対して当時の東京の水空間面積は443haであったとしており、水空間が市街地に占める割合は10.9%となる。つまり、1世紀以上前の状況としては1割程度が水面であったと考えられる。一方、現状はどうかといえば、例えば細密数値情報（1994年）によると、23区全面積に対する水面積（河川・湖沼等）の割合は4.8%である。水面の変遷に関する既存の調査事例は非常に限られているが、それらをもとに判断すると、23区全体では河川等の占有面積が過去およそ100年間で10%から5%程度に減少したものと想定された。

このような水面減少には戦後復興や高度経済成長に伴う都市化が深く関わっている。昭和初期には武蔵野台地上の零細河川が徐々に姿を消していき、戦後復興のために、旧江戸城の外濠をはじめとして、運河が焼け跡の残骸、焼土などによって埋め立てられ、その後は市街地の中小河川も谷筋の排水路としての役割しか果たさなくなり、道路化していった⁹⁾。江東地区の農業用水路網は、30年代の経済の高度成長期における都市化の影響により、雑排水路—下水道的な存在となっていた¹⁰⁾。八十川ほか¹¹⁾によると、廃止された河川の上部は公園や緑道、道路、宅地などに転用されており、廃止流路の上部空間は75%が道路に転用され、下部空間の33%は覆蓋部分（下部空間は水路や下水道として利用されているものが71%）で残りは埋め立て部分であるというような実態を明らかにしている。

既に埋め立て・覆蓋化された水面を再生することはそう簡単にできるものではないが、河川に対する防災、環境、景観、舟運、気候緩和など様々な面からの期待が大きいことも事実であり、かつての豊かな水面を湛えた魅力的な都市空間を取り戻すことによって、過度に人工化した東京に自然の潤いを蘇らせ、都市を再生させることができるのではないかと考えられる。例えば、治水と環境の両立を図りつつ水面を取り戻す方法として二層化された河川（写真—1）が考えられるし、蓋掛けされた河川の開渠化や、農業用水路等の再生（写真—2）、水循環の健全化による平常時流量増や湧水の復活などの様々な対策が想定できる。そこで、本研究においては将来のシナリオとして様々な水面再生策の実施によって東京23区内で水面積の割合を現状の倍に戻した場合を想定する。水面再生のための用地としては、公共公益施設用地と道路用地を活用すると想定した。シミュレーションでは、各計算メッシュ内でメッシュ面積の最大2.5%分の公共公益施設用地と同じく最大2.5%分の道路用地（いずれも緑被部分は除いた面積）が水面に変わるものと仮定する。これにより、23区内で水面積が5%増加し、約10%になると見込んだ。



写真—1 二層化された河川の事例
(宇都宮市・釜川)



写真—2 農業用水路が親水公園となった事例
(岡山市・西川緑道公園)

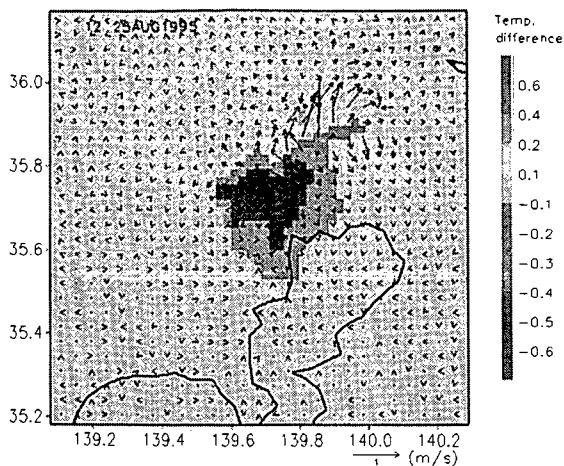


図 11 水面再生による地上気温と風速ベクトルの変化量の計算結果（8月25日12時）．対策後から対策前の値を差し引いた結果を示す．

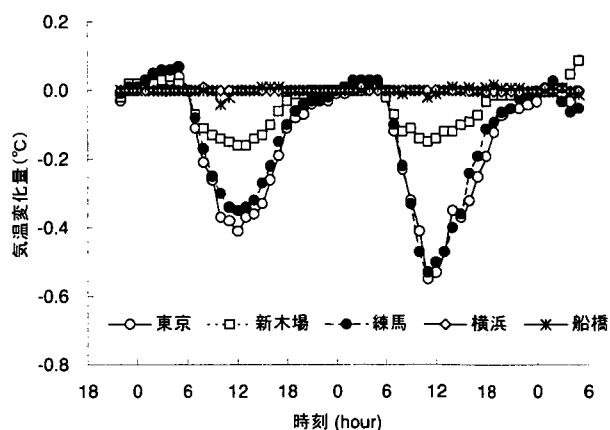


図 12 屋上緑化実施による代表地点における気温低下量の計算結果

河川等の水面再生による気温低下量と風系の変化を図 11 に示す．水面再生の効果は早朝から水面増大域全体に現れ，日中は最大で 0.6°C 以上の気温低下が発生しうることがわかった．気温変化量を地点別に整理したものが図 12 である．水面の増加量が 5% と小さいにもかかわらず，東京（大手町）と練馬における気温低下量の最大値は屋上緑化の場合とあまりかわらない．図示はしないが，領域平均で見た場合，水面再生により水体の貯熱量が増えて，その分，日中の顕熱輸送量が減少している一方，潜熱輸送量の増加はごくわずかであった．水体の貯熱が気温低減の主たる要因であることがわかる．

5. 舗装の熱特性改善によるヒートアイランド現象の緩和効果

舗装の高温化を防止して都市の気温上昇を抑制することを主たる目的とした新たな舗装として，保水性舗装と高反射性舗装（遮熱性舗装）が開発されてきている．保水性舗装は，開粒アスファルト舗装の空隙に保水性能を有する細粒やグラウトなどを充填して，雨水などを吸水し，晴天時の蒸発によって舗装の温度上昇を抑制しようとするものであり，一部の自治体においては実道への試験施工等に基づく性能把握が行われているが，効果の持続性，透水性能との両立，騒音低減性能への影響という観点から更なる技術的改善が必要である．一方，高反射性舗装は，舗装表面に特殊塗料を塗布して，日射の反射率を高くすることを意図したもので，安定的な表面温度低減性能を期待できるとともに，既設のアスファルト面に施工が可能であること，透水性舗装や排水性舗装への施工も可能であることから，実用的で速効性のある対策として期待できる．温度低減性能の更なる向上とともに，みかけの色と性能の関係，耐久性，反射日射の影響評価などが検討を要する課題として挙げられる．

1) 保水性舗装による都市の高温化抑制効果の推定

東京23区の全道路に保水性舗装を導入した場合の気温低減効果を試算した．計算に際して，保水性舗装の蒸発効率（飽和の蒸発量に対する実際の十発量の比率）の値は0.06，0.15（ β 法の定数 β ）の2通りを与えた．蒸発効率は対象期間中，一定値とした．

保水性舗装導入（蒸発効率0.15の場合）による気温低下量と導入後の風ベクトルを図13に示す．日中の時間帯において，都心部で保水性舗装の効果が認められる．また，日中は気温低減効果が徐々に大きくなりながら，海風により効果の影響範囲が内陸方向に侵入していく様子が確認できる．一方，蒸発効

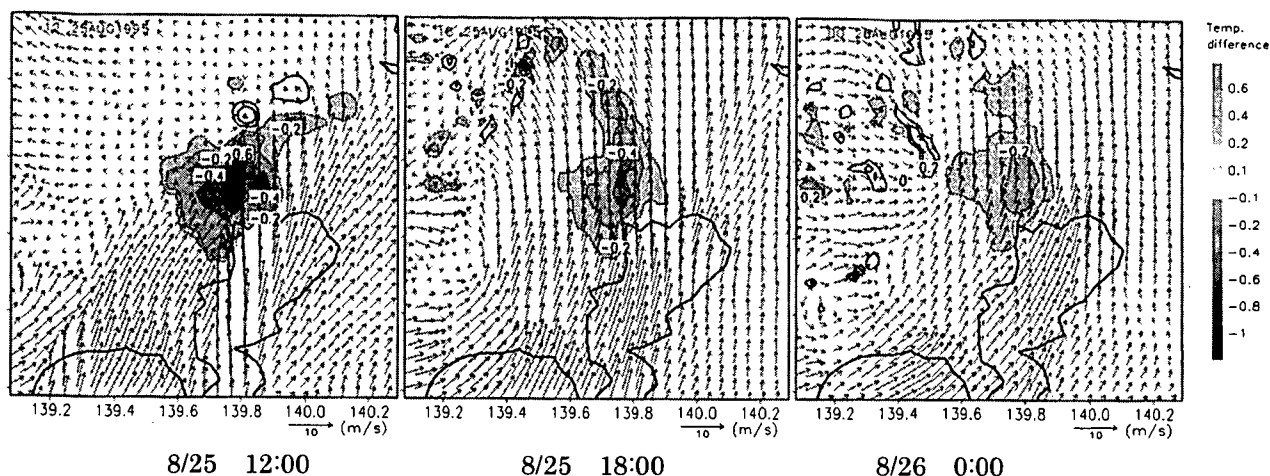


図13 保水性舗装導入による地上気温の変化量と風速ベクトルの計算結果
(気温は導入後から導入前の値を差し引いた結果、風速ベクトルは導入後の結果を示す)

率0.06を与えた場合（より乾燥した状態を想定）には、例えば大手町地点における気温低下量の最大値は0.45℃となり、蒸発効率0.15の場合の半分程度の効果に止まる。

2) 高反射性舗装による都市の高温化抑制効果の推定

高反射性舗装による都市スケールの気温低減効果を推定するにあたり、まず、舗装供試体レベルでの温度低減性能の実測による性能の確認を行った。図14は数種類の反射性塗膜を用いた高反射性舗装の表面温度が標準の密粒舗装に比べてどの程度低下するかを示したもので、表面温度差が大きいほど、温度抑制効果が高いことを示している。8月の晴天日において、灰色系で15℃以上、黒色系の舗装でも10℃近い温度低減が確認された。また、密粒舗装と高反射性舗装の熱収支を整理したものが図15であるが、高反射性舗装では、密粒舗装に比べて顕熱輸送量が日中で半分程度に減少していること、また、午前、午後で顕熱輸送量がほとんどない時間帯が密粒舗装に比べて長いことがわかる。これは蓄熱量が少ないことを意味しており、ヒートアイランド化による熱帯夜問題解消にも効果的であることが示唆される。

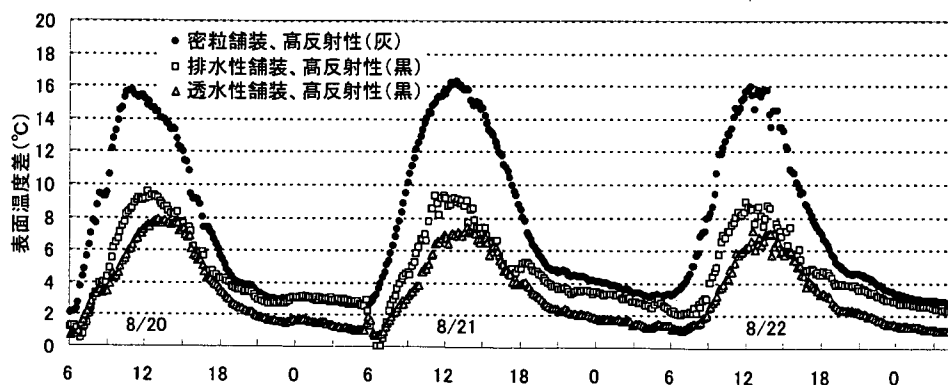


図14 標準舗装に対する表面温度低減量の経時変化

以上の性能を踏まえて、東京 23 区の全道路に高反射性舗装を導入した場合の気温低減効果を試算した。計算条件としては、現状の舗装面のアルベド値は0.1、高反射性舗装のアルベド値は0.6を与えた。高反射性舗装導入による気温変化量と顕熱輸送量の変化量をそれぞれ図 16 と図 17 に示す。都心部で正

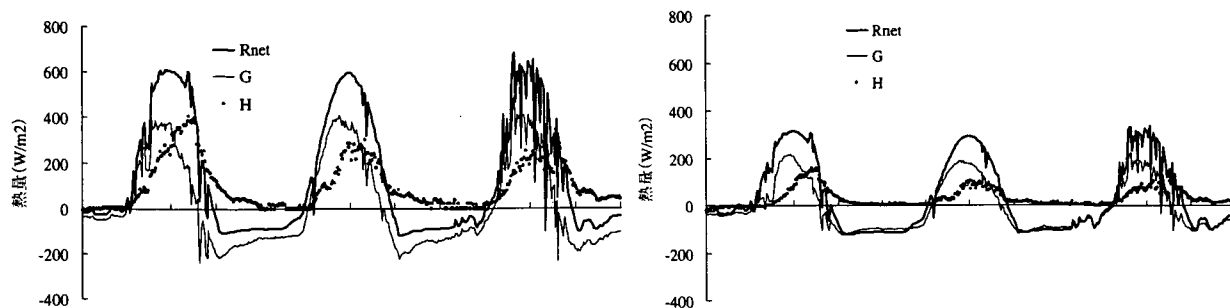
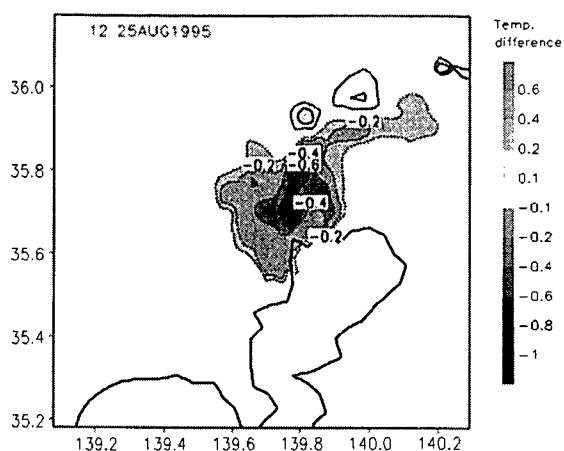
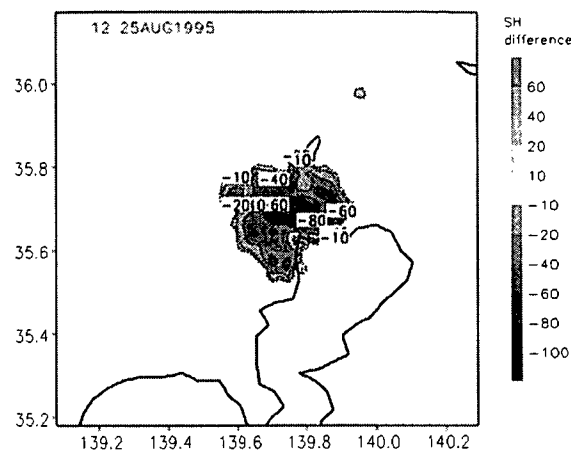


図15 舗装面の熱収支（左：密粒舗装，右：密粒舗装+灰色特殊塗料）



8/25 12:00

図 16 高反射性舗装導入による気温の変化



8/25 12:00

図 17 高反射性舗装導入による潜熱輸送量の変化

午には 0.8°C 以上、午後 2 時でも 0.6°C 以上の気温低減効果が認められた。また、顕熱輸送量は 80W/m^2 以上も減少しており、保水性舗装や屋上緑化に匹敵する量となっていた。いずれも、舗装の表面温度が低下したことに起因している。なお、舗装表面温度の低減量に関する計算結果は前述の実測の低減量よりもやや過少評価されていたことと、路面反射が建物により吸収される影響が考慮されていないことから、表面温度算定上のスキームやパラメータに改良の余地がある。

6. 対策間の効果比較

前述の水面再生、屋上緑化、保水性舗装、高反射性舗装の効果に関する試算結果に基づき、水面 10%あたり、緑被率 10%あたり、保水性舗装・高反射性舗装導入面積 10%あたりの気温低下量として整理したものが図 18 である。大手町、練馬は AMeDAS 測定地点、領域平均の値は東京 23 区内の一定範囲（北緯 $35.7 \sim 35.8$ ，東経 $139.75 \sim 139.85$ ）の平均値である。屋上緑化のみのケースと水面再生のみのケースの計算結果を比較す

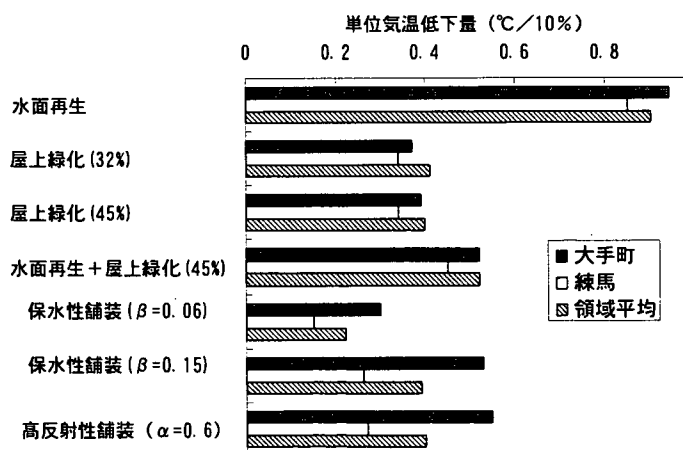


図 18 各種対策実施による気温低減効果の比較

ると、12 時における単位気温低下量は水面が緑地の倍程度の値を示しており、水面再生は、緑地を増やすのに比べて半分以下の面積で同等な効果を得られることがわかる。これは水面温度が緑地や他の地表面温度よりも相対的に低く、かつ、貯熱効果が大きいことによると考えられる。保水性舗装については、蒸発効率 0.15 の場合には屋上緑化なみの単位面積あたりの効果を示す一方、湿潤度が下がると効果も大きく減少する。高反射性舗装では、領域平均で見ると保水性舗装をわずかに上回る単位気温低下量となっている。これらの対策を組み合わせたときの効果はそれぞれの効果のほぼ線形和によって評価可能であったことから、例えば、水面を全土地利用面積の 5% 増加、屋上緑化を同 10% 増加、高反射性舗装を同 10% 増加させることにより、平均的には約 1.3℃ の気温低下が可能という結果が導かれる。現実には、対策ごとの特性の違い、地域ごとの土地利用、街区構造などの違いを考慮しつつ、地域ごとに最も有効な対策を組み合わせることによって、最小の投資で可能な限り最大の効果を発揮する必要がある。

7. 現状と将来における人工排熱量の推定とその影響予測

1) 現状の首都圏人工排熱量の推定

都市における様々な活動によって発生する人工排熱は、ヒートアイランド現象の大きな原因の一つと考えられており、人工排熱の時空間分布についてはこれまでも細密数値情報等の国土基盤情報を用いた推定が行われてきたが、多くは東京 23 区を対象とし、現状の推計に止まっている。しかし、後述するシミュレーション結果によると、人工排熱の広域的な発生と大気への放出により、特に夕方から夜間にかけて内陸部の気温形成に大きな影響を及ぼすことが明らかになってきた。したがって、大きな熱の発生源である東京都心部のみならず、周辺部まで含めた時空間分布の推計が必要である。

人工排熱量推定手法は木内・吉谷^{1,2)}に基づくが、日射の透過や人体発熱に由来する分は今回の結果には含めていない。以下、推定の概要と結果を紹介する。本研究においては既存メッシュデータや都県から収集したデータ等を用いて、首都圏における民生家庭部門、民生業務部門、運輸部門の排熱量の時空間分布を定量化するとともに、後述するように 2010 年時点での各部門の人工排熱量変化シナリオを作成し、削減対策の有無による排熱の増減量を算出した。

人工排熱削減策を考える場合、まず、人工排熱量に占める各排出源の割合を知る必要がある。図 19 は、現状人工排熱量（顕熱分のみ）の時間変動の算出例を示す。東京都において日中は全排熱量に占める業務部門の割合が大きいが、夕方以降は、家庭部門、運輸部門の割合が増加していることがわかる。埼玉県では、日中、運輸部門が支配的で、夕方以降は家庭部門が高い割合を占めている。これは意外かもしれないが、業務部門の排熱は全量が顕熱ではなく、冷却水による潜熱輸送も相当量あることによる。

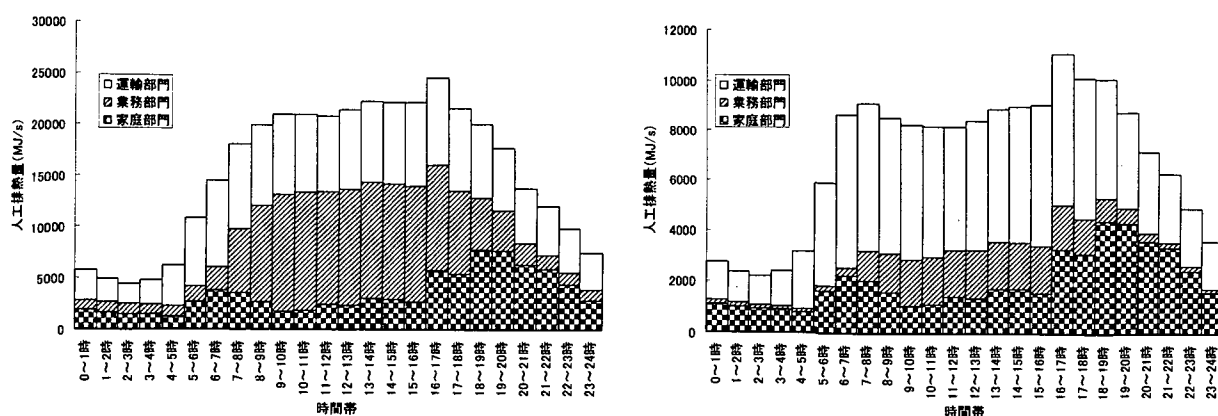


図 19 人工排熱量（顕熱）の時間変動（左：東京都，右：埼玉県）

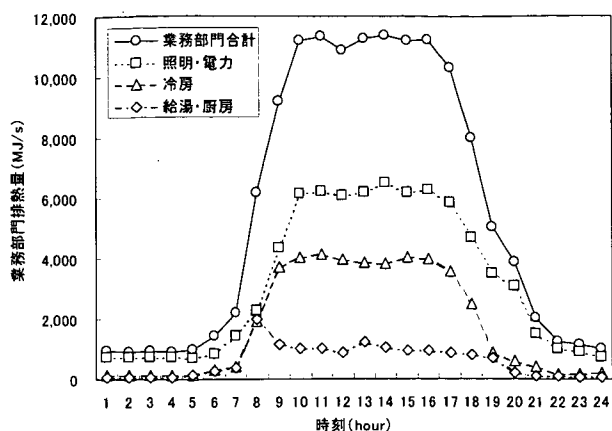


図 20 業務部門排熱量の内訳（東京都）

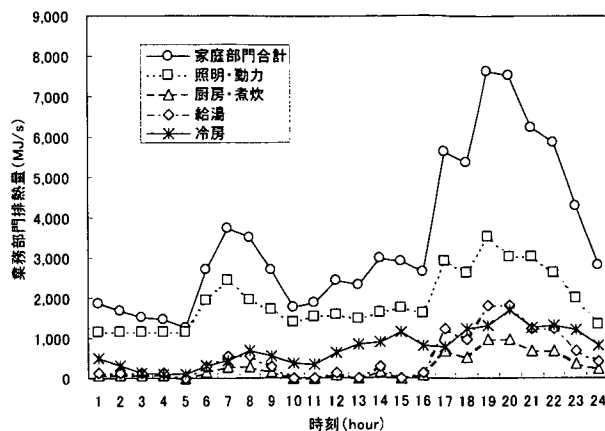


図 21 家庭部門排熱量の内訳（東京都）

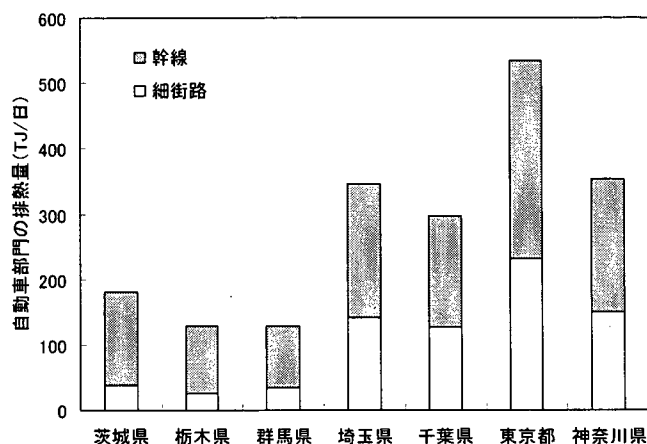


図 22 各都県における自動車部門排熱量の推定値比較

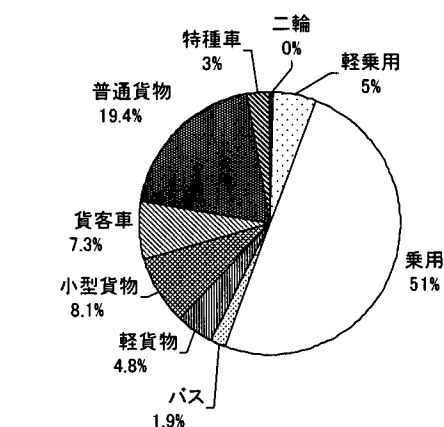


図 23 自動車部門排熱量の内訳（東京都）

図 20, 21 は東京都における業務部門と家庭部門の排熱量内訳の時間変化を示している。業務部門では、日中ほぼ一定の割合で排熱が発生し、照明・電力に由来する排熱が冷房機器の駆動用エネルギー消費に起因する排熱を上回る。一方、家庭部門では朝と夜間の2つの時間帯でピークが見られることや、照明・動力由来の排熱が多いことがわかる。

