

マイクロフィルム用資料

ISSN 1386-5878

土木研究所資料第3844号

平成13年度

土木研究所講演会
講演集

平成14年1月

独立行政法人 土木研究所

Copyright © (2002) by P.W.R.I.

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

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

平成 13 年 度

土木研究所講演会 講演 集

企画部研究企画課

要 旨

本資料は平成14年度1月25日に開催される「平成13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，コンクリート構造物，基礎の耐震補強，水質事故，国際水管理，土砂災害監視，道路斜面

目 次

【一般講演】

1. コンクリート構造物の長寿命化と維持管理戦略 1
技術推進本部主席研究員（構造物マネジメント技術） 河野 広隆
2. 既設基礎の耐震補強技術の開発 19
構造物研究グループ上席研究員（基礎） 福井 次郎
3. 新しい水質事故対策技術 39
水循環研究グループ上席研究員（水質） 田中 宏明
4. 国際水管理に向けた技術開発の課題 51
土工研究グループ上席研究員（水理水文） 吉谷 純一
5. 土砂災害監視技術の動向と今後の課題 61
土砂管理研究グループ長 仲野 公章

【研究成果報告】

6. 道路斜面のリスク評価・マネジメント技術の開発 87
研究総括：材料地盤研究グループ長 三木 博史
材料地盤研究グループ主任研究員（地質） 佐々木靖人
土砂管理研究グループ主任研究員（地すべり） 浅井 健一
材料地盤研究グループ研究員（土質） 加藤 俊二

[一般講演]

コンクリート構造物の長寿命化と維持管理戦略

技術推進本部主席研究員（構造物マネジメント技術） 河野 広隆

目 次

1. はじめに	1
2. コンクリートの劣化の種類とその実態	1
2. 1 コンクリートの劣化要因	1
2. 2 全国の劣化の実態	4
3. コンクリート構造物のライフサイクルコストと長寿命化の重要性	5
3. 1 長寿命化の重要性	5
3. 2 維持管理費の例	6
3. 3 ライフサイクルコストを考慮した今後の設計のあり方	7
4. コンクリート構造物の長寿命化のための技術的課題の抽出	9
4. 1 実態調査から浮かび上がる問題点	9
4. 2 耐久性委員会の提言	9
5. 具体の検討課題	10
5. 1 設計	10
5. 2 施工と品質管理・検査	11
5. 3 点検と診断	14
5. 4 補修補強	14
5. 5 データベース	16
5. 6 維持管理戦略	16
5. 7 診断士などの活用	16
6. おわりに	17
参考文献	17

コンクリート構造物の長寿命化と維持管理戦略

技術推進本部主席研究員（構造物マネジメント技術） 河野広隆

1. はじめに

日本ではこれまでに莫大な数の土木用コンクリート構造物が造られてきていて、今後これらの維持管理費の急増が懸念されている。これに対応するためには、既設の構造物を適切に維持管理するとともに、これから造る構造物はなるべく維持管理費用のかからないものにしていく必要がある。

一方、1999年6月に起こった新幹線のトンネル覆工コンクリート塊落下事故をきっかけに、その後コンクリートの耐久性不足に起因する問題が多発した。コンクリートの品質と耐久性に関する懸念は社会問題化し、その信頼性を大きく損なうこととなった。この問題をきっかけに、大規模な調査が行われ、コンクリート構造物の劣化の実態が明らかになってきた。

ここでは、既設のコンクリート構造物の劣化の実態や維持管理費用の例を紹介し、そこから今後検討しなければならない技術的課題を抽出する。さらに長寿命の構造物を実現するための設計・施工上のポイントとなる技術、既設構造物を合理的に維持管理するために重要と考えられる技術開発の方向について考察する。

2. コンクリートの劣化の種類とその実態

2.1 コンクリートの劣化要因

(1) 凍害と中性化などの古くからある劣化

いわゆるコンクリートクライシスが問題となった1980年頃より以前は、コンクリート構造物は「メンテナンスフリー」と考えられた時代があった。しかし、実は古くからコンクリート構造物の耐久性の問題は存在していた。

古い土木学会コンクリート標準示方書を見ると、「耐久性」という言葉が「凍結融解に対する耐久性」とほぼ同義語で用いられていることに気づく。つまり、土木の分野では、凍害が最も一般的な劣化原因だったことがわかる。一方、建築の分野では中性化の研究が盛んであった。中性化による鉄筋腐食が劣化の主原因であったと推測される。

まず、この古くからある凍害と中性化について簡単に触れる。

構成材料として水を大量に含むコンクリートは硬化後もかなりの水分を含む。さらに外部から水分が供給されると、コンクリート中に存在するかなりの量の微細な空隙にも水が満たされることとなる。水は凍結すると体積が増えるが、コンクリート中の水分も0℃を少し下回った温度で凍結を始める。凍結する温度は、水に溶解している物質の種類や量、水の置かれている空隙の大きさによって異なる。水の凍結による体積膨張はコンクリート内部に引張力を生じさせ、引張強度の低いコンクリート構造物は表面の剥離、内部骨材周りのセメントペースト分のゆるみ、ひび割れなどが生じる。緩んだ部分にはさらに水が供給され易くなり、凍結と融解が繰り返されると、コンクリートが表面から劣化していくこととなる（写真-1）。

凍害に対しては、コンクリート中に微細な空気を導入することによって対処できることが判明し、わが国では1948年に微細空気を導入するための混和剤である「AE剤」がJIS化され、1978年にJIS

A 5308「レディーミクストコンクリート」でAEコンクリートが標準となつてからはそれ程大きな問題とはなっていない。ただし、コンクリート工場製品では、AEコンクリートを用いると硬化コンクリートの表面に気泡が目立つため、購入者が嫌がる。このため、AE剤を用いないコンクリートが使われることが多く、製品の養生条件によっては、未だに凍結融解による劣化が生じている例がある（写真-2）。

凍結融解劣化機構と導入空気泡による劣化抑制機構には、種々の説がある。ここではその詳細は割愛させていただく。

中性化による劣化とは、次のような現象である。鉄筋は空気中に放置されると、簡単に錆びてしまうが、コンクリート中では錆びない。コンクリート内部はセメントから供給された水酸化カルシウムが多量に存在し、pH12以上という高いアルカリ性に保たれている。この高いアルカリ性の中では、鉄筋表面に不動態皮膜と呼ばれる薄い酸化物の層ができ、それ以上の酸化が妨げられる。しかしコンクリートの表面の水酸化カルシウムは、空気中に存在する二酸化炭素と反応し、炭酸カルシウムを生成する。同時に pH は低下していく。これが中性化である。pH の低下はコンクリート表面から進行するが、これが鉄筋の位置まで達すると鉄筋が錆び出す。錆びた鉄筋は膨張するためコンクリートにひび割れを生じ、さらに鉄筋が錆びやすい環境を作ってしまう、鉄筋の錆は加速される。これが中性化による劣化である。

土木構造物では、建築物に比べ鉄筋のかぶりが大きく、コンクリートも水セメント比が小さく密実であることから、

中性化の問題は少ないと言われていた。最近ではかぶりが十分にとれていない構造物が増えたり、非常に長い寿命を期待する場合には中性化が問題になため、再認識がされてきている。

少し観点が違うが、土木構造物特有の古くからの耐久性問題としては、すり減りの問題がある。道路舗装や水路などではコンクリート表面への物理的な作用により、次第にコンクリートが削られる。これに対しては、すり減り抵抗性の高い骨材を用い、水セメントを低く抑えるなどの対策がとられている。

(2) 塩害とアルカリ骨材反応、施工に起因する劣化

コンクリート構造物は「メンテナンスフリー」と考えられ、橋梁形式を選定するときなど、鋼桁は



写真-1 凍害の事例1

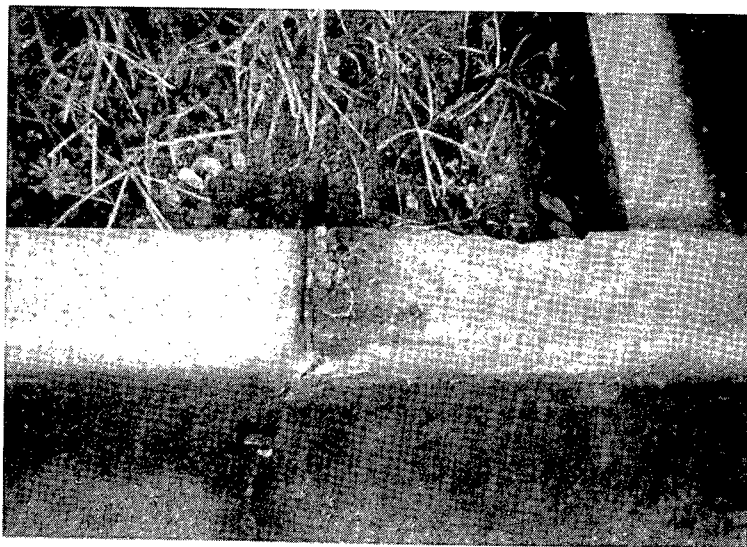


写真-2 凍害の事例2

塗装の塗り替えなどのメンテが必要なので、メンテの要らないコンクリート桁が選ばれていた時代があった。しかし、1980 年頃から沿岸部で橋梁などの鉄筋あるいはプレストレストコンクリート構造物に錆び汁を伴う著しいひび割れが散見されるようになった。また、各地のコンクリート構造物に原因不明の著しいひび割れが見られるようにもなった。これがいわゆる「コンクリートクライシス」である。その後の大規模な調査や研究により、前者は塩害で後者はアルカリ骨材反応と呼ばれる現象であることが判明した。また、塩害やアルカリ骨材反応以外にも施工不良等による早期劣化もあることがわかった。

塩害発生の機構は、次のようである。中性化のところで述べたようにコンクリート中の鉄筋は不動態皮膜で保護されている。ところがこの皮膜は塩化物イオンがコンクリート中に存在すると破壊され、錆が始まる。錆が生じるとコンクリートにひび割れが生じ、さらに鉄筋の腐食が加速する（写真-3）。この塩化物イオンの原因には、「初期塩分」と「外来塩分」がある。前者は、かつてセメントの硬化促進剤として用いられ塩化ナトリウムや海砂



写真-3 塩害の事例

の不純物として混じったりしたものである。後者は、コンクリートクライシスで新たに注目されたもので、コンクリートの硬化後に潮風などから供給され、コンクリート表面から浸透したものである。外来塩が問題となるのは、時間が長くなれば塩化物イオン供給量が次第に増え、コンクリート中の濃度が非常に高くなるためである。塩化物イオン



写真-4 アルカリ骨材反応の事例

はある程度の量が存在しても鉄筋は腐食を開始しない。この量のことを発生限界量と言っているが、コンクリート種類やかぶりの大きさ、環境条件によって異なるようで、鉄筋表面でコンクリート 1m^3 あたり塩化物イオン量で $1.2 \sim 2.5\text{kg}$ くらいであるといわれている。

次にアルカリ骨材反応の定義を示す。コンクリート用の骨材は多くの場合、珪酸 (SiO_2) 質が主成分となっている。珪酸は完全に結晶した水晶から、全く結晶していないシリカガラスまでさまざまな形態をとる。このうち、結晶度の低いものは熱化学的に不安定である。こうしたものがコンクリート中であると、ある条件のもとでセメント中の成分と反応し、吸水膨張性のある物質ができることがある。この物質ができること、あるいはこの物質が吸水・膨張して、コンクリートに著しいひび割れを

生じることをアルカリ骨材反応という（写真-4）。

施工に起因する劣化は、実に様々である。ジャンカなどの締固め不足やかぶり不足、養生不足、1999年に話題となったコールドジョイント（写真-5）などがある。

（3）最近の問題

1999年はコンクリート構造物の耐久性問題が社会的に大きく取り上げられた年であった。従来、コンクリート構造物の劣化が構造物自体の問題として扱われてきたのに対し、昨年は「第3者被害」が大きく問題となった。しかし、構造物の劣化原因そのものは特に目新しいものはない。中性化による鉄筋腐食で浮いたコンクリート片、竣工時の手直しで安直に行ったモルタルの剥離、施工不良による浮き、などが落下することによる第3者への被害が問題となる（写真-6）。

また、最近複合劣化というものが問題となっている。例えば、単に凍結融解を受けるより、凍結防止剤（塩）の散布が重なると、凍害による劣化が激しくなるというものである。また、中性化がコンクリート表面から内部へ進行していくと、中性化した先端部分に塩化物イオンが集中し、結果として内部の鉄筋の発錆が早まるという報告もある。

こうした複数の劣化要因が関係する劣化の実態は、研究も緒についたばかりで明らかになっていない。現象解明の研究が是非とも必要であるが、要因の組み合わせが無数にあり研究そのものも大変に難しいものとなっている。

2.2 全国の劣化の実態

1999年にコンクリート塊落下事故が相次ぎ、コンクリート構造物の耐久性が大きくクローズアップされた。コンクリート構造物の病気である劣化について、社会的な関心が高まったが、実際には劣化の実態はよくは把握されていなかった。このため、旧建設省、運輸省、農水省の3省合同の「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会」が1999年8月末に発足し、劣化の状況の全体像を知るため、全国的な大規模な調査を行った¹⁾。

調査に際しては、構造物の種類による影響、施工年代の影響、設置場所の影響を見るため、サンプリングに工夫をした。例えば旧建設省では全国の2000以上の橋梁、擁壁、カルバート、河川構造物、トンネルを竣工年代別に、全国各地が対象となるように実態調査した。また、全国200カ所でコアの抜き取り試験を実施した。その調査結果の一部を図-1と図-2に示す。

図-1はトンネルを除くコンクリート構造物の劣化度を竣工年代別にまとめたものである。傾向とし

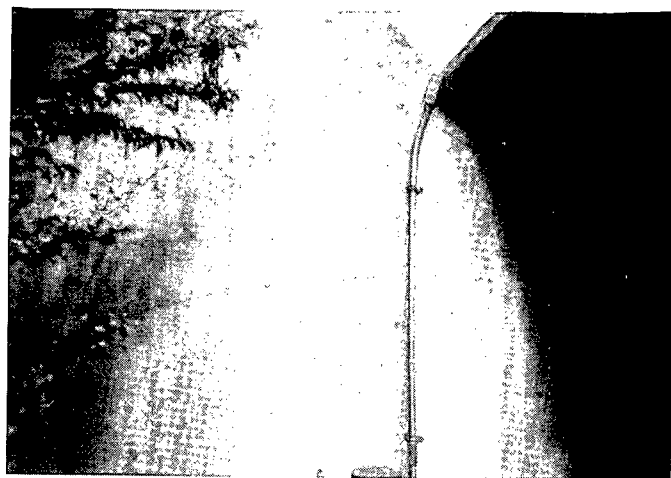


写真-5 コールドジョイント

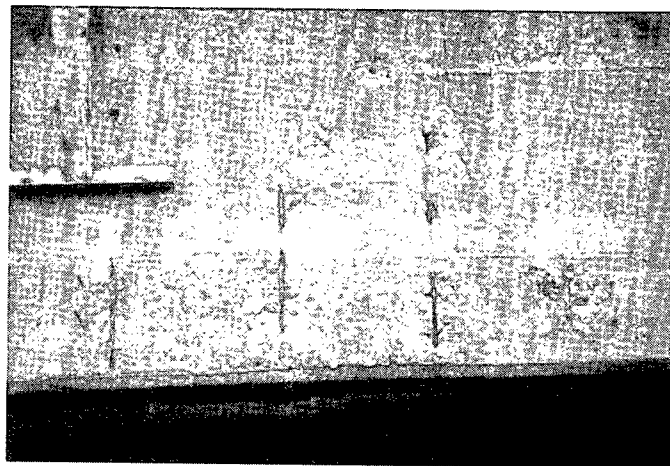


写真-6 コンクリート片の剥落

ては古い構造物ほど劣化が大きい。
全国的に言うと、一部で報道されたように昭和40年代後半に悪い構造物が集中する傾向は見られなかった。劣化の程度は、人間でいえば、全体の5%程度が「要観察」(劣化度Ⅲ)、1%くらいが「要精密検査」(劣化度Ⅳ)に相当する劣化度に位置づけられた。「即入院」(劣化度Ⅴ)に相当するものは数件であったが、いずれも補修中あるいは補修計画中であった。劣化度Ⅳ以上の深刻な劣化は塩害やアルカリ骨材反応によるものがほとんどで、劣化度Ⅴは塩害によるものであった。

図-2 に劣化の原因を示す。いわゆる「コンクリートクライシス」の原因となった塩害やアルカリ骨材反応による劣化構造物の絶対数はそれ程多くない。むしろ「コンクリートの品質が良くない」と「配筋不良」といった施工に起因するようなものが、劣化程度は軽いものの、圧倒的な数を占めていた。ここでいう「配筋不良」は、本来コンクリート中に十分な「かぶり」がとられて埋められているはずの鉄筋が、浅い位置に置かれたため、表面近くの中性化の進行のために錆が生じたものである。また、塩害とアルカリ骨材反応に対しては 1986 年に旧建設省の対策の通達が出されている。今回の調査では、昭和60年代前半以降に造られた構造物には塩害、アルカリ骨材反応の兆候は見られなかった。

コア抜き調査から得られた結果のうち、構造物の深部にも比較的多量に塩化物イオンが含まれ、施工当初から塩分を多量に含んでいたと推定される構造物の数を図-3に示す。「塩害に関する通達(1986年)」以前の構造物は、そうしたものが存在するが、それ以降には見られなかった。これを見ても、通達の対策が功を奏したものと考えられる。

3. コンクリート構造物のライフサイクルコストと長寿命化の重要性

3.1 長寿命化の重要性

わが国では、これまでの社会資本整備で多くの土木構造物が造られてきた。例えば、道路橋を見る

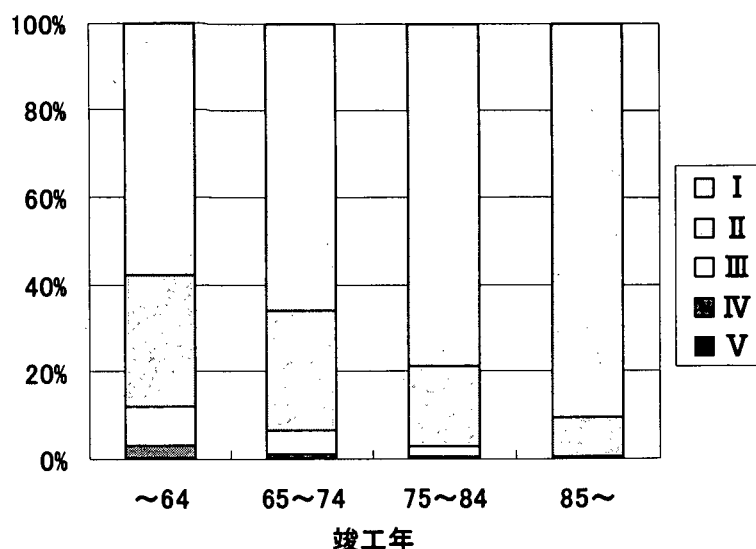


図-1 竣工年代と劣化度の関係

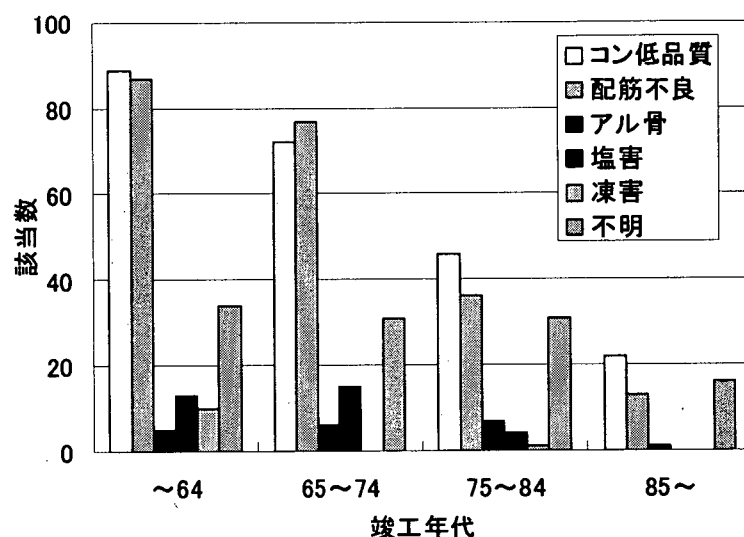


図-2 劣化要因の推定結果

と橋長 15m 以上の橋だけでも既に約 13 万橋が存在し、内コンクリート橋は約 7.5 万橋である。

これらの維持管理の負担は今後膨大なものになっていくと予想されるため、より合理的な維持管理が要望される。このためには既設構造物の維持管理の合理化はもちろんであるが、今後新設する構造物の設計に関しても、維持管理を考慮することが望まれる。

一方、現在、いわゆる「循環型社会」の形成が望まれている。これは近代社会が膨大な資源を消費することによって維持されており、今後従来のペースで生産・消費活動を行うことは、資源の有限性の

みならず、地球環境への負荷を考えると、許されないことであるとの認識が広まっているためである。リサイクル法やその関連法の整備など、次第に具体的な施策も出てきている。一般の消費財の場合、リユースやリサイクルなどの循環を推進することが、資源の有効利用や環境負荷低減のためには効果的であろう。しかし、もともと長寿命で、しかも一品生産的な土木構造物では、資源の有効利用や環境負荷低減という本来の目的のためには、さらなる長寿命化を進めるのが重要であると考えられる。

コンクリート分野でも、まずやらなければならないことは構造物の長寿命化ではないだろうか。コンクリート分野ではリサイクル関係の研究が盛んである。しかし、いくらリサイクルが可能となっても、リサイクルそのものも必ず環境負荷を生じる。構造物の長寿命化は、構造物に用いる材料から施工に要するエネルギー、副産物の発生、その他諸々の環境負荷を最小限にするための最も基本であると思う。長寿命化といっても、構造物本体の耐久性を高めることはもちろんであるが、施設の機能の長寿命化も重要である。過去の建築物や道路橋の撤去理由²⁾の多くを占めるのは、構造物そのものの劣化ではなく、機能的な陳腐化などであるので、その点の配慮も必要である。

また現在、公共事業に対しては、社会の高齢化への対応、公共事業費の縮減などの厳しい要求が突きつけられている。このような社会情勢を考えても、コンクリート構造物をますます長寿命化していくことは極めて重要な技術的課題であると考えられる。

3.2 維持管理費の例

一般の環境では、きちんと設計施工されたコンクリート構造物は十分に耐久である。しかし、厳しい塩害環境下では、従来の設計では長寿命が期待できないことがわかってきた。このため、耐久性を向上させるための何らかの対策が必要である。しかし、これらの対策をとるためには、必然的に初期建設費の上昇を招く。こうした場合には、ライフサイクルコスト (life cycle cost :以下 LCC という) の評価を行うことが重要である。

ここで、LCC は次のように定義する。

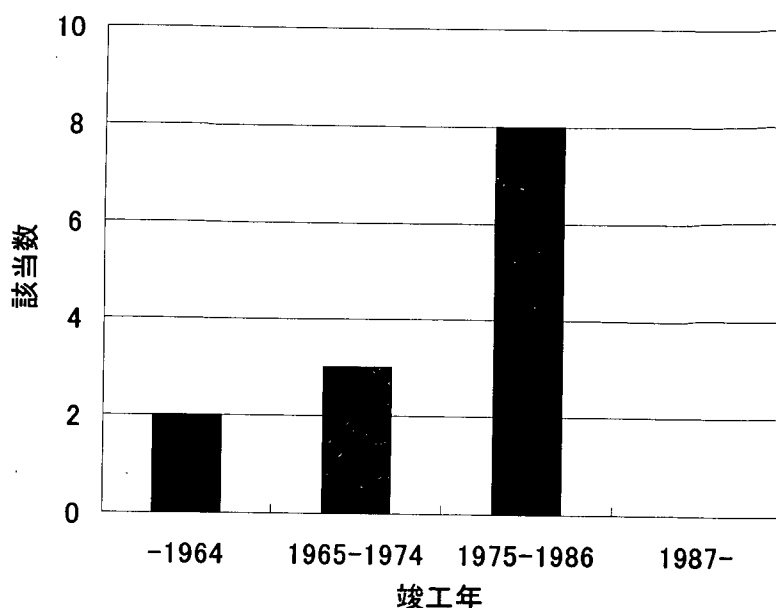


図-3 建設時から塩分を多量に含んでいると推定された構造物
(調査数193件中13件)

$$LCC = I + M + R$$

I : 初期建設費

M : 維持管理費（補修補強を含む）

R : 撤去費

LCC を比較する場合には、あらかじめ構造物の供用期間を設定して総コストで比較するか、LCC を供用年数で割って単年度あたりの費用で比較することが必要である。

橋梁を例にとると、従来、鋼橋では塗装の塗り替えという観点から維持管理費を考慮することはあったが、コンクリート橋の場合には、設計時点で維持管理費を考慮することはほとんどなかった。ひとつには、「コンクリート構造物はメンテナンスフリーである」という誤った神話があったためと思われる。コンクリート橋でも維持管理することを前提にする必要があり、そのためには LCC の実態を把握しなければならない。

こうした背景から、旧建設省では建設省技術研究会の指定課題「コンクリート橋の LCC に関する調査研究」³⁾ を実施し、厳しい塩害を受けた 4 つのコンクリート橋の LCC の実態を調査した。表-1 に調査結果を示す。表の上から 3 つの橋梁は日本海沿岸の特に厳しい塩害環境に建設された橋であり、既に架け替えられている。橋梁の供用年数を見ると、32～34 年とかなり短い。

塩害は昭和 50 年代にその問題が明らかになり、道路橋については昭和 59 年に「コンクリート道路橋の塩害対策指針（案）」が出されている。表-1 の橋は全て対策以前の設計である。建設後 10～15 年で、いずれも塩害による劣化の症状を呈し、20～30 年で 1～2 回の大規模な補修・補強が実施されていた。完成後の調査・補修・補強に要した維持管理費は初期建設費の 0.5～1.2 倍であり、初期建設費を超えたものもあった。

表-1 著しい塩害を受けた PC 橋のライフサイクルコスト(初期建設費に対する比)

橋名、供用年数	上部工 構造形式	橋長、径間数	初期建 設費 I	維持管 理費 M	撤去費 R	総費用 I+M+R	調査時現況と主な 補修・補強回数
旧暮坪陸橋、32 年	単純 PC	144m、5 径間	1.0	0.8	0.7	2.4	架替え済み、2 回
旧岩川橋、34 年	ポステン	337m、9 径間	1.0	0.5	未撤去	1.5+α	旧橋撤去は後年、1 回
旧芦川橋、34 年	T 桁	35m、1 径間	1.0	1.2	2.7	4.9	架替え事業中、2 回
小弥太郎橋、25 年		117m、4 径間	1.0	1.2	(1.0)	2.2	供用中、2 回

注) 各費用は平成 12 年度価格に換算した値。初期建設費は下部工事費を含む。() は見積額。

3.3 ライフサイクルコストを考慮した今後の設計のあり方

従来の土木構造物の設計の基本はイニシャルコストの最小化であった。もちろん、ある程度の耐久性は確保することを前提に示方書類は作られているが、そこには何年の寿命を想定するかは、明確にはされてこなかった。高耐久の材料などを用いようとする、コスト上昇は避けられない。このため、よい材料であることはわかっている、現場ではなかなか採用されないことが多かった。しかし、前項の調査結果のように、維持管理を含めて考えると、イニシャルコストの最小化はベストの選択ではない場合が多い。

コンクリート構造物の設計については、新設時・維持管理・更新時等の費用も含めて総合的に評価する必要がある。ライフサイクルコストの低減については、

案 1) 初期に大きなイニシャルコストを出しておいて、維持管理を非常に少なくする方法。

案2) アスファルト舗装のように、頻繁に取りかえるという方法。

案3) 両者の中間

の3案が挙げられる。

一般的にコンクリート構造物に適用する場合、案1) の手法が圧倒的に安価になる場合が多い。また、案2) では、廃棄物の発生や資源の多用などの問題が加速されよう。リサイクルにより、それらの問題は解決できるという意見もあるが、それは楽観的すぎる。

ライフサイクルコストによる評価にはまだまだ、解決すべき課題は多い。また、さらなるコスト低減のためには、次のような技術向上が必要である。

①新設時の設計の段階で、長寿命化するための技術

②既存構造物を長もちさせるための技術

③取りかえ時の更新技術

ライフサイクルコストを考慮した施工例として、表-1の暮坪大橋（酒田）の例を示す。同橋は、約30年前につくられた橋で塩害による被害を被っていた。当初の補修は、塩害補修を主目的に実施した。しかしながら、内部含有塩分の除去等現行の施工技術では困難な項目が多く、補修後まもなく同様の症状が発生し、2回目補修を実施した。しかし、最終的には架替えを行っている。

新橋での対策は、メンテナンス費用を低減するため、複数の新技術（塗装鉄筋使用、塗装P C鋼材使用、プラスチック製P C鋼材用シース・ダクト使用、さらなるかぶり量確保、水セメント比低減等）が盛り込まれた。同橋では、これらの対策の実施により、初期コストでは10%程度割高になるが、厳しい塩害環境でも、一般的な耐用年数の50年を大きく越える100年以上耐えうる構造を可能としている。

図-4に暮坪陸橋の旧橋と新橋のライフサイクルコストの時間経過のイメージを示す。「新技術」の線で示した新橋では、対策で初期建設費が多少増加するものの、竣工後の維持管理費は旧橋にくらべ大きく低減できることが期待される。しかも寿命が延びるため、単年度あたりのLCCを比較すると大幅なコスト削減になる。今後はこのような考え方で設計が行われるような環境を創っていかなければならない。そのためには、技術的に説明責任を果たせるよう、データの蓄積と分析を行って、このような考え方の妥当性が認識されるようにしなければならない。

なお、表-1の他の架け替えられた新橋でも、長寿命を期待して複数の塩害対策を組み合わせることとなった。

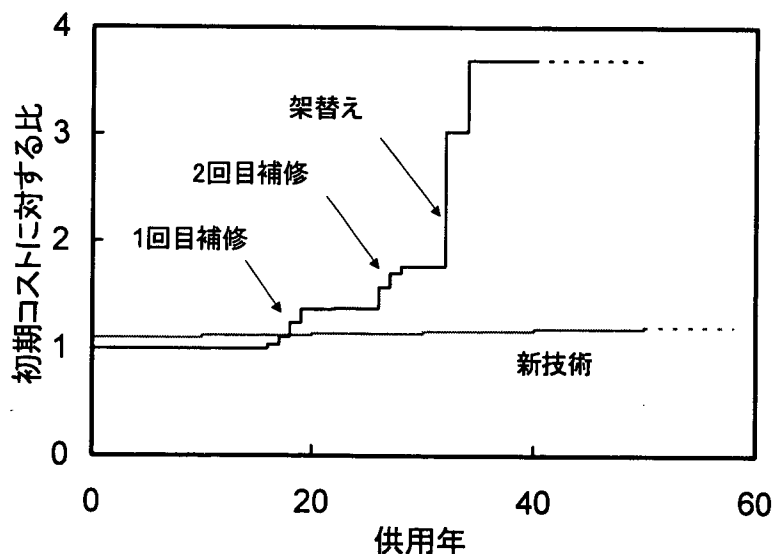


図-4 暮坪陸橋のライフサイクルコスト

4. コンクリート構造物の長寿命化のための技術的課題の抽出

4.1 実態調査から浮かび上がる問題点

前述した 2.2 の結果から、コンクリート構造物を長寿命化し、維持管理費を低減していくための、設計施工時のポイントとしては、主として「塩害対策」と「品質管理・施工管理」の 2 項目が挙げられると考えている。

①塩害対策

劣化が顕著で早急な対策を必要とする構造物は絶対数は少ないが、塩害を原因とする割合が多い。塩害は、ひとたび発生するとその後の進行を抑制しにくい現象で、構造物を長もちさせるためには、設計時に、工法や使用する材料を含めた塩害対策を考慮する必要性がある。

②品質管理・施工管理

コンクリートの品質が悪く、鉄筋のかぶりが不足しているなど等の事例が非常に多い。この対策としては、品質管理、施工管理ならびに適正な検査が重要となる。

4.2 耐久性委員会の提言

前述した 3 省合同のコンクリート構造物耐久性検討委員会からは、2000 年 3 月にコンクリート構造物の耐久性を向上させるための提言をいただいている⁴⁾。提言の骨子を表-2 に示す。

この提言に対応するため、国土交通省ではコンクリート構造物の耐久性向上のための WG（以下、耐久性 WG）を設置し、行政的に実施可能な種々の具体的手法を検討している。土木研究所ではそれらに関連した各種の研究・技術開発を行っている。

表-2 建設省・運輸省・農林水産省「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会」の提言

提言の要旨

（基本的な考え方）

コンクリート構造物は、住宅・社会資本を形成する主要な構成要素として、そのストック量は膨大なものになっている。このようなコンクリート構造物について、耐久性を確保することは、剥落による第三者被害の防止に有効なだけでなく、ライフサイクルを通じた費用の最小化のために重要であるとの認識に立ち、コンクリート構造物の建設システムや維持管理システムのあり方について、以下の提言を行った。

（具体的な提言）

1. コンクリートの剥落の事例を契機に実態調査も含め、コンクリート構造物全般の課題について検討した。実態調査では、著しい劣化により耐荷力が問題となる構造物はなかったが、劣化が認められ、追跡調査を必要とする程度（劣化度Ⅲ）以上に劣化している構造物が 5%あり、劣化は経年による影響が最も大きいことが分かった。

2. 第三者被害を防止し、耐久性を確保・向上するためには、設計・施工・維持管理において充分な対応をすべきである。

3. 土木学会の「コンクリート標準示方書—施工編」（平成 12 年 1 月）は、耐久性を確保した設計施工の基本的な考え方や方策を提示している。これを実際の構造物の設計・施工に活かすた

め、基準類やマニュアルの整備を推進する。

4. 構造物の重要度に応じて設定した耐用年数の下で、要求性能を満足するよう材料選定、配合、設計、施工方法、維持管理を計画することを基本とすべきである。

5. 耐久性の要求性能に対応した水セメント比の制限値を明示するとともに、施工段階で水分量確認を行い、耐久性の確保を図る。そのための水分量試験方法を開発することが必要である。

6. 施工においては、要求された品質水準を確実に満足するための品質管理システムを充実する。また、鉄筋かぶりや強度の確認の充実のため、非破壊検査法を活用した検査システムを開発することが必要である。

7. 劣化の兆候のある構造物や部位を効率的に見出し、安全性を確保する点検システムを構築することが重要である。このためには定期的な点検において、近接目視等により変状を把握し、展開図等で記録を残すことが有効である。

8. 維持管理のためには、建設、点検、補修・補強に関する記録を適切に保存することが重要であり、構造物毎の台帳をデータベース化することが望ましい。

9. 基準類の性能規定化、水分量試験方法、非破壊検査技術、補修・補強技術などについて、新しい技術の研究・開発に取り組み、実用化を図ることが望まれる。

5. 具体の検討課題

5.1 設計

前々章で示したように、ライフサイクルコストの削減や資源の有効利用、さらには建設事業の環境への影響の低減といった背景から、コンクリート構造物の大幅な長寿命化が要求される。特に、海岸近くの塩害環境の厳しい地区では、早急な対応が必要である。塩害はやっかいな劣化である。コンクリート中では高いアルカリ性で鉄筋表面の不動態被膜が安定しており、鉄筋は錆びない。しかし、外部からコンクリートにしみ込んだ塩化物イオンが鉄筋に達すると、不動態被膜は破壊され、鉄筋はさび出す。錆の膨張圧でコンクリートがひび割れ、構造物の表面に塩害の症状が現れたときには、既に多量の塩分がしみ込んでいて、補修しても効果が長続きしない。このため前章で示したように、竣工後 30 年あまりで架け替えを余儀なくされる事例もある。

これに対しては、表-2 の提言の 3. にもあるように、平成 11 年度版のコンクリート標準示方書施工編「耐久性照査型」（以下、h.11 施工編）の考え方を取り入れることが重要である。これは、コンクリート分野で設計寿命を設定した耐久設計法を初めて示方書類として示したものである。実際に定量的に照査できる項目はまだ塩害と中性化だけであるが、耐久性照査の考え方を打ち出したことは大きな価値がある。塩害対策については、h.11 施工編のとおり設計すると、海岸線付近の構造物では著しく大きなかぶりを確保する必要がある。

土木研究所では従来から行っている飛来塩分調査やコンクリートコアの塩分分布調査などから実務的なかぶりの設計法を提案している⁵⁾。これによると、昭和 59 年の「コンクリート道路橋の塩害対策指針(案)」に従って設計した橋梁は、厳しい塩害条件の場所ではおよそ 50 年経った時点で鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界に達する(図-5)。設計耐用期間を 100 年とするためにはかぶりを

増やしたり、海岸線付近ではかぶり増以外の対策も必要になることが判る（図-6）。逆に環境の穏やかな内陸では従来の設計でも十分に100年持つことも判る。

塩害の環境条件と設計耐用期間ごとに対策をイメージしたものが図-7である。ここでは海岸線付近でのかぶり増以外の対策として、塗装鉄筋、塗装PC鋼材、プラスチックシースの使用などを挙げている。

一方、土木構造物では中性化はあまり問題になっていなかったと前述したが、寿命が現在よりはるかに長く設定されたときには、中性化が構造物の耐久性の制約要因になる可能性も出てくる。また、複合劣化についても理解を深めないといけない。このように、コンクリート構造物の長寿命設計を行うためには、従来にも増して正確な劣化メカニズムの解明と、将来予測手法の開発を行う必要が出てくる。

5.2 施工と品質管理・検査

表-2の提言を受け、国土交通省では耐久性WGで検討を重ねた。そして2001年3月に「土木コンクリート構造物の品質確保について」という通達を出し、コンクリート構造物の品質向上を目指している。通達の中身は、次のようである。

- ①水セメント比の制限値の明示
- ②鉄筋のスペーサの単位面積あたりの個数の明示
- ③重要構造物でのテストハンマーによるコンクリート強度の推定
- ④重要構造物での竣工時のひび割れ調査
- ⑤工事関係者等の名前を示した構造物の銘板の設置

このうち特に③と④はコンクリート構造物の性能に対する施工の影響の重要性を意識したものであ

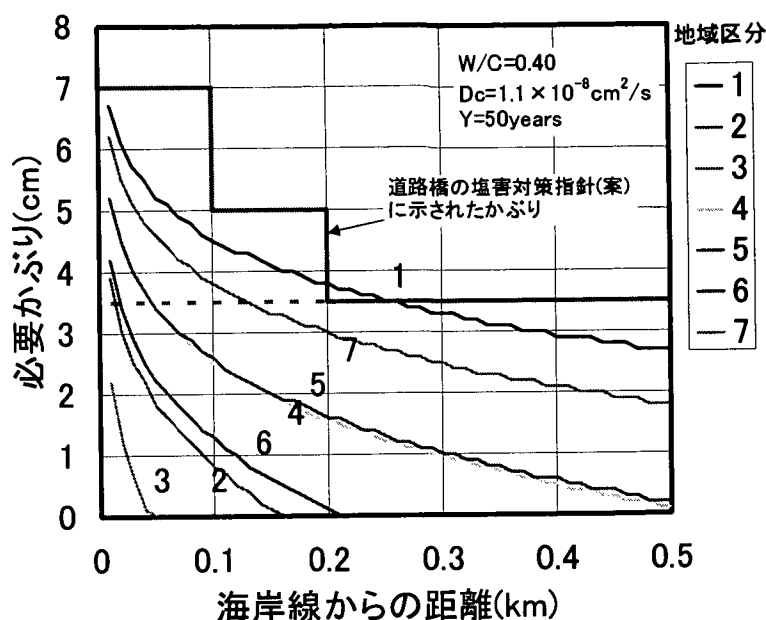


図-5 必要かぶり厚 ($W/C=40\%$, 50年)

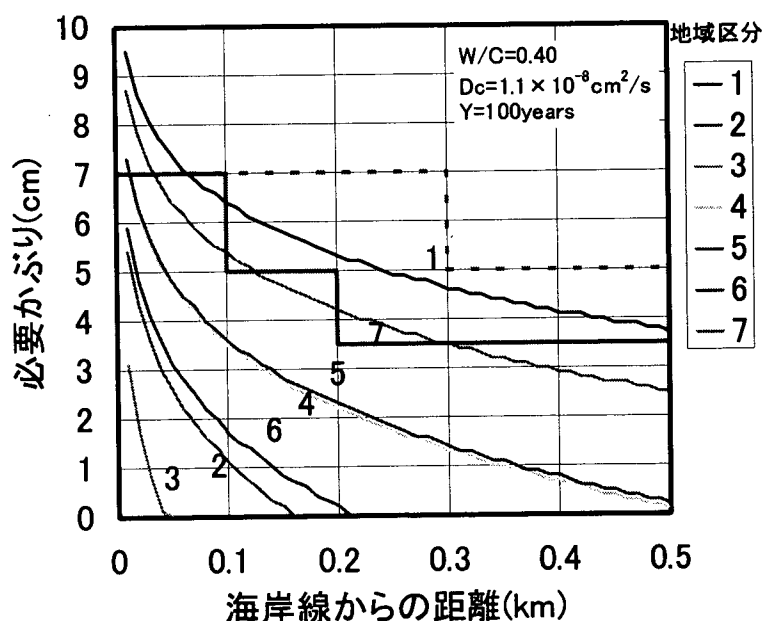


図-6 必要かぶり厚 ($W/C=40\%$, 100年)

る。テストハンマーの使用については、精度の問題などまだまだ議論すべき点もあるが、これまで竣工時には、せいぜい表面の状況を見るくらいであったコンクリートの検査を、一歩進めようとするものである。こうした項目の導入によって、施工管理がより向上することを期待している。

図-2の実態調査の結果を見ると、鉄筋のかぶりの確保が極めて重要であり、またかぶりの品質、すなわち水セメント比が低いことも重要である。このため、直ぐにでも技術開発しなければならない試験方法は「水セメント比」と

「鉄筋のかぶり」の正確な試験方法である。これまでに両者については種々の検討がなされてきているが、決定打がないのが実情である。

実はコンクリートそのものが、品質管理・検査がやりにくい材料である⁶⁾。よく言われるようにコンクリートは「生もの」である。プラントで練り混ぜられてから、時間とともに変化していく。最も基本になる材料特性の圧縮強度が28日経たないと確認できない。また、コンクリートの施工には多くの工種で多くの人が携わっている。分業化の著しい現在、それらの人々が必ずしも連携しているわけではない。これらのことが、コンクリートの品質管理・検査を困難なものにしている。

従来の圧縮強度による管理ではなく、フレッシュコンクリートの水セメント比で管理すると、打設前に確認ができ、問題があれば直ぐにフィードバックをかけられるため、本来の品質管理に近くなる。しかし、コンクリートではその特性を大きく左右する水の量が、ひとたび練り混ぜられると把握するのが極めて難しくなる。フレッシュコンクリートの単位水量試験は迅速にできる方法ではまだまだ精度が悪かったり、精度がよいと時間やコストがかかるなど、技術的に解決すべき課題は多いが、現場適用が増える方向にある。

できあがったコンクリート構造物の品質を左右する施工の工程では、その程度を定量化することすら現状では難しい。カンに頼るところも少なくない。

もし、コンクリートが高価な材料であれば、難しいコストのかかる検査も可能である。しかし、安価で大量に用いられ、刻々と品質の変化するコンクリートに対しては、迅速で安価な試験方法が必要である。しかも専門家を必要としないで、人による差が少ない方法が必要で、精度もそこそこ要求される。現場で使うことを考えれば、機器は頑強でなければならない。コンクリートの検査試験方法には大変な要求がされているわけである。

「水セメント比」と「鉄筋のかぶり」以外にもいろいろは非破壊あるいは高精度・迅速・安価な検査方法が要求されており、様々な検討がなされている。図-8⁷⁾にそれらの例を示す。土木研究所では単位水量の測定法⁸⁾、テストハンマーによる強度推定法⁹⁾、非破壊検査による竣工検査の合理化¹⁰⁾、などについて研究を行っている。

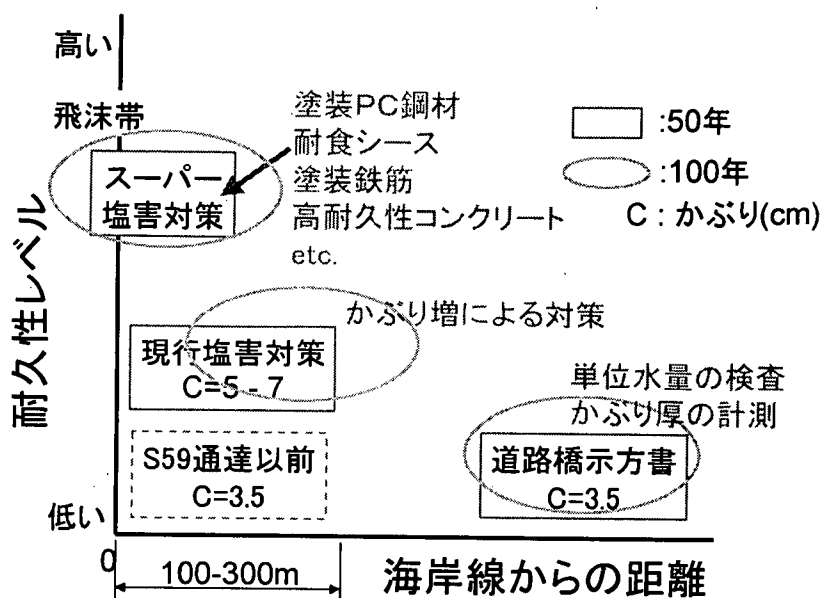


図-7 耐久性レベルのイメージ

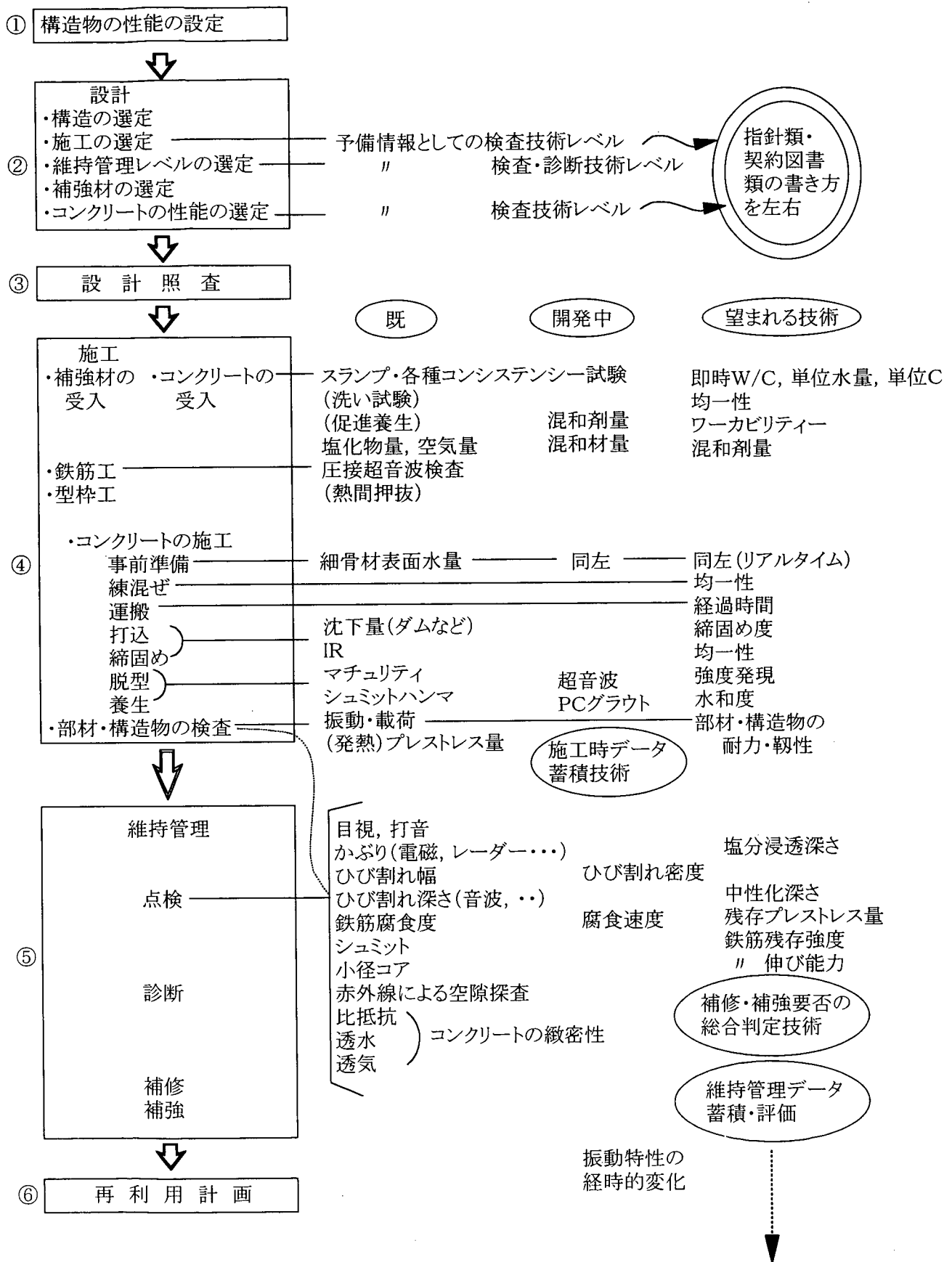


図-8 コンクリートの品質管理・検査法の概観

5.3 点検と診断

構造物の維持管理の基本となるのは点検である。通常は目視による日常点検と何らかの試験を取り入れた定期点検や臨時点検などが行われる。特に後者は多くの費用も要するため、いかに点検作業を合理化しながら構造物の状況に関する精度の高い情報をとるかが重要となる。さらに、その情報の蓄積と評価法も重要な課題である。

コンクリート構造物では塩害問題が生じてから、初めて維持管理の必要性が痛感されたと言っても過大ではない。そして、これからも塩害は最も注意を要する劣化現象であると思う。3.3 で示したように塩害はひとたび起こると制御が難しい。コンクリート表面に塩害の兆候が出てきたときには既に手遅れで、いかに早期に鉄筋の錆が始まったかを検知する必要がある。このためには鉄筋の自然電位法や分極抵抗法により鉄筋の腐食状況や腐食速度を把握するのが有効である¹⁰⁾。

1999 年のコンクリート問題で初めて大々的に取り上げられたのが第 3 者被害である。それまでの耐久性問題は構造物本体の問題であった。第 3 者被害で問題となるのはコンクリート片の落下などで、構造物本体の健全度とは一対一には対応しない。数が多いのはかぶり不足による鉄筋の錆で浮いたコンクリート片などである。これらの検知には最も確実な方法として「たたき」検査が行われている。検査の際に浮いた片はたたき落とすので対策も自動的にとられる。しかし、これは人海戦術的な手法で手間暇がかかる。そこで注目されているのが非破壊検査である。一部、赤外線による浮きや空洞の検知は実用化している。さらに、超音波やレーダなどの方法が検討されている。

塩害や第 3 者被害に共通する重要な検査項目に、鉄筋のかぶり厚さの検査がある。かぶりが薄いと塩害を早期に生じやすくなるし、中性化によってもたらされる錆びによるかぶり部の浮きも発生しやすくなる。鉄筋のかぶり厚さの検査方法についてはずいぶん長い間研究がなされてきているがまだまだ真に実用化には到っていない。

さて、構造物の点検と診断は人間で言えば健康診断である。人の健康診断では、診断機器の改良は非常に重要であるが、それに劣らず重要なのがカルテの整備¹²⁾である。ある時のひとつのデータでは病気についてはっきりしなくても、毎年人間ドックに入って昨年のデータと比較することによって、病気ははっきりするし対応も明確になる。構造物でもカルテを整備するのが有効である。平成 12 年に新たにつくられたコンクリート標準示方書維持管理編では、構造物の劣化を特定することと同時に点検のデータを記録・蓄積することの重要性を指摘している。しかし、実際にはカルテに載せる項目、構造物と劣化位置の特定の方法、データ記録の永続性など検討すべき課題は多い。

カルテの次は診断である。以前、電算が構造物の設計などに本格的に取り入れられた時期に、診断などのエキスパートシステムが脚光を浴びた。構造物の状況を入力すると、診断結果や対処法が出力されるというものである。しかし、構造物の劣化は今のところエキスパートシステムを構築するには複雑すぎるようである。もちろんこうした研究は必要ではあるが、現状では電算で専門家に診せるべきかどうかを判断させるくらいがよいのではないかと考えている。その後は、5.7 で述べるように専門家に任せるのがよいと考えている。

上記のような点検技術やカルテに関する研究は、現在多くの研究者によって検討されているため、年々レベルアップが図られることを期待している。

5.4 補修補強

図-9 に 2.2 の全国調査で調べた構造物の補修履歴を示す。この補修の中には、軽微な補修から重大な補修までが含まれている。供用年数が増すにつれてほぼ直線的に補修した構造物の割合が増えてい

て、竣工後 60 年経過すると、半分のコンクリート構造物は何らかの補修を経験している。図-9 の線を延長すると、既存の構造物では竣工後 100 年後にはほとんどの構造物が何らかの補修を受けるという予測がたつ。これからつくられる高耐久の構造物でも長期の供用後には補修を受けるという前提に考える必要がある。

劣化構造物に対し、適切な補修を行うには劣化原因を特定することが重要である。これは、劣化の進行を防止するための適切

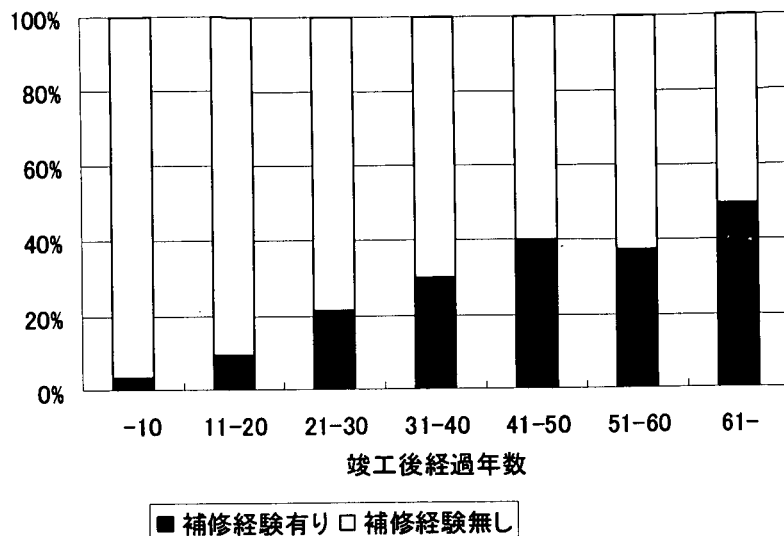


図-9 補修経験の有無と供用年数の関係

な処置方法が、それぞれの劣化原因で異なるためである。人間の病気に対する治療と同じである。また、現実には公共構造物の場合には、劣化が見つかって直ぐに大規模な補修に取りかかるのは難しい。この際、劣化の進行が早いのか遅いのかを見極めることも、実務的には重要である。さらに、ひとつの構造物で複数の劣化が見つかったときや、ひとつの路線で複数の構造物が劣化していて、補修の優先順位を決めるようなときにも、劣化原因を特定し、劣化速度を推定し、補修のコストや効果、効果の持続性などを把握しておくことが重要となる¹³⁾。つまり、補修を考えると、個別構造物の補修と路線などにある複数の構造物の補修の両面から検討が必要である。後者については 5.6 で述べる。

コンクリート構造物の補修が本格化してからまだ 20 年しかたっていない。比較的新しい技術である。その分、材料も工法も日進月歩と言ってよいと思われる。初期の段階では、言ってみれば万能薬で種々のコンクリート構造物の補修をしていた時期があった。さすがに、現在は補修も多様化している。今後ますます、劣化原因や症状ごとに特化した補修材料や工法が開発されてくると期待される。しかし、まだまだ試行錯誤の段階である。筆者自身、現場から構造物の補修の相談を受けても、自信を持ってこれがよいという判断が下せない状況にある。それは、データが圧倒的に不足しているためである。

こうした背景から、土工協の土木工事技術委員会コンクリート専門部会では平成 12 年 3 月に「実務者のためのコンクリート構造物の維持管理マニュアル（案）」を作っておられる。多分、初めての本格的な補修に関するデータ集である。かなりの力作である。しかし、マニュアルと名付けられているが、この案のとおり補修すれば補修が完了するということまでは行っていない。

