

土 木 研 究 所 資 料

堤体の非破壊調査機器に関する調査

平成元年2月

建設省土木研究所
機械施工部機械研究室
施工研究室

Copyright ©(1989)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。

堤体の非破壊調査機器に関する調査

機械研究室 室長 長 健 次
施工研究室 室長 苗 村 正 三
研究員 境 友 昭

要 旨

樋門樋管の周辺の空洞や緩み等を非破壊的に探査する技術の実用性の試験をモデル及び実際の樋門を用いて行った結果を示す。探査方法として、弾性波を用いた方法と電磁波による地下レーダを用いた。実験及び現地調査の結果、弾性波での探査では十分な探査精度が得られず、地下レーダによる探査の方が実用性に優れることが分かった。

キーワード：非破壊検査，電磁波，レーダー，河川構造物

は　じ　め　に

樋門樋管などの河川構造物の周辺に緩みや空洞が発生し、これが水道となって堤体の健全性を著しく損なう場合がある。しかし、河川構造物は一般に厚い鉄筋コンクリート構造となっているため、その表面から構造物下の状況を直接的に観測することは不可能と言って過言ではない。これまで、樋門樋管などの健全性の調査は、樋門樋管の内部から目視やテレビカメラなどによる観察によって実施されており、コンクリートの亀裂や剥離、場合によっては構造物の変位などを基に総合的な観点から健全性の判定を行っていた。著しい変形やコンクリートの亀裂が構造物の健全性を損なっていることは容易に判断できることであるが、表面からの観察のみからでは、そのような変状が生じた原因を正確に知ることは容易ではない。

構造物の周囲に空洞が生じている場合には、構造物の基礎の支持力が低下し、これによって構造物のコンクリートに亀裂などを生じると考えることができる。しかし、コンクリートに亀裂が生じる原因は構造物下の空洞のみではなく、また構造物周辺に空洞が発生したからといって直ちにコンクリートに亀裂などが生じるわけではない。このため、構造物の表面からの観察のみでは、構造物の健全性の全体像を把握することはむずかしく、構造物下の状態を探查、測定する装置の開発が望まれていた。また、探查、測定は構造物の重要性から考えて非破壊的に行われなければならない。

実際、このような構造物下の状況を非破壊的に観測する装置としては、地中に電磁波を放射しその反射波の状況を画面や記録紙に表示するいわゆる地下レーダが試験的に用いられていた。しかし、これまでの現地調査の結果では鉄筋コンクリートのように鉄のメッシュ構造を持つものでは電波の吸収によって探查することができないと言われていた。このため、この調査を実施するにあたって、電波レーダ以外による探查技術の開発を考え、弾性波探查による技術の適用性についても実験的に検討を行うことにした。しかしながら、本文の中でも論じるように、弾性波探查を樋門樋管周辺の空洞、緩み箇所の探查に適用することは非常に難しく、むしろ地下レーダの方が適用性が高いことがわかった。

本報告では、樋門樋管周辺の空洞や緩みなどの密度や強度の変化を非破壊的に探查する方法として現状の技術のうち、何が適用性が高いかを実験、調査的に検討した結果を取りまとめて報告するものである。また、非破壊検査の適用性調査の対象とした実際の樋門の破壊検査の結果について示し、非破壊検査が表示した測定結果について考察を行う。

機械研究室	室　長	長	健　次
施工研究室	室　長	苗　村	正　三
	研究員	境	友　昭

目 次

はじめに	
1 概 要	1
1.1 調査の目的	1
1.2 調査試験の概要	1
2 空洞探査技術の現状	2
2.1 概 要	2
2.2 樋門樋管周辺の空洞探査への適用性	2
3 探査の原理	3
3.1 弾性波探査	3
3.2 インピーダンスヘッドを用いた弾性波探査	4
3.3 電波レーダによる探査	4
4 予備実験	6
4.1 実験条件	6
4.2 インピーダンスヘッド落下法	7
4.3 電波レーダ	13
5 現地調査	16
5.1 調査対象	16
5.2 調査方法	19
5.2.1 調査方法	19
5.2.2 測定結果	19
5.3 電波レーダ（地下レーダ）による現地調査	26
5.3.1 調査方法	26
5.3.2 調査結果	26
5.3.3 考 察	26
6 破壊検査の結果との比較	31
6.1 破壊検査	31
6.2 探査結果の比較	31
結論と今後の問題点	34

1. 概 要

1.1 調査の目的

堤体の健全性調査方法の確立を目的に、樋門樋管周辺の地盤密度の変化を非破壊的に探査する機械、技術の適用性を実験及び現地調査によって明らかにする。

1.2 調査試験の概要

本報告書は、中国地方建設局浜田工事事務所から依頼のあった地建依頼の調査試験「堤体内部の非破壊式観測機器の調査」の研究結果をまとめたものである。浜田工事事務所は管内に、今年度中に撤去、更新する樋門を持っており、非破壊試験の結果を樋門撤去に伴う破壊検査によって検証できる体勢にあった。

このため、本調査では、文献調査や予備的な実験によって非破壊探査機器のおおよその適用性を試験し、その結果によって現地調査に使用する探査方法を選定するという方法をとった。これまでの非破壊探査技術の適用事例について調査した結果、樋門樋管が非常に厚い鉄筋コンクリート構造物であるところから、電波レーダによる方法の適用は難しく、現状では適用性のある探査方法がないという結論が得られた。このため、予備実験では、インピーダンスヘッドに重錘を取り付けて落下させ、この時の構造物の応答を調べる弾性波探査方法を用いた。しかし、鉄筋コンクリート構造物であっても部分的に電波が透過すれば探査の可能性があることから、試行的に地下レーダの適用性について実験を行った。この結果、これまでいわば常識となっていた鉄筋構造物下のレーダ探査はできないと言うのは妥当ではなく、実際は探査可能であることが分かった。

実現場での探査方法の適用性試験は、中国地方建設局浜田工事事務所管内の久座仁樋門で実施した。インピーダンスヘッドを用いた弾性波探査及び地下レーダによる探査を行った。また、この樋門では破壊検査を実施し、非破壊検査の結果と比較した。比較検討した結果、地下レーダによる探査結果は構造物のコンクリートの厚さをよく反映していたが、弾性波探査の結果はほとんど当たっていなかった。また、久座仁樋門での構造物下の空洞は小さく現状の探査技術では検知できない程度であることがわかった。

2. 空洞探査技術の現況

2.1 概 要

現在、浅層の探査技術として用いられている方法には表-2.1に示すようなものがある。探査方法には、探査地点での状況を絶対的に出力するものと、平面的な探査の中で他と異なる部位を抽出する方法がある。探査対象の構造物の性状が明確でない場合は、絶対的な指標を出力する装置であっても、全体像の中から異常なところを抽出する方法が用いられることが多い。前者の方法としては、弾性波探査、地下レーダ、後者の方法としては、表面温度、アースグラフ、音響分析などがある。

2.2 樋門樋管周辺の空洞探査への適用性

樋門樋管周辺の空洞や緩みの探査では、水路を遮断して実施することからできるだけリアルタイム的に測定できることが望ましく、このため探査に下準備が必要なものは適用性が小さい。また、当然のことながら探査の理論的妥当性が低いものは適用できない。表-2.1の判定の欄はこれらの事項を考慮して樋門樋管周辺の空洞探査への適用性の判断を行った結果を示している。表中、◎の記号は適用性が最も高い方法を示す。また、○は、適用可能な方法を意味する。アースグラフ、弾性波は探査1及び音響分析には、印がついていないが、これは検査のために検査孔が必要なもの（アースグラフ）、測定の準備に時間がかかりリアルタイムの測定ができないもの（弾性波探査1）及び厚いコンクリート構造物には適用性が小さいもの（音響分析）である。

表面温度差法は、構造物の表面が乾燥した状態であれば適用できる方法であるが、今回の調査では樋門の床板を対象としており、湿潤状態にあることから温度差の情報に空洞の有無が反映される可能性が乏しく、この調査実験では用いなかった。

表-2.1 地下探査技術

番号	名 称	探 査 原 理	判定
1	表面温度差法	構造物直下に空洞が存在する場合、空洞部の熱伝達率が周辺と異なるから、結果的に表面の温度が異なる。したがって、構造物の表面温度の分布を知ることによって構造物下の状況を推定する。	○
2	電 波 レーダ	地中に放射された電波が誘電率の異なる境界で反射することを利用したレーダ探査装置である。	◎
3	アースグラフ	地盤の電気抵抗の分布を多点間での計測から求め、電気抵抗が土質の影響を受けることから地盤の状況を推定する。	
4	弾性波探査1	弾性波の伝搬速度が地盤の強さによって変化することを基に、地盤の層構造を探査する方法。	
5	弾性波探査2	構造物の表面加振にたいする応答をインピーダンスとして測定し、構造物の構造的強さを推定する。	○
6	音 響 分 析	構造物を打撃した時、構造物下に空洞がある場合とない場合では構造物の音響放射が異なり、発生した音の周波数を分析して空洞の有無を判定する。	

3. 探査の原理

3.1 弾性波探査

一般的な意味での弾性波探査法は、図 3.1 に示す様に加振点からの振動（弾性波）を多数点で測定し、弾性波の伝搬速度を地層構造にしたがって求めるものである。図において地層 1 の弾性波速度より地層 2 の弾性波速度が大きいと、加振点より遠い測点では地層 2 を通過した弾性波方が先に到達する。このためこの方法では、表面から下の地層に向かうにしたがって、強度すなわち弾性係数が大きくなる必要がある。表層部に強い層があるとその層を伝搬する波動のみが観測され、深い層での情報を得ることが難しい。

図 3.2 は、これに対し、浅層での探査を目的とした弾性波探査の概念である。表面をインパルスハンマのようなパルス幅の狭い加振力を発生するハンマで加振し、弾性波が地層の境界で反射してくるのを測定する方法である。パルスの幅が十分に狭い場合、図-3.2(b)のような波形が得られる。反射波の発生時間と反射の強さ、方向から地層の境界の位置、境界での弾性係数の違いを推定する方法である。この方法は、横弾性波を用いて深層探査に利用されることがある。

この方法を適用する場合、ハンマによって発生する弾性波の波長は、探査しようとする地層の厚さよりも短くなくてはならない。非常に浅い層での探査を行う場合、非常に短い波長の弾性波を発生させる必要がある。（コンクリートの層厚が 40cm の時、20 kHz 以上の振動数の弾性波を発生させる必要がある。）しかし、一般にこのような高い周波数をハンマ打撃によって発生させることは非常に難しく、また周波数が高くなる程波動の減衰が大きく、実際への適用にはなお技術開発が必要である。

