

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第3155号

平成 4 年 度

土木研究所講演会

講演 集

平成 5 年 1 月 26 日

建設省土木研究所

「Copyright © (1993) by P.W.R.I.

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

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

土木研究所資料
第 3155 号 1993 年

平成 4 年度

土木研究所講演会 講演集

企画部企画課

要 旨

本資料は、「平成 4 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

目 次

水文環境の保全と再生

- －都市化と水循環を中心として－……………河 川 部 長 吉 野 文 雄…… 1

堰 と 景 観

- －堰を中心とする新しい環境の創造をめざして－…ダム水工研究室長 高 須 修 二……25

特 別 講 演

- 「創造活動のすすめ」……………筑波大学学長 江 崎 玲 於 奈……43

- 土木地質調査をめぐる最近の話題……………地 質 官 市 川 慧……45

最近の防食技術

- －土木構造物の耐久性向上をめざして－……………化 学 研 究 室 長 片 脇 清……77

土構造物の強化と高度化に向けて

- －混合土・複合土を活用した技術開発－……………機 械 施 工 部 長 久 楽 勝 行 … 101

- 地下空間の利用技術の開発……………地下開発研究官 水 谷 敏 則 … 121

水文環境の保全と再生
—都市化と水循環を中心として—

河川部長 吉野文雄

水文環境の保全と再生（都市化と水循環を中心として）

1. 水文環境への人間活動の影響

自然界における水循環の根源は太陽エネルギーにある。地球上の水の循環はおおまかに降水→流出→蒸発→大気中の水分→凝結→降水、といった経路をとり、この過程には熱の循環を伴う。このような水循環を人類は生存のために水資源の開発や治水対策により変更してきた。経済社会の発展に不可欠な水資源の開発と土地利用を可能にするための治水対策は必然的に河川流域の水循環を変更させることとなった。これらには河川流域間での水の分水、貯水池による貯留、自然の湿地貯留の減少、土地利用の変更による侵食、浸透、表流水、あるいは蒸発等の変化、等があげられる。このような水循環の変更は水循環が生起する場の水文環境の変更をもたらす。

ここでいう水文環境とは水の循環の場の環境とそこでの水の存在状態を、水循環に付随する熱や物質も含めて指す概念と考えることにする。水の存在する場としては大気・地表と地中・河川・湖沼・海洋以外に、生物体内や岩石中の水などがあるが、このような場での水は対象としない。また本来水文環境に含むべきである物質の循環は本報告では考えないこととする。

水循環はその生起する場の影響を強くうける。陸上では土地利用と強い関わりをもつ。これは水循環がその過程での個別の現象、すなわち樹冠遮断・蒸発・浸透・流出等の生起する場の特性に強く依存しているからである。さらに、表流水の循環には河川を中心にした各種の行為が強く影響している。これには、排水改良、灌漑、貯水池建設、河川改修等がある。地下水の循環は地下水開発により影響される。

これらの人類の影響は単に長期間の平均流量に影響するだけでなく、渇水や洪水の大きさとその頻度及び季節的な流量変動に影響する。水循環への影響のうち、流量変化についてはかなりよく研究が進められてはいるものの、

- 影響がかなりはっきりと認められよく研究されているタイプ；ダム建設、都市化、流域外導水、工業／農業による水の消費、
- あまり明瞭には影響が認められないもの；人工的な排水工、鉱山の露天掘、人為的な植生の改変、河川改修等の物理的な水路の変更、

に大別できる。

これらは水の循環についてのものだが、人為的な水循環の変更には熱の循環の変更を伴うことがある。例えば都市化による水循環の変更は都市域における熱利用とも複合して、人工的な土地被覆により熱循環を変更する。

本報告では主に都市化に伴う水循環を主題として、水文環境の変化とその保全について、現在の知見を要約して紹介する。

2. わが国の水文環境

2.1 わが国の水循環

わが国は周囲を海洋に囲まれているため、湿潤で降水量も多い。わが国の年降水量の分布は脊梁山脈部で3,000mmを越え、地域的には日本海側で冬季の降雪量が多く、太平洋側で台風や梅雨による降雨量が多い。降水量が少ないところは瀬戸内、中部山地内の盆地、北関東、東北地方の阿武隈、北上川の平野と北海道東部である。

日本の年降水量の平均値はその計算の方法でかなりの差があるが、一般に1,750mmから1,850mmであろうと推定されている。この値は、気象観測地点の平均値であるが、観測点がほとんど平地部にあり、降水量の多い山地部にはほとんどないため実際の降水量はこの値より大きいと考えられている。山地の降水量でも特に雪や台風時の雨量について正確な値が観測されていない。河川の流出量をもとに推定されるわが国の平均降水量は2,000mmから2,250mm程度であると考えられている。

都道府県別の年降水量の最大値と最小値の比はおよそ2程度である。また月降水量の変動係数は一般に太平洋側で大きく、かつ7、8月に大きい傾向を示す。全体的に月降水量の変動係数は最低30%（冬季の日本海側）、最高80%（夏季の太平洋側）に達し、毎月の降水量の変動がかなり大きいことを示している。ただし、この値が100%以上の地域はない。これは日本がかなり多雨で、毎年の変動は乾燥、半乾燥地域程大きくはないことを示している。しかし、この変動係数が50%以上の地域はかなり多く、年々の変動が大きいことを示している。

わが国の河川は流域が小さく、かつ急流であることから、上述の降水量の変動特性に従った状況を呈する。年合計流出高の地域分布は、降水量の分布と同様中部山岳や東北の日本海側で多く、場所によっては4,000mm以上の流出高と評価されている。流出高がこのような大きいのは融雪によるもので、一般に山岳部における降雪量の観測が困難なため降水量以上の流出量が報告される例が多い。流出高は河川の特定の地点での観測値をもとに分布図に示されるため平面的に表現するのは困難であるが、地域的にみて河川の源流程この値は大きく平野部には小さくなることが予想されるので、場所的に4,000mm以上との値として評価されていると考えられる。

流出量の年変化は日本海側では4月から6月にピークをもつが、太平洋側では、梅雨や台風の降雨による流出のため、7月から9月にピークを持つ。

2.2 わが国の熱環境と蒸発散、水収支

図-1は近藤、桑形(1992)による5年平均の日射量および有効長波射出量(水面温度と気温が等しいときに地表面から正味で失われる長波放射量)の分布である。日射量は北日本と北陸地方では135w/m²前後、関東以南では150w/m²前後と、南にいくほど大きくなる。一方、有効長波射出量は全国的に60w/m²前後で、日本海側でやや小さな値をとるが、南北差は日射量ほど顕著ではない。

図-2に近藤、桑形(1992)による地域代表風速を用いて計算した年蒸発量およびポアソン比の分布を示す。これはわが国の浅い水面からの蒸発量を推定した結果である。これによれば、北部

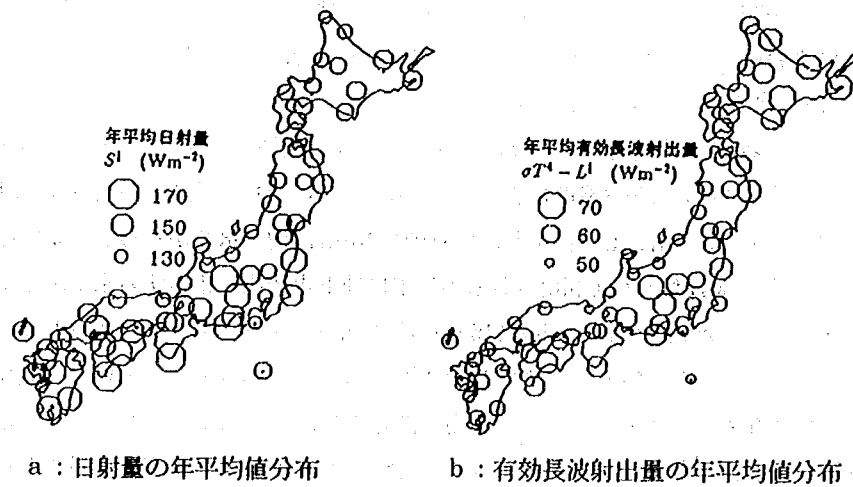


図-1 日射量, 有効長波射出量の年平均値分布 (近藤・桑形, 1992)

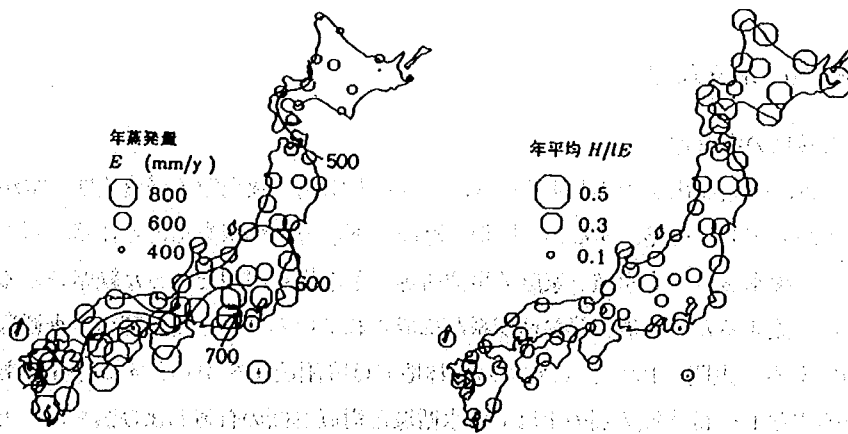


図-2 水面蒸発量とボーエン比の分布 (近藤・桑形, 1992)

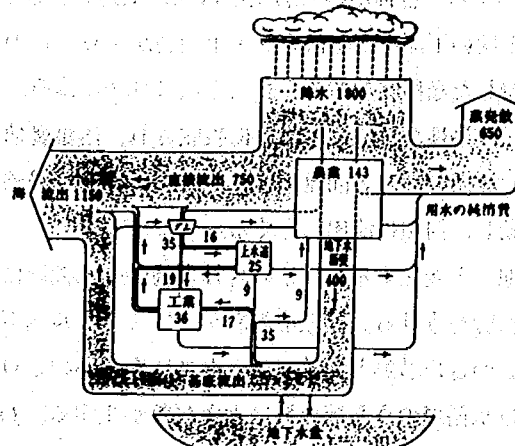


図-3 日本の水収支 (権根, 1977) (単位:mm/yr)

で500mm、南部で800mm程度の蒸発散量となっている。建設省(1969)が収集した年降水量と年流出量の関係によれば、この差を蒸発損失と仮定するとわが国では全国平均で500mmで、九州、瀬戸内で600mm、北海道で400mm程度の蒸発散量となる。

図-3は日本の水収支を模式的にあらわしたものである。(概根, 1977)。平均年降水量は1,800mmであり、このうち650mmが蒸発散によって大気中に戻る。河川に流出する残りの1,150mmのうち、750mm程度が洪水流出として流出し、残りの400mmは地下水をかん養した後に徐々に河川に流出する。このうち水資源として利用されるのは主に地下水流出に相当する水であるが、1985年時点で、農業用水として585億立方メートル(155mm相当)、工業用水156億立方メートル(41mm)、都市用水151億立方メートル(40mm)である(89水資源便覧)。ちなみにダムにより開発された有効貯水量は130億立方メートルで、これは流出高に換算すると46mm相当である。これは年総降水量に対し2.5%、水資源総量に比べ19%であって、安定した水資源開発量が少ないことが判断される(89水資源便覧)。

3. 都市と林地の水文環境

3.1 都市と林地の水循環

都市の水循環は、降雨流出を中心とする過程、すなわち降雨-蒸発散/浸透/地下水かん養-流出の過程と、雨が人工的な経路、すなわち屋根/路面-下水道-河川をたどる経路、および上水として都市域外から導水され、上水道-家庭/事業所等-下水道-河川といった経路をとる。これらの過程は相互に交流するため一層複雑な循環系が構成されている。図-4は都市の水循環システムを示す系統図である(虫明, 1992)。これに対し林地では降雨流出を中心とする過程であって、都市域との違いの主なものは流域表層の土壌での水循環と樹冠遮断の有無および蒸発散にともなう水循環の差である。図-5は森林斜面における水循環の模式図である(吉野, 1983)。

森林に覆われた山地流域では、樹冠上に到達した降雨は一部が遮断され、大部分が樹幹流や樹冠通過雨量となって地表に到達する。森林地の表層土壌は団粒構造の発達した数10cmの層を有し、その間隙率は大きい。表層土壌の下部には基盤をなす土壌層があり、この土壌層と表層土の間には上層からの溶脱物質等が沈着した漸移層がある。表層土壌は孔隙に富み、浸透能が大である。地表に到達した雨量はこのような浸透性が高い表層土壌に吸収され、落葉腐植層が少ないところや地下水位が高い沢筋等の限られた場所のみで表面流が発生する。いったん浸透した雨水も表層土壌の間隙を満たしながら側方へ移動し、河川に流出してくる。

森林が草地や田畑、市街地へと変化すると、この森林表層の保水機能に変化が生じる。水循環の主要な要素である蒸発散も影響をうける。熱環境の面からはまずアルベドの変化によって放射収支が変化し、純放射量が変わる。つぎに潜熱と顕熱フラックスに変化が起こり、地表の熱環境が変化する。このため都市と林地では水循環のうち蒸発散に大きな差が生ずる。わが国のような常に湿潤なところでは、林地が市街地に変化すると地表熱環境は大きく変化する。この点については後述する。

都市では地表面が建物やコンクリート、アスファルトで覆われるために、蒸発散は大幅に減少す

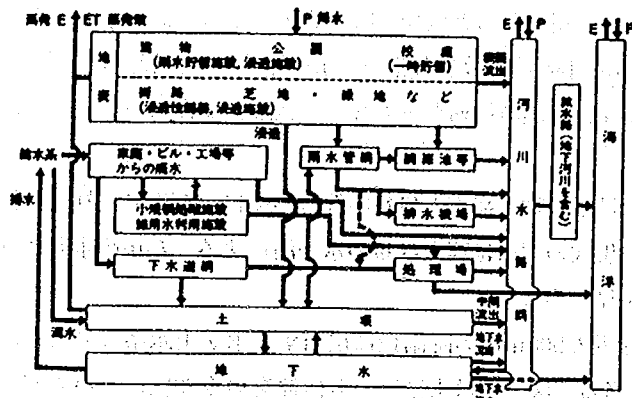


図-4 都市の水循環システム (虫明, 1992)

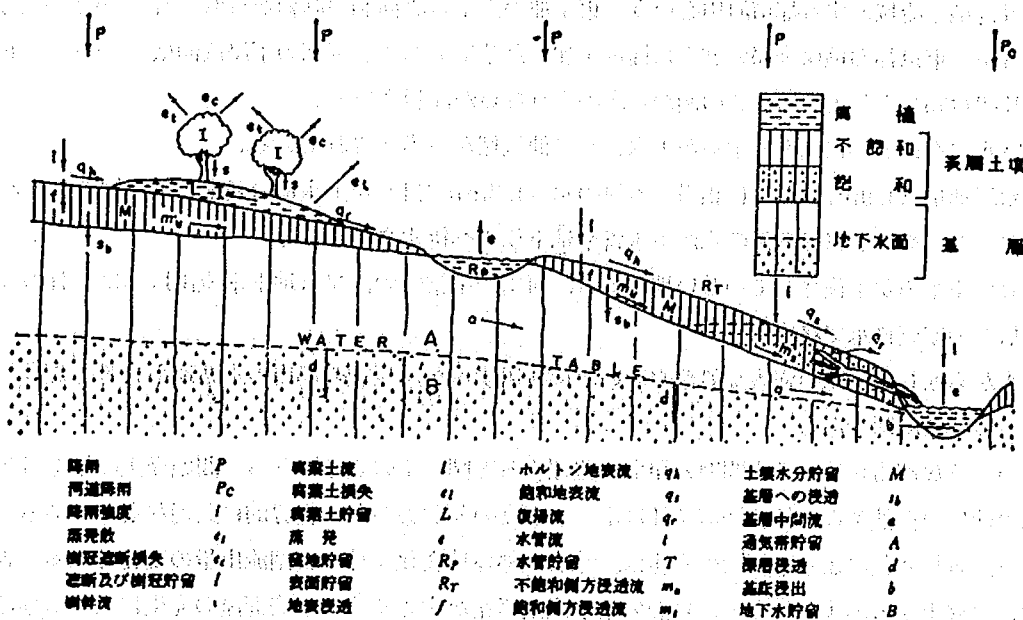


図-5 山腹斜面での水流発生機構

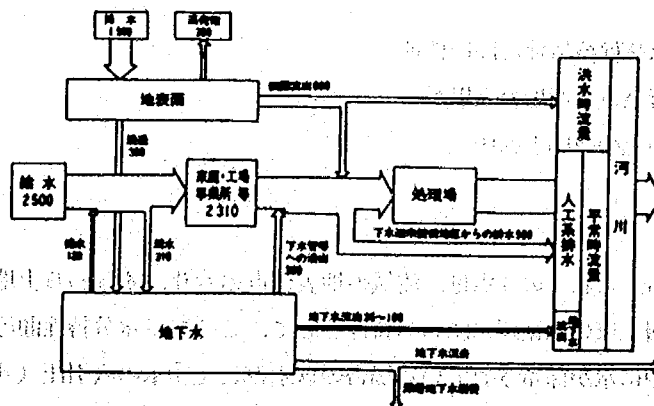


図-6 東京23区域の年間水収支 (虫明, 1992) (単位:mm):1979年時点, 不浸透面積率65%, 下水道普及率75%。河川とは, 多摩川, 荒川, 隅田川の本川は含まない, 台地中小河川。

る。完全に不透水性の物質で覆われると蒸発は降雨直後の湿った面や水面、水溜りからに限られる。自然林地では500~800mm/年の蒸発散があるが、市街地からの蒸発量は150~250mm/年程度と推定されている。蒸発散現象は潜熱の移動をとめない、気温調節作用があるので環境保全に重要な要因である。

このような水循環における林地と都市の自然条件の相違に、都市では社会条件が加わり、水問題は深刻な様相を呈する。現代の都市は莫大な量の水を消費する。都市の水問題を理解するために一例として東京の水収支を見てみよう。

例えば東京23区では年間2,500mmの降雨量に相当する水が上水系統で供給されているが、これは年降水量の1.7倍にも当る。図-6は水循環の全体像を東京23区について調べた東京都の結果に基づき推定されたものである(虫明, 1990)。ここに河川とは、石神井川、神田川、目黒川などの武蔵野台地を流域とする都市河川をいう。東京都の流量観測体制の制約から低水流量の精度に問題はあるが、東京都環境保全局の調査に推定を加えた結果である。区部の不透水面積率は65%, 下水道普及率は75%としている。この図から次のような点が注目される。

- 年降水量をはるかに越える水量が上水として他流域から導入されている。
- 雨水浸透量(1.9mm/日)に相当する量の水(1.2mm/日)が上水道の漏水として地下水かん養となるが、それとほぼ同量の水が下水管や地下鉄等へ排水されている。
- 一般に下水道が整備されていない地域では、河川の平常時の流量は地下水流出以外にその5~10倍もの家庭排水で構成される。
- 上水から転じた下水の膨大な処理水をいかに活用するか、今後の都市の水循環系を考える上で極めて重要な課題である。

このような都市化による水問題の発生を整理すると図-7のようになる。問題発生はそれぞれの地域の自然条件と社会経済条件によって程度の差があるが、世界的に共通なものである。

一方、森林変化による水循環の変化は、地表の熱環境変化を伴い長期流出量の変化となる。森林変化に表層土壌の消失が伴うと、斜面の雨水流出経路が大きく変り、表面流の発生により短期流出量が増大する。このような効果を森林の理水機能として総括したものが表-1である。

3.2 表層土壌の水分保持特性と浸透特性

流域に対する開発行為は水循環の立場から、

- 植生の除去並びに表土の改廃と転圧
- 不透透域の拡大
- 雨水排水の強化

と捉えることができる。これらの3点は、流域の地表付近の変化、すなわち土地被覆条件と表層土壌の変化である。表層土壌の水循環に関わる特性として、ここでは水分特性曲線に着目する。これは、不飽和状態で土中に水が保留されている場合の含水率と土中水の吸引圧(サクション)の関係である。この曲線によって土壌の水を保留する能力が判断される。

図-8に、自然林地と都市化地盤の深度15cmの水分特性曲線が示されている。縦軸は、吸引圧

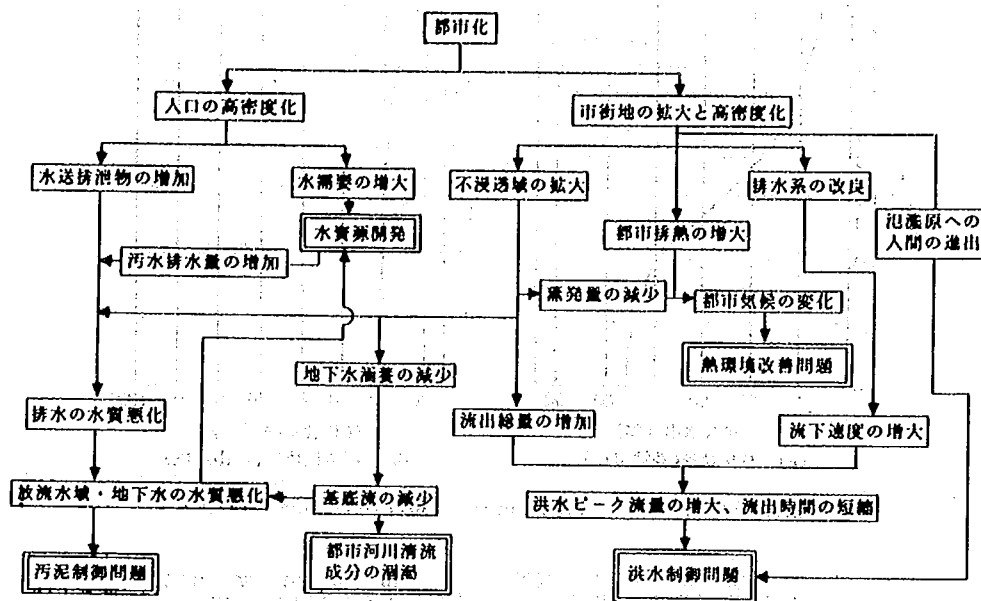


図-7 都市化が水循環とそれに伴う熱環境に及ぼす影響

表-1 森林理水機能の効果

森林の理水機能	理水機能の効果		
	渇水緩和	洪水緩和	土砂流出抑制
降雨遮断	+	+	+
蒸散	-	+	+
土壌浸透性の増強・維持	+-	+-	+-
増雨	+	-	-
林地面蒸発抑制	+	-	-
融雪遅延	+	-	0
積雪変更	0	0	0
地表流出緩和	+-	+-	+-

(水頭cm単位)の常用対数をとった値pFであらわされている。この曲線でpF=0は土壌間隙が水で飽和した状態に相当し、これに対応する含水率は土壌の総間隙を、残りが土粒子の体積率、すなわち固相をあらわす。自然林地の表土は総間隙が76%であるのに対し、土壌構造が破壊され転圧された都市化地盤では固相が約60%を占め、間隙部分は約40%に減少している。

重力水と毛管水の境はpF 2前後とい

われているが、ここではこれを用いると、

pF=0~2の間の体積含水率は重力で

排水が可能な土壌間隙の割合に相当す

る。重力の下で水が抜け空気と入れ変るとい

う意味で、これを気相と呼ぶ(一般に気相とは、土

中の空気であらわされる間隙部分をいうが、こ

こでは重力排水が可能な間隙という意味で使

用している)。図-8によると、自然林地の表土は団粒構造が発達し大間隙が多いために気相が約30%と高

い比率を示すのに対して、都市化地盤ではそれが3%程度と著しく減少しているのがわかる。

pF=2以上の範囲に対する水分量は重力では移動できない間隙水、すなわち毛管水と吸着水に

相当し、液相と呼ばれる。ある土壌の中で、固相、気相、液相それぞれが占める割合を三相分布

- + 明らかにプラス効果あり
- 明らかにマイナス効果あり
- +- 一般にはプラス効果がマイナス効果より大と判断される項目
- 0 どちらともいえない項目
- 0 ほとんど無視できる項目

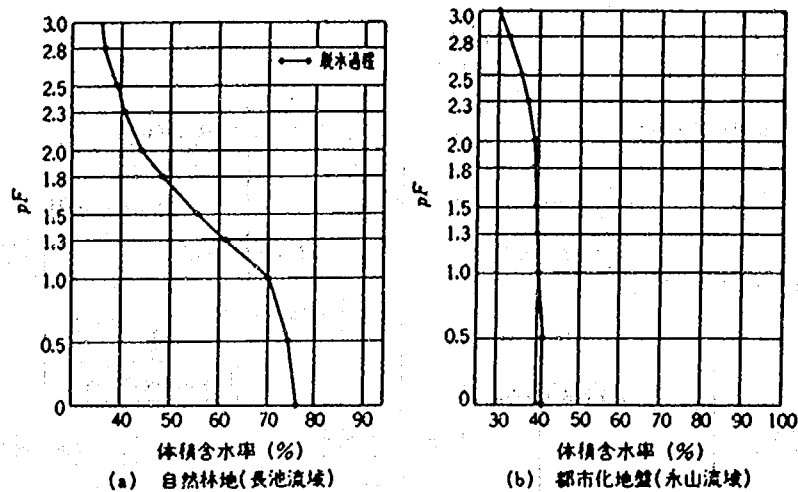


図-8 自然林地と都市化地盤の深度15cmの水分特性曲線の比較 (虫明他, 1987)

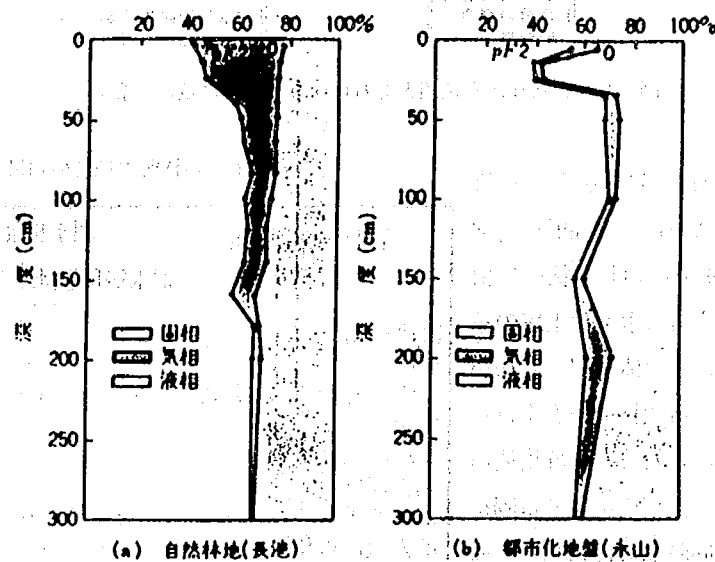


図-9 三相分布の比較 (虫明他, 1987)

という。自然林地、都市化地盤の各深度の水分特性曲線から、深度方向の三相分布を描いたのが図-9である。自然林地の屋根/斜面部では、深度150cm付近まで、重力水が移動できる間隙の割合が高く、雨水の保留能と浸透能が高いのに対して、都市化地盤では特に表層付近においてそれらが著しく低下しているのがわかる。

林地と都市化地盤ではこの表層土壌の相違からくる雨水の浸透特性の差が大きい。森林土壌では浸透能が非常に大きいことは多数の実測で明かにされている(表-2参照、村井ら, 1975)。これは浸透能試験の結果であるが、この試験の結果は一般に降雨中の実際の浸透速度より大きな値を示す傾向があり、浸透能の相対的な差異を示すものと考えた方がよいと思われる。この表からも明らかなように通常の降雨規模では地表流は林地では発生しないとしてよい。土壌の表面が攪乱された

表-2 土地被覆条件別の最終浸透形
(最終浸透レート mm h^{-1})

林 地			伐採跡地		草 生 地		裸 地		
針 葉 樹		広葉樹	軽 度 攪 乱	重 度 攪 乱	自 然 草 地	人 工 草 地	崩壊地	歩 道	畑 地
天然林	人工林	天然林							
211.4 (5)	260.2 (14)	271.6 (15)	212.2 (10)	49.6 (5)	143.0 (8)	107.3 (6)	102.3 (6)	12.7 (3)	89.3 (3)
林地平均 258.2 (34)			伐採跡地平均 158.0 (15)		草生地平均 127.7 (14)		裸地平均 79.2 (12)		

注) () 内の数値は測定した地区数

(村井 宏ら, 1975)

伐採跡地や踏みつけられた歩道上では降雨強度が浸透能を越えて地表流が発生する。都市化地盤はこの表の歩道に相当する状態にあるものとしてよい。

3.3 林地と都市化地盤からの流出現象

図-10は粗造成裸地斜面(面積 400m^2 , 斜面勾配約 7°)と林地斜面(面積 600m^2 , 斜面勾配約 18° , 栗, タラ, 笹の混交林地)にて, ほぼ同一の降雨強度(約 55mm/h)の散水を実施したときに得られた流出ハイドログラフである。粗造成地では散水時間を50分で打ち切ったため, 林地との直接対比は不可能であるが次の図-10 時間雨量 55mm/h のときの粗造成地と林地からの流出ハイドログラフ

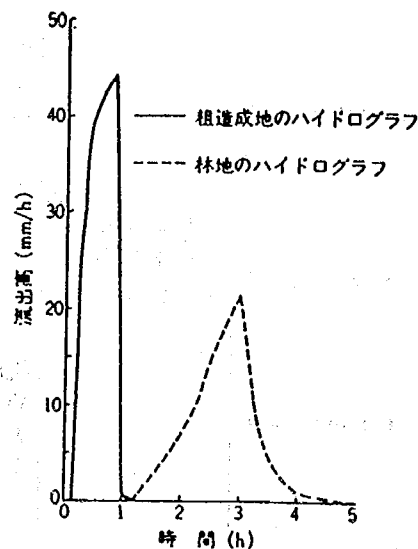


図-10 時間雨量 55mm/h のときの粗造成地と林地からの流出ハイドログラフ

- (1) 粗造成地からの流出は速い。約10分後に流出ハイドログラフが上昇し, 20分程度で流出係数が0.8にもなる。散水終了後約10分で流出量はなくなる。
- (2) 林地斜面の流出は散水開始後1時間して始まり, 散水終了時まで流出量は増大し続ける。このときの流出係数は0.4程度である。散水終了後も約2時間流出が続く。
- (3) この流出現象の差は落葉腐食土層の有無に直接的に起因している。林地では表層土が約 $50\text{cm} \sim 1\text{m}$ 程度あり, この層が多孔質で保水性が高く, 流出波形を緩やかな変化にしているものと考えられる。
- (4) 流出速度の違いも大きく, 粗造成地からの流出水の水速は林地に比べ $1/5$ 程度以下と推定される。このことは散水終了後のハイドログラフの減水特性からも類推される。

3.4 都市化と洪水流出

河川流域が開発され市街地が拡大するにつれて洪水流出特性は著しく変化する。その結果, 一般

表-3 水文諸因子の変化がハイドログラフのパラメータに及ぼす影響

水文因子	ハイドログラフのパラメータ	流出総量	ピーク流量	lag time	低減特性
浸透能の減少		損失減少による流出総量の増加がある	有効雨量の増加によるピーク流量の増加がある	有効雨量の増加による表面流出の増大はlag timeを小さくする効果をもつ	
浸透域の減少					
表面貯留の減少					
表面粗度の減少			流出速度が大きくなることによる集中効果でピーク値を大きくする	流出速度が大きくなることによるlag timeの減少がある	流出速度が大きくなることにより低減速度が増加する効果をもつ
地下水の減少		基底流の減少により流出量を減少させる			基底流の減少により低減速度が増加する効果をもつ
河道貯留の減少			流出を速めるため、ピーク値を大きくする効果をもつ	流出速度が大きくなることによるlag timeの減少がある	洪水伝播速度の増大による波形の扁平化効果の減少は低減を速くする
河道粗度の減少					

的によく認められている結論は次の3点に要約される。

- ① ピーク流量が増大する。
- ② 洪水到達時間が短くなる。
- ③ 流出率が増大する。

これらの結果は、流域開発による排水施設（道路側溝や下水道、河川改修等）の整備、宅地や道路等の建設による不浸透域拡大、に直接的な原因を求められる。

表-3はこの変化をハイドログラフのパラメータごとに整理したものである。これらの水文因子の変化が流出ハイドログラフの変化に寄与する程度を定量化できれば、流出変化の実態が明らかになるが、これらの各因子の効果を個々独立に評価することは、都市流出の実測データからみて困難な問題である。都市化の影響を評価する各種流出モデルもこれらの水文要素の変化を大別してモデルパラメータに組み入れる形をとっている。以下に研究の成果を要約して示す。

評価の方法は都市化率の異なる流出試験地データを用いて、K、Nと都市化率Uの関係を分析することによった。ここで用いる都市化率Uは全流域面積に対する人為の加わった面積（水田、畑

を除く)の割合で定義した。

貯留関数のK値はハイドログラフの通減特性に関係し時間の次元を持つ。したがってK値は流域の大きさや流路長、斜面勾配等の要素に依存する値である。ここではK値を基準化するため流域の大きさを代表する流域面積で基準化を図ることとした。重回帰分析を行った結果次式を得た。

$$K = 8.6 \cdot A^{0.10} \cdot 10^{-0.8U} \quad (1)$$

図-11はこの結果を $A=10\text{km}^2$ に相当する K_{10} の値で示したものであって、都市化率 U が大になるほどK値は減少することが判断される。この結果から、 K は $U=0$ で $K=4\sim 20$ 、 $U=1.0$ で $K=0.5\sim 5.0$ 程度の変動幅を有していることがわかる。

等価粗度係数 N は流域の土地利用によって異なり $100\sim 10^{-2}$ の値($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)をとるものが多い。図-12は等価粗度係数 N と都市化率の関係を示すものであり、都市化が進むにつれて N の値は小さくなる明確な傾向がみられる。この結果から $U=0$ で $N=0.3\sim 0.4$ 、 $U=0.5$ で $N=0.035\sim 0.64$ 、 $U=1.0$ で $N=0.004\sim 0.1$ 程度の変動幅を有していることがわかる。都市化率 U を用いると経験式として

$$N = 1.3 \cdot 10^{-2.1U} \quad (2)$$

なる関係が得られる。

以上に述べたように都市化率 U による流出モデル定数の変化傾向は明らかになった。 U が大になるとともに N 値、 K 値は減少する。しかし、これらの値の変動範囲は非常に大きい。 U の増大による K 値や N 値の減少傾向は判断されるが、この結果を都市化による流出推定法に一般化するには、これらの値の変動範囲の有する意味を考慮しておかなければならない。

3.5 都市と林地の熱環境

地表に達した日射は、その一部が地表で反射される。この日射の反射率をアルベド(albedo)といい、反射面の物性により値が異なる。代表的な地表状態のアルベドの目安を図-13に示した(塚本、森林水文学)。

地表における放射収支は短波放射(日射)と長波放射の収支からなり、地表に与えられる放射エネルギーである純放射量(net radiation, 正味放射量ともいう)は、

$$R_n = (1 - \alpha) Q_g + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (3)$$

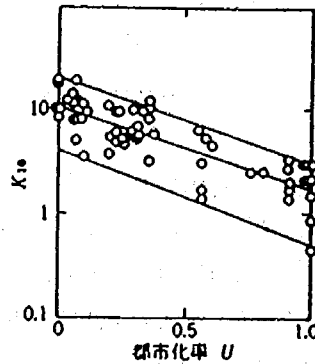


図-11 都市化率と K_{10} の関係

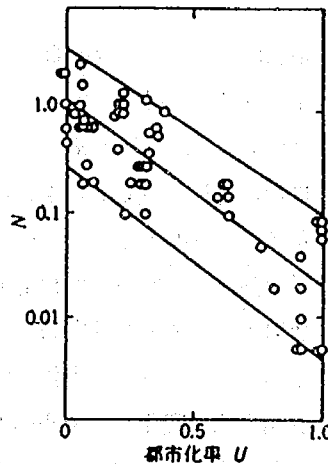


図-12 都市化率と N の関係

ただし、 R_n ：純放射量、 α ：アルベド、 Q_g ：全天日射量、 $L_{\uparrow}$ ：地表から放射される長波放射量、 $L_{\downarrow}$ ：大気から下方に放射される長波放射量、である。

この放射量が地表に供給される正味の放射エネルギーである。純放射量は気象要素の一種ではあるが、日射量と異なり属地的な量である。受ける日射量が等しくとも、地表の条件でアルベドが異なり、また地表温度が変わると地表からの長波放射が異なるからである。

図-14はBaumgartner (1967) が、西ドイツで観測した土地利用形態ごとの放射収支である。反射短波放射量は森林地で最小、裸地で最大となり、農地と草地はその中間に位置する。これは地表のアルベドに規定されるので、大きさの順位は図-18に示したアルベドの大きさと一致する。森林地の純放射量の割合は、他の土地利用より明らかに大きく、放射エネルギーを効率的に吸収していることがわかる。したがって、森林地から農地などへの土地利用形態の変化は、アルベドの増大を招くので、取り込まれる純放射量の減少につながることになる。

一方、都市の大気は、そこから排出される汚染物質によりドーム状に覆われるため、日射の減衰は森林地や農地などに比べると大きい。Oak (1981) は、大きな都市の年間日射量の減少が郊外の田園地帯の10~20%に及ぶことを見出している。

地表が受ける放射エネルギー（純放射量）は顕熱フラックス、蒸発散による潜熱フラックス、地中と植被層の貯熱変化量および光合成による二酸化炭素の固定に配分される。これを式で表現すると、

$$R_n = H + \lambda E + G + P \quad (4)$$

ただし、 H ：顕熱フラックス、 λE ：潜熱フラックス（ λ ：蒸発潜熱、 E ：水蒸気の輸送量、つまり蒸発散量）、 G ：地中などの貯熱変化量、 P ：光合成による化学エネルギーへの変換、である。このうち光合成による化学エネルギーへの変換は一般に微量として無視される。

ボーエシ比 β (bowen ratio) は、顕熱フラックスと潜熱フラックスの比で、

$$\beta = H / \lambda E \quad (5)$$

である。地表で蒸発散が生ずるとき、蒸発潜熱が必要であり、これは20℃のとき水1gについて

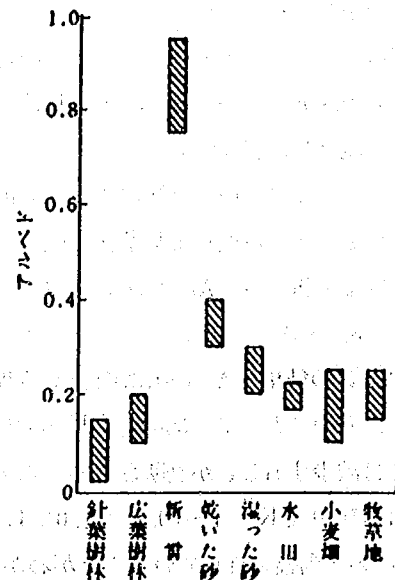


図-13 いろいろな地表のアルベド (塚本, 1992)

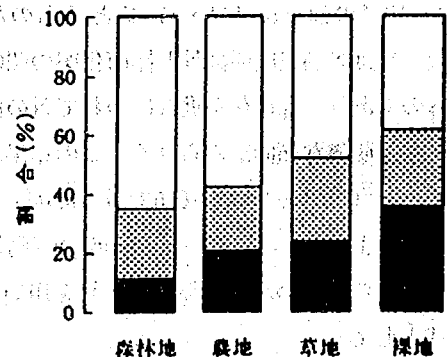


図-14 種々の地表面における放射収支 (塚本, 1992)

2454J (ジュール), カロリーの単位では586calである。

熱エネルギーの振分け, すなわち熱収支構造は, 図-15のように土地利用形態により異なる。森林地では純放射量の70%以上が潜熱フラックスに変換され, 残量のうち数%が貯熱変化量に回るが, 大部分は顕熱フラックスとなる。また, 熱配分の様子を示すボーエン比は, 森林地で0.1~0.3, 農地と草地で0.3~0.4程度である。これらのことから, 森林地は, 吸収された熱エネルギーを潜熱に変換する能率が高いことが理解できる。

日射にさらされる裸地表面では蒸発に伴う水分減少により, 乾燥した土壌層が形成され, そこでは, 吸収された熱エネルギーが地温の上昇に費やされるため, 地表の乾燥の進行とともに地温は高くなる。都市化に伴う熱収支構造の変化は, 図-15にみられるように, 顕熱フラックスと貯熱変化量の増大に特徴的に現れる。この変化は, ビルや道路などの不透透域の拡大や下水道の整備などによる都市の透水性と保水性の減少, すなわち都市の乾燥化と結び付いている。さらに, 都市を構成する物質は熱を蓄えやすいことに加え, 都市から排出される人工熱もこの変化に拍車をかける。その結果, 都市では, 周辺の森林地や農地より気温が高くなる。いわゆるヒートアイランド(熱の島)は, 都市化が生み出した特有な熱環境といえる。

図-16はアスファルト, コンクリート, および土表面における長波放射量の藤野・浅枝(1992)による実測例である。観測は雲のない8月下旬, 埼玉大学構内で行われ, 最高気温は32.3度を記録した。この図から, アスファルトがコンクリートや土とは非常に異なった長波放射をすることがわかる。地表面からの熱の放出量はアスファルトがもっとも大きく, 土, コンクリートの順となる。これはアルベドの小さいアスファルトと土は日射を吸収しやすく, 特にアスファルトは熱伝導率が大きいので吸収した熱を蓄えやすいこと, また熱伝導率が高くてもアルベドの大きいコンクリートでは吸収する熱量が少なく, アスファルトに比べ少量の熱しか蓄えないことを示している。さらに土については, 地表面において蒸発による潜熱輸送で熱を失うこと, 熱伝導率が小さいため深部まで熱が伝わらず蓄熱量が小さくなることが判断される。この観測例では, アスファルトの表面温度は57度にも達し, 650w/m²の放射量を示し, 夜間でも大気放射より50w/m²大きい。一方コンクリートはアルベドが大きいため, 最高値は土よりも小さいが, 夜間ではわずかに大気放射より大きい。土は熱伝導率が小さく日中は表面がよく温められるが, 夕方以降では大気放射より小さくなる。

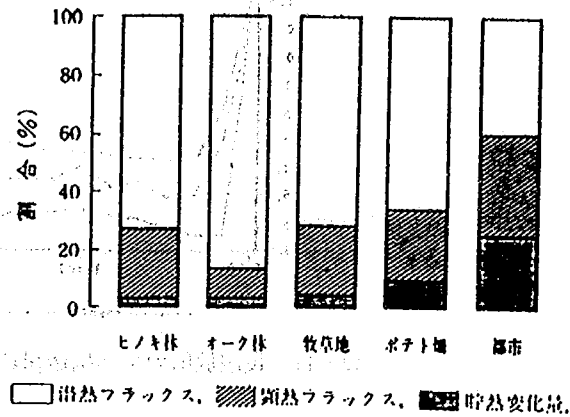


図-15 種々の地表面における熱収支(塚本, 1992)

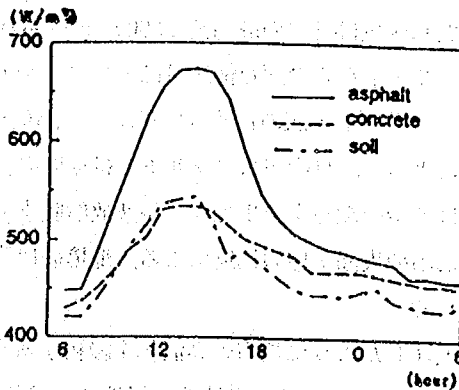


図-16 地表面からの長波放射量(藤野・浅枝, 1992)

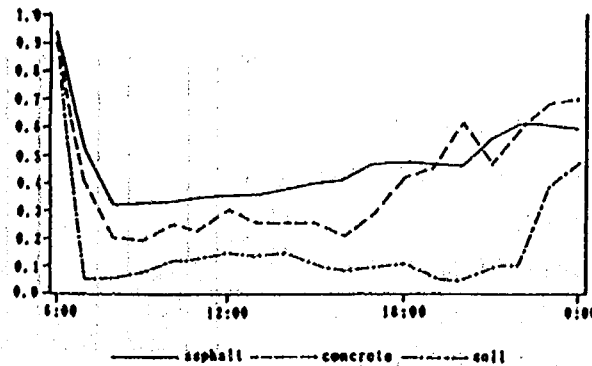


図-17 長波放射の全熱輸送量に対する割合 (藤野・浅枝, 1992)

このような観測結果から熱収支を概算してみると、アスファルトでは潜熱輸送がないと仮定して、顕熱輸送量は日中の最高値で360w/m²にもなり、これが大気加熱に大きく寄与していること、コンクリートからの顕熱輸送量はアスファルトの半分以下であること、などが推定される。

図-17は地表面の長波放射量が、全熱輸送量に示す割合を示している (藤野・浅枝, 1992)。これによると、日中アスファルトでは放射の占める割合が全体の3割以上に達し、加熱された舗装面では多量の顕熱を発生させ、長波放射収支でも多量のエネルギーを大気に放出している。このような都市の表面工種の相違による熱環境の研究は緒についたばかりであり、今後の研究の進展が期待される。

上述したように都市の高温化を緩和するうえで、熱交換効率のよい森林地の果たす役割は大きい。Myrup (1969) は、森林地の緑地の面積増大が都市の最高・最低気温の低下量に比例することを明らかにした。しかし、その影響域や影響程度の定量的評価はまだ難しい。この問題は、森林地の改変利用による熱環境の変化予測のみならず、都市林や都市近郊林が都市気候に及ぼす影響を解明するうえで重要である。

3.6 林地からの蒸発散

森林からの蒸発散は、蒸散、遮断蒸発 (葉面付着水分の蒸発)、林床面蒸発の3成分に分けられる。

世界各地の森林で測定された樹冠遮断量は表-4のように、160~540mm/yの範囲にある (塚本編, 森林水文学)。この表から、遮断率 (年樹冠遮断量/年降水量) は13~51%に分布し、気象条件や林分条件により大きな幅を持つこと、遮断率は、降水量が小さくなるにつれて、大きくなる傾向があること、などが読み取れる。

樹冠遮断量は林外雨量との間に一次式の関係をもつ。

$$PI = a \cdot P + b \quad (6)$$

ここに、PI: 樹冠遮断量, P: 連続した期間の林外雨量, a, b: 係数である。その係数をいくつかの森林で調べた結果が表-5である (塚本編, 森林水文学)。この表から、気象条件、林分条件が異なるにもかかわらず、a, bに大きな差異はないが、相対的に樹冠遮断量は広葉樹林より針

表-4 樹冠遮断量 (塚本, 1992)

林 分	測定法 ¹⁾	降水量 (mm)	樹冠 遮断量 (mm)	樹冠 遮断率 (%)	文 献
アカマツ	1	1024.4	198.5	19.4	村井 (1970)
カラムツ	1	874.0	178.7	20.4	村井 (1970)
ヒノキ	1	1793.0	457.8	25.5	岩坪ら (1967)
	1	1542.5	328.9	21.3	服部ら (1982)
	3	1336.4	312.9	23.4	服部ら (1988)
アカマツ・ヒノキ	1	1777.9	352.1	19.8	Suzukiら (1980)
スギ	1	1621.6	378.3	23.3	丹下 (1982)
	1	1702.7	245.3	14.4	丹下 (1983)
広葉樹 ²⁾	1	1793.0	360.4	20.1	岩坪ら (1967)
広葉樹 ³⁾	1	1702.7	224.1	13.2	丹下 (1983)
オウシュウアカマツ ・コルシカマツ	2	595.1	213.6	35.9	Gashら (1977)
オウシュウアカマツ	2	493	252	51.1	Gashら (1980)
	3	493	247	50.1	Gashら (1980)
シトカトウヒ	2	802	300	37.4	Gashら (1980)
	3	802	249	31.0	Gashら (1980)
シデ	1	447.0	160.3	35.9	Leytonら (1967)
混生常緑樹	3	1938.5	527	27.2	Pearceら (1981)
	3	2058.3	538	26.1	Pearceら (1981)
熱帯降雨林	1	2593	363	14.0	Shuttleworth (1988)

注) ¹⁾ : 測定法の 1, 2, 3 は本文中の①水収支の方法, ②微気象学的方法, ③組合せ法にそれぞれ対応する。²⁾ : ソヨゴ, ツバキ, クリ, リョウブなどが混生する。³⁾ : 上層木はコナラが優占する。

葉樹林の方が多いこと, が判断される。

表-5 樹冠遮断量の回帰式の係数と定数(塚本, 1992)

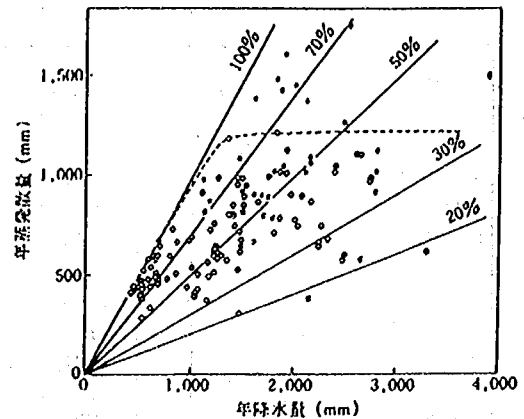
森 林		回帰係数(a)		回帰定数(b)	
		平均	範囲	平均	範囲
針葉樹林	アメリカ	0.13	0.06-0.20	2.0	0.5-9.0
	日 本	0.13	0.08-0.20	1.3	0.9-1.9
広葉樹林					
着葉期	アメリカ	0.09	0.04-0.22	1.0	0.1-2.0
	日 本	0.12	0.10-0.15	1.1	0.5-1.7
落葉期	アメリカ	0.07	0.02-0.16	0.5	0.1-1.0
	日 本	0.07	0.07-0.08	1.9	1.0-2.9

各地の森林で測定された林床面蒸発量は, 全蒸発量の 5~20% に相当する。年降水量に対する割合では 10% 以下と見込まれる (塚本編, 森林水文学)。

図-18は年蒸発量と年降水量の関係を各種のデータで調べた結果である (塚本編, 森林水文学)。年降水量400~4,000mmに対し, 年蒸発散量はほぼ300~1,800mmの範囲に分布する。年降水量が800mm以下の流域では, 蒸発散量が降水量に比例して増加し, その大部分が降水量の7割以上を占め, その全量が蒸発散で消費される場合もある。年降水量が800mmを越えると, 蒸発散は林分条件や気象条件を反映して, 広範囲に分散する。

これまでの森林水文学研究の成果として, 森林の減少により年流出量は増加し, 造林による回復

とともに年流出量は減少することが確認されている。塚本編の森林水文学によれば、Boschら(1982)は、森林被覆に10%の変化が生じたとき、針葉樹林では平均40mm、広葉樹林では平均25mmの年流出量変化が生ずることを指摘していると報告されている。



○は本邦の流域。●は熱帯・亜熱帯の流域を示す。実線と数値は、年降水量に対する年蒸発散量の割合を示す。破線は熱帯・亜熱帯の流域を除いたときの最大値を結ぶ傾向線を表す。

図-18 年蒸発散量と年降水量の関係(塚本, 1992)

4. 水文環境の再生

4.1 水文環境の制御

水文環境は以上に述べてきたように土地利用と深い関係をもつ。森林地が都市的な利用に変わると水循環と熱環境に与える影響は大きい。土地利用に伴うこのような影響を最小限におさえ、快適な都市を形成するには水循環の保全を計る必要がある。現在までに実施されたり、提案されている主要な方法には、雨水の浸透処理、森林の活用(都市緑化)、表層土壌の置換、都市域内での雨水の貯留と利用、都市域での水面確保、などがある。これらの方法のいくつかについてその可能性や効果を概括してみたい。

4.2 森林の活用

森林の理水機能の概要は上述してきたとおりである。このうち積極的な森林活用でわが国の気象条件を例にしてどの程度水の循環を変更し得るかについて検討する。

まず森林の機能として保水機能を取りあげる。一般に森林の保水機能とは、林地が雨を一時的に保留して流出を調節する機能を指す。林地で雨水を保留・調節する部分は、樹木そのものとそれが作る森林土壌である。樹木が地上に達する雨を低減させる現象を遮断といい、これまでの日本における観測結果を整理して示したものが表-4である。この結果によれば年総雨量の約13~26%程度が樹木による遮断量と考えられる。この遮断量は主に蒸発により消費される。一連の降雨による遮断量は先に述べた(6)式で表現されることが報告されている。この関係は、あくまで一連降雨量(10時間程度以内の降雨の中断がある場合は一連降雨量として扱われる。これが遮断蒸発を大きく見積もる一因でもある)と遮断量の関係である。

この遮断量を樹種や樹林密度の変更でどの程度制御し得るのであろうか。遮断量の向上は、樹種の変更と森林密度を高めることによってなされ、定量的には式(6)の係数 a をどの程度大きくし得るかという問題になる。 a の値は、針葉樹の方が広葉樹より大きいことがわかっているので、この点では樹種を針葉樹にした方がよいことになる。しかし、一方では針葉樹林にすると森林土壌の発達