「ある原因でこの程度劣化した構造物に、こういう補修を行ったら、数年後にこういう状況になった」というおびただしい量の情報がないと、処方箋も書けない。公共事業では実績主義があり、実績がないとなかなか使ってもらえないという問題と、結果が良くても悪くても公平な現場のデータをそろえるのが難しいという問題がある。種々の補修法を適用しやすくし、その代わりデータの蓄積を義務付けるようなシステムを創る必要がある。

5.5 データベース

平成 12 年 1 月に土木学会コンクリート標準示方書施工編が改訂された（以下、h.11 版施工編）。副題に「耐久性照査型」とある。耐久性照査型の設計では耐久性を確保するために、種々の選択肢が選べるようになるのが利点である。例えば従来、中性化に対する耐久性を確保するために、水セメントをいくつ以下にするとといったあらかじめ決められた仕様に従うのが主流であった。h.11 版施工編では、「中性化が〇〇年たっても鉄筋位置におよばない」ようにするためには、種々の選択肢が選べるようになった。これが耐久性照査型の利点である。

しかし、耐久設計を性能規定的に行う際に重要なことは正確な現象のモデル化である。モデルを構築するには種々のデータが必要である。施工編を改訂するときに改訂委員会で問題となったことは、我々は長い間耐久性について研究してきた割には、直ぐに使えるデータが極めて限られていたことである。使えるデータの必要性が痛感された。

また、データさえあれば劣化のモデル化ができていなくても、他の似たような構造物の状況を見て何年後にどうなるかなどの予想が立てられる。補修に関してもデータベースが必要であることは前節で述べた。

データベースの構築は多大なエネルギーを要する。一朝一夕にはできないものである。しかもその維持も大変な労力がある。現在、土木学会のコンクリート委員会では耐久性関連の研究を体系化するため、データベースの基礎となるフォーマットの検討を行っている。これらを元にデータベースの構築が各所で行われることが望まれる。

5.6 維持管理戦略

今後、維持管理費が増大していけば、従来のような行き当たりばったりの補修では直ぐにパンクしてしまう。いろいろな面で、維持管理に関して多岐にわたる戦略が必要になってくると思われる¹³⁾。

例えば、構造物の管理者は、個々の構造物をどう補修するかではなく、もっと総括的に維持管理戦略を練る必要がでてくる。ひとつの構造物でも複数の原因で劣化する。それに対してどう対処するかは、構造物をどれだけの期間使うかの想定が必要である。さらに、ある道路の路線を見た場合、構造物がひとつでもダメになればある期間その路線が機能しなくなる。そのため、路線全体を見て、どの構造物からどう補修するかを決めなければならない。そのためには、原因を知り、劣化の経時変化を予測し、各段階での補修の費用と効果を評価する必要がでてくる。現在よりさらに高度な判断が必要とされるであろう。

現在の体制では、こうした戦略は構造物の管理者が行うことになる。しかし、上記の維持管理戦略は非常に複雑高度な検討内容である。筆者はこうした状況に対応するためには、維持管理コンサルタントのような専門家の育成と、それを活用するシステムも必要であると考え。まさに VE 制度のようなシステムが必要な分野ではないかと考える。

5.7 診断士などの活用

現在、コンクリート構造物の設計規準類を性能規定化しようという動きが活発である。性能規定化は新しい概念のようにも見えるが、実はこれまでも様々なところで見られたものである。そのよい例が補修である。

コンクリート構造物の劣化は一様ではない。構造物ごとに全て異なるといっても過言ではない。しかも、構造物が置かれている環境も、全て異なる。こうした条件の中で、傷んだ構造物に対し、有効

な補修を施すためには、劣化原因や状況、環境条件をはじめとして種々の条件を考慮に入れなければならない。まさに、性能規定的に対処せざるを得ない。

よいコンクリート構造物を造るには、もちろん高度な技術が必要である。しかし、場合によっては、標準設計に従い標準的な施工を行えば、そこそこの構造物はできてしまう。これに対し、補修には標準は設定しづらい。以前は、造るのが主体で維持管理や補修は何となく付け足しの技術というイメージがあった。しかし、本当は構造物を造るより、維持管理する方が高度な技術が必要である。維持補修は造るより難しいのである。

昨年、日本コンクリート工学協会で「診断士」という資格が動き出した。いってみればコンクリート構造物の医者である。多分、5.6 で示した維持管理コンサルタントの中核になる技術者である。この診断士制度で良い技術者が認定されて、この分野の技術者の評価が向上することが必要である。

6. おわりに

「維持管理の時代」といわれて久しいが、このところやっと、コンクリート構造物の維持管理の重要性が本当に認識されるようになってきたと感じている。メンテナンスフリーといわれたコンクリート構造物にも維持管理が必要なことが認識されるようになってきている。こうした中で、公共構造物を経済的に高いレベルで維持するには種々の新しい技術が必要となる。従来、ともすると新材料や高性能材料は割高となり、良いことはわかっているにもかかわらず土木構造物への導入が難しかった。そこに、ライフサイクルコスト評価の導入など新たな価値観も生まれている。従来にない新しいアプローチも可能となっている。

コンクリート構造物を長持ちさせるためには、新設構造物の設計・施工・品質管理・検査、既設構造物の点検・診断・補修などの総合的な技術が必要である。また、維持管理についても個々の技術の向上はもとより、維持管理体制や技術者の養成など多面的な検討が必要である。やるべきことは山積していると言っている。土木研究所でも個々の技術開発はもとより、それらの規格化、現場への適用などを通して、構造物の品質向上、長寿命化、維持管理の合理化に貢献して行きたいと考えている。

最後に、今後とも、コンクリート構造物関連の土木研究所の研究に、ご意見やご助言をいただければ幸いに存じます。

【参考文献】

- 1) 古賀ほか：コンクリート構造物の健全度に関する実態調査、土木技術資料 42-12、2000.12
- 2) 土木研究所：「橋梁の架替に関する調査結果（Ⅲ）」、土木研究所資料第 3512 号、1997.3
- 3) 土木研究所：コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究－コンクリート橋の損傷状況と維持管理費－、土木研究所資料第 3811 号、2001.3
- 4) 建設省、運輸省、農林水産省「コンクリート構造物耐久性検討委員会」の提言
<http://www.moc.go.jp/tec/press/concrete/index.htm>
- 5) 土木研究所：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書（Ⅱ）
－コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討－、土木研究所共同研究報告書第 258 号、2000.12
- 6) 河野：「検査でコンクリートはよくなるか」、セメント/コンクリート No.653、2001.7
- 7) 河野、古賀：「コンクリート構造物の規準類の性能規定化と検査のあり方に関する考察」
土木学会論文集、No.651/VI-47、pp.1-10、2000.6
- 8) 例えば、土木研究所：フレッシュコンクリートの単位水量迅速推定法に関する実験的研究

土木研究所資料第 3657 号、1999.07

9) 例えば、古賀ほか：反発度法による新設構造物検査に関する検討、

第 24 回日本道路会議一般論文集 A、2001.10

10) 例えば、森濱ほか：超音波速度分布の予測によるコンクリートの品質評価に関する研究、

鉄筋コンクリート構造物の計測と表面探傷シンポジウム、(社)日本非破壊検査協会、2001.01

11) 土木研究所：鉄筋コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書

ーコンクリート構造物の健全度診断マニュアル(案)ー、土木研究所共同研究報告書 195 号、1998.03

12) 田中ほか：コンクリート構造物の診断支援システムの開発ーデータの収集・蓄積・利用の効率化ー

コンクリート工学誌、Vol.39、No.2、pp.8-13 2001-02

13) 河野：「コンクリート構造物の維持管理に戦略を」、日経コンストラクション、2000.08-11

[一般講演]

既設基礎の耐震補強技術の開発

構造物研究グループ上席研究員（基礎） 福井 次郎

目 次

1. はじめに	19
2. 官民共同研究について	20
3. 研究対象の新工法の概要	21
3. 1 高耐力マイクロパイル工法	21
3. 2 STマイクロパイル工法	22
3. 3 ねじ込み式マイクロパイル工法	23
3. 4 小径ドレーン工法	24
3. 5 SSP工法	25
4. 耐震補強工法の設計・施工上の課題	26
5. これまでの研究成果	27
5. 1 異種群杭基礎の静的水平載荷実験（静的共通実験）	27
5. 2 高耐力マイクロパイルの支持力特性に関する載荷実験	29
5. 3 異種群杭基礎の振動台実験（動的共通実験）	31
5. 4 STマイクロパイルに関する実験	33
5. 5 ねじ込み式マイクロパイルに関する実験	34
5. 6 小径ドレーン工法に関する実験	35
5. 7 SSP工法に関する実験	36
5. 8 試験施工例（差海橋の施工例）	37
6. 設計・施工マニュアルの骨子	38
参考文献	38

既設基礎の耐震補強技術の開発

構造物研究グループ上席研究員(基礎) 福井 次郎

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、多くの土木構造物に対して関東大震災以来、最大の被害をもたらした。橋梁においても、橋脚の倒壊、橋桁の落下を始め、多数の橋梁で大きな被害が発生した。このため、平成8年11月1日付けで建設省より新しい道路橋示方書が関係機関に通知された。この道路橋示方書では、プレート境界型の地震動に加え内陸直下型の地震動を考慮した設計地震力が新たに規定され、橋脚や基礎等の構造部材は、この地震動に対して地震時保有水平耐力法による耐震設計を行うように改訂されている。ここで、基礎は地震後の被災状況の調査や復旧が橋脚基部と比較して困難であることから、基礎本体には復旧に支障となるような大きな損傷は生じさせないこと、および橋全体系の安全性を損なうような過大な変形を基礎に生じさせないこととしている。また、従来よりも広範囲の土質条件で液状化に対する強度低下の影響に対する検討を行うこととし、液状化に伴う流動化に対する設計も新たに規定されている。

この結果、以下に示すような条件の既設基礎では、道路橋示方書に規定された耐震安全性を満足せず、補強が必要となる場合がある。

- ① 設計当時の技術基準類の規定は満足しているが、新しい道路橋示方書の規定を満たしていないもの。
特に、当初設計において液状化の影響を考慮していなかったが、新しい道路橋示方書では液状化の恐れがあるもの。
- ② 橋脚を耐震補強したために、相対的に基礎の耐力が不足しているもの。
- ③ 上部構造の拡幅や支承条件の変更などにより、基礎が支持する荷重が増加したもの。

これらの基礎の耐震補強として、例えば増し杭を行う場合、通常、フーチングより広い範囲を掘削しなければならず、作業空間確保のために広範囲に渡り道路通行規制を行う必要がある。また、新設基礎の場合と異なり桁下での施工となるため、工費・工期とも膨大なものになってしまう。このようなことから、限られた予算で効率的な耐震補強を行うためには、合理的かつ確実に耐震安全性を確保できる補強工法の開発が求められている。

上記のニーズに応える補強技術として、例えば、アメリカでは、1989年のロムブリエタ地震を契機に、橋梁基礎の耐震補強にマイクロパイル工法が用いられるようになってきた。マイクロパイルとは、小口径（φ300mm以下）の場所打ち杭・埋め込み杭の総称で、アメリカで用いられているのは、その一種で、小型のボーリングマシンにより鋼管をケーシングとして削孔を行い、異形鉄筋を孔内に挿入した後、グラウトを加圧注入して地盤に定着させ、杭径に比べて大きな支持力が得られる。また、短尺の鋼管をネジ継手で連結していくことにより、背の低いボーリングマシンで施工できることが特徴である。

このような状況を踏まえ、独立行政法人土木研究所では、マイクロパイル等の新技術を用いた耐震補強技術の開発を目的とした、官民共同研究「既設基礎の耐震補強技術の開発」(H11-13)を行っている。本共同研究で対象とする新技術は下記の5工法である。

- ・ 高耐力マイクロパイル工法による増し杭補強技術
- ・ STマイクロパイル工法による増し杭補強技術
- ・ ねじ込み式マイクロパイル工法による増し杭補強技術

- ・ 小径ドレーン工法による液状化対策技術
- ・ SSP工法によるパイルベント橋の補強技術

ここでは、上記5工法の概要と、これまでの研究成果および今年度作成予定の「既設基礎の耐震補強技術の開発」に関する設計・施工マニュアルの骨子について述べる。

2. 官民共同研究について

(1) 研究体制

「既設基礎の耐震補強技術の開発」に関する官民共同研究は、独立行政法人土木研究所、(財)先端建設技術センター、民間12社のメンバーで構成されている(表-2.1 参照)。また、本共同研究では、この構成メンバーの他、国土交通省関東地方整備局、日本道路公団、首都高速道路公団、

表-2.1 官民共同研究の構成メンバー

独立行政法人土木研究所	
(財)先端建設技術センター	
極東工業(株)	利根地下技術(株)
(株)鴻池組	日特建設(株)
三信建設工業(株)	日本基礎技術(株)
(株)白石	ヒロセ(株)
(株)銭高組	(株)フジタ
東洋建設(株)	ライト工業(株)

阪神高速道路公団の担当者にも出席を依頼し、既設基礎の補強に当たっての実現場での制約条件に関する情報を収集するとともに、補強技術に対する意見・要望を整理している。さらに、本共同研究で開発された技術が適用できるフィールドの提供を依頼し、新技術の速やかな実現場への導入を図ることとしている。

(2) 研究内容

共同研究は、平成11年よりスタートし、平成13年度を最終年度としている。以下に、過去2年間の研究内容と、今年度の研究計画を下記にまとめる。

1) 平成11年度

既往の耐震補強技術および液状化対策技術に関して体系的に分類・整理を行い、各種工法の設計・施工上の課題を明らかにし、本研究で開発すべき項目の抽出作業を行った。

また、耐震性能が不足している既設橋基礎を想定し、提案する5つの新技術(高耐力マイクロパイル工法、STマイクロパイル工法、ねじ込み式マイクロパイル工法、小径ドレーン工法、SSP工法)による補強効果を検証するために、現行の地震時保有水平耐力法による試設計を行った。試設計の結果から各工法の設計上の課題を整理し、その課題に対処するために必要な実験・解析等の手法および内容の検討を行った。さらに、既設基礎の補強に際して想定される制約条件を整理し、施工上の課題を明らかにした¹⁾。なお、前年度、別途実施したマイクロパイルの鉛直および水平載荷試験結果を解析し、マイクロパイルの支持力特性を明らかにするとともに、地震時保有水平耐力法の杭モデルをマイクロパイルにも適用できることを確認した。

2) 平成12年度

個別の工法毎に設計・施工上の検討を継続するとともに、「小口径による増し杭補強工法」に関して、以下の2つの共通実験を実施した²⁾。

- ① 既設杭と小口径杭の荷重分担を解明する事を目的とした、静的共通実験
- ② 地震時の小口径杭の耐震補強効果を確認することを目的とした、動的共通実験

3) 平成13年度

平成11年度、平成12年度の研究成果をまとめ、設計・施工マニュアルを作成する予定である。

3. 研究対象の新工法の概要

3.1 高耐力マイクロパイル工法

(1) 概要

高耐力マイクロパイル工法（以下、HMP と略す）は、異形棒鋼および削孔ケーシングとして用いた鋼管を補強材とし、また、定着部分にグラウトを加圧注入し、高い周面摩擦力が期待できるように築造した高耐力・高支持力のマイクロパイルである。

(2) 構造

HMP は、図-3.1.1 に示すように杭頭結合部、非定着部、定着部で構成される。上部構造から伝達された荷重は、高強度鋼管および異形棒鋼により定着部に伝達され、さらにグラウト、地盤へと伝達される。定着部のグラウトは、一般に加圧注入あるいはポスト・グラウト処理され、定着部と周辺地盤の摩擦強度が増強される。

(3) 施工法

HMP の標準的な施工手順を図-3.1.2 に示す。まず、短尺の鋼管を順次継ぎ足しながら、ケーシングとして用い、ボーリングマシンで所定の深さまで削孔する。削孔完了後、鉄筋を挿入し、グラウトの一次注入を行う。その後、鋼管を少し引き上げ、グラウトを加圧注入することにより定着部を築造する。最後に定着部への軸力伝達を円滑にするため、鋼管を再挿入し、杭頭部に支圧板を取り付け完成する。

(4) 特徴

①グラウトを加圧注入して定着部を築造することにより、支持地盤への軸力伝達が確実に行われ、圧縮（押込力）だけでなく、引張（引抜）に対して高い抵抗力を有する。②短尺の鋼管を連結していく施工手順を用いることにより、空頭制限のあるところや、狭隘地での施工が可能である。③ケーシング削孔のため、地中障害物や転石の多い地盤でも施工できる。④ 任意の角度で斜杭を施工できるので、大きな水平力にも抵抗できる。

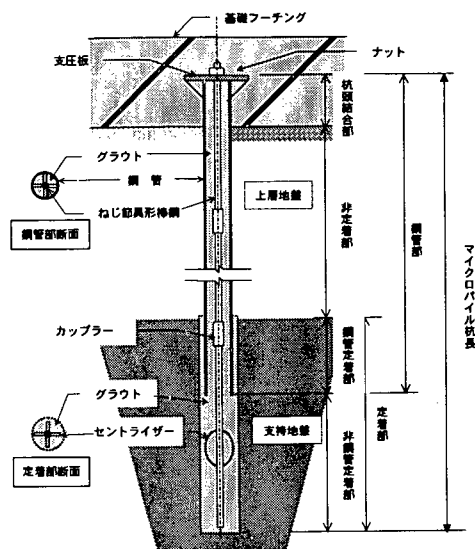


図-3.1.1 高耐力マイクロパイルの構造

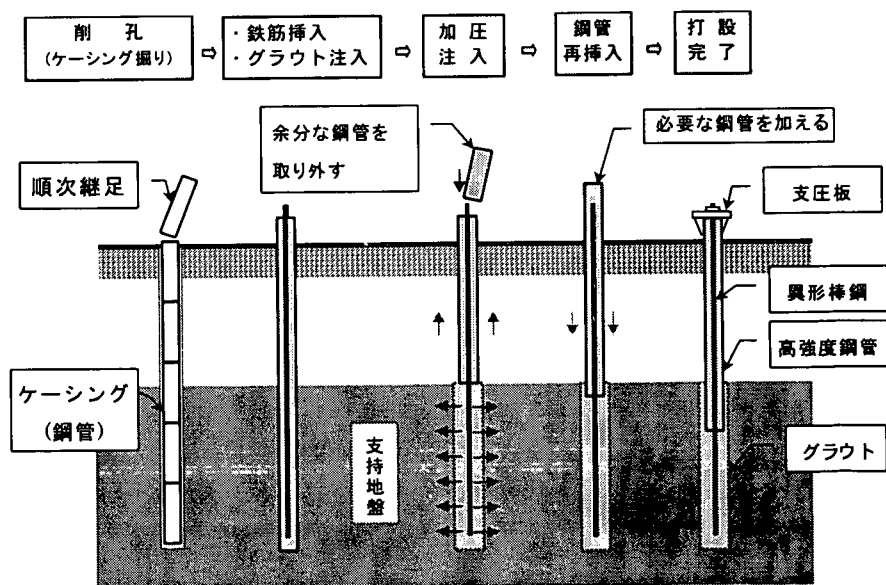


図-3.1.2 標準的な施工手順

3. 2 ST マイクロパイル工法

ST マイクロパイル工法 (STMP) とは、従来のマイクロパイル (小口径鋼管とグラウトの加圧注入技術) に高圧噴射攪拌による地盤改良技術を併用した合成構造の杭工法である (図-3. 2. 1)。本工法の特徴・概要を以下に示す。

- 1) 標準的な施工手順を図-3. 2. 2 に示す。HMP と同様、短尺の鋼管を連結していくため、小型機械で鋼管挿入ができ、空頭制限 (4m)、狭隘地等の制約条件下での施工が可能である。
- 2) 補強材として用いる鋼管は、表面には付着性能を向上させるためのビード溶接による節突起加工を施した高張力鋼管 (直径 300mm 以下) を用いる。
- 3) 鋼管の継手は、空頭制限等の制約条件における施工速度の向上、杭としての品質確保を目的とし、機械式のカップラー式ネジ継手を用いる。
- 4) 改良体の造成は、二重管ツインノズル方式のセメントミルクの高圧噴射攪拌であり、造成径は 600~1, 000mm、圧縮強度は $3 \sim 5 \text{ N/mm}^2$ 以上が標準である。
- 5) 支持力機構は、上部構造から杭頭の鋼管に伝達された軸方向荷重に対して、付着性能を向上させた節突起付き鋼管と改良体の一体化、および拡張した改良体での地盤抵抗によって大きな軸方向支持力を確保するものである。
- 6) 杭頭の鋼管に伝達された水平、モーメント荷重に対しては、高張力鋼管の曲げ抵抗および拡張した改良体の水平地盤抵抗によって、比較的大きな杭の水平抵抗を期待できる。
- 7) 杭頭結合部は、鋼管をフーチングコンクリートへ定着させた支圧板方式を標準とする。

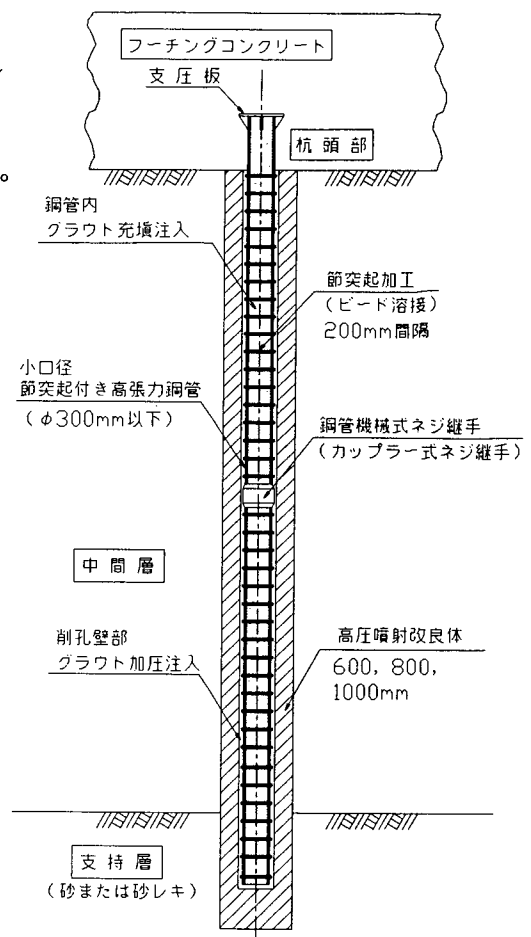


図-3.2.1 STMP の構造概要図

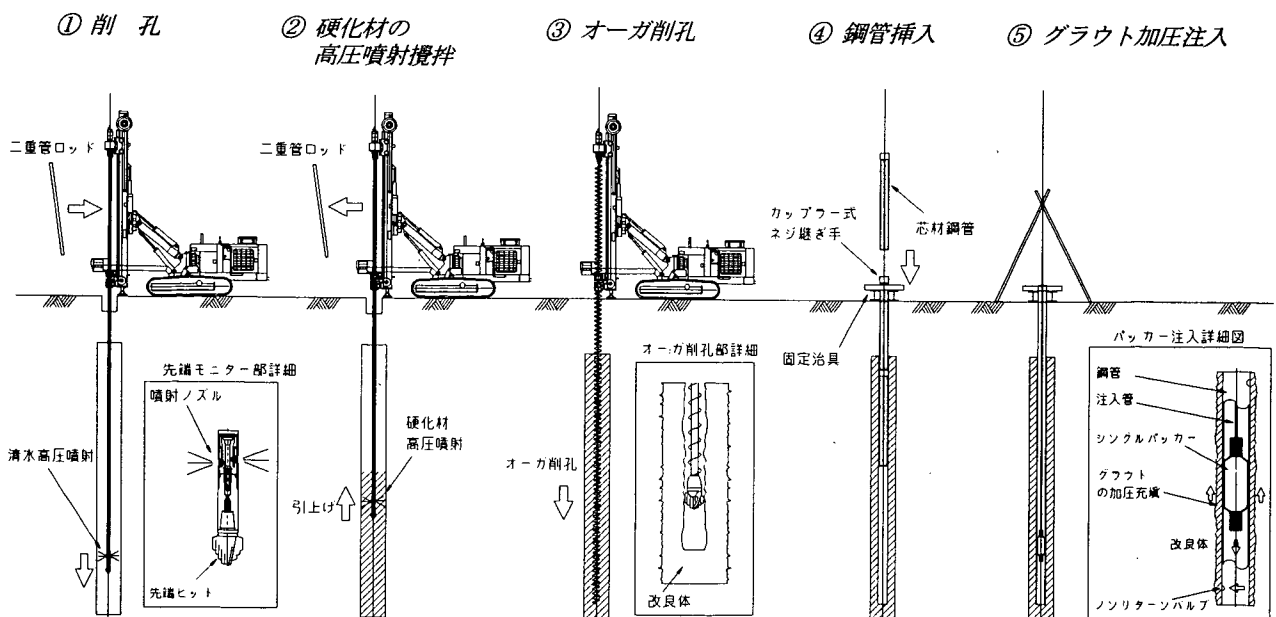


図-3.2.2 ST マイクロパイル工法の標準的な施工手順 (概要)

3.3 ねじ込み式マイクロパイル工法

(1) 概 要

ねじ込み式マイクロパイル工法とは、小口径(最大 $\phi 300$ mm程度)の鋼管(軸部)に4枚または2枚の $\phi 600$ mm程度のドーナツ状鋼板(翼部)をらせん状に取付けた杭を、回転オーガにより杭を回転させて地盤に無排土で貫入するものである。施工機械の回転オーガのみで施工するため騒音・振動が少なく、また、小型の施工機械(15t~20t 級程度)であるため狭い施工ヤードで施工が可能である。図-3.3.1 にねじ込み式マイクロパイルの構造を示す。

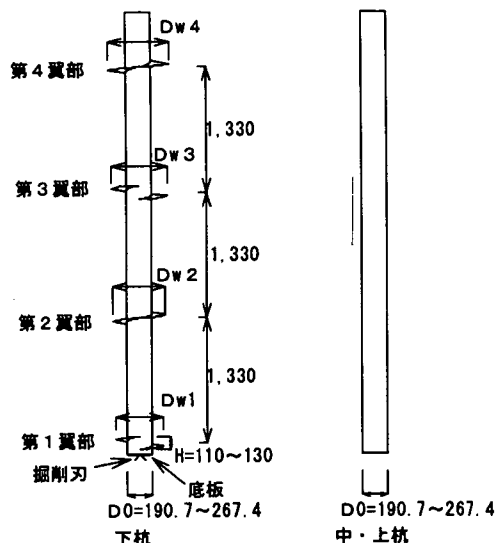


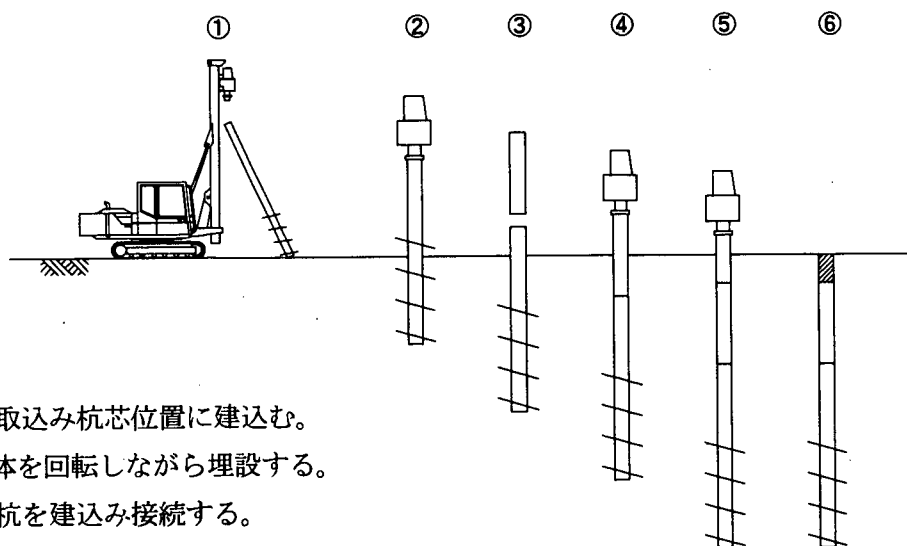
図-3.3.1 ねじ込み式マイクロパイルの構造

(2) 特 徴

- ①らせん状に取付けた翼の効果により、小径杭で大きな支持力を得ることができる。
- ②回転推進力により施工を行うため、無排土で施工ができる。
- ③HMP、STMP と同様、短尺の鋼管を連結していくため、小型の機械で施工が可能で、狭隘地での施工に適している。
- ④低振動・低騒音で施工が可能で、施工時にセメントミルク等を使用しないので、環境に優しい。

(3) 施工方法

ねじ込み式マイクロパイルの標準的な施工法を図-3.3.2 に示す。



- ① 掘削モータに下杭を取込み杭芯位置に建込む。
- ② 鉛直度を確認し、杭体を回転しながら埋設する。
- ③④ 継杭の場合、中・上杭を建込み接続する。
- ⑤ ヤットコ等を使って所定深度まで埋設し打止める。
- ⑥ ヤットコ等を回収し施工を完了する。

図-3.3.2 施工順序図

3.4 小径ドレーン工法

小径ドレーン工法の基本的な考え方は、既設基礎に新たに杭等を増し打ちするものではなく、ドレーンの排水効果で基礎周辺地盤の液状化を防止し、安定化を図ることによって耐震性能を向上させるものである。したがって、地震の主要動の到来と同時に液状化が起こる場合は、小径ドレーン工法にマイクロパイル等の増し杭工法を併用することで、より合理的な耐震補強が可能になる。

小径ドレーン工法の概要を図-3.4.1に、施工手順を図-3.4.2に示す。本工法は、人力運搬可能な施工機械を用いて、既設構造物直下の飽和砂地盤中に $\phi 5 \sim 10 \text{ cm}$ のスクリーン管（小径ドレーン）を50～150cm間隔で、所定の深度まで垂直または斜めに打設するため、以下のような特徴がある。

- ①施工機械が軽量小型で操作性に優れているため、用地、上空制限等の厳しい制約条件下にある既設構造物直下地盤の液状化対策が可能である
- ②ドレーン材は高い排水性能があり、グラベルドレーン工法と同等以上の対策効果が期待できる
- ③施工に伴う周辺環境への影響が小さい

施工機械は、操作性にすぐれたエア式地中貫孔機（例えば、インパクトモール）を用いるため、施工性、安全性の確保が容易である。小径ドレーンのスクリーン部は、写真-3.4.1に示す水平連続Vスロット構造である。地震時、スクリーン部には間隙水のスクリーン管内への流入を妨げないと同時に細粒分や砂分を極力流入させないといった機能が要求されるが、スクリーンのスロットサイズを砂地盤の85%粒径（ D_{85} ）の1/2未満とすることで、この要求性能が満たされる事を確認している。小径ドレーンの打設状況を写真-3.4.2に示す。

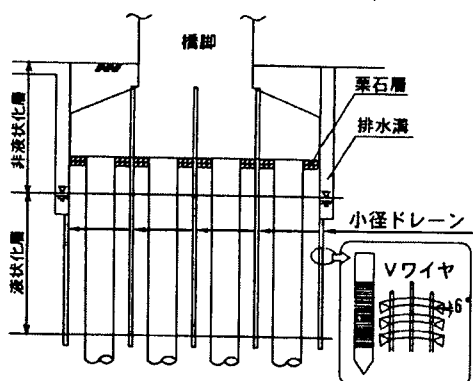


図-3.4.1 小径ドレーンの構造

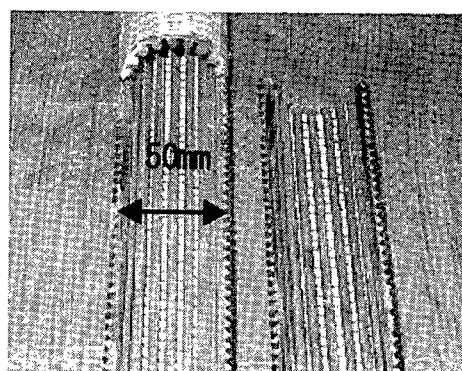


写真-3.4.1 小径ドレーン(スクリーン部)

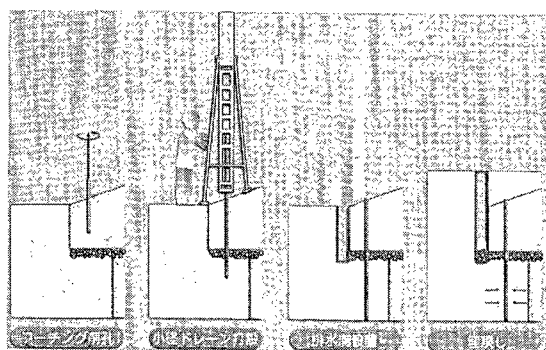


図-3.4.2 施工手順

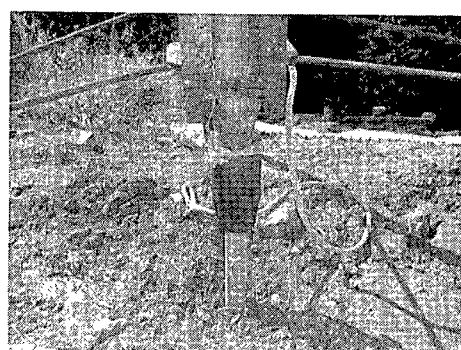


写真-3.4.2 小径ドレーン打設状況

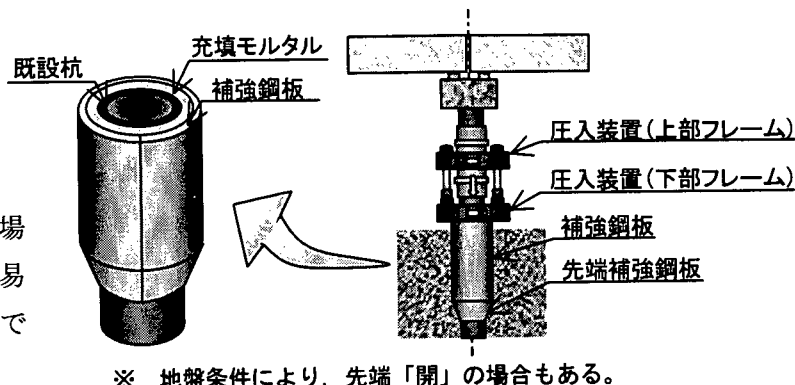
3.5 SSP工法

(1) 概要

SSP工法は、図-3.5.1 に示すようにパイルベント橋脚に半円状の補強鋼板を巻き付けて、圧入装置のジャッキ伸縮動作によって補強鋼板を押し下げ補強するものである。本工法によれば、道路橋示方書にある保有水平耐力を確保し、景観を大きく変えず河積阻害率も小さく施工性・経済性に優れた補強工法である。

適用範囲は、次の通りである。

- 杭径：φ400～1200mm
- 杭種：鋼管杭、PHC杭、PC杭、RC杭
- 最大圧入力：981kN
- 桁下空間：2.5～3.0m（確保できない場合は施工基面を掘り下げ、簡易仮締切りによる水位低下等に対応）



※ 地盤条件により、先端「開」の場合もある。

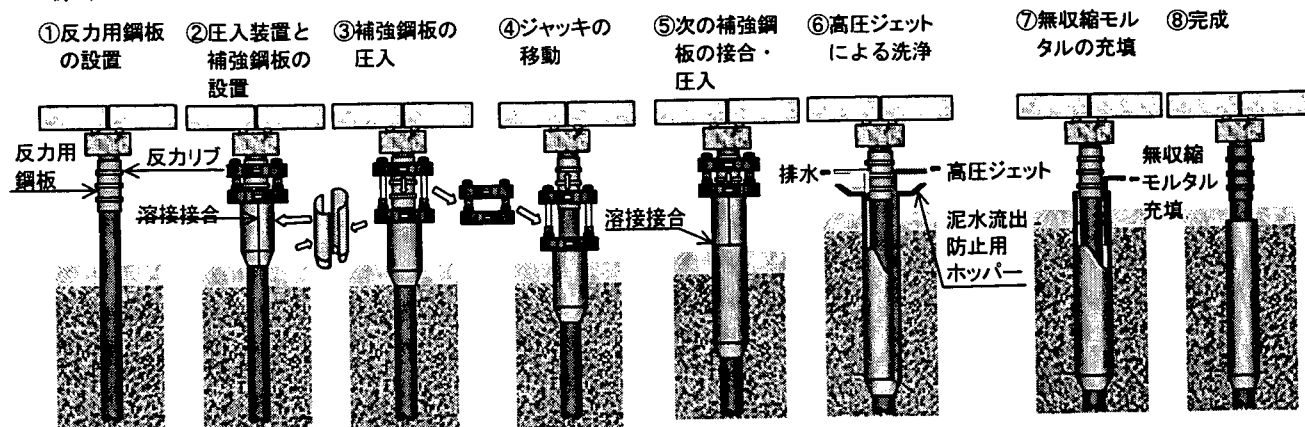
図-3.5.1 SSP工法概要図

(2) 特徴

- ①被補強構造物を供用しながら安全に所要の耐震補強を施す事が出来る。
- ②最小の空間（桁受け梁下）≧3.0m程度での施工が可能。
- ③SSP圧入装置により補強鋼板の圧入沈設を基本とする圧入工法。
- ④低騒音・低振動な無公害工法である。
- ⑤排土は高圧ウォータージェットにより土砂を攪拌して浮上排出、又はエアリフト等により強制排出する
- ⑥補強鋼板と既設パイルとの空隙部には土砂を排出後、高圧ウォータージェットで洗浄してSSPモルタルを注入・充填して既設構造物と一体化する。
- ⑦確実な圧入沈設制御により品質管理・工程管理・安全管理・環境管理が容易。

(3) 施工方法

標準的な施工順序を図-3.5.2 に示す。



※流水の少ない場合は、瀬替・堰止めなどでドライの状態で施工。流水の多い場合は、簡易仮設構台・台船により施工。

※高圧ジェットにより排出される泥水は、補強ブロック上部にホッパーを設けて河川への流出を防止する。

※圧入には高圧ジェットを併用する場合もある。

図-3.5.2 SSP工法の標準的な施工順序

4. 耐震補強工法の設計・施工上の課題

3. で提案された5工法は、官民共同研究が開始される前から提案会社によって検討が進んでいた。しかし、耐震補強の設計・施工法を確定しマニュアルを整備するためにはいくつかの課題があった。以下にその課題について整理する。

(1) マイクロパイル工法による増し杭補強に関する設計・施工上の課題

1) 設計上の課題

マイクロパイルを増し杭補強として用いる場合、1本の杭として用いられることは少なく、多数の補強杭として既設杭の周囲に配置され、フーチングと結合される。このような群杭基礎に水平力が作用する場合、単杭に比べて各杭に作用する地盤反力がその位置や杭間隔などによって異なることが知られている。これまで、群杭に関する実験のほとんどは同種同径の杭で実施されており、比較的大口径の既設杭と小口径のマイクロパイルのように、異種混合杭基礎となる場合の各杭の挙動については未だ解明されていないのが現状である。よって、異種混合杭基礎の水平荷重分担に関する研究を行い、研究結果を適切に反映した設計法を確立する必要がある。

マイクロパイルを斜杭として用いる場合、補強効果の確認や、打設角度が補強効果へ与える影響を確認する必要がある。

2) 施工上の課題

低空頭での施工を可能とするため、短尺の鋼管を順次継ぎ足しながら施工を行う。よって、施工性を向上させるため、短尺杭同士の継ぎ手の開発を行う必要がある。

マイクロパイルを斜杭として用いる場合、橋脚が支障となって打設が困難となる場合があるため、施工法の検討を行う必要がある。

(2) 液状化対策工法（小径ドレーン工法）

1) 設計上の課題

L2地震動に対する対策効果の妥当性を適切に評価すること。また、小径ドレーン工法による液状化対策範囲に関する検討を行う必要がある。

2) 施工上の課題

既設フーチングを削孔して打設を行うため、配筋位置を適切に調査できる方法の検討や、削孔によるフーチングの断面欠損の影響を検討する必要がある。

(3) パイルベントの補強（SSP工法）

1) 設計法上の課題

パイルベント基礎ではフーチングが無く、構造的に橋脚部と基礎部の区別はない。橋脚部と基礎部の区分を行うにあたり、妥当性を検討する必要がある。

2) 施工上の課題

鋼板を順次現場溶接しながら圧入していくため、現場溶接の精度に関して検討・工夫をする必要がある。

5. これまでの研究成果

4. で示した課題を解決するため、種々の検討を行っている。ここでは、その中から代表的な成果を示す。

5.1 異種群杭基礎の静的水平載荷実験(静的共通実験)

(1) 実験の目的

既設杭基礎を、マイクロパイルにより増し杭補強する場合、比較的大口径の既設杭と小口径のマイクロパイルによる異種混合杭基礎となる。このような基礎における、水平力作用時の荷重分担を解明し、マイクロパイルの補強効果を適切に反映した補強設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的としている。

(2) 実験概要

試験は土木研究所内にある大型実験土槽内において行った。試験モデルは「既設基礎の耐震補強技術に関する共同研究報告書(その1)」における各試設計結果を参考にして、実物大基礎を1/5に縮小することにより設定した。既設杭として外径114.3mm、肉厚3.5mm、補強杭(マイクロパイル)として外径34.0mm、肉厚2.3mmの鋼管を用いた。各杭に試験中の杭体ひずみを測定するためにひずみゲージを貼付した。貼付間隔については既設杭の $1/\beta$ を73.2cmと想定して設定し、地盤面から0.9m以浅に対して150mm、それ以深に対しては300~600mm間隔とした。各杭の頭部は鋼製フーチングに剛結する構造とし、フーチングの回転は自由とした。また、杭先端部は試験土槽下端に固定した。試験では表-5.1.1に示す7ケースの静的水平載荷試験を行った。また、図-5.1.1にCASE4における試験概要図を示す。地盤は試験杭を設置した後、グラブバケットにて砂(鹿島砂:Gs=2.73, 最大粒径4.75mm, 細粒分1.2%, 均等係数2.71)を投入し、タンパを用いて30cm毎に締固め

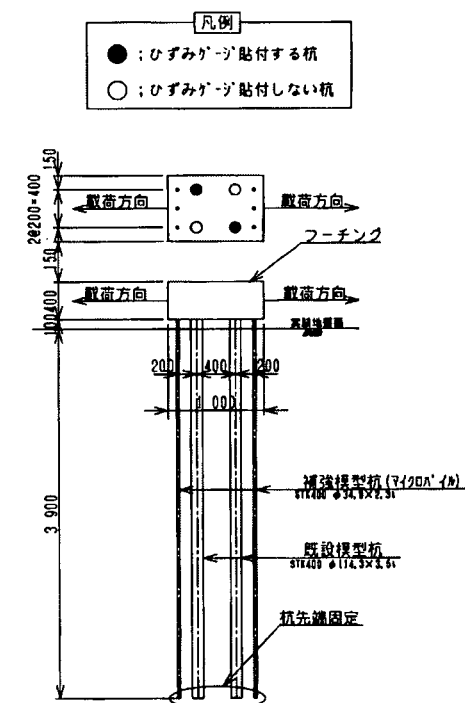


図-5.1.1 試験概要図(CASE4)

表-5.1.1 試験ケース一覧表

CASE	内 容	杭心間隔 (既設杭と補強杭)	斜杭角度	載荷方式
1	単杭(既設杭)	—	—	一方向載荷
2	単杭(補強杭)	—	—	一方向載荷
3	既設杭4本	—	—	一方向載荷
4	既設杭4本+補強杭6本(直杭)	200mm	—	交番載荷
5	既設杭4本+補強杭6本(直杭)	400mm	—	一方向載荷
6	既設杭4本+補強杭6本(斜杭)	200mm	10°	一方向載荷
7	既設杭4本+補強杭6本(斜杭)	200mm	20°	一方向載荷

ながら試験地盤を作成したが、後のサウンディング試験結果よりほぼ均一地盤であることが確認されている。載荷は多サイクル荷重制御方式とし、試験土槽上端に設置した載荷装置よりPC鋼棒を介してフーチング中央部を加力した。なお、荷重は油圧式センターホールジャッキで測定した。

(3) 実験結果

図-5.1.2に、各ケースの新規荷重時における荷重~フーチング水平変位関係を示す。荷重~変位曲線から推察すると、補強杭のないケース3に対して、ケース4~ケース6においては、補強杭による補強効果が現れている。既設杭と補強杭の間隔が違うケース4とケース5とを比較すると、杭間隔による補強効果の違いが現れている。

いは、顕著には現れていない。ケース6は、補強杭を斜杭としたケースであるが、ケース4あるいはケース5に比較して、補強杭による補強効果がさらに顕著に現れている。これは、斜杭による補強効果によるものと考えられる。しかし、ケース7においては、ケース4とほぼ同等の補強効果しか現れていない。これは、斜杭の角度が増すことによって補強効果が低減することを示すものではなく、試験においてフーチング部と杭頭部の固定が十分ではなかったために、荷重の増加に対してすべりが生じたことに起因するものと考えられる。

(4) 実験結果のシミュレーション解析

小口径杭によって既設杭基礎を耐震補強する場合、その設計には道路橋示方書に示される杭基礎の地震時保有水平耐力法を準用することが考えられる。ここでは、現行設計法に基づく計算結果と実験結果との対比により、その適用性を検討することにした。

(5) シミュレーション解析結果

解析は、地震時保有水平耐力法により規定されている補正係数をパラメータとして解析を行った。表-5.1.2に、解析に用いた補正係数の一覧を示す。また、図-5.1.3に、ケース3～ケース6の実験結果と解析結果の荷重～変位曲線を対比して示す。図-5.1.3に示すとおり、ケース3については、補正係数を適切に設定することによって、比較的精度よく

荷重～変位関係が再現されている。また、ケース4、ケース5およびケース6についても、ある程度の再現性が確認できるが、ケース3ほど近似できていない。しかし、いずれのケースにおいても、解析は実験結果を安全側に評価している。なお、実験結果と同様、解析においても、マイクロパイルと既設杭との間隔を変えたケース4とケース5との間には、大きな補強効果の違いは生じていない。現段階では、マイクロパイルと既設杭との間隔を大きくすることによる補強効果への影響は小さいものと考えられる。表-5.1.2に示すとおり、ケース3において、現行の保耐法における群杭効果を考慮した補正係数をさらに2倍することによって、実験結果とほぼ同等の荷重～変位関係を得ることができた。しかし、単杭の補正係数も2倍しており、異種異径の群杭効果については、さらに検討が必要である。

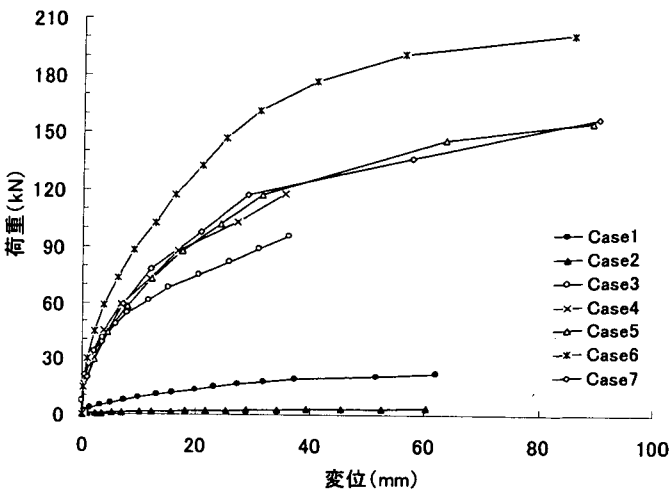


図-5.1.2 荷重～変位曲線

表-5.1.2 補正係数一覧

Case	現行基準				補正係数			
	α_k	η_k	α_p	$\eta_p \cdot \alpha_p$	α_k	η_k	α_p	$\eta_p \cdot \alpha_p$
1, 2	1.5	—	3.0	—	3.0 ($\times 2$)	—	6.0 ($\times 2$)	—
3	1.5	2/3	—	*1	3.0 ($\times 2$)	4/3 ($\times 2$)	—	*2
4, 5, 6	1.5	2/3	—	*1	3.0 ($\times 2$)	4/3 ($\times 2$)	—	*2

*1; 荷重載荷直角方向の杭の中心間隔/杭径【ただし、 $\leq \alpha_p$ 】
 *2; 荷重載荷直角方向の杭の中心間隔/杭径【上限値なし】

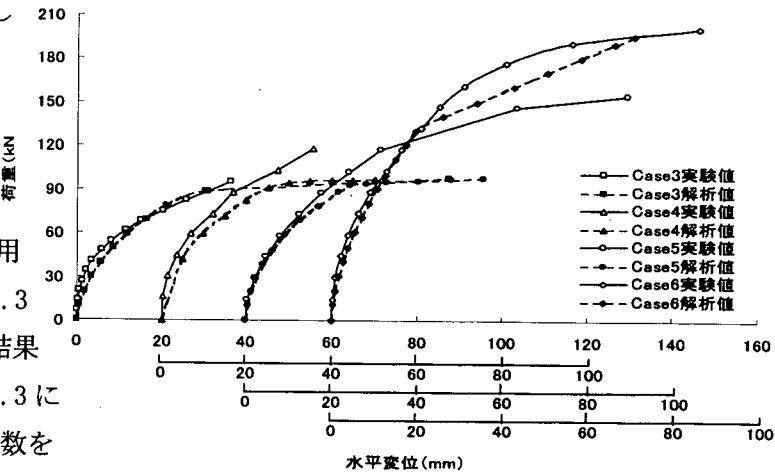


図-5.1.3 荷重～変位曲線(実験値と解析値の比較)

5.2 高耐力マイクロパイルの支持力特性に関する載荷実験

(1) 実験の目的

本実験は、高耐力マイクロパイルの支持力特性、変形特性に関する基礎的データを得ることを目的としており、鉛直および水平交番載荷試験を実施した。以下に、実験条件、実験結果について述べる。

(2) 実験条件

マイクロパイルの各諸元を表-5.2.1に示す。鋼管は低空間での施工性を確認するため、1.5m毎の両端ネジ式カップリング継手を設けている。図-5.2.1には実験位置の土質柱状図を示す。

表-5.2.1 マイクロパイルの諸元

材 料	規 格
鋼 管	油井管用縦目無鋼管 (API-N80)、外径=φ177.8mm、肉厚=12.7mm 標準部材長さ=1,500mm、降伏点強度=550N/mm ² 弾性係数=2.0×10 ⁵ N/mm ² 、両端ネジ式加工カップリング継手
異形鉄筋	ねじ形異形鋼棒 SD490 D51、弾性係数=2.0×10 ⁵ N/mm ² エポキシ樹脂充填式カップラー継手
グラウト	セメントミルク(水セメント比W/C=45%)、早強セメント・混和剤使用 設計基準強度=30N/mm ² 、弾性係数=1.35×10 ⁴ N/mm ² (実験結果)
定着部諸元	定着部有効径=200mm(剛孔径)、定着長さ=5.0m

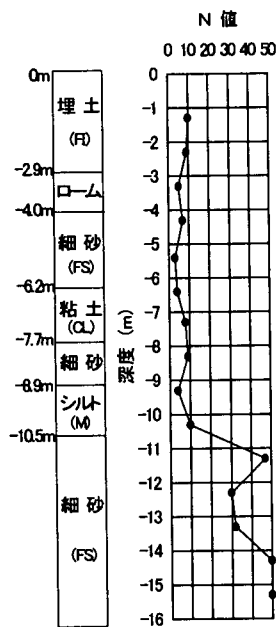


図-5.2.1 土質柱状図

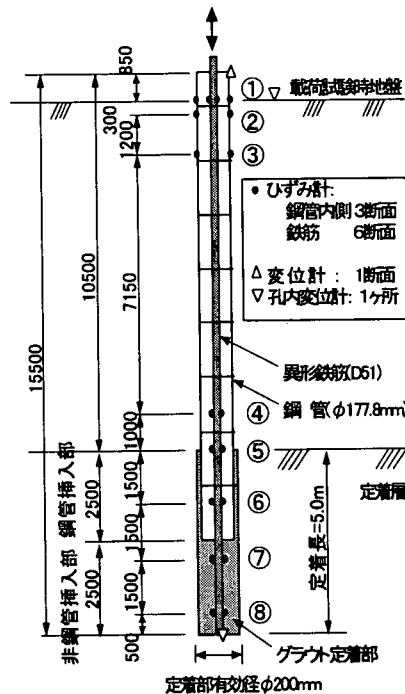


図-5.2.2 鉛直載荷時計測位置図

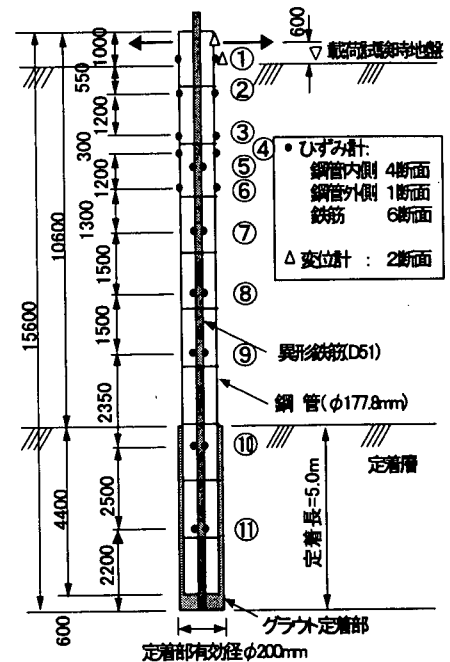


図-5.2.3 水平載荷時計測位置図

1) 鉛直交番載荷試験方法

載荷試験時の計測位置を図-5.2.2に示す。載荷方法は、荷重～変位関係における非線形領域までは押し込みと引拔きの交番載荷を行い、その後、極限状態まで単調に引抜き載荷を行った。

2) 水平交番載荷試験方法

載荷試験時の計測位置を図-5.2.3に示す。載荷方法は正負方向の交番載荷とし、最終サイクルではジャッキストロークの限界まで大変形載荷を行った。

(3) 実験結果

1) 鉛直交番載荷試験結果

図-5.2.4に、荷重～変位曲線を示す。降伏引抜支持力は900kN、極限引抜支持力は1050kNであり、概ね杭径の10%の変形量で極限状態に達した。また、降伏付近までの押し込みと引拔きの勾配は等しく、両方向の軸方向バネ定数は同程度の値であった。図-5.2.5には深度方向の軸力分布を示す。軸力は各断面の軸ひずみ値を用い、各区間で構成される鋼管、鉄筋、グラウトを全断面有効として算定を行っている。なお、引抜き時の非鋼管挿入部分(⑦～⑧)に関しては、グラウトのひずみ負担を無視し、鉄筋のみが負担すると

して算定を行った。この図からは、各荷重段階とも①～④断面の軸力変動が比較的少なく、⑤～⑧断面で急激に変化する結果となった。また、杭先端より 0.5m 上方の部分(⑧断面)には軸力が若干残るが押込み時と引抜き時のその値はほぼ同じであることが分かる。よって、マイクロパイルの支持機構は小口径であるため先端支持力はあるとしても小さな値であり、主に定着部の摩擦抵抗によって支持されることが確認できる。マイクロパイルの耐震補強工法への適用を考えると、このような小口径の杭がどのような支持力特性を有し、それが従来の杭工法とどう異なるのか把握する必要がある。今回の地盤定数を用い、従来工法による同径の極限引抜き支持力を道路橋示方書に準じて算定すると、場所打ち杭で850kN、中掘り杭で220kNとなった。今回の載荷試験ではそれらの値より大きな結果が得られていることから、マイクロパイルは小口径の杭にしては比較的高い支持力を期待できると考えられた。

2) 水平交番載荷試験結果

図-5.2.6 には水平荷重～杭頭変位の履歴曲線を示す。最終サイクルでは、最大水平荷重を正方向に 160kN 載荷し、杭頭を 355mm 変位させた。別途実施されたマイクロパイルの気中曲げ試験において、 $M \sim \phi$ 関係はバリエ型に近く、全塑性モーメントは杭体が複合部材から構成されているため、鋼管のみの全塑性モーメントより大きな値を得ている。この実験値を参考にとすると、水平荷重 150kN 時で杭体(⑤断面)がほぼ全塑性モーメントに達していることになるが、荷重～変位関係における明確な変化点や残留変位の急増点は見られなかった。今回の載荷試験では終局状態までの載荷は行えなかったものの、後述する解析結果からは、杭体が全塑性に至った後も急には耐力