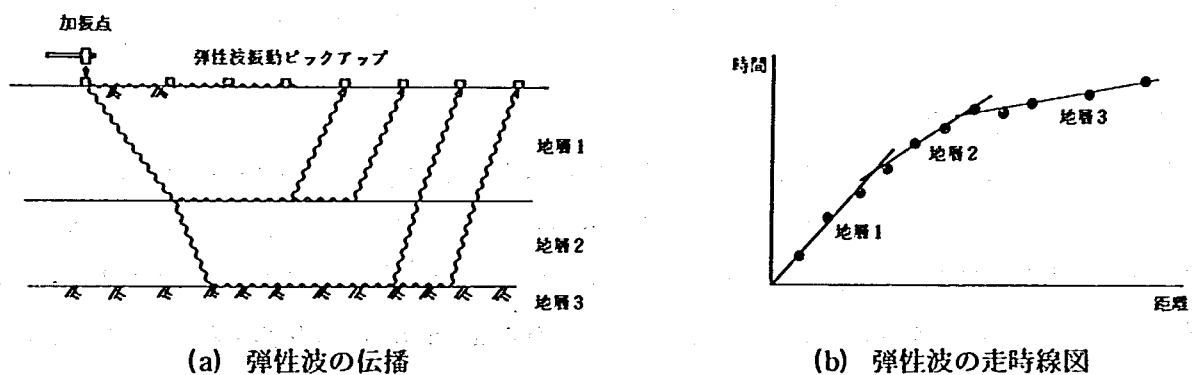


図-3.1 弾性波探査の概念

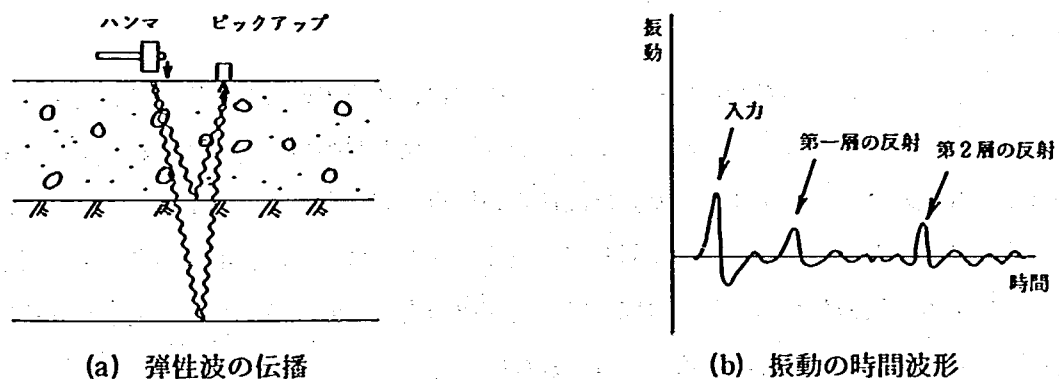


図-3.2 弾性波による浅層探査の概念

3.2 インピーダンスヘッドを用いた弾性波探査

図-3.3は、インピーダンスヘッドを用いた弾性波探査方法の概念を示すものである。インピーダンスヘッドは、加振機のヘッドに取り付け加振力と加振位置の加速度を同時に測定する装置である。加速度は、1階積分して速度とする。力と速度から加振点での接触インピーダンス（振動の伝達に対する機械的抵抗）を計算する。測定対象物が柔らかい場合、加えた力に対する変形は大きく、したがって、力を変形速度で除したインピーダンス値は小さくなる。

インピーダンスヘッドを探査に用いる場合、直接的に接触インピーダンスを用いることはないが、図-3.3(b)に示すように、加振力と速度の時間波形を対応させその特徴から地層構造を推定する。第2層目が柔らかい場合、図に示すように速度が大きくなり、また逆に硬い場合、速度が低減する。図では、重錘による衝撃加振の例を示しているが加振機を用いた定常加振でも同様の結果が得られる。

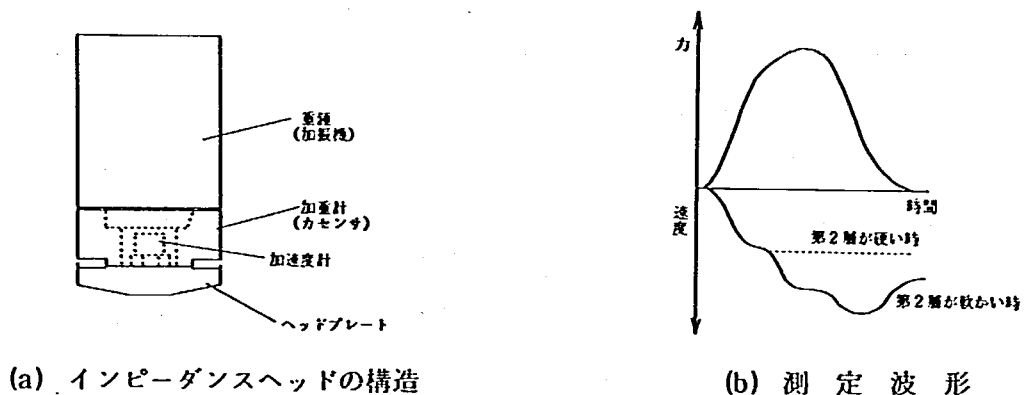


図-3.3 インピーダンスヘッドによる弾性波探査の概念

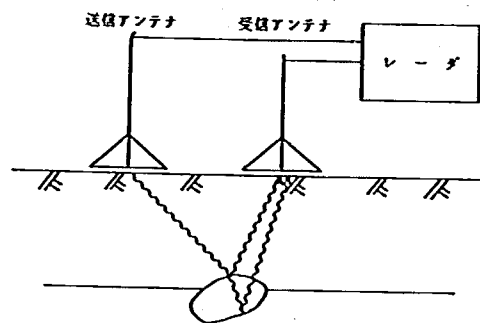
3.3 電波レーダによる探査

電磁波は、電波と磁波の交互のエネルギー変換によって伝搬する。これは、一般の振子の振動が運動エネルギーと位置エネルギーを交換しながら永続的に続けられるのと同様である。ただし、空間にエネルギーが拡散する波動である点が異なる。電磁波の伝搬ではしたがって媒質を必要とせず、また誘電率が最も小さい真空中で光の速度と等しい。電波の伝搬速度は、誘電率と透磁率の積の平方根に逆比例する。一般に、透磁率は空気、水、土ともほぼ1であり、電波の伝搬速度は、誘電率の平方根の逆数に比例すると言われている。空気の誘電率は、ほぼ1であるが、水は81、土は5～20であり、このため水中や地中での電波の伝搬速度は空気中に比べて遅くなる。

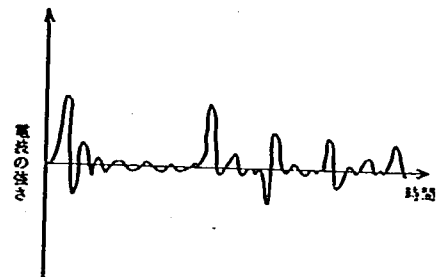
図-3.4は、電波レーダによる探査の概念を示す。電磁波は、誘電率の異なる境界で、誘電率の差に対応して反射する。電波レーダは、幅の狭いパルス電波を発射し、反射波の強さと時間遅れを測定するものである。測定の基本的な原理は図-3.2に示した弾性波探査の場合と同じである。しかし、弾性波探査が地層の力学的強さの違いを手がかりに探査するのに対して、電波レーダでは地層の誘電率の違いを探査手段としている。地盤を構成する物質のなかには強度は同じでも誘電率の違うものがあり、電波レーダによる探査結果から直ちに地層の力学的強度を論じることができない。

探査は、地下レーダを探査方向に走行させながら行い、反射波の強さを数段階に色変換して画面上に反射

波の帰ってきた時間を軸として表示する。(深さ方向の距離は、反射波の到達時間として表現される。また、表示画面の横軸は地下レーダの走行距離と対応するものが一般的である。)



(a) 測定概念



(b) レーダの受信波形

図-3.4 電波レーダによる探査の概念

4. 予備実験

前節で示した探査方法が実際の鉄筋コンクリート構造物下の探査に適用できるかどうかを明らかにするため、模型的に製作した鉄筋コンクリート床板を用いて予備実験を行った。

4.1 実験条件

(1) コンクリート床板

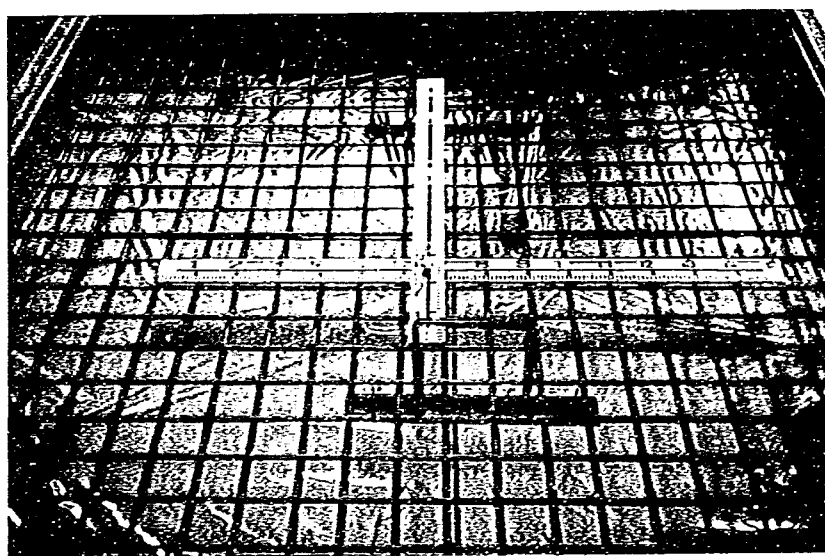
実験に用いたコンクリート床板は、厚さ10cm、20cm、30cm、40cmの4種である。縦横の寸法はいずれも2.2m×2.2mである。鉄筋は、10cmのメッシュで一重である。鉄筋の配置状況を写真－4.1（厚さ20cm）に示す。

(2) 空 洞

表－4.1 空洞の条件

空洞の大きさ	空気	水	備 考
な し	－	－	
1.2 m×1.2 m	○	－	深さ 0.1 m
0.4 m×0.4 m	○	－	〃
0.4 m×0.4 m	－	○	〃

コンクリート床板は、敷均した砂質系地盤に模型的な空洞を作成し、その上に直接設置した。空洞は、表－4.1に示す3種類であり、対照として空洞無し
の条件を加えている。作成状況を写真－4.2に示す。



写真－4.1 鉄筋の配置状況



写真－4.2 空洞の作成状況

4.2 インピーダンスヘッド落下法

インピーダンスヘッド落下法による探査の実験装置のブロック図を図－4.1に示す。衝撃加振用の重錘の質量は約4 kgである。加速度の測定値は、アナログの積分回路によって速度に変換し、衝撃荷重の時間波形と同時にデータレコーダに記録した。また、波形は同時にFFT(高速フーリエ変換)装置によって波形記録を行った。実験状況を写真－4.3に示す。

図－4.2は、衝撃加振ではなく、定常加振による接触インピーダンスの測定装置を示す。加振機は約20 kgfの加振力を持ち、加振機と測定対象床板の間にはインピーダンスヘッドを取り付けている。先にも述べたように、加振の方法は異なるが測定の原理は同じである。実験の状況を写真－4.4に示す。

インピーダンスヘッド落下法では、重錘を高さ約10 cmから落下させ、この時の衝撃力と速度の波形を16回平均して記録した。荷重の波形には測定対象物の強さの変化の情報はあまりよく反映されないで、ここでは速度の波形を用いた。

図－4.3に測定結果の一部を示す。図は床板の厚さが30 cmと40 cmの例について示すが、図からもあきらかな通り、空洞の状態による波形の特徴的な違いはなく、これから空洞の有無を判定することはできない。この原因となっているのは、速度波形の周波数が約1 kHzとなっており、探査に必要な周波数成分(10 kHz以上)が発生していないことである。打撃によって発生する衝撃力の周波数は、対象物が硬い程、またハンマの質量が小さい程高くなるが、重錘の質量を小さくすると発生する衝撃力が小さくなり、測定が困難となる。このため、衝撃力を用いて空洞を探査することは容易ではないと判断された。

定常加振は、周波数範囲200～20 kHzのランダム波を用いて加振し、この時の荷重と振動速度の間の伝達関数(インピーダンス関数)及びコヒーレンス関数を求めた。実験の結果を図－4.4(a), (b)に示す。コヒーレンス関数、伝達関数(インピーダンス関数)は、空洞の有無、形状によってわずかに異なっているが、これを明確に区分することはできない。