図 22 は自動車排熱量の算定結果を都県別・道路種別に表示している。なお、燃料販売実績に基づく推定値に較べると、図 22 の結果は 28%程度小さい値であった。1 都 3 県では細街路交通に由来する排熱量が幹線交通に匹敵する量であることがわかる。図 23 には東京都全体における車種別の排熱量内訳を示す。乗用車や軽乗用車が半分以上の排出源で、40%程度は貨物車に由来していることがわかる。

業務部門・家庭部門・自動車部門合計の日排熱量

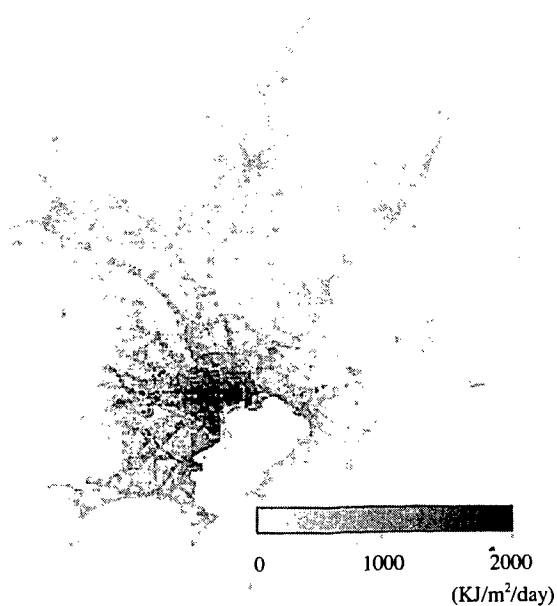


図 24 民生・運輸部門からの日排熱量空間分布

分布を図 24 に示す。都心部は周辺よりも格段に多量の人工排熱が放出されていることがわかる。以上の検討結果を整理すると、東京都における日あたり排熱量は首都圏 1 都 6 県の日あたり総排熱量の 38% であり、首都圏全体では運輸部門の占める割合が全体の 43% と最も高いことが判明した。また、業務部門からの排熱が卓越するのは日中の都心部に限定されている。最も現象が深刻な東京都区部においては、日中の業務部門の冷房、照明・電力由来の排熱削減と、夜間の家庭部門の照明・動力由来の排熱削減が効果的であろう。

2) 将来の人工排熱増による広域的な熱汚染

今後の我が国の人口は、2010 年前後まで微増で推移し、その後は減少の一途をたどるとされていることから、何らの対策を打たない場合、人工排熱は増加を続け、ヒートアイランド現象は今後数十年にわたって解消されずに進行する恐れがある。様々な対策を実施しても、将来人工排熱が増大すれば、対策の効果を帳消しにする可能性を持っている一方で、屋上緑化・壁面緑化や高反射性舗装などの対策でコンクリート・アスファルトによる建物内部への熱負荷を減らして、直接的な排熱削減につながる対策もある。したがって、人工排熱量の抑制によりヒートアイランド現象を緩和するには、将来のエネルギー需要動向の予測や省エネ技術の進展を考慮しながら将来の排熱量時空間分布を推定し、排出原因の分析や気温への影響を明らかにする必要がある。

そこで、本研究においては、近い将来(2010 年)の人工排熱量の推計も行った。推計条件の詳細は文献 12) に譲るが、結論としては、省エネ努力等の対策がない場合、首都圏全体における人工排熱量は現状の約 3 割増、東京都でも 3 割増の増加となることが予想された。また、徹底した省エネ努力によっても、首都圏全体の将来人工排熱量は、現状排熱量の 93% 程度までしか削減できないと推計された。

仮に将来の人工排熱増が起こった場合、現状よりもヒートアイランド現象がどの程度悪化する可能性があるのか試算した。将来の排熱増シナリオは文献 12) に基づいており、首都圏全体では約 30% 増加すると想定した。図 25 には地上 1.5m における気温と地上 10m における風速ベクトルの変化量の分布を示す。排熱増の影響は朝から現れ、特に排熱量の多いエリアで気温上昇が大きくなっている。日中は、都心部で 0.4℃ 以上の地上気温の上昇が見られ、夕方から夜間にかけて気温の上昇域が内陸部に移動するとともに、その影響範囲が拡大していることがわかる。現に、首都圏内陸部の埼玉県や群馬県における高温化現象が確認されており、排熱源の広域化(都市の拡大)とエネルギー需要の増大に伴い、ヒートアイランド現象は、今後、さらに広域化する恐れがあると予想される。また、排熱量の増大による気温の上昇は冷房に起因する排熱量のさらなる増大をもたらすことにも注意が必要である。

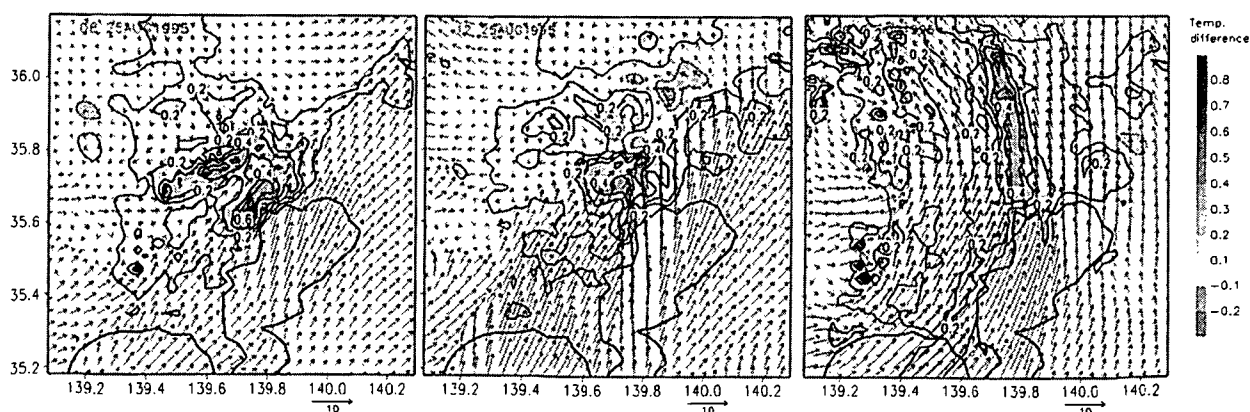


図 25 将来の人工排熱増加に伴う気温上昇量の計算結果(左: 8 時, 中: 12 時, 右: 20 時)

8. 都市の排熱が水域に及ぼす影響

都市の排熱に関する研究は、大気への影響を主に進められ、水域への影響については見逃されてきたが、東京湾においては、鞭毛プランクトンの繁殖時期が早まり、夏に起きるはずの赤潮の発生が早まり始めていると報告され、都市からの排熱が一因ではないかと考えられている。一方、ヒートアイランド緩和対策として、これまで大気に放出していた都市の排熱を水域に排出するシステムが考えられるが、水域への新たな熱負荷による生態環境への影響が心配される。そこで、東京湾において実際に水温上昇が生じているのか、生じているとしたら、一体何が水温上昇をもたらしているのだろうかという観点で分析した結果を紹介する。

過去 30 年以上にわたる東京湾奥部の水温データの分析結果¹³⁾によると、図 26 に示すように、特定の時期に限ってみると、東京湾の表層水温が経年的に上昇傾向にあることがわかる。また、都市の発展や生活様式の変化による水とエネルギーの消費量増大に伴い、下水道を経由して公共用水域に排出される下水放流水温や放流熱量も経年的に大きく増加してきていることが明らかとなった（図 27、図 28）。東京湾の水温上昇傾向が都市からの放流水温・熱量の増大によるものかどうかについてはさらに分析する余地があるものの、「都市の気温を下げる」ためのヒートアイランド対策が別の悪影響を及ぼすことがないかどうかという総合的な視点で対策を考えることも重要である。

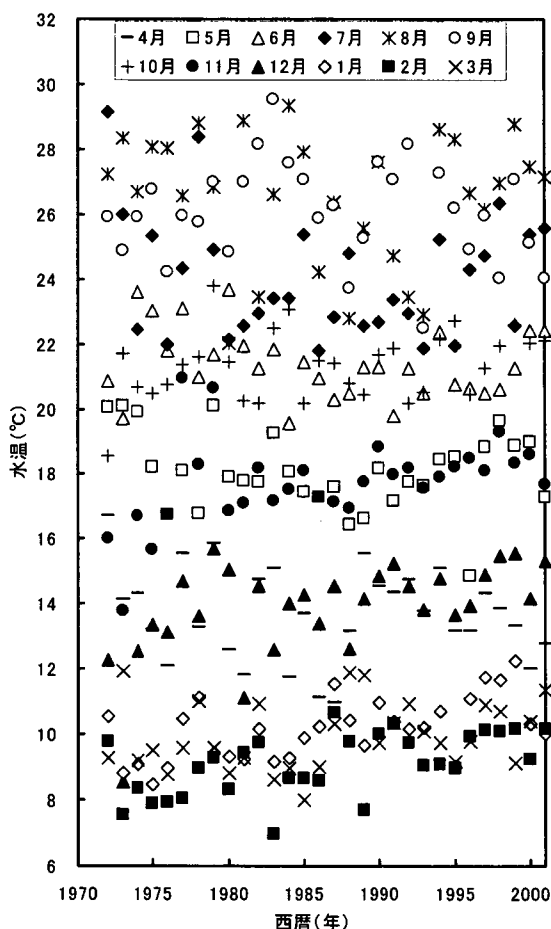


図 26 東京湾の表層水温の経年変化

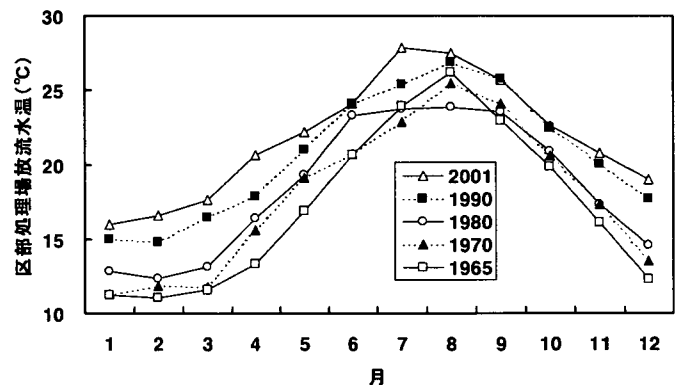


図 27 月別放流水温の経年変化

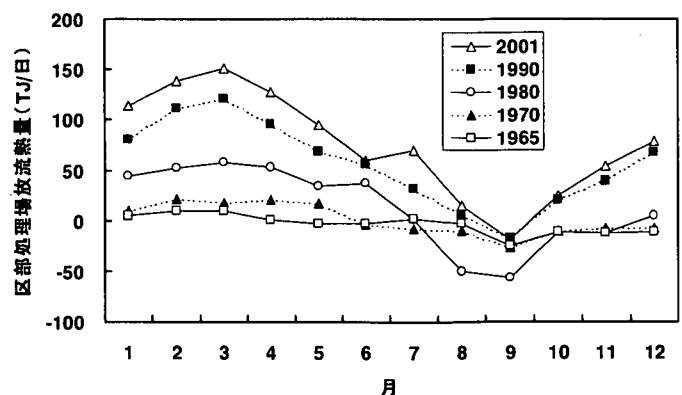


図 28 月別放流熱量の経年変化

9. ヒートアイランド軽減による便益

ヒートアイランド現象の軽減対策実施がもたらす便益についての検討事例は非常に少ないが、例えば、

Rosenfeld ら¹⁴⁾ はロサンゼルス市域を対象として対策の効果推定を行い、空調エネルギー消費削減で年間 1.75 億ドルに相当する効果があり、光化学スモッグ削減効果はその倍もあると見積もっている。

ここでは、東京都における対策を想定して、ある対策を実施することによる気温低減による便益を簡単な方法で見積もってみる。ここで言う便益とは貨幣換算された価値であり、気温低減によるエネルギー消費量（電力由来のみ、実際にはガスもある）の削減効果と、それに伴う地球温暖化ガスの排出削減効果を対象とする。仮に、年間 60 日、東京都で 1 日のうち延べ 10 時間において気温が 1 度低下するとしよう。7、8 月の平日データより算出される電力 10 社合成最大電力の気温感応度は 2000 年時点で 500 万 kW/℃に達する。東京都はそのおよそ 1/10 を占めることから、削減される電力量は 50 万 kW/℃ $\times$ 1℃ $\times$ 10 時間 $\times$ 60 日=30,000 万 kWh となる。これを、夏期昼間の業務用電力料金単価（12 円/kWh）を用いて貨幣価値に換算すると年間でおおよそ 36 億円となる。同様に、二酸化炭素の排出削減量についても試算してみる。削減量は、50 万 kW/℃ $\times$ 1℃ $\times$ 10 時間 $\times$ 0.33（kg-CO₂/発電 kWh） $\times$ 60 日=103,500(t-CO₂)となり、これに二酸化炭素削減価値（炭素税や排出権料に相当する価格）として、仮に 2000 円/t-CO₂をあてはめると、年間でおおよそ 2.1 億円の削減価値である。両方合わせると年間 38.1 億円の経済的価値を有することになる。対策が早期に実施され、効果が長期に持続すれば、その期間分の便益が累積されることとなる。気温低減効果の大小や影響範囲、時間帯などによって便益は変わるものであり、上記はあくまでも簡単な試算に過ぎない。本研究では、費用と効果の関係についても、さらに具体的に検討する予定である。

10. おわりに

本論文では東京 23 区を中心としたヒートアイランド現象軽減対策に関するこれまでの検討結果を中心に紹介してきた。建築物レベルでの対策や未利用エネルギーの活用による効果¹⁾など、紹介しきれなかったものもあり、また、今回取り上げた対策以外にもいくつか有望と思われる対策があるので、費用や便益の算定と合わせて、さらに検討を重ね、別の機会を捉えて成果を発信していきたい。

参考文献

- 1) 末次忠司, 河原能久, 木内豪, 小林裕明: 都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究(その 1) —都市河川等の水熱エネルギー活用の効果—, 土木研究所資料第 3722 号, 2000.
- 2) 東京都: 緑の東京計画—「水と緑がネットワークされた風格都市・東京」を目指して—, 2000. 12.
- 3) 東京都環境局: 都におけるエネルギー需給構造調査報告書, 2001.
- 4) Grell, G., J. Dudhia and D. Stauffer: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, 1994.
- 5) Noilhan, J and S. Planton: A simple parameterization of land-surface processes for meteorological models, Mon. Wea. Rev., 117, 536-549, 1989.
- 6) 建設省編: 建設白書, 2000.
- 7) 松浦茂樹, 島谷幸宏: 水辺空間の魅力と創造, 鹿島出版会, 1987.
- 8) 都市計画中央審議会基本政策部会水・緑・環境小委員会: 水と緑の環境デザイン, 1998.
- 9) 土木研究所緑化生態研究室: 平成 10 年度重点研究プロジェクト成果報告書, 土木研究所資料 3696 号, 2000.
- 10) 鈴木理生: 江戸の川・東京の川, 井上書院, 1989.
- 11) 八十川淳, 高橋信之, 尾島俊雄: 東京都区部における中小河川の廃止と転用実態に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文集, No.508, 21-27, 1998.
- 12) 木内豪, 吉谷純一: 首都圏における将来の人工排熱量時空間分布の推計, 第 30 回環境システム研究論文発表会講演集, 205-210, 2002.
- 13) 木内豪: 都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化—東京都区部下水道と東京湾を事例として—, 水工学論文集, 第 47 巻, 2003.
- 14) Rosenfeld, A.H., et al.: Policies to reduce heat islands: Magnitude of benefits and incentives to achieve them, Proc. of the 1996 ACEEE summer study on energy efficiency in buildings, Vol.9, p177, 1996.

[一般講演]

土木における IT 施工システム構築

技術推進本部主席研究員（先端技術） 吉田 正

目 次

1. はじめに	79
2. 土木施工と IT	79
2. 1 IT 活用の意味	79
2. 2 IT 施工システムの考察	80
3. 情報化施工におけるデータ交換の実現	81
3. 1 情報化施工におけるデータ交換	81
3. 2 情報化施工に関する国際標準化活動	87
4. 遠隔操作施工技術	88
4. 1 建設機械の遠隔操作による無人化施工	88
4. 2 建設機械の遠隔操作施工における実態と課題	90
4. 3 考察	92
5. 除雪機械の自動操舵システムの開発	92
5. 1 開発の背景	93
5. 2 自動操舵支援技術	93
5. 3 実証実験	96
5. 4 結論及び今後の課題	97
6. おわりに	97
参考文献	98

土木におけるIT施工システム構築

技術推進本部 主席研究員（先端技術） 吉田 正

1. はじめに

近年の情報技術（IT）の進展は、産業構造や経済活動の大きな変革をもたらしている。

最近は工事施工においてもITの利用が試みられている。高度化が進む情報技術、計測技術は、電子情報による施工管理を実現し、人手に代わる施工の自動化、ロボット化の可能性を拓いている。現在のIT活用の取り組みは一部の大規模、あるいは特殊な現場におけるものとどまっているが、今後、一般的な工事への普及が期待されている。

土木研究所では、本来のIT活用のメリットを享受するための技術として、工事の施工段階において電子情報の共通利用を進めるための研究を民間と共同で行い、その成果を踏まえ現在進行中の国際標準化活動に参画している。また、建設機械の遠隔操作施工の実態調査やIT技術を活用した除雪機械の自動操舵システムの開発を行っている。

本講演では、まず土木施工とITに関して概観し、次に上記の主な研究成果を紹介する。また、それらを通じて、将来のIT施工システム構築へ向けての課題を展望する。

2. 土木施工とIT

情報技術（IT）は、事業のプロセスを合理化し、工期短縮やコスト縮減を図ったり、品質の向上、安全性の向上を図るなど、本来の目的に応じて必要な箇所に逐次導入されていくものと考えられる。しかし、この導入が円滑に進むのか、また、IT導入によってすみやかに十分な効果が得られるのかという点ではいくつもの課題を抱えていると考えられる。例えば、過去のオフィス業務の情報化（OA化）の経過における「コンピュータを導入したのに業務は合理化されない」「逆にデータ入力の手間が増えた」などの問題は同様に発生することが予想できる。さらに、建設工事は短期間に多くの関係者が参加するプロジェクトであり、工事で利用される情報システムのライフサイクルも比較的短いものになるという特徴があるため、システム構築と利用メリットの確保に一層の工夫が必要である。

本来、ITの導入は業務プロセスの改善を行うことであり、一連の業務の流れに円滑にITシステムが組み込まれ、データが有効に活用できることが大事である。

2.1 IT活用の意味

ITを活用するということは、情報が生成され、伝達され、蓄積され、処理され、利用されるそれぞれの場面において、情報技術を活用して人間の手を煩わせることなく作業を進めることであり、我々のあらゆる活動のプロセスで活用できる可能性がある。これは、人間の活動そのものが、外の世界の情報を五感を通じて獲得し、頭脳でその情報を処理・判断し、その結果として、話したり、文章を書いたり、何らかの作業を行うなど、外に情報を出していくプロセスと考えることが出来、そのような意味から当たり前のことということが出来る。

CALS/ECの取り組みは、建設事業の全体のライフサイクルを前述のような活動のプロセスとして取り上げ、ITを活用した新しい業務プロセスを構築しようとしているということが出来る。したがって、具体的には事業の調査、計画、設計、入札契約、施工、検査、維持管理から、次の更新へと一連のサイクルにまたがっている。また、これらをITの活用の点から考えると、計画、設計のように主に

オフィスにおける業務で構成されるものと、施工、維持管理のように屋外の現場における具体的な作業を伴うものの2種類に大別できることが分かる。現場の作業を伴う段階は、その現場作業においてITを活用し作業能率を向上させる方法の開発が必要である。

「IT施工システムの構築」は、この「施工」の段階に焦点をあててIT活用による新たな業務プロセスを開発することを目指すものである。

2. 2 IT施工システムの考察

「施工」段階にITを導入するということを考えるため、ここで具体例として、現場における機械施工の業務モデルとして、Peyretが提案している論理モデル(Logical Model)を参照する¹⁾。(図-1)

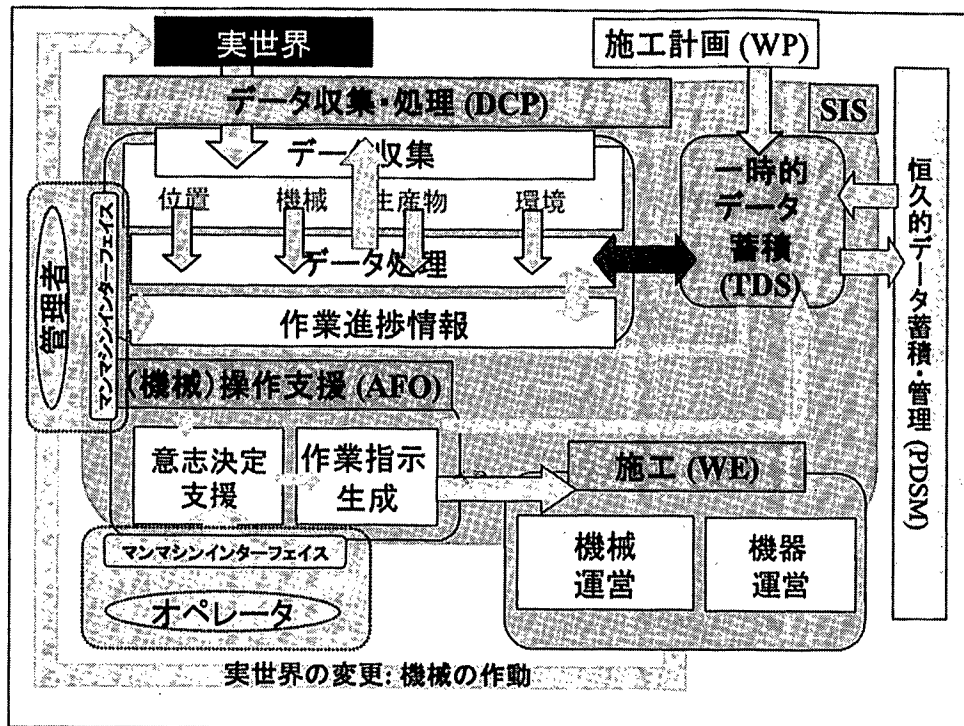


図-1 現場の機械施工システムの論理モデル (和訳：筆者)

このモデルは、現場の機械施工のシステムを機能に着目して記述したもので、大きく4つの機能から構成される。すなわち、データ収集・処理(DCP)、一時的データ蓄積(TDS)、(機械)操作支援(AFO)、施工(WE)である。それぞれはさらに下位の機能から構成される。このモデルにおいては、この4機能の間で情報を交換・共有するシステムを施工支援情報システム(SIS: Site Information System)と位置付けている。

ITを利用しない従来の施工形態においては、これらの情報のやり取りは、施工管理者やオペレータが図面等の資料や野帳へのメモ、記憶・経験等の中で行ってきたものということができる。ITを利用する場合は、このモデルのうち、どの機能あるいはどの情報交換についてどのようにITを利用するのかがポイントであり、それぞれのシステムによってITの利用の仕方は千差万別である。本来一つのITの利用技術について、それぞれの具体的なシステムの中で評価されるものである。