が低下せず、マイクロパイルはある程度のじん性を有するものと考えられた。次に、マイクロパイルのような小口径で複合構造の杭と、道路橋の現行設計手法との整合性を確認するため、単杭の静的非線形解析を行った。ここで、地盤は完全弾塑性型とし、杭体の $M \sim \phi$ 関係は前述のマイクロパイルの気中実験結果を参考とした。図-5.2.6 の水平荷重～杭頭変位曲線には載荷試験結果に加えて解析結果を示した。ここで、解析結果 1 は各土層で実施した三軸圧縮試験および孔内水平載荷試験結果を用いて土質定数を設定したものである。また、解析結果 2 はこれらの土質試験に加え、連続的な土質データを測定することを目的として実施した、静的コーン貫入試験(CPT 試験)結果を用いて土質定数を設定したものである。地盤物性の評価方法による差はあるものの、これらの解析結果は実測値に比べて若干安全側の結果となった。このことから、マイクロパイルに関しても杭・ラーメンモデルで解析できる可能性を示すものと考えられた。

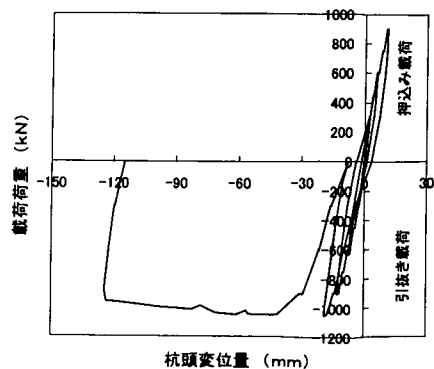


図-5.2.4 鉛直載荷試験 荷重～変位曲線

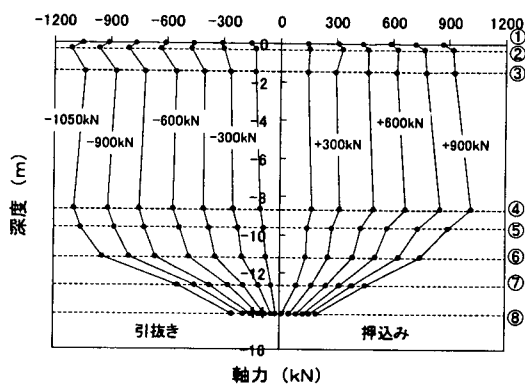


図-5.2.5 鉛直載荷試験 軸力分布図

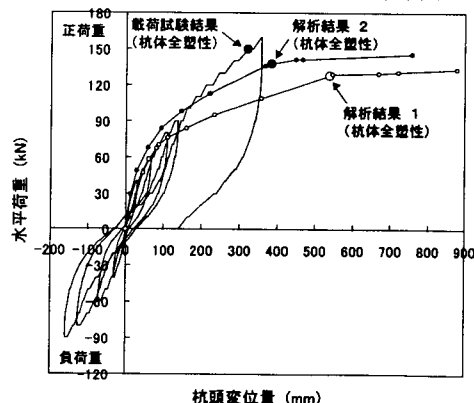


図-5.2.6 水平載荷試験 荷重～変位曲線

5.3 異種群杭基礎の振動台実験(動的共通実験)

(1) 実験の目的

既設基礎の耐震補強は、空頭制限や近接構造物等の施工上の制約条件を受けるため、従来の工法での対応が難しい場合が多くなっている。近年、狭隘な空間で施工可能なマイクロパイルが注目されているが、地震時の挙動については十分な検討が必要である。本検討では、直杭および斜杭のマイクロパイルを増し杭に用いて耐震補強した杭基礎の動的挙動および補強効果について把握することを目的として振動台実験を行った。

(2) 実験概要

振動台実験はせん断土槽を用い重力場で実施した。図-5.3.1 に実験の概要を示す。実験は図-5.3.2 に示す既設杭基礎モデル、マイクロパイルを直杭で増杭したモデル、および斜杭(15度)で増杭したモデルに対し、上部構造重量の有りと無しの状態で行った。

模型地盤は、あらかじめ基礎模型を設置したせん断土槽内に、空中落下法を用いて相対密度 $Dr=60\%$ の砂地盤を作製した。砂は、遠州浜岡砂を使用した。表-5.3.1 に浜岡砂の物性値を示す。既設杭模型には幅 30mm、厚さ 5mm のステンレス製平板を、マイクロパイル模型には幅 10mm、厚さ 2mm のステンレス製平板を用いた。既設杭基礎モデルは、4本の杭をフーチング部に剛結させ、杭先端部は土槽にピン結合した。マイクロパイルは、片側 5本ずつの計 10本とした。

入力加速度は、地盤模型の固有周期が 0.104 秒に相当するので、周波数 10Hz、最大加速度 300gal の正弦波とした。

(3) 実験結果

1) 最大加速度応答

図-5.3.3 に加速度応答を示す。図中の左側は、上部構造重量無し、右側は上部構造重量有りの結果を示す。図に示すように、せん断土槽の加速度応答は同じ値を示しており、同じ地盤条件で実験が行われていることが確認できた。橋脚躯体の加速度応答は、既設モデルと直杭補強モデルではほぼ同じ傾向を示しているのに対し、斜杭補強モデルは両モデルに比べ小さくなっている。これは、地盤の水平変位の増加に伴い斜杭の前杭が起きあがり、後杭が倒れ込む状態になるため、橋脚躯体が地盤変位と逆方向に変位する回転が生じる。そのため、応答加速度が小さくなったものと考えられる。

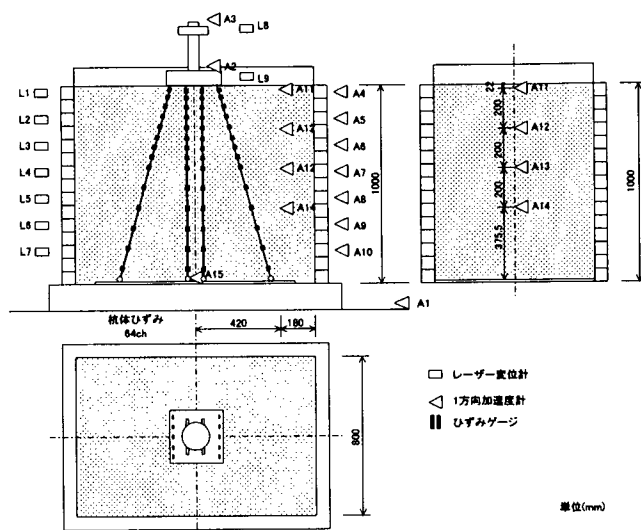


図 5-3-1 実験概要

表5-3-1 物性値

試料	浜岡砂
G_s	2.687
$D_{50}(mm)$	0.262
均等係数 U_c	2.11
e_{max}	0.881
e_{min}	0.564

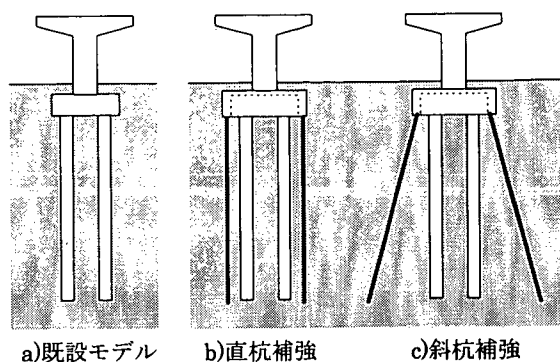


図 5-3-2 検討モデル

2) 変位分布

図-5.3.4 に既設杭の曲げモーメントが最大となる時刻の既設杭と橋脚躯体の変位を示す。既設杭の変位は、曲げモーメントの値から求めた。直杭補強モデルの橋脚躯体の変位が、既設モデルに比べ大きくなっている。これは、補強後のフーチングが大きくなり、慣性力が大きくなったためと考えられる。しかし、補強後の模型全体重量が補強前に比べ2.8倍(上部構造重量無し時)であるのに対し、杭頭での変位が1.4倍であることから、直杭の補強効果はあると考えられる。斜杭補強モデルは、前述の挙動により杭頭部や橋脚躯体の応答を抑える効果があることが確認できた。なお上部構造重量がある場合の既設モデルにおいて、橋脚天端で変位が著しく大きくなっているのは、上部構造の慣性力により生じる橋脚基部の回転モーメントに対して、既設基礎が耐えられなくなり傾いたためである。

3) 曲げモーメント分布

図-5.3.5 に既設杭の最大曲げモーメント分布を示す。補強を行なったモデルでは、上部構造重量の有無に関わらず同じ傾向を示した。既設モデルでは、上部構造重量の有時に曲げモーメントが、上部構造重量無しの時に比べ杭頭部で3.2倍大きくなっている。それに対して、直杭補強モデルでは、1.1倍であることから、直杭の補強効果はあると考えられる。上部構造重量がない直杭補強モデルの最大値が既設モデルに比べ大きくなっているのは、前述のフーチング重量増加によるためである。

4) まとめ

本振動台実験により、定性的であるが以下の効果が確認された。

- ・異種杭で補強された基礎の動的応答特性には、問題が無い事が確認された。
- ・マイクロパイルによる増し杭は、補強効果があることが確認された。
- ・斜杭による補強では、斜杭の変形性能による構造物の応答を抑える効果が確認された。

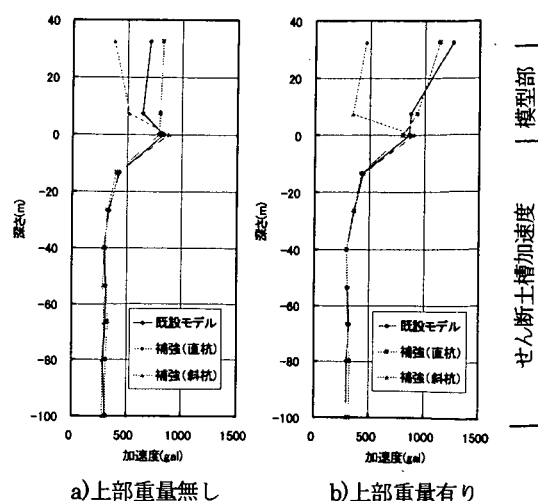


図 5-3-3 最大加速度応答

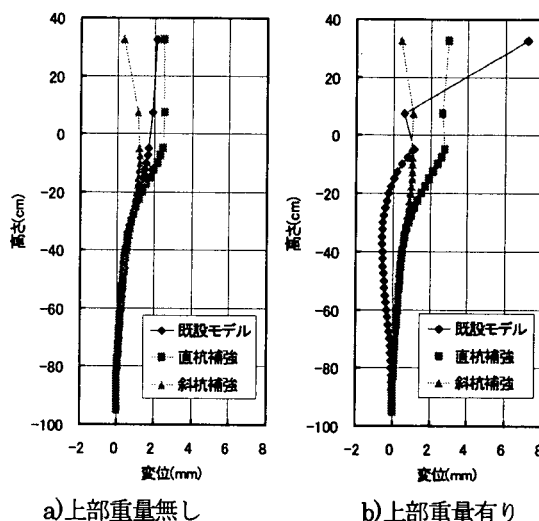


図 5-3-4 変位分布

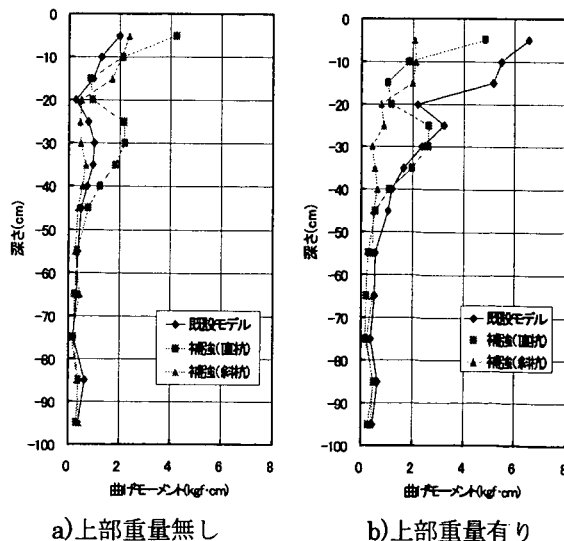


図 5-3-5 最大曲げモーメント分布

5.4 ST マイクロパイルに関する実験

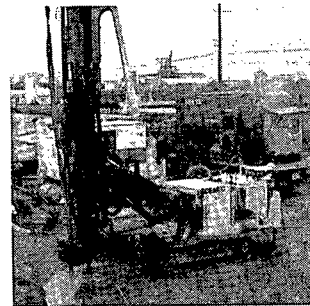
研究成果として、これまで実施した試験施工、載荷試験、室内試験を以下に示す。

(1) 試験施工

合成杭構造としての施工性、品質を確認するため、試験施工を実施し、噴射エネルギーと改良体造成径、セメント添加量と改良体強度の関係等を確認した。(図-5.4.1~5.4.2)



高圧噴射状況



高圧噴射攪拌状況

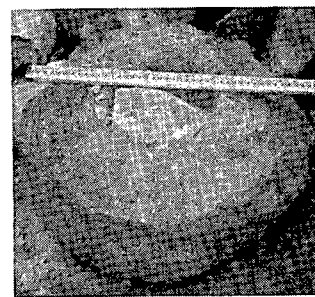
図-5.4.1 試験施工状況

(2) 鉛直載荷試験 (押し込み・引抜き)

改良体造成径 1,000mm、鋼管径 $\phi 165.2\text{mm}$ で築造した ST マイクロパイルに対し、押し込み ($L=6\text{m}$) および引抜き ($L=8\text{m}$) 載荷試験を実施し、改良体造成径を杭径として推定した極限支持力 (道示場所打ち杭を準用) 以上の軸方向支持力を有することを確認した (図-5.4.3 押し込み載荷試験結果)。また、数例の載荷試験結果から軸方向バネ定数の推定方法を検討した。



杭頭 $\phi 1,000\text{mm}$



杭先端 $\phi 900\text{mm}$

図-5.4.2 杭出来形

(3) 水平交番載荷試験

改良体造成径 1,000mm、鋼管径 $\phi 165.2\text{mm}$ で水平交番載荷試験を実施し、改良体のある範囲 ($D'=500\text{mm}$) が水平地盤抵抗を負担し、小口径鋼管に対して比較的大きな杭の水平抵抗が期待できることを確認した。(図-5.4.4~5.4.5)

(4) 材料性能試験 (継手有無での圧縮・引張・曲げ試験)

高張力鋼管の継手有り・無しでの圧縮・引張・曲げ試験を実施し、カップラー式ネジ継手が全強の継手であることを確認した。(図-5.4.6)

(5) 材料性能試験 (付着性能試験)

セメントミルク固化体に定着した節突起付き鋼の引抜き載荷試験を行い、節仕様・固化体強度と鋼管付着強度の関係を定式化した。

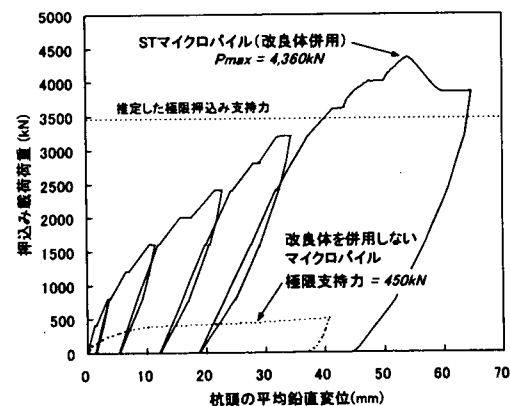


図-5.4.3 押し込み載荷試験結果

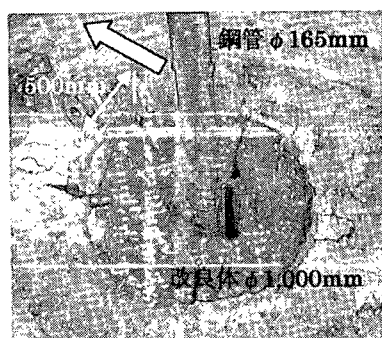


図-5.4.4 水平載荷試験杭頭状況

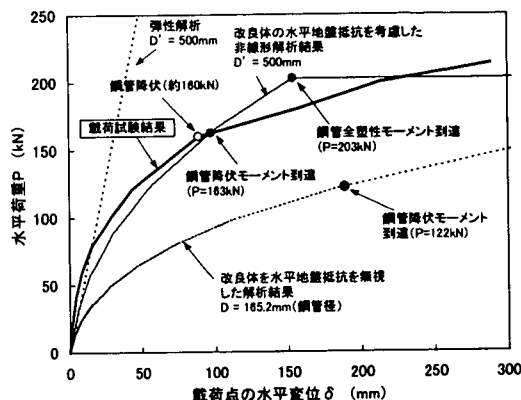


図-5.4.5 水平載荷試験結果

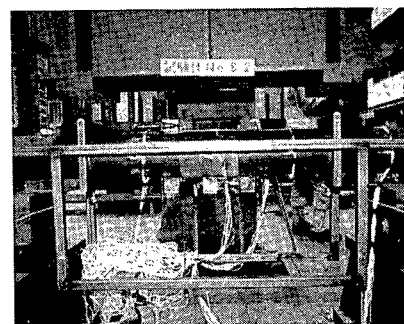


図-5.4.6 継手有り曲げ試験状況

5.5 ねじ込み式マイクロパイルに関する実験

(1) 実験の目的

載荷試験（押し込み、引抜き）を行い、ねじ込み式マイクロパイルに関する支持力特性を把握することを目的として実験を行った。

(2) 載荷試験結果

押し込みおよび引抜き載荷試験における荷重～変位関係結果から、下式に示すねじ込み式マイクロパイルの極限支持力（押し込み、引抜き）を提案した。

$$R_u = \sum q_{wi} A_{wi} + U \sum L_i f_i$$

ここで、 q_{wi} ：各翼および底板の支持力度 (kN/m²)
 A_{wi} ：各翼および底面の抵抗面積 (m²)
 U ：軸部の杭周長 (m)
 L_i ：周面摩擦力を考慮する層厚 (m)
 f_i ：各層の最大周面摩擦応力度 (kN/m²)

表-5.6.1 支持力係数

翼部の支持力係数 (kN/m ²)		
	1 翼・底板※1	2～4 翼
押し込み q_{wi}	150～200N (砂礫層)	50N
引抜き q_{wi}	70～80N	50N
軸部の支持力係数 (kN/m ²) ※2		
粘性土 f_i	15N	
砂質土 f_i	13.8+0.3N	

※1: 引抜き時は底板の抵抗面積は考慮しない

※2: 押し込み、引抜き共通

(3) 試設計結果

今回設定した支持力式を用いて試設計を行った。検討は、液状化する場合について直杭補強と斜杭補強の効果の比較を行った。図-5.5.1 に検討モデルを、図-5.5.2 に試設計結果を示す。検討結果は、直杭 (16 本) で補強が難しいのに対し、斜杭 (12 本) では基礎降伏時の想定応答塑性率 ($\mu_{FR}=3$) をクリアすることができた。この結果、斜杭による補強が特に有効であることが判った。

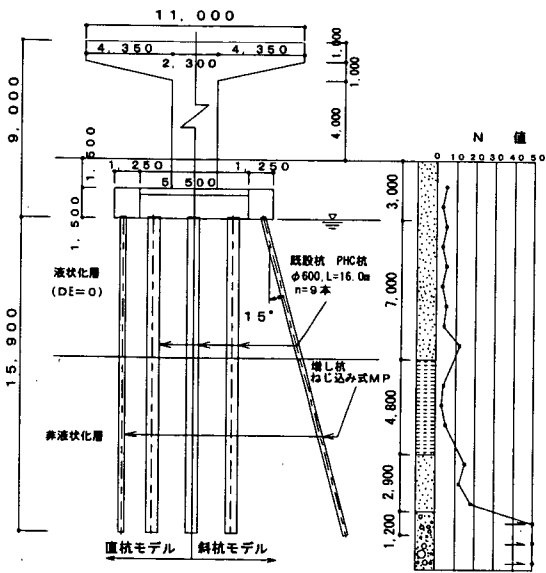


図-5.5.1 検討モデル図

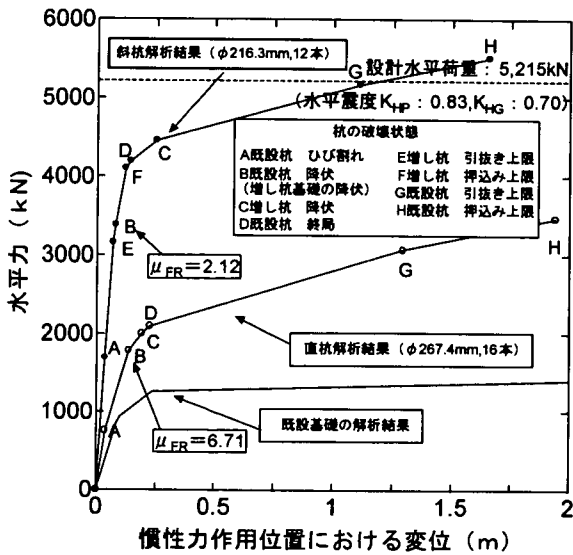


図-5.5.2 試設計結果

5.6 小径ドレーン工法に関する実験

間隙水圧消散工法による液状化対策は、ドレーン材の排水性が大きくても地震動レベルが高いときには急激に間隙水圧が上昇し、排水が間に合わず液状化に至る場合もある。しかし、上部構造物や杭基礎の被害低減に効果があることが確認できれば、合理的な液状化対策工法へつなげる可能性がある。

そこで、以下に示す各種実験を行い施工性および対策効果について検討した。

(1) ドレーン打設実験

小径ドレーンは、打撃機（インパクトモール）による地盤への直打設であるため、ドレーン材に極端な曲がりや折れが発生する可能性がある。そこで、N値が5～10程度の飽和砂地盤において小径ドレーン打設実験を行った。その結果、本工法はドレーン長20mを打設速度1m/minで施工可能であり、ドレーン出来形は打設長、鉛直性とも良好であることが確認された。

また、写真-5.6.1に示すように通常の小型ボーリングマシン（打撃方式、圧入方式、振動方式）を用いても同様な施工が可能であることを確認した。

(2) フーチング削孔方法に関する実験

構造物直下に小径ドレーン工法を適用する場合、フーチング下面鉄筋を損傷させないことが重要となる。そこで、 $\phi 50$ 、 $\phi 100$ のコアカッターを用いた二重削孔方法を考案し、その有用性について要素実験を行った（図-5.6.1参照）。実験結果より、二重削孔方法はフーチング下面鉄筋位置が不明確な場合においても、鉄筋を損傷させることなく削孔できることがわかった。

(3) 対策効果に関する振動台実験

模型振動台実験は、原位置での透水性を模型で再現するためメチルセルローズ水溶液を用いて行い、①小径ドレーンの排水性能、②ドレーン設置間隔の影響、③杭基礎の水平変位抑制効果について検討した（写真-5.6.2参照）。振動台実験の結果、図-5.6.2に示すように小径ドレーンの排水効果は比較的大きな入力加速度においても認められ、杭周辺地盤は水平抵抗を保持し液状化被害軽減に有効であることがわかった。

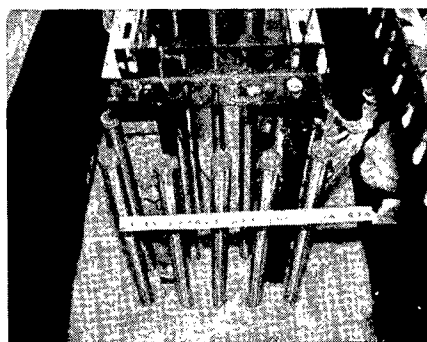


写真-5.6.2 杭基礎周辺へのドレーン設置状況



写真-5.6.1 小型ボーリングマシンによる施工状況

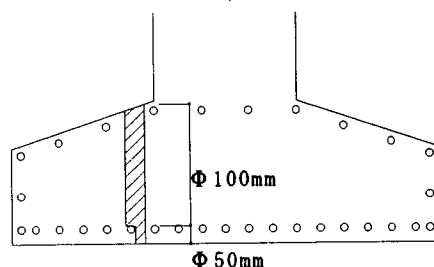


図-5.6.1 二重削孔方法（下面鉄筋位置が不明な場合）

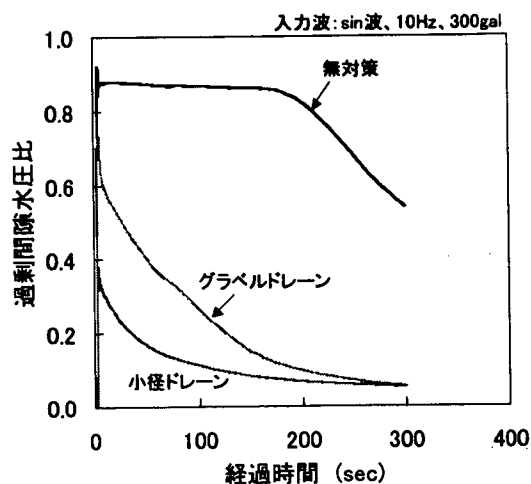


図-5.6.2 小径ドレーンの排水性能比較

5.7 SSP 工法に関する実験

SSP 工法に関して、これまでに施工性の実証実験、作動試験・耐圧試験、曲げ耐力試験を行った。以下にそれらの実験の概要および成果を示す。

(1) 施工性の実証実験

実証実験は当工法の施工性を実証することを目的として、実施工と同様の施工条件・手順で実施した。補強鋼板先端部は開とし、高圧ウォータージェットとエアリフトを併用し、補強鋼板を深さ-8.65mまで圧入した。



写真-5.7.1 実証実験状況

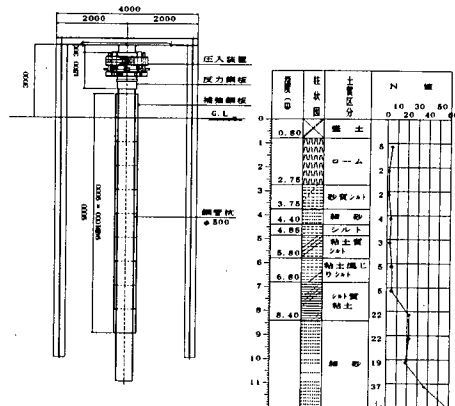


図-5.7.1 概要図

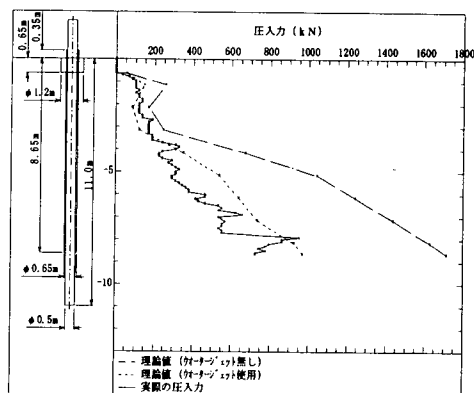


図-5.7.2 圧入結果

(2) 作動試験・耐圧試験

作動試験では圧入装置の作動状況、安全性を確認し、耐圧試験では既設杭（鋼管）と圧入装置にひずみ計を取り付け、ジャッキ加圧時（最大圧入力981kN）の杭および圧入装置に働く応力の測定、変形、亀裂の有無等の確認をした(写真-5.7.2, 5.7.3 参照)。

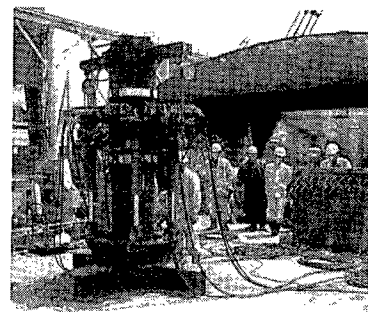
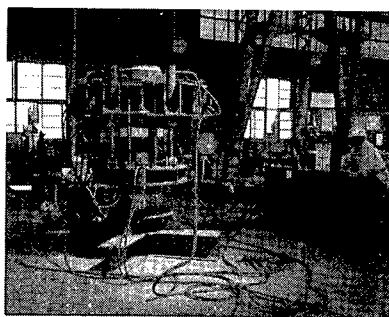


写真-5.7.2 試験状況 (1号機) 写真-5.7.3 試験状況 (2号機)

(3) 曲げ耐力試験

2重鋼管とモルタルの複合構造で補強された杭の挙動や降伏耐力、終局耐力等、力学的特性を解明することを目的とし、 $P_u=3000\text{kN}$ を最大とする多サイクル荷重方式で曲げ試験を実施した(写真-5.7.4 参照)。その結果、図-5.7.3に示すように補強後の耐力は3倍以上向上していることが確認でき、耐震補強に優れた構造であることが判った。



写真-5.7.4 曲げ耐力試験状況

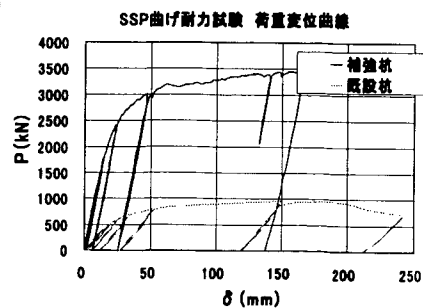


図-5.7.3 荷重-変位曲線

5.8 試験施工例(差海橋の施工例)

島根県の国道9号に架かる橋脚基礎の耐震補強工事に、高耐力マイクロパイル（以下、HMP と略）が採用された。現場は島根県簸川郡湖陵町で、同町の神西湖から日本海側へ流れる差海川に架る差海大橋の耐震補強工事である。図-5.8.1 に現場位置図を、図-5.8.2 に側面図を示す。差海橋は、有効幅員 8.0m、橋長 40.6m、支間長 3@13.5m で昭和 39 年に竣工された橋である。橋脚はパイルベント方式で、 $\phi 400\text{mm}$ の鋼管杭が 9 本用いられており、今回の補強工事では、出雲側の P1 橋脚において実施した。

現場の地盤は、G.L-20m 近くまでは、N 値 20~30 程度の細砂層が存在するが、G.L-20m 以深では N 値 8 程度の粘土層が約 10m 続いている。G.L-30m 以深では、N 値 50 以上の泥岩層が確認された。ボーリング調査の結果から、HMP の定着層は、確実な支持力が期待できる泥岩層 e とした。

補強後の杭に作用する荷重については、下記に示す仮定の基に、補強杭の本数等を検討する。

- ① 常時の上部の死荷重は、既設鋼管杭で負担する。
- ② その他の荷重（フーチング、橋脚等の増加分）については HMP で負担する。
- ③ 地震時は、既設鋼管杭と HMP の両方で負担する。

検討の結果、P1 橋脚の補強には、杭長 $L=33.5\text{m}$ （削孔長 $L=36.6\text{m}$ ）の HMP を 10 本用いることとした。工事に用いた HMP の仕様を表-5.8.1 に示す。

施工現場は、空頭高さが 4.0m と低く、施工場所も狭いので、施工機械にはクローラータイプのボーリングマシンを使用した。削孔は、定着層が軟岩（泥岩）であることにより二重管ロータリーパーカッション方式を採用した（写真-5.8.1 参照）。別途行われた載荷試験により、本現場における HMP の極限支持力は、1650kN/本が確認されている。

以上、本工事の実績により、空頭高さが 4.0m で、最短施工幅が 2.5m、といった狭隘な施工現場においても、HMP の施工が可能であることが確認され、HMP 工法が厳しい施工条件下においても、適用可能であることが実証された。

表-5.8.1 材料の仕様

鋼 管	高強度鋼管(油井管API規格5CT N-80)
	外径177.8mm 肉厚12.7mm
	両端ネジ加工 標準部材長さ1.5m
	カップリング継手 外径194.5mm
芯鉄筋	ねじ筋異形棒鋼 SD490 D51
	カップラー継手
グラウト	セメントミルク W/C=50%
	設計基準強度 $30\text{N}/\text{mm}^2$

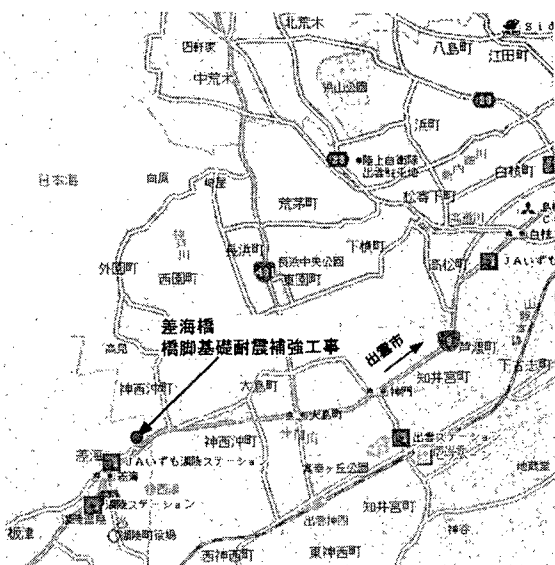


図-5.8.1 現場位置概略図

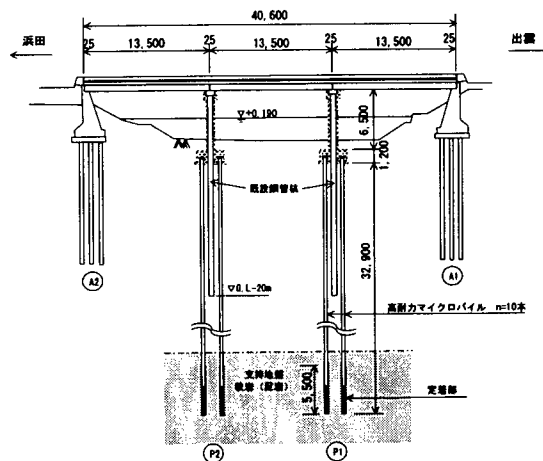


図-5.8.2 側面図



写真-5.8.1 施工状況

6. 設計・施工マニュアルの骨子

本共同研究においては、既設基礎の耐震補強技術として「3. 研究対象の新工法の概要」で紹介された5工法の研究・開発が進められており、各々の工法WGで設計・施工マニュアルを作成している。

一方、既設基礎の耐震補強を検討するにあたっては、『耐震補強の考え方』すなわち『補強の定義』について整理する必要がある、本共同研究においても、共通項目として検討している(以下、共通検討項目と称す)。ここで取扱う共通検討項目は、各工法のマニュアルの根幹を成す項目であり、また、『既設基礎の耐震補強』を検討する上では、5工法のみならず、全ての工法の参考に成り得ると思われる。

以下に、具体的な共通検討項目を示す。

①設計上の共通検討項目

・補強基礎の設計照査(補強基礎の降伏の定義、塑性率の制限値に関する考え方)・斜杭の取り扱い(斜杭の補強効果の確認、角度、杭配置)・杭間隔、群杭効果の低減について・設計手法の検討(動的解析による設計照査)・液状化地盤における検討・杭頭処理

②施工上の共通検討項目

・斜杭の施工性の確認(角度および施工誤差)・杭頭処理方法の検討・簡便な載荷試験方法の開発
これらの共通検討項目を受け、各々の工法WGにおいて、その工法の特徴を考慮して設計・施工マニュアルを作成している。マニュアルの全体構成については、研究成果と共通検討項目について記した「共通編(仮称)」と各々の工法の設計・施工マニュアルの分冊とする予定である。表-6.1にマニュアルの全体構成表を示す。

表-6.1 設計・施工マニュアルの全体構成(案)

項 目	検 討 事 項	具 体 案
構成・様式	構成(1+5分冊)	共通編+各工法編(5工法)
	様式の決定	「枠組+解説方式」形式、「文章」形式
共通編	タイトル	『既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究成果報告書』 ー研究成果および共通マニュアル(〇分冊の1)ー
	構成・目次	研究の背景・経緯・目的(マニュアルの位置づけ)
		適用範囲
		用語・記号の解説
		工法紹介一覧(各工法の特徴と適用範囲)
		工法選定表(選定項目の決定)
		補強基礎の考え方(共通検討WGの成果)
		静的模型実験結果
		振動台模型実験結果
		液状化対策工法
各工法編	タイトル(サブタイトルのみ変更)	ー〇〇工法設計・施工マニュアルー(〇分冊の2)
	目次の整合性	増し杭の3工法が討議・検討、2工法もそれを参照。

【参考文献】

- 1) 建設省土木研究所他；既設基礎の耐震補強技術に関する共同研究報告書（その1）、平成12年8月
- 2) 独立行政法人土木研究所他；既設基礎の耐震補強技術に関する共同研究報告書（その2）、作成中
(平成13年12月)
- 3) 梅原他；既設基礎の耐震補強に関する検討（その1）、第5回耐震補強・補修技術、耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集
- 4) 岸下他；既設基礎の耐震補強に関する検討（その4）、第24回日本道路会議論文集
- 5) 三木他；既設基礎の耐震補強に関する検討（その6）、第24回日本道路会議論文集
- 6) 橋立他；既設基礎の耐震補強に関する検討（その7）、第24回日本道路会議論文集
- 7) 角田他；既設基礎の耐震補強に関する検討（その8）、第24回日本道路会議論文集
- 8) 星野他；既設基礎の耐震補強に関する検討（その9）、第24回日本道路会議論文集

[一般講演]

新しい水質事故対策技術

水循環研究グループ上席研究員（水質） 田中 宏明

目 次

1. はじめに	39
2. 河川での水質事故と対策	39
2. 1 事故原因と発生件数	39
2. 2 水質事故対策の概要	39
2. 3 事故発生前の情報収集と整理の新技术	41
2. 4 事故時の緊急調査の新技术	41
2. 5 新たな事故検出技術	43
2. 6 新しい対策工法	45
2. 7 事後調査	45
3. 下水道分野での水質事故対策	46
3. 1 下水道での水質事故への取り組みの必要性	46
3. 2 下水道での地理情報システムの利用	47
3. 3 下水道での水質事故検出システム	47
3. 4 下水道での化学物質の挙動予測システム	47
4. おわりに	48
参考文献	48

新しい水質事故対策技術

水循環研究グループ 上席研究員(水質) 田中 宏明

1. はじめに

平成9年度に改正された河川法では、「河川環境の整備と保全」が目的に明記され、河川管理に、治水、利水、環境を含めた調和のとれた河川の総合的管理が求められるようになった。このような背景から、河川水質の保全は、河川の適正な利用および流水の正常な機能の維持、ならびに河川環境のために重要な事項であり、そのためには、正常時の水質管理とともに異常時の水質管理についても適切に対応する必要がある。

河川における水質事故は人為的に発生する異常水質と定義されるもので、事業所等における機械故障や操作ミス、廃棄物の不法投棄等に起因する油類や化学物質の流出によって発生する。水質事故はその規模や原因物質によっては、取水停止や生態系の破壊等、社会活動や自然環境への重大な影響を及ぼす場合もあるため、その対策は河川管理上の重要な課題となっている。一級河川で発生した水質事故は、年々増加の傾向を示しており、中には長期に渡って水道取水の停止を伴う重大な被害が発生している場合がある。

このような背景から独立行政法人土木研究所は、国土交通省河川環境課、各地方整備局と構成する国土交通省水質連絡会において、水質事故対策技術に関して平成9年度から11年度まで共同研究を行った。この共同研究の成果は、平成13年9月に「水質事故対策技術2001年版」としてとりまとめられ、突発的で緊急を要する水質事故発生時に、迅速な対策・対応を行うことで被害を最小限に食い止めるための技術資料として発刊された。本稿では、「水質事故対策技術2001年版」で取り扱っている河川での水質事故対策に活用が期待される新しい技術を中心に紹介するとともに、河川だけでなく下水道も水質事故に対する危機管理が重要となりつつあるため、独立行政法人土木研究所が研究開発している下水道での水質事故対策技術についても述べることとする。

2. 河川での水質事故と対策

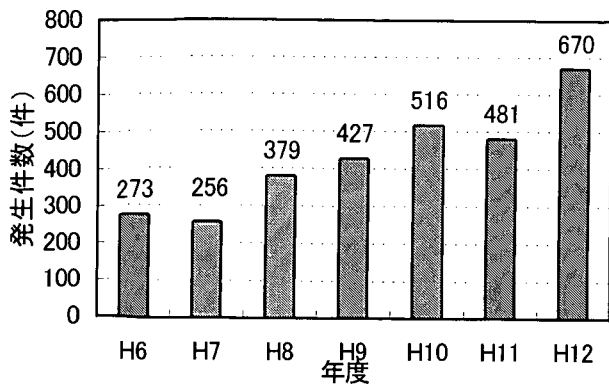
2. 1 事故原因と発生件数

一級河川での水質事故の件数は、図-1に示すように年々増加する傾向にあり、平成12年度には670件と1日当たり約2件もの水質事故が発生していることになる。これは、事故そのものが増加している他に、最近水質事故への取り組みが強化され、水質事故として把握、報告される件数が増加していることも考えられる。

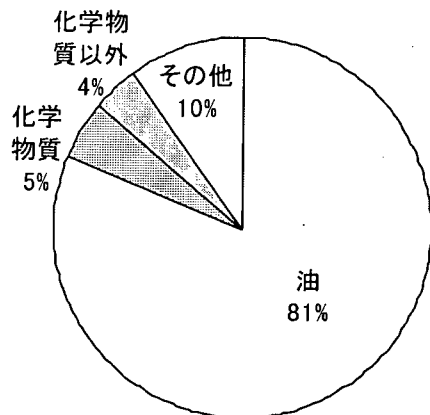
一級河川における水質事故の原因物質を平成7～11年度の情報としてとりまとめると、図-2に示すように、油類が81%と圧倒的に多く、ついで化学物質が5%、油や化学物質以外が4%、その他が10%となっている。水質事故の発生原因は、原因不明が42%と最も多く、ついで工場等の操作ミスが29%となっているが、交通事故や不法投棄など予期せぬ場所から事故発生する場合もある。

2. 2 水質事故対策の概要

河川管理者が実施する水質事故対策を時系列的にとらえると、水質事故発生前、水質事故時、水質



図－1 一級河川での水質事故発生件数の推移



図－2 水質事故の原因物質
(平成7～11年度)

表－1 水質事故対策の概要

段階	対策大分類	対策小分類
水質事故発生前	体制の整備	受信体制の整備
		情報連絡体制の整備
		調査用資機材の準備
		分析機関、採水機関リストの作成
		水質自動監視装置のデータ管理
		水質事故対応のための流域情報の整理
	対策準備	対策資機材の準備
		流量－流下時間関連図の作成
		水質事故支援システムの作成
		水質事故対策訓練
水質事故時	情報連絡の実施	情報連絡の実施
	水質調査の実施	調査地点と水質項目の選定
		水質自動監視装置の測定データ確認
		原因物質および発生源特定調査
		影響範囲の把握
		水質影響予測の実施
		調査・対策終了の判断
	対策の実施	原因別対策選定
		対策の実施
		現場における安全管理
水質事故後	環境影響調査	事故後の環境影響調査
	費用把握	費用把握
		費用負担の整理
	対策の評価	対策の評価
		情報伝達システムの評価
	その他	事故報告書の作成
		記録の保管

事故後に大別される。これらをまとめると表－1のようになる。河川管理者の基本姿勢は、河川環境などへの影響を最小限にすることであり、そのため少なくとも水質調査は必ず実施すべきである。水質事故は、河川管理者以外に関係者が多岐に渡っている。したがって、どの機関が、どういう立場で、何をすべきかについて、水質汚濁防止協議会等において、あらかじめ十分な協議・調整を行い、各機関の役割分担を決めておくことが必要である。

水質事故が発生した場合、関係各機関は、あらかじめ決められた防災業務計画等に従って、速やかに水質事故に対応できる体制を取る必要がある。また、事故の重要性によっては、河川管理者は、水質汚濁防止連絡協議会としての対策本部を設置し、情報の一元化を図るとともに、各機関相互の資機材融通等の調整に当たるなど、各機関が迅速に対応するための司令塔の役割を果たす必要がある。

このため、水質事故発生の前であっても、体制の整備、対策の準備、情報連絡の実施が行えるようにしておくことが必要である。また、水質事故時には、水質調査の実施とともに対策を実施することが必要な場合がある。採用する対策技術は、事故の発生場所や原因物質等によって異なるが、原因物質が高濃度で存在し、比較的対策の容易な発生源に近いところで講じることが原則であり、そのため、

汚染の拡大をいかに早い段階でくい止めるかが重要なポイントとなる。水質事故後についても、環境影響調査や費用把握、対策の評価を行い、今後の対策改善につなげることが重要である。

2. 3 事故発生前の情報収集と整理の新技術

河川管理者が事故対策として平時から実施する事前準備としては、事故発生時の情報連絡体制の整備、調査・対策用資機材の準備保管、関連流域情報の収集整理といったことが挙げられる。水質事故に素早く対応するためには、対象河川（対象流域）に関して、河川情報（河川の流況や施設の位置情報・構造に関する情報）、流域情報（流域内に関する用排水路、化学物質を取り扱う事業場、採水・分析機関などの情報）、事故原因となる化学物質の特性情報、その他情報（水質事故履歴）などの水質事故対応基礎情報を収集・整理し、事故時に役立つリストやマップを事前に作成しておくことが重要である。特に化学物質を取り扱う事業場に関する情報は、従来は関連都道府県や市町村の消防防災部局、環境保全部局、保健所、農林部局などから入手することが基本となっていた。平成13年度から施行されたいわゆるP R T R法（特定化学物質の環境への排出量の把握及び管理の改善の促進に関する法律）では、年間1 t以上を扱う従業員21人以上の事業場は、354もの有害性をもつ化学物質について使用排出状況を、都道府県知事を通じて国に届け出ることになっている。個々の事業場の情報についても原則として開示請求できることから、極めて有効な情報の活用が可能となる。また、有害性のある化学物質情報の収集に関しても、同法によるMSDS（科学物質安全データシート）の利用や、インターネット検索といった新たなツールの活用による大量の情報の迅速な収集が可能となった。

むしろ問題は、収集した多量な情報をいかに有効に、また迅速に活用できるかにかかっているといえよう。このようなデータベース化に関しては、近年急速に開発・発展が進んでいるIT分野等の技術の活用が有効である。「水質事故対策技術2001年版」でその例として紹介しているように、さまざまな水質事故対応支援システムが開発されつつある。例えば関東地方整備局では、図-3のようなインターネットを利用した情報の共有化、電子メールによる情報発信、GIS（地理情報システム）との組み合わせによる事故発生箇所の把握や特定事業所の位置検索、事故対策資機材の配置等の関連情報の検索、水質調査機関の検索などが可能となっている。こうした支援システムの活用によって事故発生時の対策の即応性が高まることが期待される。また、河川流況や河川構造、事故対象物質の物性などを考慮した、流下予測や被害範囲の予測モデルとを組み合わせることも試みられている。

ただ、現状では、様々なITシステム間の規格が必ずしも統合化されておらず、また基盤情報の定期的な更新も必要であることに留意すべきである。

2. 4 事故時の緊急調査の新技術

水質事故の通報があった場合、河川管理者は異常の確認と現地状況の把握・監視を行わなければならない。水質事故緊急調査は、発生している

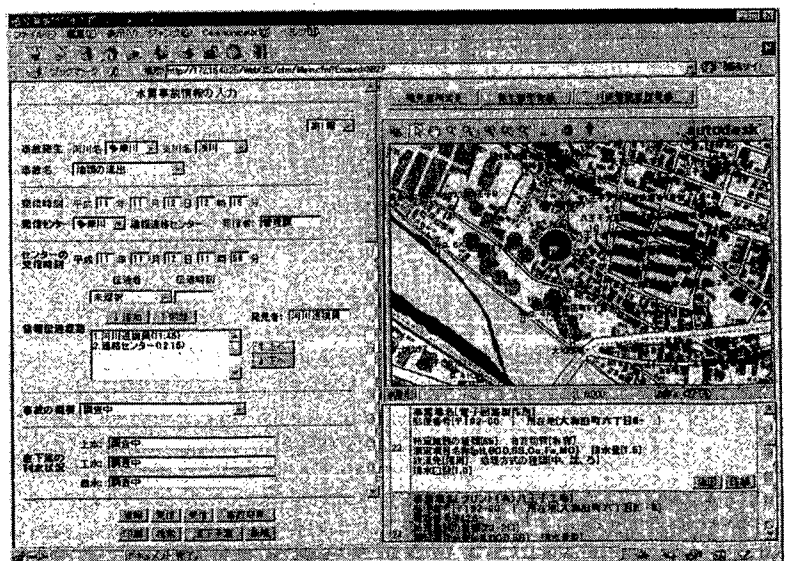


図-3 水質事故対応支援システム画面

異常を確認し、原因となった物質や発生源、影響範囲を特定するために実施するものである。緊急性を伴う水質事故対応においては、原因が不明な場合には、原因物質の特定を迅速かつ正確に行うことが重要である。このためには、水質試験を行うことで原因を追求することが原則である。

現地で使用可能な簡易測定方法として、試験紙、パック方式、センサー方式、分光光度計を利用する方式などが開発されてきており、試験可能な項目も増えてきている。しかし、簡易試験方法では原因物質の絞り込みができない場合には、最近水質分析への利用が汎用化してきている多項目同時分析可能な精密機器を用いたスクリーニングを行うことが必要となる。特に、重金属などは誘導結合プラズマ（ICP）法や誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）法によって、また有機物質についてはガスクロマトグラフ質量分析（GC-MS）法では、元素や物質のライブラリー検索が可能となり強力なツールとなる。GC-MSの中には、現場で使用可能な携帯型も開発されている。さらに最近注目されているのが、簡易試験法ではあるが高感度かつ高い識別能を持つと考えられる酵素免疫法（EIA）である。これは、抗原抗体反応を利用した方法で有害性のある物質を識別するもので、農薬などで既に製品化されているほか、土木研究所においてもダイオキシン類やノニルフェノール類などの物質を対象に共同研究を行っている。

事故発生後の現地調査として、斃死魚の観察による死因の判定ができると原因物質の絞り込みの参考となる。「水質事故対策技術2001年版」では、いくつかの有害物質によってどのような死後状況となるかを具体的に斃死魚の症状の参考写真等を含めて掲載している。また、魚の筋肉のATP（アデノシン三リン酸）が尿酸まで分解していく過程の中間代謝物を変化を測定し、鮮度を推定する方法が確立しているが、これを死後の経過時間の推定法として活用できるかも検討した。このような法医学的な手法は今後さらに研究開発が進むと思われる。

有害であることが判明したり疑問視される物質の数は、新たに作られる物質数の増加、分析技術の発達と社会的な関心の高まりによって増加の一途を辿っている。このため、全ての有害物質を網羅的に測定することは実質的に不可能であり、また水質分析による同定を待って対策を講じるのでは、被害の回避が時間的にできなくなる可能性がある。また、単一の物質の毒性は高くない物質でも、他の物質との複合的な影響により生物に重大な影響を及ぼすような場合には、水質分析による方法だけでは事故の原因が究明できないことも考えられる。

こうした欠点を補うためには、水質情報を生物を介した毒性情報として変換する、生物検定試験、いわゆるバイオアッセイによる毒性評価手法が有効と考えられる。バイオアッセイはもともと単一の化学物質に対する評価系からスタートしており、汚濁物質を含んだ環境水の毒性への利用は開発途上にある。土木研究所等においても河川や下水を対象に各種バイオアッセイによる簡易毒性試験の研究を行っており、海洋性発光細菌等の微生物による毒性試験方法（図-4）の他、緑藻の増殖状況により毒性を評価する藻類増殖阻害試験、ミジンコの運動性の変化から水質を評価するミジンコ遊泳阻害試験、試験用の魚を用いた毒性試験等、水生生態系を構成する代表的な単一生物が河川水の毒性評価にも利用可能である。

これら各種バイオアッセイは、用いる生物種による感受性、試験に用いる生物の培養あるいは入

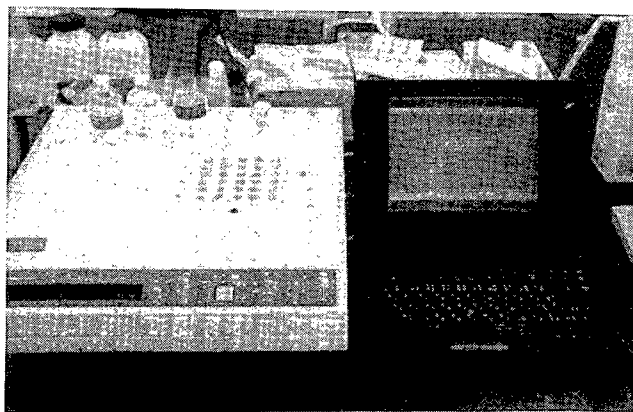


図-4 発光細菌を用いた毒性試験装置

手性、試験にかかる時間や経験などの操作性などを考慮して選定する必要がある。水質事故対策では、緊急調査を短時間でまた場合によっては現場で試験を行うことが必要であるため、「水質事故対策技術 2001年版」では、発光性細菌と小型魚類を用いた簡易毒性試験を取り上げた。これらの簡易毒性試験は、魚浮上・斃死といった事故の原因が、毒性物質によるものであるか、渇水・出水や藻類の異常繁殖等による水中の酸素濃度低下によるものか、といった判定に用いることができる。さらに、化学的な方法でも原因物質が特定できない場合、バイオアッセイと毒物絞り込み試験を組み合わせることで、どのような対策をとれば、毒性は下げることが可能かという情報を得ることができる可能性がある。具体的には、例えば発光細菌を用いた試験とバッキ、EDTAの添加、チオ硫酸ナトリウムの添加、活性炭の添加などを試験水の対して処理する場合、もしどれかの処理を行って毒性に低下が見られる場合、原因は物質は分からないけれども有効な対策がとれるヒントとなる。また同時に、もし、バッキ、EDTAの添加、チオ硫酸ナトリウムの添加、活性炭の添加のそれぞれで毒性が減少した場合、可能性がある物質として、それぞれ揮発性物質（あるいは酸素欠乏）、重金属系、酸化剤系、疎水性有機物系出ることが想定できる。米国ではこのような方法が排水規制での毒性評価として実施されており、毒性物質の同定とともに毒性削減の推定技術として実際に広く利用されている。

2. 5 新たな事故検出技術

水温、溶存酸素、電気伝導率、pH、濁度といった水質項目を測定している水質自動監視装置を事故調査に活用することはこれまでも行われてきた。河川の通常値から監視データの異常が起こっているか否かを判定して、異常水質を検出することが考えられるが、現実にはこのような指標の極端な変化が生じる前に被害が出たり、農薬の汚染のように汚染そのものを直接検出できる機構になっていないなどの課題があった。このため、新しい検出技術の開発が待たれていたわけであるが、ここでは前述した生物に対する毒性を自動検出するモニターと、もっとも発生頻度が多い油による事故を速やかに検出するモニターについて紹介したい。

土木研究所と民間企業の共同研究により開発された技術である毒物センサーは、低濃度の毒物によっても呼吸が阻害されやすい硝化細菌を利用した、河川水での実用化が図られた我が国最初のバイオセンサーである。センサー部（図-5）の構造は、硝化細菌を2枚のメンブレン膜で挟み込んで固定化した微生物膜と溶存酸素を検出するDO電極からなっている。通常、アンモニア性窒素を含む試料をセンサー部に流し続けておくと、生物膜内ではアンモニアによって水中の溶存酸素を消費するため、DO電極は酸素消費がほぼ100%起きているレベルを示す。もし毒物が試料中に含まれると、硝化細菌の酸素消費速度が低下するため、DO電極は酸素消費量が小さな値を示す。この変化を自動的