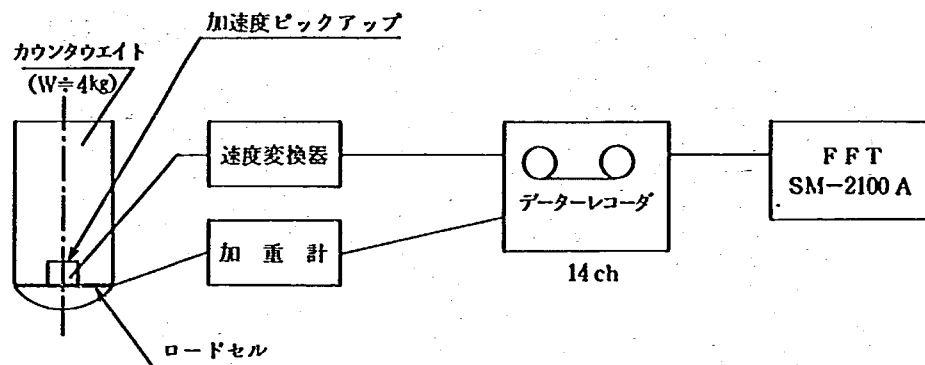


図-4.1 インピーダンスヘッド落下法の測定系

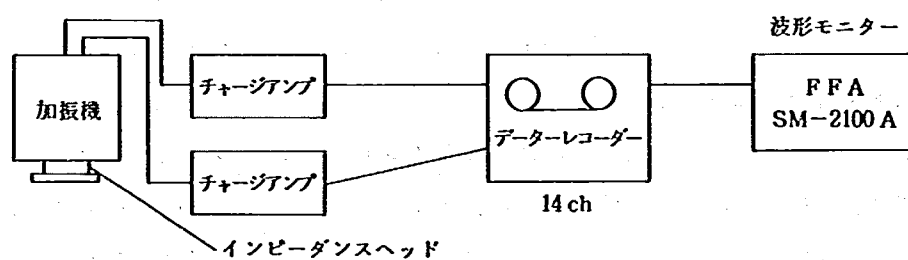


図-4.2 定常加振法の測定系

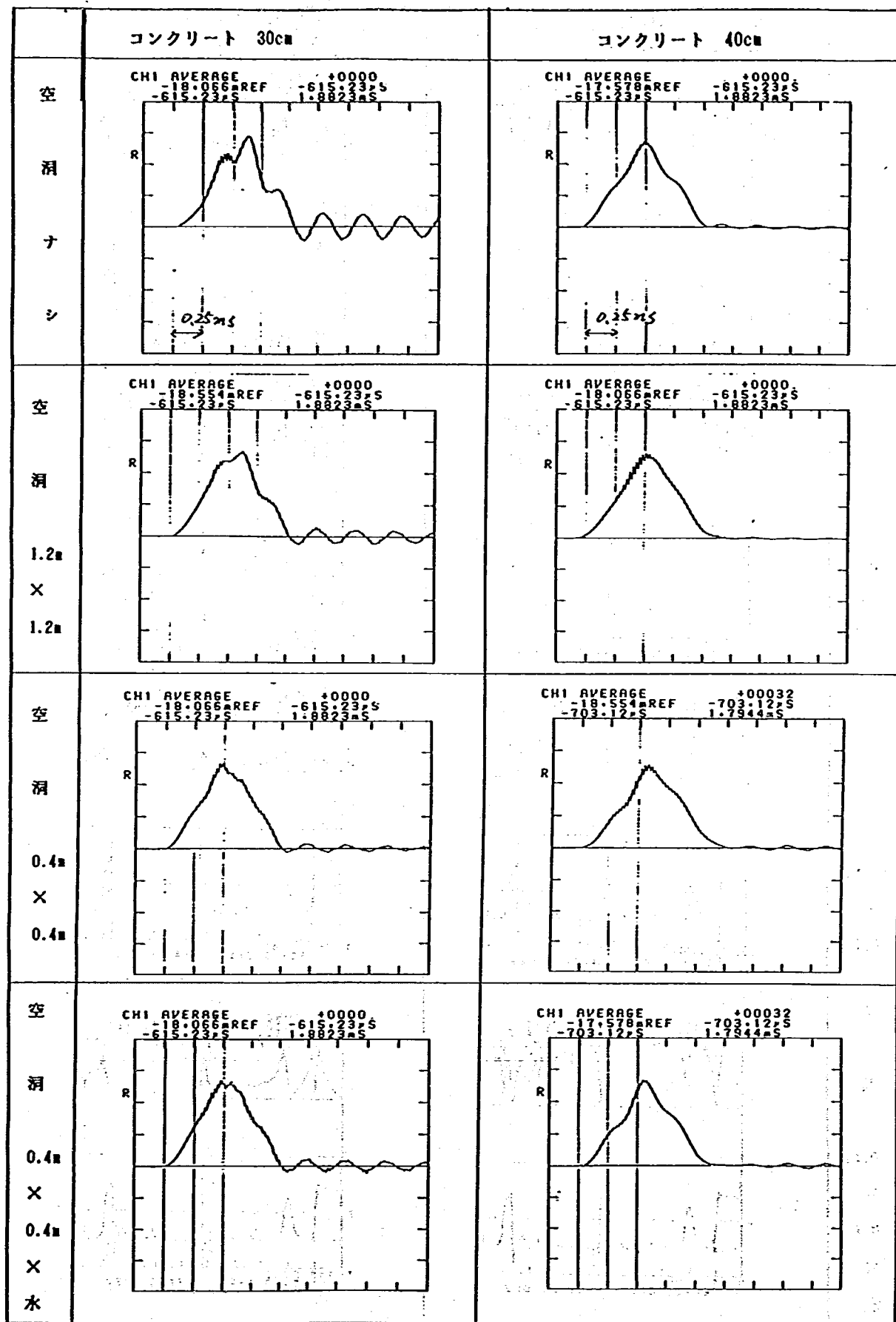


図-4.3 インピーダンスヘッド落下法による速度波形

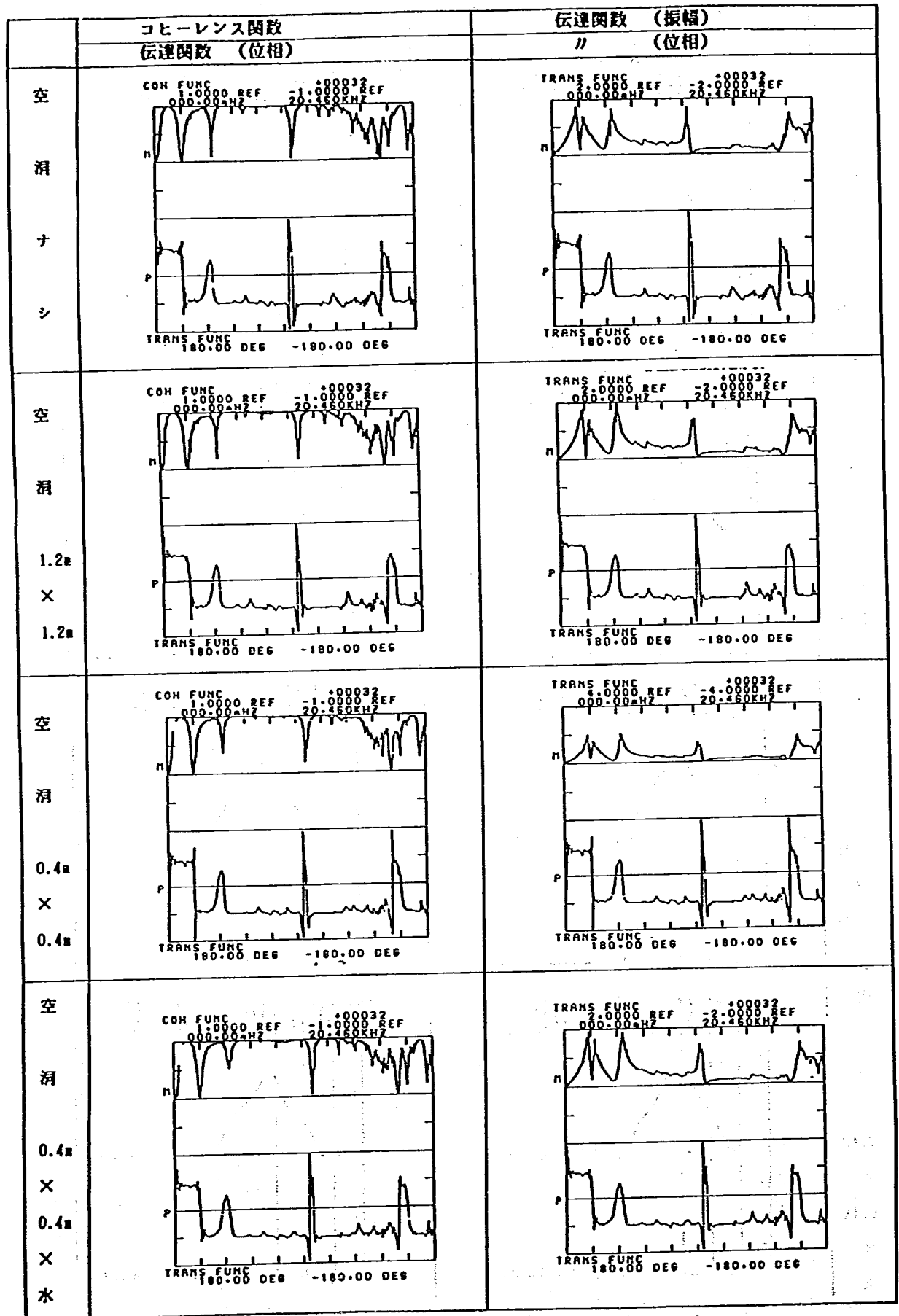


図-4.4 (a) 定常加振法によるインピーダンス (厚さ30cm)

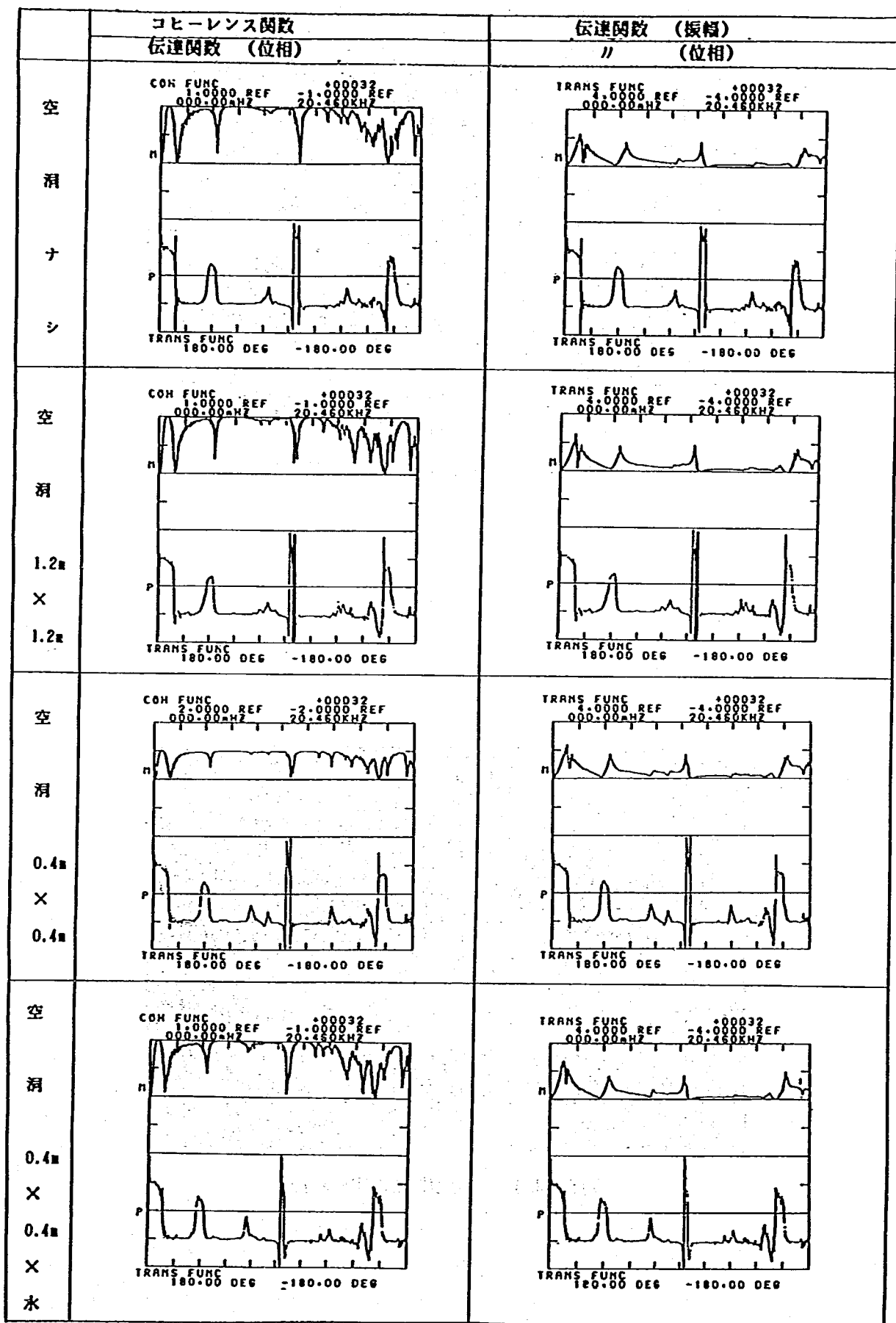


図-4.4 (b) 定常加振によるインピーダンス (厚さ40cm)