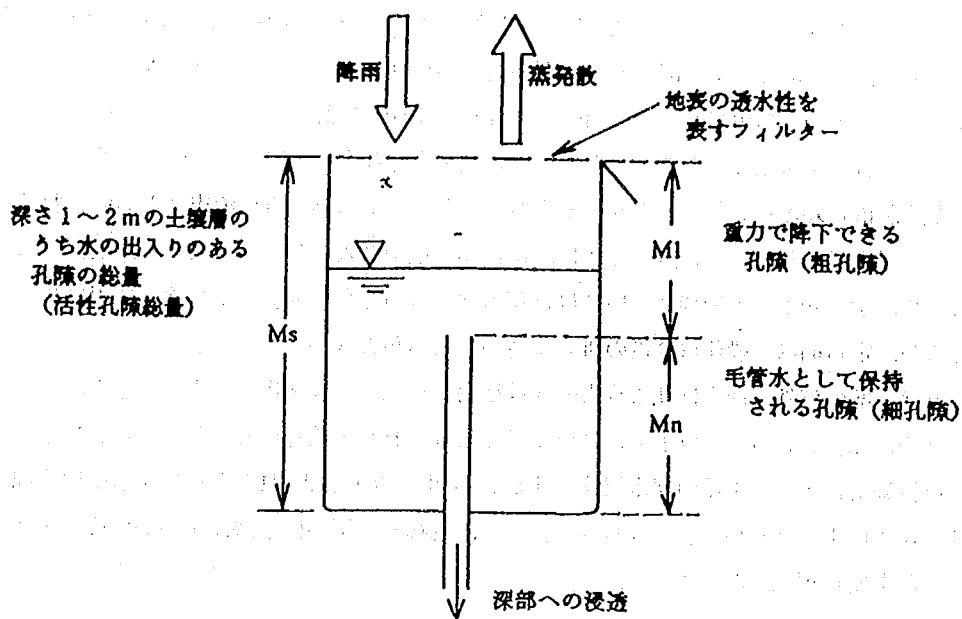


図-19 土壌層での水の挙動を表すモデル (虫明による)

は阻害されることが知られている。すなわち、遮断量の向上と土壌の保水機能の向上は両立し難い関係にある。仮に式(6)に示された平均値0.13が通常の場合でこれを範囲の最大値0.20にしようとするれば $(0.20 \div 0.13) = 0.07$ が遮断量を制御し得る最大値である。これは一雨雨量300mmとすると約20mmに相当する。遮断量を増進させるような森林施業を行うにしても、現実的には流域全体で効果が発揮されるようになるには、数十年単位の年月が必要であろう。

次に、森林土壌の効果について概説する。森林内の土壌は、気候、母材料(地質)、生物(植生、動物、微生物など)、地形、時間の5つの生成因子の総合作用によって形成され、それらの組み合わせによって異なった特性を示す。日本の山地では、高山や火山噴出物地帯、および花崗岩真砂地帯の一部などを除いて、全般的に層が厚くかつ水分を保留・調節する孔隙をもつ森林土壌が発達している。

土壌の雨水の保留・調節効果は、重力で水が降下する大きな孔隙(粗孔隙)と毛管張力によって保持され重力では降下しない小さな孔隙(細孔隙)に分けて説明できる。これを一次元に簡略化してモデルで示すと図-19のようになる(虫明原図)。

雨が地表に達すると、地表の水の透し易さ(透水係数で表す)と雨の強さとの相対関係で地中に侵入する量が決まる。通常、日本の森林土壌の表面は200mm/時間以上の透水係数を示すものが多く(表-2参照)、降雨は土壌に空きがあれば地中に侵入すると考えてよい。地中に侵入した雨水は、まず細孔隙を満たし、それが満たされた後に粗孔隙に入った水は一部は重力によって下降し、より深部へと浸透して地下水かん養成分となる。雨がさらに続いて粗孔隙部分も満杯になると、地表面からの流出が始まる。

森林土壌の活性総量(Ms)、粗孔隙(MI)と細孔隙(Mn)がどの程度かは、先に上げた因子

の作用によって異なる。日本の森林域で比較的良好な土壌について雨量と同じ高さの単位で表すと、Msは300mm程度である。M1部分の水は雨の補給がなければ2～3日で排水されるから、この図の場合一連続降雨のうち少なくとも最初の150mmが土壌中に保留されることになる。以上の話は、森林で被覆された山腹斜面でのことである。森林域で良好な土壌で覆われた山腹の他に、急斜面で土壌の発達がほとんどない部分、ガリーや岩肌、そして谷や流路（直接流出域ともいわれる）が通常20～30%程度はあり、ここに降った雨は、ほとんど地中に入ることなく洪水流出成分となる。洪水流出に及ぼす表層土壌の影響については近年の水文学の急激な進歩により徐々に明かにされてきつつあるが、定量的な一般化は今後の研究に待つところが大きい。

日本では一部の例外（例えば花こう岩の真砂地帯）を除いて森林伐採によっても土壌層の基本的な保水機能は保存される。これまでに長年かけて形成された土壌層は安定していると見るができる。森林施業によって土壌の保水機能、すなわち図-19のMsとMIをさらに10mm程度向上させるには数10年以上の歳月が必要となろう。従って、森林表土層の保水機能をいかに維持できるかということが重要な視点であろう。

4.3 雨水の浸透処理

(1) 雨水浸透工法

市街地に降った雨を土壌中に浸透させ、表面流出を抑制すると共に地下水の保全ひいては湧水の保全に役立つため雨水の浸透工法が開発された。この方法による土壌水の保全は市街地での減少する蒸発潜熱の確保にも役立つし、街路樹のためにも活用されるので、水文環境の保全と再生に有効である。

図-20は東京周辺の地区で採用された各種の浸透工法の概念図である。この工法では図-21に示すように、まずとまずの間のトレンチ内の地下埋管に通常の雨水管程度の縦断勾配をつけるが、それより下流のまず間のトレンチはまた地表面から同一の深さで設置されるため、雨水管の深さが深

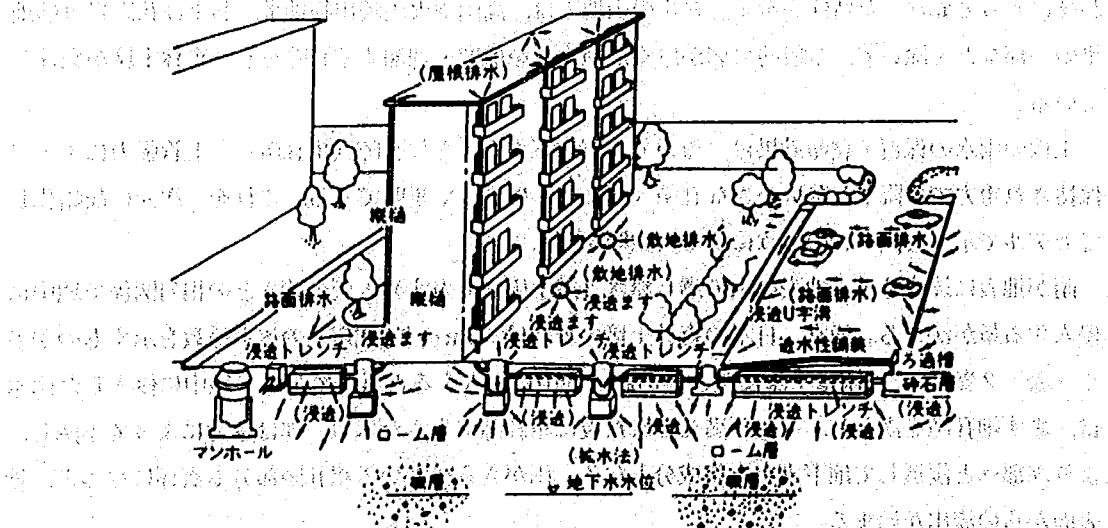


図-20 降雨水の地下浸透工法概念図

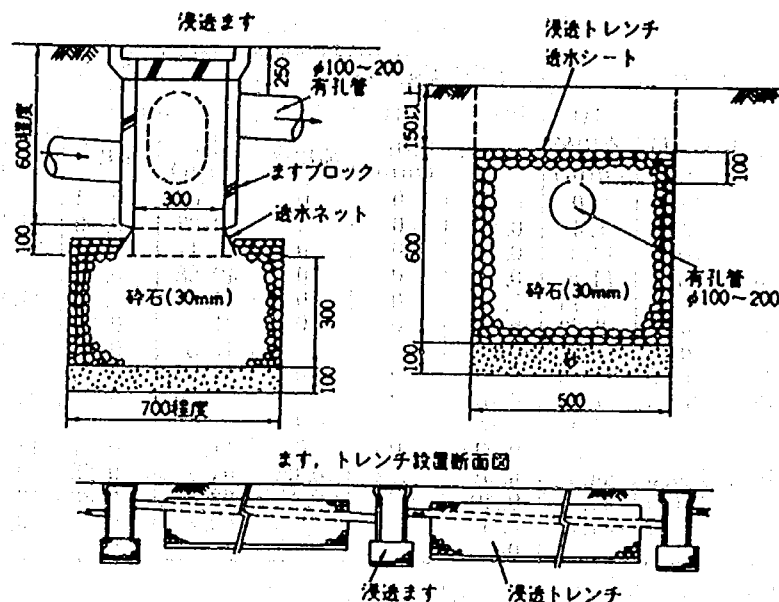


図-21 浸透ますと浸透トレンチの構造図

くならず、土工量が減少できるという特徴がある。そのため設置費用が従来型の雨水管とほとんど変わらないという長所をもっている。

(2) 昭島つつじが丘ハイイツでの雨水浸透工法

住宅・都市整備公団は昭島つつじが丘ハイイツにおいて、降雨水の団地内処理を目的とした浸透工法の試験を昭和56年度に開始した。当地区では浸透工法の機能を調べるため浸透工法実施地区と従来型の下水道地区の両地区で各種の調査が実施された。この対象流域は4ブロックに大別され、まず第1ブロックはおもに盛土地区において地下埋管を用いた浸透トレンチ、浸透側溝、浸透ますが、第2ブロックは上記の浸透工法以外に透水性舗装が採用されていることと、一部に遊水池が設けられている。第3、第4ブロックは従来工法が施工されている。昭島地区は、地表下2.5~3.0m以深に粗粒径の立川段丘礫層があり、その上を立川ローム層が覆われている。地下水は地表下10m前後にある。地下埋管の埋設深さ30cmと60cmについて土質調査を行った結果によると、深さ30cmのところは60cmに比べて粒径が若干大きく、含水比が小さい。また粒度組成はシルト~粘土であり、透水係数(室内試験)は 10^{-7} ~ 10^{-8} cm/sである。自然状態における体積含水率は55~60% (含水比59~84%)であり、これらの特性からつつじが丘ハイイツの自然地盤の表土は、一般的な関東ローム層の特徴を有すると考えられる。

この試験地区からの流出量の観測結果を表-6に示す。昭和57年、昭和58年に観測された主要な14例であるが、浸透工法実施地区の流出率はブロック2では0.02、ブロック1では0.25で、従来工法地区の0.49~0.55に比べ非常に小さくなっている。

(3) 浸透工法による流出抑制効果の評価

上述したように浸透工法による流出抑制効果はかなり大きい。雨水排水を計画する際にこの抑制効果を評価するモデルが必要とされるため、昭島つつじが丘ハイイツでの観測結果を用いて流出モデ

表-6 主要降雨による観測結果

降雨 No.	洪水年月日	ブロックNo. 総雨量 (mm)	浸透工法実施地区				従来型雨水排水方式地区			
			1(f=0.78)		2(f=0.54)		3(f=0.80)		4(f=0.57)	
			流出量 (mm)	流出率	流出量 (mm)	流出率	流出量 (mm)	流出率	流出量 (mm)	流出率
1	57.7.3	39.8	2.0	0.05	0	0	17.64	0.44	16.54	0.42
2	57.7.22	22.8	1.4	0.06	0	0	12.05	0.53	12.39	0.54
3	57.7.30	57.0	14.1	0.24	0	0	27.17	0.48	24.67	0.43
4	57.8.22-23	87.5	11.5	0.13	0	0	49.98	0.57	31.39	0.36
5	57.9.19-20	32.5	0.75	0.02	0	0	14.79	0.46	11.96	0.37
6	57.10.8-9	43.3	8.80	0.18	0	0	21.89	0.51	7.59	0.18
7	57.10.22-23	88.0	51.32	0.58	-	-	41.5	0.47	42.9	0.49
8	57.11.2-3	51.0	16.51	0.32	0	0	23.06	0.45	23.76	0.47
9	57.4.14-15	63.8	4.81	0.075	0	0	21.89	0.34	(12.84)	(0.20)
10	57.8.1-2	116.0	91.9	0.55	4.4	0.03	-	-	-	-
11	58.7.9	19.0	2.2	0.11	0	0	11.5	0.61	13.8	0.73
12	58.8.15-16	138.0	44.7	0.31	7.1	0.05	94.2	0.68	99.5	0.72
13	58.8.17	101.5	40.7	0.40	14.8	0.15	83.8	0.83	66.1	0.65
14	58.9.27-29	90.5	47.3	0.52	0	0	69.8	0.77	49.1	0.54
				0.25		0.02		0.55		0.49

(注) fは工種別流出係数に当該工種の面積を乗じて求めた流出係数

ルを構築した。

まず当該地区からの全流出量を合理式で求め、その全量がいったん浸透施設にはいるものとする。これはブロック1, 2ともほぼ現実の状況を反映していると考えてよい。次に流入量は浸透施設の貯留量分だけ貯留されるとともに、この間の浸透量を差し引き、なお貯留しきれない流入量を下流への流出量とする。浸透量は浸透施設の貯留空間内の水位を計算し、この水位に比例した量として評価することとした。浸透量はすべての施設を単位あたりの浸透量に置換し、

$$Q_t = \alpha H L \quad (7)$$

の形で評価することとした。ここに Q_t は浸透量($\ell/m \cdot n$)、 H はトレンチ内水位(cm)、 L はトレンチ長(m)、 α は係数である。このモデルを「貯留浸透モデル」と名付ける。

浸透工法の流出抑制効果(逆に見れば地下水かん養効果)を評価するために標準的な市街地をモデルとして考える。住宅・都市整備公団が建設した中層住宅団地(29団地)の平均的な土地利用によれば1haあたりの不浸透面積率は57.7%となる。これに対し在来工法で必要となる雨水排水管等は、総計で1haに対し1,081mに相当する。この在来工法で必要となる雨水排水管等をすべて浸透工法で置換するものとする。なおこれ以外に駐車場、歩道等には1,810 m^2 の透水性舗装が行われるものとする。

上述の前提のもとに1haの団地を対象として流出抑制効果を貯留浸透モデルで計算した結果が図-22と図-23である。図-22はピーク流出量の削減効果を横軸に浸透能力を表わす指数 α をとって表現したものである。ここで $\alpha=0$ は浸透がないときのものであるから、 α が大になるとピーク減少の程度が大きくなり、降雨規模が大になるにつれてほぼ直線関係で表現しうることがわかる。ローム層ではこれまで標準的な浸透トレンチ1mあたり100~300 $\ell/時$ 程度の浸透量が計測されている。100 $\ell/時$ をとれば α 値にして0.02~0.03程度になるので相当の効果を持つことが判断されるであろう。図-22は同様の結果を総流出量について対比したものであって、浸透工法が1haの

団地で計画どおりに設置されたとしたとき、地層の浸透能力 α に応じて図示のような流出総量の削減効果が期待されることとなる。

(4) 雨水浸透工法と地下水保全対策

茨城県筑波研究学園都市において国際科学技術博覧会が開催された。当該地区の開発にあたっては当初から開発行為に伴う水文環境の変化への対策を考えて、地下浸透工法を採用して地下水保全を図ることが計画された。約102haの山林地が造成された。この地区では浅層地下水が地表下1～2mにみられ、周辺地区でも地下水利用が行われている。このため地下水保全を図りつつ開発に伴う流出増の抑制策として、この地区に大規模な浸透工法を実施することとした。この工法の採用にあたっては大規模な現地浸透実験や地下水調査が行われ、これらの結果からこの地区を浸透能力に応じて3段階に分類し、流出抑制効果を評価した。

この地域では開発地区からの流出増を防災調節池で対処することとして計画されている。この防災調節池の機能を補完し地下水の保全を図るため、科学博開催時には約7kmの浸透ドレンが埋設され、現在では約17kmの浸透ドレンと浸透ますが設置されている。これによる計画最大浸透量は1.21m³/sと予想されている。浸透工法による地下水の保全により地下水位の低下はみとめられていない。

地下水位の保全は市街地での湧水の枯渇を防ぐために重要である。武蔵野台地の開発は表面流出を増大させ、地下水位の低下を生じたといわれている。このため従来は地下水が湧出していた河川の源流域で水量の減少、枯渇が見られひいては常時の河川の水質の悪化につながる。図

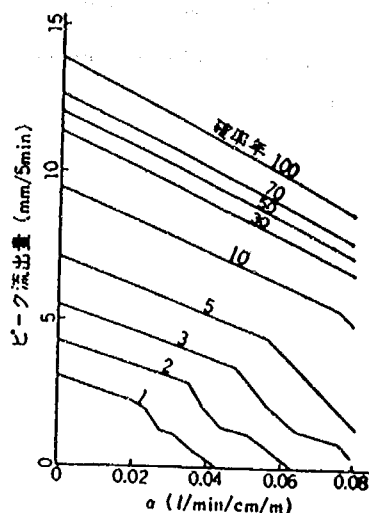


図-22 浸透能力の指数 α によるピーク流出量の削減効果

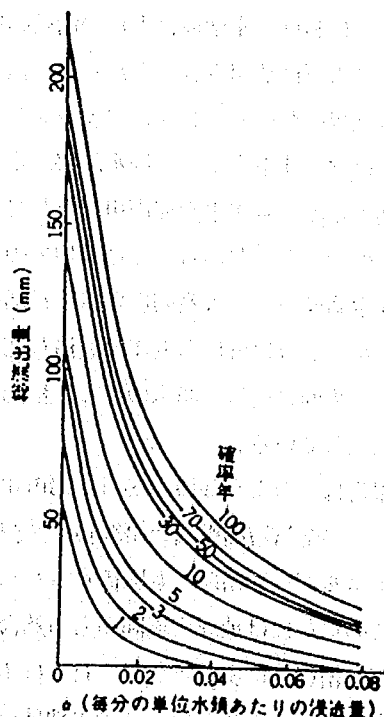


図-23 浸透能力の指数 α による総流出量の削減効果

図-24は雨水浸透工法を東京23区に適用したときの年間の水収支を概算したものである(虫明、1990)。これは下水道が完全に普及した後に現在約65%を占める不浸透面の半分に雨水浸透施設を適用した場合、年間水収支がどのように変わるかについての試算である。地下水流出がどの程度増えるかは地下水揚水をどの程度削減できるかにもよるが、図-6の現状に比べ200mm程度の増加が期待され、

都内小河川の清流の復活が予想される。水文環境を保全する試みが多くの地区で採用されることを期待したい。

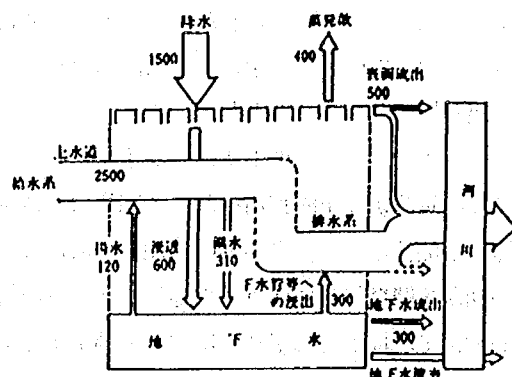


図-24 東京都区部の不浸透面積(65%)の半分に浸透工法を適用した場合の年間水収支(単位mm)
(虫明, 1990)

5. 結語

自然界における水循環は人類の活動の影響を受けて変更されてきた。特に地表水や地下水は水資源として人類に活用されてきたため、循環形態が大きく変更されている。このような水利用にともない自然界における水収支のバランスがくずれたための弊害も顕在化してきている。地下水の過剰な揚水は地盤沈下を生じ、揚水障害、水害危険度の増大、地下室等での酸欠事故をも惹起している。また地表水の灌漑用水や都市用水としての分水は河川の流量を減少させ、自然界における河川生態系への影響にもつながる。流域山地での林業開発は山林の持つ保水機能等の変更をもたらす。このような水循環系への人為的影響は人類活動に不可欠な水資源の開発効果との関係で評価されるべきであるが、これ以外にも近年の急激な都市域の拡大は水循環系に影響して、水害の激化や都市内河川の水質汚濁の進行、湧水の減少と枯渇、蒸発減少と都市のヒートアイランド現象の発生、等の問題を惹起している。

本報告はこのような観点から、都市化と水循環を中心として水文環境保全の立場からの問題点を指摘し、保全対策の事例の研究現況を紹介した。水文環境は単に水循環のみならず、それに伴う物質やエネルギーの循環とも関係するため、その保全対策には広い視点からのアプローチが必要である。このなかには地球環境問題も当然含まれてくる。地球の温暖化はエネルギー循環と大気循環を通して水循環系に影響する。これらは不可分の関係にあるといってもよい。したがって水文環境を保全再生することは広い意味での地球環境の再生につながる。水文環境についての研究の進展と保全対策のための技術開発の重要性を指摘しておきたい。

参考文献

- 近藤純正、桑形恒男(1992):日本の水文気象(1):放射量と水面蒸発、水文・水資源学会誌第5巻2号
- 花沢正男(1960):本邦河川の流出量分布について、電力気象連絡会集報、第2輯、11巻

- 福井英一郎ほか編 (1985) : 日本・世界の気候図, 東京堂
- 梶根勇 (1977) : 水を知り自然を知る, 日本の科学と技術, 771資源, pp16-20
- 虫明功臣 (1992) : 都市の水循環システムにおける「エコ」的側面, エコシビルエンジニアリング読本, 土木学会誌「別冊増刊」1992, vol.77-9
- 虫明功臣・石崎勝義・吉野文雄・山口高志編著 (1987) : 水環境の保全と再生, 山海堂
- 塚本 (1992) : 森林水文学
- 藤野毅・浅枝隆 (1992) : 舗装面からの赤外放射の吸収による表層大気の加熱効果, 水文・水資源学会1992年研究発表会要旨集
- Bosch, J. M. and Hewlett, J. D.: A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, J. Hydrol. 55, 1982
- Myrup, L. O.: A numerical model of the urban heat island, J. App. Met. 8, 1969
- Baumgartner, A.: Energetic base for differential vaporization from forest and agricultural lands. In: Sopper, W. E. and Lull, H. W. (eds.), Int. Symp. For. Hydrol., Pergamon, Oxford, 1967
- 斉藤・新田 (訳) (1981) : オーク, T. R.; 境界層の気候, 朝倉書店
- 吉野 (1983) : 表層土壌の孔隙特性と中間流の発生機構に関する一考察, 土木技術資料 25, 9 (1983)
- 建設省土木研究所 (1969) : 利水計画における流況把握の研究, 第231回建設省技術研究発表会, 昭和44
- 村井 宏, 岩崎勇作 (1975) : 林地の水および土壌保全機能に関する研究 (第1報), 林試研報 274
- 虫明功臣 (1990) : 都市と水循環, 環境情報科学 19-2, 1990

堰 と 景 観
—堰を中心とする新しい環境の創造をめざして—

ダム水工研究室長 高 須 修 二

堰 と 景 観

1. まえがき

川の流れをせき上げ、水の利用を計るため、古くから数多くの堰が設けられてきている。このような堰が洪水や地震などの自然現象に耐えるよう、永年にわたって技術の進展がはかられてきているが、近年の技術の進歩は特に著しいものがあり、時代の要請に応じて、多目的な施設として大規模ゲートを有する可動堰もつくられるようになってきている。

一方、河川に対する社会的要請の多様化から堰についても質の高いものが求められるようになってきており、各種技術に加えて、堰そのものの景観も問われるようになってきている。すなわち、水辺環境の適正な活用を計るため、豊かな自然環境と美しい景観を保全・創出することが期待されている。

本論文は、このような背景を踏まえて、堰と景観を課題とし、堰、特に大規模可動堰の建設・管理技術の歴史と動向とそれらの技術の景観設計への展開について論じるものである。後に述べるように、主要な検討対象としては、ゲートの形式、堰柱の配置、門柱の高さ、開閉装置室の配置、開閉装置室の大きさを規定する開閉装置の形式、管理橋の配置等が考えられる。

2. 堰の建設・管理技術

2.1 大規模堰の歴史

本格的な可動堰が建設されるようになったのは、大正から昭和の初めにかけてのことである。代表的なものとしては、信濃川の大河津分水に設けられている可動堰があり、これは昭和2年の自在堰の陥没事故の後に、直ちに工事が開始され、昭和6年に径間約16mのストリーゲートを10門もつ可動堰として完成されたものである。また、同じ昭和6年には、北上川下流の新北上川に飯野川可動堰が、昭和10年には淀川に長柄可動堰が完成している。飯野川可動堰は径間約17mの昇開式のローリングゲート4門、降開式のローリングゲート12門で構成されていた。長柄可動堰は、大正3年に建設された起伏堰に代って建設されたものであり、径間約34mの円形断面のローラーゲートが3門設置されていた。現在では、飯野川可動堰は北上大堰に、長柄可動堰は淀川大堰にと、どちらも径間50mを越えるシェル構造ローラーゲートを持つ大規模堰にその使命を引き継いでいる。

昭和30年代になると、河川改修に伴い、堰の改築や統廃合が数多く行われるようになり、堰の建設技術も格段の進歩を遂げることになる。このころの堰の形態を見ると、ゲートの扉高が比較的低いこともあるが、後に議論されるような高い門柱の上に開閉装置が置かれる形態は、まだ、一般的とはなっていない。また、昭和40年代に入って、利根大堰、利根川河口堰を初めとする40mを超えるローラーゲートが設けられるようになり、さらに、昭和50年代に入って50mを超えるローラーゲ-

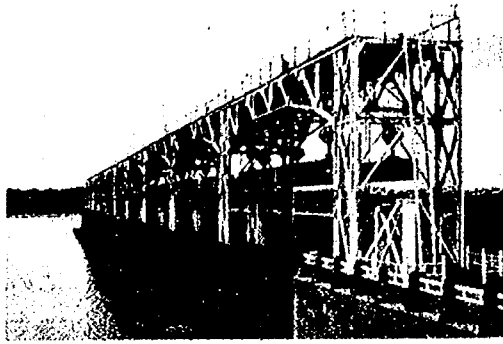


写真-1 大河津可動堰^①



写真-5 淀川大堰



写真-2 飯野川可動堰^①

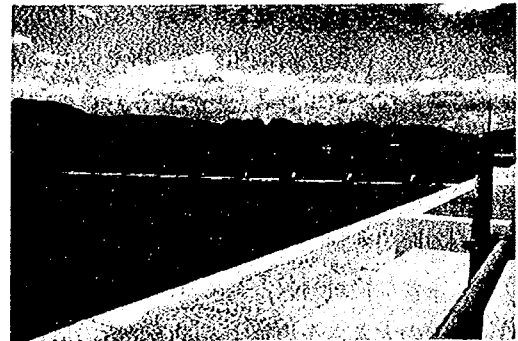


写真-6 瀬田川洗堰



写真-3 長柄可動堰^①

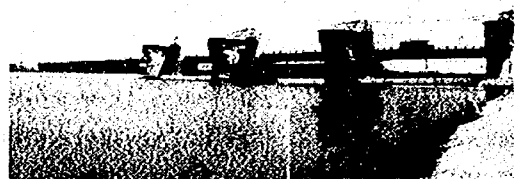


写真-7 行徳可動堰^①

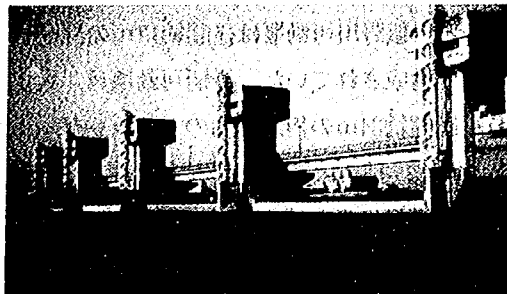


写真-4 北上大堰

トが用いられるようになってきている。今後の技術の進歩も当然考えられるが、ローラー等の維持管理の面からこの50m程度がローラーゲートの限界と考えられる。

2.2 堰の機能

堰とは、河川の流水を制御するために、河川を横断して設けられるダム以外の施設であって、堤防の機能を有しないものとされており、河川の水位を調節することはあっても、流水を貯留することによって流量調節を行うことは少ない。これに対し、ダムは、流水を貯留して積極的に流量調節を行うものである。一般的には、この点で堰とダムの区別がつくものであるが、最近は流量調節を行って積極的に流水の正常な機能を維持するための堰が設けられるようになってきているので、堰とダムの区別は必ずしもはっきりしなくなっている。

参考文献(1)では、構造令の適用においては、次の点に基づいて、堰とダムとの区分をすればよいとしている。

- ① 基礎基盤から固定部の天端までの高さが15m以上のものはダム
- ② 流水の貯留による流量調節を目的としないものは堰
- ③ 堤防に接続するものは堰

なお、堰と水門・樋門との区別は、堤防の機能を有しているかどうかで定まる。堤防の機能を有しているもの、すなわち、洪水や高潮による流水の氾濫を防止あるいは軽減するための施設は、水門・樋門であって、堰ではない。

また、堰は、その設置目的別に次のように分類することができ、それぞれに、設計条件や操作方法が異なってくる。

① 分流堰：河川の分派点付近に設け、水位を調節あるいは制限して、洪水や低水を計画的に分流させるもの。このうち、洪水を分流させる堰については、その設置目的から、「洪水を分流させる堰に関する特例」が構造令で規定されている。

② 潮止堰：感潮区間に設け、塩分の遡上を防止し、流水の正常な機能を維持するためのもの。

③ 取水堰：河川の水位を調節して、都市用水、かんがい用水及び発電用水等を取水するためのもの。

④ その他：河川の水位及び流況を調節するための堰及び多目的堰。なお、感潮区間に設けられ河口堰では、潮止堰の機能を有する目的の堰が多く、さらに高潮の遡上を防止する防潮水門の機能を持つこともある。

2.3 堰の構造

堰は、構造の面から可動堰と固定堰に分けられるが、ゲートによって水位の調節ができるものを可動堰といい、調節のできないものを固定堰という。

可動堰は、次の部分で構成される。

① 可動部（洪水吐きゲート）：ゲートを有する部分のうち、洪水の流下を妨げないように特に配慮した部分で、洪水吐きともいう。

② 土砂吐き：ゲートを有する部分のうち、用水の取水口付近に設け、みお筋を維持し、取水時における用水路内への土砂の流入を防止するものとともに、取水口付近の堆積土砂の排除を容易にするための部分。

③ 舟通し：ゲートを有する部分のうち、通常土砂吐きに接して舟運のために設けられる部分、舟通しには閘門を含む。

④ 流量調節部（流量調節ゲート）：ゲートを有する部分のうち、堰上流の湛水位又は下流への放流量の調節を行うことが特に必要なときに設けられる部分、これらの調節は、可動部の副ゲートや土砂吐きのゲートによって行われることも多い。

⑤ 魚道：通常可動部又は土砂吐きに接して、魚類の遡上等の通路として設けられる部分、特殊な場合としてゲートを有する場合がある。

また、構造上の分類として、可動堰の部分のうち、ゲートを有する部分を可動部、その他の部分を固定部と呼ぶことがある。

河道の流下断面内に工作物を設置した場合には、河積が阻害され、洪水の流下になんらかの影響が及ぶことになる。このため、堰の設置に当たっては治水上の支障を最小限度にとどめるように配慮する必要がある。すなわち、可動堰の固定部あるいは固定堰は、利水機能上からは洪水の流下断面内に設ける必然性がないものであり、避ける必要がある。

また、土砂吐き、舟通し、魚道等については、それらの機能確保のため流下断面内に設けざるを得ない場合もあるが、それらを洪水の流下断面内に設けることは、堰上流部における水位上昇、下流部における局部洗掘等を招く恐れがあるので、十分に検討することが必要である。

以上の堰の構造についての基本的な考え方は、参考文献(1)で次のように整理されている。

① 堰を流下する流水は、堰と直角の方向に流れるものであり、その平面形状のいかんによっては、下流側の水衝作用を助長したり、局部洗掘の原因となることが多い。このため、堰の河川横断方向の線形は、洪水の流心方向に直角の直線形を原則とする。言い換えれば、堰柱の方向は、洪水の流心方向が原則ということである。

② 可動堰の固定部等は、流下断面内に設けてはならないことになっているので、河積阻害で最も問題となるのは、堰柱の幅である。堰柱の幅については、ゲートの大きさ、堰柱の高さ、地盤の土質条件等によって左右されるため、構造令には特にそれを規定する条項が定められていないが、技術的に無理のない範囲で、極力小さくするよう配慮されなければならない。堰柱による河積の阻害率は、おおむね10%を超えないものとする。

なお、堰柱の断面形状については、洪水時の流水抵抗を少なくするため、楕円形その他これに類する形状のものとする必要がある。

③ 堰の敷高及び固定部は、一般に、計画河床高と一致させるものであるが、土砂吐きについては、取水口前面に堆積する土砂を排除し、みお筋を維持して取水を容易ならしめるため、洪水吐きより若干低くするのが普通である。

④ 堰の構造は「河川管理施設の構造に著しい支障を及ぼさず、適切に配慮された構造」でなければならないものであり、両端の堰柱の位置については、堤防の定規断面を著しくおかさないよう

配慮するものとする。

すなわち、堰の設計において景観に配慮するとしても、堰柱の配置に影響を与えるような修正は基本的に避けるべきことである。ただし、堰の設置位置が適当であり、堰柱の方向が洪水の流心方向とほぼ一致している場合には、堰柱の上下流方向の長さにある程度の自由度があるとして良いと思われる。

2.4 ゲートの構造

(1) ゲートの分類

可動堰の可動部（洪水吐き）のゲートとしては、引上げ式ゲートと起伏式ゲートに大別される。引上げ式ゲートとしてはローラーゲートが一般的であり、ラジアルゲートやローリングゲートも用

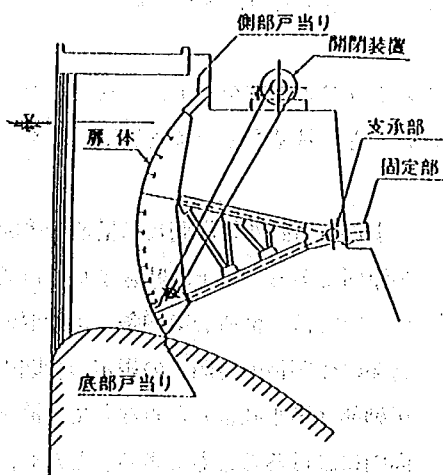


図-1 ラジアルゲート³⁾

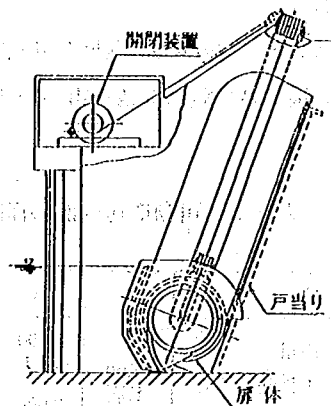


図-2 ローリングゲート³⁾

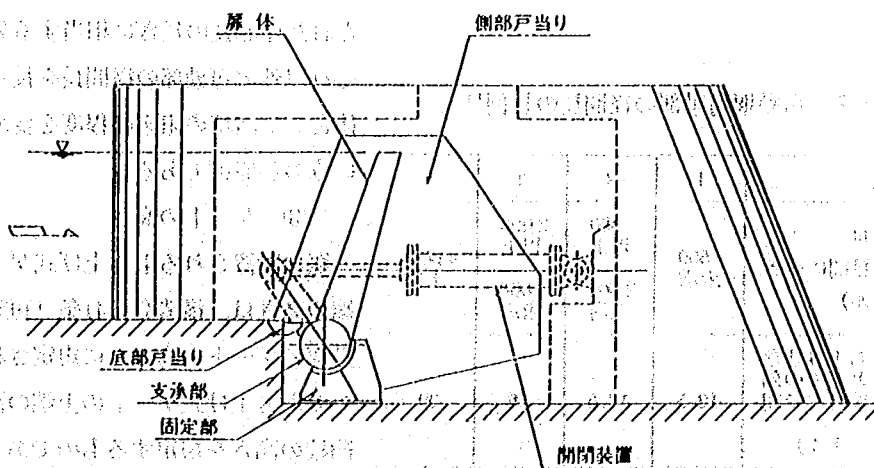


図-3 起伏ゲート³⁾

いられてきたが、昭和40年代に入ってからほとんど用いられていない。

起伏式ゲートとしては、ヒンジ形式の起伏式ゲートのほか、ゴム引き布製のゲートが代表的なものである。前者が鋼製ゲートであつた、ワンヤーロープ巻取りまたは油圧シリンダー等で操作されるのに対し、後者は袋状のゲートであり、水または空気によって膨縮される。

構造令第10条第1項において「ゲートは、確実に開閉し、かつ、必要な水密性及び耐久性を有する構造とするものとする。」とあるが、堰の場合に「確実に開閉」する構造のものとは一般に、引上げ式ゲートを指している。起伏式のゲートは洪水の疎通に著しい支障となる恐れがない場合以外は重要な河川に設けてはならないとされている。

(2) 径間長

可動堰の堰柱は、橋の橋脚と同様に河道内において洪水の流下に対して障害物となっている。従つて、その径間長は、河積の阻害を小さくするため、できるだけ大きくとり、堰柱の数を減らすことが重要である。

構造令第38条「可動堰の可動部の径間長」の規定は、このような考え方から定められたものであり、従来の幾多の経験的な積み重ねの結果、実務上運用されてきた基準をそのまま適用したものである。

表-1 可動堰可動部の径間長¹⁾

項	1	2	3	4
計画高水流量 (単位 1秒間につき 立方メートル)	500 未満	500 以上 2000 未満	2000 以上 4000 未満	4000 以上
径間長 (単位 メートル)	15	20	30	40

表-2 可動堰可動部の径間長の特例¹⁾

項	1	2	3	4
計画高水流量 (単位 1秒間につき 立方メートル)	500 未満	500 以上 2000 未満	2000 以上 4000 未満	4000 以上
可動部のうち土砂吐き 又は舟通しとしての効 用を兼ねる部分の径間 長 (単位 メートル)	12.5	12.5	15	20
可動部の径間長の平均 値 (単位 メートル)	15	20	30	40

また、可動部の径間長は構造令第38条が原則であるが、土砂吐きまたは舟通しについては、構造令第39条「可動堰の可動部の径間長の特例」の規定の範囲内で、可動部（洪水吐き）とみなして、流下断面内に設けることもできる。しかし、この場合も原則として、平均径間長、すなわち径間数を変えてはならない。すなわち、土砂吐きまたは舟通しの部分で縮小された径間長の長さに相当する分だけ、それ以外の可動部の径間長を長くして全体として河積の阻害の程度を変えないというのが原則である。

(3) ゲートの高さ

堰に設置される引き上げ式ゲートの上端の高さは、構造令第41条「可動堰の可動部のゲートの高さ」に規定されている。この引き上げ式ゲートの上端の高さは、門柱の高さを規定するものであり、ゲートが高くなるほど門柱も高くなる。

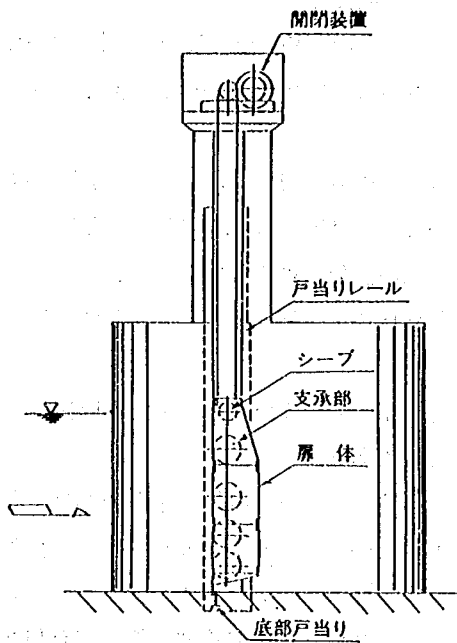


図-4 プレートガーダ構造ローラゲート³⁾

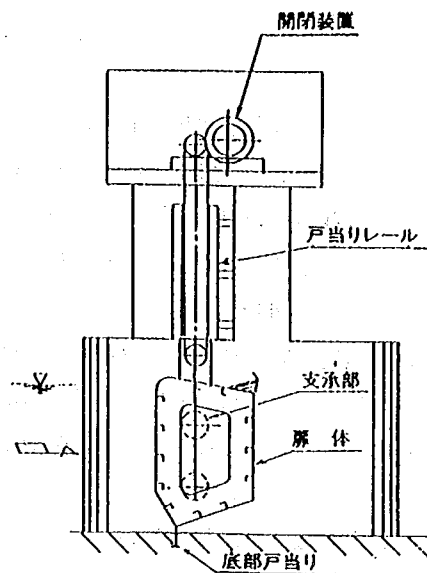


図-5 シェル構造ローラゲート³⁾

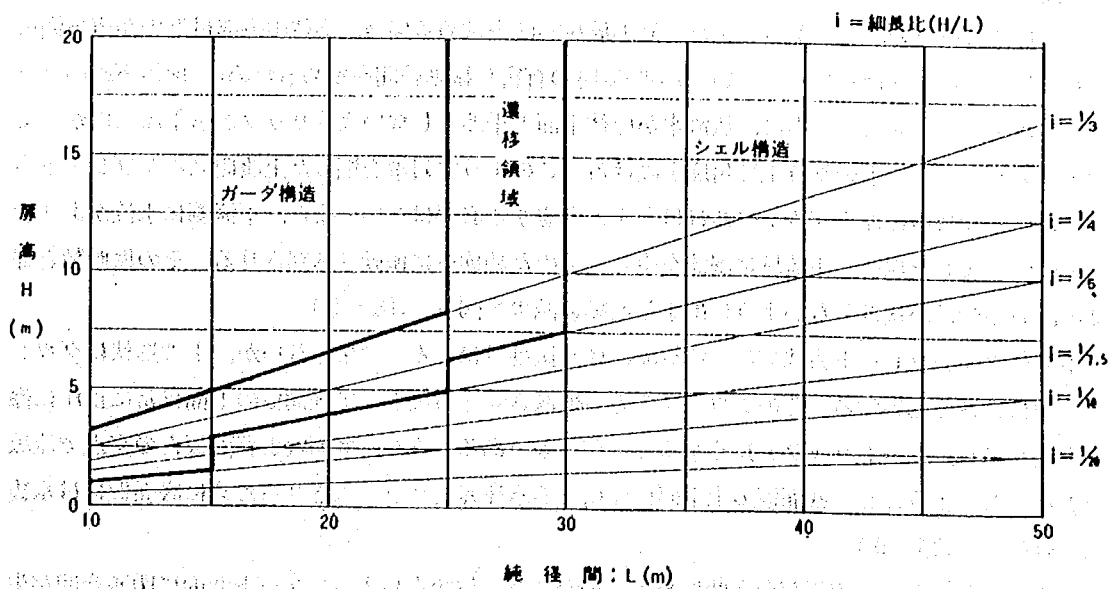


図-6 ローラゲートの構造形式³⁾

(4) 扉体形状

堰に設置される引き上げ式ゲートの扉体形状は、堰の機能を発揮させることができるものとするとも、流体力や振動に対して有利なものとする必要がある。このため、堰の景観と密接に関係しているものではあるが、制約条件としてもかなりの比重をもつことになり、その比較検討の過程は極めて重要である。

堰に用いられる引き上げ式ゲートとしては、プレートガータ構造（図-4）とシェル構造（図-5）のローラーゲートが一般的である。その適用条件は一義的には定まらず、個々の条件に基づき検討しなければならないが、実績では径間や扉高により概略の区分が可能である。（図-6）また、扉体厚さは材質、水理上の制限、許容たわみ度などにより異なるが、低水深ゲートの場合、純径間の $1/8 \sim 1/12$ が一般的である。

扉体には越流時や底部放流時、流水により種々の上向力や下向力が作用する。また河口付近に設置される水門扉においては波浪による揚圧力が作用することもある。

扉体の形状はこれらの水理力により開閉荷重が不当に大きくなったり、扉体の浮き上がり、あるいは底部の水密低下などの悪影響をきたさないことはもちろんのこと、流水による有害な振動が発生しないものとしなければならない。

一般に中流堰のゲートでは、ゲート上流側の堆砂による影響や扉体の維持管理に対して有利な上流側スキンプレート方式（図-7(a)）が、波浪や塩水などの影響を受ける河口堰では下流側スキンプレート方式（図-7(b)）が採用される。

上流側スキンプレート方式で底部放流を行うゲートについては、下流水位がゲートの底面板以上となり潜り流出状態となると、放流水が不安定な圧力変動を生じ、これが底面板に作用し扉体は自励振動を起こすことがある。特に、ゲートの微小開度時に発生することが多いので、このような開度での放流は避ける必要がある。また、最小放流開度を求める場合、扉体中央部付近の鉛直方向のたわみ量も考慮しなければならない。微小開度時の有害な振動範囲を狭めるために、扉体下端のリップ幅は極力小さくするとともに、放流水が扉体下面と干渉しないようリップから下流に向かって水平に対して 20° 以上の切り上げ角度を設ける。このような対策を図った上流側スキンプレート方式では、下流放流に伴うダウンプルはほとんど考慮する必要はない。また、下流側に水位がある状態で底部放流した場合、下流域に渦流を生じ、そのため扉体に振動を誘起させる。その振動数と扉体の固有振動数が接近しないように配慮し振動の減少を図る。（図-8）

下流側スキンプレート方式では下流放流に伴う振動はほとんど発生しないが、下端形状はダウンプル力に大きく影響する。このダウンプル力を軽減させる方法として底面板の下面は常に正圧に保つ必要があり、ゲートリップを長くすることが有効である。また、底面板と背面板との交点で流線が剝離しないようにし、底面板の上下面に作用する水圧差をバランスさせるために底面板には水抜きを設ける。（図-9）

越流式のゲートで越流幅が全径間にわたる場合には、越流水によってゲート背面に閉塞空間が生じ、有害な振動が起こることがある。これを防ぐために、越流板の下流端に $3 \sim 5$ m程度の間隔でスポイラを設けたり、越流板の下流縁を段違いにする。また、扉体両端に取り付ける導流板を利用

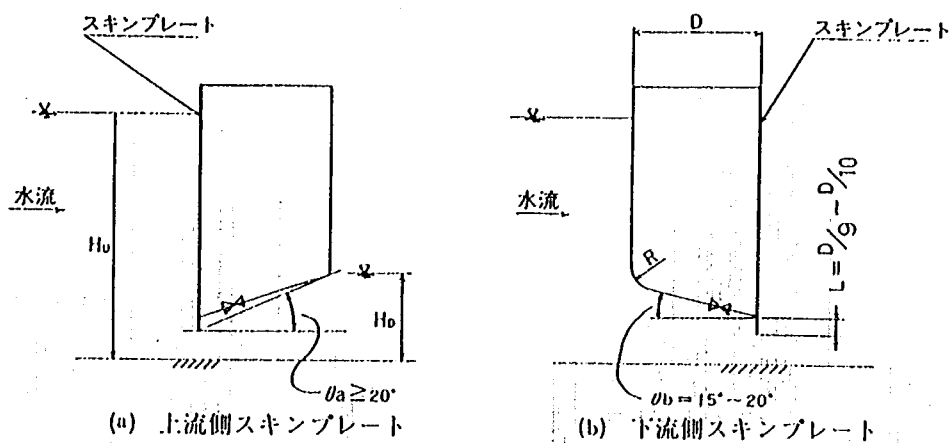


図-7 ローラゲートのスキンプレート方式³⁾

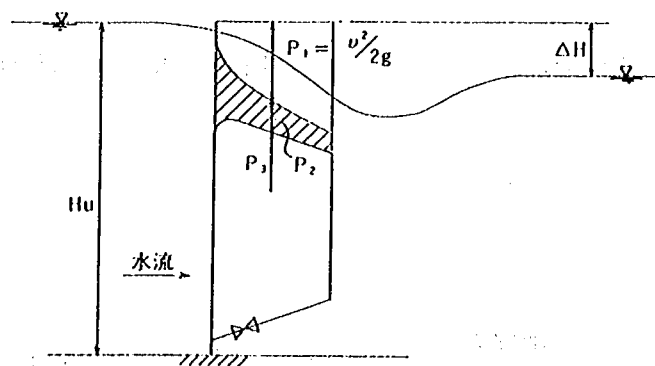


図-8 上流側スキンプレート方式ゲートの水理力³⁾

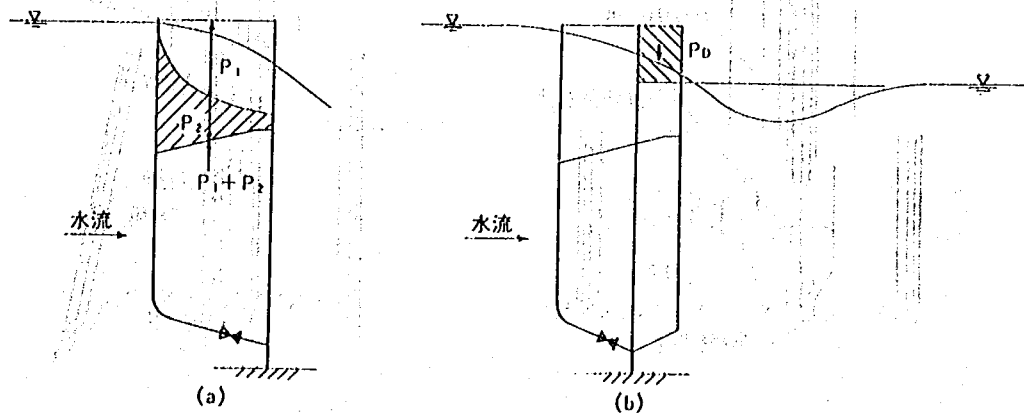


図-9 下流側スキンプレート方式ゲートの水理力³⁾

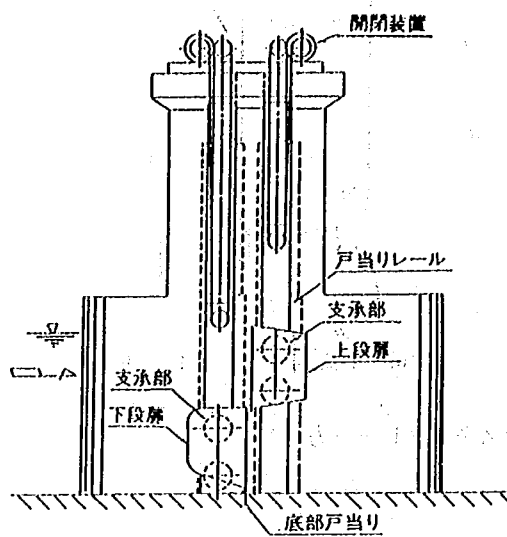


図-10 スライド式2段ローラゲート³⁾

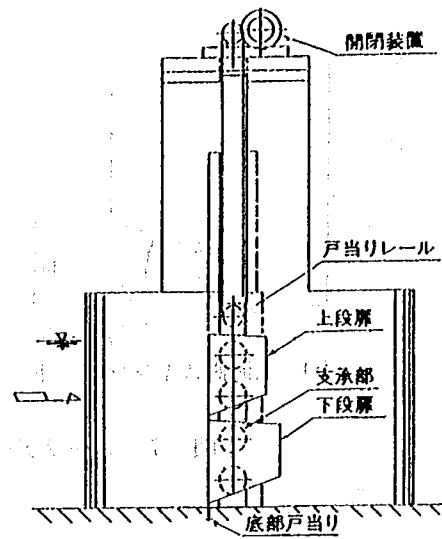


図-11 積重ね式2段ローラゲート³⁾

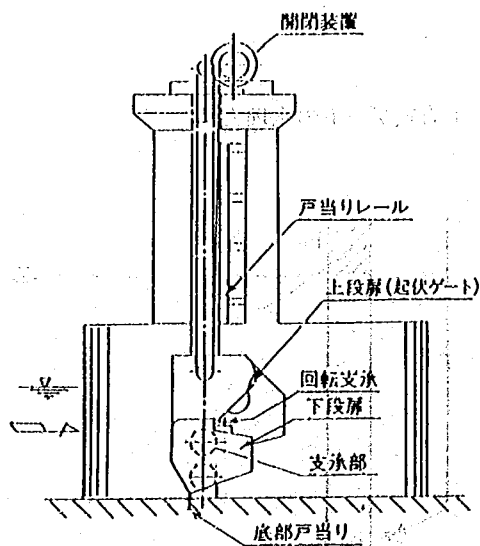


図-12 起伏ゲート付ローラゲート³⁾

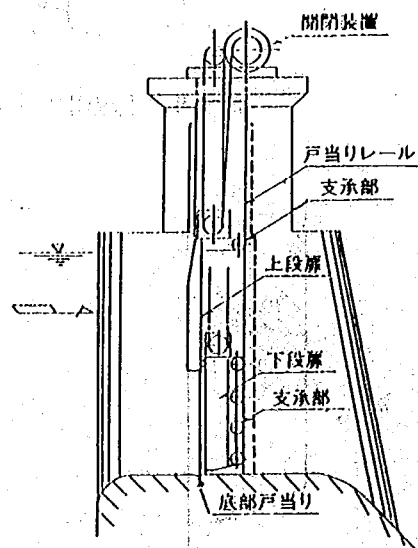


図-13 フック式2段ローラゲート³⁾

して戸溝部から給気する。また、越流時には、頂板上部の流水によって扉体に下向力が作用する。この大きさは、頂板の形状や越流水深に左右される。

スライド式2段ゲートは河口堰の流量調節部に良く用いられるもので、1段ゲートと比較してピア高さを低くすることができるが2組の開閉装置が必要である。

一方、越流操作によって流量調節などを行う場合は、扉体のスキンプレート位置によって作用する水理力が大きく異なる。通常、上段扉下流方式が用いられるが、越流操作時は下流側水位状態を考慮し、上段扉に作用する水理力として特に下向力に注意をする必要がある。一方、下段扉に対しては、上段扉を最大越流状態とした場合に大きな上向力が発生することになる。この上向力を減少させるため、底部水密位置を調節するなどの考慮がなされることがある。また、ゲート設置位置として河口部付近では下流側より波浪による影響が予想される場合で、かつ、その水位が上段扉底面をトラス構造や穴あき板構造あるいは格子構造などとして、この影響を小さくすることがある。

