

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第3475号

平成 8 年 度

土木研究所講演会

講演集

平成9年2月4日

建設省土木研究所

Copyright ©1997 by P.W.R.I.

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

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

平成8年度

土木研究所講演会 講演集

企画部企画課

要 旨

本資料は、「平成8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、沖積河川、ダム、環境、橋梁、積算、地震防災

目 次

特別講演

科学技術研究者の社会的責任…………… 国際基督教大学教授 村上陽一郎…… 1

総合的な地震防災研究をめざして…………… 耐震技術研究センター長 横山功一…… 3

生態系の保全・創造技術の現状…………… 環境部長 飯田宏典…… 27

日本の沖積河川

－その形と形成機構－…………… 河川部長 山本晃一…… 47

ダム材料有効利用の現状と今後…………… ダム部長 藤沢侃彦…… 67

合理的な橋梁構造をもとめて

－道路橋の設計・製作・施工の省人化・省力化－… 構造橋梁部長 藤城泰行…… 91

公共工事の建設費縮減に関する取り組みについて… 積算技術研究官 芦田義則…… 107

特 別 講 演

科学技術研究者の社会的責任

国際基督教大学教授 村 上 陽一郎

科学技術研究者の社会的責任

科学研究が19世紀後半に制度化された際、研究者たちはどのような行動規範に基づいて研究を行っていたのだろうか。

第一に、研究の動機は基本的には、研究者個人に内発する「好奇心」もしくは「真理探究心」であった。同じ「好奇心」を共有する個人が集まって、専門家集団、具体的には学会を組織した。

したがって研究者の意識は常にそうした専門家集団の内部、言い換えれば、「仲間」〈peer〉を向いていた。それは研究者が成果を発表する形式が、書物から論文に移動したことにも表れている。書物は一般の読者を想定して書かれるが、論文は、「仲間」以外に読まれることを全く念頭におかずに書かれるものである。

「良い成果」として認知される基準は、いわゆる〈something new-ism〉として表現されるものであって、当該の専門家集団の知的共有財産に、「何か新しいこと」をつけ加えるような成果が褒賞の対象となると考えられた。

したがってまた、成果への褒賞も、当初は、「仲間による認知」のみであった。この「仲間による認知」は〈eponym〉という概念と結びつく。「何か新しいこと」を発見した人間の榮譽を讃えて、その「新しい発見」に対して発見者の名前をかぶせて呼ぶ、というのが、〈eponym〉である。例えば「ハイゼンベルクの不確定性関係」や「プランク定数」などがそれに当たる。

研究に資金が必要な場合、専門家集団の外部から資金援助が行われることもあったが、その支援を支える論理は〈philanthropic〉であった。つまり人類の知的な幅と深さを増やすものとして認めるからであった。

こうした状況に大きな変化が生じたのは、第二次世界大戦以降であろう。一つには、専門家集団のなかで生産される知識は、上に述べたような19世紀的な科学研究にあっては、専門家集団の内部だけで流通していたものだが、次第に外部社会がそうした知識を「搾取可能」〈exploitable〉であると考え得るようになったことが重要である。例えば、原子核研究に従事する専門家集団の内部で流通している知識が核兵器開発に「搾取可能」であることがはっきりすると、軍事や政治のような外部のセクターは、資金援助と引き替えに、専門家集団の内部でのみ生産・流通されてきた知識を利用し始めた。

ここに新しい事態が生じた。研究者と外部社会とを隔てる壁が壊れ始めたとも言えるからである。

こうした新しい事態のなかで、研究の性格にも新しいものが生まれた。それは「外部からの使命に向けた研究」である。現在、非常に多くの研究が、この種の性格を持つようになってきている。

そこでは、研究に対する支援は、はっきりと「委託した使命の達成」を期待しており、その意味で〈give-and-take〉という形をとるに到った。

したがって研究者の責任も、「仲間」に対してのものではなく、「使命」の発注者に対するものが明確に問われるようになった。

しかし、同時に発注された「使命」を達成することが広く人類にとって、不都合とならないかどうか、という点にも、倫理的配慮が求められるようになりつつある。

そのうえ、この「人類」にとって、という時、その「人類」とは、単に「今日生存する人類」のみでなく、「遠い将来にこの地球上に生きているであろうすべての人類」にまで拡張された概念として、その倫理的責任が求められるという事態が現れつつある。

総合的な地震防災研究をめざして

耐震技術研究センター長 横 山 功 一

総合的な地震防災研究をめざして

1. はじめに

20世紀の最後の10年を、「国際防災の10年（IDNDR）」とすることが国連で決議され、様々な取り組みが行われている。これは、世界の国々が暴風、洪水、高潮、地震、津波などの自然災害により人命・財産などの直接的損失を被るばかりでなく、社会経済的間接被害も甚大なものとなることから、世界各国の国際協調活動を通じてそれらを軽減しようとするものである。しかしながら残念なことに、この間に地震についてみると、1994年ノースリッジ地震、1995年兵庫県南部地震などの大きな地震が起き、甚大な被害をもたらしており、まだまだ自然災害に対する取り組みを強化しなければならないといえる。

1995年1月の兵庫県南部地震は高度に発達した大都市を襲った初めての直下型地震であり、建物や道路、鉄道、港湾などの土木構造物に大きな被害を生じ、都市機能・経済活動に大きなダメージを与えた。この地震では日本で近代土木工学が始まって以来の地震力が土木構造物に作用したとはいえ、例えば鉄筋コンクリート高架橋の倒壊、橋脚の崩壊などの従来の技術的な見識では想像し得なかった甚大な被害や、礫質土の液状化などの従来認識されていなかった新たな現象も発生した。

この地震により、土木構造物の設計地震動に対する考え方の再検討、免震・制震などの先端技術を活用した耐震設計の高度化、震前震後における防災技術及び災害復旧を迅速に行うための地震防災情報システムの充実などが緊急の課題となった。現在各種の土木構造物の耐震設計基準の改訂作業が進められており、また既存構造物に対しても耐震点検が行われ、橋梁、河川堤防などにおいては全国で補強工事も始まっている。

さて、土木研究所では、平成8年5月に、地震防災部から耐震技術研究センターへ組織替えを行った。新たにスタートした「耐震技術研究センター」では、今までの3研究室の体制に防災技術課が加わり、土木構造物の耐震設計・補強法などのハード技術に関する研究を強化するとともに、今回の地震で特に充実の必要性が高まった防災計画・地震防災情報システムに関するソフト的な技術に関する研究を強化し、地方建設局・地方自治体の防災計画に関する業務への技術的支援・連携プレーに取り組んでゆくことにしている。

ここでは、地震防災研究に関する動きの中で耐震技術研究センターにおける研究活動の動向を紹介する。

2. 阪神淡路大震災による社会基盤施設の被害とその影響

兵庫県南部地震の被害に関しては関係機関から被害調査報告が出されており、被災メカニズム、今後の改善項目などが取りまとめられている。土木学会では、地盤工学会、建築学会と共同で、調査報告書の取りまとめ作業が進められており、また「土木構造物の耐震基準等に関する提言（第一次、第二次、同解説）」¹⁾が出されている。土木研究所においても報告書²⁾が取りまとめられており、また

昨年度のこの講演会でも「兵庫県南部地震と地震防災研究」についての講演³⁾があったが、1年が経過し、各方面の対応も整理されたので被害の影響に焦点を当てて再度振り返ってみることにする。

2.1 被害統計⁴⁾

国土庁が取りまとめた被害・復旧状況は以下の通り。

A. 消防庁調べ（平成7年12月27日現在）

人的被害

死 者 6,308人（関連死789名を含む）

行方不明者 2人

負傷者 43,177人

住居の被害

全 壊 100,302棟

半 壊 108,741棟

一部破損 227,373棟（一部調査中）

公共建物 750棟

その他建物 3,952棟

火 災 294件

B. ライフライン関係

a. 水道関係

約123万戸が断水。復旧・耐震化を含む災害被害額は約706億円。

b. 電気関係

関西電力管内で約100万戸が停電（地震直後は一時的に260万戸）。

c. ガス関係

大阪ガス管内で約86万戸が供給停止。

d. 情報通信関係

電話については交換設備、加入者設備の被害等により約29万の加入者に障害が発生した。交換設備については翌日午前中に、また加入者設備は家屋倒壊等を除き1月末までに復旧を完了した。

C. 交通関係

a. 鉄道関係

新幹線の地震発生当日中に運行再開しなかった区間は、京都～岡山間219キロ。4月8日の初電より新大阪～姫路間の運行を再開したことにより、全線開通した。在来線では地震発生当日中に運行再開しなかった区間は、JR123キロ。民鉄296キロ。8月23日の初電より全面開通した。復旧に要する費用はJR関係で約1,080億円、民鉄関係で約1,470億円（平成7年5月9日現在）

b. 道路関係（建設省調べ）

地震発生直後、高速自動車国道、阪神高速道路、直轄国道で、27路線36区間で交通止めになったが、一般車両ないしは緊急車両用として逐次交通開放を行い、平成7年4月10日までに阪神高

速神戸線、湾岸線を除き、順次交通を確保した。

c. 港湾関係（運輸省調べ）

神戸港において、ポートアイランド地区、六甲アイランド地区を中心に甚大な被害を受けた他、大阪港等において埠頭、道路等に沈下及び亀裂などの被害が生じた。

D. 被害額

国土庁が平成7年2月14日現在で把握した被害額は次の通り

a. 建築物等（住居、店舗・事務所・工場、機械等）	約6兆3,000億円
b. 交通基盤施設（道路、港湾、鉄道）	約2兆2,000億円
c. ライフライン施設 （電気、ガス、水道、下水道、通信・放送等）	約6,000億円
d. その他	約5,000億円
e. 総額	約9兆6,000億円

2.2 ライフラインの被害の影響

我が国のライフライン施設は、近年の主要な地震のたびに被害を受けてきた。1983年日本海中部地震では主として下水道管路施設に、また1993年釧路沖地震では主としてガス管路施設に大きな被害が生じた。1995年兵庫県南部地震によって生じた通信ネットワークや道路ネットワークをはじめとするライフラインシステムの寸断は、従来の地震と違って被害が大きかったばかりでなく大都市における被災であったことから、地域における住民避難や復旧活動の障害となっただけでなく、国土全体の社会・経済活動に間接的に大きな影響を及ぼした。¹¹⁾

(1) 電話・電気・ガス・上下水道

電話等の電気通信については、長時間の停電に伴う障害の影響が大きかったほか、中継系伝送路に比べ脆弱な加入者回線が大きな被害を受けた¹²⁾。

電気については、発災直後260万軒であった停電軒数は、被害を受けていない系統から切り替えて送電を行い、1月17日7時30分には約100万軒まで減少した。その後1月23日15時には送電可能な箇所への電気の供給が可能となった。¹³⁾

ガスについては、製造設備、高圧導管の被害はなかったが、中圧導管106箇所と低圧導管21,647箇所被害が生じた。地震直後は供給停止地域を設定したが、導管の復旧作業を進め3月10日には復旧作業の対象となる顧客の80%を復旧し、地震発生後85日目の4月11日に瓦礫の堆積などで復旧作業の出来ない箇所を除く全ての復旧作業を終了した。復旧作業には、導管の中に入った泥や水の処理、倒壊した家屋による道路の閉塞や交通渋滞などが影響を及ぼした。また、復旧作業と並行して地震直後からLPG、LNGを利用した代替燃料が病院など社会的に特に重要な施設に供給された。¹⁴⁾

それぞれの時間的な復旧状況が図-1にとりまとめられている。

水道については、神戸市、西宮市、芦屋市などのほぼ全域が断水し、2月末までに当面の仮復旧はほぼ終えたが、一方、仮復旧までに約3ヶ月を有する水道施設も見られるなど、応急給水に依存しなければならない期間もかなり長期間になった¹⁵⁾。また、神戸市の下水道については、処理場ポンプ場は

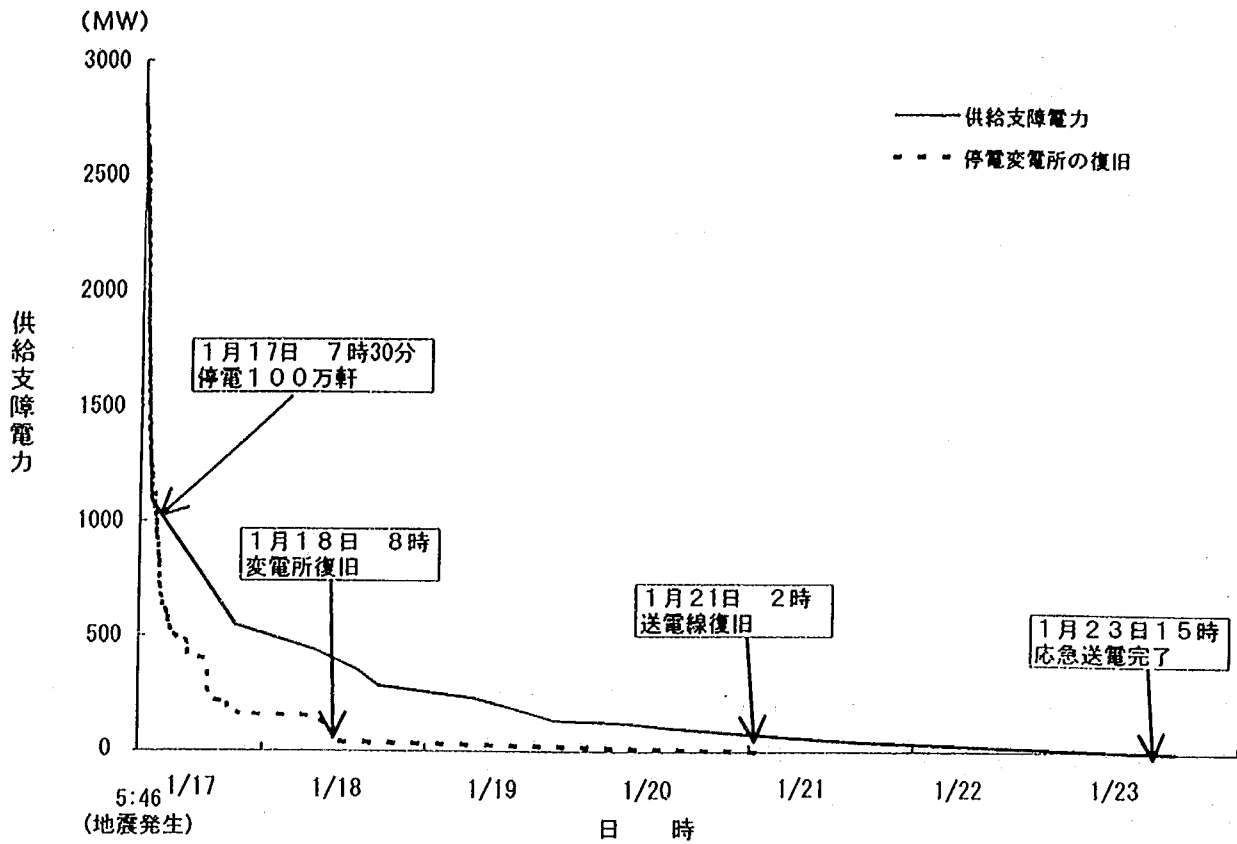


図-1.1 関西電力・供給支障電力の推移⁵⁾

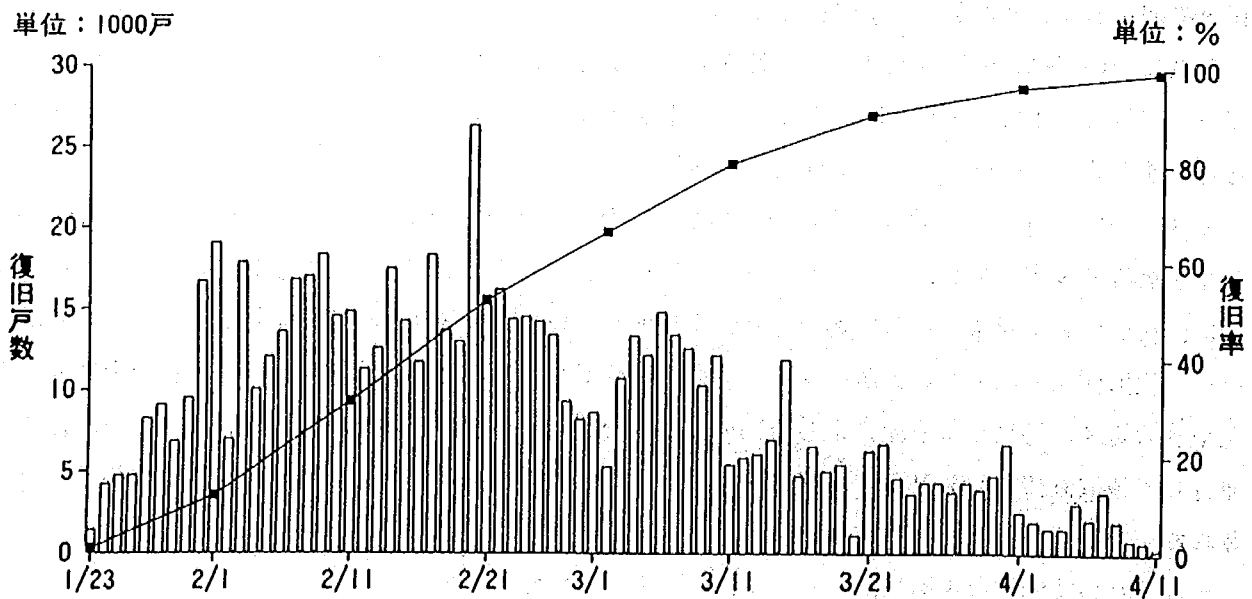


図-1.2 大阪ガス・復旧戸数と復旧率の推移⁶⁾

何らかの被害を受け、処理能力が完全に停止したものから数十%に低下するものがあった。これらは平成7年5月1日には仮復旧し機能回復が図られたが、本格復旧には9年度末までかかる予定である。また、管路施設の被災延長は、汚水幹線が4,500m（調査延長83,000m）、雨水幹線が6,309m（調査延長377,600m）となっていた。各家庭に設置されている排水設備はその埋設深度が浅く、地盤の破壊などによって多大な被害を受けた。水道の断水により水を少量しか流さずに水洗トイレを使ったため、詰まって使えなくなったトイレが続出した。¹⁾

（2）道路・鉄道

高速道路は、発災直後は名神高速道路、中国自動車道など849.8km、阪神高速道路200kmが交通規制の対象となった。高速道路の被害の大半は高架橋等の橋梁の損傷であった。名神高速道路、中国自動車道はそれぞれ復旧工事の進捗により部分開通しながら、7月29日、7月21日に完全復旧した。また、阪神高速道路では、3号神戸線、5号湾岸線が全線不通となり、湾岸線は1月下旬より緊急輸送路として開通し、7月1日より夜間に限り全線開通、すべての交通規制が解除されたのは9月であった。神戸線は1月下旬に一部復旧したが完全復旧は平成8年10月になった。

神戸・阪神間の阪神高速道路の不通は道路交通に大きな影響を及ぼした。阪神高速道路の復旧状況と交通量の推移を図-2に示す。震災前の3号神戸線の1日当たり全利用交通量は187,000台/日となっており、そのうちの8割が神戸市または阪神間の各都市に発着する交通で、神戸～阪神間に係わりのある交通であった。3号神戸線は国道を含む神戸～阪神間の道路の中で、東西交通の約4割を分担し、その時間便益は約1,400億円になると推計されていた。平成7年4月時点では、東灘・灘区界断面での交通量は震災前の約40%（後19,000台/日/前291,000台/日）、神戸市役所→大阪市役所間での所要時間は約4倍（後2時間4分/前33分）となっていた。⁸⁾

一般道路では被災地域の9市に含まれる市道以上の道路で、被災箇所は2,003ヶ所に及んだ。発災直後に緊急輸送ルートとして指定された国道2号と43号には緊急車両等が集中し著しい交通渋滞が発生した。また、信号機や道路交通情報施設が停電により機能停止したことも渋滞の原因になった。市街地では、建物の倒壊等により街路が多数閉塞され避難や救助活動に支障が生じた。

建設省近畿地方建設局が行った4断面での交通量調査によると、東西方向の幹線道路が被害を受けたため神戸市東西の断面で交通量の落込みが激しく、これに代わって六甲山麓断面の交通量が平常時より大きくのびている。また、武庫川～三宮間の旅行速度は前年20km/hであったが、発災直後には3.5km/hまで低下した（図-3）。²⁾

一方、鉄道の不通区間は、地震発災時には約640kmに及んだが、2日後には約半分が復旧した。大阪～神戸間を結ぶJR西日本東海道線、阪急神戸線、阪神電鉄本線の合計の交通量は、1日約45万人、ピーク時1時間約12万人であるが、3線が不通になり大阪～神戸間の鉄道交通機能は完全に麻痺した。このため、復旧作業と同時に震災直後から、他の鉄道やバスによる代替輸送が検討・実施された。地震一週間後の23日には、JR西日本福知山線～神鉄～北神急行のルートで大阪から神戸中心部へ入るルートが開け、30日には西からもJR西日本山陽線が神戸市中心部まで開通した。また、2月16日には神戸市交通が全線で運転を再開し、神戸市内の交通事情は大きく向上した。一方、大阪～神戸間の鉄道は地震発生から9日後の1月26日に阪神電鉄本線が神戸市東端まで達するなど東西から徐々に復旧したが、乗り換えながらもこの区間が鉄道で往復できるようになったのは2月20

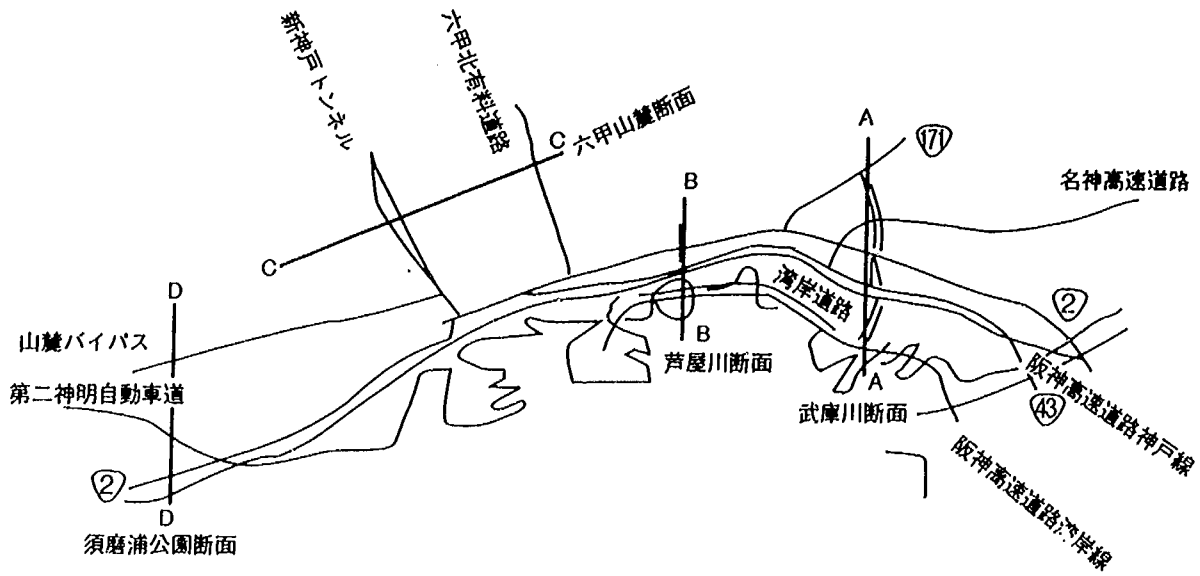


図-2.1 交通量調査断面図

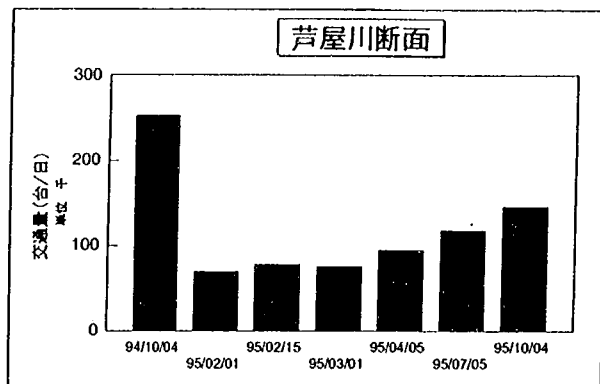


図-2.2 芦屋川断面における交通量²⁾

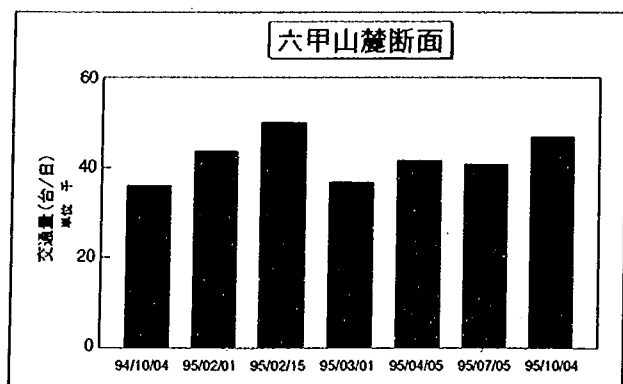


図-2.4 六甲山麓断面における交通量²⁾

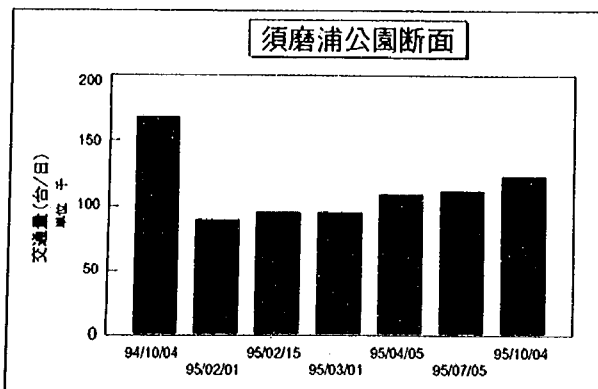


図-2.3 須磨浦公園断面における交通量²⁾

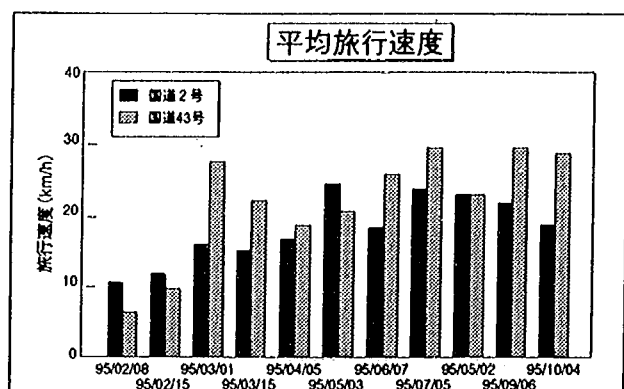


図-2.5 武庫川断面から三宮までの平均旅行速度²⁾

交通開放延長

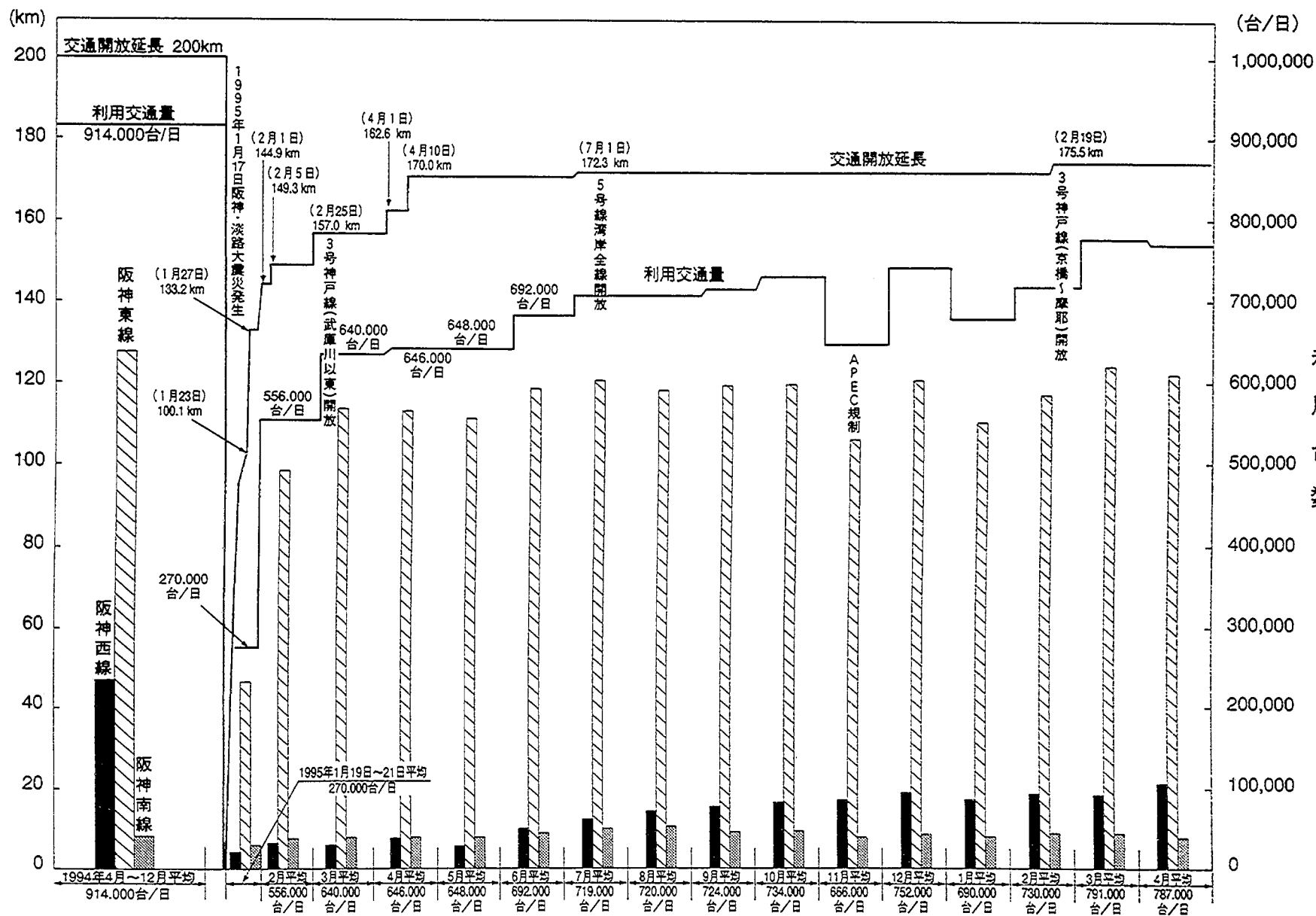
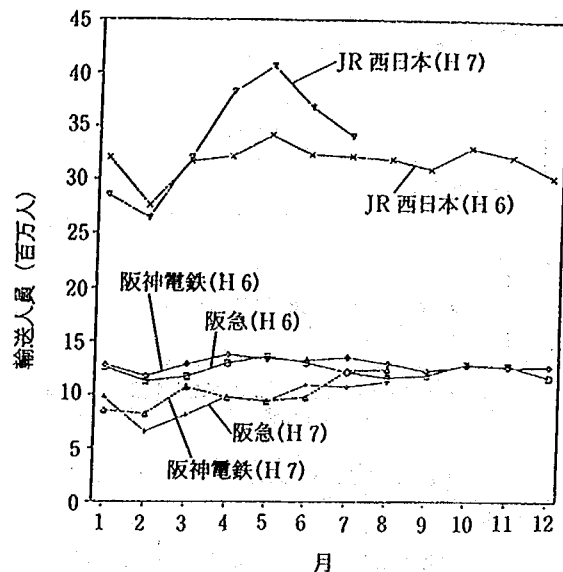


図-3 阪神高速道路の交通開放延長と利用交通量の推移

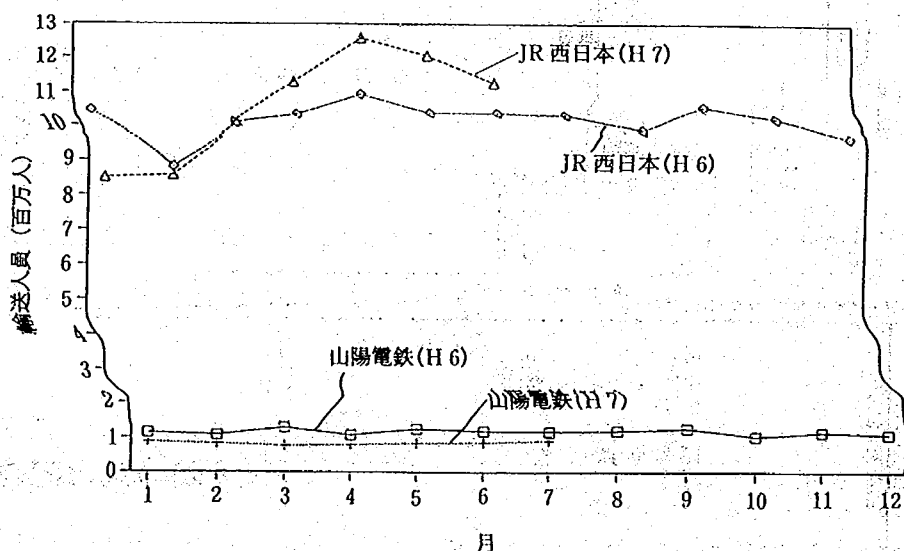
日のことであった。その後、JR西日本東海道線が4月1日に、また山陽新幹線も4月8日に開通し、東西の交通事情は飛躍的に改善された。残る阪急神戸線、阪神電鉄本線も6月中に全通し、大阪～神戸間の鉄道は地震後5ヶ月で震災前の状況に戻った。

鉄道の輸送状況の推移は図-4に示すとおりであるが、路線が全通したからといって旅客数がすぐに回復するわけではなく、数ヶ月かけて徐々に回復している。一方、新幹線で代表される広域の輸送量は近距離に比べれば全通後の回復は早いが、それでも2ヶ月を要している。



- (注) 各データは次のとおりであり、内容に整合はとれていない。
1. JR西日本 : 京都駅～神戸駅間の輸送人員 (6年: ×, 7年: ▽)
 2. 阪急 : 神崎川駅～三宮駅間の駅乗降客数の合計 (6年: □, 7年: +)
 3. 阪神電鉄 : 出屋敷駅～元町駅間の駅乗降客数の合計 (6年: ◇, 7年: Δ)

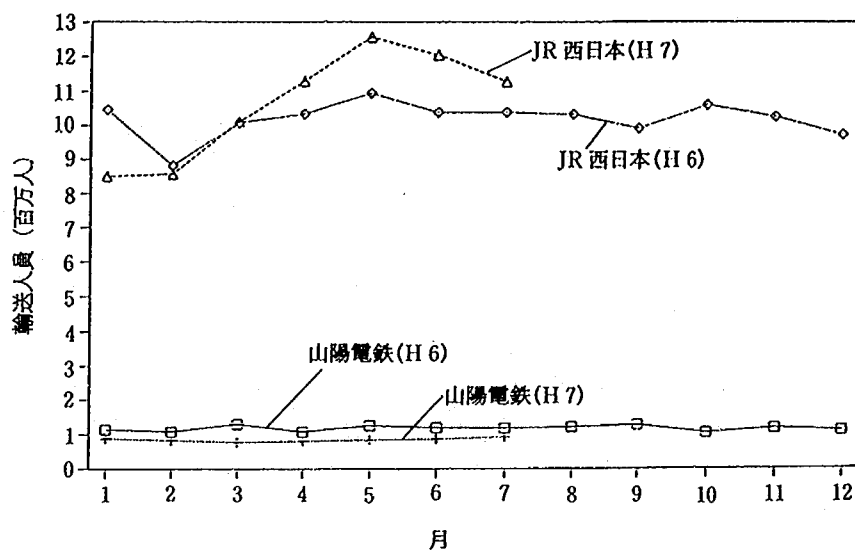
図-4.1 神戸市東側の輸送状況の推移⁹⁾



- (注) 各データは次のとおりであり、内容に整合はとれていない。
1. JR西日本 : 神戸駅～西明石駅間の輸送人員 (6年: ◇, 7年: Δ)
 2. 山陽電鉄 : 西代駅～明石駅間の駅乗降客数の合計 (6年: □, 7年: +)

図-4.2 神戸市西側の輸送状況の推移

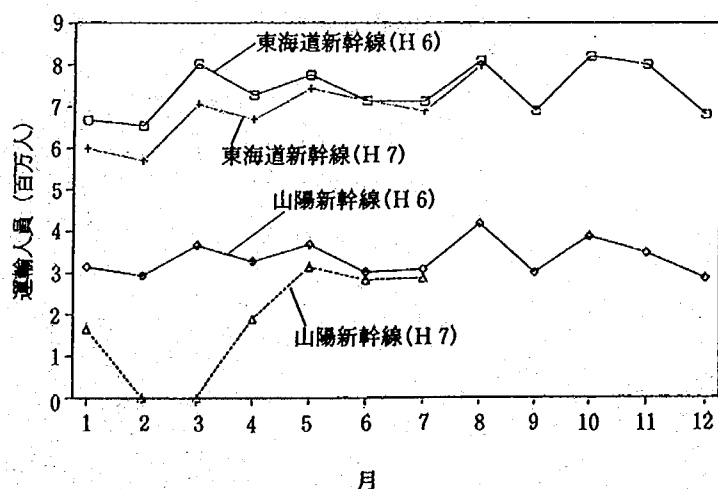
正 誤 表



(注) 各データは次のとおりであり、内容に整合はとれていない。

1. JR 西日本 : 神戸駅～西明石駅間の輸送人員 (6年:◇, 7年:△)
2. 山陽電鉄 : 西代駅～明石駅間の駅乗降客数の合計 (6年:□, 7年:+)

図-4.2 神戸市西側の輸送状況の推移

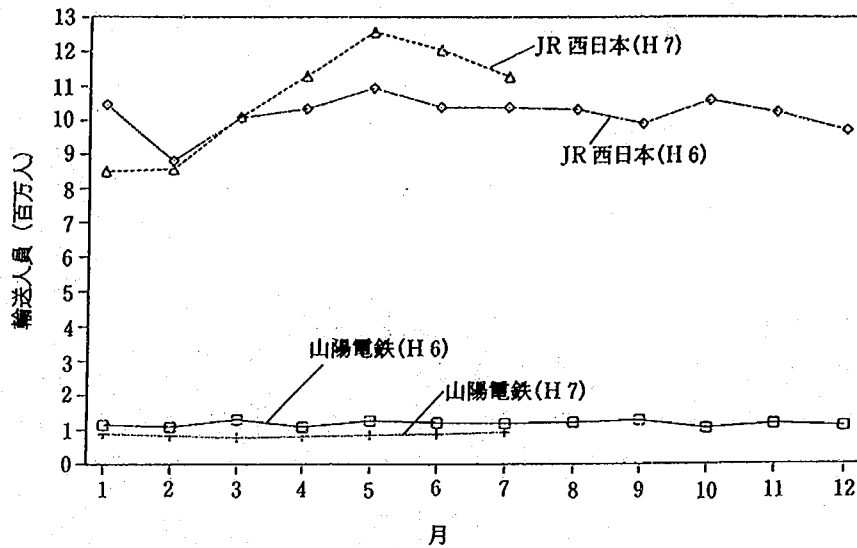


(注) 各データは次のとおりである。

1. JR 東海 : 東海道新幹線 東京駅～新横浜駅間の輸送人員 (6年:□, 7年:+)
2. JR 西日本 : 山陽新幹線 新大阪駅～西明石駅間の輸送人員 (6年:◇, 7年:△)

図-4.3 新幹線の輸送状況の推移⁹⁾

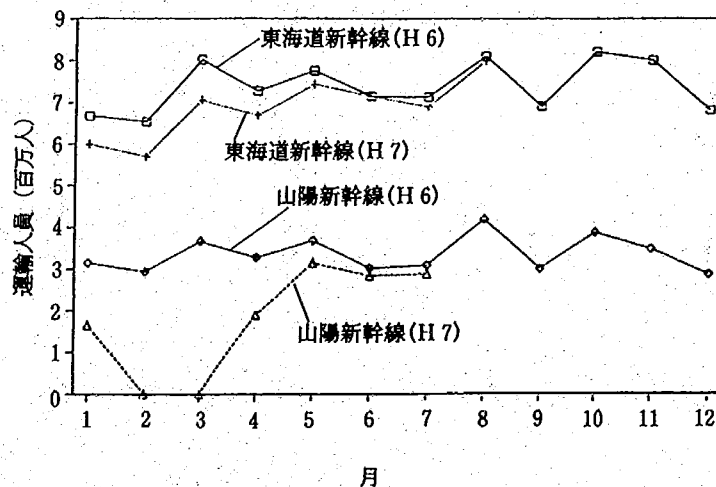
正 誤 表



(注) 各データは次のとおりであり、内容に整合はとれていない。

1. JR 西日本 : 神戸駅～西明石駅間の輸送人員 (6年:◇, 7年:△)
2. 山陽電鉄 : 西代駅～明石駅間の駅乗降客数の合計 (6年:□, 7年:+)

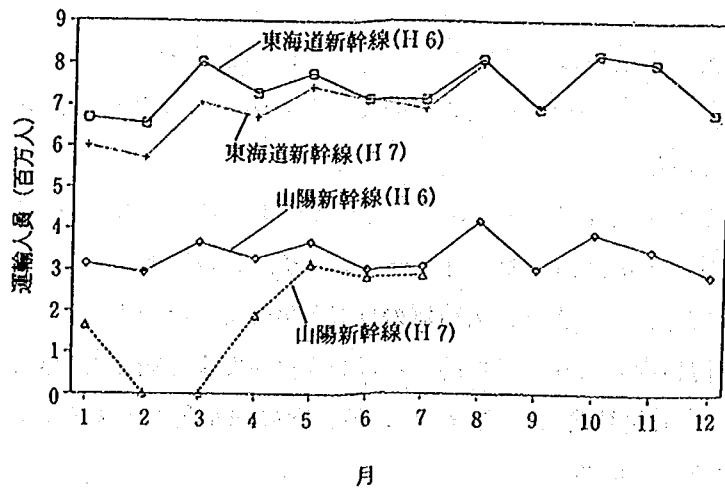
図-4.2 神戸市西側の輸送状況の推移



(注) 各データは次のとおりである。

1. JR 東海 : 東海道新幹線 東京駅～新横浜駅間の輸送人員 (6年:□, 7年:+)
2. JR 西日本 : 山陽新幹線 新大阪駅～西明石駅間の輸送人員 (6年:◇, 7年:△)

図-4.3 新幹線の輸送状況の推移⁹⁾



(注) 各データは次のとおりである。

1. JR 東海 : 東海道新幹線 東京駅～新横浜駅間の輸送人員 (6年:□, 7年:+)
2. JR 西日本 : 山陽新幹線 新大阪駅～西明石駅間の輸送人員 (6年:◇, 7年:△)

図-4.3 新幹線の輸送状況の推移⁹⁾

(3) 港湾

神戸港、尼崎西宮芦屋港など24港において埠頭の沈下等の被害が発生した。特に神戸港については耐震強化岸壁の3バースを除き、ポートアイランド地区、六甲アイランド地区を中心にコンテナ埠頭を含め大部分が被災し使用不可能な状態になった。神戸港では、岸壁については1月31日までに当面の応急復旧を終了し、3月までには公共岸壁約150バースのうち、107バースが暫定的に利用可能となった。⁴⁾

(4) 経済的被害

阪神淡路大震災による人的物的被害は既に見たとおりであり、またライフライン施設の復旧状況が図-5¹⁰⁾にまとめられている。復旧に日時を要したことから多くの市民が長い間避難所などでの不自由な生活を余儀なくされたばかりでなく、また地域の経済活動へも深刻な影響を与えた。近畿地域

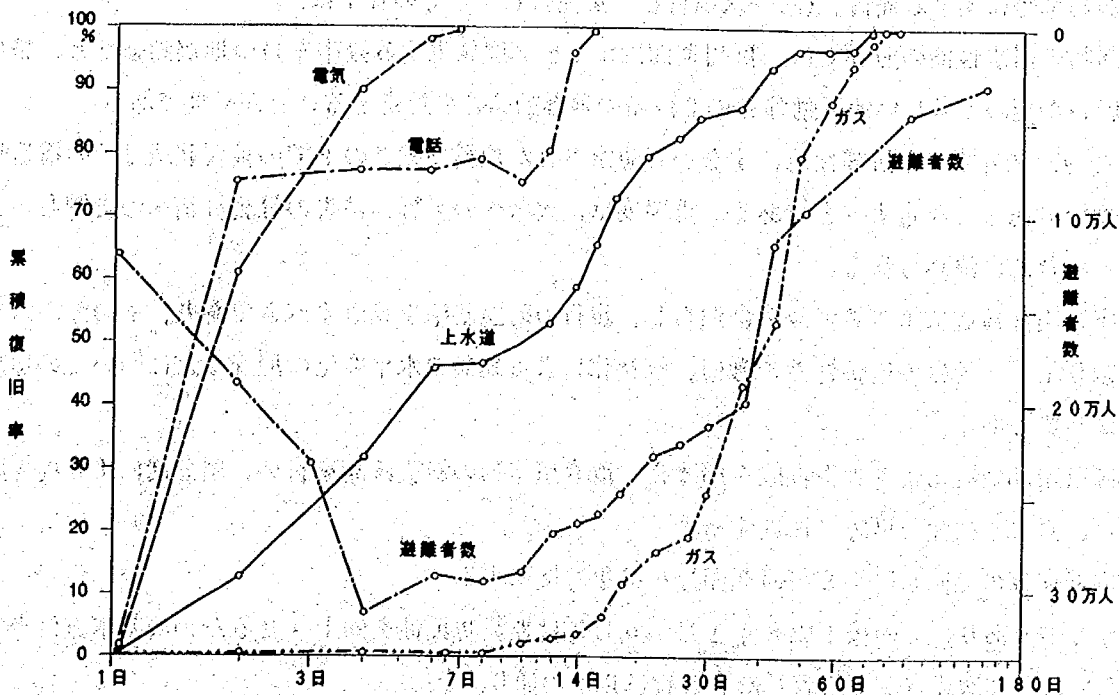


図-5 ライフラインの復旧過程と避難者数の推移 (阪神淡路大震災)¹⁰⁾

の生産面では、1月の工業生産指数は前月比1.4%減、消費面での落ち込みはもちろん、物流面では、鉄道・道路施設の被災により輸出入産業資材のみならず国内の搬出入にも深刻な影響を及ぼし、また輸送コストも増加している。

土木学会「耐震基準等基本問題検討会議」は、交通施設の被災による神戸市、西宮市、芦屋市の間接経済被害（平成7年3月の1ヶ月値）の推計を行っており、この結果によれば「3月1ヶ月の製造業、卸売業、小売業の被害総額（被害額は入荷側の被害と出荷できないことによる被害の大きいほうを採っている。）は650億円程度であり、最終的に被害が3年程度まで続くと考えれば、1兆2千億円（18ヶ月分）となる。これに直接被害の2兆円、他地域、その他産業まで考えれば、最終的には4兆円程度と考えられる。」¹¹としている。

また、港湾施設の被災影響として、運輸省の推計¹²によると、「神戸港の被災により神戸港仕向貨物の中には他港への振替輸送も行われ、大阪湾全体で取扱量が4割減少し、また釜山港を利用したのも3%近くあった。港湾被災による代替港利用による輸送費増加は1ヶ月で約90億円、物流機能の低下による社会経済的損失額は平成7年3月の1ヶ月間で500億円、平成7年内の総被害額は4,000～6,000億円と推計された」。

2.3 提起された課題

この様な激甚な災害からの教訓により、あらゆる都市施設において地震に対する脆弱性を軽減することが緊急に求められている。このためには、施設の耐震性を向上して直接的な被害の発生を防ぐとともに、被害を生じた場合の危機管理体制の高度化を図ることが不可欠である。都市の重要なコンポーネントであるライフライン施設についても、上記の観点に即した技術的・政策的な対応が極めて重要である。この様な観点から施設毎に被害実態を踏まえた今後の課題が整理されている。

また土木学会は、平成7年3月に「耐震基準等基本問題検討会議」を設置し、5月には「土木構造物の耐震基準等に関する提言」（第一次提言）¹³を発表した。その骨子は、

- 1 構造物の耐震性能の照査では、供用期間内に1～2度発生する確率を持つ地震動強さと、発生確率は低いが極めて激しい地震動強さの2段階の地震動強さを想定することが必要である。
- 2 構造物が保有すべき耐震性能、すなわち想定された地震動強さの下での被害状態はその構造物の重要度を考慮して決定すべきである。重要度は、人命への影響、被害の社会経済への影響などを考慮して総合的に決められる。
- 3 兵庫県南部地震による被災経験に照らし、現行の耐震基準を見直すべきであり、その際、水平震度の割り増し、地盤の増幅特性の考慮、液状化による地盤の水平変位の照査などについての追加・修正が必要である。
- 4 兵庫県南部地震による被災経験を踏まえ、既存構造物の耐震診断を行い、緊急度により優先順位をつけ、必要な補強を早急に推進する。
- 5 耐震基準等の見直しに必要な研究開発を早急に促進する。

というものであり、その後平成8年1月10日には地震防災性を向上させるための基本方針を新たに追加して、第2次提言¹⁴を公表した。要旨は以下の通り。

- 1 土木構造物の耐震性能の照査にあたり、強い地震動であるレベル2地震動については、活断層を

同定し、活断層から発生する地震動を予測することを基本とする。

2. レベル2地震動を受けた場合、構造物が損傷をすることを前提として、その程度に立ち入って耐震性能を照査する。このための合理的な耐震設計法を確立しなければならない。
3. 1次及び2次の2段階の耐震診断を行って、補強を必要とする構造物を選び、適切な優先順位に基づいて補強を行う。なお、目標とする耐震性能は新設構造物と同等とする。
4. 土木構造物の耐震性能の強化と併せて、計画等の面から総合的な地震防災性の向上を図るとともに、地震災害アセスメント制度の導入や、都市・地域の計画基準の見直し等を検討すべきである。

3. 道路橋の耐震設計体系の変更

建設省所管施設については、兵庫県南部地震後にそれぞれの施設毎に被災状況、その原因究明及び今後の対応方針を検討する委員会が設置され報告書が取りまとめられている。建築物、ダム、砂防施設については現在の設計基準を大幅に変更する点はないとの結論に達したが、道路橋、下水道施設については技術基準の改訂作業が進められ、また河川堤防はスーパー堤防を除いて耐震性能が規定されていなかったが耐震性を高めようとの動きがある。道路橋に関しては建設省は平成8年11月1日、新たな知見を取り込み道路橋の耐震設計基準（道路橋示方書[道示と略記する]）を改訂した。新しい基準は、設計時に考慮する地震力として内陸直下型地震による地震動を追加したほか、設計法についても構造物としてのねばりを高め、橋全体として大地震に耐える設計を行うようにする特徴がある。

ここでは兵庫県南部地震の経験を踏まえて改訂された設計基準の代表的例として道路橋示方書¹²⁾を取り上げ、その主な改訂点を紹介する。

3.1 耐震性能の明確化

新しい示方書では、「橋の耐震設計は、橋の重要度に応じて必要とされる耐震性能を確保することを目標として行う」と規定している。具体的には、重要度が標準的な橋（A種の橋）は、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動に対しては健全性を損なうことなく、また、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動に対しては致命的な被害を防止することを目標とする。特に重要度が高い橋（B種の橋）は、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動に対しては健全性を損なうことなく、また、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動に対しては限定された損傷にとどめることを目標とする。

従来、設計で考慮する地震力と橋の耐震性能が必ずしも明確には示されていなかったが、平成2年道示では「道路交通の安全性確保を目的として、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震に対しては、構造物の健全性が損なわれず、希に起こる大きな地震に対しても落橋などが生じないことを目標として行う」として、確保すべき耐震性能の考え方が示された。更に、今回の改訂では耐震設計で考慮する地震動と構造物が具備すべき耐震性能が具体的に規定され、耐震設計の目標が明確になったものである。

参考[下水管きよの耐震性]

兵庫県南部地震では、下水道施設についても同じように大きな被害が出て、今後の地震対策につい

て委員会で検討されている。そこでは、下水道施設のうち下水管きよについては、面的な地中構造物であり、個々の施設毎に同一のレベルの耐震性を確保することは困難であることから、全体の被害率を低減させるという確率論的な考え方を設定している。即ちレベル2地震動に対して、重要性の高い下水管きよを除いて、ネットワークとして機能できること、一般に幹線と比べて復旧が容易であることなどから、被害率と応答速度、地盤ひずみの関係を求め、ここから耐震設計のための外力を設定する考え方が提案されている¹³⁾。

3.2 設計地震動

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及び供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動の2段階を考慮する。橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動としては、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と同じであり、また供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動としては、平成2年の道示に取り入れられた発生頻度が低いプレート境界型の大規模な地震による地震動に加え、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も考慮することとされた。これらを、それぞれタイプⅠ、タイプⅡの地震動と呼ぶこととしている。タイプⅠの地震動は大きな振幅が継続時間が比較的長く繰り返して作用する地震動を、タイプⅡの地震動は継続時間は極めて短いながらも極めて大きな強度を有する地震動を表しており、鉄筋コンクリート橋脚や鋼製橋脚の許容塑性率の算定等においてこの違いを考慮している。

耐震設計法の従来の基準との大きな違いは、従来は震度法と許容応力度法を組み合わせ、弾性領域の橋の安全性を照査していたのに対し、今回は地震時保有水平耐力法により実際に観測された地震動をもとに構造物が損傷を受けることを考えて耐震設計を行うようにしたことである。すなわち設計地震動で見ると、従来の震度法の設計水平震度0.2～0.3から、地震時保有水平耐力法の設計水平震度0.7～2.0に変更になった点であり、加えて兵庫県南部地震のような内陸直下型地震を設計に取り込んだことである。

従来より、道路橋示方書では設計外力に対し再現期間を関連づけて規定していたのは風荷重だけであった。風荷重は「50年間でその風速を超えない確率が0.6以上となるように」基準風速を設定したとしている。具体的には、この場合再現期間は100年となる。この背景には橋の寿命実態調査から、橋の耐用年数が50～100年と言われるときに、考慮すべき外力の再現期間を耐用年数との関係で妥当なところに設定していたと考えられる。これに対し、活断層に起因するような内陸直下型地震の再現期間は1,000～10,000年のオーダーであると言われており、発生確率的には非常に低い事象であるが、起きた時のその影響度を考えて、設計外力の設定に対する確率的なアプローチとは異なる方法がとられた。

この様な内陸直下型地震による地震動を設定する場合には、確率的アプローチでは難しいため、活断層を同定しその活動度や規模をもとに発生する地震動を予測する方法が検討されることがある。この様な試みは、ケーススタディとして行われてはいるが、全国規模で設計に取り込むには現状では未解明な点も多いとして、今回の道示では構造物に影響を与えたという観点で現在までに観測された中では世界的に見ても最も強い兵庫県南部地震の地震動を考慮することとした。

参考 [活断層を含む地震調査研究の動き]

平成7年6月地震防災対策特別措置法が施行され、その中で、地震調査研究の推進のために体制の整備を行い、従来ややもすると個別に行われていた計画立案、実行、評価の一元化を図ることとしている。具体的には、「地震調査研究推進本部（本部長：科学技術庁長官）」を設置し、地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的な施策の立案、総合的な調査観測計画の策定、調査結果の収集、整理、分析及び評価などを行う。耐震設計に深く関係する活断層が引き起こす地震の規模については、手法も含めてこの推進本部で評価することになっている。

3.3 照査基準、手続き

新しい道示では、設計は原則として震度法及び地震時保有水平耐力法によって行うものとしている。そして、地震時の挙動が複雑な橋は動的解析を行い、その結果を設計に反映するのがよいとしている。

今までの耐震設計が震度法を基本とし、鉄筋コンクリート橋脚に対し地震時保有水平耐力の照査を行っていたのに対し、今回の基準では鉄筋コンクリート橋脚、鋼製橋脚ならびに基礎や支承に対しても地震時保有水平耐力法で設計することとした。すなわち、構造部材の強度を向上させると同時に変形性能を高めて橋全体として地震に耐える構造系を目指すために、照査レベルが許容応力度から終局耐力に変わっている。従って、設計手続き的には弾性範囲を対象としている許容応力度法から、基本的に非線形挙動までを視野においた地震時保有水平耐力法あるいは動的解析に変わるため、構造物の非線形特性を理解して設計に臨まなくてはならない点が重要である。