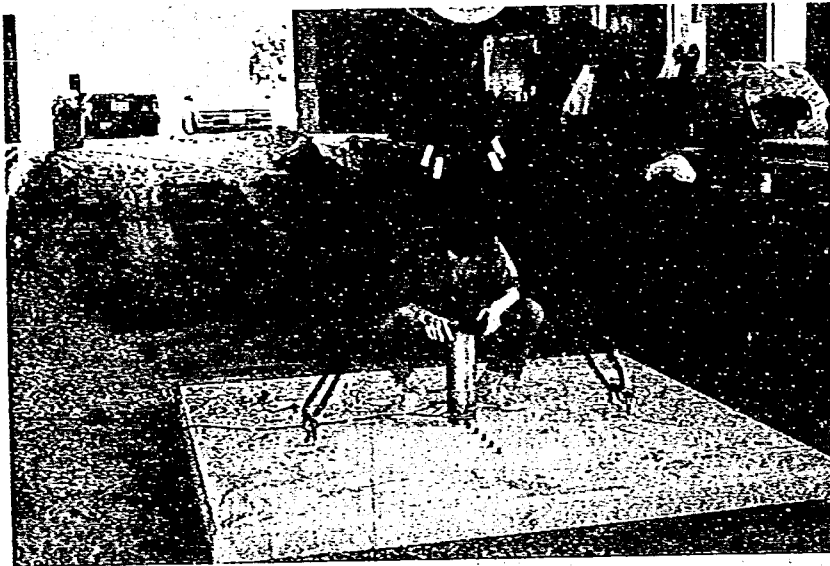


写真-4.3 インピーダンスヘッド落下法実験状況

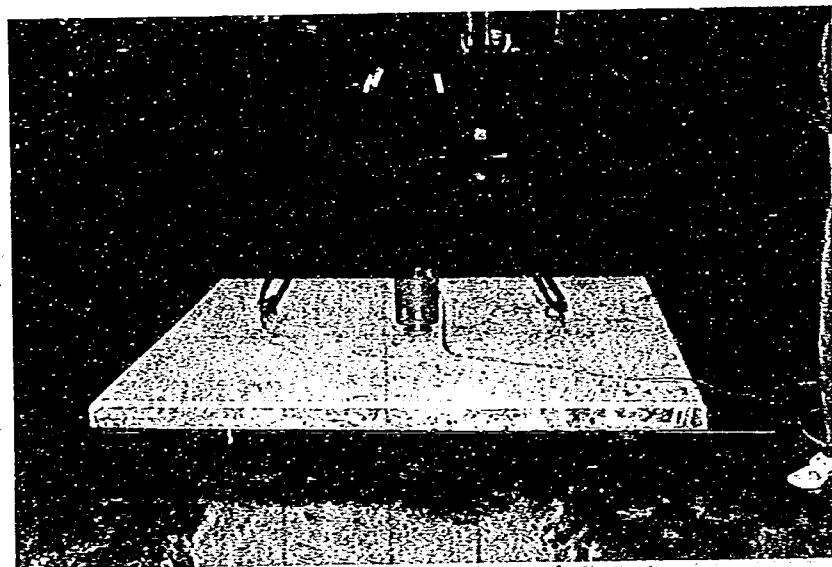


写真-4.4 定常加振法の実験状況

4.3 電波レーダ

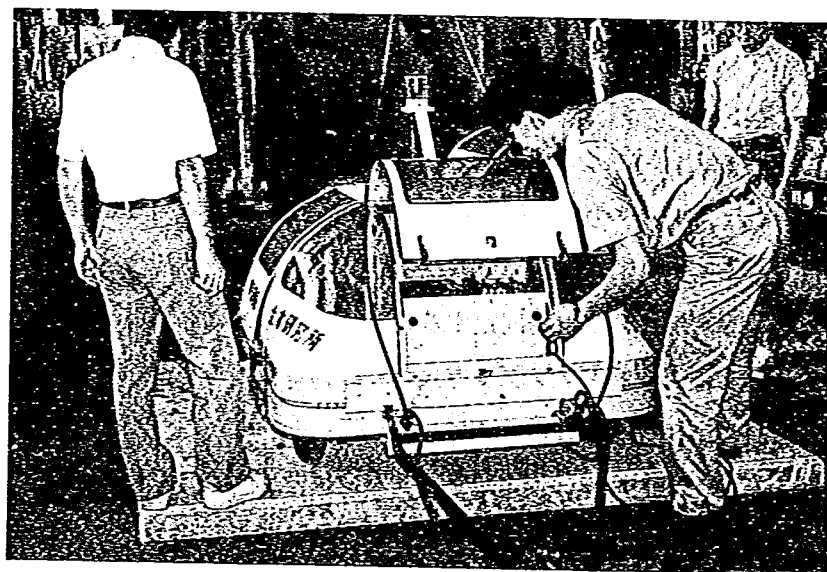
電波による地中レーダは、使用する周波数および電波の送受信の方法によって数種に区分することができる。現在、用いられている一般的な地中レーダの使用周波数は80 MHz, 167 MHz, 350 MHzであり、いずれも発信される電波のパルスの幅から計算によって求められた値である。予備実験に用いたレーダは、これらとは異なり、地盤の締固め度の測定を目的として開発した電波レーダであり、使用周波数は720 MHzと高い。これは、締固め度の測定対象となる深さ50 cm以浅の測定を目的として開発したためである。電波レーダでは、発信する信号の時間幅を基準として掃引する最大時間を設定しているため、結果的に使用する周波数が高い程、探査深度が浅くなるという特徴がある。また、電波の地中での減衰は周波数に比例して大きくなり、高い周波数では、深い地盤の探査は困難となる。一般に、80 MHz程度の周波数で探査深度は普通の地盤で9 mと言われており、720 MHzでは、探査深度1.5 m程度となる。樋門樋管の周辺の調査では、コンクリート床板の厚さが1 mある場合でも探査深度が1.5 mあれば十分であり、このため高周波数型の電波レーダを用いたものである。

測定方法には、電波の送受信を同一のアンテナで行うものと、送信アンテナと受信アンテナを別々に持つものがある。送受信共用型は、レーダの探査範囲がアンテナの直下近傍に限定され、かつアンテナ部の重量が軽い、という特徴がある。送受信別々のものでは、受信アンテナを2個以上持ち、アンテナ部の重量は重い但し反射波の時間遅れから空洞などの位置を同定することができる、という特徴がある。

今回の実験に用いたレーダは、ワイドアングル方式と呼ばれるもので、受信アンテナを2個を有するタイプである。予備実験での測定の状況を写真-4.5に示す。

測定の結果を写真-4.6～4.9に示す。測定結果は、写真に示すようにCRT画面上の映像として表示される。写真に見られるとおり空洞の状況に対応してCRTに表示された映像パターンは異なり、地下レーダの情報は現在この画面のパターンを解読する方法によって得られているのが現状である。写真-4.6は空洞がない状態であるから、写真に見られる通り特別なパターンは観測されない。写真-4.7は40 cmの鉄筋コンクリートの下に1.2 m×1.2 m深さ10 cm空気空洞を設けた場合の探査結果である。写真に見られるとおり、画面の上端から2本目の筋が中央部分右側で盛り上がっている。2本目の線は、コンクリートの底部及び空洞の底部からの反射波を意味していると解釈することができる。すなわち、この部分が盛り上がって観測されるのは、空気中での電波の伝搬速度がコンクリートや土の中での速度と比較して速いためである。実際、コンクリートの誘電率は、約4、土は4～20であるから、コンクリートの中の電波の速度は空気中の1/2以下となる。このため空気空洞が存在する場合、反射波の映像が盛り上がって観察されることになる。この映像から、電波が鉄筋コンクリートを貫通して、その下の地盤に達していることがわかる。写真-4.8は、同様に空気空洞であるが、寸法は0.4 m×0.4 mである。写真-4.7の場合と同様に空洞の上部をレーダが通過している時、反射波の盛り上がり現象が見られる。ただし、空洞の寸法が小さいため、盛り上がり部分の幅が狭くなっている。この幅は、レーダの水平方向の掃引速度に依存する。予備実験では、できるだけ一定速度で探査機械を走行されるようにしたが、手動であるため掃引速度一定とはなっていない。実際の地下レーダでは、ロータリエンコーダを用い、走行距離によって水平方向の掃引を行う方式を用いているのが一般的である。

写真－4.9は、空洞が水で満たされている場合の映像である。反射波のうち、2本目の線となっているものはやや盛り上がり、表示されているが、その下の部分には逆に垂れ下がった線が観測される。これは、反射波の到達時間が遅れるためである。すなわち、コンクリートの下部にコンクリートより誘電率の高いものが存在すること（この場合水）を意味している。また、この部分では時間遅れを生じて多重反射が見られるが、これは水の誘電率が周囲より大きく、このため電波の多重反射が生じたものである。