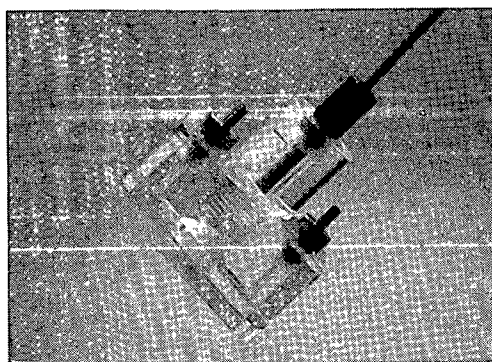


図-5 毒物センサー

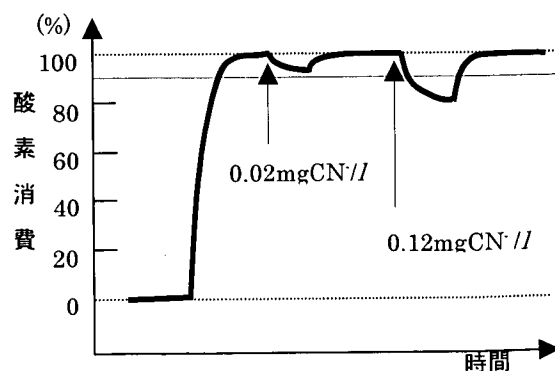


図-6 毒物センサーのシアンへの応答

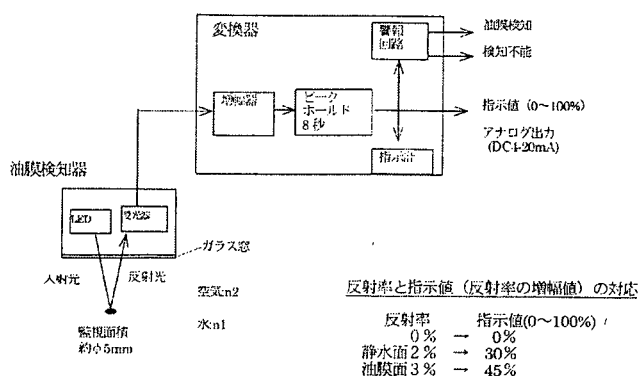


図-7 反射率測定方式油分センサーの原理

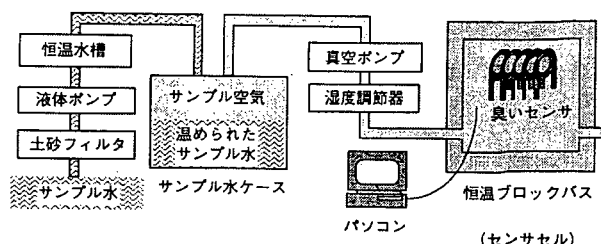


図-8 臭い検知方式システム構成

に読みとり異常を検出するというものである。図-6は、試料水中に添加したシアン酸イオンに対する毒物センサーの応答を示したものである。硝化細菌を用いたこの方式の毒物センサーは既に、国内でも浄水分野や河川モニター等で40件以上の導入実績を有している技術である。水道原水では従来、魚を監視して水質異常をとらえていたものであるが、このセンサーはわずか数分の検出時間で、魚類の24時から48時間の致死濃度に相当する多くの化学物質をとらえることができる。

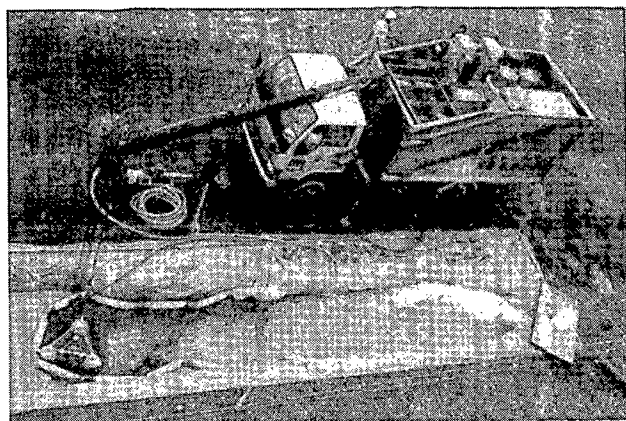
毒物センサーの他にも、魚類や甲殻類など水生生物の行動を画像処理や電極などでモニタリングする様々な生物モニターも開発されており、今後、毒性の自動検出技術として我が国においてもより積極的に用いられることが期待される。

油分についてはこれまでの複数の方式が検討され、開発されてきたが、河川のような水面に乱れがあると実用化は困難であった。そこで、土木研究所と民間との共同研究で、油が水より反射率が大きい性質を利用した反射率測定方式(図-7)は、一定強度の光を水面に照射し、その反射光の強度を測定し、水と油での反射光の強度差によって油膜を検知する技術である。これまでと違って、河川の水面付近で計測が行えるように工夫した結果、ごくわずかな油膜でも検出が可能で、また風などによる水面の乱れに対しても利用が可能であるとのフィールド実験の実績が得られている。

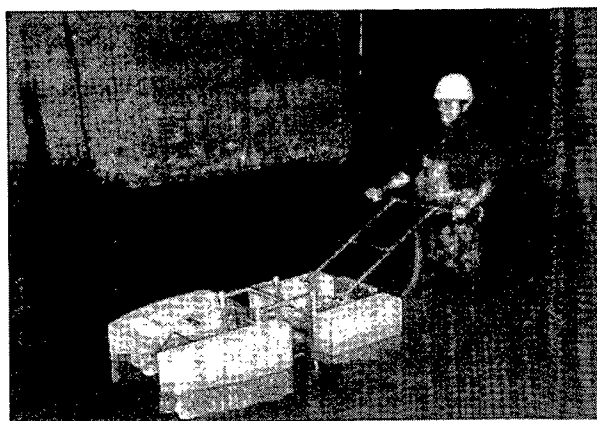
臭い検知方式(図-8)の油分センサーでは、有機薄膜を被覆した水晶振動子に揮発性の高い臭気物質が吸着し、振動子の質量が増加することによって共振周波数が変化する性質を利用し、共振周波数の変化を測定することによって、油膜を検知する技術である。臭い検知方式は一定条件下での油膜検知が可能のほか、油以外の臭気物質の検出にも適用できる可能性が注目されているが、土木研究所と民間との共同研究では実機の開発までには至っていない。

反射率測定方式や臭い検知方式の他にも、ブイ等に設置した電極に油が付着することによる導電率の変化を測定し油分を検出する導電率測定方式や、水面に照射したレーザーの反射光の縦横の振動成分の比率である偏光比が水と油で異なることに着目し、偏光比を測定することで油分を検出する偏光解析方式といった油分センサー技術についても開発が進められている。

こうした油分自動監視システムには検出原理の違いによる特徴があり、導入にあたっては設置場所における流速等の水理条件、風速等の気象条件、ゴミ等の環境条件などを把握したうえで、適切な箇所に適切なシステムを導入することが必要である。また、設置個所に関しては、流域の利水状況や排水状況を勘案し、事故発生後の被害の軽減、油の流出・拡散の抑制が期待できる地点を選定して設置することが重要である。



図－９ 油回収装置（関東技術事務所）



図－１０ 油回収装置（東北技術事務所）

２．６ 新しい対策工法

水質事故を引き起こす原因物質の種類によって、有効な対策工法は様々である。河川管理者は、調査によって判明した事故原因物質の影響を最小限にとどめるために、汚染物質の流下・拡散の防止、水塊からの回収、処理処分、無害化及び希釈やフラッシュといった対応を取ることが求められる。これらの対策工法は、汚染物質の特性により油対策とその他の物質対策に大別することができる。

油による水質事故にはオイルフェンス等による拡散防止、回収又は分散化、回収物の処分といった対策がとられる。油対策に関しては、これまでも様々な資機材が開発利用されている。河川幅の大きな場合、オイルフェンスの展張を、ペットボトルロケットやロッド（竿）で展張させる工夫が考えられる。人でのかかる油の回収の効率化に関しては、関東技術事務所（図－９）や東北技術事務所（図－１０）は、油回収装置などを開発した。また、吸着剤には、化繊系、半化繊系、天然系、活性炭系など様々な材質のものがあるが、それぞれの孔径や吸着量に違いがあること、さらに一旦吸着された油分の保持機能にも違いがあることから、使用時の材質の選定と適正な利用方法に心がける必要がある。さらに、ゲル化剤や油処理剤は、使用による二次的な生態系への被害を与えることのないよう細心の注意が必要である。もちろんこれらの機材によって回収した油分は、産業廃棄物として適正に処分する必要がある。

その他の物質対策として、汚濁物質が広範囲に拡散する前に汚染水の回収が可能な場合には、ドラム缶等を反応容器として汚染水をポンプアップし、汚染物質に対応した処理を行うことが一般的である。酸・アルカリの流出事故の場合にはpHを6～8の範囲に収まるように中和処理を、農薬流出事故では粒状活性炭による吸着処理法を、重金属流出事故の場合にはまた薬品沈殿法が採られる。シアン化合物の流出事故に関しては、苛性ソーダと次亜塩素酸ソーダを用いる従来のアルカリ塩素処理に加え、オゾンによる処理も有効であると考えられるが、二次的な環境影響等については今後の検討がさらに必要であろう。

２．７ 事後調査

河川管理者や事故原因者による水質事故対策が終了した後も、事故の規模や被害状況によっては環境影響調査が必要となる場合がある。事後調査は水質・底質の汚染調査と、魚類・底生生物の汚染調査が主体となる。水質・底質に関しては、河川水、地下水、底質について事故原因物質や原因物質とともに流出したと考えられる物質について実施し、必要に応じて環境基準項目や飲料水の水質基準項

目についても実施することが望ましい。

魚類・底生生物の調査が必要な場合には、事故による汚染水域と対照となる非汚染水域について生息種や現存量を調査を実施し、事故による影響の有無を判定する。また、汚染物質の種類によっては水生生物への蓄積が考えられるため、必要に応じて汚染水域と対照となる非汚染水域の生物相について事故原因物質の蓄積量の比較調査を行う。

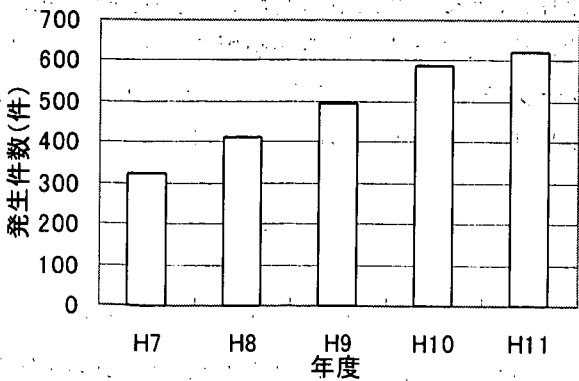
3. 下水道分野での水質事故対策

3. 1 下水道での水質事故への取り組みの必要性

河川での水質事故の発生の他に、事業場から誤って酸が下水道に流れ込み、下水処理場の活性汚泥を壊滅させるなど下水道でも同様な被害が起こっていることが次第に明らかになってきた(図一11)。事業場等で事故が発生し、異常な水質の下水が下水道に排除された場合でも、現行制度では、当該事業業者に下水道管理者への通知義務がないため、下水道管理者は事故の発生すら把握することができず、適切な対応を講ずることが出来ないことがある。このような場合、事業者と下水道管理者が適切かつ迅速な対策を実施できる措置を講ずる必要があることが平成12年12月都市計画中央審議会下水道小委員会から提言された。毒性の強い化学物質や爆発を伴う危険物が、誤って、あるいは意図的に、下水管渠に投入された場合の下水道での体系だった水質事故対策の立案と技術開発も必要となっている。

すでに水質汚濁防止法に基づいた有害物質については、下水道管理者への届け出、報告、立ち入り検査などで、下水道区域内の事業場での使用実態を捕まえられているはずであるが、未規制物質についてはほとんど捕らえられていないのが現状と思われる。今後、PRTRの施行に伴い、情報の公開されるので、下水道管理者としても積極的な化学物質のリスクの把握が行える機会がある。

下水処理を支えているのは微生物群である。土木研究所では、下水に含まれる可能性のある様々な化学物質が生物処理にどのような影響を及ぼすのか過去から研究してきた。下水処理過程では、BODのような有機物を好氣的に分解、酸化する細菌群の他に、アンモニアあるいは亜硝酸のような無機物を好氣的に酸化する細菌群、つまり硝化細菌がいる。BODを分解する細菌群に比べ、硝化細菌群は化学物質の影響を極めて受けやすいことが分かってきた。表一2は、土木研究所がこれまで行ってきた、活性汚泥や硝化細菌の化学物質に対する影響阻害試験の結果の例である。EC50とは、細菌の活動を50%抑制する化学物質の濃度であり、値が小さいほど毒性が強いことを示している。フェノー



図一11 流域下水管渠や処理場への悪質排水流入事例数

表一2 BODに係わる活性汚泥と硝化細菌との化学物質に対する感受性の相違 (EC50, mg/L)

化合物名	バイオッセイによる評価	
	活性汚泥 BOD ₅	硝化細菌 NO ₂ ⁻ -N 1day
Cu	6.2	0.15
2-クロロフェノール	1000	0.11
3-クロロフェノール	270	0.047
4-クロロフェノール	1300	0.0094
2,3-ジクロロフェノール	68	0.054
2,4-ジクロロフェノール	40	0.15
2-クロロアニリン	210	1.31

ル類として規制している化学物質にクロロフェノールがあるが、活性汚泥でBOD除去に影響が見られるのは、数十～数千 ppm のオーダーであり、下水道が事業場排水の受け入れ規制を行っている 1ppm でBODの除去には問題が起こることはないと考えられる。一方、活性汚泥の一部である硝化細菌は、同じクロロフェノールに対して数～数百 ppb でも硝化に大きな影響を受けることが分かる。BODの除去に対する影響に比べ、硝化への影響は、実に1万倍以上も敏感に現れる場合がある。

今後、第5次総量規制では新たに窒素・リンの削減が求められ、また内湾などを対象とした流総計画に基づいて環境基準達成に高度処理が定められ、実際に現場への導入段階である。このような下水処理場では生物学的窒素除去が必要となるので、第一段階である硝化プロセスに阻害が起こると窒素除去が十分に行えない恐れが生ずる。したがって、下水処理へ影響を及ぼすという視点から、下水道でも水質事故対策が必要になる。下水道へ流入してきた化学物質を下水処理場で水質事故時用の処理系を予め備えておき、オンラインモニターで異常を検知したときにはこの処理系に一旦ため込んだ後、無害化处理、あるいは回収、処分する冗長性を持つことも対策として考えられる。

3. 2 下水道での地理情報システムの利用

前述したように有害物質や危険物を取り扱っている事業場をGISをベースにマッピングし、有害物質が河川で検出した場合にその上流側のどこにその物質を取り扱う事業場が存在するのか、また、下流側へはいつどの地点に流れ出るのか等の情報を短時間で検索推定できる流域の情報システムが作られ始めている。下水道でもGISシステムの構築に際してこのような情報システムが取り込まれる様に配慮することが必要となる。また、水質事故時の発生源の探索と早期検出、雨水系を含めた下水道での技術的、計画的対応方法の確立が、今後重要となると考えられる。

特に、事業場からの未規制物質の排出については、河川と同様にPRTTR制度による下水道への排出情報を活用することが重要であろう。これらのデータベースの活用に当たってもGISシステムとの連携は有効である。

3. 3 下水道での水質事故検出システム

前述した河川で開発された水質の異常を検出するオンラインモニタリングシステムの下水道施設への導入も、異常水質発生の抑止力や対策に有効である。既に土木研究所では、前述した硝化細菌を固定化した毒物検出用バイオセンサ、さらに油分の流出を検出する油分センサの他に、下水中に含まれるガスクロマトグラフを用いた揮発性有機物(VOC)の連続測定装置の開発を行っている。このような下水用のモニタリングシステムの開発も今後活発に行われていくことが期待される。

3. 4 下水道での化学物質の挙動予測システム

BODやCOD、窒素、リンなど一部の物質を除いて、下水道へ流入した化学物質が下水処理でどのような運命をたどるかは、これまでほとんど明らかにされてこなかった。ようやく、環境ホルモンやVOCなどの調査により、挙動が少しずつ明らかにされ始めたに過ぎない。例えば、溶媒などのVOCはどのように除去されているのであろうか。下水に排出されたVOCは最終的に下水処理場に流入し、下水処理場では、反応槽で多量の空気が送り込まれているので、効率よく水から除去される。しかし、水から除去されたVOCは排ガス中に移行し、脱臭装置を経て、大気環境へ出ていく。このことは地方公共団体と土木研究所の共同研究からも分かっている。さらに、土木研究所が活性汚泥実験装置を用いて行ったVOCの収支実験の結果、物質の性格と運転方法によって、VOCの種類により、その運

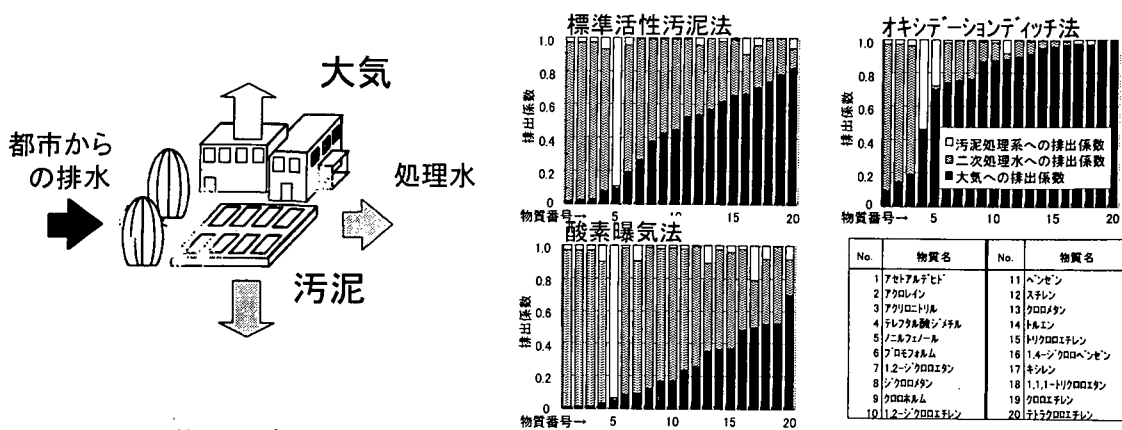


図-12 数値モデルを用いて推定したVOCなどの化学物質の大気、処理水、汚泥への移行割合の下水処理方法による違い
注) 生分解はないと仮定した場合の排出係数の違い

運命が大きく異なることがわかってきた。

ー12は、ベンゼン、ジクロロメタン、トルエン、キシレンといった大気汚染で問題となっている化学物質が下水処理施設に流入した場合、どの程度、処理水、大気、汚泥へ移行するかをパーセントで表したものである。このように化学物質を環境管理するためには、単に水の系でどれだけ取れるのかという視点では不十分で、分解したのか、大気へ移行したのか、あるいは汚泥へ移行したのかという理解が必要である。水質事故時には、下水処理場の放流水だけでなく、排ガスや処理処分される汚泥にどの程度残っているのかを把握していくことも場合によっては必要となる。

4. おわりに

本稿は、独立行政法人土木研究所および国土交通省水質連絡会の研究成果による河川での新しい水質事故対策技術を主に紹介し、今後下水道でも重要となる水質事故対策技術の開発状況も述べたものである。「水質事故対策技術2001年版」が技報堂出版より出ている。河川における水質事故対策技術の詳細やここで触れた以外にも多様な内容が述べられているほか、具体的な水質事故事例が30に渡ってまとめられているので参考にしていきたい。

最後に、「水質事故対策技術2001年版」をとりまとめに協力いただいた関係者、及び本稿をまとめるに協力いただいた水循環研究グループ水質チームのメンバーに感謝したい。

参考文献

- 田中 良春、田中 宏明：硝化細菌を用いたバイオセンサによるバイオアッセイ技術の開発、用水と排水、40,4, pp.306-309、1998.4.
- 松原 正明、原田 新、南山 瑞彦、田中 宏明：緑藻及び発光細菌を用いた下水処理水の生物に対する影響評価、下水道研究発表会講演集、第35回、pp.239-241、1998.7.
- 原田 新、松原 正明、南山 瑞彦、石井 信之、田中 宏明：カエル胚を用いた下水処理水の生物に対する影響評価、下水道研究発表会講演集、第35回、pp.242-244、1998.7.
- 豊田 忠宏、松原 正明、小森 行也、田中 宏明：硝化細菌*Nitrosomonas europaea*を用いたバイオアッセイ、下水道研究発表会講演集、第35回、pp.245-247、1998.7.

小森 行也、田中 宏明、南山 瑞彦、竹歳 健治：活性汚泥処理における有機塩素化合物（2-クロロフェノール）の硝化阻害、下水道研究発表会講演集、下水道協会、第35回、pp.792-794、1998.7.

H.Tanaka,M.Minamiyama,T.Toyoda,K.Komori,Y.Tanaka,K.Taguti:Development of a toxicity Monitor using nitrifying bacteria,WEFTEC '98, Water Environment Federation, Vol.4, pp.165-180,1998.10.

小森 行也、田中 宏明、竹歳 健治：GCを用いた下水中のVOCモニタリング、第7回環境システム計測制御（EICA）研究発表会、Vol.3,No.1、pp.139-144、1998.10.

松原 正明、原田 真一郎、南山 瑞彦、田中 宏明：水生生物を用いた各種のバイオアッセイの下水試料に対する感受性の比較、環境工学研究論文集、Vol.35、pp.305-312、1998.12.

磯部 健介、岡安 祐司、小森 行也、田中 宏明：硝化細菌*Nitrosomonas europaea*を用いたバイオアッセイに関する研究、日本水環境学会年会講演集、第33回、pp.75、1999.3.

小森 行也、田中 宏明、竹歳 健治：有機物の生物化学的酸化に及ぼす有機塩素化合物（クロロフェノール類）の影響、日本水環境学会年会講演集、第33回、pp.381、1999.3.

磯部 健介、岡安 祐司、小森 行也、田中 宏明：硝化細菌*Nitrosomonas europaea*を用いたバイオアッセイ、下水道研究発表会講演集、第36回、pp.1038-1040、1999.6.

岡安 祐司、田中 宏明、田中 良春、磯部 健介、豊田 忠宏：硝化細菌を用いた毒物モニタによる河川水質モニタリング、土木学会第54回年次学術講演会、第54回、第7部pp.108-109、1999.9.

小川 茂樹、杉本 岩雄、中村 雅之、加藤 忠、田中 宏明、白崎 亮：水晶振動子式ニオイセンサによる水の異常臭検出、化学センサシステム研究会資料pp.23-28、1999.9.

岡安 祐司、田中 宏明、乾 貴誌、田中 良春：硝化菌を用いた毒物センサの下水道施設への適用、日本水環境学会年会講演集、第34回、pp.76、2000.3.

磯部 健介、岡安 祐司、小森 行也、田中 宏明：有機塩素化合物の硝化菌に対する影響、日本水環境学会講演集、第34回、pp.421、2000.3.

前田恒明、奥田泰資、小森行也、田中 宏明：ポータブルヘッドスペースGC/MSを用いた排水分析の迅速化、Separation Sciences 2000 講演要旨集、pp.77-78、2000.6.

前田恒明、市岡耕二、熊沢亜紀、小森行也、田中 宏明：下水中の排水基準項目（揮発性）連続自動分析装置の試作、Separation Sciences 2000 講演要旨集、pp.119-120、2000.6.

岡安祐司、田中 宏明、乾 貴誌、田中良春：硝化細菌を用いた毒物センサの下水道施設への適用、下水道研究発表会講演集、37、pp.1011-1013、2000.7.

齋藤美加、柴田省三、小森行也、田中 宏明：下水中の揮発性有機化合物のオンラインモニタリングシステムの開発、第37回下水道研究発表会講演集、pp.996-998、2000.7.

磯部健介、岡安祐司、小森行也、田中 宏明：硝化細菌 *Nitrosomonas europaea* に対する有機塩素化合物の影響、第37回下水道研究発表会講演集、pp.1008-1010、2000.7.

建設省下水道部：都市計画審議会基本政策部会下水道小委員会説明資料、2000.8.

田中 宏明、白崎亮、原直樹、圓佛伊知朗：油膜検知装置の実河川における評価、環境システム計測制御学会(EICA)誌、Vol.5 No.1、pp.163-166、2000.9.

小森行也、白崎亮、岡安祐司、田中 宏明：水環境における水質計測、学会誌EICA、Vol.5 No.1、pp.129-134、2000.9.

柴田省三、齋藤美加、小森行也、田中 宏明：ガスクロマトグラフによる下水中の揮発性有機化合物の連続モニタリング装置、学会誌EICA、Vol.5 No.1、pp.143-148、2000.9.

前田恒明、市岡耕二、熊沢亜紀、小森行也、田中 宏明：下水中の揮発性有機化合物の連続自動分析装置の試作、工業用水、第505号、pp.49-54、2000.10.

岡安祐司、小森行也、竹歳健治、田中 宏明：ベンチスケール活性汚泥処理実験装置と数理モデルを用いた揮発性物質の挙動の把握、環境工学研究論文集、37、pp.299-310、2000.11.

石井宏幸、田中宏明、白崎亮、横田敏宏：油類による水質事故の早期検出システム、土木技術資料、43,2,pp.28-33,2001.2.

岡安祐司、小森行也、田中 宏明：硝化細菌バイオアッセイによる水中有機有害物の検出、日本水環境学会年会講演集、pp.35、2001.3.

小森行也、岡安祐司、竹歳健治、山口司、田中 宏明：活性汚泥処理性能に及ぼす化学物質の影響評価、第35回水環境学会、2001.3.

田中 宏明：バイオアッセイの下水道への利用、化学物質の環境管理のリスク管理とバイオアッセイ講演会講演集、バイオアッセイ研究会、2001.4.

田中 宏明：下水道と化学物質のリスク対策、下水道協会誌、日本下水道協会、38、463、pp.16-20、2001.5.

田中 宏明：化学物質のリスク管理の強化が期待される下水道事業、水道公論、日本水道新聞、pp.7、2001.7.

乾貴誌・田中良春・岡安祐司・田中 宏明：硝化細菌を用いた毒物センサの下水道施設への適用試験、下水道研究発表会講演集、(社)日本下水道協会、38、pp.924-926、2001.7.

岡安祐司・小森行也・竹歳健治・田中 宏明：数理モデルを用いたP R T R指定化学物質の活性汚泥処理における挙動の推定、下水道研究発表会講演集、(社)日本下水道協会、38、pp.163-165、2001.7.

国土交通省水質連絡会編：水質事故対策技術2001年版、技報堂出版、2001.9.

Y. Okayasu, H. Tanaka, K. Komori, K. Taketoshi: Behavior of Volatile Organic Compounds in Activated Sludge Process Evaluated by Bench-scale Experiment and Mathematic Model, Proceedings of the 1st IWA Asia-Pacific Regional Conference, International Water Association, 1, pp.893-898, 2001.9.

Y. Tanaka, K. Taguchi, Y. Okayasu, H. Tanaka: A New Biomonitoring System with Biosenor Using Nitrifying Bacteria for Rivers, Preprints of IWA 2nd World Water Congress, International Water Association, pp.262, 2001.10.

Y. Goda, M. Hirobe, A. Kobayashi, S. Fujimoto, M. Ike, M. Fujita, Y. Okayasu, K. Komori, H. Tanaka: Development of the ELISA for Detection Hormones in Environment, Preprints of IWA 2nd World Water Congress, International Water Association, pp.269, 2001.9.

岡安祐司・小森行也・竹歳健治・田中 宏明：P R T R対象物質の下水処理での挙動推定、土木技術資料、財団法人 土木研究センター、pp.43-9, pp.46-51, 2001.9.

小森行也、田中 宏明、三縄義和、滝野草平、前田恒昭：非接触サンプリング・ユニバーサルモニタリングシステムによる流入下水の連続監視手法の開発と応用、環境システム計測制御学会誌、E I C A環境システム計測制御学会、Vol.6, No.1, pp.27-30, 2001.11.

柴田省三、齋藤美加、小森行也、田中 宏明：ガスクロマトグラフによる揮発性有機化合物の連続測定装置の開発、環境システム計測制御学会誌、E I C A環境システム計測制御学会、Vol.6, No.1, pp.31-36, 2001.11.

Y. Okayasu, K. Komori, H. Tanaka: Estimation of Behavior of Chemical Substances in Activated Sludge Process by the PWRI Mathematical Model, Proceedings of 9th International Conference on the Conservation and Management of Lakes 9th International Conference on the Conservation and Management of Lakes, c/o Shiga Prefectural Government, 3-1, pp.233-236, 2001.11.

[一般講演]

国際水管理に向けた技術開発の課題

水工研究グループ上席研究員（水理水文） 吉谷 純一

目 次

1. はじめに	51
2. 国際化の意義	51
2. 1 一般的必要性	51
2. 2 技術基準と適用範囲	52
3. 国際水管理に向けた技術の体系化	53
4. 水循環系健全化計画策定のビジネスモデル	56
5. 水循環モデルの体系化	57
6. 地上水文データの乏しい流域の流量予測	59
参考文献	60

1914

1914

1914

1914

国際水管理に向けた技術開発の課題

水工研究グループ 上席研究員（水理水文） 吉谷純一

1. はじめに

大量の物資や情報が世界を行き来するようになった現在、水分野においても日本は、自国のことだけを考えて発展することはもはやできなくなったと言える。国際的な枠組みを念頭においた技術開発のためには、自国で発達してきた技術を世界の中で再度位置付けることが必要で、それによる技術の適用範囲が拡大するだけでなく、より多様な市場での適用性向上を通して、自国の技術向上を期待することができる。

本稿では、世界の中で体系化すべき日本の水管理技術の例として、水循環系再生計画の枠組みと意思決定支援の解析技術、世界水アセスメント計画での指標及び地上水文データの乏しい流域での予測技術について、その技術現況と課題を解説する。

2. 国際化の意義

2. 1 一般的必要性

国際活動は、従来、「国際貢献」という漠然とした目的で行われてきたように思われる。気象のような地球規模で強く関連する現象について、国際的に取り組むのは当然であるが、河川流域で管理する水を、なぜ国際的に取り組む必要があるのかは、私自身、明確に理解することができなかった。実際、国際的に研究を進める実務者が、国際貢献を、あたかも納税のような義務としか意識しない例もよく目にしてきたし、私自身もそのように漠然と思っていた。しかし、世界や日本の現在置かれている状況を考えると、日本国の将来のために国際化は避けて通れない。最初にこのことについて議論したい。

海外において水問題が深刻化するとされている原因は、人口爆発と気候変動である（玉井、2001）。2003年3月、京都・滋賀・大阪を結んで開催される第3回世界水フォーラムのパンフレットでは、日本は大量の水を使ってつくられる農作物をはじめ、工業製品、木材等の多くを世界中の国々から輸入しているので、世界の水問題は日本にも深い関わりがあると述べている。大豆、小麦、大麦、とうもろこしだけで日本の輸入量相当を生産するのに、年間約50億 m^3 の水量が必要で、これは日本の総人口の約1/3の生活用水量に匹敵するとしている。日本が間接的に海外の水を利用する限り、海外での水問題は日本に影響を及ぼすと思われる。

また、ダム建設に反対する報道機関やグループ等は、米国開拓局元長官の「ダムの時代は終わった」発言や米国での堰撤去事例、オランダのハーリングフリート堰半開放の事例などを引用し、論陣を張ることが多い。ダム終結発言は、開拓局がダム建設から水マネジメントへとミッションを変更しつつある中でなされた、極めて政治的な発言であることや、開拓局がダム建設を完全に終結したのではないことは、日本でも多くの専門誌で報告されている。また、堰開放は単に生態系のためだけでなくEUの農業政策や有害物質を吸着した底泥の浚渫費用が大幅に不要になること等、多様な代替案から費用便益を中心とした総合的な判断をしているのに、これらは一般の人に認知されるに至っていない。その理由のひとつは、反論が受身に終始し、弁解に見えてしまうからであろう。国内の水管理者も、このような報道機関やグループのような世界的なネットワークを持ち、情報発信を先んじて行っていれば、一般の人に認識は違っていたかもしれない。しかし、米国においても建設事例がある、社会条件

が異なるといった情報を収集するだけでは、このような一部の報道機関と同じように場当たりの対応に終わる可能性が高いと思われる。浅野（2001）は、“アメリカでは…、先進事例に学ぶべきだ…という発想ではなく、日本が直面しているダム問題を自分の頭で「考える水資源」として捉え、地震国日本、米作文化、氾濫原で文明生活を送るリスク認識・管理を基とした独自の国家水資源計画の再構築”を提案し、これを Think Locally, Act Locally とシンボリックに提唱している。

地域的に考え、行動すべき水管理において国際化する、真の意味での必要性は、もう既に国際化が当然となっているビジネス界での発言からヒントを得ることができる。例として、中国家電メーカーの CEO のインタビュー内容をビジネス誌（日経ビジネス、2001）から以下に抜粋する。

李東生、TCL 集団総裁（売上高 25 億ドルを超える中国の家電メーカー）

「私たちはこれから成長していかなければならない。そのためには海外企業との連携が不可欠です。連携を通じて、私たちの至らない部分を補完できます。反面、日本企業もさらに大きな市場を求めているでしょうから、中国市場をともに開拓することで新たな収益機会を得られるのではないかと思います」

若干の補足を加えながら、この家電メーカーを日本国に置き換え、日本が国際化しなければならない理由を以下のように説明できる。

日本は、国内及び海外市場において、独自の技術を武器として、さらに成長しなければなりません。そのためには、海外との連携が不可欠です。連携を通じて、日本の至らない部分を補完でき、海外のみならず日本国内でも技術力が高めることができます。反面、海外も日本市場を開拓することで新たな収益機会を得られるのではないかと思います。

即ち、成長を続けるために海外との連携により技術を補完し、それを海外での市場のみならず、日本国内にもフィードバックできるこの構図は、双方に利益をもたらすと言える。将来像を自らの頭で考える能力を高めるためには、利害関係者の間で、ありとあらゆるシナリオを想定し、その利害やリスクをシミュレーションに基づき議論し、判断・実行する能力を高める必要があり、そのために国際化が有効であり、それが自国の利益になり、海外の利益にもなると考えるべきではないだろうか。この構図が、水管理についても本当に当てはまるかについて、さらに以下で考えたい。

2. 2 技術基準と適用範囲

日本での河川流量観測は、水文観測業務規程及び同細則、河川砂防技術基準(案)、及び、具体の観測方法を記述した実質的なマニュアルである「水文観測」（建設省水文研究会編）に従い、行われてきた。これらの基準は、他国との比較を考慮せずに、国内で独自に発展してきた。国内で流量観測を行うには、これで何ら問題は生じないが、海外で日本の基準が通用する保証は一切ない。他国でも独自の基準を作っているのが、特に問題は生じないであろうと当初考えていたが、後に国際標準化機構（ISO）に、開水路の流量測定（TC113）の項目として面積流速法（SC1）があることを知った。例えば、ISO 4369:1979（修正協議中）・Measurement of liquid flow in open channels – Moving boat method（ボートによる流量観測）では、断面区分数を最低 25 としているが、日本の基準では 10 区

分である。最悪の場合を想定すると、日本の観測方法は ISO に照らして精度の劣る方法であり、海外の調査では認められないと言われかねない。さらには、日本の基準自体が世界的に不合理と言われるかもしれない。

水文観測は、各国が独自の基準を設けているので、市場から締め出されるようなことが起こるとは考えにくい。海外諸国に派遣されている専門家からは、筆者は次のような同様の懸念を聞いている。

当国の、治水計画、河川構造物に関する技術基準は日本の基準を手本にして作られていますが、政府関係者から International なのかと聞かれています。なぜなら、道路や住宅に関する基準は、アメリカの基準を基に、多様で国際的な資金とコンサルタントによる計画・設計によって事業が進められているので、International 基準で仕事をしているという安心感があるのに対し、河川に関してはそれがいないため、一種の不安感があるからです。

これに対して、「アジアモンスーン地帯という非常な多雨の気候条件、及びある程度氾濫を許容しながら水を利用し、稲作するという共通の社会条件では、日本の基準を基にすることが適している。」と、漠然とした一般的な回答しかできないのが現状である。

この技術（基準）の適用範囲は、水文・水資源学的にも確立されているとは言えない。水文・水資源学はこれまで、温暖・半湿润気候で、かつなだらかな大陸的地形を持つ、ヨーロッパや北米を中心に発展してきた。しかし、アジア地域は、気候的にはアジアモンスーンによる多雨／湿润地帯を含み、地文的にはプレートテクトニクスによる山岳や火山とその下流に広がる沖積／洪積平野からなり、欧米とは著しく異なる水文環境条件を有する（虫明、2000）。従って、欧米の自然条件で発展した水文・水資源学は、適応性に限界があるのだが、一方で、アジア地域の水文・水資源学が存在しない。アジア・太平洋水文水資源協会は、このようなアジア地域の水文・水資源研究の体系化と経験の交流を目的として、設置準備がなされている。アジアにおける造山地域の水文学といった学問体系が確立されれば、先述の技術基準の適用範囲もより明確になるはずである。学問体系が確立されるまでの間は、ISO の場で、防衛的手段として、自国の基準が孤立しないように誘導することが必要である。

3. 国際水管理に向けた技術の体系化

土木研究所の氾濫シミュレーション技術を韓国の技術者・研究者に紹介する場で、筆者は、シミュレーションモデルの基礎式は水理学に基づく万国共通式であるが、破堤条件や氾濫原の粗度係数の与え方は日本のデータに基づく経験式を用いていることを紹介し、韓国技術者の興味を引くことができた。さらに、氾濫モデルはどのように用いられるのかと話が発展し、治水経済調査や洪水ハザードマップ作成に利用されることを紹介した。そのとき韓国側は、韓国で氾濫予想区域を公表するのは社会的インパクトが大きすぎて不可能であるとの見解を示した。技術の利用方法や成果の活用は、日本国内においても十分に意識され、チェックされているが、その前段階とも言える社会的インパクトの検討については、筆者の知る限り、何ら公的な記録が残されていない。「当初、建設省も地価への影響を心配し、まず実績図を公表したが、全くといって良いほどインパクトがなく、予想図公表へ踏み切ったと聞いたことがある」と間接情報を伝えるしかなかった。即ち、日本の技術を海外へ適用しようとするとき、特に人文社会学的評価がないと普及は難しいということを、このときに学んだ。

体系化が水管理技術を国際化する際の重要なポイントであることを、虫明ら（2000）が以下のよう
に述べている。

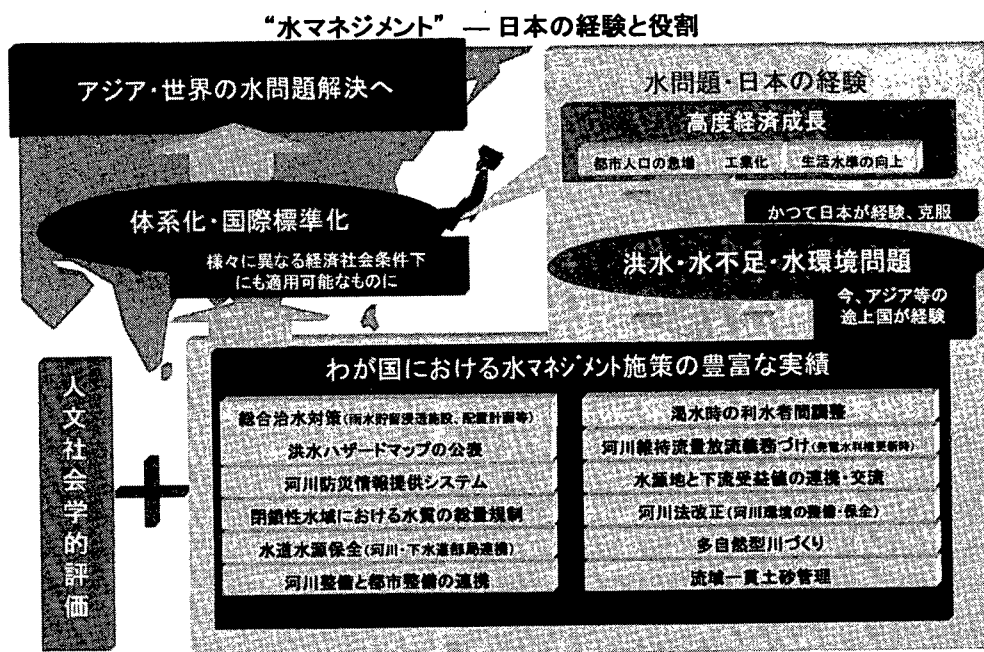
日本でも、1970年代頃から水行政・河川行政に様々な新しい措置がとられ、現在に繋がっている。（中略）これらは時代の要請を捉えた適切な措置であると評価される。しかし、水マネジメントという総合的な視点で捉えた場合、水マネジメント全体を総括する理念が必ずしも明らかでない中で、それぞれの措置は個別的な対症療法としかみられない。言い換えれば、マネジメントの部品は散在するが、それらを繋ぎ全体を構成するマネジメント・システムがないのが日本の状況と言える。

体系化とは、別々のものを系統的に統一することである。水の流れは、普段と洪水時で異なるのはもちろん、潮位の影響の有無や、勾配や河床の違い等から、様々な異なるが、力学を基礎とする水理学により、体系化されている。学術論文も、一見脈絡のない複数の調査研究結果を、あるひとつの目的を達成するための手段として位置付け体系化したものと言える。先述の氾濫シミュレーションのような人文社会学的な評価は、数学や物理学のような普遍的なツールがないので分かりにくい、目標を達成させるために、一度俯瞰的に見て、クリアすべきことをひとつひとつ評価し、世界のどこでも通用するマニュアルを作ることに相当すると思う。この体系化により、図－1のように海外の水問題への適用性を増すことができる。

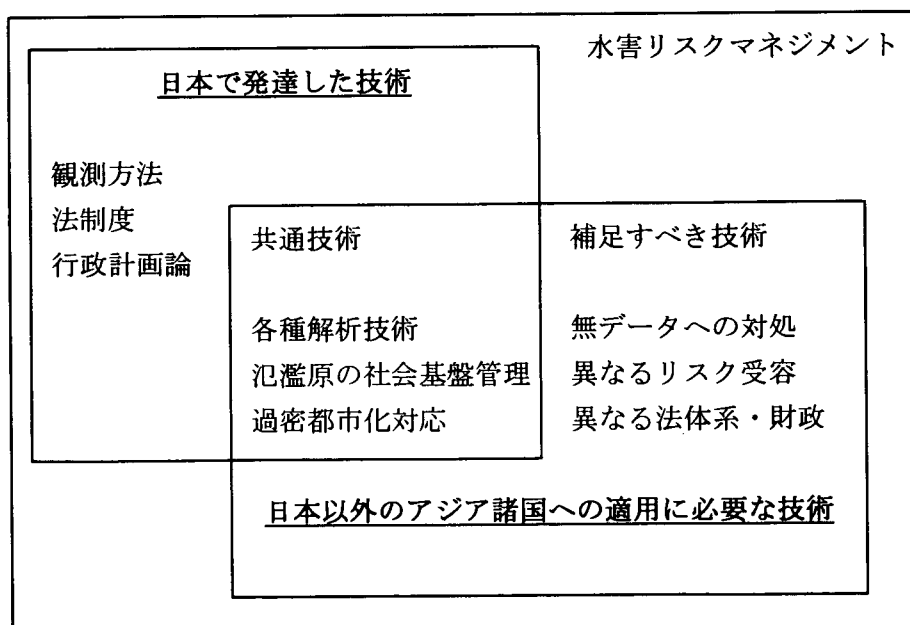
体系化は、その技術が使える条件を明確にし、現地での適応性を判断できるようにすることとも言える。体系化は適用範囲を限定していくので、範囲がどんどん狭まるはずである。しかし、狭い範囲であってもその適用性が明確になれば、世界のどこであっても、その条件さえ満たせば、すんなりと普及するであろうし、さらに、使える技術のない分野が明確になる。水害リスクマネジメントを例にしたその区分を図－2に示した。単純な例ではあるが、先述の氾濫シミュレーションの破堤条件や氾濫原の粗度係数の経験則の場合、経験則を導いたときの地形や土質、土地利用形態や平均的な流速などの諸条件を明らかにし、その適用範囲を明確にして限定することにより、今まで適用範囲が漠然としていたために適用されなかった技術の適用機会が増えることが予想される。

もうひとつの体系化の大きな利点は、日本の技術を核として海外に適用しようとするとき、個別技術でなく、パッケージで紹介できることである。洪水ハザードマップは、それを見た住民の避難開始時刻が早くなることが調べられており、その有効性は評価されているが、先ほどの韓国の例のように不動産業界が反対するから公表できないという国もある。日本では浸水実績の公表から少しずつ始めたが、結局、予想したほどの社会的インパクトがなかったことを客観的に評価し、洪水ハザードマップの作成方法から効果の測定方法までをパッケージとして提示することができれば、こうした国に対して説得力が増すだけでなく、これら一連の手法を使ってもらえることも考えられる。このような事例を増やすことにより、日本の技術的リーダーシップが確立していくのであろう。

体系化は海外でのリーダーシップ確保のためだけでなく、国内でも有益なはずである。海外向けに体系化した技術は、自国においても普遍性が増していることが期待できるからである。それは、海外展開により多様な現地でのノウハウを吸収し、さらに現地での販売力を増すという好循環を続ける国際企業の戦略と似た構図と考えられる。また、日本国内だけでの適用では気が付かない欠陥・思い違いが明らかになることも多い。例えば、総合治水は、都市化する流域での洪水対策として画期的な施策といえるが、より俯瞰的に見ると、都市計画の失敗を補う施策とも言える。このような評価は、社



図－１ 水マネジメントにおける日本の役割（国土技術政策総合研究所河川研究部との共同作成資料）



図－２ 水害リスクマネジメントを例とした技術体系

会条件が大きく異なる海外との比較から明白となり、世代が代わったときに同じ失敗を繰り返さないためにも必要はらずである。

4. 水循環系健全化計画策定のビジネスモデル

千葉県海老川流域等の都市水循環再生リーディング流域、鶴見川流域における水マスタープラン策定は、利害関係者と共に、法的枠組みを超えて、治水・利水・環境・危機管理等複数を同時に考える事例である。この日本の取組みは、同様の都市問題を抱える国にも多く適用できる手法と考えられる。これを海外へ向けて展開するには、単に枠組みや解析ツール

を示すだけでなく、問題の社会背景の分析から始まる、体系化が必要である。海外にも適用することを強く意識するとき、この体系化はビジネスモデルと呼ぶことができる。

利害関係者が一同に会するような計画作りを体系化するときには重要となるのは、それに至る背景・問題を正しく認識し、問題解決に向けてのプロセスを示し、それをモニターすることである。現時点では、ビジネスモデル化までは出来ていないが、私の理解する範囲でそのポイントを以下に列挙する。

- 水循環とは、治水・利水・環境・危機管理等のすべての目的と人とのかわりも含む文学的な概念であり、部局間での調整をせずに各担当部局が独自に個別の目的を追求してきた結果、お互いに大きな悪影響を及ぼすようになったことから出発している（これについては、平成 11 年に開催した日米流域管理ワークショップ、土研資料第 3682 号にて、米国でも同じ背景であることを確認している）。従って、図-3に示すようなマトリックスをつくり、それぞれの施策が各目的に与える影響を把握し、利害関係者間で生態系にとって良いことでも治水にとっては良くないといった関係を共通認識にすることが必要である。
- 米国の流域管理（watershed management）では、治水、利水といったそれぞれの利益代表の利害を戦わせながら妥協点を見出していくが、日本ではそれを会議の席で表面化することはしない。マトリックスにおいて、悪影響のある施策よりも、どの目的にも効果のある浸透施設の設置や緑地の確保等を全面に出しながら、調整していく。
- 様々な解析結果を示しながら、最初に基本理念の合意を目指し、その後にマネジメント施策の策定に移り、時間をかけて各部局で実行可能なことを確認の上、実行に移す。実行にあたっては、進捗状況をモニターする。基本理念の合意は、昔の水環境を懐かしむだけの非現実的な懐古主義を排除し、意識の低い部局を計画作りにとどまらせること等に意義がある。

少なくとも、上記のことに人文的な分析がなされ、ビジネスモデルの中に位置付けられれば、部局間の調整が必要な程、治水が進んでいないのに、あえて時間と手間のかかるこの水循環の手法を用い

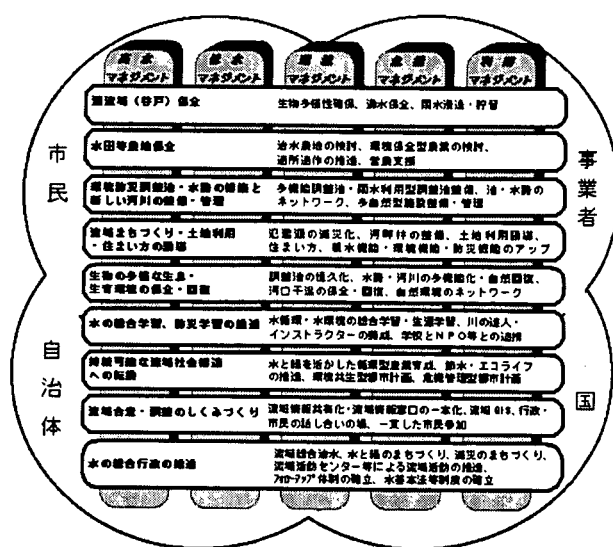


図-3 鶴見川水マスタープランでの目的・施策のマトリックス（簡易版）

る、会議を皆の意見を吸い上げる場としか考えない、基本理念の合意は簡単に済ませようとする、あるいは各部署の実行可能性を無視した計画作りをする、といった本来の趣旨に反することを行うことはなくなるであろう。

このビジネスモデルの有効性は、国内での事例分析だけでなく、多様な国際社会の中でその適用性を検証することにより、より普遍性を増すことができる。米国では、Calfed やサンタアナ流域管理プロジェクト機関のような調整組織を設立する方式が多く、イギリスでは National Rivers Authority の民営化が失敗し再度国営化された。フランスのセヌノルマンディ水管理庁は、任意メンバー制度の元で時間をかけて全市町村をメンバーにすることができ、流域管理ができるようになったといった多様な事例と比較して、日本の水循環ビジネスモデルの適用範囲と特徴を明らかにする必要がある。

5. 水循環モデルの体系化

水循環モデルとは、先述の水循環系健全化において複数の目的に対する現状を評価し、多様な代替案の効果を示すツールである。量を評価するモデルに限っても、世の中では多くのモデルが存在する。近年、土木研究所が開発に関与しているモデルだけでも表—1のとおり数多くある。ツールは多い程良いという訳ではない。数は増えるほど、どれを使ってよいか分からなくなるからである。これは、まさにモデルの体系化ができていないための障害と言える。

水循環モデルの体系化の第一歩として、未完成で改良の余地が多いが、土木研究所が開発に関与したモデルについて、その用途を分類してみた。使うモデルは、解析目的、流域のスケール、高水か低水かの現象等により異なる。そして、今までユーザーに強調してこなかったが、より重要な分類は、モデル同定用の過去の流量データの有無である。これらを表—1のように分類・体系化することにより、例えば以下のことがより一層明確になってきた。

- 近年、多く開発されている、複雑な計算をする、俗に言う物理水文モデルは、貯留関数法に置き換わるものではなく、支援解析あるいは流量データなしを埋めるためのモデルと位置付けられる。タンクモデルも同様である。
- 支援解析は、森林の影響を知りたい、水田での水利用合理化の影響を知りたいといった、解析目的が最重要項目であり、一般向けかプロ向けかにより要求されるモデルの構造が大きく異なる。一般向けには、精度は高くなくても簡単で分かりやすく表示することが求められ、プロ向けには、多様なニーズに対応できる部品を用意することが求められる。

モデルの体系化を始めようと考えただけでも、これだけの方向性が明確になったが、体系化には個々のモデルの水文学的な適用範囲をより詳細に検証することが必要である。日本で開発されたモデルが海外でどの程度適用できるのか、また欧米で発達したモデルが、モンスーン特有の気候と造山帯という地形地質を特徴とするアジア域でも適用性があるのかを検証するには、モデルの構造と流量の再現性の両面で行う検証を必要があり、そのような検証データと体制を整備する必要があると結論付けられる。

表一 各種水循環モデルの体系化（暫定版）

スケール	対象とする現象	計画用				管理(洪水予測)用
		流量再現(法定計画)用		支援解析用(水循環マスタープラン)		
		流量データあり	流量データ無し	流量データあり	流量データ無し	
大陸	通常、高水・低水の区別無し	タンクモデル等	なし [修正TOPモデル] [物理モデル]	I. 一次解析・一般用(傾向や相互関係の概略を解析・分かり易く表示する) USEPA Basins, Surf your watershedが代表、データベースのリンクが重要		相関法 タンクモデル等
	河道	不等流等	なし [人工衛星利用]			
河川流域	高水用	貯留関数法等	なし [物理モデル]	II. 詳細解析用(プロ向け) ベースとなるモデルに必要に応じて特殊なコンポーネントを組合せる必要がある。		相関法 貯留関数法等 と実時間修正
	低水用	タンクモデル等	なし [土研改良分布モデル]			
	河道	貯留関数法等	貯留関数法			
中小河川流域	高水用	貯留関数法等	合理式 [物理モデル] [WEPモデル] [GIS活用合成合理比流量]	II-i. 土地利用・被覆変化 (a) 森林(遮断・蒸発散等)の影響 (b) 農地(取水・還元量の変化)の影響 (c) 都市化、下水道建設		なし [GIS活用合成合理式+レーダ]
	低水用	タンクモデル等	[土研改良分布モデル]	II-ii. 水マネジメント (a) 貯水池運用変更 (b) 節水・需要		
	河道	無視	合理式洪水到達時間で考慮			
都市小流域	高水用	貯留関数法(パラメータを土地利用別等価粗度より推定)	合理式	SHERモデル	WEPモデル	なし [GIS活用合成合理式+レーダ]
	低水用	タンクモデル	比流量	同上	同上	
	河道	無視	合理式洪水到達時間で考慮	無視	同上	

降雨流出プロセスは、空間スケール、時間スケールにより異なり、詳細にモデル化すべきプロセスも解析目的による。従って、万能なモデルは存在せず、用途別に使い分けられている。
[]は適応可能と思われるが、未検証のモデルを表す。

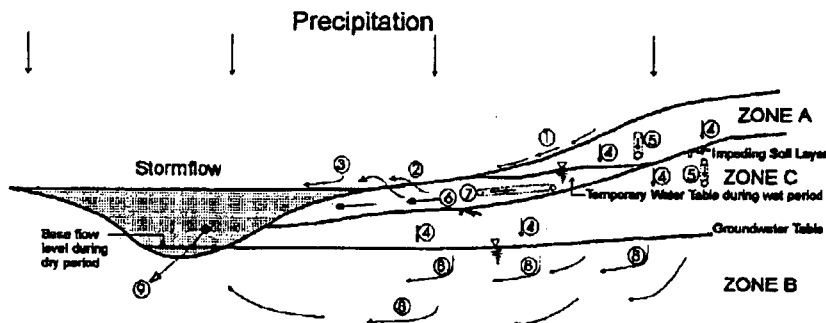


Figure 1. Runoff flow paths at a hillslope cross-section.