積重ね式2段ゲートは、潮止め堰と防潮水門の機能を合わせ持つ多目的堰に使用されるのが一般的であり、この場合下流スキンプレート方式が採用される。下段扉は越流操作を伴うことから種々の水理力に対する検討が必要である。

フック式2段ゲートは、越流形と非越流形があり設置目的によってそれぞれ使い分けられる。一般に、上段扉は径間方向に対する剛性が劣る構造となっているので径間の長い場合は適さない。

起伏ゲート付きローラーゲートは、越流によって放流量や貯水池水位の制御を行う場合に適し、中流堰の流量調節部に良く用いられる。起伏ゲートの高さは一般的に扉高から1/3程度以下とし、また越流面形状は全開時にスライド式ゲートの越流面と一致するような形状とすることが望ましい。しかし、ゲート本体との関係から構造的にこのような形状とすることが困難な場合もあるが、一般的に起伏ゲート部分は軽量であることから越流に際して負圧が発生しないような形状とすることが必要である。また、ローラーゲート本体を全開から開操作する場合は、扉体に作用する上部水重によって操作力が大きくなることから底部水密位置を調節し上向力を加える構造とすることがある。

(5) 開閉装置

構造令第10条（ゲート等の構造の原則）第2項において「ゲートの開閉装置は、ゲートの開閉を確実に行うことができる構造とするものとする」とあるが、大規模堰のゲートの開閉装置としては以下のものが考えられる。

① ワイヤロープウインチ式

ワイヤロープウインチ式には、1モータ2ドラムウインチ式、1モータ1ドラムウインチ式、2モータ2ドラムウインチ式の3種があるが、大規模堰の径間30mを超える長径間ゲートの開閉装置としては2モータ2ドラムウインチ式が一般的である。ただし、土砂吐きゲートや閘門ゲートは、径間が短くなることが多いので1モータ2ドラムウインチ式となる。

② 油圧シリンダ式

油圧シリンダ式は起伏式ゲートに良くつかわれている。一般には大きな開閉力を必要とする場合や開閉装置を狭い場所に据え付けなければならない場合等に有利である。

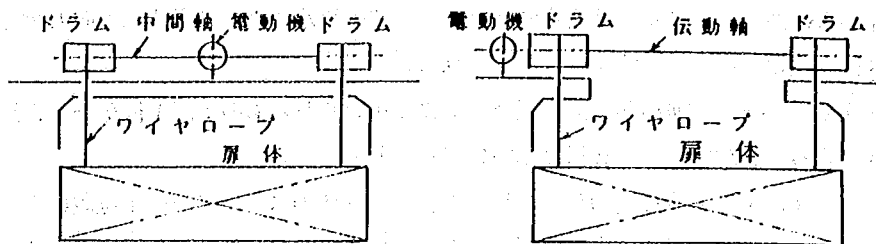


図-14 ワイヤロープウインチ式開閉装置³⁾
(1モータ2ドラムウインチ式)

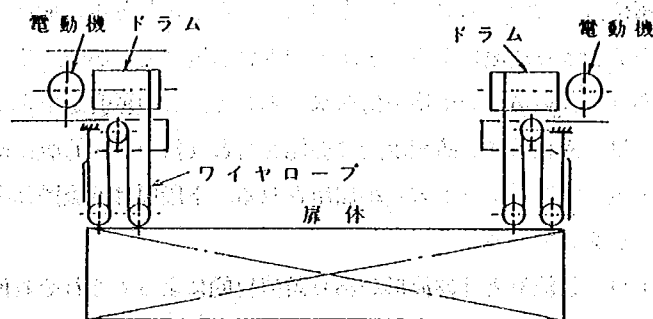


図-15 ワイヤロープウインチ式開閉装置³⁾
(2モータ2ドラムウインチ式)

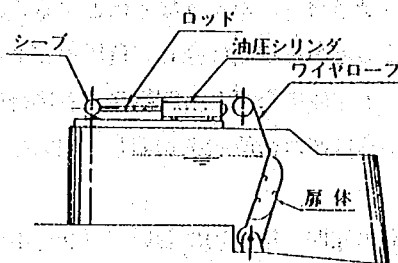


図-16 油圧シリンダワイヤロープ式開閉装置³⁾

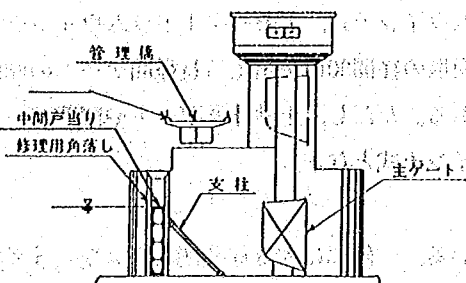


図-17 支柱支持形式設置例³⁾

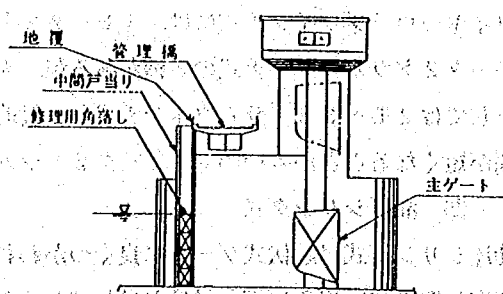


図-18 管理橋支持形式設置例³⁾

③ 油圧シリンダワイヤロープ式

油圧シリンダの長さを小さくできるので、高揚程の場合や開閉装置を狭い場所に据え付けなければならない場合に有利であるが、作用荷重は大きくなる。このため、高揚程、大荷重のゲートでは油圧シリンダのストロークやワイヤロープの掛け数を考慮して選定することになる。

開閉装置の形式や配置は、開閉装置室の大きさ、そして堰の景観に大きな影響を与えるので十分な検討が必要である。

(6) 予備ゲート

分流量堰、潮止堰、取水堰等の可動堰にあつて、年間を通じて操作を必要とする堰については、主ゲートの保守点検を行うための予備ゲートを1門以上設ける必要がある。予備ゲートは堰柱に荷重を伝えたり、堰柱との間で水密を確保したりする必要がある。すなわち、堰柱の上下流方向の長さや、管理橋の位置はこの予備ゲートの設置を考慮して決められることになり、堰の景観と密接に関係している。

2.5 堰の管理

(1) 洪水時操作

堰の管理にあたっては、法令に基づく操作規則を定めてゲート操作等を実行することになる。この操作を適切なものとするために、可動部と流量調節部の径間割りが検討される。すなわち、堰の景観は堰の管理とも密接に結びついているのである。

堰のゲート操作は、堰の設置目的によるが、一般に次の三操作に分類される。

① 非洪水時の操作

平常時には、予め与えられた条件に配慮しつつ、堰上流水位をある水位に保つ操作が必要となる。通常は流量調節ゲートにより放流が行われるが、魚道の呼び水水路を流量の微調節施設として利用することもある。与えられる条件としては、上流水位、河口堰にあつては上下流水位差及び塩水の侵入防止がある。

高潮時の操作は、河口堰に必要な操作であり、防潮水門の機能を合わせ持つ場合には、ある下流水位までは高潮及び塩水の侵入防止のためゲートを全閉する。それ以外はゲートを全開する。

② 洪水移行時の操作

洪水を流下させるため、堰の上下流水位に急激な変化を与えることなく水位を低下させるゲート操作であり、越流により流量調節を行っている場合には下端放流への切り替えを伴うことになる。

③ 洪水時の操作

堰地点の流量が、予め定められた流量を超える場合には、洪水の速やかな流下を計るため、全開操作を行う。この場合、ゲートは計画堤防天端高より高く引き上げられるため、洪水の流下の支障となることはない。

(2) 呼び水効果

堰には、魚道が設けられるのが一般的である。魚道が十分にその目的を果たすためには、魚道内の水理条件が対象とする魚類等の遡上に適しているのはもちろんのこと、下流から遡上してきた魚

類等が、魚道の入り口を容易に感知し、誤った進路をとってしまったり、進路を見いだせずに滞留したりしないようにすることである。魚道には呼び水水路を併設するのが一般的であるが、魚道の効果をより高めるためには、ゲートからの放流により魚が魚道に集まるようなゲート操作を行うのが効果的である。

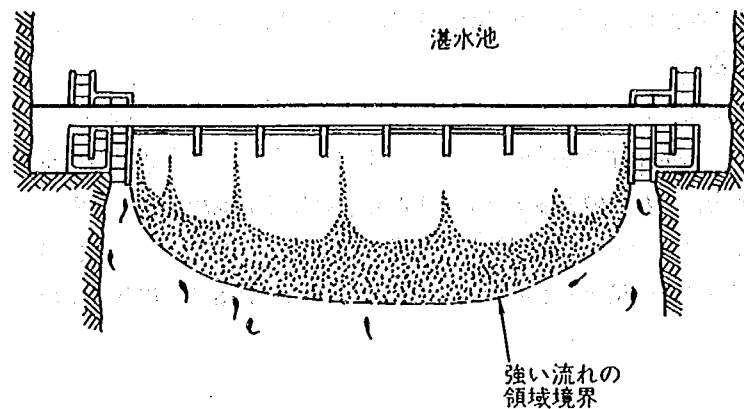


図-19 呼び水効果⁵⁾

3. 堰と景観

3.1 堰の景観的特徴

堰の遠景は、水平方向のスケール感が強く、全体形状は、管理橋・ゲート及び門柱・開閉装置室に分離される程度で、比較的規則的であり、かつシンプルである。このような視点から見た場合、堰は周りの風景を必ずしも疎外するものではなく、自然の風景を強調して、全体として良いものとしてしていると評価する事ができる。すなわち、自然環境との調和が計られていることになる。なお、川幅すなわち径間長及び径間数が減ると、全体としての垂直性は高まってくることから、まとまった一体感のある構造物となってくる。

堰に近づくにつれて、門柱・開閉装置室の垂直性が目立つようになるが、管理橋などの下部に比較して上部の立ち上がりが顕著であり、さらに、開閉装置室が門柱と比較してかなり大きいことから、安定感が損なわれていることが多い。また、流量調節部の径間や開閉部の構造の違いにより、規則性が失われ、一体感が弱められることになる。

さらに近づくると、各部の素材の違いが認識されるようになり、一体感がさらに弱められる。この一体感については、堰全体を一体的に設計することで、いろいろなおさめがたを演出することができるようになるが、不安定感についてはデザインにより軽減することはできるものの、構造的に修正を施さない限り除去することはできない。

3.2 堰構造と景観

デザインに配慮することで容易にまとまりをもたせることができる部分も多いが、慣例的に用いられてきた堰の構造を抜本的に見直すことで、景観上非常に優れたものをつくることのできる。特

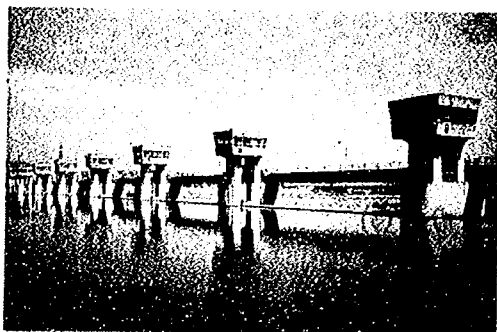


写真-8 飯泉取水堰



写真-9 加古川大堰



写真-10 芦田川河口堰

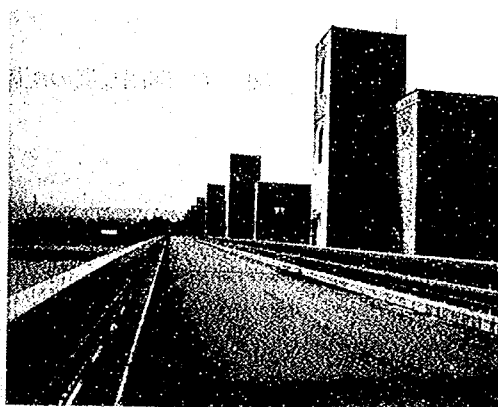


写真-11 妙見堰

に、開閉装置室の配置・規模は堰の景観を左右する重要な事項であり、堰の機能を損なわれないことを前提に見直す必要がある。その方法としては次の3種が考えられる。

① 開閉装置室の高さを低くする。

開閉装置室の高さは、開閉装置等の保守及び修理のための移動・搬出を考慮して決められている。しかし、開閉装置室の屋根を部分的に取り外すことで、外から直接、搬出可能なものとすれば、開閉装置室の高さを低く押さえることができる。

② 開閉装置室の位置を変える。

開閉装置室を門柱の上から下げ、堰柱の上に直接載せる。門柱の上には転向シープだけを設置する。

③ 開閉装置の形式を変える。

引上げ式ゲートの開閉装置は、ワイヤーロープウインチ式が一般的であるが、チェーン方式として、油圧シリンダーを用いることで、開閉装置室の規模を小さくする。油圧シリンダーは起伏ゲートで一般に用いられており、実績も多い。また、チェーン方式は過去に多く用いられてきている。

さらに、ゲートの形式を変えることも考えられる。例えばラジアルゲートは門柱が不要であり、開閉装置室を含めて全体をすっきりさせることができることから、ダムのカレストゲートとして多用されている。堰においても過去に用いられた事例も多く、最近では、新潟県の新発田川放水路で径間22mのものが景観を意識して採用されている。

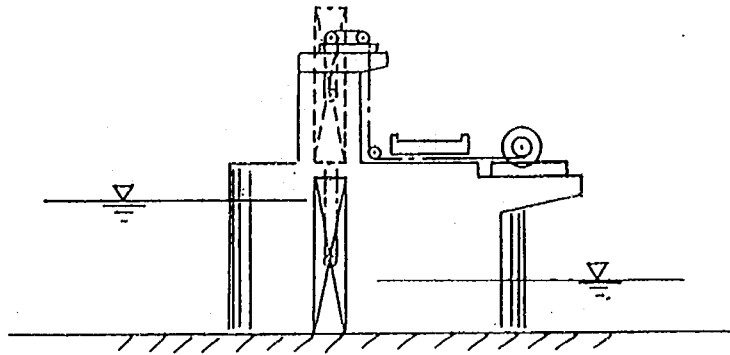


図-20 開閉装置の配置例（一段式ゲートの場合）

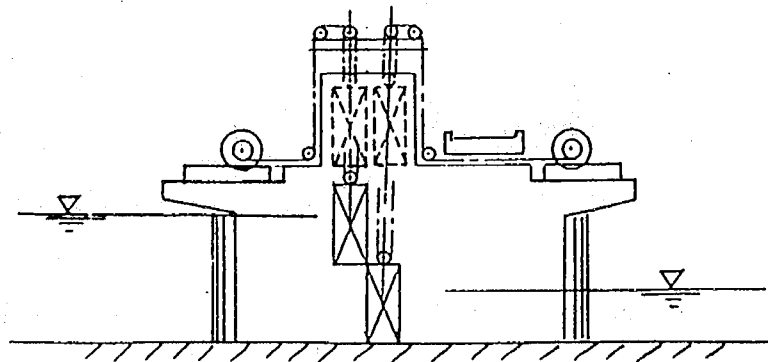


図-21 開閉装置の配置例（二段式ゲートの場合）

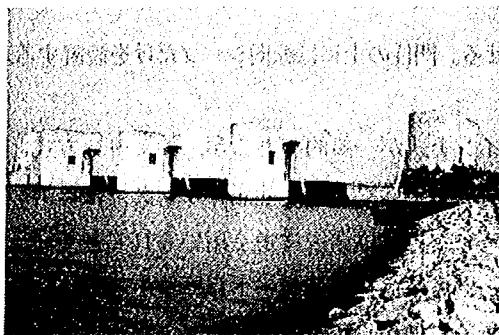


写真-12 津田江水門

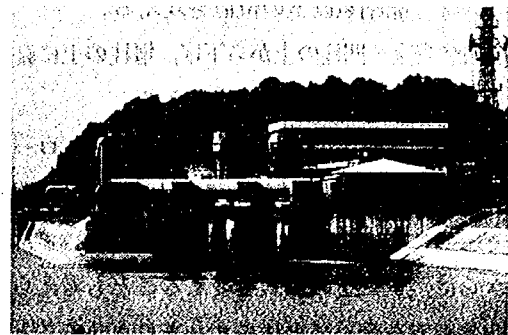


写真-13 瀬田川洗堰バイパス

この他、径間割り等に配慮することも可能性としては考えられるが、堰の洪水を通過させる機能と直接的にむすびついており、景観設計の観点から制約を除去するのは難しいと思われる。

4. あとがき

堰の設計に景観設計が本格的に取り入れられるようになってきたのは、極く最近のことである。これまでも、水門や小規模の堰については、デザインに配慮して設計・建設された事例は多かったが、ゲート構造が比較的限定される大規模堰では、ほぼ標準的な形状が過去の実績として受入れられ、部分的にデザインが考えられていたに過ぎなかった。

堰の景観設計手法はまだ確立したものではなく、これからの試行錯誤の中で、その考え方が整理されていくものと思われる。堰の設計は、土木技術者だけではなく、デザインの専門家の意見を広く受け入れ、きちんとしたコンセプトに基づいた景観設計を行うことで、その設計が真に優れた社会的資産として評価を受けていくことになると考えている。

参考文献

- (1) 「解説・河川管理施設等構造令」，河川管理施設等構造令研究会編，(株)日本河川協会
- (2) 「堰の設計」，山内彪編著，(財)ダム技術センター
- (3) 「ダム・堰施設技術基準（一次案）」，(財)ダム・堰施設技術協会
- (4) 「河川構造物大鑑」，土木界通信社

特 別 講 演
「創造活動のすすめ」

筑波大学学長 江 崎 玲於奈

—— へ ——

—— 人 也 ——

土木地質調査をめぐる最近の話題

地質官 市 川 慧

土木地質調査をめぐる最近の話題

1. 地質調査手法の近代化

1.1 調査の目的

地質調査の内容は、対象となる地盤と計画される土木構造物によって異なるが、使われている個々の手法自体は共通しており、調査は構造物と地盤の特徴に合わせた手法群の組合せの形をとる。その点では従前に行われていた土木地質調査と変わるところはないが、最近の情勢の変化の特徴として次の点を挙げることができよう。

・計画構造物の大型化：長大橋梁、大型ダム、地下街、物流基地、大断面トンネル、大深度地下発電所などに見られるように施設自体が大規模化し、地下化している。

・特殊化あるいは新しい目的の発生：放射性廃棄物などの地層処分、都市地域の大深度地下開発、地下河川、地下備蓄、連続橋梁の一体化などのように、社会の要請から全く新しい形の施設が現れている。

こうした情勢を受けて構造物の支持基盤に対して新たに生じた条件として、次の問題がある。

一つは構造物の大きさの中での地盤の物性の不均一性が大きな意味をもつようになったことである。構造物の規模が小さいときにはこれを考慮に入れる必要性は極めて低かった（例えば10mオーダーであればその中の物性値のばらつきは通常は無視できる）。また、その不均一性は空間的な位置に関してばかりでなく、時間経過の中での変化のあり方にも存在する。

しかしながら、設計する側にも大規模な構造物のもつ法効果を的確に反映する手段はないと言っても過言ではなく、それには構造物の設計で扱われる物性の精度と調査から求められる地盤の物性の精度との間には一桁以上の開きがあることが大きいのしかかっていることを、地盤を対象としている立場としては認めざるを得ない。

もう一つはCADの採用に代表されるように、構造物の設計が高度化、複雑化したことである。構造物の材料が高い精度と信頼性をもっているのに対して、地盤はこの点に関しては甚だ頼りない。従前はこれを構造物の設計の方でカバーすることが可能であったが、構造物の材料と同程度の質の地盤の情報が要求されるようになったと言ってもおかしくはなくなった。

これにはもっと深刻な事態が隠れている。われわれが設計に携わるよりもっと以前には、構造物と地盤の双方にまたがる知識や経験をもった技術者の割合がわれわれの時代より多かった。今日では技術の発展につれて技術者が多くなると同時に、分業化、専門化が進み、自分の側の業務に必要な情報量が膨大なものになり、もはや相手側の領域を顧慮するだけの余裕がなくなってしまった。特に地盤に関係している者として失礼を敢えてすれば、設計者は地盤の調査成果やそれから導かれる情報、岩盤力学や土質力学からの計算や予測といったものの精度、さらにはそれ以前に手法や理論展開に内在する不正確さや仮定に関して、構造力学の世界と全く同じ質のものとして理解してい

るのではないだろうか。そこに地質調査への不満や不信が生まれる原因の一端があると考えられる。

1.2 調査の手法の進歩

土木地質調査は、地盤の状況を工学的性質の分布という形で表現することであり、対象とする構造物によってその表現型式が異なると同時に、物性を求めるための手法群の組合せも異なる。しかしながら、調査対象が地球の表層で、その成果である地質図は地質学的な構成に基づいて物性を表現している以上、基礎技術としての踏査（マッピング）、ボーリング、試料採取と各種の試験、観測、測定は従前と異なるところはない。基礎技術を駆使して地盤の情報を明らかにするという土木地質学の立場は、その誕生以来少しも変わっていない。

それでは土木地質学の世界におけるイノベーションとは何であろうか。一言で言えば基礎データの収集の仕方と集まったデータの処理の方法が、各種の最新のピックアップとコンピュータを用いて迅速、容易かつ大規模に行われるようになったことである。ほとんどが手作業で行われていた個々の要素技術は、次のような変革を迎えている。

- ・主体は従来と変わらないが、材料や計器が新しくなったもの：ボアホールスキャナーによる孔内観察、掘削用水に界面活性剤を使ったミスト（気泡）ボーリング、岩盤剪断試験の自動載荷計測システム、弾性波探査の繰り返し起震、など

- ・手法は従来と全く変わらないが、コンピュータによって高度化したもの：各種探査のレシーバーのアレー配列によるシグナルエンハンスメント、など

- ・コンピュータの導入によって、理論的には既知でも実行不可能だったものが実用化したもの：CT（トモグラフィ）の導入、ジオスタチックス、多変量解析などの統計的処理、柱状図などの地質情報処理、など

2. 新しい現位置探査・計測法

最近の研究によって、日本列島は、時代の異なるいくつもの地質ブロック（付加体と称されている）が、まるで寄木細工のように複雑に組み合わさって構成されていることがわかってきた。さらに、現在においても日本列島周辺は活発なプレート活動域に属することから、地震や火山活動に代表されるような地殻変動の影響を受けていることで特徴づけられる。日本列島の地質はこのようなもともと複雑なうえに、新しい時代の変動を受けていることから、土木構造物の基礎としては問題がある場合が多い。極端な例では川の右岸側と左岸側とでは地質体が異なったり、断層や破碎帯に悩まされない山岳トンネルはまずないと言ってもよいであろう。

このような複雑な地質構造を相手にするとき、我々は、対象とする地域に一体何があるのか（地質の分布）、どうなっているのか（地質の構造）、なぜそうなっているのか（地質の形成史）を理解することが大切である。従来の地質学、あるいは近年の地球科学の学問体系や、付随する技術は、それらの理解を助けることに大いに役立つものである。しかし土木地質学の領域では、地質をただ“解釈”するだけでなく、それをどうするか、という実践的な課題にも応えなければならない。換言すると、従来の地質学の手法は往々にして“定性的”であるのに対して、土木地質学において

は、対象地盤に対する実践的な“手を加える”という行為（多くのバリエーションがあり得る）の中から最適なものを選択する判断基準として、何らかの“定量的”情報を提供することが加えられる。

地質を定量的に評価する、あるいは地質情報を数値化して表示することが求められる訳であるが、その手法が「物理探査」と総称される現位置探査・計測である。

従来、土木地質分野において物理探査と言えば弾性波（屈折法）探査を思い浮かべることが多かったが、近年、新しい探査・計測手法の開発と現地への適用が展開してきた。その背景には近年における計測・解析技術の格段の進歩と岩盤（地盤）の理論的研究が進み、基礎的物性に関するデータが蓄積されてきたことが挙げられる。しかし、今日土木地質分野において適用が試みられている新しい探査・計測技術の殆どは他分野（資源探査等）で開発されたものであり、それらを直接的に応用しても満足できる成果を得られるという保障はない。新技術の適用にあたっては、その技術の理論的背景、計測する物性の持つ意味、精度、対象とする実地盤のモデル化の妥当性等を吟味しながら進めて行くことが大切である。

地質研究室を主として土木研究所では、土木地質分野において新しい探査・計測法の開発に携わり、また技術の評価・現地への適用を行なってきたが、その中からいくつかの探査・計測法を取りあげここに紹介する。

なお今回紹介する手法は現位置での地盤（岩盤）の評価に対するもの（現位置探査法）であり、室内試験等に関わる手法は省略する。これは、前述のように複雑な地質構造を有する我が国においては、ミクロな評価（室内試験等の結果）をいくら積みあげたところで、マクロ（実地盤）の評価を行ない得ないことから、実地盤に対する探査・計測のウエイトが大きいと考えているからである。

2.1 新しい現位置探査・計測法とその適用例

(1) ジオトモグラフィー

従来、物理探査は地表や空中から行われるのが一般的であったが、探査機器の小型化やデータ処理技術の向上などに伴い、ボーリング孔を用いた探査技術体系が発展してきている。ジオトモグラフィー(Geotomography)はこの代表的なものである。ジオトモグラフィーは、医療分野のX線CTスキャンなどに代表される非破壊の内部情報画像化技術の一種である。探査手法の概要は次の通りである。

- ① 画像化しようとする領域を囲む（または挟む）ように、測線および測点を設定し、その正確な幾何学的位置を求める。
- ② 探査領域を挟んで、発振器と受振器を設置する。
- ③ 発振・受振点を少しずつずらしながら、それぞれの伝播経路（波線）における波の到達時間や減衰率の測定を繰り返す。
- ④ 探査対象断面を、解析しようとする小さいエリア（セル）に細分する。
- ⑤ CG法、最小二乗法、ART法、SIRT法、SVD法、DLSRT法など各種のインバージョン（逆解析）手法により、セルを通過する各波線部分の伝播時間や減衰率に関する合理的な解の

集合、すなわち各セルの物性値分布を反復計算により求める。

ジオトモグラフィーにおいては、医療用CTなどに比べ探査距離がきわめて長いので、伝播する波が大きく屈折するのが特徴である。ART法など屈折を考慮しないインバージョン手法に比べ、DLSRT法などの方法は反復計算のたびに新たな波線を設定する。このように、ジオトモグラフィーの実用化にあたっては、探査方法や解析方法において独自の手法が開発・利用されている。

① 弾性波トモグラフィー(Seismic Tomography)

・探査原理

数十～数百Hzの弾性波を用いて上記の手法で探査を行うものである。なお、ボーリング孔のみならず地表にも発振点や受振点を設定し地表とボーリング孔間で探査することが可能である。ボーリング孔と地表の測線を用いると、解析精度の向上が期待できる。なお、このような測線の配置はVSP(Vertical Seismic Profiling)と同一であるが、VSPが地層中の反射波を主に処理対象にするのに比べトモグラフィーの場合は直達波を処理対象にする点が異なっている。

・データ取得法

ボーリング孔の幾何学的配置を正確に求めるために、まず孔曲がり検層を行う。次に、必要な探査精度と解析量のバランスから、発振・受振間隔を設定する。通常、間隔は1～5 m程度とすることが多い。発振源は主に火薬を用いる。受振器は本来、精度の高い解析のために振動方向を明確に出来る三成分系の受振器を用いることが望ましいが、火薬により孔壁が破壊され複数回発振することが出来ない場合が多いので、上下方向一成分の多連の受振器ケーブルを吊り下げて測定するのが一般的である。

・データ処理・解析法

データは増幅器を経てデータロガーに記録される。波形データはデジタル化され、高周波ノイズを取り除くためのバンドパスフィルターなどの基礎的な処理を行った後に初動や振幅の読みとりが行われる。このデータをもとにインバージョンが行われる。

・適用例

図-1～3は、あるダムサイトにおける推定地質構造、弾性波トモグラフィーによる探査結果、および探査結果から推定されるリニアメント(線構造)である1)。地質は白亜紀の花崗岩である。推定地質構造に見られる断層は直接的には捉えられていないが、断層とリニアメントの方向性がほぼ一致すること、岩級区分と弾性波速度分布が類似することなどから、この弾性波トモグラフィー結果は、割れ目系に伴う岩質の急変部をリニアメントとして捉えていると考えられる。

② 電磁波トモグラフィー(Radar Tomography)

・探査原理

数十～数百MHzの電磁波を用いて上記の手法で探査を行うものである。同様の機器を用い、電磁波のアンテナを一方のボーリング孔に並列して岩盤中の割れ目からの反射を捉える方法もあるが、これは反射法として区別される。

・データ取得法

まず、弾性波トモグラフィーと同様に孔曲がり検層と発振・受振点の設定を行う。電磁波トモグ

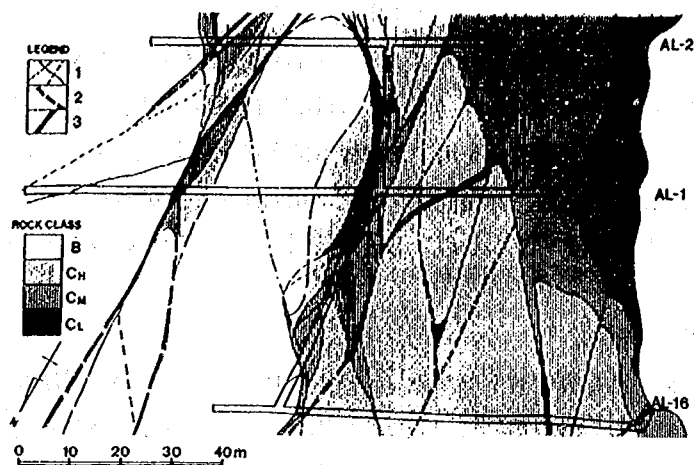


図-1 推定地質構造

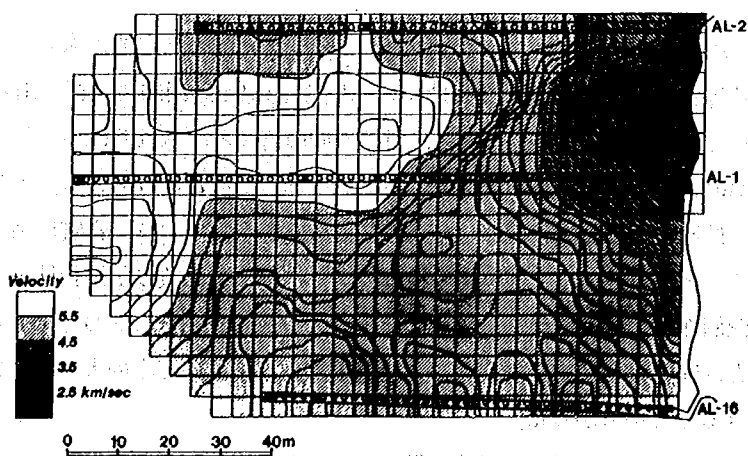


図-2 弾性波トモグラフィー探査結果

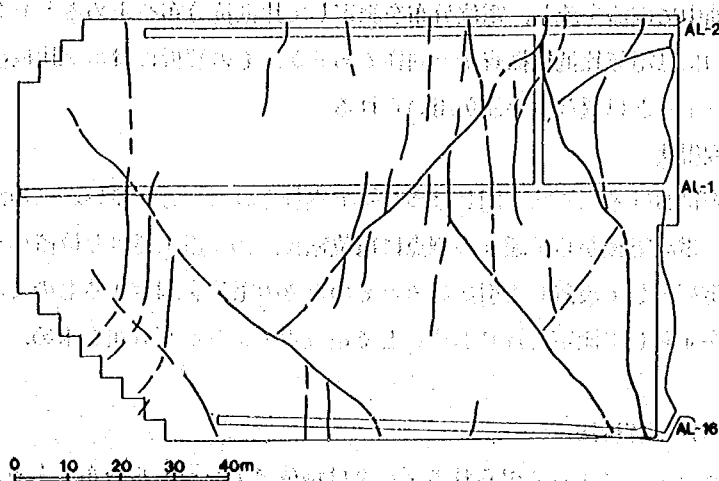


図-3 探査結果から推定されたリニアメント

ラフィーの機器には、国内のもののほか、アメリカ、スウェーデンなどの機種が一般に利用されている。いずれも電磁波の発振器は、インパルス（半波長波）、またはモノパルス（一波長波）を繰り返し発振できるものが用いられているが、S/N比や探査深度の向上のために符号化パルスやチャープ信号（周波数可変の連続波）を用いた機種も開発途上にある。発振アンテナと受振アンテナは同型の仕様のものが用いられ、無指向性タイプと指向性タイプがある。アンテナからデータロガーへの伝送においては電気ケーブルを用いると雑信号が発生しやすいので光ケーブルを用いているものもある。

・データ処理・解析法

データの処理、解析手法は弾性波トモグラフィーと同様である。しかし弾性波と電磁波は物性的には全く異なるものであり、特に、電磁波の減衰率は周波数に強く依存するため、同型の機種であっても異なる周波数で測定された探査結果は、必ずしも同様な結果を与えるとは限らない。また逆にこの性質を利用して透過波のスペクトル特性から岩質を判定しようとする試みもある。

・適用例

図-4～5は、あるダムサイトにおける2本のボーリング孔間の推定地質構造および電磁波トモグラフィーによる探査結果である2)。地質は第三紀～第四紀の砂礫層および火山岩類で、推定地質構造はほぼ水平である。探査結果によると、斜め方向の偽像とみられる構造が認められるが、大まかには、間隙率の高い砂礫層部分が低速度、高減衰率として探査されている。また、砂礫層部分を詳細にみると、低速度部と高減衰率部はやや異なる分布を示しており、岩質に細かな相違があることを示している。そこでボーリングコアや検層のデータから電磁波の伝播特性と土木的な諸物性値を対比し、砂礫層部分の探査結果を粒度と間隙率の分布として解釈したものが図-6である。これによると砂礫層は細粒で間隙率の小さい最下層、細粒で間隙率の大きい中層、粗粒な上層の三層に細分できることが分かった。

③ 比抵抗トモグラフィー(Resistivity Tomography)

・探査原理

電極を用いて地中に電流を流し、電位分布を測定して比抵抗分布を求めるトモグラフィーである。探査方法は基本的には電気比抵抗探査法と同様であるが、その解析には電気比抵抗探査や弾性波・電磁波トモグラフィーとは異なる手法が用いられる。

・データ取得法

電気比抵抗探査における二極法と同じ電極配置で実施されることが多い。二極法は、ある一つの測点に電流電極、電流電極から距離 a の測点に電位電極、 $10a$ 以上離れた位置にそれぞれの反対側の電極を無限遠電極として設置して引加電流とそのときの電位を測定するものである。この電流・電位電極の位置をずらして測定を繰り返すことで電位ポテンシャル分布を求め、これを解析データとする。

・データ処理・解析法

比抵抗トモグラフィーによって得られるデータは電位ポテンシャル分布であり、弾性波や電磁波のトモグラフィーと異なり、波線概念を用いることが出来ない。したがって、FEMや、三次元的

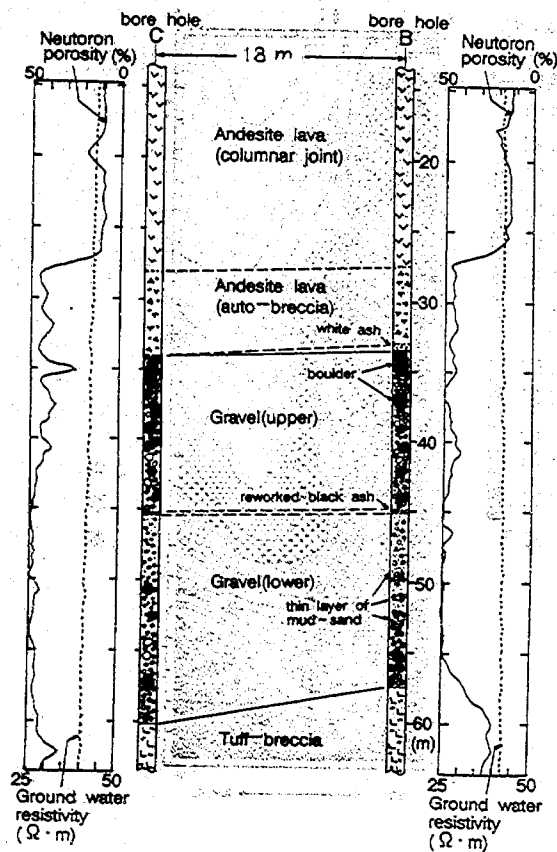


図-4 推定地質構造

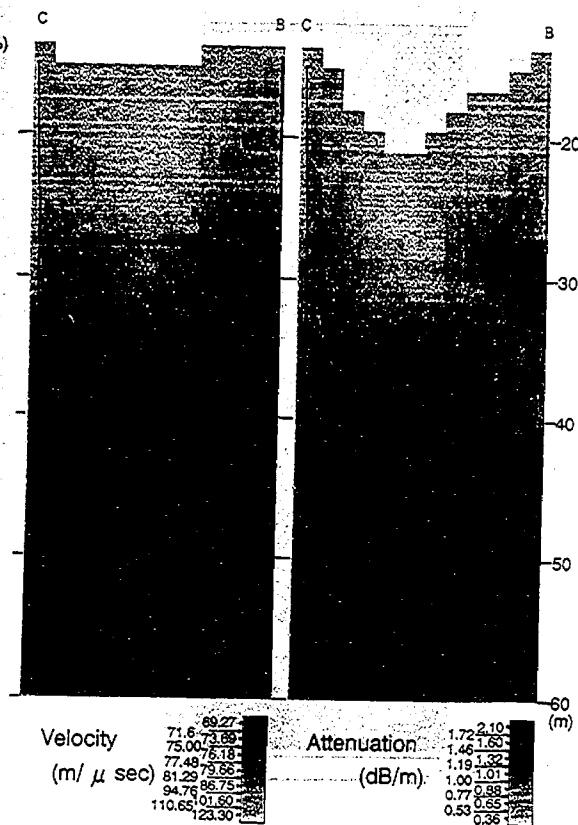


図-5 電磁波トモグラフィーによる探査結果

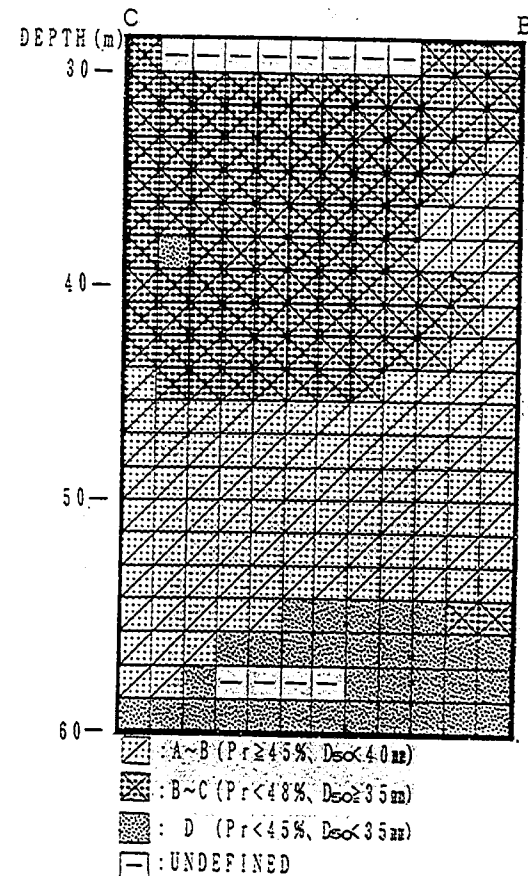


図-6 電磁波トモグラフィーと検層による地質解釈結果

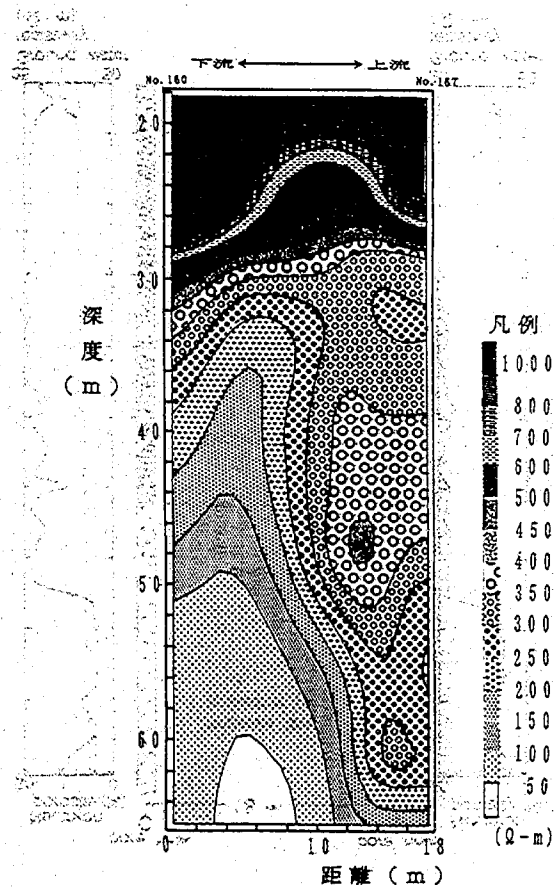


図-7 図-4の地質における比抵抗トモグラフィー結果

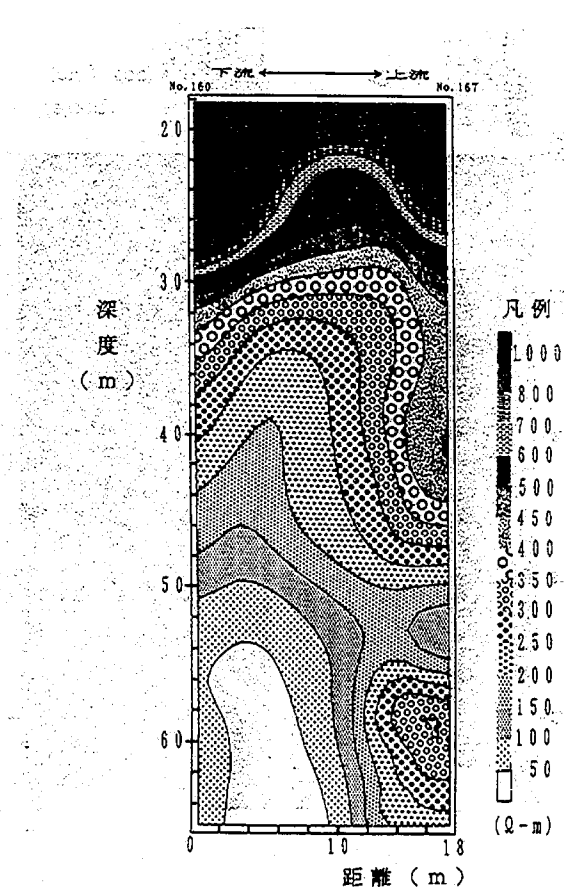


図-8 上流側孔から塩水を注入した後の比抵抗トモグラフィー結果

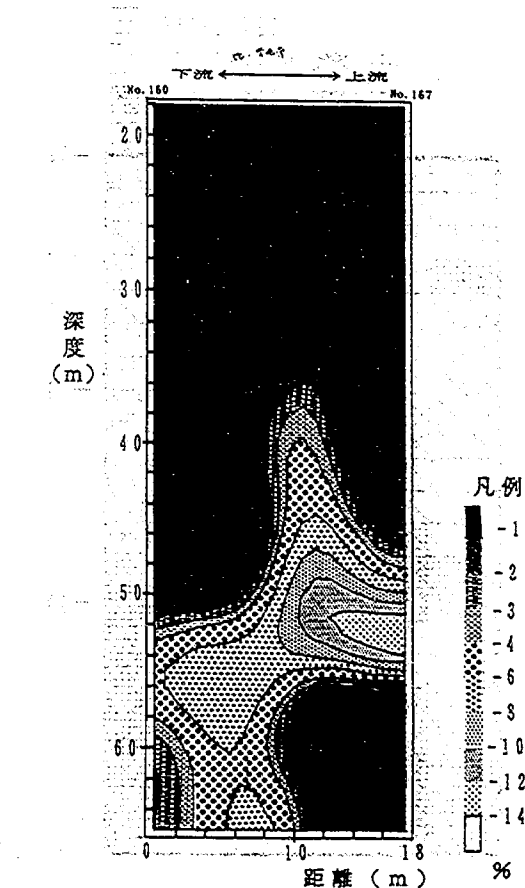


図-9 塩水注入前後の比抵抗の変化

な比抵抗および電位の分布を簡単な級数和で表現するアルファセンター法と呼ばれる手法を用いて解析を行っている。

・適用例

図-7は図-4~5と同じ断面で比抵抗トモグラフィーによる探査を行った結果である3)。図-4と比較すると、上部の安山岩溶岩にあたる部分が高比抵抗に、それ以外の部分が低比抵抗になっており、電磁波トモグラフィー結果に類似する。しかし安山岩溶岩の中央部が周辺よりやや低比抵抗となっており、偽像の可能性が示唆される。図-8~9は上流側(右側)の孔に塩水を注入しながら探査したときの探査結果および注入前後の比抵抗変化率である。特に図-9と図-6を比較すると、塩水の浸入経路は砂礫層の中層部に限定されており、内部で上下に分散していくことが推定される。電磁波や比抵抗を用いたトモグラフィーではこのように地下水とは異なる電磁特性を持つ水をトレーサーとして用いることで、地質構造のみならず地下水の流動速度や流動方向を推定することも可能である。

④ ウェルテストトモグラフィー(Welltest Tomography)

・探査原理

ボーリング孔中の一定区間で水圧変化を発生させ、他方のボーリング孔でこの水圧変化を測定するパルステストと、ジオトモグラフィー手法を組み合わせた手法である。

・データ取得法

発信孔の所定の区間をパッカーで区切りポンプによって加圧して発生させたパルスまたは正弦波状の水圧変化を、他方のボーリング孔にパッカーで区切って設置した多数の水圧計で測定する。

・データ処理・解析法

解析手法は確立されていないが、亀裂性岩盤の場合は事前に割れ目計測を行い割れ目系のモデルを作成し、これを初期モデルとして順解析として浸透流解析を行い、計算結果と実測例の比較からモデルの逐次修正を行って透水性分布を求めた例がある4)。電磁波や弾性波のトモグラフィーに比べ、透水性は三次元的な構造が極めて強く影響するので、初期モデルの設定方法と、三次元モデルへの展開が解析の鍵となる。

・適用例

図-10~12は、礫岩、凝灰岩、および砂層が累重する地質(図-10)において、ボーリング孔壁の観察などから透水性に関する初期モデルを作成し(図-11)、ウェルテストトモグラフィーを行った結果(図-12)である4)。割れ目分布などから推定した初期モデルに比べ、試験結果による透水性分布は、左上から右下に伸びる特定の割れ目群が透水に強く関与していることを示唆している。

(2) 電磁波反射法(Georadar, Subsurface Radar, Ground Penetration Radar)

・探査原理

百数十MHz~1GHz程度の電磁波を地中に発射し、地層境界や断層などの地中の電磁氣的インピーダンスの境界部からの反射波を受信して画像化するもので、地下レーダー、地中レーダーなどとも呼ばれる。画像は地表面に沿ってアンテナを移動させることにより求められる。探査深度は数mと浅いが、地中における波長が極めて短いため、高精度の探査が期待出来る。

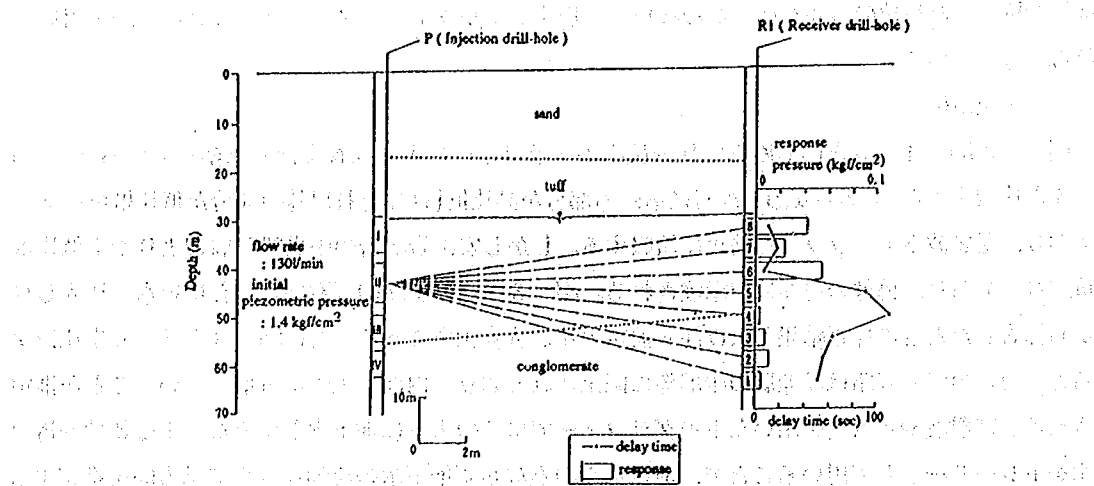


図-10 推定地質構造

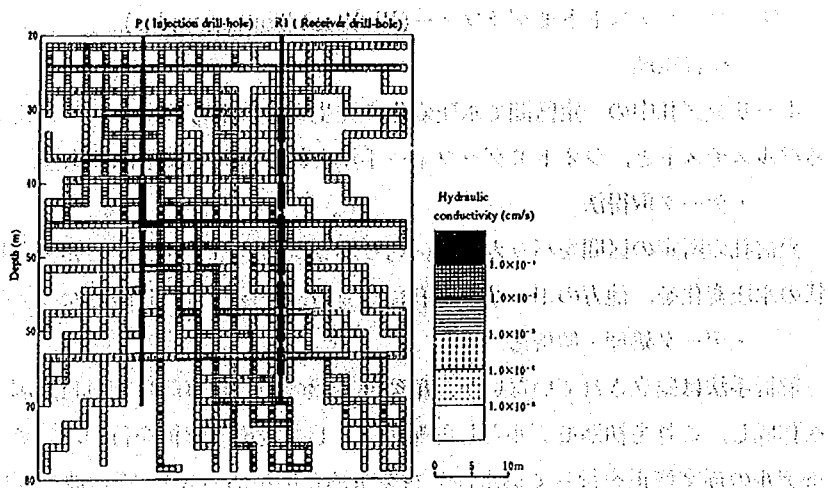


図-11 割れ目分布モデル (初期モデル)

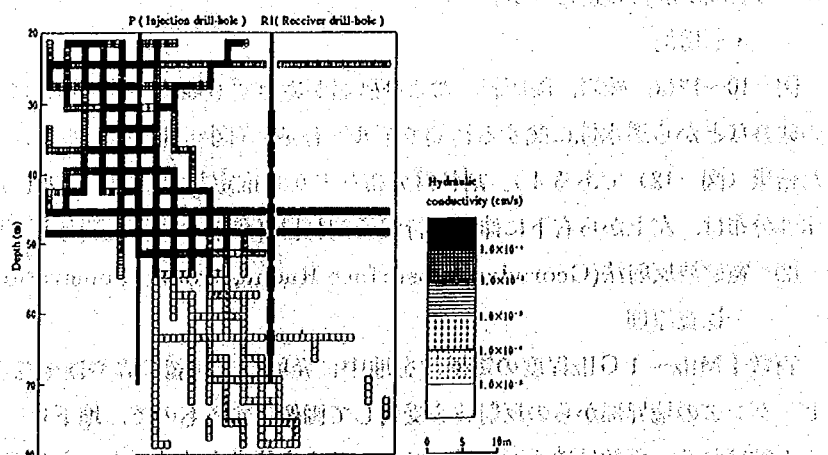


図-12 ウェルテストトモグラフィによる解析結果

・データ取得法

発振器自体は電磁波トモグラフィーと同様のものを用いる。発振・受振アンテナは、ボーリング孔のものに比べ、平板型で指向性の高いものを用いる。探査方法としては、二つのアンテナを並列し、地表面に沿って同時に移動させる方法（プロファイル測定）と、一方のアンテナのみを移動させる方法（ワイドアングル測定）があるが、一般に行われるのはプロファイル測定であり、ワイドアングル測定は地中の電磁波速度を算出し正確な深度を求めるために用いる。また、弾性波の浅層反射法と同様に三つ以上のアンテナを並列して設置し、解析も浅層反射法の手法を利用するマルチチャンネルの手法も検討されており⁵⁾、S/N比の向上が期待できる。なお、通常、アンテナは探査深度を最大にするため地表面に密着させて探査するが、探査効率の向上を計るため空中から探査する試みもなされている⁶⁾。これが実現するとパルス圧縮や合成開口法などマイクロ波リモートセンシングの解析手法を活用し極浅部地質構造や埋設物の面的で精密な探査が実現される可能性がある。しかし日本国内においては、電波法の制約上、この周波数帯での高出力化や空中からの探査は困難な状況下にある。

・データ処理・解析法

測定された時間-波形データは、時間-波形列としてそのまま、またはTVG (Time Variable Gain) により深部からの反射波形を強調させた後に画像化される場合が多いが、二次的に処理されて画像化される場合もある。二次的に処理する場合は、波形をデジタル化した後、各種のフィルタリングにより雑信号を抑えたり背景を除去しアノマリー（異常部）を強調する処理、デコンボリューションやマイグレーションなど、反射面の位置をより明瞭化させる処理が行われる。

・適用例

図-13は自然斜面の探査を行った例である⁷⁾。斜面表層は、上部がマサ化した風化花崗岩の上部にロームおよび腐植土が堆積している。探査結果を詳細にみると、探査結果には、二層の明瞭な