3.1 から 3.3 に紹介した新しい耐震設計の基本的な考え方が表－1 に、設計の流れが図－6 に整理されている。

表－1 道路橋の耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能

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

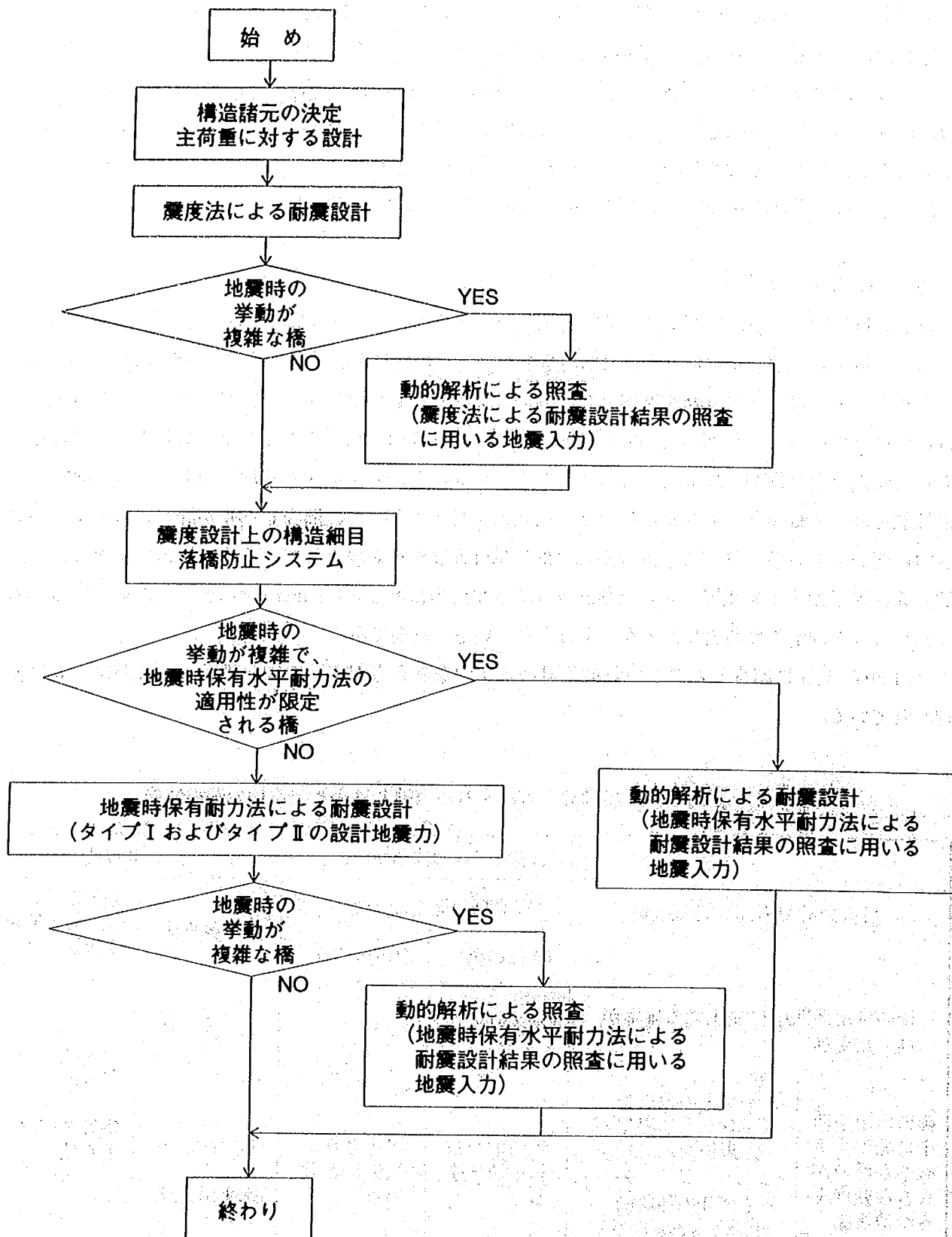


図-6 標準的な道路橋の耐震設計の流れ

4. 地震防災計画

阪神淡路大震災以後、近年の災害の経験と都市化・高齢化・情報化・国際化などの防災を取り巻く社会構造の変化を踏まえ、わが国の防災対策の基本である「防災基本計画」の見直しが行われ、また建設省でも「建設省防災業務計画」の改訂が行われた。

今回の地震の反省から、構造物の耐震性を高めるのみならず、地震後の早期状況把握、救助活動、復旧などの緊急対応が非常に重要であることが再確認された。

4.1 地震計ネットワーク

業務としての地震観測は、従来より気象庁が担当してきたが、観測地点は地域的には限られたものであった。また、他の機関が行っていた強震観測も、関西地震観測研究協議会などを除き、今後の研究に役立てることを主目的にしており、オフラインのために瞬時に地震情報を集めるようにはなっていなかった。地震後直ちに地震動の分布が得られたならば、被害状況の把握の参考になりまた緊急対応などに役立つと考えられる。また、地震防災計画の策定や耐震設計、耐震補強などにも活用することが出来る。この様な観点から、強震計ネットワークが整備されてきており、代表的なものにカリフォルニア州のCUBE (Caltech-USGS Broadcast of Earthquake)、関西の関西地震観測研究協議会ネットワークがある。兵庫県南部地震の際には、各機関で観測された地震記録が地震後の対応に役立てられた。この様な状況から、わが国では阪神淡路大震災以降、全国に展開した強震計をネットワークで結び早期に地震記録を収集・情報提供するシステム整備が進められてきており、代表的なものに科学技術庁のKネットがある。建設省でも3ヶ年計画で地震計ネットワークの整備が進められており、その他には、消防庁などの防災部局、横浜市などの地方自治体でも同様な動きがある。

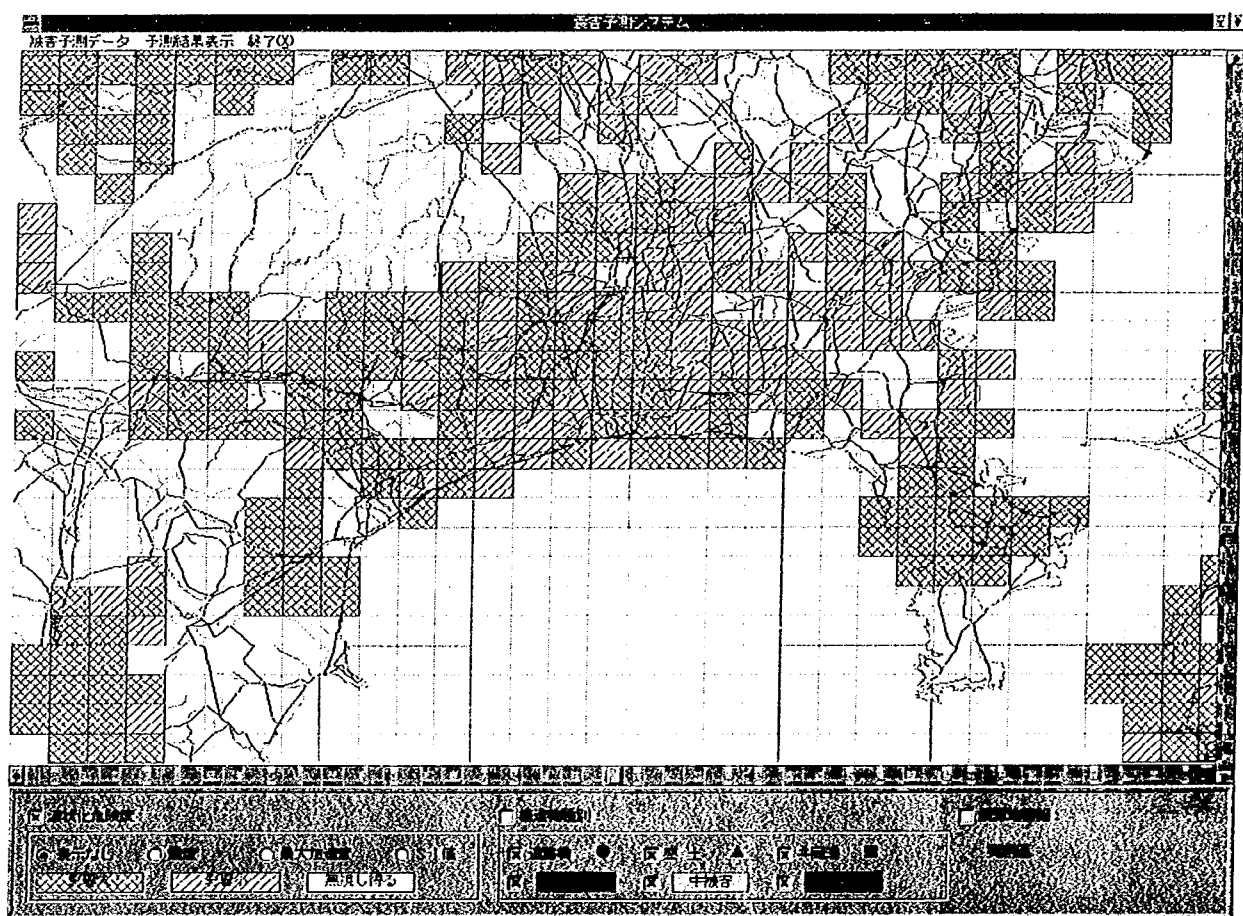
建設省地震計ネットワークは、河川、道路の工事事務所、出張所、テレメータ観測地点及び重要構造物（橋梁、ダム）などにおいて地震計を設置し、これらを建設省無線網で結ぶ。これにより、最大加速度と地震被害と関係が深いSI値等を関係事務所等に配信し、震後の迅速かつ的確な応急対策活動に役立てるものであり、平成9年度には完成する計画になっている。この地震情報ネットワークにより、点検優先区間の判断、近隣の事務所からの応援を含めた支援体制の確立、情報板やラジオを通じて施設の利用者や周辺住民への早期情報提供が図られる。また、今後は、地震情報による即時地震被害予測システムの開発にもつながっていく。更に、他機関との連携による地震観測網の充実が求められる。

4.2 早期地震被害把握

地震発生後、施設管理者としては、各々の管理する施設等にどの程度の被害が生じるかを早期に把握することが重要である。地震直後の被害把握方法については、大きく分けて施設被害を人・センサーなどにより検知する方法と、間接的に被害を予測する方法の二つがある。

まず、被害の検知については、道路等のライフラインネットワークや河川管理施設等の各箇所にセンサーを設置し、地震被害発生と同時にその情報を電話回線などにより担当部局に伝達・報知するものである。センサーには、ワイヤーセンサーなど施設に直接設置するものや、レーザー測距儀のよう

一方、即時被害予測は、地震動に関する情報をキャッチすると同時に、その情報と事前に準備されたデータベースの情報を組み合わせて、施設の被害状況を〔検知せずに〕予測しようというものである。〔すでに施設の被害が発生した段階ではあるが、実際の変状を計測せずに知ろうとするものであることから、ここでは（早期）被害予測と呼ぶことにする。〕このような被害予測システムの一つの例として、現在土木研究所において開発中の「即時被害予測システム」がある。このシステムでは、地震発生と同時に建設省地震計ネットワークの観測記録に基づいて加速度等の分布を推定し、橋梁など対象構造物の被害程度を予測したり、液状化危険度を推定しようとするものである（図－7）。このようなシステムにより、施設管理者は、地震直後の施設点検のルート、点検を重点的に行うエリア・施設の目途をつけることが可能となる。



以上のような被害把握を行うための検知システム、予測システムの整備を進めるにあたっては、システムの整備に要する費用、遠隔地との情報伝送に必要な回線の確保、平常時の運用方法などに配慮

する必要がある。昨今の情報処理機器の低価格化に伴って、必ずしも高価な機器を用いなくとも実現可能な処理が広がっているが、より多くの情報を流すための回線は次第に限られてきている。回線・機器ともに、非常時のためだけにこれらを整備するのではなく、これからのシステム構築にあたっては、平常時の業務における利用の方法、災害が発生した場合の利用モードの変更を念頭においておく必要がある。

5. 今後の地震防災研究の課題

5.1 日米協力における研究課題

地震防災に関しては、日米両国では両国が地震国であることから以前よりU J N R耐風耐震構造専門部会の活動やその他の研究協力プログラムを通じて研究交流が行われてきたが、最近既存の協力及び新たな地球規模の問題に対する協力をも取り上げ、日米2国間の協力を積極的に推進しようとする枠組みが動き出している。1993年7月、宮沢総理大臣とクリントン大統領が、日米包括経済協議の一環として「地球的展望に立った協力のための共通課題（コモンアジェンダ）」を打ち出した。そして、1996年4月、新たに「自然災害の軽減（地震）」を含む8協力分野を追加した。「自然災害の軽減（地震）」の中には以下の3項目が含まれている。

- ・地震被害軽減パートナーシップ [科学技術庁]
- ・日米地震シンポジウム [国土庁]
- ・太平洋自然災害監視ネットワーク [気象庁]

第1回日米地震シンポジウムは両国から政府関係者及び科学者を集め平成8年9月ワシントンで開催された。シンポジウムでは緊急地震対策の強化方法を討議し、地震災害の軽減とそのための実践方法に関する政府の政策について意見交換を行った。共同声明の中に盛り込まれた今後の日米両国の協力分野は表-2の通りである。第2回のシンポジウムが平成9年日本で開催される予定になっており、その後も継続的に協力及び対話を行うために日米地震防災政策会議を設置することが決定されている。

また、地震被害軽減パートナーシップでは、地震予知及び被害の軽減に関する情報交換等、一層緊密な地震に関する研究開発協力を行うこととしている。ここでは、表-3のように日米で行うべき幅広い分野の研究課題を整理している。これらの課題は、国内ではそれぞれ気象庁、郵政省、通産省、運輸省、消防庁と建設省が分担し、米国のカウンターパート機関と共に担当することになっている。

パートナーシップの課題は、いわゆるハードの技術＝地震動の特性を初めとする理学的・技術的課題が中心であり、一方シンポジウムで取りまとめられた協力分野はソフトの技術＝行政サイドの課題が中心となっており、それぞれ幅広い分野を含んでおり、今後の地震防災研究の枠組みを与えている。

表-2 日米地震シンポジウム・今後の協力分野

1. 開発及び情報交換

- ・地震警告、緊急対応、復旧及び被害軽減の政策及び手続きの改善
- ・地震被害を軽減するための都市計画及び都市開発政策
- ・適切かつ迅速な対応を可能にする正確な地震規模評価法

- ・高度な捜索、救助、消火技術
- ・被災地の復興支援プログラムの改善とこれにより得られた新しい知見
- ・新素材及び大規模試験施設の使用を含む、建築物、構造物、ライフラインシステム等の耐震脆弱性評価及び耐震補強技術の向上、並びに設計ガイドライン、建築基準等の開発
- ・政策担当者、技術者の交流及び地震により得られたデータの交換
- ・大都市における危険評価と緊急事態管理

2. 改善

- ・リアルタイム地震モニタリング、警告、予知及び地震危険区域地図
- ・建物、構造物、ライフラインシステムの損害危険評価法
- ・準備、被害軽減活動を啓発し、地震後の緊急対応を容易にする地震損失評価モデル
- ・重要な施設、公共構造物、公共事業の耐震脆弱性並びにそれらの耐震性能の評価の政策及び手法

表-3 日米地震被害軽減パートナー・シップの研究テーマ

1. 地震の脅威の数量化

- 1.1 将来の地震ポテンシャルの数量化
- 1.2 損失評価方法の強化
- 1.3 震源に関する基礎理論の検証
- 1.4 震源付近における震動、地質的影響及び構造物の応答の理解

2. 地震被害の軽減

- 2.1 鉄骨建築物による地震リスクの軽減
- 2.2 既存及び損壊した建築物及びインフラストラクチャの耐震評価及び補強の強化
- 2.3 性能志向型設計法の開発

3. 緊急時対応のための技術の改良

- 3.1 リアルタイム地震情報システムの開発
- 3.2 地震時火災の制御

4. 工学的および社会学的研究

5.2 土木研究所におけるこれまでの地震防災研究

土木研究所においては、1922年（大正11年）の発足以来、地震防災に関する研究は大きな柱の一つになっている。関東地震、新潟地震、十勝沖地震など多くの地震から貴重な教訓を受けて研究が進められ、橋梁、ダム、土構造物などに対する耐震設計法・対策等に研究成果が活用されている。その他に、建設省において1972年から開始された総合技術開発プロジェクト（総プロ）では、「新耐震設計法の開発」、「土木構造物の復旧技術の開発」、「災害情報システムの開発」、「大都市地域における地震防災技術の開発」を実施してきており、それぞれの研究内容と成果が表-4に取りまとめられている。

表-4 「地震防災関連」建設省総合技術開発プロジェクト

プロジェクト	内 容
「新耐震設計法の開発」 1972～76	「新耐震設計法」 土木・建築の整合性、地震マップ他 → 建築：1981 建築基準法の耐震規定追加 土木：各施設毎の耐震規定に反映 1980 道路橋示方書・耐震設計編 1990 同 上
「震災構造物の復旧技術の開発」 1981～85	「土木・建築構造物の震災復旧マニュアル」 (土木構造物：河川・海岸・砂防施設、道路施設、下水道施設) → 各施設毎の耐震点検・震後対応マニュアル等に反映
「災害情報システムの開発」 1987～92	「災害情報システムガイドライン」 (震災復旧編・水害復旧編・土砂災害復旧編) 基本技術編：ヘリテレビ、空中写真、GIS 基幹施設編：震災時に必要な情報、災害情報地上検知システム、 震災・復旧情報収集システム、情報伝達システム、 地震時地表変状の予測、地中構造物・道路施設等の 被害予測
「大都市地域における地震防災技術の開発」 1993～98	地盤震動： 地盤振動増幅（特に不整形地盤）、断層調査法、断層近傍地震動 液状化： 液状化因子の再検討（密度、不規則性）、液状化対策 都市内構造物 高架・地中等の近接構造物、杭基礎の地震時耐力を考慮した設計 RC構造地震時せん断耐力、地中構造物の非破壊探査手法

5.3 耐震技術研究センターの研究課題

耐震技術研究センターでは、兵庫県南部地震など最近起きた地震災害からの教訓、土木学会からの提言、日米の地震防災に関する研究課題などを踏まえ、地震防災のための研究の全体像を図-8のように整理して考えている。地震動、構造物の耐震設計、評価、補強などの技術に加え、社会経済的影響

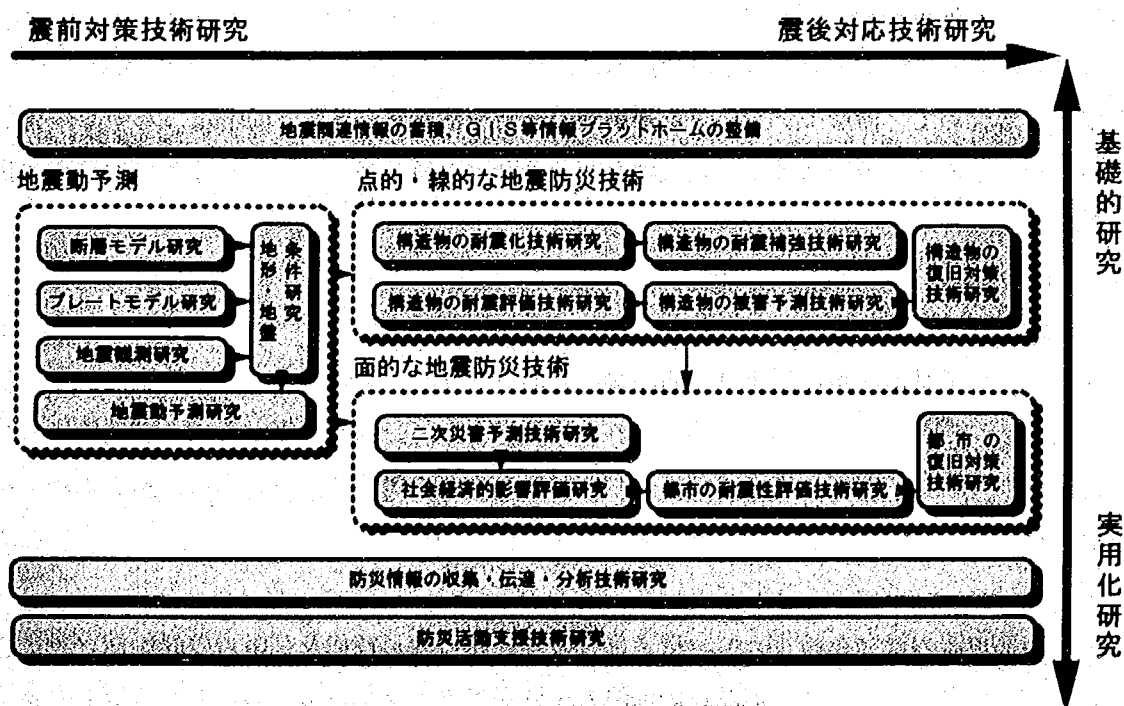


図-8 地震防災研究の全体像

響の評価、地域の耐震性、そのための地震防災情報の収集・活用・伝達などについて幅広く研究を進めていくこととしている。ここでは、その中から道路橋等のライフラインを中心にいくつかの研究課題を簡単に紹介する。

(1) 地震動の工学的な評価

耐震設計において考慮すべき地震動の大きさは基本要素であり、ライフラインの代表として道路橋を取り上げ、その耐震設計の荷重の変遷をたどってみると、先ず1923年関東地震に続く1926年に設計に取り入れられ、その時の設計震度 k_h は各地域における最強地震力を用いることとされ、具体的には地域と地盤条件に応じて0.1～0.3という値をとるとされた。1939年には水平震度標準値が0.2とされ、その後様々な地震被害を教訓に調査研究の成果も取り込み、1971年には地盤条件、地域、構造物の固有周期等の影響を考慮して標準的な設計震度が与えられるとともに、耐震設計に種々の変更が施された。1990年の設計基準の改訂においてはRC橋脚の地震時保有水平耐力の照査が行われることとなり、ここでは設計水平震度は0.7～1.0という値が採用された。更に1995年兵庫県南部地震では、多くの点でこれまで我が国で観測された地震動とは異なる特性が見出された。すなわち、①大きな最大加速度を有する、②応答スペクトルが広い周期帯で大きい、そして③繰り返し回数が少ない¹⁾。これを受けて道路橋の耐震設計も大幅に改訂され、地震時保有水平耐力法で用いられる設計震度はプレート境界型地震を想定したタイプⅠの地震動に加えて、タイプⅡの地震動として内陸直下型地震を想定して1.5～2.0という値が設定された。また、兵庫県南部地震では④硬質な地盤において地震動が大きいという現象が見られた。従来、強震記録の整理から、一般に軟弱な地盤ほど地震動は大きく増幅されるとされてきたが、地震動が大きな場合には軟弱地盤では大きなひずみが生じ、塑性化し、このために地震動の伝播特性が変わったと考えられる。この点は地盤種別毎の地震動設定において考慮しなければならない点であろう¹⁾。

このように、地震荷重はこれまでに改訂され続けており、現在も一層の高度化が求められている。この数十年間で地震観測技術も高度化し、精度の高い情報が蓄積されてきている。それに呼応して、地震のメカニズムに関する研究も格段に進み、地震に対する理解も深まってきた。活断層に起因する直下型地震も含めて、断層モデルによる地震動の推定や活断層の地質学的情報に基づく地震危険度解析といった、地震学、地球物理学、地質学などの分野との研究協力を行い設計地震動の高度化が必要である。

(2) ライフライン施設の耐震設計法

1) 道路橋の耐震設計法

1995年兵庫県南部地震により、道路橋の鉄筋コンクリート橋脚では、主鉄筋段落し部に関する規定が改訂される1980年以前に施工された橋脚において、曲げ損傷からせん断破壊に移行するという著しい被害を生じた例や橋脚基部に著しい被害を生じた例があった。また、鋼製橋脚では矩形断面の鋼製橋脚において、ウェブ及びフランジの局部座屈が角溶接の破断に発展し、大きな被害となった例があった。

兵庫県南部地震の経験を踏まえて、構造部材の地震時の変形性能及び耐力の評価法、動的解析の活用、道路橋全体としての変形性能及び動的耐力を確保できる支承構造、衝撃力を考慮した落橋防止装置、けた端から下部構造頂部縁端までの距離、液状化・地盤流動が道路橋に与える影響、及び道路橋

全体としての耐震性向上に関わる研究開発の必要性が指摘された。

改訂された道路橋示方書では、従来の震度法による設計に加えて、橋全体系としての変形性能を向上させ、耐震性を高めるために、鉄筋コンクリート橋脚、鋼製橋脚、基礎等において地震時保有水平耐力法による設計法が導入された。今後は、活断層の特性を考慮した地震動の設定方法を開発することが急務であり、また他の構造物と併せてシステムとしてみたときの道路橋の所持すべき耐震安全性を議論し、それを実現できるような新しい設計体系の確立が望まれている。

2) 新技術の活用

地震時の構造物の振動を低減し、耐震性の向上を図るための、免震・制振・ハイブリッドコントロール技術の開発が進められている。

免震技術に関しては、変形によりエネルギーを吸収する高減衰ゴムを用いた高減衰積層ゴム支承や、減衰性能の向上と分散を目的とした免震設計法が開発され、道路橋の免震設計法マニュアル（案）（1992）としてまとめられていたが、こうした免震設計法が改訂された道路橋示方書に規定された。また、免震設計と制振設計の両者の利点を活用した振動制御方法としてハイブリッドコントロール技術の開発が進められている。ハイブリッド制御装置の一つとして、減衰性能を構造物の振動性状に応じて変化させることが可能なバリアブルダンパーが開発されている。

また、自己修復機能を有する材料や自己診断機能を有する材料等、近年の開発がめざましい新材料を活用し、被災しても簡易に修復可能で、また、被災状況を簡易に診断可能な耐震構造の研究開発が実施されている。

(3) ライフライン施設の耐震評価及び耐震補強

1) 道路橋の耐震評価及び耐震補強

道路橋示方書が改定され、新設橋については従来よりも高い耐震性能を確保することとしたが、一方、既設の道路橋は相対的に耐震性が低く評価されるため、適切な耐震補強を施し耐震性を高める必要がある。兵庫県南部地震のような大規模地震に対して安全性を確保するためには、道路橋の上部構造や下部構造を一体のシステムとして捉え、強度及びじん性を向上することが重要である。このような考えに基づく既設の道路橋の耐震性を評価する技術が必要になる。

また、橋脚の耐震補強法として鉄筋コンクリート製橋脚のコンクリート巻立て工法や鋼板巻立て工法があり、橋脚の曲げ耐力及びじん性を向上する上で有効である。曲げ耐力及びじん性の評価手法に関する研究開発が、模型載荷実験を通じて実施されている。また、炭素繊維シートを用いた補強方法についても研究開発が進められている。鋼製橋脚に対する耐震補強技術としては、隅角部を補強する工法、補剛版を増設する工法、コンクリートを充填する工法について、研究開発が進められている。

これらを含めて、全ての橋梁に対して同時に耐震補強を進めることは経済的、実務的にも現実には困難が多いことから、優先順位を適切に定めて効果的に耐震補強を進めていく必要がある。このためには優先順位の設定法や補強法の選定方法などが課題となる。

2) 地下埋設管路施設の耐震評価及び耐震補強

1993年釧路沖地震や1994年北海道東方沖地震において、現地盤や埋戻し地盤の液状化により下水道管路施設に甚大な被害が生じた。液状化地盤中に設置されていたマンホールが1.5 mも浮き上がったほか、埋設管路が鉛直方向・水平方向に変形した。埋設管は地盤の液状化により甚大な被害

を受けやすく、また、被害の発見及び復旧も困難である。

同様に、共同溝は多くの公益施設を收容しており、都市のライフライン施設の中でも最も重要な施設である。このため、1991年には既存の共同溝に対する全国一斉の耐震点検が実施された。耐震点検により、液状化による被害を受ける可能性がある区間を抽出し、これらの区間に対して詳細調査及び対策計画の策定が実施されている。

1995年兵庫県南部地震を契機として、公共土木施設の耐震設計水準が引き上げられつつある。地下埋設管路施設についても、新たな課題として、大規模地震時の液状化に対する安全性評価手法の構築が必要とされている。ここに、地下埋設管路施設の耐震性向上に関する施設管理者の施策を円滑に推進するためには、実務的かつ経済的な技術開発が不可欠である。このため、液状化対策が必要な地下埋設管路施設の特定、液状化に対する危険度評価技術・対策技術、及び費用便益効果の評価技術に関する研究開発を推進する必要がある。

(4) 緊急対応に向けた情報システムの高度化

地震による直接的・間接的な影響を軽減するためには、市民の生活や産業活動を支えるライフライン施設が地震後も機能を保持していることが重要である。このためには、まずライフライン施設の直接的な被害を最小化すること、次にライフラインネットワーク上で被害の影響をできるだけ局所的にとどめることが重要である。

道路ネットワークは、地震後の住民避難路や復旧のための緊急輸送路として極めて重要な役割を担っている。このため、道路ネットワークの損傷は、地震による間接的な影響の広がり大きく左右することになる。地域レベル・全国レベルともに、地震による間接的な影響を軽減するためには、まず道路ネットワークの地震時の安全性を向上することが急務である。

既往の地震災害によれば、道路ネットワーク管理に対する防災情報システムの開発・導入が極めて有効であることが指摘されている。防災情報システムの導入は、道路ネットワークとしての耐震評価や耐震強化戦略といった効果的な震前対策を、また、道路ネットワークの被害把握や復旧戦略といった迅速な震後対応を実現するものである。

また様々な産業分野において、GISやGPSに代表されるような新しい情報技術の開発・導入が進められている。施設管理者の道路ネットワーク管理を高度化するためには、これら新技術を防災情報システムに導入するための研究活動が重要である。

(5) 地震災害の影響評価

地震が発生した際の道路等の社会基盤施設の被害の影響としては、個々の施設の耐震性のみならず、ネットワーク全体としての耐震性を評価するとともに、その被害が社会に与える影響を評価し、これによって震前の補強戦略、震後の復旧戦略に生かす必要がある。たとえば重要度の高い道路の重要構造物と比較的重要度が低い道路の構造物が被災した場合、震後の交通処理機能に与える影響は明らかに異なり、したがって震後の救急・救援活動、復旧活動や経済活動への影響の程度も異なってくる。道路のほかにも、他のライフライン施設などネットワークとして機能する基幹的な施設においては、同じように影響を適切に評価し、有効なネットワーク計画、補強・復旧活動を進める必要がある。

道路のネットワークとしての耐震性は、被災後に、公的機関、救急医療施設、物流拠点、避難施設等の間に生じる人命救助、生活物資輸送、情報収集等に関わる活交通需要に対応できる程度によって

計られる。このような意味での耐震性は、震後の1ヶ月程度の間におけるネットワークの機能を表すものである。また、道路施設被害の長期的な影響については、交通容量の低減による経済的な波及効果が考えられる。すなわち、地震による産業施設の被害が小さくても、関連の深い産業の施設間を連絡する道路ネットワークが被災したために通行が不能となったり走行時間が増大した場合、産業間の生産物の流通が困難となり、他産業へと影響が波及してゆく。ネットワーク中の個々の施設被害による経済的な影響を推計することができれば、その程度により、各施設・ルートの補強・復旧のプライオリティの検討を支援するデータが提供できる。(図-9)

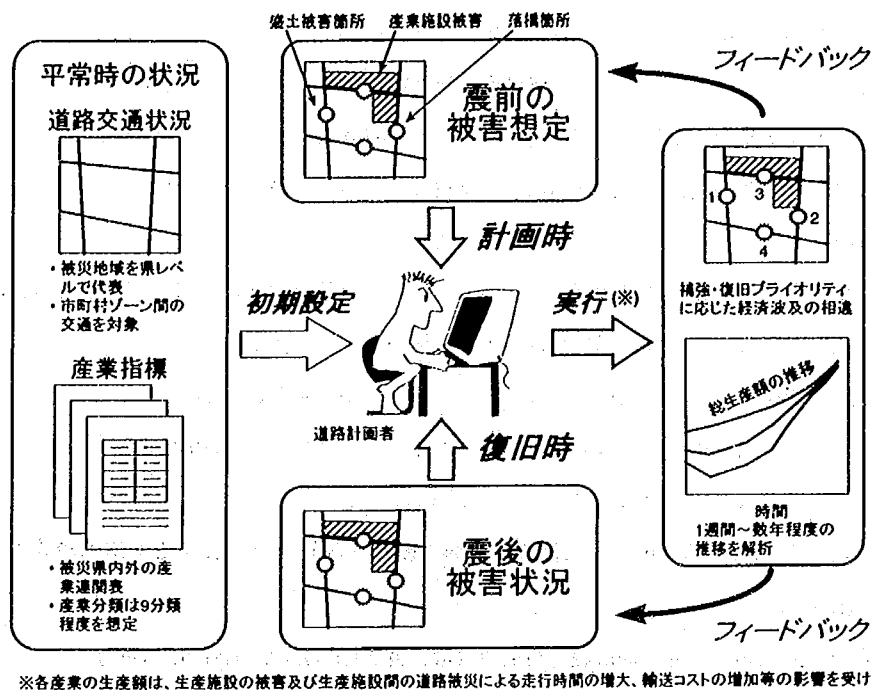


図-9 地震災害の評価

このため、上記のような震災直後における道路ネットワークの耐震性の評価に関する研究および地震による道路被害の社会経済的影響評価を行うシステムの開発が重要であり、道路のみならず各種の交通機関・ライフライン施設のネットワークの相互影響を考慮した耐震性評価、影響評価手法の開発が必要である。

6. 終わりに

兵庫県南部地震によるインフラストラクチャを中心とする被害とその影響について述べ、今後必要な地震防災研究の課題を紹介した。地震から2年が経過し、被害の実態・メカニズムに関する調査、今後の対応に関する提言や勧告などが出揃い、道路橋のように地震からの教訓とその後の調査研究の成果を取り込み既に技術基準が改訂されたものもある。多くの土木施設に関する技術基準は改訂作業中であり、近々新しい基準に置き換えられよう。また、既存構造物に対する耐震補強も進められており、地震に強い安心して生活できる社会基盤造りが進められている。

しかし、兵庫県南部地震は様々な分野に多くの検討課題を残した。まだまだ調査研究を続けなければならない課題も多い。そのような課題の一つに「設計地震動の設定に活断層の特性をどのように取り込むか」という課題がある。更に、社会基盤施設の直接的被害が大きばかりでなく、間接的被害も大きなものがあり、発災直後からの即時対応・緊急対応、さらには応急・復旧活動に対しても損害を軽減できるハード、ソフト技術が必要であり、これは土木分野だけで出来るものではなく多くの異分野との協調が必要であり、総合的に考えていく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会耐震基準等に関する提言集、(1996、5、20)
- 2) 土木研究所：平成7年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告、土木研究所報告、(1996、3)
- 3) 土木研究所：平成7年度土木研究所講演会講演集、土木研究所資料No.3398、(1996、2、2)
- 4) 国土庁編：平成7年版防災白書、(1995、6、30)、平成8年版防災白書、(1996、7、1)
- 5) 関西電力（株）：阪神・淡路大震災復旧記録、(1995、6)
- 6) 資源エネルギー庁監修、ガス地震対策検討会編：ガス地震対策検討会報告書、ガス事業新聞社（1996.3.15）
- 7) 神戸市下水道局：阪神・淡路大震災における下水道復旧の記録、(1995、7)
- 8) 阪神高速道路公団：阪神・淡路大震災からよみがえる阪神高速道路、(1996、3)
- 9) 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編集委員会：よみがえる鉄路、山海堂、(1996、5)
- 10) 東京都：阪神・淡路大震災調査報告書、p308、(1995、7)
- 11) 運輸省港湾局、港湾技術研究所、第三港湾建設局：阪神・淡路大震災による港湾施設等被災状況調査報告書（第2集）、(1995、10)
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、丸善(1996、12)、(1990)、(1980)
- 13) 下水道地震対策技術調査検討委員会：下水道の地震対策についての最終提言、(1996、8、30)
- 14) 田村敬一、本田利器：設計地震力、土木技術資料39-2、(1997、2)

生態系の保全・創造技術の現状

環境部長 飯田 宏典

生態系の保全・創造技術の現状

はじめに

近年、国民の自然や生物とのふれあいに対する関心の高まりとともに、公共事業が生態系に対する影響に注目がされるようになった。建設省では、このような関心に応えるべく、全国の公共事業の現場において、生態系の保全措置をとってきており、今後さらに積極的に生物生息空間の創造に対しても取り組んでいこうとしている。土木研究所では、このような取り組みを支援するよう広範な研究を展開してきている。本稿では、このような国民の関心の背景と、建設省の取り組み、特に土木研究所における研究の現状について紹介する。

1. 「生態系の保全・創造」に対する関心の背景

最近の新聞報道等に見られるように、生態系の保全に関する国民の関心の高まりは著しいものがある。このような関心の高まりの背景として大きく次の4つが考えられると言われている。

その第一は、生物とのふれあいがあまりに少なくなっていることである。すなわち、本来人間が他の生物とのふれあいを必要としているにもかかわらず、自然の動植物を見たり、その声を聞いたりする機会は、とりわけ大都市において、その機会は極めて乏しくなっている。このような状況下では、市街地内の公共事業においては、人間と動植物とのふれあいの場を保全するとともに、創造にも力を入れることが要求されている。

第二は、市街地の拡大により都市周辺で動植物の生息・生育環境が侵され、その結果、動物の悲惨な事故が多発していることである。人間の活動が生む動物たちの悲惨な光景（とりわけロードキル：交通事故）は、日常的に住民の目にふれており、住民に精神的苦痛を与えているものと推測される。

第三の背景は、特に地方圏において特色ある地域作りの核として動植物を保護しようとしていることである。静岡県磐田市の桶が谷沼、愛媛県中村市の「トンボ王国」などがこれであり、生物は優れた自然環境を示すシンボルとなっている。

第四は生物資源として種を保全していこうとする世界的な動きである。これまで、先進国においても多くの生物種が絶滅してきたが、近年は発展途上国における森林破壊によっても著しい勢いで生物種が減少してきている。このような事態に対し、我が国では平成7年10月生物多様性国家戦略が策定され、国土全体において種の保全に努めることとされた。

以上のように、近年の我が国における生態系の保全・創造に対する世論の高まりの背景は多様であり、生態系保全の必要性は地域等により異なるものと予想される。今後、それぞれの地域にふさわしい保全・創造のあり方が求められるであろう。

2. 建設省における「生態系の保全・創造」の位置づけ

建設白書に「生態系の保全・創造」に類する言葉が現れるのは「昭和54年国土建設の現況」からで

あり、「河川には・・・動植物の保護・・・等の機能が果たされており・・・」と述べられている。そして、昭和56年版には、「生態系保全のための護岸整備等を実施する。」と述べられており、このころから、生態系の保全が全国的施策として意識されたと考えられる。

重要施策の指標である五箇年計画に取り上げられるのは、平成4年9月に決定された第8次治水事業五箇年計画が最初である。ここでは事業目標として「水と緑豊かな生活環境の創造」が挙げられており「多自然型川づくり」を促進するとされている。また平成4年10月の第11次道路整備五箇年計画においては主要課題として「自然環境との調和」が挙げられ、自然環境をふまえた路線選定、エコロード整備の推進、のり面再緑化など生態系の保全・創造に係る事項が挙げられている。

平成5年11月に環境基本法が成立するが、これに先立つ平成4年12月、建設大臣の私的諮問機関である豊かな環境づくり委員会に、今後の国土建設においてどのように「環境」に取り組むべきかを議論するよう要請があり、同委員会は平成5年6月、「豊かな環境づくりのために」と題する提言を行った。提言は、「我が国の経済力と技術力にふさわしい質の高い環境を備えた国土を形成していくことが国土建設の今日的課題である」と述べ、そのための基本的方向として『環境の内部目的化』やエコネットワーク、エコロードのような分野についても目標や水準、整備手法などを検討し、その計画を明らかにすること」としている。また、重点課題として「ミティゲーションを施設整備の基本とするとともに、そのための基準の明確化を図ること」、「計画段階における評価・検討の充実を図ること」などを指摘している。

この提言を受け、建設省では平成6年1月、「環境政策大綱」を決定したが、その第1章「国土形成における環境政策の理念」では、健全で恵み豊かな環境の保全のために、「すぐれた自然環境をできるだけ保全し、環境への影響を軽減、解消する再自然化その他のミティゲーションを積極的に行う」とし、そのために河川内の動植物の生息状況調査、保全区域・利用区域のゾーニング、多自然型川作り、自然との調和を目指した道路のルート選定、魚道や野生生物の横断用施設など施設構造や工法上の対応、改変した自然地の復元等を行うとしている。さらに、後の章では、建設省が今後推進すべき具体的施策として、都市・河川・道路などにおける環境計画の策定、エコシティ・多自然型川作り・エコロードなどの事業を掲げている。このように、生態系の保全・創造は現在の建設行政の主要テーマの一つとなっている。

また、一昨年7月に策定された「緑の政策大綱」も、同様の施策を挙げており、特に河川事業における、自然の創造も含めた21世紀初頭までの目標数値について、多自然型川づくりを実施する河川延長の割合を約1割とすることを明記している。

最近では環境アセスメントの法制化が予想されることなどから、生物の保全に関して一般の関心はとみに高まっているが、ここ一年の行政の注目すべき動きとして、一昨年12月道路局道路環境課と土木研究所環境部が監修した「自然との共生をめざす道作り——エコロードハンドブック——」の出版がある。本書はこの分野の大学の先生方からなるエコロード検討委員会の指導を受けつつ作成されたもので、「生き物とそれを支える環境」がどのようなものかを説明し、自然環境保全の基本的考え方やエコロード整備に関する具体的手法を平易に説明している。

一方、河川分野においては、平成9年度を初年度とする第9次治水事業五箇年計画の中で、河川改修の基本を多自然型川作りとし、「自然を活かした川」を目指した整備に転換し、河川・溪流の改修に新たに着手する9,800kmのうち7,600kmでコンクリートのない川を目指すとしている。

3. 技術の開発の位置づけ

「緑の政策大綱」では「環境復元、施設整備のためのミティゲーション技術開発を推進する」としているが、建設省の各分野別の技術五箇年計画も生態系の保全・創造技術の開発を課題としている。

例えば平成5年6月の道路技術五箇年計画は生態系に配慮した道路技術をテーマとして挙げ、「道路建設における調査計画、設計施工、維持管理の各段階で自然環境保全を図るための適切な対策手法の開発を行う」としている。

また平成6年5月の河川技術開発五箇年計画は、「かけがえのない自然の保全と自然的環境の創造」のために河川・ダム湖・海岸・砂防における自然環境保全技術の開発を推進することとしている。なお、本計画が、「環境にやさしい施行技術の開発」にも一節をさいていることは興味深い。

このほか、平成6年3月の下水道技術五箇年計画においては主要技術テーマの最初に「多様な生物のための水環境を創造する技術」を挙げており、同じく平成6年3月の公園・緑化技術五箇年計画においては「ビオトープネットワーク化計画技術」、「ビオトープ空間の形成技術」を挙げています。

平成7年9月に出されたこれらのまとめとも言える建設省技術五箇年計画においては主要な技術開発テーマの一つとして自然共生技術を挙げ、「環境影響予測技術、および生態系の保全と生息空間の創造技術、ミティゲーション技術の開発に取り組む。」としている。

これら五箇年計画に位置づけられ、生態系の保全・創造技術は土木研究所環境部を中心として近年急速に拡大をしているが、とりわけ、平成8年度からは「生態系の保全・生息空間の創出技術の開発」という総合技術開発プロジェクト研究が開始されている。

4. 研究の現状

「生態系の保全・創造」というと、「どんな施設を整備したか」という設計内容のみが注目されることが多い。しかし、実際は①事前調査②計画③設計④施工⑤事後調査（モニタリング）⑥維持管理からなっており、したがって生態系の保全・創造技術には、調査技術や計画技術、管理技術も含まれる。

これらの手順の関係を、図-1に示す。

建築物や工作物の整備と異なるところは、事前調査と事後調査の重要性が特に大きいということである。

事前調査には次のような調査内容が含まれる。

- ① 事業の対象地の付近の、生物の種、個体数、密度、重要性
- ② 保全すべき種、もしくは新たにそこに生息させようとする種（これらを「目標種」という）の生態

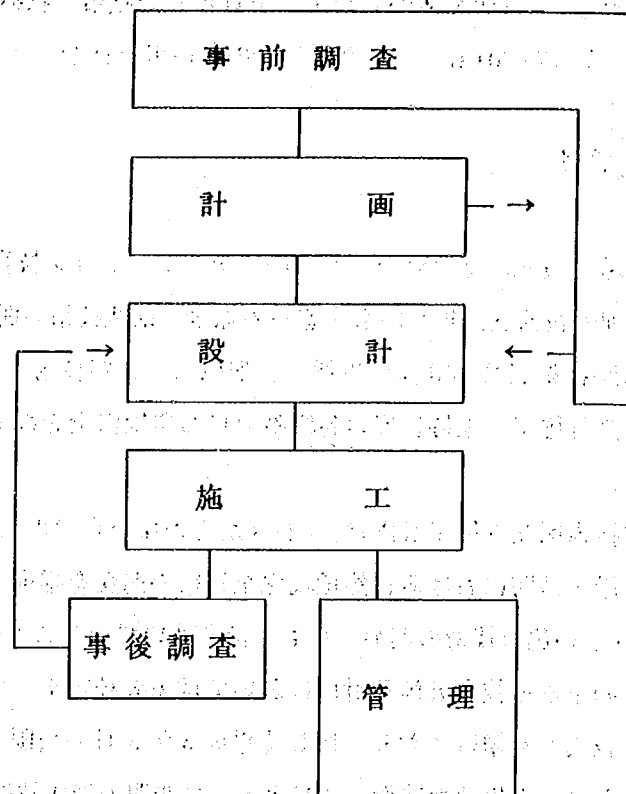


図-1 生態系の保全・創出のフロー

③ 上記の種に与えられようとしている影響の種類、規模

④ 保全・創造のために過去に採られた方策の事例、およびその成否

①～③の調査は「計画」に先だち行われるが、④は①～③の結果、あるいは「計画」の結果を受けて行われる場合も多いと予想される。これらの調査は、現地などで新たに調査を行う場合もあれば、既存の調査資料を収集する場合もある。

事後調査には次のような内容が含まれる。

① 対象地にいつ、どのような生物がどれほど生息するようになったか。目標は達成できたのか。

② 目標が達成出来なかったとすれば、その原因は何か。

事後調査は、竣工後まもなく行うこともあれば、それ以後長期にわたり行われる場合もある。事後調査の結果、十分な成果が上がっていない場合は、その原因を明らかにし、再び「設計」段階に戻る。

事前調査と事後調査を行うことにより、初めて生態系の保全、創造の効果は検証される。このような調査を通じて、成功・失敗の要因を考察し、その結果を他の現場に活かしていくことが必要なのであるが、現在のところ、さまざまな保全対象生物や現場条件に応ずるだけの十分な事例は集まっていない。このため、個々の事例について、一部の生物を除いては、新たな事前調査に基づき個別に計画・設計などの対策を検討し試行錯誤している。

では、このような生態系の保全・創出に役立つ土木研究所の研究成果の一部を紹介する。

事例1 浮島による生態系の回復・維持

土木研究所では霞ヶ浦工事事務所と共同して、霞ヶ浦の土浦港に浮島を設置している。「浮島」という言葉は本来、湿地や沼の水面に浮き、漂っている島のようなもの（水草・水苔・泥炭等の塊で、上には湿性植物が生える）を示す。これに対して本研究で扱う浮島とは、人工の浮体に植栽を行ったものである。

土浦港の浮島は4.5m×4.5mの鋼製フレームを、縦2・横20フレーム連結したものである。このフレームはスポンジが固定されており、植物が生育しやすいように設計されている（図-2）。

施工は土木研究所の指導の下で、建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所によって1993年に行われた。写真1に示すように当初はいくつかの区域に分けて、ヨシ、ガマ、マコモ、カンガレイ等の水生植物が植栽された。設置後植生の遷移が起こり、いったんはアメリカセンダングサやセイタカアワダチソウ等の陸生植物が目立つようになった。しかし、現在では陸生植物も残るものの、ヨシが優先しており、景観的にも優れたものになっている（写真-2）。

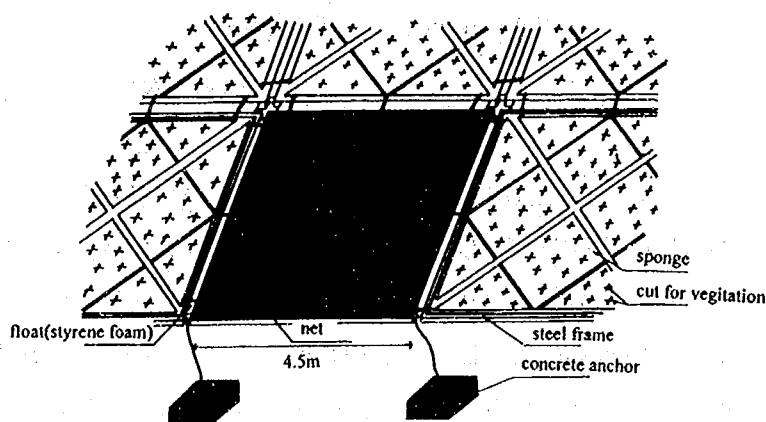


図-2 浮島構造図

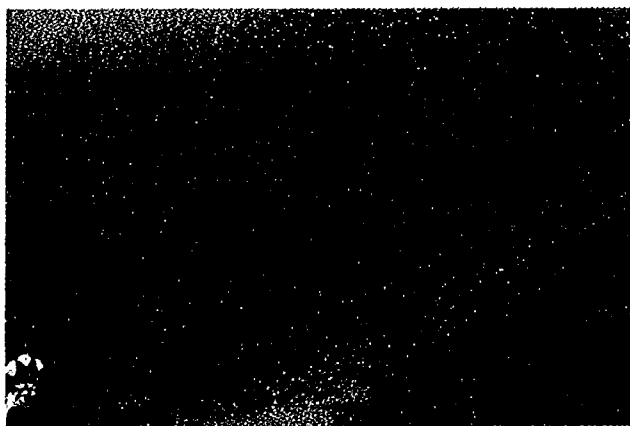


写真-1 施工直後の浮島

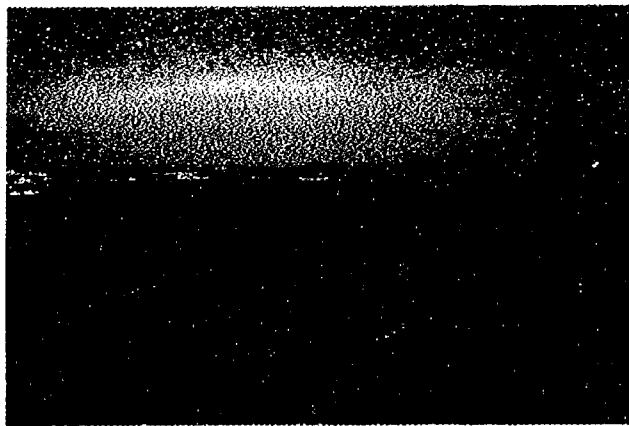


写真-2 最近の浮島

また、設置後浮島周辺で釣り人の姿が目立つようになった。浮島の魚礁としての効果が想定されるため、1994年10月に浮島周辺において生物調査を行った。その結果、植物プランクトン、動物プランクトンの現存量は浮島の有無であまり差はでなかった。しかし、浮島に生えている植物の根に付着する藻類は無視できない量であり、魚類・甲殻類に関しては浮島の有無で大きな現存量の差が生じていることがわかった（図-3）。

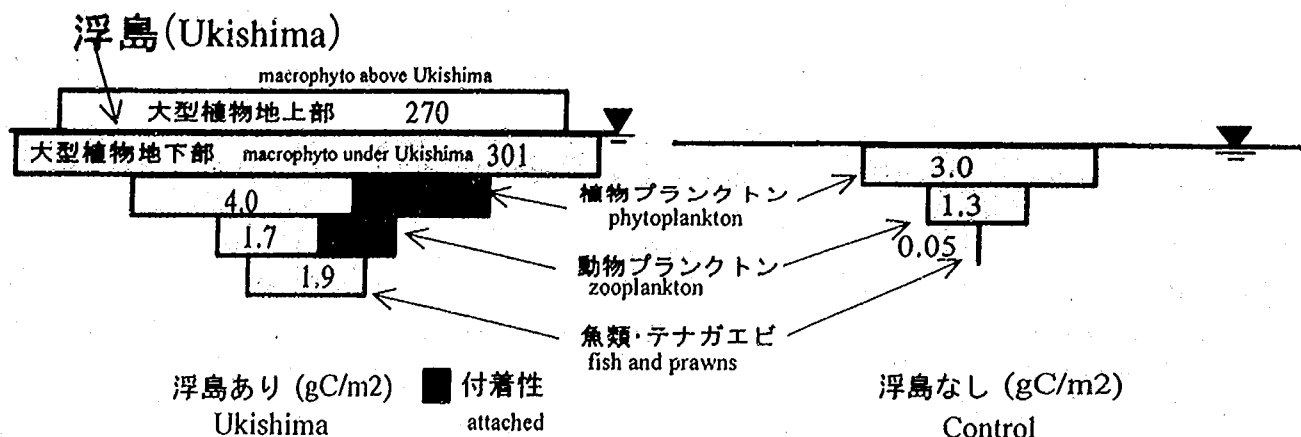


図-3 浮島の有無による残量比較

また浮島上は鳥類が利用しており、1996年の観察では、オオヨシキリとバンの営巣が確認された。

浮島には植物が繁茂しているため、窒素、リンの吸い上げによる水質の浄化にも役立っていると予想される。しかし、この浮島は周辺の水の移動が自由になっているためその効果の測定は困難である。そこで、1995年に霞ヶ浦の大岩田地区に5 m平方の隔離水域を作成し浮島のある場合とない場合での水質を測定した。その結果、浮島のある場合では透視度が4～5倍であった。また植物プランクトンの細胞数では、浮島がある場合はない場合の1/10程度であった。

このことから、浮島には①鳥類の棲み家や魚類の生息空間、②水質浄化、③浮島上部に生えている植物による修景、の効果が明らかとなった。

また浮島には、消波効果による湖岸保護等の効果も考えられる。

事例2 強度と植物生育環境を備えたポーラスコンクリート護岸

最近、河川改修において、景観や生態系保全のために出来る限りコンクリートを用いないこととされたが、水衝部のような水の大きな圧力がかかる部分では、コンクリートにより護岸や堤防の強度を高めることが不可避である場合が多い。しかし、このような部分においても出来るだけ景観や生態系が保全されるよう、コンクリート面に植物を生育させる試みが、各地で行われている。

ポーラスコンクリートには現場施工のものと、工場でブロックに加工し現場にブロックや平板の形で施工するものがある。

土木研究所では平均強度 18 N/mm^2 、孔隙率20%のポーラスコンクリート平板上に植物を生育させる実験を行った。図-4、写真-3は温室内に設けたポーラスコンクリートブロックの傾斜面上で植物を生育させたものであるが、土壌の厚さがわずか1 cmでも十分に灌水を行えば植生は旺盛に生育することがわかった。

写真-4は屋外において、生育試験を行ったものである。ポーラスコンクリート平板には深さ5 cmの溝があり、その溝に土壌をつめた土を、さらに1 cmの土壌で被覆した。播種したのは6月であり、気温が高く地表が乾燥したため、生育初期に灌水を行った。生育初期には、ブロックを敷いていない対象区の生育がもっとも大きかったが、秋になるとコンクリートを敷設した実験区の生育は対象区に追いついた。根はコンクリート平板を貫通して地山に達し水分を吸収していたが、そうなるまでの初期成長期に植物に乾燥を乗り越らせるにはどうしたらよいかが今後の大きな研究課題である。