- ①ホルトン表面流、②復帰流、③水面上の表面流、④鉛直不飽和浸透流、⑤鉛直マクロポア、⑥側方浸透流、⑦側方マクロポア、⑧自由地下水流、⑨河道流

図一 4 山地断面における流出の素過程

図一 4 は、山地における洪水の流出素過程の概念図である。注目すべき部分は、図中で②とした復帰流の存在である。この領域は、⑥側方浸透流が地表面に復帰し、降雨初期には浸透域であったが、後に表面流が発生する飽和域に変化するので、変動流出寄与域と呼ばれる。日本の洪水流出は、貯留

関数法でよく知られるとおり、洪水期間中の流出率の急増を、f1-Rsaのパラメタで決定される浸透域から流出域への偏移として表現している。大きな降雨が発生するアジアモンスーン地域で用いるモデルには、概念的にしる物理的にしる、最低限この現象が組み込まれている必要がある。また、最終的には、流量の再現性でモデルの性能を評価することが必要であり、現在、そのためのデータの整理を進めている。

6. 地上水文データの乏しい流域の流量予測

図-2に示した日本の技術ではカバーできない項目の中で、水文学上、最も重要な項目は、地上水文データの乏しい流域での水文予測 (prediction of ungaged basins; PUBs) である。過去の流量データがなければ、水害リスクといった確率評価はできないし、代替案の効果も予測できない。さらには、降水量データも不十分な流域が世界には多くある。これらのデータ不足を補う技術は、実用化の一手前のレベルに達している。過去の流量データを再現するには物理水文モデルが、過去の降水量データを再現するには地域スケールの気象水文モデルがツールとなる。PUBsに必要なモデルの条件は、同定が不要であることである。なぜなら、同定のための過去の水文データがないからである。

物理モデルによる河川流量の再現手法

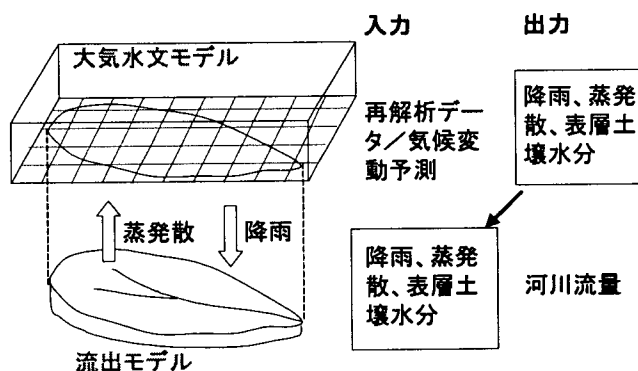


図-5 大気水文モデル及び物理水文モデルによる河川流量データの再現概念

流量再現のための物理水文モデルとは、流域の地形、土地利用、土壌等の情報から、水文循環の素過程を数値的に追跡する技術である。物理という言葉

葉がついているからと言って現実を忠実に再現しているとは限らない。水文循環の素過程をすべて物理的に表現するために流域全体のデータを取得するのは事実上不可能であり、さらに、流域の大きさにより水の流れる速度等を再現するのに最適なパラメタが大きく異なるという、スケール問題があるからである。このスケール問題のため、

流域土壌情報から決まるパラメタをモデルに入力しても、流量を再現できず、必ず一部のパラメタでフィッティングの必要性が生じる。これは地下水流動解析において、小スケールであれば観測された透水量係数を用いて地下水位を再現できるが、広域の地下水流動はまったく再現性がなくなるこ

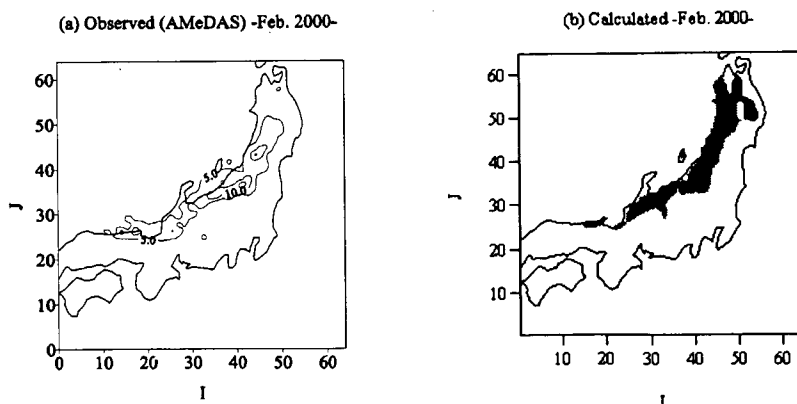


図-6 2000年2月の降水量再現計算結果(中間結果)

左: アメダス、右: 再現計算(塗潰し範囲は、約10mm/day以下)

とと同じ問題である。

このスケール問題の主要な原因は、ポイントスケールでの運動方程式をそのまま面的な広がりをもつ領域に適用していることにある。土木研究所はカリフォルニア大学デーヴィス校との共同研究により、この基礎的問題に取り組む、ポイントスケールの基礎式を確率論的手法により面積積分し、全く新たな基礎式を用いて流れを追跡する手法を開発した。その成果は近く論文として発表する予定である。

過去の流域降水量の再現は、気象情報のダウンスケールにより可能である。図—5に示したとおり、気象分野で既に全球で整備されている再解析データをモデルに入力し、より小さなスケールの地形の影響を表現できる気象水文モデルを用いて、流域内の降水の再現が可能である。この気象水文モデルは、土木研究所が地球温暖化の影響予測のためにカリフォルニア大学デービス校 (UC Davis) との共同研究で開発したモデルであり、長期間のシミュレーションを安定して行えるようにするため、大気下部と地表面間の水蒸気の相互作用をモデルに組み込んでいる。従って、降水だけでなく、蒸発散量と土壌水分もモデルアウトプットとなっている。幸いなことに、これらのアウトプットは物理水文モデルが必要とするインプットそのものである。当初から意図したのではないが、これらの2つのモデルはうまく連携し、過去の水文データの再現に活用できる。図—6は、国土数値情報等を用いず、世界どこの地域でも利用可能なデータベースのみを用いて上記の水文気象モデルを本州にあてはめ、降雨を再現した例である。これをさらに、気象モデルによりダウンスケールし、河川流域の降水量を予測できるようにする研究を進めている。

現在、この土木研究所・UC Davis の技術は、世界水アセスメント計画 (World Water Assessment Program; WWAP) のパイロット・ケーススタディ河川流域である利根川を対象としたものであり、水文データの乏しい流域での指標化の基礎水文資料を提供する技術として研究を開始している。その成果は、『世界水発展報告』 (World Water Development Report; WWDR) で発表される見込みである。この PUBs 技術を単なる個別技術ではなく、基礎水文データの再現から始まり、それに続くリスク解析、施設設計、施工と続く一連の業務の精度をまとめて高め、日本国の優位性を増す技術とすることが期待される。

参考文献

- 浅野孝(2001)：アメリカの水資源事情—回顧と課題、河川 2001 年 5 月号、pp.63-71.
玉井信行(2001)：21 世紀の水環境マネジメントをめぐって、環境情報科学 30-1、2001、pp.27-32.
虫明功臣(2000)：アジア水文・水資源学会の設立に向けて—第 7 期学会長に就任して、水文・水資源学会誌第 13 巻 6 号、2000、pp.421-422.
虫明功臣ら(2000)：水資源マネジメントと水環境—原理・規制・事例研究 翻訳に当たって、技報堂出版、2000.
日経ビジネス(2001)：香港異色鼎談 国を飛び越えた連携を！、2001 年 11 月 19 日号、pp.57-58.

[一般講演]

土砂災害監視技術の動向と今後の課題

土砂管理研究グループ長 仲野 公章

目 次

1. はじめに	61
2. 流域土砂環境の把握技術	61
2. 1 有珠山噴火災害調査で利用されたりモートセンシング技術	61
2. 2 ヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形変化測定	65
2. 3 衛星リモートセンシングによる斜面崩壊等の自動抽出	70
3. 地すべり監視技術	74
3. 1 光ファイバーセンサーを用いた地すべりの面的監視	75
3. 2 3次元レーザーミラースキャナーによる地すべり移動計測	80
4. まとめと今後の課題	83
4. 1 流域土砂環境の把握技術	83
4. 2 地すべり監視技術	85
5. おわりに	85
参考文献	86

土砂災害監視技術の動向と今後の課題

土砂管理研究グループ長 仲野 公章

1. はじめに

わが国は、地形、地質、気象条件および土地利用状況等から見て非常に高い自然災害ポテンシャルを有するため、21世紀を迎えた今も自然災害対策の推進は大きな社会的課題の一つである。また、災害によって失われる人命数の割合で見ると、自然災害の中でも土石流や地すべり、がけ崩れ等によってもたらされる土砂災害の重大性は、近年相対的に増大する傾向にある。

21世紀においても土砂災害対策をより一層強化するためには砂防施設等の建設といったハード（構造物による）対策をさらに推進する必要があるが、近年の土地開発に伴う土砂災害危険箇所の増加、防災施設の建設サイトの不足、工事実施にあたっての生態系や景観への配慮、財政状況の悪化など、防災施設整備をとりまく環境は厳しい。したがって、今後はますます土砂災害の発生予測、危険度評価等のソフト（構造物によらない）対策が重要になると思われる。さらに、平成7年1月の阪神・淡路大震災を契機として、危機管理体制の強化が強く求められているところであり、この点からも被災状況の迅速かつ的確な把握等を可能とするソフト対策の強化が重要となっている。

一方、21世紀は情報化の時代とも呼ばれる。近年 IT 関連技術が飛躍的に発展しつつあり、土砂災害対策の分野においても、これらの技術を活用した被災状況や土砂移動現象などの迅速かつ的確な把握・監視や警戒避難のための災害発生予測レベル向上を目指した取り組みがなされている。本稿では、平成12年の有珠山噴火災害時になされたリモートセンシングを主とした調査事例の紹介などを交え、流域土砂環境の把握技術および地すべり監視技術に関する研究開発の現状を述べるとともに今後の課題等を整理する。

2. 流域土砂環境の把握技術

アクセスが困難でかつ広い地域を事業対象とする場合が多い砂防の分野において、空からのリモートセンシング技術を用いた調査・解析へのニーズは高い。ところが、これまでは砂防が求める空間スケールや精度とリモートセンシングのそれとが合わず、航空機利用の空中写真を用いた判読・計測以外一般的には用いられてこなかった。

しかしながら、近年の技術発展はめざましく、例えば衛星画像については、最近登場した商用高分解能衛星により、空中写真に匹敵する高精度な画像を得ることが可能となってきた。今後もより高精度のセンサーを搭載した地球観測衛星や航空機の登場が期待され、そうしたリモートセンシングツールを活用することを視野に入れた調査・解析手法の研究がますます必要となってくる。

こうした背景を踏まえ、土木研究所では国土交通省国土技術政策総合研究所と連携しつつ、平成12年の有珠山噴火災害等を事例研究対象として、砂防分野におけるリモートセンシング技術の適用性を検討している。

2. 1 有珠山噴火災害調査で利用されたりモートセンシング技術

1) 平成12年有珠山噴火災害の概要

北海道の有珠山は、平成12年3月31日に22年ぶりに噴火活動を再開した。最初の噴火は、有珠

山の西山山麓で発生し、噴煙の高さは最高で 3,500m に達し、東に流れた。翌 4 月 1 日には、有珠山北西側にある金比羅山西側山麓で新たな火口群を形成し、噴火した(図-2.1.1)。その噴煙の高さは 3,000m に達した。こうした火山活動により、噴火後の 3 月 31 日時点では、6,874 世帯、15,815 人が避難指示、勧告の対象となった¹⁾。

噴火活動の結果、地殻変動により地形が変化し、噴出した火山灰が噴火口周辺に厚く堆積した。前回(昭和 52、53 年)の噴火時には、噴火活動によって有珠山を源とする各溪流の流域が荒廃し、泥流が数多く発生した。前回の噴火による死者は全て泥流によってもたらされたため、今回も泥流によって被害が生じることが強く懸念された。

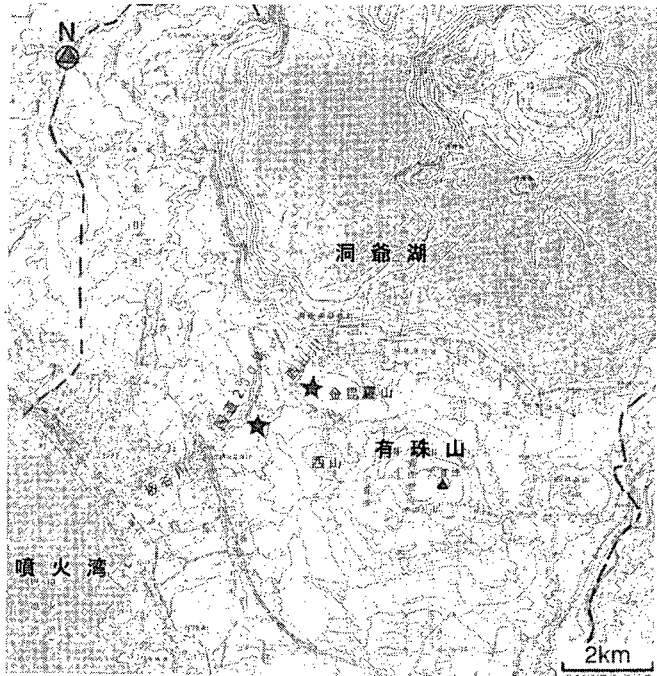


図-2.1.1 今回の噴火における噴火口群の位置

噴火以来、広域の立ち入り規制が敷かれるとともに噴火口周辺半径 5 km の範囲の上空が航行規制されたため、現地調査やヘリコプターからの目視による情報収集が困難な状況となった。

2) 検討内容および各手法の評価

有珠山噴火当時は、地球観測衛星、空中写真、レーザースキャナー(レーザプロファイラー)、その他数々の手法を用いた情報収集が行われた。それらの取得データのうち地形計測が行えるものおよび地表面情報が得られるものを集めて解析し、どのような手法を用いれば、火山噴火時の砂防に必要な情報のうち何が得られるかを明らかにすることを試みた。さらに、これらの成果から災害時におけるリモートセンシングデータを用いた砂防調査のあり方についても検討した²⁾。

① 収集データ

収集したデータを表-2.1.1 に示す。これらのデータのうち既にデータ処理が終わり解析結果が出ているものについては、処理済みのデータや成果論文等を入手した。それ以外のものについては、デー

表-2.1.1 収集データ

	データの種類	データの概要
地形計測用データ	1万分の1空中写真	コンピュータによるステレオマッチングで標高自動抽出(DEM作成)
	SPOT HRV-P ステレオペア画像	コンピュータによるステレオマッチングで標高自動抽出(DEM作成)
	IKONOS DEM	JSI がステレオペア画像から作成した DEM(既存データの購入)
	レーザプロファイラー	レーザ測距による直接高さ計測(既存データの購入)
	RADARSAT	リポートパス観測での干渉 SAR による地形変位計測(報告書レビュー)
	PI-SAR	Xバンド主従アンテナでの干渉 SAR による地形変位計測(報告書レビュー)
地表面変化取得用データ	空中写真	1万分の1カラー写真(写真判読)
	SPOT HRV-XS マルチスペクトル画像	分解能 20m 可視緑、可視赤、近赤外、の 3 バンド(画像解析)
	IKONOS パンシャープン画像	分解能 1m 可視青、可視緑、可視赤、近赤外、の 4 バンド(画像解析と判読)
	RADARSAT	C バンド SAR の強度画像(報告書レビュー)
	PI-SAR	X バンド HH、VH、VV の偏波特性を用いたカラー合成画像(報告書レビュー)

タを入手して加工・解析を行ったが、データの処理は噴火当時の災害対応という状況を想定し、短時間で実施できる必要最小限の処理のみを行った。

② 地形データの作成および地表面情報の分析

噴火直後の2時期の航空写真ポジフィルムと SPOT 衛星のパンクロステレオペア画像から、いずれもコンピュータを用いたステレオマッチングによる標高値自動抽出手法で数値標高モデル (DEM) を作成した。2. 2で述べるヘリコプター搭載レーザースキャナーでの観測で得られた詳細な地形変化データとここで作成したデータを比較し、両者がどの程度一致するかを確認した。

表一2.1.2 航空宇宙技術の特性総合比較表

問題点	比較項目		空中写真判読	SPOT HRV	IKONOS	RADARSAT	Pi-SAR	
				マルチスペクトラル画像	パンシャープン画像	強度画像・干渉画像	強度画像	
画像精度に関わる問題	精度	分解能	実績値*	—	60m	3~12m	40~45m(強度画像) 400~450m(干渉画像)	Xバンド:7.5m Lバンド:15m
			公表値	—	20m	1m	8~9m(FINE 画像)	Xバンド:1.5m Lバンド:3.0m
		標高精度	実績値	—	30~50m	—	4.0~5.0m	—
			公表値	—	7~11m	—	—	2m
		撮影範囲	撮影高度による	60km×60km	11km×11km	50km×50km (FINE 画像)	観測幅 4ch:8.2km, 6ch:4.3km	
		センサーの特徴	—	近赤外線バンドを持つ	近赤外線バンドを持つ	—	—	
	画像データ使用時の問題	使用性	データ	アナログデータ	デジタルデータ	デジタルデータ	デジタルデータ FINE 画像で 600KB/km ²	デジタルデータ Xバンドで 6.8MB/km ²
データ処理			—	・斜め観測(首振り観測)のため、中心部以外には地形の倒れ込みが発生。このため補正が必要	・他の3つに必要な倒れ込み補正やスペckルノイズ除去が必要ないためデータ処理が簡便	・レーダー画像であるため地形の倒れ込みが発生。補正には DEM が必要 ・スペckルノイズが発生するためノイズ除去が必要 ・干渉画像作成には特殊なソフトが必要	・レーダー画像であるため地形の倒れ込みが発生。補正には DEM が必要 ・スペckルノイズが発生するためノイズ除去が必要	
データ入手			各航空測量会社 購入可能	RESTEC 購入可能	JSI 購入可能	RESTEC 購入可能	独立行政法人通信総合研究所 一般配信されておらず、 入手困難	
撮影時の安全	遠隔性	噴煙到達高度	航空機から撮影を行うので、噴火口付近を飛行できない	衛星搭載型のため、噴火災害時にも撮影可能	衛星搭載型のため、噴火災害時にも撮影可能	衛星搭載型のため、噴火災害時にも撮影可能	航空機搭載ではあるが撮影高度が 6,000 ~ 10,000m と高高度であるため噴火時でも影響はほとんどない	
画像取得に関わる問題	(通常時)	迅速性	撮影間隔	—	0~3日(平均1.5日)	1~2日	1~6日	—
		受信局での処理時間	—	数時間	数時間	数時間~2日	—	
		画像(写真)	10Km ²	10日	4日	4日	3日	6日
			100Km ²	10日	4日	4.5日	3日	33日
			入手に1000Km ²	40日	4日	8日	3日	—
	要する時間(日)	備考	観測要求あり	観測要求なし	観測要求なし	観測要求なし FINE画像使用	通信総研の 処理体制が不明	
	(緊急時の対応)	迅速性	緊急対応実績等	各航空測量会社が自社努力にて撮影	有珠山噴火時にはNASDA、RESTECが集中的な判断(宣伝効果等)により即時撮影される可能性は極めて良い	災害時には営業的な判断(宣伝効果等)により即時撮影される可能性は高い	有珠山噴火時にはNASDA、RESTECが集中的な判断(宣伝効果等)により即時撮影される可能性は極めて良い	有珠山、三宅島などの災害時撮影実績があるので、災害時の対応は良い
確実性	天候等	・要有視界、雪、雲、噴煙等がある場合は地表面の判読が不可能 ・夜間撮影不可	・要有視界、雪、雲、噴煙等がある場合は地表面の判読、解析が不可能 ・夜間撮影不可	・要有視界、雪、雲、噴煙等がある場合は地表面の判読、解析が不可能 ・夜間撮影不可	・全天候型、雪、噴煙を透過するので天候に左右されない ・夜間撮影可能	・全天候型、雪、噴煙を透過するので天候に左右されない ・夜間撮影可能		

* 光学系の画像については、公表値の3倍、レーダー強度画像については5倍、干渉画像については50倍の数値を実際の識別可能規模として示した

表—2.1.1 で集めたデータのうち、噴火前後の空中写真と SPOT 衛星のマルチスペクトル画像、噴火後の IKONOS パンシャープン画像は、実際に判読や画像解析に用いて作業を行った。噴火災害においては、2 次的な泥流の材料となる火砕降下物の状況とその土砂を運ぶ水の所在の把握が重要であるとの考えから、土砂生産源となる荒廃範囲と水の所在である積雪域と湛水域の抽出を衛星のスペクトルデータの解析から試みた。また、空中写真と IKONOS パンシャープン画像では、上記以外の火山活動状況（地表面の隆起・沈降）や被害状況（砂防施設、保全対象）など可能な限り詳細な判読を試みた。

③ リモートセンシングツールの総合評価・判定

②の作業を経て全て揃った表—2.1.1 のデータ（地形計測データ、画像情報データ）に対し、データ精度、作業時間、ハンドリング性、実利用に際しての問題点という 4 つの項目で評価・判定を行った結果を表—2.1.2 に示す。

3) 航空宇宙技術を用いた砂防調査手法のあり方

噴火災害当時砂防分野において必要とされた情報を整理し、また、2)の③の作業で得られた結果を考慮して、リモートセンシングデータを用いた砂防調査手法を検討した。発災後の重大関心事である 2 次災害に関する情報のうち必要性の高い 5 項目をあげ、それらに対する現時点での航空宇宙技術の砂防調査への適用性を表—2.1.3 にまとめた。

表—2.1.3 航空宇宙技術の砂防調査への適用性

調査項目	目的	広域	狭域	悪天候時
1 土砂生産源	噴火活動による降灰域や噴石位置、地震動で発生した崩壊地を探索。将来の土砂移動現象の発生と、その流下方向を予測する。	降灰範囲が広い場合 →SPOT HRV-XS 崩壊地 60km 四方以上の分布 →SPOT HRV-XS	降灰範囲が狭い場合 →空中写真、IKONOS(1m パンシャープン)、PI-SAR 崩壊地 11km 四方までの分布 →空中写真 11km 四方以上の分布 →IKONOS(1m パンシャープン)	噴火中であれば RADARSAT による概況把握。 噴火沈静時あるいは噴煙量が少ない日を狙って SPOT、IKONOS、空中写真を使用する。また IKONOS と空中写真については対象面積によって使い分ける。
2 水の所在	積雪域や湛水域を検索。土砂移動現象の発生危険度、および土砂量を推測。	広域概査 →SPOT HRV-XS →RADARSAT	ある程度範囲が特定できる場合 →空中写真、IKONOS(1m パンシャープン)	
3 土砂移動実績	泥流や土石流が発生した箇所を探索。復旧対策を立案。	広域概査 →SPOT HRV-XS	ある程度範囲が特定してから →空中写真、IKONOS(1m パンシャープン)、PI-SAR	
4 地形変化	地形の隆起・沈降による流下範囲方向の変更を予測。	広範囲の地形変動の把握 →RADARSAT 干渉 SAR による地形変位計測	流域単位での地形データ取得（対数値シミュレーション等） 空中写真 →場所を指定して→河道沿い等限定された範囲での地形データ取得 火山周辺地域など限定された範囲でのデータ取得 →レーザプロファイラ	天候条件が悪い場合の地形データ取得 PI-SAR
5 砂防施設	砂防施設の被害状況や、堆砂状況など、施設の機能を確認。	広域での防災施設の位置把握→IKONOS(1m パンシャープン)	狭域での防災施設の位置確認 →空中写真 →場所を指定して→堆砂状況等の施設機能調査 →レーザプロファイラ	天候条件が悪い場合の防災施設の位置把握 PI-SAR

2. 2 ヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形変化測定

1) 調査の背景

平成12年の有珠山噴火災害時の調査においては、最近実用化が進んでいるヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形計測技術を適用し、噴火活動中の火山において迅速かつ正確にDEMを入手する手法としての適用性を検討した。

泥流の発生および氾濫シミュレーションを行うためには、DEMが必要である。しかし、噴火中の火山では、地殻変動や大量の火砕物の堆積によって地形が大幅に変化する場合がある。そのような場合、既存のDEMによって氾濫シミュレーションを行っても正しい結果が得られないので、新たに正確なDEMを作成しなければならない。従来は、空中写真測量によりDEMが作成されてきたが、噴火活動の推移に応じて泥流の発生および氾濫シミュレーションを行うには、データ作成に時間がかかりすぎていた。

2) 調査の概要

① 航空機搭載型レーザースキャナーの概要

詳細は他の文献³⁾に譲るとして、以下に要点のみを記す。

航空機搭載型レーザースキャナーによる計測システムを図-2.2.1に示す。

航空機搭載型レーザースキャナーによる地形計測は、

- (i) 航空機の位置を求める技術 (Kinematic GPS 手法)
- (ii) 姿勢を制御する技術 (ジャイロ等の3成分加速度計を利用して姿勢や位置を補完計算)
- (iii) レーザー装置技術 (発射されたレーザーの反射を受信し、その時間遅れから地表面との距離を計測)

が合体することによって可能になった。

② 計測方法

今回のレーザー計測は、ヘリコプターをプラットフォームとして実施した。また、計測飛行は、対地高度600~900mを時速60~90kmで、150m間隔で飛行することによって行った。

計測に用いたレーザースキャナーの諸元を表-2.2.1に示す。計測は、地表面の標高の計測が主目的のため、Last Pulse Modeによって行った³⁾。

計測は2回行ったが、実施日は噴火直前の平成12年3月31日と約1ヶ月後の4月26日である。

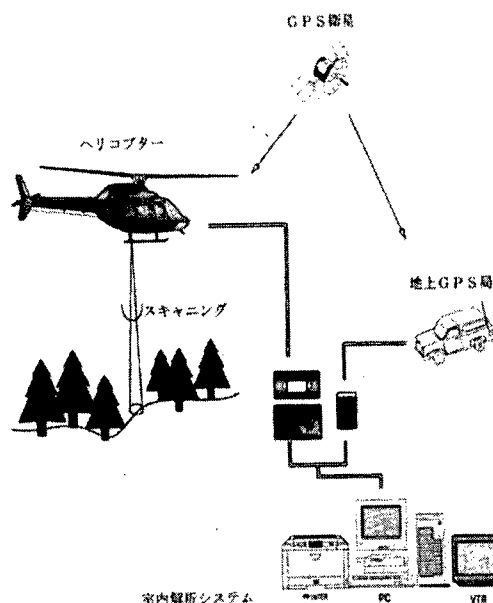


図-2.2.1 航空機搭載型レーザースキャナー計測システムの概要

表-2.2.1 ヘリ搭載型レーザースキャナーの仕様

仕様項目	仕様
レーザー発射回数	25,000 Hz
スキャン回数	25 Hz
スキャン角度	0~±11.3°
スキャン形状	矩形、三角波形
受信モード	First, Last
ビーム広がり角度	0.25, 1.2 mrad
サンプリング量	1000 点 / scan
地上分解能	25 cm (V = 45 km/h)
測距精度	< 0.15m / 1 ショット
座標精度	< 0.5m
照射角度精度	0.05° (POS)
飛行高度	65~1000m
飛行速度	30~150km/h
レーザー放射レベル	クラス 4
波長	1064nm (Nd : YAG)

3) 調査結果

① 2時期の地形変化

今回の噴火により形成された火口群は、西山の北西側と金比羅山西側周辺の2地域に集中しており(図—2.1.1)、火山噴火予知連絡会における呼称はそれぞれ西山西火口群と金比羅山火口群である。

レーザー計測結果から作成した等高線図と陰影図を図—2.2.2 および図—2.2.3 に示す。両図とも、左側が噴火前で右側が噴火後の図である。等高線図では、西山西火口群の周辺のコンターが大きく変化している。陰影図では、今回の噴火によって形成された数 10 にも及ぶ噴火口の形状を明瞭に捉えている。また、西山西火口群の周辺には、多くのグラーベン状断層が形成されているのがわかる。

1 回目と2回目の計測結果の差分を面的に表現した隆起量変化図を図—2.2.4 に示す。金比羅山火口群から西山西火口群にかけて(図の中央部やや右から左下の方向)の範囲で大きな隆起が認められ、西山の北西約 1 km 付近の西山西火口群を中心に最大約 65m の隆起が生じているのがわかる。

② 地形計測データの利用

今回の噴火は長期に及び地形の変動も顕著であったことから、噴火活動等の状況に応じた迅速な災害対応が求められたが、レーザーによる地形計測により①で述べたような有用な情報を迅速に得ることができた。実際、ヘリコプターからのレーザー計測終了3日後にはコンター図、鳥瞰図、陰影図等を得ることが可能であった。また、土砂災害(泥流)対策を検討する上で重要な溪流の縦横断図や氾濫シミュレーションに必要なDEM等を迅速に作成することができた。

(i)板谷川流域

図—2.2.5 は、前回の噴火時に泥流災害が発生し今回も泥流災害が強く懸念された板谷川の流域において、①で述べた最大で約 65m 隆起した地形変化の影響を受けて上流域で流域閉鎖を生じた面積 1.15km^2 の範囲を示したものである。また、図—2.2.6 は、板谷川のレーザー計測2時期の源頭部および河道縦断図(道央自動車道より上流)を示したものである。大きな地形変化を経た4月26日の断面では先に述べた上流部の流域閉鎖が明瞭であり、上流部の溪床勾配も 7° 近くに増大したことが明らかにされた。このような基礎データや別途作成した5mメッシュのDEMを活用した泥流氾濫シミュレーション(実施は、財団法人砂防・地すべり技術センター)結果は、北海道が設置した土砂災害対策検討委員会に資料としていち早く提供された。

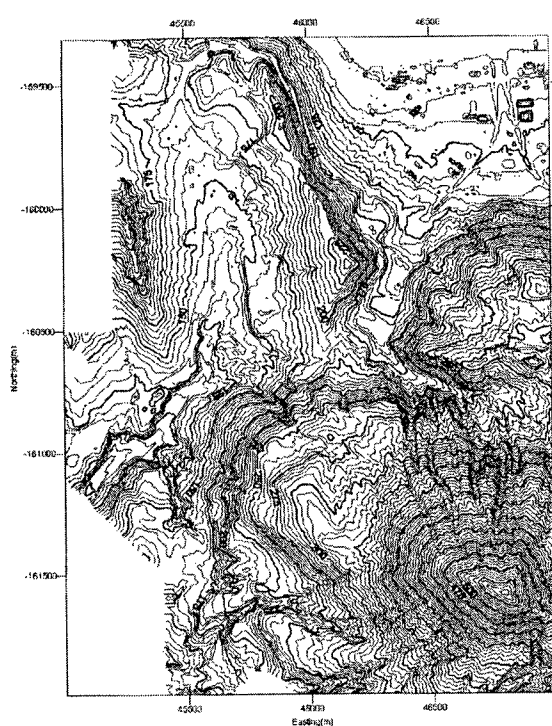
(ii)西山川流域

先にも述べたように活発な噴火活動継続中現地は厳しい立ち入り制限体制が敷かれた。洞爺湖温泉街を流下し、洞爺湖に流入する西山川では噴火口から噴出した高温の泥水が洞爺湖温泉街で氾濫(熱泥流:以下泥流と呼ぶ)したが、災害発生以来長期間現地への接近はできなかったため、レーザー計測結果を用いて泥流の堆積厚さを推定した。

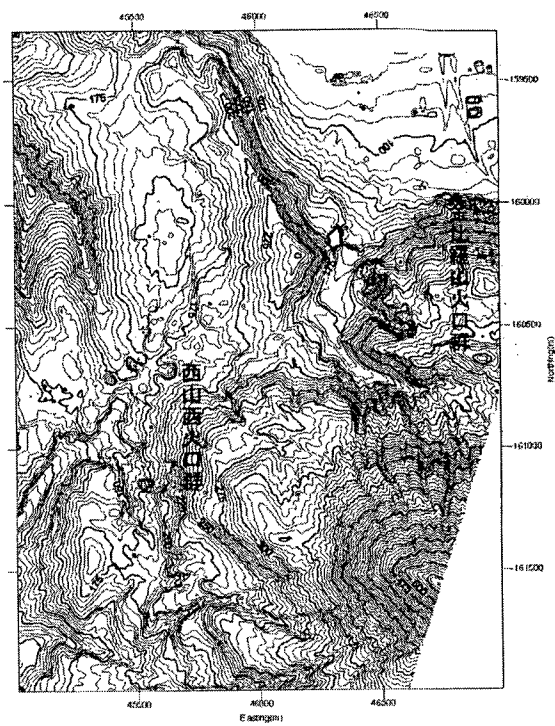
図—2.2.7 の左側は、4月26日撮影の空中写真、右側は2時期のレーザー計測結果の差分をとって作成した地形変化量図であり、白い部分が3月31日から4月26日にかけて標高が低下した範囲を表し、黒い部分が上昇した範囲を表している。地形変化量図を見ると、全体的に噴火口側の地盤高の上昇が大きく、湖側で小さいことがわかる。これは、火口に近いほど地殻変動による影響が大きく、火山灰堆積厚も大きいためであると考えられる。

写真中に西山団地と記した建物をはじめ多くの建築物は、地形変化量図において火口側が白く、湖側が黒く表されている。この傾向は、噴火口に近い建物ほど顕著である。これは、地殻変動により建物が湖側に水平移動したためであると考えられる。また、地形変化量図において、西山川沿いに洞爺温泉小学校の周辺にかけて、周囲に較べてやや黒味がかかった範囲が読みとれる。これが、今回の噴火

の際に生じた泥流の堆積範囲であると考えられる。

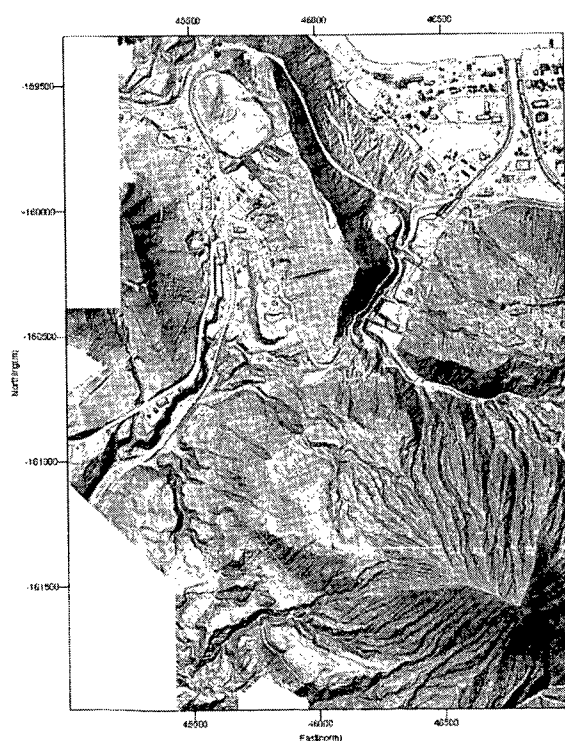


噴火前 等高線図 (平成12年3月31日計測)

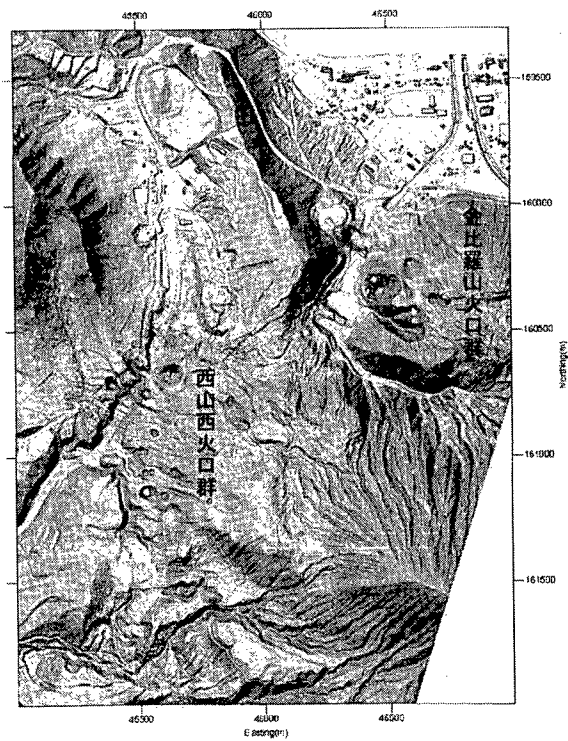


噴火後 等高線図 (平成12年4月26日計測)

図一2.2.2 有珠山西麓の噴火前 (平成 12 年 3 月 31 日) と噴火後 (平成 12 年 4 月 26 日) の等高線図

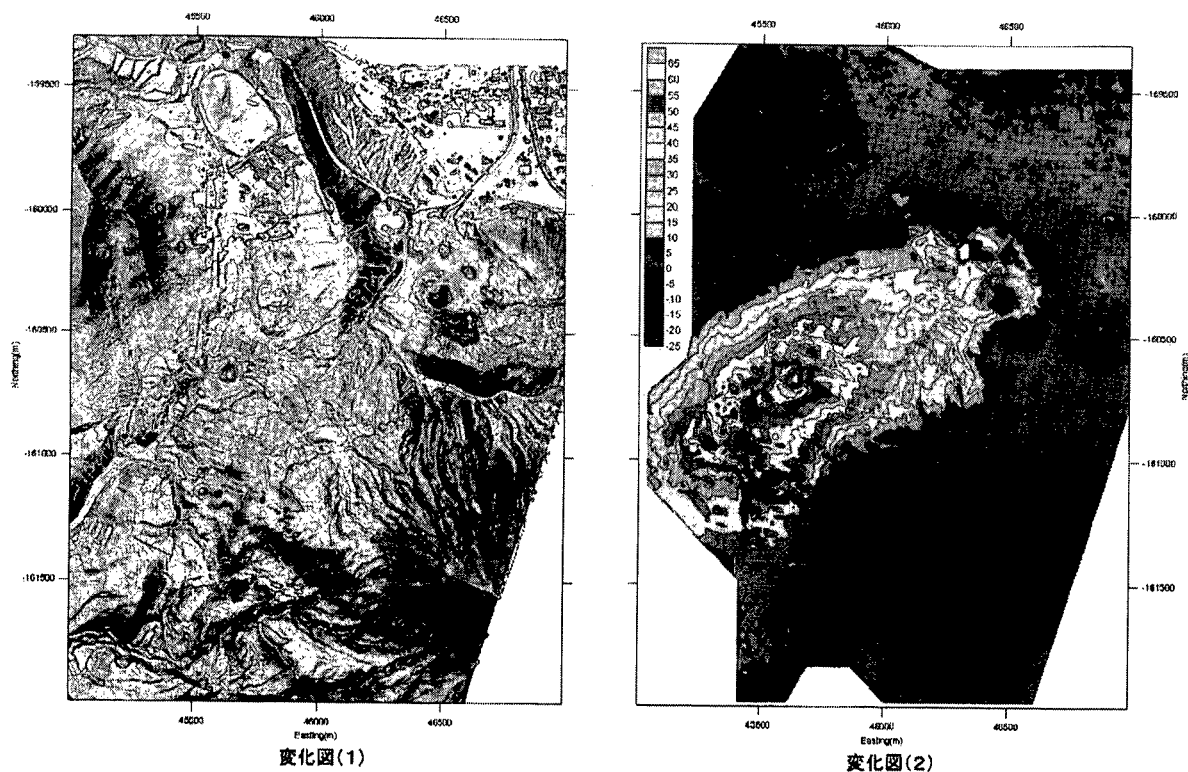


噴火前 陰影図 (平成12年3月31日計測)

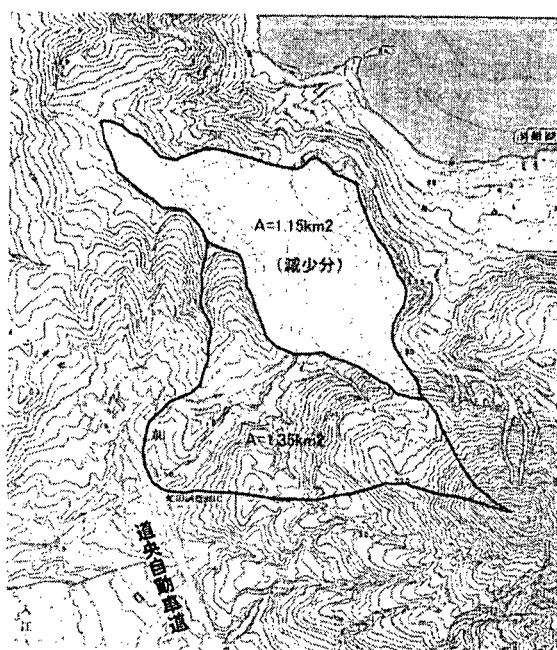


噴火後 陰影図 (平成12年4月26日計測)

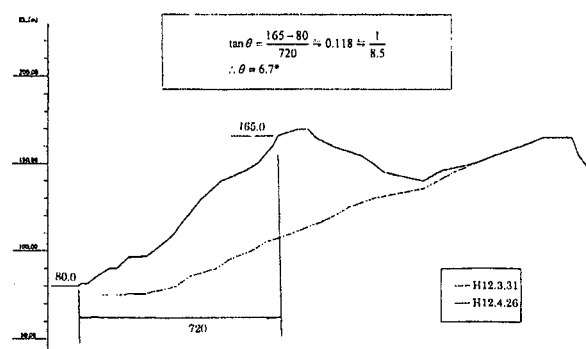
図一2.2.3 有珠山西麓の噴火前 (平成 12 年 3 月 31 日) と噴火後 (平成 12 年 4 月 26 日) の陰影図



図一2.2.4 有珠山北西山麓の隆起量変化図



図一2.2.5 板谷川上流域の流域閉鎖の範囲



図一2.2.6 板谷川中・上流域の河道標高の変化

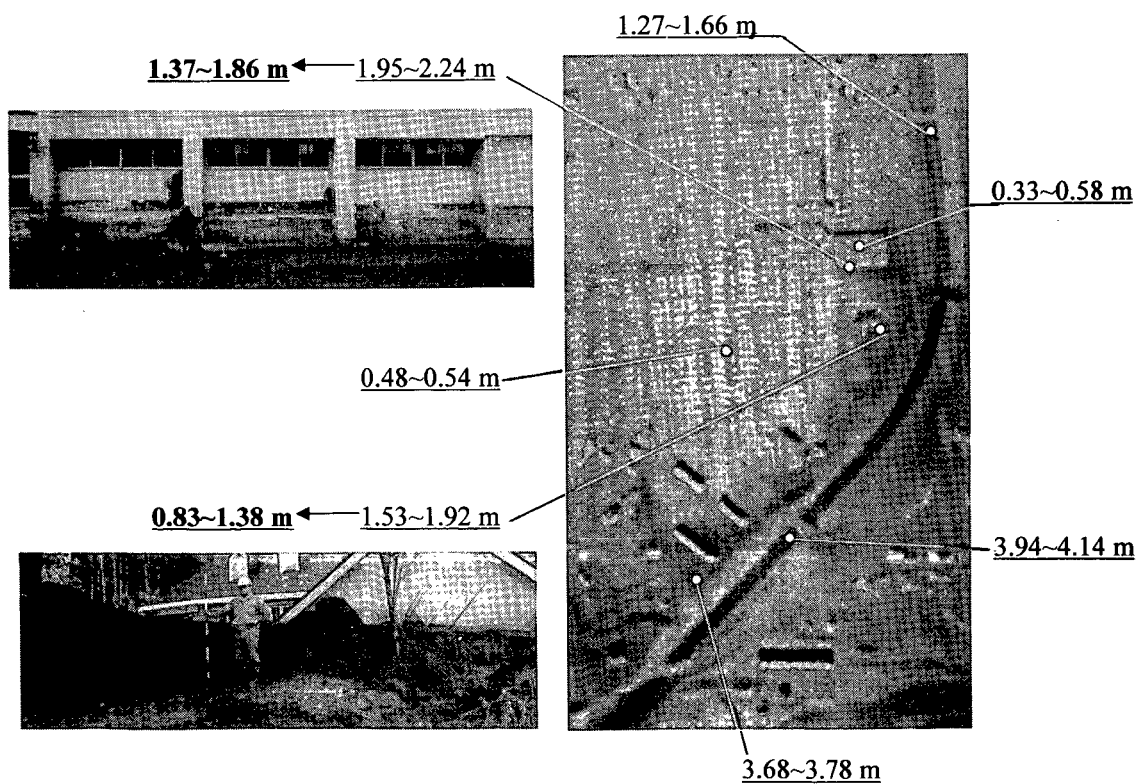


空中写真
2000年4月26日撮影



地形変化量図
2000年3月31日～4月26日にかけての変位
白 ← 沈下・隆起 → 黒

図一2.2.7 西山川周辺の地形変化



図一2.2.8 西山川の泥流氾濫域の状況

図一2.2.8 の右側の図は地形変化量図であり、左側の2枚の写真は、現地調査時（平成12年9月10日）の洞爺温泉小学校（上の写真）およびみずうみ読書の家（下の写真）付近の泥流堆積状況を示したものである。地形変化量図における地形変化量は、地盤変動高、火山灰堆積厚および泥流堆積厚の3つの和であると考えられる。したがって、泥流堆積厚のみを求めるためには、地形変化量から地盤変動高と火山灰堆積厚を差し引かなくてはならない。

小学校体育館の噴火口側地面の地形変化量は、地形変化量図によると1.95～2.24mであった。なお、数値の幅は、任意に指定した地点近傍8点の地形変化量のばらつき幅を示す。一方、体育館の屋上（屋根は平ら）の地形変化量は0.33～0.58mであった。体育館の屋上には泥流堆積物が存在しないので、屋上の地形変化量はその近傍の地盤変動高プラス火山灰堆積厚を表す。したがって、体育館の噴火口側地面の地形変化量値から屋上の値を差し引いた1.37～1.86mが、この付近での泥流堆積厚と考えられる。図一2.2.8左側上の写真で実際の堆積痕跡を確認できるが、堆積物の上端を示すマッドラインは地上およそ1.6m付近にあることがわかる。両者は値としてほぼ一致している。

2. 3 衛星リモートセンシングによる斜面崩壊等の自動抽出

1) 調査の背景

従来から行われている災害調査手法である空中写真判読や現地調査は取得される情報が詳細であり、また、現場の状況に応じることができる。しかし、その反面、山地流域全体を網羅した広域調査への適用については時間、コスト、安全性等の問題がある。そこで、これらの問題への対応の可能性が高いと考えられる衛星リモートセンシング技術が注目されている。

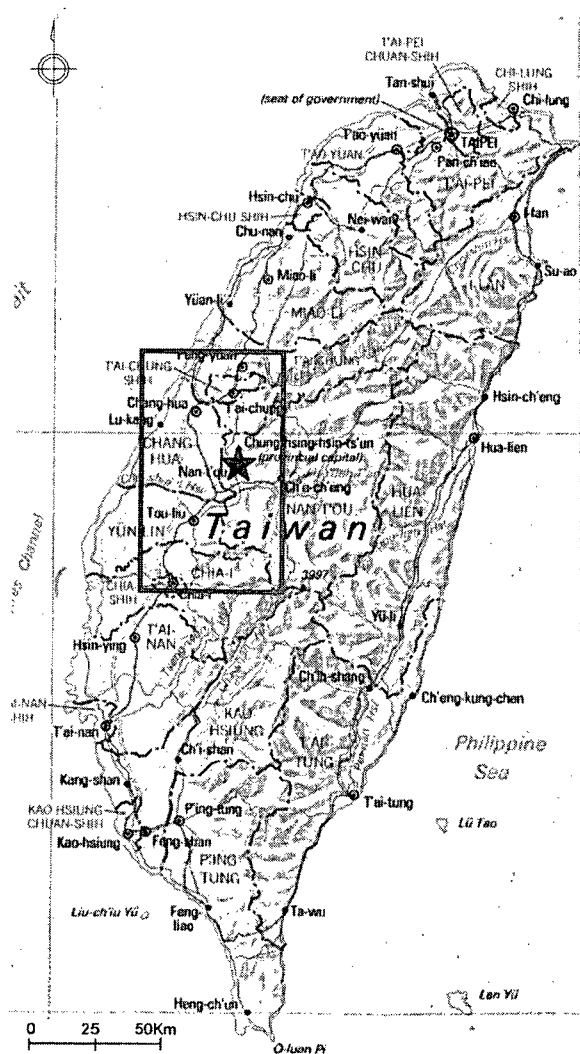
2) 調査概要

① 調査対象現象および地域

平成11年9月21日に、台湾中部の南投縣集集市の東10km付近でマグニチュード7.3（台湾中央気象局）の大地震が発生した（図一2.3.1）。この地震により、都市部での家屋倒壊や土木構造物破壊といった被害のほか、山間地でも崩壊や地すべりによる土砂災害が多発した。なかでも南投縣と台中縣の県境では、30～50km²の広い範囲で表層崩壊による禿げ山が発生したり、九分二山や草嶺山などの山岳地帯においては地震による土砂災害規模としては最大級に相当する崩壊土量10⁷～10⁸m³級の大規模崩壊が発生した。この地域を対象として衛星画像を用いた崩壊地自動抽出の可能性を検討した⁴⁾。

② 使用センサー

人工衛星に搭載されているセンサーは、機能的



図一2.3.1 対象エリア（台湾中部）
枠内が調査範囲、★印は震源を示す

表—2.3.1 使用衛星画像 (1)

衛星/センサ名	観測日	画像モード	ビームタイプ	画像中心緯経度
RADARSAT/SAR	1999 年 4 月 9 日 (災害前)	WIDE	W2 (31° - 39°)	23° 52' 02" N 120° 48' 00" E
RADARSAT/SAR	1999 年 10 月 18 日 (災害後)	WIDE	W2 (31° - 39°)	23° 51' 02" N 120° 45' 08" E

にマイクロ波センサーと光学系センサーの2種類に分類される。マイクロ波センサーは、自ら電波を地表面に照射しその反射波から画像を合成するもので、天候に左右されることなく観測が可能なセンサーである。RADARSAT 衛星等に搭載されている合成開口レーダー (SAR) はその代表的なものである。一方、LANDSAT 衛星に搭載されている TM (Thematic Mapper) に代表される光学系センサーは地表面から反射・放射される太陽光の強度を観測するものである。

本検討では、この2種類のセンサーデータを用いて崩壊地自動抽出の可能性を検討した。

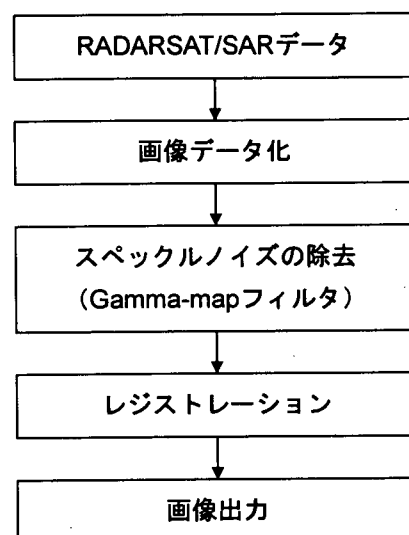
③ 合成開口レーダー画像を用いた崩壊地の自動抽出手順

合成開口レーダー (SAR) の後方散乱強度画像 (以下、SAR 強度画像) を用い、災害前後の画像から散乱強度の変化箇所を崩壊地として抽出することを試みた。

照射されたマイクロ波が地表で後方散乱した強度 (後方散乱強度) は、物体の形状や表面状態等によって変化する。ここでは、崩壊の発生による地表面粗度の変化に着目し、SAR 強度画像中に現れると考えられる画像の濃淡のコントラストを地表の変異箇所として抽出することとした。地表面粗度の変化とは、例えば、山地流域のように森林で被覆された地域で崩壊が発生した場合、崩壊地の表面の粗さは森林の樹冠に比べて滑らかになると考えられることから、森林と崩壊地では後方散乱に大きな差が生じることを想定した。

本検討では、RADARSAT/SAR-C バンド WIDE モード (波長 37.5—75mm、空間分解能 27m) データを用いた。C バンド SAR は、植生の樹冠表面からの表面散乱および葉・枝などからの体積散乱の強度を観測することが可能である。今回は森林の有無という変化に着目していることから、マイクロ波がある程度樹冠で散乱する C バンドデータを選定した。解析に使用したデータを表—2.3.1 に示す。

SAR 強度画像を用いた崩壊地自動抽出手順は、図—2.3.2 の通りである。



図—2.3.2 SAR 強度画像作成手順

④ 光学系センサーデータを用いた崩壊地抽出手順

光学系センサーデータを用いて土地被覆分類図を作成し、災害前後の土地被覆状況の変化から崩壊地を抽出することを試みた。解析に使用した衛星データは、表—2.3.2 の通りである。

光学系センサーは、物質表面からの太陽光の反射強度を、可視光域から近赤外域の間を複数の波長帯に分けて観測するものである。物質は物性、含水量、表面粗度、色等によって異なる反射強度を示すことから、この特性を利用することで、地表の被覆物を複数の領域 (水域、都市部、森林など) に区分することが可能となる。ここでは、災害前後の光学系センサー画像から各時期の土地被覆分類図

表-2.3.2 使用衛星画像 (2)

衛星/センサ名	パス/ロウ又はロウ/カラム	観測日	空間分解能
LANDSAT/TM	117/43、117/44	1999年9月1日(災害前)	30m
SPOT/HRV-XS	299/302、299/303	1999年9月27日(災害後)	20m
SPOT/HRV-XS	299/302、299/303	1999年10月12日(災害後)	20m

を作成し、災害後に植生が失われた箇所を崩壊地とみなして崩壊地分布図を作成した。崩壊地分布図の作成手順を図-2.3.3に示す。

3) 崩壊地抽出結果

① 合成開口レーダー画像を用いた崩壊地抽出結果

図-2.3.4に平成11年4月9日(地震前)および同年10月18日(地震後)のRADARSAT/SAR強度画像の例を示す。SAR画像強度の明暗は後方散乱強度の強弱を表している。しかし、この2画像の判読による比較から崩壊地を抽出することは困難なため、地震前後の変化をより明確に示すために2時期画像の強度の差画像を作成した(図-2.3.5)。

図-2.3.5左図の左側に位置する草嶺の付近に暗い箇所、すなわち、地震後後方散乱強度が低下した箇所が見られる。ここは、大規模な地すべり性崩壊が発生し、その崩土により清水溪が堰き止められて天然ダムが形成された箇所である。また、右上側にも明るい箇所が見られるが、ここも崩壊が発生した場所である。しかし、光学系センサーSPOT/HRVの画像(図-2.3.5右図)と比較したところ、SPOTの画像で確認できる多数の大規模崩壊地をSAR差画像からは判読できない。

② 光学系センサー画像を用いた崩壊地抽出結果

LANDSAT/TM(平成11年9月1日:地震前)およびSPOT/HRV(平成11年9月27日、同年10月12日:地震後)から得られた土地被覆分類図をもとに作成した推定崩壊地分布を図-2.3.6中の灰色のプロットで示す。なお、図-2.3.6の基図はWANGほか⁵⁾が空中写真判読等から作成した崩壊地(図中黒色のプロット)分布図である。図-2.3.6中、実線の円または楕円で囲まれた範囲は両者の分布が良く一致しているエリアであり、九九峰、九分二山、草嶺で発生した大規模崩壊などが抽出されている。しかし、一方で、崩壊の発生していない場所が崩壊地として誤分類されている箇所も多く見られる(図-2.3.6中、破線の円または楕円で囲まれた範囲)。その主な理由として、以下のことが考えられる。

(i)雲の存在が非植生地として分類されている(地震後画像で雲が存在すると分類上そのエリアは非植生地へ変化したものとみなされる。)

(ii)僅かな画像同士の位置ずれが誤分類を招く。

後者の位置ずれの発生原因は、地震前と地震後の画像に仕様の異なる衛星より得られたデータを用いたことにあると考えられる。すなわち、ポインティング機能によりセンサーを傾けて観測するSPOT画像は幾何学的なひずみを含むことから、常に直下視で観測するLANDSATの画像と位置の整合をそ

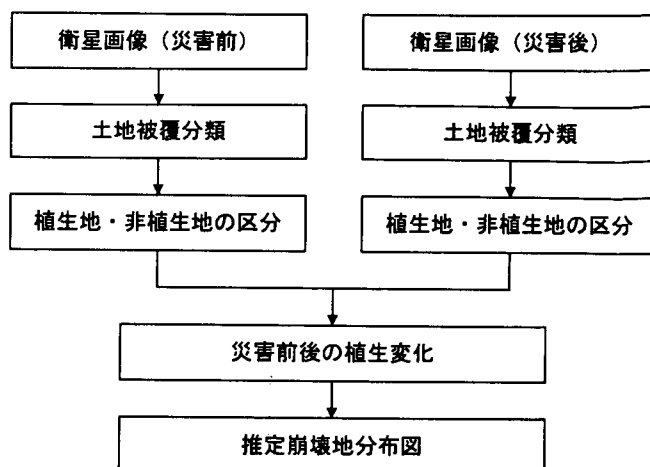
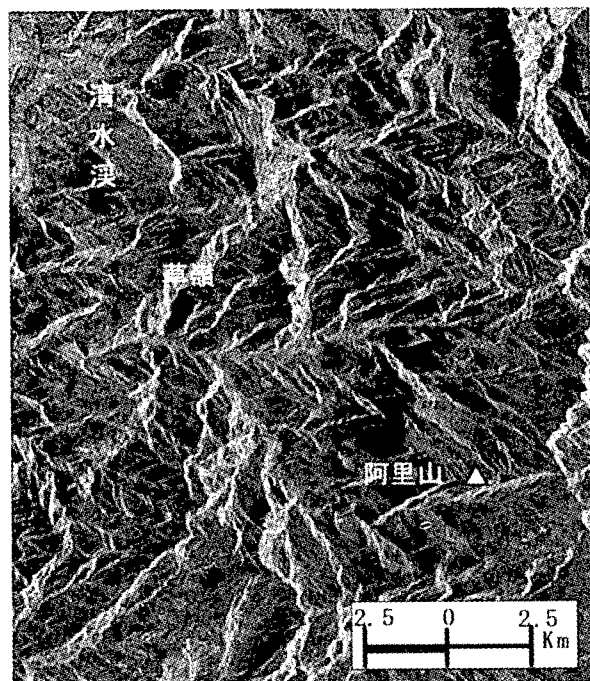
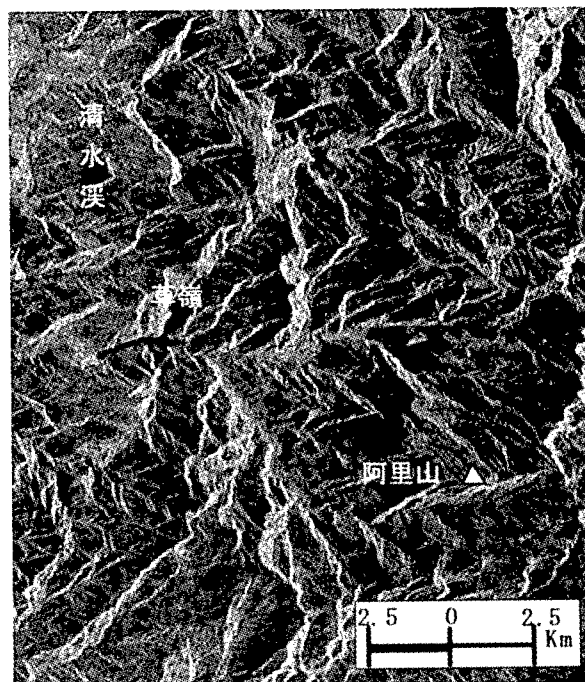