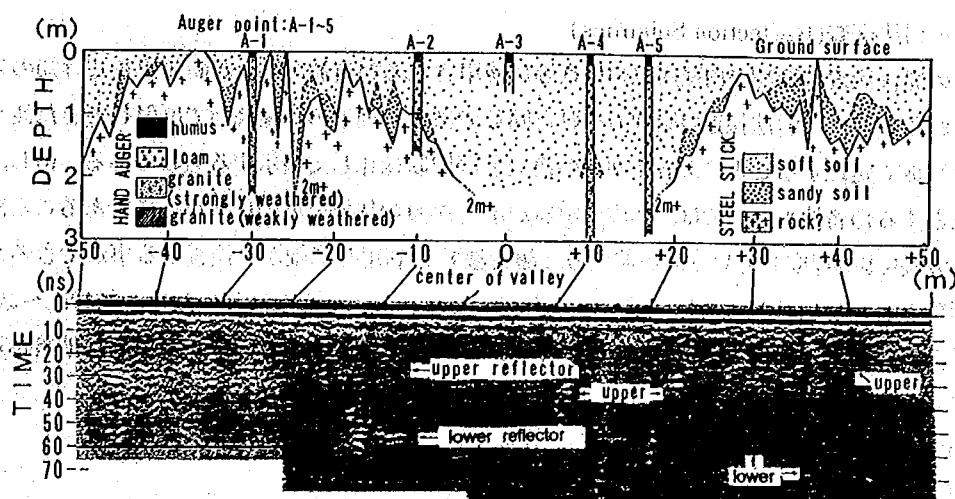


図-13 斜面表層における電磁波反射法測定結果

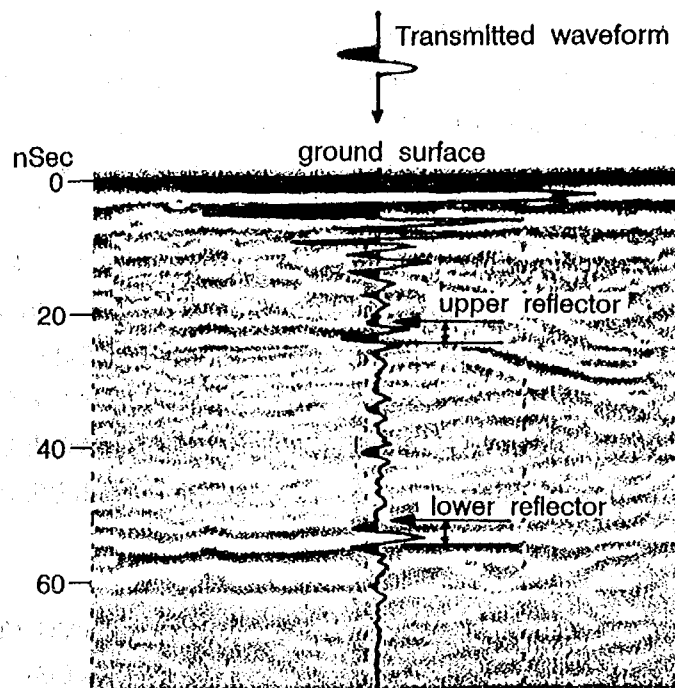


図-14 反射面の拡大図

反射面が認められる(図-14)。ローム中に鉄筋棒を挿入して測定した結果から、上部の反射面はロームとマサの境界であることが分かった。下部の反射面にあたる地質構造は認められなかったが、斜面下部の湧水の存在、室内でのコアの電磁気特性試験結果、探査結果の波形解析などから、下部の反射面はマサまたは風化花崗岩中の地下水面であることが推定された。従来、表層付近の地下水面の位置を面的に求める手法はほとんどなかったが、本手法で表層地下水面の探査が可能となった。

(3) 反射法探査(Reflection Seismics)

胎児の発育状況の確認や内蔵疾患の検査等に使用される超音波エコー診断装置をご存知の方も多と思われるが、反射法探査の原理もそれと同じであり、地下の不連続面で反射してきた波を計測し、計算機で処理することによって地下の構造を擬似映像化して表示するものである。但し、人体を対象とする超音波エコーでは、体内の臓器が氷づかりの状態では波の伝播が一様であることから数MHz(波長0.5mm程度)という高周波の波(超音波)を利用して細かく検査する事ができるが、地盤を対象とした反射法探査では、地盤が不均質なうえに波の減衰が著しいため、数10Hz～数100Hz(波長数m～数10m)の波を利用せざるを得ない。そのため、数mオーダーの細かな地盤構造の変化は捉えられないものの、土木地質調査としては必要な分解能は充分に有している。

① 浅層反射法(Shallow Reflection Survey)

・探査原理およびデータ取得法

図-15に示すように、地表に多数の受振点を配置し、振源で起振した波を同時観測する。観測記録には地表を直接伝播した直接波のほか、地下の不連続面で反射してきた何枚かの反射波が含ま

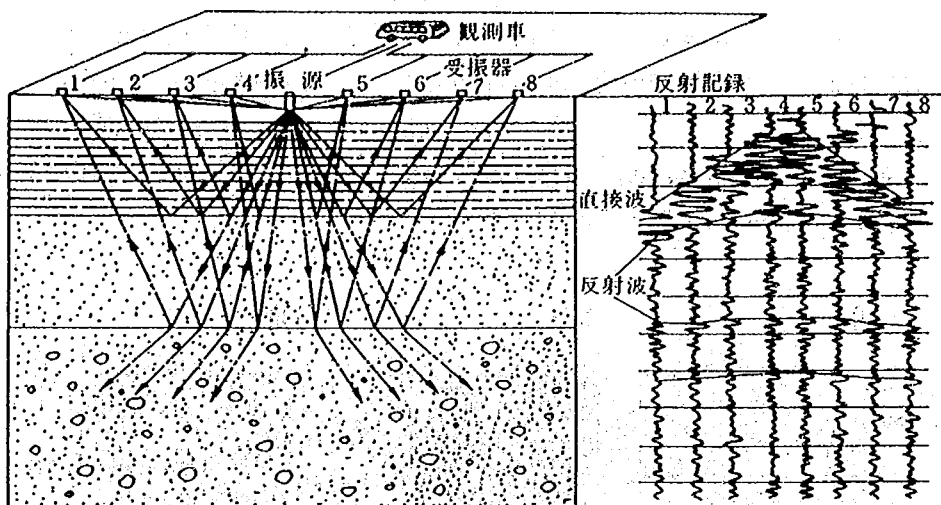


図-15 浅層反射法の概念図

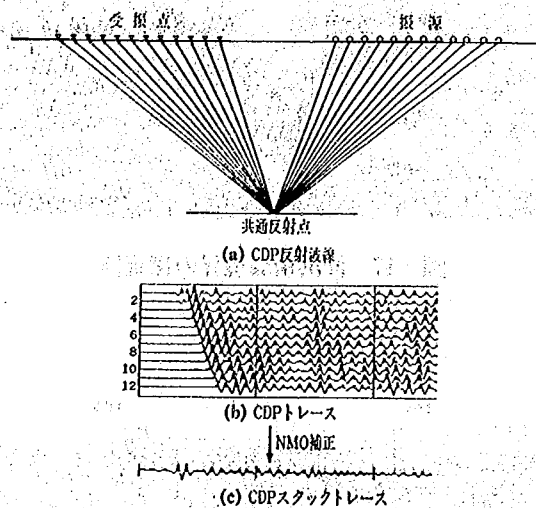


図-16 CDP重合法の原理

れている。この反射波だけを抽出して断面を再構成する訳である8)。

振源-受振点群を少しずつずらしながら観測すると、図-16に示すように、共通の反射点を有した一連の波形記録が得られる。換言するとこれは一地点を多方面から観測しているということであり、一地点(反射点)の信号を強調することができる。電波天文学におけるアレイ観測と同じ原理である。

・データ処理・解析法

観測波形は増幅器、A/Dコンバーター、スタッキング装置、デジタル収録器等で構成されるデジタル探鉱器に収録され、専用のソフトウェアによってコンピュータで処理される。主なデータ処理とし

では、地表部のゆるみ領域の影響を補正する静補正、減衰した波群の振幅を大きくする振幅回復、共通の反射点を有する波形記録を集めるCDPソート、放物線上に配列した反射波を直線上にならべなおすNMO補正、並べられた反射波を足し合わせることによって強調するスタック等がある。

・適用例

図-17は深さ5~10m付近にある沖洪積層境界を検出した例である。この図では深さ10m、幅100m程度の浅い埋没谷が捉えられている9)。

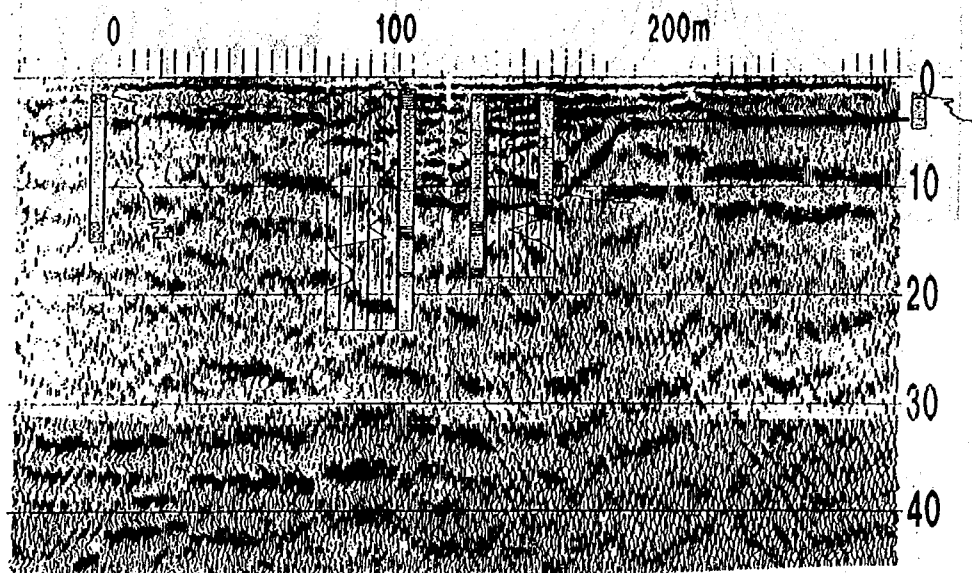


図-17 沖洪積層境界の探査例

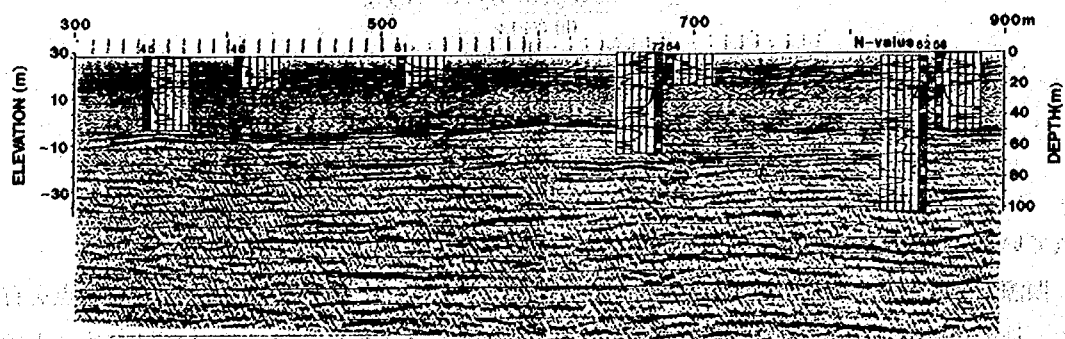


図-18 土木研究所構内における探査例

図-18はつくば市の土研構内の反射断面である。同図には水平に成層した地盤構造が明瞭に捉えられている。また重ねて表示したボーリング柱状図とN値分布との対比では、反射面の多くが礫などの粗粒の堆積物の下面(N値が急激に低下する境界)に対応していることがわかる10)。

② マルチチャンネル音波探査(Multichannel Marine Reflection)

・探査原理

水域での音波探査では、従来シングルチャンネルの方式が主であった。しかし、陸域での反射法探査と同様に、受振器を多数個配列したストリーマーと称する装置を索引して、反射面の信号を強調させて表示することが可能なマルチチャンネル音波探査が土木地質調査分野でも利用され始めている。

・データ取得・解析法

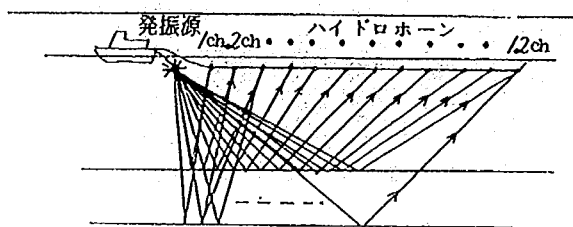


図-19 マルチチャンネル音波探査の探査方法

図-19のようにストリーマー、音源等を装備した観測船によってデータを取得する。ストリーマーの長さは数100m～数kmに及ぶことがあるため、観測船後方水域の確保が必要となるため船舶航行の激しい水域では注意を要する。

・適用例

シングルの音波探査では海底面からの多重反射によって地下構造がマスクされてしまい、詳細な解析が困難になる場合が多いが、マルチチャンネル音波探査では多重反射の影響を受けることなく地盤構造が把握されていることが図-20に示されている。

(4) VSP (Vertical Seismic Profiling)

・探査原理およびデータ取得法

ボーリング孔を利用した検層法の一つにPS検層がある。VSP(Vertical Seismic Profiling)も探査・データ取得法としてはこのPS検層と全く同一である。主たる相違点は、PS検層では観測波形の初動にのみ着目して速度構造を求めるのに対し、VSPでは初動に続く後続波のなかから地下の境界面ではねかえってくる波(上向波)を抽出してボーリング孔近傍の地盤構造(速度境界)を評価する。

・データ解析法

観測波形から上向波を抽出し、合成波形を得る過程の各段階の波形を図-21に示す11)。

・適用例

土研構内地質野外実験上での適用例を図-22に示す。A孔・B孔とも孔深度は60mで、柱状図は時間軸が等間隔となるように深度軸を伸縮して表示してある。主体として振幅の大きい部分が、地層境界、特に砂礫層の上下付近に対応していることがわかる12)。

VSP合成記録からは、地下の速度境界のみならず、地質の伝播特性、各地層の減衰定数などの情報も得られることが報告されている。

VSPは一般にボーリング孔内において実施されてきたが、最近、トンネル坑内においてVSPを実施し、切羽前方地山を評価する試みも行われている。

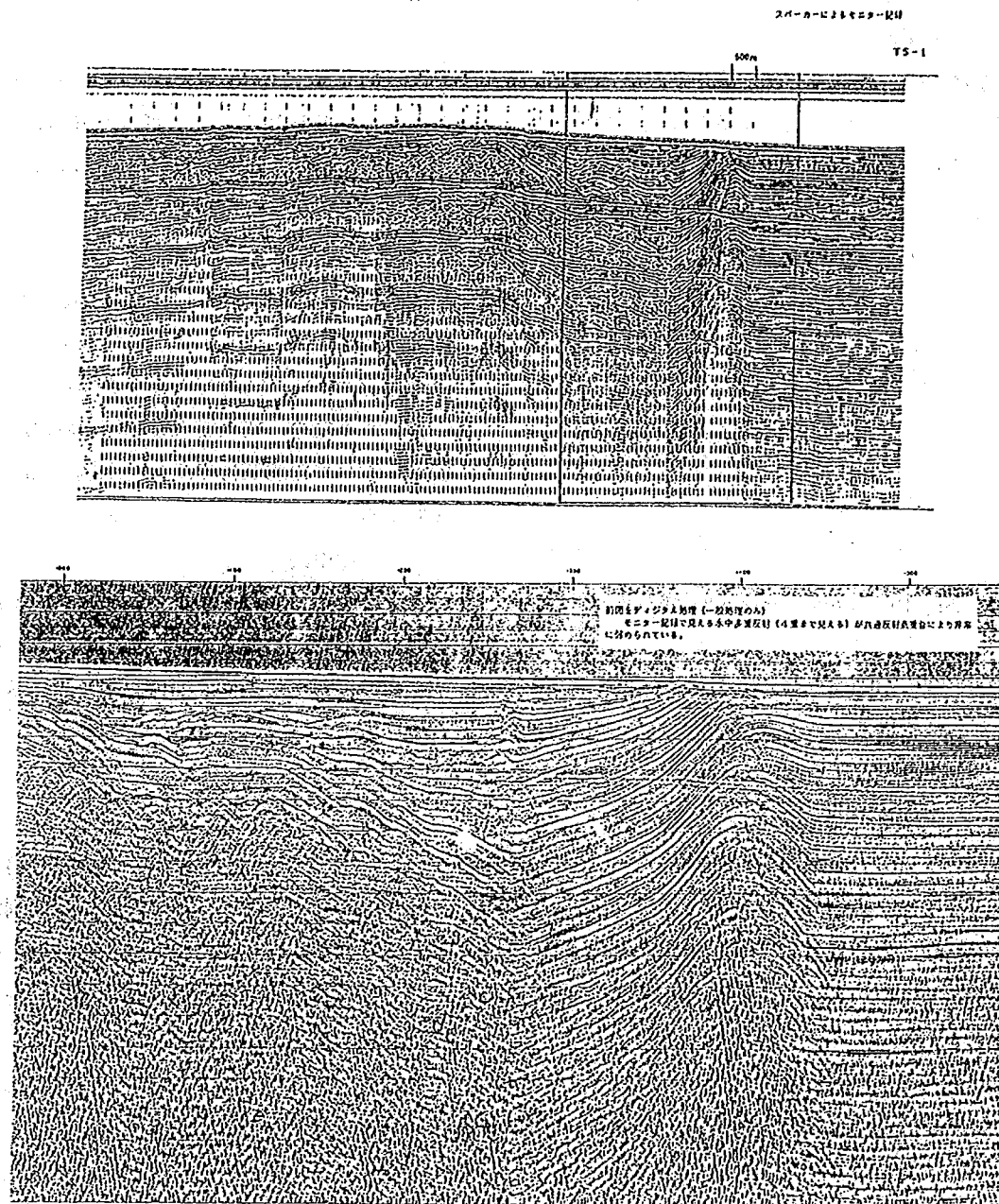


図-20 マルチチャンネル音波探査の探査例

(5) 孔内計測・検層法(Well Log)

ボーリング調査は地盤内部における地層の分布を直接確認できることから他にかえることのできない優れた調査法であると言えるが、一般に土質ボーリングではコア採取が行われていないこと、岩盤ボーリングにおいても採取されたコアが必ずしも現位置の岩盤状況を反映していないことなどから、各種センサを直接に孔内に挿入し、現位置で直接的に地質構成や物性値を測定しようとする

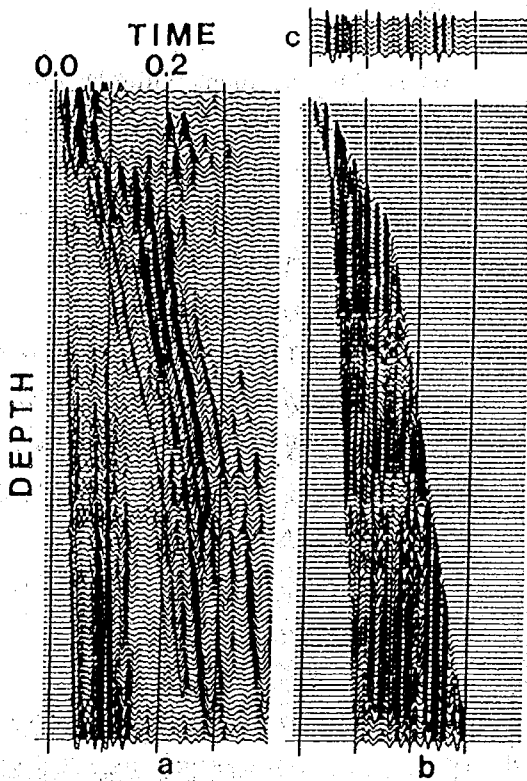


図-21 VSP解析処理の各段階の波形

試みが土木地質調査分野においても広がってきている。それらのなかから、特徴的なものをいくつか以下に紹介する。

① FMS検層

・FMS検層の概要

FMS (Formation MicroScanner) 検層は、多数のマイクロ比抵抗電極を配置したアームパッドを孔壁に押しつけ、それぞれの電極で得られるマイクロ比抵抗曲線を擬似画像化表示して、孔壁に現れた地層をより詳細に解明しようとするものである。ボタン電極の総数は100個～数100個、孔壁の走査面積も40%～80%程度カバーできるよう4本～6本のアームを有した装置が利用されている。

・適用例

図-23はFMSの結果を画像表示したものである。同図には細かく互層し、ラミナが発達した構造がはっきりと捉えられている(13)。

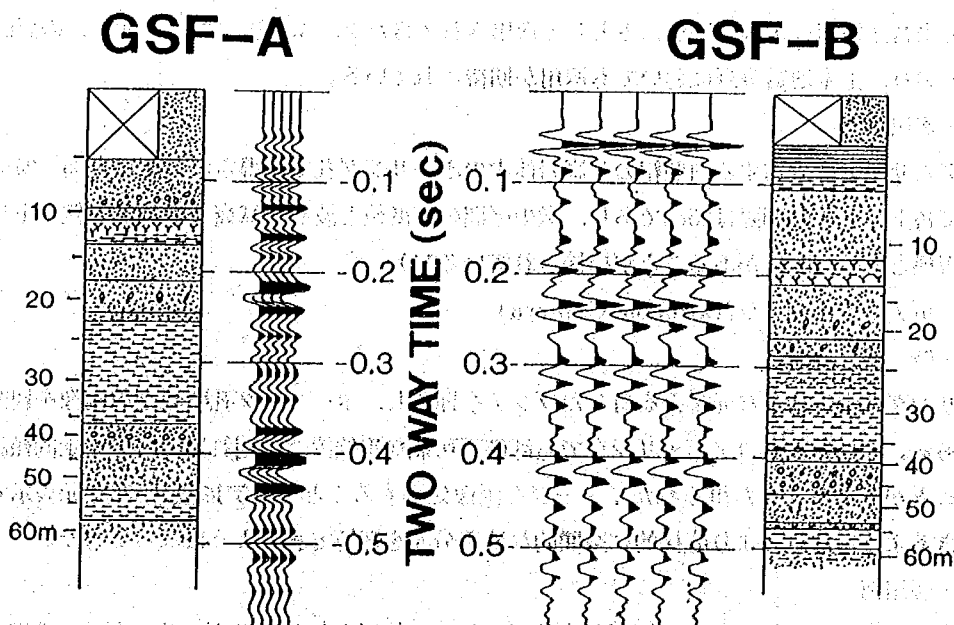


図-22 土木研究所構内におけるVSP探査例

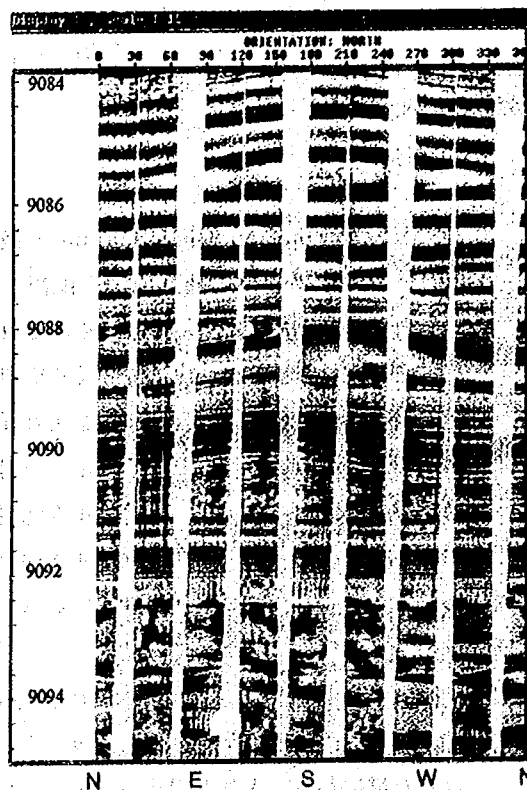


図-23 FMS 探 査 例

② MWD検層

・概 要

MWD (Measurement While Drilling) 検層は、ワイヤーラインを用いずに掘削しながら同時に孔壁周辺の地質情報や物性値を得ようとする方法であり、現在石油資源調査分野で最も注目されている検層法の一つである。土木地質分野においても掘削時にビットにかかるトルクや給圧とその変化から地質の物性を評価することが試みられてきているが、MWDでは、現位置（孔底）に掘削用ビットと直結して各種センサーを挿入し、密度や速度、比抵抗、含水率等を測定する。

③ フルウェーブソニック検層 (Full Wave Sonic Log)

・概 要

フルウェーブソニック検層は音波探査の一種であるが、多数の発振器と複数の受振器とを一連のソンドとして一体化し、初動のみでなく後続波を含めて全波形 (Full Wave) 観

測することで、岩盤中のキレツの分布や、キレツに支配される透水性等を評価しようとする方法である。従来音波検層は未固結地盤に主として適用されてきたが、本検層はキレツ性岩盤の評価を目的としており、土木地質分野においても適用が期待されている。

・適用例

あるダムサイトに分布する白亜紀の花崗岩体中のボーリング孔で取得された記録を図-24に示す。この図で各トレースの間隔は25cmであり、微少区間の速度値と波形の減衰・散乱が岩盤のキレツの密度・規模と密接な関係があることが指摘されている(14)。

④ ボアホールカメラ (Borehole Camera)

・概 要

ボーリング孔中に特殊な光学系を有したゾンドを挿入し、ボーリング孔壁の全周画像を観察する装置である。これによりコアボーリングでも評価不可能な現位置での割れ目の状態・走向傾斜を確認することができる。また得られたイメージを画像処理することでコアに似せて3次元表示することができるようになり、より直接的に空間的な地質分布を理解できるようになってきた。

・適用例

あるトンネル掘削現場において切羽前方確認のために施工された水平ボーリング孔の観察・画像処理例を図-25に示す(15)。この図には、花崗岩体中に極めて不定形な開口亀裂が存在しているこ

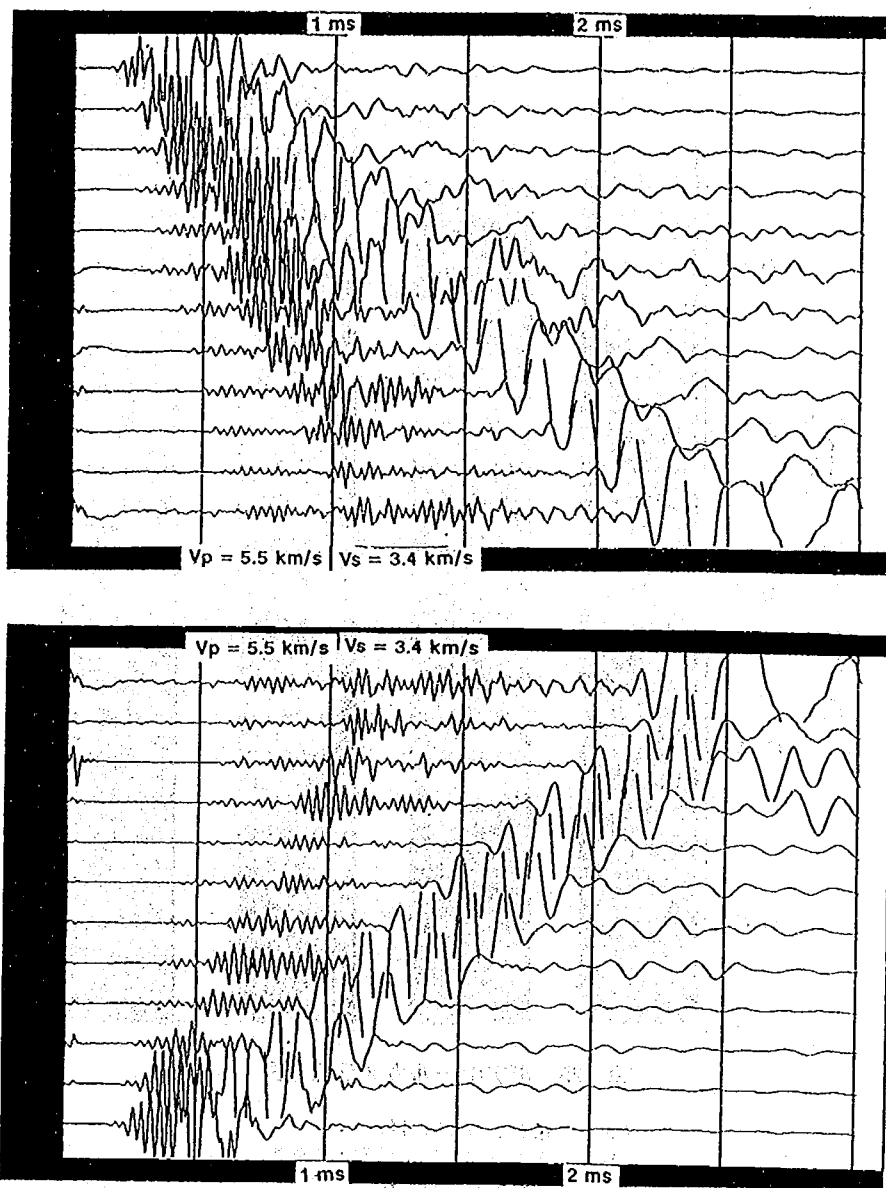


図-24 フルウェーブソニック検層探査例

とが明瞭に捉えられている。孔内湧水の計測と総合検討の結果、湧水を伴うこのような亀裂の位置をボアホールカメラによって詳細に把握できることがわかった。

⑤ 各種放射能検層

・概要

放射能検層は、天然あるいは人工的に放射線を照射して、地層の密度、含水量、構成元素などを
知るものであり、以下の方法等が利用されている。

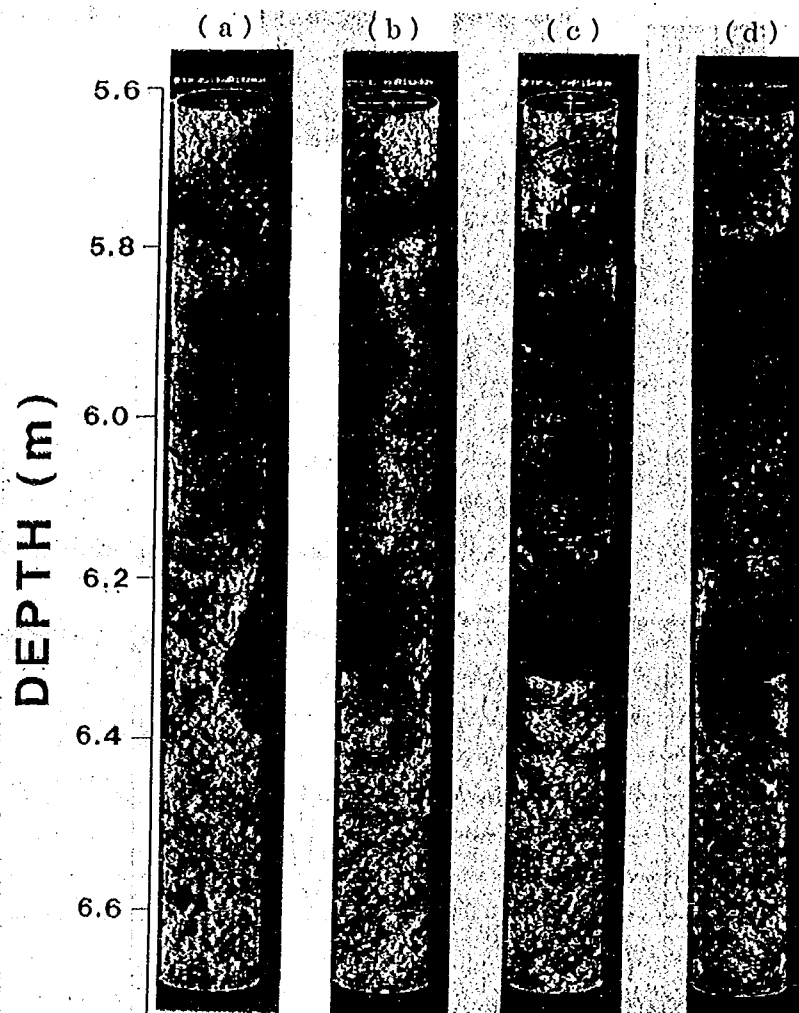


図-25 ポアホールカメラ探査例

- (a) : 鉛直上方より外視
- (b) : 水平方向避難坑外側より外視
- (c) : 鉛直下方より外視
- (d) : 水平方向避難坑反対側より外視

γ線密度検層

中性子水分検層

天然γ線検層

γ線スペクトル検層

・適用例

未固結地盤へのγ線密度検層および中性子水分検層の適用例を図-26に示す(6)。同図では検層曲線とともに土質試験値も重ねて示してあるが、両者は極めてよく一致している。またN値では区別できない深度19-44m間の粘土質シルト層で、上方ほど密度値が大きくなるとともに中性子水分

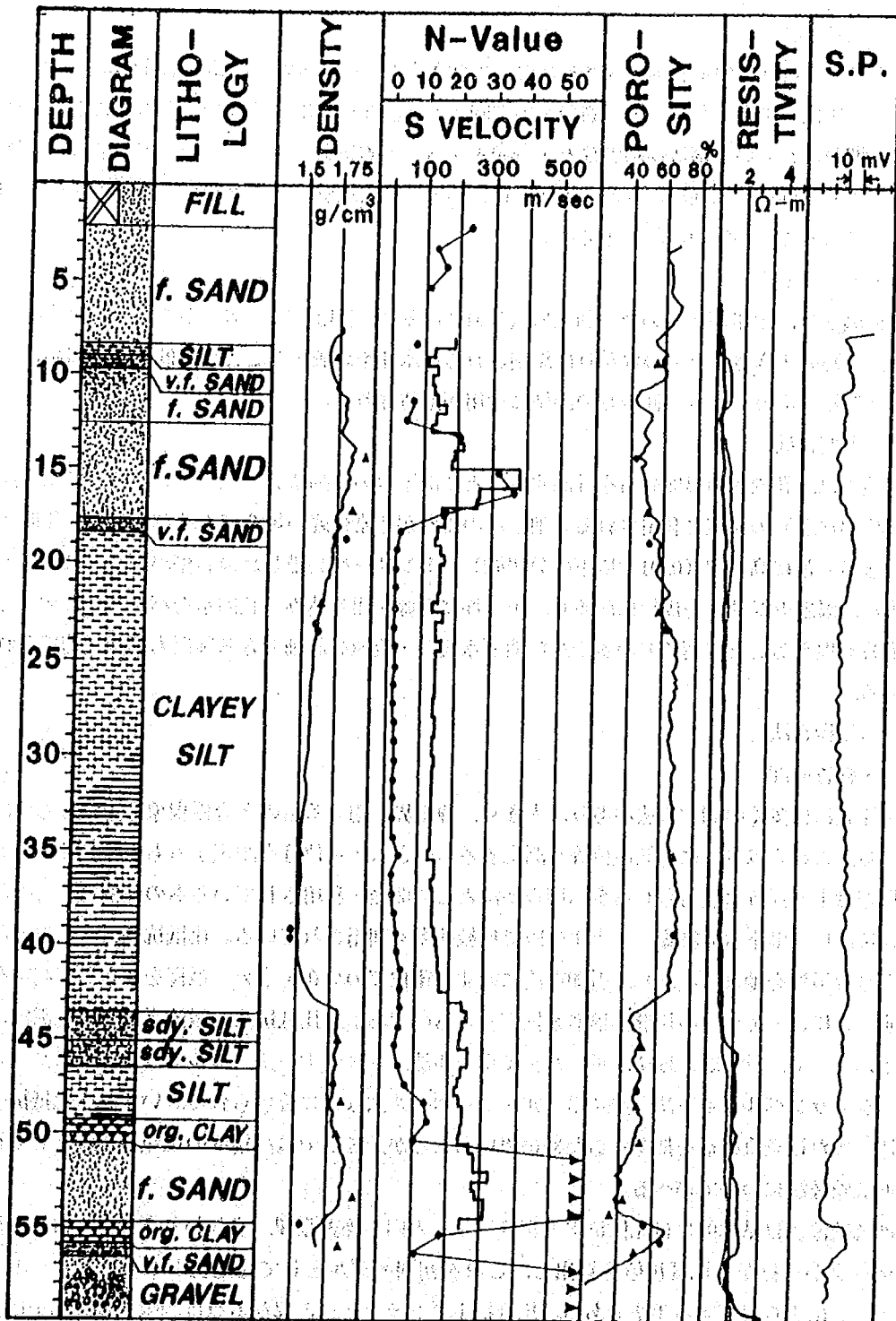


図-26 密度検層および中性子検層の探査例

検層で求めた空隙率は低下しており、砂分の構成比が徐々に上昇していることが読みとれる。

⑥ その他の検層法

・磁気検層

火成岩や堆積岩などの地層中に残された磁気の強さを連続的に測定し、磁気層序学に基づいて各地層の絶対年代を判定したり、同一層の水平方向への連続性を評価する場合に利用される。また、地盤内に埋蔵されている構造物基礎などから発生する人工的磁気ノイズを検知して、構造物の位置、根入れ深さの評価等にも利用される。近年、首都圏の“洪積地盤”が本検層によってかなり古い時代のものであることが解明されてきている。

・NMR検層

この検層法は、水素原子核の核磁気共鳴 (NMR) 現象を利用して、地層中の水の附存状態、すなわち、空隙の大きさとそのつながりに規制される透水性を評価することを目的として開発された新しい検層法であり、キレツ性岩盤の評価に適用が期待される。

・温度検層

温度検層は、孔内水の温度分布を計測することで地下水の流動状態 (流動層の位置、逸水・湧水箇所の検出など) の判定に利用される。地下水の流れが非常に遅い場合でもそれに伴う温度変化を検出できる非常に高精度 (0.01℃以下の分解能) のセンサーを装備した検層機が利用され始めている。また、温度センサーを周状に配置し、中心部に熱源を組み込み、孔内水をパルス状に加熱し、その応答を捉えることで極めてゆるやかな地下水流向・流速を評価できる装置も開発・適用されてきている。

(6) 電気探査法

・探査原理

電気探査には多くの測定方法があり、大きく、静電界を用いるものと分極現象を用いるものに分けられる。これらはさらに自然電位等を測定するものと人工電位等を測定するものに分けられる。電気探査は土木探査よりもむしろ金属探査手法として開発・利用されているものが多い。このなかで比抵抗法は、地下水の調査など土木分野で比較的多く利用されている。比抵抗法は、一対の電流電極と電位電極を地表に設置し、引加電流に対する電位差の分布を求め、電極をずらして測定を繰り返すことによって地中の比抵抗構造を推定するものである。比抵抗法は電流電極と電位電極の配置方法によって、2極法、3極法、ポールダイポール法、ウエンナー法、エルトラン法、スタッガード法、シュランベルジャー法、ダイポール・ダイポール法などに分けられる。いずれも比抵抗の水平構造、または垂直構造を把握するために用いられるが、ここでは高精度の電気探査法として有望な比抵抗映像法について述べる。

比抵抗映像法は基本的には比抵抗トモグラフィーと同じ探査原理、すなわち2極法等により得られたデータから見かけ比抵抗値を算出し、これを初期モデルとして比抵抗トモグラフィーのインバージョンにより処理する手法である。比抵抗トモグラフィーと異なる点は測線が地表面上にある点である。

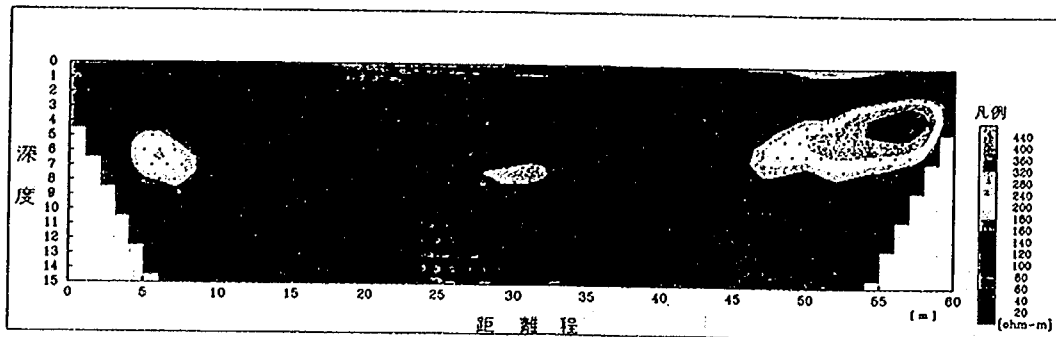


図-27 河川堤防における樋管の探査例

・データ取得法および処理・解析法

比抵抗トモグラフィーと同一である。

・適用例

河川堤防の上部天端に、上下流方向に測線を設け、堤防の土質および樋管を探査した例を図-27に示す(17)。樋管は測線30mの深度8.5~10.5mに設置されている。材質はコンクリートで、厚さは約50cmである。探査結果によると深度7~8m付近に高比抵抗体が見られている。これが樋管を示すものと思われるが、実際の位置よりやや上部にずれている。また、樋管周囲の土質は、その外部に比べ低比抵抗である。これは樋管設置時の掘削と埋め戻しによる土質の違いを表すものと考えられる。

(7) その他の探査・計測法

資源探査分野で主として開発・利用されてきた現位置調査技術のなかで、最近土木地質調査にも適用されてきている探査法をいくつか以下に紹介する。

① 電磁探査法

電磁探査は、電磁誘導現象を利用して地下の比抵抗分布を把握する探査法で、求められる物性値—比抵抗分布—は電気探査法と同じである。本法は従来、低比抵抗で特徴づけられる金属資源の分布や、熱資源の探査等比較的深部を対象として利用されてきたが、土木地質調査分野においても、基礎として問題となるような断層破碎帯を低比抵抗ゾーンとして捉えようとする試みがなされている。

② 重力探査

地下構造を構成する地質体はそれぞれ固有の密度値を持っている。この密度値の差が大きい場合、それに伴う重力の変化—重力異常—を観測することによって逆に地下構造を推定することが可能となる。この探査法が重力探査である。重力探査は従来、広域的かつ深部の地下構造の推定に利用されてきたが、近年、高精度の測定装置(重力計)が導入され、土木地質分野にも適用されるようになってきている。

特に、地下浅所に想定される空洞の検出には、密度のコントラストが大きい重力異常として捉えられやすく、多くの適用例がある。

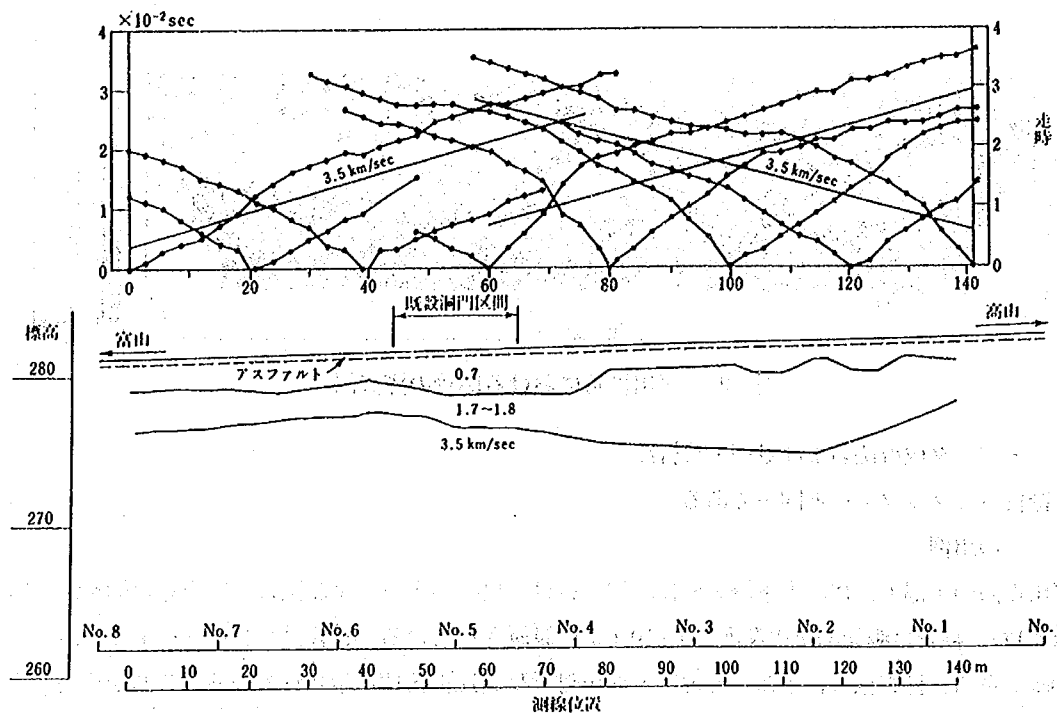


図-28 山岳道路路盤下の重力探査例

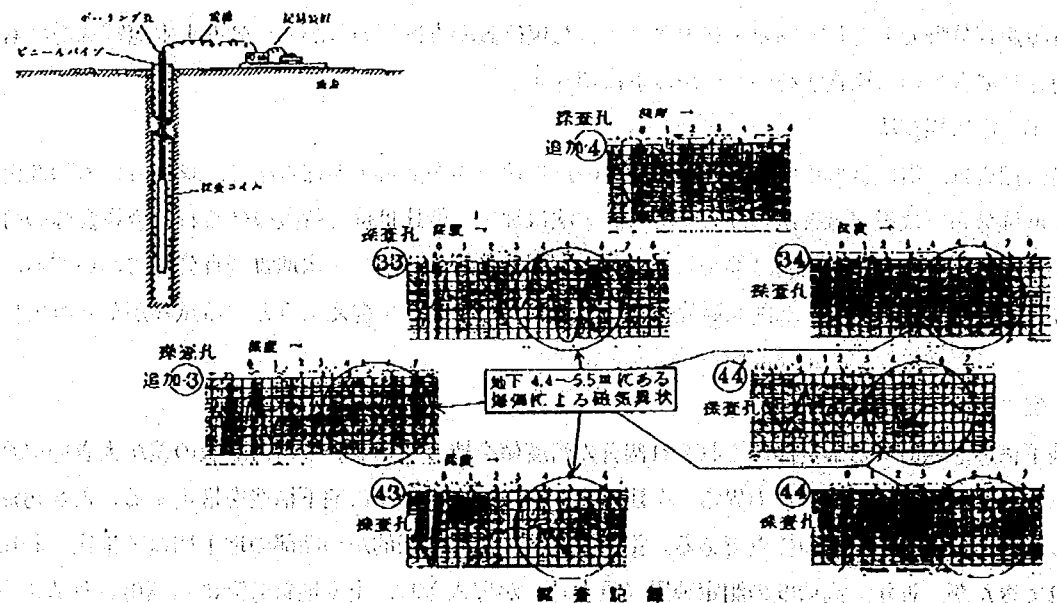


図-29 磁気探査による不発弾の探査例

図-28は、山岳道路の路盤下の岩盤線深度の調査に高精度重力探査を適用した例を示しているが、解析結果は現地調査等によって推定されたものとよく一致している(18)。

③ 磁気探査法

磁気探査とは、地下構造の異常(埋設管や不発弾など)によって引き起こされる地球磁場の変化(磁気異常)を測定し、異物の位置、深さ、規模等を評価する探査法である。一般に埋設管類は残留磁気と誘導磁気をあわせもっているが磁気探査によって人工的に誘導磁界を生起させた場合、不発弾等がそれに感応する危険性があるので、一般には2つの誘導コイルを接続した両コイル型磁気傾度計を用いて残留磁気を計測する。

ボーリング孔内での磁気探査によって地下4.4~5.5m付近に不発弾によると考えられる磁気異常を検出した例を図-29に示す(19)。

④ GPS

GPS(Global Positioning System)とは、人工衛星を用いた高精度測位システムである。測位の精度は通常の観測では数10m程度であるが、多数のGPS受信局を配置して同時観測を行なうと、測位精度を飛躍的に向上させることができ、1cm以下の精度が期待できる。したがって測位精度以上の地表変動が想定される地域、たとえば地すべり地や人工斜面等にGPSをセットすることで、その動きをモニターし、危険時の対処が可能となる。GPSを用いたこのようなモニタリングは現状ではまだ実施されていないが、土木地質・測量分野における適用性について多くの提案が出されている。

⑤ リモートセンシング

・探査原理

リモートセンシングとは遠隔から探査する技術の総称であり、地表面・海水面などから反射・放射される電磁波を測定する技術である。一般に電磁波の周波数としてはマイクロ波~可視領域が用いられるが、通常、赤外線~可視領域に関しては自然状態の放射を捉える受動センサ(光学センサ)が一般的であるのに対し、マイクロ波領域については人工的に発射されたそれを捉える能動センサが一般的である。光学センサは人間が肉眼で木々の緑を判別するのと同様に、太陽光の反射スペクトルから地表の物質を判別するものである。一方マイクロ波センサは、マイクロ波が雲を通過するので、常に鮮明な地形(地質)情報を得ることができるのが特徴である。また、近年は土木分野においても、構造物の健全度や含水状態などを調査するために、地表、または航空機から熱赤外線等で探査する方法が用いられつつある。また、画像解析処理技術の向上に伴い、近年、岩盤中の割れ目の分布などを立体写真画像等から定量的に解析する手法なども開発されているが、衛星写真からリニアメントを抽出する手法と同様にこれも一種のリモートセンシングといえる。

・データ取得法および処理・解析法

岩石や土を構成する鉱物がその種類によって異なる反射特性を持つことを利用して、地表の土質の反射スペクトルから基盤岩の地質を推定する。一般にセンサにおいては反射スペクトルはいくつかの周波数帯(バンド)に区分され、各バンドの反射量比によって地表の土質や岩質が判別される。植生の種類や活性度などを区分する場合も、同様の手法が用いられている。

一方、マイクロ波センサは、遠距離から高分解能の探査を行うために、周波数可変の連続波を放射し受信波形にフィルターをかけることにより高い電力の短いパルスと等価なデータが得られるパルス圧縮という手法を用いている。また、データ取得方法についても、探査機器の移動に伴う異なる受信波データを、その位相情報をもとに合成する合成開口という手法を用いて、分解能を向上させている。

・適用例

図-30は土木研究所構内に作られたモデル吹き付けのり面において、熱赤外線カメラにより吹き付け表面の推定温度分布を測定したものである²⁰⁾。モデルのり面には吹き付け直下に円形の空洞が設定してあり、この空洞が温度異常部として判別されている。ただしこの探査方法は、一つのバンドのみを用いている点で最も単純な処理方法であり、含水状態の影響など各種の誤差要因を判別することが困難である。このため現在は複数の時間帯で探査して温度差などを比較することにより誤差を消去しているが、今後は複バンド化など、衛星からのリモートセンシング手法と同様の処理が望まれる。



図-30 熱赤外線カメラによる吹き付けのり面の探査例

これを数値化して判定する。もう一つはウェーブレット解析を基本としたものであり、波形スペクトルの時間変化を解析する。商業的には前者のものが主に用いられている。いずれも、特定振動の発生ににくい一定重量のハンマーにより測定対象物を打撃して、マイクロフォンで録音、または直接解析する。

・適用例

図-31はモデル吹き付けのり面において前者の方法（ダイヤサウンドアナライザ）およびシュミットハンマーで空洞を調査した例である²⁰⁾。探査結果は、吹き付け直下の空洞の存在を的確に捉えている。ただし本手法は吹き付け厚さ・吹き付け表面の凹凸・含水状態等の影響を受け、最大数十%程度値が上下することに注意する必要がある。

2.2 今後の展望

(1) ジオトモグラフィー

⑥ 打診音調査法

・探査原理

岩盤や構造物をハンマーで打撃し、その音響を解析して物性や異常部を測定する方法である。

・データ取得法および処理・解析法

土木分野においては、主に2種類の解析方法が用いられている。一つは音響スペクトルを1/3オクターブ毎に区分して解析する方法（1/3オクターブ解析）を基本としたものである。物質中に亀裂や空洞が存在すると、撓み振動など特定帯域の周波数が卓越するため、

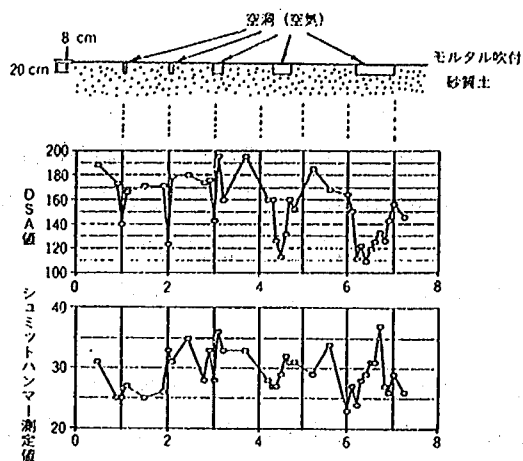


図-31 打診音調査法による吹き付けのり面の探査例

ジオトモグラフィーの中でも弾性波トモグラフィーは現在、最も解析技術が進んでいる。また弾性波の速度や減衰は土木分野で必要とされる力学的な強度や変形性に関連が深い物性値であるため、岩盤等級などとも相関が高く、ボーリングをコンスタントに実施するダム等の分野では標準的な調査法として今後利用が進むと考えられる。電磁波トモグラフィーは、分解能が高いが探査深度が短いこと、電磁波の速度や減衰率といった物性値が土木工学的な物性値とどのような関係にあるかが明らかでないことなどから、現在のところ利用例は少ないが、物性データの整理が進み、探査結果の地質解釈が合理的に出来るよ

うになれば、反射法による微細な亀裂の探査と併せて用いられていくと考えられる。比抵抗トモグラフィーは、電磁波トモグラフィーとともに、地質構造の調査のみならず、地下水の調査手法としても利用が増加すると考えられる。ウェルテストトモグラフィーは岩盤の透水性を直接的に探査する手法として今後急速に発展する可能性がある。特に2孔間のみならず三次元的な透水挙動を考慮した探査・解析方法の発展が期待される。