また、行政の現場からは、急勾配の護岸の緑化が望まれており、今後取り組んでいきたい。

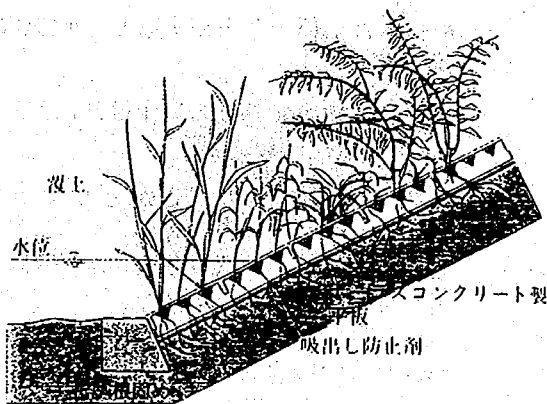


図-4 ポーラスコンクリートブロック断面図



写真-3 ポーラスコンクリート上の植栽

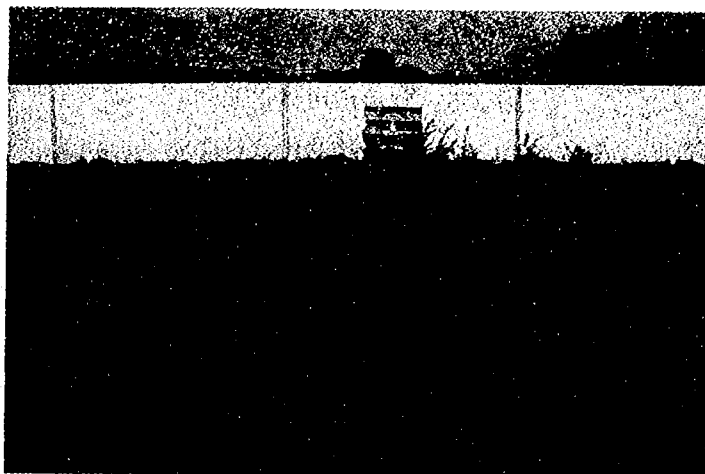


写真-4 屋外の生育試験

事例3 河川の自然環境の変化に関する研究

河川の自然環境の特徴の一つは、洪水等による地形や植生等の攪乱とその後の再生である。河川の自然環境は、本来このような攪乱と再生によって形成されているものであり、よって保全するためにはこの変動の特性を把握しておく必要がある。

また、河川改修等と生物の生息空間の変動は人為的なインパクトとそれに対するレスポンスと考えられる。河川改修（人為的なインパクト）が与えられた場合には、その河川が持つ変動の特性にしたがって自然環境の再生（レスポンス）が起きる。

写真-5は北九州市貫川で行われた河川改修の例である。河川改修で川幅拡幅を行った後、数年ではほぼ改修前の低水路幅に戻った。また植生も数年で回復し、自然環境が復元した。

また、近年においては河道内の樹林化が全国の河川で進行中でありその現状とメカニズムを研究中である（図-5）。図-6には雫石川の例を示した。雫石川ではこの50年で樹林地が約10%から約30%に大きく増加している。このような樹林化の現象のシミュレーションモデル化を進めている。

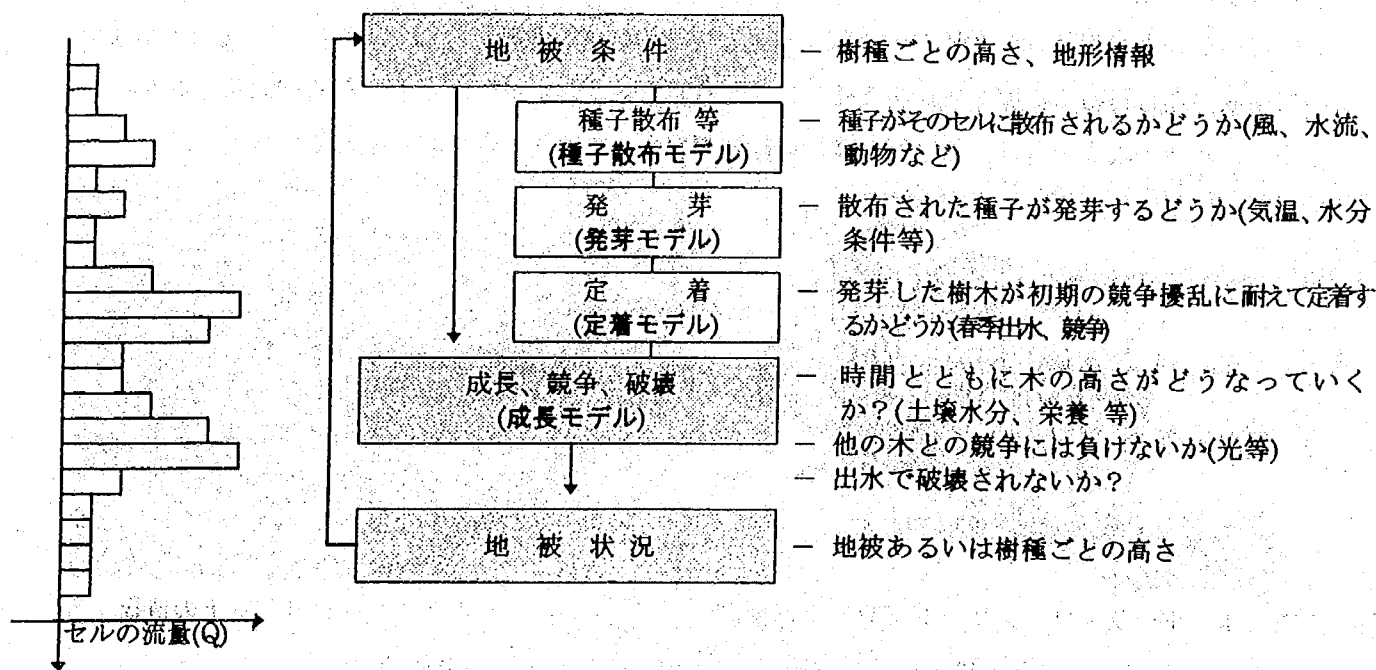


図-5 河道内樹林化モデル

50年前は砂礫地が広がる扇状地河川があったのですが、砂利採取やダム竣工といった人為的インパクトにより、1988年では砂礫地は1/3以下に減り樹林地は3倍に増加しました。樹林化は日本全国の河川でその進行は著しくなっています。

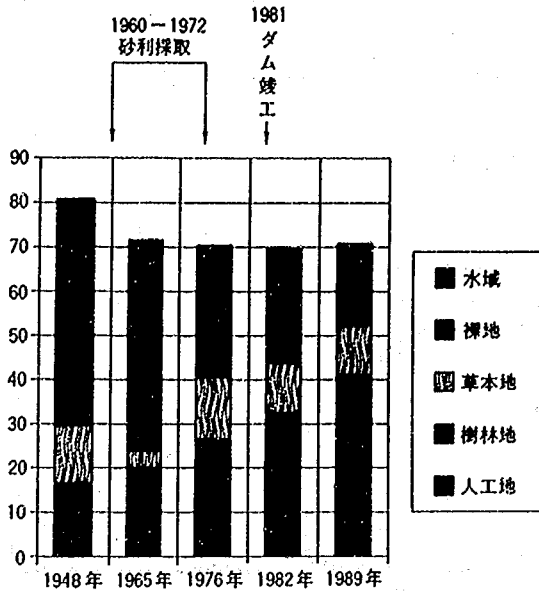
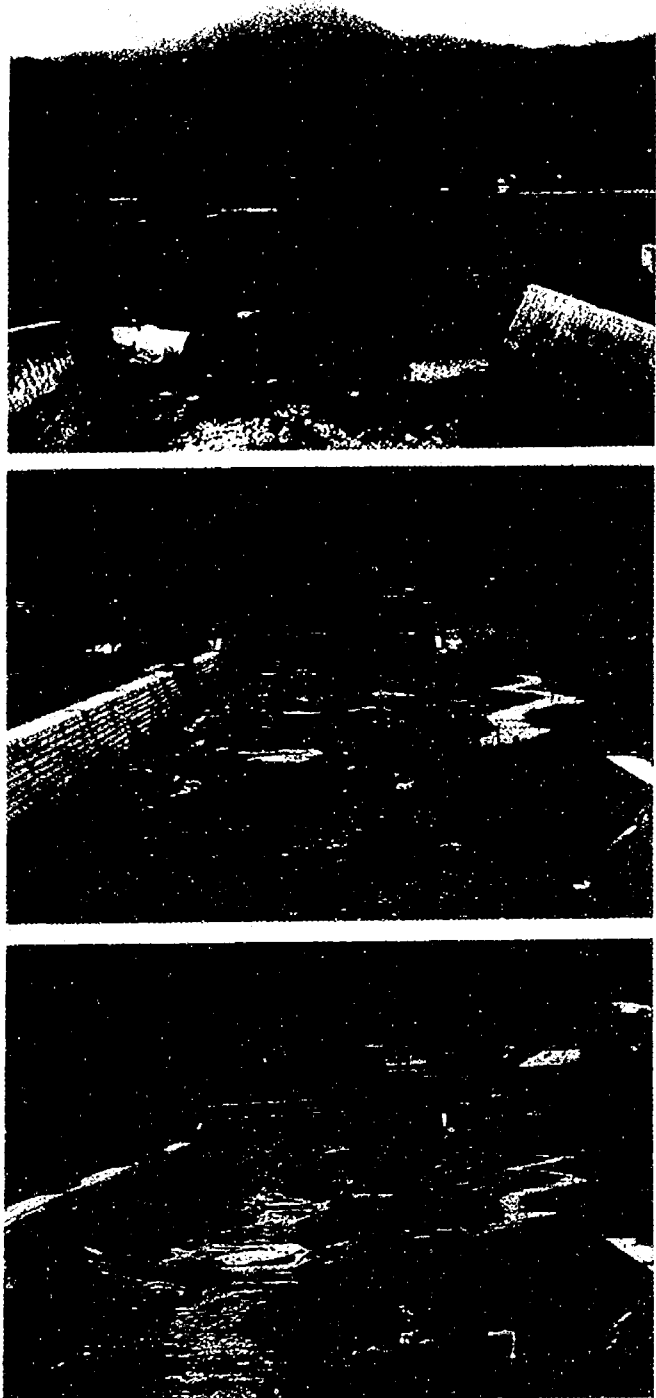


図-6 雫石川における地被の変遷

事例4 開水路における魚類の遊泳速度の測定

近年川の自然環境が着目され多くの環境の保護や創出の試みがなされているが、現在のところ生物学的な情報と水環境的な情報のリンクが十分でないのが現状である。これは魚道の設計等に用いられる魚の遊泳速度にもあてはまる。遊泳速度の測定は魚類学者により各国で行われているが、その実験の多くがパイプの中の流速と魚類の遊泳能力の関係について調べたものである。そのため、実際の河川のように流速が時間的・空間的にばらついている場合には、この結果をそのまま用いることが適切ではないと思われる。魚の遊泳速度を用いて魚が遊泳可能かどうかを判断するためには実際の河川に近い、流速が時間的・空間的にばらついている場合での遊泳速度の測定が必要である。

そこで、河床を固定していない開水路を用いて遊泳速度の測定を行った。対象魚はウグイ、コイ、フナとし、測定は河川環境実験水路(図-7)を用いて行った。河床条件は①、河床材料に礫(粒径30mm)を1/100勾配に一樣な厚さにしたケース、②、①の河床に平均粒径100mmの玉石を設置したケース、の2ケースである。実験水路は、水路全長20m、実験区間延長15m、水路幅0.75m、河床勾配1/100である。水路内の流れは等流になるように設定した。



上/施工前の川。
中/施工後10カ月経過した平成6年6月撮影。この年は渇水だった。
下/平成7年7月撮影。草刈りをおこなっている。
(写真=3点とも北九州市)

写真-5 北九州市貫川の景観

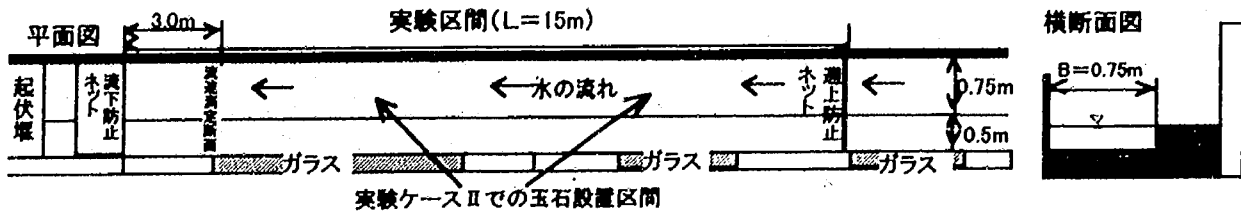


図-7 実験水路平面図 (実験使用区間)

この水路は側面の一部がガラスになっており、側面から魚の遊泳状況をビデオカメラで撮影し魚の行動を解析した。

与える流速は、断面平均流速を1m/sを初期値として5分ごとに0.1m/s刻みで上昇させ、1.8m/sまで実験を行った。この研究では、魚が実験区間に留まることができずに下流端の流下防止ネットに打ち上げられた時点の断面平均流速をその魚の「遊泳限界速度」とした。

本研究によって以下の結果が得られた。

①断面平均流速が速くなるに従って、魚は河床から数cmの深さの壁際へ移動する。また、玉石を配置した場合にはその背後の空間に移動する。魚の移動した空間は図-8に示すように流速分布の遅くなった空間と一致している。

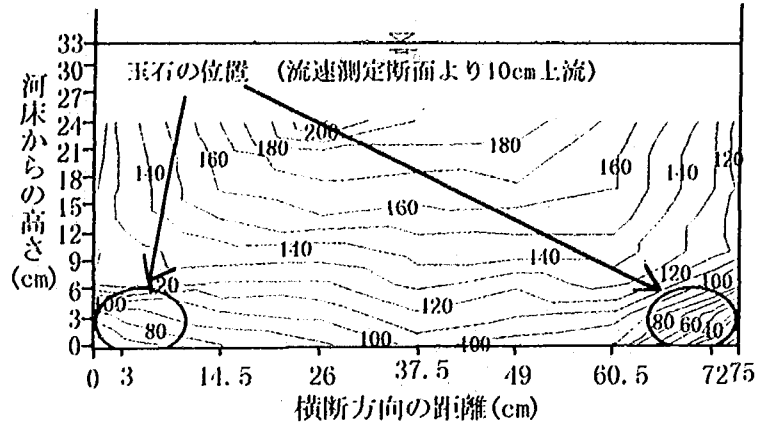


図-8 ケース②流速分布 (断面平均流速1.5m/s)

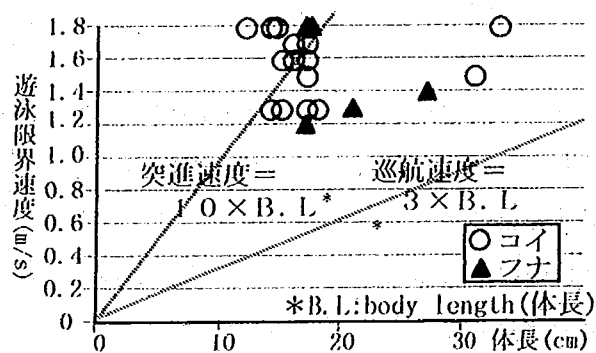


図-9 ケース③遊泳限界速度

つまり、流速にばらつきがある場合には、魚は水路内の流速の最も遅い箇所に移動するために、魚が遊泳可能かどうかは断面平均流速だけでは評価し得ない事がわかった。

②断面代表流速と魚の巡航速度 (20分～60分の間維持できる最大速度) を比較すると、巡航速度の数倍の断面代表流速速度でも魚は遊泳可能である。実験に用いた魚はケース①で55%、ケース②で75%が流速1.8m/sでも遊泳可能であった。遊泳できずに流下防止ネットに打ち上げられた魚の遊泳限界速度を図-9に示す。従来の研究では巡航速度は体長の3倍/s程度とされている。しかし、本研究結果からは体長と遊泳限界速度の比例関係は見られなかった。これは小さい魚ほど流速の遅い空間を有効に利用できる為だと推測される。

③河床内に玉石のような突起物がある場合、魚は高流量に耐える事が可能となる。

この研究結果から、魚の遊泳に配慮した構造物等 (特に魚道) の設計の際の有効な知見が得られた。今後は、魚の利用できる空間の大きさや連続性、配置等について研究を行うことによってより経済的かつ高機能な構造物の設計が可能となる。

事例 5 動物類の移動経路に関する研究

道路の計画路線が動物生息地を通過する際には、動物が通常利用している移動路を遮ることにより、生活圏を分断する可能性がある。このような地域では供用後に動物と車との衝突事故が生じやすい。これを防ぐため、オーバブリッジやボックスカルバート、コルゲートパイプ等により道路を横断することのできる動物移動路を確保する対策が必要となる。この際、これらの横断施設に動物を誘導するための植栽や、動物が車道に侵入するのを防ぐための侵入防止柵も設置する必要がある。

土木研究所では、これらの横断施設の構造や周辺環境と動物の利用状況について現地調査を行った。調査対象とした野生動物はタヌキ、ノウサギ、キツネ、イタチである。調査結果の概要を以下に示した。

①横断施設の設置場所の環境

沢地形で斜面の樹林環境と草地環境（農耕地等）の接点部に横断施設を設置したものの利用が多かった。

②樹林と構造物の距離

ボックスカルバート、オーバブリッジでは0～250m、コルゲートパイプでは0～220mの範囲において、樹林に近いほど横断施設の利用が多くなる傾向が認められた。

③人為的影響と利用頻度

構造物の人間の利用頻度が低いものや人家からの距離が離れているなど、人為的影響の低い構造物ほど、調査対象種の利用頻度は高くなる傾向があった。

④道路構造

切土、盛土及び切り盛り境のそれぞれに設置された道路構造物と調査対象種の利用状況に関して調査を行った。一般的には切り盛り境界部において動物の衝突件数が多くなるとされる。しかし、本調査結果からは、設置場所と調査対象種の利用に関し、特に傾向は認められなかった。

⑤立入防止柵の形状と利用頻度

道路構造物のうち、オーバブリッジでは、周辺の立ち入り防止柵の下部の隙間等細部に配慮した対策を実施すると、利用頻度が高くなる傾向が認められた。

⑥構造物の幅

ボックスカルバートでは、幅員2～5mの範囲において、幅が狭くなるほどタヌキとキツネの利用が多くなる傾向が見られた。一方、オーバブリッジではタヌキが2.6～7.2mで幅が狭くなるほど利用が多くなる傾向が見られた。

⑦構造物の高さ

ボックスカルバートの高さは、調査対象種でおおむね2～3m程度の高さで利用が高くなる傾向が認められた。

⑧延長

ボックスカルバートでは、延長25～70mの範囲で利用することが確認された。タヌキ、キツネ、イタチは比較的短い横断施設しか利用しないが、ノウサギは長い施設でも利用する傾向があった。パイプコルゲートの場合、タヌキ及びキツネが50～60m程度の施設を利用する傾向が認められた。

一方、オーバブリッジでは40m程度の長さの構造物を利用していた。

⑨路面の状態

横断施設内部の路面の状態では、全ての調査対象種において未舗装タイプの方が利用頻度は高くなる傾向が認められた。

今後の課題としては、まず同様の調査検討を他地域においても実施し、同種の地域的な行動の違いを検証したデータの蓄積が望まれる。また対象種も通行車両の安全性確保の観点から衝突時に人的被害が大きい大型ほ乳類（シカ、カモシカ、イノシシ等）も視野に入れた横断施設利用状況の整理が望まれる。

表-1 動物が利用しやすい横断施設の条件

1. カルバートボックス（コルゲートパイプ含む）

	設置される環境	見通し	幅	高さ	長さ	参考 (オープン係数)	路面の状態	水路の深さ
タヌキ	沢部の樹林が接する環境下の人為圧の低いところ	—	狭い	低い	短い(コルゲートパイプは長い施設)	中程度以上の開放性(0.35以上)を持つタイプ	土または砂利	—
ノウサギ	沢部の樹林と草地在り接するまたは樹林と水田が広がる環境下で、人為圧の低いところ	見通しの良い施設	—	—	長い	—	土または砂利	浅い
イタチ	樹林から開けた環境までの広い環境域のところ	見通しの良い施設	—	—	短い	—	—	水路なし
キツネ	斜面部樹林と耕作地などが接するまたは耕作地が広がる比較的人為圧の低いところ	見通しの良い施設	狭い	—	短い(コルゲートパイプは長い施設)	—	土または砂利	—
イヌ	樹林から耕作地までの広い環境域下で人為圧の高いところ	見通しの良い施設	広い	高い	短い	中程度以上の開放性(0.35以上)を持つタイプ	舗装	浅い
ネコ	樹林が少なく耕作地の多い開けた環境下で人為圧の高いところ	見通しの良い施設	広い	高い	短い	高い開放性(0.7以上)の施設では少ない	舗装	浅い

2. オーバブリッジ（水路型を含む）

	設置される環境	見通し	幅	長さ	欄干の形状
タヌキ	尾根または台地上の樹林と接する環境下の人為圧の低いところ	—	狭い	短い	縦目型
ノウサギ	斜面部樹林または尾根、台地上の平坦地で樹林が連続する人為圧が比較的低いところ	橋端を樹林が覆うタイプ	—	短い	—
イタチ	樹林から耕作地までの広い環境域	—	—	—	—
キツネ	台地上に畑など耕作地が広がる場所	橋端を樹林が覆うタイプ	—	—	—
イヌ	斜面部樹林や台地上の耕作地など開放的な要素の強いところ	—	広い	長い	—
ネコ	尾根部の樹林環境から耕作地の多い開けた環境のところ	—	広い	長い	—

注1：—は明瞭な傾向が現われなかった項目

注2：オープン係数：数量化理論1類で用いたカルバートボックスの大きさに関わる指数

例えば係数の値0.35では、幅、高さ、長さがそれぞれ4, 4, 45.7m

係数の値0.7は幅、高さ、長さがそれぞれ4, 4, 22.9mなどである時の値である。

注3：  は多変量解析で寄与度が高いと示された項目

事例6 小動物に配慮した側溝の検討

道路の両端に設置される側溝には、カメやトカゲなどの地上徘徊性の小動物が落下し、脱出できないまま死に至ることがある。このため、落下した場合でも自力で脱出できる斜路等の構造を有した側溝が考案されているほか、蓋をかけるなどの対策が求められている。

土木研究所では、表-2に示すは虫類（カメ）、両生類（カエル）、ほ乳類（ネズミ）等の動物を対象に側溝の斜路（図-10）の粗さ（表-3）、角度と小動物の登坂能力の関係について調査を行った。調査結果によるとネズミは30センチ程度の壁面は跳躍により脱出した。それより深い場合は路面に適度な凹凸があればおおむね50°程度の角度なら登坂可能であるとの結果を得た。反対に平滑な面ではカエルが20°、イモリやカメは30°程度が限界となる傾向が認められた（表-4）。

今後の課題として、季節、動物種により行動は大きく変化することが想定される。そこで動物種を増やすとともに、他の季節における検証を加え、対象種に応じた細かい配慮を明らかにする必要がある。また、側溝の設置間隔、転落個体を確実に斜路まで誘導するための構造等の検討も必要である。

表-2 実験に使用した小型動物

対象動物			個体数
哺乳類	ネズミ類	ヒメネズミ	4
		アカネズミ	2
ハ虫類	カメ類	イシガメ	3
		ハイブリッド*	2
		クサガメ	1
両生類	イモリ		5
	カエル類	アマガエル	7
		ニホンアカガエル	8
		トノサマガエル	8
		ツチガエル	6

*ハイブリッド：イシガメとクサガメの交配種

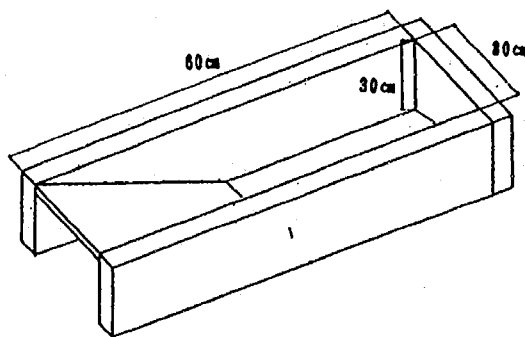


図-10 斜路模型の見取り図

表-3 斜路の粗さ

斜路の種類	凹凸の深さ(mm)	きめ深さ(mm)
平滑な斜路	ほとんどない	0.31
小凹凸の斜路	±0.5	1.75
大凹凸の斜路	±1.5	2.47

表-4 動物種別登坂可能角度

	凹凸大	凹凸小	平滑
ネズミ類	90°	90°	90°
カメ類	70°	50°	30°
イモリ	50°	50°	30°
アマガエル	90°	80°	20°
ニホンアカガエル	70°	50°	20°
トノサマガエル	50°	30°	20°
ツチガエル	60°	40°	20°

事例7 水性植物保全のためのため池の生態構造調査

国営讃岐まんのう公園（香川県）とその周辺には、満濃池をはじめとする大小さまざまな規模の溜め池が存在し、これまで農業用水の確保に必要な「貝掘り」などの維持管理作業が行われ、その結果多様な生態環境が維持されてきた。しかし、近年その維持管理作業が停止し、生態環境の均質化が進んでいる。このような溜め池の一つ「逆様池」では、他の溜め池で既に消滅・衰退した水生植物、ヤナギスプタ、マルバオモダカ、ヒメミクリ、などの絶滅危急種が存在している。本研究はこれらの植物の保全対策を検討するため、その生育状況と環境条件との関係を求めることを目的としたものである。

水生植物に影響を与える要素としては、維持管理作業停止に伴う底泥の堆積と水深の変化があげられた。そこで、その影響を検証するため、水深及び底泥堆積状況に関する調査と、初夏、夏、秋の3回、水生植物の植生調査を行った。その結果の一部を図-11～12に示す。

縦断面図（図-11）に示すように、底泥は溜め池の上流部に厚く、下流部に薄く堆積しており、上流部から流入していることがわかる。そして、底泥が厚く堆積した水深の浅い部分にはカンガレイ、ガマなどの高茎の植物が分布し、貴重植物であるヒメミクリ、ジュンサイは水深の大きい範囲で被度が高い。また、同じく貴重種であるヤナギスプタ、オモダカは底泥の層が薄い区域に集中して分布していた（図-12）。この結果から、底泥の堆積が植物の分布に影響を与えている可能性が示唆された。周辺はアカマツと広葉樹の混交林であり、マツノザイセンチュウの被害によるアカマツの枯死と、それに伴う土壌の流出が著しい。このため、貴重種の保全には周辺の林の管理など底泥の流入防止が必要であろうと結論された。

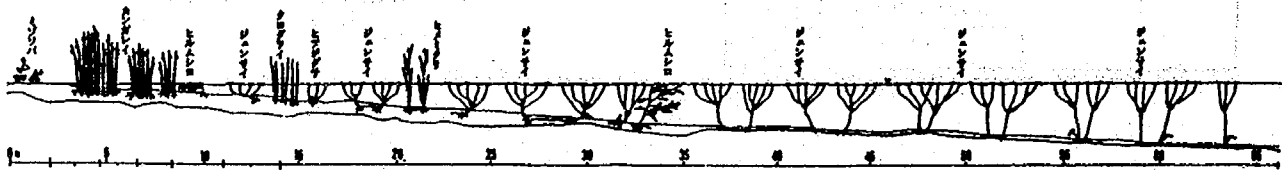


図-11 池の縦断面図



図-12 池の横断面図

事例8 植生・地形・土壌の面的ユニットの抽出と、その昆虫層との対応

国営常陸海浜公園と那珂湊港湾開発区域（茨城県）にまたがる沢田遊水池は、谷戸の谷底面に湿地が広がっており、オゼイトトンボ、ミクリなどの希少種を含む多様な動植物が存在する。沢田遊水池は、一部が港湾の造成区域にかかっているため、その隣接地に新しい代替の谷戸を造成することが検討されている。新たな谷戸には現在ある谷戸の生態系をそっくり復元しなければならない。

植生は動物の生息環境の重要な要素であり、生態系の保全には植生の復元が必要と予想される。しかし、植物を移植し保存しようとしても植物の生育条件が整わなければ永続するとは限らない。

植生の成立に大きな影響を与える要素としては、土壌と水分条件が考えられる。また、水分条件には地形と土壌の影響が大きい。したがって、植生は一定の地形・土壌の条件下に生息していることが予想される。このことを検証するため、これらの要素についての詳細な調査を実施した。

その結果、これらの微細な面的ユニットについても、対応関係があることがわかった。その一部を図-14、表-5に示す。例えば大構造で「砂丘平坦面」である区域には、中構造で「平坦面」「微凸地」「微凹地」「緩斜面」が対応する。中構造の「平坦面」では土壌は「Ims（砂丘未熟土）」であり、ウメガサソウアカマツ群落が対応している。

このような地形・土壌・植生の均質な空間の単位をエコトープといい、この現場では69のエコトープが抽出された。

続いて、これらのエコトープと動物相（チョウ類とトンボ類）が対応するか否かを検証した。その結果チョウについては対応が見られなかったが、トンボについては、表-6のような対応が見られた。例えば、アジアイトトンボは谷底面の開放水域やチゴザサ群落に多く出現した。

このことから、トンボ相を復元するには、植生・土壌・地形などの要素によるエコトープを復元する必要がある可能性が考えられた。

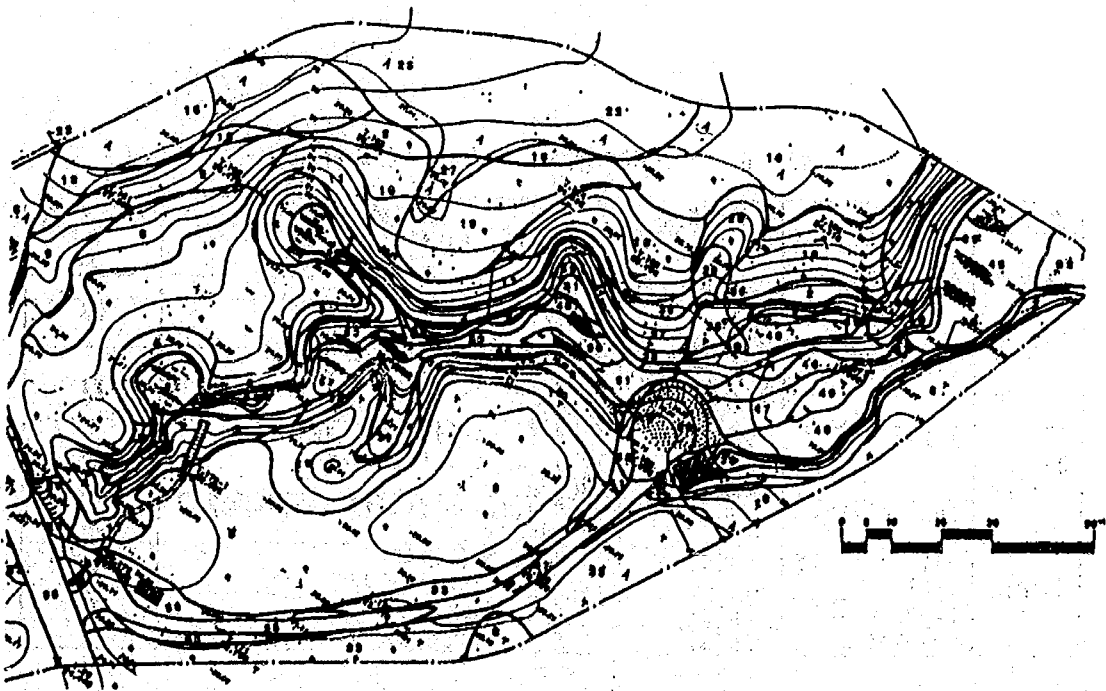


図-13 エコトープ図

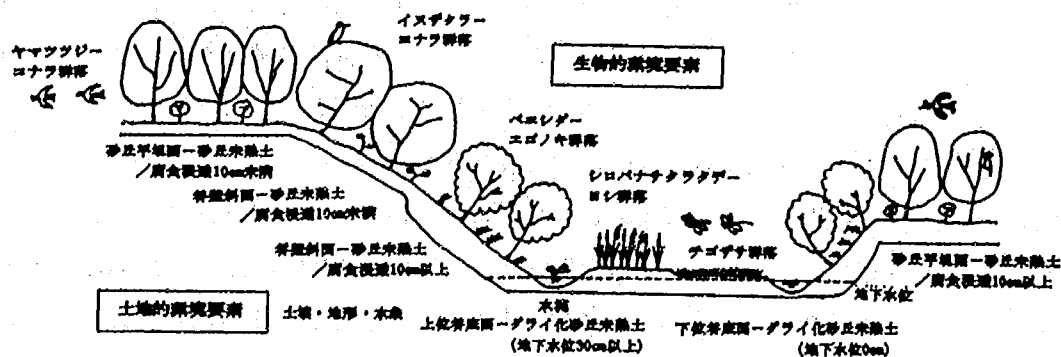


図-14 谷戸の土地的・生態的構造の模式図

表-5 地形・土壌・植生の対応

大構造	中構造	小構造 (例)
ゲオトープ群	ゲオトープ	エコトープ
砂丘平坦面	平坦面-Ims 微凸地-Ims 微凹地-Ims 緩斜面-Ims/Ims	ウメガサソウ-アカマツ群落 ウメガサソウ-アカマツ群落 ウメガサソウ-アカマツ群落 ヤマトツグイ-コナラ群落
谷頭	凹地-Bims 平底-Gims	ベニシダ-エゴノキ群落 トボシガラ-セリ群落
谷壁面	上部-Bims 下部-Bims	イヌザクラ-コナラ群落 イヌザクラ-コナラ群落
谷底面	上位-Gims, 0-30 下位-Gims, 30< 流水	シロバナサクラタデ-ヨシ群落/イ群落 ハンノキ群落/チゴザサ群落 ツリフネソウ群落

(注) Ims 砂丘未熟土、Bims 褐色森林土、Gims グライ化褐色森林土

表-6 トンボの種とエコトープとの対応

タイプ	種名	主な地形	主な植生	エコトープ数
1) 密集	アサギイトトンボ	谷底面	開放水域、チゴザサ	6
	オオイトトンボ	谷底面	開放水域	4
	ヒカシカワトンボ	流路	ツリフネソウ	3
2) 密集 + 広域 分布	ノシメトンボ	谷底面 砂丘平坦面 砂丘緩斜面 道路	チゴザサ、トボシガラ-セリ ウメガサソウ-アカマツ(トクウキ下位) オオメシハムシ、メシハ=フタクサ 人為裸地	23
	オニヤンマ	谷底面	チゴザサ、シロバナサクラタデ=ヨシ	12
		流路	アサギイトトンボ、開放水域 ツリフネソウ	
3) 広域 行動	クロスギンヤンマ	谷底面 流路	チゴザサ、イ、シロバナサクラタデ=ヨシ、開放水域 ツリフネソウ	
	ショウジョウトンボ、ショウ ジョウトンボ	谷底面 道路	チゴザサ、開放水域 アキメシハ、メシハ=フタクサ	18 13
	ショウジョウトンボ	谷底面	チゴザサ、開放水域	6
4) 中間	マユタテアヒ	谷底面	チゴザサ、開放水域、シロバナサクラタデ=ヨシ	7

事例9 道路空間を活用したビオトープ整備手法の検討

これまでは道路建設によって自然環境に与える負荷の面が強調されがちであった。しかし、急激な都市化に伴って生きものの生息空間（ビオトープ）が失われているなかで、インターチェンジやのり面等を活用したビオトープの創出が有効であると言われている。さらに、これらの創出されたビオトープと現存する沿道のビオトープを道路空間を使ってネットワーク化する取り組みがヨーロッパ等で行われており、これらの取り組みが地域の生態系に大変有意義であるとの指摘がある。

土木研究所でも、地域の生態系に貢献するようにビオトープとして道路空間を積極的に活用するための計画手法及び整備手法について研究している。

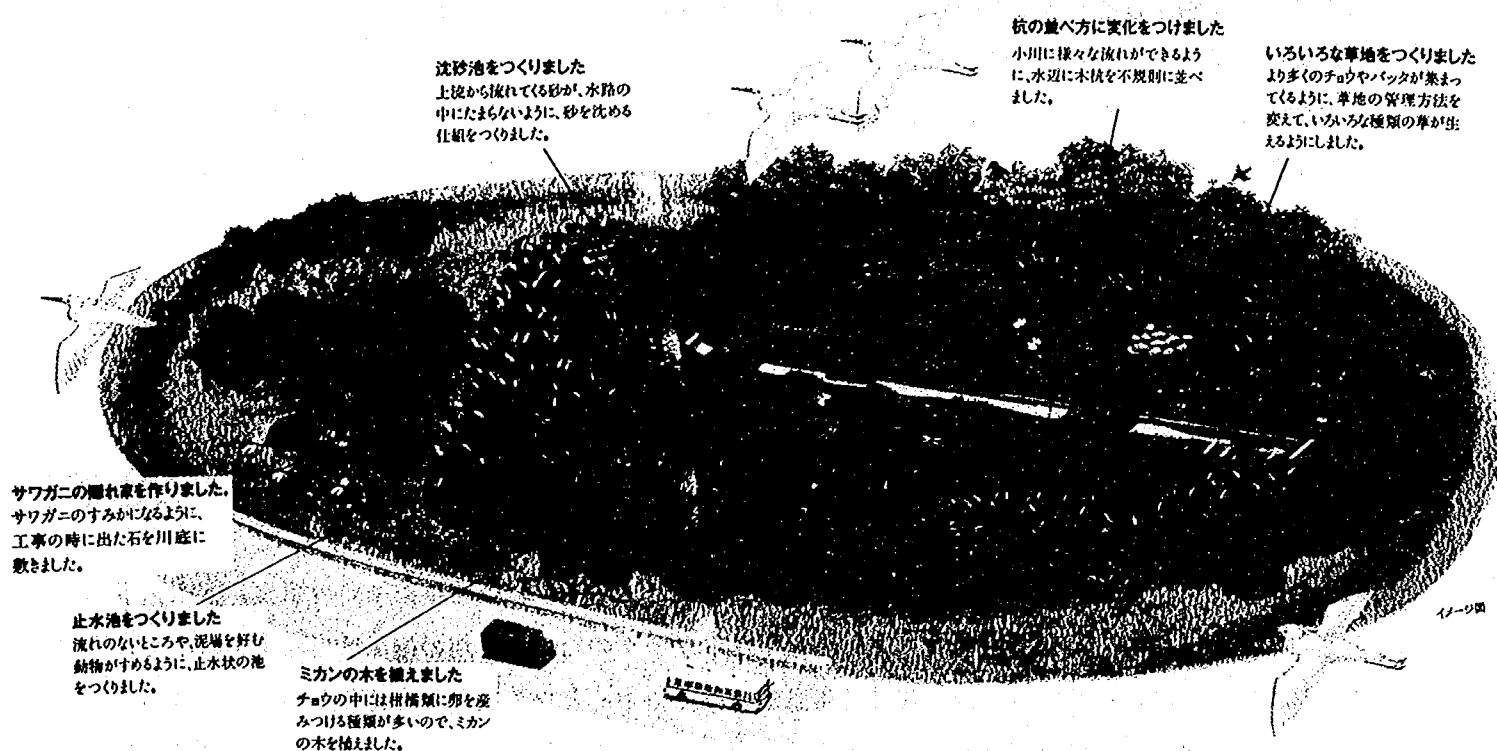


図-15 東名高速道路大井松田ICにおけるビオトープ整備

以上のような研究のほかに、生物の生息現況や生態、保全事例に関する資料を収集整理している。また、生態系総プロの中でデータベース化が検討されている。今後はこれらの充実を図っていきたい。

4. 今後の方向

以上のように、土木研究所では、主にこれまでは個別の生態系の保全・創出に関する技術研究が行われてきた。しかし、現在新しい任務が要求されつつある。それらについて述べる。

4.1 ネットワーク化の試み

動物には、生存のために休息、採餌、繁殖などに適する場所を移動することが必要なものがある。このような生物が移動できるためには、それに適した環境を持った空間的ネットワークが必要である。これを生態的ネットワークと呼ぶ。

生態的ネットワークを通じて、動物は他の地域に移動する。このことにより、一つの生息地の環境条件が生存に適しなくなっても、他の地域において種の存続がはかれる。このことは植物にもあてはまる。

先年、土木研究所の研究により、オランダにおいて全国土レベルでの生態的ネットワークが作られている実態が明らかにされた（図-16）。最近では、我が国でも河川、道路、公園その他の公共事業の重点施策の中に、さまざまな事業が連携して行う生態的ネットワークの形成があげられている。

生態的ネットワークは、計画的に作られる必要がある。しかしながら、その計画手法は定まったものがない。このため、土木研究所では実際の都市をモデルにして、生態的ネットワーク計画を検討することにより、計画手法を確立しようとする試みがなされている。

なお、ネットワークのうち、線的なオープンスペース（ノード）は道路事業や河川事業、下水道事業等の中で行えるが、代替的生息地や生態的なネットワークのための用地の確保は当該事業の中で行うことが難しい場合が多い。一方、代替的生息地の確保や中心となる広がりを持ったオープンスペース（コアエリア）は都市公園などとして整備・管理することが可能となっている。このように公共施設は自然環境の保全創出においても事業の種類ごとに特性を持っており、今後さまざまな制度がタイアップし生態系の保全を図ることが必要であると考えられる。研究分野においてもタイアップを視野においた整備手法の研究が必要であろう。

4.2 地域的生態系保全計画

最近、議論されている環境アセスメント法の一つの特徴は、対象生物が危急種・貴重種に限ることなく、生活の中で人とふれあう「普通種」にまでその対象を広げようとしていることである。建設省は、公共事業に伴う環境への影響調査の中で、これまでも普通種への影響まで視野に入れ、影響軽減の対策をとってきた事例は多い。

しかしながら、評価の対象が普通種まで含めるということが制度的に決定されるとなると、それをどのように評価し、どれほど保護すべきかということにより以上真剣な検討が必要になる。普通種は

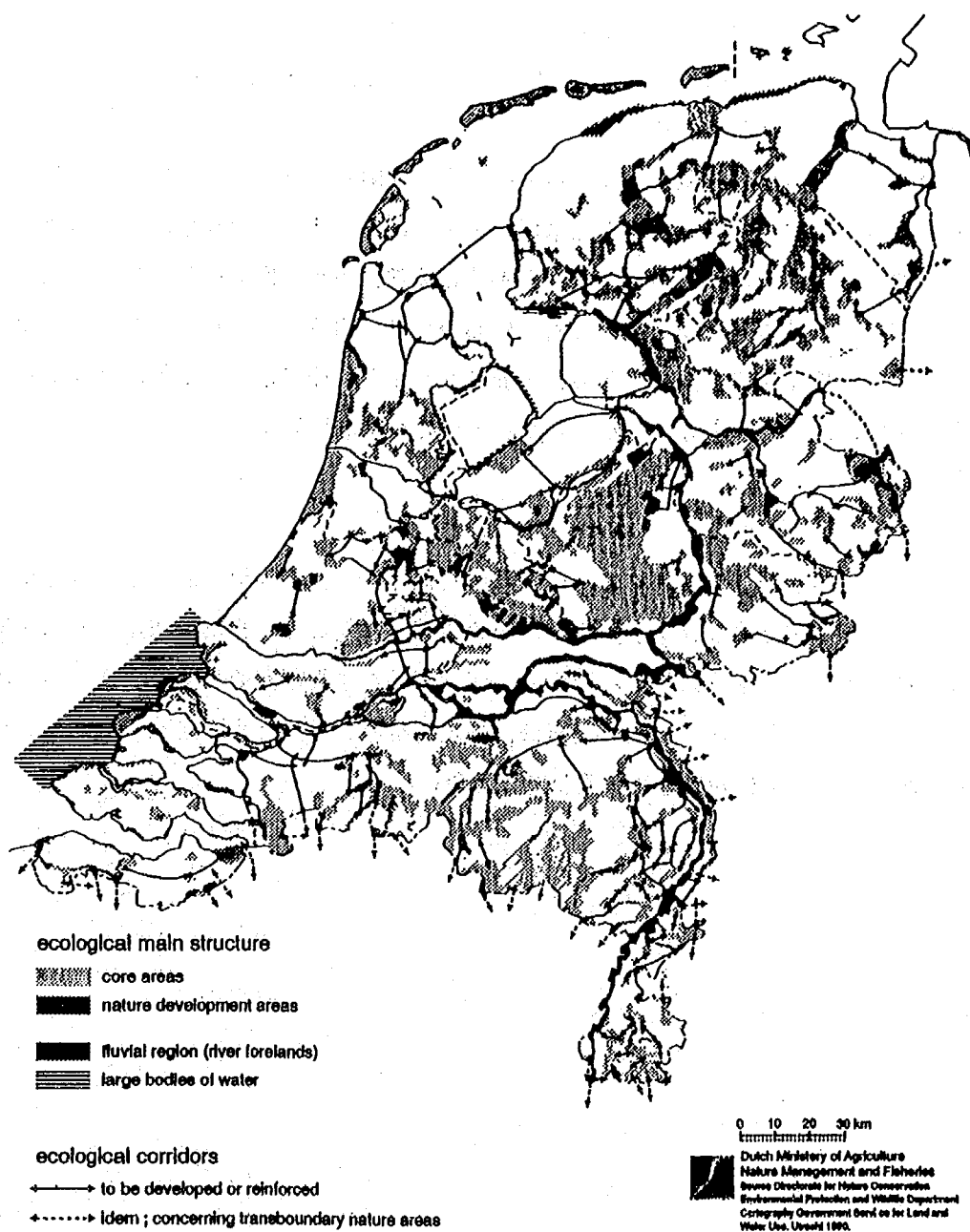


図-16 オランダの国土生態ネットワーク計画図

本図にはコアエリア、自然創出区域、河川区域、北海の海水面で生態的価値が高い海域及び生態的回廊が表示されており、緩衝帯は表示されていない。生態的回廊のうち波線矢印は、国境を越えてドイツ、ベルギーと連絡するものを表している。

注) 本図の原図はMinistry of Agriculture, Nature Management and Fisheries (1990) : Nature Policy Plan of the Netherlandsである。

至る所に居るから、総て保護しようとするれば、公共事業が不可能になってしまう。それは国民の望むことではないであろう。むしろ、地域の中で生物の生息域に影響を与えることが避けられないとすれば、その損失をどこで補うか、が問題であろう。それには、地域の中で保つべき自然環境の水準を決めるとともに、地域のどこを保全し、どこで生物の生息に適した条件を整備し、どこを開発を許すか、その全体像を検討することが必要であろう。

このような、計画の策定は地域の土地利用計画と大きな関わりを持つことになる。したがって、計画立案のためには、基礎的調査手法、生態系保全手法のほか、他の土地利用計画との調整の手法に関わる研究が必要となってくる。このような計画手法は非常に複雑な作業を要すると予想されるが、従来、都市緑地保全法に基づき「緑の基本計画」においては、環境保全のための緑の系統が計画されてきた。このような事例をふまえ技術をさらに発展させ、また前節で述べた生態的ネットワークの計画技術なども併せて、計画手法を構築していくことが今後の課題となろう。

おわりに

以上述べたことから予想されるように、生態系の現象は、多種の動植物およびこれらに影響する機構、地形、地質等のさまざまな要素が関係し、極めて緩慢に起こる。また、河川・ダム・道路・公園などのそれぞれの事業が動植物に与える影響や、保全上果たす役割もそれぞれ異なる。このような多様な条件下における生態系の保全・創出技術は、物理的材料を対象とする研究に比較し、極めて長い期間を要するが、今後着実に知見を積み重ねていきたい。

日 本 の 沖 積 河 川

—— その形と形成機構 ——

河 川 部 長 山 本 晃 一

日本の沖積河川

—— その形と形成機構 ——

はじめに

河川は人間の生活と極めて密接な関係を持っている。歴史時代を通じて現在まで、河川は人間社会に大きな影響を与え続け、また河川も人間の生活環境をより良いものとしていく営為の中でさまざまに変化を受けてきた。

河川は地形学の立場からは、地表面のほぼ一定した流路を通して下方に流れ、湖、海、他の河川に注ぐ水体とその河道を含めた総称であり地表に降った降水や湧水等の排水路であるということができ、侵食・運搬・堆積の作用を営み、たえず地表を変化させ、また河川自身も変化してやまない。現存する河川は、この三つの作用による自然史と人間が河川・流域に働きかけた歴史との相互連関性の具体的な現れといえる。

これを河川管理という立場で見るとは、この自然史と社会史の相互連関の結果である対象の特性を、人間の生活に脅威となる可能性を順次取り除き、利用することによって、社会により良く役立たせるために把握することである。

しかしながら、この身近な存在である河川そのものについて、案外知られていないことが多く、河川の特性（空間的および時間軸で見る動的変動特性）の把握が十分に為されているかという十分とは言えない所がある。特に河川および河川流域での人間活動の影響が、河川の縦横断形状にどのような変化を及ぼすかと言うような、河道の中長期的な変化を把握する方法論が確立されていない。

本論では、このような課題に応えるヒントとなる日本の沖積河川の特徴、特にその縦横断形状とその形成機構について最近の研究成果について述べてみたい。

1. 沖積河川の実態 ——その特徴と姿——

1.1 河道の縦断形状

沖積河川の縦断形は、多くの場合、図-1の上図の木曽川の例に示すように同一勾配を持つ区間がいくつか集まってできている。同一勾配を持つそれぞれの河道区間は、図-1の下図の木曽川河床材料粒度分布変化図（縦軸にある粒度以下のものが河床材料中に占める割合（%）を、横軸に河口からの距離を取り、図中に示す数値（mm単位）の粒径以下のものの割合が縦断方向でどのように変わるか示したもの）に示すように、ほぼ同じ大きさの河床材料を持っており、さらに洪水時に河床に働く掃流力や低水路幅・深さも概略同じような値を持っている。

このように河床勾配が同一で、似たような特徴を持つ区間ごとに河道を区分することを“セグメント区分”と言い、区分された各区間を“セグメント”と呼ぶ。

河川におけるセグメントの数は、河川によって、また河川をセグメント区分する目的（河道特性の違いを細かく見れば見るほどセグメントの数は多くなる）によって異なるが、図-1に示した木曽川のように比較的単純な河川の場合（山間部から堆積空間に出て、そのまま海に入ってしまう河川で、大きな支川が入り込まない河川）では、山間部を出てからは、通常次の三つのセグメントを持つ。

扇状地を持つ河川の場合は、扇状地を流下する河道区間に当たるセグメント1、その下流で粗砂あるいは中砂を河床材料に持つ自然堤防帯あるいはデルタに相当するセグメント2-2、その下流で細砂あるいはシルトを持つセグメント3である。図-1で示した木曾川の例では、42kmより上流の河床勾配が急で河床材料の平均粒径が6cm程度のセグメント1、10～42km区間の勾配1/3400で粗砂を河床材料に持つセグメント2-2、0～10km区間の勾配が非常に緩く河床材料に細砂を持つセグメント3からなることがわかる。

扇状地を持たない河川では、山間部から出た河川は、直接自然堤防帯に入るが、河床材料が砂利であるセグメント2-1、その下流で粗砂・中砂を河床材料に持つセグメント2-2、その下流で細砂を河床材料に持つセグメント3を持つ。なお扇状地を持たない河川の中には、粒径が1cm以下の中礫を河床材料の主モードとする短いセグメントを持つ場合がある。これはセグメント2-2の中に含ませるものとする。

表-1には各セグメントと地形区分との関係、また各セグメントと河床材料、河岸物質、勾配、蛇行速度、河岸侵食程度、水路の深さとの概略の関係を示した。これによってもセグメントごとに種々の河道特性が変化することを示した。セグメント1、2-1、2-2、3およびこれに加えて沖積地より上流の山間部あるいは狭窄部をセグメントMと名付け、これらを地形特性と対応した大セグメントと呼ぶ。

なお日本の河川は内海に流入する場合を除けば、セグメント3を持たない例が多く、また外海に面し、全面に海盆がせまっているような河川では、砂分が波浪によって他の場所に運ばれてしまうためセグメント2-2を持たないことがある。

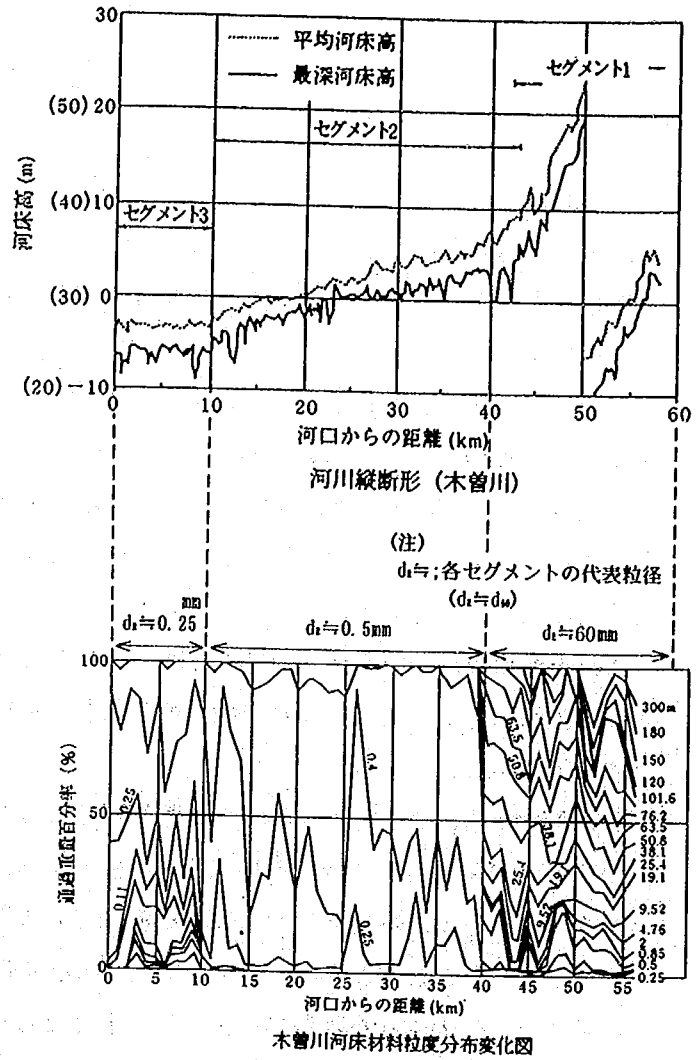


図-1 木曾川の縦断面形と河床材料

表-1 各セグメントとその特徴

	セグメントM	セグメント1	セグメント2		セグメント3
			2-1	2-2	
地形区分	山間地	扇状地	谷底平野		デルタ
河床材料の代表粒径 d_s	さまざま	2 cm 以上	3 cm ~ 1 cm	1 cm ~ 0.3 mm	0.3 mm 以下
河岸構成物質	河床河岸に岩が出ていることが多い。	表層に砂、シルトが乗ることがあるが、河床材料と同一物質が占める。	下層は河床材料と同一。細砂、シルト、粘土の混合物。		シルト・粘土
勾配の目安	さまざま	1/60 ~ 1/400	1/400 ~ 1/5000		1/5000 ~ 水平
蛇行程度	さまざま	曲りが少ない	蛇行が激しいが、川幅水深比が大きい所では蛇行または島の発生		蛇行が大きいものもあるが小さいものもある。
河岸侵食程度	非常に激しい	非常に激しい	中、河床材料が大きいほうが水路はよく動く。		斜、ほとんど水路の位置は動かない。
低水路の平均深さ	さまざま	0.5 ~ 3 m	2 ~ 8 m		3 ~ 8 m

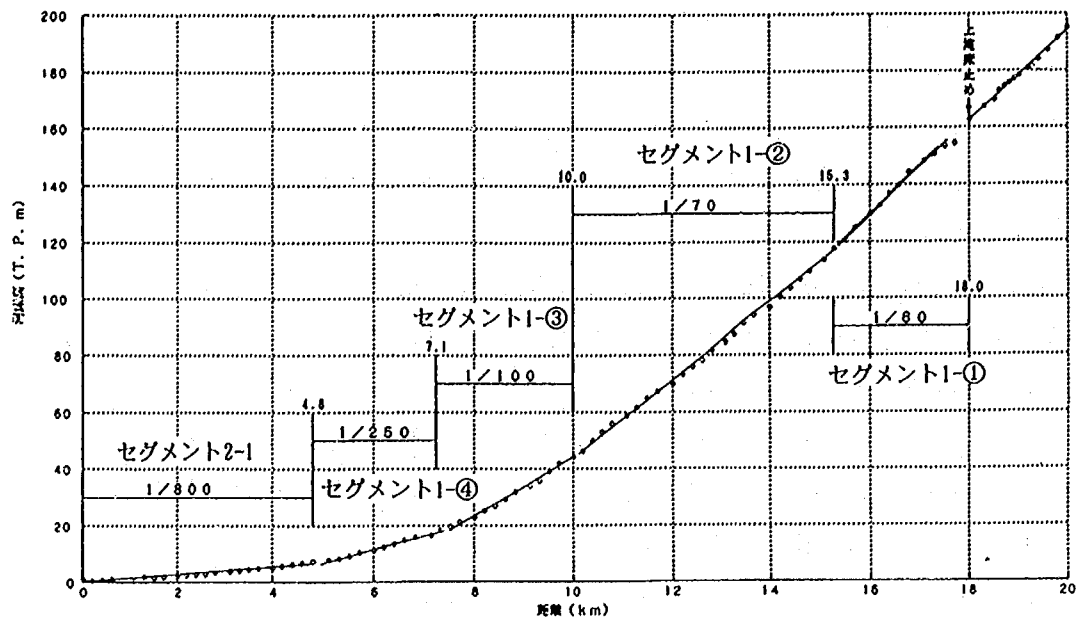


図-2 常願川の河床縦断とセグメント区分

実際の河川は図-2の常願寺川の例に示すように、詳細に見ると大セグメントを二つあるいは三つの小セグメントに分けることができることがある。この場合は、セグメント1を例にとると、これらを上流からセグメント1-①、セグメント1-②と順番に番号を付けて区分する。