写真－4.5 電波レーダによる実験状況

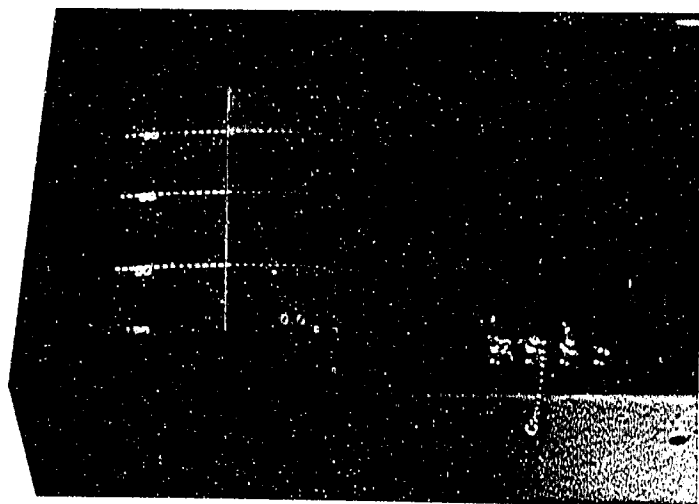


写真-4.6 空洞なし

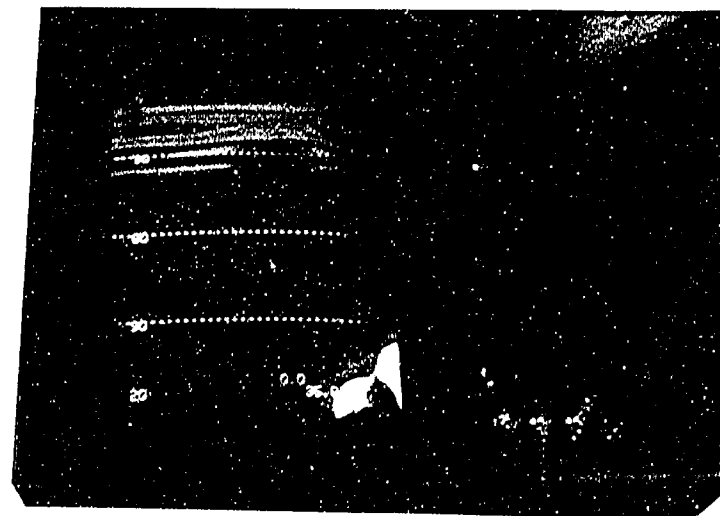


写真-4.7 空気空洞 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$

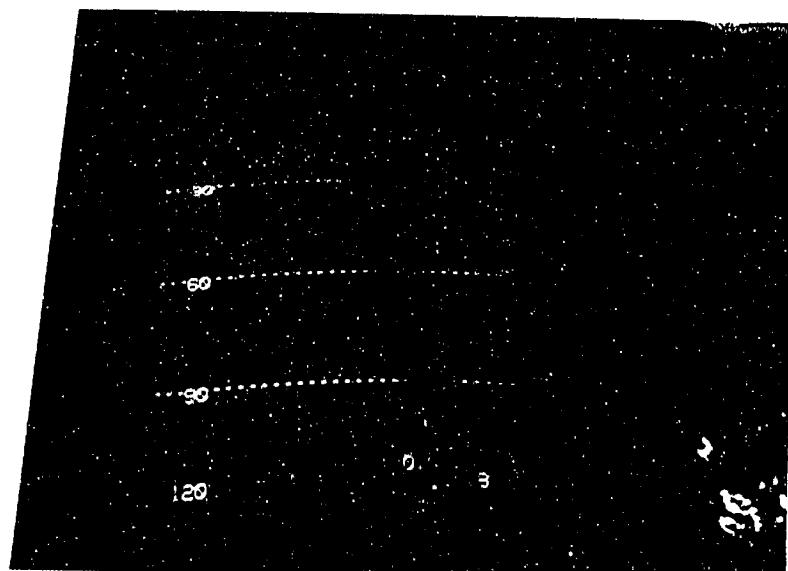


写真-4.8 空気空洞 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$

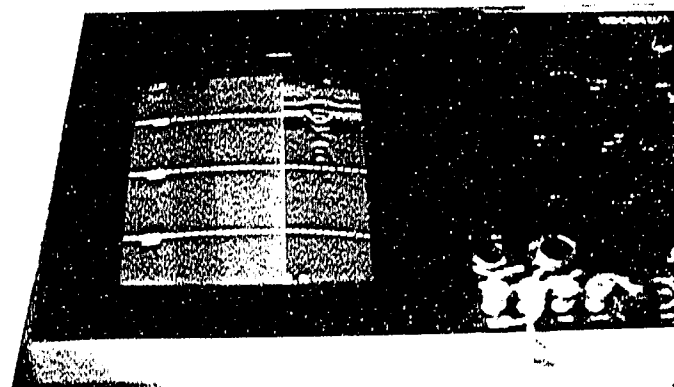


写真-4.9 水空洞 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$

5. 現地調査

予備調査の対象とした、インピーダンスヘッド落下法及び地下レーダ法を用いて実際の樋門の調査を行った。

5.1 調査対象

- 1) 樋 門 名 久座仁排水樋門
- 2) 河 川 名 江の川 (建設省中国地方建設局浜田工事事務所)
- 3) 設 置 年 昭和49年 (1974年)
- 4) 本体構造 RC 2.0 × 2.0 × 43.6 m

久座仁排水樋門の構造は、現況調査の結果であり、製作図面は残されていない。このため、調査の段階では、コンクリートの厚さや鉄筋の配置状況などは分かっていなかった。樋門の内部には、図-5.1に示すように至るところにクラックが発生しており、特に中央部分のクラックの幅は10 mm以上あり、クラックの深さは少なくとも50 cm以上であることが確認されている。一般にこのような構造物では、鉄筋がコンクリートの両面に配置され、しかも間隔は15 cm以内であるのが普通であり、鉄筋が腐食している可能性が考えられた。

樋門、樋管点検調査結果 (No. 3) 調査写真 (久座仁樋水樋門)

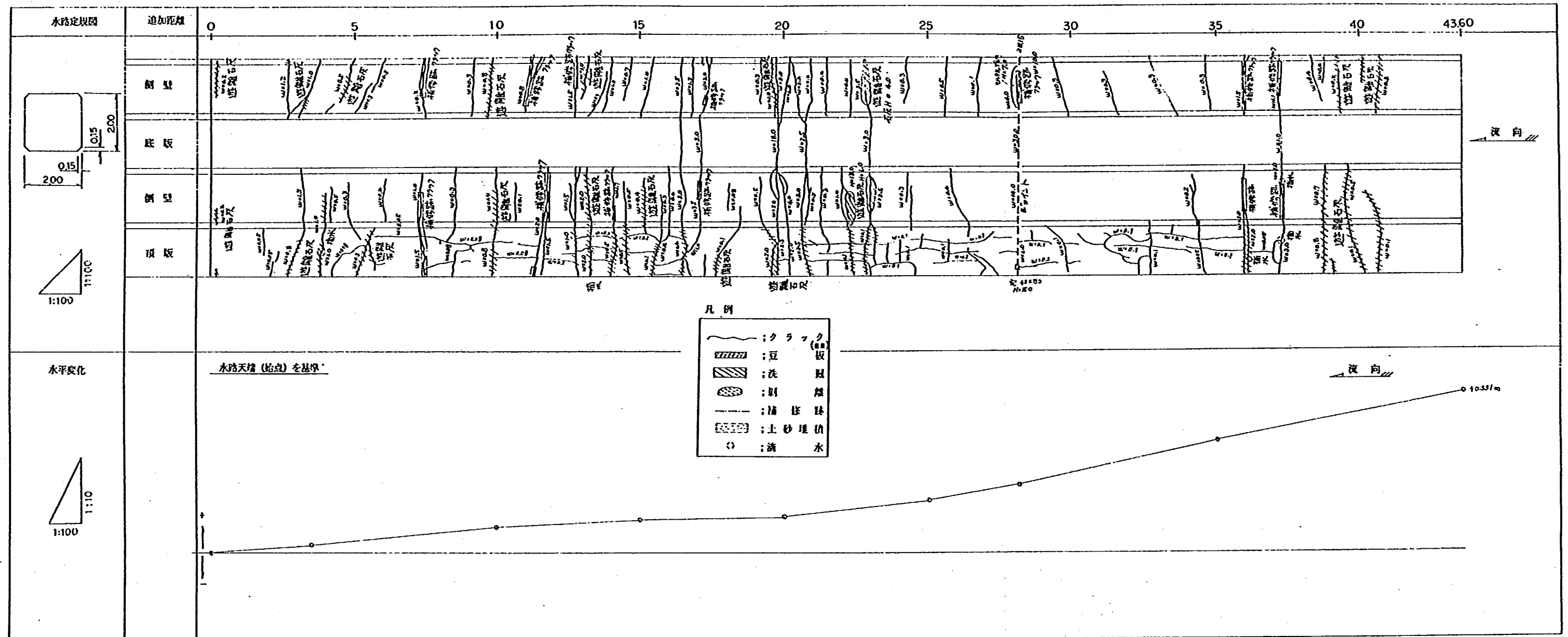


図-5.1 樋門内の点検結果

5.2 インピーダンスヘッド法による調査

5.2.1 調査方法

1) 測定点

対象樋門の中心（江の川から21.8m）を中心として ± 10 mの20m区間を測定区間とした。位置を図-5.2に示す。測定は、この20m区間、10cmピッチの201箇所とした。

2) 測定方法

重錘の質量を20kgとし、高さ10cmから落下させてこの時の衝撃荷重及び加速度を測定した。測定データは、データレコーダ（ティアック；SR-50）に記録し、またFFTアナライザ（岩崎通信；SM-2100A）によって波形処理を施した。

測定値のうち、加速度の時間波形は一階積分し、振動速度に変換した。測定によって得られる信号の波形は、図-5.3に示すようになる。測定尺度として接触インピーダンスを用いた。これは、衝撃力の最大値を速度の最大値で除すものである。振動速度の最大値はほぼ重錘の落下速度の最大値（コンクリートと衝突する寸前の速度）に等しく、衝撃力は測定対象の構造的剛性に比例する。このため、インピーダンス値は測定対象の強さを反映する。すなわち、コンクリート構造物の基礎部分に空洞があるとその部分の強さが損なわれていることになり、インピーダンスの変化から空洞の有無を推定することができる。ただし、コンクリート構造物が十分に厚い場合、入力となった衝撃力の範囲では基礎の影響を反映できる程には変形させることができない場合があり、この時にはインピーダンス計測は適用できなくなる。図-5.3に示す時間 t_1 、 t_2 は、衝撃力の最大値から95%減衰した時間を示し、この間を衝撃の作用時間 t とした。

5.2.2 測定結果

インピーダンスの測定結果を表-5.1に示す。また、図-5.4は測定したインピーダンスの値を測定点との関係で図にしたものである。図ではインピーダンスの大きさによって3段階の区分を行っている。

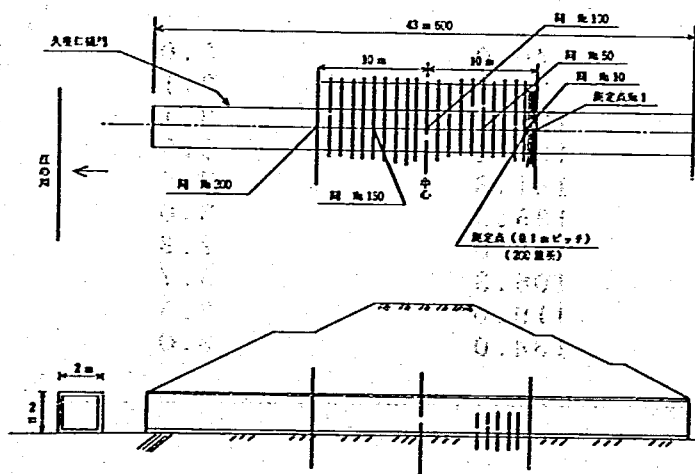


図-5.2 測定点の配置

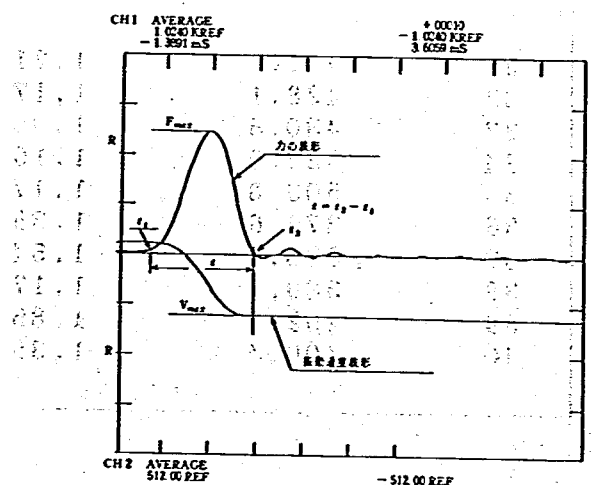


図-5.3 測定波形

表-5.1 インピーダンスヘッド落下による各諸元の測定結果 (1)

測点	Fmax(Kg・f)	T(ms)	Vmax(cm/s)	Z(F/V)(Kg・f・s/cm)
1	305.3	1.62	100.7	3.0
2	412.8	1.15	115.7	3.6
3	401.0	1.14	113.7	3.5
4	346.0	1.27	112.7	3.1
5	417.7	1.25	127.3	3.3
6	282.0	1.63	100.4	2.8
7	301.9	1.49	101.2	3.0
8	286.0	1.39	89.3	3.2
9	306.8	1.30	89.6	3.4
10	233.7	2.45	96.1	2.4
11	416.0	1.30	135.3	3.1
12	397.6	1.24	132.6	3.0
13	362.9	1.24	113.9	3.2
14	400.0	1.20	129.6	3.1
15	321.1	1.41	118.3	2.7
16	389.1	1.18	115.3	3.4
17	420.8	1.12	122.3	3.4
18	378.3	1.19	115.9	3.3
19	373.4	1.27	125.6	3.0
20	352.5	1.36	117.8	3.0
21	399.8	1.19	123.3	3.2
22	428.6	1.16	131.5	3.3
23	349.1	1.28	115.2	3.0
24	403.3	1.27	137.1	2.9
25	453.4	1.22	153.3	3.0
26	365.7	1.15	106.9	3.4
27	340.6	1.28	107.5	3.2
28	364.1	1.30	113.8	3.2
29	293.7	1.54	107.3	2.7
30	321.5	1.51	108.8	3.0
31	421.2	1.21	140.0	3.0
32	428.1	1.17	138.8	3.1
33	430.5	1.30	138.1	3.1
34	523.0	1.16	132.6	3.9
35	503.8	1.17	141.8	3.6
36	379.6	1.35	125.9	3.0
37	328.8	1.54	118.6	2.8
38	389.7	1.17	106.3	3.7
39	292.3	1.85	119.0	2.5
40	400.4	1.35	134.0	3.0