いずれのトモグラフィー手法にしても、得られる値は物性値分布（例えば弾性波速度分布）に過ぎず、それを土木分野で利用していくためには、探査結果の地質解釈を行って地質構造に再構成し、必要とする土木的な情報（例えば弾性定数分布や岩盤等級分布など）に変換する必要がある。すなわちジオトモグラフィーを有効に利用していくためには、探査・解析技術のみならず、客観的な地質解釈技術や情報交換技術を体系化する必要がある。このためには物理検層などを組み合わせた総合的な探査体系を検討する必要がある。

(2) 電磁波反射法

電磁波反射法は現在発展途上にあり、最も技術向上の著しい探査法の一つである。連続波などを用いてS/N比や分解能を向上させることにより、極浅部地質調査法として利用が期待される。しかし極浅部は掘削も容易であるため、利用は、掘削が不可能な場合が短時間に広域を調査する必要のある場合に限定される。日本国内では電波法の制約があり大出力化やヘリ搭載が現在のところ困難であるが、何らかの限定的条件下でこれが可能となれば、弾性波探査技術やリモートセンシング技術の利用によって画期的な探査が可能になるかも知れない。地質調査のみならず、例えばラジコンヘリを用いて、埋設された危険物（地雷など）の発見などにも活用できる可能性がある。

(3) 反射法探査

浅層反射法に関しては、効率的な振源の開発など、今後取り組むべき課題もあるが、基本的には計測環境（装置・処理システム）の高精度化・ダウンサイジングが進んでおり、二次元のみならず

三次元的な地質把握手法として、都市域の調査法などに適用が期待される。特に、探査・解析方法の標準化²¹⁾等による探査結果の均質化・良質化が望まれる。

(4) VSPおよび孔内計測・検層法

トンネル坑内のVSPは従来は特殊な計測であったが、切羽前方の探査手法として有効であり、トンネルでの標準調査法となるだろう。FMSでは高透水性の薄層や地層の走向・傾斜が把握できるため、廃棄物処分など微細な地質情報を必要とする分野で利用が拡大すると思われる。ボアホールカメラは、礫層の間隙性状や亀裂の開口度などコア観察では分からない情報を直接観察でき、経時的に観察することにより、トンネルなどのゆるみの進行なども把握することが可能である。このため、必要に応じて利用されていくと考えられる。

検層はボーリング孔周辺の物理探査であり、ボーリングコアのデータと対比できるだけでなく、コアデータと地表やボーリング孔からの面的な物理探査データの仲介を可能とするものである。したがって、面的な物理探査と併せて検層を実施して地質解釈を行うシステムを確立していく必要がある。

(5) 電気探査法

比抵抗映像法は従来の電気探査、特に比抵抗法が得意としてきた地下水探査や断層等の探査だけでなく、その分解能の高さを利用して河川の堤体の探査など人工構造物の診断などにも威力を発揮してくるものと思われる。特に経時的な探査を実施することで、地下水の動きや地山の長期変化を捉えるようなモニタリング目的に利用が広がると推定される。このような目的に利用していくために、解析速度の向上や、探査結果の出力等に関する周辺ソフトの充実も望まれる。

(6) その他の手法

GPSやリモートセンシングなどの手法は現在、土木分野でも盛んに用いられつつあり、新たな利用方法についての研究も盛んである。GPSは地滑りなどの監視に今後用いられてくるであろう。リモートセンシングは現在、人工衛星の技術が最も進んでいるが、その探査分解能は土木分野で求められる精度を満足しているとはいえない。例えば斜面崩壊の危険箇所を予測する場合、少なくとも5～10m程度のグリッドを設定する必要があるが、人工衛星画像の分解能はこれより大きく、ましてグリッド中の斜面特性を判読することは不可能である。したがって今後は航空機やヘリコプターを利用して、かつ人工衛星の探査技術を導入した手法が増加すると思われる。この場合、地形や植生の影響を排除して地下構造を推定する方法など、細部技術に関して土木分野独自の開発が求められる。ただし土木開発の自然環境への長期的な影響などを観測するような場合、人工衛星のデータは有効であろう。電磁探査や磁気探査は土木分野で必要とする探査精度を得ることが難しいことから、今後探査精度の向上が望まれる。重力探査は地下空洞の探査などに用いられているが、やはりこれも精度上の問題があり、他の手法と併せて利用していくことが有効である。

従来、土木分野では、弾性波探査などが主体であったが、データ処理技術等の向上にともない、適用範囲は資源探査分野から土木探査分野へと大きく拡大してきている。しかしその結果土木分野においては、さまざまな探査手法が未整理のまま利用されており、探査目的と探査精度のずれや、

探査結果の不適切な解釈など、探査結果が充分活用されているとはいえない事例が多く見受けられる。これは新技術を導入する過渡期に起こり得る不可避な現象であるとはいえ、やはり、探査技術と土木技術のギャップを埋める探査結果の解釈技術の確立が望まれる。これは一種の境界分野であり、広い分野の共同的な作業を必要とする。同時に、これを利用するわれわれ土木技術者も、これらの新技術を不当に拒絶せず、また、手放しで歓迎するだけでなく、その適用性をじっくりと見極めながら、かつ積極的にその利用技術の熟成に寄与していくことが必要である。

3. 地質調査の問題点

現場で実際に施工に携わっている土木技術者からは、時間と経費を割いているにもかかわらず、地質調査は何故当たらないかという疑問がよく寄せられる。地質調査にかかる費用の掛け方についてはにはわかには首肯し難いが、ここでは触れないことにして、当たらない、あるいは予測が難しいことについて考えてみる。

まず第一に、地質の調査とその他の調査とが本質的に異なることは、あらゆる調査の基本となっている数量化とサンプリングの考え方が実効的でないということにある。言い換えれば、物理的・工学的性質の指標である各種の数量と、その分布を明らかにする必要のある地盤の調査では、品質管理の場合のような一つの値の変動に着目したものでもないし、生態調査の場合のような個体群の構成内容を表示したものでもない。加えて、特に岩盤の場合では、例えば剪断強度を支配しているのは岩盤を構成する岩石自体の強度と不連続面によるその低減で、後者はドーナツの穴のようなもので直接はおろか間接にもそれだけを抽出して工学的指標を求めることができないので、そのような因子を内包する岩盤という評価をした上で扱うことが必要になってくる。

また、外部から観察することによって大まかな全体像を把握することができる、そのほかの調査の対象とは違って、極く限られた露頭から、甚だしい場合には都市の地盤のように全く見ることでない対象を推論から明らかにしなければならない。

これは非常に重要な点で、機械的かつ力任せに物量作戦的にデータを集めるだけでは核心に迫ることはできないことを意味している。

地質調査におけるサンプリングでは、無作意抽出によって母集団を推計するためのものではなく、極く限られた、しかも特殊な、偏っていることの多い点しか得られないものである。

第二には、上記の点から生じることであるが、調査開始時点から工事の終了あるいは管理時点まで、地盤自体や地盤が原因となって生じる現象に対して解釈が介在するという点である。調査に着手するときから、地盤を構成する地質の状態を頭に浮かべて作業仮説を組み立て、この仮説と現実の調査結果との一致と乖離をもとに新しい解釈を加えて先の作業仮説を修正して、次の調査に進むというステップ・バイ・ステップ方式によらざるを得ないという点である。

これに前述のサンプリングの問題が重なって、地質調査では試行錯誤や誤謬法に近い推論の積み重なりとして地質図が描かれている。従って、新しい調査データが加わった時点で全く別の地質図（実は図を作っている担当者の頭脳の中では全く新しいのではなく、解釈の向きが少し変わったとしか感じられていない）が出現するのは、実はここに原因が存在している。

4. 何故岩盤区分から抜け出せないのか？

これまでに述べたように、地質調査では数量によるサンプリングと処理は、原子力発電所の基礎や地下備蓄基地の調査といった特殊な場合を除けば極めて困難で、岩盤の様子を定量的に取り扱うことによって大局的な評価をするという方式が一般的である。これは前述のように、岩盤は土とは違って不連続体である上に実効的なモデル化が不可能なことが理由である。

岩石の中のことを対象にするミクロな研究や、大陸や海洋といった非常に規模の大きい地球物理というマクロな研究では、モデル計算が既に実用化されつつあり、われわれの調査対象となる大きさの岩盤に対して、ブロック理論や多変量解析などが導入される機運にあるが、理論計算に用いられる計算式に入力する数値が、現場で直接にせよ間接にせよ得られないことが大きな障害となっている。

地盤(特に岩盤)と構造物との関係は、かつてのように構造物を地盤に合わせていたのとは異なっており、社会的要請から非常識とも思えるほどの関係が現れてきている。従来の考え方では限りなく黒に近いグレースーシを如何にして従来からの設計体系に適用できるように評価するかという課題が、一方では調査法の近代化を招来したが、設計理論もまた呼応して変化して行くことになる。

小論の中核となる調査手法の記述は、当研究所地質研究室の稲崎主任研究員と佐々木研究員の手になるものを前面的に引用している。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献

- 1) T. Inazaki, S. Jinbo, Y. Takahashi, F. Watanabe (1988) : Application of seismic tomography to the evaluation of rock mass properties, 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Balkema, pp. 347-356.
- 2) 佐々木靖人, 藤井厚企, 中村康夫 (1992) : 電磁波トモグラフィーによる地質解釈—現地探査結果とコアデータの対比—, 日本応用地質学会平成4年度研究発表会講演論文集。
- 3) 建設省 (1992) : (未公表調査資料)
- 4) Tatsutoshi Kondo, Yukio Ohi, Yasunori Otsuka, Kazumasa Itoh (1991) : Pulsation Test System: A new method and instruments for hydrogeological investigation of rock masses, Proceedings of the 3rd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Balkema, pp. 175-183.
- 5) Geophysics
- 6) 浦塚清峰, 西尾文彦, 大前宏和, 前晋爾 (1989) : 179MHz航空機搭載電波氷厚計による南極氷床の計測, 郵政省通信総合研究所季報, 35(176), pp. 297-306.
- 7) Yasuhito Sasaki, Yasuo Nakamura (1992) : Subsurface Radar Prospecting for Surface Soil in Natural Slope, 29th International Geological Congress Abstracts, vol. 3 of 3, p. 945.
- 8) 稲崎富士 (1983) : S波を利用した浅層反射法探査の実験的考察, 土木技術資料, vol. 25, No. 2, pp. 61-66.

- 9) 中村康夫, 稲崎富士 (1992) : 大都市地域における地震防災技術の開発に関する調査報告書, 土木研究所資料, 第3109号, pp.14-28
- 10) Inazaki, T. (1990) : High-resolution shallow seismic reflection surveys using SH-waves, Proc. 6th. IAEG Congress, pp. 953-958
- 11) 稲崎富士, 長沢政和, 阿部昌彦 (1989) : VSPを利用した浅部地盤の評価, 日本応用地質学会 平成元年度研究発表会講演論文集, pp. 93-96
- 12) 稲崎富士, 長沢政和, 阿部昌彦 (1990) : 沖洪積層を対象とした物理探査 (その2), 土木研究所資料, 第2863号, 52 p
- 13) Schlumberger (1990) : Formation MicroScanner Service,
- 14) 渡辺史郎 (1989) : デジタルボアホールサイスミックシステムの開発, 物理探査学会 第81回学術講演会講演論文集, pp. 157-159
- 15) 稲崎富士, 海野芳聖, 長沢政和, 中村康夫 (1992) : 雁坂トンネルにおける岩盤計測, 土木研究所資料, 第3082号, 115 p
- 16) 稲崎富士 (1992) : 地盤調査技術の開発, 建設省総合技術開発プロジェクト「地下空間の開発」報告書, 第4編, pp. -
- 17) 中村康夫, 平野勇, 佐々木靖人, 阿部昌彦 (1989) : 非破壊手法による堤体内部調査, 土木研究所資料 部内資料27号。
- 18) 稲崎富士, 神保悟 (1988) : 山岳道路における基礎岩盤の物理探査, 土木技術資料, vol.30, No.10, pp. 558-563
- 19) 駒澤正夫 (1991) : 重力・磁気探査, 物理探査学会 第7回物理探査基礎講座講習会テキスト, pp.360-371
- 20) 三木博, 小橋秀俊, 佐々木靖人 (1992) : のり面保護工の維持点検手法に関する調査, 建設技報, pp. 52-56.
- 21) 稲崎富士 (1992) : 浅層反射法マニュアル (案) の作成 - 都市域における地盤探査手法の標準化に向けて -, 第25回地質担当者会議資料, 第3064号, pp. 65-84.

最近の防食技術
—土木構造物の耐久性向上をめざして—

化学研究室長 片 脇 清

最近の防食技術 —土木構造物の耐久性向上をめざして—

1. はじめに

土木構造物は、様々な自然環境のなかで50年ないし100年といった長年月間を良好な機能を果たすべく設置される。

大型機械や建築物などくらべても、大型土木構造物ほどの長寿命を要求されるものは類をみないようである。特に道路構造物、河川構造物、海岸構造物、下水道構造物等では供用期間の長寿命化が要望されており、重要な構造物では100年の使用が期待される場合も少なくない。

風雨にさらされる土木構造物にとっては、構成材そのものである材料の寿命が本質的に重要であり、土木材料の耐食性、防食性能の大幅な向上が不可欠であるといっていよいであろう。

このため、構造物に用いる材料に関する、より厳しい吟味がなされる必要がある。もちろん、構造物の寿命を延ばすためには、材料の寿命を延ばす以外にも、傷んだ材料を交換・補修していく方法もある。しかし、規模の大きな構造物になるほど、点検・補修に要する費用は大きくなるので、やはり材料の耐久性を高め、維持管理の手間を省く方が合理的となる。

このため、メンテナンスフリーのために設計時点より積極的に防食を行い、設置した構造物の寿命をできるだけ延ばそうという考え方が広まっている。

防錆防食技術は、近年著しい進歩を遂げた技術分野のひとつであるが、ここでは最近の防食技術についてそのいくつかを紹介したい。

2. 防食の対象となる土木構造物

近年、ウォーターフロントに新しい空間を創成して大規模な土木構造物を構築することが計画されている。たとえば、東京湾横断道路、関西新空港等のビッグプロジェクトでは、海中に大がかりな構造物が建設されている。

このような土木構造物においては、鋼材の腐食や塗膜の劣化がはなはだしいため、構造物に効果的に防錆防食を施すことが前提となっている。

湾岸道路や海岸に沿った橋梁なども腐食損傷が著しい例である。また、海底トンネルや埋立地を貫通する地下トンネルなどでも、コンクリートを含めて腐食対策がとられるようになった。海域制御構造物も同様に、海水波浪を直接受ける厳しい腐食環境にある。

以上は塩分腐食による例であり、日本のようにまわりを海に取り囲まれた地勢では避けることのできない劣化要因である。

ところが、陸水や河川水も設置条件によっては構造物を腐食させることが次第に明らかになった。

このように、規模の大小を問わず防食の対象となる土木構造物は幅広い（表－１）。

表－１ 防食の対象となる土木構造物例

構造物分類	対象構造物	腐食環境条件
橋梁	海上橋 湾岸道路	海水 潮風
トンネル	海底トンネル 大深度地下トンネル	海水 地中
河川	河口堰 ポンプ場	海水 河川水
ダム	放流管	高速流水
海岸	海域制御構造物	海水 潮風
下水道管施設	下水道施設 下水管システム	強酸性ガス 硫化水素
砂防	砂防施設	火山性ガス

ところで、腐食が構造物の強度低下や機能低下に与える影響が深刻となった理由のひとつに、最近局所的な腐食の形態が明らかにされたことがある。

実態調査から、飛沫帯や海水中のように塩分が影響する環境下で、鋼材の腐食が主として局部腐食（ローカルコロージョン）であることが確かめられたことである。また、放流管やトンネルでも局部腐食のひとつである隙間腐食が目立つようになった。

局部腐食とは、鋼材の一部が局所的な腐食減をすることである。このため、腐食している部分としていない部分とでは、腐食厚さの大きな違いが生じ、局部腐食の生じた場所では穴が生じるが、そのまわりでは板厚がほとんど減少していない。

局部腐食を生じる原因は、鋼材そのものによる場合と環境に起因する場合とがあるが、いずれにしろ、形状が複雑な部材、突起部、接合部といった場所に局所的な腐食減が生じやすく、また、隙間部や生物が強固に付着している場合にも生じる。

局部腐食が支配的である場合には、均一腐食（ゼネラルコロージョン）が生じることを前提とする腐食しろによる防錆方法は、構造的な面また経済的な面から不合理となる場合が多い。このため、局部腐食の対策としては積極的な防食によるのが合理的であり、腐食しろによる方法は、部材の形状が平滑でかつ比較的使用期間の短い場合に用いるのが妥当とされるようになった。

3. 環境の特長と腐食対策

大規模な鋼構造物においては、部材が置かれている環境が様々である。たとえば下部構造部のように、大気中、海水中、海底土中と複数の異なる環境（図－１）に接している場合には、それぞれ単一な環境に接している場合と異なった腐食挙動（マクロ腐食）を示すことが知られている。特に、

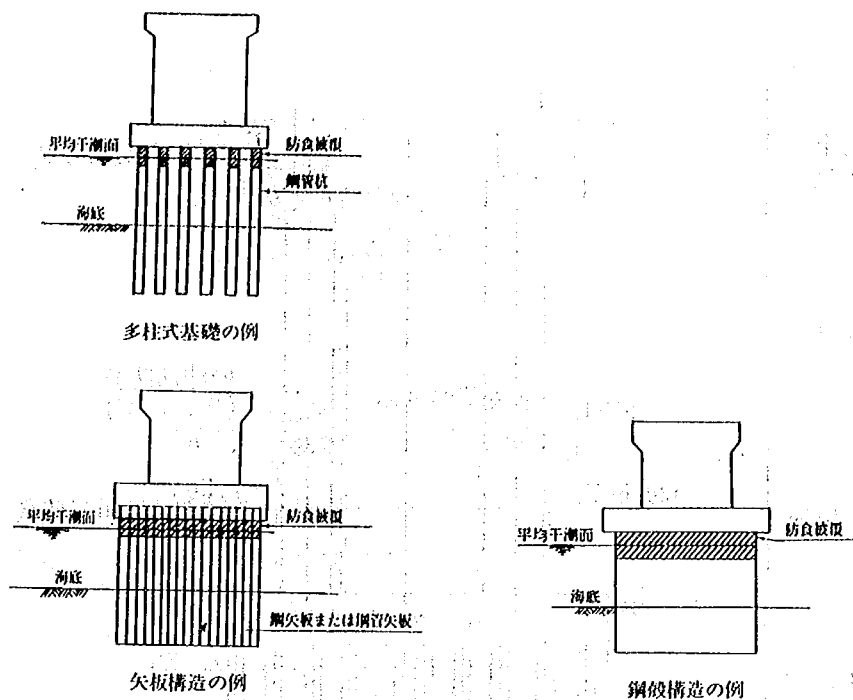


図-1 下部構造とその接する環境

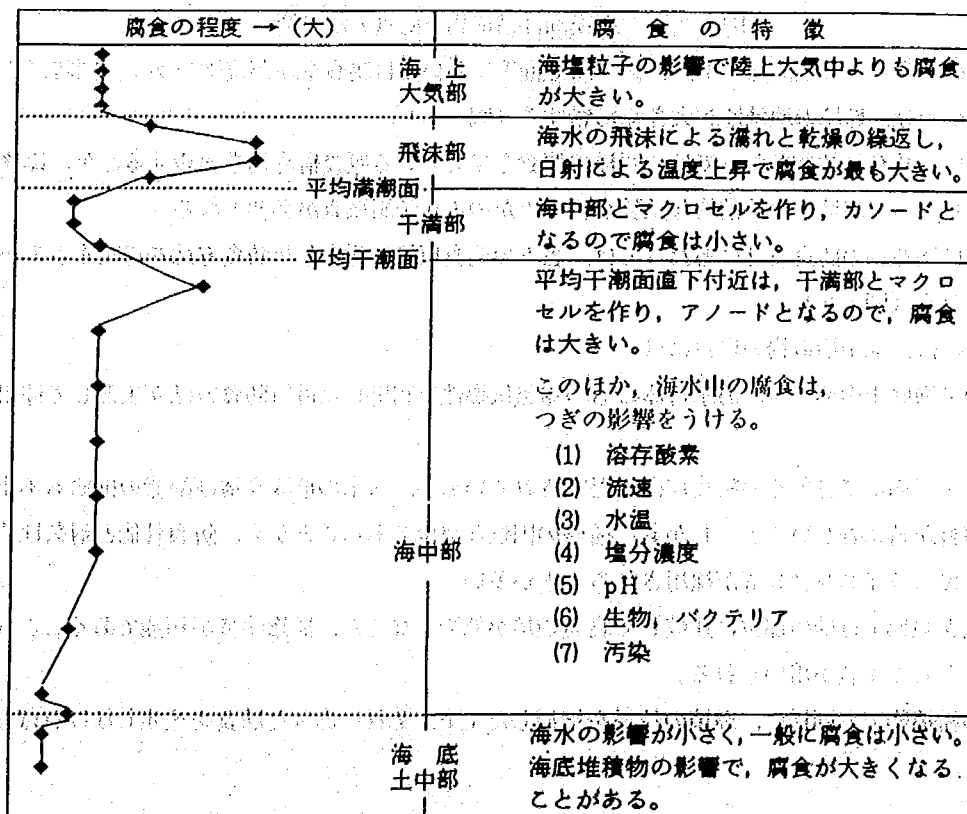


図-2 腐食環境の区分と特徴

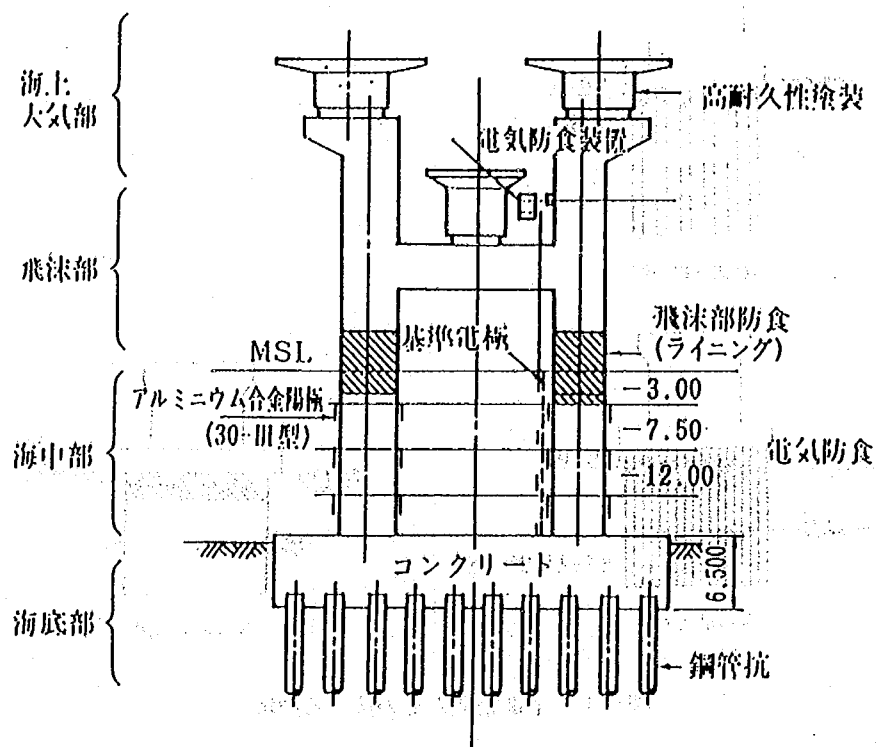


図-3 大規模海洋構造物と防食方法(例)

環境が最も変化する飛沫部、干満帯部、海底面等においては腐食挙動が複雑である。同時にこのような場所では、環境の地域性が大きく影響する(図-2)。

そこで、防食設計にあたっては、同様の腐食を呈している既設構造物を調査するとか、比較的長期間にわたって現地での予備的な試験を行うとかの劣化予測調査が必要となる。

大規模構造物の防食設計にあたっては、各々の腐食環境に適合した防食方法を選定するのが合理的であろう(図-3)。

たとえば、海中構造物の場合には、

海中・海底土中部では、海水自体のもつ電気伝導性を利用した電気防食方法が主として採用されている。

飛沫・干満部では多くの防食技術が提案されているが、海水の飛沫を浴び酸素の供給も不十分なため腐食が特に著しいこと、しかも、補修の困難な部位であることから、防食性能と耐久性能の優れた被覆(ライニング)等が採用されることが多い。

海上大気部では他の部位に比較して腐食環境が穏やかなこと、補修塗装が可能であることなどから、主として塗装が用いられる。

他の構造物でも同様に、環境の特長を把握した上で、それにあつた防食を選定しなければならない。

4. 防食法の選定

新設構造物の場合には、特殊な場合を除いてほとんどの防食法が可能であるため、要求性能にあわせて高品質の防食法が選定できる。

既設構造物の再補修の場合には、効果に優れていても現場の条件によっては適用できない工法があるだけでなく、補修や再施工は現地ではその効果を低下させる場合が多い。

このため、できるだけ新設時に防食対策を検討し、長期的な観点にたって維持管理を含めた防食方法の選択を行うことが重要である。

防食材料は構造材料に比べて高価であり、構造用途に大量にまた直接にそのまま用いることは現時点では経済的に難しい。このため防食材料として機能性を考慮した形で用いられる。

このような防食設計の考え方や、工法や材料の選択については、既に指針類が作成されている（参考文献4, 5, 7, 8）。

これらは、最近の技術成果をもとにして作成されたものであるが、構造物の種類や設置環境によって、その適用範囲が限定されてはいるが、具体的な手法などを提示した内容を持っているので参照されたい。

5. ダムや堰構造物の腐食対策

ダムや堰などの河川構造物も厳しい腐食環境にある。これらは、これまで淡水中にあるからとして、海洋環境に較べるとマイルドな環境にあるとされてきた。しかし、これらの損傷実態を調査した結果によれば、腐食を決してなおざりにできるものではないことがわかった（たとえば、高圧、高流速の水を流すダム放流管、絶えず越流水で濡れている可倒堰や、乾く間がない水門）。

5.1 ステンレスやステンレスクラッド

ダムや堰構造物の腐食対策として、水に強いステンレスを用いることが最近多い。

ステンレスやステンレスクラッドの適用が可能な部位を表-2に示す。

最近の研究成果に基づき、ステンレス材料の選択、ディテール設計、施工上の注意等についてもマニュアルの形で提案されている。

ステンレス材料を使用する際の留意事項は以下に示す通りである。

- 最小板厚
- ステンレスクラッド鋼合せ材
- ステンレス鋼とステンレスクラッド鋼の使い分け
- 両面ステンレスクラッド鋼
- 異種金属接触腐食の対策
- 隙間腐食の対策
- ステンレスクラッド鋼の端面処理

表-2 ダム・堰への材料と適用

系 形状 鋼種			オーステナイト系					マルテンサイト系		オーステナイト・フェライト系		析出硬化型			
			板・棒・管					鋳鋼	板・棒		板・棒				
			用途部位			SUS304	304L	304N2	316	316L	SCS313		403	410	329J1
水門扉	扉体	スキンプレート	◎K	○K		○K	○K					○K	○K		
		主桁	○		◎	○									
		端縦桁	○		◎	○									
		補助桁	○		◎	○									
	脚柱（トラス含む）	△		△	△			◎							
水門扉	戸当り及び限定間	ローラ	◎						○						
		ローラ軸, ロッカビーム軸	◎K	○K		○K	○K					○K	○K		
		バルブ本体	◎K	○K		○K	○K					○K	○K		
		戸当り材	◎K	○K	◎	○K	○K			○	○	○K	○K	△	
	ローラレール	○		◎	○				◎		◎	◎			
水門扉	戸当り及び限定間	ローラ踏面材	○		◎					◎		◎			
		トラニオンピン	○		◎				○			◎			
		アシンカガード	K	K		K	K								
		ボンネット, ケーシング	◎K	◎K		○K	○K					○K	○K		
	摺動板（支圧板）	◎K	○K	◎	○K	○K					○K	○K			
水門扉	戸当り及び限定間	水密板	◎K	○K		○K	○K					○K	○K		
		ボルト, ナット	◎			△			○					△	
		開閉装置	シーブ	◎					◎						
			軸類（シーブ）	◎			△			○					
	ワイヤロープ		◎						○						
放流管	管胴本体	スピンドル	◎												
		ロッド	◎												
		油圧配管	◎												
		管胴本体	◎K	○K	△	○K	○K					○K	○K		
	整流板, 整流管, 内張管	◎K	○K	△	○K	○K					○K	○K			
放流管	フランジ		◎	○		○		○				○			
		空気管	主・副空気管	◎K	○K										
			スクリーン	◎	○										
			空気箱	◎	○										
	充水装置	充水管	◎	○											
バルブ		◎	○					◎							
放流管	スクリーン		◎	○											
		取水塔	◎K	○K	○	○K	○K								
		スクリーン	◎	○											
		開閉装置架台	◎	○											
	開閉装置室	◎	○												
放流管	操作橋		◎	○											
		繫船設備	◎	○											
		手摺, 階段, 防護柵	◎	○											
		給油装置	◎	○											
	電気制御設備	◎	○												

注) ◎: 適用可能な基本的材料
 ○: 適用可能。環境条件に応じて最適なものを選定する
 △: ダム堰施設基準にはないが適用可能
 K: クラッド鋼として適用可能

表-3 ダム等に使用されるステンレス鋼とその特性

系 統	種 類	特 性
オーステナイト系	SUS 304	オーステナイト系ステンレスの代表的鋼種である。通常の淡水中での耐食性に優れ、加工性、溶接性も良い。
	SUS 304L	溶接熱影響部の鋭敏化防止の効果がある。
	SUS 304N2	SUS 304の耐力を大幅に増加した鋼種 (21kg/mm ² →35kg/mm ²) で硬度、加工性、溶接性も良い。水門戸当りにも使用されている。
	SUS 316	SUS 304に比較して、Moを添加し、高耐食性をもたせた。水質が酸性のダムゲート等に適用可能である。
	SUS 316L	溶接熱影響部の鋭敏化防止の効果がある。海水に接するゲート等に適用可能である。
マルテンサイト系	SUS 403	耐食性はやや劣るが、焼き入れ効果により、高硬度特性を持っている。加工性、溶接性は検討を要する。ボルト、ナットに使用される。
	SUS 410	焼き入れ硬化により硬さに優れる。水門戸当たりにも使用されている。
オーステナイト・フェライト系	SUS 329 J1	河口堰等塩素イオンが比較的多い環境で使用される。加工性、溶接性は検討を要する。
	SUS329J4L	河口堰も海岸に近く塩素イオンの多い環境で使用される。
マルテンサイト系	SUS 630	析出硬化により、耐摩耗性が優れている。耐食性も高いが、溶解ではアンダカットに注意する。

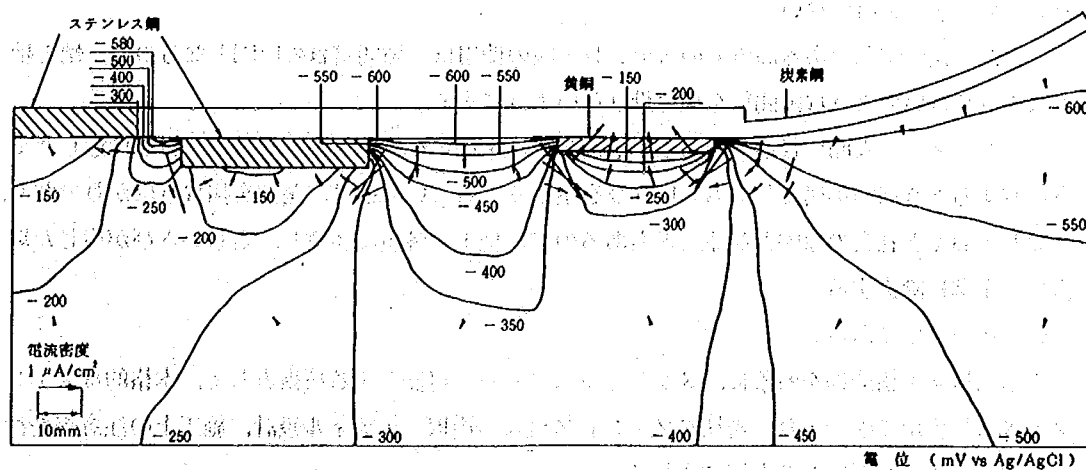


図-4 ガルパニックコロージョン電位分布および腐食電流 (数値解析による)

ダム放流設備等に使用されるステンレス鋼の特性を表-3に示す。

ステンレス鋼の最小板厚は、摩耗に対する余裕厚を含め原則として8mmとする。ステンレスクラッド鋼では合せ材の最小板厚は2mm、母材は6mmとする。合せ材の厚さは、摩耗量または突合せ溶接のある場合は溶接施工性などを考慮して2mmを越えてもよい。

ステンレス鋼とステンレスクラッド鋼との使い分けでは、ステンレスクラッド鋼の母材の厚さが6mm未満の場合はステンレス鋼を使用したり、鋼板の端面が露出する以下のような場合には、ステンレス鋼を使用することが望ましい。

- ① 常時水中または湿潤環境にある。
- ② 取り替えが容易でない箇所に使用する。
- ③ 再塗装が容易でない箇所に使用する。

ステンレスはさびにくい材料ではあるが、材質の選定や設計に配慮を欠くと異種金属腐食、隙間腐食、もらいさびなど特有の腐食を生じる。特に問題を生じるのはカルバニックな電気化学的なコロージョンである。典型的なカルバニックコロージョンの測定によれば、電位分布図(図-4)のようになる。

この結果、ステンレスに接する普通鋼に著しい腐食が生じる。このような予期しない腐食を未然に防ぐには、異種金属接触腐食が生じないようにすることが不可欠である。

- ① 普通鋼とステンレス鋼の混用を極力避ける。

混用が避けられない場合には、ステンレス鋼と接触する普通鋼の防食に十分配慮しなければならない。

- ② ステンレス鋼中に普通鋼が一部分露出する構造を避ける。

ステンレスクラッド鋼を使用する場合は、端部の普通鋼が露出しない構造とし、原則として孔あけ加工を行わない。

- ③ ステンレス鋼と普通鋼を混用する場合の普通鋼部分の防食には、アルミニウムや亜鉛の被覆(容射、めっき)を用いない。

また、狭い隙間のある箇所でのステンレス鋼の使用は、隙間腐食の原因となるので、軸と軸穴のはめ合いのような隙間部を極力設けないようにする。

ステンレス鋼の表面に普通鋼の粉末や溶接スパックなどが付着したり、普通鋼材が接触したまま放置すると普通鋼が腐食してもらいさびを生じる。もらいさびは、美観を損なうばかりでなく、放置しておくと孔食の原因となることもあるので、施工や養生に注意し、もらいさびが生じた場合には早期に除去する。

などの配慮が必要である。

河川水に接する構造物を対象に、メンテナンスフリーを可能とする技術として、本格的なステンレスの導入は実用段階であり、適切なステンレス材料の選択、ディテール設計、施工上の注意等を行うことで、適用範囲が広がると期待される。

6. 海域土木構造物での腐食対策

海域に設置される土木構造物に適用される防食技術を紹介する。

6.1 電気防食

鋼構造物の海中部および海底土中部は、海面から見えないために注目されることは少ないが、実際には構造物の大半は海中部および海底土中部にある。このため、信頼性が高く、しかも単位面積当たりの値段が安い経済的な防食方法が必要である。

電気防食は、電気そのものによって鋼材を防食するという、いわば目に見えない防食手法である。このためもあってか、本格的に土木構造物において適用され始めたのは最近である。(写真-1)

けれども、電気防食は塩分を含む海水が電気伝導性が高いことを利用して、いわば塩分を逆手にとって電気防食方法は経済的なものとなっている。電気伝導度が高いことは、必要な電流量が小さくて済むというだけでなく、複雑な部材であっても防食に必要な電位分布が比較的均一にあるという優れた効果をもっている。

とはいえ、一般の海域においては、電気防食の設計手法は比較的均一な状態を前提とすればよいが、たとえば、速い潮流が絶えずあるような海域(海峡等)においては、大きい電気防食電流を必要とすることがわかった。この場合には、塗装と併用することによって防食電流を低減させる方法も用いられる。

電気防食の利点はもうひとつある。それは、海水中においては、疲労腐食等により異常な鋼材の損傷進展を生じることがあるが、電気防食によってこれらをかかなりの程度まで軽減できることが明らかとなってきた。

電気防食法の防食電位は環境条件によって異なるが、電気防食設計指針(案)¹⁾・同解説²⁾には、防食電位値や防食電流密度などの設計数値が示されている。

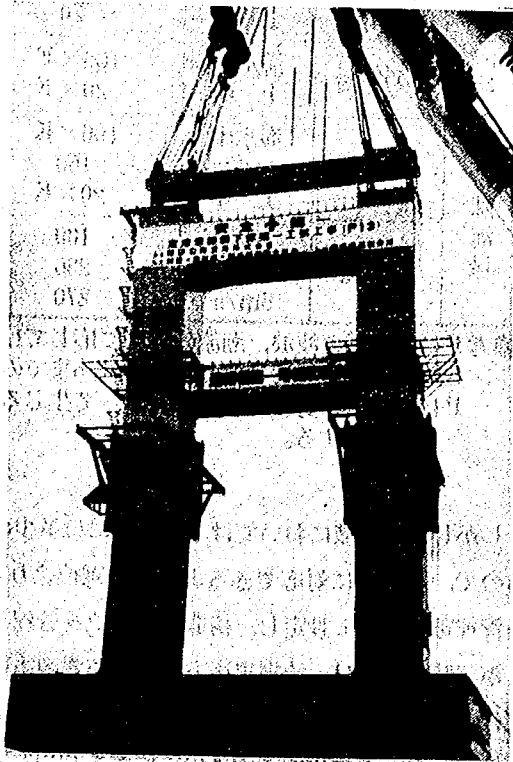


写真-1 関西新空港連絡橋橋脚に適用した電気防食

(1) 防食電位

海中部に電気防食を適用した場合、鋼材の電位を防食電位より卑（防食電位より低い電位）に維持すれば防食率97～99%が得られることが確認されている。即ち無防食の場合の鋼材の腐食速度を0.1mm/年とすると、電気防食を適用した場合には、局部腐食を軽減することになり、実用上、腐食は無視できる大きさとして取扱える。海洋環境における鋼材の防食電位を表-4に示す。

表-4 電気防食電位と防食電流密度

環境	電気防食の種類	防食電位 単位:mV(SCE)	
		電気防食法	複合電気防食法 (塗装併用)
一般海域		-770	-770 ただし下限を -1050
汚染海域		-900	
潮流海域		-770	

単位:mA/m²

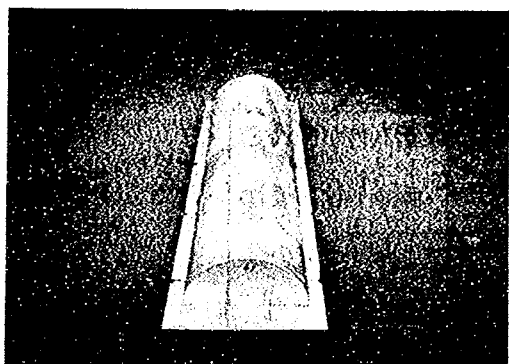
環境			防食電流密度		複合電気防食
			初期 防食電流密度	定常 防食電流密度	防食電流密度
一般海域	内湾性	海水中 土中	100 20	50 10	左の値にPを乗じた値
	外洋性	海水中 土中	100×F 20×F	50×F 10×F	
特殊海域	汚染	海水中 ヘドロ 土中	100×K 150 20×K	50×K 100 10×K	
	潮流	1m/s	160	80	
		2m/s	230	115	
		5m/s	270	135	

備考 Fは、海域の波浪、潮流の程度に応じて1.0～1.5までの範囲とする。
Kは、汚染の程度に応じて1.2～1.5までの範囲とする。
Pは、塗膜の劣化・損傷等によって生じる鋼の露出率で、塗装系により0.1～0.25までの範囲とする。

しかし、実海域においては、将来的には多少の環境変化があり、また予測じにくい事態も発生するので、これらに対応できるよう防食電位より若干卑な電位（清浄海域で-800mV(SCE)程度）を管理電位として設定し、構造物の電位を管理している場合が多い。

電気防食法には、流電陽極方式・外部電源方式・複合電気防食方式の3種類がある。流電陽極方式は、鋼材より卑な電位を有する金属(Al,Zn,Mgなど)を陽極として構造物を陰極として、両者を接続したときに生ずる両者の電位差を利用して構造物に防食電流を供給する方式である。現在では電源を要しないこと、メンテナンスが容易であること、施工が簡単なことに加えて、経済性と安全性が優れるアルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式が主体となっている。

長寿命型で抵抗の小さいアルミニウム合金陽極も最近開発され、本四公団の水中ケーソンに取付けられた（写真－２）。



写真－２ 長寿命で抵抗の小さいアルミニウム合金陽極

(2) 防食電流密度

有効な電気防食を行うために重要なことは、設計時にその海域の環境に見合った適切な防食電流密度を採用することである。代表的な環境における防食電流密度を表－４に示す。

必要な防食電流密度は、環境によって変化する。内湾性の波浪や潮流の小さい海域では、 $100\text{mA}/\text{m}^2$ の防食電流密度で十分であるが、外洋性の波浪の大きい海域や高潮流海域では、酸素の拡散速度が大きいため、内湾性の海域に比較して大きな防食電流密度を必要とする。また、汚染海域では、

水温の高くなる夏期に大きな防食電流密度を必要とする。

このような点から、その海域に最も適切な防食電流密度を決定するためには、仮通電試験を行って決定する場合がある。

アルミニウム合金陽極を用いる流電陽極方式による電気防食の工事において、主な作業は、アルミニウム合金陽極の取付け工事である。アルミニウム合金陽極の取付けは、陽極の芯金を所定の位置に水中または陸上溶接によって行う。大型の構造物の場合は特に波浪等に十分耐え得るような取付けが必要である。

構造物の電位の測定は、電気防食装置が計画どおり作動しているかどうかを知る上で定期的に行う必要がある。大規模な構造物の場合は、予め、測定位置を選定して、その位置に基準電極を設置しておき、その位置における電位を随時容易に測定できるような設備を施すことが望ましい。

6.2 飛沫帯防食

海水飛沫を直接に受けた場合には、普通の塩水と異なり、海水には粘着する性質があるため、塩気が強固に付着することになる。付着してもすぐに洗い流されてしまえばよいが、そうでない場合、高濃度の塩分が鋼材の表面に長期間にわたって固着することになる。

この点、飛沫帯の防食においては、防食効果の高いものが要求される。

現在では、飛沫帯に適用する材料のいくつかは20年以上の寿命を有することが検証されている。また、40年以上の寿命を期待できるものもある。チタンや高耐食ステンレスのような新素材を活用することによって、ほぼ半永久的な防食手法と見なせるものも出現している。このような新しい材料においては、デテールの設計、溶接等の施工管理や材料の信頼性が重要なキーポイントとなることも明らかとなってきた。

海洋構造物に適用される被覆防食法には次の種類があり、特徴を述べてみたい（表－５）。

●耐食性金属ライニング

表-5 飛沫・干満帯に適用される被覆防食法の特長

防食法	代表的な仕様例			特 長	
	被覆材料	被覆厚さ (mm)	施工法		
耐食性金属 ライニング	耐海水性ステンレス鋼	3	クラッド 又は 溶接巻付け 押出し被覆	・耐久性が優れている。 ・耐衝撃性が優れている。 ・現場工事での扱いが容易。	・イニシャル・コストが高い。 ・異種金属接触腐食に対する配慮が必要。
	チタン	1			
	キュプロニッケル	2			
	モネル	2			
	低合金系耐海水鋼	9			
有機ライ ニング	ポリエチレン	2.5	押出し被覆 又は貼付け	・工業的に大量生産可能で安価。 ・耐久性に優れている。	・傷がつきやすい。
	ポリウレタン	2.5	塗 装		
	エポキシ	2			
	タールウレタン	2			
ベトロラム ライニング	ベトロラム・テープ +FRP保護カバー	ベトロラム2~3 FRPカバー 3	テープ巻付け +カバー巻付け	・複雑な形状でも 施工が可能	・耐衝撃性が劣る。
コンクリート ライニング	コンクリート +FRP保護カバー	かぶり厚さ 100	型枠注入	・耐久性が優れて いる。	・現地施工に限られる。 ・耐衝撃性が劣る。
塗装	厚膜型無機質ジン クリッチペイント +エポキシ樹脂塗料	0.475	塗 装	・施工が容易で補 修しやすい。 ・美装効果が大き い(タールエポ キシ以外)。 ・イニシャル・コ ストが安い	・傷がつきやすい。
	厚膜型無機質ジン クリッチペイント +タールエポキシ樹脂塗料	0.475			
	厚膜型無機質ジン クリッチペイント +塩化ビニール樹脂塗料	0.475			
	有機質ジンクリッ チプライマー +ガラスフレーク 入りポリエステル 樹脂塗料	1			

- 有機ライニング
- ペトロラタムライニング
- コンクリートライニング

6.3 耐食性金属ライニング

耐食性金属ライニングには次の種類がある。

- ① ステンレス鋼
- ② チタン
- ③ キュプロニッケル
- ④ モネル

耐食性金属の海水環境における腐食の特徴は、飛沫部と干満部で異なる。

飛沫帯にさらされた高耐食性金属に生じる腐食形態は、鋼や低合金鋼とは異なり、浅い点食、発錆、割れなどが主なものである。

ステンレス鋼を例にとると、点食や割れなどには、溶接作業などの熱履歴により生じる鋭敏化減少を原因とすることが多い。したがって、低炭素化により鋭敏化を回避し、Moの添加により耐孔食性を向上させたSUS316Lグレードなどのステンレス鋼であれば、飛沫帯におけるこれらの腐食を抑制することが可能である。

チタンやチタン合金は、飛沫帯において良好な耐食性を示すことが知られている。

一方、干満帯に暴露された耐食性金属の腐食形態は、隙間腐食・孔食などであり、とりわけ、隙間腐食が問題である。隙間となる部分は、海洋生物の腐食など自然に生ずるものと、構造物の形状

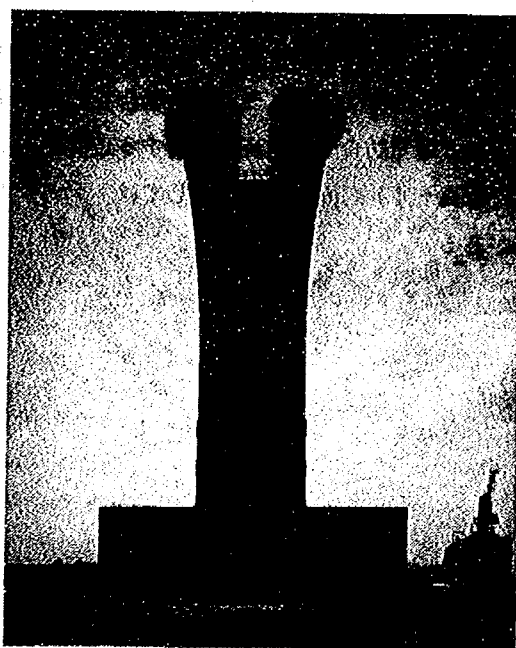


写真-3 チタンクラッドの利用例

や構造に由来する人為的なものがある。一般に、高耐食性金属の腐食環境としては、ボルトのワッシャー下部など構造による隙間のほうが、生物付着箇所など自然に生じる隙間よりも、苛酷に作用することが多い。

チタンは、孔食・隙間腐食・応力腐食割れの発生が少ない海洋環境における優れた耐食金属である。これまで、海水冷却用の熱交換器などに石油掘削用プラットフォーム部材、マリンライザーなどにも採用されている。

東京湾横断道路の鋼製橋脚にチタンクラッドが用いられた(写真-3)。チタンは接合に難しい点があるのを、形状の工夫でもって接合を可能にしたものである。

キュプロニッケル(10~30%Ni-Cu合金)は、停滞海水中よりむしろ流速の速い海水中で良好な

耐食性を示し、耐孔食性も優れていると報告されている。また、耐生物付着に優れている。

モネルメタル（70%Ni-Cu合金）は、停滞海中では孔食を発生するが、流速の速い海中では耐孔食性に優れ、NACE（米国規格）の飛沫部用の防食仕様に採用されている。

これら耐食性金属の施工法としては、母材にシートを溶接する方法とクラッド法がある。シート溶接の板厚は、モネル1～2mm・ステンレス2～4mm・チタン1～3mm程度である。クラッド法は、熱間圧延法や爆発圧着法等により鋼材に耐食性金属を接合させる方法であり、密着性に優れそのまま構造用材料として使用できる。ただし、クラッド鋼の溶接は、母材側とクラッド側の溶接をわけて行う必要があり、クラッド材料の厚みは、モネル・ステンレス2～4mmであり、チタンは耐食性の観点からは0.5mmで十分であるが、クラッド比の関係から通常1～3mmの厚みが採用される。

耐海水性ステンレス鋼・モネル・チタンなどは、高価ではあるがメンテナンスフリーで使用できる可能性がある。そのため、イニシャルコストではなく、その長期耐久性を考慮にいれてコスト評価すれば、十分経済性を有するものと考えられる。ただし、これら耐食性金属を被覆した鋼材では、シート溶接法でもクラッドの場合でも、鋼構造本体との接合部は、異種金属溶接被覆を防止するため、電気防食や塗覆装を併用する必要がある。ステンレスを部材に被覆した鋼管基礎の例もある（写真-4）。面白い利用としては、チタン表面を発色させ、景観を兼ねた耐食材として用いた例がある。

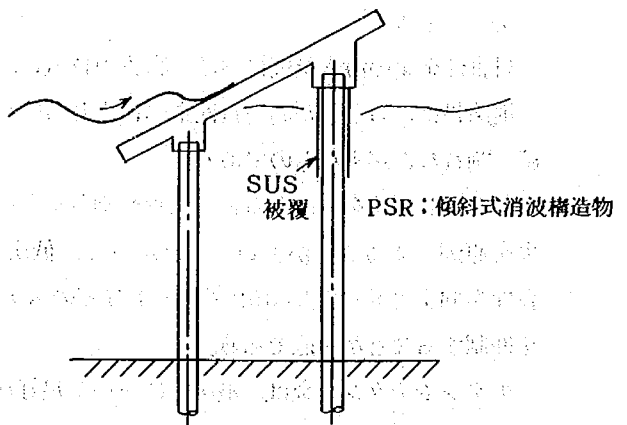


写真-4 PSR（傾斜式防波堤）に設置されたステンレス被覆

6.4 有機ライニング

有機ライニングには多くの種類がある（表-6）。

- ① ポリエチレンライニング
- ② 厚膜無溶剤樹脂ライニング
- ③ レジンモルタルライニング
- ④ 水中硬化型樹脂ライニング
- ⑤ FRPライニング
- ⑥ ゴムライニング

ポリエチレン被覆鋼材は防食性と施工性ともに優れたプレ重防食鋼材であり、鋼管杭や矢板など

表-6 有機ライニング工法の特徴

	標準膜厚 mm	標準施工法	施工場所		特 徴
			工場	現場	
ポリエチレンライニング	2~3	溶融シート巻付け あるいはシート貼付け	○		工場生産で品質安定。 大量生産可能で安価。 複雑な形状には施工困難。
厚膜無溶剤型樹脂ライニング	0.5~5	塗 布	○	○	特殊塗装機によりスプレーが可能。 2液エアレスが必要
水中硬化型樹脂ライニング	1~10	ハンドワーク、注型法		○	水中での施工が可能。 パテタイプは工数がかかる。
	0.1~1	ハ ケ			
レジンモルタルライニング	3~10	塗 布	○	○	耐衝撃性がよい。複雑な形状も可能。施工条件厳しく、均質塗膜形成困難。
F R P ラ イ ニ ン グ	2~5	ハンドレイアップ	○	○	耐摩耗性がよい。複雑な形状も可能。工数がかかる。
防食テープライニング	0.3~5	粘 着		○	水中での施工が可能。 海水中では保護が必要、工数もかかる。
ゴ ム ラ イ ニ ン グ	3~15	シート貼付け+加硫	○		耐衝撃性、耐摩耗性がよい。

に広く用いられる（写真-5）。

ポリエチレン樹脂は耐薬品性・耐海水性に優れており、カーボンブラックの配合により耐候性が優れている。通常、厚さ2~3mmの膜厚にライニングされ、耐衝撃性に優れている。鋼矢板などでは、押出し法による自動被覆ができないので、ポリエチレンシートの張り付け工法により被覆する。

厚膜無溶剤型樹脂ライニングの代表的なものが、ポリエチレンウレタンライニングであり、機械化された2液エアレスで自動塗装されたプレ重防食鋼矢板などとして市販されている。ポリエチレンウレタンライニング鋼管もポリエチレン被覆と同様に海洋暴露試験等で耐久性が確認されている。

ポリエチレンのほかエポキシやタールウレタンなどの無溶剤型樹脂ライニングも行われている。

また、最近の傾向として景観矢板の導入がある。ポリエチレン被覆は通常耐候性を増すために黒色である。まわりの景観と調和させるために美しい色を矢板に与えたものも開発されている。

海洋環境の中でも飛沫部・干満部は、腐食の他に波浪や漂流物などによる機械的なダメージを受け易い部位である。そのため物理的強度の高い被覆が要求される。この様なニーズに合致した被覆法としてエリカサンドを含有した、いわゆるレジンモルタルと総称されているエポキシ樹脂ライニングがある。超厚膜エポキシ樹脂ライニングとも呼ばれ関西空港の連絡橋などにも用いられた。

水中硬化型塗料にはパテ状のものとハケ塗りの可能な液状のものがあり、3種類の施工法が採用されている。いずれの方法でも素地調整を行い、塗料のみを塗布するものと、塗料の補強材として