図-2.3.3 光学系センサ画像を用いた崩壊地分布図作成手順

のまま取ることができないためである。位置ずれについては DEM を用いることで補正が可能であるが、今回の対象エリアについては補正に必要な DEM を入手することができなかった。

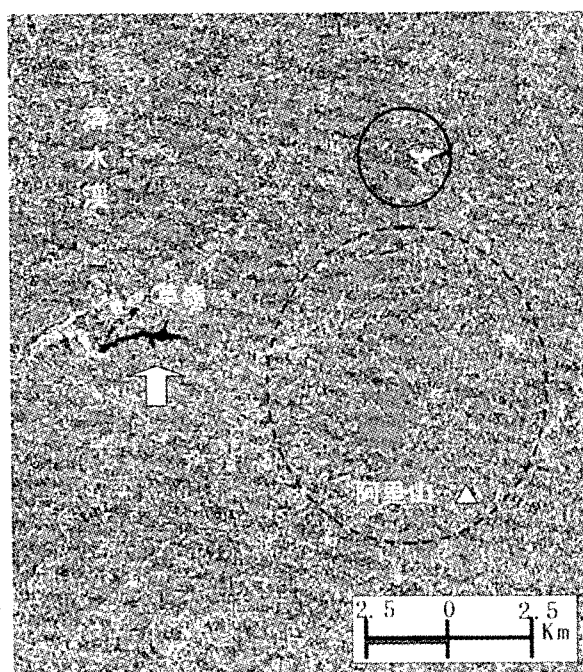


1999年4月9日（災害前）

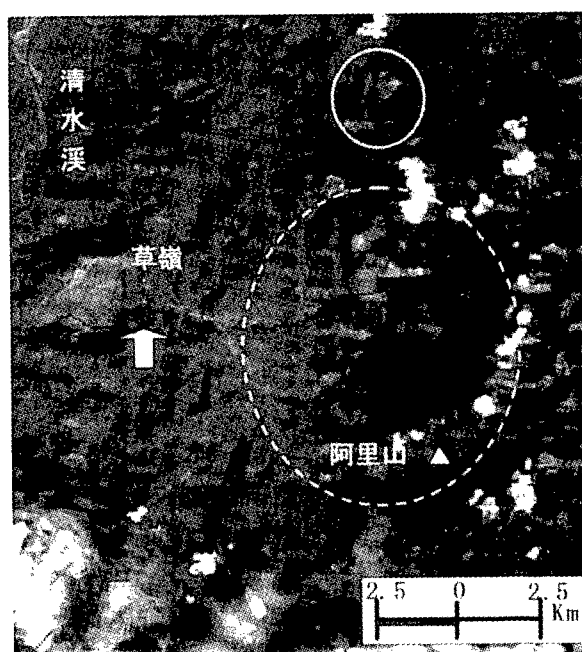


1999年10月18日（災害後）

図一2.3.4 RADARSAT/SAR 強度画像（清水溪周辺）

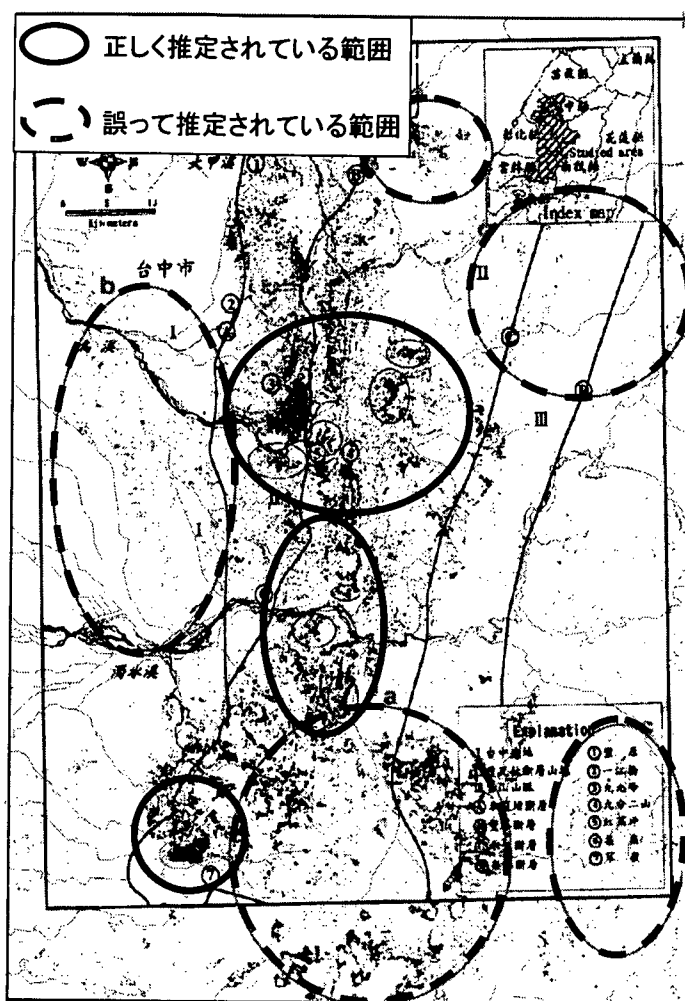


2 時期の差画像



SPOT/HRV画像（1999年9月27日）

図一2.3.5 清水溪周辺の 2 時期の SAR 強度差画像及び SPOT 画像



図一2.3.6 推定崩壊地分布を既存崩壊地分布図^{b)}に重ねた図

3. 地すべり監視技術

地すべりの動態を把握するため、従来、地上・空中写真測量および伸縮計・傾斜計等の計測器による調査が行われてきた。これらの手法の適用範囲は広いが、以下のような場合には有効ではない。

(i) 規模の大きな地すべり挙動の面的把握

規模の大きな地すべりの多くは、複数の地すべりブロックで構成されており、それらが複雑に絡み合った挙動を示す。これらの地すべりの機構解明、危険度評価および対策計画策定を精度良く実施するためには、何よりも面的な地すべり挙動を正確に把握することが重要となる。しかしながら、大規模地すべりの動態観測など広い範囲を計測するには、伸縮計などの既存の計測器では1台当たりの計測範囲が狭く、対応が難しい。また、空中からのリモート測量は有効な手法の一つと考えられるが、空中写真測量は経済性や即時的なデータ把握に問題があり、航空機搭載レーザープロファイラーも現在のところ経済性に問題がある。

(ii) 変位が大きく立ち入りが困難な地すべりの挙動の把握

大きな変位が生じた地すべりは、時として大災害をもたらす急速な滑動過程に進行することがある。このような地すべりに対しても挙動を正確に把握することが、警戒避難体制や応急対策を検討する上で重要となるが、現地への立ち入りは非常に危険であり、通常の調査手法では対応が困難な場合が多い。地すべり頭部の亀裂を挟んで伸縮計を設置し変位を計測できる場合もあるが、安全性確保の観点から見ると適用の機会は制限される。航空機搭載レーザープロファイラーの適用は可能であると考えられるが、経済性に問題がある。

上記のような問題への一つの対応策として、以下のような地すべり挙動監視技術の開発および普及が考えられる。

(i)に関して、光ファイバーセンサーは、センサー自体が伝送部を兼ねるため、広範囲の計測が容易である。また、リアルタイムの計測が可能、耐久性に優れる、雷に強い等の野外観測に適した特長を持つため、地すべり挙動監視への応用が期待される。

(ii)に関して、地すべり地外から非接触で、かつ、面的な計測が可能で、さらに、経済的にも有利な地上でのレーザープロファイラーの活用が期待される。

ここでは、光ファイバーセンサーとレーザープロファイラー（3次元レーザースキャナー）を用いた地すべりの監視技術に関する研究の現状を紹介する。

3. 1 光ファイバーセンサーを用いた地すべりの面的監視

1) 研究の背景と概要

センサーとしての光ファイバーは、当初、光ファイバーに屈曲が生じると伝送損失が発生する性質を利用したもので、斜面変状の検知と位置の特定を主目的とするものであった(石川ほか⁶⁾)。最近では、ブリルアン散乱光やブラッグ格子などを利用した光ファイバーによるひずみ計測技術をコンクリート構造物や河川堤防の監視に応用する研究が行われている(例えば、倉島ほか⁷⁾、河川情報センター⁸⁾)。

光ファイバーによる計測技術を地すべり地へ応用する場合、地すべり地では継続的に変位が生じ、かつ、その変位が大きいなどの地すべり地特有の条件について検討する必要がある。そのため、光ファイバーセンサーによる地すべりの動態観測や対策工の監視技術の実用化には、室内や模型による基礎実験、次に現場における実証実験という段階を経て適用性を検討することが必要と考えられる。土木研究所では、(i)広域的・リアルタイムな地すべり地表変動計測、(ii)長時間にわたる杭の変形、アンカーの緊張力・定着力の計測手法に関する研究を、主に基礎実験を土砂管理研究グループが、現場実証実験を新潟試験所が担当する形で進めている。

以下には、広域的・リアルタイムな地すべり地表変動計測に関するこれまでに得られた知見と調査の現状を紹介する。

2) 基礎実験

① 実験の概要

光ファイバーの長手方向に生じた歪みによってファイバー内で散乱される特定の光の周波数が変化する(ブリルアン散乱)。この変化量から歪み量を計測するとともに、周波数の変化した箇所までの伝達時間から歪みの生じた位置を測定する方法が、B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) 法である。地すべりの監視においては、光ファイバーを広範囲に敷設するため、このB-OTDR が最適な方式と考えた。このB-OTDR 法を応用し、光ファイバーを地すべり地内にメッシュ状に敷設することによって地表面に生じた歪みの分布を2次元的に計測するための基礎的な実験を実施した。

地すべり変動の検出特性および適切な埋設方法を検討するため、図-3.1.1 に示す装置で実験を行った。光ファイバーの敷設方法には、伸縮計のように地上に設置する方法と地中に埋設する方法が考えられるが、積雪に対する保護が容易で、温度変化の影響を受けにくい地中埋設とした。長さ約10mの台形状盛土の長手方向に光ファイバーを埋設する。盛土の中央には幅1.8mの鉄板が敷いてあり、この鉄板を1cmずつ移動させ、盛土を強制的に変形させた。この際の地中変位をB-OTDRと変位計で計測し、盛土の天端の変位を測量した。

光ファイバーはステンレスの保護管に入ったシングルモードファイバーを使用し、そのまま地中に埋設した。光ファイバーは1m毎のカシメでステンレス管に固定し

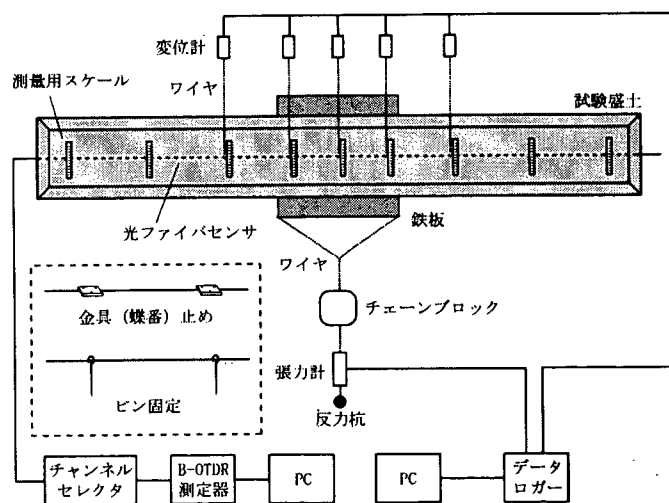


図-3.1.1 地表面ひずみ測定実験機器配置

であり、約 0.1%の張力が与えられている。予備実験の結果、歪み測定精度は 0.01%、距離分解能は 1 m、計測可能な最大の歪み量は約 2 %であった⁹⁾。

光ファイバーの固定方法、盛土材料および埋設深度が計測結果に与える影響を把握するために、埋設深度は 20cm と 50cm の 2 種類、盛土材は山砂と碎石の 2 種類とした。光ファイバーの固定方法は、(i)そのまま埋設、(ii)1 m 毎にピンで留めて全く動かないよう埋設、(iii)蝶番 (4×13cm) で光ファイバーを挟み込んでネジ留めし、ある程度の移動が盛土内で可能なように埋設の 3 種類とした。

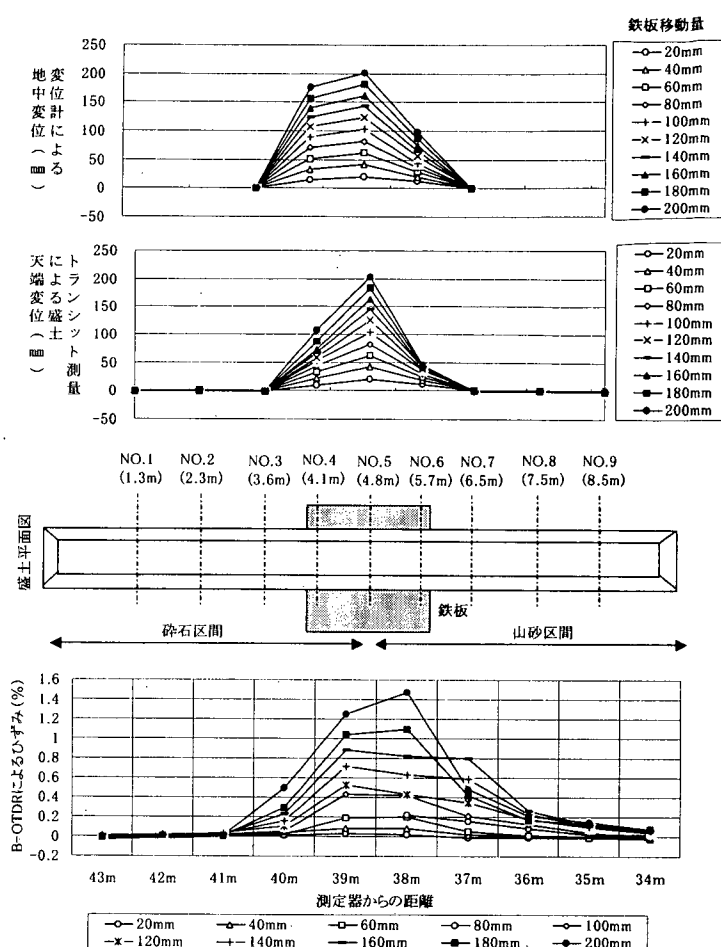
② 実験結果

実験結果の例を図—3.1.2 に示す。段階的な盛土の変形に伴い、変位計、測量、B-OTDR のいずれの計測結果も歪みまたは変位が段階的に増加している。固定方法による計測特性の違いを図—3.1.3 に示す。光ファイバーをそのまま埋設したケースでは、盛土変位が増加しても、B-OTDR で計測される歪み量はごく小さい値にとどまった。一方、蝶番留めしたケースでは盛土の変位が 20cm まで計測でき、その際の B-OTDR の歪み量は 1.6%であった。光ファイバーをピン留めして埋設したケースでは、鉄板移動量が 10cm までは順調に歪み量が大きくなるが、それ以降は異常値が計測された。実験後に掘り出して光ファイバーの変形形態を観察したところ、蝶番留めのケースでは蝶番が盛土中で回転、ずれを生じていた。それに対し、ピン留めのケースでは、ピンは盛土に対して殆ど動いておらず、光ファイバーはピン留めされた箇所ですぐな折れ曲がりを生じていた。

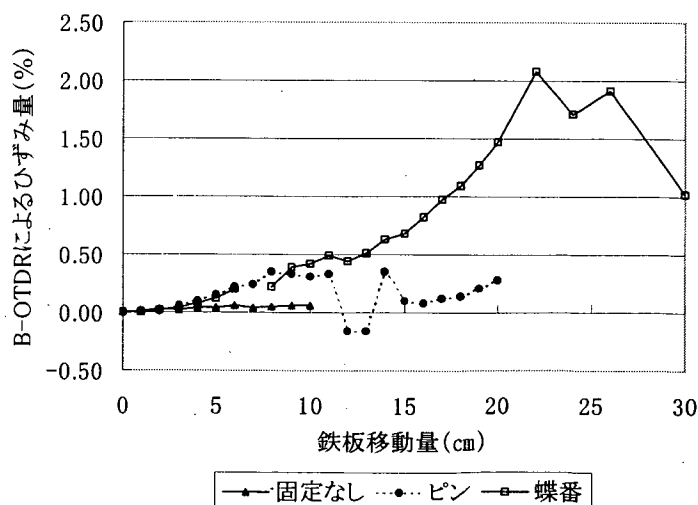
③ 実験から得られた知見等¹⁰⁾

(i) 固定方法

光ファイバーを地中に埋設する場合に



図—3.1.2 地表面ひずみ測定実験結果 (1)



図—3.1.3 地表面ひずみ測定実験結果 (2)

は、光ファイバーを固定する方が良いと考えられる。ピンで固定した場合は、歪みの分散がなく、位置の確定精度も高い。しかし、大きな変位が生じた場合には、固定箇所で光ファイバーに急激な屈曲が生じ、光ファイバーセンサーの計測可能歪み量に達する以前に計測できなくなる可能性がある。それに対し、蝶番留めではいくらかの歪みの分散が生じるが、位置の確定精度が高く、かつ計測可能な歪みの範囲が広い。そのため、大きな移動量まで計測する必要がある地すべりにおいては、蝶番留めのような固定方法が有効と考えられる。

(ii)埋め戻し材

盛土材料の違いは、光ファイバーをそのまま埋設したケースとピン留めしたケースでは、計測値に殆ど影響しなかった。しかし、蝶番留めのケースでは、碎石より山砂の方が、歪みが広範囲に分散する傾向が認められた。蝶番留めとする場合は、土質によってずれ特性が異なることから、埋め戻し材を用いた試験によって特性を把握しておくことが望ましい。

(iii)埋設深度

埋設深度は 20cm、50cm とともに、人間や小型重機程度の荷重では計測値に影響が生じなかった。埋設深度は 20cm でも計測に影響はないが、誤って掘り起こされたりすることなどを考えると、50cm 程度の埋設深さにした方が安全である。

(iv)その他

B-OTDR による歪み計測は温度変動が生じるため、野外に設置して通年観測を行うなどの温度変化が大きい場合には、歪みが加わっていない区間を基準にするなどして温度補正を行う必要がある。また、光ファイバーと計測器の間の光スイッチや接続ケーブルによる光波伝搬時間の遅延によって、光ファイバーに実際に歪みが発生している位置と B-OTDR 測定器に表示される歪みの位置とに差が生じることがある。そのため、一部区間に人工的に歪みを与えるなどして、B-OTDR による計測位置と実際の位置の関係を事前に検定する必要がある。

3) 沖見地すべり地における現場計測実験

2) の基礎実験で得られた知見を踏まえ、沖見地すべり地において光ファイバーセンサーを用いた地すべり挙動の現地計測実験を実施している。

① 沖見地すべり地の概要

沖見地すべり地（新潟県東頸城郡牧村大字神谷地先）は、上越市の東方約 14km、東頸城丘陵の一角を占める標高 100～300m の牧～三和丘陵にあり、保倉川水系高谷川の一支流である平方川右岸に位置する。地すべり規模は、長さ約 1,500m、最大幅 500m、面積約 70ha である。平均斜面勾配約 10° で、比較的緩やかな地形を呈している。また、周辺の地質は、新第三紀中新世の泥岩層（椎谷層相当）から構成されている。

この地すべりは、大きく 5 つのブロックに分けられ、年間移動量が 1 m に達するブロックもある。また、これまでの観測結果では、7 月等の豪雨期と 3～4 月の融雪期にかけて移動が生じ、特に融雪期には大きな移動量が観測されている。

② 地表面変位計測方法

(i)センサーの構造およびセンサーの固定・埋設方法

地表面の変位計測に用いたセンサーは、シングルモード光ファイバー（コア径 0.01mm、クラッド径 0.125mm）をインコロイ管（直径 2.0mm）内に導入したものをを用いた。また、B-OTDR は距離分解能 1 m を有していることから、インコロイ管に 1 m ピッチごとにカシメを設け、カシメとカシメの間では、光ファイバーに 0.4%歪みに相当するプレテンションをかけた。

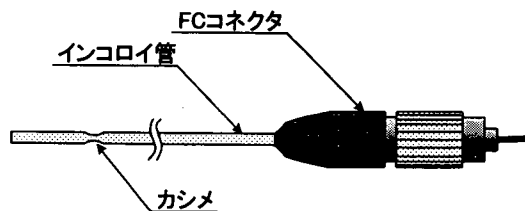
計測に用いたセンサーの構造を図—3.1.4 に示すが、センサー先端に FC コネクターを取り付け、通信用ファイバーと接続することにより、遠隔地から観測できるようにした。

敷設時における固定方法として、地盤に直接設置する方法と、ファイバーのカシメ部分に固定金具（蝶番）で固定する方法（図—3.1.5）を採用した。断面的な配置を図—3.1.6 に示す。埋設深度は 50cm 以上とし、埋め戻し材には現地発生材（粘性土）を用いた。

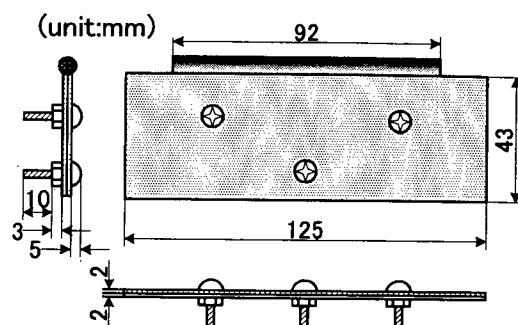
(ii) センサーの平面配置

今回センサーの敷設を行った地すべりブロックは、従来移動範囲が不明瞭であり、大規模な地すべり地内の小ブロック（長さ 200m、幅 100m 程度）である。このため、固定点の確保が困難であること、また、本観測では活動範囲確定や変状確認が主目的であるため、面的な活動範囲の把握が容易と思われる直交配置とした。

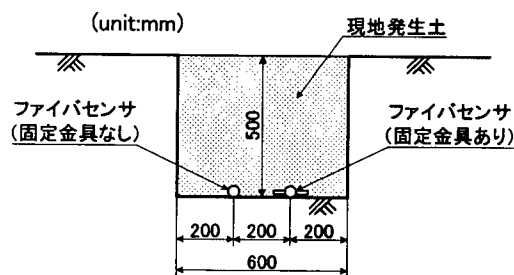
図—3.1.7 に光ファイバーセンサーの敷設平面図を示す。敷設は地すべりの頭部にあたる位置とし、地すべりの移動方向（南北方向）に 90m、幅方向に 80m の範囲とし、10m の格子状に行った。なお、地すべり活動によってセンサーが破断する可能性があるため、移動方向に 4 系列（Ⅰ～Ⅳ系



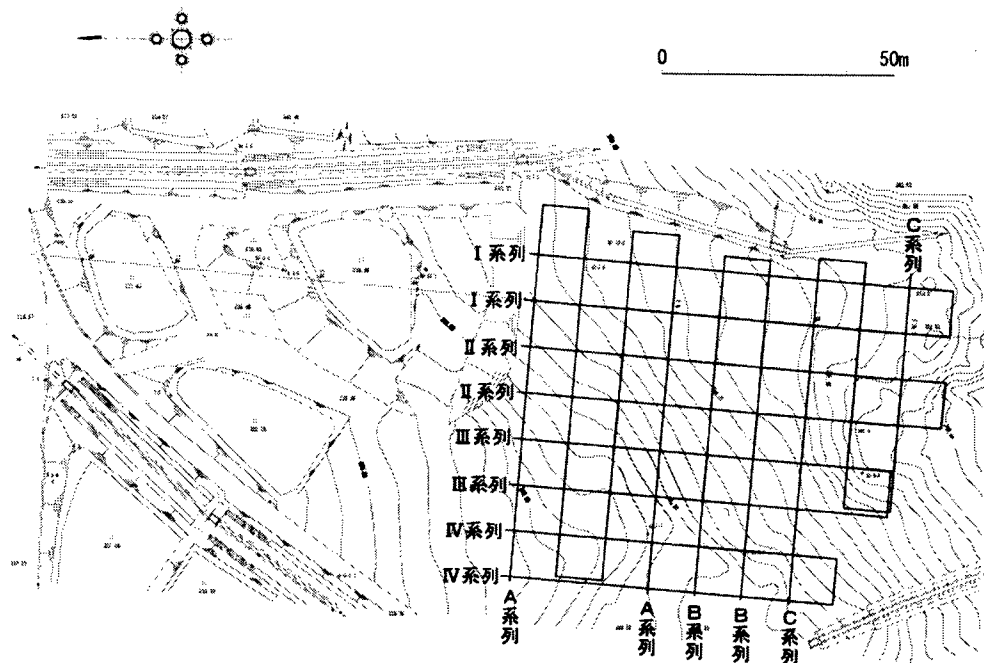
—3.1.4 光ファイバーセンサーの構造図



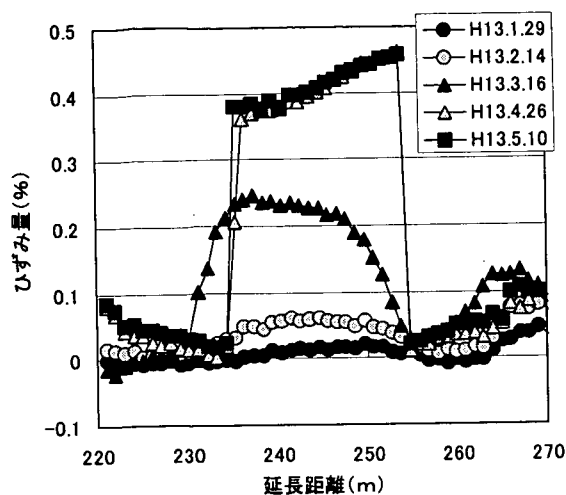
図—3.1.5 ファイバーカシメ部固定金具



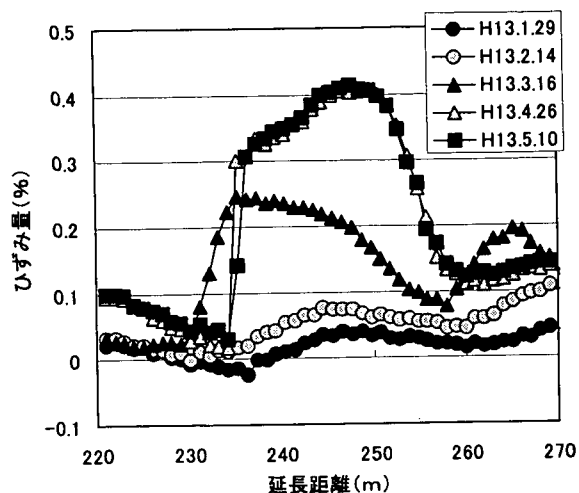
図—3.1.6 ファイバーセンサー敷設横断面図



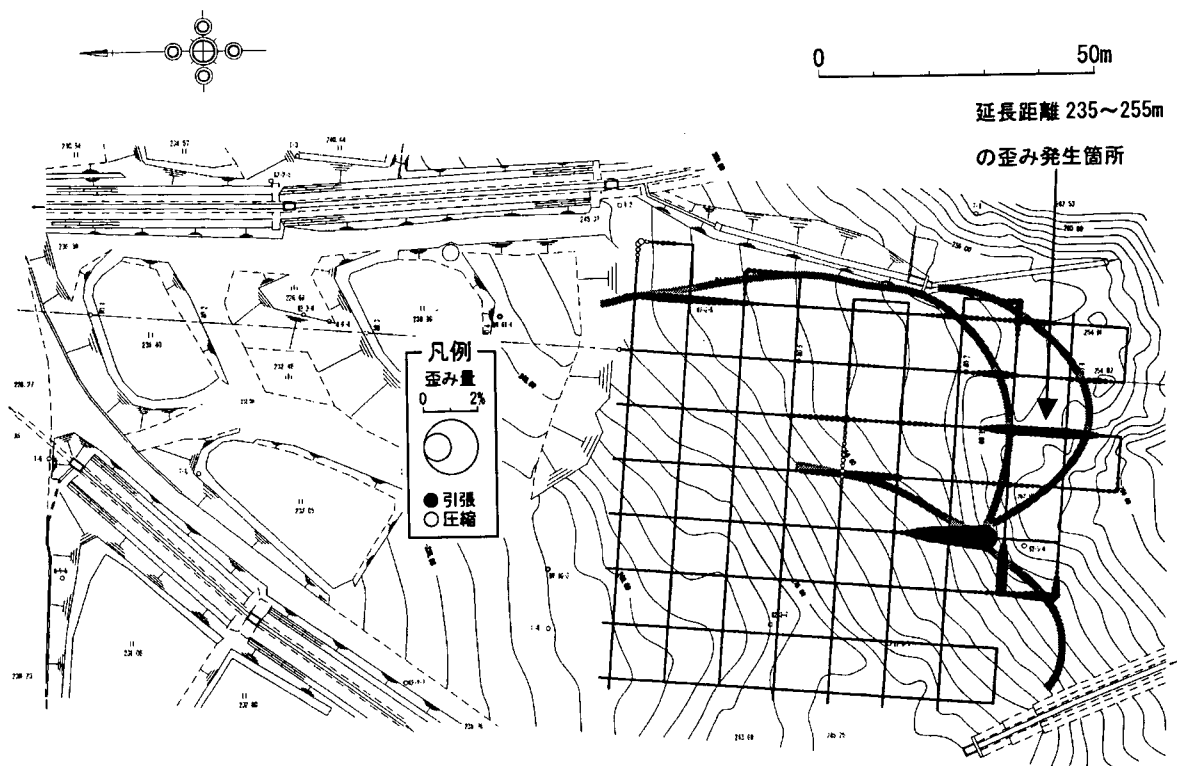
図—3.1.7 地表面変位計測用センサー敷設平面図



図—3.1.8 II系列(固定あり)のファイバーひずみ量



図—3.1.9 II系列(固定なし)のファイバーひずみ量



図—3.1.10 光ファイバーセンサー計測結果によるブロック区分

列)、幅方向に3系列(A~C系列)の7系列とし、それぞれ固定あり・なしの2本ずつ敷設としたため、計14本の光ファイバーセンサーを敷設した。なお、各交点には検証用の移動杭を設置した。

③ 地表面変位計測結果

(i) センサー固定方法による計測結果の違い

1mごとに固定金具を用いた場合と用いない場合の計測結果の違いを分析した。

図—3.1.8は、II系列の地すべり頭部付近における固定金具を用いた場合の歪み量を示したものである。延長距離235mおよび255mに大きな歪みが生じており、地すべりの挙動を捉えているものと考え

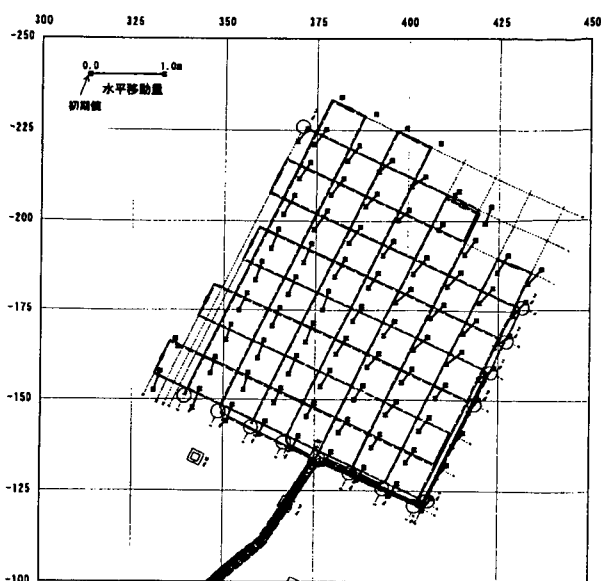
えられる。一方、図—3.1.9 は、図—3.1.8 と同じ位置における固定金具を用いなかった場合の歪み量を示したものである。延長距離 235m では、概ね同様の挙動を示しているが、延長距離 255m の位置では、歪みが分散して計測されている。

これらの結果を比較すると、延長距離が 235m の位置で、固定金具がある場合は約 0.4% に対し、固定金具がない場合は約 0.3%、最大歪み量においても各々 0.47% と 0.4% と、いずれも固定金具がある場合が大きな結果となった。今回得られたファイバー歪み量と移動量の詳細な関係については未検討であるが、ブロック境界の確定に関しては、固定金具を用いる方がより正確な位置を把握できるものと思われる。

(ii) ブロック区分

図—3.1.10 は、敷設したファイバー平面上に得られた歪み量の計測結果（固定金具ありの場合）（平成 13 年 1 月 17 から同年 4 月 26 日の累計）をプロットしたものである。全体的に引張り歪みが主体となっており、地すべり下部が先行して移動しているものと考えられる。また、東・西側の 2 つのブロック頭部を確認することができ、特に東側ブロック頭部は、2 重になっていることが見て取れる。

図—3.1.11 は、ファイバー敷設交点に設置した移動杭の観測結果を示したものである。この結果から、Ⅲ系列頭部の移動量が小さくなっており、ファイバー計測結果のブロック境界が得られていることと調和的である。また、移動杭全体が移動しており、この結果からはブロック区分はできなかった。



図—3.1.11 移動杭観測結果

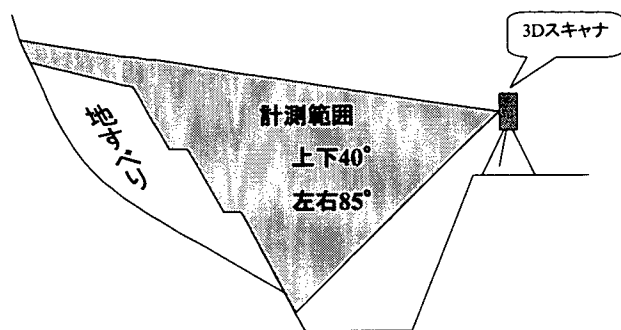
3. 2 3次元レーザーミラースキャナーによる地すべり移動計測

1) 調査の背景およびスキャナーの概要

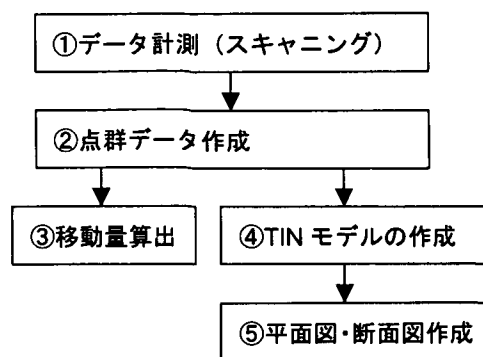
地すべり災害が夜間に発生した場合や二次災害の危険性が高い場合には、危険区域内での機器の設置や計測は困難となる。こうしたことから、地すべりの動態観測にあたり、安全性を確保しながら計測が可能な調査・計測手法の実用化が望まれている。

地すべり地外から非接触で地形のスキャニングが可能な 3 次元レーザーミラースキャナー（以下、3D スキャナー）は、必要な計測精度を担保できる距離内に計測対象の地すべり地を見渡せる場所があることが前提にはなるものの、安全性を確保しながら比較的容易かつ経済的に地すべり地を計測できる可能性があり、この機器を用いた地すべり挙動把握の実用化が期待される。そこで、ノンプリズム型 3D スキャナーを用いて地すべり地で遠隔計測を行い、3D スキャナーのスキャニングデータより移動量の算出を試みた。

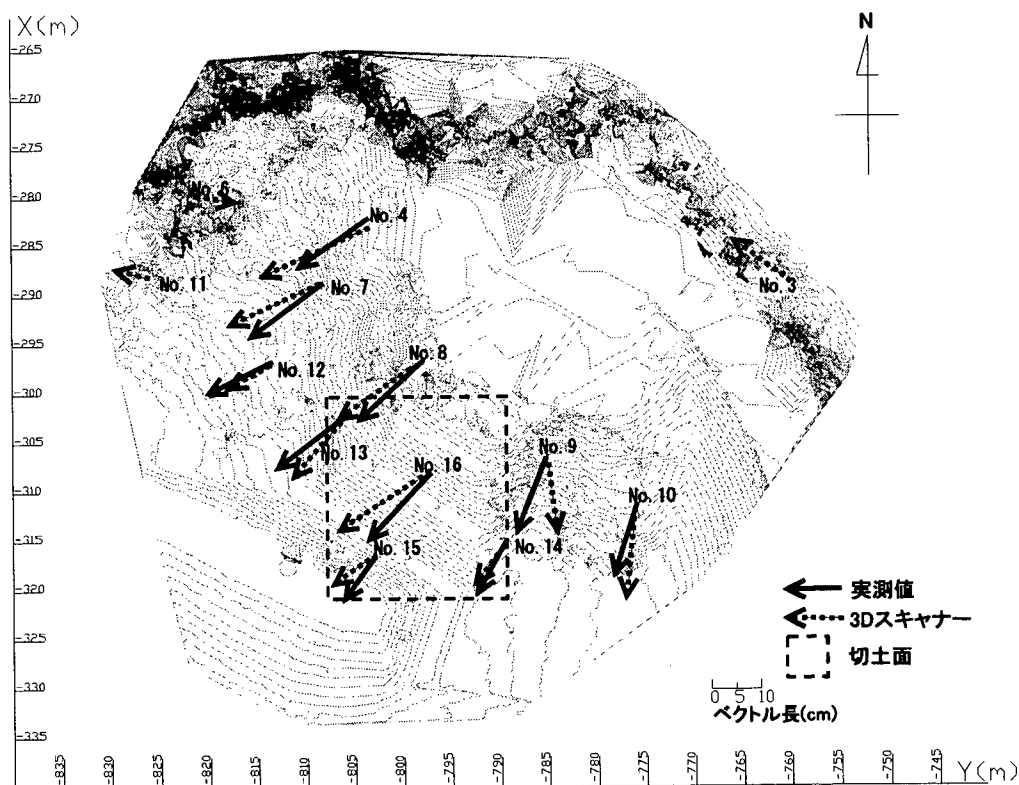
3D スキャナーの原理は汎用的な光波測距儀やトータルステーション等と同じであるが、器械内部のミラーを回転させることによって向きを変え、1 秒間に数千点以上をスキャニングできるように設計されている。また、計測点に反射体を設置しなくても計測は可能で、必要とする縮尺の地形図を迅速に作成することができる。



図—3.2.1 計測のイメージ



図—3.2.2 計測データの解析の手順

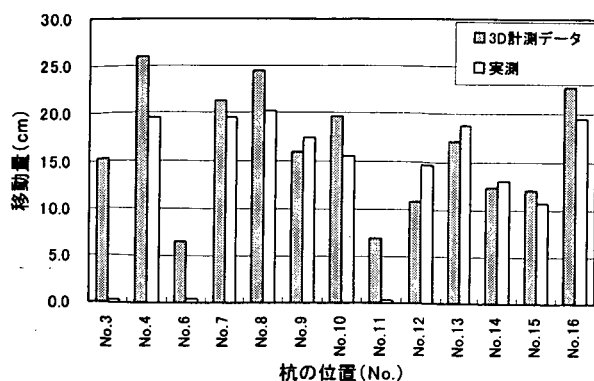


図—3.2.3 移動ベクトル図

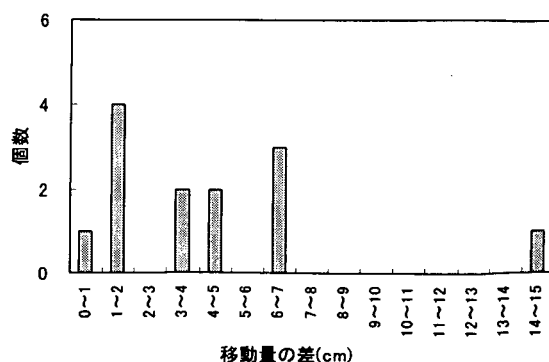
2) 計測方法および解析手順

今回計測した地すべりは、幅約 50m、長さ約 60m の規模である。地すべり斜面の対岸に 3D スキャナーを据え付け、水平方向で 85° の範囲、垂直方向では上下 40° の範囲（水平距離 15～100m の範囲）を計測した（図—3.2.1）。

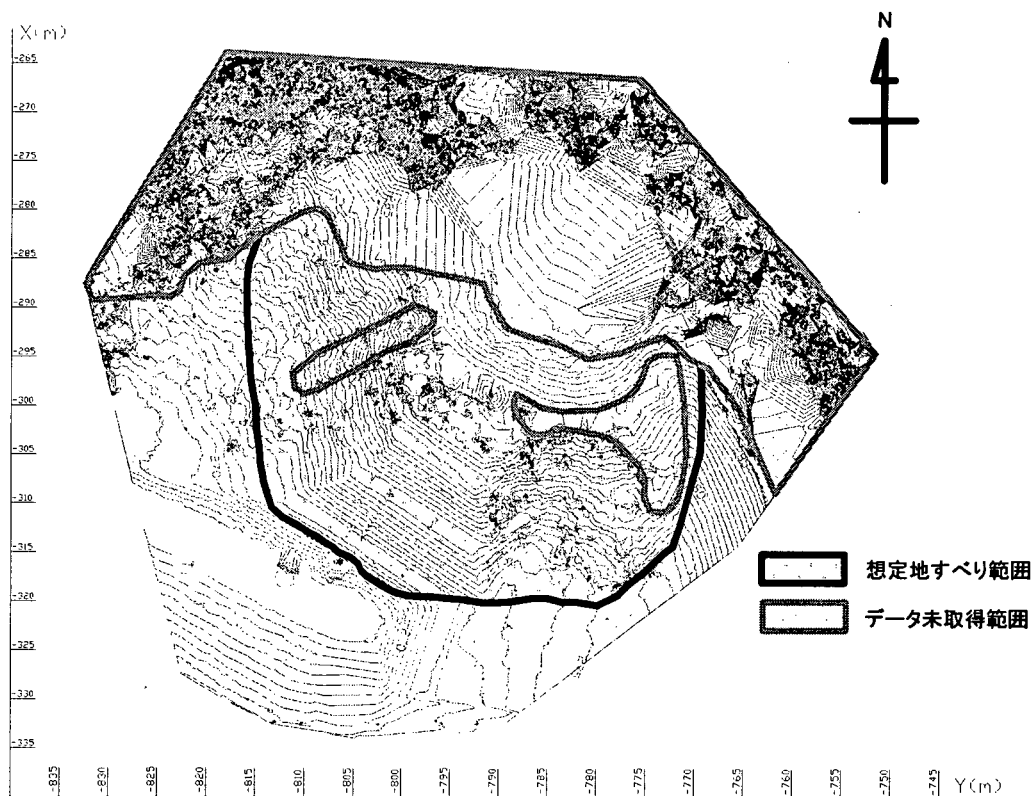
地すべり地には、13 本の移動杭を設置し、トータルステーションによる移動量の計測を予め行っている。この移動杭測定の結果と 3D スキャナーによる計測結果を比較することによって、計測誤差の検証を行った。双方のデータを比較する上では、スキャニングデータ上で移動杭の位置を識別するため、計測データ上に何らかの目印となるものが必要となる。そこで、移動杭位置のレーザーの反射強



図—3.2.4 移動量の計測結果



図—3.2.5 計測誤差の頻度分布



図—3.2.6 地すべり移動範囲図

度を強めて識別性を高めるため、移動杭の頭部に 5 c m 四方の反射シールを貼付した。

3 D スキャナーおよび移動杭の計測は、平成 12 年 11 月 16 日と同年 11 月 24 日の 2 時期に同一地点から行い、この期間の移動量を求めた。なお、今回の計測対象地すべり地は、地すべりの安全率に係わる諸問題を解明するための移動実験が行われた箇所である。実験では、斜面の末端を切土し、頭部に盛土を行い強制的に変位を生じさせている¹³⁾。

計測から解析までの手順は図—3.2.2 に示す通りであり、現地にて計測したデータをパソコンで 3 次元座標系の点群データに変換している。座標変換にあたっては、5 地点 (No.3、No.6、No.10、No.11、No.14) の移動杭測量の座標値をスキャニングデータに与えて変換している。

3) 計測結果および考察

スキャニングデータおよび移動杭測量のデータから求めた移動ベクトルを、平面図上に重ねたものを図—3.2.3 に示す。移動ベクトル長さは、移動杭設置位置（13 点）の 2 時期（11 月 16 日と 11 月 24 日）の平面座標値の差を示している。3 D スキャナーによる計測結果は、トータルステーションによる移動量の計測結果（以下、実測値）と概ね同じ傾向を示しているものの、不動点（No.3、6、11）においても移動量が計測されている。不動点での移動方向を見るとレーザーの照射方向と概ね直交している。また、No.4 の位置では、双方のベクトルの始点にズレが生じている。ズレが生じた原因としては、地表面の凹凸による計測の誤差、座標変換に伴う誤差が考えられる。

これら実測値と 3 D スキャナーの移動量計測結果を図—3.2.4 に、3 D スキャナーによる計測誤差の頻度分布を図—3.2.5 に示す。図—3.2.5 は、実測値を正確な値とした場合の 3 D スキャナーによる計測結果との差を計測誤差として示したものである。No.3 の地点では 15.0cm の計測誤差が生じているが、それ以外の結果は概ね 15～20cm の実測値に対して 7cm 未満の計測誤差であった。

計測誤差が生じる要因としては、(i)計測条件（天候、計測距離、計測角度）に伴う誤差、(ii)計測毎に器械を設置する際に生じる誤差、(iii)計測結果の差表変換を行う際の既知点の与え方（点数、位置）により生じる誤差、(iv)既知点の画像上の判読誤差、(v)使用した器械の精度が考えられる。器械の精度は $2.5\text{cm} \pm 20\text{ppm} \times \text{計測距離}$ であり、計測距離が 100m の場合は $\pm 2.7\text{cm}$ の誤差が生じている可能性がある。したがって、今回の計測結果は、使用した器械以外の要因による誤差が大きかったと考えられる。

スキャニングデータを基に作成した移動前後の平面図を重ね合わせたところ、移動範囲の把握が可能であった。図—3.2.6 に 2 時期の 3 D スキャナーの計測結果から推定された地すべり移動範囲を示す。斜面上部付近は平坦な地形のため計測できない部分があったが、本計測手法により地すべり末端の移動境界の判別が可能であった。

4. まとめと今後の課題

ここまで、流域土砂環境の把握技術および地すべり監視技術に関して、近年土木研究所が関係して実施してきた幾つかの研究・開発事例を紹介してきた。以下に各技術の現状での適用性を整理するとともに今後の課題について少し触れたい。

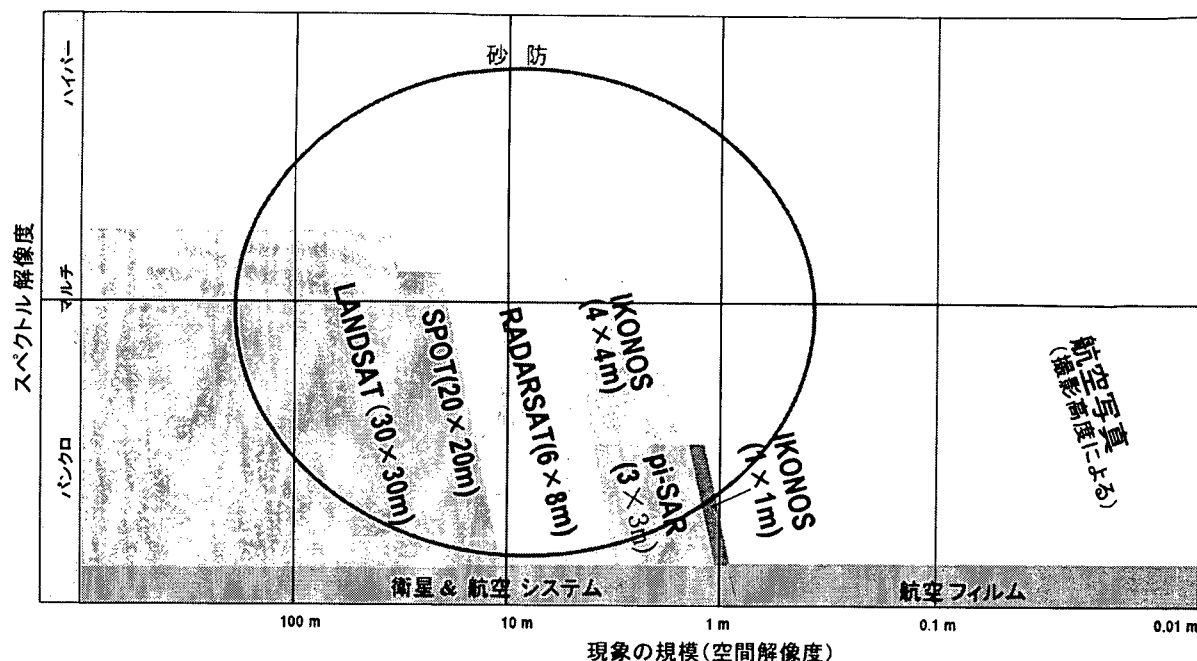
4. 1 流域土砂環境の把握技術

有珠山噴火災害調査で用いられたリモートセンシング技術のうち、2. 2 で紹介したヘリコプター搭載型のレーザースキャナーによる地形計測手法については、計測精度および機動性の観点からしても、砂防調査へ導入することの有効性は十分に認められ、また、計測およびデータ加工技術も既に実用の段階に入っていると考えている。今後、土砂移動現象に応じた利用の拡大が期待される。

一方、有珠山の火山災害や台湾の地震災害調査で用いられた各種の衛星データについては、現状においては一部を除き、空間分解能（精度）不足や解析・利用技術の未発展、信頼性の不足といった問題を抱えていると言わざるを得ない。

図—4.1.1 は、砂防の分野で必要な情報と各種リモートセンシング技術のカバーエリアのイメージを概念的に表したものである。ここで、横軸は現象の規模（＝空間解像度）を意味し、縦軸は現象の特徴（＝スペクトル解像度）を意味している。また、図中の楕円は、砂防の分野全体としての現象の範囲をイメージして描いたものである。この図から、砂防の分野において必要とされる現象の規模（空間解像度）の範囲が広いこと、また、有益な情報を得るために必要なスペクトル解像度の範囲も広い

ことが分かる。それに対し、現状のリモートセンシング技術でカバーできる範囲は限られている。



図—4.1.1 砂防分野に必要な情報とリモートセンシング技術のイメージ図

表—4.1.1 航空宇宙技術を用いた砂防調査手法として有効なもの例

地形計測 (鉛直方向の計測。土砂量 算出の目安となる物)	・レーザープロファイラー (標高精度 0.15~0.3m) ・空中写真測量 (標高精度 5.0m) 1 万分の 1 空中写真をコンピューターによるステレオマッチングで処理した場合
地表面観測 (画像情報)	・大縮尺空中写真 (5 千分の 1 ~ 1 万分の 1) 11km 四方まで ・高分解能衛星 IKONOS の画像 (1m パンシャープン画像) 11km 四方以上 ・SPOT 衛星の画像 60km 四方以上 ※広域の概査に適用 ・PI-SAR Xバンドの偏波を利用した高解像度カラーレーダー画像 ※但し研究機関所有

厳しい見方をすれば、航空宇宙技術を用いた砂防調査手法のうち、現状において有効に活用できるものは表—4.1.1 に例として示したものなどに限られてしまうのが現状である。ただし、災害時を想定した場合、これらにおいても気象条件や観測スケジュールに左右されて、要求時にデータが入手できず、意志決定に間に合わないことがある。また、光学系センサーのスペクトルデータを用いた解析や干渉 SAR を用いた地形計測などは未だに研究段階のものであり、これならほぼ確実に分かる、砂防に使えるといった確立された手法はほとんどないと言っても過言ではない。

今後より高精度のセンサーを搭載した衛星の出現が待たれるところであるが、衛星データ活用が一般化されるには、それ以外の技術的課題も多く残されているので以下に主なものを列記する。

- ・高精度に画像を重ね合わせる技術が必要：土砂災害の多発する山間地等では、ポインティング撮影による画像の歪みが大きく、また、グランドコントロールポイント (GCP) となる地点の抽出が困難
- ・衛星の軌道を高精度に制御する技術が必要：干渉 SAR 処理に適した基線長の短いデータが少ない。
- ・崩壊地等の自動抽出精度を向上させるアルゴリズムや閾値の設定技術が必要：現状のマルチスペ

クトル解析では誤判読が多く精度不足

4. 2 地すべり監視技術

光ファイバーセンサーを用いた地すべりの面的監視に関する基礎的実験では、光ファイバーセンサーが、地表変動解析に応用可能であることが確認できたが、センサーの設置・取り付け方法については、紹介した方法以外にも様々なものが考えられる。したがって、今後は、計測事例を増やすことにより、より良い方法を見極めて行く必要がある。

また、基礎実験を踏まえて沖見地すべり地で実施している現地計測では、移動杭では把握できなかったブロック境界を捉えることができ、地すべり発生時の初動体制確立やブロック区分の確定に有効であることが分かった。しかし、計測によって得られた歪み量と実際に生じている変位量の関係、移動方向の把握等の課題が残されており、他の方法との比較などを含めてより詳細な検討を実施する必要がある。

現段階では、光ファイバーセンサーを用いた地すべりの面的監視技術は、まだ一般化できるレベルには達していないが、その特徴を活かせば、他の計測手法との組み合わせにより総合的な面的監視技術のレベル向上に大きな寄与が期待される。したがって、より多くの現場での計測実績を蓄積しつつその適用性をより詳細に明らかにすることが必要であり、そのためには、普及を促す最低限のマニュアル類の早期作成が必要になるものと思われる。

次に、脚部の切土および頭部の盛土により強制的に発生させた地すべりに対して実施した3次元レーザーミラースキャナーによる地すべり移動試験計測では、トータルステーションにより計測した移動杭の移動方向と整合性が相当高い結果が得られ、また、地すべり移動範囲の面的な把握も可能という結果が得られた¹⁴⁾。つまり、変位量の大きい地すべりを非接触で安全かつ経済的に面的監視できる手法の一つとなる可能性が高いことが確認できた。

ただし、今回は1方向からの計測であったため、地すべり地全体のデータ取得はできなかったが、複数方向からの計測でより広い範囲を計測することで全体をカバーすることが可能になると考えられる。また、地表面の凹凸による精度の低下に関しても、複数方向からの計測により精度の向上を図れると考えられることから、今後精度の向上に向けて計測方法の検討を進める必要があると考えている。

上記のような課題解決の余地は残されているものの、対象地すべりの挙動把握のための要求精度を確保できる3Dスキャナーの設置場所等の条件が満たされれば、直ちに実用に供することが可能な技術と認識している。地すべり災害に対する危機管理体制強化の観点から、この手法が広く活用されることが期待される。

5. おわりに

近年土木研究所が調査・研究等に係わった土砂災害監視技術に関して、空からのリモートセンシング技術を用いた流域土砂環境の把握技術および光ファイバーセンサーや3Dレーザーミラースキャナーを用いた地すべり監視技術の動向と今後の課題を述べた。

砂防の分野における衛星データの適用性については、現時点ではやや悲観的なまとめとなったが、航空宇宙技術の進歩は日進月歩である。高性能センサーを搭載する商用衛星の打ち上げが数多く予定されており、また、わが国の次期陸域観測衛星ALOSの打ち上げ準備も進んでいる。今後なすべきことは、現状より優れた空間分解能や多バンド機能を持つセンサーを搭載する衛星の出現を期待するだけでなく、4. 1で述べたような技術的課題の解決に積極的に取り組むことが重要であろう。