表-5.2 インピーダンスヘッド落下による各諸元の測定結果 (2)

測点	Fmax(Kg・f)	T(ms)	Vmax(cm/s)	Z(F/V)(Kg・f・s/cm)
41	537.8	1.09	152.7	3.5
42	386.1	1.38	132.7	2.9
43	440.3	1.19	139.1	3.2
44	500.4	1.07	142.3	3.5
45	399.2	1.10	128.2	3.1
46	507.7	1.14	148.2	3.4
47	412.8	1.26	130.2	3.2
48	356.0	1.54	127.0	2.8
49	377.0	1.41	114.0	3.3
50	366.0	1.53	126.0	2.9
51	490.3	1.18	144.5	3.4
52	480.7	1.30	140.0	3.4
53	444.9	1.40	143.8	3.1
54	398.3	1.59	135.0	3.0
55	388.0	1.50	135.0	2.9
56	480.7	1.30	157.0	3.1
57	444.9	1.40	143.8	3.1
58	398.3	1.59	135.0	3.0
59	512.1	1.18	154.0	3.3
60	474.3	1.33	145.0	3.3
61	390.7	1.38	133.0	2.9
62	480.1	1.18	151.2	3.2
63	420.9	1.22	135.0	3.1
64	477.4	1.26	148.8	3.2
65	486.7	1.18	148.8	3.3
66	437.3	0.00	141.1	3.1
67	415.5	1.21	129.3	3.2
68	463.8	1.16	145.4	3.2
69	500.3	1.13	153.0	3.3
70	436.8	1.21	141.6	3.1
71	521.8	1.11	150.3	3.5
72	472.8	1.23	156.1	3.0
73	443.7	1.20	141.8	3.1
74	445.2	1.24	143.7	3.1
75	493.2	1.20	155.9	3.2
76	559.9	1.08	156.8	3.6
77	514.1	1.13	149.1	3.4
78	505.6	1.14	148.7	3.4
79	496.0	1.18	156.5	3.2
80	544.5	1.08	158.3	3.4

表-5.3 インピーダンスヘッド落下による各諸元の測定結果 (3)

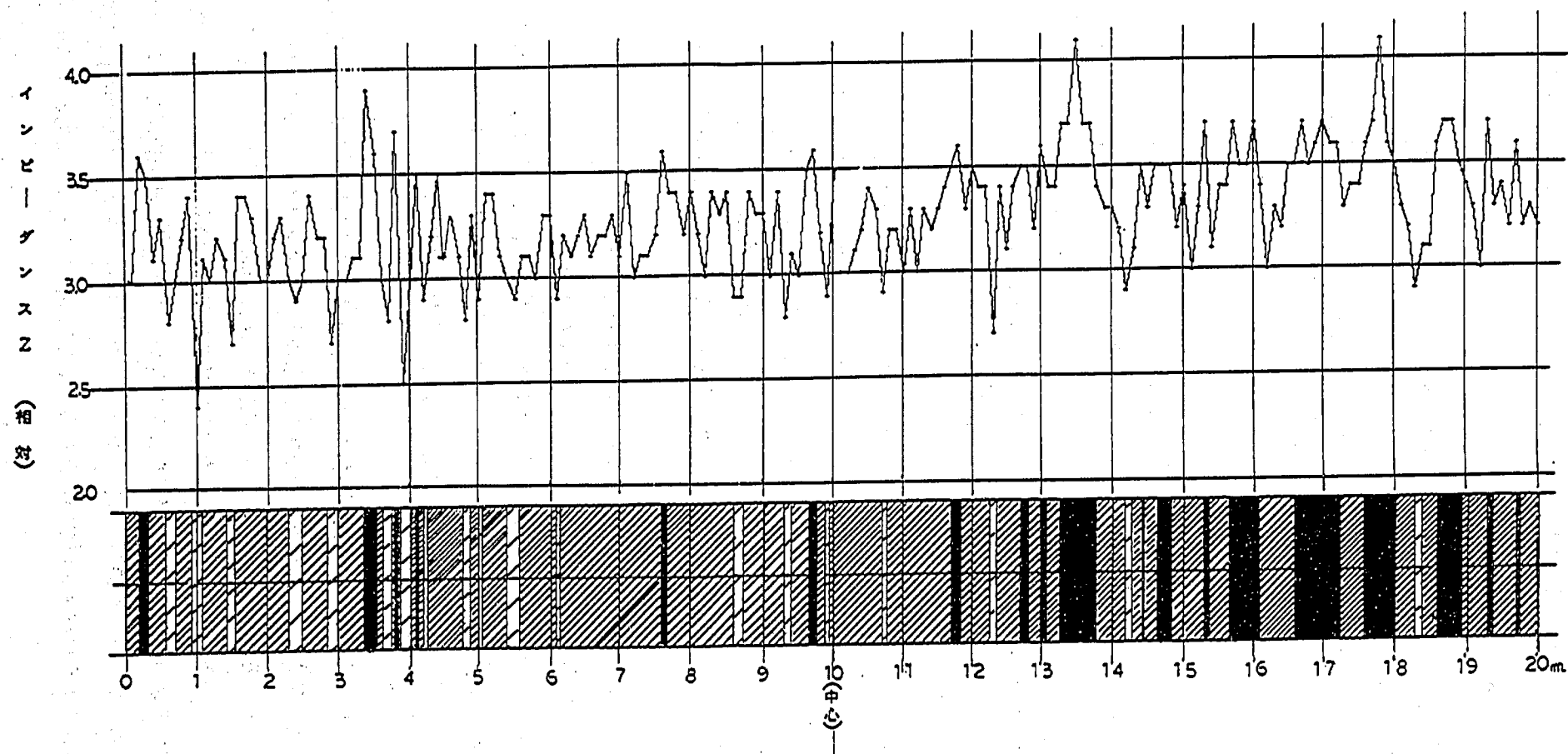
測点	Fmax(Kg・f)	T(ms)	Vmax(cm/s)	Z(F/V)(Kg・f・s/cm)
81	448.3	1.16	138.8	3.2
82	442.7	1.27	145.6	3.0
83	518.6	1.13	151.4	3.4
84	501.9	1.20	154.0	3.3
85	530.0	1.20	155.8	3.4
86	390.6	1.41	135.8	2.9
87	352.6	1.39	121.3	2.9
88	444.9	1.17	130.0	3.4
89	421.6	1.26	128.3	3.3
90	432.8	1.23	131.8	3.3
91	368.5	1.35	124.0	3.0
92	412.8	1.19	122.6	3.4
93	337.6	1.49	122.0	2.8
94	432.5	1.31	139.3	3.1
95	421.3	1.32	140.0	3.0
96	521.3	1.13	148.0	3.5
97	472.8	1.14	132.6	3.6
98	442.0	1.24	137.0	3.2
99	416.3	1.52	142.0	2.9
100	491.2	1.16	141.0	3.5
101	376.8	1.45	123.9	3.0
102	404.4	1.45	133.3	3.0
103	406.8	1.34	130.6	3.1
104	420.0	1.27	130.8	3.2
105	449.3	1.31	134.1	3.4
106	423.3	1.25	127.8	3.3
107	332.3	1.55	116.4	2.9
108	415.5	1.32	131.5	3.2
109	405.1	1.30	125.3	3.2
110	398.8	1.41	133.0	3.0
111	433.3	1.24	129.5	3.3
112	391.1	1.42	132.5	3.0
113	444.8	1.24	133.0	3.3
114	456.9	1.31	143.2	3.2
115	482.3	1.22	148.1	3.3
116	455.7	1.24	133.7	3.4
117	482.7	1.19	138.2	3.5
118	498.4	1.13	141.2	3.5
119	460.6	1.32	138.8	3.3
120	484.5	1.16	140.4	3.5

表-5.4 インピーダンスヘッド落下による各諸元の測定結果 (4)

測点	Fmax(Kg・f)	T(ms)	Vmax(cm/s)	Z(F/V)(Kg・f・s/cm)
121	471.0	1.24	138.7	3.4
122	474.1	1.22	139.9	3.4
123	346.7	1.63	129.0	2.7
124	487.8	1.23	144.9	3.4
125	465.0	1.30	147.6	3.1
126	435.9	1.25	129.3	3.4
127	484.8	1.19	140.2	3.5
128	482.6	1.18	139.1	3.5
129	431.6	1.38	135.4	3.2
130	540.1	1.11	149.1	3.6
131	476.3	1.20	140.8	3.4
132	514.6	1.25	149.4	3.4
133	556.6	1.09	149.5	3.7
134	569.0	1.09	153.8	3.7
135	632.7	1.00	155.4	4.1
136	563.0	1.10	151.3	3.7
137	584.5	1.08	156.0	3.7
138	491.8	1.17	144.9	3.4
139	492.3	1.25	148.5	3.3
140	519.0	1.19	155.7	3.3
141	456.7	1.28	142.1	3.2
142	377.4	1.30	130.0	2.9
143	459.1	1.32	150.4	3.1
144	537.9	1.12	153.5	3.5
145	510.4	1.19	152.4	3.3
146	484.5	1.20	137.0	3.5
147	510.8	1.18	146.9	3.5
148	510.1	1.10	144.9	3.5
149	469.2	1.30	146.8	3.2
150	536.4	1.21	156.3	3.4
151	391.2	1.41	135.0	2.9
152	471.3	1.21	142.5	3.3
153	491.7	1.11	133.3	3.7
154	427.8	1.31	137.8	3.1
155	501.7	1.21	148.2	3.4
156	492.1	1.22	144.0	3.4
157	558.0	1.11	150.1	3.7
158	498.4	1.21	141.0	3.5
159	513.8	1.15	145.9	3.5
160	576.9	1.10	155.7	3.7

表-5.5 インピーダンスヘッド落下による各諸元の測定結果 (5)

測点	Fmax(Kg・f)	T(ms)	Vmax(cm/s)	Z(F/V)(Kg・f・s/cm)
161	487.0	1.19	145.2	3.4
162	421.2	1.31	140.0	3.0
163	470.1	1.22	141.7	3.3
164	491.0	1.26	151.6	3.2
165	535.2	1.12	152.1	3.5
166	507.4	1.18	145.8	3.5
167	559.4	1.03	150.1	3.7
168	518.7	1.12	148.6	3.5
169	571.0	1.10	156.5	3.6
170	585.1	1.10	158.0	3.7
171	537.3	1.17	151.0	3.6
172	567.7	1.12	157.0	3.6
173	508.7	1.27	154.4	3.3
174	536.4	1.12	155.9	3.4
175	516.7	1.24	154.2	3.4
176	555.1	1.09	155.3	3.6
177	575.4	1.11	156.8	3.7
178	650.0	1.10	156.8	4.1
179	566.4	1.17	158.8	3.6
180	546.9	1.22	157.0	3.5
181	510.9	1.20	155.4	3.3
182	459.1	1.22	144.5	3.2
183	439.9	1.33	152.7	2.9
184	476.1	1.26	152.3	3.1
185	475.0	1.25	154.4	3.1
186	568.2	1.15	157.8	3.6
187	583.0	1.13	156.5	3.7
188	536.5	1.04	144.1	3.7
189	535.9	1.08	151.8	3.5
190	536.4	1.10	156.0	3.4
191	515.8	1.16	155.7	3.3
192	469.1	1.31	154.6	3.0
193	567.4	1.09	154.7	3.7
194	520.4	1.19	157.5	3.3
195	533.7	1.20	157.3	3.4
196	477.0	1.21	147.2	3.2
197	565.4	1.05	154.9	3.6
198	498.1	1.21	154.6	3.2
199	513.4	1.37	156.1	3.3
200	468.1	1.22	148.6	3.2