しかし、ITを活用したシステムを考える上で、共通して取り上げられるべき課題、施工の実施形態に係る基本的な課題も存在しており、本稿では次のような観点からの考察を報告する。

(1) ITを有効に利用した施工(情報化施工)を実現するには、それぞれの機能を実現する応用システム間で情報が電子データとして円滑に流通することが不可欠である。またこれらのデータは他の現場、他のシステムともデータ交換が可能である必要があり、そのための方策の検討が必要である。

(2) (機械)操作支援の機能に関しては、施工時のオペレータの安全確保や能率向上、工期短縮等の観点から、オペレータが機械に搭乗しないで遠隔地から運転する無人化施工や施工の自動化・ロボット化などもITの応用技術として求められている。機械施工の合理化の観点から欠かせない重要な技術開発課題である。

3. 情報化施工におけるデータ交換の実現

ITを有効に利用した施工（情報化施工）を実現するには、情報が電子データとして円滑に流通することが不可欠である。またこれらのデータは他の現場、他のシステムともデータ交換できる必要がある。

ここでは、土木研究所が民間企業15社と行った共同研究の結果と、現在参画しているISOの国際標準化（ISO/TC127/WG2）における検討状況などについて紹介する。

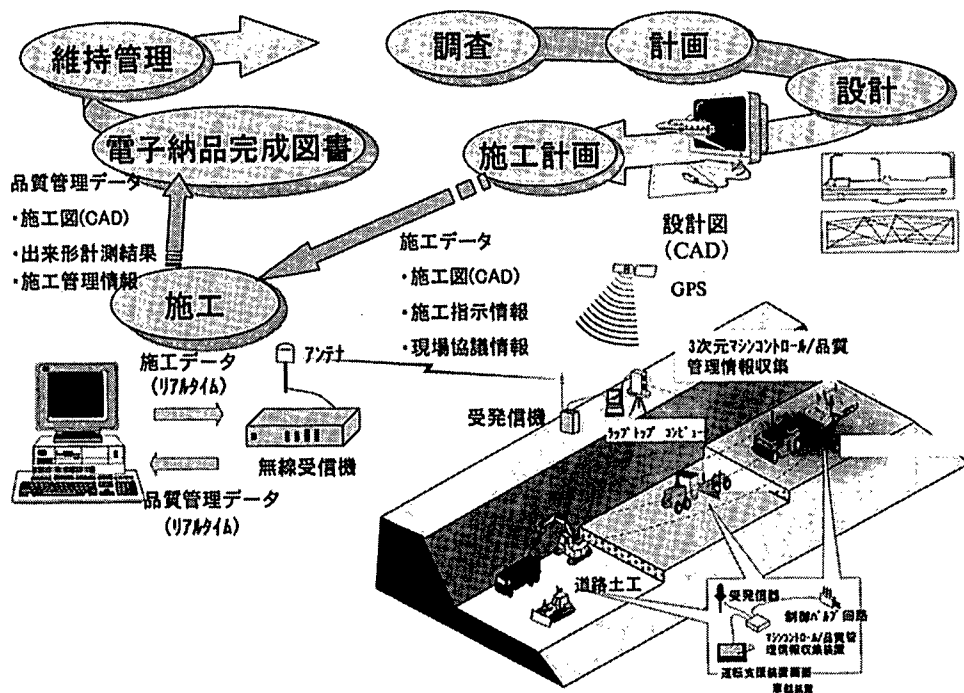


図-2 施工支援情報システムの概要

3. 1 情報化施工におけるデータ交換

情報化施工において実施されるデータ交換に関しても、後述のようにそれぞれの主体間によって扱われるデータや目的が異なる。現在、事業の発注者側に関係する監督・検査や施工管理に関する事項は国土交通省国土技術政策総合研究所において検討されており、ここでは、土木研究所で取り組んでいる機械施工に焦点をあてる。

3. 1. 1 施工支援情報システムの役割・機能

情報化施工とは、情報技術を施工に適用し多様な情報の活用を図ることにより、施工の効率化・省力化、品質向上、安全性確保、環境保全に関する合理化を図る生産形態である。

施工支援情報システムは、工事施工現場において建設機械による施工に必要な施工指示情報や建設機械の施工中のデータ、出来形結果情報などを処理・管理し、建設機械、計測・測量機器並びに施工者の管理システムとの円滑な情報交換を行うことで、機械施工の合理化を実現する。図-2にその概要を示す。施工における現場の施工支援情報システムには、前段階の設計・施工計画から施工図や施工指示情報が受け渡され建機による作業に提供される。また、施工中のデータや施工後の品質管理データ等は完成図書等の後段階へ引き継がれる。このような情報交換の実現がポイントとなる。

3. 1. 2 施工支援情報システムの動向

(1) 国内における開発動向

現在までに開発された施工支援システムについてアンケートによる事例調査を行った（H12年調査）。調査の結果、開発事例は85件となり、

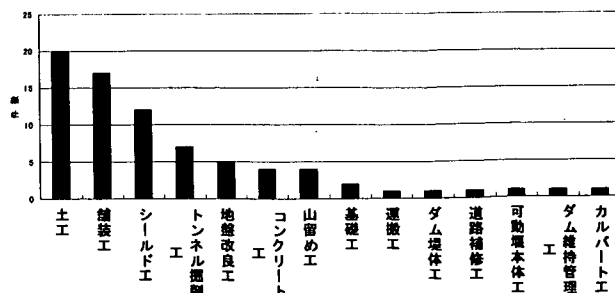
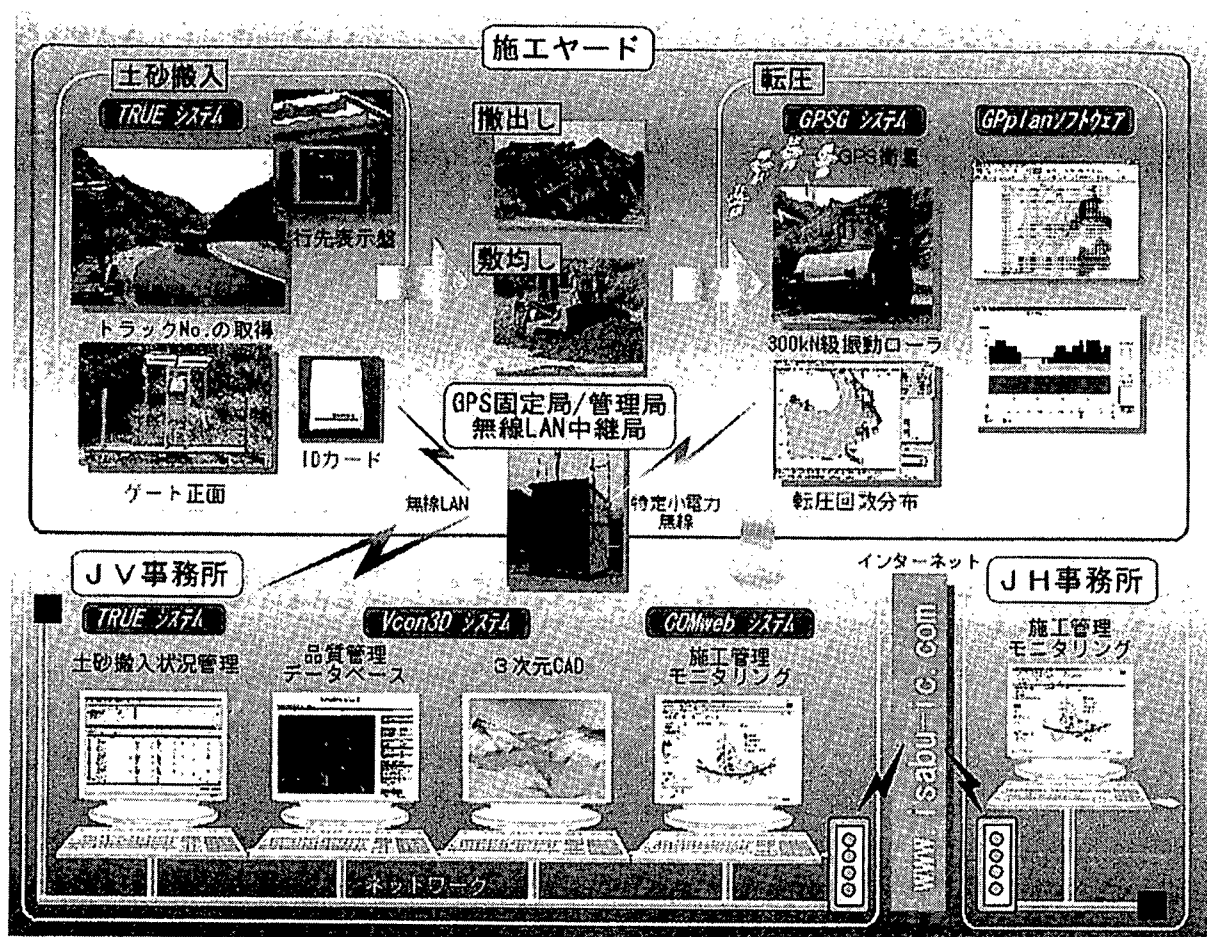


図-3 工種別導入実績

工種別に分類すると図－3に示すとおりである。土工、舗装工、シールド工で全体の半数以上を占めている。

図－4に、土工における施工支援情報システムの例を紹介する。



図－4 GPSを用いた締め固め回数・層厚管理システム²⁾
(日本道路公団 IT土工システムDREAM)

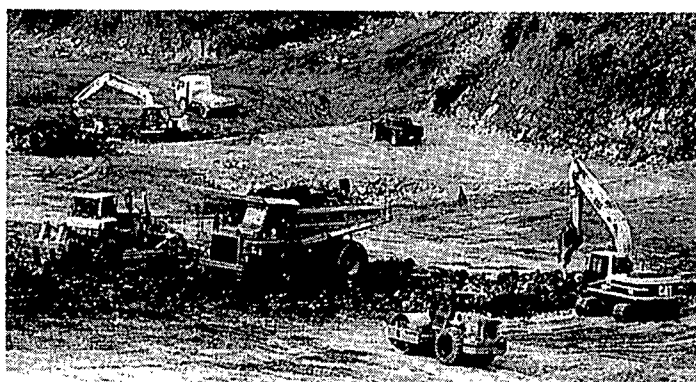
図－4、写真－1のシステムは、JHにおいて第二東名高速道路における大規模盛土工事ために開発、活用されているシステムで、厚層施工による盛土施工の効率化を実現している。

土砂搬入、撒きだし・敷き均し、転圧の一連の作業のために、複数のシステムが構築されネットワーク、インターネットを介して施工者と発注者が情報交換を行っている。

しかし、これらのシステムでは各システム間のデータ交換や共有は行われていない。

(2) 現場導入における課題

今後、施工支援情報システムを現場に導入して行くに当たり、実際の施工においてどのような課題があるか検討し、表－1のように整理した。いずれもシステムの開発・活用、データの入出力・活用上の



写真－1 GPSを用いた締め固め回数・層厚管理システムによる施工状況(同上)²⁾

課題があり、データ交換のための標準の必要性がうかがえる。

表－１ 現場への施工支援情報システム導入における課題

区 分	課 題
施工会社	・現場状況および施工方法が現場ごとに異なり、かつ使用する建設機械や参入する専門業者の組み合わせが現場毎に異なるために現場毎の開発システムとなりやすく、コストが高くなる。 ・開発システムのノウハウは、施工会社独自のものとなるが、開発コストがかかり効率的なシステム開発が難しい。
下請け会社	・現場毎または施工会社ごとに応じた複数の情報システムが必要となる。 ・異なるメーカーの建設機械を購入するため、建設機械からの情報の入出力はメーカーに依存し、データの連携・共有にはコストと手間がかかる。
発注者	・データを一括管理するには、各施工会社に応じたシステムが必要となり情報共有・連携が難しい。

3. 1. 3 施工で取り扱う情報の連携に関する分析

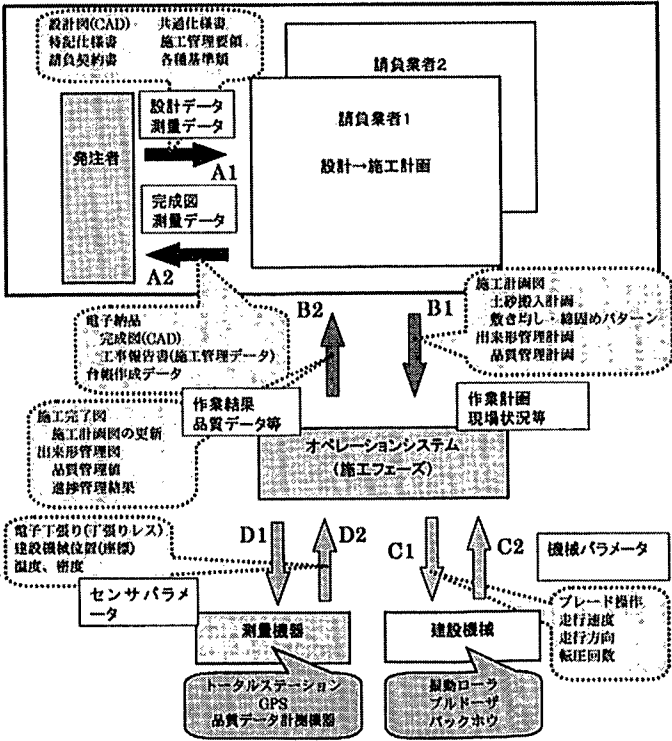
施工段階の情報連携を検討するために、まず、実際の工事の実施形態を前提として施工支援情報システムを導入した場合のモデルを情報交換の観点から設定し、各主体間のデータ交換について検討した。次に、施工のプロセスに着目して、ITを活用することにより、取り扱われるデータにどのような変化がもたらされるのかを検討するとともに、プロセスの前段階のデータが次の段階でどのように活用されるかという点について具体例の分析を行い、データ交換・連携のための課題を検討した。

(1) 施工支援情報システムを導入した施工における情報交換

ある建設プロジェクトの施工現場に施工支援情報システムを導入した場合の施工形態については、図－５に示すように、発注者、請負業者（施工業者）、オペレーションシステム、建設機械、測量機器の主体で構成され、これらの各主体間で情報交換が行われるモデルで表すことができると整理した。

(2) 施工プロセスと情報連携・活用に関する分析

ここで、現状の施工プロセスにおいて施工支援情報システムを導入した場合の効果と情報項目の標準化の必要性について、システム開発事例の多い道路土工の盛土・締固め施工で分析した。分析は業務プロセス分析手法として IDEF 手法を適用し、IDEF0 に準じて実施した。結果を図－６に示す。図中の四角はアクティビティと呼ばれ、施工内容や機能を表し上段が施工のプロセスを、下段がそのプロセスで扱われる情報となる。実線の矢印が物質の流れを、破線が情報を示す。



図－５ 施工支援システム主体間の情報交換

図-6の上図は盛土・締め固め施工の現状の施工プロセスを記述したものである。例としてこの中の丁張りの設置を取り上げる。

丁張りは施工計画図を元に実施工前の準備測量の成果により設置されるもので、施工出来形を直接左右する目標指標となり、設置精度及び設置後の管理と比較的多くの労務を要するものである。現在は施工計画図が電子化されていないため、丁張りは必要箇所毎に測量し設置している。

今後、図-6の下図のように施工計画図がCAD等により電子化されれば、準備測量は施工計画図の電子データを修正するために実施され、測量するポイントも減り簡素化が期待される。さらに、盛土及び締め固めを行う施工機械側が施工計画図の座標データを現地で認識し活用できれば丁張りの現地へ設置は不要となり電子化される（電子丁張り）。すなわち実作業ではなく情報処理のプロセスとして取り扱われることとなり大幅な業務改善が期待できる。

一方、施工計画図に反映される準備測量成果は施工段階、工種が異なっても、各社で受け渡される情報であり、この成果に基づく丁張りも共通利用が図られていることより、施工業者が異なっても安定した品質、出来形を確保している。したがって、電子丁張りにおいても、一連の施工段階、工種においてその連携・共有化が図られることが必要である。

(3) 情報連携の課題

盛土・締め固め施工の詳細な施工プロセスとプロセス単位の情報の入出力を分析したものを図-7に示す。図中、建設機械が用いられるのは土砂搬入（ダンプ）、まきだし（ドーザ）、転圧（ローラ）のプロセスとなる。

ここで、この機械施工の3つのプロセスとその前後との関係を見ると、前段階（施工計画関連）の情報は機械施工のプロセスへ伝達されるが、機械施工のプロセスから後段階（品質管理、出来形管理）へはあまり情報が伝達されずに、別途、試験・計測データが必要になっているのが分かる。ITの導入に

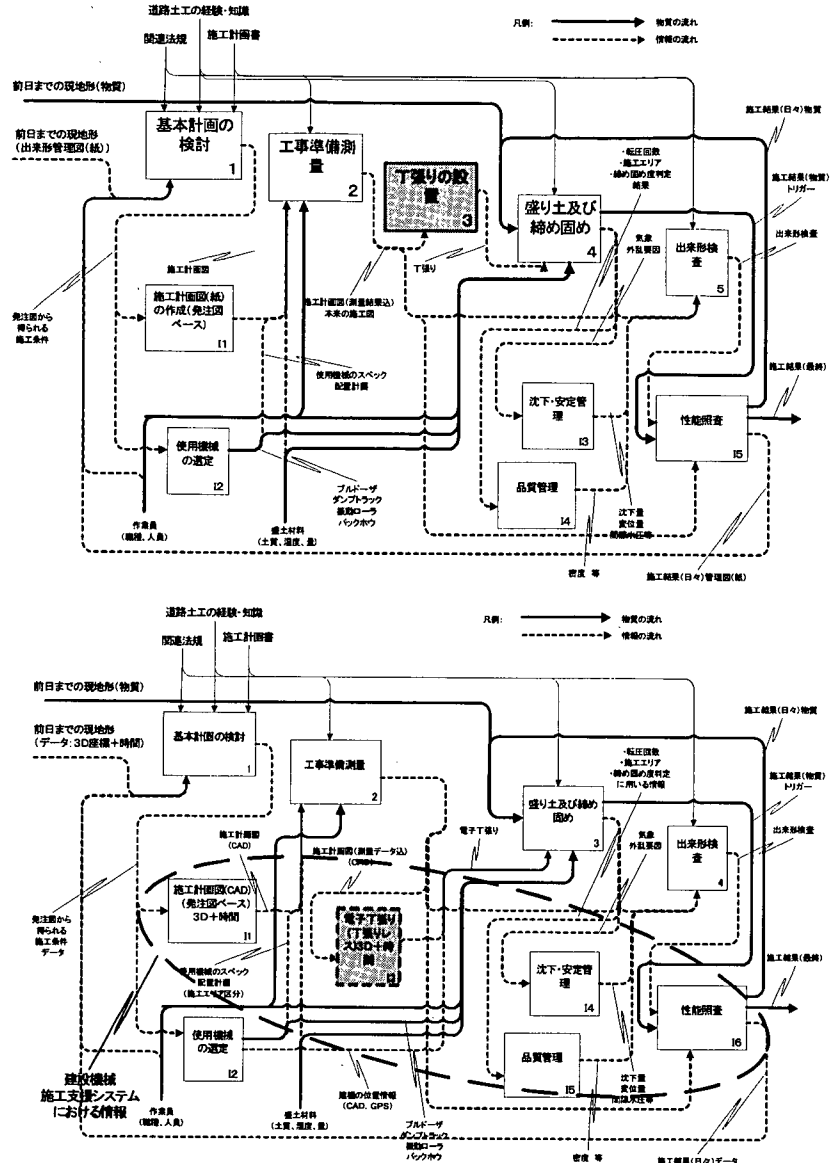


図-6 施工支援情報システム導入前後の施工プロセスの差異

The diagram illustrates a comprehensive construction management process. It begins with an 'Input' (入力) section at the top left, which feeds into a 'Design Book' (設計図書). This leads to a series of planning stages: 'Basic Plan Design' (基本計画の検討), 'Construction Method Planning' (工事方法調査), and 'Trial Construction' (試験施工). These stages involve multiple iterations and feedback loops, indicated by arrows labeled 'Loop'. Key components include 'Material Management' (材料管理), 'Quality Control' (品質管理), and 'Cost Management' (コスト管理). The process culminates in 'Execution' (施工) and 'Output' (出力), which includes final reports and data analysis. The diagram also features a legend at the bottom right explaining the symbols used for data flow and processing.

3. 1. 4 施工支援情報システムで取り扱うデータの標準化検討

(1) 標準化の範囲の設定

(2) 標準化の手順

表-2 標準化の範囲

標準化のターゲット(案)	対象	備考
①インプットデータ	×	調査設計段階の成果品の標準化に踏み込むため対象外とする。
②作業管理データ	○	システム相互運用性の確保、システム構築の効率化に寄与するため、対象とする。
③GPS 出力データ	×	既に出力データの仕様が定められているため、ここでは対象外とする。
④GPS データ欠損時の位置補捉方法	×	成果品の品質の統一・向上に寄与する重要な項目ではあるが、品質管理に係わる内容であるため、対象外とする。
⑤GPS データの信頼性判定基準	×	
⑥転圧管理メッシュの大きさ	×	
⑦メッシュ転圧完了の判定基準	×	
⑧作業結果データの記録頻度	×	
⑨締固め(地盤反力)データの取り扱い	×	
⑩ユーザインターフェイス	×	データや帳票の標準化によりある程度統一されるため、標準化する必要はない。
⑪作業結果データ	○	システム相互運用性、システム構築の効率化に寄与するため、標準化対象とする。
⑫締固め管理データ	○	帳票作成のもととなるデータであるため、標準化することによる効果は大きい。
⑬施工管理帳票／報告書	△	帳票の様式そのものは標準化しないが、②⑪⑫の標準化を行うために、各帳票が具備すべき情報を整理する
⑭アウトプットデータ	×	下流工程(特に維持管理段階)における利活用方法を全て想定して標準化することは困難であり、対象外とする。

必要なデータ項目を整理し、③取り扱いデータのデータ項目を抽出し定義や関連について整理する手順

で標準化作業を実施した。

(3) 標準化対象情報の分析

3事例のシステムは全てGPSデータを用いて転圧管理を行っているため、概要比較ではほぼ同機能である。

標準化対象情報を考えるに当たり、出力帳票に着目し、締固め管理度を判定できる帳票である走行軌跡図、転圧回数管理図、締固め高さ管理図、締固め層圧分布図、締固め管理断面図における情報を対象とした。

取り扱いデータの標準化にあたり、前述の必要データ項目を区分毎に分類した。区分は①対象工事に関する基本的な情報である「工事管理データ」、②各作業管理データで取り扱う座標系を規定する「使用座標データ」、③施工前地盤の標高データである「元地盤データ」、④対象作業に関する基本的な情報である「作業管理データ」、⑤作業中の移動局の位置やGPS測位状態を示す「作業結果データ」、⑥帳票出力データで登録済みデータから生成できないデータである「帳票登録データ」、⑦帳票を出力する上で①～⑥のデータより加工処理して得られるデータを「結果加工データ」の7区分とした。これらの区分で整理した各データ項目について、定義、型式、データ長を設定しデータ定義書案として取り纏め、データの関連性は図-8のUMLのクラス図で表現した。