引用・参考文献

- 1)北海道建設部：平成 12 年（2000 年）有珠山噴火半年の軌跡、平成 12 年 10 月
- 2)青山ほか：航空宇宙技術を用いた平成 12 年有珠山噴火災害の調査・研究、平成 13 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.464-465、(社) 砂防学会、平成 13 年 5 月
- 3)仲野ほか：2000 年有珠山噴火時におけるヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形変化測定、砂防学会誌、Vol.53、No.6、pp.88-94、平成 13 年 3 月
- 4)福嶋ほか：衛星リモートセンシングによる斜面崩壊等の監視手法の検討、土木技術資料 Vol.43、No.3、pp.54-59、平成 12 年 6 月
- 5)Wen-Neng WANG ほか：A Photogeologic Study on the Earthquake-induced Slope Failure in Central Taiwan on September 21, 1999、第 39 回日本地すべり学会研究発表会地すべり 2000 講演集、pp.417-420、平成 12 年 8 月
- 6)石川ほか：光ファイバを用いたのり面・斜面変状検知システム、土木技術資料、Vol.34、No.12、pp.46-51、平成 4 年 12 月
- 7)倉嶋ほか：光ファイバセンサを用いたコンクリート構造物の歪み分布測定、応用物理学会第 19 回光波センシング技術研究会、LST19-4、pp.23-29、平成 9 年
- 8)(財)河川情報センター：河川施設管理用光ファイバセンサの開発、174p.、平成 10 年
- 9)杉本宏之：光ファイバセンサを用いた地すべり移動量測定技術の開発、土木研究所資料第 3760 号、第 39 回土木研究所研究発表会論文集、pp.37-40、平成 12 年 12 月
- 10)杉本ほか：光ファイバによる地すべり計測の基礎実験、地すべり学会誌、Vol.38、No.1、pp.24-29、平成 13 年 6 月
- 11)吉田ほか：光ファイバセンサを用いた調査・計測方法に関する検討（その 1）、第 40 回地すべり学会研究発表会地すべり 2001 講演集、pp.287-290、平成 13 年 8 月
- 12)井良沢ほか：同上（その 2）、同上、pp.291-294、同上
- 13)綱木ほか：地すべりの载荷移動実験、土木技術資料、Vol.43、No.6、平成 13 年 6 月
- 14)浅野ほか：3D レーザースキャナーによる地すべり移動量計測の検討、第 40 回地すべり学会研究発表会地すべり 2001 講演集、pp.279-282、平成 13 年 8 月

[研究成果報告]

道路斜面のリスク評価・マネジメント技術の開発

研究総括：材料地盤研究グループ長

三木 博史

材料地盤研究グループ主任研究員（地質）

佐々木靖人

土砂管理研究グループ主任研究員（地すべり）

浅井 健一

材料地盤研究グループ研究員（土質）

加藤 俊二

材料地盤研究グループ研究員（土質）

田中 衛

目 次

1. 「新道路技術五箇年計画」	87
2. 研究の目的・意義と概要	87
3. 研究開発体制	88
4. 中間成果	89
4. 1 ハザード評価技術	89
4. 2 影響軽減技術	96
4. 3 予知技術	100
4. 4 リスクマネジメント技術	107
5. まとめと今後の課題	110
6. 謝辞	110
参考文献	111

道路斜面のリスク評価・マネジメント技術の開発

材料地盤研究グループ長	三木博史
材料地盤研究グループ主任研究員（地質）	佐々木 靖人
土砂管理研究グループ主任研究員（地すべり）	浅井 健一
材料地盤研究グループ研究員（土質）	加藤 俊二
材料地盤研究グループ研究員（土質）	田中 衛

1. 「新道路技術五箇年計画」

国土交通省道路局と国土交通省国土技術政策総合研究所および独立行政法人土木研究所では、1998年（平成10年）度から2002年（平成14年）度までの五箇年計画で、「新道路技術五箇年計画」を進めている。

この計画では、①道路環境の改善、②道路と生活の安全・安心の向上、③道路交通と道路事業の効率性の向上、④アカウンタビリティの向上に関する技術研究開発項目を13テーマに絞り込み、研究予算を重点的に充当している。

本稿は、このうち、②道路と生活の安心・安全の向上の1テーマとなっている「岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術」に関する研究開発の動向を紹介するものである。

2. 研究の目的・意義と概要

我が国に存在する膨大な数の道路斜面（法面を含む）について、限られた財源や管理体制の下で効率的かつ効果的な防災管理を実現するために、岩盤・斜面崩壊に対する合理的なリスク評価手法・マネジメント手法の開発が求められている。

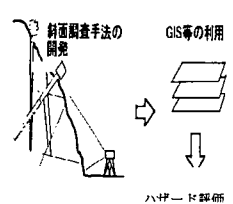
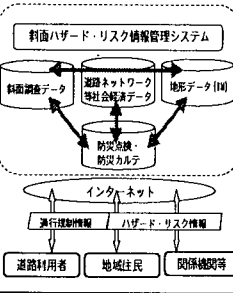
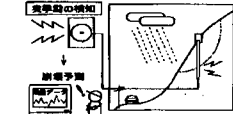
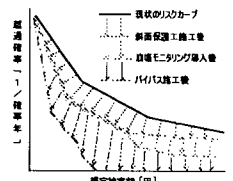
すなわち、技術面においては、GISなどの先端技術を活用したハザード評価技術の構築、斜面モニタリング技術の開発、事前通行規制の高度化などを行うとともに、道路斜面防災対策のアカウンタビリティ（説明責任）向上の面からは、斜面崩壊のリスクを適切に評価・提示し、各種防災対策の投資効果や優先度を明確にすることが必要である。

そこで本研究開発では、道路斜面防災対策を①ハザード評価技術（抽出）、②影響軽減技術（管理）、③予知技術（監視）、④リスクマネジメント技術（説明責任）の4つの側面から捉えて、それぞれに必要な要素技術に関する研究開発を実施している。

表-1に、個別要素技術（A～L）の概要を、また図-1に、これらの個別要素技術の関連性や研究開発全体のなかでの位置付けをまとめた研究体系図を示す。図中のアルファベット（A～L）が、表-1中の個別要素技術に対応している。

これらに示すように、本研究開発では、道路斜面情報データベースに基づくハザード抽出支援システムと意志決定支援システムの開発に力点を置きつつ、従来から築きあげてきた防災カルテ等による日常管理、監視強化、降雨事前通行規制といったアクションプログラムの高度化をめざしている。

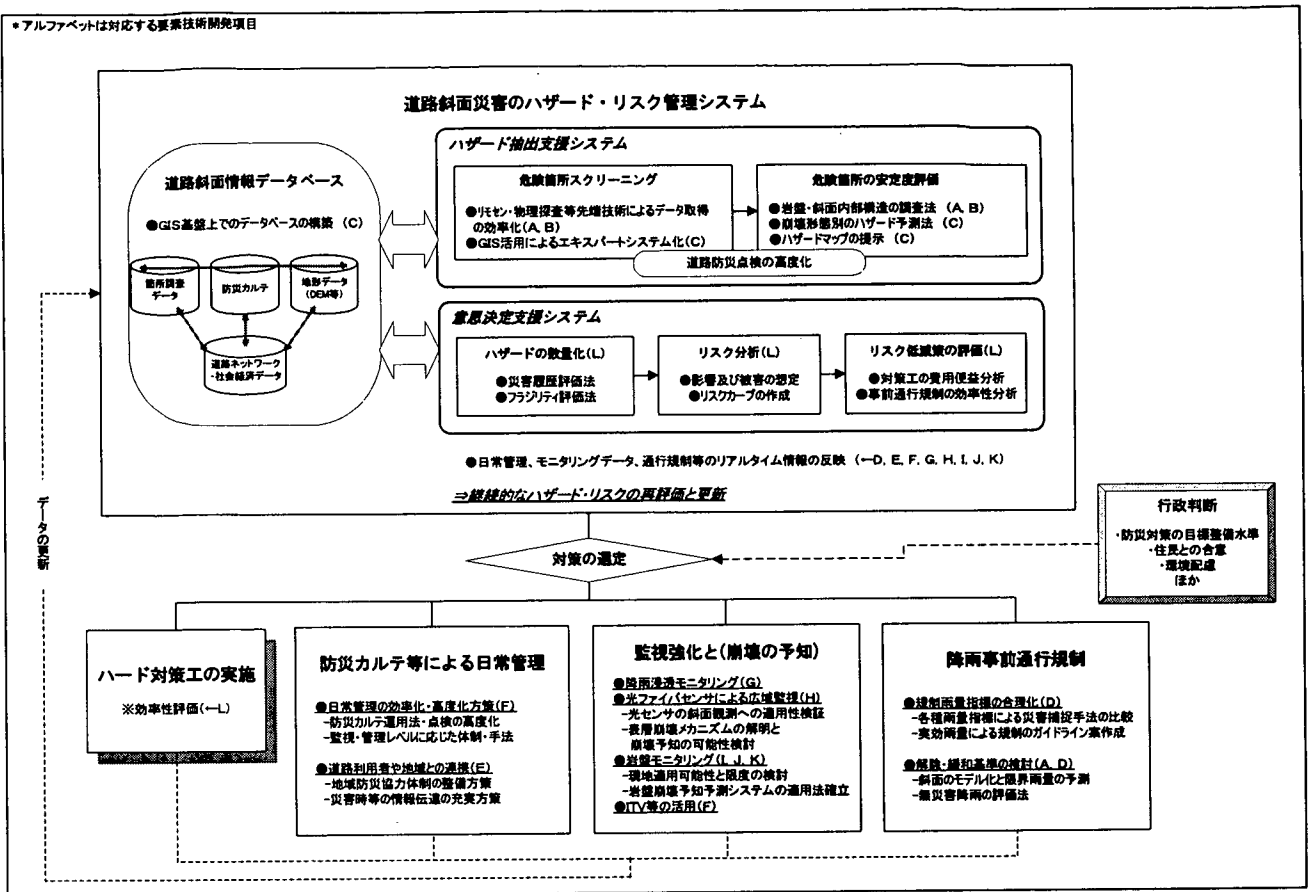
表－１ 個別要素技術の概要

技術開発項目		実用化イメージ	要素技術開発	
ハザード評価技術 (抽出)	岩盤・斜面の内部構造調査、安定度評価技術		A 斜面安定度調査の効率化・簡素化技術の開発	斜面安定度の簡易調査手法の開発 落石・崩壊のハザード評価における先端技術活用手法の開発
			B 岩盤内部構造の探査手法の開発	17トレーサー試験・リモートセンシング・物理探査手法等の開発 各種探査法を用いた不安定岩盤斜面選定法の確立
			CGIS 活用技術の開発	斜面ハザード評価への GIS 技術の活用手法の開発 GIS を活用した斜面ハザード・リスク情報管理システムの開発
影響軽減技術 (管理)	斜面防災管理を効率化、高度化する技術		D 事前通行規制手法の高度化	事前通行規制手法の見直し検討 無災害降雨履歴・限界雨量指標の評価方法の検討 新しい事前通行規制手法の試行
			E 道路利用者や地域との連携手法他ソフト対策の検討	道路利用や地域との連携手法他ソフト対策の検討
			F 日常管理の高度化	日常管理の効率化・高度化方策の検討 新しい日常管理手法の試行
予知技術 (監視)	斜面表層崩壊のモニタリング技術		G 降雨浸透モニタリング手法の開発	降雨浸透モニタリング手法の開発
	岩盤崩壊のモニタリング技術		H 斜面表層崩壊のモニタリング手法の確立	光ファイバセンサを用いた斜面広域監視システムの開発 斜面表層崩壊メカニズムの推定
			I 岩盤斜面の計器観測	岩盤斜面の計器観測の実施及びデータ解析
技術(説明責任)	合理的なリスク評価・マネジメント技術		J 岩盤モニタリングの現地適用可能性と限度の検討	岩盤モニタリング手法(崩壊予測・安定度評価)の現地使用可能性と限度の検討
			K 岩盤崩壊予測、モニタリング手法の評価及び確立	岩盤崩壊予知予測システムの改良と適用法の確立
			L 合理的なリスク評価・マネジメント手法の導入	岩盤・斜面崩壊のリスク評価数量化手法の構築 対策優先順位の決定及び対策の合理的な選定手法の検討 モデル路線におけるリスク評価・マネジメントの試行 防災対策目標整備水準の検討

3. 研究開発体制

本研究開発のタスクマネージャーは本省道路防災対策室の野崎課長補佐と土木研究所材料地盤研究グループ長の三木が務めており、土木研究所からは材料地盤研究グループの土質チームと地質チーム、土砂管理研究グループの地すべりチームが研究開発に参画している。

また、岩盤・斜面のモニタリング技術や内部構造調査手法、GIS の活用技術、事前通行規制手法、新しいリスク評価・マネジメント手法の開発については、本省や各地方整備局と連携・分担し、試験フィールドにおける現地試験やモデル区間における試行を行っている。さらに、「GIS を活用した道路斜面のリスク評価技術」については民間 6 社と、また「光ファイバーセンサを活用した道路斜面モニタリング技術」については民間 14 社（6 グループ）と共同研究を実施している。そして、学識経験者、本省、土木研究所、各地方整備局、日本道路公団等の委員からなる技術検討委員会（委員長：奥園誠志九州産業大学教授）を設置し、研究開発全般に関する審議を行っている。



図ー1 新道路技術五箇年計画 重点項目「岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術」 体系図

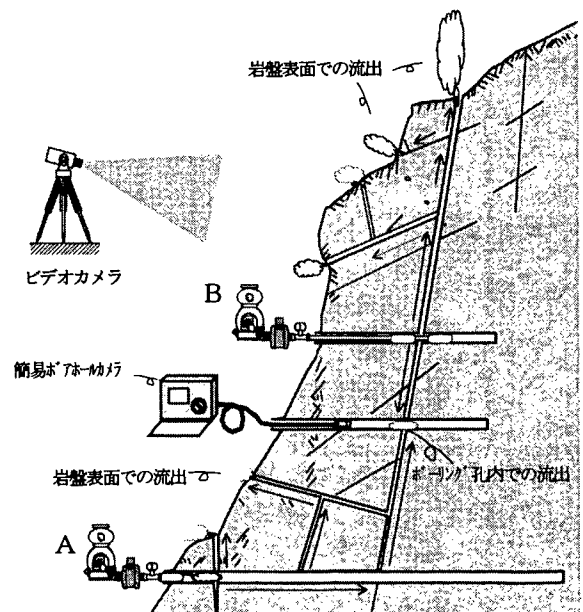
4. 中間成果

これまでに得られた成果の主なもの、次のとおりである。

4. 1 ハザード評価技術

(1) 岩盤内部構造の探査手法の開発

岩盤斜面のハザード評価においては、岩盤斜面の形状、岩質分布、ならびに亀裂分布を適切に把握することが基本であるが、急峻な地形や地質の不均質性により、これらを正確に把握することは困難なのが現状である。そこで本研究では、①岩盤斜面形状の迅速な調査技術、②岩盤表面の岩質の迅速な調査技術、③岩盤内部の亀裂分布の調査技術、を主目標として研究を進めている。この結果、①については既存技術である地表等からの3次元レーザー測定技術が利用できるため、岩盤斜面での活用法を検討している。また、②と③については適当な既存手法がないことから、②については可視ならびに近赤外ス



図ー2 エアートレーサー試験の方法

A : 簡易エアートレーサー試験

B : 区間エアートレーサー試験

ペクトル映像を用いた岩質判定技術（スペクトルカメラ）、③については空気を利用した開口亀裂の連続性調査技術（エアートレーサー試験）を、それぞれ本研究で新たに開発した。ここでは既に特許公開されているエアートレーサー試験（特許公開 2001・152778 岩盤中の亀裂探査方法）について報告する。

1) エアートレーサー試験の概要

岩盤斜面の安定性は岩盤内の開口亀裂の分布に強く依存する。しかし既存の調査法では岩盤内部に発達する亀裂の連続性を的確に把握することは困難であった。そこで本研究では、トレーサーを混入した空気を開口亀裂に挿入し、流出地点の3次元分布や到達時間、トレーサーの量や濃度などから開口亀裂の連続性を明らかにするエアートレーサー試験を開発した（図-2）。この試験方法を活用することにより、岩盤斜面内部の亀裂の連続性が明らかになるとともに、ゆるみの範囲や崩壊メカニズムの推定が可能となることがわかった。

この調査法は、簡単で解りやすく迅速に作業できることもあり、岩盤斜面の防災対策の飛躍的な発展が期待できる。

2) エアートレーサー試験の試験装置

装置の基本構成は図-3に示すとおりである。装置は、送風機、計測装置、トレーサー混合装置、ダクトホース、岩盤表面やボーリング孔等の開口亀裂への挿入部分（ロッド、パッカー等）より構成される。

3) トレーサーの挿入方法

トレーサーの挿入方法は以下の3種類に分けられる。

①送風機を用いて岩盤表面の開口亀裂に直接挿入する方法

この方法は、ボーリング孔のない岩盤斜面などで概略的に調査する方法である。岩盤表面の開口亀裂の形状は様々なので、挿入部分は形状に合わせて取り替えが可能なものとしている。また、岩盤内部にトレーサーが効率的に挿入できるように、挿入部分周辺を粘土等で塞ぐことが多い。

②送風機を用いてボーリング孔内の開口亀裂に挿入する方法

ボーリング孔を利用して調査をする場合、2通りの方法がある。1つはボーリング孔内全体にトレーサーを挿入する方法であり、流出する亀裂箇所の大まかなチェックを行うことを目的とする。もう1つはボーリング孔内の開口亀裂の位置をボアホールカメラで確認した後に、ダブルパッカーで前後を閉塞してトレーサーを挿入する方法であり、特定の亀裂の連続性をチェックすることを目的とする。

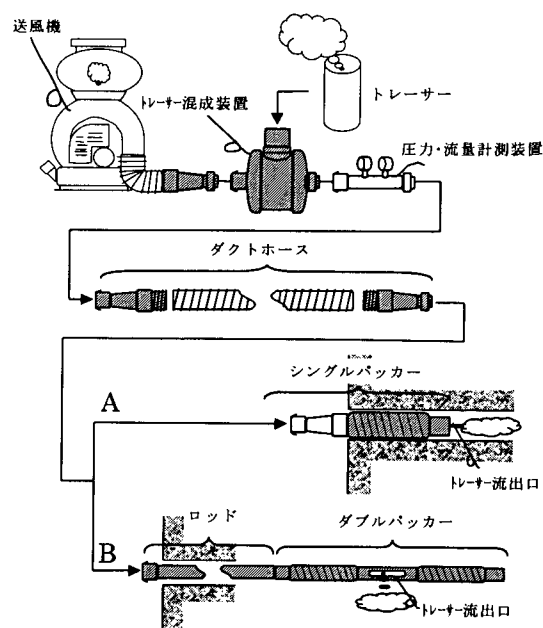


図-3 装置の構造

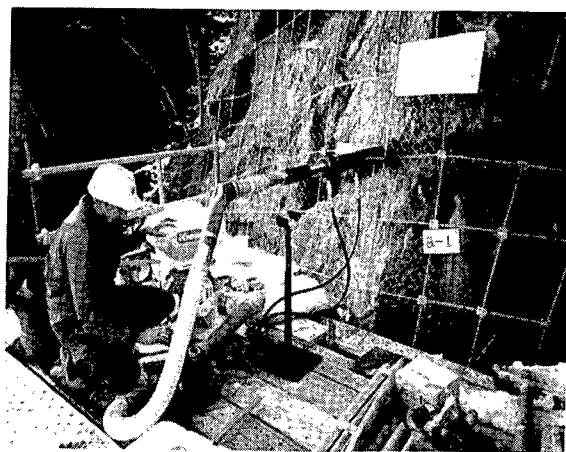


図-4 ボーリング孔を用いた試験の状況

③自然の空気の流れを用いてトレーサーを移動させる方法

岩盤斜面が大規模な場合は、送風機能力ではトレーサーが広域に拡散しない。しかし岩盤中には、外気温と岩盤内温度の差により空気の流れが生じていることがあるので、これを利用してトレーサーを移動させる方法である。

4) トレーサーの観察方法

①地表面での観察

煙をトレーサーとした場合の流出地点の確認は目視やビデオカメラを用いる。トレーサー到達地点における煙の流出濃度は、最初は非常に薄い状態で、徐々に濃い煙へと変化する。トレーサーの流出の確認は、ビデオカメラの映像より目視観察の方が一般に早く、また日照、距離、ビデオカメラの種類、映像を再現するモニターの種類によっても確認できる時間は異なるので、観測の統一が取れるよう現地においてチェックを行う必要がある。

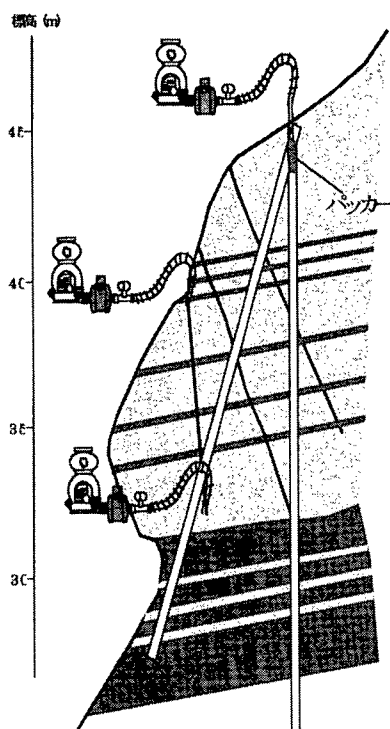


図-5 調査地の断面図

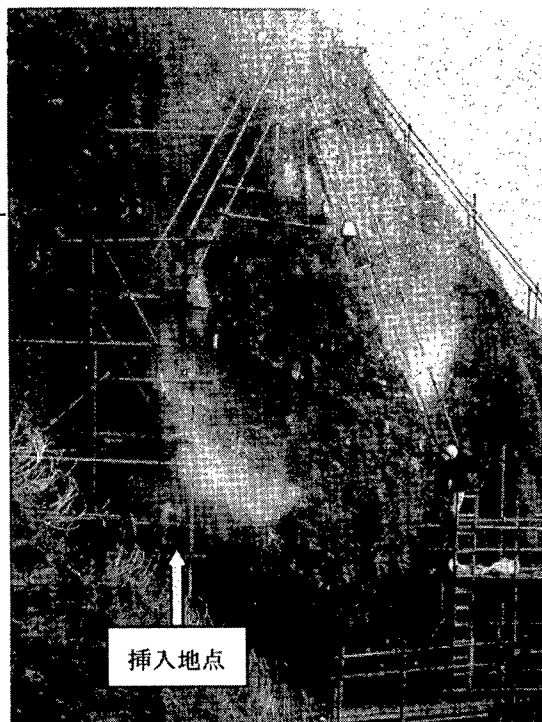


図-6 亀裂3からの試験状況

②ボーリング構内での観察

ボーリング孔内でのトレーサー流出の観察は、ボアホール型のビデオカメラを挿入して行う。

5) 現地適用事例

エアートレーサー試験の現地適用性と適用方法を検討するためにこれまで 10 数箇所の岩盤斜面において現地適用実験を行った。それぞれの岩盤におけるゆるみの形態は様々であるが、わかりやすい適用事例として、ゆるみの形態が単純な例を紹介する。

調査地は日本海に面した山形県の岩盤斜面である。調査地は、比較的軟らかい凝灰角礫岩質よりなる海食崖の一部が緩んで、開口幅 10cm ほどの開口亀裂によって囲まれた高さ 8m、幅 5m、奥行き 3m の分離岩塊を形成している (図-5)。この岩盤表面の開口亀裂とボーリング孔にトレーサーを挿入して開口亀裂の連続性を特定し、分離する岩塊を調査した。

図-5 に示す開口亀裂の各位置にトレーサーを挿入した。図-6 は岩盤表面の開口亀裂にトレーサーを挿入したときの周辺の流出状況である。流出は挿入地点から近い亀裂より始まり、順

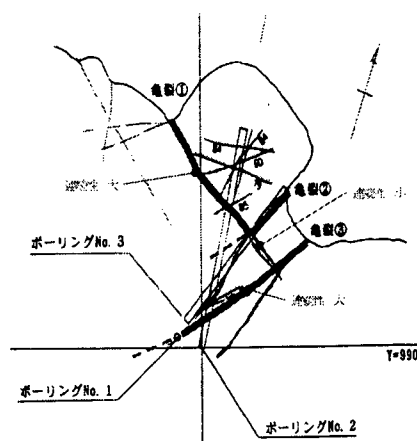


図-7 本試験により推定された亀裂の連続性(上部からのスライス図)

次亀裂全体へと広がった。最終的にトレーサーは図-6中央のブロックの上半部を取り囲むように流出し、このブロックのゆるみが進行し分離した岩塊を形成しつつあることを裏付ける結果が得られた。各地点への移動速度は 0.2m/sec 程度で、開口亀裂内がほぼ均一に開いていることを示している。下部での流出が乏しいのは、その部分が開口していないためである。岩盤表面の開口亀裂の状況を含めて考えると、岩盤は全体としてトップリング状の変形をしていると考えられる。なお、トレーサーは最終的にはこのゆるみブロックの更に奥の亀裂でも流出した。ただし、トレーサーの見かけ移動速度は 0.02m/sec とはるかに遅く、流出量も少ないことから、直接の連続性はなく、複数の亀裂を経由して到達したものと解釈した。最終的に、亀裂の連続性は図-7のように推定された。

6) 開口亀裂の解釈方法

エアートレーサー試験の観測値としてはトレーサーの移動距離や

移動時間、トレーサーの流出量や濃度等があり、このような観測値を解析することで、開口亀裂やゆるみの性状を定量的に推定できる可能性がある。そこでこれらから開口亀裂の性状を解釈する方法を検討している。なお、経験的には、両者には表-2のような関係がある。

7) まとめ

本調査法の利点をまとめると以下のとおりである。

- ①微細な開口亀裂から大きな開口亀裂までの連続性の検証が可能。
- ②ゆるみの分布や性状を複数の観測要素から判断できる。
- ③機器が簡単で、短時間に試験可能。
- ④煙をトレーサーに活用した場合、流出を目視で迅速に確認できる。
- ⑤自然の空気の流れを用いると 100m 以上の亀裂の連続性を確認することができる。
- ⑥目詰め工などの施工の確認も可能。

しかし岩盤中の空気の流れは複雑であるため、試験結果を合理的に解析し、岩盤の安定度を適切に評価する方法については、今後、より詳細に検討を行う必要がある。最終的には、人工亀裂岩盤によ

エアートレーサー試験の結果					推定される開口亀裂とゆるみの性状	
最大流出範囲	流出パターン	流出量	濃度	流速度	開口亀裂の性状	ゆるみの程度
広い (10m 程度以上)	面的	大量 (煙突の煙のように流出)	様々 (距離による)	様々 (距離や流出経路、自然の空気の流れの有無等による)	内部の平均開口幅数 cm 以上、比較的単純な亀裂系	ゆるみ範囲: 特大 ゆるみ程度: 大 (特大のゆるみ、要注意) (人工工入法の決定限界のため必要に応じ自然の空気の流れを用いるエアートレーサー試験が必要)
	スポット的				内部の平均開口幅数 cm 以上、複数の亀裂系の複合、ないしは亀裂に凹凸がある、開口亀裂の一部が土壌に覆われている、など	
中程度 (数 m ~ 10m 程度)	面的	大量	濃い ~ 中程度	様々 (距離や流出経路による)	内部の平均開口幅数 cm 以上、比較的単純な亀裂系	ゆるみ範囲: 大 ~ 中 ゆるみ程度: 大
	スポット的				内部の平均開口幅数 cm 以上、複数の亀裂系の複合、ないしは亀裂に凹凸がある、開口亀裂の一部が土壌に覆われている、など	ゆるみが発達しており要注意
	面的	小 ~ 中量	中程度 ~ 薄い	一般に速い (大よそ 0.05m/sec 以上)	内部の平均開口幅数 cm 程度、比較的単純な亀裂系	ゆるみ範囲: 大 ~ 中 ゆるみ程度: 中
	スポット的				内部の平均開口幅数 cm 程度、複数の亀裂系の複合、ないしは亀裂に凹凸がある、開口亀裂の一部が土壌に覆われている、など	ゆるみが発達しており要注意
	面的	小量 (タバコの煙程度)	薄い	一般に速い (大よそ 0.05m/sec 以下)	内部の平均開口幅数 mm 程度、比較的単純な亀裂系	ゆるみ範囲: 大 ~ 中 ゆるみ程度: 小 (開口亀裂が連続しており要注意)
	スポット的				内部の平均開口幅数 mm 程度、複数の亀裂系の複合、ないしは亀裂に凹凸がある、開口亀裂の一部が土壌に覆われている、など	ゆるみ範囲: 大 ~ 中 ゆるみ程度: 小 (亀裂の方向性やゆるみのモードによっては要注意)
狭い (1 ~ 2m 程度)	面的ないしスポット的	大量	濃い	一般に速い	内部の平均開口幅 1 ~ 数 cm 以上	ゆるみ範囲: 小 ゆるみ程度: 大 (落石等、注意)
		小 ~ 中量	中程度 ~ 薄い	一般に速い	内部の平均開口幅数 mm 以下 (通常 2 ~ 8mm 程度)	ゆるみ範囲: 小 ゆるみ程度: 小 (流出箇所がブロックを取り囲む形状ではあり問題ない)
流出ほとんどなし (または数 10cm 以内)					内部の亀裂がほぼ密着	ゆるみなし

表-2 エアートレーサー試験とゆるみ性状の関係の試案

るモデル実験や数値シミュレーションの結果も含め、定量的な解釈技術を検討する。本試験方法およびその解析方法に関するマニュアルを作成する予定である。

(2) GIS活用技術の開発

道路斜面の合理的なリスクマネジメントを実現する上では、路線周辺の危険斜面とその危険度を見逃しなく把握するのが基本である。そのためには、これまで蓄積した防災カルテなどの斜面データを活用するとともに、不足するデータを効率よく取得し、斜面ハザードマップを作成した上でその活用を図る必要がある。このとき、道路斜面のデータは膨大であり、ほとんどのデータは位置情報を伴うため、GIS（地理情報システム）を活用するのが効果的である。そこで本研究では、GISを活用した道路斜面のハザードマップ作成及び道路管理への活用を目的として、以下の項目について検討している。

- ①調査技術（ハザードマップ作成のための地形地質等の面的調査技術）
- ②評価技術（斜面の危険度評価及びハザードマップ作成技術）
- ③GIS技術（GISによるデータ管理、ハザードマップ表示、及び活用技術）

1) 調査技術

① 必要データ及び調査技術の整理

ハザードマップの作成及び道路斜面管理において必要なデータを大まかに整理し、データ取得に必要な調査技術を整理した。今後これらをもとに「GIS及びITを活用した道路斜面管理のためのデータ整理要領」（仮称）を作成する予定である。

② レーザー測定による微地形調査

日本の土砂災害の約半数以上は小規模な崩壊であるため、ハザードマップを作成する上では、1/2,500 程度の高精度の地形図と、そのベクトルデータや DEM データの整備が基本となる。この要請を満足する地形調査技術として、航空機レーザー測定技術を選定し、道路斜面への適用性を検討した。図-8に、植生のある斜面の植生繁茂期と落葉期のデータの違いを示す。両者を比較してわかるとおり、データ密度は大きく異なり、その結果、地形図も非常に異なっている。なお、取得されたデータの詳細な検証は今後さらにを行い、最終的にマニュアルに反映させる予定である。

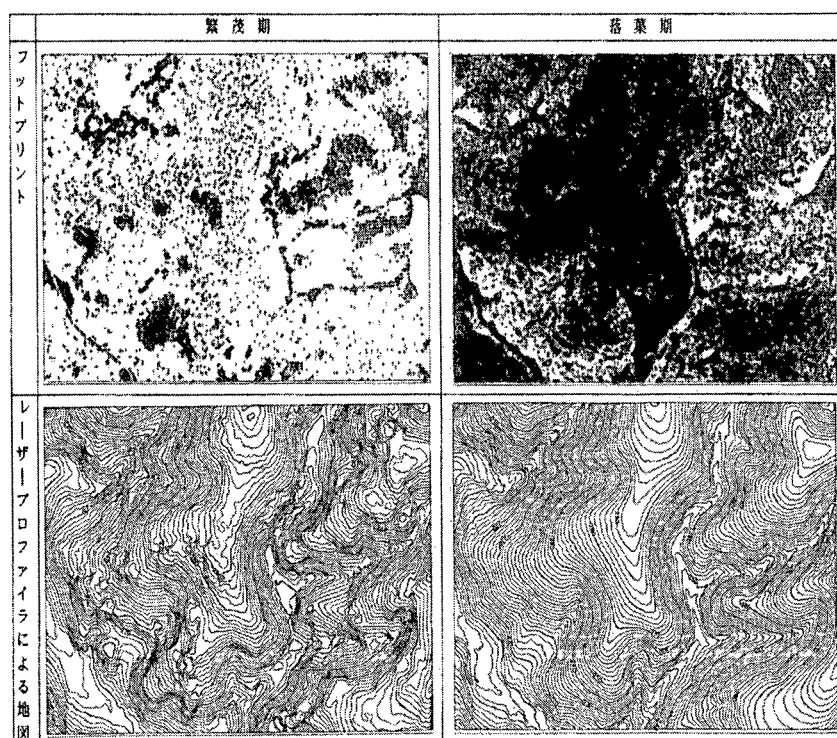


図-8 データ取得時期による航空機レーザー測定結果の相違
(上：データ取得点、下：データから形成された等高線)

③土層深簡易測定技術の開発

斜面の土層深を簡易に測定する方法を開発した（図－9）。通常の（土研式）斜面調査用簡易貫入試験では、1箇所の土層深の測定に数10分程度要するのに対し、本試験法では1～2分程度で測定可能である。このため、短期間に大量の試験データを得ることができる。表層崩壊の危険度は斜面の土層深に大きく依存することがわかっているが、これまでは、短時間に土層深を測定する適当な方法がないことから、代表的な数箇所の土層深から安定性を評価していた。しかし斜面の土層深は場所により大きく異なっており、代表箇所のみでの推定では高精度のハザードマップを描くことは非常に困難である。本手法を用いれば、ある程度面的な土層深分布を描くことができ、GIS上での危険度評価の精度も向上することが期待される。なお、この手法は、地形などから大まかに危険箇所を絞り込んだ後の詳細調査手法として用いるのが効率的である。



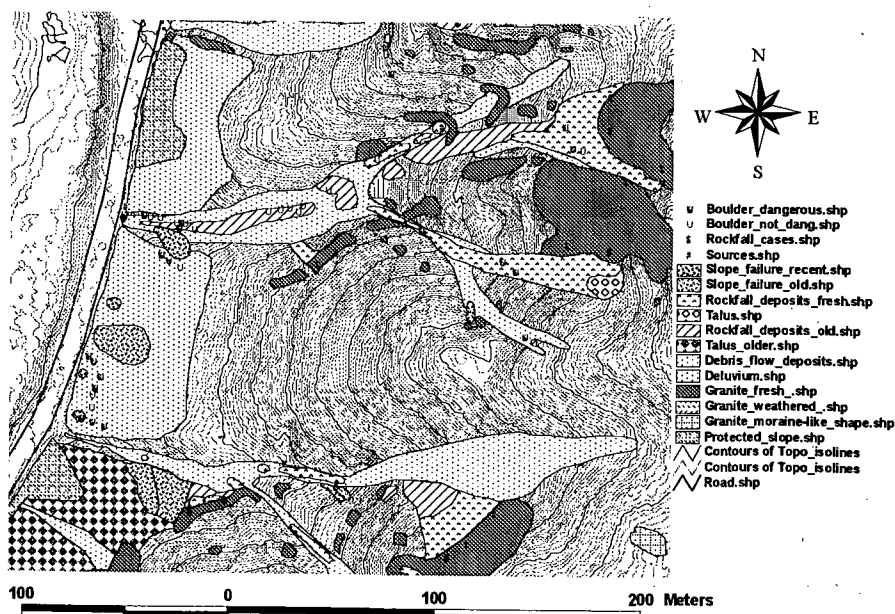
図－9 土層深測定棒の外観

2) 評価技術

① 斜面ハザードマップの概念整理

斜面ハザードマップのレベルの概念整理を行い、GISを用いて実際にいくつかのハザードマップを試作した。斜面ハザードマップは、インベントリーマップ（素因図）、サスセプティビリティマップ（不安定箇所分布図）、フラジリティマップ（誘因に対する不安定度分布図）、狭義のハザードマップ（想定被害分布図）の各段階を経て作成される。

現在の道路斜面防災基本



図－10 インベントリーマップの例（国道49号）

図類は一般にインベントリーマップのレベルである。図－10は試作されたGISによるインベントリーマップの例（国道49号）、図－11は同じくGISによるフラジリティマップの例（平成11年広島豪雨箇所）である。

②ハザードマップ作成の基本フローの作成

上記のような概念整理をもとに、ハザードマップ作成のための調査・評価の基本的なフローを作成した。基本フローは概略評価と詳細評価の2段階からなる。概略評価では、まずDEMなどの概略的な地形要素や既往データを元に各種斜面変動形態（土砂崩壊、岩盤崩壊、落石、土石流、地すべりなど）の起こりやすいエリアを抽出する。この結果が、概略ハザードマップとなって示される。次に詳細評価では、現地調査を含むより詳細な調査により各種斜面変動形態毎に危険度が評価される。この結果が詳細ハザードマップとして示される。今後このフローに沿ってGISのハザードマッピングシステムを構築していく予定である。

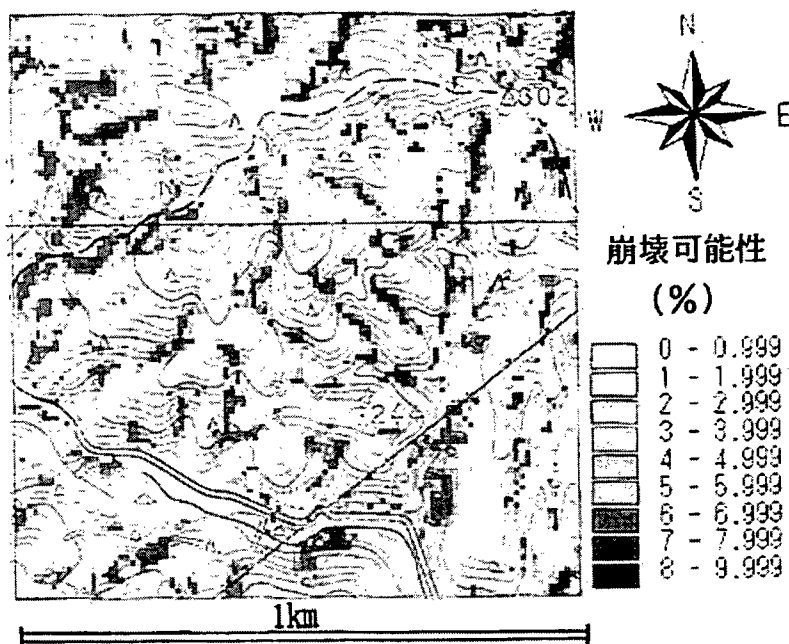


図-11 フラジリティマップの例（平成11年広島豪雨箇所）

3) GIS 技術

国道49号のモデル路線において多様な道路斜面データを実際に入力してGISによる表示（インベントリーマップレベル）を実施し、表示項目、表示方法、活用方法などについて検討した（図-12）。

現在、Web-GISも視野に入れてシステムの内容を整理している段階である。

4) まとめ

道路斜面には多様なデータがあるが必ずしも十分利用されておらず、その一方で基本的なデータが不足している現状がある。今後はまず、重要なデータの効率的な蓄積のための体制作りが必要である。また、わかりやすいハザードマップの確立、道路管理者の活用方法、道路利用者へのデータの情報公開方法などにも取り組む必要がある。

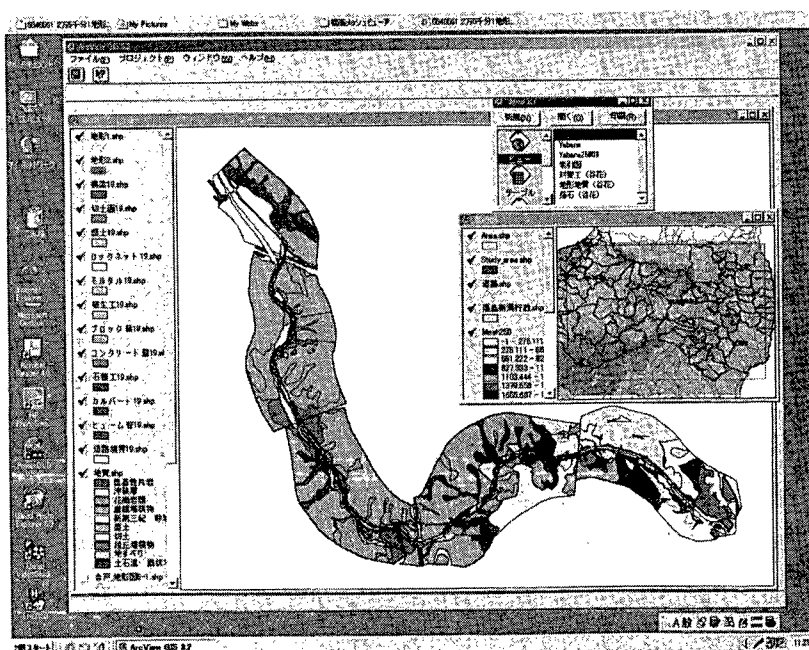


図-12 モデル路線のデータの表示例

4. 2 影響軽減技術

(1) 事前通行規制の高度化

国土交通省では、全国で193区間の事前通行規制区間があり、連続雨量法により規制を実施している。しかし、平成2年～平成11年の過去10年間の規制と災害の状況をみると、124区間で災害が発生しておらず、通行規制を行っているのに災害が起こらない、いわゆる規制の「空振り」が多く発生している。その一方、発生した214件の災害のうち、事前通行規制で捕捉できたのは27件にとどまりっており、規制手法の改善が求められている。そこで、本研究では、先行降雨の影響を考慮した換算連続雨量法（実効雨量法）の適用性について検討を進めている。

1) 換算連続雨量法の概要

換算連続雨量とは、連続雨量では考慮できない先行雨量を反映することが可能な雨量指標であり、最も単純な「半減期モデル（実効雨量）」、「三段タンクモデル（気象庁の土壌雨量指数はこの1パラメータ）」等がある（図-13）。先行雨量とは、連続雨量法において一定時間の無降雨により規定している「1降雨の降り終わり」以前の降雨をいう。三段タンクモデルは、比較的土中の水分の細かい動きを表現することが可能であるが、パラメータの設定が複雑であることから、単純で説明・解析および現場での運用が容易な実効雨量法を検討の対象とした。

なお、実効雨量法は、1時間雨量を半減期により加算する手法である。概念的には、半減期を限りなく短くすると、1時間雨量に近づき、降雨強度影響型災害の捕捉に効果的となる。逆に、半減期を長くすると先行雨量の影響が強い災害の捕捉が可能となる。

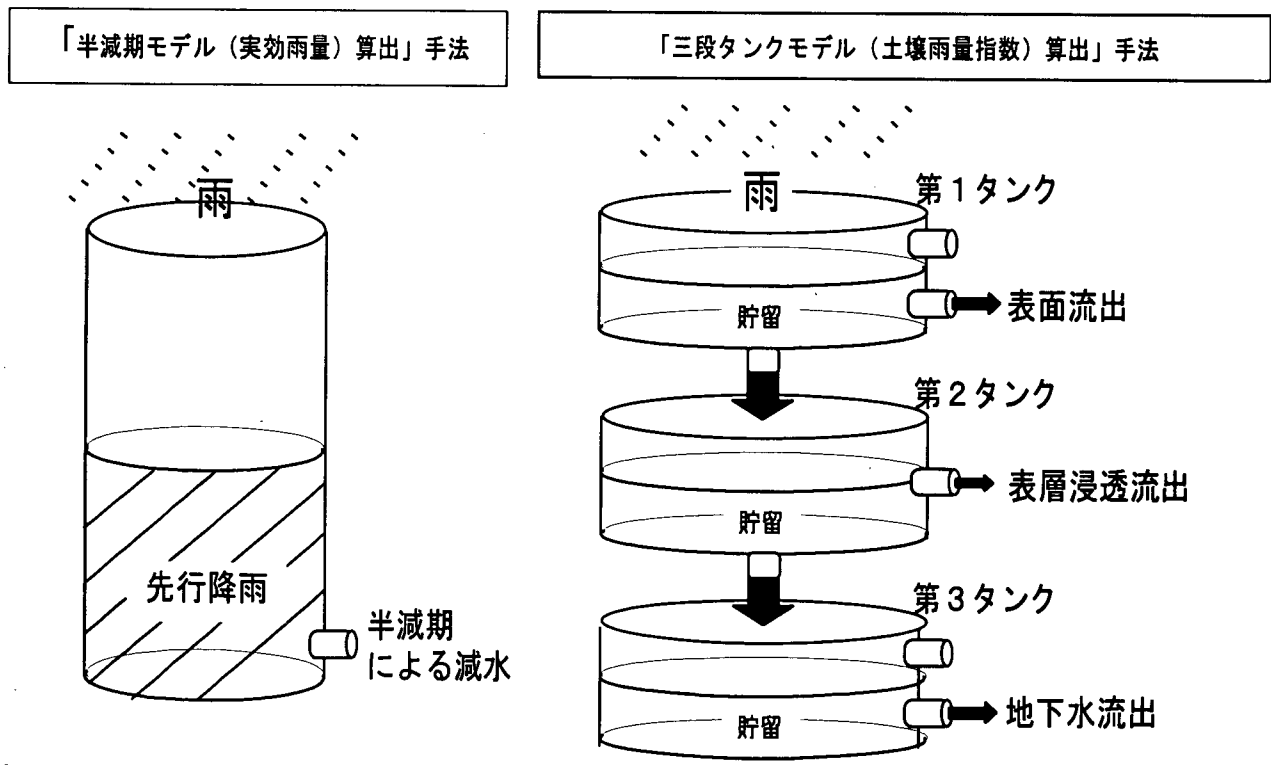


図-13 換算連続雨量の例

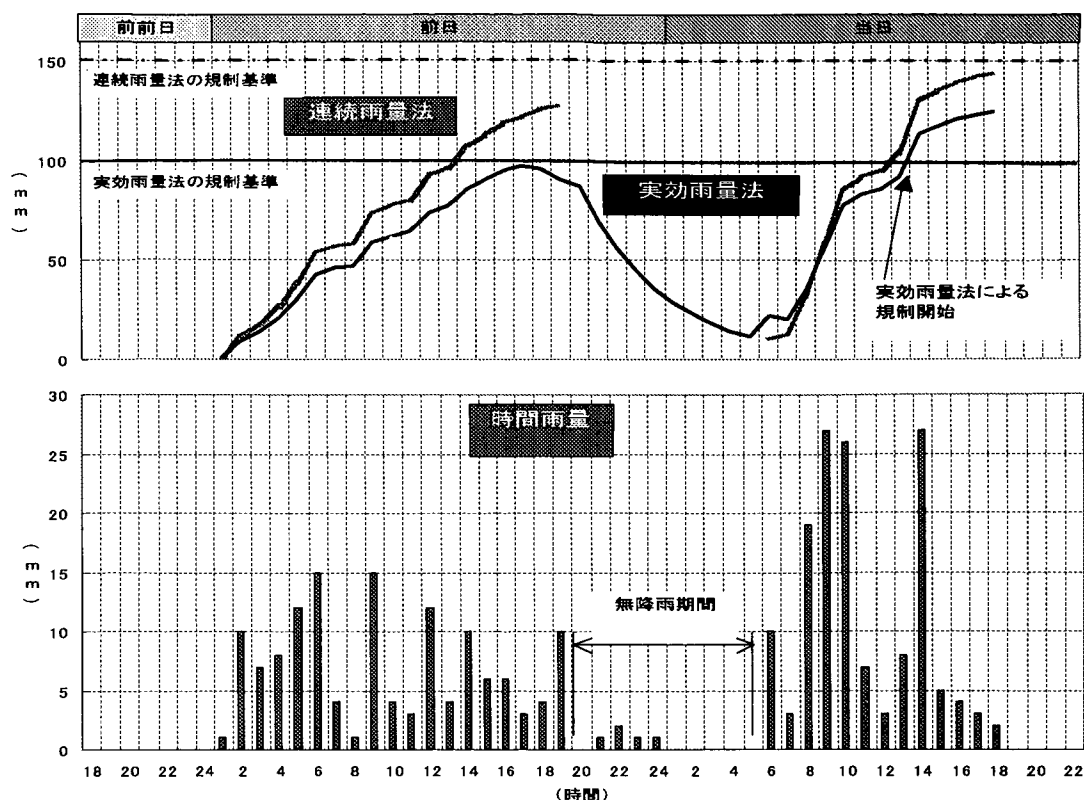


図-14 換算連続雨量法（実効雨量法）と連続雨量法の模式図

2) 換算連続雨量法（実効雨量法）による事前通行規制区間の検証

全国 193 区間の事前通行規制区間を、降雨と災害の関係で整理したものが図-15 である。過去 10 年間で災害が発生した区間は 69 区間で、そのうち、降雨と関係する災害が発生した区間は 57 区間であり、さらにそのうち 30 区間が連続雨量法と比較し、換算連続雨量法（実効雨量法）の方が効果がある（災害の捕捉率が向上し、規制の空振りが減少する）ことが確認された。

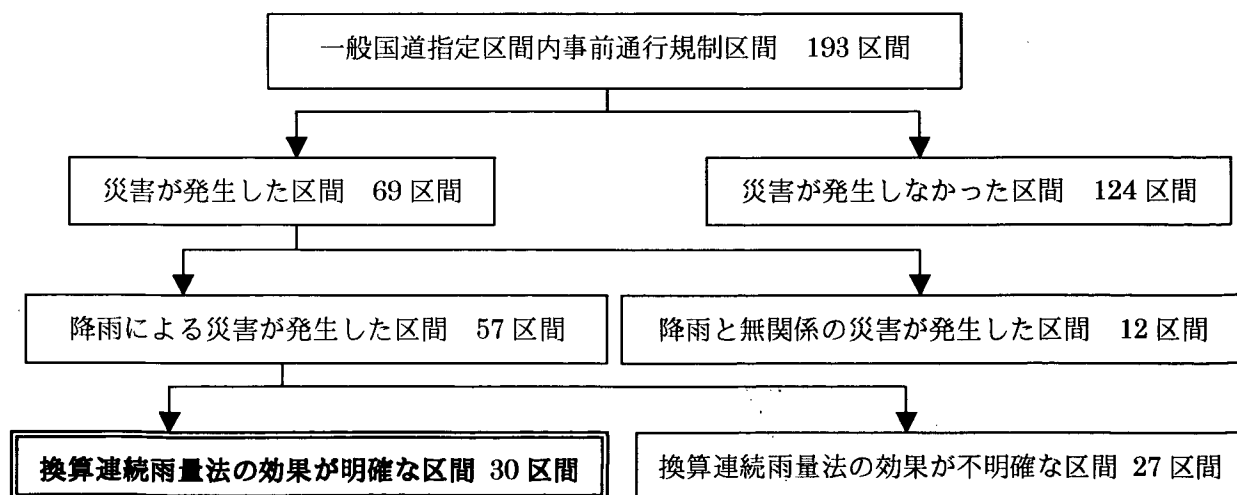


図-15 事前通行規制の現況

3) 換算連続雨量法（実効雨量法）による事前通行規制ガイドライン（案）の作成

図-15で「換算連続雨量法の効果が明確な区間」と分類された30区間について、過去10年間の災害と降雨のデータを使い、連続雨量法と換算連続雨量法（実効雨量法）を比較したものを図-16に示す。連続雨量法を用いた実績では、61件の災害のうち、通行規制により捕捉できたのは18件にとどまったのに対し、仮に換算連続雨量法（実効雨量法）を適用した場合、捕捉できる災害は21件増加し31件になる。また、空振りに終わった通行規制件数も、188件から58件に減少し、これら30区間では換算連続雨量法（実効雨量法）により効果的な通行規制を実施することが可能であることが明らかになった。

そこで、これらの検討結果を踏まえ、「換算連続雨量法（実効雨量法）を用いた事前通行規制ガイドライン（案）」を作成し、一部の区間で実効雨量法による試行を連続雨量法と併用しつつ開始している。今後もデータの蓄積を図りつつ換算連続雨量法（実効雨量法）での基準値の信頼性の検証を継続する。

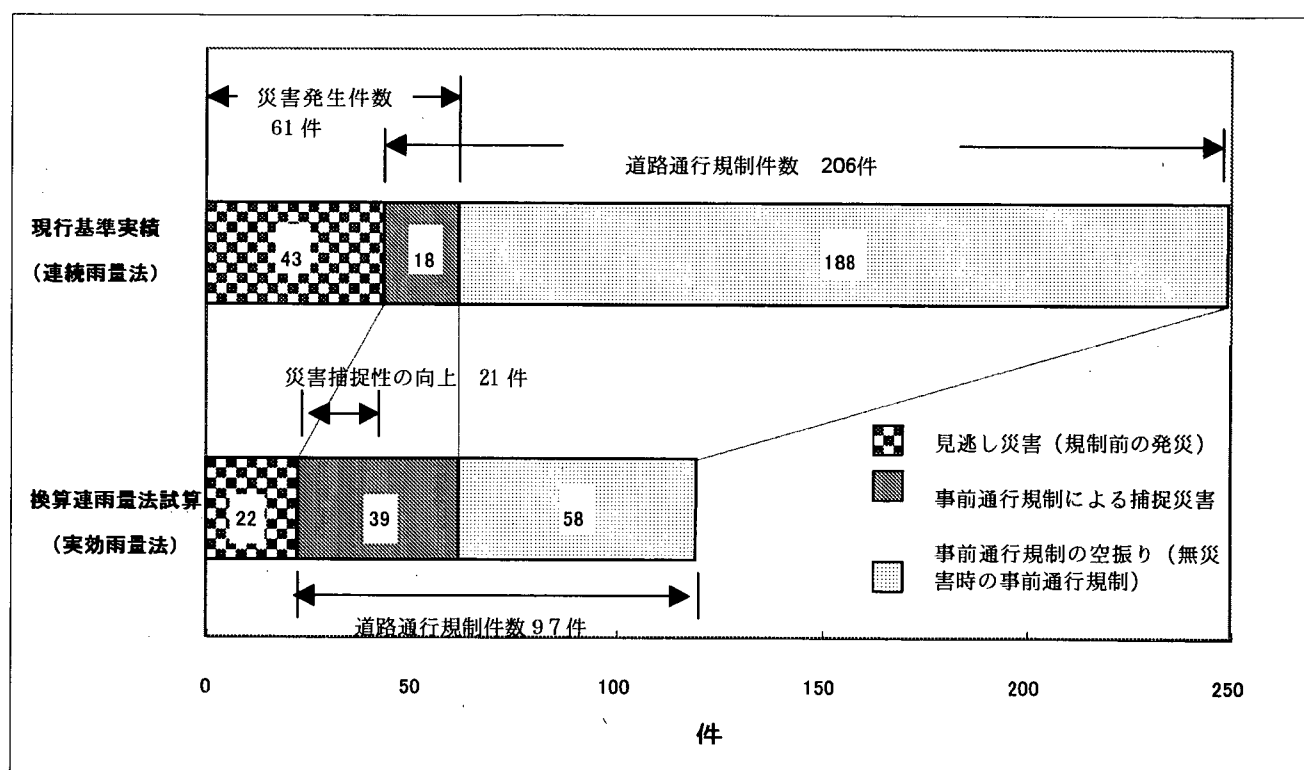


図-16 現行連続雨量基準値と換算連続雨量基準（実効雨量基準）適用時の比較

直轄国道、換算連続雨量法（実効雨量法）適用提案30区間（平成2年～平成13年の10年間の降雨・災害データ比較）

4) 今後の取り組み

災害が発生しなかった124区間は、防災対策の進捗により道路斜面の安全性が向上したものも含まれていると考えられる。このような場合、降雨に対する斜面の安定度を適切に評価する手法として、今後は以下の2点について研究を進める予定である。