1.2 河床材料の粒度分布と河床材料の動きやすさ

河床材料の粒度分布形は、対数正規分布形に近いといわれているが、実際には、特性の異なる三つ以上の粒径集団(population)を持っているのが普通である。堆積学では図-3のように河床材料の主モードである集団をA集団、それより細かいものをB集団、A集団より粒径の大きいものをC集団と呼んでいる。

工学上は、図-4に示すように集団区分粒径(diameter of population break)を決め、この区分粒径によって集団ごとの存在範囲を定め、その存在範囲ごとの粒径集団の移動特性と、移動量を評価すると、河床変動の評価や土砂の分級機構を解明および解釈するうえで実用的であるので、この方法によって各粒径集団の存在範囲を定めることにする。粒径集団区分粒径は、図-4に示すように粒径加積曲線上での勾配の急変化点とすればよい。

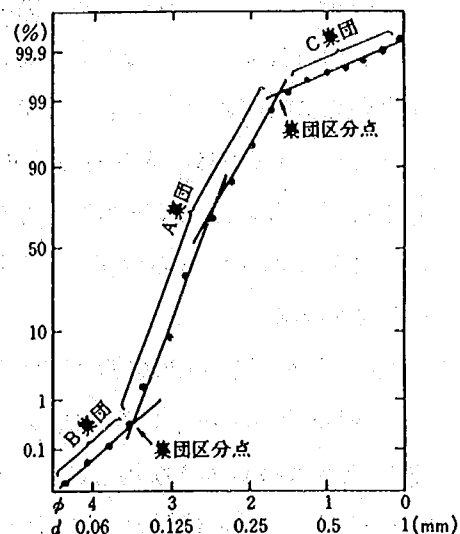


図-3 河床材料の粒度分布

なお、扇状地河川の場合は、粒径の存在範囲が広く、集団区分粒径の決定に困難を覚えることが多い。この場合は次のように、区分粒径を決める。

- ① 各セグメントごとに測定された河床材料の粒度分布曲線を描く。
- ② 大粒径集団でチャンネル・ラグ・デポジット(channel lag deposit)であるC集団と河床材料

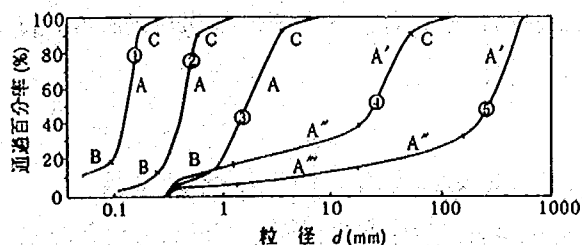


図-4 種々の粒度分布形におけるポピュレーションブレイク

の主構成材料であるA'集団は、通常、粒径加積曲線上で勾配の急変点が現れるので、その材料をC集団とA'集団の区分粒径とする。

③ 砂成分をB集団とする。この場合、粒径加積曲線上で勾配の急変点が生じていれば、それを区分粒径とする。通常1.0～2.0mm程度になることが多い。勾配の急変点が明確でない場合は、2.0mmを区分粒径とする。

④ A'集団とA"集団の区分粒径は、粒径加積曲線上で、勾配の急変点として評価し得ることが多いが、細粒分の多い河床材料分布の場合、勾配急変点が明確でないことがある。この場合は、線格子法による河床表層材料の粒度分布（⇒注1）（みお部の表層材料は、ほぼC集団とA'集団からなる）から判断するか、粒径が粗砂以上であれば、同一粒径集団として、同じような土砂の移動形態を持つものは、最大と最小の粒径の比で7～8程度であるので、C集団とA'集団の区分粒径の8分の1程度の粒径をA'集団とA"集団の区分粒径とする。

⑤ A'集団とA"集団の区分粒径とB集団の最大粒径の比 γ が8～10程度であれば、A'集団とA"集団の区分粒径とB集団の最大粒径の間の材料をA"集団とする。 γ が15を超える場合は、下流のセグメントの粒度分布形を参考にしながら、A'集団とA"集団の区分粒径とB集団の最大粒径の間の粒径成分を最大と最小の粒径比で8程度となるように区分し、大きな集団からA"、A'集団とする。

⑥ 最後に対象河川の各セグメントの区分粒径が、上下流で一致するように区分粒径を微調整する。これは河川の土砂収支の検討、河床変動計算等において、粒径集団ごとにその移動量の収支を把握するのが、工学的に有益であり実用的であることによる。

河床材料の特性を表すものとしては、一般に河床材料の平均粒径 d_m を取ることが多いが、河川工学の観点からは河床の動きやすさを示す指標を取る方が良い。ところで河床材料、特に60%通過粒径 d_{60} が1cm以上のものは、大粒径から小粒径のものを含んだ均一度の悪い粒度構成となっている。このうち小粒径のものは大粒径の間に存在するマトリックス集団であり、河床変化にはあまり関係しない。河床変動に関係するのは主にC集団、A'集団であり、また河床材料の動きやすさを規定するのもこの集団である。

A"集団以下の材料が20%以下であるような場合は、平均粒径 d_m あるいは60%通過粒径 d_{60} は、C集団とA'集団のみからなる材料の平均粒径とあまり変わらないが、河床材料中にA"集団以下の材料が40%程度占めるような場合には、河床材料の平均粒径 d_m あるいは60%通過粒径 d_{60} とC集団とA'集団のみからなる材料の平均粒径との差が大きくなり、河床の動きやすさを示す指標として適切でなくなる。

そこで河床の動きやすさ、河床変動に影響を与える指標として、C集団とA'集団のみからなる河床材料の粒度分布より、その平均粒径あるいはその60%通過粒径を求め、これを代表粒径 d_R と名付けることにする。

1.3 洪水時に河床に働く力と代表粒径

河床材料は洪水時に動かされ堆積したものであり、河床材料の大きさは洪水時に河床に動く力の強さを表わすものと考えられる。実際にどうなっているのか見てみる。

図-5は日本の直轄河川の平均年最大流量時に低水路河床に働く平均的掃流力（ここでは掃流力 τ を水の密度 ρ で除した摩擦速度の2乗 u_*^2 で示してある）と代表粒径 d_R 関係を示したものである。

これより河床材料と洪水時に河床に働く流水による力とが密接な関係にあることが分かる。沖積地を流れる河川は、図-5の関係となるように河道を形成していくものと考えられる。

低水路の水深や川幅等が、平均年最大流量 Q_m 、河床勾配 I_b 、 d_R がほぼ同じである河川間では、同じようなスケールになることを示す。

平均年最大流量時の流速係数 ψ は、図6のように d_R と I_b によってほぼ定まるので、

$$\psi = f_1(d_R, I_b) \quad \dots (1)$$

と表わせる。図5より

$$u_*^2 = f_2(d_R) \quad \dots (2)$$

であるので、 $u_*^2 = g \cdot H_m \cdot I_b$ の関係より

$$H_m = 1/g \cdot f_2/I_b \quad \dots (3)$$

となり、低水路の平均流速 V_m は、

$$V_m = f_1 \cdot (f_2)^{1/2} \quad \dots (4)$$

となり、 H_m と V_m は勾配 I_b と d_m でほぼ定まる。

低水路幅 B は $Q_m = B \cdot V_m \cdot H_m$ であるので

$$B = f_1^{-1} \cdot f_2^{-3/2} \cdot g \cdot I_b \cdot Q_m \quad \dots (5)$$

となり、川幅は、 I_b 、 d_m 、 Q_m の三量で評価される。

図-7には平均年最大流量時の H_m 、 d_m の関係を I_b を指標として、また図-8には V_m と d_R の関係を示した。

なぜ、図-5のような関係が生じるかは、次のような理由によろう。

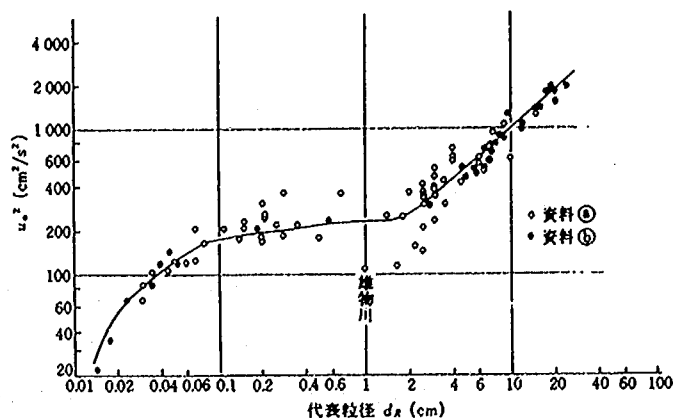


図-5 日本の沖積地河川の u_*^2 と d_R の関係

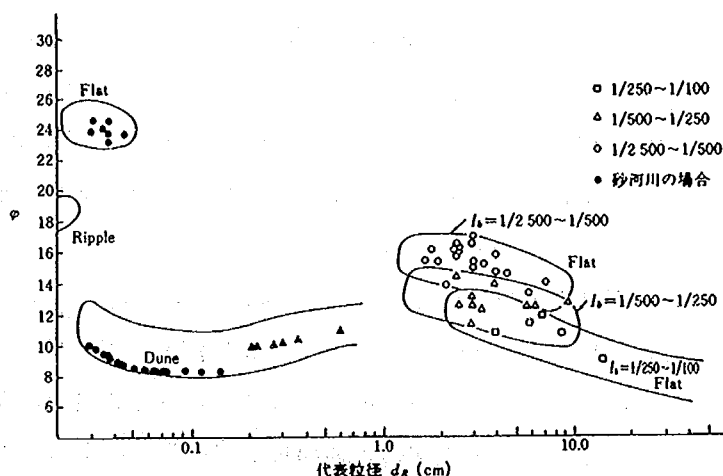


図-6 平均年最大流量時の ψ と d_R の関係

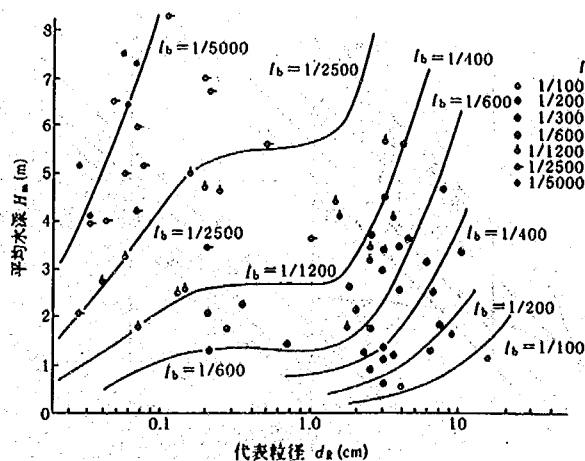


図-7 平均年最大流量時の水深 H_m と d_R 、 I_b の関係

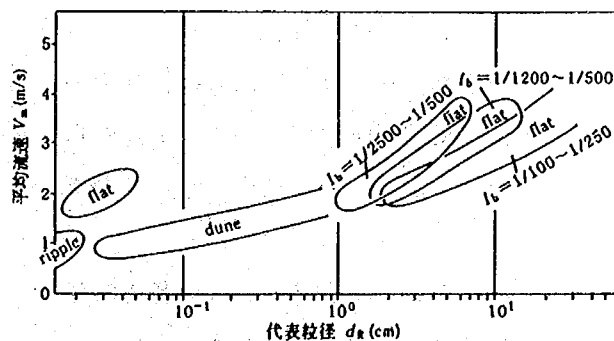


図-8 平均年最大流量時の平均流速 V_m と d_R の関係

代表粒径2cm以上の河床材料を持つ河川では、図-9に示すように $\tau_{*R} = 0.05 \sim 0.1$ の間にある。

扇状地河川 ($I_b > 1/250$) の場合、河岸物質は河床材料とほぼ同一の物質であるので、洪水時の掃流力に耐え得る耐侵食力は、河床材料が移動し得る限界の掃流力にほぼ等しいか、それより多少小さい値と考えられる。したがって、河床材料が動き得るくらいの掃流力の状態まで河幅が広がってしまうものと思われる。実際河岸が河床と同一粒径の砂で構成された人工の小水路に通水した場合、最終状態の河床が平坦河床であれば水路の τ_{*R} は0.04~0.08程度であり、ほぼ移動限界掃流力の状態となっている。

勾配が緩い自然堤防帯の特性を持つ河川 ($I_b = 1/500$ から $1/2,500$) の河岸は、下層は河床材料とほぼ同様な物質であるが、中層は小砂利、シルト混じり砂などからなり、上層はシルト混じり細砂である場合が多い。このような地点の河岸侵食は、河岸近くの河床の深掘れによって、中・上層の粘着力を持つ河岸の安定が崩れ滑落崩壊することによって生じる場合が大部分である。河岸物質は河床材料が移動し始めるくらいの掃流力に対して粘着力があるためある程度耐えることができるが、河床材料が移動し始めると深掘れ部の河床低下が生じ河岸が崩れてしまい、扇状地河川と同様土砂の移動限界掃流力より多少大きな掃流力の状態に対応する河幅になるものと考えられる。

代表粒径2cm以下0.5m以上の河床材料を持つ河川では、 u_*^2 はほぼ一定値となっている。これは河岸物質が粘土混じりシルトや粘土混じり細砂となり、側岸の耐侵食力が河床物質を動かす力より大きいため、側岸の流水に対する耐侵食力に対応した河道を形成するためと考えられる。ただし、これは河岸が洪水に対して侵食されず水路が側方に移動しないということを意味しているのではない。

代表粒径が0.5mm以下となると急に河床に働く掃流力 u_*^2 が小さくなる。この材料を持つ堆積空間は、河川自身が土砂の堆積によって自らつくり出したというよりも、完新世における海面変動、人工的堆積空間の形成などの他の地形形成営力によって基本的性格が規定されているという特性を持っている。0.3mm以下の場合は図-9に示すように、 u_*^2 と河床材料の主モード (A集団) の平均粒径 d_A との関係は、上流のセグメントでワッシュロード的であったものが、対象セグメントで浮遊砂的な運動形態を持つような水理量となっている。すなわち、

$$d_A = 0.2\text{mm} \text{ に対して } u_*^2 \approx 50\text{cm}^2/\text{s}^2, \tau_{*A} \approx 1.5, u_*/w_0 \approx 5$$

$$d_A = 0.15\text{mm} \text{ に対して } u_*^2 \approx 30\text{cm}^2/\text{s}^2, \tau_{*A} \approx 1.2, u_*/w_0 \approx 5$$

$$d_A \leq 0.1\text{mm} \text{ に対して } u_*^2 \leq 20\text{cm}^2/\text{s}^2,$$

程度である。ここで w_0 は d_A の粒径に対する沈降速度である。

なお図-9を用いると河床材料中の各粒径集団が洪水時どのような運動形態を持つかについて推定することができる。

図-5は、沖積河川が持つ基本的特性であり、この関係となるように河道を調整していくものと考えられる。図10は、河道掘削によって河積を増大した

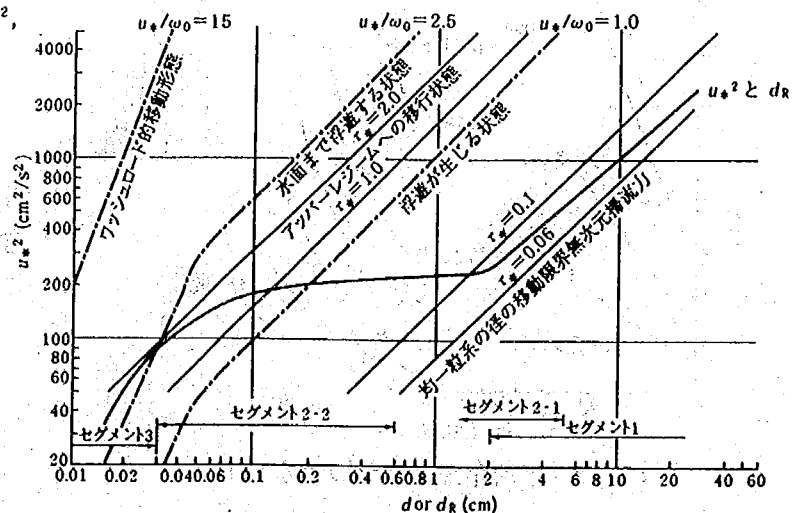


図-9 粒径 d と $u_*/w_0, \tau_*$ の関係 (w_0 は Rubey の式 $S=1.65, T=25^\circ\text{C}$ で評価)

り、蛇曲していた河川を直線化したりした後、河道がどのような速度で、どのように変化したかを示したものである。河道は図-5に示した関係に戻ろうと反応している。

図-5を用いて河道の応答の方向を推測可能なのである。

1.4 セグメント単位の見方と河川工学

河道計画、河川環境計画、河道の維持管理および河川構造物の設計などの河川工学上重要な河川の種々の姿としては、次のようなものが挙げられる。

①洪水時の水理量（洪水時の流速、掃流力）、②河道の平均的なスケール（河道の川幅、水深、勾配）、③小規模河床波の形態と流れの抵抗（流量変化と小規模河床波の対応）、④土砂の運動形態とその量（各粒径集団ごとの輸送形式とその河道形成に及ぼす役割）、⑤氾濫原（高水敷）の特性（高水敷堆積物の質、洪水時の高水敷の挙動）、⑥河道の平面形状（蛇行形態、砂州と平面形状との関係、河岸侵食位置と侵食速度、島の発生状況）、⑦河道の横断形（洗掘深、洪水による横断形変化）、⑧位況・水面変化特性（流況と位況の関係、左右岸水位差）、⑨河道の縦断形変動形態（変動速度、アーミング形態）、⑩生態系（植物、動物）、⑪人的作用による河道特性の変化形態、⑫河川の景観。

上述の河川の種々の姿を総称して河道特性と呼び、個々の特性項目を河道特性の構成要素と呼んでいる。上述した河川の種々の特性は、個々ばらばらに存在しているのではなく、図-5に示した洪水時に河床に働く力と代表粒径の関係を媒介として相互に密接に関連しあい、河道という一つのシステムを作っている。すなわち河道特性の諸構成要素を Y_i とすると、これを規定する主要因子は、平均年最大流量 Q_m 、河床材料の代表粒径 d_R 、河床勾配 I_b と考えられる。すなわち

$$Y_i = f_i(Q_m, d_R, I_b) \quad \cdots \cdots (6)$$

の関数関係が成立するものと考えられる。例えば上述の①、②、③については、1.3で示したように(6)式の関数関係が成立している。他の河道特性項目についてもほぼ(6)式の関数関係が成立するとして河道特性を分析し得ること、またそこで得た共通性（法則性）を用いて河道特性の解析がなし得ることが明らかにされている。

なお、河道に対する働きかけを計画する場合（河道計画、河川構造物の設計等）には、当該河道をほぼ似たような特性を持つセグメントに区分し、区分された単位空間ごとに河道特性の構成要素を分析・把握しておく、すでに他の河川で大セグメント単位である程度共通の基準で河道情報が整理されているので、他の河川の経験を利用したり、相互の比較が容易になり技術的判断が的確になる。このようにセグメントを河道を把握・分析する単位空間として取ることをセグメント単位の見方と言う。

既にこのセグメント単位の見方で河道計画のあり方、考え方を整理し、指針としたり、護岸水制の工法選択や設計論への利用が始まっている。

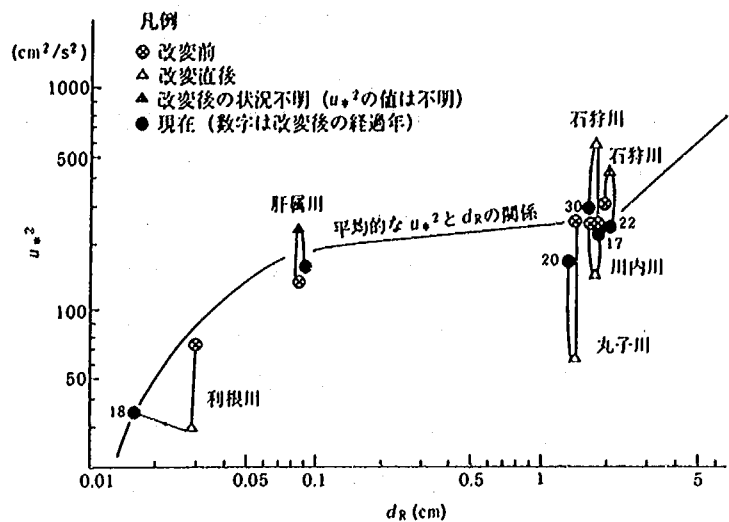


図-10 人工的河道改変後の河道の応答

2. セグメント形成機構と粒径集団

2.1 粒径別土砂供給量

セグメントの形成機構を論ずるには、まず山地部から沖積地にどのくらいの土砂供給量があり、かつ粒径集団別にどの程度の割合となっているかを知る必要がある。

図-11は、①沖積地の地下層序構造の情報を基にして評価した供給土砂量（約10,000年間の年平均値）と、②ダム堆砂量から評価した供給土砂量（10～30年程度の年平均値）を、土砂生産流域面積（山地面積）で割り、比供給土砂量の形にして示したものである。ここでは供給土砂量を堆積した状態での体積（空隙を含む）で表わしてある。

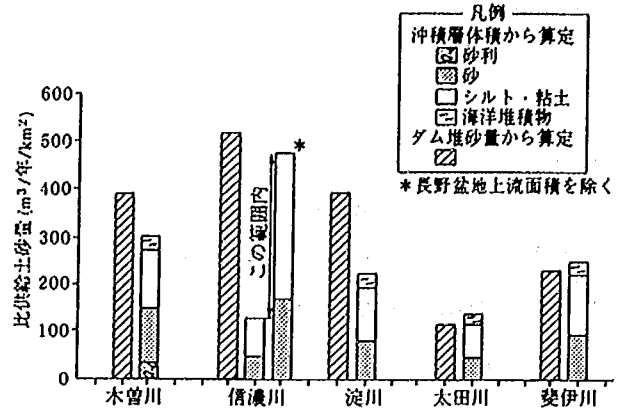


図-11 比供給土砂量比較図

この図から、平均化に用いた年数が大幅に違うにもかかわらず、二つの方法による供給土砂

量は、信濃川と淀川を除き近い値にあることがわかる。信濃川と淀川については沖積層体積から求めた値が小さくなっているが、これは上流に盆地があり、そこでの堆積量を考慮していないことが大きな理由である。図-11には、信濃川の沖積層体積から求めた比供給土砂量を、長野盆地上流域で生産された土砂は新潟平野には供給されないものとして、長野盆地上流域を土砂生産域から除外して求めたものも併せて示してある。信濃川への超長期（10,000年）の平均供給土砂量は、これら二つの値の間にあるものと考えられる。

供給土砂の質については、対象河川による大きな違いがなく、いずれも砂利：砂：シルト・粘土＝（0%～10%）：（35%～40%）：（50%～65%）程度の構成比となっている。このことは、供給土砂の大部分が砂とシルト・粘土で占められていることを示している。

以上のことは、最近数十年の供給土砂量と過去10,000年程度の超長期の平均供給土砂量との差が大きくても5割の範囲内にある可能性が高いことを意味している。

どのような粒径のものがどれだけ供給されるかは、山地部の岩質と風化作用の違いに規定されると考えられるが、これについてはまだ良く分かっていない。

2.2 セグメント形成シュミレーション

沖積地河川の縦断形は、山間部で生産された土砂が洪水によって篩い分けられたものの現れと考えられる。その篩い分けの単位ユニットがセグメントである。

ここでは沖積地形発達形態のうち、最も単純であり基本的である内湾に流入し、地盤変動、潮汐、風、海水と河水の密度差の影響が他の地形発達要因の影響に比べて無視し得るような場合の地形発達過程についてのモデリングを行い、これを確認する。

すなわち完新世における沖積地へ供給された土砂の量と質、海水面の変化、初期地形および洪水条件のもとで地形発達に関する実験、数値シミュレーションを行い、沖積河川と同様な河道縦断形が形成されるのか検討する。

[1] 大セグメント形成に関する実験

セグメント1と2-2が形成されるメカニズムは沖積平野の形成に密接に関係している。そこで、沖積河川の河道特性を考慮した沖積平野形成モデル実験を行い、セグメントが形成し得るか確かめる。

1) 実験方法

実験は、図-12に示す一定水位を持つ実験水路に上流端から一定量の水と土砂を供給し、実験水路（以後河道と呼ぶ）内に土砂を堆積させるというものである。実験条件を表-2に示す。実験方法は、沖積平野が完新世の海水面高変化のもとで形成されたことを踏まえ、その過程を定性的に再現することを基本に次のように定めた。

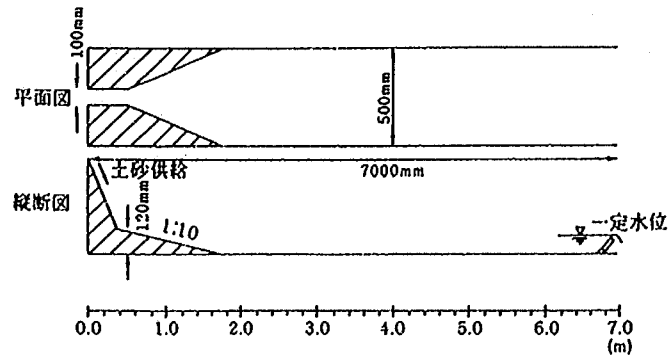


図-12 実験装置概要図

- ① 供給する材料の設定：セグメント1の河床構成主材料（砂利）はセグメント2-2の主構成材料（砂）に対して30～60倍の粒径を持ち、同じ摩擦速度に対しての砂の無次元掃流力は砂利の30～60倍となる。このため、砂利と砂は同じ流砂形態をとらない（砂が掃流形態で移動するとき砂利は移動せず、砂利が掃流形態で移動するときは砂は完全な浮遊形態となる）。この性質を実験で再現することが最も重要と考え、表-2下欄に示す粗砂と石炭粉をセグメント

表2 実験条件一覧表

実験名	流量 (cm ³ /s)	給砂材料	給砂量 (cm ³ /s)	通水および 給砂時間	下流端 水深
初期河道形成実験 (沖積層基底礫層形成実験)	150	粗砂のみ	2.04	3時間	0 cm
沖積河道形成実験	150	粗砂	0.61	20時間	7 cm
		石炭粉	2.44		

* 給砂量は粗砂、石炭粉とも堆積した状態での体積で表現（空隙率0.4により換算）
* 粗砂は粒径2mm、比重2.65、石炭粉は粒径0.3mm、比重1.5

- 1と2-2の砂利、砂それぞれに対応する材料として用いた。粗砂が限界掃流力状態のとき、石炭粉は $\tau_* = 1.1$ 、 $u_* / \omega_* = 3.2$ となり浮遊形態となる。なお、シルト・粘土は縦断面形成に直接関係しないとして無視した。
- ② 各材料の供給量比の設定：砂利に対して砂分の供給量が相当多いことが重要と考えて、実験での粗砂と石炭粉の供給量比を1：4とした。実験水路への供給は、両者を十分混合してから行った。
- ③ 初期河道と実験水路内水位の設定：最初に、水路内水深がほぼ0の状態では粗砂のみを供給して、沖積地河道の基盤となっている沖積層基底礫層に対応する河道をつくり、これを沖積地形成モデル実験の初期条件とした。次に実験水路内水深を7cmになるように水量を増やして（海水面の急上昇を模擬）、②に示した材料を供給した。

2) 実験結果

図-13に、4時間ごとの縦断面図と実験終了後の掘削結果から得た縦断面堆積状況を示す。この図から、石炭粉の堆積領域と石炭粉混じり粗砂の堆積領域（以後それぞれ石炭粉、粗砂堆積域と呼ぶ）にはっきり分かれ、明確な縦断的分級が生じていることがわかる。各領域内では縦断面形が概ね直線であり、粗砂堆積域の河床勾配は石炭粉堆積域より大きく、この2つの領域の境界で勾配の急変が起こっている。石炭粉堆積域の勾配は供給された石炭粉量に対する動的平衡勾配よりやや小さくなっている。実験中は、大量の石炭粉供給により湛水部分が埋め立てられるに伴い、石炭粉堆積域が海部に向かっ

て急速に伸張し、それよりかなり遅い速度で粗砂堆積域が下流に広がるという堆積、分級過程を示している。この間、各領域の勾配には大きな変化は見られない。流水幅は粗砂堆積域で10cm程度、石炭粉堆積域で30cm程度である。河床上昇は、流路位置が横断方向に変動するため横断方向にほぼ均等に生じた。

堆積物の粒度分布を調べると、各領域内ではほぼ一様であり、粗砂堆積域の粗砂・石炭粉比は6:4(実質体積比)、石炭粉堆積域は0:10であった。空隙率は、石炭粉堆積域では0.5程度であり、粗砂堆積域においては0.2程度であった。0.2は粗砂あるいは石炭粉だけの場合の空隙率0.4よりもはるかに小さい。このことは、粗砂だけの場合の粗砂粒子の隙間を石炭粉粒子が埋めた状態と粗砂堆積域の堆積構造が似ており、石炭粉が河床変動に対して有効な働きをしていないことを示している。

以上のような特性が現れた理由としては、①石炭分が粗砂に比べて非常に動きやすいため、勾配の大きい粗砂堆積域に留まる石炭粉は粗砂堆積構造の隙間にトラップされた石炭粉粒子だけである、②同様の理由により粗砂が石炭粉堆積域に侵入することができない、③①のトラップ量よりはるかに多量で、海部を埋めて新たなセグメントをつくるだけの石炭分が供給されていることが挙げられる。また、縦断面形が変化している過程であるにもかかわらず石炭粉堆積域が動的平衡勾配に近い勾配を持ったのは、流送された石炭粉のかかなりの量が海部の埋立てに使われるため石炭粉堆積域前縁線の移動速度が遅くなり、前縁線に固定堰を設けた条件に近い状況になったためと考えられる。石炭粉堆積域と粗砂堆積域の境界位置の移動特性は、境界付近での粗砂供給による河床上昇速度と石炭粉堆積による河床上昇速度との相対関係で決まる。図-14は海部水深を4cmにしたことを除いて、表-2と同じ条件で行った別の実験の結果である。図-13と比較すればわかるように、より小さな海部水深設定により海部埋立てに要する石炭粉が減り石炭粉河床上昇速度が大きくなったため、境界位置が下流方向ではなく上方に移動している。

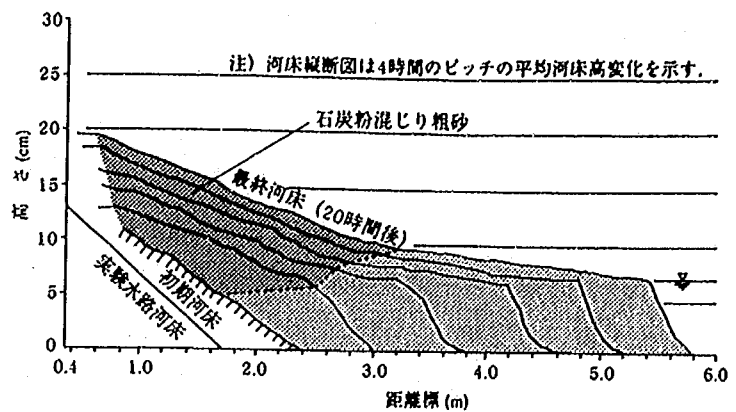


図-13 縦断面形成過程と堆積物粒度分布
(縦断面図)

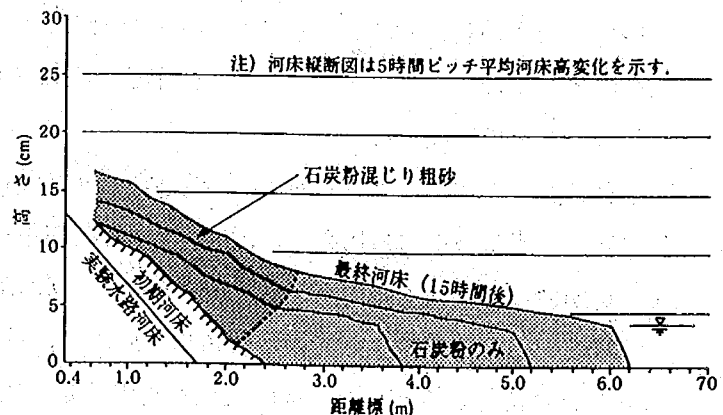


図-14 縦断面形成過程と堆積物粒度分布
(縦断面図) - 海部水深(下流端水深)を4cmとして実験を行った場合

[2] 河床変動計算による河床縦断面形成過程の追跡

実験において形成された縦断面形と縦断方向の土砂の分級特性、土砂流送特性は、石炭粉、粗砂をそれぞれ砂、砂利と置き換えればセグメント1と2-2が接続する縦断面形を持つ河川の特徴と定性的に非常によく一致しており、実験水路における縦断面形成機構が実河川の縦断面形成の説明に有効であると考えられる。そこで、その機構を反映させた簡単な数値シミュレーションにより、実際の河道縦断

形形成の再現を試みる。対象にしたのは、木曽川をモデルとした沖積河川の10,000年間の形成過程である。

1) シミュレーション方法

計算は、一次元の土砂収支を表わす次式を用いて行った。

$$(1 - \lambda)B \cdot \partial z / \partial t + \partial(\Sigma bq_{s,i}) / \partial x = 0 \quad \dots\dots (7)$$

ここで、 B ：沖積平野幅（沖積作用が生じる堆積空間の幅）、 z ：河床高、 x ：沖積平野の中心線沿いに海方向に取った座標、 b ：河道幅、 $q_{s,i}$ ：各粒径別の河道内流砂量、添字 i ：粒径の種類を表わす記号、 λ ：空隙率、である。 $q_{s,i}$ は、河川流量が幅 b の河道幅を流れるとして不等流計算により求めた各点の掃流力から流砂量式を用いて算定した。上式は土砂の輸送が河道幅で行われ、堆積は沖積平野の堆積空間全幅で生じる状況を表現したものである。

計算条件の設定は、木曽川および濃尾平野沖積層の諸元を参考に次のように設定した。まず、沖積平野幅 B と初期河床高は図-15のとおりとした。木曽川は河道幅の縦断変化が小さいので、河道幅 b として全区間一定の500mを与えた。海水面高は完新世における海水面高変化をもとに、10,000年前から6,000年前にかけて-40mから0mまで年間1cmずつ上昇し、それ以後現在まで一定という変化を与えた。流量は、木曽川犬山地点流量データに準じて設定した。供給土砂については、前節までの結果を踏まえて砂利、砂、シルト・粘土の3種を与え、それぞれの粒径を30mm、0.5mm、0.01mmとし、供給量を砂利：84,000m³/年、砂：321,000m³/年、シルト：401,000m³/年とした。

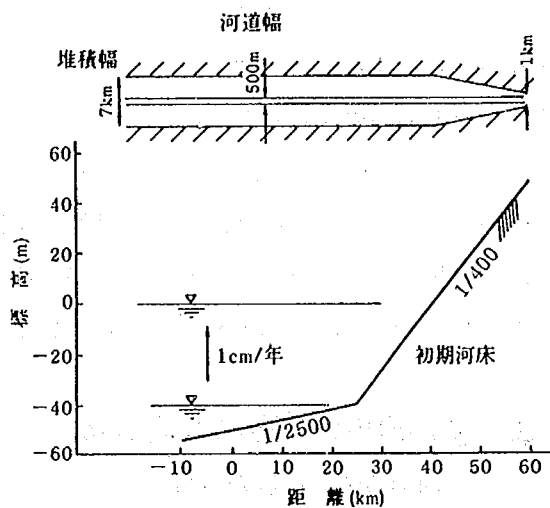


図-15 計算条件

計算は一次元河床変動計算で用いられている方法に準じて行った。ただし、通常の混合粒径の計算法を10,000年間の河床変動に適用すると莫大な計算労力がかかるので、次のような簡略化を行った。各計算ステップで、設定した各粒径それぞれについて均一粒径の河床変動計算を行い、各粒径別の河床変動量を合計したものを当該計算ステップでの最終河床変動量とする方法を用いた。均一粒径の計算において着目している粒径が存在しない区間については固定床とみなした。これは、縦断的分級機構を最も簡単にモデル化したものである。また、すべての粒径で掃粒砂のみの計算としている。計算ステップは5年間とした。

この計算法は、セグメント1の河床材料中にトラップされる砂がセグメント2-2への砂供給量に影響しないことを前提にしている。セグメント1の河床材料中の砂分割合は多くの場合10%程度である。この比率を10%とおいても、砂供給量は砂利供給量より相当多い（4倍以上）ので、砂利中にトラップされる砂量は全砂供給量の数%となり、上記の前提は妥当と考えられる。

2) シミュレーション結果

図-16に示したシミュレーション結果から、モデルとした木曽川（図-1）によく似た縦断形が得られたことが分かる。最終的に形成された縦断形のセグメント2-2においては勾配の縦断変化が小さく（下流に向かって1/2,500から1/3,000程度まで変化）、全体的に動的平衡勾配である1/2,500に近い値を

持っているのに対して、セグメント1の勾配はセグメント2-2との接合点に向かって動的平衡勾配である1/400から1/1,000程度まで変化する。両セグメントとも堆積上昇速度は、海水面高がほぼ安定したここ数千年間で年間平均1～2mm程度となっている。両セグメントの接合点は上方に移動している。

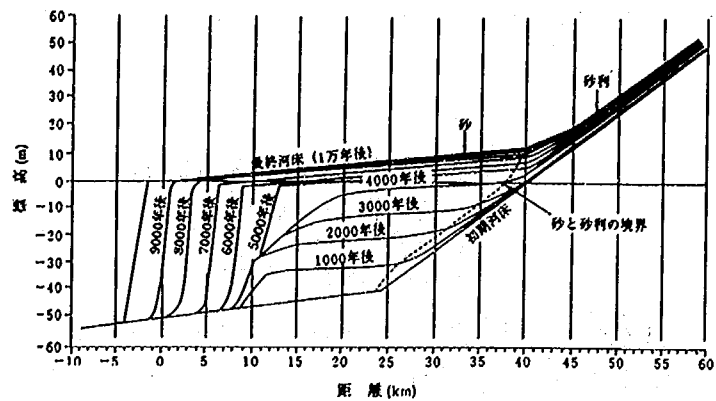


図-16 河道縦断形成過程のシュミレーション結果

2.3 総合土砂管理への応用に向けて

実験結果およびシミュレーション結果は、概略沖積地地形の堆積構造、沖積河川の縦断形状と似たようなものとなる。このことは、実験およびシミュレーション条件（仮説）が適切であったことを示している。すなわちセグメントは上流から供給された土砂が粒径集団ごとの堆積条件に応じて分級堆積したものの現れといえる。

以上のことは、河川流域スケールの土砂収支を把握して流系一貫した土砂管理計画を立案するには、セグメント単位で粒径集団別に土砂収支を把握し、かつセグメント単位内の河道変化がどの粒径集団に主に規定されているかを分析しておくことが必要なことを示している。実際にこのようなアプローチによって中長期的な河床変動の予測や大規模洪水時の水系内土砂移動の分析が始められている。

3. 個別河川の河道特性調査法

3.1 河道特性調査法の意義

ある個別目的のために行われる河川の調査は、その河川の河道特性調査そのものといえるが、そこで得られた資料は、河川の特性の一部を示すものである。それらの調査を有機的に結びつけ、対象河川の全体像を浮かび上がらせ、かつ河川の種々の特性の共通認識をつくり出すには、河川を上流から下流まで一貫してとらえた河道情報の整理と分析を行うことが必要である。このためには河道特性調査の内容、収集すべき資料の種類および記述の形式等は、ある程度共通のものとする必要がある。

河道特性調査は表-3に示す項目を含むことが望ましいが、基本的には河道特性調査を利用する目的に応じて調査項目を選択する。なお、現沖積河川は、河床掘削や上流ダム群の築造等によって河道特性がここ30年で大きく変化していることが多いので、河道特性の空間変化（縦断方向の変化）の分析のみならず、時間

表-3 個別河川の河道特性調査の項目

〇〇川の河道特性	
1. 河川及び流域の概況	4. 高水敷の特性
① 河川の概況	① 高水敷の平面形
② 流域の地形、地質	② 高水敷の土質構造
③ 流域の地形発達史	③ 河岸近くの表層堆積物と河岸物質
④ 〇〇川の河道変遷史	④ 高水敷の微地形と堆積物
⑤ 流域の土地利用の変遷	⑤ 高水敷の特性
⑥ 河川の利用状況	⑥ 計画高水時の高水敷の水量
2. 水文資料	5. 河道の平面形
① 降雨特性	① 低水路の平面形状と砂州およびみお筋
② 洪水特性	② 河岸侵食位置および侵食形態
③ 流出特性	③ 洪水時の流況と平面形
④ 流量と水位	6. 各セグメントの流砂形態と河床変動形態
3. 洪水時の営力と河道	① 各セグメントの流砂形態
① 河床材料	② 縦断形変動形態
② 低水路幅、高水敷幅	③ 土砂収支
③ 河床勾配と河床高	④ 河床変化の方向
④ 洪水時の河道特性量	7. その他
⑤ 河道特性量からみた河道のセグメント区分	水質と水生動植物に関する記述等その他必要な事項

各河道特性構成項目は、洪水時の河道特性量と密接な関係があることが明らかにされている。他の河川と同じような特性を持っているのか、また特殊なものであるかを把握し、特殊なものであればその原因について分析する。なお、河道特性量とは平均年最大流量時の低水路部の各種水理量（水深、摩擦速度、水路幅等）である。

[1] セグメント区分と河道特性量

荒川水系は、図-17に示すように、関東平野の西部に位置し、わが国の政治、経済、文化の中心である首都をひかえ、その重要性はきわめて大きいものがある。

This map illustrates the Kanto Plain region, focusing on the Tone River (利根川) and its extensive network of tributaries. The river flows from the north towards the south, eventually emptying into the Tone River (利根川). Major tributaries shown include the Tone River (利根川), Tone River (利根川), and Tone River (利根川). The map also depicts the Tone River (利根川) and its tributaries, including the Tone River (利根川) and the Tone River (利根川). A scale bar and a north arrow are included.

元荒川の本流を和田吉野川の流路に落とす付替え工事が行なわれ、これ以後、荒川低地は荒川本流の流下場所となった（数千年以前には、荒川低地には荒川と合わせて利根川の本流が流下していたと推定されている）。明治時代に入ると近代的改修が始まり、大正時代から昭和にかけて堤防、横堤の築造、シュートカットが行なわれ、現在の荒川となった。ショートカットされた区間は、荒川中流部の大部分におよび、現在の荒川流路は人工河道と言っても過言ではない。

荒川中流部の河道特性量は河口より76kmより下流は、低水路満杯流量時の、それより上流は平均年最大流量約1,200m³/s時の水理量で評価した。76kmより下流の径深Rは、低水路両岸肩から以下の河積Aを両岸肩幅Bで除することによって求めた。

— 59 —

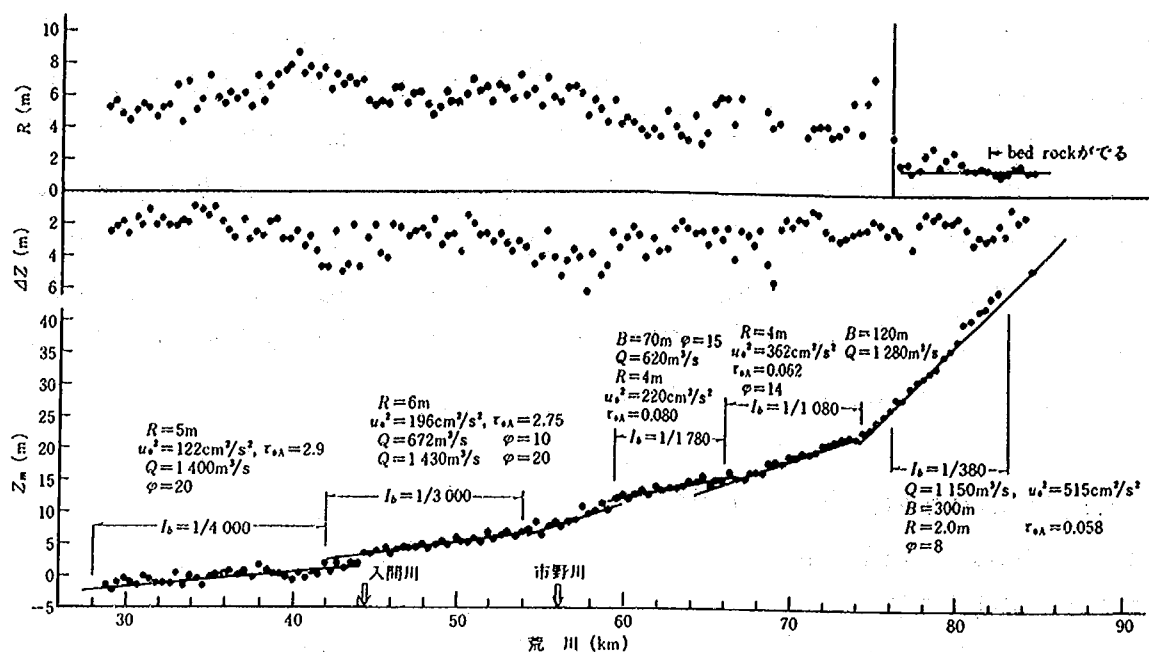


図-18 R, ΔZ , Z_m の縦断方向の変化

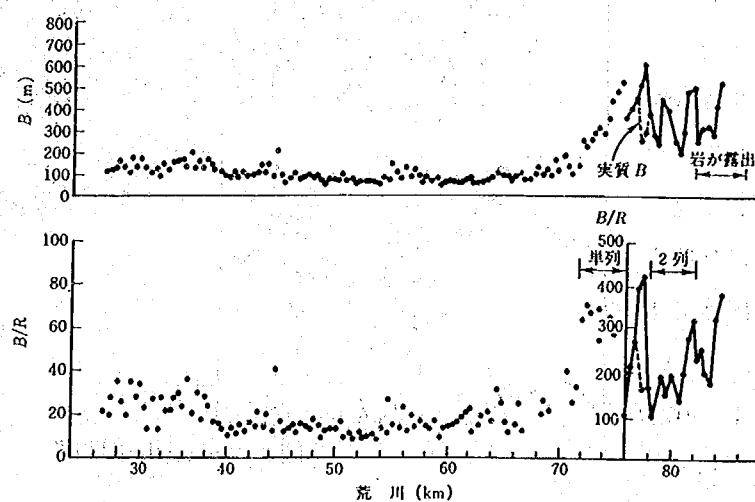


図-19 B, B/Rの縦断方向の変化

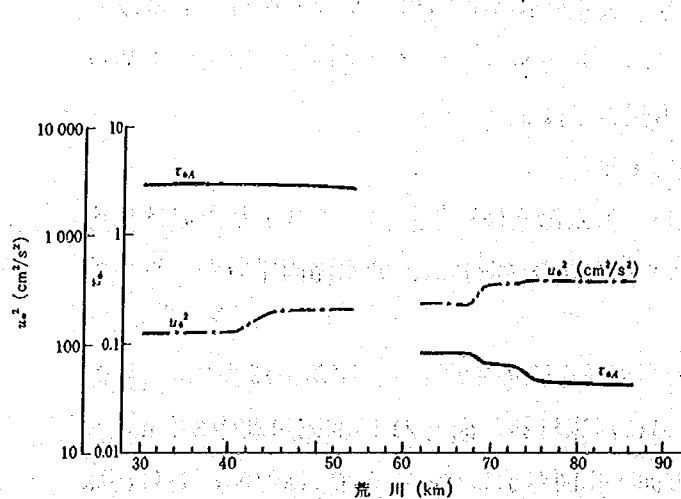


図-20 U_{*}^2, τ_{*}^A の縦断方向の変化

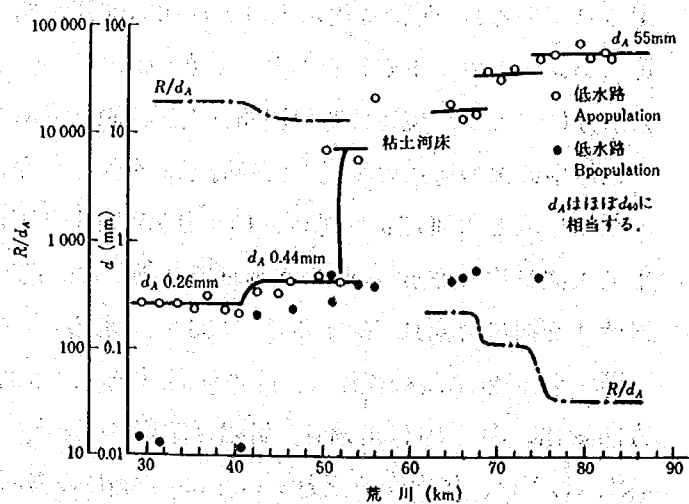


図-21 R/d_A , d_A , d_B の縦断方向の変化

以上の資料および河岸物質、現地踏査などの結果より、荒川中流部（28.8～88.8km）の河道は、次の6つのセグメントに区分しえると判断される。

1) セグメント1 = 74～88.8km

いわゆる扇状地河川に相当するセグメントで、河床勾配は約1/380である。84kmより上流は、旧扇状地を下刻化し段丘地形を作っている。現成扇状地は84km地点を扇頂としていると考えて良い。本セグメントへの上流からの砂利分の供給は減少の方向にあると判断される。83kmより下流の低水路の砂州の列数は2～4列であり、83km以上では第三紀の砂泥岩が河床に露出し、深掘れの生じるのを防いでいる。

2) セグメント2-1-① = 67～75km

このセグメントは河道特性量から見ると通常の河川では、自然堤防帯の河川の特性を持ち、蛇行の自然短絡などが起こりやすい区間であるが、荒川の場合、横方向に活撓に動いた形跡が見られない。河床は平均3～4cm程度の礫と砂から成っている。

3) セグメント2-1-② = 59～67km

この区間の大部分は、大正・昭和期の河川改修によって人工的に掘削された河道部分であり、河岸物質の下層は後背湿地堆積物である粘性土からなる。人工河川区間ではない65～68km区間は、河川沿いに微高地が発達しており、自然堤防の発達が良いが、掘削河道区間ではほとんど発達していない。なお本区間の下流部は埋没洪積層上を流れている。

4) セグメント2-1-③ = 54～59km

この区間は、勾配が上流のセグメントに比し急である。河床は掘削河道部分は写真1に示すように、粘性質である。

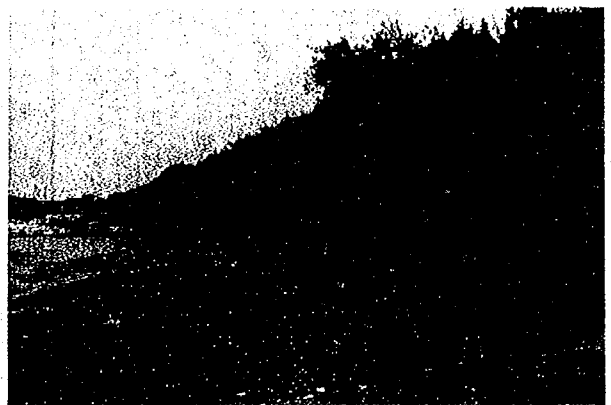


写真-1 58.5km地点の様子

5) セグメント2-2

この区間は荒川の有力な支川である人間川と市野川の合流点間の区間であり、河床材料は上流部はまだ小砂利であるが、主に0.4mmの中砂からなる。

6) セグメント3 = 28～42km

このセグメントは勾配が緩く、また川幅もセグメント2-2の1.5～2倍程度となる。低水路満杯時の摩擦速度の2乗 u_*^2 は上流のセグメントで $190\text{cm}^2/\text{s}^2$ 程度、このセグメントで $120\text{cm}^2/\text{s}^2$ 程度に減少している。この掃流力の減少に応じて河床材料も0.44mmから0.26mmの砂に変化している。

以上6つのセグメントは、おのおのが異なった特性を持っており、河川にかかわる種々の工事や計画にあたっては、この特性を十分に踏まえて置く必要がある。ここでは、表-4に各セグメントごとに各種河道特性を簡単に記載しておいた。本表によって河道をセグメントに区分する十分な理由が、また各種河道特性を、平均年最大流量程度の時の河道特性量で説明、記述し得ることが理解し得よう。

[2] 河床の変動形態に及ぼす河床・河岸物質の影響

沖積河川の河床変動や局所洗掘は、通常河床材料が非粘着質の物質から成るとして、流砂の連続条件と水理量の縦断方向の変化より、平均河床高の変化を予測し、また局所洗掘深は、流れと河床材料

表-4 各セグメントの各種河道特性総括表

	セグメント1 (扇状地)	セグメント2 (自然堤防帯)				セグメント3
		2-1-①	2-1-②	2-1-③	2-2	
低水路満杯時水 理量	$I_b=1/380$ $B=300m$ $R=2m$ $u_*^2=515cm^2/s^2$ $\tau_{*A}=0.058$	$I_b=1/1080$ $B=120m$ $R=4m$ $u_*^2=352cm^2/s^2$ $\tau_{*A}=0.062$	$I_b=1/1780$ $B=70m$ $R=4m$ $u_*^2=220cm^2/s^2$ $\tau_{*A}=0.08$		$I_b=1/3000$ $B=85m$ $R=6m$ $u_*^2=196cm^2/s^2$ $\tau_{*A}=2.75$	$I_b=1/4000$ $B=130m$ $R=5m$ $u_*^2=122cm^2/s^2$ $\tau_{*A}=2.9$
河床材料および 河床物質	5~6cmの砂利を主体として0.4~0.5mmの砂がマトリックス。74km以上は三紀層露出	3~4cm程度の砂利が主体。70km以下は泥層が河床に露出している所あり。	泥層(縄文時代の川の後背湿地堆積物)および洪積層上に2~3cmの砂利とを主とした堆積物が薄く乗る。	泥層が露出していると思われる。所々に砂利。砂の堆積	泥層の上に小砂利。53km以下は0.4mm程度の中砂	0.2~0.3mmの砂。最深部はデルタ底層の粘土
河岸物質	82kmより上流は、下層は岩、その上に右岸側は旧扇状地堆積物、左岸側は沖積扇状地堆積物。表層はシルト含み細砂。82kmより下流は砂利の上に表層に薄くシルト含み細砂	70kmより上流は、下層に砂利の上にシルト含み細砂。70kmより下流は下層は粘土、その上4~6mはシルト含み細砂	下層は粘土の上にシルト含み細砂4~6m、粘土層の上部は黒色の腐植層。60km付近より、下層は洪積層の堆積物	下層粘土層その上4~5mはシルト含み細砂腐植層見られず。	下層粘土層その上にシルト含み細砂。54km左岸に均一性の粗砂あり。	下層粘土。上層。シルト含み細砂。粘土もある。
高水敷の微地形と堆積物	人工掘削(400~500万 m^3)による河床の低下による段丘化(高水敷の形成)表層1~2mはシルト含み細砂	自然堤防の発達(2~3mの高さ、横方向勾配1/150~1/200)	旧川沿いの自然堤防(横方方向勾配1/250~1/300)	堤防幅狭く、自然堤防の発達良くない。	ゴルフ場が多く高水敷が地形改変されている。あまり自然堤防の発達良くない。	旧川沿いに自然堤防がある。入間筋の土砂による堆積によるかもしれない。
堤内と堤外の地盤高差		2~3m 高水敷の平均上昇速度年1cm程度と推定される。1600年代に堤防築造	2~3m 1600年代に堤防築造			ほとんどない新堤の築造(大正期)
低水路の平面形状	82km以上は岩が露出し砂州の発達は、顕著でなく、それより下流では、2~4列の砂州	砂州の発達が顕著でないが、川幅の広い所にPoint bar発生。旧流路は蛇行度 $S=1.20$ で川幅の10~15倍の蛇行波長であった。	人工掘削河道が大部分。砂州の発達は見られない。旧流路では $S=1.1$ で蛇行波長650m		人工河道が大部分。砂州の発達は見られず。旧流路 $S=1.3$	砂州の発達見られず。
計画高水時の高水敷の水量推定(7000 m^3/s)		水深4~5m $V_m=2m/s$	水深4~5m 1.5~2.0m/s	水深4~5m 1.5~2.0m/s	水深5~6m 1.3~1.5m/s	水深6m 1.2~1.6m/s
低水路満杯時の河床波、粗度と平均流速	$\psi=8\sim10$ $n=0.03\sim0.035$ $V_m=2\sim3m/s$ $V_{max}=5\sim6m/s$	$\psi=13\sim15$ $n=0.025$ 程度	粘土層露出部分多し	粘土層露出 $\psi=13\sim16$ 程度か $n=0.025\sim0.03$	flat bed or dune bed 一部は粘土層露出 $\psi=15\sim22$ $n=0.025$ 程度か	flat bed $\psi=20\sim25$ $n=0.02\sim0.022$ $V_m=3\sim3.5m/s$
洪水時の流砂形態	平均年最大流量程度(1300 m^3/s)のときは河床のA集団(5.5cm)の $\tau_{*A}=0.058$ であり、砂州を形成しながら動き始めるが十分なものではなく、動かない所もある。計画高水時(5800 m^3/s)には $\tau_{*A}=0.15$ 程度となり1時間に4~5万 m^3 のA集団を動かそう。B集団(0.4~0.5mm)の砂は、1300 m^3/s 時には $\tau_{*B}=5.6$ であり、浮遊砂0.2mm以下はワッシュロード的運動形態	$Q=1300m^3/s$ 時の $\tau_{*A}=0.058$ $R/d_A=100$ A集団(3.5cm)は掃流砂 B集団(0.4~0.5mm)浮遊砂しかし河岸肩まで舞い上らず、0.2mm以下ワッシュロード	$d=4\sim5cm$ の砂利はここではほとんど動けない。2cmの砂利に対して $\tau_{*A}=0.068$ 0.4~0.5mmの砂は浮遊砂であるが高水敷上までは舞い上がらない。	土砂の通過区間 河床は粘土質らしい。	低水路満杯時0.4~0.5mmの砂は $\tau_{*A}=2.7$ であり浮遊砂として移動。砂利は動けない。0.2mm以下はワッシュロード的	主モードの河床材料は、0.26mm。低水路満杯時の $\tau_{*A}=2.9$ 0.45mmの砂は、浮遊形式というより、河床近くを跳躍する。0.1mm程度の砂は、高水敷上まで舞い上がっている。