金網などを使う方法、型枠を用いて樹脂を注入する方法がある。これらの水中硬化型塗料は主として、既設構造物の補修に適用されている。

ゴムライニングは海洋暴露試験で優れた評価を得ているが、加硫作業の問題とコスト面から国内での使用実績はまだ少ない。

FRPライニングは、エポキシ樹脂やポリエステル樹脂にガラス繊維などを混合してライニングするので、機械的強度に優れているが、ハンドレイアップ法による施工に限定される。

6.5 ペトロラタムライニング

ペトロラタムライニングには次の種類がある。

- ① ペトロラタム防食層+FRP保護カバー
- ② ペトロラタム防食層+緩衝層+FRP保護カバー

ペトロラタムは、インヒビターを含む粘性の高い石油系の防錆材料であり、ガラスクロスや合成繊維不織布などのテープに含浸させ、構造物の表面に巻付けあるいは貼つけ、FRP製の保護カバー

を用いて、ペトロラタムテープなどの防食層を保護する。FRP製保護カバーとペトロラタムテープとの隙間にポリエチレンなどの発泡体を緩衝層として組入れることもある（図-5）。

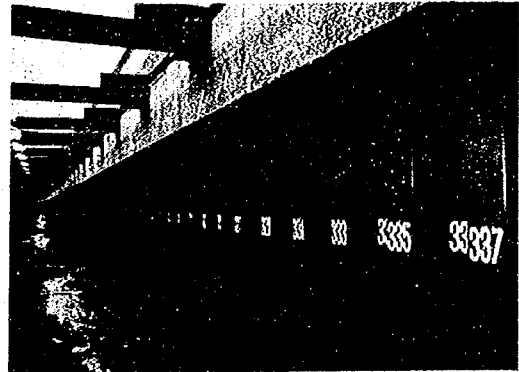


写真-5 ポリエチレン被覆防食鋼矢板

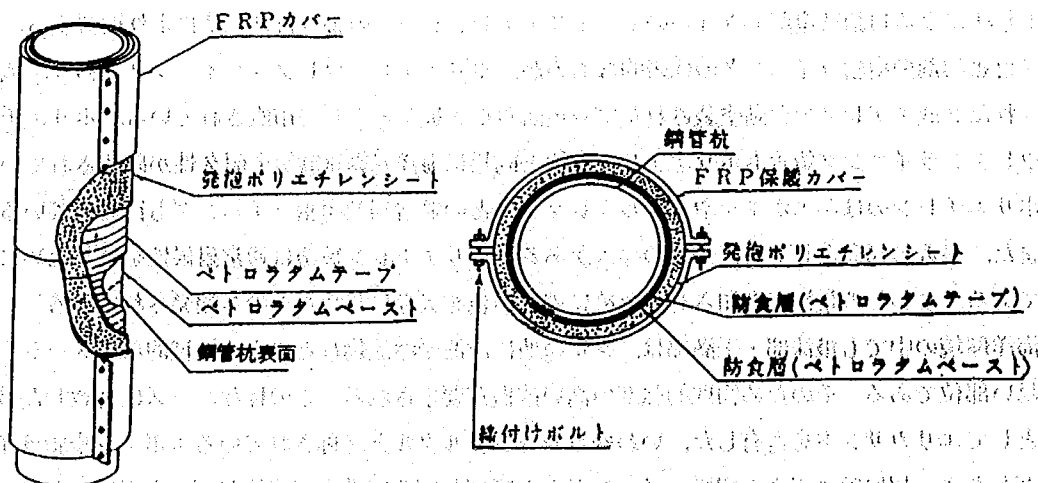


図-5 鋼管杭へのペトロラタム+FRP保護カバーの適用例

FRPは成型が自由であるため、複雑形状の構造物にも施工が可能である。保護カバーの厚さは、

2～7mmのものが用いられるが、波力など環境条件を考慮して決定しなければならない。FRPは、補強材であるガラス繊維に熱硬化性樹脂を含浸積層硬化させることにより形成するが、樹脂としては、ポリエステル樹脂やエポキシ樹脂などが用いられている。価格や硬化時間の制御のしやすさなどの点から、不飽和ポリエチレンが一般的である。

ペトラタムライニングには2種類の工法がある。

一つは、マルチステップライニングと言われるもので、素地調整後、ペーストとを塗布し、ペトラタムテープを巻き保護材あるいは緩衝層を取り付ける方法である。

もう一つは、素地調整後、防食層、緩衝層（外力のクッションと、防食層を鋼材に密着させることを目的とする）および保護層を予め工場で一体化した防食体を取り付けるいわゆる一体成型法である。この一体成型は、工程省略によるコストダウンにつながる。

6.6 コンクリートライニング

コンクリートライニングには次の種類がある。

- ① コンクリートライニング後型枠を残すもの
- ② コンクリートライニング後型枠を取外すもの

コンクリートライニングとはセメントモルタルやコンクリートによる被覆を総称したものである。

モルタルライニング法には2種類の工法があり、一つは素地調整後FRP（強化プラスチック）やGFRC（ガラス繊維強化セメント）等の型枠を取り付け、モルタルを注入し型枠をそのまま残して、モルタルと型枠による中性化速度の減少と、防食体の強化を狙う方法である。他の一つは、メタルフォームなどの型枠を施工後取り外す工法である。

型枠を保護カバーとしてそのまま残す方法は、気密性、水密性の高い、耐食性の優れた材料で作った型枠を使用し、モルタルの打設後もそのまま残し、衝撃によるひびわれや中性化からモルタルを保護する方法で、この型枠に使う材料にはFRP、FRVなどの強化プラスチックやGFRC（強化セメント）が使用されている。

6.7 上部構造のための塗装

鋼桁やタワーのような上部工は塗装されるが、最近長期防錆型塗装や高耐久性塗料は急速に開発が進んでおり、既に広く採用されている。

長期防錆型塗装の代表的なものは、ジソグリッチペイント、エポキシ、ウレタン系の高品質塗料であり、この場合には、鋼材の防錆性を厚膜型無機ジソグリッチでもって向上させている。また、塗膜の遮断性を高めたガラスフレーク系の塗料や、塗り回数を少なくししかも作業性を高めた厚膜型エポキシ塗料等の利用が実用的な段階に入ってきた。

このような塗料を用いることによって、厳しい海上環境においても、これまで塗装の寿命とされてきた8～10年程度から、最近では15～20年程度まで寿命を向上させることができている。

このように、防錆機能が向上するとともに、塗膜の色や光沢などの保持性が問題となっている。これまでは錆によって塗膜の寿命が決まったために、比較的短期間で塗り替えていた。このため、

色が褪せる退色や汚れ等があっても塗り替えることによってリフレッシュされる、すなわち塗膜の更新が可能であったために、これらの耐久性はそれほどまでには要求されなかった。けれども、防錆機能が向上したことから、保色性を含めた塗膜自体の耐久性も大幅に向上させる必要に迫られている。

構造物が架設される周辺の景観との調和が真剣に考慮される場合、落ち着いた色を持った塗料やいつまでも鮮やかさを失わない塗料の要求が高まり、これに対応するものとして、ふっ素樹脂塗料あるいはシリコン樹脂塗料が開発された(図-6)。

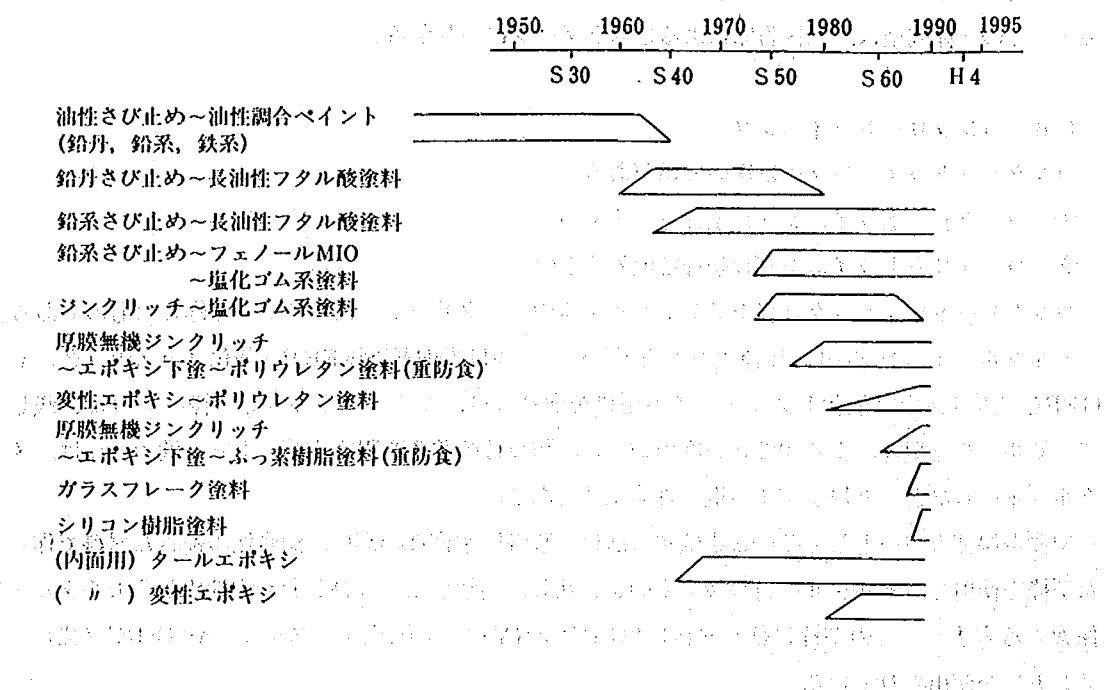


図-6 土木構造物に適用する塗料と塗装系

このような塗料は、これまでの油性フタル酸系塗料に比べると初期費用は多少高いが、その長期的な寿命、塗り替えコスト等を考慮すると高いものではない。このため、新設計段階からこのような長期防錆型でしかも高耐久性の塗料を採用することが最近増えている。現在、海洋構造物の塗装に適用されている代表的な塗装系を表-7に示す。

橋梁では構造物の外表面、内表面、上面、継ぎ手部等に分けて考えることができる。この中で最もさびやすい部分は継ぎ手部である。外表面でもフランジ下面のような部位は塗膜が痛みやすい傾向にある。

(1) 高力ボルト接合部

高力ボルトの接合部は、ボルト、ナットともに鋭角が多く、しかも塗膜厚が付きにくいという点に塗装するのが困難な部位である。このため、長期防錆型の塗装を用いても、最も早くさびが生じる場合がある。対応としては、防錆ボルトを用いる、塗膜厚をより厚くつける、あるいは保護カバー

表-7 海上大気部の塗料仕様例

防食仕様	A-1		A-2		A-3		A-4	
	塗料名	塗装間隔	塗料名	塗装間隔	塗料名	塗装間隔	塗料名	塗装間隔
素地調整	SPSS Sd 2 あるいは Sh 2							
1層	厚膜型無機 ジンクリッチ ペイント 75(700)	1日 ～ 6ヶ月	厚膜型無機 ジンクリッチ ペイント 75(700)	1日 ～ 6ヶ月	厚膜型無機 ジンクリッチ ペイント 75(700)	1日 ～ 6ヶ月	厚膜型無機 ジンクリッチ ペイント 75(700)	1日 ～ 6ヶ月
2層	ミストコート (160)		ミストコート (160)		ミストコート (160)		ミストコート (160)	
3層	厚膜型エポキシ 樹脂塗料 (下塗り) 100(500)	2日 以内	厚膜型エポキシ 樹脂塗料 (下塗り) 100(500)	2日 以内	厚膜型エポキシ 樹脂塗料 (下塗り) 100(500)	2日 以内	厚膜型エポキシ 樹脂塗料 (下塗り) 100(500)	2日 以内
4層	厚膜型エポキシ 樹脂塗料 (下塗り) 100(500)	1日 ～ 1ヶ月	厚膜型エポキシ 樹脂塗料 (下塗り) 100(500)	1日 ～ 1ヶ月	ガラスフレーク入り ポリエステル 樹脂塗料 (下 塗り) 100(500)	1日 ～ 1ヶ月	厚膜型エポキシ 樹脂塗料 (下塗り) 100(500)	1日 ～ 1ヶ月
5層	ふっ素樹脂塗料 (中塗り) 30(170)	1日 ～ 3ヶ月	アクリルシリコン 樹脂塗料 (中塗り) 30(170)	1日 ～ 3ヶ月	ふっ素樹脂塗料 (中塗り) 30(170)	1日 ～ 3ヶ月	ポリウレタン 樹脂塗料 (中塗り) 30(170)	1日 ～ 3ヶ月
6層	ふっ素樹脂塗料 (上塗り) 30(140)	1日 ～ 7日	アクリルシリコン 樹脂塗料 (上塗り) 30(140)	1日 ～ 7日	ふっ素樹脂塗料 (上塗り) 30(140)	1日 ～ 7日	ポリウレタン 樹脂塗料 (上塗り) 30(140)	1日 ～ 7日

(注1) SPSSは、塗装前鋼材表面処理基準(日本造船研究会作成)に規定される素地調整の程度である。

(注2) 表中の数字は標準塗膜厚(μm)を示す。
()内数値は所定膜厚を得るための塗料使用量(g/m^2)を示す。
施工はいずれもスプレー塗装とする。

(注3) 塗装間隔は塗装環境温度 20°C の場合の標準を示す。

を用いる等の方法がある。

(2) 外面

外面は、太陽光線の直射を受ける環境である。このため、塗膜の退色、変色が起こりやすい。しかし腐食の点に言えば、腐食した塩分が雨によって洗い流される効果があり、しかも乾燥しやすいことからさびが生じるのが遅い。

このため、外面においては、さびよりは美観が問題となることが多い。

ただし、外面の下面部はさびやすい部分である。これは、比較的膜が付きにくく、しかも鈍角部等端部からの発錆があるからである。この場合には、鋼材端部のアール加工を行い塗膜ののりをよくすることが効果的である。

アール加工は、鋼材加工の一部として行われるようになったが、しかし塗り替えの困難な部位や激しい腐食にさらされる構造部等では、他の部位よりもっと大きなアールを切り取る必要があると考えられている。

(3) 箱桁等の内面

太陽光線の直射を受けず人目にも触れないので、耐候性や美観上の配慮は不要である。しかし、湿潤状態になりやすいため、耐湿性の優れた塗装系を適用する。また、構造的に密閉された状態にあるため、現地塗装作業時に中毒や引火の危険があるので、換気等で対応できない場合には、これらの危険性のない塗装系が選定される。また、明るい色をもった塗装系を用いることによって、点検時の作業安全性を高める工夫もされている。

(4) 鋼床版上面

鋼床版上面は、舗装が舗装されるまでに長期間風雨にさらされる上に、力学的損傷を受ける機会が多い。グースアスファルト塗装の際には、200℃程度の高温になること、舗装の接着性や長期にわたる防食性等の性能が要求されるので、無機ジンクリッチ塗装を中心とした塗装が行われる。

6.8 大型構造物における実際の評価

防食方法を用いる場合に、防食材料の実際の耐久性能がどの程度持続するのかということが最も問題となる。土木構造物に本格的に適用できる防食材料は、比較的新しく開発されたものが多いため、その耐久寿命が長いことは予想できるが、実際にはどこまで防食寿命があるのかは不明であるとの理由で、積極的に導入するまでには到らない場合があった。

けれども、昭和40年代後半からこれらの新しい防食方法について様々な検証実験が実環境でも行われてきた。

たしかに実際海域においては、これまで予想もされなかったような問題が生じることがあった。たとえば、付着生物による異常な腐食や工場地帯周辺の海水の汚れ等である。これまでの十数年の長期暴露試験によって、これらの問題を含めて材料の信頼性および耐久性に関する技術資料が整備されてきた。このため、重要な構造物においても、新しい技術の中のいくつかは十分に信頼性と経済性が満足でき、使用に耐えるものと考えられている。

長期にわたる評価例としては、土木研究所では駿河湾における実大構造物を用いた暴露試験を

行っている。

この暴露試験は、(財)鋼材倶楽部、(財)日本プレストレストコンクリート建設業協会、(財)土木研究センターなどと共同して土木研究所が行っているものであり、優れた防食材料を見出し、できるだけ短い期間で実際の土木構造物へ適用することができるように、検証のための施設設置を含めて体系的に実施されてきたものである。

メインの試験施設である海洋技術総合研究施設は、防食材料と防食技術の開発を促進するための検証試験を行うことを主たる目的のために、昭和58年に設置されたものである(図-7)。

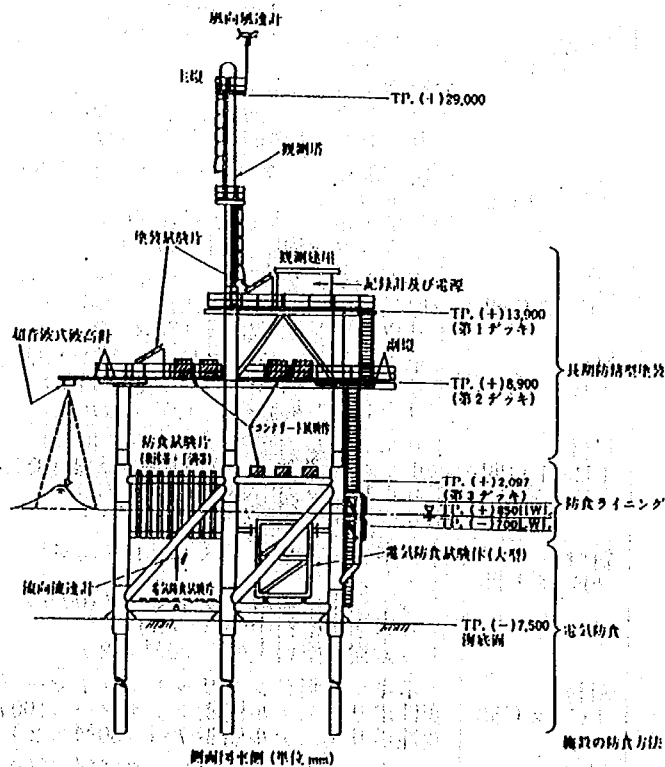


図-7 海洋技術総合試験施設（海洋暴露試験施設）

この施設を用いた検証中の防食技術は多岐にわたるが、上部工の防食塗装(表-8) 飛沫帯の防食ライニング、防食鋼材、海水中の電気防食などの鋼材構造物を対象とするものだけでなく、コンクリート構造物を対象とする技術も含まれている。

土木研究所が現在行っている実際環境下での暴露試験を表-9に示す。

7. あとがき

大量の土木構造物を抱えた維持管理の時代が近づこうとしている。

構造物にとって良好な維持管理を行うことを前提として、それをどのように楽にするかが問われていると言えよう。このために、トータルライフコストの考え方の導入やマネージメント(維持管

表-8 施設本体の海上大気部塗装仕様(実大試験用)

仕様No.	塗装部位	塗 装 系
A	主鋼管 1-A,B,C	厚膜型エポキシジンクリッチ (75 μ) ポリエステルガラスフレーク塗料 (350M $\times$ 2) ふっ素樹脂塗料上塗 (20 μ $\times$ 2)
D	主鋼管 2-A,B,C	厚膜無機ジンクリッチ (75 μ) ミストコート 厚膜型ビニル樹脂塗料 (150 μ) ビニル樹脂塗料上塗 (30 μ)
H	主鋼管 3-A,B,C	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75 μ) ミストコート 厚膜型エポキシ樹脂塗料 (60 μ $\times$ 2) ポリウレタン樹脂塗料用中塗 (30 μ) ポリウレタン樹脂塗料上塗 (30 μ)
I	斜材 3B-3C間	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75 μ) ミストコート 厚膜型エポキシ樹脂塗料 (150 μ) ポリウレタン樹脂塗料 (30 μ)
J	斜材 2C-3C間	エポキシジンクリッチプライマー (15 μ) 超厚膜型エポキシ樹脂塗料 (2000 μ) ポリウレタン樹脂塗料 (30 μ)
G	斜材 1B-2B間	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料 (750 μ $\times$ 2) ポリウレタン樹脂塗料用中塗 (30 μ) ポリウレタン樹脂塗料上塗 (30 μ)
E	斜材 1B-1C間	ポリエステル樹脂プライマー (40 μ) ポリエステル樹脂ガラスフレーク塗料 (350 μ $\times$ 2) ポリウレタン樹脂塗料用中塗 (30 μ) ポリウレタン樹脂塗料上塗 (30 μ)
B	斜材 2B-3B間	厚膜型ジンクリッチペイント (75M) ミストコート ふっ素樹脂塗料用プライマー (100 μ) ふっ素樹脂塗料中塗 (50M) ふっ素樹脂塗料上塗 (20M $\times$ 2)
C	斜材 1C-2C間	エポキシ樹脂ジンクリッチプライマー (25 μ) 変性ポリエステル樹脂プライマー (100 μ) 変性ポリエステル樹脂塗料 (50M $\times$ 2)
F	斜材 2B-2C間	エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料 (300 μ) エポキシ樹脂ガラスフレーク塗料 (750 μ) ポリウレタン樹脂塗料用中塗 (30 μ) ポリウレタン樹脂塗料上塗 (30 μ)
L,M	1,2デッキ 下面	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75 μ) ミストコート タールウレタン樹脂塗料 (200 μ $\times$ 2)
N	1,2デッキ 縁取り	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75 μ) ミストコート (75 μ) 変性エポキシ樹脂塗料 (75 μ $\times$ 2) ポリウレタン樹脂塗料上塗 (30 μ)
	階段	変性エポキシ樹脂塗料 (75 μ $\times$ 2) ポリウレタン樹脂塗料上塗 (30 μ)
	手摺り 2C-3C間	(パワーツール処理) 変性エポキシ樹脂塗料 (75 μ $\times$ 2) ポリウレタン樹脂塗料上塗 (30 μ)
P	タワー 1B-2B間	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75 μ) 厚膜型エポキシ樹脂塗料 (60 μ $\times$ 2) ポリウレタン樹脂塗料用中塗 (30 μ) ポリウレタン樹脂塗料上塗 (30 μ)

表-9 土木研究所が現在行っている実際環境下での
暴露試験

	環境	目的	対象とする材料
建設材料研究施設 (茨城県つくば市)	標準的	材料開発 耐久性評価	一般土木材料
海洋技術総合研究施設 (駿河湾内, 静岡県)	海 洋	材料開発 耐久性促進 評価	防錆・防食材料
沖縄北部 (沖縄県)	海 洋 (亜熱帯)	耐久性促進 評価	防錆・防食材料 塗料
日本海海岸 (新潟県)	海 岸 (季節風)	耐久性評価	防錆・防食材料 コンクリート防食
阿字ヶ浦海岸 (茨城県)	海 岸	耐久性評価	防食材料 補修塗料
沖の鳥島	海 洋 (熱帯)	耐久性促進 評価	防食材料 新素材

理体制)の見直しも必要であるが、しっかりした長寿命の構造物を作ることがまず重要であることは言うまでもない。

防食技術を確立することは、長期にわたる体系的な材料開発と評価、そしてその施工技術の開発が不可欠である。このような長期で基盤的な取り組みが、国立研究機関に求められる役割のひとつであろう。

ここで紹介した防食技術は、優れた耐久的な構造物を作るための重要な要素技術である。構造物にふさわしい優れた防食技術を開発するとともに、その利用を合理的に進めることを今後も行っていきたい。

参考文献

- 1) 海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究報告書(概要) 科学技術庁(昭和60年)
- 2) 海洋構造物の耐久性向上技術に関する研究報告書 建設省土木研究所, 社団法人鋼材倶楽部, 社団法人プレストレストコンクリート建設業協会, 財団法人土木研究センター(昭和60年, 63年, 平成元年)
- 3) 海洋技術総合研究施設に関する研究報告書 建設省土木研究所(昭和60年)
- 4) 海域における土木鋼構造物の電気防食指針(案)・同解説 建設省土木研究所 財団法人土木研究センター(平成3年)
- 5) 海洋鋼構造物の防食指針・同解説(案) 飛沫帯・干満帯編 建設省土木研究所 鋼管杭協会(平

成2年)

6) 土木技術資料 - 腐食防食特集 - (平成2年7月)

7) 鋼道路橋塗装便覧 社団法人日本道路協会(平成2年)

8) ダム放流設備へのステンレス鋼適用マニュアル(案)建設省土木研究所(平成4年)

土構造物の強化と高度化に向けて
—混合土・複合土を活用した技術開発—

機械施工部長 久 楽 勝 行

土構造物の強化と高度化に向けて — 混合土・複合土を活用した技術開発 —

1. はじめに

我が国の社会資本の整備に伴い築造される土木構造物に対して、次々世紀にわたって活用できる安全で、かつ耐久性のある品質の高い構造物の築造が、今後一層望まれる。特に、従来から道路盛土や造成用盛土、河川堤防、のり面工、斜面安定工、土留め構造物、地盤処理工等の土構造物は一般に土や岩などの土質材料を主材料にして造られてきており、他のコンクリートや鋼製の土木構造物などに比べて修復が比較的容易であり、構造的な補強を後から行うこともできることから、初期の工事費を節減しておいて、維持補修によって順次、その機能を高めていくという考え方が強い。土質材料の性質上、今後とも状況が許されれば、その考え方ややり方は適用できるものであるが、最近では土構造物の一層の品質の向上や安定性の増大が求められており、また将来の維持・管理の体制などを考慮にいれると、維持補修をほとんど必要としない、メンテナンス・フリーのしっかりとした後世に残る土構造物の築造が期待される。

一方、最近の土構造物の築造にあたっては、良質の土質材料を入手することが難しくなってきた反面、処分地等の社会的な問題から、建設残土等の有効利用が強く望まれている。また、複雑な地層構成の地盤や超軟弱な地盤、あるいは急峻な山岳地での土構造物の築造など、地盤条件の厳しい個所での土工事が多くなっている。さらに、都市内での狭隘な場所での施工や土構造物の築造に伴う周辺環境への影響、ならびに完成後の土構造物自体の自然環境との調和などを考慮することも重要になってきている。このような種々の多様な問題に対処するためには、新しい考え方や工法を積極的に導入して、周辺環境への影響等にも配慮した安定性の高い、しっかりとした土構造物の強化対策、ならびに高度化技術の確立が以前に増して望まれる。

そのような要求に対応して近年、土工の分野で以下に示すような土などの材料に固化材や補強材、軽量材、止水材などを、攪拌・混合、あるいは土中に敷設または挿入するなどして、新しい混合土または複合土をつくり、これらを土構造物に適用する工法が開発されてきている。また、地盤の条件や変形などに追従できる新しい型式や構造の土構造物の築造技術等も開発されてきている。これらの土構造物の築造技術は、従来の土工では対応しきれなかったような多様な問題にも対処でき、しかも確実で、かつ土構造物の安定性の向上などの強化対策や高度化に役立つことから、今後の発展が一層期待される。

2. 最近の建設事業を取り巻く環境

最近の建設事業を取り巻く環境として、社会的及び経済的な環境の変化により、建設分野に求め

られている内容も高度化し、しかも多様化していることが挙げられる。土工に関連したそれらの主なものとしては、下記に示すような内容のものがある。

- (1) 21世紀に向けての社会資本の一層の整備
- (2) 防災対策の一層の推進
- (3) ゆとりとうるおいのある生活空間の形成
- (4) 地域の活性化ならびに再開発
- (5) 地下空間や海洋等の新規の開発
- (6) 景観と自然環境の保全
- (7) 作業環境の改善と安全性の確保
- (8) 現場における施工技術の合理化と生産性の向上
- (9) 労働力不足及び熟練作業員の高齢化
- (10) 周辺環境への影響
- (11) 建設副産物の抑制とその有効利用

上記のようなことを十分考慮して各種のニーズに応じたより良い土構造物を築造することが重要なわけであるが、一方では図-1に示す各土構造物に対して考慮すべき条件を満足し、しかも高品質の安全性の高いものが求められるようになってきている。また、社会資本の整備に伴い、築造される構造物も膨大なものになってきていることから、将来の維持管理を極力少なくすることができるような耐久性のある、メンテナンス・フリーを旨とした土構造物の築造ということも、強く要望されている。さらに、既存の土構造物を長もちさせるための新たな補強対策も望まれている。

ここで、土に固化材や補強材、軽量材、止水材などを攪拌・混合、あるいは土中に敷設または挿入する混合土または複合土は、混合する添加材の種類や量を土質に応じて調整することにより、強度や重量、透水性、施工性などを改善して任意のものにすることができる。また、それらの混合土や複合土の強度や変形、止水性などを適正に評価することによって、従来の土構造物とは異なる安定性の高い土構造物を短期間に築造することもできる。従って、混合土や複合土は上記のような要求に対応でき、土構造物の強化や高度化に役立つ工法として期待される。

3. 盛土・切土等への適用

道路盛土や宅地造成盛土、水中盛土などにおいて、盛土の安定性の向上ならびに盛土の沈下、変形の軽減、あるいは長大のり面を少なくし、周辺環境との調和を図ることなどを目的として、表-1に示すような新しい工法が現場に適用されている。

3.1 盛土の安定性の向上を図る盛土補強工法

盛土の崩壊は一般に、図-2(a)に示すような降雨や地山からの浸透水などによる土塊の重量の増大と、土のせん断強さの低下によって生ずる。また、大きな地震力が作用した場合には、盛土の崩壊あるいは著しい沈下や変形が生ずることがある。盛土等の土構造物は、従来から豪雨や地震等に

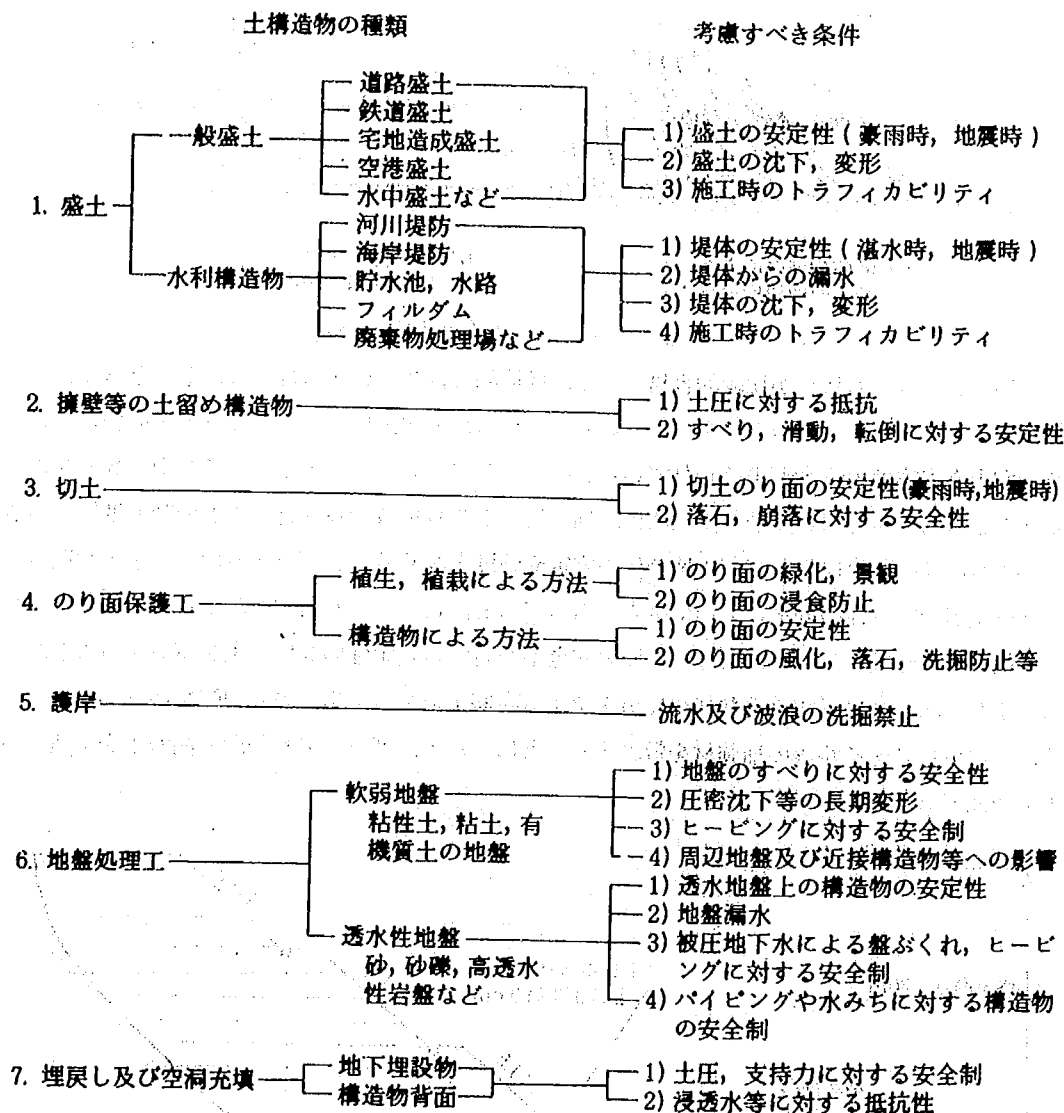


図-1 土構造物の種類と考慮すべき条件

表-1 混合土及び複合土を活用した盛土への適用工法

盛土補強工法	1) ジオキススタイルを用いる方法 (織布, 不織布, ネット類, ジオグリッド等) 2) 帯鋼, 鉄鋼等を用いる方法 3) 多数アンカー付鉄筋等を用いる方法
圧密排水工法	1) ジオテキスタイルを用いる方法 (不織布や複合製品などの排水材) 2) 人工材 (スラグ, 骨材など) 3) 石灰あるいは吸水材を用いる方法
軽量盛土工法	1) 発生材 (火山灰土, 水砕スラグ, 石炭灰, 焼却灰など) を用いる方法 2) 人工素材 (発泡スチロール, 気泡モルタルなど) を用いる方法 3) 軽量混合土を用いる方法 4) 中空構造物による方法 (コルゲートパイプ, ボックスカルバート, 多連カルバートなど)
水中盛土工法	1) 事前混合処理土による方法 (土砂に固化材, 増粘材等を加えてスラリー状にした流動化処理土等) 2) 残土や固化土等をジオテキスタイルで袋詰めにする方法

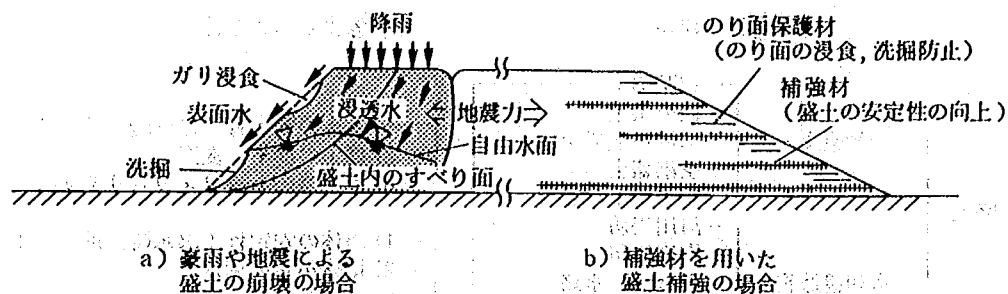


図-2 補強土工法による盛土の安定性の向上

よって損傷を受けても修復が比較的容易であり、構造的な補強を後から行うこともできることから、維持補修によって順次、その機能を高めていくという考え方が強いが、最近では土構造物の一層の品質の向上や安定性の増大が求められている。図-2(b)に示したジオテキスタイルや多数アンカー付鉄筋などの補強材を用いた補強土工法は、補強材の引張り抵抗や補強材と土との摩擦抵抗、あるいはかみ合わせの効果によって、土塊全体の安定や強度を高めることができるので、豪雨や地震に対する盛土等の安定性の向上に大いに役立つものである。特に、せん断強度が小さい良質の土でなくても補強材を敷設することにより、所要の安全率を有する安定性の高い盛土を築造することができる。また、図-3に示すような10~15mを超える高盛土であっても、のり勾配をゆるくすることなく、ジオテキスタイル等の補強材を敷設することによって、通常のにり勾配で高盛土を築造することも可能である。

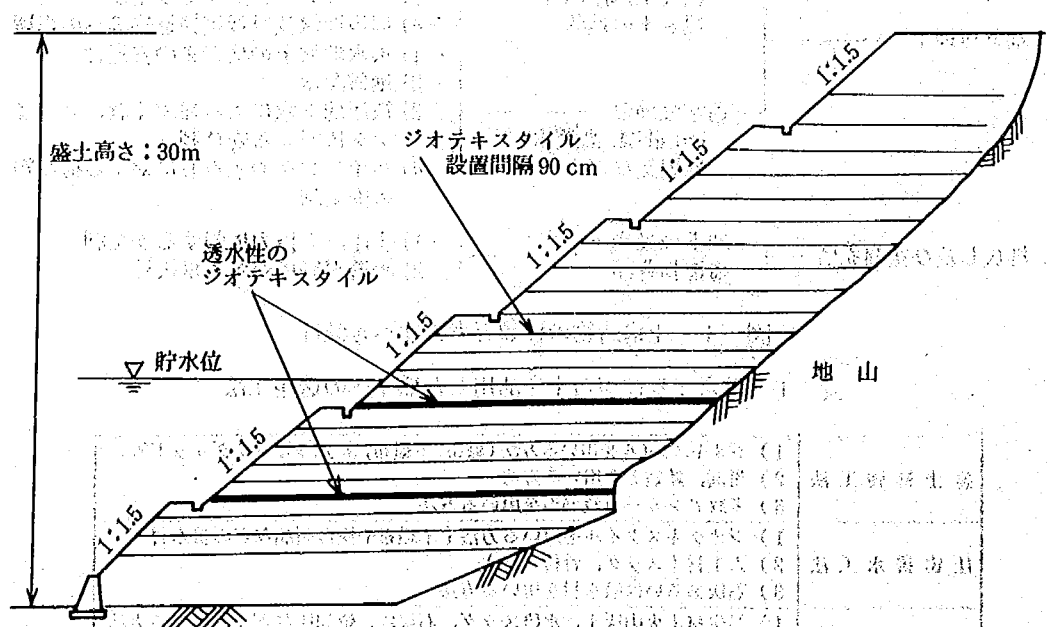


図-3 ジオテキスタイルを用いた補強土工法による高盛土(高さ: 30m)の施工例

3.2 急勾配もしくは垂直な壁をつくる補強土工法

土質材料を用いて盛土を行うと、盛土の安定を保つために、図-4(a)に示すようにのにり勾配を設

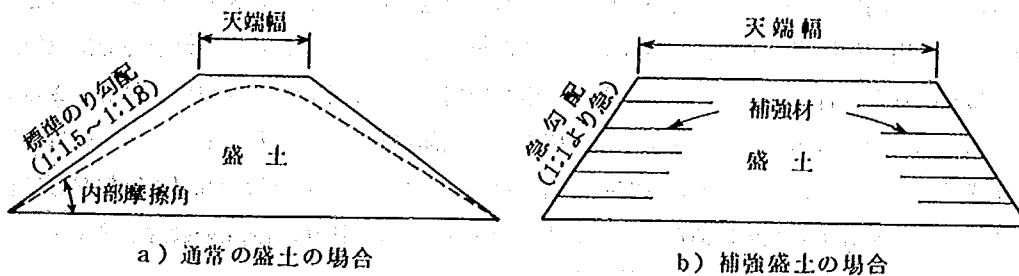


図-4 通常の盛土と補強盛土の比較

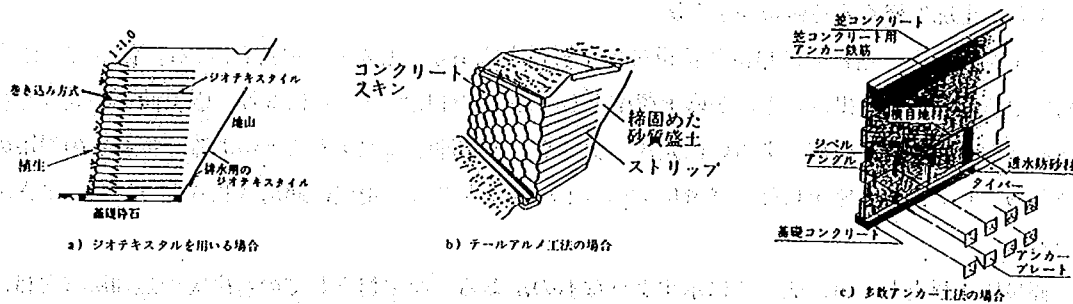


図-5 壁面を有する補強盛土の適用例

けることが必要となるが、ジオテキスタイルや帯鋼、あるいは多数アンカー付鉄筋などの補強材を敷設すると、図-4(b)のように急勾配の盛土を築造することができるようになる。また、図-5に示すように補強材と土との土圧軽減の効果によって垂直壁を有する盛土とすることもできる。

従って、補強材の効果で盛土ののり勾配を急にすることにより、用地を最小限におさえることが

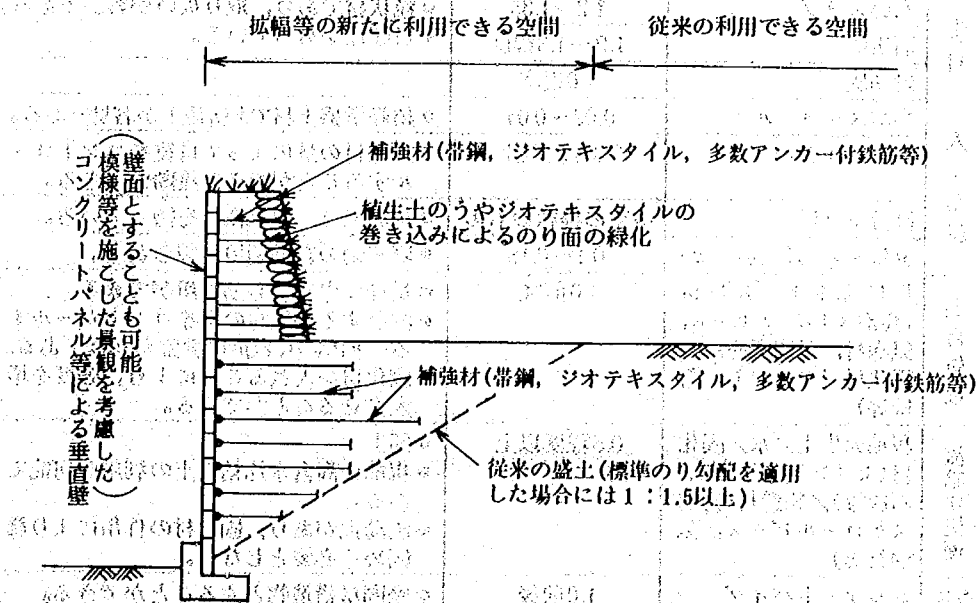


図-6 急勾配もしくは垂直な壁を有する補強土工法による既設盛土の拡張等への適用

できると共に、山岳地の盛土等においては、のり勾配を急にすることで長大のり面を壁けることが可能となり、周辺環境等への影響を少なくすることができる。また、都市部の盛土等では急勾配、もしくは垂直な壁を有する盛土とすることで、少ない用地での盛土の施工が可能となる。さらに、既設の盛土においては図-6に示すように、盛土のり面部に垂直な壁を持つ盛土、あるいは急勾配の盛土を築造することにより、新たな空間を造りだすことができ、道路等の幅員の拡張などに利用できる。なお、補強土の適用にあたって、ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル（土木研究所資料、第3117号）等の整備も図られている。

3.3 土塊を軽くする軽量盛土工法

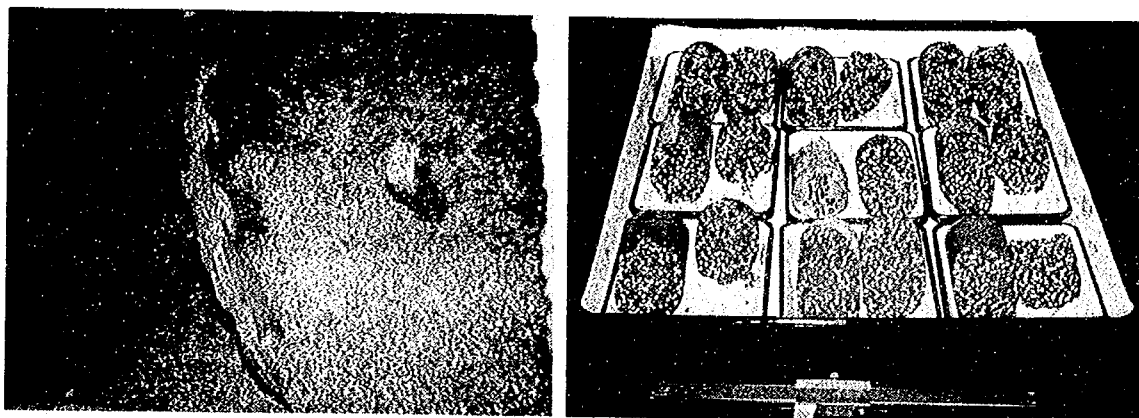
盛土を行うと、通常その単位体積重量は土質にもよるが、 $1.4 \sim 2.0 \text{ tf/m}^3$ である。従って、盛土高に単位体積重量を掛けたものが盛土荷重として地盤に作用することになり、盛土荷重が大きくなると、地盤のすべり破壊、あるいは大きな沈下や変形が地盤に生ずることがある。それらの対策のひとつとして最近、盛土自体の軽量化を図る工法が開発され、現場に適用されるようになってきている。

軽量盛土材としては、表-2に示すようなものがある。発生材としての石炭灰や焼却灰などは、通常の土砂に比べて軽いため、軽量盛土材として利用できる。また、最近では人工素材である発泡スチロールや気泡モルタル等が用いられている。このうち、発泡スチロールは単位体積重量が 0.02

表-2 軽量盛土材の種類と特徴

工法	使用する材料		単位体積量(tf/m ³)	特 徴	
量軽量材を用いる方法	発生材	軽量土砂(火山灰土等)	1.2~1.5	●天然の材料を用いることができる。	
		水砕スラブ	1.2~1.35	●粒状材であり、取り扱いが容易である。	
		石炭灰	1.2~1.3程度	●自硬性をもっている。	
		焼却灰	1.0程度		
	人工素材	発泡スチロール	0.02~0.04	●超軽量盛土材であり、施工が容易である。	
		気泡モルタル	0.3程度以上	●気泡材の量によって自重をコントロールすることができ、流動性がある。	
		高分子材料	中空の枠状のもの	●超軽量で、排水機能を持っている。	
		軽量廃棄物(空かん等)	0.1~0.18	●廃棄物の有効利用が図られる。	
現地発生材の軽量化	混合処理	現地発生土／軽量材(発泡スチロールビーズ、気泡材、石炭灰等)／固化材(セメント、石灰等)	1.0前後	●現地発生土の有効利用ができる。 ●混合する軽量材の量をコントロールすることにより、自重の調整が可能である。 ●固化材を入れることにより、強度を増大させることができる。	
		現地発生土／水／固化材(セメント系固化材、石灰等)／軽量材(発泡スチロールビーズ、気泡材等)	0.5程度以上	●同上 ●現地の高含水比粘性土の利用が可能である。 ●流動性があり、固化材の作用により締固めを必要としない。	
	中空構造物	盛土内に設置する構造物	コルゲートパイプ	1.0前後	●堅固な構造物とすることができ、
			ボックスカルバート	1.0前後	●構造物自体の沈下や変形を極力少なくすることができる。
多連カルバート等					

～0.04tf/m³と超軽量であり、人力での運搬や設置などの施工が可能である。気泡モルタルは、セメントと水のモルタルに気泡剤を加えて、流動性のある単位体積重量0.3tf/m³程度の軽量盛土材を現場で施工するもので、固化後は軽量で自立性のある盛土体ができあがる。さらに、土と発泡スチロールのビーズ等の気泡材とを現場で攪拌・混合する新たな軽量盛土材も開発されている（写真－1参照）。この軽量盛土材は、混合する気泡材の量を調節することにより、任意の単位体積重量のものが得られるとともに、固化材を適度に添加することにより強度も調節することができる。この他にも、コルゲートパイプや多連カルバート等の中空構造物による方法もある。



a) 土と発泡スチロールビーズとの混合状況

b) 供試体の作製状況

写真－1 土と発泡スチロールビーズとを混合した
軽量盛土材

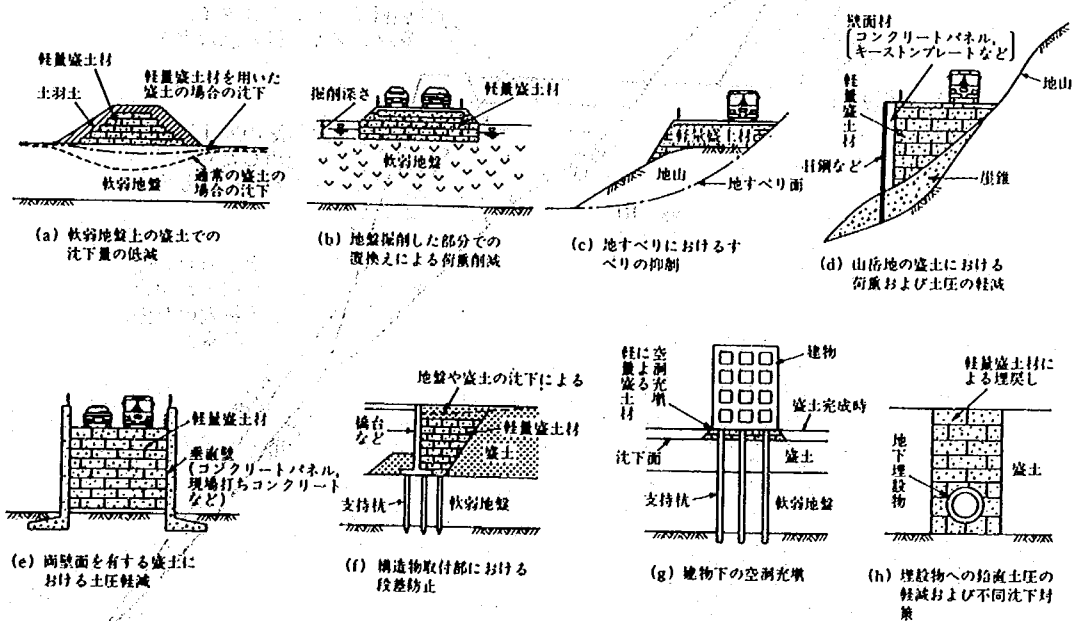


図-7 軽量盛土材の土構造物への利用方法

いずれにしても、軽量盛土材は従来の盛土材に比べて軽量であり、しかも自立性や流動性などを有しているものもあるので、それらの利点を生かして、図-7に示すような軟弱地盤での盛土による過大な沈下の抑制や地すべり地区でのすべり防止、あるいは山岳地等の盛土における土圧の軽減を図る土留め壁などに利用できる。また、都市部の盛土等では、自立性を生かした両壁面を有する盛土や構造物の取付部における段差防止、あるいは空洞充填、埋設物への鉛直土圧の軽減などに、確実に、しかも有効な対策工法として、軽量盛土工法は利用できる。なお、現場への適用に当たって、発泡スチロールを用いた土構造物の設計・施工マニュアル（土木研究所資料、第3089号）が作成されている。

3.4 周辺環境との調和を図る補強土工法

ジオテキスタイル等の補強材を用いた補強土工法は、図-8に示すように急勾配の切土や盛土に適用できることから、切盛りを少なくすることができる。すなわち、補強土工法によって切土を少なくし、しかも急勾配の補強盛土とすることで、所要の用地を確保することが可能となり、自然環

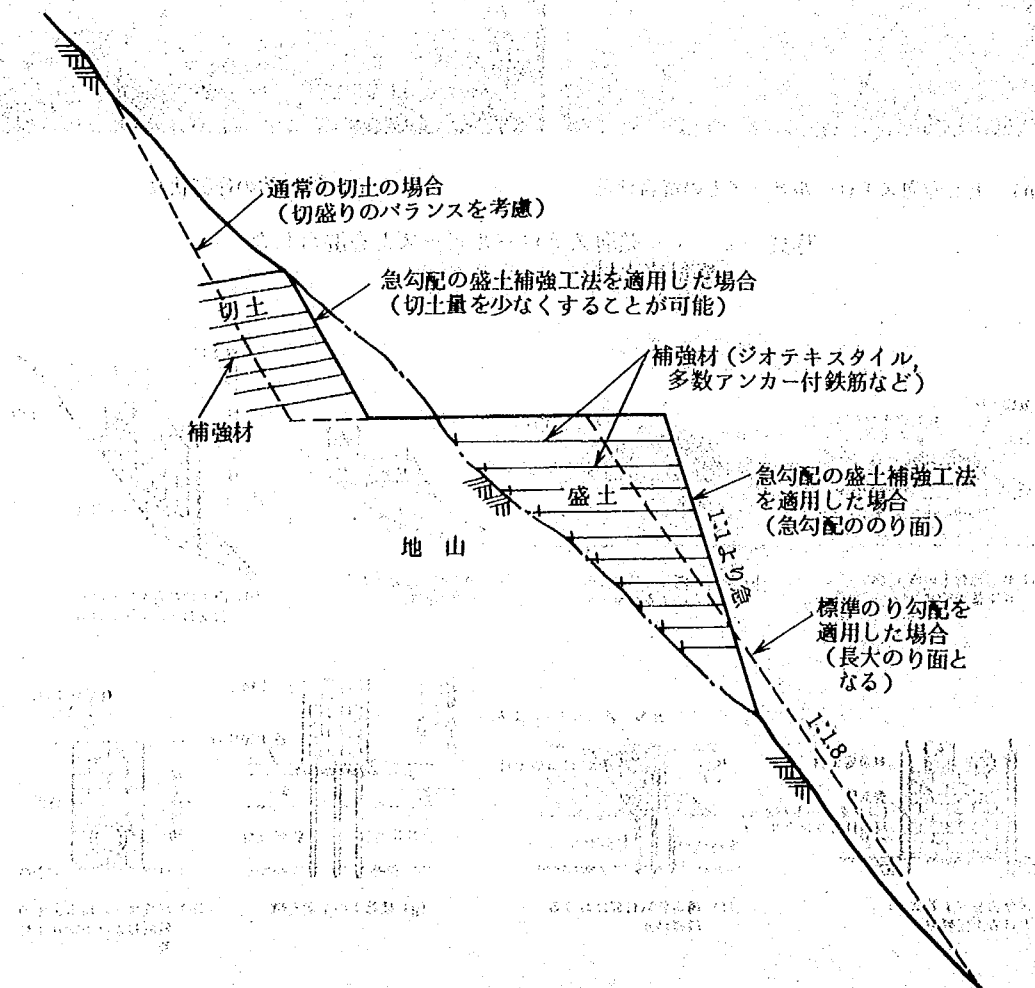
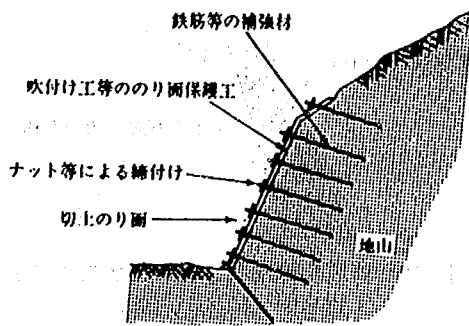
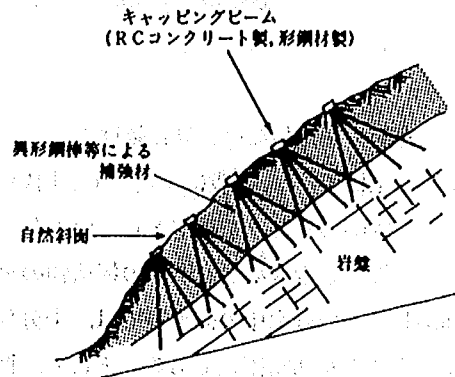