これらの分析から、各種の情報が相互に関連を持ち、位置座標(X、Y、Z)などが多くの情報に共通のデータとして存在することが分かる。

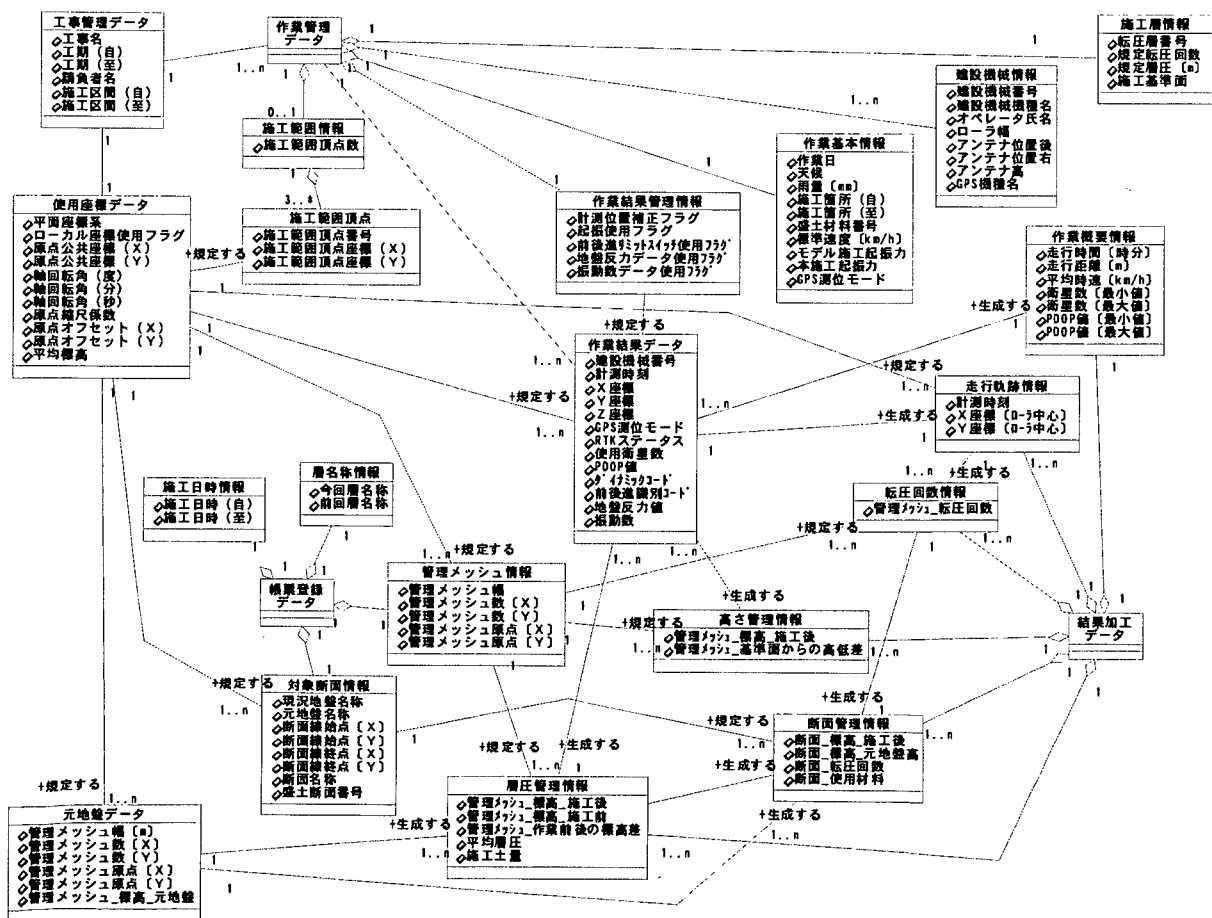


図-8 取り扱いデータの関連性整理

3. 2 情報化施工に関する国際標準化活動

ISO/TC127（土工機械）では、情報化施工に関する標準化に取り組んでおり、本項ではその動向を参考に紹介する³⁾。

3. 2. 1 現在までの経緯

情報化施工では、多くの機器、システムが協調しあって実現する建設工事を運営・管理する必要がある。システムのコストを縮減し、情報化施工の効果を一層高めるため、システムの互換性の確保に必要な標準化が望まれている。一方、諸外国においても情報化施工に関する研究や施工事例が見られるようになったことから、標準化について活動における国際的な取組みが重要と考えられる。また、日本における CALS/E C の実施、情報化施工の進展を受け、国際的な標準化を進めることで、建設機械や測量・計測機器の市場が国際化している現状に対応することができると考えられる。そこで、2000年の10月に開かれた ISO/TC127 において、日本から、情報化の基本となる建設機械周りをターゲットに、情報交換の標準化作業を提案した。この結果、新しいワーキンググループの設置が決定され、提案国である日本がコンビナーを務めることになった。

国内的には、ISO/TC127 の日本側の窓口になっている(社)日本建設機械化協会に、学識経験者、建設会社、建設機械メーカ、測量・計測機器メーカが参加した委員会が設置され、対応することとなった。現在、国内委員会では、プレゼンテーションの準備、国内意見の調整、国際対応戦略の検討を行っている。

これまでに、東京（2001年2月）、ボローニャ（2001年9月）、ウエストミンスター（2002年3月）、フランクフルト（2002年10月）の計4回のワーキンググループの国際会議が開催された。参加国は、アメリカ、イタリア、スウェーデン、ドイツ、フランス、日本の6ヶ国で、10数名の専門家が集まり熱心な議論が交わされている。初期の会合で、各国における情報化施工の事例紹介、標準化のスコップ、標準化の進め方等の意見交換がなされ、標準化推進の必要性について共通の認識があること、当面データ交換実現のためのデータ定義の標準化に関して取り組むことなどが確認された。さらに、ボローニャ会議以降、具体的な標準化項目について、3項目のPWI提案（用語、システムアーキテクチャー、データ辞書）を行うことが概ね合意され、ウエストミンスター会議を経て2002年5月に開催された ISO/TC127 ポーランド会議においてPWI提案^(注)がなされている。

現在は、提案された3項目のPWIに関しては各国からの意見が集められている段階である。また、ワーキンググループの検討としては、3つのPWIに関して具体的な規格原案の検討、作成が進められているところであり、日本がシステムアーキテクチャーと用語、フランスがデータ辞書を担当して作業を進めている。

2002年5月に開催された ISO/TC127 ポーランド会議においては、ワーキンググループの活動において早期に具体的な規格案を提案するように求める声があり、今後日本としても早期に具体案の提案（NW I^(注)提案）を行えるように検討を進めている。

(注) PWI: Preliminary Work Item 予備業務項目

NWI: New Work Item 新規業務項目

3. 2. 2 海外各国における標準化の動向

(1) アメリカ

米国においては LandXML の取り組みが報告されている。これは発注者と受注者間のデータ交換や長期的なデータの保管、インターネット等を介してのデータ交換を可能とすることをねらいとして、XML（電子データ交換のための言語の一つ）に CAD の Element（データ要素）を定義することで、測量・

設計・建築・土木等の座標・設計データを共通に扱えるようにすることをねらったものである。CADソフトの企業が提唱しソフトウェアベンダーやメーカー、公共機関等が参加して活発に活動が進められている。

(2) ドイツ

独国における建設機械関連での情報化としては、IREDES (International Rock Excavation Equipment Data Exchange Standard) の取り組みにおいて、鉱山の採掘工程におけるデータ交換の標準化が2006年の運用開始を目標として進められている。

(3) フランス

仏国からはOSYRIS (Open System for Road Information Support) のプロジェクトの取り組みが報告されている。ヨーロッパ4カ国の研究機関、メーカー等が共同研究を進めているもので、道路建設工事を対象とした情報化施工システムの研究が行われている。この中で、道路建設において取り扱われるデータに関して共通利用が可能となるようにする検討が行われている。

4. 遠隔操作施工技術

ITを現場へ活用する技術として、情報・通信技術の利用による建設機械の遠隔操作施工がある。建設機械の遠隔操作施工技術は、災害復旧におけるいわゆる「無人化施工」として活用されている。緊急を要する災害復旧など危険個所の工事においてこの10年間で約80件実施されており、この意味では実用段階といってよいと考えられる。

ここでは、いわゆる「無人化施工」の経緯と現状を紹介するとともに、遠隔操作施工技術としての実態と将来へ向けての課題を考察する。

4. 1 建設機械の遠隔操作による無人化施工

無人化施工とは、文字通りの意味からは人手によらない工事の施工のことと考えられるが、現在は特に緊急に行われる災害復旧作業などで施工現場内に人間が立ち入らずに行われる施工方式を指して称されている。具体的には、遠隔操作付き建設機械と無人化施工設備によって施工される。

4. 1. 1 無人化施工の基本構成⁴⁾

無人化施工における遠隔操作システムの構成は、安全な位置で操作するための遠隔操作室、遠隔操作信号を受信して制御される遠隔操作付き建設機械であり、必要に応じて、無人中継車、現場を俯瞰する映像や重機の作業状況を監視するカメラ(無人移動カメラ車等)を組み合わせる。

(図-9)

無人化施工で使用する遠隔操作付き建設機械の操作に使用する無線は、特定小電力無線が標準とされ、安全を確保できる場所から工事場所までの距離に応じ、目視(50m以内)、遠隔施工(50~150m程度、モニタ利用)、超遠隔施工(150m以上、モニタ利用、無線中継車利用)を行うこととなる。

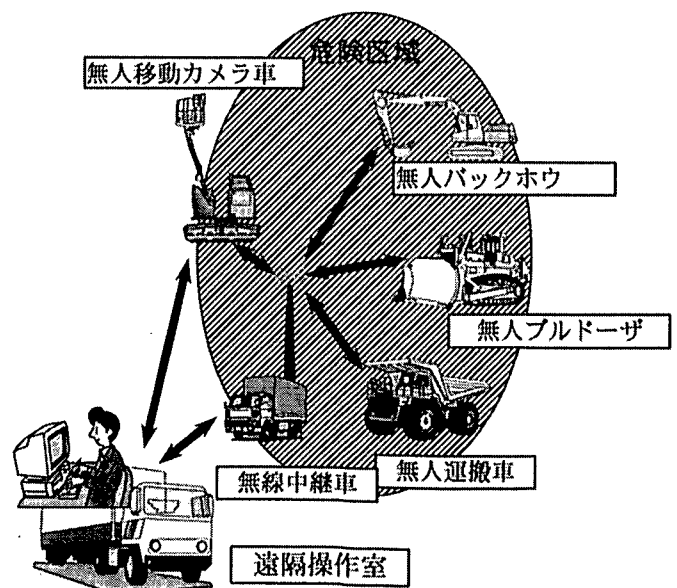


図-9 無人化施工の基本構成⁵⁾

4. 1. 2 無人化施工の経緯^{6), 7)}

(1) 無人化施工の先駆け

最初に遠隔操作技術を活用した無人化施工の事例は、1969年に常願寺川の災害による富山大橋の緊急対策工事で使用された遠隔操縦の水中ブルドーザである。1983年には崩落危険個所での掘削作業に立山砂防工事で使用された無線による遠隔操縦のバックホウが導入された。遠隔操作の範囲は100m程度しかなく、有人作業に比べて作業効率も悪いことから多く利用されることはなかったが、現在の遠隔操作式建設機械の基礎が確立されたものと言える。また、1980年代に圧気式ケーソン内の劣悪な作業環境下の掘削作業での無人ケーソン掘削機の実用化が図られた。この無人ケーソンでは、従来の目視によるリモコンの遠隔とは異なり、テレビカメラで送られた現場の画像を見て機械を遠隔地から操作するものであった。これは、テレビカメラや計測結果を離れた運転席のI T Vに表示することによって、現場状況を把握し、遠隔で施工する現在の無人化施工システムの基本技術が大成されたものと言える。

(2) 無人化施工の実用化

前述のように無人化施工の基礎的な技術が形成されてきたが、実用的な工法として確立され、多くの現場で利用されるようになったのは、1994年1月に、雲仙普賢岳における災害復旧工事において、公募による試験フィールド事業として無人遠隔操縦の建設機械が導入されたことを契機としている。この事業では、砂防対策工事と同時に、工事中的火砕流や土石流への危険性に対する安全性の確保が図られなければならないものであった。また、非常に広い施工ヤードをカバーする必要性から自由に移動する機械同士の協調作業及び運転席から見た施工箇所の状況を把握することが重要となった。そのため、

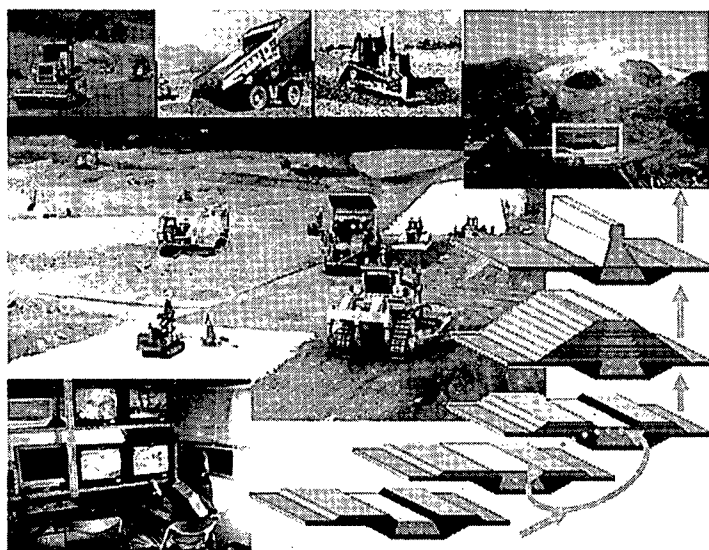


図-10 無人化施工による砂防堰堤(ダム)の建設

1 km程度離れたところからの複数の建設機械の操作や出来形計測などが必要になったことから、工事を実施するための建設機械を遠隔で制御する技術、遠隔地にいるオペレータに映像情報を伝達する技術、出来形計測などの施工管理技術を確認する技術が必要になった。(図-10) この結果、前述(図-9)のようなシステムが有効であることが確認された。雲仙では、その後継続的に実施され、雲仙以外では、熊沢川、伊出川、蒲原沢、葛葉、山梨川、河内谷川、針原川、第二白糸トンネルなどの災害に活躍した。

2000年3月末に発生した有珠山の噴火による災害の復旧作業は、雲仙・普賢岳では樹木がなく見通しのよい山ろくの現場であったのに対し、市街地の中や市街地に隣接した場所のため、建物や樹木が電波や視界をさえぎる厳しい施工条件であった。従来の方式では多くの中継が必要になるため、無線機に係るトラブルの発生が懸念された。そこで、中継局を設けることなく、1 km以上の遠隔操作を可能とするため、郵政省(当時)の臨時措置として操作系400MHz帯8ch、映像系2.4GHz帯8chの許可を得た。その後、総務省では「災害時の無人化施工のための画像伝送システム」として1W出力5.8GHz帯マイクロ波4chを割り当てることを既に決定している。また、操作系には既存の特定小電力無線及び業務用デジタル無線を利用することとされていて、今後の無人化施工への寄与が期待されている。

また、最近では、除石や掘削・盛土等の土工工事以外に、ブロック積みなど他工種における遠隔操作

施工も実施されるようになってきている。有害な SO_2 ガスの放出が続いている三宅島においては、2001年度に泥流対策の床固め工のために1個2tのコンクリートブロック700個以上を用いたブロック積み工を、把持装置を装着した無人バックホウで施工した。長野県内では上部の岩盤が崩落するおそれのあるロックシェッド内に長さ350mの下水道管を敷設する工事が無人化施工によって行われた。さらに、雲仙普賢岳の復旧現場では、現在、緑の復元やスリット式の砂防ダムの施工を無人化施工で実施する議論が進められている。

このように、建設機械の遠隔操作施工技術は、災害復旧におけるいわゆる「無人化施工」として活用されている。人が立ち入ることが出来ない作業現場で緊急に工事を行う際の施工技術という観点からは実用化のレベルにあるということができよう。

4. 2 建設機械の遠隔操作施工における実態と課題

前項では、建設機械の遠隔操作施工技術は危険個所での緊急施工に活用するという点では実用レベルにあると述べたが、一方で、その他の一般的な土木工事での本技術の活用はあまり進んでいない。当然の事ながら、遠隔地からの無線による操作を行うために遠隔操作システムや無人中継車、無人移動カメラ車など通常の建設機械に追加する機器に経費を要することから、有人施工に比べ経済性の点で不利になる点は否めない。しかし、作業現場を無人にすることが出来るという特徴を活かして、有人で行うためには大規模な安全対策が必要な場合や苦渋性の高い環境下で施工される場合には、有効な施工技術として活用される場面があるものと考えられる。

そこで、遠隔操作施工技術の実態と課題について、災害復旧等で活用された際に実施した実態調査の結果並びに公表されている論文等から報告する。

4. 2. 1 遠隔操作施工技術の実態^{4), 8), 9)}

(1) 遠隔操作方法

1) 遠隔操作に必要な映像

建設機械の遠隔操作では、オペレータの視界の確保が重要となるため以下の工夫が行われている。

○建設機械本体にカメラを搭載し、無線によりオペレータがいる操作室まで伝送する。また、オペレータの死角となる位置には固定型のカメラを設置する。

○高台に操作台を設置するか、またはゴンドラにオペレータを搭乗させ目視で行う。

遠方にある操作室でカメラ映像により操作する場合には、作業の種類に応じて、確保される映像による操作感が大きく異なることが報告されている。例えば、ブルドーザの押し土作業ではブルドーザ前方からの映像が望ましい。バックホウの掘削積み込みでは機械に搭載したカメラ映像では通常画角が狭く遠近感に乏しい。また、機械本体の傾きが分かりづらいので外部からの映像が必要である。

また、カメラ映像では作業現場の立体感が分からなくなるため立体カメラが使用されることもあるが、運転者の疲労が大きく実施工で長時間使用することは難しい。

2) 遠隔操作装置

操作装置についても搭乗タイプに比べて大きく操作感が異なるものがあり、例えば走行型の機械では従来の操作レバーに加えてペダルを利用するなどの工夫が加えられたものもある。

また、ペダルを使わない場合のブレーキのコントロールに注意を要するとの報告がある。外部からのカメラ映像の場合、機械の向きと操作レバーの反応の向きが逆になる場合があり熟練が必要である。一方、遠隔操作と搭乗タイプが同様の動作パターンとなる操作レバーで行われるもの（バックホウなど）は経験者が慣れることは比較的容易である。

(2) 施工方法

通常、建設機械と人力で行っている作業を、遠隔操作型建設機械のみで施工することになる。そのため工夫を現場ごとに検討している。特に復興作業では、砂防ダム、導流堤などの構築があるため、以下のような工夫を行っている。

○型枠工は、押土・掘削等を行った土砂を型枠として用い、施工はバックホウ、ブルドーザで行う。または、バックホウにアタッチメントを装着し、積み易い異型コンクリートブロックを用いて施工する。
○コンクリートの打設は、RCC工法または高流動コンクリートを用いることにより人力の打設手間をなくしている。

建設機械の配置は、他の建設機械のためにオペレータに操作上の死角ができないように現場に投入する台数を最大2台に抑えている。夜間作業を行う場合は、バックホウの爪先が見えるように照明設備が必要である。

遠隔操作型建設機械を用いた災害復旧作業の施工は、本格的に活用されるようになってまだ日が浅い。このため、施工方法として確立されるには至っておらず、より効率的な施工方法が求められている。

(3) 検測方法

施工後の検測は、①搬出土砂を計測する、②平地ではGPSを使用する、③検測時のみ人が現場内へ入る等の措置により行っており、より合理的で安全な検測方法が必要である。特に遠隔操作施工に適した方法の実用化が求められている。

(4) 無線

無人化施工では、無線により遠隔操作型建設機械を操作しており、操作に使用する周波数は429MHzの特定小電力無線が一般的である。このうち遠隔操作型建設機械に使用する「テレコントロール用」は、40chある。しかし、混信を防ぐために実際使用できるチャンネル数は、無線機の発信と受信特性から決められるため、5～20chとメーカー毎により異なる。一度に同じ現場で複数の機械を利用するために混信の問題があり、この通信の確保が課題となっている。

カメラ映像の伝送用としては、簡易無線の50GHzが使用されているが、周波数が高いために指向性が強く、パラボラアンテナ装着時の指向範囲は3度以内、パラボラアンテナを外した状態で指向範囲は30度以内である。建設機械に簡易無線(カメラ)を装備する場合は、ジャイロを利用して通信対象となるアンテナを追従する自動追尾装置が必要となる。

(5) 機器の安全装置

遠隔操作に関連した安全装置としては、非常停止装置、無線の誤動作防止機構、誤操作防止機構(デッドマン装置、ニュートラルチェック等)がある。また、建設機械本体には、電波の受信状態を表示する装置や故障時の警報装置がついている。

非常停止として、電波不良時、操作器からの押釦よりエンジン停止となる機構としている。

4. 2. 2 施工状況

(1) 作業効率、施工精度

作業効率(ここでは、搭乗式の有人施工に対しての効率をいう。)は各施工現場や施工システムにより状況が異なるため一概にはいえないが、聞き取り調査によればブルドーザでは搭乗型と同程度、バックホウで搭乗型の3～6割程度との報告がある。また、緊急時に行われる無人化施工については工事契約のための積算では効率は0.6を標準とし、後に契約変更することが述べられている。

この効率は、使用される建設機械の機種・規格・作業内容による差異の他、これを左右する要因として、地形・地質等の現場条件やオペレータに提供される視覚情報の内容・質、操作システムの特性、オペレータの技量・経験等多くの事項に影響されると考えられる。ブルドーザによる施工では、土石流上

面では土砂しか見あたらないが、下面に直径 2～3m の岩石が堆積しているために搬出に手間取るケースも見られた。

精度の点では、レーザを用いたトータルステーションによる測量を行うと高い測量精度は得られるが、遠隔地の操作室でカメラ映像を用いた無人化施工では丁張りの替わりのマーキングとの位置関係を目測で確認して施工を行うことになるため、1 m程度の誤差が発生する。

(2) 機器の故障

遠隔操作型建設機械の故障としては、機械動作による反動が直接伝わってこないために無理な作業を行い部品が壊れるケースや、走行面の状態が良く把握できずに油圧ホースを引っかけて切るケースが見られた。また、通常は搭乗型として使用し遠隔機器のメンテナンスがなされず、遠隔機器の断線により故障するケースがあった。このような面で機械整備工と電工の常駐が必要である。

4. 3 考察

これまでの議論では、緊急の災害復旧工事で人が立ち入ることが出来ない危険箇所での無人化施工に関しては実用化されているといえる。

しかし、ここでさらに、今後、「無人化施工」技術が一般の工事へ適用されるかという観点から考えるとそれは困難であり、コスト面での問題、施工能率・施工速度の問題、対応工種・作業が限定されている問題、電波の利用制限の問題、施工機械・オペレータ・支援技術者の問題、施工精度確保の問題等がある。

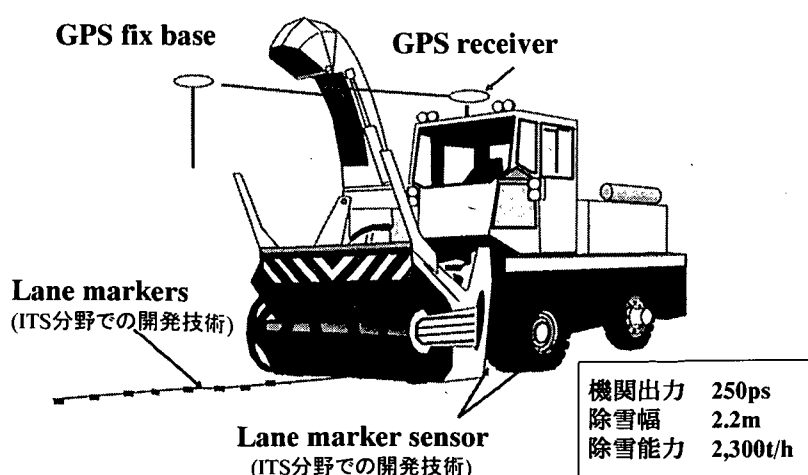
これらの問題を、施工機械と施工技術の面から考えると、つぎのような課題が解決される必要がある。

- ① オペレータが遠隔地から施工状況（全体、作業箇所）を把握するためのインターフェイスの問題
- ② オペレータの操作制御方法におけるインターフェイスの問題
- ③ 施工箇所とオペレータ間のデータ伝達に関する問題
- ④ 作業機械の作業性能（機能、能力）の問題
- ⑤ 施工準備、施工管理手法の問題（丁張り設定、出来形管理、品質管理等）

さらに、施工の容易化、能率向上を図るためには、施工機械にセンシング機能、計画・判断機能、自動運転機能を付加することで合理化を図る、自動化・ロボット化を目指した技術開発を進める必要がある。

5. 除雪機械の自動操舵システムの開発

除雪作業は、積雪期の道路交通を確保するために欠かせない作業で、各種の除雪機械によって道路上を走行しながら路上の雪を処理する。一般の土木工事と比べ機械が走行する位置が比較的限られているが、すぐ隣を一般の自動車が走行し歩行者が歩いておりオペレータは大変神経を使う作業となっている。いずれも屋外で機械が移動しながら行う作業であり、その



図－11 ロータリ除雪車の自動操舵システムの開発

自動化においては機械自身の位置の検出と作業対象物との関係の認識およびそれに基づく制御など共通の課題がある。

ここでは、ITを活用した機械の位置制御の自動化技術の開発例として、国土交通省からの委託により土木研究所で行った「除雪機械の自動操舵システムの開発」に関して、基本となる位置検出及び制御技術について述べるとともに、実機を利用した実証実験の結果を紹介する。(図-11)