の相互関係を力学的に解析あるいは経験則として評価するということが一般に行なわれている。しかしながら個別河川の河道特性調査を通じて、河床の変動形態は、河岸物質・河床物質の粘着性や層序構造、すなわち堆積の歴史性について十分な認識が無ければ、解釈し得ないことが多いことがわかってきた。ここでは前節で述べた荒川中流部の河床変動や護岸の被災原因を通してこれを見てみよう。

図-22に昭和39年と昭和54年に行われた横断測量結果より、その間の最深河床高の変動量を示した。最深部の変動量は最大6m近くあるが(56km)、ほとんど変動していない場所もある。最深部の変動量の大きい場所は44km、56km、60km、66kmの付近で、いずれも4~5m下降している。この深掘れは資料によると、ますます深くなる傾向にある。またこの変動量の大きい場所は、いずれも河床勾配の変化点に相当している。通常の沖積河川であれば、勾配の変化点は河床に働く掃流力が小さくなる所であり、堆積傾向となる所であるが、荒川中流部の場合は、低水路の人工的直線化によって、低水路部の土砂の輸送能力より供給土砂量が少なく、全般的に下刻化しつつある河道である。セグメントの結接点の直上流には泥層が存在し、この泥層が一時的侵食基準面となり、河道の下刻化を防ぎ、セグメントの形成因となっている。

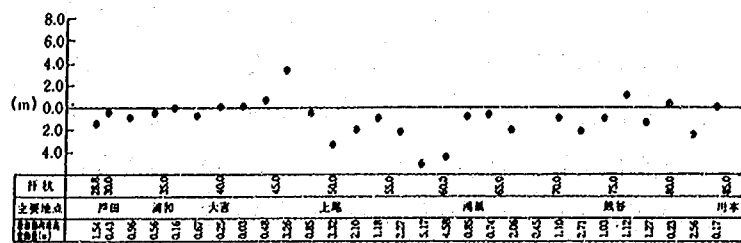
河床勾配の変化点は、この泥層が破壊されつつある所であり、下刻化が進むのである。このことは、図-23に示す横断形状の経年変化に示されるように、河床の一部が急激に低下する形で下刻化が進むことによく示されている。逆に河床の低下の進まない所は、横断形状が台形状であり、河床は同一の侵食抵抗を持つ泥層の存在が暗示される。多少河床低下のある所は質の違う堆積層が一枚一枚はがされていくような形態を取っているようである(図-24)。ただし扇状地扇端である74km地点は、いくらか河床が上昇傾向にある(図-25)。ここはセグメント1から運ばれてきた砂利が堆積するところである。なお扇状地部では昭和37年ごろから砂利採取が始まり46年度に砂利採取が禁止となっている。この間の72~84km区間の河積は400~500万 m^3 増となっている。昭和46年から昭和54年では24万 m^3 ほど河積が減少しており、この間平均3万 m^3 の砂利の堆積があったことになる。

次に護岸の設置位置について述べてみよう。護岸の設置位置は、通常河道の平面形状や砂州の配置構造との関係で説明されることが多い。すなわち河岸侵食位置は、流水の集中(水衝部の発生)との関連性で説明される。しかし荒川の場合には、前述した河床の垂直変動特性との関係から説明されなくてはならないことの方が多い。

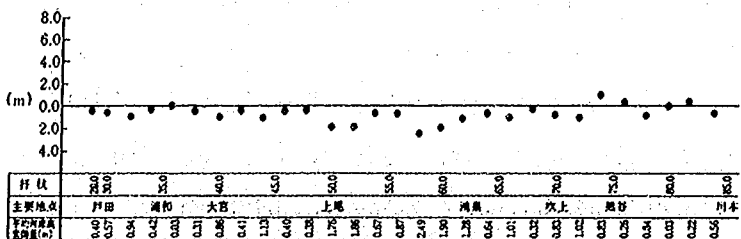
護岸の分布状況を図-26に示す。この図は昭和41年から昭和52年までの工事記録から取ったものである。なお同図には昭和56年8月洪水後の災害復旧工事位置も示しておいた。ここで1か所に多数の護岸位置が示されている所は、設置された護岸が破壊され、再度護岸が設置されたことを示す。現在の護岸はほとんどが災害復旧工事として施工されており、洪水等によって河岸が侵食を受け崩れた場所、既存の護岸が破壊された場所を重点に順次施工されている。

護岸の設置回数、設置密度の高い区間の理由を考えてみたい。

セグメント1で護岸の設置回数の多いのは、82.5km付近左岸および81km地点右岸である。82.5km地点は、ちょうど河床が、岩から砂利に変わる所であり、みお筋が左岸に寄った所である。81km地点は、左岸によった水が右岸に寄ってくる所である。このみお筋位置はほとんど動いていない。この地点下流より、川幅が拡がり、4列程度の砂州が発生しだす。河岸侵食されやすい所は、84kmより上流の単列砂州の平面形態をこの地点まで持っており、川幅の狭いこともあって洪水時には流速が速く、



最深部河床高変動量 (昭和39年～昭和54年)



平均河床高変動量 (昭和39年～昭和54年)

図-22 平均河床高および最深河床高変動量 (昭和39年～昭和54年)

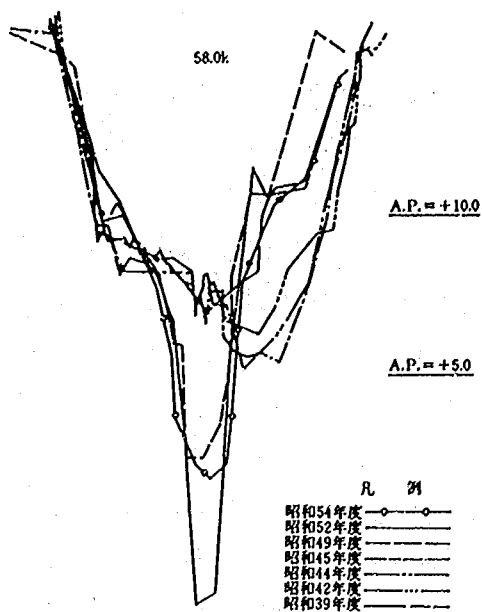


図-23 58km地点横断形状の経年変化 (縦横ひずみ度10)

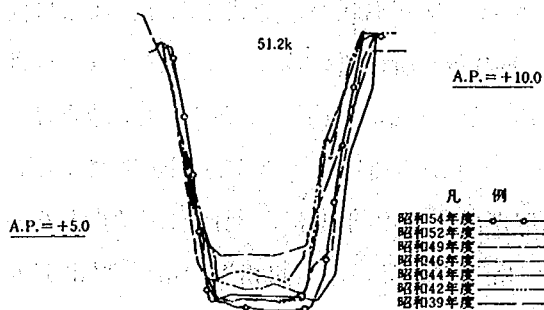


図-24 51.2km地点横断形状の経年変化 (縦横ひずみ度10)

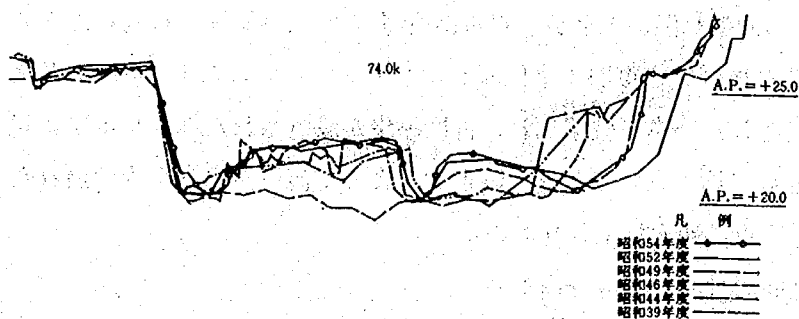


図-25 74km地点横断形状の経年変化 (縦横ひずみ度10)

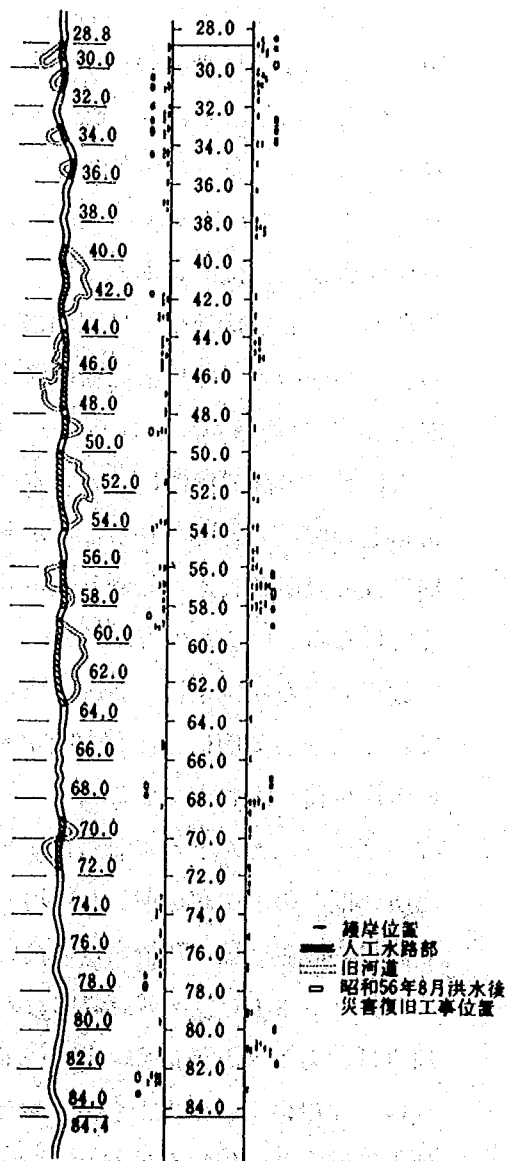


図-26 護岸の設置位置

また上流からの供給土砂量の減少もあって、河床が低下傾向にある所である。

セグメント2-1-①では、このセグメントの上流部の74～75km地点および、68km右岸に護岸の設置数が多い。74～75km地点は扇面の直下流にあたり、砂州の形態が多列から単列河道に変わり、また堆積空間であることもあって、河岸侵食が起りやすい所である。68km右岸は、大芦橋の近くであり、人工掘削河道の直下流にあたっている。なぜここで河岸侵食されやすいかは良くわからないが、68.8km地点の河床横断形状の経年変化図を見ると、昭和39年から42年にかけて最深河床が2.5m低下しており、河床低下による河岸崩壊に原因しよう。この区間(68.3～68.8km)は、昭和23年(1948)に開削した人工河道の部分であり、昭和39年ごろ河床の堆積物が幾分侵食に強いものから、弱い堆積物の層に変わり河床低下が進んだものと考えられる。

セグメント2-1-②の区間は河岸侵食があまり生じていない。後背湿地性堆積物、洪積層を掘削した人工河道部分が多く、侵食に対して強い河床および側岸物質から水路が成るためであろう。

セグメント2-1-③では58km～56km区間にかけて多数の護岸が設置された。この区間が河床低下区間にあたり、河床低下によって引き起こされる河岸崩壊によって護岸の破壊が進むものと思われる。

セグメント2-2では、44km～45km区間で護岸の設置が多い。この区間の末端は入間川との合流点に当たる所で、セグメントの変わり目の所にあたる。44.4km(入間川合流点直下流)と44.0km地点の平均河床および最深河床の差は2～3mもあり、ここで河床高に段差が生じている。44.4kmの河床には流れに対する侵食力が強い層があるようで、44.4～44.8kmが上流のセグメントの一時的侵食基準面にあたり、最深部の河床材料は下流の44.0kmとは異なった質のものと考えられる。護岸の設置数が多いのは、入間川との合流点に当たり、また国道16号が横断しており治水上重要地点であることが第一に原因すると考えられる。

セグメント3では38km右岸に護岸の設置回数が多い。ここは、わん曲部の外わん側にあたり、流水が集中し右岸沿いにみお筋がある。本堤と低水路との距離がほとんどないこともあって護岸が集中的に設置されている。38km以下は首都に近くなり、高水敷の利用度も高いこともあって、護岸の設置数が多くなる。ほぼみおが河岸に寄る方に護岸が設置されている。なお横断面形状の経年変化を調べてみると、この区間は、護岸の設置されている側の対岸が侵食されている所が多く、その侵食面はA.P.-1mより上層が削られている。河岸物質は表面からA.P.1～2mは、泥層・シルト・細砂の互層からなる自然堤防性の堆積物の所が多く、+1～-2m間は海成・汽水成の砂層から成り、-2m以下は粘土層となっている。このような層序を持つ河岸が多いことが河岸侵食量が多い一因であろう。またこのセグメントでは、以前夜間ポンプ船による盗掘があり、それも河岸侵食の原因になっていた。

あとがき

ここで述べたことは、あまり技術書や教科書に書かれていません。難しい話ではありませんが、案外世間一般の常識と違っているのとまどいがあるかも知れません、詳しくは拙書「沖積河川学」を参照下さい。

注1) 河床上に巻尺等で直線を張り、一定間隔(河床材料の最大径以上)ごとに、その直下にある石を採取し、石径 $x=d$ の個数分布密度 $d(x)$ を作り、これを積分したもの。これは表層にある石径 $x=d$ の面積

支配確率密度を積分したものに等しく、もし地中も同様な石礫の構成であれば、通常のふるい分けによる粒径加積曲線に等しい。詳しくは文献6)pp.12-15を参照されたい。

参考文献

- 1) 山本晃一, 1988; 河道特性調査のすすめ, 地質と調査1988年第4号, pp.11-19.
- 2) 山本晃一, 藤田光一, 赤堀安弘, 大田知章, 1993; 沖積河川縦断形の形成機構, 土木研究所資料第3164号.
- 3) 山本晃一, 藤田光一, 佐々木克也, 有沢俊治, 1993; 低水路川幅変化における土砂と植生の役割, 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, 土木学会水理委員会基礎水理部会, pp.233-238.
- 4) 建設省河川局治水課, 土木研究所, 1991; 河道特性に関する研究—その3, 河床変動と河道計画に関する研究—, 第45回建設省技術研究会論文集.
- 5) 高橋邦治, 服部敦, 藤田光一, 宇田高明, 1996; 大規模洪水による粒径集団別の水系内土砂移動, 第50回土木学会年次学術講演会講演集第2部門.
- 6) 山本晃一, 1994; 沖積河川学, 山海堂.

ダム材料有効利用の現状と今後

ダム部長 藤沢 侃彦

ダム材料有効利用の現状と今後

1. はじめに

わが国における近代的なダムの建設技術は概ね今世紀当初に始まる。1900年に神戸市に造られた五本松ダムはわが国最初のコンクリートダムである。また、1924年に完成した木曽川の大井ダムは機械化施工で造られた最初のコンクリートダムとして知られている。しかし、本格的かつ大規模なダムの建設は、第二次世界大戦後の経済復興を目指し、エネルギー開発を目的とした発電用ダム、洪水調節、各種用水の開発を目的とした多目的ダムの建設によって開花した。以来、今日まで着々と準備が進められている。

この間、ダムの計画、調査、設計、施工、管理技術は日々大きな進歩を遂げているが、ダムの建設技術について見てみると、その発展段階は概ね4つの段階に分けることができる。すなわち、第1期は、上述した五本松ダム、大井ダムに代表される近代的なダム建設技術の確立時期であり、構造的に信頼性が高く、また構造設計理論も簡便明解な重力式コンクリートダムが数多く造られた時期である。第2期は1960年代であり、構造解析技術を駆使して堤体積の削減を図り、ダム建設の経済性を追求したアーチ式コンクリートダム、中空重力式コンクリートダムが全盛を迎えた時期であり、上椎葉、鳴子、黒部（以上、アーチ式コンクリートダム）、井川、畑薙第二ダム（以上、中空重力式コンクリートダム）などが造られた時期である。

続く第3期は1960年代後半～1970年代前半であり、高度成長に伴う人件費の高騰と相まって、材料費の削減よりも人件費の削減を目指し、機械化施工が指向された時期であり、大型土工機械を利用したロックフィルダムの建設が盛んになった時期である。この時期に造られたロックフィルダムには御母衣、九頭竜、岩屋、高瀬、白川ダムなどがある。

第4期は1970年代後半～1990年代であり、ロックフィルダムと同様な機械化施工による経済性の追求をコンクリートダムにも適用した時代であり、RCD工法などの合理化施工法が確立された時期である。このような合理化施工法の開発はわが国のダム技術を飛躍的に発展させた。RCD工法によるダムは島地川、玉川、境川、宮ヶ瀬ダムなどがある。

このように、ダム建設技術の発展は安全性確保を前提とした経済性の追求と深く結びついている。しかし、経済性の追求は、堤体積の削減という「設計の合理化」に始まり、続いて機械化施工という「施工の合理化」に変化していった。そして、今日、新たなる経済性の追求として「材料利用の合理化」が検討されている。すなわち、ダムサイト近傍で採取される材料の特性を最大限考慮したダムの設計を行い、材料の有効利用を図り、経済性を追求しようという考え方である。

「材料利用の合理化」という考え方は、ロックフィルダムの設計、施工では多少考慮されていたが、コンクリートダムでは良好な材料を前提とした設計、施工が行われ、このような考え方は取り入れられていなかった。しかし、近年、原石山から採取される骨材の歩留まり低下が顕在化し、骨材の有効利用を図ることが経済性の追求と併せて、資源、環境面からも大きな課題となっているのは周知のと

おりである。コンクリートダム建設におけるこのような経済性の追求は「最適骨材評価コンクリート」として研究されているところであるが、ここでは、既往の施工事例等の中から築堤材料の有効利用を図っている例を取り上げ、「材料利用の合理化」の現状と今後について述べる。

2. 原石山における骨材採取状況の現状

2.1 概要

ここでは、ダム築堤材料の利用技術の合理化を進める上で重要となる、実際のダム建設現場の原石山におけるコンクリート骨材採取状況の現状把握調査結果について示すこととする。本調査は原石山から骨材を採取しているコンクリートダムのうち比較的新しいものについて実施したものであり、原石山掘削終了ダム15、原石山掘削中ダム9の計24ダムを対象としている。調査方法としてはアンケート手法を用い、各ダム建設現場における①原石採取状況（実態調査）、②廃棄岩の生じる理由やその判定方法など廃棄岩の取り扱い法（実態調査と意識調査）、③原石の有効利用に関する現場の声や意見（意識調査）の3項目に対して調査を行った。

2.2 原石採取状況

各ダムの原石山で廃棄岩がどれだけあるかを把握するために、原石採取状況を調査した。この際、表土や岩盤の定義が各ダム毎に異なることが予想されたため、積算上の区分の「表土」「軟岩Ⅰ」「軟岩Ⅱ（機械掘削）」「軟岩Ⅱ（発破掘削）」「硬岩」に分けて、計画時および実績のそれぞれについて、掘削数量とそのうちの原石使用量、廃棄岩量（骨材プラントに入る前の廃棄岩を示す、つまり廃棄岩量＝掘削数量－原石使用量）について調査した。

これらのデータより求めた表土を除いた歩留まり（＝原石使用量／（掘削量－表土量）×100％）の平均値を、掘削が終了したダムと掘削中のダムのそれぞれについて図-2.1に示す。これを見ると、実績の平均は54％で、表土を除いた岩のうち5割程度が廃棄されることがわかる。次に、図-2.2に示す表土を含めた廃棄岩の内訳（実績）をみると、表土が相対的に多くなると予想される掘削中ダムにおいても「表土」は23％しかなく、「軟岩Ⅰ」が3割以上と最も多いことがわかる。また、「軟岩Ⅱ（機械掘削）」まで含めた土石が6割程度となっている。一方、

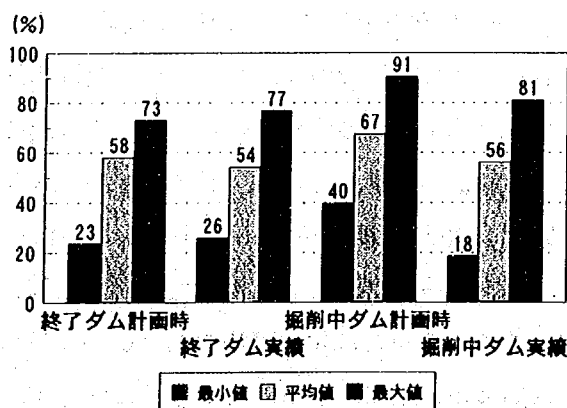


図-2.1 歩留り

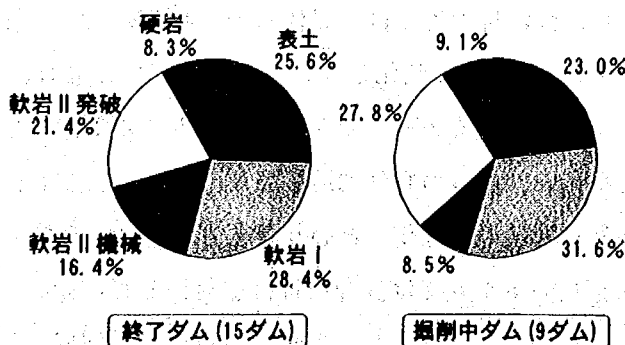


図-2.2 廃棄岩内訳（平均値）

岩石（軟岩Ⅱ（発破掘削）、硬岩）中の廃棄岩の割合を図-2.3に示す。これを見ると、実績で2割以上が廃棄されていることになる。これらのことから、今後原石を有効に利用していく上では、表土以外の「軟岩Ⅰ」「軟岩Ⅱ（機械掘削）」を如何に利用していくか、岩石内の廃棄岩を如何に少なくするかが課題となると考えられる。

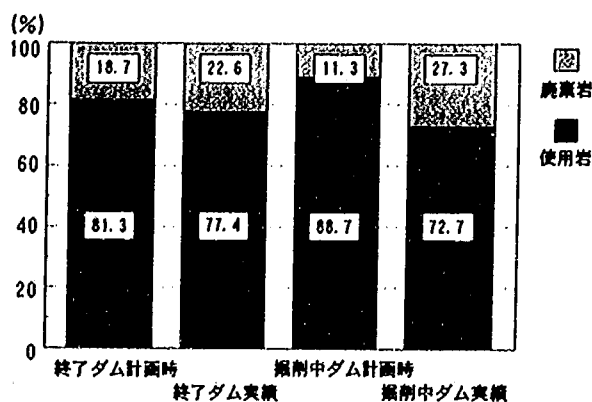


図-2.3 「岩石」中の歩留り (平均値)

2.3 廃棄岩の生じる理由と判定方法

各ダムでの廃棄岩が生じる理由を図-2.4に示す。図中で「有害鉱物を含む」を理由としているのは4ダムに過ぎないが、4ダムとも主な廃棄理由として取り上げているのは特徴的である。有害鉱物の内訳はモンモリロナイト(4)、ローモンタイト(1)、トリディマイト(1)であった。したがって、モンモリロナイト等を含む原石の有効利用方法について調査していく必要があるといえる。

また、それぞれの廃棄理由を回答したダムの実績歩留りの平均値（終了ダム）を図-2.5に示す。図-2.4で示した「風化が厚い」「断層変質帯が多い」が主な廃棄理由となっているダムでは、平均値に比べて低い歩留りとなっている。さらに、それぞれの廃棄理由を回答したダムの廃棄岩内訳を図-2.6に示す。図から、「風化が厚い」「互層構造」では他と比べ廃棄される表土～軟岩Ⅱ（機械掘削）の

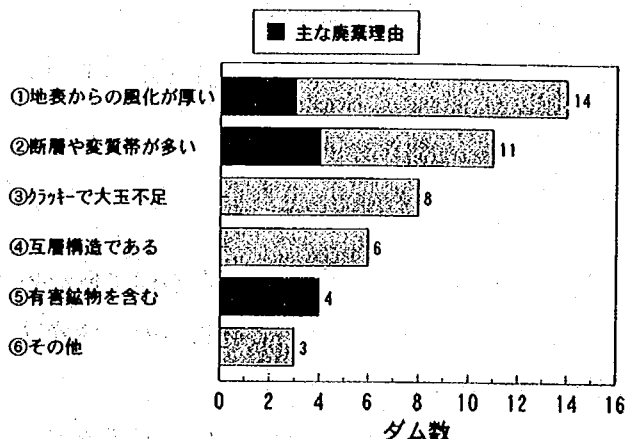


図-2.4 廃棄岩の生じる理由

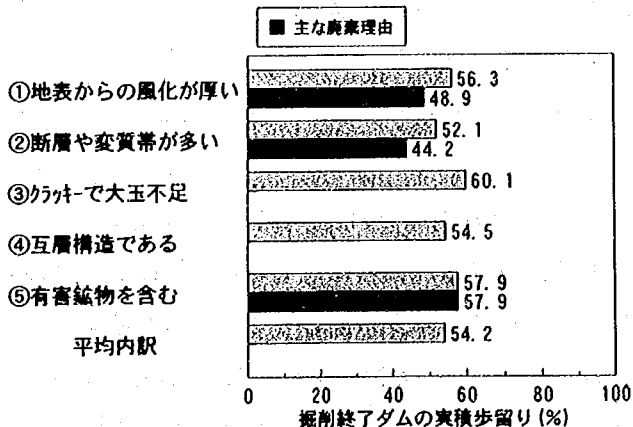


図-2.5 廃棄理由毎の歩留り

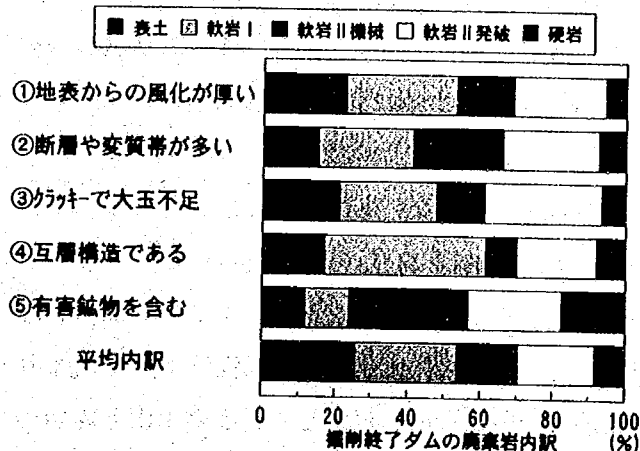


図-2.6 廃棄理由毎の廃棄岩内訳

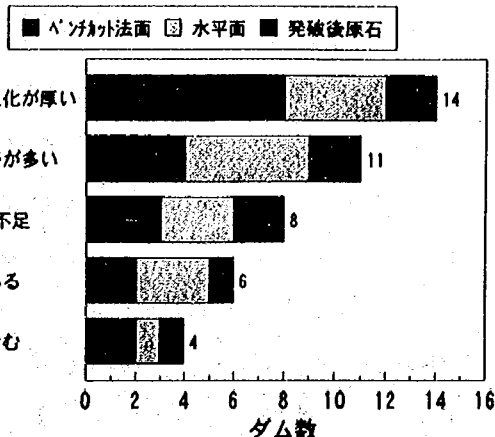


図-2.7 廃棄理由と判定時期の関係

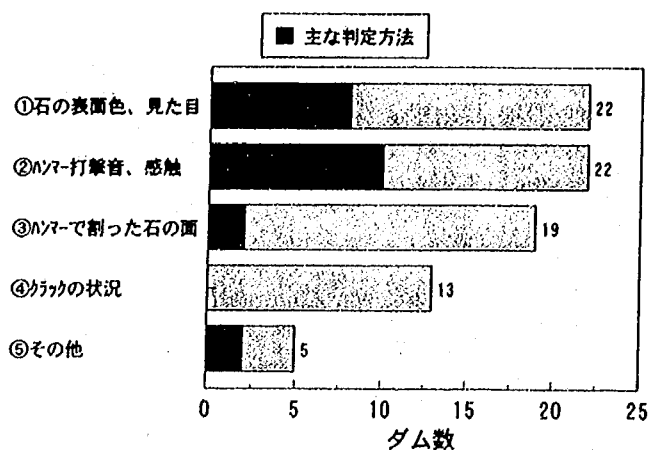


図-2.8 廃棄岩の判定方法

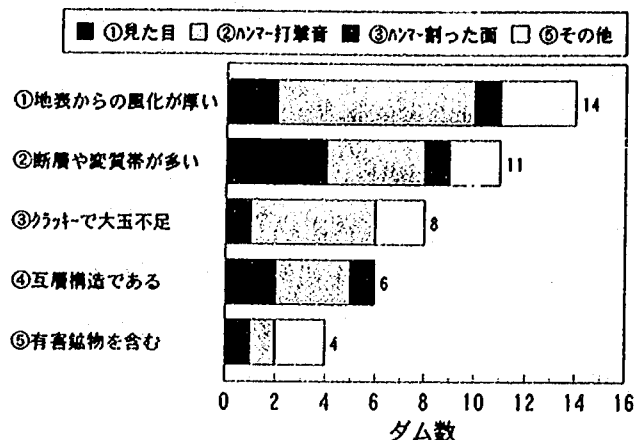


図-2.9 廃棄理由と主な判定方法の関係

割合が大きくなっている。また、「有害鉱物を含む」では、廃棄される軟岩Ⅱ（発破掘削）～硬岩、特に硬岩の割合が大きくなっていることがわかる。

次に、廃棄理由と廃棄岩の判定時期の関係について図-2.7に示す。これによると、判定時期は「風化が厚い」場合は「ベンチカット法面」、「断層変質帯が多い」場合は「水平面」が多いようであるが、明確な特徴は見られない。ただ、全体に発破後よりも発破前に廃棄岩の判定をしているようである。

廃棄岩の判定方法について図-2.8に示す。複数回答可とし、さらにそのうち主なものを一つ回答してもらった。主な判定方法は「ハンマー打撃音」「見た目」が最も多かった。「その他」は、X線分析や粘土鉱物脈の脈度数による判定などであり、全て有害鉱物が含まれる場合に限られていた。

また、廃棄理由と主な判定方法の関係を図-2.9で見ると、「風化が厚い」「クラッキーで大玉不足」は「ハンマー打撃音」が、「断層変質帯が多い」は「見た目」が多い。

2.4 各ダム現場での廃棄岩に対する要望、意見

現場における廃棄岩に対する意見等は次のとおりである。図-2.10は歩留り向上のためには何が必要かを選択肢の中から回答してもらった結果である。「簡易試験の確立」、廃棄岩と使用岩の「篩分け設備」、比重、吸水率等の「骨材品質規準の緩和」が挙げられている。

回答が各ダムの現状を反映していると仮定して、歩留り向上のための項目と廃棄理由の関係を図-2.11で見ると、「風化が厚い」ダムでは「簡易試験の確立」「篩分け設備」が求められている。また、「断層変質帯が多い」ダムでは「篩分け設備」が、「互層構造」が問題となるダムでは「簡易試験の確立」がそれぞれ求められている。一方、「有害鉱物」が問題となるダムでは、「品質規準の緩和」よりも「簡易試験」や「篩分け設備」が求められている。

また、図-2.12は現在廃棄している原石（表土など明らかに使えないものを除く）を骨材として使用する場合、どんな課題が生じるかを調査したものである。「⑥コンクリートの耐久性低下」「①プラントで大量のスラッジ発生」「⑦コンクリートの強度低下」「④水分量、コンシステンシー等品質管理が困難」が多く、逆に「②大玉不足でバランスが崩れる」「⑤コンクリートの施工性低下」はあまり問題とされていない。また、回答が各ダムの現状を反映しているものと仮定して、廃棄理由と課題の

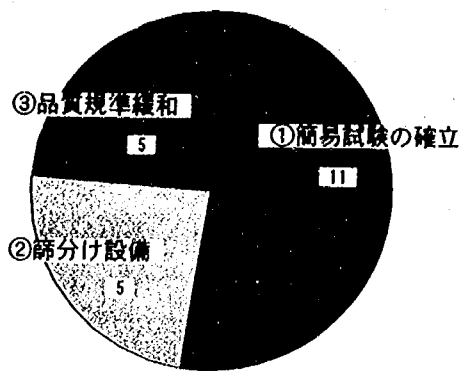


図-2.10 歩留り向上のための項目

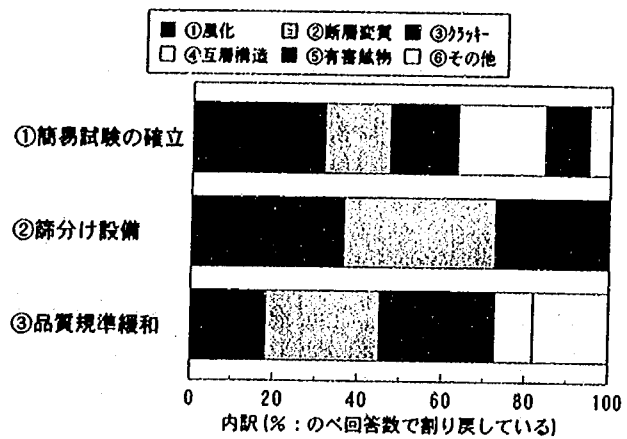


図-2.11 歩留り向上のための項目と
廃棄理由の関係

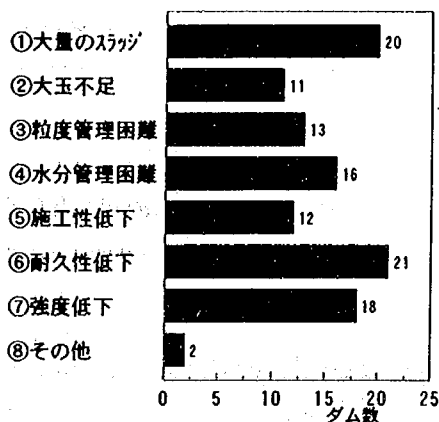


図-2.12 廃棄岩使用時の課題

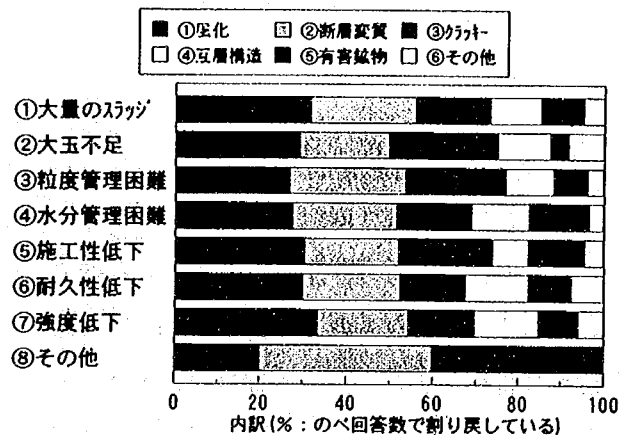


図-2.13 廃棄岩使用時の課題と
廃棄理由の関係

関係を図-2.13で見ると、「風化が厚い」ダムでは「大量のスラッジ発生」「コンクリートの強度低下」を課題としている。また、「断層変質帯が多い」ダムでは「大量のスラッジ発生」「粒度管理困難」「水分管理困難」を課題としており、「クラッキーで大玉不足」となるダムでは「大玉不足」「粒度管理困難」「コンクリート施工性低下」を課題としている。一方、「有害鉱物」に関するダムでは、「水分管理困難」の回答率が高い。

3. 骨材の有効利用の実施例

3.1 Aダム

3.1.1 概要

Aダムは堤高 156 m、堤体積 80 万 m³ のアーチ式コンクリートダムである。アーチ式コンクリートダムは、堤体の構造の安定性を確保するため、その下流に所要の強度を持った岩盤の厚みを必要とする。このため、重力式コンクリートダムと比較するとダム敷の岩盤を深くまで掘削しなければならな

い。そこで、本ダムでは、このようにして掘削された岩盤を堤体コンクリートの骨材として利用している。したがってこのダムでは原石山を設けていない。現在、Aダムでは、ダムの基礎掘削を完了し、堤体コンクリートを約33万m³（平成8年11月20日現在）打設している。Aダムのコンクリートの配合表を表-3.1に示す。

表-3.1 コンクリートの配合

種 類 割合	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	VC値 (秒)	空気量 (%)	水結合 材比 (%)	混和材 換率 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m³)								混和剤	
								水	セメント M	混和材 FA	細骨材	粗骨材					
												150- 80mm	80- 40mm	40- 20mm	20- 5mm	減水剤 (g/m³)	AE剤 (g/m³)
外内部	150	3±1	—	3±1	40.9	30	25	90	154	66	521	410	378	378	410	550	44-55
構造用	80	5±1	—	3.5±1	40.9	30	31	109	187	80	614	—	551	413	413	663	53-67

3.1.2 原石の採取方法

Aダムの基礎岩盤は白亜紀の花崗岩からなり、基礎の掘削量は約190万m³（地山容積）に及んでいる。このうち、コンクリート骨材となりうる硬岩、軟岩Ⅱ（CL級以上の岩盤：CL級岩盤は、亀裂は多いが岩片は硬質なもの）は約79万m³である。

基礎掘削はベンチカット方式で行い、ダンプトラックで原石の運搬が可能な右岸のEL.385mよりも高標高部とEL.320mからEL.260mの範囲、左岸のEL.335mからEL.260mの範囲、および河床のEL.260m以下については、監督員の指示に基づいて利用可能な原石を選別してストックパイルまで運搬した。なお、この範囲においては総掘削量102万m³のうち、原石として約35万m³を採取した。

一方、ダンプトラックで原石の運搬ができない左岸のEL.335mよりも高標高部、および右岸のEL.385mからEL.320mの範囲については、掘削ズリを一旦河床部に落とし、ここから、ダンプトラックでグリズリー（原石選別設備）まで運搬した。グリズリー（スクリーン間隔150mm、傾斜角度37°）では、掘削ズリのうち大粒径の原石のみを選別し、これを再びダンプトラックでストックパイルまで運搬した。（図-3.1、図-3.2）

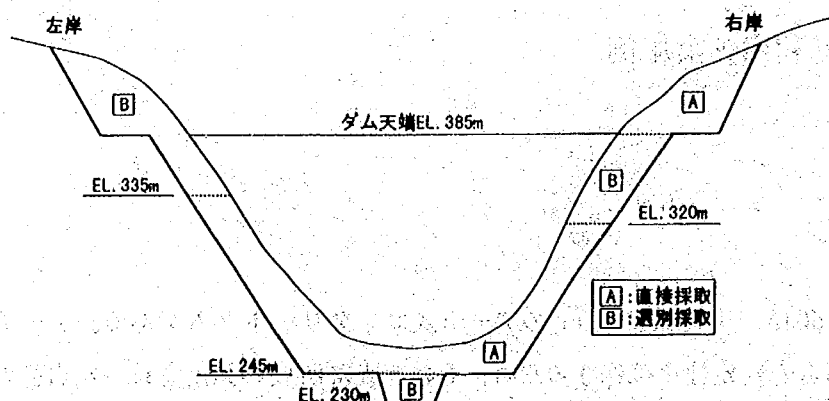


図-3.1 原石採取形態区分

掘削ズリを河床部に落とす際、良好な原石と表土が混合することが懸念されたが、実際には、掘削ズリのうち粒径の大きなものは河床部へ落ちる際に斜面の前方へ転がり出るため、粒径の小さな表土等と自然に分離され、結果として表土の混入をある程度抑えることができた。また、グリズリーを通すことによって、原石に含まれる表土は分離、除去されて良質な原石のみ採取することができた。

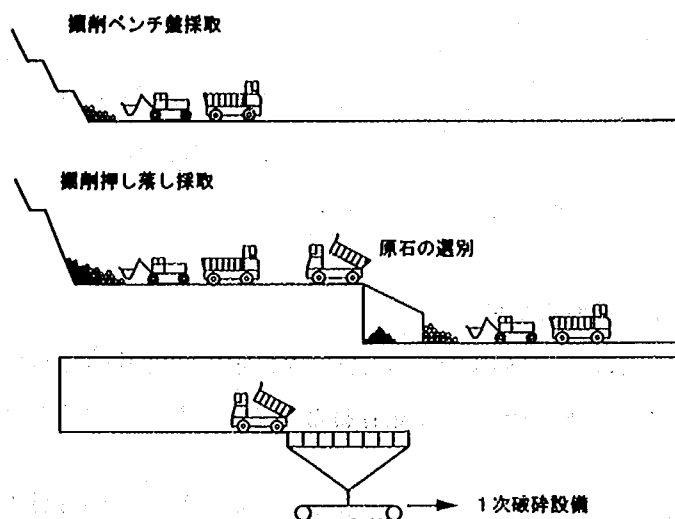


図-3.2 Aダムの原石採取方法

施工実績より、河床部に落とした掘削ズリ約91万 m^3 のうち、グリズリーに運搬された掘削ズリは約77万 m^3 （約85%）であり、グリズリーを通してストックパイルに運ばれた原石は約44万 m^3 （約57%）であった。これにより、必要骨材の全量を基礎掘削ズリの転用により賄うことができた。なお、原石採取に当り特に留意した点は、コンクリート量の変動に対しての対応ができるように、採取量に余裕（必要量約75万 m^3 に対し、約79万 m^3 を採取）を持たせたこと、安定した骨材品質を確保するためにストックパイルに番地を付け、ストックパイルの番地と原石の品質との対応がとれる

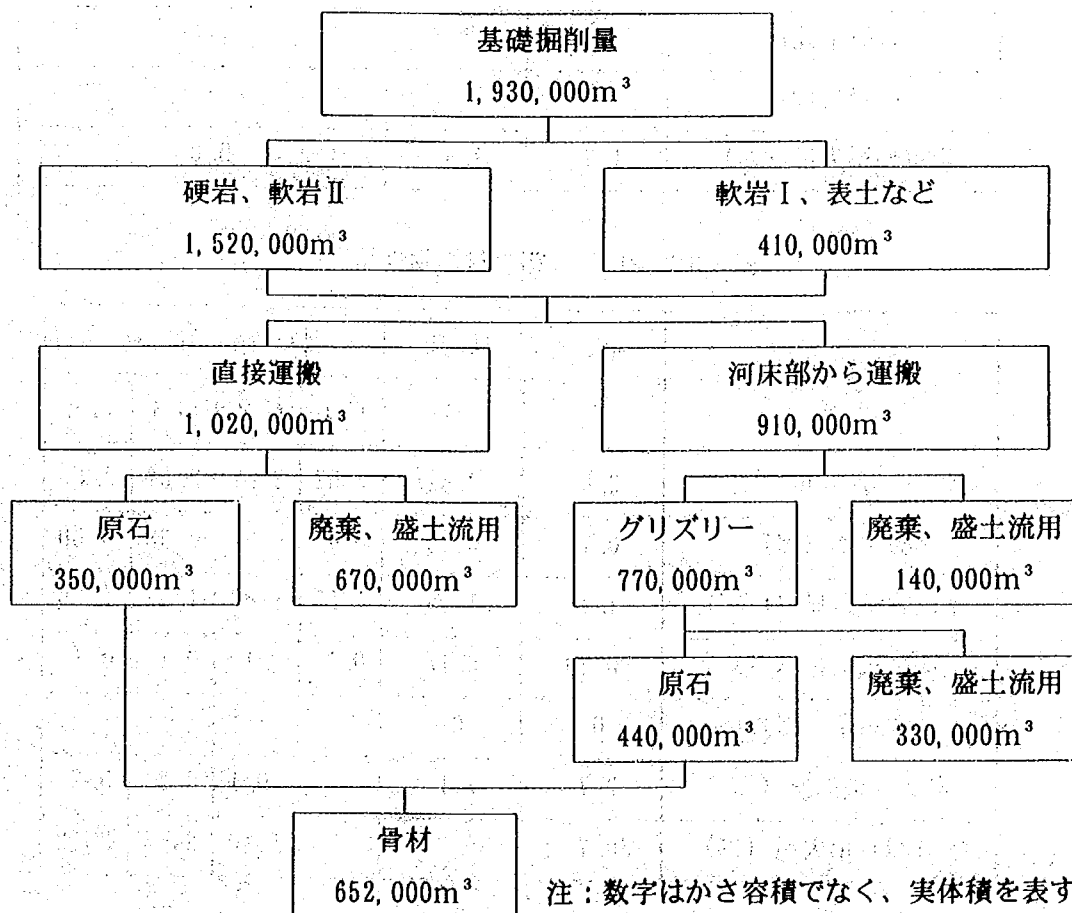


図-3.3 骨材の生産実績

ように配慮した。

ストックパイル以降の骨材製造過程は、コンクリートの単位水量を低減するため、40mm以下の粗骨材と細骨材の粒形改善（堅型回転式の粒形改善機を使用）を実施した他は通常と変わらない。Aダム の骨材生産実績を図-3.3に示す。

3.1.3 骨材の品質

生産された骨材の物性値を表-3.2に示す。骨材の品質は規準値と比較して十分満足のいくものであり、ダム基礎の掘削ズリを骨材として使用しても全く問題がないことが確認された。

表-3.2 (1) 細骨材の物性値

試 験 項 目	調 査 時 試 料		製 品 骨 材
	A	B	
比 重	2.62	2.64	2.60
吸水率 (%)	0.91	1.04	0.69
単位容積質量 (t/m^3)	1.62	1.60	1.70
洗い損失量 (%)	1.60	2.00	0.85
有機不純物	合格	合格	合格
軟石量 (%)	—	—	—
安定性損失量 (%)	1.3	1.4	0.6

表-3.2 (2) 粗骨材の物性値

試 験 項 目	調 査 時 試 料		製 品 骨 材			
	A	B	G 1	G 2	G 3	G 4
比 重	2.62	2.64	2.62	2.62	2.62	2.63
吸水率 (%)	0.74	0.49	0.47	0.51	0.58	0.60
単位容積質量 (t/m^3)	1.48	1.49	1.65	1.63	1.53	1.56
洗い損失量 (%)	0.20	0.18	0.1	0.1	0.1	0.1
軟石量 (%)	0	0	—	—	—	—
安定性損失量 (%)	2.7	2.1	—	0.1	0.2	0.2
すり減り損失量 (%)	30.7	29.3	—	12.6	24.3	23.2

3.2 Bダム

3.2.1 概要

Bダムは堤高70.4m、堤体積約70万m³の重力式コンクリートダムである。重力式コンクリートダムの堤体コンクリートは、主として外部コンクリートと内部コンクリートに分類され、外部の環境に晒される外部コンクリートには高い品質が要求されるが、外部の環境に晒されない内部コンクリートにはそれほど高い品質が要求されない。そこで、一般に、内部コンクリートにはセメント使用量を抑えた貧配合のコンクリートが採用されているが、当ダムでは、内部コンクリートに多少品質の劣る骨材を採用することによって骨材の有効利用を図っている。現在、Bダムのコンクリート打設は完了し、試験湛水を迎えようとしている。なお、Bダムのコンクリートの配合表を表-3.3に示す。

表-3.3 コンクリートの配合

種 類	粗骨材 最大寸法	スランブ	VC値	空気量	水結合 材比	混和材 置換率	細骨材率 s/a	単位量(kg/m ³)							混和剤		
								水	セメント	混和材	細骨材		粗骨材			減水剤 (g/m ³)	AE剤 (g/m ³)
											細骨材	微粉末	80- 40mm	40- 20mm	20- 5mm		
配合	(mm)	(cm)	(秒)	(%)	(%)	(%)	(%)										
外 部	80	3.0±1		3.5±1	52.3	30	30	115	154	66	603		570	427	427	550	59
内 部	80		20±10	1.5±1	69.2	30	30	83	83	36	571	100	634	475	475	300	-
	80		20±10	1.5±1	75.5	30	30	83	77	33	570	110	638	479	479	275	-
	80	3.0±1		3.5±1	78.6	30	32	110	98	42	671		576	433	433	350	20
岩 着	80	3.0±1		3.5±1	62.8	30	30	113	126	54	616		582	436	436	450	43
構造用	80	5.0±1		3.5±1	46.8	30	29	117	175	75	574		568	427	427	625	82

3.2.2 骨材の品質と有効利用の範囲

Bダムの原石山は中生代丹波層群の砂岩、頁岩の互層からなる。一般に、砂岩は骨材に適するが、頁岩は骨材に適さない。当ダムの原石山から採取した岩石の物理試験結果によれば、砂岩は骨材として良好な物性を示すが、頁岩はCM級岩盤であっても安定性損失重量において規準値を満足しない。

一方、原石山における砂岩、頁岩の賦存比率は概ね3:2程度で、頁岩を全て廃棄すると歩留りが著しく低下することが予想された。そこで、堤体積約70万m³のうち44万m³を占める内部コンクリートに粗骨材に限定して頁岩を利用し(コンクリートの耐久性は粗骨材よりも細骨材の品質に左右される)、骨材の有効利用を図ることにした。

なお、粗骨材に頁岩を用いたコンクリートの凍結試験結果によれば、図-3.4

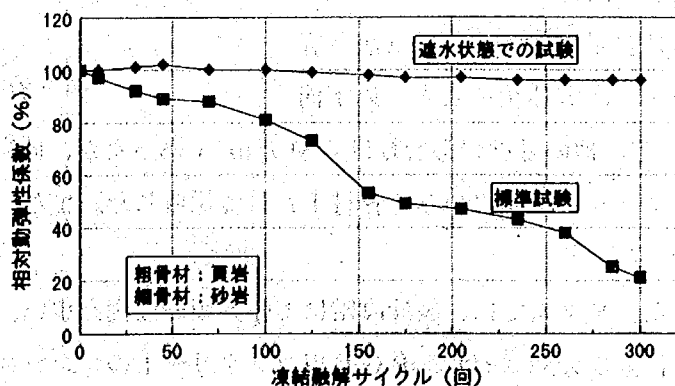


図-3.4 湛水状態における凍結融解試験結果

に示すように、その耐久性指数は30%程度であるが、内部コンクリートの環境に近い遮水状態では相対弾性係数の値は300サイクルで90%以上を示した。また、図-3.5に示すように、コンクリートの圧縮強度に関しては頁岩と砂岩で有意な差は認められなかった。

3.2.3 骨材の製造方法

Bダムでは、砂岩骨材（骨材Ⅰ）と頁岩骨材（骨材Ⅱ）を別々に生産するものとしたが、図-3.6に示すように、破碎設備は1系列とし、運搬、貯蔵設備のみを2系列配備した。

原石山における骨材Ⅰと骨材Ⅱの区別は監督員の指示によるものとし、切り羽での判定に加え、発破後にも再確認を行った。また、砂岩と頁岩の境界部では、小型重機を用いて分別作業を行った。

骨材の破碎設備が1系列のため、効率的な破碎を行う上で原石の仮置きが必要であったが、原石山が横に広いため、特に支障は生じなかった。

堤体コンクリートの配合区分から定まる内部コンクリート用粗骨材の必要量は約25万 m^3 （かさ容積でなく、実体積を表す。以下同様）、その他の骨材の必要量は約31万 m^3 であったが、砂岩と頁岩の賦存比率は3：2程度であったため、マッシュな砂岩のみを骨材Ⅰとして採取した。また、頁岩における原石、廃棄の判断も安全側に判断した。

また、Bダムでは、製砂段階にて乾式製砂設備を用い、濁水処理費の軽減を図った。また、発生した微粒分は分別回収し、RCD用コンクリートのコンシステンシーを改善するためにRCD用コンクリートの細骨材に添加して使用した。

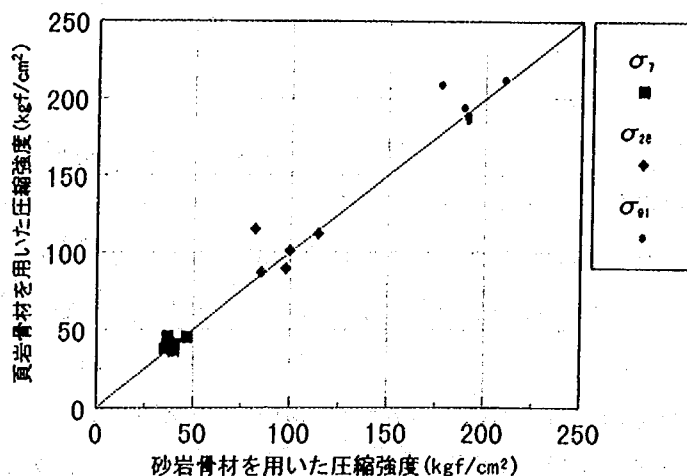


図-3.5 砂岩骨材を頁岩骨材を用いた圧縮強度の比較

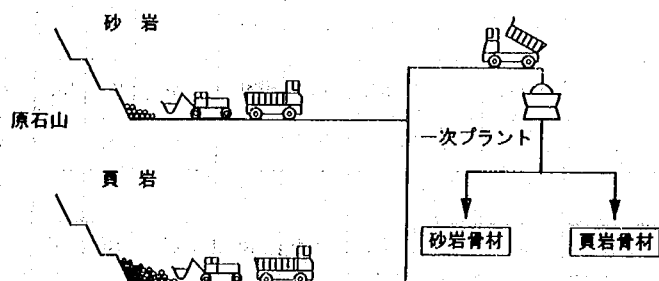


図-3.6 (1) Bダムの原石運搬方法

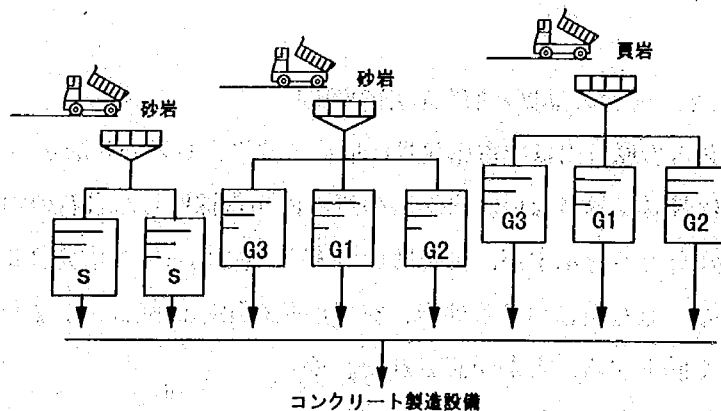


図-3.6 (2) Bダムの骨材貯蔵設備

3.3 Cダム

3.3.1 概要

Cダムは堤高156m、堤体積200万 m^3 の重力式コンクリートダムである。当ダムの原石山から採取される骨材にはローモンタイトやモンモリロナイトが含まれ、ローモンタイトはコンクリートの耐久性、モンモリロナイトはコンクリートの施工性に大きな影響を及ぼすことが懸念された。このため、コンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼすと考えられる外部コンクリートの細骨材には河床礫を砕砂にして用いることとした。しかし、外部の環境に晒されない内部コンクリートにはそれほど高い耐久性が要求されないため、原石山から採取される細骨材を用い、原石の有効利用を図ることとした。