図-8 急勾配の盛土補強工法を山岳盛土等で適用した場合



a) 鉄筋挿入工法



b) 網状鉄筋挿入工法

図-9 切土のり面及び自然斜面における補強土工法

境への影響を少なくすることができる。ここで、切土への補強土工法としては、図-9に示すような鉄筋や異形鋼棒等の補強材による切土斜面の補強工法が開発され、現地の切土のり面に適用されている。鉄筋挿入工法は、切土のり面に数多く削孔した箇所に鉄筋等の補強材を挿入して、その周囲をグラウトし切土のり面の補強を図る工法である。また、網状鉄筋挿入工法（ルートパイル工法とも呼ばれている）は、図-9(b)のように異形鋼棒を同一方向でなく、三次元的に網状に配置して補強効果を高めるものである。この他にも、切土のり面を補強する方法として、PC鋼棒やPC鋼より線などの引張強度の大きい鋼材を用いたのり面アンカー工なども現場に多く適用されている。

片盛り部においては、3.2および3.3で述べたような補強盛土工法や軽量盛土工法を適用して盛土を急勾配、あるいは垂直な壁を持つ盛土とすることにより、長大なり面を避け、自然環境の影響を少なくすることができる。



写真-2 補強土工法による急勾配のり面での緑化の状況

また、のり面にはジオグリッドおよび不織布等を巻き込んで植生を施したり、植生土のうを積み上げるなどして、緑化を図ることもできる（写真-2を参照）。さらに、図-10に示すような長繊維連続糸と砂と種子土とを混地で混合して、それを締固めることにより土圧に耐え、しかも透水性があり、緑化も行える土留め構造物を築造する工法も開発されている。垂直な壁面を有する盛土等において、コンクリート製の壁面材を用いる場合には、これらの壁面材に色調やデザインに工夫

を加えることにより、景観の良い垂直な壁を有する盛土を築造することもできる。

3.5 締固めを伴わない流動化処理土

盛土等の土構造物は、一般に良質の土を用いて、それをよく締固めることを基本としているが、地中埋設物の埋戻しや狭い個所での構造物の裏込め、埋戻しあるいは水中の盛土等では、十分な締固めを行うことが通常困難である。そこで、掘削した残土などに比較的多量の水と固化材を加えて攪拌・混合することにより、流動性と固化性を持つ安定処理した土をつくる流動化処理工法が開発されている。この工法による流動化処理土は、流動性があることから、圧送によって現場で打設することが可能であり、しかも締固めを伴わずに、固化材の混合量を調整することにより、所要の強度のものを得ることができる。

表-3は、流動化処理土を埋設管の埋戻しに用いたときの配合状況を示したものである。流動化処理土は、水を加えて関東ロームの含水比を270%に調整したものに、セメント固化材を150kg/m³添加して攪拌・混合したものである。写真-3に示すように、ホースを通して圧送した流動化処理土は、埋戻管の底面および周辺部に回り込み、比較的均質な一軸圧縮強さが3.0~3.5kgf/cm²（3日強度）で、地山と同等以上の埋戻しが可能となった。舗装を完了した後、20tトラックによる走行実験（走行数30,000回）を実施したが、路面状況は従来の良質土の区間を遜色なく、良好な埋戻しが得られた。このように、流動化処理土による埋戻しは、掘削残土の有効利用とともに、確実な施工と締固めを伴わないので省力化が図られる。

さらに、流動化処理土は流動性があることから、圧送によりトレミー管などで水中打設することが可能である。しかも、締固めを伴わずに固化材の混合量を調整することにより、所要の強度を得ることができるので、水中盛土等に適した工法であり、東京湾横断道路の人工島などに適用されている。

この他にも、現地発生土を処理し、それを袋詰めにして、盛土等に適用する方法も考えられる。

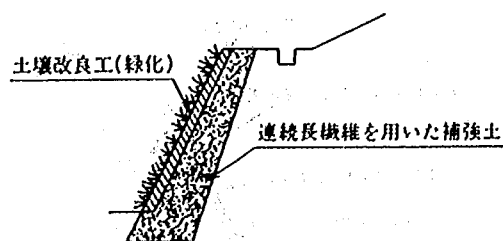


図-10 連続長繊維系を用いた補強土による土留め壁（緑化が可能）

表-3 現地発生土を用いた流動化処理土の配合表

調整含水比	関東ローム ($W_a=94\%$)	水	泥水比重	固化材
273 %	617 kg	583 kg	1.2	150 kg

（泥水1 m³当り）



写真-3 流動化処理土を用いた地中埋設管の埋戻しの施工状況

特に、高含水比の粘性土やヘドロ等の処理をその有効利用に適しているといえる。

4. 堤防、貯水池等の水利構造物への適用

河川堤防や貯水池等の水利構造物は、湛水時の浸透水によって、堤体が不安定になったり、堤体漏水を起こすようなものであってはならない。そこで、これらの水利構造物における浸透水の排除、あるいは遮水を目的として、ジオメンブレンやアスファルトなどを含着させた各種の遮水シートを用いた複合土が現地の堤防等に適用されるようになってきている。

また、河川堤防等の護岸や堰、越流堤などの構造物に対して、洗掘や吸い出し等を防止するとともに、基礎部の変形等についても追従できるような構造物が築造されている。

4.1 表層被覆による堤防補強工法

土砂等で築造された河川堤防は、本質的に水の作用に対して弱く、越水が起これると裏のり部が侵食、洗掘を受けて破堤したり、長期間の降雨、洪水に伴う浸透水によって堤体が浸潤してのりすべりを生ずることがある。

そこで、そのような河川水や雨水の作用に対して堤防の安全度を向上させるために、図-11に示すような止水性のジオメンブレンで堤体の表層付近を被覆するアーマー・レビー工法が現場に適用されるようになってきている。この工法は、表のり部からの河川水の堤体への浸透、あるいは雨水の浸透に対してはジオメンブレンでそれらの浸透を防止し、越水による裏のり部の侵食や洗掘に対しては、ジオメンブレンおよびふとんかごで防ぐこととしている。

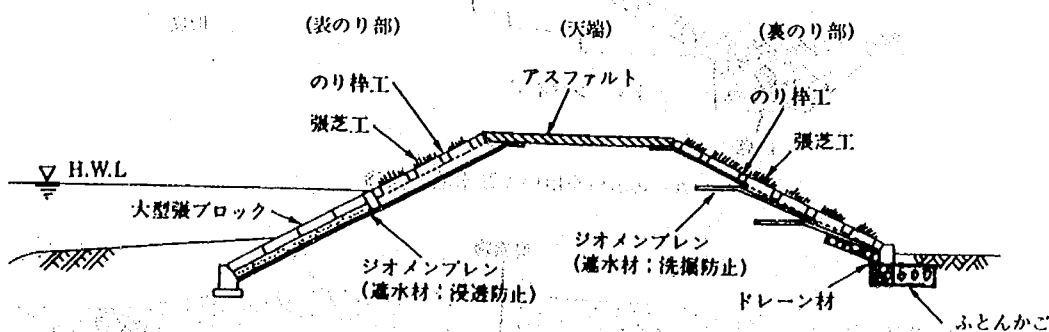
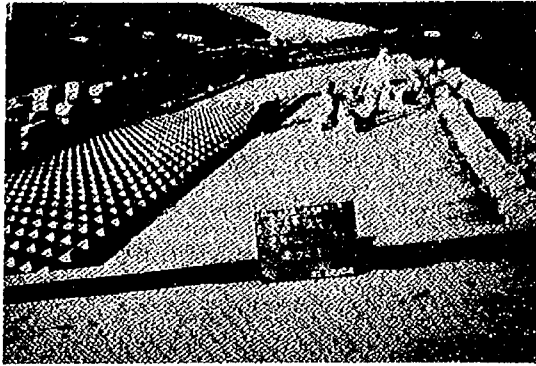
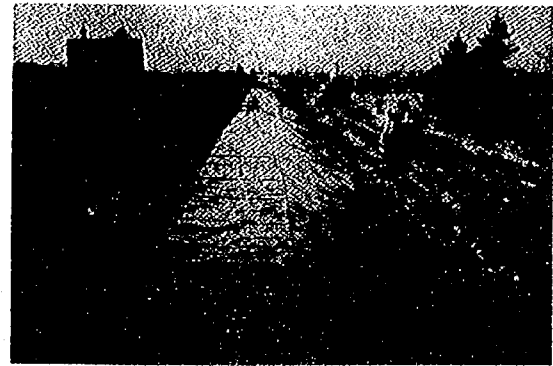


図-11 ジオメンブレンによる堤防補強工法（アーマー・レビー工法の概要）

写真-4(a)は、江戸川の堤防で降雨および河川水による浸透水に対する堤防の強化を目的として、表のり部をジオメンブレンによる遮水シートと連接ブロックを併用してアーマー化した施工の状況を示したものである。また、写真-4(b)は、加古川堤防のアーマー・レビーの施工状況を示したものである。加古川堤防では、表のり部とともに、裏のり部についてもジオメンブレンを敷設して、図-11に示した基本構造のものとなっている。なお、表のり部の一部では、景観護岸を採用して周辺環境への配慮がなされている。



a) 江戸川堤防での表のり部の
施工状況

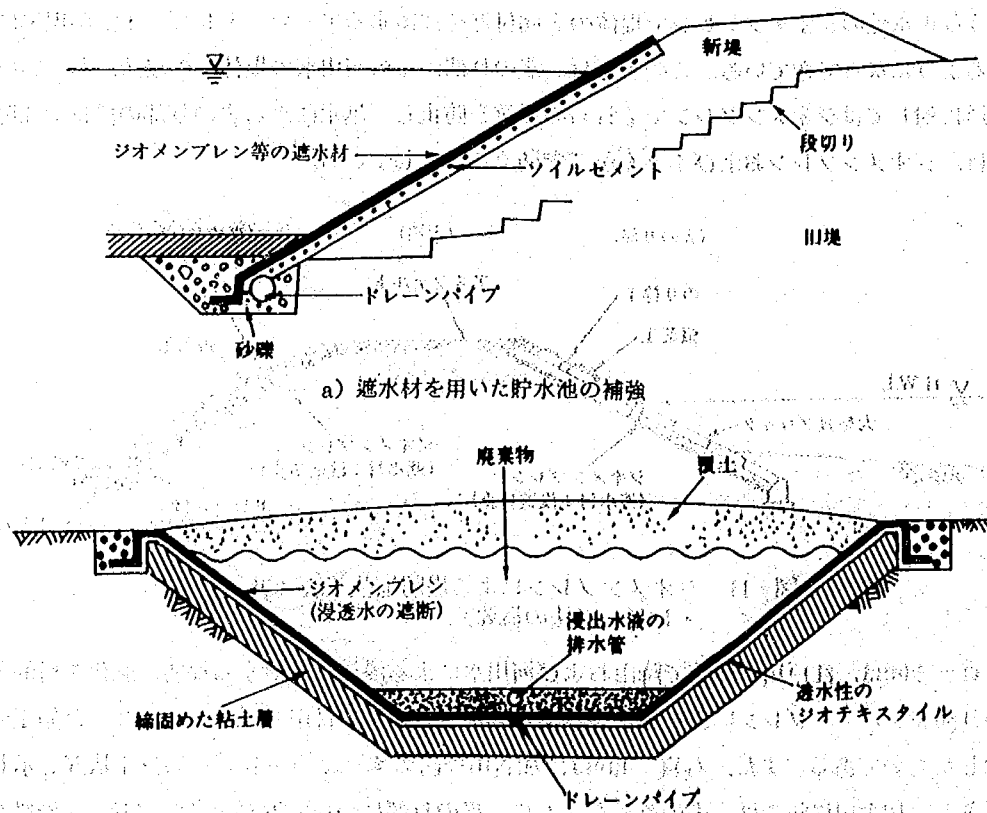


b) 加古川における裏のり部
の施工状況

写真-4 堤防補強工法の施工状況

4.2 止水性を高める表層遮水工法

不透水性の良質土が得られない場合や基盤の透水性の高い貯水池、小規模のダム等においては、堤体および地盤の漏水対策として、変形に追従しやすく、施工が比較的容易で、しかも遮水の効果



a) 遮水材を用いた貯水池の補強
b) 廃棄物処理場における遮水材の利用

図-12 表層遮水工法の現場への適用例

が得られる表層遮水型の構造のものが期待できる。図-12(a)は貯水池等の堤体補強として表面遮水材を用いた例を示したものである。この場合、長期の湛水において不透水性が確保でき、しかも水圧、波浪に対して十分耐え得る材料であるとともに、施工時の重機や突起物等によって、遮水材が損傷しないようにすることが大切である。また、不慮の事態による浸透水や地山からの地下水に対して、それらを排除するために遮水材の下にドレーン工や透水性のジオテキスタイルを敷設する方法が現場に適用されている。なお、コンクリート構造物等に接する個所では、漏水を起こしやすいので、ジオメンブレン等の遮水材は重ね合わせによる熱溶着などを確実に行って、漏水防止を図ることが必要である。

さらに、最近我が国においても、廃棄物の適切な処理が必要となってきた。廃棄物の中には、そのまま投棄すると有害物質が飛散したり、溶出して河川や地下水等を汚染するおそれがあるものもある。そこで、廃棄物の最終処分地について、図-12(b)に示すような、ジオメンブレン等の遮水材とジオテキスタイルとを組み合わせ、外部と廃棄物とを遮断する方法が最近用いられるようになってきている。今後、廃棄物の最終処理において、安全で、かつ経済的な遮水材を用いた遮水工法の適用が増大するものと予想される。

4.3 変形に追従できる河川構造物

河川堤防の護岸や堰、樋門・樋管等の河川構造物の基礎部は河川の流水や浸透水による洗掘、あるいは吸い出し、地盤の沈下等によって構造物に変状が生じ、機能が著しく損われることがある。そこで、図-13に示すように、河川構造物において洗掘および吸い出しを防止するとともに、地盤の変形等にもある程度追従できる可とう性の基礎部の構造のものが現場に適用されている。基礎部は、蛇かご状あるいは袋状のジオテキスタイルに碎石等を充填して、浸透水を速やかに排除し、同時に流水や浸透水による洗掘および吸い出しの防止を図っている。

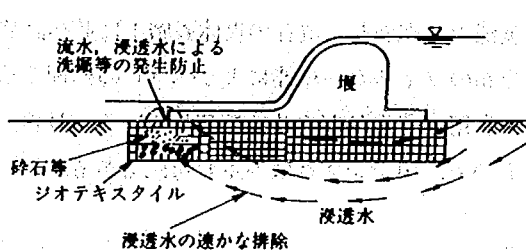


図-13 河川構造物における洗掘防止と変形に追従できる構造の基礎部の例

写真-5は、小貝川における可とう性を有する床止め工の例を示したものである。床止め工の基礎部は不織布と織布とを2枚重ねにして敷設し、流水や浸透水による洗掘、吸い出しを防止している。また、床止め工本体も写真-5のように連接ブロックを用いており、万一吸い出し等によって基礎部に変形が生じて、その変形に追従できる

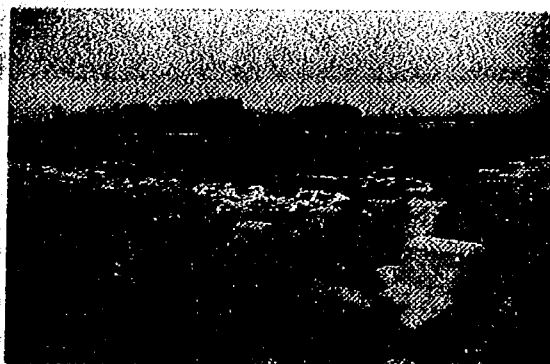


写真-5 ジオテキスタイルを用いた床止め工の状況（下館工事事務所）

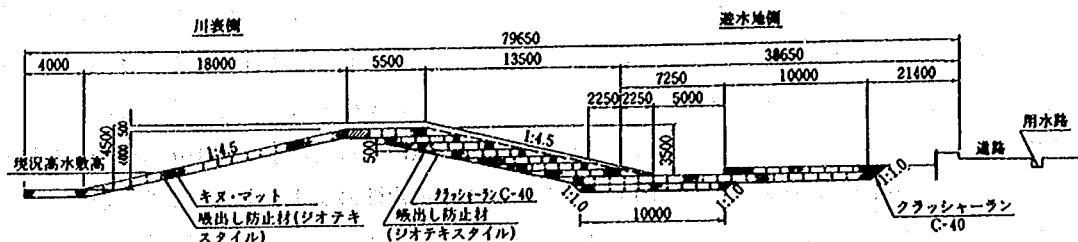
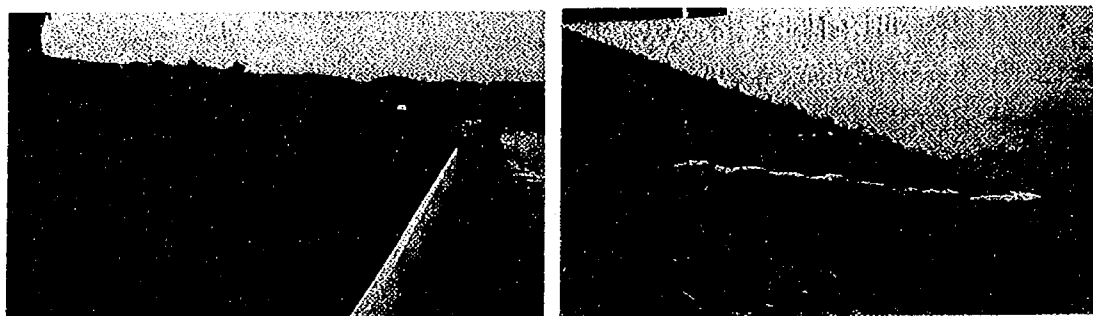


図-14 ジオテキスタイルを用いた越流堤の断面図 (下館工事事務所)

に示すような小貝川遊水池における越流堤の事例がある。この越流堤では、砕石を充填した蛇かご状の構造のものを越流堤の裏のり部の表層部に階段状に数段設置し、その下にフィルター機能をもつ不織布を敷設している。洪水時の越水による堤体の洗掘に対しては、砕石層における流水の減速と不織布とによって対処することとし、越水時の堤体土の吸い出しについては、不織布でそれを防止することを図っている。従って、この越流堤の構造では、その機能が保持されることともに、可とう性を有していることから地盤の変形等に対してもある程度追従できる構造となっている。また、変形等が生じた場合でも補修が容易であり、また嵩上げ等も蛇かご状のものを積み上げることで対処できるなどの利点を持っている。

この他にも、写真-6に示すような霞ヶ浦の堤防において、不織布を用いた袋状の中にヘドロ状の浚渫土を充填し、既存の堤体表層上に並べ試験的に護岸として適用した例がある。この護岸は、不織布のフィルター機能によりヘドロの処理とその有効利用が図れるとともに、可とう性の護岸として利用できるなどの特色を有している。写真-6(b)は、施工完了の3ヶ月後の堤体表層部を示したもので、覆土をすれば植生も可能である。



a) 袋状ジオテキスタイルの施工状況

b) 植生を施した施工後3か月状況

写真-6 袋状ジオテキスタイルを用いた可とう性の護岸の適用例 (霞ヶ浦工事事務所)

河川堤防に設置される樋門・樋管では、盛土との不同沈下に対処し、地盤の変形に追従できる構造のものと、図-15に示すような柔構造、柔支持の樋門・樋管が構築され始めている。この工法の基本的な考え方は、従来の支持杭を有するものに対し、樋管等の沈下を許容することを原則としている。従って、図-15に示したように樋管は、地盤の沈下に追従できるように分割し、それぞれ分割した樋管のブロックはPC鋼棒等で連結する。また、継手部はゴム等による可とう継手や弾

性継手とし、分割ブロックの継手部の下部の開きは、ゴム等の伸びによって止水性を確保する構造になっている。なお、柔構造・柔支持の樋管等の場合には、地盤の沈下に追従する構造となっていることから、その沈下量に見合った断面の余裕を当初から設計に見込むなどの配慮がなされている。

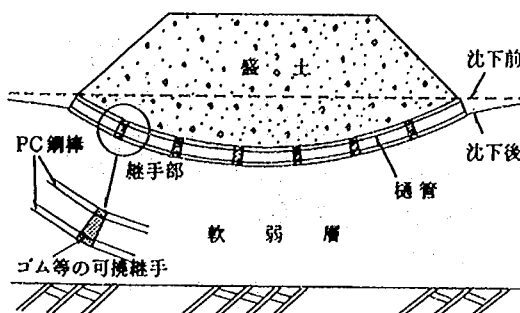


図-15 柔構造・柔支持の樋管の概要図

5. 地盤処理工への適用

最近の地盤処理工として、超軟弱な地盤や軟弱層の厚い個所、あるいは砂礫の地盤、亀裂の多い透水性の高い岩盤等での構造物の築造や、掘削工事などが増大している。また、市街地等での盛土工事や掘削工事では、近接構造物への影響を考慮した地盤処理対策が必要な個所も多くなっている。このような地盤条件や社会的な条件下においては、構造物の安定性とともに、周辺地盤を含めた構造物の沈下、変形、あるいは地盤の止水性などが問題となる。従って、それらの問題の解決に当たって、地盤処理を安全に、かつ確実に、しかも迅速に経済的に行うことが以前に増して求められてお

表-4 混合処理工法の種類と特徴

工法の種類		工法の概要	処理対象土	施工区域の実績	主な目的
浅層混合処理工法	粉体散布混合工法	地盤表面にセメント系、石灰系などの固化材を散布し、トレンチャー式・ローター式などの混合機で攪拌し固化する工法。	砂質土 粘性土	陸上	●トラフィックビリティー確保 ●支持力増加
	スラリー混合工法	セメント系固化材のスラリーを地盤に圧入すると同時に攪拌翼の回転により混合する工法。	粘性土	陸上 海上	同上
深層混合処理工法	セメント系深層混合処理工法	セメント系固化材のスラリー、セメントモルタルなどを地盤に吐出し、攪拌翼の回転で土と混合して固化する工法。	粘性土	陸上 海上	●地盤の破壊防止 ●土圧軽減 ●ヒービング防止 ●地盤沈下抑止
	石灰系深層混合処理工法	塊状の石灰を地盤に投入し攪拌翼の回転で土と混合して固化する工法。	粘性土	陸上	同上
	粉体噴射攪拌工法	セメント系、石灰系の固化材を粉体でエア圧送により地盤中に吐出し、攪拌翼の回転で土と混合して固化する工法。	粘性土	陸上 (海上)	同上
	高圧噴射攪拌工法	セメント系固化材のスラリーを回転する注入管から高圧で地盤中に噴射注入し、土と混合して固化する工法。	砂質土 粘性土	陸上 (海上)	●既設構造物の変形抑止 ●止水 ●ヒービング防止 ●シールド等の掘削補助
残土処理処分工法		セメント系、石灰系のはか、特殊固化剤などを用いて、汚泥、泥水、有害産業廃棄物などを固化し、埋立材料や充填材料に再利用する工法。	砂質土 粘性土 その他	陸上	●含水比低下 ●運搬性向上 ●盛土材としての利用

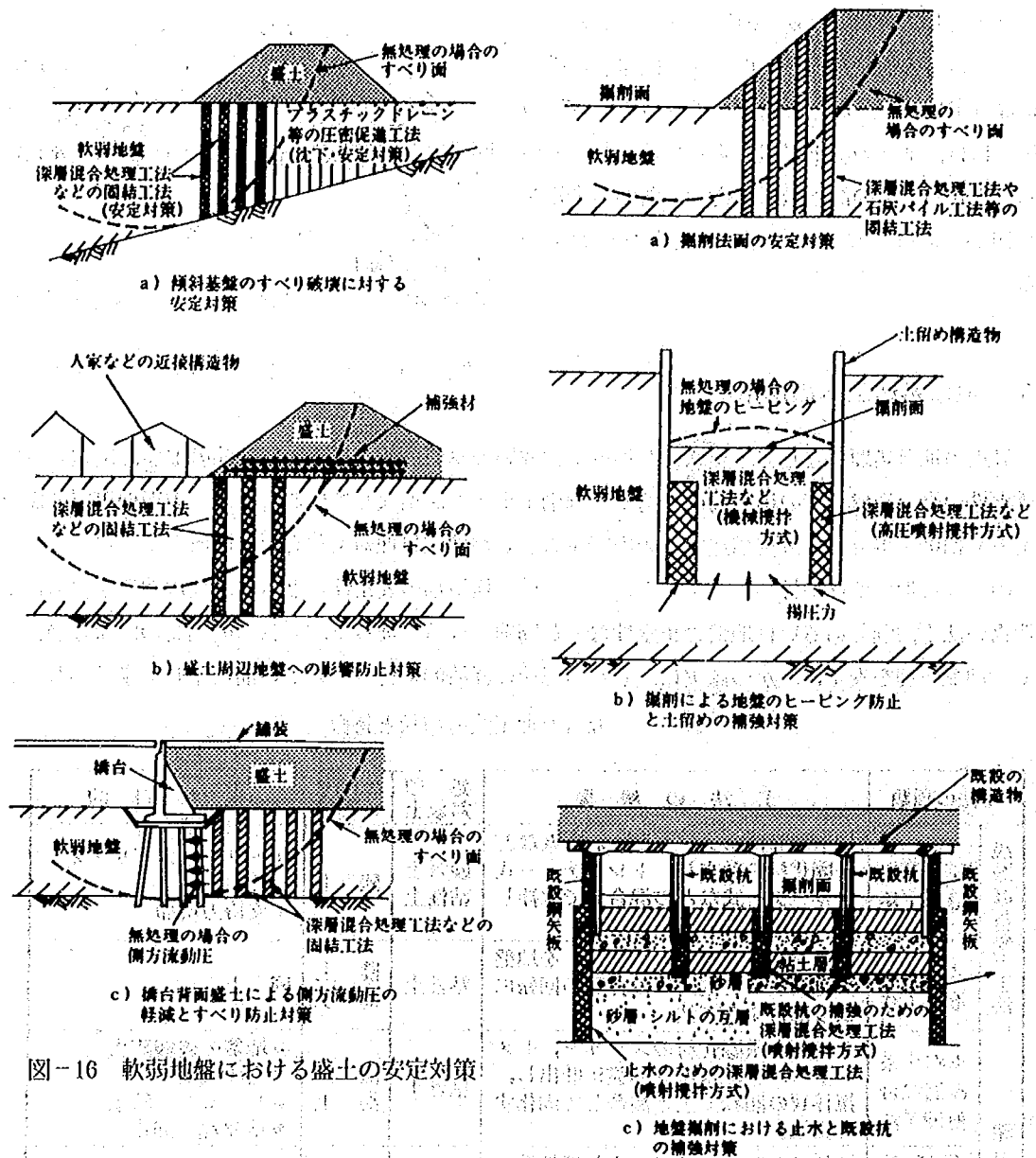


図-16 軟弱地盤における盛土の安定対策

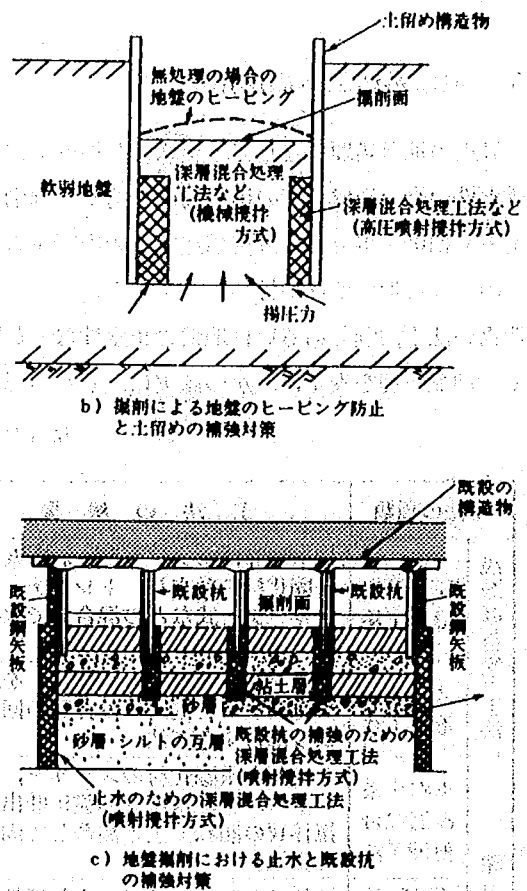


図-17 軟弱地盤の掘削における安定対策並びに補強対策

り、そのために早期に地盤の強度を高める混合処理工法や、地盤の止水性を高める薬液注入工法などの地盤処理技術が開発されている。

5.1 地盤を固める混合処理工法

混合処理工法は軟弱地盤において、原位置の軟弱土にセメント系、石灰系、あるいはセメント・石灰複合系の固化材を添加して、それらを攪拌・混合することにより、早期に固化した地盤または改良柱体をつくる工法で、表-4に示すようなものがある。

表層混合処理工法は、軟弱地盤の表層部にセメント系、あるいは石灰系の固化材などを散布し、トレンチャー式またはローター式の混合機などで攪拌・混合し、地盤の表層を強化するものである。この工法によって、地盤の表層1.0～4.0mの厚さの固化板を造ることができ、建設機械のトラフィカビリティや所要の地盤の支持力を早期に確保するのに役立つ。

深層混合処理工法は、攪拌翼あるいは高圧噴射等によって、短期間に所要の強度を有する改良柱体を造るもので、処理した地盤の強度や圧縮性が著しく改善される。固化材としては、セメント系、石灰系の固化材などが用いられており、工法によってスラリー状のものと粉体状のものとを用いる方法がある。深層混合処理工法は、図-16に示すような軟弱地盤のすべり破壊に対する安定対策や、周辺地盤への縁切りを目的とした影響防止対策、あるいは地盤の側方流動圧の軽減対策等に適用できる。また、図-17のように軟弱地盤の掘削における安定対策や、掘削に伴う地盤のヒービング防止と土留め壁の補強対策、ならびに地盤掘削における止水と既設杭の補強対策等にも役立てることができる。

この他にも、混合処理工法は現場発生土とセメント系および石灰系の固化材とを混合して、盛土材や埋立て材、充填材料として、その有効利用を図ることもできる。

5.2 止水や地盤補強に役立つ薬液注入工法

透水性地盤の土の間隙や岩のすき間などにセメント懸濁液、あるいは水ガラス系水溶液などの注入材を圧入して、地盤の改良を行う薬液注入工法が、止水工法ならびに地盤の補強工法として、広く用いられている。特に、最近新しい注入材として表-5に示すような非アルカリ系のシリカゾルや耐久性注入材、あるいはスラグを主成分とした懸濁型注入材、ゲルタイムを早める懸濁型瞬結性注入材、懸濁型の浸透性を増すための超微粒子セメントなどが開発されている。

薬液注入工法は、注入材の固化時間と注入方法、注入圧力などが改良効果を左右することになる

表-5 開発された注入材

中性グラウト (非アルカリ系注入材)	酸性領域に移行させた水ガラスを、アルカリによってゲル化させるもの。
耐久性注入材	活性化(イオン化)させた水ガラスを、あらかじめ土粒子表面カルシウムイオンを吸着させた地盤へ注入し、セメントの水和物の結晶を生じさせるもの。
スラグを主成分とした懸濁型注入材	ゲルタイムと固結強度を独立して決定するために、ゲルタイムを石灰に、強度をスラグに受持させたスラグ-石灰系材料を用いた懸濁型注入材。
懸濁型瞬結性注入材	半水せっこうや水酸化カルシウムなどの促進材によりゲルタイムを早め、瞬結性とした懸濁型注入材。
炭酸ガスを用いた注入材	硬化材として炭酸ガスや高濃度の炭酸水を用いた注入材。
高強度用溶液型注入材	高濃度の水ガラスと有機系硬化剤により、10～20kgf/cm ² の高強度の固結体を得ることが可能なもの。
超微粒子セメント	セメント粒子を細粒化したコロイドセメント(15μm残分;30%以下)、超微粒子セメント(10μm残分;10%以下)により、浸透性を改善した懸濁型注入材。

が、図-18に示すような砂礫層からなる透水地盤の厚い個所でも、部分的改良によって地盤の止水性を確保し、ヒービングの防止を図る方法が、現場に適用されるようになってきている。今後、より良い注入材の開発とともに、改良強度や改良範囲、脈状注入の有無などを精度よく、かつ簡易に判定する技術開発が望まれる。

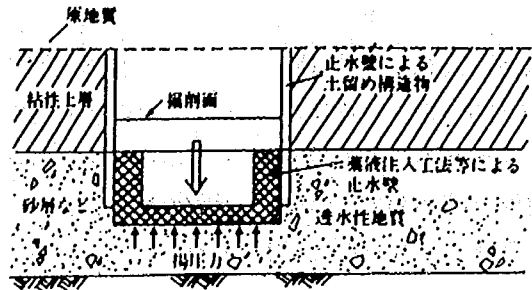


図-18 薬液注入工法によるヒービング防止の例

6. おわりに

土構造物の強化と高度化に向けて、各種の混合土や複合土を活用した最近の技術開発について述べた。特に、各種の混合土や複合土を用いた土構造物の築造技術は、必ずしも良質の土質材料でなくても、それらに添加材や補強材等を混合、あるいは挿入した混合土の強度などを適正に評価し、確実に施工することにより、従来のものに比べて安定性の高い土構造物を短時間に築造することができる。従って、各種の混合土や複合土を活用した土構造物の一層の進展が期待されるわけであるが、そのためには混合土が土と添加材との混合体、あるいは複合体からなっているので、それらの相互作用の解明や一体化の条件などの整備を通して、混合土や複合土を用いた各種の土構造物のより合理的な設計、施工法の確立が望まれる。また、混合土や複合土の品質が土構造物の安定性や変形、遮水性などに著しい影響を及ぼすことにもなるので、現場の条件に即した混合土および複合土の品質管理の手法についてより一層の検討が期待される。さらに、各種の混合土および複合土の耐用年数に関しても十分な検討を行い、土構造物の種類や目的、重要度等に応じて、50年、あるいは100年程度といった耐用年数を有する土構造物の築造が望まれる。

参考文献

- 1) 土木研究センター：土木新材料要覧，平成3年
- 2) 久楽勝行，青山憲明：建設分野へ利用される新素材・新材料（その6）—盛土・地盤用新材料—，土木技術資料，Vol.33，No.5，1991.3
- 3) 久楽勝行：ジオテキスタイルの土構造物への利用技術の開発，土木学会論文集，第424号，Ⅲ-14，1990.12
- 4) 土質工学会：補強土工法，土質基礎ライブラリー29，1986
- 5) 建設省土木研究所土質研究室，施工研究室，動土質研究室：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル，土木研究所資料，第3117号，平成4年3月
- 6) 久楽勝行：軽量盛土工法の特徴とその適用，基礎工，Vol.18，No.2，1990.2
- 7) 三木博史，林義之，青山憲明：発生土の高付加価値化技術の開発，土木技術資料，Vol.34，No.11，1992.11

- 8) 建設省土木研究所土質研究室, 動土質研究室: 発泡スチロールを用いた軽量盛土の設計・施工マニュアル, 土木研究所資料第3089号, 平成4年3月
- 9) 久野悟郎, 篠原洋司: 最近の締固め, 5. 締固めを伴わない安定処理盛土, 土と基礎, Vol.39, No.1, 1991.1
- 10) 財国土開発技術研究センター: 硬質塩化ビニル管および強化プラスチック複合管における流動化処理土を用いた基礎工法の適用性に関する調査報告書, 平成4年3月
- 11) 福岡捷二, 藤田光一, 加賀谷均: アーマー・レビーの設計, その1, 土木技術資料, Vol.30, No.3, 1988.3
- 12) 久楽勝行, 吉岡淳, 細谷政和: アーマー・レビーの設計, その2, 土木技術資料Vol.30, No.3, 1988.3
- 13) 福岡正巳: 産業廃棄物処理場におけるジオテキスタイルの利用, ジオテキスタイルの適用性に関する発表論文集, 土質工学会, 平成2年3月
- 14) 三木博史, 林義之, 佐藤正博: ジオテキスタイルの河川構造物への適用例について, 土木技術資料, 新しい技術情報, Vol.34, No.3, 1992.3
- 15) 財国土開発技術研究センター: 軟弱地盤上の樋門・樋管設計の手引(案), 平成3年12月
- 16) 苗村正三, 小野寺誠一: 止水工法の現状-注入工法・地盤改良工法-, 基礎工, Vol.18, No.8, 1990.8

地下空間の利用技術の開発

地下開発研究官 水谷 敏 則

地下空間の利用技術の開発

1. はじめに

わが国における国土空間の利用においては、価値観の多様化等を反映してその質的向上が求められている。

地下空間は、今後の国土基盤整備の展開にあたっての貴重な空間資源として大きな役割を期待されており、しかも、単に地上空間の代替空間としてばかりでなく、地下の持つ特性を積極的に活用した空間、技術の進歩によって創造される新しい空間としての開発利用も期待されている。

こうした状況のなかで、建設省では昭和62年度より5ヶ年計画で総合技術開発プロジェクト「地下空間の利用技術の開発」を進めてきた。本プロジェクトは、首都圏などの大都市域における地下空間の安全で合理的な開発利用を図ることを目的としたものであり、まず地下空間の利用の実態と地下特性に応じた合理的な利用形態等を総合的に調査研究し、次に、都市の高密度化等に伴い今後大規模・大深度化そして輻輳化が進む地下空間の開発利用にあたって必要となる地中情報の利用技術、設計・施工技術及び環境保全技術、さらに地下空間の防災対策技術や環境制御技術等の開発を行った(表-1.1)。

ここでは、本プロジェクトの中から、土木研究所が中心となって実施した土木分野における地下空間利用技術の開発に関する研究成果の概要を紹介する。

表-1.1 総プロ「地下空間の利用技術の開発」の主な研究課題(*:土木研究所担当)

- | |
|---|
| 1. 地下空間の利用形態の研究
(地下道路* 地下河川* 都市の拠点地区地下空間・大規模地下空間) |
| 2. 地中情報の利用技術の開発
(地盤調査技術* 地盤情報利用技術* 地中地図作成技術) |
| 3. 地下構造物の設計・施工技術の開発
(トンネル建設技術* 土留め・立坑技術* 耐震設計技術* 地下建築物の防水・液状化対策技術) |
| 4. 環境保全技術
(地盤変状対策技術* 地下水環境保全技術*) |
| 5. 防災・環境制御技術の開発
(地下道路の火災・地震防災対策技術* 地下建築空間の煙制御・温熱環境予測・制御技術) |

2. 地下空間の利用形態

地下空間は、狭小な国土を有効に利用するための貴重な空間資源であり、また地下の持つ特性に応じた開発利用も期待されている。特に大都市部では、高密度化の進行に伴い、今後の地下利用は大規模化、大深度化、輻輳化することは避けられない状況にある。

本研究では、まず都市部における地下空間利用の現況と将来ニーズを把握し、潜在的地下空間利用の需要予測を行った。一方、現時点における地下空間建設技術レベルの現状を把握するとともに、今後の地下空間利用のニーズに対応するために必要な新たな技術開発課題の抽出を行った。これらの成果を参考として、次章以下に述べる技術開発に取り組んだ。

ここではさらに、道路あるいは河川及び調節池などのインフラ施設に関して、地下化に要求される機能・構造の検討、地下化に伴う付加施設設置の可能性、等の地下利用に伴うメリット・デメリットを経済的、技術的側面から洗い出し、地下の諸特性を生かした合理的な地下空間の利用方法を検討した。

2.1 地下道路の検討

わが国の都市部の道路交通においては、慢性的な交通渋滞や駐車場不足が大きな問題とならているが、建設のための用地取得の困難から整備が遅れている箇所が多い。道路を地下に建設した場合、建設費は高くなるが、騒音等の地表の環境への影響は少なくすることができるメリットもある。

ここでは都市部の地下に道路（自動車専用道路）および駐車場を建設することを想定したケーススタディーを行った。検討条件としては、トンネル延長を20km、道路路面深度を15m、30m、50m、100mの4ケース、トンネル施工法を開削、シールド、山岳工法の3工法、対象地盤を東京の下町地盤、山の手地盤の2種類と設定した。

各種トンネル工法の比較において、建設コストの面では、地山条件、深度、等によっても変化するが一般には開削工法、山岳工法に比べてシールド工法が有利であった。また、地下道路以外の高架橋梁形式との比較検討の結果では、工事費だけでは約5～6倍となる例もあるが、用地費を加えた建設費ではどちらが有利であるか予断ができない。

今後、都市部の高度利用の進展を考えると空間利用の輻輳化は免れない。それに伴い都市内道路の計画も、単に建設コストの面だけでなく、経済社会への影響、周辺環境への影響、工期、等のほか、付加施設との複合整備による新たな価値の創造などを含めて総合的に検討する必要がある。

2.2 地下放水路及び地下調節池の検討

治水対策の分野では、頻発する洪水被害に対処するため継続的な治水投資と事業推進の努力がなされているが、高い地価とそれに伴う国土の高度利用等の理由で、地上部において実施される河道の拡幅等の河川改修はなかなか進展しない場合も多い。この傾向は都市部になればなるほど顕著で、放水路や調節池といった施設を地下部に設け、治水対策とする事例が増加している。

ここでは放水路、調節池の地下化に関するケースを設定することによって、地下施設どうしの比

較及び地上での河川改修等と地下施設との比較を、技術的、経済的側面から行い分析を加えた。検討条件の設定として、地盤は東京の山の手地盤、下町地盤を想定し、深度は近未来の施工技術を考慮して最大深度は100mと想定した。放水路の延長は市街地の広がりを想定し10kmとし、拠点的な施設との比較を行うため一部5km、2kmについても検討した。

分流量が100m³/sのときの地下放水路（シールド工法）と地下調節池について試算した事業費をみると、

- (1) 地下放水路は、全ケースを通じて工事費及び用地費のウェイトが高く、大深度になると発電施設の絶対額も大きくなる。
- (2) 地下放水路の全ケースを通じて最下流に位置する排水部のウェイトが高く、最も低いケースでも63%を占めた。これは、地下放水路の流下方式を開水路方式としたため排水部が大規模となったためである。このため、放水路の延長を短くしても地下放水路の全体工事費はそれほど大きな変化はなかった。
- (3) 地下調節池は、大部分のケースで地下放水路に比べて安い。全体事業費に対する用地費の占める割合は大きい。なお、地下調節池の設置深度が浅い場合(H=15m)にはかなり高くなる。なお、この傾向は、地下施設の設置深度、用地補償費や工法などの条件によっても変化するもので、具体的なケースについては精査が必要である。

3. 地盤情報の調査・利用技術

3.1 地盤調査技術

わが国の沖積平野に立地する大都市の地盤は、一般に軟弱で複雑な構造と物性を呈する厚い沖・洪積層で構成されている。したがって都市域での大規模な地下空間施設の設計・施工計画の立案にあたっては、地下水位が高い軟質地盤における合理的な設計・施工法を適切に選定するのはもちろん、沖・洪積地盤に特徴的な問題、すなわち地盤環境の変更に伴う地盤の变形や地下水への影響を評価し、また大深度での高い拘束圧下における土圧・水圧を適切に評価し、その対策をたてることが特に重要であり、このための地盤構造の探査や地盤の力学的特性の評価、いわゆる地盤調査技術の果たす役割は以前にも増して大きくなってきている。

都市域で施工された大規模地下工事において用いられる地盤調査手法としては、ボーリング調査が普遍的に用いられており、ボーリング孔を利用した各種調査が補助的に併用されているのが現状である。

ボーリング孔を利用して地盤特性を評価する手法としては、直接孔内で求める物理検層やサウンディングによる方法と不攪乱試料をサンプリングして室内試験で求める方法とに大別される。大深度の地盤調査においては、高い拘束応力、高い貫入抵抗、多様な地層（多様な土質、固結度、応力履歴）等のため、既往の調査法の改良あるいは新しい調査法の開発が必要とされる。力学試験のための不攪乱試料の採取は、特に未固結の場合困難であり、特に大深度の砂礫地盤については、有力な調査法が確立していない。既存の調査手法の中で大深度に適用し得るものとしてはPS検層等の

孔内物理検層、孔内載荷試験、大型貫入試験が有望である。

しかし、これらのボーリングによる調査法は、特定の地点の地盤構成や地盤特性を直接的に確認することは可能であるが、広い範囲についての面的、立体的な地盤構造を把握するのに適切な手法であるとはいえず、その把握には極めて多数の調査が必要とされる。この欠点を補うものとして面的な構造の評価が可能である各種物理探査手法の適用があるが、現時点では余り利用されていない。これは、物理探査手法が都市域での調査実施上の制約をよりきびしく受けるためであり、人工的ノイズの多い都市域での適用性向上技術の開発が待たれている。

上述した大深度地下空間開発のための地盤調査法の適用上の現況と課題から、特に適用性の高い手法と考えられた孔内検層法、孔内載荷試験法、浅層反射法及び地下レーダー探査法について、現場実験を含めた研究を実施した。

① 孔内検層法

物理検層法は、これまで測定精度あるいは他の地質工学的指標と結びつけにくいなどの問題点を有していたことから土質地盤の調査に余り適用されなかった。都市域における大深度地盤調査においては、用地条件等から高密度でボーリング調査を行なうことが非常に困難であること、したがって各孔において多種

目のデータ取得が要求されることなどから、地盤定数の推定・評価は近年、室内試験から原位置試験・測定に重点が移行してきている。

例えば図-3.1は、S波区間速度とN値との関係を示したもので、両者の間には非常に明瞭な相関があることが確かめられた。

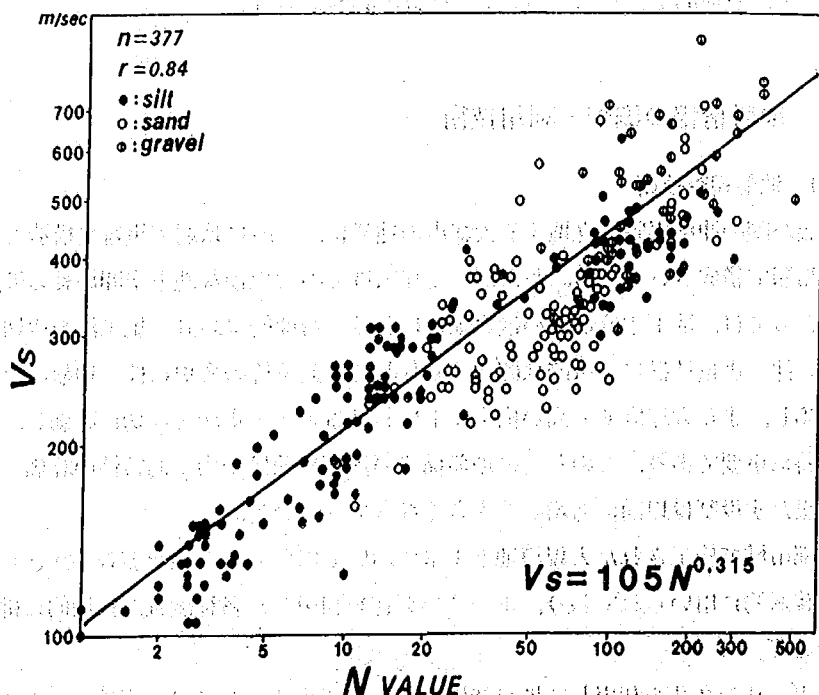


図-3.1 S波区間速度とN値との関係

② 孔内載荷試験法

孔内載荷試験は、地盤反力係数や変形係数などを求める方法として用いられてきた。孔内載荷試験結果は試験の行われるボーリング孔壁の掘削に伴う孔壁の乱れに影響されることが知られており、それを克服するために載荷試験機自体に削孔機能をつけて孔壁の乱れを極力少なくして試験機を載

荷位置に挿入するセルフボーリング式の孔内載荷試験機の研究が進められている。

そこで、従来のプレボーリング方式(PBP)とセルフボーリング方式(SBP)の両方式による現場試験を行いその比較を行うとともに、これまでに提案されている解釈の手法のいくつかを実際に試験結果にあてはめて検討した。

- (1) SBP試験は、比較的軟弱な地層においても大深度の基盤層に相当する比較的硬質な地層においても適用可能であるといえよう。
- (2) SBP試験は、PBP試験に比べて現状では施工性において劣るが、その反面、得られるデータの質では勝ることがわかった（特に、初期せん断剛性率のデータに関して）。
- (3) 初期せん断剛性率より、除荷・再載荷ループから得られるせん断剛性率の方が孔壁の乱れの影響を受けておらず信頼性があるといえよう。
- (4) せん断剛性率は、試験時のひずみレベル、応力レベルの影響を受けており、これらを考慮に入れて設計の際に使うことが望ましいといえよう。
- (5) せん断剛性率とひずみレベルの関係は、今後、現実の地下構造物の施工に伴う挙動と、地盤調査結果から定めた地盤定数を用いた解析との対比を図り、地盤調査の精度が設計に及ぼす影響やあるいはひずみレベルが現実にもどのように影響しているのかを検討する必要がある。
- (6) 砂質土においては、せん断強度のうち、排水条件下における内部摩擦角についてはある程度正確に求められることがわかった。難透水性と見なされるシルト層に関しては粘着力はかなり大きな値が算定されたが、現場載荷条件と室内せん断試験の載荷条件の差（初期圧密条件、せん断方向）の影響が与えられるが、今後の課題として残された。

③ 浅層反射法

探査目的を地盤構造の評価に限定すると、適用性が高い手法は浅層反射法であり、特にS波を用いた場合、P波探査に比べてより高分解能の探査が可能なことや地下水の影響を受けにくいこと、交通振動ノイズへの耐性が大きい、得られるS波速度構造を用いて地盤物性を評価することができる等のことから最も適用性

が高いと考えられる。

表 3.1 浅層反射法による探査・解析マニュアル（案）：目次

浅層反射法は、線状の探査測線の調査で疑似地質断面を得ることができ、都市域における面的地盤探査手法として最も実用段階に近いレベルにある。しかし、同法については都市域での適用実績が少なく、また探査・解析手法についても統一化された基準がなかったため、探査成果の品質が保

第1章 総論	第3章 データ処理
1節 総論	9節 データ処理装置
第2章 測定	10節 データ処理の進め方
2節 測定計画	11節 データ処理の内容
3節 起振装置	第4章 解釈
4節 受振器	12節 解釈
5節 記録器系	第5章 成果及びとりまとめ
6節 測定パラメータのテスト	13節 成果
7節 測定準備	14節 とりまとめ
8節 測定	第6章 参考資料

障されないという重大な問題点を有していた。

このため、まず都市域での現地実験を実施し適用性の向上を図った。現地実験の結果、深度4m～10m付近の地下構造が明瞭に捉えられることがわかった。さらに、都市域での同法の作業性向上技術開発の一環として、海域で利用されている音波探査用のストリーマケーブルの技術を応用したランドストリーマー（陸上用牽引型弾性波探査ケーブル）を考案した。これを利用することにより探査時間が大幅に短縮され、都市域での調査に必要な占有時間及び面積を最小限とすることが可能となった。

これらの成果を、都市域の地盤条件、測定条件を考慮した浅層反射法による探査・解析マニュアル（案）としてまとめた（表-3.1）。

④ 地下レーダー探査法

本探査法は、現在実用化されつつある段階にあるといえるが、この手法の適用にあたっては以下に指摘するような種々の制約があり、地盤条件や探査時間等によっては良好な成果が得られない場合もあるので、実用化に向けて解決しなければならない多くの技術的な課題が残されている。

- (1) 探査深度が地表から1～2m程度までに限られる。
- (2) 特に比抵抗の小さい地盤（泥炭など）では、電磁波の急激な減衰によって探査自体が困難となる。
- (3) 極浅部（数10cm以浅）の探査では、強い直達波のために信号の歪みが生じ、正確な結果が得られない。
- (4) アンテナの形態やアンテナと埋設物との方向性、アンテナと地表面との間隔によって記録の解像度が影響を受ける。