5.1 開発の背景

ロータリ除雪車は、道路の路側に寄せられた雪を排除する拡幅除雪、運搬排雪作業に用いられ、車両を運転するオペレータと投雪作業を行う助手の2名が乗務している。オペレータは路上のマンホール等の段差に注意しながら路肩の縁石の間隙を走行する運転操作を行い、助手は沿道の住宅等の投雪禁止区域を回避するきめ細かな投雪作業の制御を行う。これらの操作は一般車両が往来する交通流の中で安全を確保しながら行われるため、熟練された技術が必要としている。一方、除雪機械のオペレータは近年、高齢化の傾向が顕著であり、将来の労働力の確保が懸念される。

そこで、現在オペレータの作業である車両の運転操作の一部を自動化し、助手の作業である投雪操作を受け持つことを可能にすることで、将来のワンマンコントロールが実現することを念頭に研究開発を進めている。

5.2 自動操舵支援技術

将来的に実現を目指す運転操作の自動化機能のうち、今回開発した自動操舵支援技術は、ロータリ除雪車のステアリング操作を自動化したものである。

5.2.1 ロータリ除雪車のステアリング制御

機械の動作の自動制御を行うには、あらかじめ機械の挙動をコンピュータによって予測可能なように、機械の運動と制御内容を数式やパラメータによりモデル化して与えておく必要がある。

ロータリ除雪車のステアリング機構は一般の車両と異なり、車体の前部と後部をピンで連結し屈折させるアーティキュレイト機構を採用している。そこで制御方法は、移動車両等の軌道を制御するのに有効な非ホロノミックな拘束を受ける運動方程式で表される非線形制御理論における「厳密な線形化手法」と「時間軸変換」を採用した¹⁰⁾。この方法は車体の横滑りがないものとして定式化される。しかし除雪車は図-12の例のように雪堤から除雪作業の反力を受けながら走行し、横滑りを発生する。そこで滑りを外乱として取り扱い、後述する積分型のサーボ系を構成することで制御することとした。

(1) 軌道追従制御

図-13において除雪車の連結ピン部から前部車輪及び後部車輪までの距離をLとおく。前部車両に対する連結ピン部折れ角を 2α としたとき、除雪車が通る軌道は半径 $R=L/\tan\alpha$ の円弧となる。前車輪中心点Pでの軌道接線方向速度ベクトルを v 、接線方向角度を θ としたとき、P点の運動方程式は次で記述できる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \frac{v}{R} = v \frac{\tan \alpha}{L} \end{aligned} \quad \cdots \textcircled{1}$$

①式に対して「厳密な線形化」と「時間軸変換」を行い、状態フィード

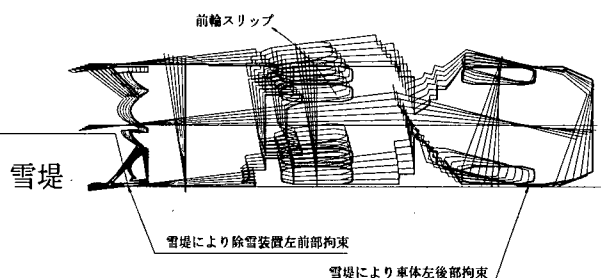


図-12 除雪作業時のロータリ車の挙動(例)

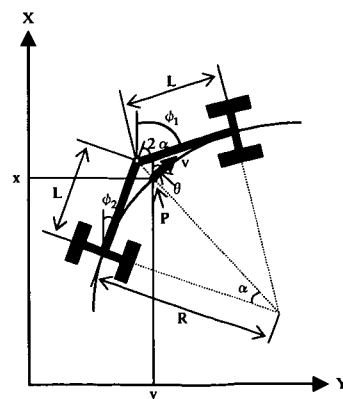


図-13 座標系

バック制御を施すと、除雪車の操作量である連結ピン部折れ角 α は、次式となる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ (f_1 y + f_2 \tan \theta) / L \cos^3 \theta \right\} \quad \dots \dots \dots ②$$

②式では、横滑りが考慮されていない。そこで横滑りによる定常偏差を無くするために、積分型のサーボ系を構成すると、操作量 α は、次式となる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left[L \cos^3 \theta \left\{ f_3 \int_0^t (y - y_{ref}) \cos \theta dt + f_1 y + f_2 \tan \theta \right\} \right] \quad \dots \dots \dots ③$$

f は制御ゲインであり、③式より、 f_1 は比例ゲイン、 f_2 は微分ゲイン、 f_3 は積分ゲインを示し、PID 制御を用いてシステムを構築した。

5. 2. 2 位置検出方式

開発したシステムは、2 方式の位置検出に対応した機能を装備している。一つは、レーンマーカ・センサを用いた位置検出による誘導方式、もう一つは、GPS と GIS を用いた位置特定によるステアリング制御である。

5. 2. 3 レーンマーカ・センサ誘導方式

レーンマーカ・センサは ITS(Intelligent Transportation System)分野で開発された AHS(Advanced Cruise-Assist Highway Systems)の要素技術であり、路面に埋設されたレーンマーカの位置を、車両に設置されたセンサとマーカからの信号で検知し、マーカの埋設軌道に誘導する方式である。これには電波式と磁気式の 2 種類がある。

(1) 操舵角算出の考え方

レーンマーカはある間隔をもって路面に埋設されるため、得られる信号は連続でなく離散している。マーカの埋設間隔は、道路に設置するインフラとしてのコストに直接影響するため、粗であることが望ましい。ただし、急なカーブや交差点等の操舵制御量が大きい区間では、制御システム構築の観点より設置間隔を密にする必要がある。したがってマーカの設置間隔は道路線形によって異なり、マーカを通過するまでは設置間隔が未知であることが考えられる。そこで、今回開発した制御システムではマーカセンサを 2 列設置し、マーカ通過時の位置を次のマーカを通過するまでホールドし、前後位置の相対差を比較することで、未知であるマーカの設置間隔に対応した (図-14)。

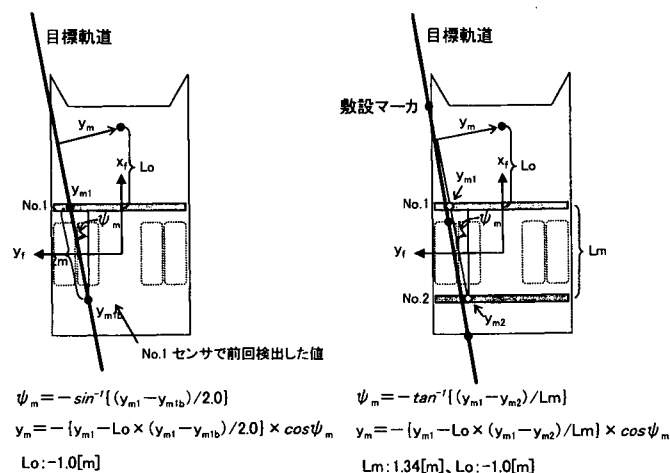


図-14 レーンマーカ・センサ誘導方式

今回のロータリ除雪車に採用したレーンマーカ及びマーカセンサシステムは、国土交通省により開発されたものを調達し、活用したものである。以下にそのシステムの概要を紹介する。

(2) 電波式マーカセンサ位置検出方法

電波式は、車両に搭載された検出装置側から 227.5kHz の電波を送信アンテナで路面に向け送信し、電波マーカ (写真-2) がこの送信電波を受信すると 2 倍の周波数の 455kHz で反射する。この反射電波を受信アンテナで受信し、マーカと車両間の通信を行うことで、位置検出を行う (図-15)。

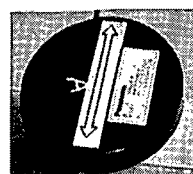


写真-2 電波マーカ

マーカ軌道上の位置（縦方向）は、100ms サイクルの送信電波により、反射電波のピーク値を検出することで判断する。道路横断方向の位置（横方向）は、車幅方向に 6 個設置された受信アンテナが、電波マーカからの反射電波を 2 つ以上のアンテナで受信し、その時の受信強度値を三角測量法でアンテナ間の距離を演算し、マーカ位置を検出する¹¹⁾。

（3）磁気式マーカセンサ位置検出方法

磁気式は、路面下の永久フェライト磁石である磁気マーカ（写真－3）と車両に設置された磁界密度を検出する磁気センサにより磁場の強弱で位置を特定する。

磁気マーカの直上磁界強度 (B_z0) はマーカ直下で $170\mu\text{T}$ であり、磁界分布は、車両進行方向 B_y （縦方向）、車幅方向 B_x （横方向）共に単峰性を示す。この磁場の垂直成分 (B_z) と車幅方向成分 (B_x) の磁束密度を磁気マーカで検出し、予め規定している B_x/B_z 関係式よりセンサとマーカ間の距離を算出し、マーカ位置を検出する¹²⁾。

5. 2. 4 GPS/GIS 位置特定方式

GPS/GIS 方式は、GPS 衛星からの受信データによるロータリ除雪車の位置座標と、予め道路 GIS 上で与えられている目標となる道路の線形データの位置座標を照合し、自車の位置を特定し、制御を行う方式である。

（1）道路 GIS

道路 GIS は、道路行政に利用される道路全般に渡るデータベースとして構想されているもので、構造物や交通管理に関する情報が電子化されて納められる技術である。今回の開発では、ロータリ除雪車の目標軌道情報をこの GIS データのルールに基づき生成し利用した。

現在の拡幅除雪等においてロータリ除雪車のオペレータは、除雪端部を指標として走行している（図－16）。除雪端部は一般的に道路側端の歩道の縁石であることが多いことより、採用した GIS データは縁石のデータとした。

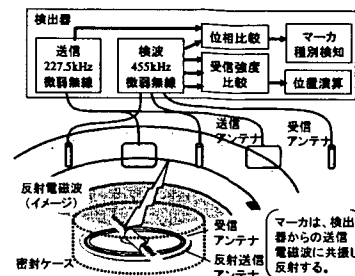
（2）RTK-GPS

RTK-GPS は、GPS 受信アンテナを固定局と移動局（除雪車上）の 2 ヶ所に設置し、固定局の GPS 受信データを無線で移動局に伝送することで高精度（誤差半径 2 ～ 3 cm 程度）な位置計測が可能な技術である。

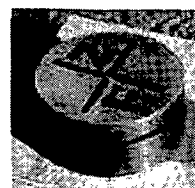
GPS 受信データの更新は 20Hz であることより、ほぼリアルタイムに位置計測できる。また、座標は世界測地系を適用し、GIS データと整合を図った。

（3）目標軌道情報

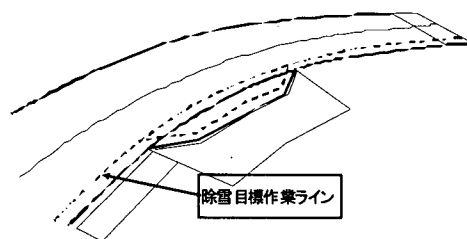
GPS 衛星からの位置データの受信範囲は、国道全線を網羅できない。その不感地帯をレーンマーカ方式で補うことを想定し、今回開発したロータリ除雪車には、レーンマーカ・センサ方式と GPS/GIS 方式の 2 つを装備するし、お互いの方式が円滑に切り替えられるように配慮した。



図－15 電波マーカシステム構成



写真－3 磁気マーカ



図－16 道路 GIS データ

5. 3 実証実験

今回開発したロータリ除雪車で実道での除雪作業を想定した実証実験を平成14年1月～2月の間、北海道小樽市内で実施した。

実証実験は、自動操舵の各方式の除雪車特有の挙動（低速、横滑り）に対する適用性と実用性に関して、実道作業を想定した評価を目的として実施した。

5. 3. 1 実証実験概要

(1) ロータリ除雪車

ロータリ除雪車の本体は、国道で最も利用頻度の高い中型（250ps級）機種を採用した（図-17）。本機は、平成14年度より実道で稼働する予定のものであり、一般的に調達される仕様の本体に、一部改造が加わった仕様である。ステアリング機構は基本が油圧制御であることから、サーボバルブ、電磁駆動方向切換弁を追加した形とし、従来の運転機能を損なわないように構成した。

(2) 実証実験コース

実証実験のコースは図-18のように構成し、実際の道路の線形を組み込んだものとした。具体的には、国道の条件を再現するものとし、直線部、カーブ部、交差点部で構成し、カーブ部は前後にクロソイド曲線を設け、曲率は道路構造令より最も厳しいR30mを適用した。レーンマーカの埋設間隔は、コースの前半を2.0m、後半を1.5mと変化させた。

ロータリ除雪車の作業速度は、拡幅除雪を想定した4km/hと、運搬排雪を想定した0.5km/hの2種類とした¹³⁾。また、除雪負荷も除雪車に横滑りを与えるため、拡幅除雪を想定した三角断面の雪堤を成形した。

5. 3. 2 実証実験結果

実験は、①レーンマーカ・センサ（電波式、磁気式）誘導方式の単独制御、②GPS/GIS位置特定方式の単独制御、③上記①と②の併用制御を実施し、検証した。

(1) 除雪作業軌跡

除雪作業の出来形は、写真-4に示す状態で、雪堤側の除雪断面も多少の凹凸はあるものの、ほぼ均一に仕上がっている。なお、除雪作業の軌跡はGPS移動局の受信データを用い、記録した。

(2) 制御性能評価

今回構築したステアリング制御は、設定した目標軌道に追従するシステムであるため、制御性能を評価する指標は、除雪車の目標軌道からのずれ量（横ずれ量）とした。実験では、このずれ量を最小化するため、制御調整値（ゲイン）を油圧機器の反応速度、路面状態等の諸条件に合わせ、入念に調整した。

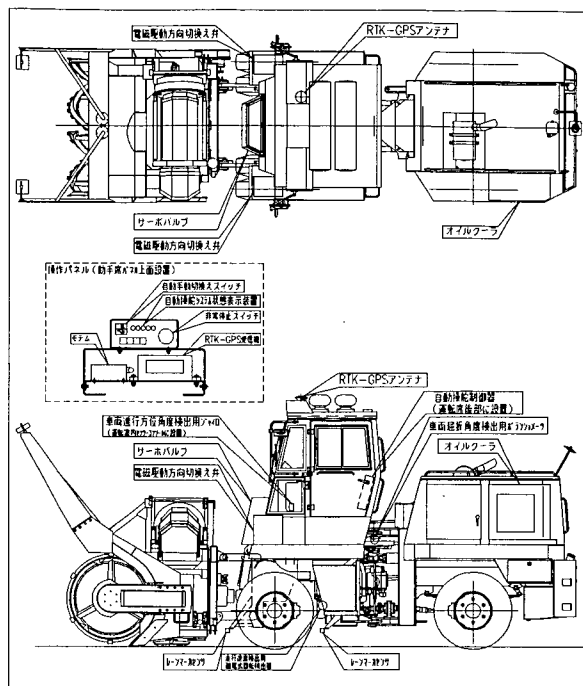


図-17 自動操舵支援機能付ロータリ除雪車

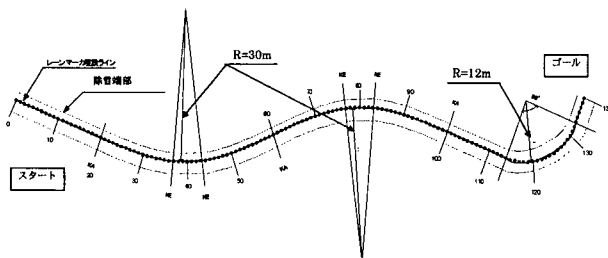


図-18 実験コースレイアウト

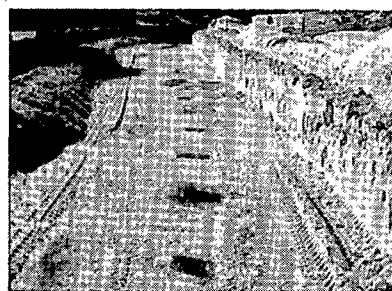


写真-4 除雪作業軌跡(電波マーカ方式)
注)中央はマーカ位置を示す印

実験結果の横ずれ量を方式毎に整理したものが表－3である。

これによると、全般的には直線部は横ずれ量、標準偏差が共に小さいが、カーブ部、交差点部は共に大きい。これは、曲率半径が小さい区間ではステアリング操作量が大きいのに加え、除雪負荷等の外乱による横滑りも生じやすいことが理由と考える。

方式別では、GPS/GIS方式がレーンマーカ方式より優位であることがうかがえる。前者は20Hzとほぼリアルタイムに位置を計測することで、横滑りにほとんど瞬時に反応しステアリングを制御するため、横ずれ量が少ない。一方後者は、マーカ～マーカ間の無信号区間の横滑りは検知できずステアリング操作が遅れるため横ずれ量が大きくなる。そこで、マーカ通過時はセンサとの横ずれ量の補正のみではなく、次のマーカの座標（軌道情報）を与えること実験した。横ずれ量の分布結果は図－19に示す通りで、このときの 2σ （ σ ：標準偏差）は、軌道情報なしでは $\pm 57\text{cm}$ 、軌道情報有りでは $\pm 31\text{cm}$ となり、大幅な改善が図られGPS/GIS方式とほぼ同等の制御性能に向上した。

4km/hと0.5 km/hの速度差による性能差は見られなかった。

レーンマーカ・センサ方式とGPS/GIS方式の併用制御は、GPS/GIS方式で走行中、急にGPS衛星が補足できなかった場合に円滑にレーンマーカ・センサ方式に切り替わる、又はその逆を想定したものである。指定した地点でどちらかの方式の位置検出信号を機械的に遮断する操作で模擬した結果、異常な挙動なく円滑に移行できた。

5. 4 結論及び今後の課題

レーンマーカ、GPS、GISなどを活用しての自動操舵制御技術は、ロータリ除雪車の一般的な除雪作業において概ね実用レベルの制御が可能となることを確認した。ただし今後の実用化へ向けには、以下の課題への対応が必要である。

①GPS/GIS方式では、開放的な空間であっても一時的に検出精度が落ちる場面が観察された。原因は、GPS衛星の位置が狭い範囲に集中することによるのではないかと推測される。また、電波マーカ方式においても、実験で車体に取り付けた高出力の送信機の影響と思われる予測できない挙動を示した場面があった。このような状況への対応策として、異常な動作信号が出力された場合には、オペレータに依存しないで自動的に停止する機能を付加することが必要である。

②レーンマーカ方式は、GPS/GIS方式同様、レーンマーカの座標を予め除雪車に入力し、軌道情報を与えて制御精度の向上を図ることが必要と考えられる。それには、マーカ通過毎に当該マーカの通過記録が必要で、このマーカを読み飛ばした場合の対策が必要になる。

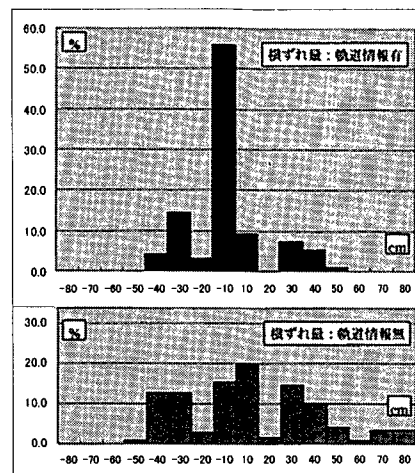
③さらなる制御性能の向上（横ずれ量の低減）を図るには、除雪車の横滑りや除雪負荷等の外乱の定量化に努め、ロータリ除雪車の除雪作業のモデル化を行い、制御技術においてはシミュレーションによる最適方式の選定、パラメータの設定を行う技術を目指す必要がある。

6. おわりに

近年、情報技術（IT）を活用した工事施工の高度化に関する取り組みが各所で実施されている。し

表－3 システム毎の横ずれ量（一例）

単独動作（作業速度4km/h、前センサ位置ずれ量） 単位：m					
道路線形	直線	左カーブ	右カーブ	直線	交差点部
電波式	最大値	0.25	0.41	0.28	0.39
	最小値	-0.23	-0.49	-0.38	0.02
	平均値	-0.05	0.06	-0.13	0.16
	標準偏差	0.12	0.23	0.19	0.12
磁気式	最大値	0.06	0.35	0.37	0.42
	最小値	-0.18	-0.37	-0.53	0.11
	平均値	-0.04	0.08	-0.25	0.27
	標準偏差	0.06	0.21	0.24	0.10
GPS	最大値	0.04	0.04	0.25	0.24
	最小値	-0.03	-0.32	-0.26	0.00
	平均値	0.00	-0.08	-0.04	0.07
	標準偏差	0.02	0.11	0.10	0.08



図－19 軌道情報有無による横ずれ量

かし、情報を利用するために個別のシステム開発だけを押し進めても情報入力などの手間が増大する一方で十分な効果が得られない危惧がある。

ITシステムの活用によるメリットを最大限に、速やかに享受できるようにするには、まず業務プロセスの改善を的確に行うとともにそこで適用されるシステム間のデータ交換・共有を実現していくことが重要である。ここで取り扱う情報は、標準化が図られ、次のサイクル（工程）あるいは他のシステムで利用できる必要がある。そのためには誰もが共通認識を持つことが出来るように業務プロセス、データ構造のモデル化を行い、それに基づく標準が示される必要がある。

データの高度利用により作業対象へ働きかける施工システムにおいては、施工の自動化・ロボット化を実現するために、まず対象とする作業プロセス、機能のモデル化やそれに基づくシミュレーション技術などが確立される必要がある。ロボットによる作業のような高度な機能を実現するには、実用機の開発にかかる前に、システムの機能や構成の全体を見通した検討が必要であり、モデル化やシミュレーションなどの基礎的な技術の研究開発が必要である。また、施工のプロセスで人間が関与する場合には、人間とシステムとのインターフェイス技術の改善に取り組むことが必要である。

最後に、現実に活用されるIT施工システムの構築・導入を着実に進めるためには、一連の業務プロセス、機能を見失うこと無く、ステップバイステップで技術開発と導入を進めていくことが出来るような取り組みが重要と考えられる。

【参考文献】

- 1) Francois Peyret : STANDARDIZATION OF DATA FLOWS ON EARTHWORKS AND ROAD PAVEMENT SITES USING INFORMATION SYSTEMS, 19th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION, pp.305-310, 2002.9
- 2) 小林隆幸ほか：IT土工システム DREAM、土木施工 Vol.42 No.1、pp.4-12、2001.1
- 3) 吉田 正：ISO/TC127(土工機械)ワルシャワ会議が開催される、土木技術資料 Vol.44 No.10、pp.6-7、2002.10
- 4) 緊急時の無人化施工ガイドブック；財団法人先端建設技術センター編、2001.7
- 5) 伴 喜生、橋本正一：無人化施工の現状と課題、第9回建設ロボットシンポジウム論文集、pp.65-70、2002.7
- 6) 村松敏光：情報化施工と今後の動向①；建設機械、Vol.38,No.1、pp.8-19、2002.1
- 7) 日経BP社：身近になった無人化施工；日経コンストラクション、2002年1月25日号、pp.38-56 2002.1
- 8) 朝倉義博、吉田正、柳原英夫：災害復旧工事における無人化施工の課題と対策；土木技術資料 Vol.40,No.7、pp.56-61、1998.7
- 9) 藤井政雄：雲仙普賢岳における無人建設機械の操作実感；建設機械、Vol.36,No.1、pp.40-43、2000.1
- 10) 三平満司、伊藤毅：非線形制御理論を用いた車両の経路追従制御と移動計画－切り返しを用いた車庫入れ制御；システム制御情報学会論文誌、Vol.6 No.1、pp.37-47、1993
- 11) 半田悟、中塚章、丹治義彦：レーンマーカシステム；Matsushita Technical Journal, pp45-49, 2001.10
- 12) Hiroyoshi Suzuki : Development of Lane Marker System in AHSRA, 6th World Congress on Intelligent Transport Systems, 1999.11
- 13) 道路除雪ハンドブック第4版；社団法人日本建設機械化協会編、pp131、1993.8

[一般講演]

時代の要請に応えるダムの水理設計技術

水工研究グループ上席研究員（ダム水理） 柏井 条介

目 次

1. はじめに	99
2. 掘削量低減措置	100
2.1 越流部	100
2.2 減勢工	103
3. 治水専用ダムの常用洪水吐き	105
3.1 土砂排除施設としての常用洪水吐き	105
3.2 魚道としての常用洪水吐き	107
4. 既設ダムへの放流管の増設	109
5. 新式ゲート	111
5.1 引張りラジアルゲート	111
5.2 ゲート底面が円弧のジェットフローゲート	113
6. 土砂バイパス施設	115
参考文献	117