凡 例

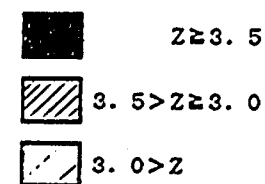


図-5.4 インピーダンス値の分布

5.3 電波レーダ（地下レーダ）による現地調査

5.3.1 調査方法

1) 測定線

電波レーダによる測定は、レーダを走行させながら連続的に行うので、点ではなく線的に測定を行うことになる。測定点の距離標は、図-5.2の場合と同じであり、距離0は樋門の中央であることを意味する。図-5.5に測定点の配置と呼称を示す。3本の測定線を設定したがいずれも床板を対象としたものである。測線2は樋門の中央であるが、探査機械の幅が1.0 mあることから測線1及び2は壁面から0.5 mの位置である。

2) 測定方法

測定は、締固め管理ロボットとして建設省土木研究所と東急建設株式会社が共同研究によって開発した探査装置（使用する電波の周波数720 MHz）と地中レーダ（KSD-8；167 MHz）の2種の地下レーダを用いて行った。測定装置のシステム構成は図-5.6に示す通りであり、地中レーダによる測定の場合でも締固め管理ロボットによる測定の場合でも測定結果を画面に表示するコントローラは共通である。画像としてCRTディスプレイ上に表示されたデータは走行距離約5 m毎にカメラ撮影した。

5.3.2 調査結果

測定結果を写真-5.1～5.3に示す。使用した地下レーダの種類によって観測された映像は異なっている。映像の違いの原因の一つは、使用している周波数が異なり、探査深度が違うためである。結果から判断すると締固め管理ロボットの探査深度は、約2 m以内、KSD-8では、約6 mと推定される。

予備実験の結果と併せて判断すると、締固め管理ロボットでの探査映像の最上部の線は、床板コンクリートの表面からの反射、2番目の線は床板の底面からの反射と考えることができる。これを基に映像を解釈すると、以下のことが推定される。

- ① A部は、コンクリートが厚いか、床板と棄コンの間に間隙が生じている。
- ② B部のコンクリートは乾燥しているか、もしくはコンクリートが薄い。
- ③ B部4 m程度の深さには、電波を反射するものが平面的にある。しかし、その物質は分らない。

また、床板表面の観察結果から、C部はコンクリートのジョイント部である。ジョイントのためコンクリートの見かけの厚さが大きく、従って、床板下面からの反射波が捕らえられていない。

5.3.3 考 察

レーダによる探査結果から、樋門床板下面の空洞の有無を明確に指摘することは困難であった。写真-5.1のA部は空洞と判定することもできるが、この判定を下す前提条件としてコンクリートの厚さがこの樋門のどの位置でも同じということがある。地下レーダは、探査機器として用いられているが、地下の力学的状態を反映するものではないため、地下の構造を正確に探査する機械ではないというのが妥当な判断であろう。樋門の製作図面が与えられているような場合には、図面を参照しながら、レーダの結果をよりよく解釈することができよう。いずれにしろ、対象とした樋門では、コンクリート底盤からの電波の反射が明確に観測されており、また空洞と考えられるようなパタンがないことから判断して空洞があるにしても非常に小規模なものと思われる。

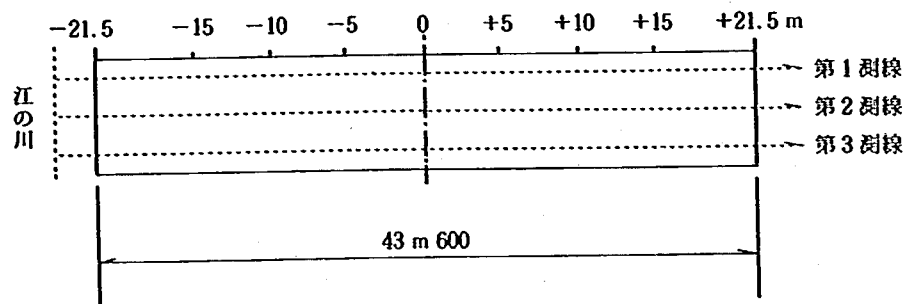


図-5.5 電波レーダによる測定線の配置

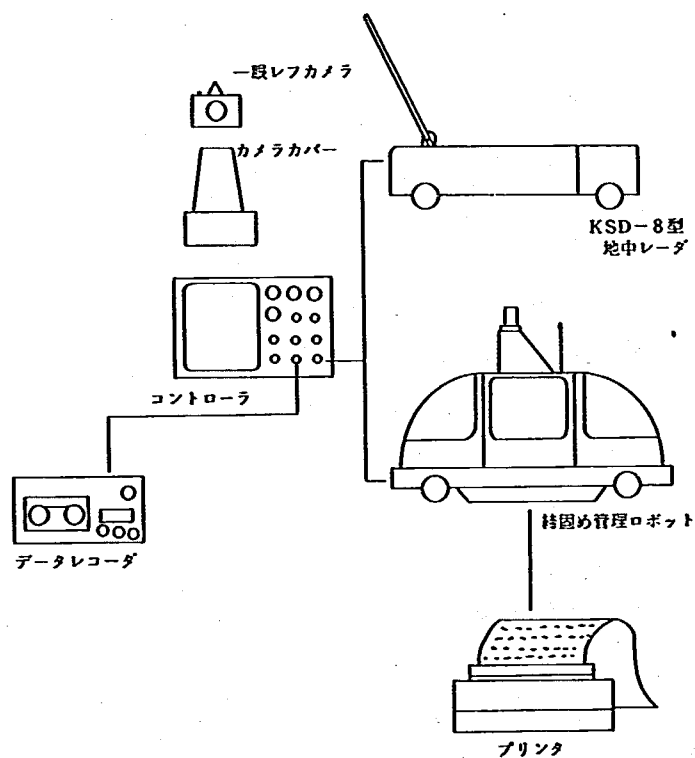


図-5.6 システムの構成

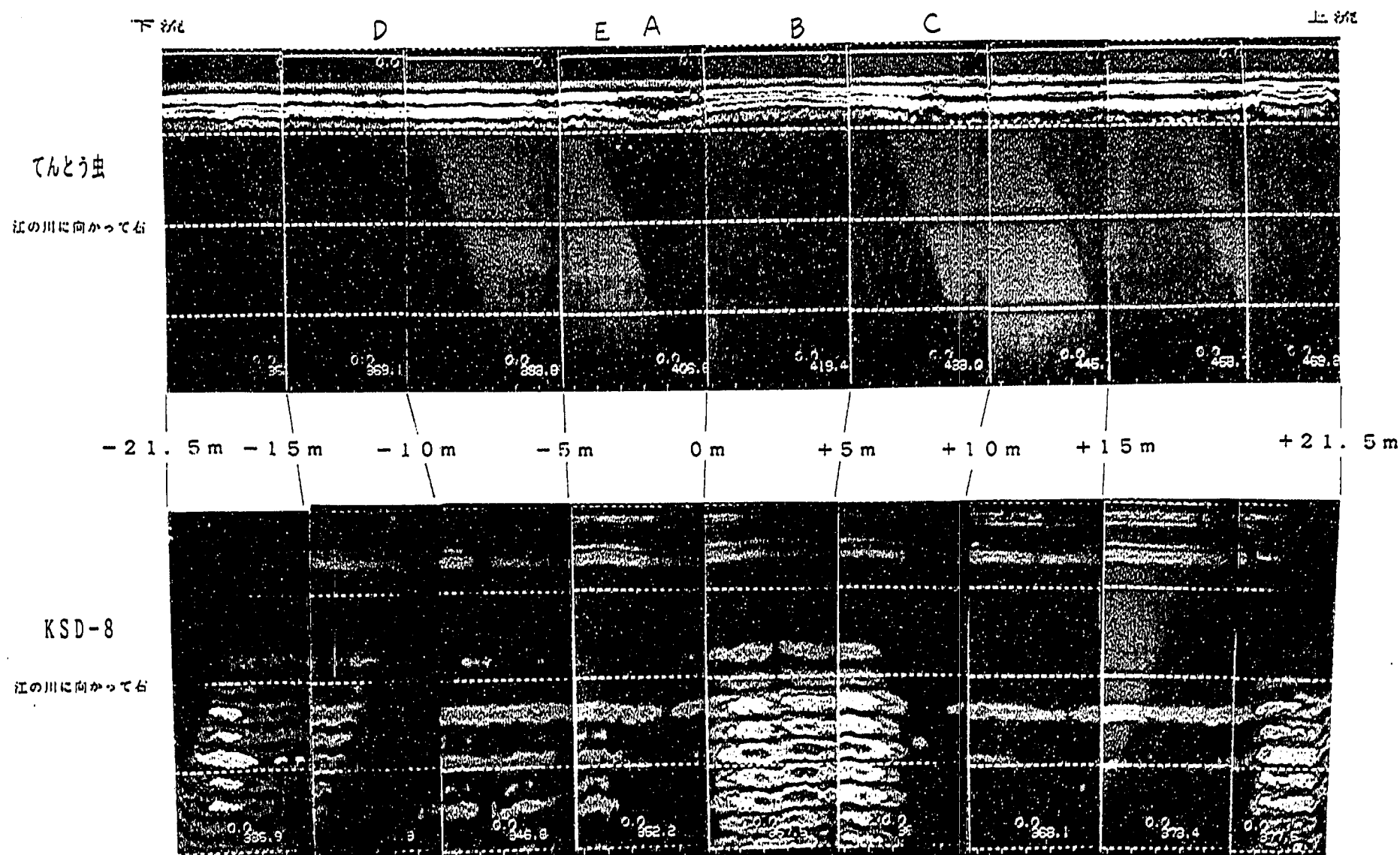


写真-5.1 地下レーダによる探査結果 (1)

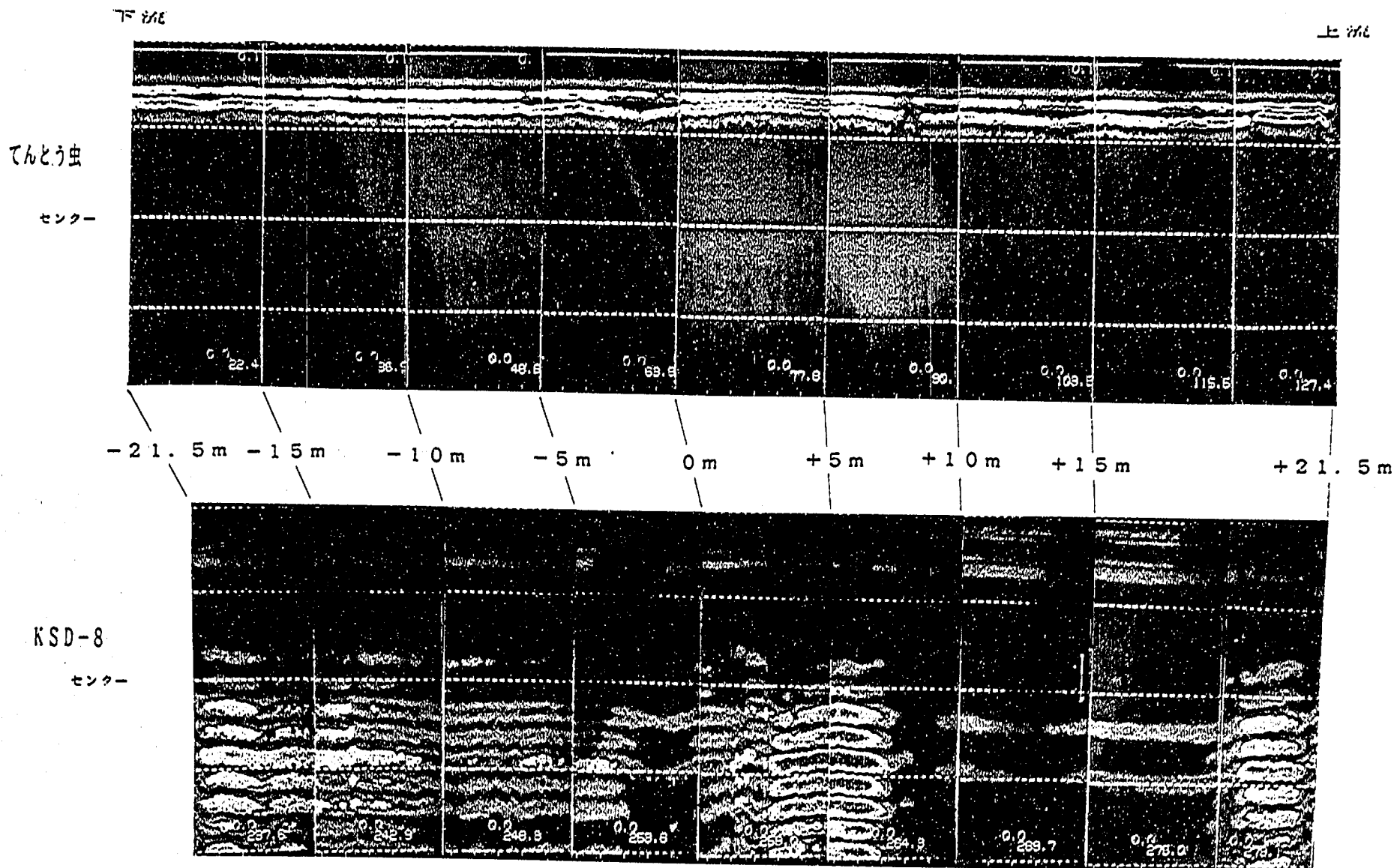


写真-5.2 地下レーダによる探査結果 (2)