- ①無災害降雨履歴評価手法の開発：災害のおこらなかった降雨（無災害降雨）の履歴を統計的に評価し、規制基準値以上の雨の無災害降雨履歴に対する次回の基準値以上の雨における災害発生確率を算定し、基準値の指標とする。
- ②限界雨量指標評価手法の開発：斜面をモデル化し、崩壊に至った土中水分分布とそれに対応する降雨を斜面の限界雨量指標と考え、斜面の安定度を評価する。

(2) 日常管理の高度化

平成8年度道路防災総点検以後、防災カルテを活用した目視点検等により、記録の蓄積と斜面等の経年変化の把握を行っている。防災カルテを活用した点検による管理を円滑に実施する目的で、関東地方整備局では「防災カルテ運用マニュアル(案)」および「防災カルテを用いた点検基本マニュアル(案)」を整備した。現在、両マニュアル(案)は、関東地方整備局管内の各事務所に配布して試行中である。このマニュアル(案)による点検は、判断における専門知識の要否によって、監視・管理レベルを区分化し、各レベルに応じた点検を実施することとしている(表-3)。

また、道路防災管理における5つの業務項目(①防災点検の実施、②防災カルテの作成、③日常防災管理、④対策工の実施、⑤危機管理への対応)のうち、②および③の補助を目的として「防災カルテデータベース支援システム」を開発した。「防災カルテデータベース支援システム」は、各地方整備局や政令指定都市等の道路管理者に配布され、防災カルテデータの電子化が行なわれた。今後は、防災カルテを活用した日常防災管理を補助するツールを開発する目的で、以下の検討を行っている。

- 1) 防災カルテ情報を利用した日常管理支援システムについての具体的な開発・運用に向けての検討。
- 2) 防災カルテデータベース支援システムと地図情報との連携方法についての検討。
- 3) GISを用いたプロトタイプシステムの開発。

表-3 監視・管理レベルの概念

箇所の 種別	監視・管理 レベル	点検の種類				計測・監視シス テムの活用度	通行規制	
A	(該当せず)	日常の道路パトロール 年1回の構造物点検等	数年毎に実施する安定性評価	防災カルテを用いた観察を主体とする点検	専門知識による判断を伴う点検 (必要に応じて実施)	高度な判断を伴う点検 (必要に応じて実施)	—	—
B	(レベル0)						降雨量による事前通行規制	
C	レベルⅠ							
	レベルⅡ							
	レベルⅢ							
↓ 変状の進行が著しく、災害の可能性が増している場合								
レベルⅣ	日常の道路パトロール	定期的見直し	① 職員等による高頻度の点検	② 専門技術者の定期点検	③ 専門家の指導	・常時監視 (自動監視) ・管理基準の検討・設定	観測結果と連携した事前通行規制	

A：通常の管理箇所 B：安定性に変化が生じないかどうか注意していく箇所 C：監視管理強化箇所

- ① 職員等：職員及び維持管理者等(必要に応じて専門技術者への委託も検討する)
- ② 専門技術者：H8道路防災点検の講習会を受講したコンサル等
- ③ 専門家：防災ドクター等の学識経験者

4. 3 予知技術

(1) 斜面表層崩壊のモニタリング技術

降雨に起因する土砂系の表層崩壊は、地形・地質条件や植生条件等により崩壊形態が多様であり、また発生箇所の特特定が困難である。現在でも、伸縮計等の従来型センサでのモニタリングは実施されているが、点あるいは線的な計測で監視域の連続性が低い等の問題がある。このため、広範囲に連続する斜面を網羅的かつ面的に監視できるシステムが必要とされている。

光ファイバセンサは、変状発生個所が特定できない広範囲な斜面を連続的に計測することが可能である。さらに、国土交通省で整備している光ファイバ網（情報BOX）を活用することで工事事務所からの遠隔地の複数斜面のモニタリングが可能となり、効率的な斜面監視が期待されるものである。

しかしながら、光ファイバセンサで自然斜面をモニタリングするためには、斜面との追従性の確保や計測精度、動植物や気象の影響等を考慮した設置方法など適用性の検討が必要である。そこで、平成11年度末より民間14社との共同研究「光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する研究」を実施している。平成12年度末から、実斜面に斜面モニタリングシステムを設置して適用性の検討を行っており、ここではその概要について報告する。

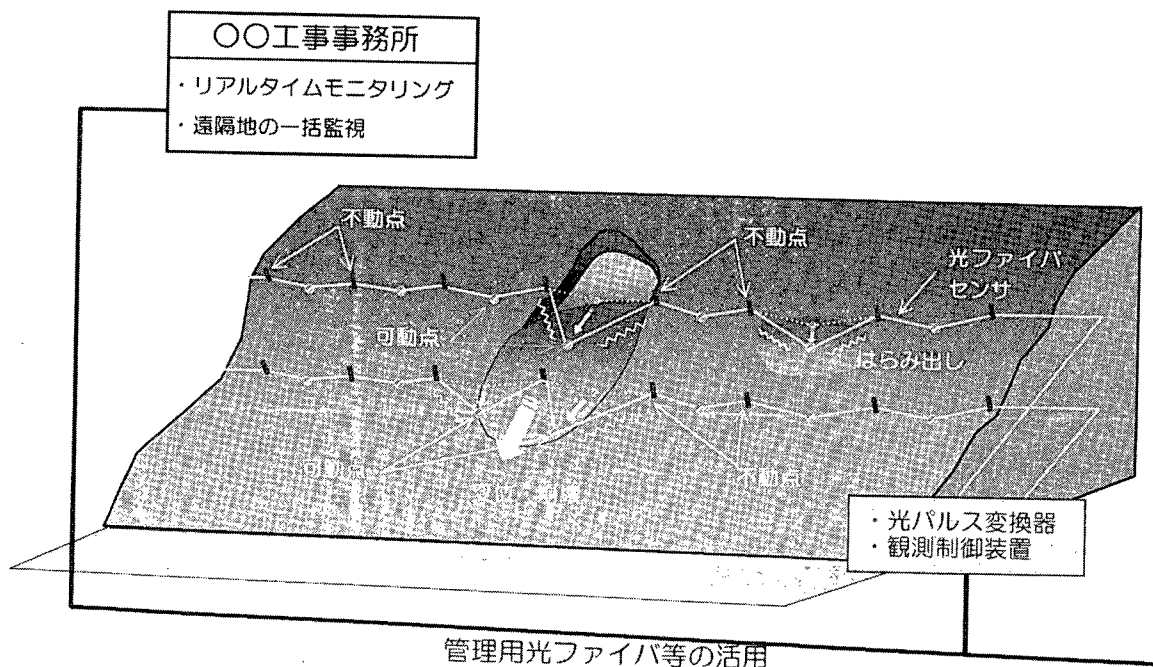


図-17 光ファイバセンサによる斜面表層崩壊モニタリングシステムの概念図

1) 設置斜面の概要

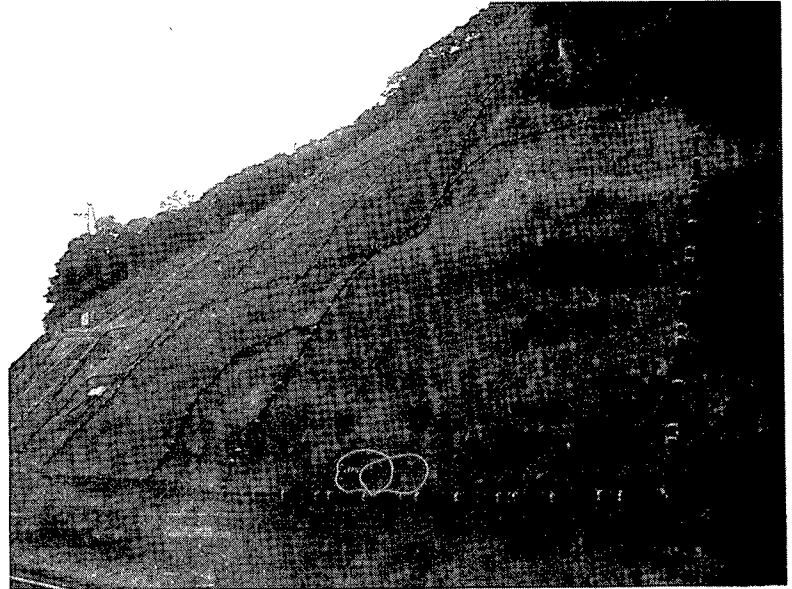
光ファイバセンサを設置した斜面は、全国の国土交通省6工事事務所の協力により現地調査を行い、降雨浸透により変状発生のあると考えられる6カ所を選定した。設置する光ファイバセンサの測定方式は、代表的なものと考えられるBOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) 方式、FBG (Fiber Bragg Grating) 方式、MDM (Macro Distortion Monitor) 方式の3種類とした。センサの設置は1斜面に対し1方式とし、現地調査結果をもとにセンサの設置位置等を決定した。表-4に斜面モニタリングシステムの設置斜面の概要、表-5に光ファイバセンサの計測方式の概要、図-18に光ファイバセンサの設置事例を示す。

表－４ 斜面モニタリングシステムの設置斜面の概要

実施箇所	対象斜面概要	センサ方式
49号 福島県いわき市三和町中三坂	ゆるいマサ土からなる崩壊性の斜面。複数の滑落崖があり、特定困難なすべり面の存在が想定。	FBG方式
19号 長野県上水内郡信州新町新久米路TN付近	崖錐表土で構成される斜面。崩壊履歴があり、トンネル坑口付近擁壁に若干の変状あり。	BOTDR方式
52号 山梨県南巨摩郡身延町相又	泥岩の風化が著しい斜面。急崖部の崩落、崩積土の再移動、地すべりが想定。	FBG方式
42号 和歌山県西牟婁郡すさみ町黒崎	泥岩砂岩互層流れ盤へのモルタル吹付斜面（老朽化）。水平クラック、はらみだし等の変状あり。	BOTDR方式
28号 兵庫県津名郡津名町塩尾	下方に厚い崖錐堆積物を伴う、風化花崗岩からなる崩壊性の急崖斜面。	BOTDR方式
220号 宮崎県日南市大字伊比井字鶯巣	泥岩・砂岩互層の水平盤斜面。崖錐表土の表層崩壊と上部砂岩の落石が想定。	MDM方式

表－５ 光ファイバセンサの計測方式の概要

測定方式	概要
①BOTDR方式	ブリルアン後方散乱光の検出により、変位、歪み等を測定。光ファイバに加わる任意の場所の歪み分布の連続計測が可能。
②FBG方式	光ファイバに加わる変状により、センサ部での反射波の波長の変化を検出し、高精度での歪みを測定。
③MDM方式	光ファイバの屈曲率と透過光強度に一定の関係があることを利用し、光ファイバの湾曲部の透過光強度の検出により変位を測定。



図－18 光ファイバセンサの設置事例（左：MDM<宮崎>、右：BOTDR<和歌山>）

2) 従来型センサとの比較検討

表－６に、観測面での従来型センサとの比較結果を示す。光ファイバセンサは、センサ部に電源が不要なため電磁誘導の影響を受けないという特徴がある。また、光ファイバはガラス製であるため、

腐食に対して強いものである。メンテナンスの面においても、センサ部の機構・構造が簡素なものが多いため、従来型センサに比べ故障の可能性が低くなるといった利点がある。このため、長期にわたる斜面計測において非常に優位であると考えられる。また観測体制では、地点毎の微小変位の短時間かつ高精度な計測や、変状発生個所が特定できない広範囲な斜面の連続的な計測等、目的に応じて使い分けることができ、より効率的な斜面モニタリングが可能になると考える。

表－6 観測面での従来型センサとの比較

	従来型センサ	光ファイバセンサ		
		BOTDR	FBG	MDM
電磁誘導の影響	受ける	受けない		
センサ部の電源	現場に電源要	電源不要		
観測体制	点・線的計測。設置密度に限界あり	点・線・面的計測。小～広範囲を効率的に計測可		
管理施設	現場ごとに観測管理施設が必要	遠隔地より複数現場の一括管理が可		
計測時間	リアルタイム（自動計測化）	5～10 分間隔	リアルタイム	

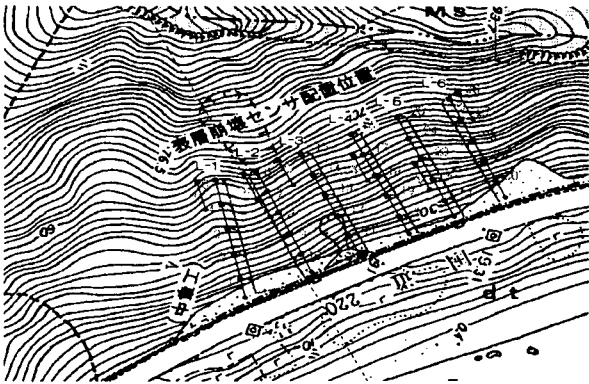
表－7 に、設置面での従来型センサとの比較結果を示す。固定点に関しては基本的には固定杭を用いるため、特に従来型センサと変わらない。対動植物・風雪に関しては保護工の選択肢が多い分、優位性があると考ええる。ただし、実施工時には、設置する際の曲率（小さいRでは設置できない）や不慮の断線、融着精度等、光ファイバ自体の取り扱いに注意が必要である。

表－7 設置面での従来型センサとの比較

	従来型センサ	光ファイバ型センサ	
		塩化ビニル管による保護（地上設置）	フレキシブル（変形可能な）管による保護（地表設置）
対動植物、対風雪	①塩化ビニル管によるインバー線の保護	ケーブル防護管の埋設による保護（地中設置）	
固定点の設置	杭の打込み60cm以上、間隔20m以内で設置。通常、風雪や保護管との摩擦の発生等から10m以内で設置。インバー線の張力(20N程度)でモーメントが生じ、杭が傾かないよう注意。	杭間隔は測定規模に応じ適宜選定し、杭を地盤に打ち込むことで固定（地上設置）	鋼製のピンを地盤に打ち込み、保護管により防護された光ファイバを地表面に固定（地表設置）
		表層部に埋設してある保護管を杭等を打ち込むことで固定（地中設置）	
		BOTDR方式の設置間隔は計測上最低でも2m以上とする。	

3) 計測事例

6月の梅雨の時期に宮崎の設置現場で小規模の表層崩壊があり、その崩壊をMDMセンサで検知することができた。図－19に光ファイバセンサの設置図、図－20に崩壊にいたるまでのMDMセンサで検知した変位と、雨量を示す。崩壊は、ライン3の左側、MDMセンサ設置ラインの中央部付近で発生した。崩壊規模は崩壊土量に15m³程度の小規模なものであり、道路には到達せず、大き



図－19 光ファイバセンサの設置図

な災害には至らなかった。6月20日に84mm、21日に99mmの日降雨があり、災害発生までの累計では243mmの累積降雨があった。崩壊の兆候としては、20日の昼頃から、斜面下方のNO.12のMDMセンサで、わずかな変位を検知した。22日の昼過ぎに崩壊が発生し、ライン上のすべての計測位置で変位を観測した。

4) まとめ

宮崎での崩壊検知事例のように、光ファイバセンサにより斜面崩壊をモニタリングする事が可能であることがわった。今後は、さらに測定データを集積し、効率的な設置方法の検討やセンサの計測精度

等の改善を行っていくとともに、最適なセンサ方式の選定方法や設置方法等を整理し、「光ファイバセンサによる斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル（案）」の作成を行う予定である。

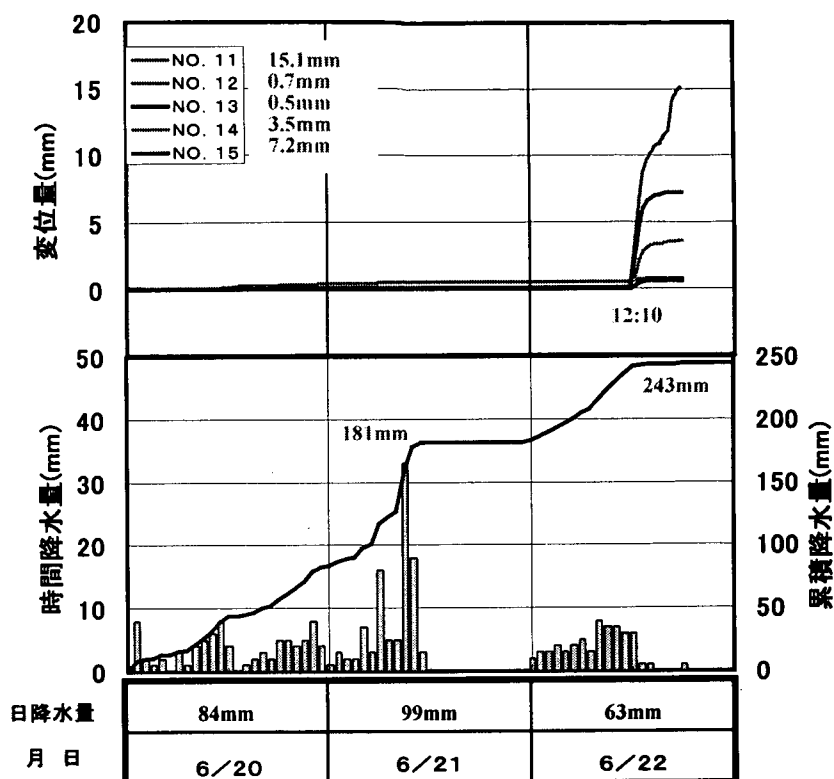


図-20 MDMセンサによる検知変位と降雨状況

(2) 岩盤崩壊のモニタリング技術

1) 研究の概要

平成8年2月に発生した北海道豊浜トンネルにおける岩盤崩落災害は、従来の技術的知見では大規模な岩盤崩落は予測が極めて困難な現象であること、及び実際に岩盤崩壊を対象とした計測事例も極めて少ないことを改めて認識させることとなった。これらの背景をもとに、本テーマでは、岩盤崩壊危険箇所の計測技術の向上と、計測値の評価方法の開発を目的として、実際に岩盤斜面に計器を設置して挙動計測を行うとともに、計測結果をもとに岩盤モニタリングの現地適用可能性と限界を明らかにし、岩盤崩壊予測及びモニタリング手法の確立を目指した検討を行っている。

2) 岩盤斜面の計測

岩盤斜面の計測については、平成8年度に全国8箇所のモニタリング箇所を選定して計器を設置し、平成9年度に計測を開始した。平成10年度には北海道開発局管内の5箇所の計測を追加した。これらのうち2箇所は平成11年度で計測を終了し、現在は全国で11箇所となっている。また、これ以外に試験フィールド箇所2箇所での測定データを平成12年度より活用している。これらの位置を図-21に示す。

これらのモニタリング箇所のうち、平成 10 年度末に近畿地方建設局（当時）管内の天鳥橋西地区において自然崩壊が発生し、この崩壊現象を計器及び画像で捕捉し貴重なデータが得られている。

3) 岩盤モニタリングの現地適用可能性と限度の検討

計測結果をもとに、各種計測器の有効性の検討、計測値の解釈上問題となるノイズ、周期的変動等の検討、各種計測器の配置・設置方法の検討を行っている。

このうち各種計測器の有効性については、接触型計測器、非接触型計測器それぞれについて、天鳥橋西地区その他の計測結果を検討することにより特徴や計測限界等を明らかにしている

が、特に非接触型計測器については技術的に新しいため既往文献調査と現地観測による検討を併せて行っている。非接触型計測器の一例として天鳥橋西地区におけるデジタルカメラによる画像解析の事例を図-22 及び図-23 に示す。本事例は計測対象の岩盤ブロックから 8 m の距離にデジタルカメラ（撮像素子：140 万画素、理論的に 3 mm の分解能を持つ）を設置して撮影を行ったもので、得られた画像を用いて時間差画像解析を行い、解析結果（図-22、23）を伸縮計の実測値と比較した（図-24）。その結果、最大約 10mm 誤差で岩盤の挙動をとらえることができた。

また、計測値には日変動や年変動などの周期的変動やノイズ等が見られることが多く、岩盤崩壊につながる累積挙動を抽出するため

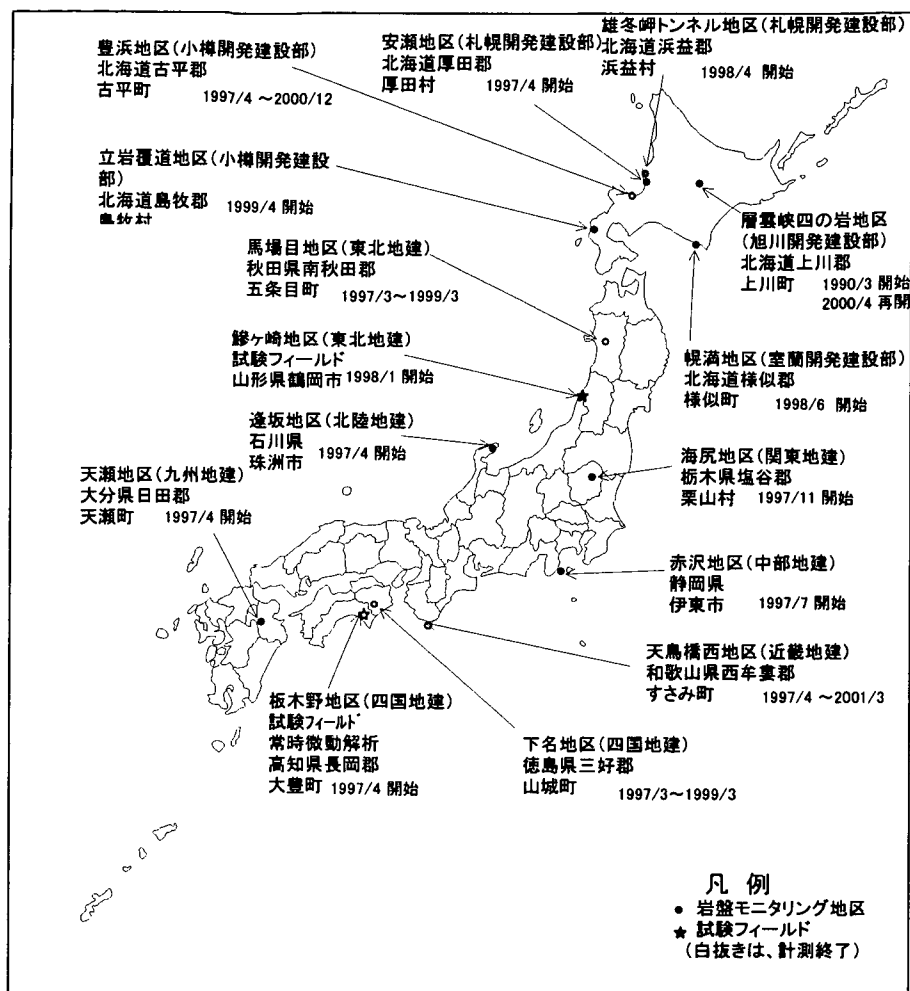


図-21 全国岩盤崩壊モニタリング箇所位置図

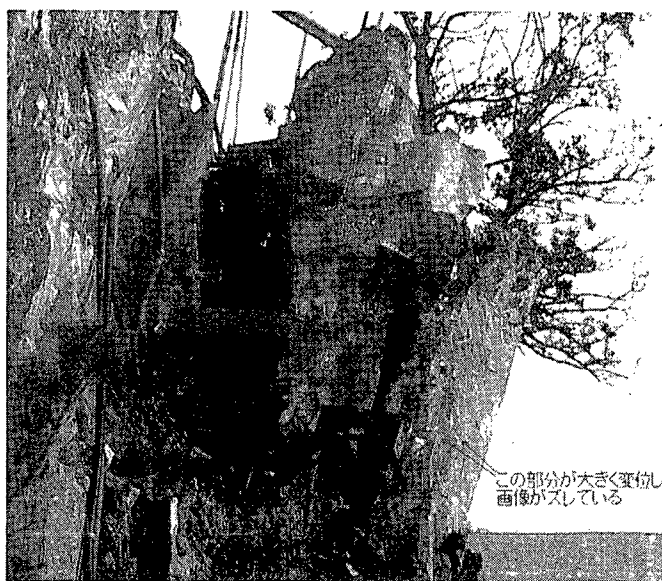


図-22 時間差画像（天鳥橋西地区、2 時期の画像を重ね合わせたもの）

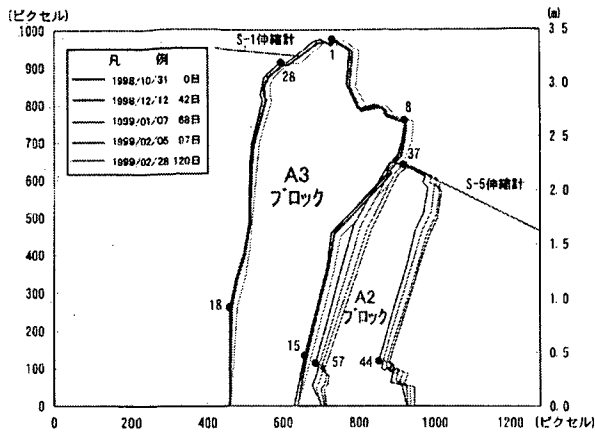


図-23 時間差画像解析結果

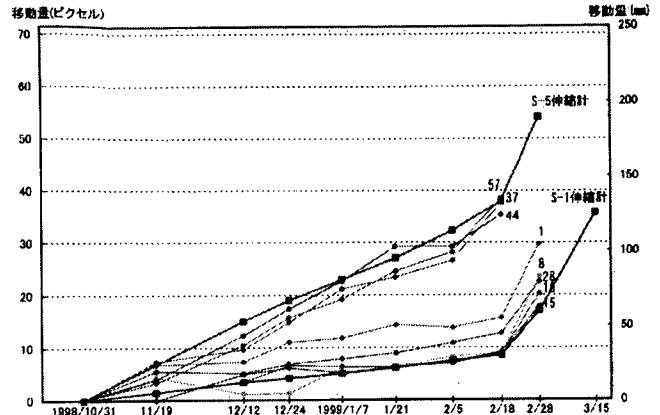


図-24 画像解析による変位量と伸縮計実測値の比較

には、特に変位が小さい段階においてそれらの影響を取り除く必要がある。図-25 は計測値の日変動及び年変動の模式図であるが、これらは主に温度の影響によって生じており、温度相関が明確なものについては補正が可能である。

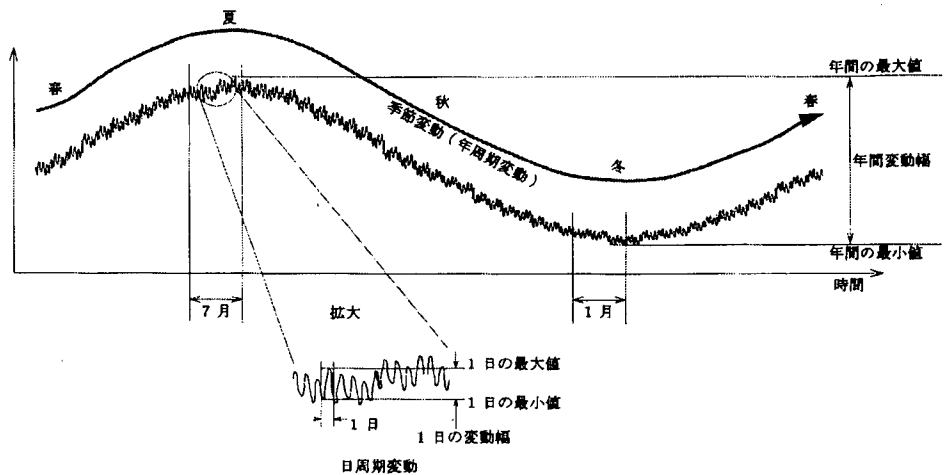


図-25 計測値の日変動及び年変動の模式図

各種計測器の配置・設置方法については、従来型計測器に加え、AEセンサー等の新しい計測器の設置方法の検討を行っている。

以上の検討結果によって得られた各種計器毎の知見については一覧表にとりまとめている。

4) 岩盤崩壊予測手法の検討

崩壊の前兆現象の検知手法及び崩壊予測手法に関して、天鳥橋西地区における自然崩壊事例の解析を行った。

本地区では計測開始当初からトップリング型の累積挙動を示していた。崩壊の前兆現象として、ITV画像やAE計測により、崩壊発生前に落石発生数やAE発生数の増加傾向が見られた。図-26 はAE計測結果の事例で

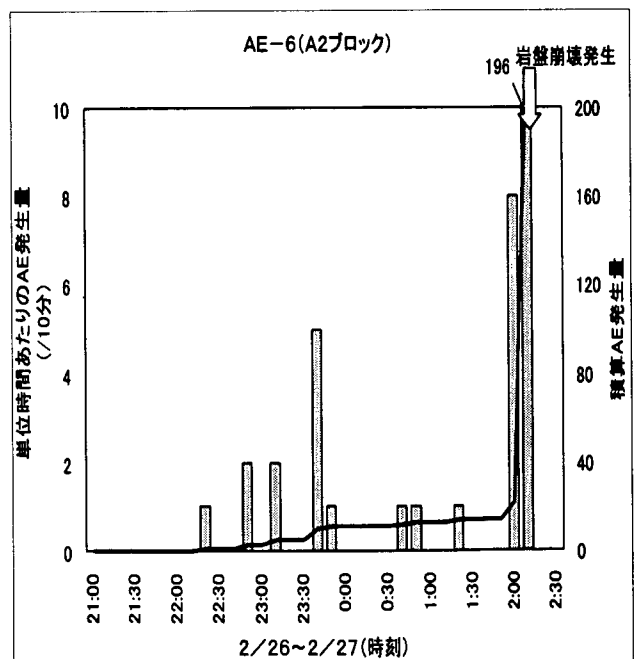


図-26 天鳥橋西地区における自然崩壊発生時のAE計測結果

あり、崩壊約4時間前からA Eの発生が見られ、崩壊直前に発生数が急増している。

本地区における崩壊発生までの累積挙動を見ると、ブロック頭部での最大変位量は2年間で約25cmであり、転倒速度の推移パターンとして、緩急を繰り返しながら次第に加速していく状態が把握された(図-27)。また、崩壊直前においては、24時間毎のプロットでは斉藤の第3次クリープ破壊曲線にあてはめられる挙動を繰り返した後、崩壊したことが示されたが(図-28)、毎時データでは結果的に全体的な加速はあるものの、崩壊数時間前までは、階段状のステップが錯覚となり、加速していることを見落としやすい状況となった(図-29)。

本事例は、直ちに岩盤崩壊予測手法の確立あるいは管理基準の設定を可能にするものではないものの、崩壊予測の方向性を示すモデル事例として注目すべきデータである。

5) まとめ

天鳥橋西地区における崩壊の計測事例によって注目すべき知見が得られたが、岩盤崩壊のメカニズムは複雑であり、崩壊予測手法やモニタリング手法の確立に向けて未だ多くの問題点が残されている。今後はそれらの問題点の検討を進めるとともに、検討結果を「岩盤崩壊モニタリング要領(案)」としてとりまとめる予定である。

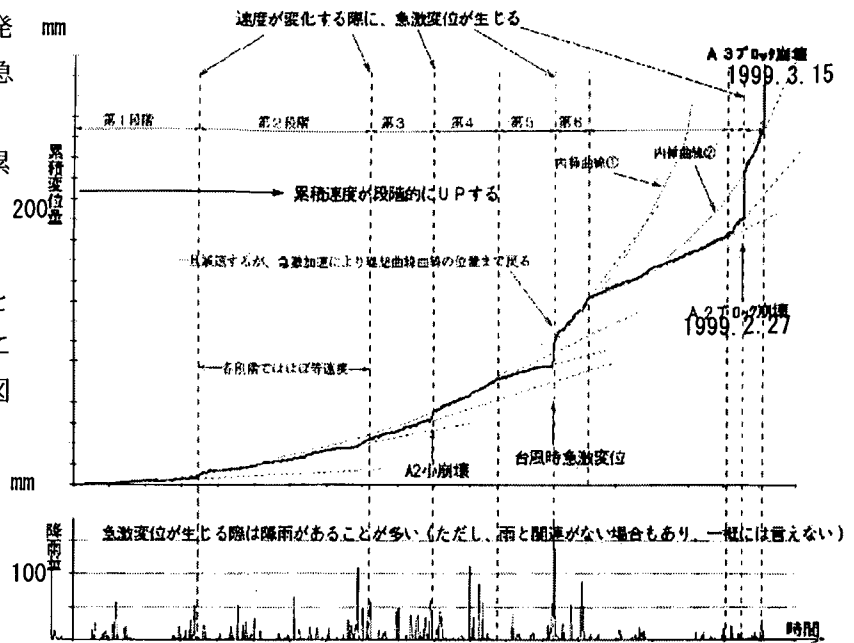


図-27 天鳥橋西地区における自然崩壊発生までの累積挙

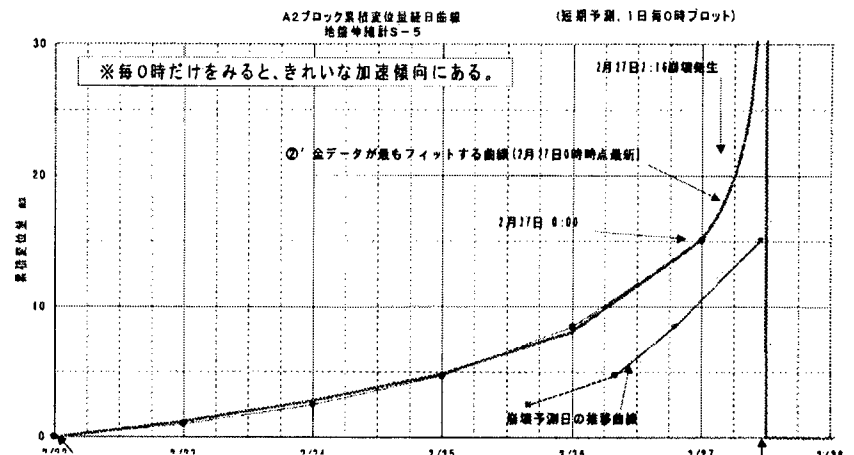


図-28 天鳥橋西地区における崩壊発生前の累積挙動

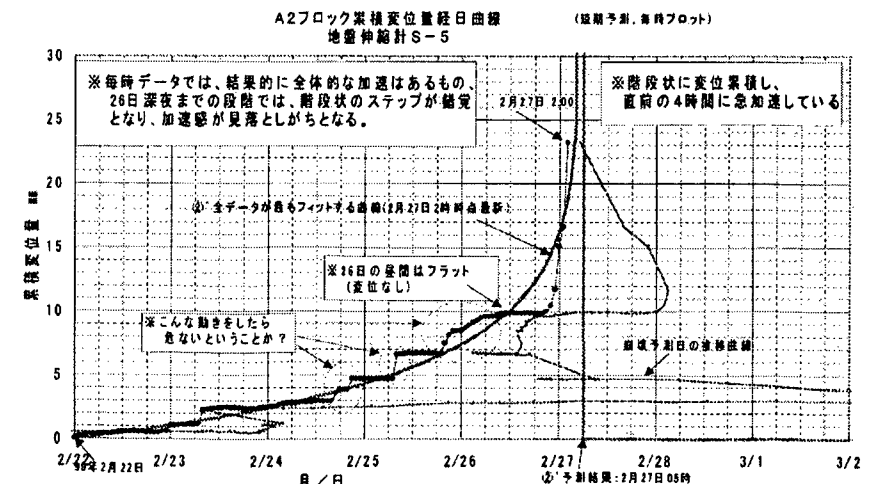


図-29 天鳥橋西地区のデータを用いた予測式の検討事例

4. 4 リスクマネジメント技術

(1) 合理的なリスク評価・マネジメント技術

1) 研究の概要

道路防災管理において、斜面災害に対する防災対策の投資効果を明確にし、アカウンタビリティを向上していく上で、斜面崩壊のリスク(災害に伴う社会経済的損失)分析に基づくマネジメント手法が有用と考えられる。そこで、本テーマでは、以下の4つの手法の開発により、斜面崩壊のリスクを定量的に評価・分析することを目標として研究を行っており、あわせてモデル路線での試行を行っている。これらの手法を用いることにより合理的な道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援を実施することができる。(図-30)

①ハザード(発生確率・想定災害規模)の予測手法の作成

- ・既往災害履歴の統計処理による簡易予測法
- ・斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測法

②リスク(想定被害額)の算定手法の作成

- ・人身損失(D1)、被災道路復旧費用(D2)、迂回損失(D3)、救急医療損失額(D4)の各項目の算定法の作成
- ・リスクカーブ(想定被害額とその年超過確率)の作成法

③防災対策の費用便益手法の作成

- ・リスクカーブを用いた防災対策の便益の算出方法

④リスク分析・マネジメント手法の提案

- ・優先対策箇所、効率的な防災対策の選定の考え方
- ・事前通行規制の評価の考え方

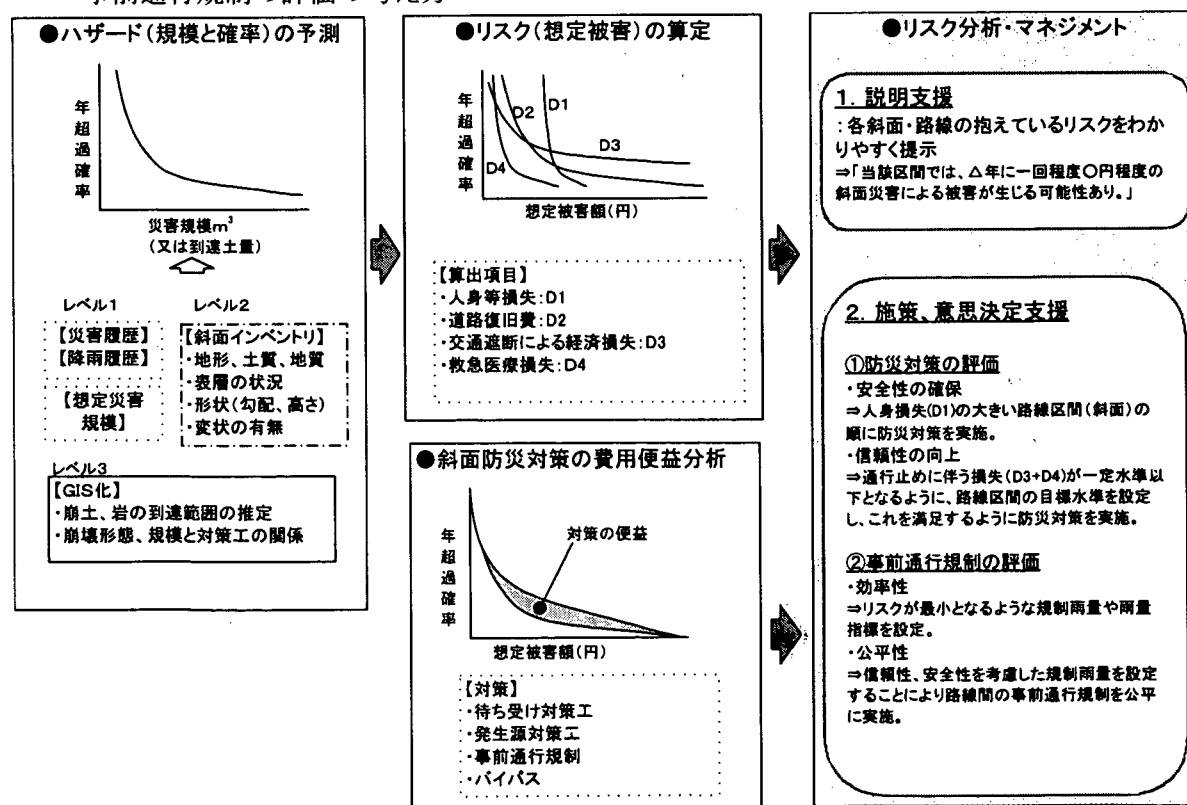


図-30 道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援の流れ

2) リスクカーブの作成

本研究では道路斜面災害のリスクを定量的に表すため、道路利用者や道路施設が被る損失（直接損失）と、道路の寸断が社会全体に及ぼす経済的損失（間接損失）をあわせて、リスクとして算出することとしている。これにより、検討対象となる道路が、斜面災害に対して抱えている潜在的なリスクを把握することが可能となる。具体的な算出項目は、人身損失、被災道路復旧費、交通遮断に伴う迂回損失、救急医療を受けられないための人身損失の4つである（図-31）。

これらのリスクの算定結果は図-32 に示すようなリスクカーブで表現することができる。リスクカーブは、縦軸を年超過確率、横軸を想定被害額で表し、ある被害額が1年に1度以上起こる確率があるかを表示している。リスクカーブで囲まれた面積が、その路線区間（斜面）の被害額の年期待値となる。このリスクカーブを用いることにより、様々なリスクマネジメントが可能となる。

3) リスクカーブを使ったリスクマネジメント手法

リスクカーブは、リスクカーブは通行規制・斜面对策工・バイパス整備等の対策の実施等によりするので、リスクカーブの変形量（リスクの低減量）は防災対策の総合的効果（便益）と考えることにより対策費用をコストとした防災対策の費用便益分析が可能となる（図-33 参照）。これにより、リスクの許容水準や対策の費用効果を考慮して、路線区間（斜面）間での対策優先度の決定、並びに各種防災対策の選定等を合理的に行うことができる。例えば、優先対策箇所を選定では、候補路線ごとに図-32 の面積を求めることにより、想定被害額の大きいところから実施することができる（図-34）。そして、選定した箇所で行える各種対策（待ち受け対策工、モニタリング、バイパス等）ごとにリスクカーブを策定し、リスクの低減量から便益を計算する。そして、対策の工事費等をコストとして費用便益分析を行い、費用便益効果の一番高い対策（この場合は、モ

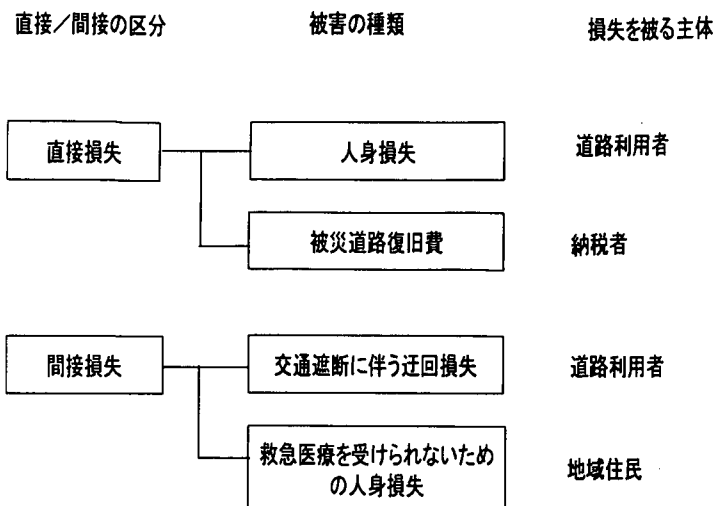


図-31 対象とするリスク

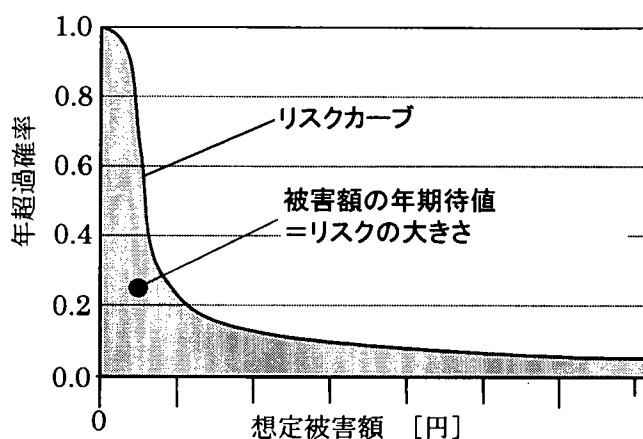


図-32 リスクカーブ 変形

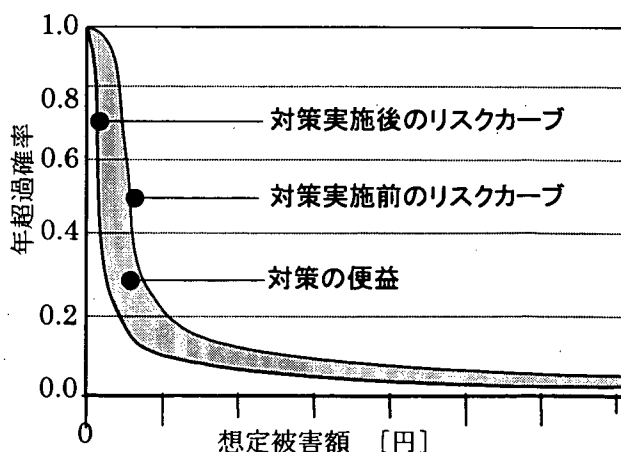


図-33 リスクカーブと対策の効果

ニタリング)を選定するのが効率的であることになる。また、仮に、道路防災対策も目標水準を被害額の観点から定めることができれば、費用便益に加え、目標水準を満たす対策(この場合は待ち受け対策工)を選択することになる(図-35)。このように、リスクカーブを使うことにより、道路防災管理業務の投資効果を明確化することができ、アカウンタビリティの向上を図ることができる。

4) 今後の予定

これらの手法は「道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援マニュアル(暫定版)」として道路管理者向けにとりまとめた。今後、地方整備局の協力を得て、モデル路線においてマニュアルの試行を行い、マニュアルのブラッシュアップを図る予定である。

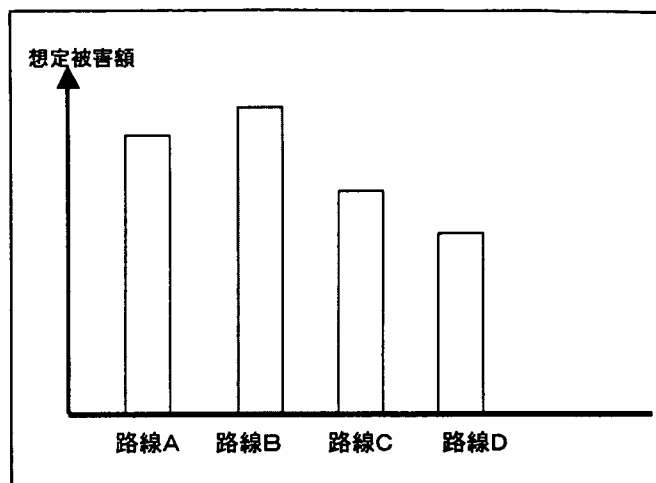


図-34 優先対策箇所の選定イメージ

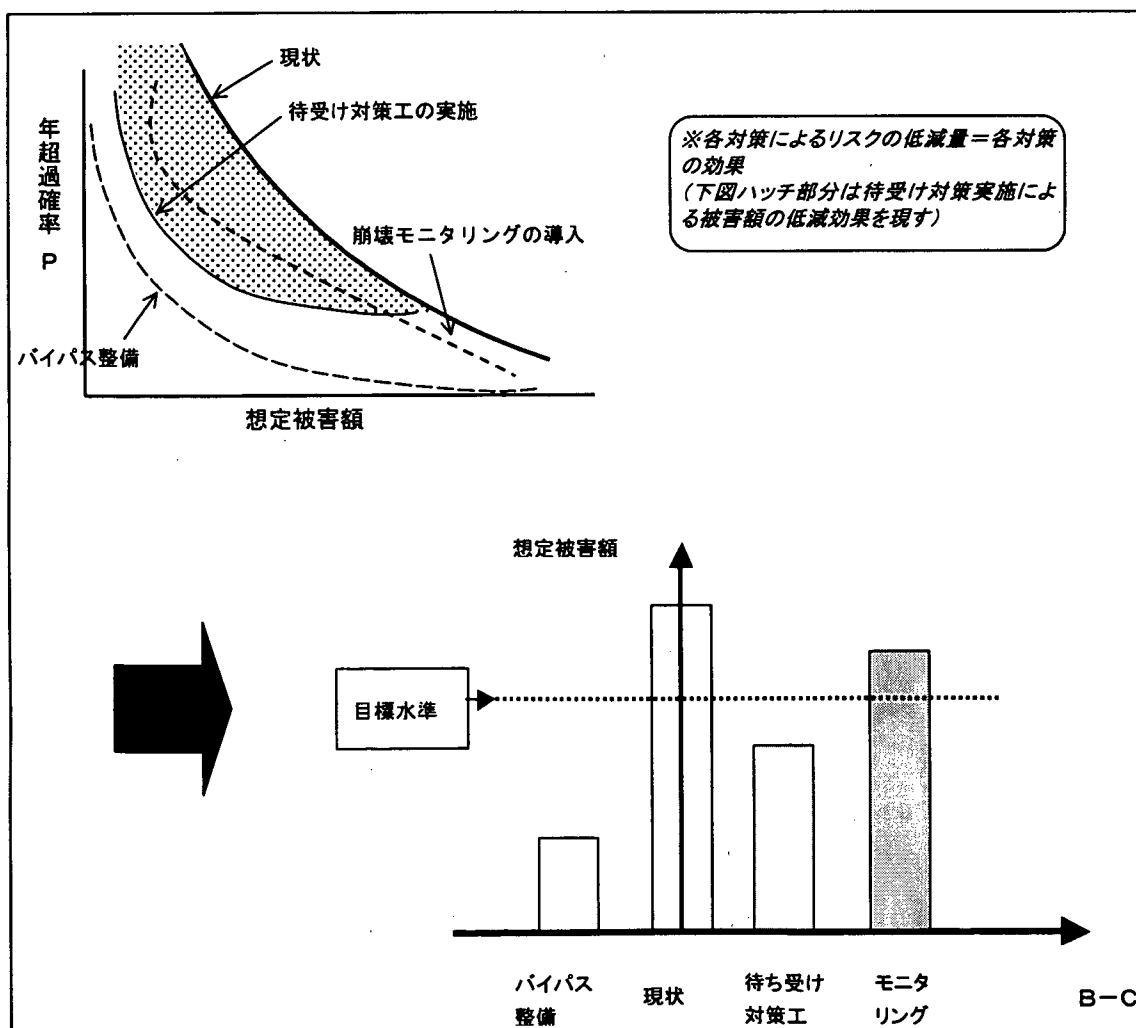


図-35 対策の選定イメージ

5. まとめと今後の課題

最後に、本研究開発に対し、外部評価委員の方々（主査：今村遼平アジア航測株式会社技術顧問、委員：桑原一横河電機株式会社マーケティング室長、小俣新重郎日本工営株式会社総合技術センター長の3名）からいただいた中間評価の概要を以下に紹介し、本稿のまとめと今後の課題としたい。

（1）国土交通省では、限られた予算の効率的な執行と道路管理の支援、道路利用者へのサービス向上を目指しているが、道路の岩盤・斜面崩壊対策として投下されている費用は膨大である。この効果を本研究開発の成果によって定量化するとともに、GIS、リスクマネジメントなど近代的な手法によって再評価し、新しいガイドラインを制定することは極めて大きな意義があり、また、道路斜面防災対策のアカウンタビリティ向上にもつながる。

（2）道路防災対策をより一層広い視野から計画的に実施するため、基礎的な地形図の整備をはじめとするデータベースの拡充と、それに基づくハザード抽出支援システムならびにリスク評価による意思決定支援システムの開発・実用化に精力的に取り組むことが重要である。

（3）GISを使って道路斜面の災害危険度（ハザード）に対するリスクを予測し、これを評価する手法を開発することは、きわめて多数におよぶ全国の道路岩盤・斜面の防災対策のプライオリティーの決定や、災害発生時の対応などのために不可欠である。

GISを使った手法の開発は、膨大な数の斜面を短時間で評価し、日常の道路マネジメントに資する手法であることなどから、現時点では技術的に最適であり、実務への活用が期待される。

（4）限られた財源を活用して安全な道路の維持管理を目指すとき、岩盤・斜面崩壊に対するリスクマネジメント手法が有効である。リスクを全て定量的に評価することは極めて困難と思われるが、現時点で可能な到達点を見極めるという意味で、有意義である。

（5）リスクマネジメントの結果をアカウンタビリティ向上に生かすためには、脆弱な国土条件の存在、岩盤斜面崩壊には不可知な部分もあるとの認識、自然災害全てを予測することは不可能ということなどを国民によく理解されるよう情報発信に努めるとともに、そうした条件や認識のもとで取り組んでいる本研究開発の活動状況や成果をこれまで以上に積極的に情報発信することが重要である。

6. 謝辞

本文の「4. 2 影響軽減技術」で述べた（1）事前通行規制の高度化については、中部地方整備局道路管理課が主担当となって各地方整備局の膨大なデータを分析し、とりまとめたものである。同様に（2）日常管理の高度化は、関東地方整備局道路管理課が主担当となってとりまとめたものである。これらの概要を本文に紹介させて頂いたことを記して謝意を表します。

さらに、現地試験やモデル区間における試行に全面的なご協力を頂いている地方整備局ならびに工事事務所の関係者の方々に対してこの場をお借りして心から謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 建設省道路局・土木研究所:新道路技術五箇年計画 ～活力ある社会を築く新しい道路技術政策～、1998年11月
- 2) 三木、藤井、古田:特定のり面・斜面の危険雨量の設定方法の検討、土木技術資料、1999年2月号
- 3) 小林、小嶋、門間:傾斜計と伸縮計を用いた岩盤斜面挙動計測、土木技術資料、1999年6月号
- 4) J. Nakano and H. Miki: Risk Evaluation Method for Rock Bed and Slope Failures in Road Disaster Management, GeoEng2000, 2000.11
- 5) 三木、中野、古田:道路のり面・斜面の表土層の簡易強度推定法の開発、日本道路会議論文集、1999年10月
- 6) 大谷、佐々木、脇坂:空気の流動性を活用したトレーサー試験の開発と岩盤斜面の亀裂の調査、日本道路会議論文集、1999年10月
- 7) 大谷、佐々木、脇坂他:空気の流動性を活用した岩盤斜面の開口亀裂の連続性調査、応用地質学会論文集、1999年10月
- 8) 大谷知生・佐々木靖人・脇坂安彦(1998):空気を活用した岩盤斜面の亀裂の調査手法、平成10年度応用地質学会講演論文集, pp. 85-88.
- 9) 佐々木靖人・大谷知生・村上隆・原田久也・高橋伸尚・人見美哉・脇坂安彦:岩盤斜面内の空気の流れを利用した開口亀裂の連続性調査法, 第38回地すべり学会研究発表講演集, pp. 589-592, 1999.
- 10) 高橋伸尚・大谷知生・佐々木靖人・脇坂安彦:室内モデル実験によるエアートレーサー試験の定量的評価の試み, 日本応用地質学会平成12年度研究発表会講演論文集, pp. 185-188, 2000.
- 11) 大谷知生・佐々木靖人・脇坂安彦:現地実験によるエアートレーサー試験の活用法の検討, 日本応用地質学会平成12年度研究発表会講演論文集, pp. 189-192, 2000.
- 12) Sasaki, Y., Ohtani, T., and Wakizaka, Y. (2000): Air tracer test - a new method for investigating crack persistence and loosening-, International conference on geotechnical and geological engineering (GeoEng2000), Melbourne, Australia.
- 13) 加藤、三木、恒岡、田中、小川:光ファイバーセンサを活用した表層崩壊モニタリングシステムの構築に関する取り組み、豪雨時の斜面崩壊のメカニズムと予測に関する論文集、地盤工学会 四国支部、2001、pp.67-74
- 14) 山邊、恒岡、中野、加藤ほか:光ファイバセンサを用いた斜面の表層崩壊モニタリングシステムに関するフィールド試験、土木学会論文集、2001年10月
- 15) 加藤、恒岡、田中:光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングシステムに関する検討、日本道路会議論文集、2001年10月
- 16) 小林、門間:割れ目解析による岩盤斜面挙動機構調査、応用地質学会論文集、1999年10月
- 17) 門間、高木他:重心解析による岩盤崩壊予測の検討、砂防学会、2000年5月
- 18) 門間、小嶋、高木他:岩盤斜面計測における温度補正の一事例、砂防学会、2000年5月
- 19) 落合達也・小野田敏・荒井健一・門間敬一・綱木亮介・浅井健一:岩盤崩壊モニタリング箇所での転倒崩壊に至るまでの変位挙動の事例、地すべり、投稿中.
- 20) 中野、三木、恒岡ほか:斜面崩壊のフラジリティの統計的評価手法、地盤工学会論文集、2001年6月

21) J. Nakano and H. Miki (200): RISK EVALUATION METHOD FOR ROCK BED AND SLOPE FAILURES IN ROAD DISASTER MANAGEMENT, International conference on geotechnical and geological engineering (GeoEng2000), Melbourne, Australia.