そこで、同法の適用性向上のために、モデル実験を行い現地測定条件とデータ処理条件について検討を加えるとともに、測定システムについての技術的課題を整理した。

モデル実験の結果、原記録をデジタル化し適切な処理を施すことで埋設管からの信号のみを強調することができ、客観的な評価が可能になることがわかった。

計測システムに対する検討の結果、高周波サンプリング回路の機能向上が高精度・高分解能の計測に最も重要な課題であることが指摘された。

3.2 地盤情報利用技術

都市域における地下空間の開発に先立ち、対象地盤のみならず広域的な地質情報を収集・解析することが必要とされる。しかし、都市域では既設構造物による障害や用地難等により、新たな地盤調査の実施には大きな困難が伴うようになってきている。

一方、都市域では各種構造物の建設に伴い膨大な量の地盤調査が過去に実施されてきており、そのデータが有効に利用できれば広域的な地盤評価を効率的に行うことができる。しかし、それらのデータは一括管理されておらず、また、単に資料を収集するだけでは必要とされる情報をそこから自動的に得ることはできない。

そこで、既存の地盤調査データから地下空間開発のために有効に利用できる高度の地質情報を生

み出すことができる地盤情報処理システムの開発を目指した。

全体システムの根幹部分である地盤情報処理技術は、1次元のボーリングデータから2次元、3次元の高次の地盤情報を生みだすことを可能とするものである。これにDWM(Dynamic Waveform Matching)による自動地質対比システム、および専門的知識のプロダクションルール化に基づいた地質解釈を実行するエキスパートシステムを用いることによって、地質断面解釈をパソコン上で半自動的に行えることを明らかにした。実行結果は専門家による対比結果と概ね調和的であり、処理時間もデータ入力を除けば1分以内と短時間で結果を得ることができた。

また、処理結果をもとに地盤の3次元構造モデルを作成し、それを管理・表示するシステムを概成した。ベースシステムとしてUNIRAS, LYNXを用い、ボーリング位置図、背景地図表示、N値スライス図、地層境界面鳥瞰図、支持層等深面鳥瞰図、ボーリング投影図、断面図、フェンスダイアグラム、3次元ブロックダイアグラム等の図が表示できるようにした。出力の例として、図-3.2にN値スライスマップを示す。地盤情報の表現およびその理解にこれらの疑似3次元(カラー)表示が極めて有効であることが確かめられた。

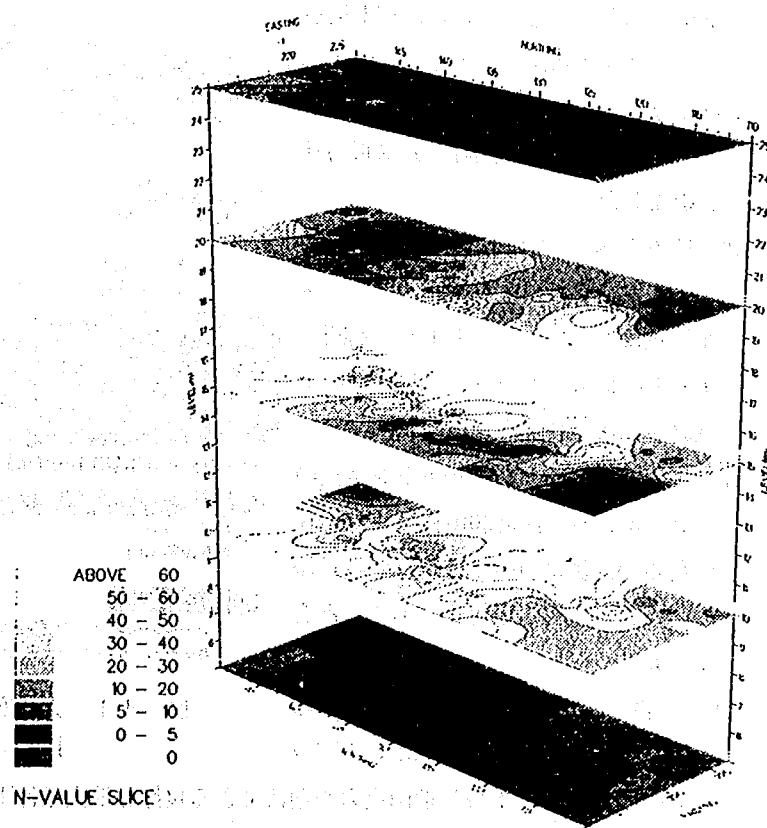


図-3.2 地盤情報の表示例(N値スライスマップ)

4. トンネル掘削技術

4.1 シールドトンネル工法

都市部における下水道、地下鉄、共同溝等の地下施設の建設に際し、シールド工法は地下水位が高く軟質地盤における代表的なトンネル工法として発展し、普及してきた。

今後の地下空間の開発を進める場合、浅深度においては輻輳する既設の構造物等により制約を受けた中での施工を余儀なくされ、また、さらに大深度を対象とせざるを得なくなることも予想される。加えて、地下道路等では大断面で複雑な形状に対する新たな要望もできている。これらの新たなニーズを踏まえ、必要となる設計・施工技術の開発を行った。

① 大深度・大断面シールド

3車線規模の道路トンネルを想定して直径約20mのトンネルを地下深度50mから100m程度の地下深部に建設することを目標とした技術開発を行った。まず現状の技術レベルから予想される技術的課題を抽出した後、最重要課題と考えられる各要素技術について詳細な検討を実施した（図-4.1）。

(1) 大深度・大断面シールドにおいて掘進に伴う地盤変状を予測する際の留意事項を示すとともに、特に、切羽抵抗圧や裏込注入状態などの施工条件が地盤変状に及ぼす影響が大きいことから、これらの条件を加味した解析方法を提案した。

(2) 地下水への影響予測について、3次元の浸透流解析によりシールドトンネル構築によって生じる地下水の遮断、水みちの形成、対策工の効果について試算により状況を把握した。

(3) 大深度・大断面シールドトンネルの設計にあたり、深度50m程度までの作用荷重の評価については現行の設計法の考え方で概ね適用可能であることを示した。

(4) 大深度下でのセグメント継手の構造について、梁バネモデルによるパラメータ解析では、十分な地山反力を期待できる良好な地山条件下ではセグメントの組み方を芋継ぎ方式とする方が構造的に曲げモーメントが小さく経済的となることを示すとともに、分割数、材質、止水性についての基本的な考え方を示した。

(5) 大深度・大断面下の泥水式工法の切羽の安定について、泥水圧の設定位置と泥水の比重を考慮することで現状の切羽安定の理論の安定範囲を満足する泥水が作成可能であることを示すとともに、切羽の安定が比較的困難となる礫地盤を対象とした数種の泥水実験から泥水管理の考え方や逸泥に対して注意が必要となることを示した。

(6) 大深度下の泥土圧式工法の切羽の安定に大きく影響する止水及び山留めについて、高水圧下の実験からスクリーコンベアの適切な構造、運転管理のもとで掘削ズリの排出が十分安定することを示した。また、添加材についての高水圧下での実験より、対象土に応じて現在一般に使用されている材料を適切に用いることにより適正な濃度・粘性のもとで十分な止水性が得られることを示した。

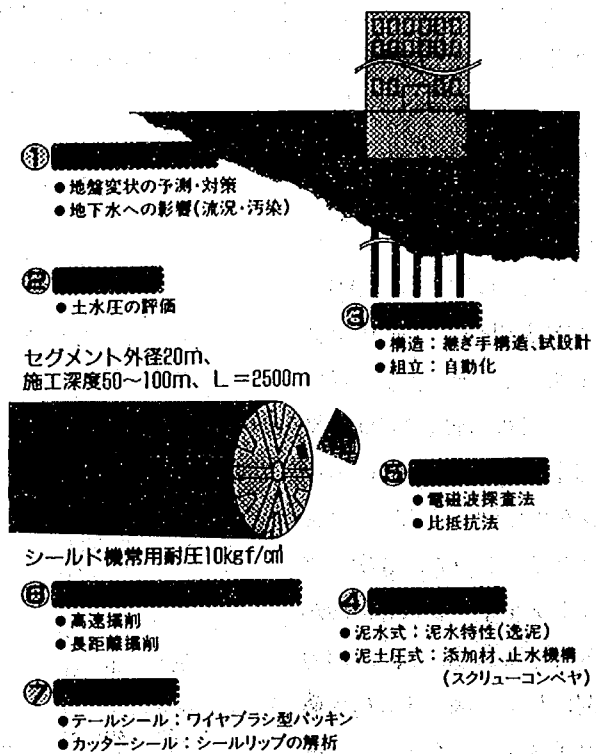


図-4.1 大深度・大断面シールドの技術的課題

- (7) 泥水加圧式及び土圧式における掘削土搬出方法について、必要設備数、配置、管理制御、検出装置、泥水処理能力等に対する調査、試設計及び配置計画の検討を行い、併せて適用性の把握を行った。ケーススタディ及び要素実験をもとに検討した結果、大深度・大断面シールドトンネルのズリ運搬施設の概略を明らかにした。
- (8) 掘削速度の向上と長距離掘削について、カッタービットの切削負荷の推定法を実験結果をもとに示すとともに、ビットの摩耗量の推定と摩耗の均一化を図る切削条数の設定方法について示した。
- (9) 高水圧下での止水性能を満足するシールドのテールシール、カッターシールの開発を行った。
- (10) セグメントの自動組立について、その現状を確認するとともに、より高速な大断面セグメントリングの組立システムの提案を行った。
- (11) 地山検知技術について、その必要性と現状技術について示すとともに、実験結果から今後の可能性について示した。
- (12) シールドの製作運搬について、直径20mクラスの製作の可能性と運搬上の課題について示した。

② 楕円形シールド

収容する施設の用途に適合した合理的な断面の構築と地下空間の有効利用の観点から、楕円形の断面形状を有するシールド工法の設計・施工技術の開発を実施した（図-4.2）。検討の結果、楕円形シールドの実現性については従来の円形シールド技術の応用で十分可能であると判断された。

- (1) 楕円形シールドは、経済的には円形と同程度と判断されたが、条件により円形に比べて空間に無駄がなく有効に利用できるとともに、占有幅や掘削断面積が小さくなる点で有利である。
- (2) 楕円形の断面形状は、シールド掘削機構および覆工の検討から短径に対する長径の比が1～0.7程度が適用可能と判断された。
- (3) 楕円形トンネルに作用する荷重は、遠心力載荷実験から土被り比（土被り高さ／トンネル幅）

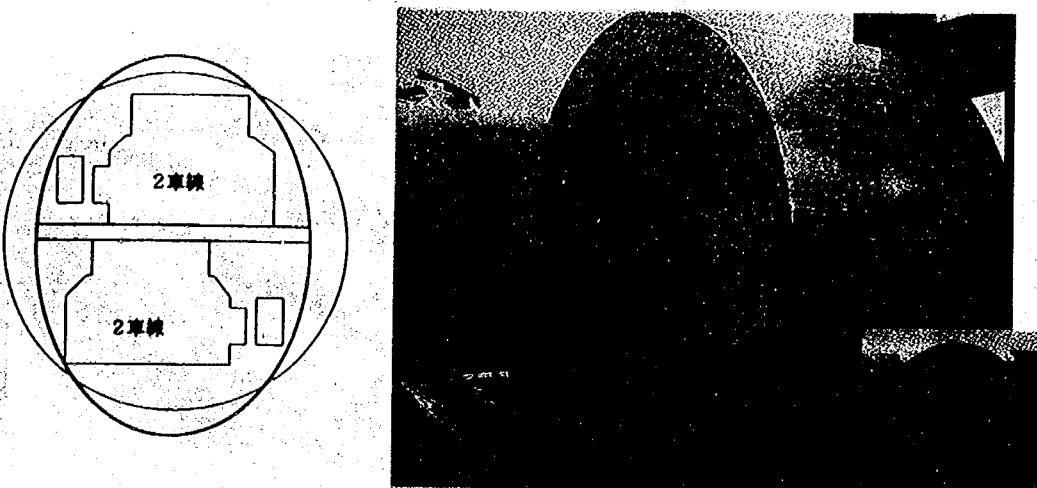


図-4.2 楕円形シールドの概要

1～3.5程度の条件の砂質地山においてはトンネル幅を直径とする円形断面のトンネルとほぼ同程度の緩み高さが、また、土被り比1～2.5の条件の粘性地山においてはほぼ全土被り土圧が作用することを確認した。

- (4) 覆工の試設計により、正格円形に近似しているほど構造的に有利であるとともに、従来のRCセグメント構造で十分覆工可能であることを確認した。さらに剛性の高い高強度のセグメントを使用することで桁高のトンネル径に対する割合を円形断面と同程度まで小さくできる。

なお、高強度セグメントの設計は単体曲げ試験より従来のRC理論が適用できることを示した。

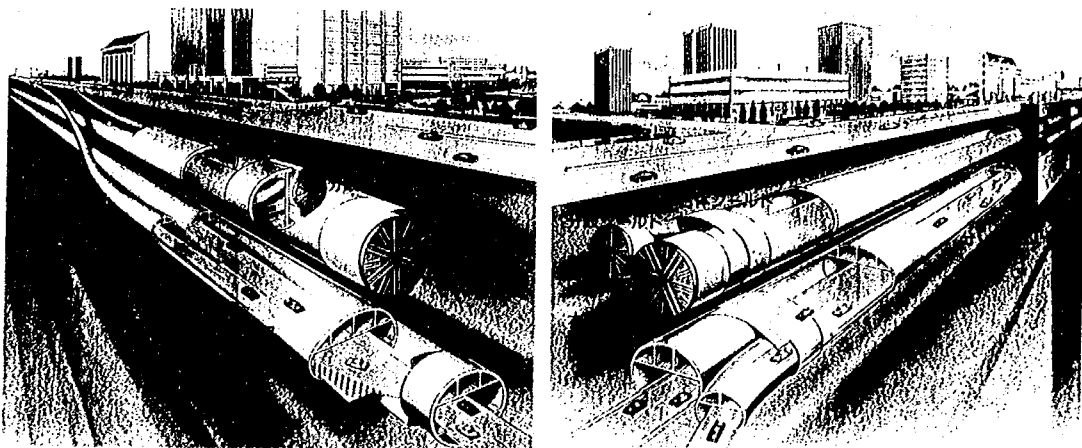
- (5) 楕円形シールドの掘削機構として、今回新たに考案したスイングカッター及びスライドカッターの補助掘削機構と従来の円板カッターを組み合わせることで短径に対する長径の比が1～0.5の広範囲にわたる楕円形に適用できることを示した。

- (6) スイングカッターのジャッキ制御および掘削性能について要素実験・掘削性能実験から確認し、制御は従来の技術で十分可能であることを示した。また、スライドカッターのシール性能実験よりその構造特性を確認した。

③ シールドトンネルの分岐・合流

地中における構造物間の接合技術として、シールド工法を用いた分岐・合流部の新しい設計・施工技術の検討・開発を行った。検討の対象は、道路トンネル用のランプやジャンクションとして、本線トンネルからの分岐・合流部とした。その結果、分岐・合流に関する新しい施工方式として2つの方式を考案した(図-4.3)。

一つは、併設するシールドトンネル間を接合し、多心円形の断面を構築する「併設トンネル接合方式」で、他の一つは、複数のシールドを組み合わせた合体シールドで多心円形断面を掘削してゆき、分岐地点で各シールドを個別に進退させる「シールド分離方式」である。また、2方式の共通の主要課題である特殊部分の掘削機構として揺動カッターを選定してその掘削性能を模型実験により確認し、実機においても適用可能と判断された。また、覆工構造、施工法、シールドの検討を行うとともに、新たに考案した2方式についての適用性を示した。



(a) 併設トンネル接合方式

(b) シールド分離方式

図-4.3 シールドトンネルの分岐・合流

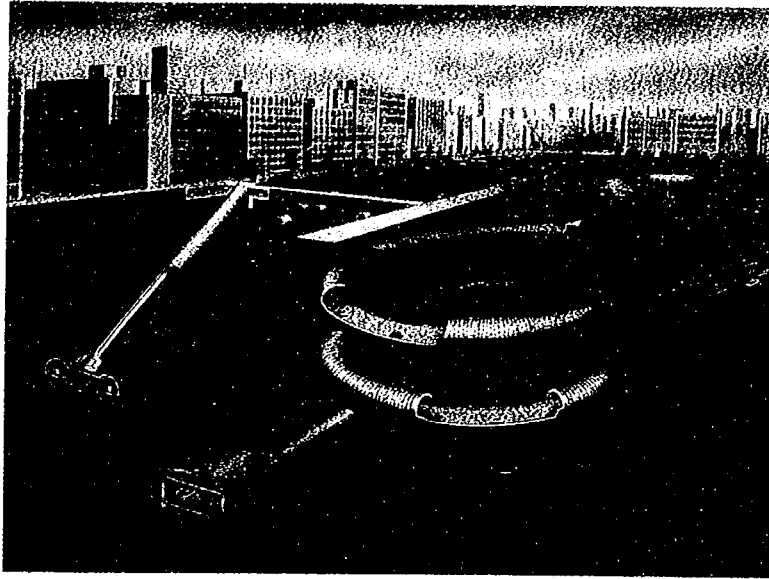
④ 急曲線・急勾配シールド

検討の対象としては、適用範囲が広く他にも技術の応用ができると考えられる地下道路からのランプなどの急曲線・急勾配の条件を持つスパイラルトンネルと、地下施設からの避難坑などの急勾配の条件を持つ斜坑を対象として研究を行った（図－4.4）。

(1) スパイラルトンネル

のように、トンネルが互いに近接して施工される場合の作用荷重の相互影響を遠心力載荷実験により明らかにした。

(2) 3次元模型実験により10%勾配のスパイラルトンネルの挙動を確認した。継手を持つトンネルの挙動に関して3次元の数値解析と実験を比較することにより3次元梁バネモデル



図－4.4 急曲線・急勾配シールド

の妥当性を確認した。数値解析によるパラメータスタディーにより、3次元の構造検討に関する2次元平面モデルの適用性について示した。

(3) 3次元模型実験から急曲線施工時の中折れシールドの旋回時のメカニズムについて示すとともに、検討条件下でのシールド設計の基本的な考え方について示した。

(4) 急曲線・急勾配シールドの掘進管理に関して、シールドに対するセグメントの位置、方向及びテールクリアランスの自動測定装置を新たに開発するとともに、姿勢制御に関する自動化システムの可能性について示した。

(5) 急曲線・急勾配シールド および急勾配シールドの土砂、資機材の運搬方法について試設計を行った。

(6) 高水圧下および急曲線施工時における裏込注入材料、注入管理に関して基本的な考え方を示すとともに、注入方法について提案した。

4.2 山岳トンネル工法

地山に密着した吹付けコンクリートやロックボルトを主たる支保工とする山岳トンネル工法は、山岳部におけるトンネル施工のために開発された工法であるが、近年では都市域における地下空間建設に適用される事例もみられその適用範囲を拡大しつつある。しかし、都市内の未固結な含水地山に山岳トンネル工法で地下空間を構築することを考えたときには、地下水への影響、地表面への

影響、施工中の酸欠や可燃性ガスの噴出、切羽の安定、より合理的な設計・施工手法の確立等、解決すべき課題が多い。本研究ではこれら解決すべき設計・施工上の技術的課題に対して検討を行い、都市域における山岳トンネル工法の適用性の拡大を図り、また都市部の大深度における山岳トンネル工法の合理的な設計・施工指針についての検討を行うことにより、山岳トンネル工法による地下空間開発を行う技術についての研究開発を行った。

① 未固結含水地山のトンネルの設計・施工

山岳トンネル工法が都市域での地下空間建設に導入されたのはごく最近であり、建設技術としては開発および改良の余地が数多く残されている。具体的には、切羽の安定対策、地下水対策、地盤変状対策などの課題がある。これらの課題に対処するためには補助工法の併用が重要である。

(1) 排水工法

大深度未固結含水地山を山岳トンネル工法で施工する場合、湧水処理は切羽の自立や周辺地下水等に影響を与えることと深く関係しているので特に配慮しなければならない。排水工法を採用する場合であっても薬液注入工法の併用により、周辺の地下水位の低下をできるだけ抑え切羽からの湧水を処理する部分排水工法を検討した。部分排水工法を用いた補助工法より排水位置・排水量とリチャージ位置・リチャージ量のそれぞれをパラメーターとした効率の良い排水工法を行い得ることを試算により確認した。

(2) 注入工法

大深度の未固結地盤では、土圧や水圧が大きく作用し、とりわけ、水圧が薬液注入に及ぼす影響は大きく効果的な注入速度や注入圧力の設定においては地下水圧の影響を考慮する必要があると考えられる。そこで実際の圧力環境を再現できる大型加圧モールドにより比較的大規模な注入実験を実施した。その結果、未固結含水地山において間隙水圧に応じた注入効率の良い注入圧を概念的に設定することができた。

(3) 凍結工法

凍結工法は確実性が高く信頼のおける工法であるが、他の補助工法と比較して工期・工費の面で多くの課題を有する。ここでは長さ10m、幅3m程度の半ドーナツ状の空間をトンネル縦断方向に100~200m間隔で設置し、この空間から長孔水平ボーリングを穿孔し、凍結工法を実施することにより地盤改良を合理的に実施する方法を考案した。

② 新工法の開発

(1) LAP (Long Arch Pre-Lining) 工法

大深度未固結含水地山では掘削地山が高水圧・高土圧の状態にありこのような地山に対して山岳トンネル工法を用いてトンネルを施工する場合には切羽の安定が不可欠な条件となる。切羽の安定を図るためには切羽の自立性を確保するとともに事前支保によって切羽前方地山を補強できる地盤補強工法を開発することが重要である。ここでは切羽前方地山を補強する地盤補強工法としてLAP工法を提案した(図-4.5)。

本工法は、荷重と強度についての試算に基づいてトンネル掘削に先だって切羽前方地山内は長尺シェル状のプレライニングを構築するものである。本工法により掘削前に生じる先行変位、掘削後本覆

工が施工される間に生じる変位を減少させ、地表面沈下を防止することが可能である。

プレライニング材料と材料の口元処理方法について要素実験を行った結果、プレライニング部の構築に用いるモルタルの配合、口止め処理に関する設計手法を確認できた。

(2) PATM工法 (Pre-Arch Tunnelling Method)

本工法はトンネル本坑を掘削する前にあらかじめ地山内に一次覆工を完成させてお

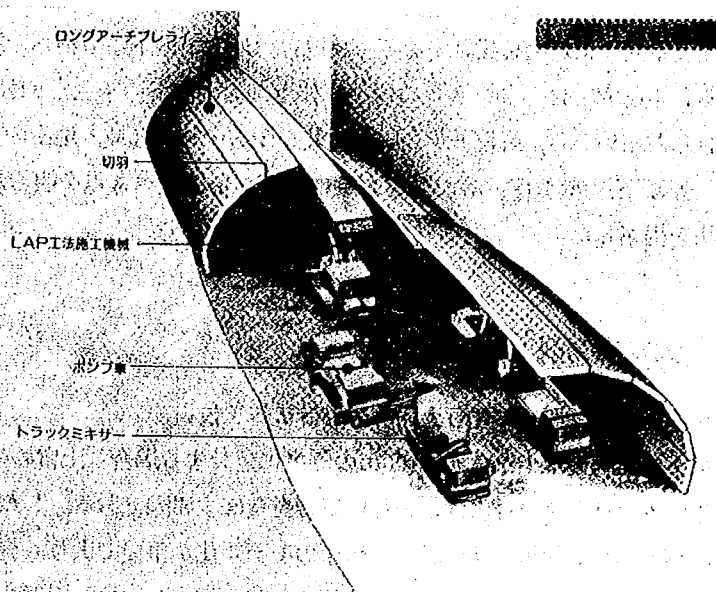


図-4.5 LAP工法

てから、一次覆工内の土砂地山を掘削してトンネルを構築する工法である(図-4.6)。

まず、トンネル覆工の外周部にはほぼ内接する2本の側壁導坑と1本の頂設導坑を先進させる。次は、導坑間にまたがる半円形状の専用の掘削機によってトンネル外周に沿った溝掘削を行い、掘削機を前進させた後、掘削機の後部にてコンクリートを打設する。これにより、地山内に連続したアーチ状のライニングを形成し、その後このライニングの内側の地山を大型の掘削機により掘削しトンネル本体部を形成するものである。

PATM工法の施工上の課題として、溝掘削時の切羽の自立性、ずりの排出性、プレアーチコンクリートの配合などに注目し、検討を加えた結果これらが施工上満足すべき条件を満たし得ることがわかった。

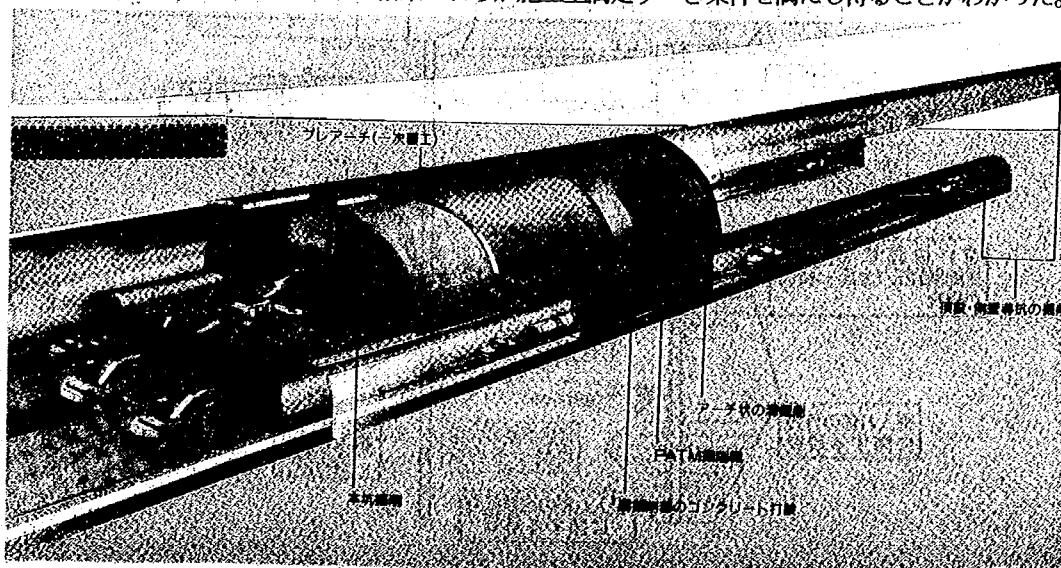


図-4.6 PATM工法

③ 地盤変状の予測・対策

地下空間に構造物を建設する際には既存の地上・地下構造物への影響を最小限に抑制する必要がある。本研究では、トンネルの建設に伴う地表面沈下の予測をFEMにより解析する手法について検討した結果から、解析モデルの側方及び下方の境界領域、地山の地山物性値（変形係数、強度特性、等）、応力解放率、等の設定方法について留置すべき点を明らかにし、これを解決するための方法を提案した。

5. 大規模開削・立坑技術

5.1 大規模開削に伴う土留めの設計・施工技術

地下構造物を地上から20～100mの深度に建設する場合、土留めの設計法および施工法の選定は、工事の安全性および経済性に著しい影響を及ぼす要因である。したがって、土留めの設計においては、精度の良い解析手法の設定や側圧のモデル化が重要であり、施工においては信頼性の高い工法の採用が必要となる。このため、技術の現状を調査し、検討課題をまとめた。下記の課題について、現場での実測データの分析および数値解析により検討を行った。

(1) 土留め壁への作用側圧

洪積砂層においては土圧水圧を分離し、従来どおり計算してよいことが認められた。この層においては粘着力 c が存在し、設計に用いることが可能であるが、定数設定にあたっては、詳細な調査が必要である。

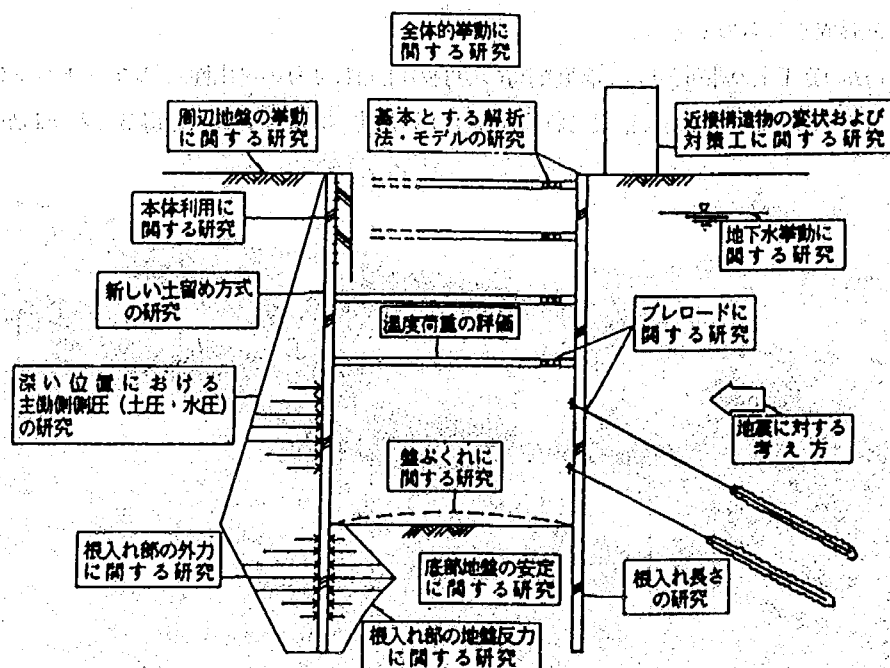


図-5.1 大規模土留めの検討課題

洪積粘性土においては、土圧・水圧一体を基本とし、ランキン・レザールの式により求めた側圧に、下限値として別途実測水圧を加えた側圧が、実測側圧を概ね表現していることが確認された。ただし、洪積粘土の上下に砂層が広がり、それぞれが水頭の異なる被圧水を有している場合の掘削に伴う水圧の変化など、予測が簡単でないことが多いため、今後の研究が必要である。

(2) 土留め壁根入れ部の地盤反力

実測データを基に水平方向地盤反力係数を求め、根入れ部の地盤反力特性について検討した。その結果、水平方向地盤反力係数は土留め壁の変形の増加に従って低下しており、ばらつきは大きいものの、その傾向は $-1/2$ 乗則におよそ合致していることが認められた。

また、このひずみ依存性について、モデル地盤を想定した試算を行い、土留めの変形量や断面力への影響について検討した。その結果、解析モデルにおいて地盤の塑性化を考慮していることから、根入れ部付近の地盤が比較的軟らかく土留め壁の変位置が大きい場合には、土留め壁の変位置への影響が多少あるものの、硬質地盤の場合や断面力への影響は小さいことが認められた。

(3) 形状効果

矩形立坑における形状効果について、3次元及び2次元有限要素法により解析を行い、掘削平面形状による影響を把握した。さらに、2次元有限要素解析に任意の形状効果バネを取り入れた解析を行い、形状効果バネを考慮した山留め弾塑性解析の適用性を検討した。

その結果、門型ラーメンあるいは箱型ラーメンモデルにより形状効果バネを算出し、それを、通常の山留め弾塑性解析に取り入れることにより、立坑の設計が可能であることが認められた。

(4) 掘削底面地盤の安定

掘削底面の安定のうち、盤ぶくれに関する安定照査法について弾塑性有限解析により検討した。その結果、粘性土地盤の掘削において掘削底部地盤の厚さが掘削幅に比較して大きい場合には、自重の他土留め壁と地盤との摩擦抵抗やせん断抵抗を考慮した力の釣合によって安定性を検討できることが認められた。

② 地盤変状の予測・対策

今後都市内における開削工事は、過密した既設構造物の中で進める必要があり、これに伴って土留め構造物も大深度化・大規模化が進んで行くと考えられるので、環境対策としての周辺地盤変状に対する予測対策は重要な課題であると考えられる。本研究では大規模掘削による周辺地盤の変状予測手法およびプレロード工法等の対策工法について、計測データの収集・解析、実験および有限要素法に基づく検討を行った。

(1) 土留め壁の変位による影響範囲は、実測値に対して弾性解析ではかなり大きく、弾塑性解析では比較的よい一致を示した。また、土留め壁の変形時に発生する背面土の地すべりは、弾塑性解析により推定可能であることが認められた。

(2) 掘削深さ30m以上の大深度掘削に対する数値解析から、掘削に伴う背面側地盤の水圧の減少範囲は透水係数の影響を大きく受け、透水係数が大きい場合には周辺地盤の沈下は顕著になる。透水係数が小さい場合は圧密が進行しにくいため沈下量は少ない。

③ 大規模土留め、立坑の設計施工指針（案）

大規模土留め壁の設計における諸課題について既往の研究成果の収集を中心として検討を行うとともに、施工上の留意点をまとめ、「大規模土留め、立坑の設計施工指針（案）」を作成した。指針の適用範囲としては、現場での計測データのある掘削深さが30～50m程度とし、土留め壁の種類は地下連続壁、鋼管矢板留め壁および柱列式地下連続壁としている。

なお、指針（案）の作成に当たっては最新の研究成果や計測事例をもとに検討を行ったが、今後とも十分な計測データの蓄積が望まれる。

6. 地盤補強技術および止水技術

地上の限定された作業スペースから地下深部の地盤中に広がりのある空間を建設するという新たなニーズに対して、新たな工法の開発が望まれている。

これに対して、ロックボルト等を用いた補強土工法とグラウンドアンカー工法とを併用した工法は、切り梁支保工なしの掘削が可能であり、作業性、経済性の面で有利になると考えられる。しかし、この工法を地下掘削に適用するには、地上の土構造物と荷重条件、施工条件が異なること、さらには高水圧の地下水下の未固結地盤であるため止水のための注入工法の併用が不可欠であることなど、検討すべき課題が多い。

本研究は、特に地下に広がりのある空間を掘削する際の地盤補強技術及び止水技術の開発を行うものであり、実験や数値解析の結果をもとに本工法の適用性を検討した（図-6.1）。なお、本技術は掘削時の地盤補強・止水を考慮したものであり、永久構造物としての適用性については別途検討が必要である。

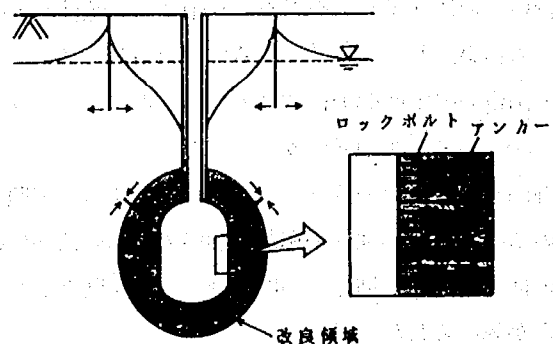


図-6.1 地盤補強技術及び止水技術の概念図

① 地盤補強技術

鉛直な掘削面をロックボルトとグラウンドアンカーとの併用により補強する工法について、比較的軟質な未固結地盤及び土丹のような固結地盤を対象として適用性の検討を行った。

(1) 未固結地盤に対する適用性

実験による検討の結果、無補強、ロックボルト単独、アンカー単独の場合よりも、ロックボルトとアンカーを併用した方が補強効果は高いことが確認された。本工法の補強機構としては、アンカーがプレストレス力により初期の段階で地盤全体を補強し、ロックボルトがアンカー間の地盤を一体化する働きをして、結果的に地盤全体の強度を高める働きをするものと考えられる。なお、ロックボルトは、ある程度以上の長さがなければ効果は現れず、また、地盤を一体化させるためにはボルト間隔をある程度密に配置する必要があることを示した。

(2) 固結地盤への適用性

土丹を想定して行った実験より、固結地盤においても未固結地盤と同様の結果となった。有限要素法の結果を用いて簡易的にすべり線を表示する手法(DpFE法)を用いて実験結果の再現を行った結果によると、実験で生じたすべり線が数値解析でも簡易に再現でき、また載荷耐力も実験結果と近い値を示す結果となった。DpFE法は、破壊時にすべり線が明確に発生するような固結地盤に対してすべり線を簡易に推定することが可能であり、補強すべき領域を求める手法として適切と考えられる。

② 止水技術

止水工法としては、地下水の止水機能のみではなく、地盤を補強する効果も期待されている。また、地上あるいは坑内の限られた作業スペースでの施工のためには設備は小さいことが望ましい。

このことから、止水工法として最も有力であると考えられる注入工法について、その機能と適用性を検討するため、代表的な数種類の注入材料について実験を行った。

(1) 地盤への浸透性については、超微粒子セメント、超微粒子セメントLWについては浸透性に若干劣る傾向が見られた。

(2) 改良強度としては、超微粒子セメントで約 $30\sim 80\text{kgf/cm}^2$ 、超微粒子LWで約 $20\sim 80\text{kgf/cm}^2$ と高強度が得られ、これら2種類の注入材料は十分な改良強度が期待できるものと考えられる。

(3) 止水性については、超微粒子シリカ、水ガラス、超微粒子LWは、透水係数を $1\times 10^{-8}\text{cm/sec}$ 程度まで減少させ、十分な止水効果をあげている、超微粒子セメントは 1×10^{-4} 程度までしか減少していない結果であった。

(4) 掘削時の仮設工法として考えると耐久性としては、超微粒子セメント、超微粒子LW、超微粒子シリカとも問題はないものと考えられる。

③ 大深度地下空間建設への適用性

ロックボルト工法、アンカー工法及び注入工法を併用した地盤補強・止水技術の地下空間建設への適用性を検討するため、FEMによる弾塑性解析によりケーススタディーを行った。

想定した地下空間は、適用性の限界を確認するために横断面形状として高さ32m、幅15.5mの比較的大きいカプセル型断面とし、立地条件としては、大深度地下空間を想定して地下50m以深に構築することとした。地盤条件は、固結地盤として一軸圧縮強度 20.4kgf/cm^2 、粘着力 9.5kgf/cm^2 の土丹層を想定した場合と、一方、未固結地盤に対しては地盤を注入工法により改良することを前提とした。

解析検討の結果、固結地盤においては周辺地盤は十分に安定であり、さらに粘着力が 4.0kgf/cm^2 と小さい地盤に対しても適用が可能と考えられた。このことから本地盤補強・止水技術の地下空間建設への適用の可能性は、土丹層などの固結地盤に対しては十分にあると考えられる。

未固結地盤においては、地下水位下に対しては塑性領域が広く発生し適用に限界があるが、地下水位の低下とともに地盤が安定化するので、このような場合には適用の可能性がでてくるものと考えられる。

7. 環境保全技術の開発

地下空間の利用技術の開発とともに、地下空間利用による周辺環境への影響評価及び保全技術の開発も不可欠となっている。地下空間利用に伴う環境への影響の主なものとしては、掘削に伴う周辺地盤の変状と地下水環境への影響があげられる。本研究においては、これらの項目についてその予測と対策技術について検討を行った。なお、トンネルや立坑の掘削に伴う地盤環境への影響の予測とその対策技術についての検討結果は、それぞれの掘削技術の成果（前出）とともにまとめており、ここでは復水工法を中心に述べる。

7.1 復水工法

建設工事に伴う地下水環境への影響としては、地下水位低下による地盤沈下、井戸枯渇、地下水

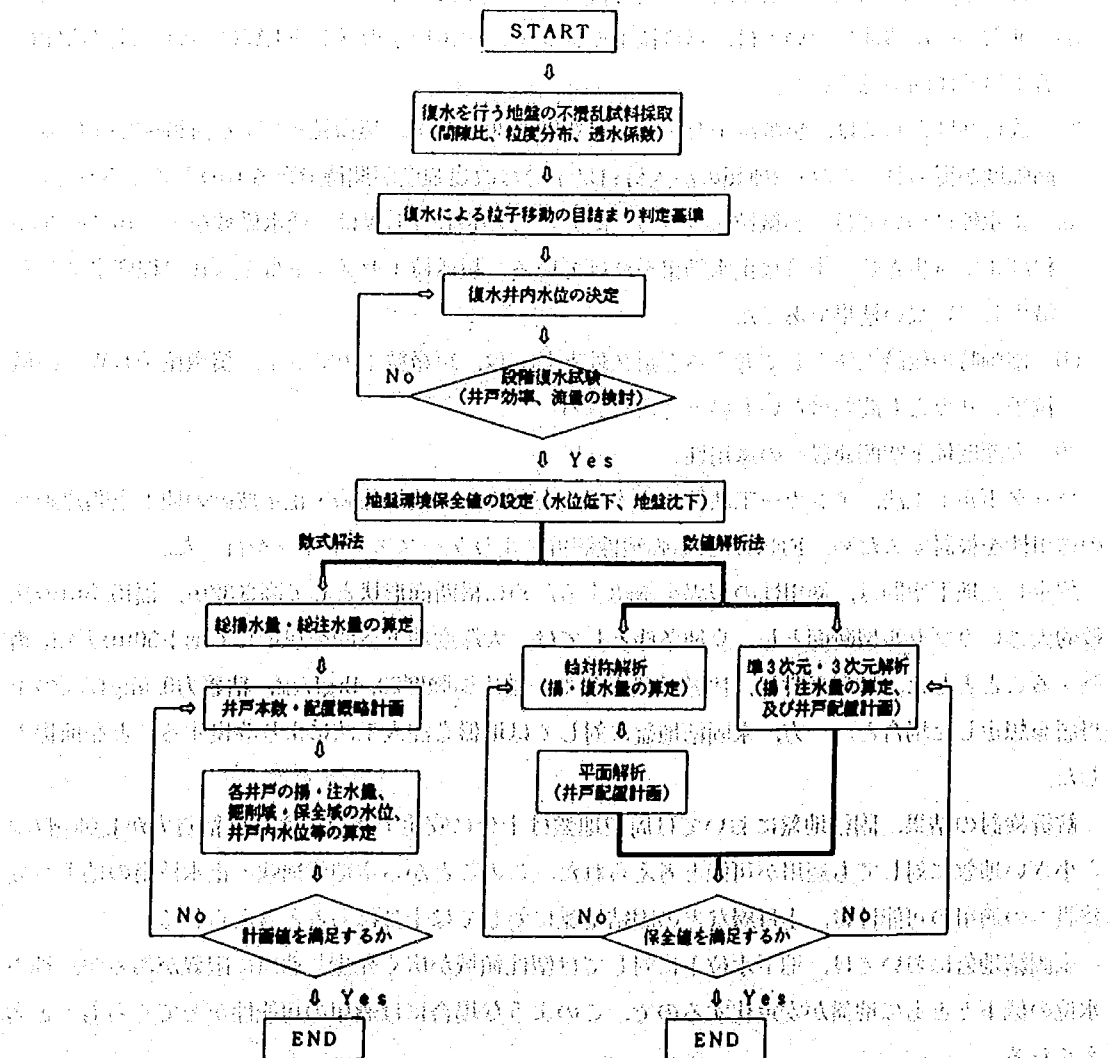


図-7.1 復水工法の設計手順

質の変化、等が従来から発生しており、そのつど対策が施されてきたが、近年その対策工法として復水工法の採用が検討されることが多くなっている。ここでは、主に工事期間中に実施される復水工法の適用上の問題点を明らかにし、その設計法と施工法に関して適切と思われる手法を提案した。

7.2 地下水環境の保全技術マニュアル（案）

前項の復水工法に関する研究成果とともに、地下構造物構築後に生じる可能性のある地下水流阻害の対策工法について検討した結果を加えて、「地下水環境の保全技術マニュアル（案）」としてまとめた（表-7.1）。

表-7.1 地下水環境の保全技術マニュアル（案）の概要

1. 地下水問題の現状	2) 復水工法の設計手順
1) 広域的な地下水問題	3) 数式解法
2) 工事による地下水問題	4) 数値解析法
2. 地下水環境の保全技術の現状	5) 設計例
1) 地下水位の保全に関する現状	5. 復水工法の施工法
2) 地下水の流動阻害に関する現状	1) 施工手順
3. 復水工法の事前調査方法	2) 井戸掘削工法
1) 復水時の帯水層定数の特性	3) 復水井の構成
2) 事前調査項目	4) 復水井周辺システム
4. 復水工法の設計方法	5) 井戸の逆洗浄方式
1) 設計上の留意点	

8. 大規模地下施設の耐震設計法

本研究は、大規模地下道路、大規模地下河川等の全く新しい構造で、かつ、大規模（大断面）な地下構造物の耐震設計技術を開発することを目的として実施したものである。

大規模地下構造物を地震時の振動特性に基づいて分類すると、深さ方向に比べて水平方向に偏平で長大な地下構造物（幅広地下構造物）、水平方向に長大な地下構造物（線状地下構造物）、水平方向に比べて深さ方向に長大な地下構造物（鉛直地下構造物）、多くの隔壁や接続物が組み合わされた構造物、の4つの構造パターンに分類される。

8.1 応答変位法による幅広地下構造物及び鉛直地下構造物の耐震計算法の開発

構造物の規模が大きくなると、地盤の変形により構造物の周面に作用するせん断力（以下、地震時周面せん断力と呼ぶ）の影響が大きくなり、これまでの応答変位法では地震の影響を適切に評価することができない。このため、従来の応答変位法で考慮する地震時土圧及び慣性力に、地震時周

面せん断力を加えた新しい応答変位法（図-8.1）を開発した。

地震時周面せん断力を考慮した応答変位法の適用性に関して、以下の点が指摘された。

- (1) 同じ入力地震動が作用するという条件で、応答変位法と動的解析を比較すると、両者には大きな違いがない場合が多い。これらは、原理的には、応答変位法は1次モードを考慮した応答スペクトル法による動的解析に近いためである。
- (2) 長手方向に沿う軸力及び曲げモーメントが支配的となる線状地下構造物だけでなく、地盤のせん断変形に基づく曲げモーメントや周面せん断力が支配的となる幅広地下構造物及び鉛直地下構造物に対しても、精度よく適用することができる。

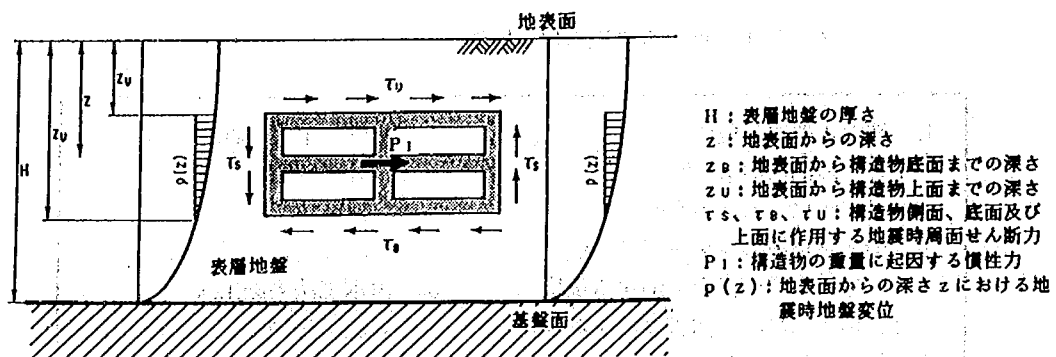


図-8.1 応答変位法で考慮する地震時荷重

② 応答変位法による大断面シールドトンネルの耐震設計法の開発

シールドトンネルの地震時変形特性に関する既往の検討結果をもとに、大断面シールドトンネルの耐震設計法をとりまとめた。その要点は以下のとおりである。

(1) トンネル長手方向の耐震設計法

（基本方針）：耐震計算は応答変位法によるものとし、長手方向に沿う地震時地盤変位により生じる断面力を用いて耐震性を照査する。地形・地盤条件が著しく変化する箇所、異種構造物との取付部、トンネル分岐部・曲線部に対しては、動的解析により安全性を確認する。

（シールドトンネルの剛性）：多数のセグメント及び継手から構成される覆工を、等価な剛性を有する一様連続なはりにモデル化する。特に、二次覆工を有する場合の覆工剛性は、覆工の損傷状態に応じて段階的に変化させる。

（耐震性の照査）：M7程度の中規模地震に対しては許容応力度法により、また、M8クラスの大規模地震に対しては地震時保有水平耐力法により、それぞれ照査する。

（構造細目）：シールドトンネルが長手方向の地震力を受けた場合に、二次覆工の損傷が特定の箇所に集中して生じるのを防ぐために、最低限二次覆工の長手方向に配置しておくべき鉄筋量を定めた。

(2) トンネル横断方向の耐震設計法

従来、トンネル周辺の地盤が均質で、かつ、土被りが大きい場合には、トンネル横断面方向に及ぼす地震の影響は一般に小さいといわれてきた。しかし、常時の断面力と地震時の増分断面力を重

ね合わせた覆工の応力は、地震時の割増しを見込んでも許容応力度を超える可能性があることが本研究により明らかにされたため、トンネル横断面方向についても耐震設計を行うこととした。

耐震計算は応答変位法によるものとし、地盤のせん断変形に基づく地震時土圧、地震時周面せん断力、慣性力により生じる地震時の増分断面力を常時の断面力に重ね合わせることで耐震性を照査する。

常時の断面力に比べて地震時の増分断面力が大きくなるのは、以下の場合である。

- i) 常時の断面力を土水分離の考え方で算定する場合
- ii) 地盤が軟弱で、かつ、土被りが小さい場合
- iii) トンネル横断面が地盤条件の大きく異なる地層間に跨り、地層境界付近での地盤の変位振幅が大きく変化する場合

③ 地下空間内の地震防災システム

地下構造物のうち不特定多数の車両及び人間が利用する大規模地下道路を対象として、利用者の地震に対する不安感を解消できる地震防災システムを検討した。

(1) 地震時に地下道路利用者が抱きやすい不安感

「地下道路」と「地震」を合わせて聞いた場合に、地下道路の利用者がどのような不安感を抱きやすいかを、VE (Value Engineering) 手法により検討した。これによれば、利用者の不安感は、地下道路に対して日常から抱いている不安感と、地震時に発生する可能性があると考えられる事象に対して抱く不安感の2種類に分類でき、さらに8項目に細分された。

(2) 地震時に地下道路利用者に不安感を与える要因

地下道路利用者が地震に対して不安感を抱く要因には様々なものがある。また、ある不安感に対して複数の要因があったり、互いに関連しあっていたりする。このような要因間の関係を、ISM (Interpretive Structural Modeling) 法及びFSM (Fuzzy Structural Modeling) 法により解析した結果に基づき、地下道路利用者が抱く不安感を構成する最も根源的な要因(構造モデルの最下層要因)を抽出した。

(3) 地震防災システムの基本方針

地下道路利用者が抱く不安感を低減するためには、不安感を生む最下層要因を解消できる方策を実施することが基本的に最も有効である。ただし、最下層要因といっても、不安感を生む程度は異なるため、地震防災システムではそれらのうち支配的な要因に対して対策を講じることが重要となる。このため、AHP (Analytical Hierarchy Process) 法を用いて、最下層要因の影響度を解析した。

(a) 総合影響度の大きい「閉鎖空間である」、「防災教育を受けていない」、「防災訓練を受けていない」、「歩行者が混在している」、「他施設との連絡がしにくい」、「避難場所の防災設備が不十分」に対して優先的に対策を行うことが有効である。

(b) 上記6つの最下層要因を解消することにより、地下道路利用者の不安感を33%低減できる。

④ 大規模地下構造物の耐震設計法ガイドライン(案)

以上の研究成果をもとに「大規模地下構造物の耐震設計法ガイドライン(案)」としてとりまと

めた（表-8.2）。

表-8.2 大規模地下構造物の耐震設計法ガイドライン（案）：目次

第1章	総則
第2章	耐震設計の基本方針
第3章	耐震設計上考慮すべき荷重及び設計条件
第4章	大断面シールドトンネルの耐震設計法
1節	一般
2節	シールドトンネル長手方向の耐震設計法
3節	トンネル横断方向の耐震設計法
第5章	幅広地下構造物の耐震設計法
第6章	鉛直地下構造物の耐震設計法
第7章	地震の影響の低減を期待する構造
第8章	大規模地下道路の地震防災システム

9. 道路トンネルの火災対策

都市内道路トンネルを対象として、トンネル内の火災対策法及び火災シミュレーション手法について検討した。主要な研究成果は以下のとおりである。

(1) 火災対策の基本姿勢を、次のように提案した。

- (a) トンネル内からの迅速かつ正確な情報収集
- (b) 受報後の速やかな救援出動
- (c) 情報提供設備の活用による後続車両の現場接近阻止と事故拡大及び二次災害の発生防止
- (d) 円滑な避難誘導及び不安感の軽減
- (e) 初期消火を目的とした消火設備の整備充実
- (f) 日常からの一般利用者に対するトンネルの潜在的危険性及び事故防止に関する広報

(2) 小規模の火災による火災時の気流や温度分布を解析できるシミュレーションプログラムを開発した。

10. おわりに

5カ年間にわたる研究の成果として得られた新たな開発技術及び設計・施工指針（案）、マニュアル（案）等は、従来にない大断面・大深度の地下利用を可能とするものであり、今後積極的な地下空間利用の計画、設計、施工を推進する上での礎になるものと確信している。

しかし、開発した技術には、指針（案）など直ちに現場の参考となるものもあるが、中にはさら

に多くの実測データによる裏付けが望まれるもの、要素技術の開発の段階にあるもの、等もあり、今後より一層の研鑽を重ね、現場での試験を行いながらその完成度を高めていくことが期待される。

最後に、本総合技術開発プロジェクトの実施にあたり、ご指導を頂いた地下空間利用技術開発委員会（伊吹山四郎委員長：（財）国土開発技術研究センター）の各位、共同研究として参画頂いた（財）先端建設技術センター及び民間企業の方々、並びに直接研究を担当された方々に心より感謝の意を表します。

参考資料

- 建設省総合開発プロジェクト「地下空間の利用技術の開発報告書」（第1～3分冊）、平成4年8月、建設省

土木研究所講演会講演集

I S S N 0386-5878
土木研究所資料第3155号
平成5年1月 (1993)
企 画 部 企 画 課

キーワード：土木研究所講演会

要旨

本資料は、「平成4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。

郵便はがき

305-□□

41円切手を
はって下さ
い。

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

企画部企画課
行

No.

配布先氏名

配布先住所



No. _____

土木研究所資料第3155号
(土木研究所講演会講演集)

部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印