時代の要請に応えるダムの水理設計技術

水工研究グループ上席研究員 柏井 条介

1. はじめに

本稿は洪水吐きを始めとする最近のダム水理構造物の設計事例をまとめたものである。タイトルの「時代」は、ここ 10 年ほどを指している。

最近は余り聞くこともなく筆者も使うことがないが、先輩諸氏からは「ダムは一品料理」という言葉をよく聞かされた。ダムに同じものはないから心して造らなければならない、という技術者の自戒であり、筆者ら後輩への教訓であったかと思う。一方、筆者が主に係ってきた多目的ダムの水理構造物では、ゲートのない洪水吐きの増加や 10 年程前になされたダム・堰施設技術基準(案)の策定といった近年の動きがある。こうした動きの中、施設の多様性は徐々に失われ、マニュアル的な計画・設計が多くなっている印象を受けている。「一品料理」の情熱は失われつつあるとあってよい。筆者は、既設ダムの設計事例の蓄積により、設計の簡素化が図られるのは当然の流れであり、生活貯水池など小規模ダムが増加すれば、計画・設計における思考過程の規格化も必要であろうと思っている。その意味では「一品料理」の昔にこだわるものではない。

時代の要請が水理構造物の規格化にあるのであれば、規格内容を記述するのが本稿の内容となるべきであるが、本稿の内容はその逆である。

土木研究所では旧土木研究所時代から引き続き、国土交通省のダムを中心にダムの水理構造物の水理模型実験を実施してきている。即ち、これら施設の水理設計に関与してきている。以下に示すものは、土木研究所が係ってきた最近の水理設計事例を、検討中のものも含めてとりまとめたものである(多くは直接関与したものであるが、一部に間接的に関与したものも含んでいる)。検討中のものについては、必要に応じ今後の課題にも言及した。まとめてみると、大半の施設が検討時期の所謂規格品を逸脱している。逸脱の必要性があった、或いはあるからである。必要性は土木研究所側から発したものもあるが、多くは直接の事業担当者側から提供されたものである。事業担当者の「一品料理」への熱意は健在というべきであろう。

提供された必要性はもちろん個別ダムに係るものである。しかし、全体として眺めると昨今の時代の流れを抽出することができる。本稿タイトルと齟齬は生じないと思っている。キーワードは環境、コスト縮減、既設貯水池の有効利用である。前 2 者は近年の土木界全体のキーワードでもあり、説明する必要はないであろう。既設貯水池の有効利用は、ダム独自の事情かもしれない。

2001 年版のダム年鑑によれば、わが国における高さ 15m 以上の完成ダム数は、敗戦年の昭和 20 年に 1,198 であったものが、55 年後の平成 12 年 3 月には 2 倍以上の 2,704 を数えている。特に、大規模ダムの建設はこの時期に集中しており、この期間内に 95% の貯水容量が建設されている。わが国ダム建設の歴史は、確認されているだけでも 2000 年に迫る長いものであるが¹⁾、近年の建設状況は歴史上特筆すべきものであり、管理ダムの蓄積、経験年数の増大は、ダムの利用法について幾つかの要求をもたらすようになっている。複数ダムを用いた効率的な運用への要求、必要機能の変化に対応した柔軟な運用変更などである。運用方法の変化は、放流設備の新設につながる場合もある。また、堆砂問題が絡めば土砂排除施設が必要になる場合もある。既設貯水池の有効利用はそういう流れを指している。

本稿は、当初は上記キーワード毎に項立てする予定であったが、うまくまとめることができなかった。一つの技術が複数のテーマに係るからである。そこで、技術内容で項立てし、その必要性又は効果という形でキーワードとの係りを記述することとした。ダムは依然として規格品としてのみでは計画・設計できないのである。無理に一品料理化する必要はないが、規格化された考えに合わせる為にいたずらに掘削量を増やす、また、技術の冒険を回避するのは問題のある流れではないだろうか。そのことが伝達できれば幸いである。ダムの水理設計技術が細部技術の蓄積にあることを理解戴ければ更に幸いである。

2. 掘削量低減措置

2. 1 越流部

ここで述べる例は、必要な越流量を確保するための越流頂長が重力式コンクリートダムの堤頂長より長く、通常の設計では越流頂長確保のために更に堤体部を延長させる必要がある場合の対応である。堤体として必要な堤頂長内に越流頂を収めることにより、掘削量を減少させ、ダム建設による地形の改変面積を小さくすることができる。もって、環境への影響を低減するとともに、コスト縮減にも寄与するものである。

こうした問題が出てくる背景として、洪水吐きのゲートレス化、特に非常用洪水吐きのゲートレス化の流れがある。洪水調節を目的に含む多目的ダムの洪水吐きは、洪水調節用の放流設備と堤体の越流を防止する非常用洪水吐きから構成され、洪水調節用放流設備は一般に放流管やオリフィスの管路式の放流設備により、非常用洪水吐きは越流頂により計画・設計される。洪水吐きのゲートレス化は流域面積が小さくゲート操作を行うことの確実性に問題のあるダムが増加してきたこと、及び管理ダムの増加による人的負担を軽減すること等の理由により進んできている。特に、操作変更により貯水池の建設効果が影響を受ける洪水調節用放流設備に対し、そうした影響がなく、また、堤体の安全性に係りより確実な操作が求められる非常用洪水吐きでは、可能な限りゲートを無くしていこうという流れがある。

重力式コンクリートダムの非常用洪水吐きは、堤頂部に設けられる。堤頂には図-1 に示すように管理用の道路が設けられ、越流頂を仕切るように橋脚が設置される。

橋脚幅は通常 1.5～2.0m 程度であるが越流頂が堤頂全体に設けられる場合には、10 以上の橋脚が設けられる場合もあり、越流幅の無視できない部分を占めることになる。また、堤頂道路からアプローチ可能な用管理用のエレベーターや選択取水設備が設けられこれらの幅も越流幅から除かれる。更に、

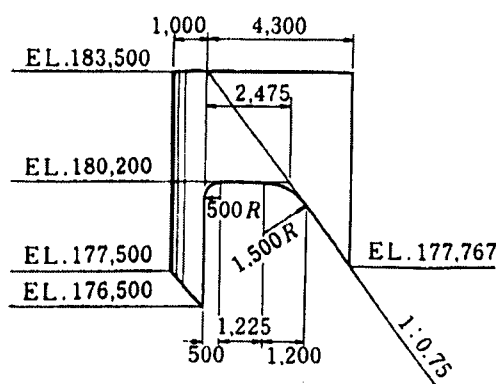


図-1 自由越流頂と橋脚

洪水調節用オリフィスや放流管入口にゲートを設置する場合には、これら施設の入口上方区間も越流幅として使えない。こうした制約のもとで通常の洪水吐き配置をすると、堤頂長を大きく超える越流頂長となるダムが幾つか生じることとなった。

対処方法は、まず堤頂長を可能な限り有効に利用することにある。そのための方策として次の対応が考えられた。

- 1) 橋脚やエレベーターを越流の支配断面位置より下流に移動させ、越流への影響を低減する。
- 2) オリフィスや放流管と可能な限りオーバーラップさせる。

図-2 はこうした処理を行った灰塚ダムの例である²⁾。同様の処置は青森県の世増ダムにて先行して検討・実施されている。

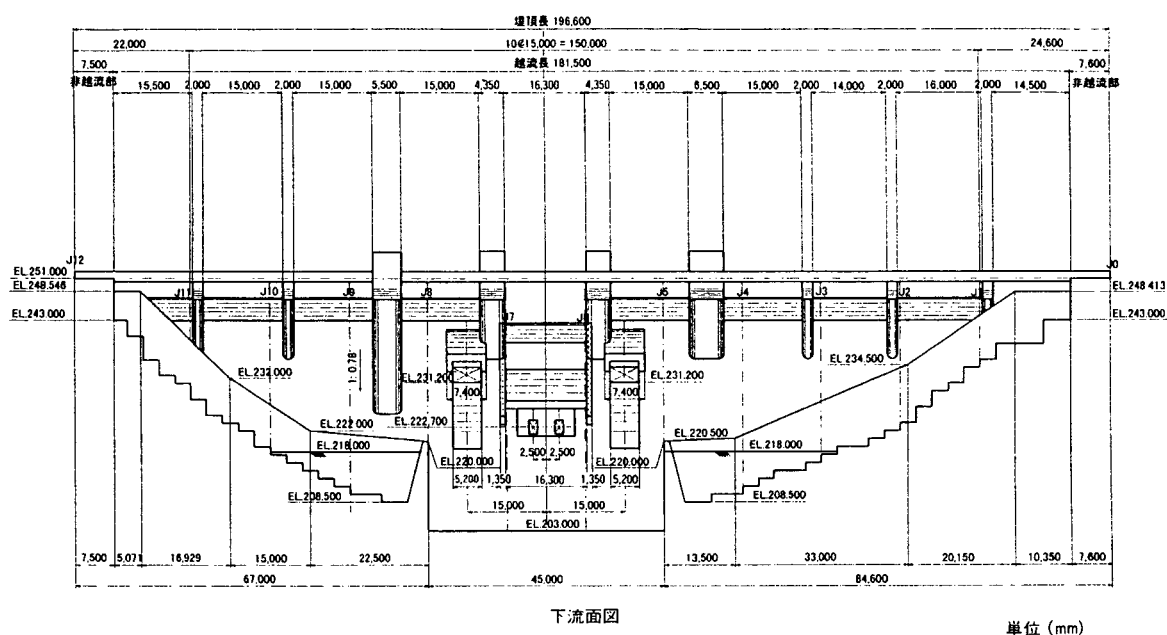


図-2 灰塚ダム洪水吐き配置

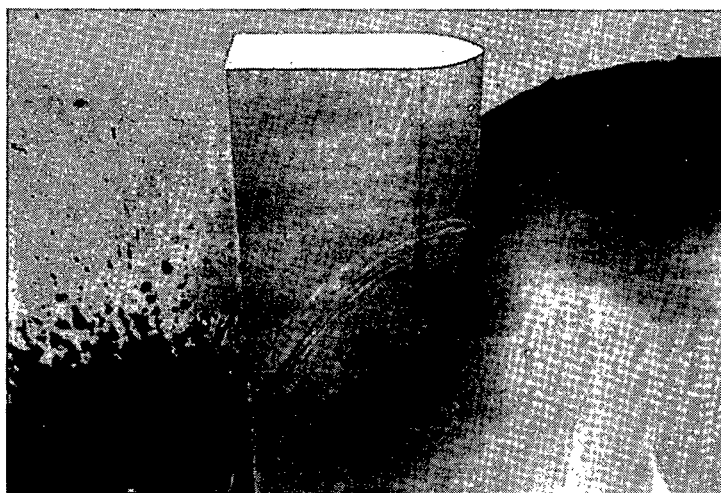


写真-1 下流に移動した橋脚周辺の水脈の食い上がり



図-3 先鋭とした橋脚等の先端形状

橋脚等を支配断面下流に移動させると、橋脚部分で跳ね上がりが生じ、流況が悪化することが懸念される。また、橋脚等の規模が大きくなる。前者は案が許容されるか否かの問題であり、後者は所要の放流量を得る為に必要な移動量を求める問題となる。パラメーターは移動量と橋脚等の上流端形状であり、これらを変化させた世増ダムの検討により、先端形状を図-3に示すような先鋭形状とすることで、水脈の這い上がりを橋脚周りの薄い水脈のみに限定させ、越流量に影響しない程度に下流に移動させても安定した流況が得られること(写真-1)、こうした形状を用い、越流頂部から橋脚上流端までの距離を設計水頭の 70%程度以上とすれば越流量の減少が生じないことなどが把握されており、設計に生かされている。

越流水のオリフィスや放流管とのオーバーラップについては、ゲートの設置位置が確保できる場合及び管路と越流頂間に十分なコンクリート厚が取れる場合に実施可能となる。水理的にはオリフィスや放流管出口への給気方法が課題となる。両水脈の合流部の流速は比較的大きく、両水脈間に給気されない閉空間が生じると大きな圧力降下が生じ水脈の振動やキャビテーション発生の原因となることが懸念される。別途給気管を設置する方法も考えられるが、堤体下流面全体が越流水で覆われている状態では給気管入口の設置場所の確保が難しい。それ故、オリフィスや放流管出口上方にデフレクターを設置し、上方からの越流水脈を下流に放出して堤体下流面上を流下する越流水脈との間に空間を設ける方法をとっている。写真-2はその場合の流況例を示しているが、放出された水脈は減勢工内に空中放流されており、減勢池への影響が別途課題として残る。こうした課題に対応することで洪水吐きの最終形状を得ることができている。

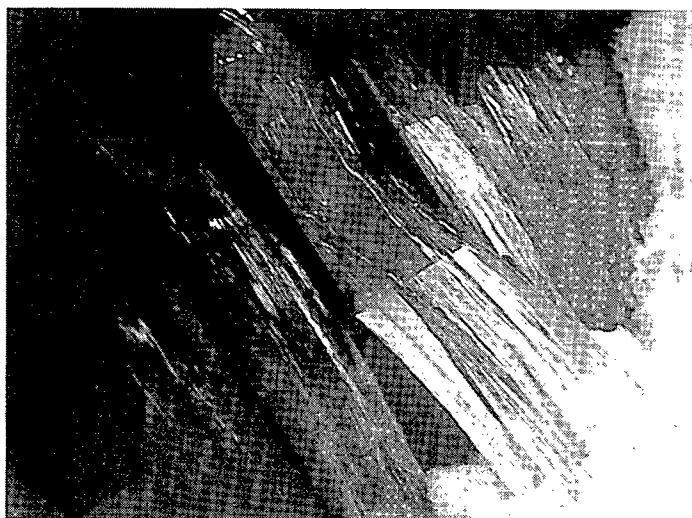
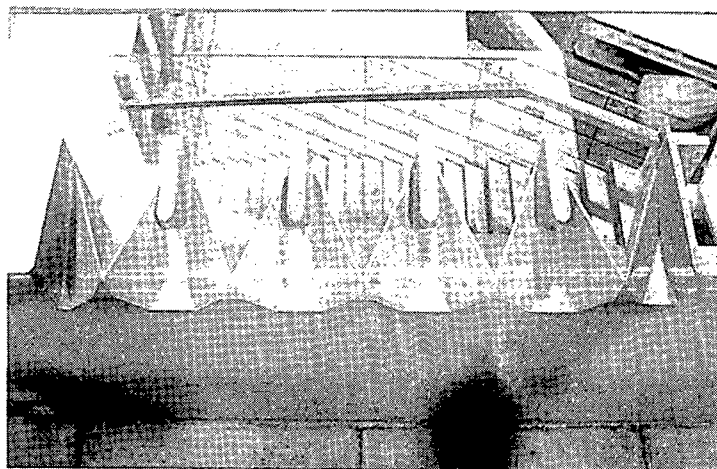


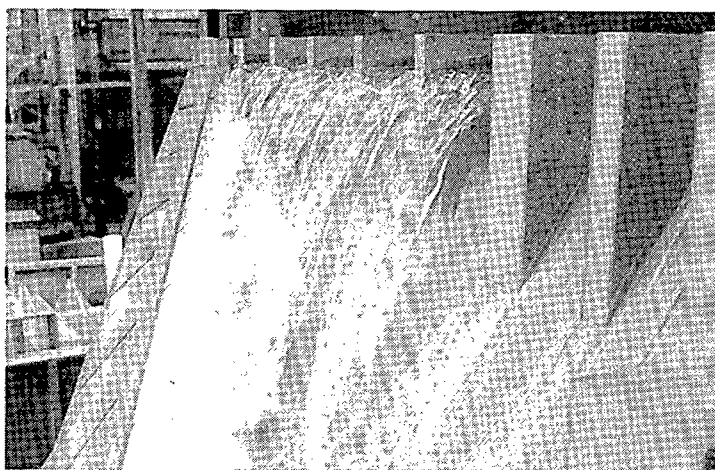
写真-2 デフレクターによる越流水脈の水切り

上記は、橋脚等による堤頂幅の欠損分を無くす方法といえることができるが、それだけでは対応できない場合もある。その場合の対応策として苦田ダムでは写真-3に示すラビリンス型越流頂を用いている³⁾。ラビリンス型越流頂は、越流頂部の平面形状をジグザグにしてダム軸方向での単位幅当り越流量を大きくしようというもので、主としてフィルダムの洪水吐きとして海外で実績がある。地山に設けられるフィルダムの洪水吐きでは、平面形状が地山の状況により制約を受け、まとまった平面形状が確保しやすい場合には、ラビリンス型越流頂が有利になる。これを重力式コンクリートダムに適用したものであり、適用に当り次の配慮を行っている。

1) ラビリンス型越流頂では、越流水脈の相互干渉の影響を小さくするため越流頂下流は水脈から離



写真－３ 苦田ダムのラビリンス型越流頂



写真－４ ラビリンス型越流頂からの放流状況

す構造とするのが通常である。一方、堤頂を構成する構造物として、引張りを生じさせない必要があり、上流側を 1:1 の緩勾配面とした。

2) 安定した越流状態を得るためには越流水脈下方に十分な給気を行う必要があり、橋脚を水脈分割用のスプリッターとして利用する。

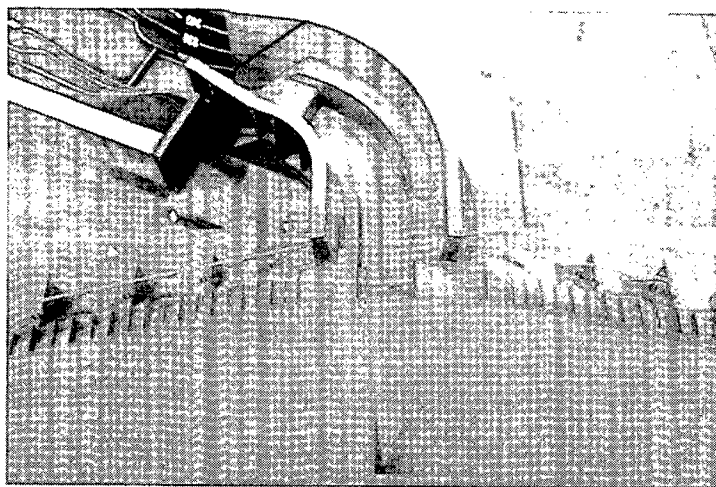
3) 水面と天端橋梁間のクリアランスを確保するため、橋梁を下流側の水面低下部に移動させる。

ラビリンス型越流頂では、小さい面積に流れが集中し越流水深が大きくなるに従って、ジグザグとしたことによる放流量増加の割合が減少する。この減少量は、上流側の接近流速が大きくなる程顕著になる。一方、重力式コンクリートダムでは上流側の水深は十分大きく、流量の減少を抑えることができる利点がある。苦田ダムでは、直線とした場合の 2.6 倍の越流頂長を確保しており、直線越流頂を標準断面形状で建設した場合と比較して 1.4 倍の越流量を得ている。

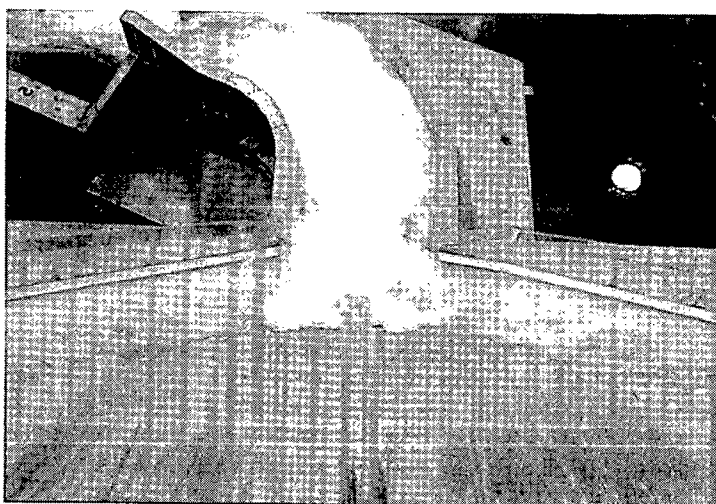
写真－４はラビリンス型越流頂放流時の下流流況を示したものである。越流頂部からの流れは、中央に集中しながら下流側へと放出されるが、下流導流部上の流れは比較的安定しており、問題のない流況となっている。

2. 2 減勢工

減勢工における掘削量低減についても同様に地形改変を減少させ環境への配慮となるとともにコスト縮減に資することができる。減勢工における掘削量低減の基本は、地形形状に合わせた水叩き形状



写真－５ 利賀ダム副断面湾曲減勢池



写真－６ 副断面湾曲減勢池の流況例

の採用にある。先に述べたように近年ではゲートレスダムが増加してきており、非常用洪水吐きは堤頂長を利用して幅広く設置される。この越流幅は、通常下流河道幅よりかなり広いものであり、写真－４に示されるように、越流水脈は堤体下流端の地山取付け部に設置した導流壁により河道に向かって集められる（堤趾導流という）。導流壁は、地山取付け部のフーチング上に設けられ、フーチングは上下方向に階段状に取付けられるので、導流水路は階段水路となるのが通常である。階段水路であること、また幅の広い越流頂であり単位幅当りの越流量がそれ程大きくないこと等から越流水脈はかなり減勢して河道部の減勢池に達する。すなわち、非常用越流頂の越流水脈に対する減勢池の負担はそれ程大きくない。減勢池内の跳水のみに減勢を依存するのは洪水調節用放流設備からの放流であるが、その流量は下流の河道計画とリンクした計画最大放流量程度でありダム安全のための放流であるダム設計洪水流量と比較してかなり小さい。従って、河幅が狭ければ、洪水調節用放流設備の放流を対象とした減勢池をまず想定し、これに上乘せさせる形で非常用の水脈を処理することが可能である。

写真－５は上記の考えのもと、現地の河道幅、地山地形を尊重して作成された副断面湾曲減勢池であり、利賀ダムの減勢池として現在検討中のものである。設計当初における流れの想定は、次の通りであり、副断面の標高は、河道部の掘削を極力小さくすること及び最も経済的な断面となることを目標に検討・設定されている。

１）洪水調節用オリフィスのみからの放流時にはこれを低位標高の水叩き上にて跳水させ、一部湾曲

内側の中位標高の水叩き上に越水させる。

2) 非常用越流時には減勢池での減勢流況は考慮せず副断面全体を使って流下断面を確保する。

上記の趣旨に合わせて、下流水位堰上げのための副ダムも副断面としている。写真-6は非常用越流時の流況を示したものであるが、安定した流況が得られている。

繰り返しになるが、堤趾導流部の流れはかなり減勢されて河道部標高に達する。従って、洪水調節用放流設備の放流水脈を堤体上で幅広く分散させることができれば減勢池を最小にする、場合によっては省略できることも考えられる。こうした発想から、オリフィスの流れを堤体中段に設けた横越流水路に導流して減勢・越流させ堤趾導流上を流下・減勢させる方法について現在検討を行っている。

写真-7はゲート付きダムで放流幅の広い新丸山ダムの検討例である⁴⁾。現況の河道は右岸側の幅の狭い部分にあり、洪水吐き幅はこれと比較して非常に大きいものとなる。本ダムは洪水調節用、非常用放流設備ともにゲート付きダムであり、単位幅当り流量は非常に大きい。従って、利賀ダムの場合のように非常用放流水脈を堤趾部で減勢させるのは無理であり、幅全体に亘り跳水式の減勢池が必要になる。一方、通常考えられている幅方向に水平な水叩きでは減勢池の掘削が非常に大きくなることが懸念された。写真の方法は、現地地山の左岸側が台地形状をしていることから、河道部及び台地部の両者の上にそれぞれ標高の異なる水叩きを設けたものである。

写真にあるように、台地部下流では河道が広がっており、跳水後に直線シュートにより河道標高まで導流し減勢させることも可能である。ただし、落差が大きく、つまり台地上跳水後の残存エネルギーが大きく、かなり大きな減勢池が必要になる。シュート部の構築も必要であり、こうした方法では、水叩きを異なる標高としたメリットが少なくなる。そこで、写真のように、台地上減勢池の流れを側方に越流させ、河道部水叩き上に逐次合流・減勢させる方式を採用した。通常の跳水と比較して流況は若干乱れたものとなるが、本形式の採用により掘削量、コンクリート量ともに大幅な低減が可能になっている。