また、モンモリロナイトを多量に含む原石はコンクリートの過早凝結をもたらすが、骨材の有効利用を図るため、超遅延剤を用いて対処するものとした。

3.3.2 骨材の品質と有効利用の範囲

Cダムの原石山は新生代中新世の火山礫凝灰岩からなる。原石山から採取した岩石の物理試験結果を表-3.4に示す。表によれば、骨材の物理試験結果は規準値を満足しているが、骨材中には、ローモンタイトを0.7%程度、モンモリロナイトを4%程度含む。

ローモンタイトがコンクリートの耐久性に及ぼす影響は細骨材において顕著であるから、外部コンクリートの細骨材には河床礫から製造した砕砂を用いることとした。しかし、内部コンクリートにおいては耐久性の要件が緩和されることから、必要な細骨材量約52万 m^3 のうち約40万 m^3 には原石山から生産した細骨材を用いた。

表-3.4 原石の物理試験結果

項 目	新鮮部	準風化部
比 重	大半が2.6以上	大半が2.6以上
吸水率(%)	大半が3%以下	大半が3%以下
一軸圧縮強度(kgf/cm^2)	1000~1500	1000~2000
すり減り減量(%)	15.0~18.2	
安定性損失重(%)	1.7~25.0	
有害物質含有率(%)	・ローモンタイト - EL300m以上 平均1.97% - EL300m以下 平均0.69% ・モンモリロナイト - EL300m以上 平均7.49% - EL300m以下 平均4.19%	

また、モンモリロナイトが骨材中に多量に含まれると、コンクリートの過早凝結が顕著になり、施工性が極端に低下するが、これについては超遅延剤を用いることにより対処するものとし、これによ

って骨材の有効利用を図った。

なお、骨材の必要量196万 m^3 を確保するため、原石山をEL.155～500 mの間で掘削したが、EL.295m以上はローモンタイトの含有量が2%に及んだため、全量廃棄する結果となった。

3.3.3 骨材の製造方法

骨材中に含まれるローモンタイト、モンモリロナイトの含有量を抑制するため、原石中に含まれるローモンタイト、モンモリロナイトの許容値をそれぞれ1.0%、10%とした。ローモンタイト、モンモリロナイトの含有量の管理は図-3.7に示すフローに基づいて実施した。

すなわち、原石山では、ベンチカット用の発破孔の削孔時にくり粉を1 kg程度採取し、これをX線回折器にかけてローモンタイト、モンモリロナイトの含有量を測定管理した。試料の採取は、幅10 m×奥行10 m×高さ7.5 mを1ブロック(750 m^3)として各ブロック毎に行った。ここで、ローモンタイト、モンモリロナイトの含有率が許容値を超えた場合、試料を採取した該当ブロックは全量廃棄した。

また、骨材の破碎工程では、ローモンタイト、モンモリロナイトを含む原石は細粒化しやすいため、一次破碎の段階で5 mmアンダー分は全て廃棄するものとした。

さらに、製品段階でもローモンタイト、モンモリロナイトの含有量をチェックするものと

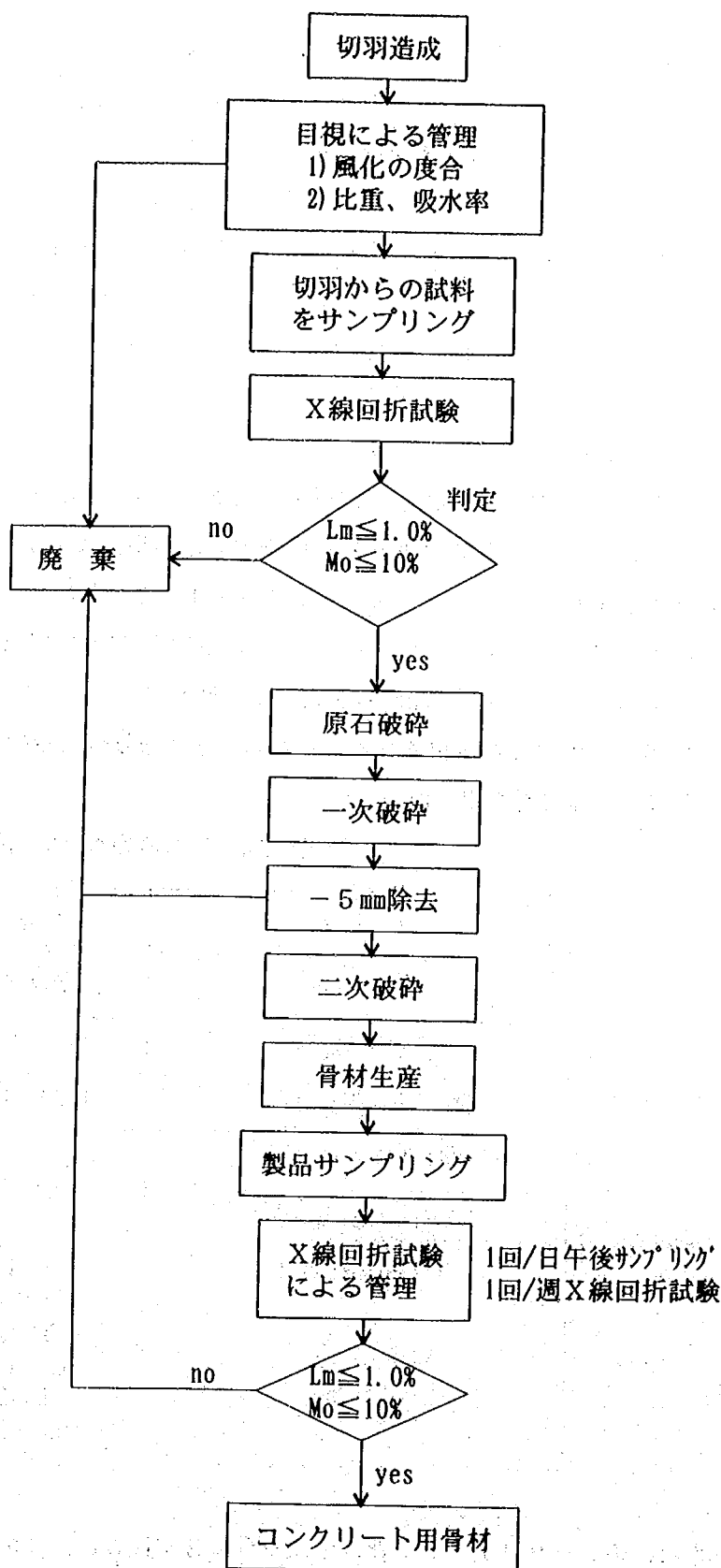


図-3.7 Cダムの原石管理フロー

し、ベルトコンベア上で1日1回、粗骨材3kg、細骨材3kgをそれぞれ採取し、X線回折器にかけて管理を行った。

3.3.4 骨材の品質

生産された骨材の物性値を表-3.5に示す。骨材の品質は規準値と比較して十分満足のいくものであった。

しかし、粒径150～80mm骨材が運搬時に破碎し（主としてホッパー受け入れ時）、そのまま計量すると小粒径の骨材が多くなることが確認されたため、ミキサー部で篩い分け試験を行い、その結果を基にバッチャープラントでの計量調整を行った（配合ではG1：G2：G3：G4＝1：1：1：1であるのに対し、一例としてバッチャープラントではG1：G2：G3：G4＝0.65：0.97：1.12：1.07で計量(残りは-5mm)）。その結果、所定のコンシステンシーを確保することができた。

表-3.5 骨材の物理試験結果

項 目	細 骨 材		粗 骨 材			
	S1	S2	5～20mm	20～40mm	40～80mm	80～150mm
比重	2.56	2.65	2.64	2.65	2.66	2.67
吸水率(%)	2.20	2.16	1.71	1.34	0.96	0.65
安定性損失量(%)	9.9	7.6	14.9	12.6	6.4	2.9
洗い損失量(%)	2.85	2.36	0.38	0.40	0.46	0.39
単位容積重量(t/m ³)	1.54	1.59	1.52	1.54	1.63	1.67
実績率(%)	61.6	61.3	58.5	59.1	62.1	63.0
軟石量(%)	—	—	1.5	1.0	0.3	0
すり減り減量(%)	—	—	13～14			

3.3.5 超遅延剤による過早凝結対策

細骨材に含まれるモンモリロナイトの含有量は平均で2.5%程度、最大で7%(1回)であった。モンモリロナイトが細骨材中に過度に含まれるとコンクリートの過早凝結が生じ、その施工性が著しく低下するため、超遅延剤を用いてVC値の経時変化を調整するものとした。予めVC試験、大型供試体試験を行って、コンクリート温度、モンモリロナイトの

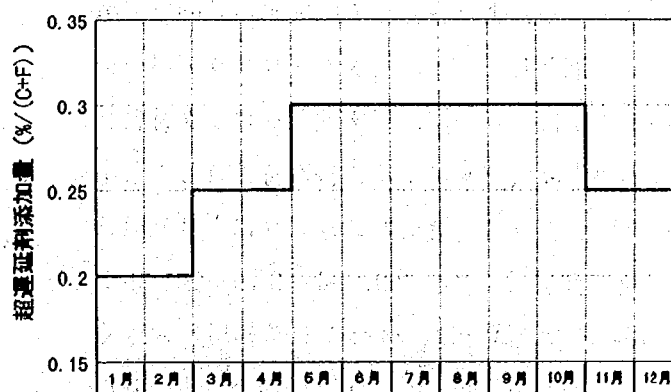


図-3.8 超遅延剤の年間添加量計画

含有量、超遅延剤の使用量とVC値の経時変化と締固め密度、圧縮強度への影響を調べ、練混ぜ後4時間まではVC値が50秒を超えないように超遅延剤の添加量を決定した。その結果、図-3.8のような管理曲線を作成して配合管理を行った。夏季における超遅延剤（グルコン酸塩系）の添加量は最大0.3%であった。

3.4 泥流堆積物をロック材料として有効利用した例

3.4.1 概要

Dダムは堤高36.5m、堤体496千 m^3 の傾斜コア型ロックフィルダムである。本ダムでは上流に堆積した泥流堆積物を掘削しその掘削土を粒度調整してダム堤体材料として用いることとしている。

3.4.2 有効利用方法

ゾーン型フィルダムのロックゾーンは強度を有し、かつこのゾーンの材料が透水性材料と呼ばれるように、締固め後も高い透水性を有することが要求される。

Dダムで用いようとしている泥流堆積物は礫材料と共に細粒分を多く含み、それが混合された状態であるので、締固め後の透水性はロックゾーン材料としては小さいものとなる。このため泥流堆積物の細粒分をカットし、残りの礫材料を用いれば所要の性質を満足し得る可能性があるとの発想から、グリズリーバーにより細粒分を除去する試験を実施した。結果として10mm間隔のグリズリーバーを用いることにより強度、透水性ともロック材料としての要求品質を満足する材料が得られることが判明した。グリズリー構造とグリズリーにより分級された粒度曲線等を図-3.9、図-3.10、図-3.11に示す。この試みは、材料の有効利用に大きく資するものであるが、泥流性堆積物を将来の貯水池内から採取することにより、貯水池容量の増大に資すること、他からの採取運搬に比較して残土処理場の軽減も含めて工費の縮減等に資する効果は極めて大きいものと考えられる。

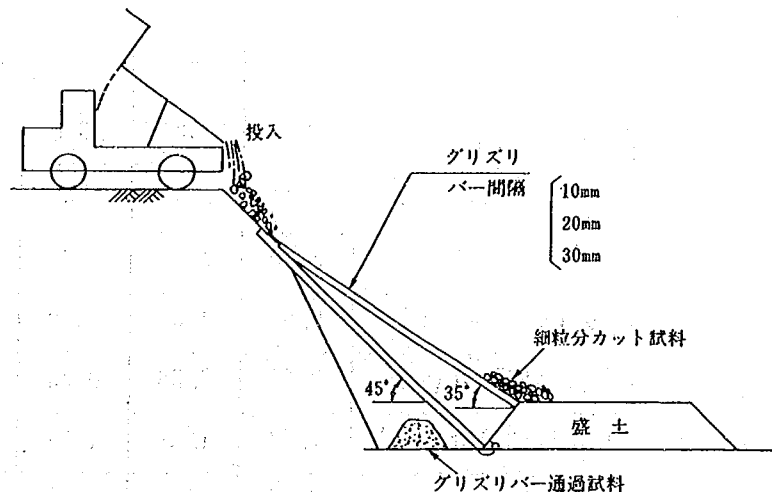


図-3.9 分級試験方法

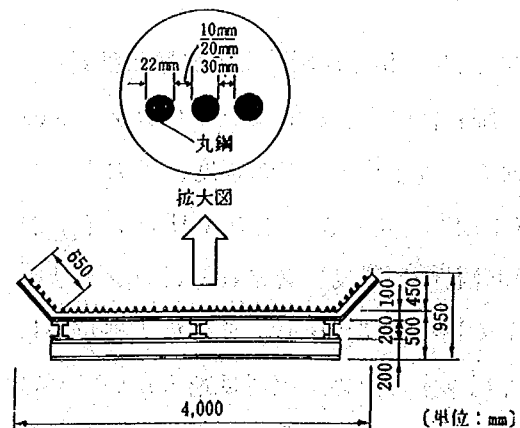


図-3.10 グリズリー構造図

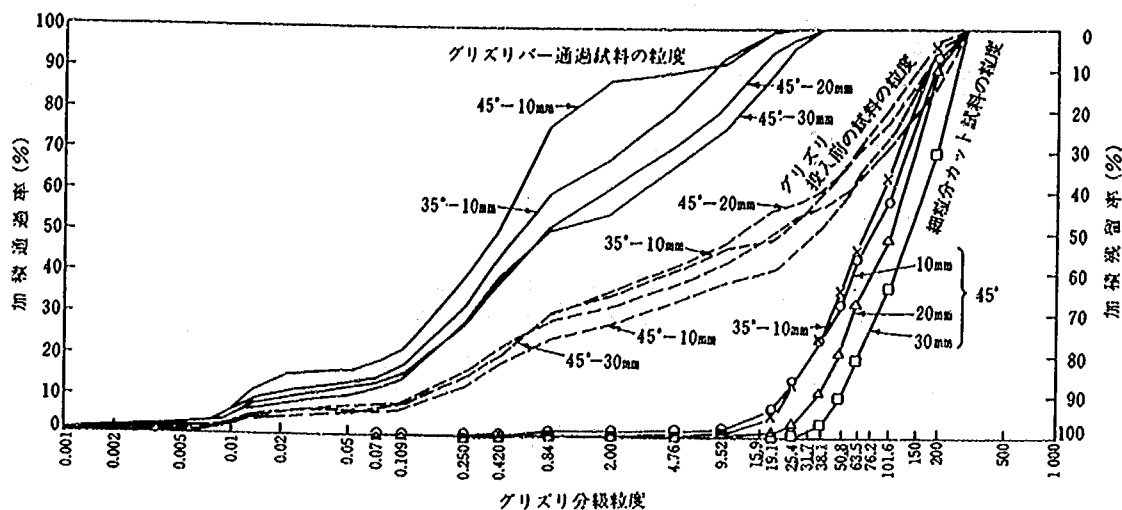


図-3.11 グリズリにより分級された粒度曲線

3.5 CSG工法

3.5.1 概要

CSG (Cemented Sand and Gravel) 工法とは、現地発生材 (河床砂礫など現地で利用可能な材料で基本的に大玉のみを除いたもの) にセメントを添加混合することにより強度増加を図り、改良盛土材料として有効利用するものである。その施工は材料とセメントを現地で混合後、ダンプトラック等で運搬、ブルドーザで敷き均し、振動ローラで転圧することにより構造物を築造するものである。

3.5.2 CSG工法の適用例

本工法はダム工事の上流仮締切堤、あるいは盛土構造物の保護工として用いられ始めている他、近々、貯砂ダムとして本格的な構造物に採用される運びとなっている。使用材料も河床砂利の他トンネル掘削ズリも用いられている。本工法は、現地発生材を大粒径を除いたのみでそのまま用いることを基本としていることから、強度特性等も材料に影響される側面を有する。従って構造物は材料特性からその形状が定まってくる特徴を有している。ここでは、CSG工法を初めて採用したEダムにおける仮締切堤の設計及び施工について紹介する。

Eダムでは、ダムサイト付近に豊富に存在する河床砂礫を有効利用し、経済的・効率的に仮締切堤を施工するためにCSG工法を採用した。

セメント添加量については、材料試験の結果に基づくとともに施工時の品質のばらつきを考慮し 80kg/m^3 としている。

仮締切堤の安定性の検討では、フィルダムの安定計算 (円弧すべり) および重力式コンクリートダム (弾性体) の安定計算の両方で検討されている。このうち、フィルダムによる検討では、せん断強度の評価において砂礫材料にセメントを添加し固結させたものであることから粘着力成分を有する材料強度を三軸試験によって求めたせん断強度を用いている。

一方、重力式コンクリートダムによる検討ではすべり滑動、支持力について検討している。なお、仮締切堤は仮設構造物であることから地震力を考慮した評価は本来必要ではないが、技術開発目的か

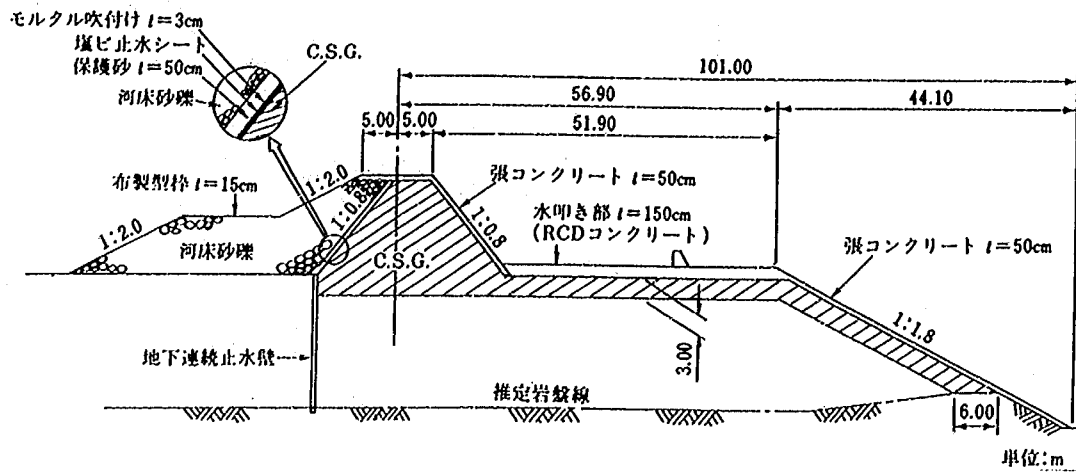


図-3.12 標準設計断面図

ら、地震力も考慮した検討を行っている。

堤体は天端幅5mで、上下流とも8分の法勾配とし、基礎は河床砂礫層上部の乱された部分を厚さ3mのC S Gで置き換えた。なお、8分の法勾配については実施工の結果、法面保持に何らかの措置が必要なこと、施工性が劣ることが明らかとなり、現在、適用中の別のダムでは1割2分として設計が進められた。

また、越流対策として堤体表層部には厚さ0.5mの張りコンクリートを施工したうえで、下流部には水たたき部を設けている。

仮締切堤の止水構造では堤体上流面に止水シートを張り、末端を直下の地下連続壁に接続させている。

C S Gの施工法は、練混ぜヤードで混合した材料を11tonダンプトラックで盛立場所まで運搬し、21ton級ブルドーザで敷均し、8 ton級（最大起振力19ton）の振動ローラーで締固められた。従って、コンクリートダムのように骨材およびコンクリート製造プラントは特に必要としない。撒き出し厚さは1層当り17cmとし、3層（1リフト約50cm）撒

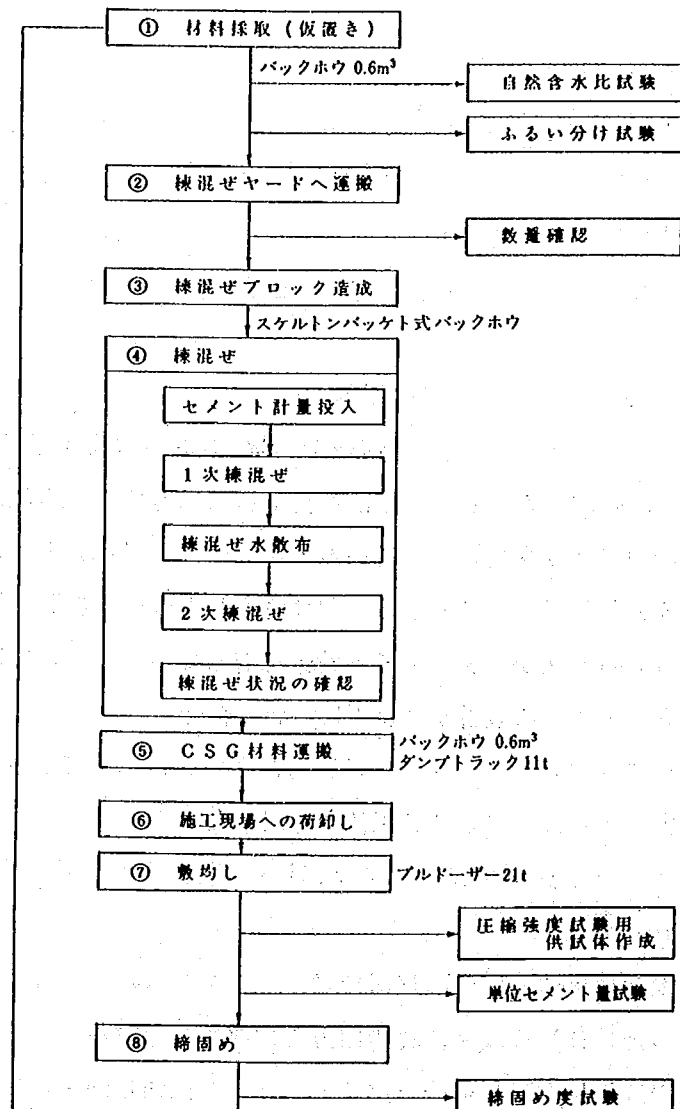


図-3.13 C S Gの施工フロー

き出し後に振動ローラーで6回の転圧を行った。リフト間の水平打ち継目処理（グリーンカット、モルタル処理）は行っていない。仮締切堤の築堤期間は約150日、築堤量は22,900 m³、施工能力は日平均実績で400～600 m³であった。CSG工法により短期間に効率的、経済的に当初の目的とする構造物を築造することができた。設計断面および施工フローを図-3.12、図-3.13に示す。

4. 骨材の品質とコンクリートの品質

4.1 概説

以上、堤体材料の有効利用技術の動向を示したが、次に、コンクリートダムを例にとり、骨材となる原石の品質と堤体材料であるコンクリートの品質の関係について略述する。なお、このような研究は官学民の多くの研究機関で実施されているところであるが、ここでは、土木研究所で最近実施された調査試験について述べる。

4.2 コンクリートの耐久性

コンクリート用骨材の品質規準は土木学会編コンクリート標準示方書などに述べられているが（表-4.1参照）、このような品質規定は主としてコンクリートの耐久性に関して規定されたものである。この規準値はコンクリートに関する知見の蓄積とともに徐々に緩和されているが、安全に対してある程度余裕を見た値として設定されたものであり、コンクリートの使用部位を限定すれば、品質規準に適合しない骨材でも十分使用が可能と考えられる。そこで、規準から外れる骨材を用いてコンクリートの耐久性試験を実施した。

表-4.1(1) コンクリート用骨材の品質基準

	細骨材	粗骨材
比重	—	2.5以上
吸水率(%)	—	表-4.1(2)
すりへり減量(%)	—	40%以下
安定性損失質量(%)	10%以下	12%以下

使用した骨材は実際に廃棄岩として廃棄されている花崗閃緑斑岩であり、その物理的性質を表-4.2に示す。また、比較試験として、規準を満足する良好な骨材として笠間産の砂岩碎石を用いた試験も実施した。なお、この廃棄岩を細骨材として用いた場合、フレッシュコンクリートの品質が安定化しないため、ここでは粗骨材のみを骨材として利用した。

コンクリートの耐久性は、骨材の耐久性とペースト（セメントミルク）の耐久性から決定される。そこで、実験では、骨材の品質の水準として笠間産砂岩（規準適合粗骨材）と花崗閃緑斑岩（低品質粗骨材）の2種類、ペーストの品質の水準として水セメント比を45～85%の5水準に設定して比較試験を行った。なお、耐久性試験はJSCE-G501-1986に示す方法を用いて実施した。

表-4.1(2) コンクリートと粗骨材品質の組み合わせ

コンクリートの設計基準強度 fck (kgf/cm ²)	粗骨材の品質	
	耐久性を要求されるコンクリート	耐久性を特に要求されないコンクリート
180未満	吸水性：3%以下 安全性損失質量：40%以下 または 吸水率：5%以下 安定性損失質量：12%以下	吸水率：5%以下 安定性損失質量：40%以下
180以上 300未満	吸水率：3%以下 安定性損失質量：12%	吸水率：3%以下 安定性損失質量：40%以下 または 吸水率：5%以下 安定性損失質量：12%以下
300以上	吸水率：3%以下 安定性損失質量：12%	

表-4.2 試験に用いた粗骨材、細骨材の物性値

	笠間産 細骨材	笠間産 粗骨材	低品質 粗骨材
岩種	砂岩	砂岩	花崗閃緑斑岩
比重	2.65	2.67	2.61
吸水率 (%)	1.36	0.51	2.93
すりへり減量 (%)	--	10.8	22.6
安定性損失質量 (%)	0.7	0.2	42.9

図-4.1は試験より得られた耐久性指数をとりまとめたものである。図によれば、低品質粗骨材を用いたコンクリートの場合、水セメント比の大小に関わらず耐久性指数は低い値を示すが、規準適合粗骨材を用いた場合でも、水セメント比が大きければ耐久性指数は低下する。したがって、コンクリート標準示方書においても、耐久性が要求されるコンクリートには、良質な骨材を用いるほか水セメント比を抑えたコンクリートを用いることを規定している。しかし、ここで着目すべき点

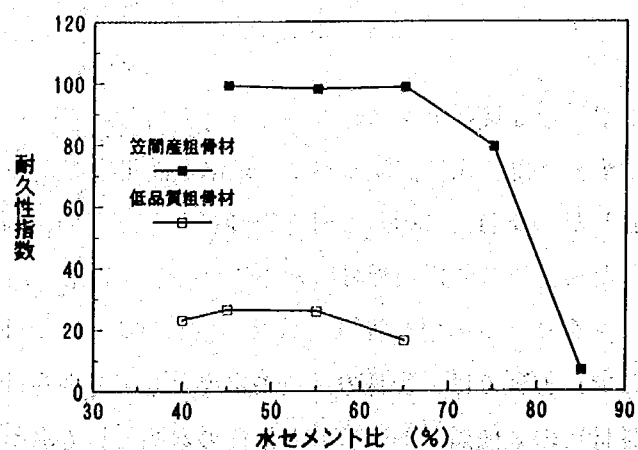


図-4.1 水セメント比と耐久性指数の関係

は、水セメント比が80%以上のコンクリートの耐久性は規準を適合しない粗骨材を用いたコンクリートの耐久性と概ね同等であることである。水セメント比が80%程度のコンクリートの一例としてRCD用コンクリートがあげられ、高い耐久性が要求されない重力式コンクリートダム内部コンクリートに広く利用されている。また、1976年に完成した島地川ダムを初めとして全てのダムが良好な状態を保持している。もちろん、JSCE-G501-1986の耐久性試験は耐凍害性に関する試験であり、全ての化学的、物理的耐久性を保証するものではないが、使用部位に留意すれば、品質規準を下回る骨材でもコンクリートとしての品質に支障を与えることなしに利用できる可能性を示している。

4.3 コンクリートの強度

コンクリートの耐久性は構造物の機能に関する要件であるが、コンクリートの各種強度は構造物の安全性に関わる要件であり、より慎重な対応が要求される。そこで、上記のコンクリートに対してコンクリートの圧縮強度試験、引張強度試験を実施した結果について述べる。なお、圧縮強度試験においてはコンクリートの弾性係数についても併せて測定している。

図-4.2は、規準適合粗骨材と低品質粗骨材を用いた同一水セメント比のコンクリートについて、それぞれのコンクリートの圧縮強度を比較し

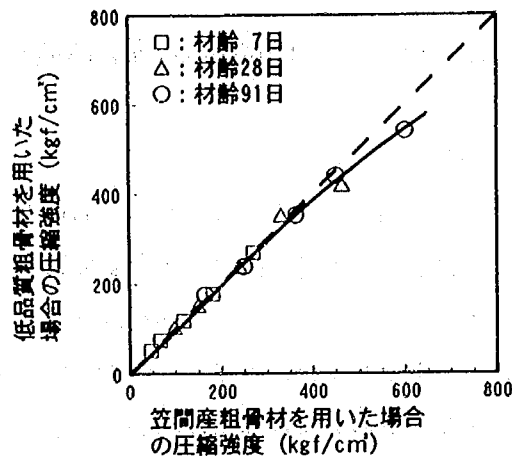


図-4.2 基準適合粗骨材を用いた場合と低品質粗骨材を用いた場合の圧縮強度の比較

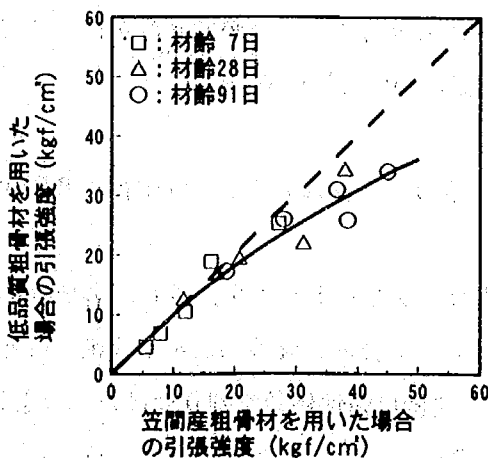


図-4.3 規準適合粗骨材を用いた場合と低品質粗骨材を用いた場合の引張強度の比較

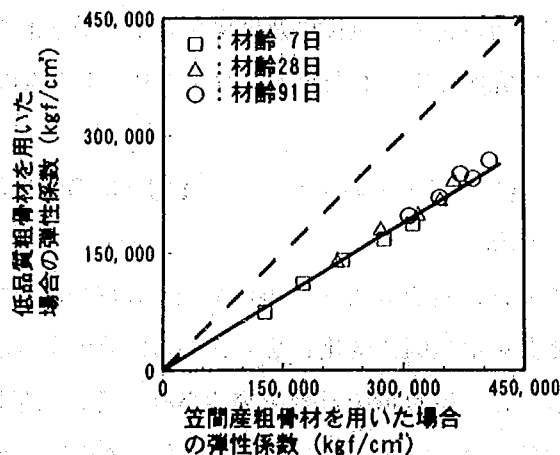


図-4.4 規準適合粗骨材を用いた場合と低品質粗骨材を用いた場合の弾性係数の比較

たものである。図によれば、コンクリートの圧縮強度は主として水セメント比によって支配されている。なお、今回使用した低品質粗骨材の圧縮強度（下限値）は400kgf/cm²程度と推定され、コンクリートの圧縮強度が400kgf/cm²に達する付近から、低品質骨材を用いたコンクリートの強度低下が現れているが、重力式コンクリートダムに用いられるコンクリートに要求される圧縮強度は高々

200kgf/cm²程度であり、よほど低品質な骨材でない限りコンクリートの圧縮強度が問題となることはないと考えられる。

また、図-4.3はコンクリートの引張強度について同様な試験結果を示したものである。圧縮強度の場合と同様に、低品質骨材を用いたコンクリートの引張強度が問題となることはない。

一方、図-4.4は、規準適合粗骨材と低品質粗骨材を用いた同一水セメント比のコンクリートについて、それぞれのコンクリートの弾性係数を比較したものである。図によれば、低品質骨材を用いたコンクリートの弾性係数は規準適合骨材を用いたコンクリートの弾性係数よりもかなり小さくなる。しかし、弾性係数の大小は重力式コンクリートダムの構造設計に支障を及ぼすことはないため、弾性係数の低下は問題とならない。

5. コンクリートの品質変動が構造物の設計に及ぼす影響

5.1 概説

骨材の有効利用を図る場合、骨材の品質の低下が問題となることに加え、良好な骨材と低品質な骨材の混合によって骨材の品質が大きく変動することが予想される。このような品質の変動は、コンクリートのワーカビリティに影響を及ぼしてその施工性に影響するほか、構造物内の応力分布に乱れを与えて構造の安定性に影響する可能性がある。

コンクリートの施工性に及ぼす影響は主として細骨材の品質に左右され、スランプの変動、ブリージング率の変動、凝結時間の変動など種々の形態で現れる。このような問題への対応は、①低品質骨材の粗骨材に限定した使用、②混和剤による品質変動の抑制などによって対処することができ、その一例は第3章の事例研究で述べたとおりである。

一方、構造物の安定性に及ぼす影響は、数学的なアプローチから検討することができるが、ここでは土木研究所で実施した重力式コンクリートダムの安定解析結果について述べる。

5.2 コンクリートの弾性係数、圧縮強度の変動が重力式コンクリートダムの構造の安定性に及ぼす影響

ここでは、有限要素法を用いて図-5.1に示すような重力式コンクリートダムを作成し、各要素の弾性係数を不規則に変化させて各要素に発生する応力を計算した。各要素に弾性係数を不規則に分布させるには、計算機で乱数を発生させ、その結果に基づいて各要素に弾性係数を割りつけた。なお、解析結果について統計的な処理ができるように、弾性係数の割りつけを変えて30回の計算を行った。

応力解析より得られた堤体内の応力分布の一例を図-5.2に示す。材料の弾性係数が場所的に変化すると、堤体内の応力分布は複雑なものとなり、隣接する要素でも発生する応力は大きく変化する。解析の詳細は文献4)によるものとするが、得られた結果を要約すると次のとおりである。

- ① コンクリートの弾性係数の変動が大きくなると、それに応じて、ダム堤体に生じる応力の変動も大きくなる。この場合、弾性係数の大きな部分には大きな応力が生じ、弾性係数の小さな部分には小さな応力が生じる。

- ② コンクリートの弾性係数が変動すると、ダム堤体に生じる応力のばらつきは大きくなるが、ダム堤体に生じる応力の平均的な大きさはほとんど変化しない。

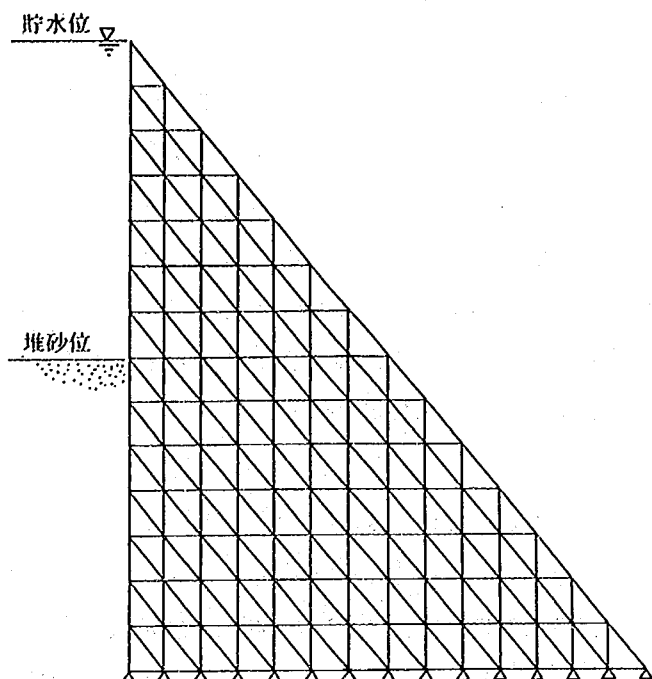


図-5.1 解析モデル

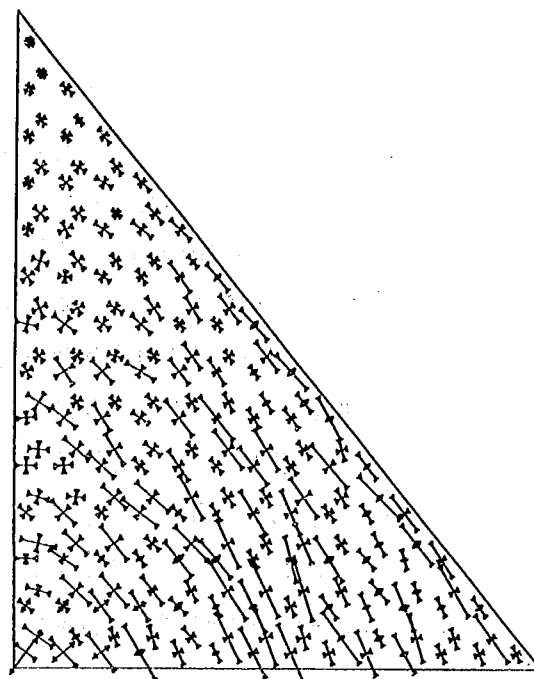


図-5.2 ダム堤体内の応力分布例

- ③ 各材料の弾性係数を材料全体の弾性係数の平均値で除して正規化した弾性係数に書き直すと、正規化した弾性係数が同一な材料に生じる応力は、その弾性係数の大きさ、材料全体の弾性係数の変動幅にかかわらずほぼ一定の頻度分布を示す。
- ④ 各材料に生じる応力の大きさは、材料の弾性係数の平均値と変動幅がわかれば、これを確率論的に推定することができる。
- ⑤ 材料全体の弾性係数の平均値よりも大きな弾性係数を有する材料では、これを単独にダムの堤体材料として用いる場合に比べて、発生する応力は大きくなる。また、材料全体の弾性係数の平均値よりも小さな弾性係数を有する材料では、これを単独にダムの堤体材料として用いる場合に比べて、発生する応力は小さくなる。
- ⑥ 一般に、良好な骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は堤体内に生じる応力に比べてはるかに大きい。したがって、単独で堤体材料に用いることができる低品質骨材であれば、これが良好な骨材と混合して用いられる場合にも問題は生じない。

6. まとめ

本論文では、資源の有効利用とダム建設の経済性を追求するため、低品質の原石を堤体材料として利用する方法について、種々の方面で検討されている結果を紹介した。これらの事例を踏まえてダム築造に用いる岩石材料の有効利用のあり方を考察すると次のようになる。

岩石材料を有効利用する方法には、大きく分けて4つのアプローチがある。第1の方法は、Aダム、Dダムに見られるように、ダム建設に伴って発生する岩石材料を堤体材料として利用する方法である。

ダム建設に伴って発生する岩石材料には、堤体の基礎掘削によって発生する掘削ズリのほか、付け替え道路の建設に伴って発生する掘削ズリがある。また、発電用ダムでは地下発電所の掘削に伴って発生する掘削ズリが利用可能であり、また、特殊な例であるが、Dダムのように、貯水池掘削に伴って発生する掘削ズリを利用することも可能である。このような掘削ズリを有効利用するには、2つの面からの検討が必要である。第1は、このような掘削は堤体材料を採取することが本来の目的でないため、良好な材料と不良材料が混合して存在し、堤体材料として利用可能な材料を選別する必要がある。AダムやDダムではグリズリを用いて選別が行われているが、今後、堤体材料として利用可能な材料を効率的に選別する技術の開発が必要である。第2は、ダムの築造工事とこれら付帯工事の間には一般に時間的なずれがあることである。すなわち、これらの工事の多くはダムの築造に先だって行われるため、掘削ズリから得られた堤体材料を貯蔵しておくスペースの確保が必要となる。したがって、ダムサイト周辺の地形条件を十分に考慮した施工計画の立案が必要である。

岩石材料を有効利用する第2の方法は、Bダムに見られるように、堤体各部の構造要件を考慮して、適材適所の材料を利用する方法である。コンクリートダムの堤体は主に内部コンクリートと外部コンクリートに区別され、それぞれに要求されるコンクリートの品質は大きく異なる。また、フィルダムにおいても、上流側のロック材と下流側のロック材、外部のロック材と内部のロック材に要求される要件はそれぞれ異なっている。そこで、岩石材料を相対的に品質の優れたものと品質の劣るものに分別することによって材料を有効に利用することが可能となる。このように品質の分別により岩石材料を有効利用するには、3つの面から検討が必要である。第1は、材料の分別を効率的に行う方法である。Bダムでは岩種と岩級によって分別を行っているが、これらの分別は目視による判断に負うところが多く、熟練した技術者が必要となる。したがって、誰にでも容易に判断できる簡易的な分別方法の開発が望まれるところである。第2は、骨材の貯蔵設備が二系列になることである。したがって、仮設備の費用の観点からも経済性の検討が必要である。第3は、品質に優れた材料と品質の劣る材料が同じ割合で生産されないことである。原石山は風化の影響を受け、初期には低品質の材料が多く産出され、後期には良好な材料が多く産出されるのが一般的である。したがって、原石山の地質条件を十分に調査するとともに、仮置きヤードなどの確保を検討する必要がある。

岩石材料を有効利用する第3の方法は、Cダムに見られるように、材料の品質を主として化学的方法で改良し、使用方法である。特にコンクリートの分野においては、混和剤によるコンクリートの品質改良技術の進歩が著しい。近い将来、今日では想像できないような岩石材料の改良技術が開発されることも夢ではないと思われる。なお、化学的改良方法には副次的な悪影響が生じる可能性がわずかながら含まれている。特に耐久性の問題は長期的な実験によって初めて明らかにされるものであり、新しい材料の利用にあたっては、化学的な知識とともに慎重な判断が必要となることはいうまでもない。

岩石材料を有効利用する第4の方法は、新しい設計法、施工法を開発することによって、岩石材料の利用範囲を拡大する方法であり、Dダムの上流仮締切りダムにおけるCSG工法はその一例といえる。

また、CSG工法を用いて貯砂ダムをコンクリートダムとして築造しようとする試みが現在なされ

ているが、これはC S G材料強度特性等から堤体形状を定めようとするものである。堤体形状から材料を選定するこれまでの方法とは逆のプロセスであるが、今後このような材料から形状への発現も重要と考える。

7. あとがき

ダムは巨大構造物であり、その安全性の確保は極めて重要である。このため、ダムの設計、施工にはこれまで保守的といえるほど慎重な判断がなされてきた。しかし、兵庫県南部地震において多くの土木構造物が大きな被害を被った中でダムが軽微な被害を受けたのにとどまったのは、このような判断があつてのことと思われる。また、R C D工法の開発にあたっても、ダムの構造の安全性を損なうような施工の合理化は行わないことを前提にその技術が開発されてきた。R C Cダムに比べて合理化の程度が低いとの評価が諸外国からなされたが、R C Cダムに見られたような漏水は一切生じず、R C D工法の高い信頼性が証明された。堤体材料の有効利用にあたっても、このような哲学が貫かれなければならないことは言うに及ばない。

堤体材料の有効利用とは品質の劣る骨材を許容することではない。堤体材料の有効利用とは、堤体材料に要求させる品質を適正に評価し、その上で所定の品質を満足する材料を正しく使用することである。ダムの構造の安全性を損なうことなく、従来のダムと同様な構造の信頼性をもったダムをより合理的に築造するために、今後、さらなる研究が行われることを切に望む次第である。

参考文献

- 1) 西元宏任：〔現場報告〕泥流堆積物を利用する金原ダムの堤体材料試験、ダム技術 No.82、1993.7、pp94～106
- 2) 中村昭、豊田光雄：岩石質材料（泥流堆積物）の工学的特性、ダム技術 No.86、1993.11、pp35～46
- 3) 藤沢侃彦、中村昭、豊田光雄、石川高史、山上和彦：〔現場報告〕C. S. Gの材料試験及び施工、－長島ダム上流仮締切堤への適用－、ダム技術 No.83、1993.8、pp41～52
- 4) 廣瀬利雄、永山功、大槻英治：品質変動の大きなコンクリートを用いた重力式ダムの構造的安定性の評価方法について－最適骨材評価コンクリートの開発（低品質骨材の有効利用）に向けて－、ダム技術 No.82、1993.7、pp38～

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

合理的な橋梁構造をもとめて

—道路橋の設計・製作・施工の省人化・省力化—

構造橋梁部長 藤城 泰行

合理的な橋梁構造をもとめて

— 道路橋の設計・製作・施工の省人化・省力化 —

1. はじめに

今後、建設事業の分野では、労働力不足が深刻化し、さらに道路建設をとりまく制約条件も一層厳しくなることが予想される。一方平成6年12月に「公共工事の建設費の縮減に関する行動計画」が発表され、縮減策のひとつとして省力化の推進が挙げられている。

このような状況の中で新設時において省力化をはかるとともに、将来にわたって維持管理の負担を残さない耐久性のある道路橋を建設していくためには、品質を確保しつつ橋梁を安全にかつ効率的に造ることを目指した技術開発を推進していくことが重要である。

道路橋においても、従来の構造形式から設計・製作・施工さらには管理の省力化を重視した合理的な構造形式に変えてゆく必要がある。

ここでは、土木研究所で行った省力化鋼桁橋や、床版のプレファブ化、ケーソン基礎の省力化など広範囲な合理化、省力化の研究結果について述べる。

2. 鋼上部構造の施工合理化

2.1 鋼道路橋設計ガイドライン

平成7年10月、「鋼道路橋設計ガイドライン」（以下ガイドライン）という）が建設省から通知され、7年度内にモデル事業として選ばれた13橋がこのガイドラインに沿って設計されることになり、平成8年4月には、直轄事業に対しては本運用となった。また、同時に積算基準についても多くの橋梁製作工場の実態を調査し、従来の主として鋼重に比例するかたちのものから、工数を重視する形に改訂された。さらにこの改訂に関連して、「鋼橋の仮組立による検査を省略する場合の施工管理基準及び規格値（案）」を示し、部材寸法の自動計測システムの適用を可能とするとともに、精度確認にかかるコストを大幅に低減した。

「ガイドライン」の目的は、新しい積算基準において最適となる桁構造が変わることになるため、そのおおよその方向を示したものである。また、「ガイドライン」は基本的に鋼桁橋を対象にしているが、それ以外の橋梁形式についても類似の部材については準じて設計できることとされている。

図－2.1に、従来の標準的な設計による鋼桁橋と「ガイドライン」に沿って設計される鋼桁橋の比較を示す。

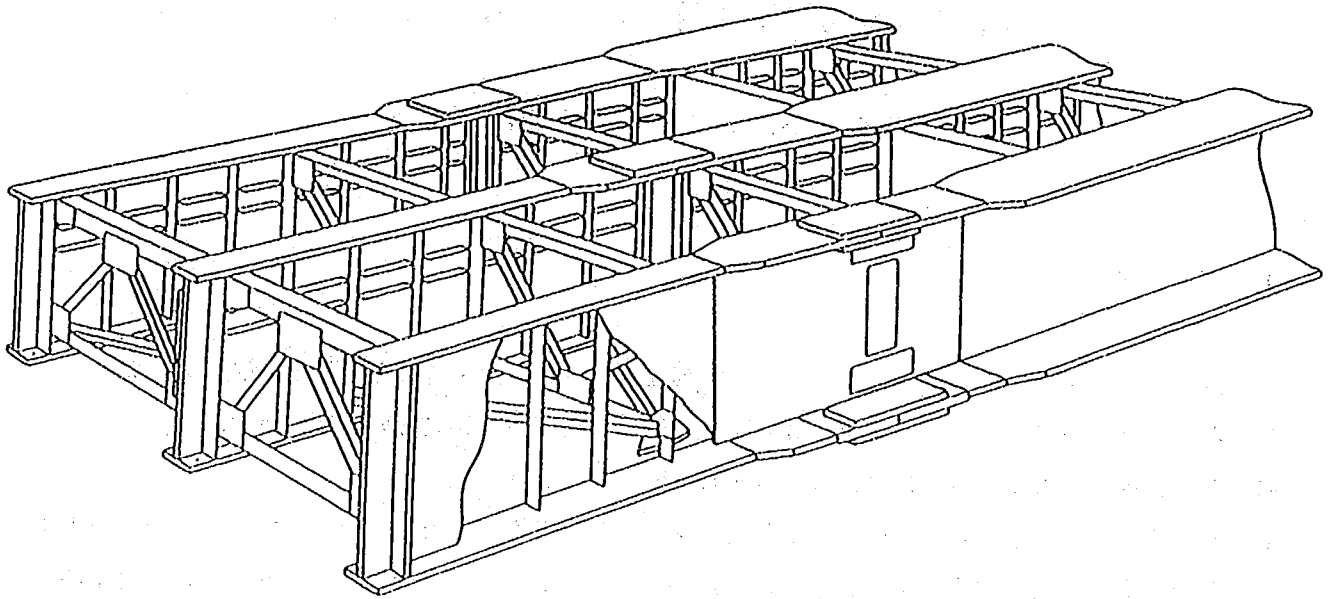


図-2.1(a) 従来の標準的な鋼桁橋

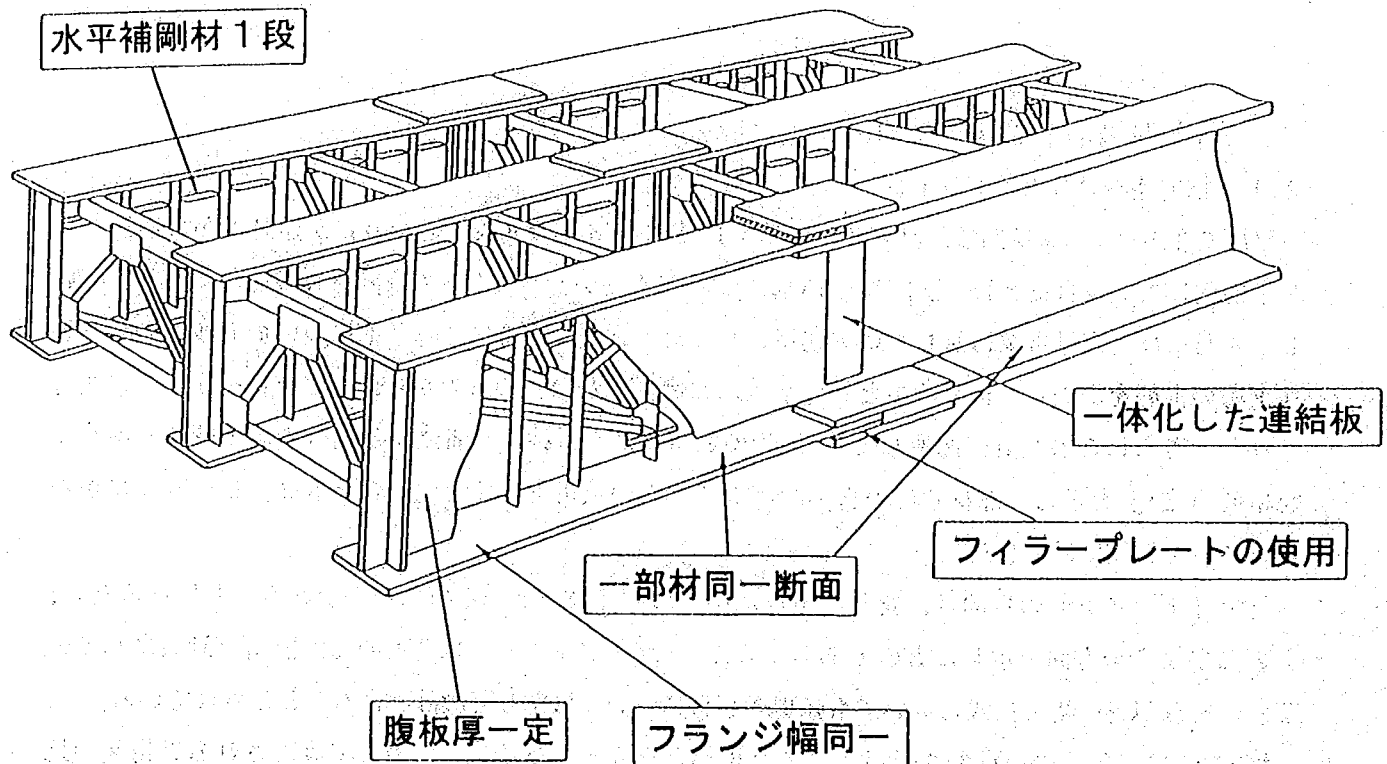


図-2.1(b) 「ガイドライン」による合理化橋

一見して桁構造がかなり簡素化されたのがわかるが、従来形の構造との主たる違いは以下の通りである。

- 一部材一断面とし、主桁横断方向の溶接継手をなくした。
- 上下フランジの幅を桁全長にわたり一定とし、断面変化は板厚の変更によるものとした。その結果、桁の取り扱い及び床版型枠（あるいは樹脂等注入のシール）の施工を容易にした。
- 断面変化を現場継手位置のみとし、高力ボルト摩擦接合継手にフィラープレートを用いることとした。
- 腹板厚は全長にわたって一定とし、板厚を厚くして水平補剛材を従来より一段少なくした。
- 高力ボルト継手の添接板は、シアプレートとモーメントプレートに分けず一体とした。
- 支承はゴム支承とすることを標準とした。

以上の変更により、床版の施工を別にしても鋼橋製作・施工のコストを5～10%縮減することが可能となった。

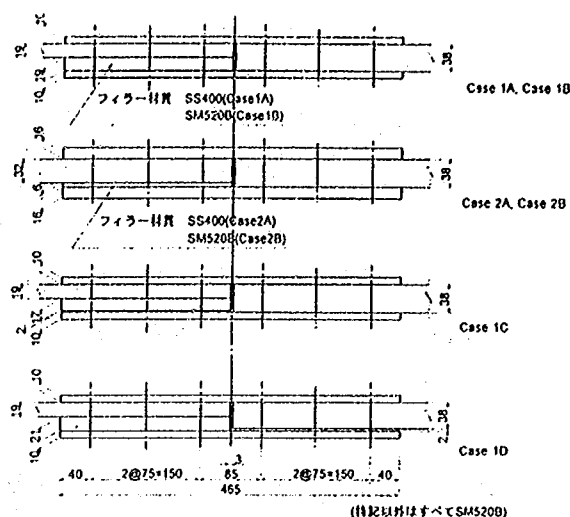
2.2 「ガイドライン」策定に向けた研究

土木研究所では「ガイドライン」の策定に先立ち、平成5年度から（社）日本橋梁建設協会との共同で「省力化に対応した鋼桁橋の構造に関する研究」を実施していたが、平成6年度後半より建設費の縮減が全省的な動きとなり、（社）日本道路協会の橋梁委員会鋼橋小委員会にワーキンググループを設置して、短期間に実現可能な「ガイドライン」をとりまとめることとなった。

共同研究においては、当時、将来においてRC床版打設の労務価格が高騰することが予想されたため、床版施工の省力化を最優先に考えることとし、プレハブ系床版（プレキャスト床版、合成床版等）の使用を前提として、これらの床版が最も有効に活用される鋼桁の構造を模索する方向で検討した。その結果、前記の「ガイドライン」に盛り込まれた項目のほか、以下のような点を考慮した仕様書と標準図を作成した。

- 道路の幅員に関わらず、主桁の間隔は一定とし、一律2.6mとする。これは将来、プレキャスト床版が二次製品的に供給され、低価格化することを目指すものである。
- 床版の標準工法は示すが、所定の性能を満たせば、他の形式を選定してもよいこととし、より合理的な床版構造の開発を促す。
- プレハブ系床版の施工を容易にするため、上フランジの幅を一定とし、上フランジ天端の高さを揃える。
- 主桁については工場の設備により最適となる構造を選ぶことができることとするが、重量増の検討の結果から、支間30m以下の場合のみ水平補剛材を省略し、30mを超える場合には1段とすることを標準仕様とする。
- 対傾構を製作の容易なフルウェブの横桁タイプとする。

これら「ガイドライン」に盛り込まれなかった項目の内いくつかは、これからの課題として注目され始めているいわゆる「性能規定」的なものであり、時期尚早と判断された。また、片側にフィラープレートを用いたフランジの高力ボルト摩擦接合継手については、これまで使われた実績がほとんどないので、大型供試体による継手の引張試験を行って、フィラープレートの板厚や材質について検討

[illegible]

2.3 第2東名神を目指した日本道路公団の動き

新琴似高架橋

1 部材 1 断面、ファイラプレート挿入高力ボルト摩擦接合継手の採用。これらは「ガイドライン」にも踏襲された。また、仮組立を約 1/4 の部分仮組みとし、2 方向にプレストレスを導入したプレキャスト床版を採用した。この結果、主桁間隔 2m のこの橋でのプレキャスト床版は必ずしも経済的ではないこと、しかし工期、作業員数を大幅に削減することの可能性が明らかにされた。

平成5年に架設された上信越自動車道栃木川橋では、安全にも配慮して主桁とプレキャストPC床版を予め結合し、完成断面の形状で送り出す「全断面一体送り出し架設工法」を採用。高所作業の削減を実現した。また、桁構造の簡素化として、対傾構のフルウェブ横桁化、下横構の省略、仮組立への自動計測システムの適用、維持管理を考慮した交換可能なプレキャスト床版の採用など、様々な取り組みを行っている。

— 94 —

主桁は「ガイドライン」に沿って1部材1断面（現場継ぎ手位置でのみ断面変化）とすることで工場での突き合わせ継ぎ手を省略するとともに、腹板厚を厚くする（23mm！）ことにより水平補剛材

Figure 1 is a cross-sectional diagram of the bridge deck. The total width of the deck is 11,400 mm. The deck is composed of several layers: a 75 mm asphalt paving layer (アスファルト舗装), an adjustment concrete layer (調整コンクリート), and a 310 mm prestressed concrete slab (プレストレストコンクリート床版). The deck is supported by two piers, G1 and G2, which are 6,000 mm apart. The deck thickness is 1,090 mm, and the total height of the bridge structure is 3,200 mm. The deck is sloped at 2% on the left and 4.5% on the right. The piers are 700 mm wide. The deck is labeled 'Level'.

図-2.3 ホロナイ川橋2径間連続橋(53.0m+53.0m)断面図
(日本道路公団パンフレットより転載)

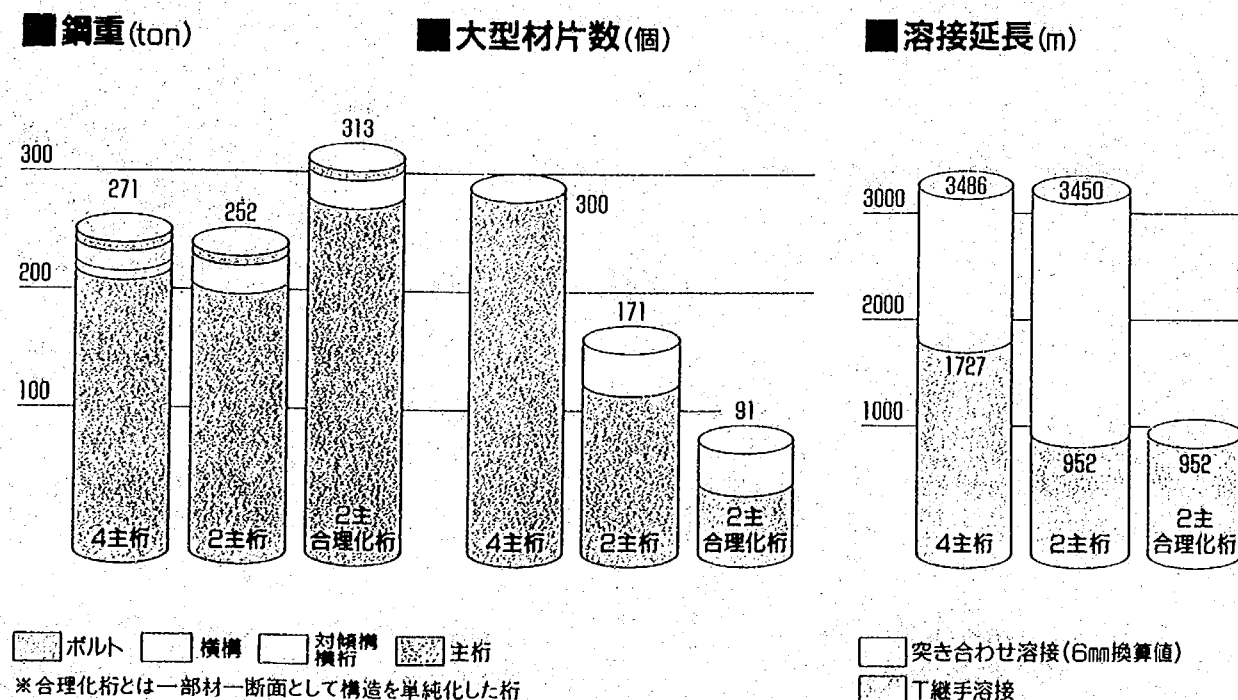


図-2.4 鋼重、大型材片数、溶接延長の変化
(日本道路公団パンフレットより転載)

横桁については、主桁間のたわみ差に起因する取り付け部の疲労に配慮するとともに、移動型枠による床版の施工にもっとも有利になるように位置が決定された。また、床版については移動支保工を用いたRC構造を基本とし、主筋（橋軸直角）方向にプレストレスを導入した、いわゆるPRC構造を採用して耐久性の向上を図っているが、PC鋼材として煩雑なグラウト施工をさけるために、いわゆるアフターボンド鋼材（表面を硬化時間を制御した常温硬化性樹脂をポリエチレンシースで被覆したもの）を使用している。

2主桁橋とすることの問題点は、主桁間隔が広くなることにより床版の支間が拡大し、床版の耐久性低下が懸念されること、主桁の数が少ないことによりいわゆるリダンダンシー（Redundancy:冗長性）が低いこと等が挙げられ、我が国でこの形式が普及しない理由となってきた。日本道路公団では、土木研究所とほぼ時を同じくして完成した輪荷重走行試験機を用いて床版の耐久性を確認し、一本の主桁の下フランジとウェブを切断するいわゆるリダンダンシー試験を大型模型を用いて実施し、これらの問題をクリアーしている。今後の課題として現場継手の溶接化、連続合成桁化等への拡張が期待される。

ホロナイ川橋は、平成7年度の土木学会田中賞作品賞を受賞、現在非常に注目されている。この構造は、2車線＋片側歩道の一般的な道路橋に無理なく応用できるため、近い将来、一般道においても標準的な構造となる可能性がある。

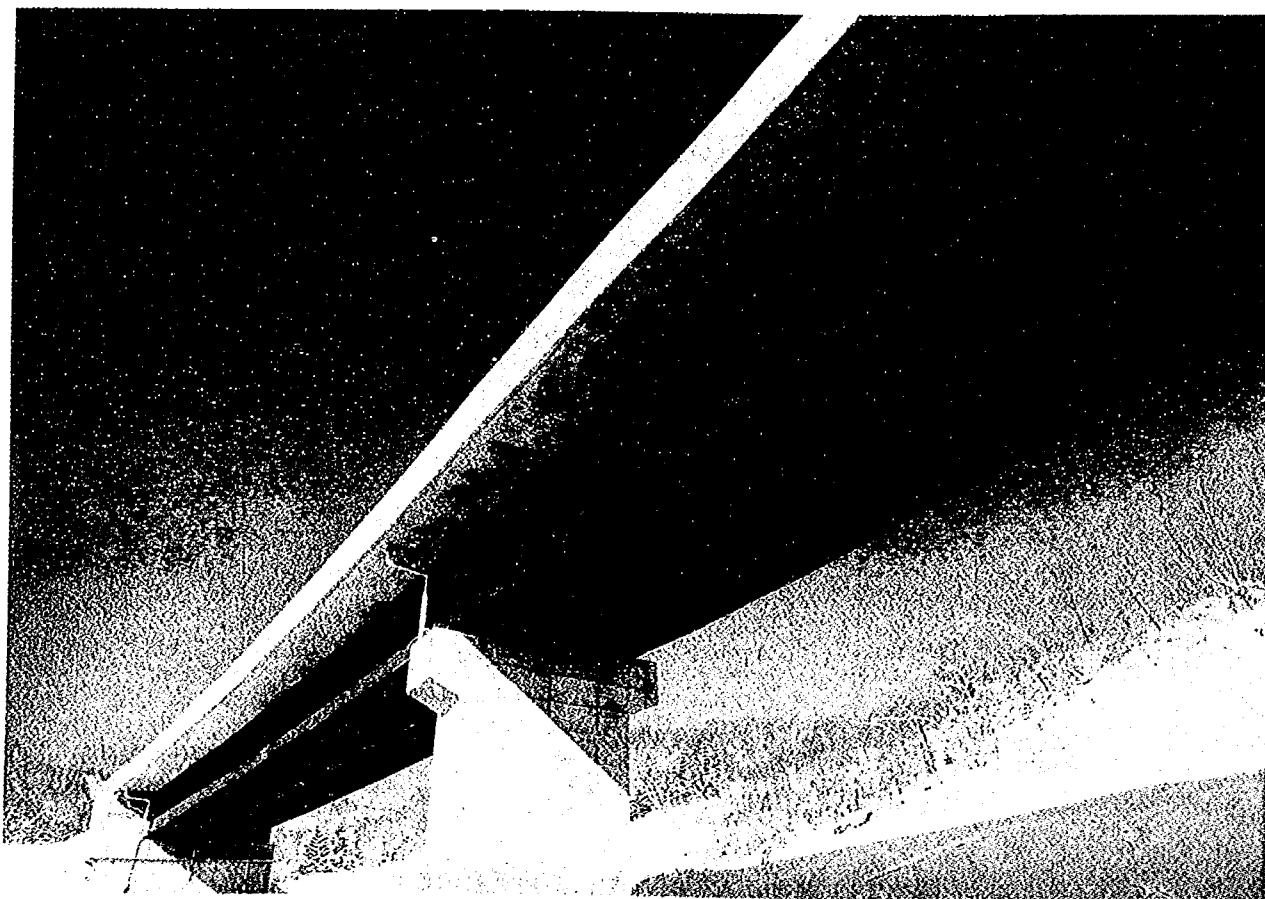


写真-2.1 ホロナイ橋の全景（日本道路公団パンフレットより転載）

2.4 道路橋示方書の改訂

平成8年11月1日付けで道路橋示方書が改訂された（解説付きの書籍としての市販は12月）。今回の改訂は主として耐震設計に重点が置かれており、鋼橋編は大きな改訂とはならなかったが、国際化及び製作施工の合理化に対応するため、以下のような改訂がなされた。

- 主桁の少数化及び構造の簡素化により部材の厚板化が必要となるため、板厚の許容範囲を従来の50mmから100mmに拡大した。これにより、テーパ鋼板の採用もしやすくなった。
- 通常の鋼材では極厚領域（40mm超え）での保証降伏点が低下するため、それに応じた許容応力度を設定したが、同時に極厚領域でも保証降伏点が低下しない鋼材の使用を可能とした。これにより設計が容易になるとともに、現場継手の溶接量が大幅に削減される。
- 予熱判断基準を炭素等量P Cから溶接割れ感受性組成P CMに変更し、鋼材の性質に応じて緩和できるようにした。厚板の溶接が簡素化される可能性を残したことになる。
- 高力ボルトの耐力点法による締め付け工法を採用しやすくなるため、ネックとなっていた遅れ破壊を防止するためのボルトの材質上の目安を示した。

これらのほか、国際化を意識して国内高炉産の実勢鋼材品質に頼っていた規定をミルシートに保証された材質のみを対象としたものに変更し（たとえばSS材の溶接禁止）、輸入鋼材を使用する場合のトラブルの防止や、JIS規定を上回る品質を有する鋼材を使用する場合の加工に関する緩和規定（シャルピー値に応じた冷間曲げ加工半径の規定等）によるデザインの多様化に配慮している。

今後の課題として、厚板化の結果現場継ぎ手が高力ボルトから溶接へとシフトすることが考えられ、現場溶接部の品質確認法としての超音波探傷試験法と欠陥の等級分類に関する検討が残されている。

3. プレストレストコンクリート上部構造の合理化

3.1 プレストレストコンクリート橋における省力化

プレストレストコンクリート橋は常に鋼橋との価格競争を意識してきたこと、コストの大きな部分を現場経費が占めていることから省力化には常に熱心に取り組まれてきた。最近の動きでは、大きな割合を占めるポステンT桁の断面形状を、重量増加というハンデを犯してまでシンプル化し、型枠の効率的な活用や省力化を追求しており、建設省の標準設計やJISの改訂が行われたことは記憶に新しい。しかし、最近の話題はやはりプレキャストセグメント（あるいはプレキャストブロック）工法の積極的な適用であろう。プレキャストセグメント工法は、我が国でも昭和40年代の前半から特殊な条件下で採用されてきているが、近年、建設コストの縮減が重要度を高まるに伴いその需要が急増している。ここでは、プレキャストセグメント工法に関する土木研究所における研究と、引き続き実施しているポステンT桁橋の中間横桁の省略及びP C桁とR C床版の合成構造に関する新たな取り組みについて紹介する。

3.2 プレキャストセグメント（ブロック）工法

プレキャストセグメントあるいはブロック工法とは、一般にコンクリート桁（T桁、I桁あるいは箱桁）橋軸直角方向に分割して工場または現場ヤードで製作し、現場で架設し、せん断キー及びプレ

ストレスにより一体化する工法を指す（図-3.1参照）。

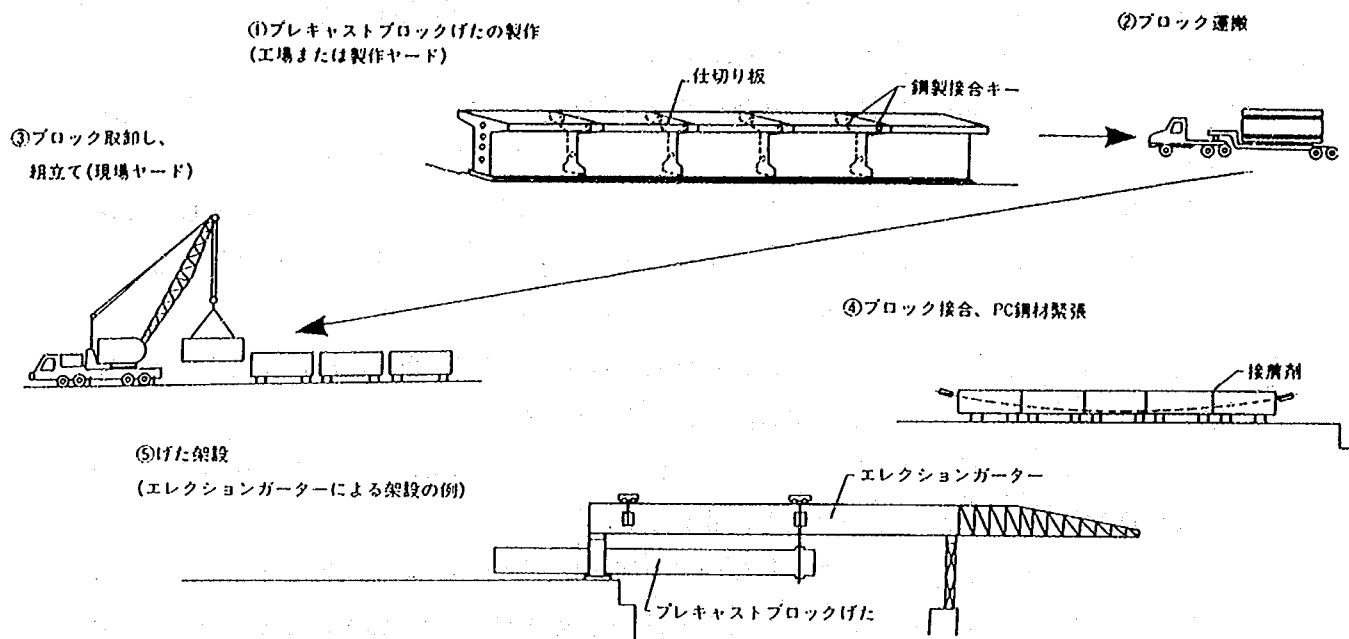


図-3.1 プレキャストセグメント工法による架設の流れの例（T桁橋）

土木研究所では、平成3年度から7年度にかけて、（社）プレストレストコンクリート建設業協会との共同研究によりプレキャストセグメント（ブロック）工法によるT桁及び箱桁橋の設計法に関する研究を行い、その成果は、「プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリートT桁道路橋設計施工指針」（日本道路協会、H4.10）、「コンクリート道路橋設計便覧」（同、H6.2）及びこのたび改訂された道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編に反映されてきており、さらに出版準備中のコンクリート道路橋施工便覧にも記述が追加される予定である。

土木研究所における共同研究では、主として鋼製及びコンクリート製の接合キーを用いる場合のプレキャストセグメント接合部の摩擦抵抗力の評価法について、供試体による実験を行って明らかにしている。

一連の研究によって、これまで明確でなかった設計条件が明らかになり、プレキャストセグメント工法の採用が容易になり、その適用が増加している。この工法をより合理的なものとするには、いわゆる外ケーブルと内ケーブルとの組み合わせが不可欠であり、今後の課題として取り組む必要があろう。

年度	土木研究所共同研究	日本道路協会各種基準
H. 3	鋼製接合キーを配置した梁目部のせん断試験	
H. 4	コンクリート製接合キーを配置した梁目部のせん断試験	プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリートTげた道路橋設計施工指針(H. 4. 10)
H. 5	鋼製接合キーを配置した梁目部のねじり試験	コンクリート道路橋設計便覧(H. 6. 2)
H. 6	プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート道路橋設計・施工指針(案)	
H. 7	(H. 7. 12)	
H. 8		道路橋示方書(H. 8) コンクリート道路橋施工便覧(H. 8 予定)

図-3.2 共同研究成果の各種基準への反映

最近のプレキャストセグメント橋では、日本道路公団松山自動車道の重信高架橋が現在施工中である。本橋のセグメントはショートラインマッチキャスト方式で製作され、内外ケーブル併用の連続箱桁橋である。マッチキャスト工法とは、直前に完成したセグメントの端面を次のセグメントの型枠として用いて製作する方式で、架設順序に従ってひとつずつ製作する方法をショートラインをショートラインと呼んで、1径間等まとめて製作するロングライン方式と区別している。

本橋では、1径間分約20個のセグメントを並べておいてPC鋼材を緊張し、スパンごと一括して架設する工法（スパンバイスパン架設工法）を採用して工期の短縮を図っているのが特徴である。床版の横締めはセグメント製作時にプレテンション方式により行われ、シーす及びグラウトが不要となり、作業の簡略化が図られた。

一方、第二名神高速道路では、弥富高架橋（連続箱桁橋）の架設準備が進められている。本橋は重信高架橋が上部構造と橋脚が剛結される形式であるのに対し、反力分散ゴム支承を用いた多径間連続橋であるが、基本的には重信高架橋での経験を活かして施工されることになる。但し、支間が87.5mとなる区間については、エレクトリションノーズを用いた片持張出架設

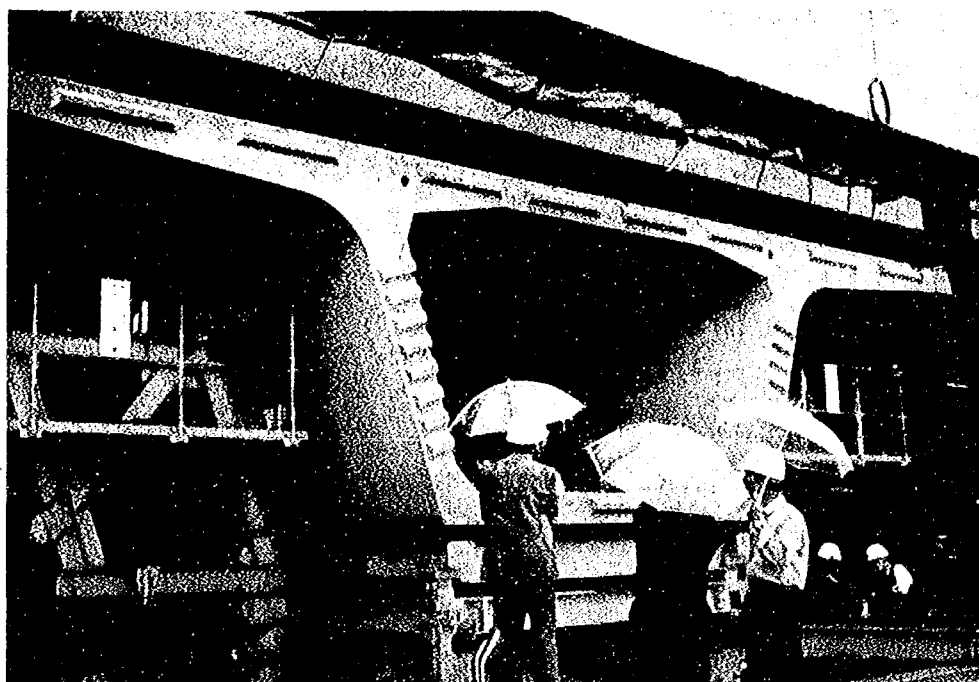


写真-3.1 重信高架橋のセグメント
(コンクリート製の多段接合キーが見える)

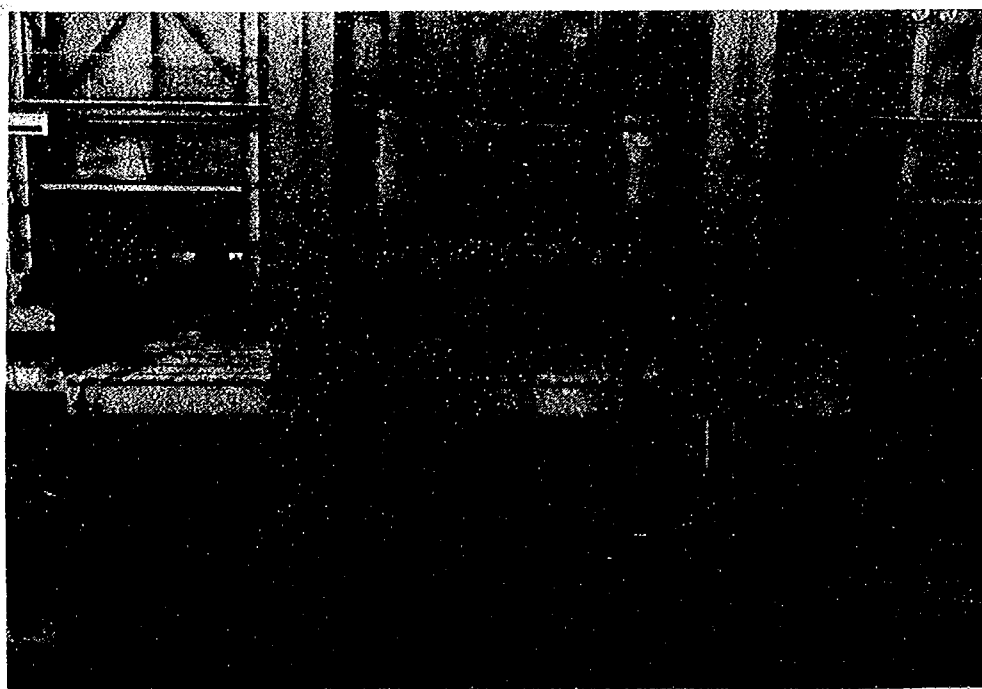


写真-3.2 中間横桁を省略したボステンT桁橋の模型試験

工法により行われる。セグメントの製作開始は平成9年度当初、架設開始は同じく10年度当初とのことである。

3.3 ポステンT桁橋の中間横桁の省略

ポステンT桁橋は、プレストレストコンクリート橋の中でもっとも多く用いられている形式のひとつである。桁本体は工場あるいは現場近くのヤードで製作され、一括架設されるが、中間横桁の施工を行う際にそのための支保工を設ける必要がある。もしこれを省略することができれば、ほとんどの施工は支保工なしで行うことができ、省力化だけでなく施工の安全性にも寄与する可能性がある。写真は1/2縮尺模型による、5主桁橋の載荷試験の模様を示しており、中間横桁の有無、斜角の有無により、桁間のたわみ差や床版に及ぼす影響について検討した。本研究についても土木研究所PC建設業協会の共同研究が行われ、その成果に基づき、この度改訂された道路橋示方書に中間横桁を省略する場合の設計法を規定した。

3.4 新型合成桁の開発

ポステンI桁とRC床版を合成させたいわゆるPC合成桁橋は従来から用いられており、それなりに合理的な構造とされてきたが、今回、さらに以下の点を改良して省力化とコストダウンを図ることとした。

- 主桁間にプレテンPC版（厚さ7cm）を渡し、埋め殺し型枠として使用する。
 - 主桁断面をI型からTに近い断面にする。
- これにより、以下のような利点が生じる。
- 接合キーの配置が容易になり、プレキャストセグメント工法への対応がしやすくなる。
 - 床版及びPC型枠の支間を短くなるため、主桁間隔を広くとれる。
 - I桁に比べて桁高を小さくできるとともに、桁上での作業スペースを大きくとれる。

このケースについても、土木研究所とPC建設業協会との共同研究が行われており、現在、PC型枠を有するRC床版の輪荷重走行試験機による疲労試験を実施している。この形式については、試験中であるにも拘わらず、その効果が期待され、既に平成8年度の試験フィールド制度の対象として取り上げられ、国道50号大足坊（だいだらほう）橋にて施工が行われている。

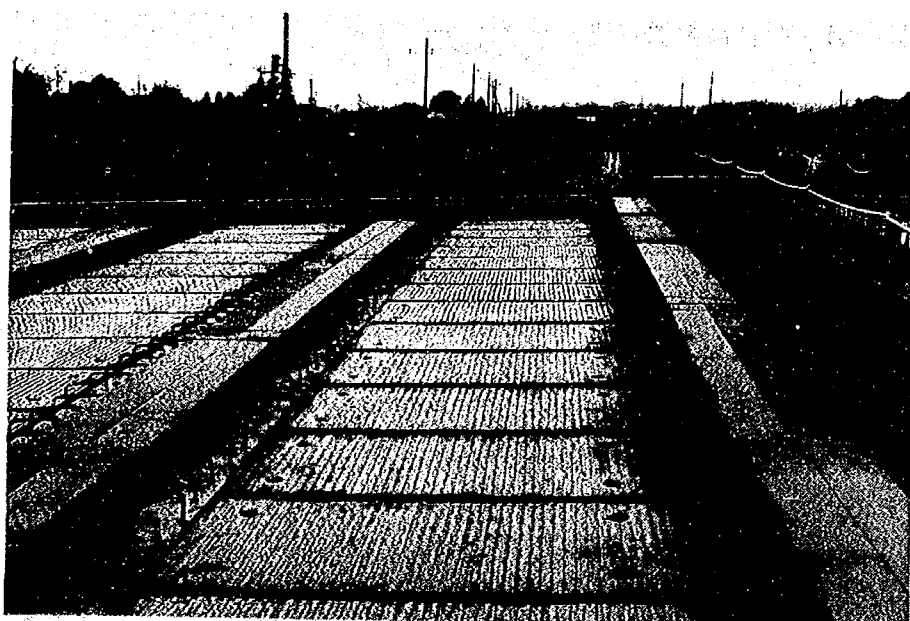


写真-33 架設中の新型PC合成桁橋（一般国道50号大足坊橋）
（主桁天端とPC型枠が見える）

4. ケーソン基礎の省力化技術の開発

4.1 自動化オープンケーソン工法（SOCS：Super Open Caisson System）

オープンケーソン工法は、鉄筋・型枠の組立、コンクリートの打設・養生等の躯体の構築作業を現場で行うため、人力作業の多い工法である。また、クラムシェルによる掘削が主体で刃口下地盤の直接掘削が不可能なため、周面摩擦力や刃口反力が卓越する硬質地盤では躯体の沈下管理が困難になること、余堀りにより沈下促進や姿勢修正を行う場合、地山を引き込んで周辺構造物に悪影響を与える可能性があることなどの問題点を有している。

土木研究所では、平成2～6年度に実施した総合技術開発プロジェクト「建設事業における施工新技術の開発」の一環として、(財)先端建設技術センターおよび民間企業との共同研究により、刃口下地盤の掘削を可能とし、また、ケーソン躯体の構築や掘削・沈下作業を省力化・自動化した全く新しいオープンケーソン工法（以下、SOCSと呼ぶ）を開発した。

SOCSの概要を図-1に示す。この工法は、次の3つのシステムで構成されている。これらのシステムは現場条件に応じ、単独あるいは組み合わせて使用することができる。

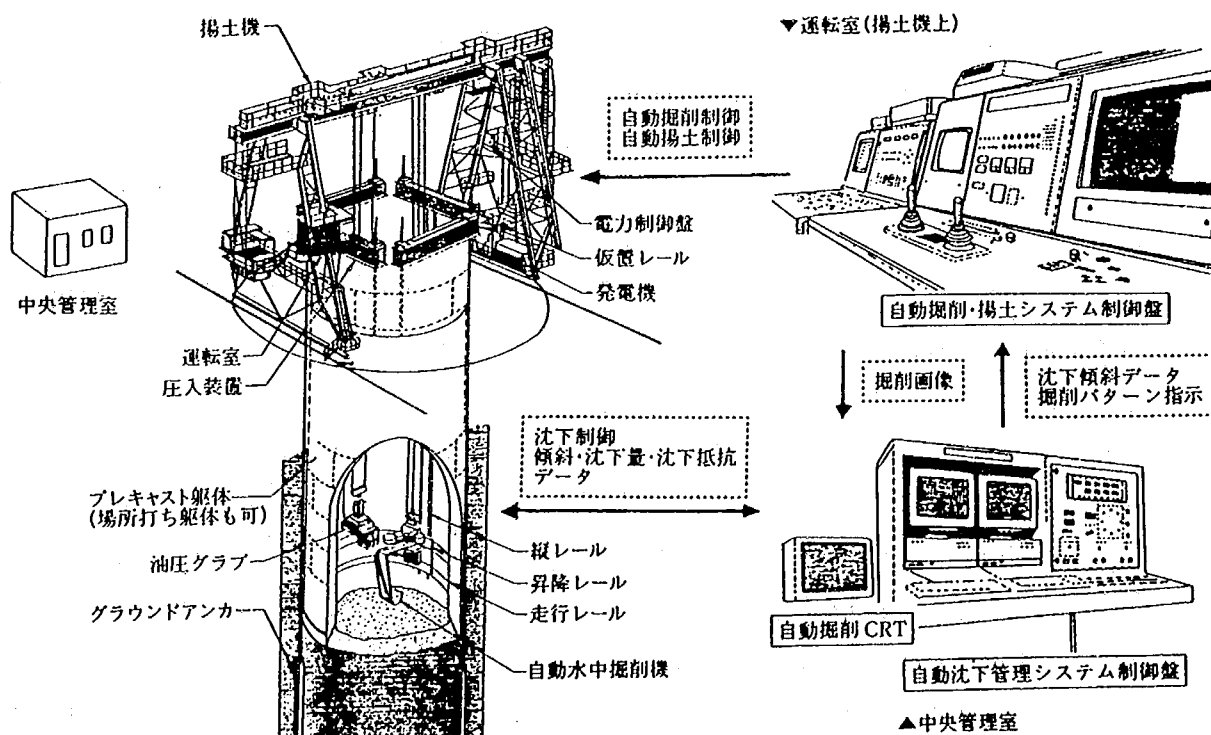


図-4.1 SOCSの概要

① 自動掘削・揚土システム

このシステムは、ケーソン刃口上部の躯体内壁に取り付けた円形のガイドレール上を走行する自動掘削機とケーソンの周りを円形走行する自動揚土機から構成される。自動掘削機は写真-1に示すバックホウタイプであり、これにより刃口直下を含めた全断面の地盤掘削が可能となる。自動掘削機と自動揚土機の運転制御は土質や沈下状況に応じ、揚土機上の運転室内で最適パターンをスイッチで選択入力することにより行う。

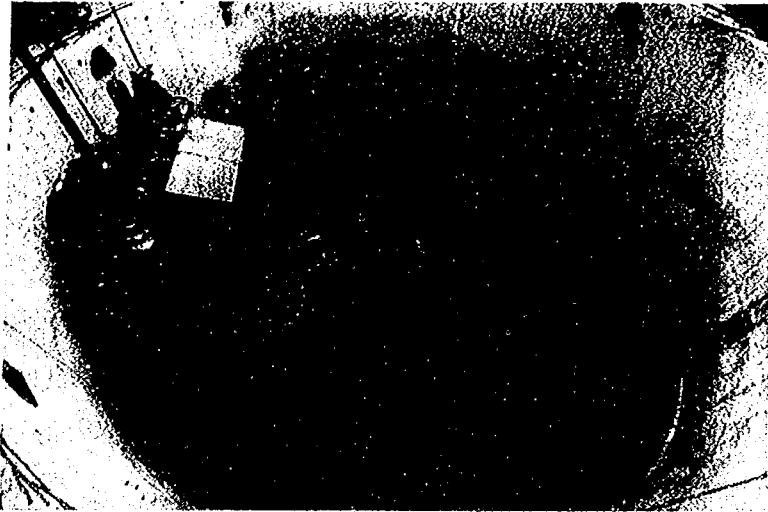


写真-4.1 水中自動掘削機

② 自動沈下管理システム

ケーソン躯体の圧入沈下精度を向上させるため、躯体に取り付けた各種センサーの情報を基に、コンピューターが瞬時に傾斜を察知し圧入用ジャッキを自動制御するシステムである。

③ プレキャスト躯体システム

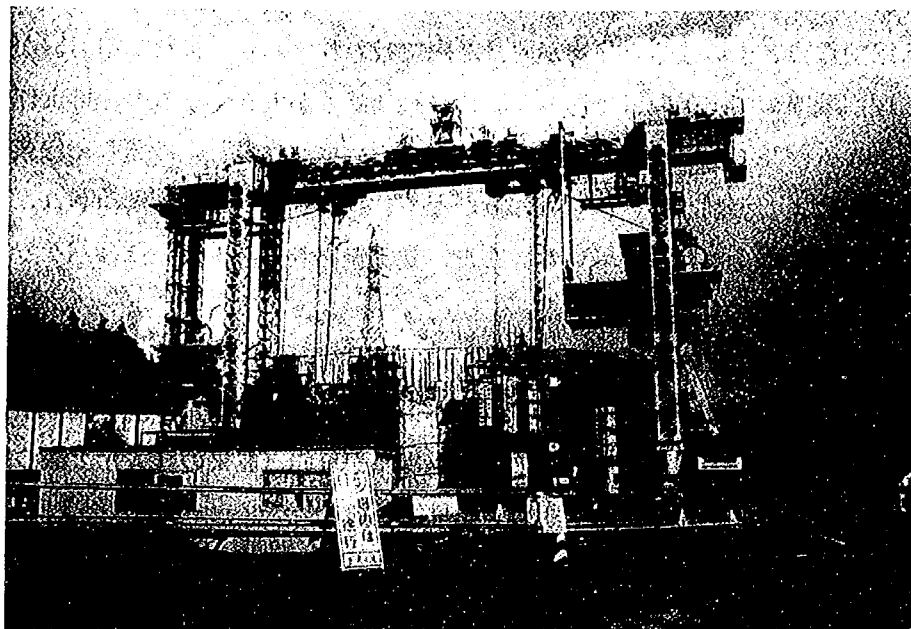
現場打ちコンクリートによりケーソン躯体を構築する従来の工法に代わり、小割のプレキャスト部材相互を現場接合にて構築する省力化技術で、短期間に高品質の躯体構築が可能となる。躯体の水平方向継手はP C鋼棒による緊張、鉛直方向継手はくさび接合継手もしくはコンクリート接合継手を使用する。

S O C Sの特徴として、以下の事項が挙げられる。

- ① 一般に外径8～25 m程度、深度100 m程度までのケーソンに適用可能
- ② 一軸圧縮強度 $q_u = 50 \text{ kgf/cm}^2$ 程度までの硬質地盤に対応可能
- ③ 大深度の掘削でも掘削・揚土効率の低下が皆無
- ④ 現場作業の省力化・工期短縮が可能
- ⑤ 大深度でも安全で高精度な施工が可能

S O C Sは、平成5年度に外径9 mの躯体を用いて実証実験工事を行い、各システムの性能確認等を行った。この結果、開発した自動掘削・揚土システムは各種地盤条件への適合性が高く、土丹等の硬質地盤においても精度よい刃口部の掘削が可能であること、自動沈下管理システムとの組合わせにより、高精度なケーソンの沈下・姿勢制御が可能であることを確認した。

また、S O C Sは平成8年1月～平成9年8月の予定で建設省霞ヶ浦導水工事事務所の立坑工事に適用された。ここでは、自動掘削・揚土システムと自動沈下管理システムにより外径22 m、深度54 mもの大規模ケーソンが施工されている(写真-4.2参照)。



写真－4.2 霞ヶ浦導水立坑の施工状況

今後の課題としては、次の事項などが挙げられる。

- ① 自動掘削システムのハード上、ソフト上の改善による掘削効率の向上
- ② 自動掘削・揚土システムの機械組立解体およびメンテナンス作業の簡易化
- ③ ケーソン沈下抵抗力の推定精度の向上
- ④ バケットへの粘性土の付着防止（掘削効率の向上のため）
- ⑤ プレキャスト躯体の構築手順の合理化

4.2 自動化ニューマチックケーソン（NPC：New Pneumatic Caisson）工法

ニューマチックケーソン工法は、掘削作業が圧気下の函内で行われるため、安全衛生上の制約を受ける。大深度になるほど潜函病等の危険に曝され、施工能率が低下するため、施工可能深度にも限界が生じる。大深度でも安全で能率良く施工するためには、圧気下での一連の作業を無人化・自動化する技術の開発が必要となる。

土木研究所では、SOCSと同様、平成2～6年度に実施した総合技術開発プロジェクトの一環として、(財)先端建設技術センター、民間会社との共同研究により、函内における掘削と揚排土を無人化・自動化した全く新しいニューマチックケーソン工法（以下、NPC工法と呼ぶ）を開発した。

NPC工法の概要を図－2に示す。本工法では、掘削には在来の無人化工法と同様に地上遠隔操作による天井走行式掘削機での函内掘削システムを用い、一方、排土には自動制御による土砂積替えシステムおよび地上搬出システムを新しく開発した。

土砂積替えシステムは、函内掘削機により掘削集積された土砂を図－3の手順により自動運転にて

在来工法では掘削作業と土砂積込み作業が同じ図内で行われており、また、掘削機が土砂積込み作業を行うため、掘削効率の向上が困難であった。特に掘削深さが大きくなると、排土作業時間が長くなり、掘削ロスタイムが長くなる。しかし、NPC工法では掘削作業と土砂積替え作業が切り離されているため、掘削機による掘削土砂の積込み作業がなく、掘削ロスタイムが解消され、在来の無人化工法に比べて掘削効率の向上が図られている。また、地上搬出システムは、土砂バケットの自動転倒装置を開発し、排土効率の向上を図っている。

- ① 一般に断面積150m²以上、深度25～50m程度のケーソンに適用可能
- ② 最深部においても10m³/時間（地山）の掘削土搬出が可能（在来の無人化工法の約2倍）
- ③ 大深度になるほど従来工法からの工期短縮効果を発揮
- ④ 自動制御・遠隔操作により、圧気下での過酷な作業を無人化
- ⑤ 大深度でも安全で確実な施工が可能

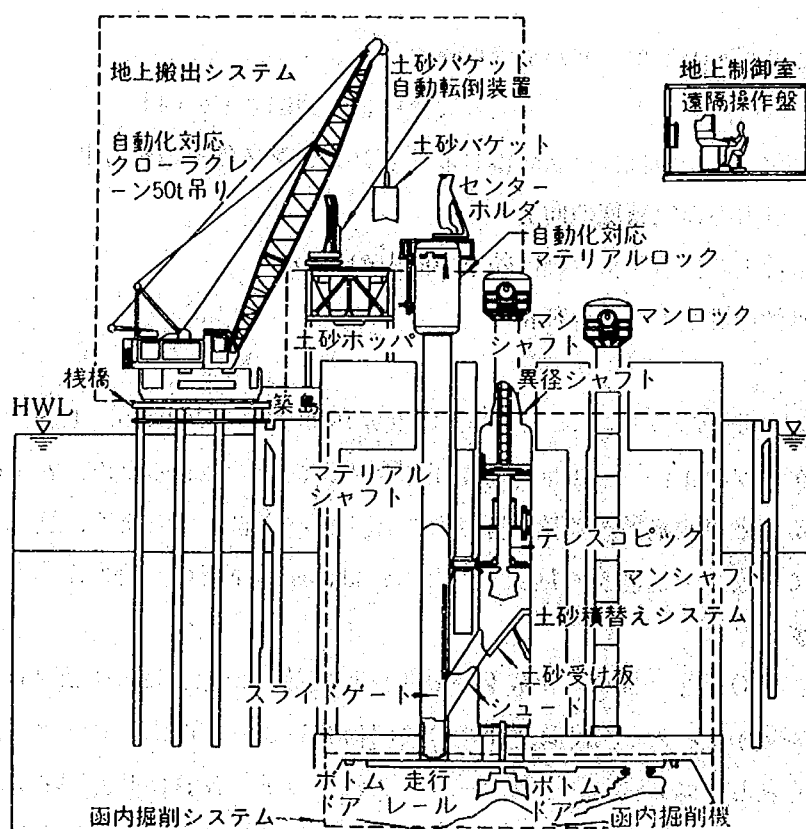
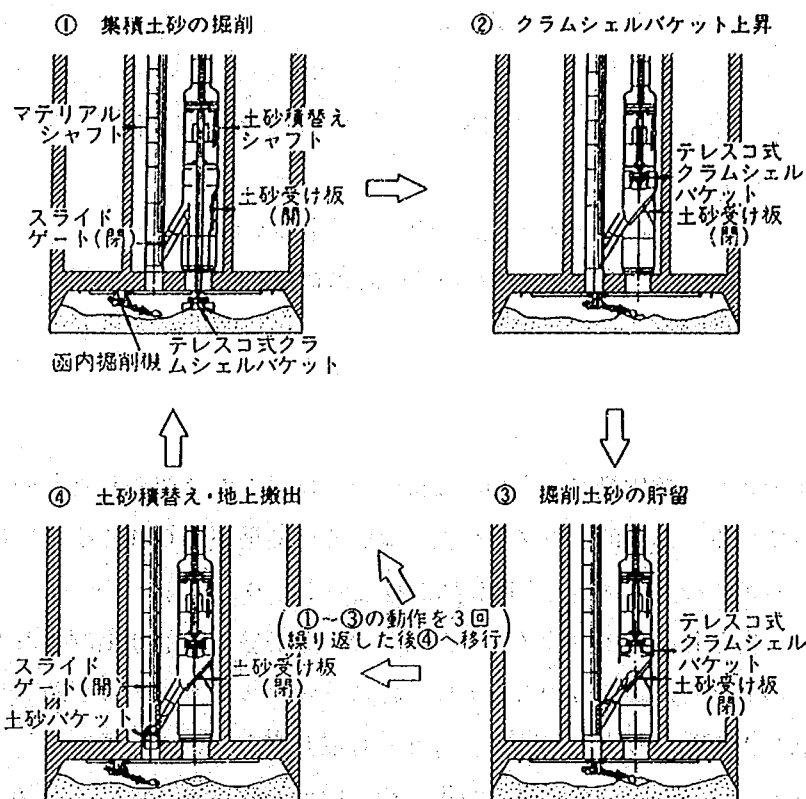


図-4.2 NPC工法の概要



図－4.3 掘削、土砂積替え、搬出の手順

NPC工法は、平成7年10月～平成8年5月に施工された福岡県と佐賀県の県境を流れる筑後川をわたる天建寺橋の下部工の工事に適用された（写真－2参照）。NPC工法を橋梁基礎に適用した初めての工事であったため、各装置の組立や制御センサーの調整などに多少の時間を要したが、概ね順調に施工され、当初の計画どおり一渇水期内で工事を完了した。この工法の特徴となっている土砂積替えシステムの稼働実績については、目標である $10\text{m}^3/\text{時間}$ の掘削土搬出を達成することができた。また、施工時の現場周辺での騒音・振動についても調査したが、発生源から50m離れた地点における騒音の最大値はロックの排気音で75dB、振動の最大値は土砂バケットの転倒時で55dBであり、現場周辺への影響はないと判断された。



写真－4.3 天建寺橋下部工の施工状況

今後の課題としては、次の事項などが挙げられる。

- ① 掘削初期段階からNPC工法の適用（天建寺橋の工事では、途中まで在来工法により掘削）
- ② NPC工法の機装作業、電気・信号関係および制御ソフトの調整作業の簡略化（コスト低減、工程短縮のため）
- ③ 土砂搬出装置内の粘性土の付着防止（排土能率の向上のため）
- ④ 自動化クレーンを用いた土砂バケット空中移動時の荷振れ防止

5. おわりに

道路橋の施工の省力化および建設コストの縮減については、ここで紹介したものを含め、各機関で様々な検討が行われている。具体的なコスト縮減についての結果が得られるまでにはもう少し時間を有するものと思われるが、着実に目指す方向に向かっているものと期待している。

将来の橋梁設計の方向としてライフサイクルコストの概念が盛んに取り上げられつつある。これは従来の初期コストを中心とした経済性の考え方に、維持管理コストさらには更新（架換）コストを加えて、長期的に評価しようというものであり、海外でも取り組みが始まっている。ライフサイクルコスト概念による設計では、最小限の維持管理負担で最大限の寿命（耐久性）を期待できる橋が経済的にも最適となり、耐荷力よりも疲労や腐食、劣化に強い材質及び構造が採用されることになる。土木研究所においても、ミニマムメンテナンス橋と称してライフサイクルコストが最小となる橋づくりを提唱しているが、今後、これを実現するための具体的な技術開発が求められることになろう。

公共工事の建設費縮減に関する取り組みについて

積算技術研究官 芦田 義 則

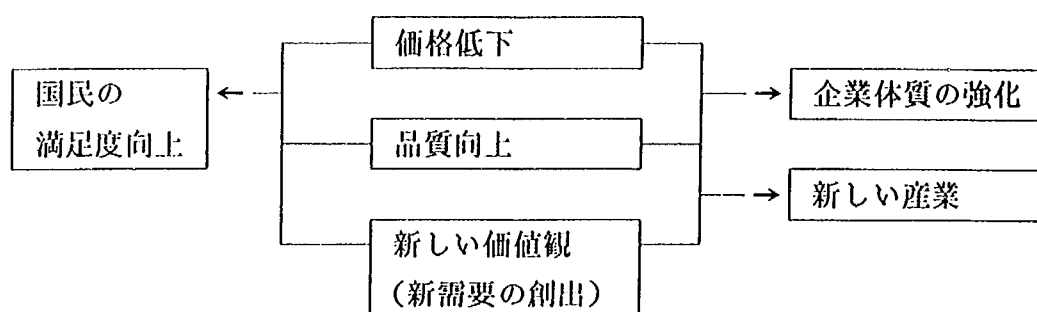
公共工事の建設費縮減に関する取り組みについて

1. はじめに

我が国の住宅・社会資本整備は依然として立ち後れており、国民の生活の質の向上に向けて住宅・社会資本整備の推進に対する国民の期待には極めて大きなものがある。一方、我が国の所得は世界有数の水準に達しているが物価水準も高いことが、国民が豊かさを実感できない要因の一つとして指摘されている。こうした物価水準是正のニーズに応えるとともに、限られた予算の中で社会資本整備を進めて行くには、公共工事の建設費についても縮減に向けての努力が必要となっている。

特にバブル崩壊以降、我が国の高コスト体質が国際競争力を失わせつつあり、産業や雇用に陰を落としていることや財政上の制約などもあり建設費縮減の要請は一層強まっている。建設費縮減は、経済構造改革、規制緩和、人の価値観の多様化、国際化といった社会的要請の流れを踏まえつつ、ユーザーである国民の満足度を高めることに視点をおいたものである必要がある。

そこで本稿では、始めに建設費縮減の必要性等の背景を整理した上で技術的側面から建設費縮減に関する取り組みについて紹介するものである。



2. 建設費縮減の必要性

2.1 建設費の現状

表-1は、東京と欧米の各都市との物価水準を対比したものであるが、ほとんどの財やサービスについて我が国と諸外国との間に幅広く価格差が生じている。

一方、建設費の価格差を比較するため、我が国又は米国において実際に施工された工事の積算事例により工事費総額を比較すると、表-2のようになる。

また、建設費を構成する要素で

表-1 東京と主要都市との物価水準の比較

費 目	東京/N.Y.	東京/ロンドン	東京/パリ	東京/ベルリン
生 計 費 総 合	1.41	1.46	1.36	1.38
食 料 品	1.62	2.15	1.88	1.93
耐 久 財	1.36	1.07	1.00	0.93
被 服 ・ 履 物	1.64	1.66	1.26	1.34
そ の 他 商 品	1.37	1.34	1.18	1.22
エ ネ ル ギ ー ・ 水 道	1.87	1.71	1.23	0.98
運 輸 ・ 通 信	1.25	1.12	1.23	1.12
保 健 ・ 医 療	0.80	1.83	1.69	3.55
教 育	0.90	0.81	2.20	1.18
家 賃	1.84	1.21	1.34	1.35
一般のサービス	1.11	1.28	0.99	1.11

(出典：経済企画庁、内外価格差調査 1994)

1993年平均為替レートによる換算。1ドル=111.20円、1ポンド=166.87円、1772=19.64円、1744=67.26円

ある労務単価、資材単価、機械損料についての価格差は表-3のようである。

これらの分析から、為替レートによる比較では、建設サービスに関する内外価格差は、他の財・サービスと同様の水準での内外価格差があるが、購買力平価等で見ると必ずしも高いとは言えない状況にあること。価格そのものより、価格差が生ずる原因を調査、分析することによって我が国の建設費の縮減方策を検討することが重要であることが指摘されている¹⁾。

2.2 建設費縮減の必要性

我が国の公共工事の事業実施システムを諸外国と比較した場合に、次のような建設費を押し上げる特性が見られる。

- (1) 資材等の複雑な流通機構
- (2) 建設機械の低い稼働率
- (3) 安全及び工事中の騒音・振動等の周辺環境対策の水準の高さ
- (4) 中小企業の受注確保等にも配慮した工事の発注規模 等

これらは、我が国の経済的社会的環境や政策的に必要とされる目的のために実施されてきた事柄を反映したものであるが、これらの諸特性を絶対不変の条件と考えずに可能な限り改善に努め、実態に即した見直しを行うことにより建設費の縮減に取り組むことが、国民の期待に応えるために必要となっている。すなわち、我が国の現況の中で、建設費縮減の必要性は以下のように整理される。

- (1) 円高の定着を踏まえた国際的な視野での対応：例えば輸入資材を活用するなど円高メリットを生かすことにより公共工事の建設費縮減を図る。
- (2) 高齢化社会の到来に備えたより一層効率的な公共工事の実施：高齢化社会の到来により投資余力の低下が懸念される所であり、建設費の縮減により公共工事の効率化を図ることが重要となっている。また、生産年齢人口の減少による労働者不足も懸念されるところであり、省力化を念頭においた効率化方策を講じることも必要となっている。
- (3) 国民のコスト意識の高まりに応えた一層効率的な公共工事の実施：社会の各分野で起こっている価格体系の変化の中で国民のコスト意識の高まりに応え、「良いものをより安く」、すなわち品質

表-2 各種の比較手法による日米の建設費の差

		為替レート	貿易財と非貿易財に区分し加重平均	一人当たりの国民所得に対する割合	国民支出購買力平価
①	内務省道路局：都市道路工事	1.28	0.98	0.91	0.75
②	陸軍工兵隊：都市道路工事	1.39	1.12	0.99	0.82
③	NY州交通局：道路改良工事	1.45	1.16	1.02	0.85
④	日本の道路改良工事（米国は対比対象）	1.13	0.89	0.80	0.67
	（米国は対比対象）	1.34	1.05	0.95	0.79

〔比較方法〕

- （出典：内外価格差調査研究会報告書）
- 1) 米国内務省道路局、陸軍工兵隊、ニューヨーク州交通局が実施した積算事例について、日本の積算基準を使用して価格差を算出したもので、積算にあたっては、米国の発注図面及び仕様書を用いた。
 - 2) 日本の道路改良工事については、発注図面、仕様書に基づき米国のエスティメーターが積算した。
 - 3) 貿易財（資材費、機械費等）は為替レート、非貿易財（労務費、経費等）は国民支出購買力平価を使用した。
 - 4) 為替レートは1ドル111円（1993年平均）、国民支出購買力平価は1ドル188円（OECD調査1993年）を用いた。
 - 5) 「一人当たりの国民所得に対する割合」とは、各事例における工事費が一人当たりの国民所得の何倍に当たるかを日米で比較したものである。

これは、建設費を所得と比較することにより、実感として建設費の高低を比べようという主旨による。

表-3 労務・資材・機械損料の日米欧の単価比較

	比率（日本／米国）	比率（日本／英国）	比率（日本／独）
労 務 単 価	1.20	1.56	0.76
資 材 単 価	1.51	1.29	(1.44)
機 械 損 料	1.31	(2.40)	(1.11)

（出典：内外価格差調査研究会報告書）

- 注 1) 為替レートは1993年平均、1ドル=111.20円、1ポンド=166.87円、1マルク=67.26円で設定
2) () の値は参考値（理由：対象品目が少ない＜資材単価＞
整理方法が異なる＜機械損料＞）

の確保を前提として建設費の縮減に努めることが、真に豊かさを実感できる社会の実現に必要なとなっている。

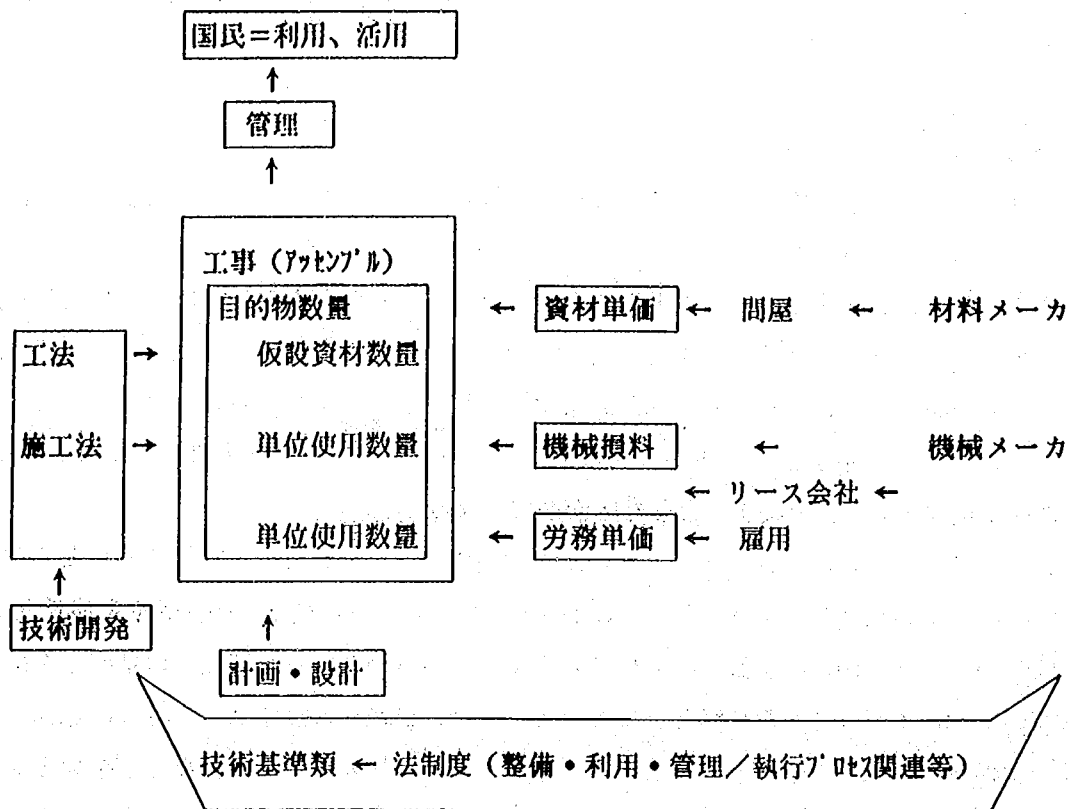
2.4 建設費縮減方策

建設費の縮減は、品質の低下を招いたり、適正な利潤を侵害したりする形での低減を意味するものではなく、合理性のある方策が必要となる。

建設費の構造をモデル的に表すと図-1のようであり、コスト要素からすると資材費、機械費の低減と単位当たりの要素使用数量（歩掛）を低減する（能率、稼働率を向上する）ことが必要となる。すなわち、これらのコスト要素に対してとるべき方策は、直接的には、生産性の向上や調達コストの低減であるが、それだけでは不十分でありコストの決定に関わっている様々な法制度や技術基準類、商慣行さらには技術開発といった要素まで含む対応が必要となる。