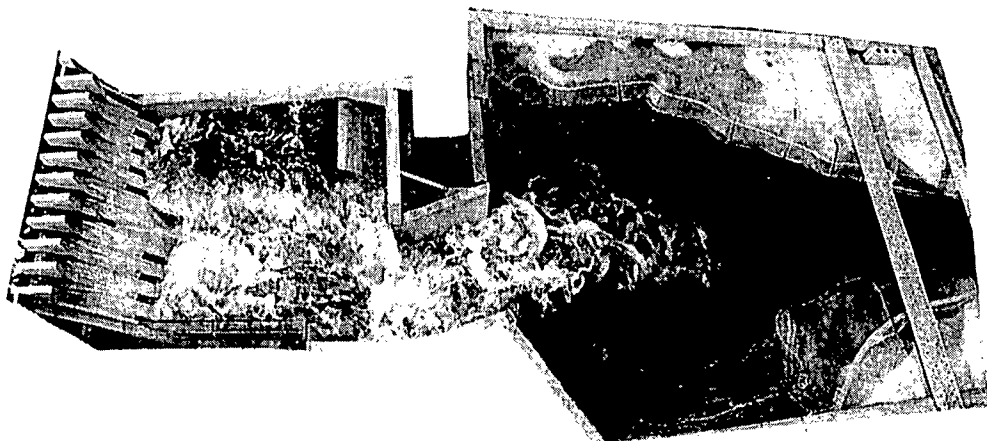


写真-7 新丸山ダム減勢池の流況例

3. 治水専用ダムの常用洪水吐き

3. 1 土砂排除施設としての常用洪水吐き

通常の多目的ダムでは、100年間に溜まるであろう推定堆砂量を堆砂容量として予め確保している。治水専用ダムにおいても従来は同様の考えで計画される場合もみられたが、治水専用ダムは出水時の

み流水を貯留すればよく、常時は貯水池を空虚にすることが可能である。常時のダムを空虚にできれば流入土砂の積極的な排出が可能であり、最近では排砂を前提として治水専用ダムが検討されるようになってきている。排砂することにより、常時のダム上流の状況を河道と変わらないものとするのが可能である。また、必要な貯水空間を減少させ環境への影響低減、コスト縮減を図ることができる。更には、下流への土砂供給が実施され、下流河床等の状況をダム建設前と同様のものとして確保することができるという利点を持つ。一方、放流設備に対しては土砂を流下させる分負担が大きくなる。具体的には洪水調節用放流設備を低位に設置し排砂設備として利用することになり、水のみでなく土砂の流下に配慮した設備の設計が必要になる。具体的には摩耗・損傷及び減勢部での土砂の堆積が問題として浮上する。

土砂の貯水池への流入は、主として出水時に生じ、流入した土砂は、粒径ごとに洪水調節中の一連の水位変化に応じた挙動を示す。即ち、沈降しにくい微細粒子は、流水と同様に一時的に貯留された後、貯水池が空虚になる過程で放流される。また、沈降しやすい大きな粒径の土砂は、貯水位上昇時には水面位置付近に堆積するが、水位の低下に伴い侵食されて下流に移動し、最終的にはダム下流へと放出される。中間的な粒径の土砂は、両者の間の挙動を示すこととなる。施設の摩耗・損傷及び減勢部での土砂の堆積の問題は、基本的には比較的粒径の大きな土砂が対象になる。これら土砂の移動は比較的低い水位で生じることが分かる。

施設の摩耗損傷は、基本的には避けられないものであり、ライニングによる対応を取らざるを得ない。図-4は排砂を積極的に取り入れた益田川ダム洪水吐きの例であるが、堤体への影響を最小限にするという意味で堤体内通過部は耐摩耗性に優れたステンスライニングを施している。また、堤体から減勢部へ繋げるインバート部分についても、流れが内側に変向され損傷が大きい部分であること、堤体への影響があることから、更に、下流副ダム上流面付近についても跳水のために下流水位が確実に確保できるようステンスライニングとしている。一方、減勢池水叩き及び導流壁については、ある程度の損傷は許容するものとし、経済性を考慮して高強度コンクリートを用いるとともに、次に示す堆積土砂の挙動を考慮した水理設計を行っている。

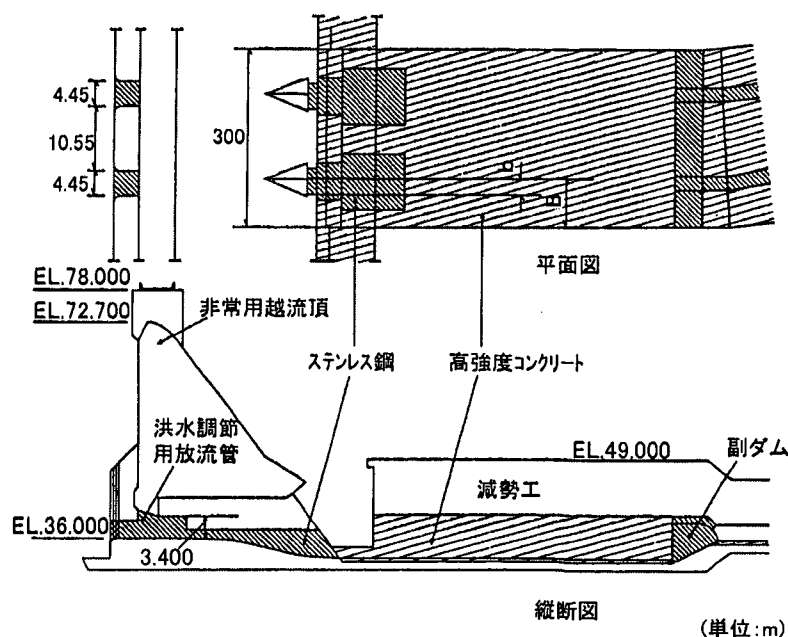


図-4 益田川ダム洪水吐きの概要

減勢部の土砂の堆積は減勢への影響という意味では余り問題とならない。貯水位が上昇し放流水脈の流速が大きくなるに従って堆積土砂は掃砂され、また、上流からの土砂供給量も減少するからである。堆積土砂の問題の一つとして常用放流設備の埋没がある。わが国の減勢工は副ダムにより堰上げ強制的に跳水させる例が多いが、副ダムより低位に設置した常用放流設備では、減勢部の堆砂による埋没が懸念される。現在のところ埋没に対する理論的・体系的な知見は得られておらず個別に検討されているが今後の整理が求められている。

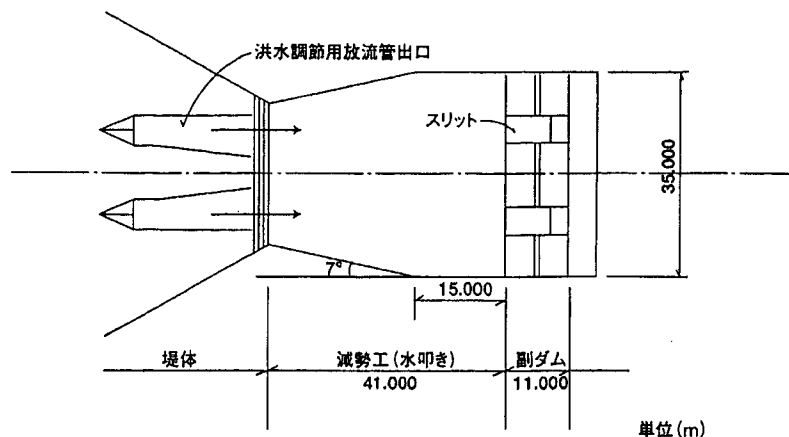


図-5 五木ダム減勢池

減勢部堆砂における他の、かつ重要な問題として摩耗・損傷を助長・加速することが上げられる。すなわち、減勢池の幅は洪水調節用放流設備からの放流幅より通常大きい、その差が大きくなると放流水脈側方に回流となる平面渦が生じ、回流内に土砂が残留する。土砂の残留が高速流時に至ると非常に大きな損傷が生じる可能性がある。従って、高速流時にこうした損傷が生じないよう減勢池内に平面渦を形成させない配慮が必要である。益田川ダムでは、こうした考えに基づき、平面渦の生じない減勢工幅が設定されており、土砂を用いた水理模型実験により、水叩き内の堆積土砂が貯水位上昇に伴い速やかにフラッシュされていくことが確認されている。放流水脈の流入フルード数が2～3の基礎実験によれば、 $B/b = 2.5$ 以下（ここに、 B ：放流管中心軸から導流壁までの距離、 b ：放流管幅の1/2、図-4参照）であれば問題となる平面渦の発生を防止できることが示されており⁵⁾、益田川ダムの設計形状はこの条件より若干大きい概ね満足している。図-5は、同様の趣旨にて検討した五木ダムの減勢工の例である⁶⁾。本ダムでは、放流管からの放流水脈の拡幅形状を考慮した平面形状を採用している。平面渦の発生を防止するとともに、下流側で幅を大きくすることにより、単位幅流量の小さい、より安定した跳水状態を得ようというものである。

3. 2 魚道としての常用洪水吐き

先に述べたように、排砂を前提とした治水専用ダムのダム上流の貯水池は、常時は河道の状態となる。従って、魚類の移動に関して、適当な措置を施せばダム建設前の河道での生物環境を維持することが可能である。方法としては、放流設備標高を元河床高程度の低位とし、更に、減勢池副ダム低位に孔を設けるなどして常時の放流設備～減勢池下流までの勾配を小さくする方法がある。先の益田川ダムではこうした考えに基づき放流設備標高を設定するとともに、副ダムには河床標高に敷高をもつスリットを設けている。

一方、地形・地質等の関係から放流設備標高を河床高付近まで下げ得ない場合がある。この場合に

は魚道が必要になるが、魚道は、ゲートを設けなければ洪水時には放流設備となる。洪水時の操作や維持管理を考えるとゲート設備の設置は好ましくなく、魚道を兼ねた放流設備が必要となる。

魚道を兼ねた放流設備の設計は、従来の放流設備の水理設計の考え方とは矛盾するものである。魚道は流速低減を行う必要があり、設備は流れに対し抵抗の大きなものとする必要がある。つまり、流れに対し凹凸が必要である。一方、ダムの放流設備は高速流を流下させるものであり、不適切な不陸の存在はキャビテーションや不安定な流れの原因となる。このため、ダム放流設備の接水面は、流れに悪影響を与えるような圧力降下を生ぜず、かつ安定した放流状況が得られるものとして設計される。魚道設置においてもこうしたダム放流設備の原則を維持する必要がある、問題は両者を満足する形状の存否にある。

今、水路面上にランダムな凹凸をつけて流れの抵抗を増すことを考えると、これは、放流設備としての条件を満足できないのが明白である。一方、放流設備の接水面が全て流線に沿った滑らかなものかというところではない。例えば、スライドゲートのゲート戸溝は流線に対し凹な形状であるが、適当な凹形状の採用により戸溝内に安定した渦を形成させ、高速流下においても適用が可能である。高圧ゲートの戸溝は一般に下流側にオフセットが設けられ、流れから少し逃げる形状となっている。これにより戸溝内の渦の安定を図るとともに、高速流の衝突・剥離を生じる戸溝下流コーナー部の圧力降下を低減させるためである。魚道においても、階段式魚道であれば戸溝が連続した形状と考えることができ、圧力や流況の観点でも適用の可能性はある。

図-6はこうした考えのもと検討した洪水調節用放流管の例である⁶⁾。放流管はゲートを設けないものであり、益田川ダムと同様に堤体内で管路流から開水路流に移行する部分管路型放流管である。

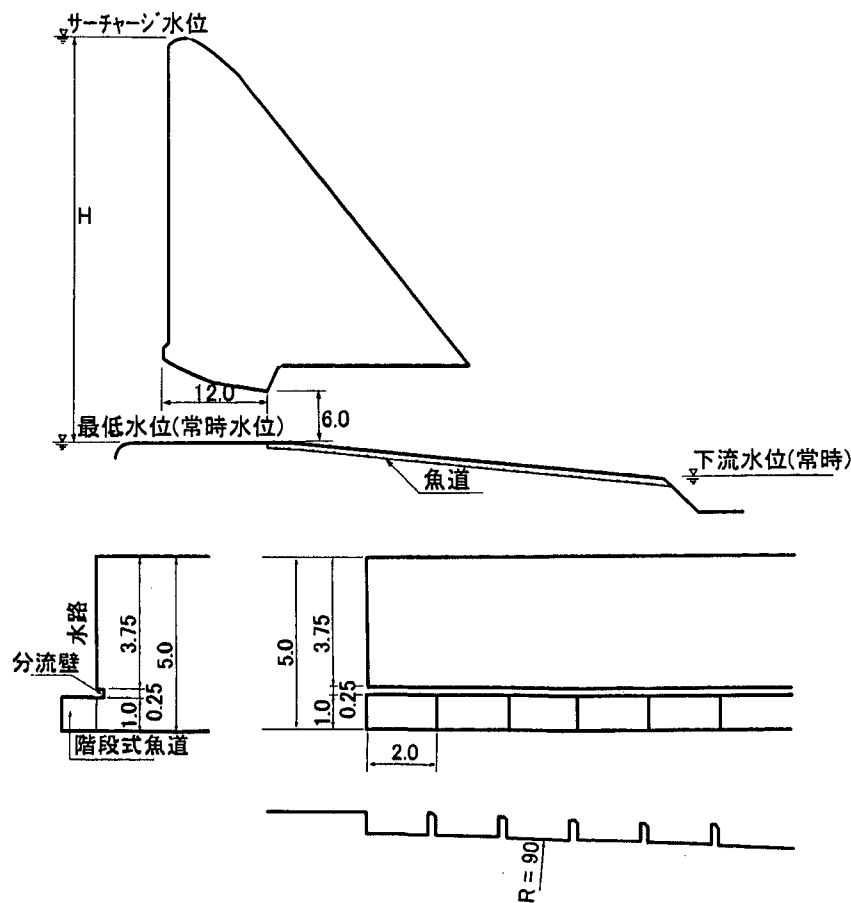


図-6 五木ダム魚道付き洪水調節用放流管

このうち、流量調整する重要な部分である管路部は、魚道のような凹凸面を作らないものとし、底面を水平として流速を低減させることとしている。魚道は放流量に影響のない開水路部に設け、管路部からの自由落下曲線に対し、階段式魚道隔壁頂部が常にオフセットを取りながら流れの外側に逃げる形状として設定している。また、経済性や将来の維持管理を考慮して、放流管幅全体に設置するのではなく、魚道の必要幅のみを対象に設置している。この場合、魚道としての機能が求められる常時の魚道内流量の維持、つまり魚道以外の部分を流下する流れが魚道内に流入しないよう、他の部分については自由落下曲線を下方に平行移動させた形状とし、魚道との間に隔壁を設けて仕切ることとした。上記設定のもと実施した水理模型実験により、有害な圧力効果も無く放流状況の安定した流れが得られることが確認され、放流管内への魚道の設置が可能となった。

以上の検討は流水のみを対象としたものである。設備にはこれに加えて土砂の流下という負荷が掛かることになる。土砂は貯水位が高くなれば掃砂され魚道内には存在しなくなることが確認されているが、土砂が流出する低水位の間は常に摩耗・損傷の負荷に晒されることになる。また渦流となる魚道内の摩耗・損傷の度合いは、通常の滑らかな底面と比べて大きいと考えられる。対象となるのが比較的低位下での放流とはいえ、河川に設けられる魚道と比較すればかなり大きい流速下で土砂が通過する。詳細設計に際してはそうした摩耗・損傷負荷に強度的にも耐えられるようライニングや隔壁形状を検討する必要がある。なお、実験によれば、放流設備条件をクリアする魚道の隔壁形状には、ある程度の自由度がある。

4. 既設ダムへの放流管の増設

先にも述べたように、ダムの堆砂容量として 100 年間の推定堆砂量が確保されている。仮に 100 年間経過したとして、更には計画通りの堆砂進行があったとして、100 年後のダム貯水池には未だ有効貯水容量がそのまま残る。多くのダムでは堆砂容量は総貯水容量の 10～20% 程度以下であるから大半の貯水池容量が利用可能なものとして残ることになる。また、適当な堆砂対策を講じれば半永久的な貯水池の利用が可能である。

貯水池が半永久的に利用可能なものとして、利用方法が半永久的に変わらない保証はない。変わると考えるのが普通である。時間間隔を特定することは難しいが、100 年以下の間隔で利用方法が変わってもおかしくはない。その場合、既設の放流施設で対応可能であれば問題はないが、新たな施設が必要になる場合も多いと思われる。新たな放流設備を設置する場合、重力式コンクリートダムであれば堤体内に設けるのが地山を改変することも無く一般に経済的である。既に幾つかの利水放流管等の設置例が見られるようになっている。これらは、前述の利用方法の変更のみでなく、水質対策や貯水池管理の合理化の観点からもなされている。

新たに放流設備を設ける場合、利水放流管や選択取水設備の設置などであれば新たな水理的課題がある訳ではない。課題は、寧ろ施工や構造設計の方にある。これらは本稿の対象ではない。本稿の対象は、放流量規模が大きい場合にある。つまり洪水処理施設の増設である。

堤体内に埋設する新設放流管は堤体内を削孔して設置され、掘削周辺の配筋等の補強はできない。従って、放流管の規模がダム建設時の横継ぎ目の間隔により制約を受けることになる。洪水処理施設で水理的課題が生じるのは、放流量が大きいと、必要規模が構造上制約される放流管規模に近づき、管内流速の制約により必要放流管の条数に影響するようになるためである。ここで、放流管の管内流速は、貯水池と放流管出口の標高差及び管内での各種損失という所謂基礎水理学による部分の他、湾曲部の存在に起因する圧力降下による制約を受ける。この湾曲による圧力降下が水理的な課題となる。

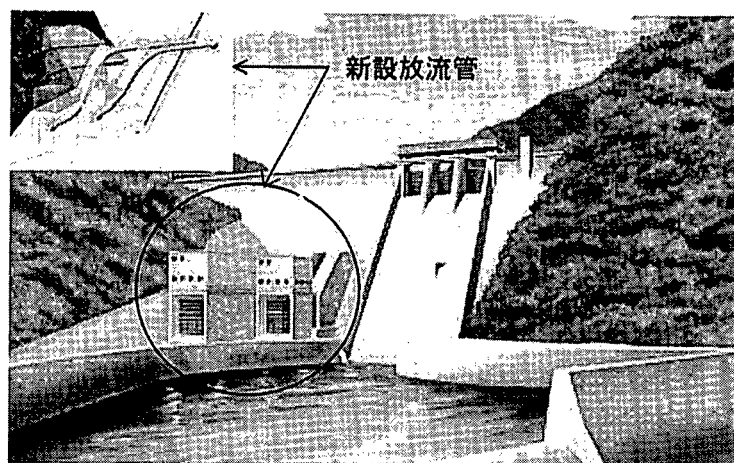


図-7 五十里ダム新設放流管の概要

堤体内を掘削する新設放流管では大きな空間を要するゲートハウスは堤体外に設けられる。つまり堤体内は埋設放流管で通過する。また、新設放流管の設置位置は、そもそものスペースの割り振りの困難、施工時及び将来における流水処理の困難等の理由から既設洪水吐き幅内に設けられることはなく、その脇に設置されるのが一般的である。更に、施工時の貯水位の低下を極力抑える意味から、放流管入口標高は減勢池標高に対し比較的高位標高に設置される。ここで、新設放流管の減勢工として既設洪水吐きの減勢工を利用することを考えると、堤体内通過後の放流管を減勢池脇に延長し、ゲートを介して放流することになる。こうした制約により、新設放流管は例えば図-7のように堤体上で鉛直下方に、更に減勢池導流壁高程度の標高において、水平及び減勢池方向に流向変更するための湾曲部を要することになる。

こうしたやや複雑な線形をとる管路式放流管として利水放流管があるが、利水放流管では管路の分岐等もあることから管内流速を 10m/S 程度以下に抑えて、ゲート断面より管断面を大きくして設計されるのが通常である。先に述べたように、洪水処理用放流管のように放流量の大きい施設にこうした流速の制約を採用すると、必要な放流を実施するための条数が大きくなり、不経済であるとともに管設置に伴う地形改変も大きくなる。そこで、湾曲部の圧力特性を正確に把握し、有害な圧力降下の生じない範囲で流速を大きくしていくこととした。

湾曲部の圧力特性は、遠心力によるもののみであれば問題は簡単であるが、放流管が大きくなると滑らかな管の製作が困難になる。湾曲部の製作は管径が小さい場合には高周波による曲げ加工が可能であり、スムーズな曲管として製作することができる。管径が 1m を超えるような場合には、曲げ加工が困難であり、図-8に示されるエビ継ぎ管が用いられる。エビ継ぎ管は直管を斜めに切断してつないだものであり、エビの背中様の様相を示すことから名称がきている。図-8にはエビ継ぎ管湾曲部壁面での圧力水頭分布を示したものであるが、エビ継ぎ目の屈折部にて、湾曲内側では大きな圧力低下が、外側では圧力上昇が生じている。大きな管内流速を採用するためにはこうした局所的な圧力の状態を把握する必要があり、キャビテーション等の有害な現象が発生しないような圧力制御を行わなければならない。

こうした問題認識のもと、大規模放流管を最初に増設した田瀬ダムでは、エビ継ぎ部の圧力分布を実験により検証しながら 14m/S 程度の管内流速を許容するものとして設計している。また、図-7に示す現在施工中の五十里ダム放流管では、エビ継ぎ中心角等を変化させた系統的な実験をもとに、 20m/S 以上の管内流速を許容した水理設計を行なっている⁷⁾。五十里ダムの設計では、堤体通過部の

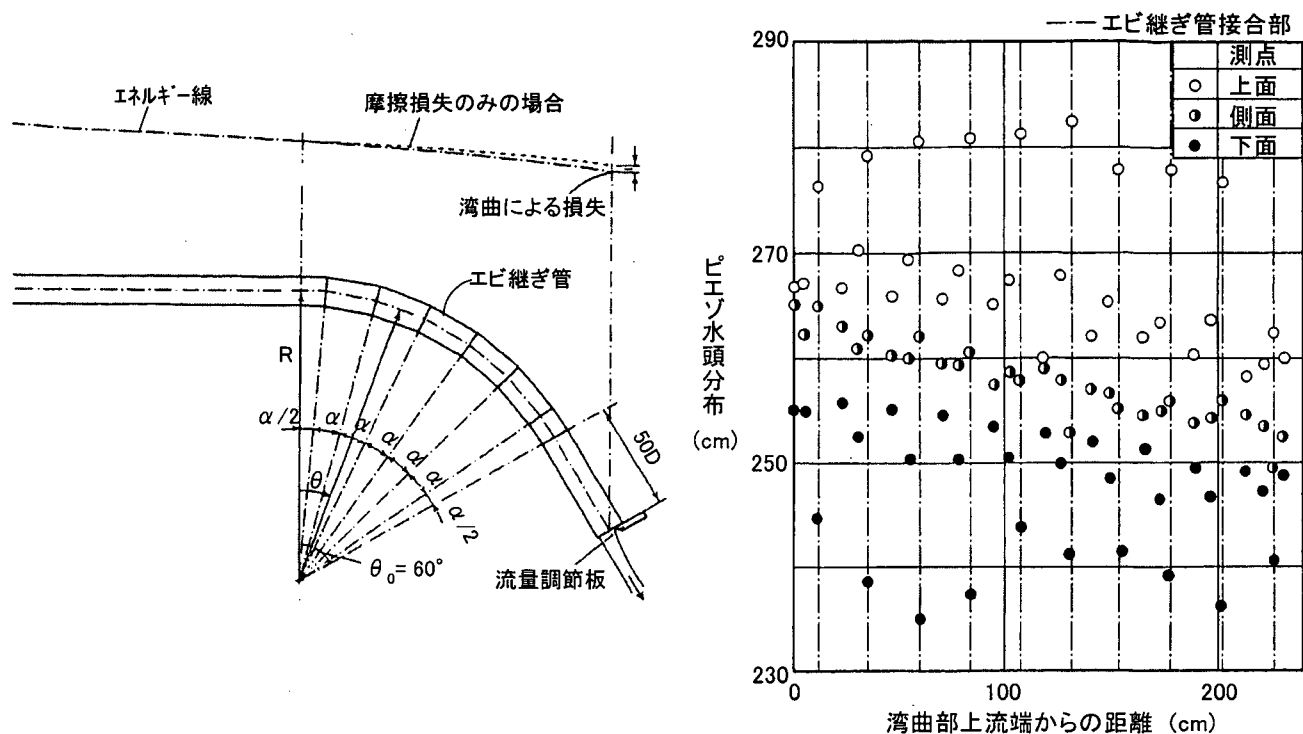


図-8 エビ継ぎ管と圧力分布

放流管を若干傾斜させ、圧力が低下しやすい上方湾曲部上流端付近の標高を下げるるとともに、エビ継ぎ管の屈折角度を調整することにより正圧を確保している。

先に、放流水脈を既設洪水吐き減勢池に放流するとしたが、放流量が大きい場合における既設減勢池の利用の可否については、明らかではない。最近の研究テーマとなっている⁸⁾。田瀬ダム、五十里ダムでは水理模型実験による検討が実施されており、既設減勢池の活用が可能であることが確認されている。