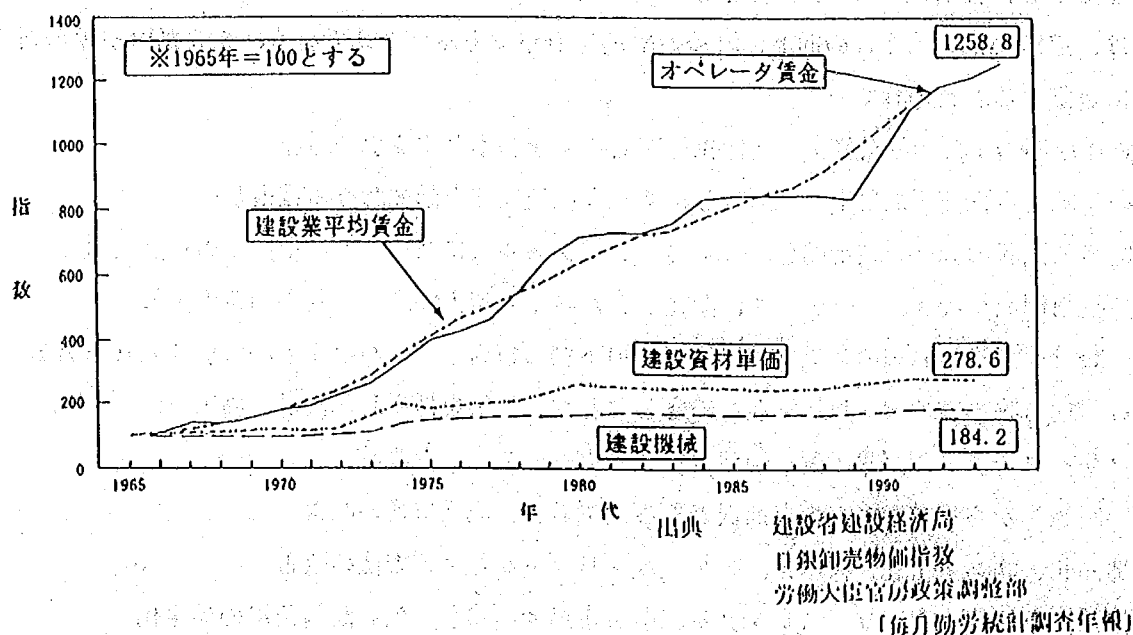
例えば、法制度や技術基準類については、それらが過剰品質をもたらしたり、時代に合わなくなつて不合理なものになっていないかどうか、様々な規制等が民間の自己責任の下での活動や生産性向上、技術開発を妨げていないか、国民の価値観の変化に対応できているかといった観点での見直しを関係する法制度について幅広く行うことが必要となっている。また、商慣行の点では、資材等の流通機構の改善や建設機械の稼働率向上や中古市場の活性化、下請・メーカ等の競争性確保などが必要となっている。さらに、技術開発は、単にコスト低減だけでなく新しいニーズに応えるという意味でも重要である。特に、技術のブレークスルーにつながる技術開発は、従前では困難であった社会資本の建設を可能とし、社会活動の基盤として貢献したり、新しい需要を社会に提供したりしている。例えば、コンクリートダムの建設に、貧配合、超硬練コンクリートをトラックで運搬し、ブルドーザで敷均し、振動ローラで締固めるといった一連のシステムを導入したRCD工法は、ダムの設計、材料、施工方法の全てを変革し、経済性の向上、工期短縮、施工時の安全性の向上をもたらした。また、最近話題のITSは、道路交通の安全性の向上、渋滞の解消に有用であるばかりでなく、50兆円規模の新産業の創出に貢献すると言われている。

- ・ 自己責任原則の下での社会経済の活性化を図ることを基本とする規制緩和
- ・ 国民の要求する機能・品質水準に適合し、多様な技術開発を誘発しうる技術基準
- ・ 社会経済的意義の大きい技術開発、技術のブレークスルーに結びつく技術開発の重点支援
- ・ 民間の技術開発へのインセンティブ、開発された技術の導入促進に有効な施策の実施
- ・ 計画→設計→工事→管理のステップに対して川下側の技術・ノウハウを上流に取り入れる方策
- ・ TPO（構造物の重要度、地域特性）に応じた基準、技術を採用した設計、施工
- ・ ライフサイクルコスト（建設費＋管理費）評価をベースにした設計
- ・ 幅広い調達先からベストのものを選択できる環境整備、流通機構の改善
- ・ 大型部品化、ユニット化、標準化、スケールメリットなど調達方法の改善
- ・ 建設機械の稼働率上昇、リースレンタル、中古市場の活用など生産設備使用の効率化
- ・ 省力化を図れる設計、プレキャスト化、機械化、多能工化などによる現場の生産性の向上
- ・ 施工管理の高度化、OA化、規制緩和などによる間接部門の効率化
- ・ 平準化、効率を考慮した発注ロットの設定



$$\begin{aligned}
 \text{コスト} = & + \text{資材費等} = \Sigma \text{数量} \times \text{資材単価} = 43\% \\
 & + \text{機械費等} = \Sigma \text{単位数量} \times \text{機械損料（リース料）} = 19\% \\
 & + \text{労務費等} = \Sigma \text{単位数量} \times \text{労務単価} = 39\%
 \end{aligned}$$

図－1 建設コストモデル図



図－2 要素価格指数の推移²⁾

3. 性能規定とV E

建設費縮減にも効果がある新しい技術を生み出すしくみとして、基準類の性能規定化やV Eが注目されている。以下ではこれらについて紹介する。

3.1 性能規定化

1) 性能規定化の位置づけと意義

基準類は、構造物の安全性や使用性などを一定水準以上に確保するために不可欠のものであるが、その規定の仕方によって過剰規制となったり、技術開発の支障となったりすることがある。こうしたことから、基準類は社会経済情勢に応じて適宜、見直しされるべき性格のものであり、今日においては、以下のような観点から基準類の規定方法、基準類の規定項目、品質レベルのあり方などについての見直しが要請されている。

1. 規制緩和：自己責任原則の下での多様性の拡大による活力ある経済社会の創造
2. 国際化：国際的な共通ルールとの整合
3. 国民の要求機能の変化：価値観の変化にあった施設の整備

こうした中、性能規定化は基準類の規定方法を改めることを意味するものであり、性能規定化は以下のような意義を有している。

1. 基準類を要求する性能（機能）と性能の照査方法を中心とする内容の性能規定に改めることにより、従来の仕様（形、材質）にとらわれない新しい技術の開発や多様な構造物の設計が可能となり、結果的に同一機能の構造物を安価に築造することが期待される。
2. 国際的な規格制定の考え方との整合性が図られる。すなわち、「貿易の技術的障害に関する協定（WTO／TBT協定）の2.8」では、「加盟国は、適当な場合には、デザイン又は記述的に示された特性よりも性能に着目した製品の要件に基づく強制規格を定める。」とされている。

2) 性能規定化の意味

性能規定の対語として仕様規定という用語が使われるがこれは、材料、形状、寸法等を具体的に記述した規定である。基準類には、内容的に性能を規定している部分と仕様を規定している部分があり、その効力において強制規格（遵守を強制）と任意規格がある。性能規定化とは、強制規格となるものは、要求性能（機能）のみの記述とし、その実現方法は基本的に設計者等に任せる方法である。

性能規定化を図った場合、前述のような効果がある反面、設計毎に要求性能を満足していることを証明するのは手間を要することである。すなわち、従前の仕様規定は、一応性能要求を満足する仕様であることを証明されたものであり、設計の効率性確保の面では有効性がある。これらは任意の規格として位置づけることが考えられる。

◎性能規定化した場合の体系

- 強制規格部分・・・目的、要求機能、要求機能水準
- 任意規格部分・・・性能評価手法、要求性能を満たすと見なす仕様

＜仕様＞は絶対ではなく、性能規定を満足する一つの形

◎構造物の性能評価項目と規定の対象

使用性、安全性、耐久性、保守管理、施工性	：	構造物に関する規定
施工性、環境影響	：	環境、安全衛生等の規定
経済性、保守管理、施工性、環境影響、美観	：	代替え案との相対比較

◎性能規定の対象となる項目

以下のような事項についての要求機能及び要求機能水準を規定

基本機能	強度、使用性（設計速度、対象流量）
安全性	外力＜耐力、安全率、耐震性、耐風性、耐火性、公害防止
耐久性	耐候性、耐磨耗性、耐腐食性、防食性
操作性	軽さ、取り付けやすさ

◎性能規定化に伴い再検討すべき項目

構造・寸法	配筋設計、形状
構成材料	材料、混合物
施工方法	転圧回数、仮設方法

以上のような流れの中、建築基準については、平成8年3月の「住宅建設コスト低減のための緊急重点計画」等において、(1)建築基準について、仕様規定中心の現行制度から、原則として性能規定に改める。(2)枠組壁工法（ツーバイフォー工法等）による住宅について、平成8年度中に先行的に構造方法に関する技術基準の性能規定化を行う。ことが決まり³⁾、性能規定化へ向けての動きが始まっている。土木関係についても平成9年度からの総プロの中で性能規定化に関する研究が始まろうとしている所である。

3.2 VEについて

建設コストの低減が話題となっている今日、VE（価値工学）が注目されているが、その意味するところには、(1)民間が保有する技術を活用する制度が求められていることの側面と(2)顧客のコスト削減要請が厳しくなっていることからこれに應えるための技法としての側面がある。公共工事に関するVEはこの両面から検討され始められている所であるが、本節ではこれらの概要について紹介する。

1) 制度としてのVE

建設コストが発生するのは工事段階であるのに対し、コスト要因の多くは計画・設計段階で決まる。こうした状況の中で、コスト低減を図るには工事段階側の技術・ノウハウ等を計画・設計にフィードバックすることが有効であることから、そうしたノウハウを有する民間の技術を活用しコスト低減を図る仕組みとして、制度としてのVEの意義がある。制度としてのVE導入は、建設コスト低減により発注者ひいては国民の利益になるものであるが、民間企業に積極的に提案を促すにはそれに見合うインセンティブを含むものである必要がある。

米国はVE発祥の地であり、1954年に国防省船舶局で採用された後、国防省内に広がり、その後、財政支出削減等のため行政予算管理局の指令書が出されるなどがなされ、連邦政府機関内に制度としてVEが定着して行った⁴⁾。

本年2月には、クリントン大統領が公法第104-450号に署名しVEが立法化され、全ての連邦管

轄諸官庁でVEを行うことが義務付けられた。改訂条項におけるVEの定義は、「各管轄官庁またはその契約受託者によるプログラム、プロジェクト、システム、製品、サービス、供給品などについて、有資格担当者がその機能を、それぞれの性能、信頼性、品質、安全、ライフサイクルコストなどの改善向上を目的として行う分析」であり、各管轄官庁は、コスト効果向上のためのVE手続き／プロセスを設定し、維持することを要求されている⁵⁾。

VE制度は、それを実施する時期によって表-4.1のようなタイプのものがあり、我が国においては、近年一部の自治対等の建築工事や電力土木工事、鉄道工事でVE付き入札・契約方式が取り入れられている。建設省直轄工事においては、本年より、入札前に代替案の提示を求め、発注者が適切と認めたものについては代替案による入札を行う方式（施工方法等提案型）が試行されている。こうしたVEを制度的に取り入れるためには、表-4.2のような点が検討課題となる。

表-4.1 VEの実施段階別分類

実 施 段 階	名 称
調査・設計段階	設計VE
入札時 (設計+施工)	性能発注
入札時 (施工)	代案提案型 (価格評価)
入札時 (施工)	代案提案型 (総合評価)
契約後 (指定部分)	契約後VE (狭義VE)

表-4.2 VE制度に関する検討課題

- 対象工事
- 提案範囲、提案時期、審査基準
- 提案費用負担
- メリットの配分方法
(低減分を還元、入札が有利、技術審査加点)
- 提案への責任、知的所有権の扱い
- 法制上の扱い（会計法、予定価格制度等）

図-3は作業の流れの中でVEを行う時期の最適点を説明するものである。すなわち、コストのほとんどは設計で決まることから、川上でVEを行うほどコスト低減効果を上げやすいが、未確定の設計条件が多いと条件変更に伴いVE成果が意味をなさなくなるなどVE費用が大きくなるため、条件の半分程度は決まった段階での実施が有効となる。

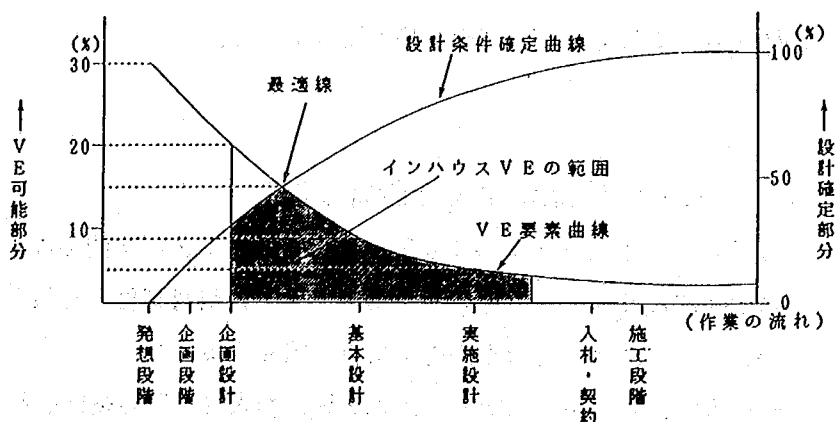


図-3 VE適用時期のイメージ⁶⁾

2) VE技法

技法としてのVEは、GE社のローレンス・マイルズ氏によって1947年に発表された価値分析(VA)に始まる。マイルズ氏の考え方は、需要者は製品を求めているのではなくて機能を求めている。そしてその機能の必要度に応じて金を払うものであるから、安くても良い製品を設計する基本は、製品に求められている機能を徹底的に追及・理解することを設計の基礎としたものである⁷⁾。こうした考えが国防省等によって発展させられ現在のVE技法として確立されている。

VEの定義には様々なものがあるが「最低のライフサイクルコストで、必要な機能を確実に達成するために、製品またはサービスの機能分析にそそぐ組織的努力」というのが一般的理解のようである。いずれにしてもVEの目的は価値向上であり、価値向上には以下の4パターンがある。

$$V(\text{価値指数}) = F(\text{機能}) / C(\text{コスト})$$

F:一定	C:削減	F:上昇	C:一定
F:上昇	C:削減	F:上昇 ²	C:上昇

VEの基本的プロセスは、図-4のようであり、その特色を表-5に示すが、機能を徹底的に追求して新しいものを組織的に創造する実践技法というのがVEであると言える。

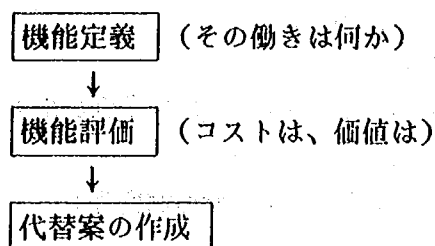


図-4 VEの基本的プロセス

表-5 VEの特色

1. 顧客本位に価値向上を考える
2. 機能中心に考える
3. 機能達成には様々な手段がある
4. 専門家の知恵を活用する
5. 組織的な活動努力(提案力向上)

こうしたVEの技法は、建築分野では業務VE(業務改善)、開発VE(低コスト技術開発)、工事VE(工事原価低減)として適用されてきており成果が報告されている⁸⁾。今後、土木分野においても価値向上のために活用が期待される所であるが、VEは結果を保証するものではないだけに、有効に機能させるしくみづくりが今後の検討課題と言える。

4. 資材費の低減による建設費縮減

資材費は、建設コストの40%を占め、鉄やセメント関係の主要資材価格は少しの価格低減でも効果は広範囲に及ぶことが期待される。こうした資材費低減方策としては以下のような方策が考えられるが、ここではその主なものの事例を紹介する。

- 輸入資材の活用：モデル工事の実施、輸入資材情報提供など
- 資材の生産・流通の合理化：生産合理化、輻輳した商流、物流の合理化など
- 資材の仕様・規格の標準化：多品種少量生産の改善
- スケールメリットの活用：発注ロットの大型化、超大口価格の設定
- 再生資源の活用：活用範囲の拡大
- 規制緩和：海外建設資材品質審査証明事業

4.1 輸入資材活用モデル工事

安い海外資材を活用することにより建設費削減を図るため、輸入資材活用モデル工事が実施されている（表－6）。

本来、資材の利用に関しては品質規格を満足する資材なら、調達先を問うものではないが、海外資材が占める割合は大理石が100%、木材で74%、鋼矢板で6.5%、その他の鋼材、セメントでは1%以下（平成6年）という実態にあり、活用が進んでいるとは言い難い。この原因としては、

- (1) 品質・耐久性への不安
- (2) 供給の安定性への不安
- (3) 情報不足
- (4) 調達手続きに不慣れ

といったことが考えられる。こうした課題への対応の検討といった点も含めてモデル工事が実施された。

実施結果を総括すると以下の通りである。

(1) J I S 規格品、海外建設資材品質審査証明を受けたものを使用しており品質面での問題はあまり指摘されていない。なお、工期の設定に余裕のないこともあってか J I S 認定工場のある韓国製を利用するケースが多くなっている。

(2) カラー舗装骨材以外では納期、供給能力にはやや不安があるとの報告があり、余裕のある工期設定が必要となる。

(3) コスト的には、鉄筋以外は縮減効果が見られたが、発注数量が小口なため価格が思うように低減できなかったケースや陸揚げ、陸上輸送の横持ちコスト等によりメリットが得られないケースが報告されている。

4.2 再生資源の活用

限りある国土、資源の有効利用、生活環境の保全、また、地球環境の保全という観点からも、建設副産物の発生抑制とともに再生利用を中心とする適切な循環処理系を構築することが課題となっている。このため、「建設副産物対策行動計画」（リサイクルプラン21）が策定され、発注者、施工者及び処理会社が一体となって総合的な建設副産物対策が推進されている。

建設副産物対策の中で、コンクリート塊やアスファルトコンクリートなどの建設廃棄物の再利用・減量化率は51%（平成5年）と全産業平均78%を下回っている。これらの再生利用を促進するため、「プラント再生舗装技術指針、平成4年」や「コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基

表－6 資材別の工事件数（直轄モデル工事）

資 材 名		H 6	H 7	計
土 木 用 資 材	鋼矢板	1	9	10
	軽量鋼矢板		1	1
	鉄筋		5	5
	セメント		6	6
	カラー舗装用骨材	1	2	3
	ガードレール		2	2
	その他		2	2
	合 計	2	27	29
建築材料の一部		1	5	6
設備機材の一部		2	2	4

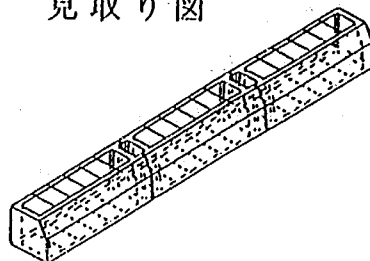
準（案）平成 6 年」が作成され、また、建設残土の有効利用ため「建設発生土利用技術マニュアル、平成 6 年」が作成されている。こうした技術基準類の整備や再利用技術の開発、建設副産物情報交換システムの活用などによって再生資源の活用が進むだけでなく、建設費縮減に結びつくようになってきている。

例えば、アスファルト・コンクリート塊についてはその 78% が再利用されているが、再生資材化施設が近傍（40km または 1.5 時間以内）にある舗装工事においては、再生合材の使用を義務づけることにより約 19 億円（8.6%）の縮減効果を得ている。

また、コンクリート塊についても再生資材としての利用が図られるようになっているが、護岸基礎や護岸のフトン籠に利用するなど現場内利用を図る工夫をすることにより廃棄物の発生抑制を図るだけでなく、直接的に建設費縮減効果も得ることが可能になる。

中部地建では、図-5 のように護岸基礎工について、内部を中空にしたプレキャスト製品にし、現場で発生したコンクリート塊を中詰め材に再利用することで、11% の建設費縮減を可能にした。

見取り図



断面図

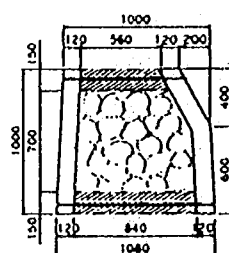


図-5 護岸基礎見取り図及び断面図

4.3 資材の使用規格の標準化

設計段階等での資材及び部品の仕様・規格の標準化を図ることにより、多品種少量生産を是正し、資材生産や流通の合理化が期待できる。具体的には、標準設計で採用する資材の標準化を図っている（5.2 参照）他、H 形鋼については、建設省直轄工事の使用実績を調査し、88 品種のうち比較の実績が多い、もしくは代替えのない 47 品種のみを原則として使用することとした試行が始まっている。

5. 新技術の活用等による建設費縮減

5.1 建設費縮減のための技術方策

表-7 建設費縮減のための技術的方策

建設費の低減のためには常に新しい技術を開発し、現場に活用する必要がある。

建設費縮減を目的とする技術開発は、表-7 に示すような方策により達成されるが、これは一般論であり、実際には、現場の特性、工種の特性等に応じた様々な創意工夫の組み合わせが必要となる。

そこで本節では技術活用パイロット工事

方 策

手 法

設計法の変更
プレキャスト化
代替材料・工法開発
施工方法の改良
管理方法の改善

省力化、形状の単純化、標準化・規格化
構造要素の製品化、製品の大型化
発想の転換（機能が同等なら良い）
機械化、機械開発（大型化、新機能）、
システム化、自動化、不稼働日減少
OA 化、新計測技術の活用

等で実施された、新しい技術の開発と活用による建設費縮減事例について紹介する。

5.2 設計法の変更（省力化設計法）

1) 考え方

従来の設計法は、必要最少限の材料で力学的条件を満足することを主な判断基準とするものであった。相対的に材料費が高価で合った時代には、こうした考え方で経済設計を成し得た。しかしながら、労務費が相対的に高くなると、材料使用量が増えても施工手間を減ずる設計を行った方が経済設計となる場合が出てくる。一方、経済性の他に高齢化社会の到来に伴う建設労働者の不足、労働者の高齢化といった課題に対応するためにも省力化を図ることが必要となっている。こうしたことから、材料は増えても施工の手間を減らす方向での設計とすることにより施工の効率化、工期短縮、建設費縮減を図ることを基本的視点とする設計法の研究が行

われ、平成7年10月に「鋼道路橋設計ガイドライン（案）」が、平成8年6月に「土木構造物の設計ガイドライン（案）」が出された。これらが対象とする構造物は表-8の通りであり、以下にその概要を示す。

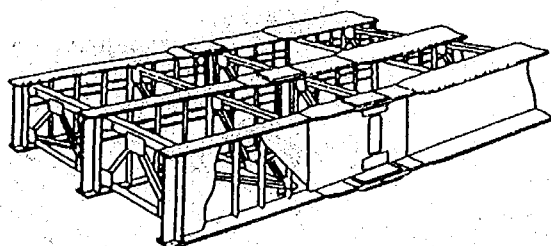
表-8 対象構造物

土木構造物	：側溝類、暗きょ類、擁壁類
橋梁	：下部工：逆T擁壁、張出し・壁式橋脚
構造物：上部工	：ボステンT桁橋、プレテン床版橋、 プレテンT桁橋、鋼プレートガーダー橋
基礎工	：場所打杭工

2) 鋼道路橋

「鋼道路橋設計ガイドライン（案）」は、使用頻度が高いプレートガーダー橋（I桁、箱桁）を対象に、構造を簡素化することによって製作の一層の省力化を図ったものである。具体的には、同一部材は同一断面、連結板の一体化、水平補剛材の原則1段化等により、板継ぎ溶接の削減、材片数の削減が図られ、工場製作加工の省力化が可能となった。また、構造が簡素化されたことにより現場での連結作業の省力化や床板施工時の型枠作業、ハンチ量の管理、配筋作業の省力化が可能となった。また、副次的効果として剛性の増加による桁や床板の耐久性の向上や溶接箇所の減少による耐疲労性の向上も期待できる¹⁰⁾。

現在の構造のイメージ



本ガイドラインによる構造のイメージ

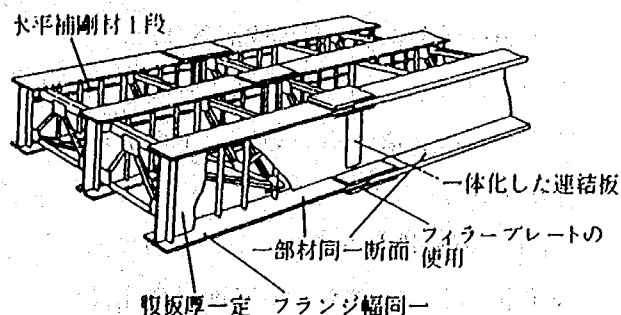


図-6 鋼橋の省力化イメージ図

「鋼道路橋設計ガイドライン（案）」に沿っての試験施工が地建、関係公団で実施されているが、以下に日本道路公団、阪神高速道路公団で取り組まれた事例を示す。

表－ 9 日本道路公団の事例¹⁾

対 策 概 要	単純 I 桁	連続 I 桁	箱桁	省 力 化 効 果	
フランジ突合せ溶接廃止	○	○	○	鋼重	1.10 倍
フランジ幅統一	○	○		加工数	0.90 倍
水平補剛材一段化	○	○		溶接延長	0.61 倍
ウェブ添設板の1枚化		○	○	製作費	0.92 倍
対傾構の充腹桁化	○				
圧縮側縦リブ溶接廃止			○		

＊) 対象橋梁数：6 橋

表－ 1 0 阪神高速道路公団の事例^{1 2)}

橋梁形式	3 径間連続 非合成 I 桁	4 径間連続 非合成 I 桁
平均支間長	43.3m	41.6m
加工重量	1.08	1.04
大型材片数	0.60	0.53
小型材片数	0.84	1.05
板継ぎ溶接延長	0.0	0.0
T 継手溶接延長	1.0	1.0

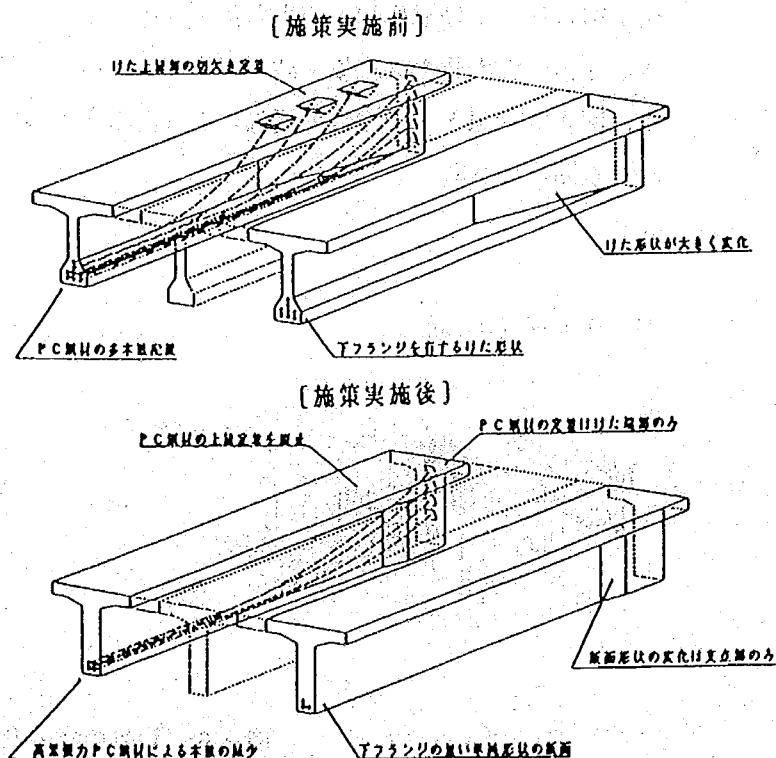
製作コスト縮減効果：約 8 %

＊) 中間支点部ではフランジ幅を
変化させて鋼重増を少なくしている

3) PC 道路橋

ポストテンション PC 橋の標準設計は、設計基準である「道路橋示方書－Ⅰ 共通編、Ⅲ コンクリート橋編」が改訂され、それに整合させる必要が生じたことから平成 6 年 3 月に改訂された。この改訂に当たっては、施工合理化の観点からの見直しも行い、以下のような変更を行っている。

(1) 主桁形状を下フランジのない単純な形状とする。また、桁断面の変化は支点部とする。このことにより、鉄筋加工の簡易化、型枠転用の効率化、コンクリート打設性の向上と高品質化が図れる。



図－ 7 ポストテンション PC 橋の省力化イメージ

(2) 主ケーブルをP C鋼より線のB種に統一し、高緊張力を与えられるようにする。

(3) 従来手間のかかったP C鋼材の上端定着を廃止し、端部定着を原則とする。

これらの対応は、太径のP C鋼材が使用できるようになったことや鋼材の本数を減じて高緊張力を与える方法でも問題のないことが研究成果として確認されたことで可能となったものである。

本方策により、資材量は8%程度増加するものの約1%のコスト低減効果（直轄での試験施工16件）が認められた。

4) 擁壁、カルバート、橋台、橋脚

擁壁、カルバート、橋台、橋脚については、図-8に示すような具体的方策を提案している。擁壁を例に具体的方策と期待される効果を整理すると表-11の通りである。なお、これらは試験工事の発注を目的とした素案であり、試験工事の結果を踏まえて内容の見直しやコスト縮減効果の定量化を図って行く予定である。

表-11 擁壁に関する施工合理化設計法の概要

方 策	期 待 さ れ る 効 果 等
1. 形状の単純化 • つま先版、かかと版にはテーパを設けない • たて壁背面には勾配を設けない • 部材形状は等厚で10cmピッチ、矩形断面 2. 配筋仕様（配筋の標準化） • 定尺鉄筋（50cmピッチ）を使用するし、重ね継手長、定着長で調整 • たて壁主鉄筋の断面変化の廃止及び主鉄筋の太径化、本数の減少 • 底版下側鉄筋は、前趾後趾の鉄筋を統一する • たて壁配力筋は主鉄筋の外側 底版上・下面の配力筋は主鉄筋の上側 • 擁壁高さが変化する場合でもたて壁の主鉄筋の種類は3種程度までとし、天端筋で調整する	• 鉄筋加工工数の減少、コンクリート表面仕上げ労力削減、たて壁足場の設置容易化 • 配筋作業、型枠施工等の施工性を考慮 • 型枠の転用性向上、工場加工、自動化 • 鉄筋加工工数の減少、材料種数の削減 • 材料数の削減、加工組立の省力化 • 加工組立省力化 • 鉄筋組立の施工性を向上 • 鉄筋加工工数の減少、材料種数の削減

方 策	期 待 さ れ る 効 果 等
- 主鉄筋径の配筋間隔（250mmまたは125mm）及び主鉄筋と配力筋の組み合わせを標準化 - ユニット鉄筋仕様を以下のように定める - 面材ユニットが原則 - 主鉄筋配筋間隔 250mm - 配力筋配筋間隔 300mm - 重ね継ぎ手を用いる - 配力筋重ね継ぎ手長=20Φ - 主鉄筋と配力筋の結束は専門工場での自動溶接	- 作業効率の向上、ユニット筋化の促進 - ユニット鉄筋の使用促進 - 継ぎ手が一断面に集中するため1.3倍の割り増し
3. プレキャスト化指針 - 横断方向に一体化 - コンクリートの設計基準強度； 300~400kgf/cm²	たて壁とフーチング分割は開発段階であり当面は横断方向に分割してプレキャスト化する

5.3 2次製品化（プレキャスト化）

2次製品化は、土木構造物を構成する要素を工場製作可能な部品とすることにより、現場の省人化や工期短縮さらには建設費縮減を図る方法であり、従来から各地、各機関で取り組まれて来ている。そうした中でも北陸地建は、体系的に多くの品種について大型化・2次製品化を試み、建設費縮減の効果も得ている¹³⁾。こうした2次製品化への取り組みは、前述のような効果のみならず、積雪寒冷地帯特有の冬季の建設需要の低減を補う効果もある。

北陸地建での取り組みによる建設費縮減等の成果は表-12に示すとおりであり、主要8製品、約32万tで245百万円（18%）の建設費縮減効果を得ている。

製品開発は、JIS製品の大型化、もしくは現場打ち施工のプレキャスト化の視点で行われているが、いずれの場合も機械化施工を前提として製品化されており、製品開発に併せて機械（アタッチメント）も同時に開発されている。

プレキャスト化や製品の大型化は、多くの人の発想の中にあるものではあるが、それを実現し、普及させるには、発注者、設計者サイドでそれらを採用しやすくする仕組みが必要であり、そうした需要が見込めないと生産者も開発、供給できないし、また、量産化が図れないとコスト縮減にも結びつきにくい。こうしたことから、北陸地建では、製品の開発から普及に向けてのいくつかの工夫が見ら

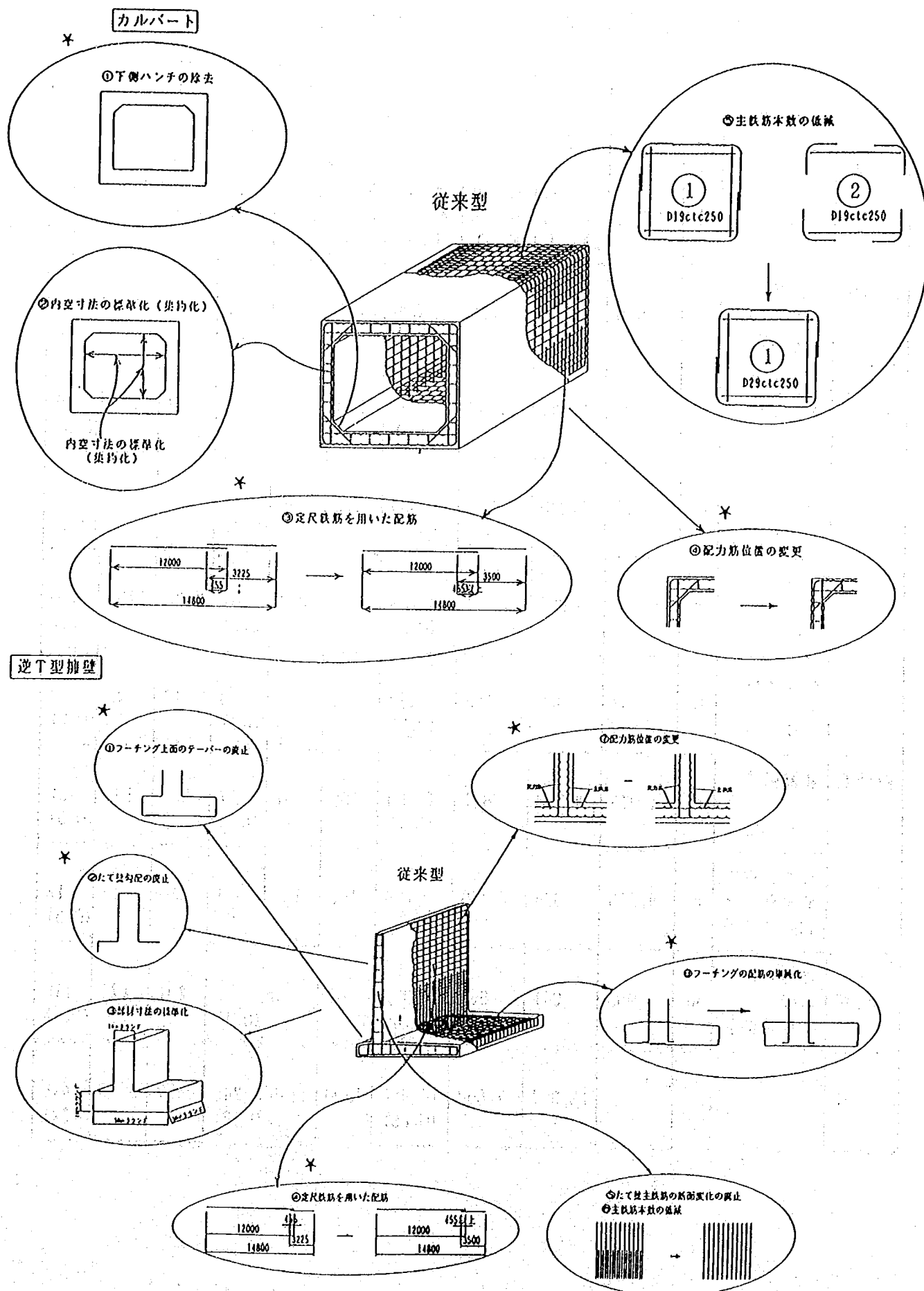


図-8 施工合理化設計法の概要

表-12 北陸地建の主なコンクリート2次製品によるコスト縮減額¹⁾

種 類	名 称 及び 規 格	単 位	H 7 出荷量	コ ス ト 縮 減 の 内 容								
				労 務 人 数 (人)			工 事 費 (百 万 円)			工 期 (日)		
				従 来 製 施	大 型 製 品 施 工	縮 減 人 数 (率)	従 来 製 品 施 工	大 型 製 品 施 工	縮 減 工 費 (率)	従 来 製 品 施 工	大 型 製 品 施 工	縮 減 工 期 (率)
側溝類	道路用側溝 PUT, PU L=5.0m	m	4,088	2,726	1,636	1,090 (0.4)	191	134	57 (0.3)	723	361	362 (0.5)
ブロッ ク類	大型ブロッ ク π 型 1m ² , 4m ²	m ²	5,207	2,734	1,640	1,094 (0.4)	253	227	26 (0.1)	723	578	145 (0.2)
	大型植栽ブ ロック L=4.0m	m	1,478	1,370	274	1,096 (0.8)	110	66	44 (0.4)	241	24	217 (0.9)
	法留めブロッ ク L=4.0m	m	11,114	10,885	2,177	8,708 (0.8)	418	334	84 (0.2)	2129	1703	426 (0.2)
	法枠ブロッ ク 6 m ²	m ²	583	626	188	438 (0.7)	33	23	10 (0.2)	47	38	9 (0.2)
擁壁類	井桁擁壁 フルム型	m ²	4,073	2,139	641	1,498 (0.7)	168	151	17 (0.1)	263	131	132 (0.5)
	L型、逆T 型擁壁L=4m 北陸地建型	m	4,556	936	748	188 (0.7)	150	150	0 (0)	40	28	12 (0.3)
ヒュー ム管類	連結ヒュー ム管 工場連結品	m	983	941	564	377 (0.4)	67	60	7 (0.1)	291	175	115 (0.4)
合 計				22,357	7,868	14,489 (0.65)	1390	1145	245 (0.18)	4457	3038	1418 (0.32)

れる。例えば、JISは、人力施工を前提とする規格となっているが、機械施工を考えて大型化を図ろうとするとJIS規格にない材料を使用することになる。この場合、同等品であれば良いというのが発注者の仕様の前提ではあるが、同等品かどうかの技術判断が必要となる。このため、「製品評価委員会」を設けてその評価が行われている。また、普及を促進するため、「土木用コンクリート製品設計便覧」、「省人化プレキャスト製品標準図集」の発刊、施工単価の公表などが行われており、設計、積算、施工管理に必要な情報の提供が図られている。

開発された製品の例を以下に示す。

● 長尺側溝

JIS規格の長さは1 m、2 mであるのに対し、5 mへの長尺化が図られた。断面寸法はJISと同様であるが、吊り込み時の自重に耐えられるように縦方向に用心鉄筋が配置されている。

長尺側溝の効果は以下の通りである。

施工日数 従来品；2.9 m/日 → 6.3 m/日

施工価格(1995秋) 9,100円/m → 6,600円/m

側溝は、道路排水や用排水路など使用頻度の高い小構造物であるだけに、広範囲に効果が及ぶことが期待される。

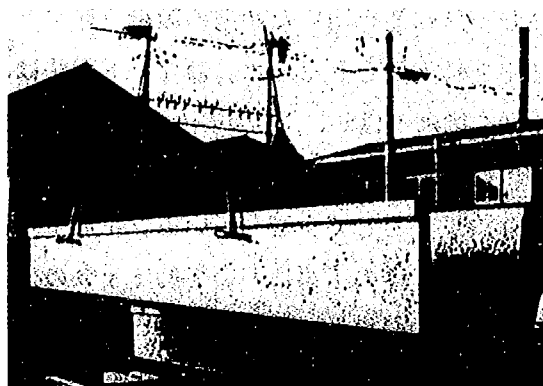


図-9.1 道路用側溝¹⁾

● PCダブルホロースラブ桁

JISでの桁幅が70 cmであるのに対し、2連構造とし、桁幅を倍の140 cmとしたものである。なお、輸送のため桁長は5～13 mに限定されている。

ダブルホロースラブ桁の効果は以下の通りであるが、桁幅が大きくなったことにより架設時間が短縮され、早期に交通開放できる効果もある。

施工日数 従来品；0.7 m/日・幅 → 0.8 m/日・幅

施工価格(1995秋) 1,158千円/m・幅 → 936千円/m・幅

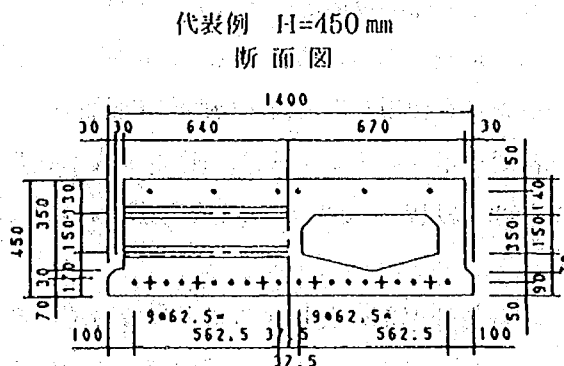


図-9.2 PCダブルホロースラブ桁¹⁾

● 法留ブロック

従来は現場打ちでの施工が一般的であった法留ブロックについて2次製品化を図ったものである。

高さ1.5 m、長さ4 mの製品の場合、労務人数は、現場打ちの2割程度と現場作業の減少効果が大きい。また、河川工事は、非出水期に限定されるため、法留工の工期短縮は他の工事にも良い影響をもたらすものと考えられる。

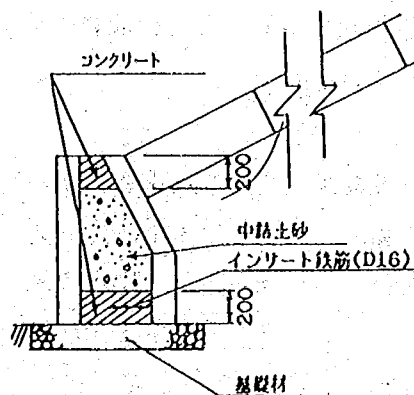


図-9.3 法留ブロック¹⁾

施工日数 従来品； 6 m/日 → 8 m/日

施工価格(1995秋) 1,158千円/m・幅 → 936千円/m・幅

5.4 現場にあった工法の採用(鉄線籠を用いた新型護岸)

従来の護岸は、ブロック積みやコンクリート張りにより築造されていたが、コンクリート程の強度が要求されない流速の緩い箇所などの現場にあった護岸工法として鉄線籠を用いた新型の護岸(籠マット工法)が採用されることとなった。籠マット工法は、材料費の低減を図れるほか、工法が簡便で熟練工を必要とせず、施工の省力化・省人化を図れる。また、多自然型川づくりの工法としても適している。平成7年度には、全国で184件の工事において約11%の建設費低減が図られた。今後、中詰めの機械化、中詰め材に再生材を使用するなどの工夫をすることによりさらなる低減が期待される。

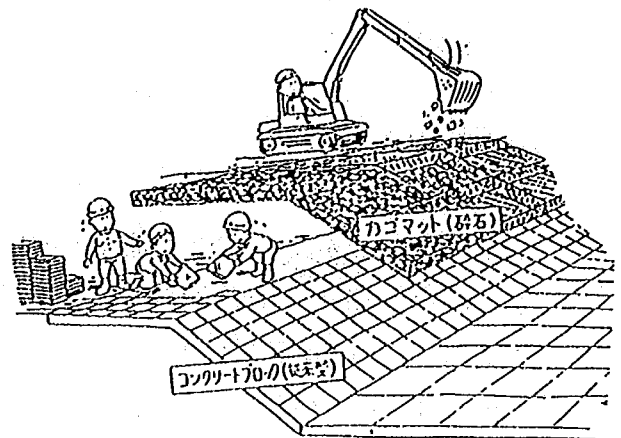


図-10 鉄線籠を用いた新型護岸

5.5 代替材料の採用(高耐圧ポリエチレン管を用いた樋門)

軟弱地盤であるため地盤沈下に追従でき、なおかつ建設費の縮減が可能な工法として高耐圧ポリエチレン管を使用した柔構造樋門が建設された¹⁵⁾。

高耐圧ポリエチレン管は、(1)フレキシブルな構造でたわみ性がある。(2)一体構造で水密性に優れる。(3)長尺軽量である。(4)耐圧強度、耐薬品性、耐腐食性に優れている。といった特徴を有している。

これを管渠部に使用することによって、軟弱地盤の沈下に追従でき、長期的に信頼できる樋門の建設が可能となるだけでなく、長尺軽量であるためクレーンによる機械施工が可能となり施工性に優れ、省力化を図ることができた。また、軽量であるため基礎の置換え処理が小規模化できたことが建設費縮減に大きな効果をもたらしている。

建設費縮減効果(2門の低減額平均)

樋門本体	1,350千円低減
基礎置換え	6,050千円低減
合計	7,400千円低減(30%の低減)

工期(1門当り) 従来：115日 → 75日 (基礎置換で5日減少、管渠部で35日減少)

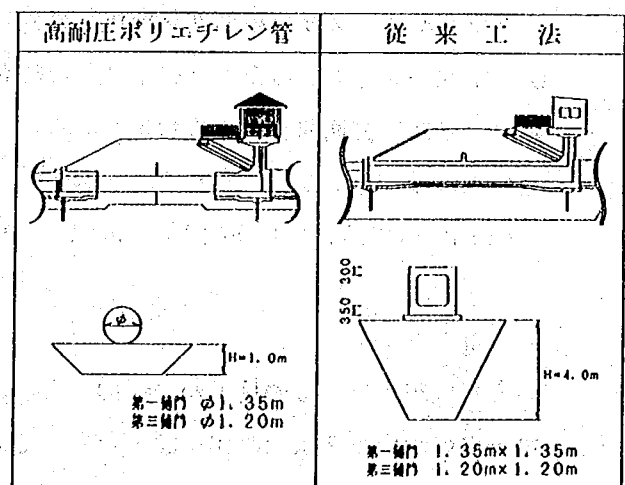


図-11 標準図比較

5.6 部品・設計法の変更（荷重分散沓の採用による下部構造の設計合理化）

連続桁の支承に従来の鋼製支承に変えて荷重分散沓を採用することにより、地震時の橋軸方向の上部構造慣性力を分散させる設計法が採用できるようになり、下部工の縮小化を図ったものである。また、本設計法の場合、荷重が分散されることにより橋脚の均一化を図ることも可能となり景観的にも好ましい橋脚を建設できる。中部地建の松尾高架橋の事例では、下部工13基でコンクリート量は1,260m³削減され、88百万円／下部工13基の建設費縮減効果を得ている。

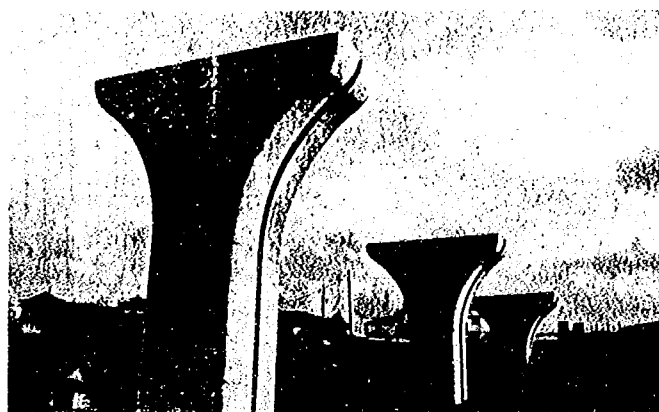


図-12 松尾高架橋下部工

5.7 材料・施工方法の変更（野芝種子吹付工法）

堤防の裏面等の芝植栽は、芝を1枚ずつ人力で張り付ける張芝工が主であった。本工法は、野芝の種子を吹き付け機で直接法面に吹き付ける工法であり、大幅な省力化、工期短縮を図ることが可能となる。しかしながら、本工法は種子を吹き付けるものであるため、施工時期が限定される、発芽率が低く養生負担が大きいといった欠点はあるが、建設費縮減効果は大きい。

表-13 張芝工・野芝種子吹付工の比較

	利 点	欠 点
張芝工	速効性が高い 施工時期を選ばない 施工ムラが少ない	手間がかかる 施工費が高い
野芝種子吹付工	機械化による省力化 施工費が安い 工期が短縮できる	施工時期が限定される 発芽率が低く養生負担が大きい 法面浸食対策を要す（長繊維不織布の被覆）

コスト縮減率 20%～35%

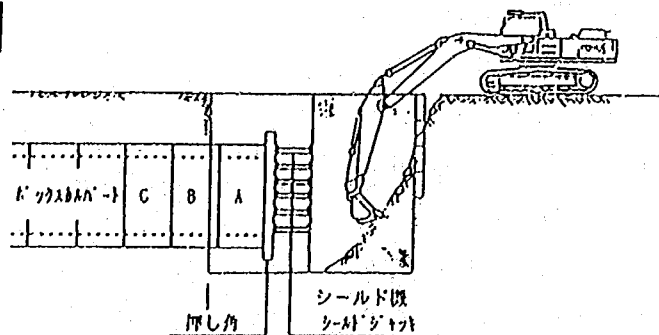
工期 張芝 : 8日/100m² 種子吹付 : 0.15日/100m²

5.8 仮設工法の工夫、プレキャスト化（新オープンシールド工法）

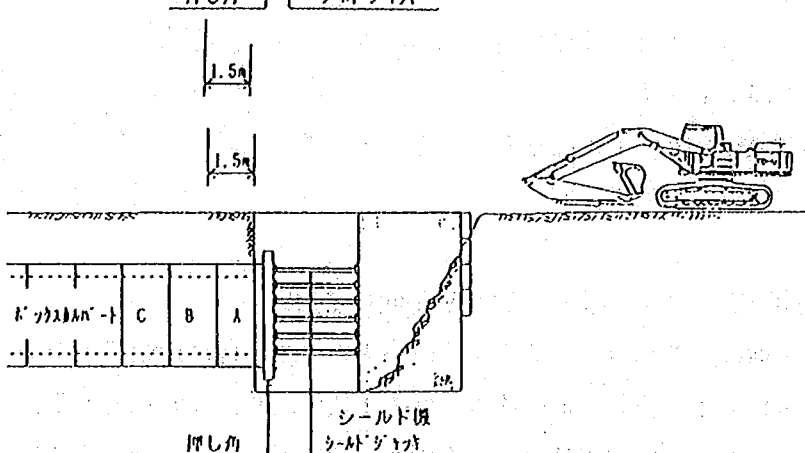
新オープンシールド工法を採用した共同溝設置現場では、床付面下に転石混じりの砂礫層があったため、矢板土留が困難と判断され、本工法が採用された（図-13参照）。本工法の採用により、矢板の打設・撤去がないため大幅に工期短縮が図れ、コスト縮減効果は55%であった。また、本工法は、(1) 民家等に近接しての施工が可能、(2) 振動、騒音が少ない、(3) シールド通過後早期に交通開放できるといった利点も有している¹⁶⁾。

掘削・掘進

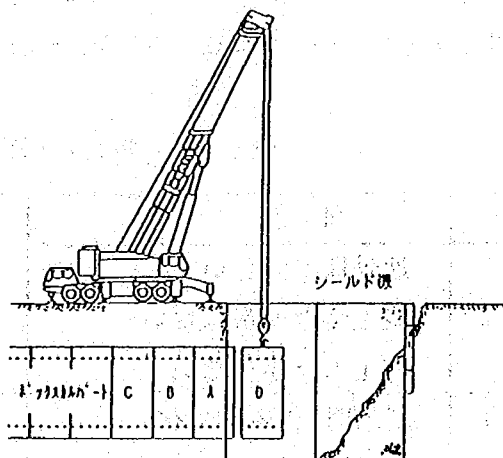
掘進前



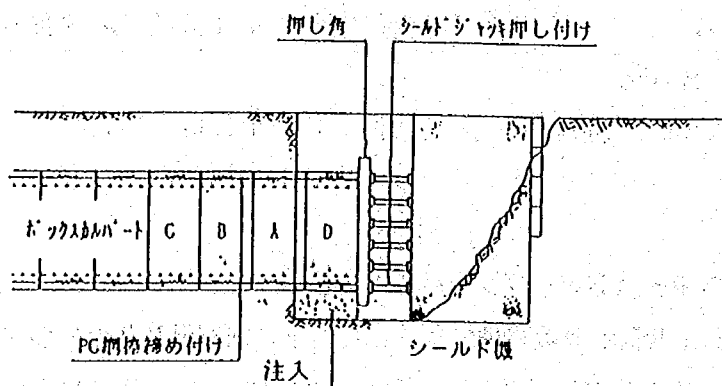
掘進後



函体据付



PC鋼棒設置・緊張



埋戻し

図-13 新オープンシールド工法の施工手順

5.9 管理方法の改善（施工管理システム）

施工管理システムは、工事の出来型管理の支援、品質管理の支援、書類作成の簡素化を目的として中部地建等を中心に作られたシステムである¹⁾。本システムは、ハード的には、電子野帳とパソコンで構成されており、電子野帳には、規格値・基本形状が登録されているのでこれらを確認しながら現場での計測データ入力を行える。計測されたデータはパソコンにとり込まれ、管理図の作成や工事関係書類の作成に活かされるようシステム化されている。システム開発と併せて国県の工事関係書類の様式統一が図られたことにより、システムの利用範囲が拡大され、管理業務の一層の効率化が期待される。

6. おわりに

建設費の縮減には従来から各機関で取り組まれてきており、本稿で掲げた事例以外にも多くの取り組み事例があり、様々な成果を得ているところであるが、効率的な公共事業の執行の要請は益々高まっている。このため、今後も技術面での取り組みが果たす役割は大きなものがあり、さらなる工夫が必要となっている中、本稿がその一助となれば幸いである。最後に、資料提供にご協力戴いた各機関の皆様に感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 「公共工事の建設費の縮減に関する行動計画」,建設省：,1994.12
- 2) 「内外価格差調査研究会報告書」,内外価格差調査研究会,1994.12
- 3) 「住宅建設コスト低減のための緊急重点計画」,建設省住宅局住宅生産課,1996.3
- 4) 「欧米の公共工事建設システム」,建設大臣官房技術調査室監修,(社)国際建設技術協会編集
- 5) 「バリュー・エンジニアリング No.174」,(社)日本バリュー・エンジニアリング協会,1996.5
- 6) 「VEの公共事業への適用性に関する研究」,(社)土木学会,1996.3
- 7) 「価値分析」,玉井正寿,現代経営工学全書8,森北出版
- 8) 「建設業のVEの進め方」,上野孝,鹿島出版会
- 9) 「コンクリート塊状型護岸基礎工について」,榎原至,小林修之等,第50回建設省技術研究発表会報告書集,1996.11
- 10) 「鋼道路橋の構造の簡素化及びコスト縮減に向けた取り組みについて」,菊地春海,積算技術,1996.2
- 11) 「鋼橋製作の省力化の取り組みについて」,三百田健治,安川義行,第50回建設省技術研究発表会報告書集,1996.11
- 12) 「阪神高速道路北神戸線における省力桁の設計」,中島隆,大谷大等,第50回建設省技術研究発表会,1996.11
- 13) 「コンクリート構造物の大型化・プレキャスト化によるコスト縮減」,柳沢今朝次郎,穂刈正昭,第50回建設省技術研究発表会
- 14) 「省人化プレキャスト製品標準図集」,北陸地方建設局
- 15) 「高耐圧ポリ塩化管を用いた樋門」,西巖,高橋弘等,第50回建設省技術研究発表会報告書集,1996.11
- 16) 「新オプン・カット工法による共同溝工事の施工について」,大川忠昭,竹野正勝,紫垣公生,九州地方建設局
- 17) 「施工管理システム」,中部地方建設局,(社)中部建設協会

土木研究所講演会
講演集

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3475号
平成9年2月(1997)
企画部企画課

要旨

本資料は、「平成8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、沖積河川、ダム、環境、橋梁、積算、地震防災

郵便はがき

切手
はって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

企画部企画課 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3475号（土木研究
所講演会講演集）部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名



土木研究所資料第3475号

土木研究所講演会講演集