5. 新式ゲート

5. 1 引張りラジアルゲート

ダムのゲートについては、水密構造等様々な改良が加えられてきたが、ゲート形式そのものについては既に確立された技術となっている感がある。つまり、近年新たな形式が開発された例は殆どない。こうした中、経済性を追求した検討がゲート構造の観点から進められ、洪水吐きゲートとして最も一般的に用いられているラジアルゲートに対し、荷重の作用方向を逆とした引張りラジアルゲートが考案された。

従来のラジアルゲートでは、ゲート扉体に作用する水圧の作用方向がゲートトラニオンピン向きであり、主として圧縮力に対応する桁構造により荷重伝達がなされている(図-9)。考案されたゲートは、図-10のように水圧の作用方向をトラニオンピンから離れる方向としたもので、荷重の伝達は引張り力に対応する板構造にてなされる。座屈を考えた場合、圧縮より引張りに強い鋼材の特性を生かそうというもので、経済性ととも、ゲートハウス空間が小さくて済むゲートとして提案されている。

引張りラジアルゲートは、ゲート構造関係者の検討から生まれたものであるが、その後の調査により同様の考えのもと設置されたゲートが既に存在していることが明らかになった。米国開拓局で開発されたクラムシェルゲートがそれである。クラムシェルゲートは名前が示す通り図-10に示す2枚の

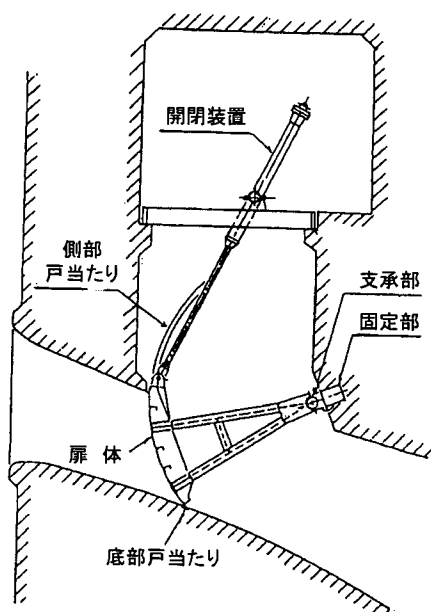


図-9 従来のラジアルゲート

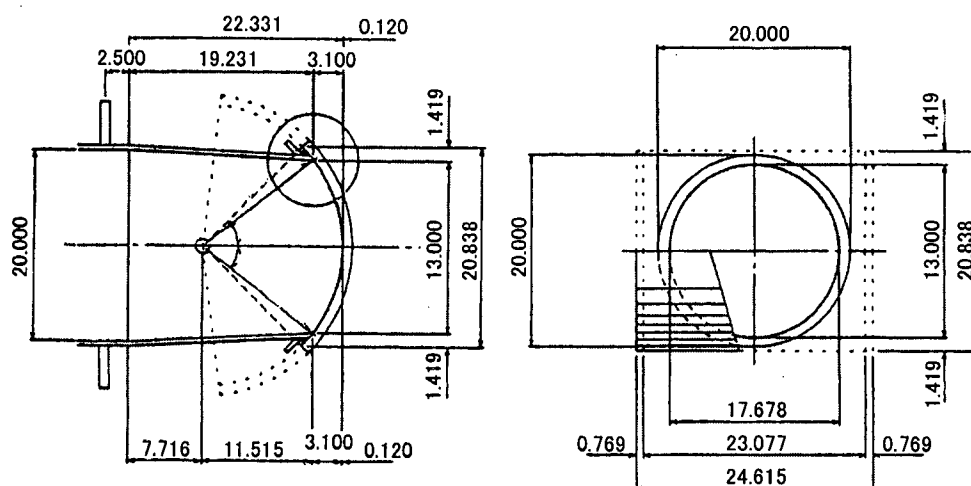
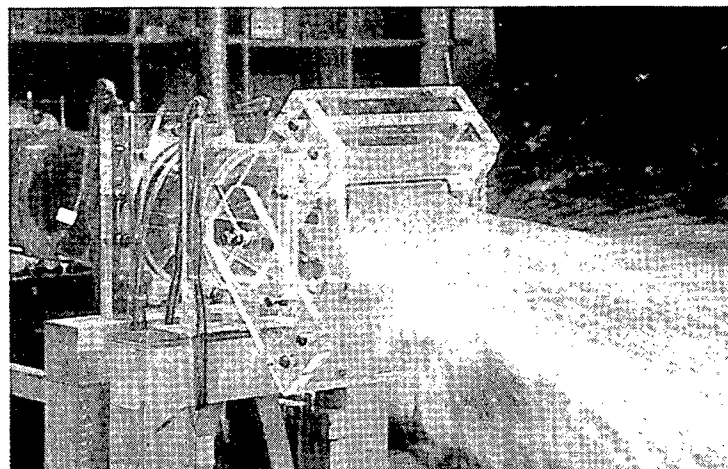


図-10 引張りラジアルゲート(2枚扉)

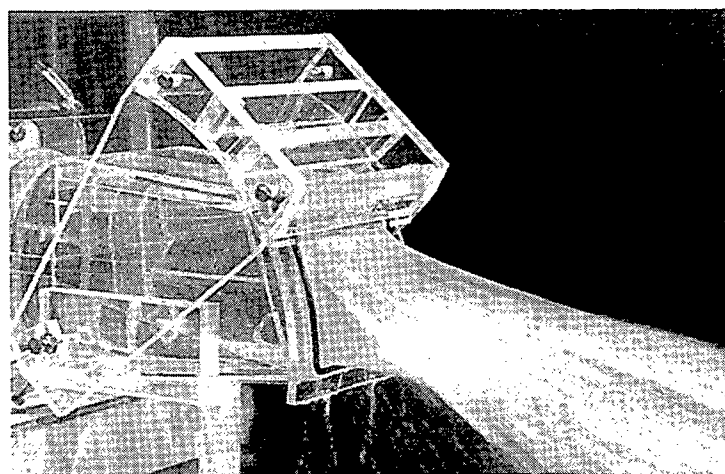
扉を持つものである。当初の検討では同じく2枚扉のものが考えられており、羽地ダムの維持用水補給及び水位低下用放流設備に用いられている。

一方、水理模型実験の結果では、2枚扉のものは、ゲート部分開時の放流水脈の幅方向への拡がりが大きく、また、飛沫状の水脈の乱れが大きいことが示された。これを改善する方法として従来のラジアルゲートと同様に扉体を一枚とする方法を考え、水脈の拡がりや飛沫状の水脈の少ない安定した流況を得ている⁹⁾(写真-8参照)。また、1枚扉とすることで、以下のような構造上のメリットがあることも明らかになり、こうした検討を踏まえ、苫田ダム³⁾、灰塚ダムにて経済的なゲートとして設置されることとなった。1枚扉の引張りラジアルゲートは新しい形式のゲートということができよう。

- 1) 放流管側に設けられる連続ゴムによる水密がなされ、水密構造が単純・確実である。
- 2) 開閉装置数が少なく、2枚扉で必要になる開閉装置の同期の必要がない。また、閉方向が重力の方向と一致し、全休時の休止は休止台にて行われる。



2 枚扉



1 枚扉

写真－8 引張りラジアルゲートの放流状況

3) 放流管を底部架台に固定でき、予測の難しい振動現象に対する対策が容易である。

なお、開発した 1 枚扉ゲートでは、ゲート半開時の放流水脈の変形を抑えるため、放流管出口形状は長方形断面としている。また、1 枚扉ではゲート半開時に水脈が下方向きとなる傾向があるので注意が必要である。下流に水路が設けられる場合には水路底部のライニング等の処理が必要となる場合も生じる（水脈の拡幅の大きい 2 枚扉では、左右側壁に同様の措置が必要になる場合が考えられる）。

5. 2 ゲート底面が円弧のジェットフローゲート

利水・低水用放流設備出口では、通常複数の流量調節用ゲートが用いられる。これは、ゲート保守点検時の代用ゲートが必要なこと、及び必要放流量範囲が大きい場合の流量調節精度に限界があると考えられることによる。前者は代替施設が別途設けられるのであれば問題とならない。逆からいえば、代替施設がなければ最小 2 個の流量調節用ゲートを設ける必要がある。後者は、大きなゲートでの小流量制御の困難を意味しており、微小開度放流時の流況不安定化の解消及びゲート静止精度の確保が課題となる。

代替施設がある場合、微小開放流が可能であれば必要流量制御範囲によらず流量調節ゲートは 1 個で済ませることが可能である。つまりかなりのコスト縮減を見込むことができる。そこで、微小開放

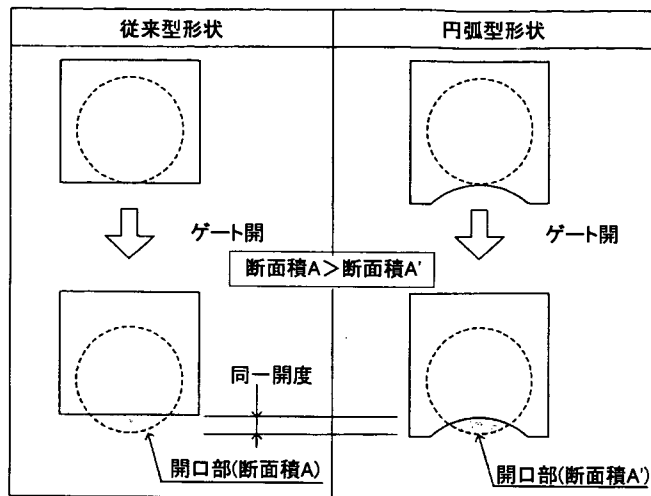
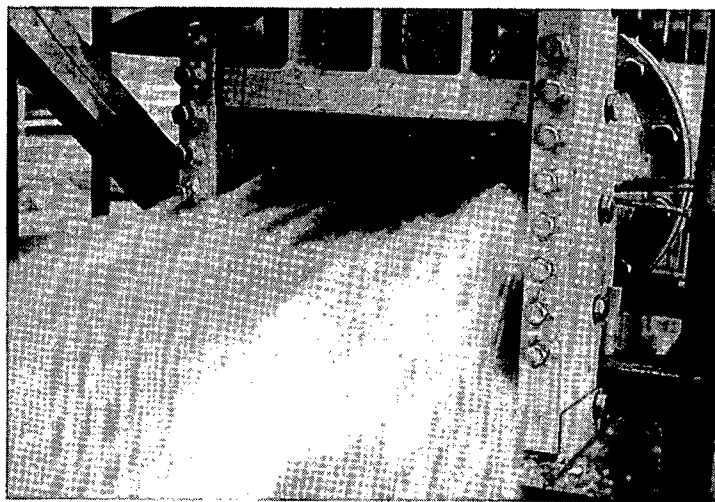


図-11 従来型及び底面が円弧のジェットフローゲート



底面円弧



底面直線

写真-9 ジェットフローゲートの放流状況

流での問題点を解消するため底面が円弧のジェットフローゲートの検討を行った(図-11)¹⁰⁾。
ここに、ジェットフローゲートは利水用放流設備の流量調節用ゲートとして多く用いられているゲー

トで、スキンプレートが平板であるスライドゲートがゲート扉体として用いられる。ジェットフローゲートの底面は通常直線であるが、放流管出口断面が円弧であることから。直線と円弧の交点付近から顕著なヒレ状の水脈が放出され水脈の変形が顕著になる。円弧としたのは、こうした水脈変形を抑え流況の安定化を図るとともに、小開度時の放流量増加を抑え（同じゲート開きでの放流断面が小さくなる。これについては、より効果を得るために三角形の切込みを設けた検討もある¹¹⁾）流量変化に対するゲート移動距離を大きくしようとするものである。

実験の結果、底面が円弧の場合の放流水脈は、水脈変形による乱れが全体に小さく流況が安定していること（写真－9）、直線の場合と比較してゲート開度に対する放流量が小さいことが確認された。実験結果等を参考に、摺上川ダムでは水位低下用放流の比較的大流量の放流と利水放流の小流量の放流を単独のゲートで対応することとしている。

ジェットフローゲートの下流には、放流水脈の整流のためゲート口径より大きな口径の整流管が用いられるのが一般的であるが、トンネル内放流する摺上川ダムの水位低下用放流設備では、整流管下流でのトンネル内流況の乱れが大きいことが確認された。このため、流況の安定化及び経済性の観点から導流水路方式を採用することとしている¹²⁾。

6. 土砂バイパス施設

近年、堆砂に対する貯水機能の維持及び下流への土砂供給の観点から土砂バイパス施設への期待が高まっている。土砂バイパスは、貯水池を迂回する水路により、出水時に流入する土砂を洪水流の一部と併せて迂回させようというものである。流水のエネルギーを用いた土砂対策であり、同様のものとして、土砂フラッシングがある。宇奈月ダム、出平ダムの連携排砂で知られる土砂フラッシングは、一時的に大幅に貯水位を下げる必要がある。貯水位がそのままでは土砂が移動しないためである。従って、既設ダムに適用するためには、貯水池運用計画を見直す必要がある。これに対し土砂バイパスは、放流量の範囲でバイパスを行うことにより、貯水池運用を変えずに運用することが可能である。つまり、既設ダムの堆砂対策としてより適用し易い方法ということが出来る。

土砂バイパス施設の水利的課題としてまず、分流のための流量制御が挙げられる。洪水調節を含む多目的ダムでは、分流量は洪水調節操作の放流量以下とする必要がある。一方、土砂バイパス量を大きくする観点からは、分流量をできるだけ放流量に近づけることが望ましい。経済性の観点からトンネル断面を小さくする場合にも、洪水調節初期の分流量は放流量に近づけるものとし、トンネルの最大流下量にて一定量分流とするのが、最も大きな土砂バイパス効率を得ることが出来る。一方で、貯水池上流端付近で洪水流を分流することから、ゲート操作はできるだけ避けるのが望ましい。つまり、前述の分流をゲート操作なしで実施する必要がある。

分流施設は水位維持のための堰とバイパス水路に分流するための流入施設により構成される。図－12は美和ダムの流入施設であり、流入施設は入口の越流部及びこれに続く横越流水路で構成されている¹³⁾。入口で支配断面を生じた流れは横越流水路内で跳水減勢しバイパス水路へと導かれるが、ある分流量以上になると、一部の流量は横越流頂から貯水池側に戻りバイパス水路の流入量増加を抑える構造となっている。対象となる洪水調節方式は一定量方式であり、上記の施設構成により一定量放流に近づけた分流を可能としている。また、一定率－一定量放流方式に対する最近の検討では、オリフィスと自由越流頂の組み合わせにより、分流量の放流量近似が可能であることが示されており、オリフィス上方に越流頂を重ねたコンパクトな施設設計方法について現在検討を実施している。

美和ダムでは貯砂ダム及び分流堰により粒径の比較的大きな土砂は捕捉・除去される。バイパスさ

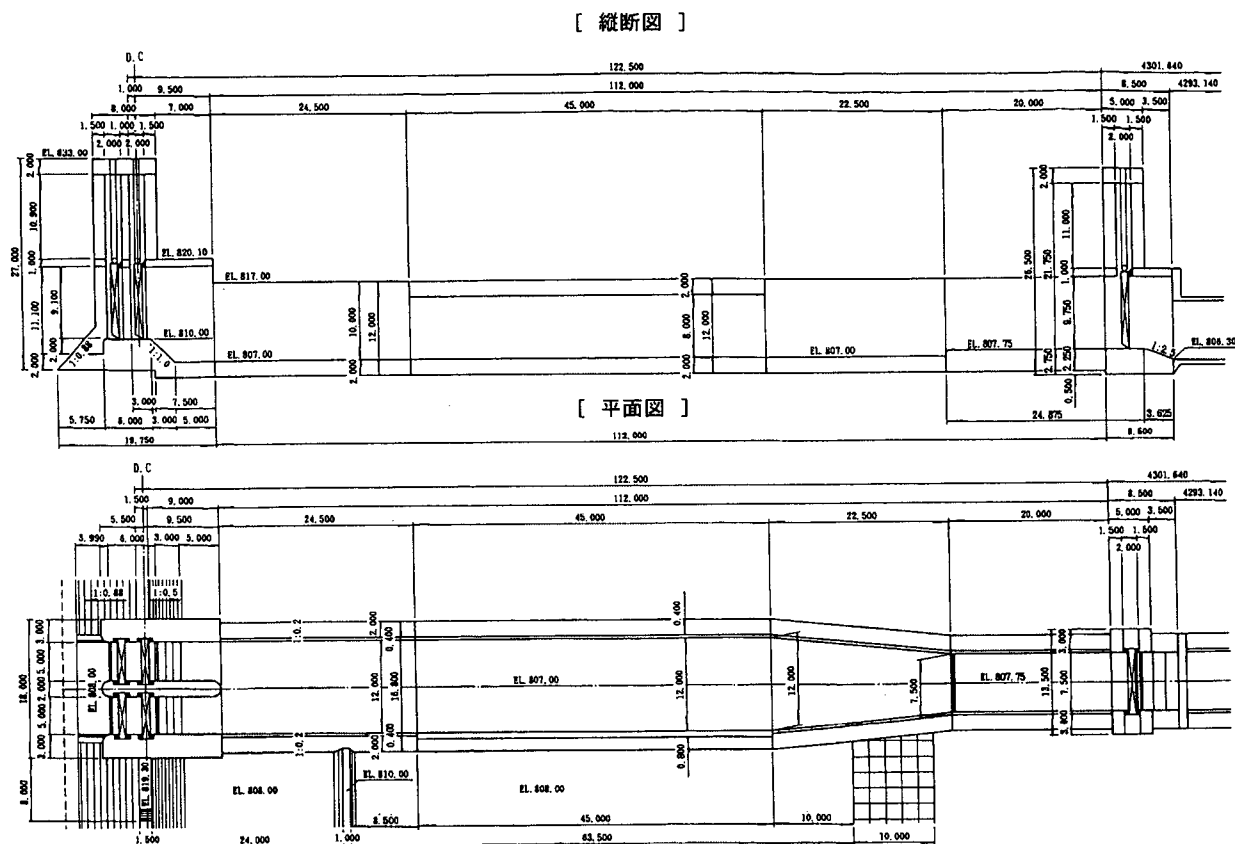


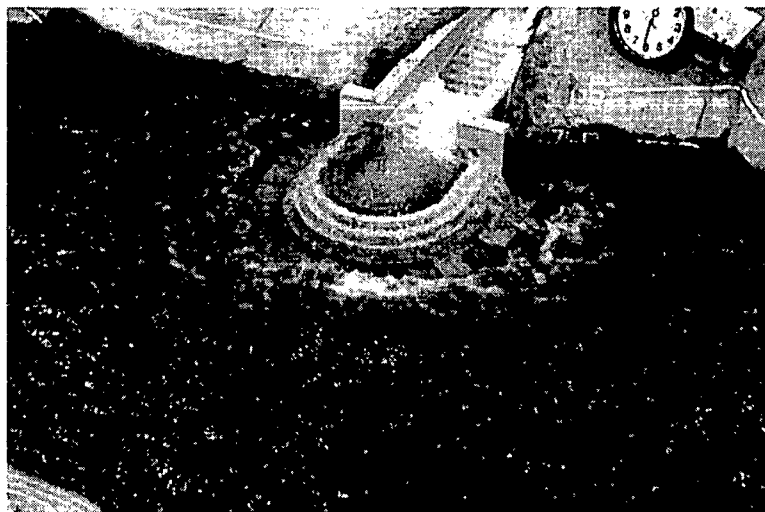
図-12 美和ダムバイパス施設の流入部

れるのは微細粒子成分のみであり、バイパス水路の土砂流下能力や摩耗の問題は少ない。掃流砂成分をバイパスする場合にはこれら問題を考慮する必要がある。バイパス水路の土砂流下能力は固定床水路の流砂問題となり研究事例も少ないので今後の研究展開が望まれるところである。最近の実験検討によれば、底面粗度が大きくなると土砂輸送能力が急激に減少することが示されている。水路を通常のコンクリートにより構築するものとする、底面の損傷は避けられず粗度の増加が生じる。コンクリート損傷量の予測とともに損傷による粗度変化についても知見が必要になっている。また、流入条件となる分流堰上流での堆砂・侵食現象の予測も必要である。現在は個々の事例ごとに対応されているが、体系化が急がれる分野でもある。

バイパス水路からの放流水の流速が大きい場合には減勢が必要である。バイパス水路はダム下流に放流されるからダムの減勢工下流に更に減勢工が設けられることになり、バイパス水路の減勢工がダム放流設備の減勢及びその下流河道の流況に悪影響を与えないよう配慮する必要がある。また、バイパス水路からの放流は河道の側方からなされるから、河道との合流方法についても配慮されなければならない。こうした条件を念頭に美和ダムでは写真-10に示す減勢工を開発している。美和ダムではトンネル出口が河床より6.5m高く計画されており、シュートを紹介して河道標高に導水される。減勢処理としてまずこのシュート部に階段を設けて減勢池への流入流速を低減させる。次に減勢池では潜り跳水により減勢させ、単位幅当り流量を小さくするよう全方向に越流させる。越流させた水脈は階段により減勢させ河道に流下させる。徹底した減勢方式を行っており、河道での流況は極めて穏やかなものとなっている。また、減勢池そのものもかなりコンパクトなものとして設計できている。

先に述べたように美和ダムではバイパスする土砂は微細な粒子であり、階段の適用を考えたのも、

材料の選定等により摩耗・損傷に対する安全性が確保されとの前提に立ってのことである。掃流砂を対象とする場合には別途の考えが必要になるであろう。



写真－１０ 美和ダム土砂バイパスの減勢工

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：昭和 62 年版多目的ダムの建設、第 1 巻、行政・計画編、p 1、1987
- 2) 独立行政法人土木研究所水工研究グループダム水理：灰塚ダム水理模型実験報告書、土木研究所資料、第 3848 号、2002
- 3) 独立行政法人土木研究所水工研究グループダム水理：苫田ダム水理模型実験報告書－ラビリンス型越流頂と引張りラジアルゲートの適用－、土木研究所資料、第 3846 号、2002
- 4) 加藤典子：地形を考慮した減勢工形状の検討、ダム技術、No.179、2001
- 5) 桜井力、柏井条介：土砂放流を考慮した減勢工の水理設計、ダム技術、No.163、2000
- 6) 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室：五木ダム水理模型実験報告書－魚道の設置と排砂を考慮した洪水吐き－、土木研究所資料、第 3619 号、1999
- 7) 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室：五十里ダム新設放流管水理模型実験報告書－高速湾曲エビ継ぎ管の水理特性－、土木研究所資料、第 3698 号、2002
- 8) 柏井条介、田村洋満：放流管空中放流水脈の跳水条件、土木技術資料、Vol.44、No.9、2002
- 9) 桜井寿之：引張ラジアルゲートの水理特性、第 39 回土木研究所研究発表会論文集、－土木研究所資料第 3760 号、2000
- 10) 小松直史、鹿野安彦、佐藤信之：摺上川ダムジェットフローゲートの安定放流の検討、ダム技術、No.189、2002
- 11) 黒田満穂、宮崎重雄、山本博士、石山浩司：改良型ジェとフローゲートの水理特性に関する研究－その 1－、水門鉄管、No.197、1999

- 12) 独立行政法人土木研究所水工研究グループダム水理チーム：摺上川ダム水位低下及び利水・低水放流設備水理模型実験報告書－底面が円弧形状のジェットフローゲートの適用－、土木研究所資料、第 3850 号、2002
- 13) 建設省土木研究所水工水資源研究室：土砂バイパスの水理検討報告書（美和ダム再開発事業）、土木研究所資料、第 3258 号、1994