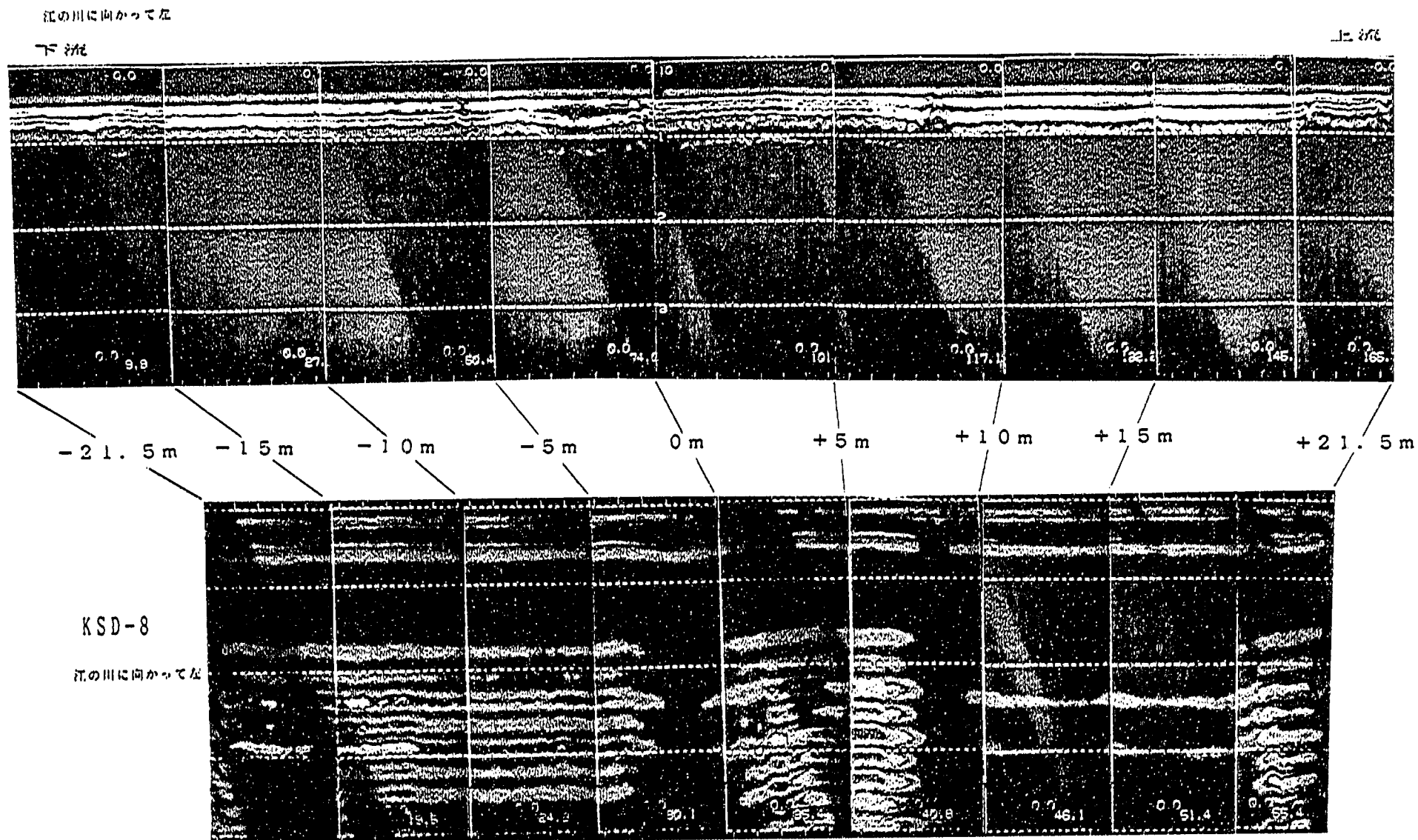


写真-5.3 地下レーダによる探査結果 (3)

6. 破壊検査の結果との比較

6.1 破壊検査

調査対象とした樋門は、改築工事の対象となっており、非破壊検査の結果を検証するために、破壊検査を実施している。破壊検査は、本報告書が対象とする業務には含まれないが、非破壊検査の結果を検証するため、若干の説明を行う。

破壊検査の項目は、以下の通りである。

- ① 検査孔を用いたコーン貫入試験。
- ② 検査孔からカラーモルタルを注入し、注入量から空洞の大きさを推定する。
- ③ 床板を取り壊し、目視によって樋門床板下の空洞を観察する。

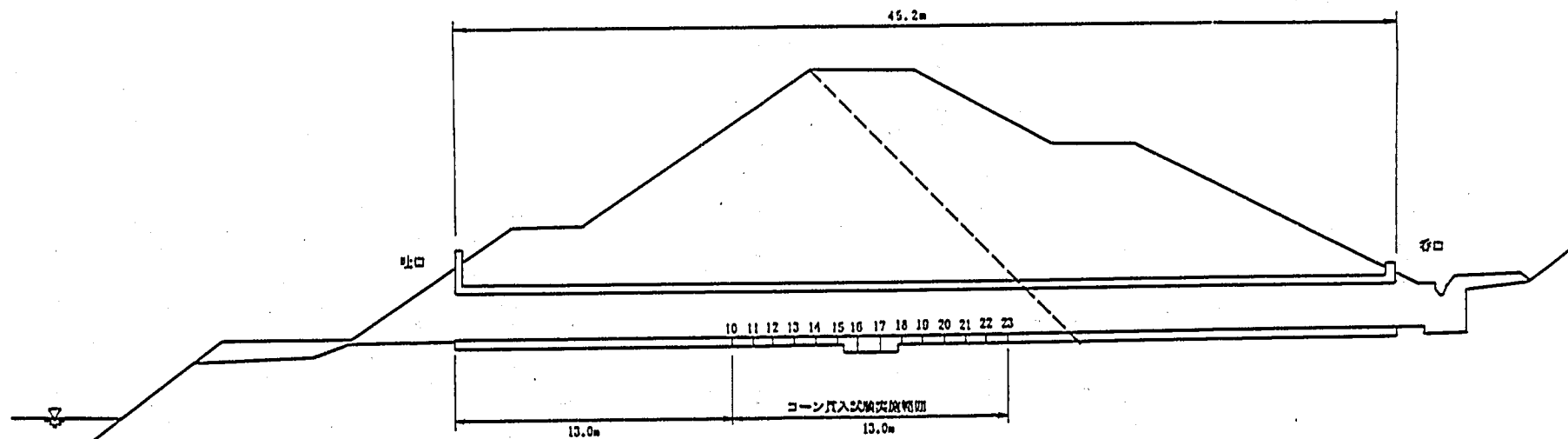
破壊検査は、地下レーダによる探査結果を基に、+3～-10mの区間で行った。検査位置及び、①、②検査の結果を図-6.1に示す。図の樋門断面図は、破壊検査の結果を反映させて制作したものである。写真-5.1で指摘したA部（図-6.1ではNo16, 17付近）は、空洞ではなく、止水壁の部分で特別にコンクリートの厚さが大きかったものであることがわかる。実測から、この樋門の床板のコンクリート厚は、棄コンを含めて約0.9mあり、止水壁部では1.3mに及ぶことが分かった。止水壁より吞口側では棄コンの下に数cm～10cm程度（No18では44cm）の柔らかい層があるが、吐口側ではそのような層は観測されていない。

モルタル注入後の破壊検査の結果を、図-6.2にまとめて示す。カラーモルタルは広い範囲に分布しているが、層厚は比較的薄く、また特に厚く分布している部位はない。これから判断して、樋門では空洞は小さいことがわかる。また、止水壁の吞口側では、一部湧水が観察されるなど、ミズミチの存在が推定されるが、止水壁で遮断され堤体を貫通する状況ではなかったものと思われる。

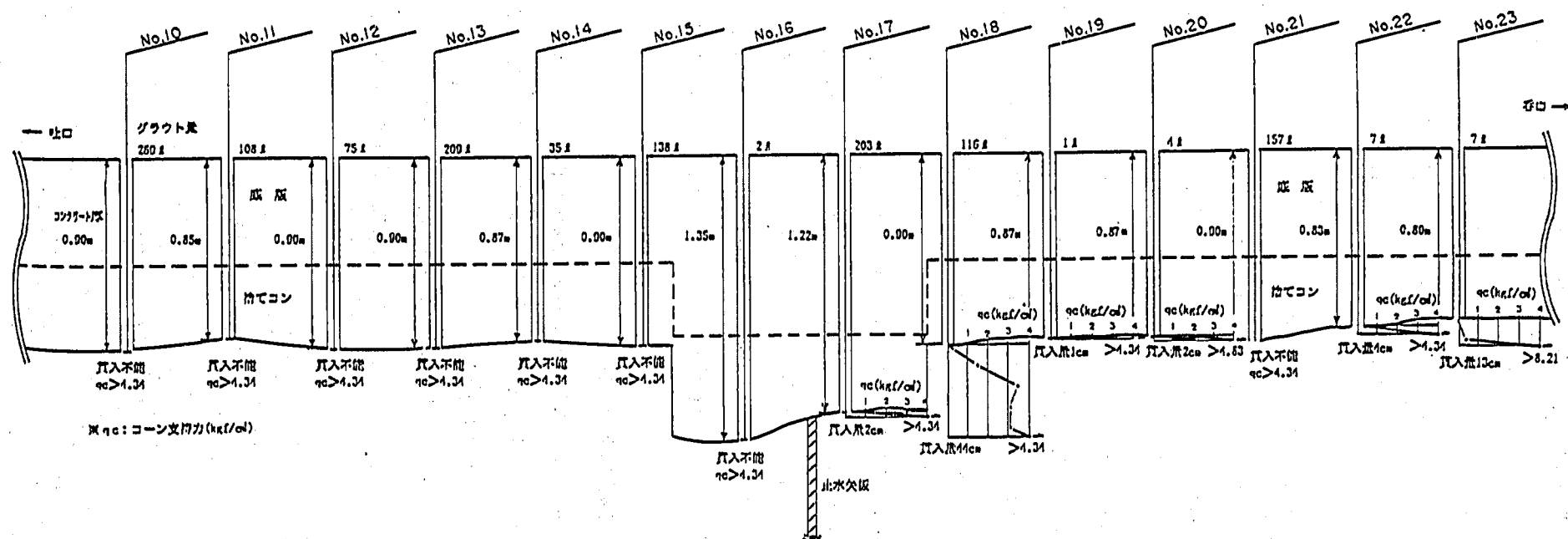
6.2 探査結果の比較

破壊検査の結果を基にレーダの映像を再度解釈すると、以下のことがわかる。

- ① 写真-5.1のA部は止水壁でコンクリートが厚かったため、底盤からの反射波が下に垂れ下がるパターンとして観測されている。
- ② B, D, E部に見られる強い反射波はコンクリート下部の空隙の影響と思われる。
- ③ どちらの地下レーダでも止水矢板（鋼矢板）の存在は探査できなかった。



(a) 試驗實施位置圖 (S = 1 : 200)



(b) 試驗結果概略圖

図-6.1 コーン貫入試験結果図

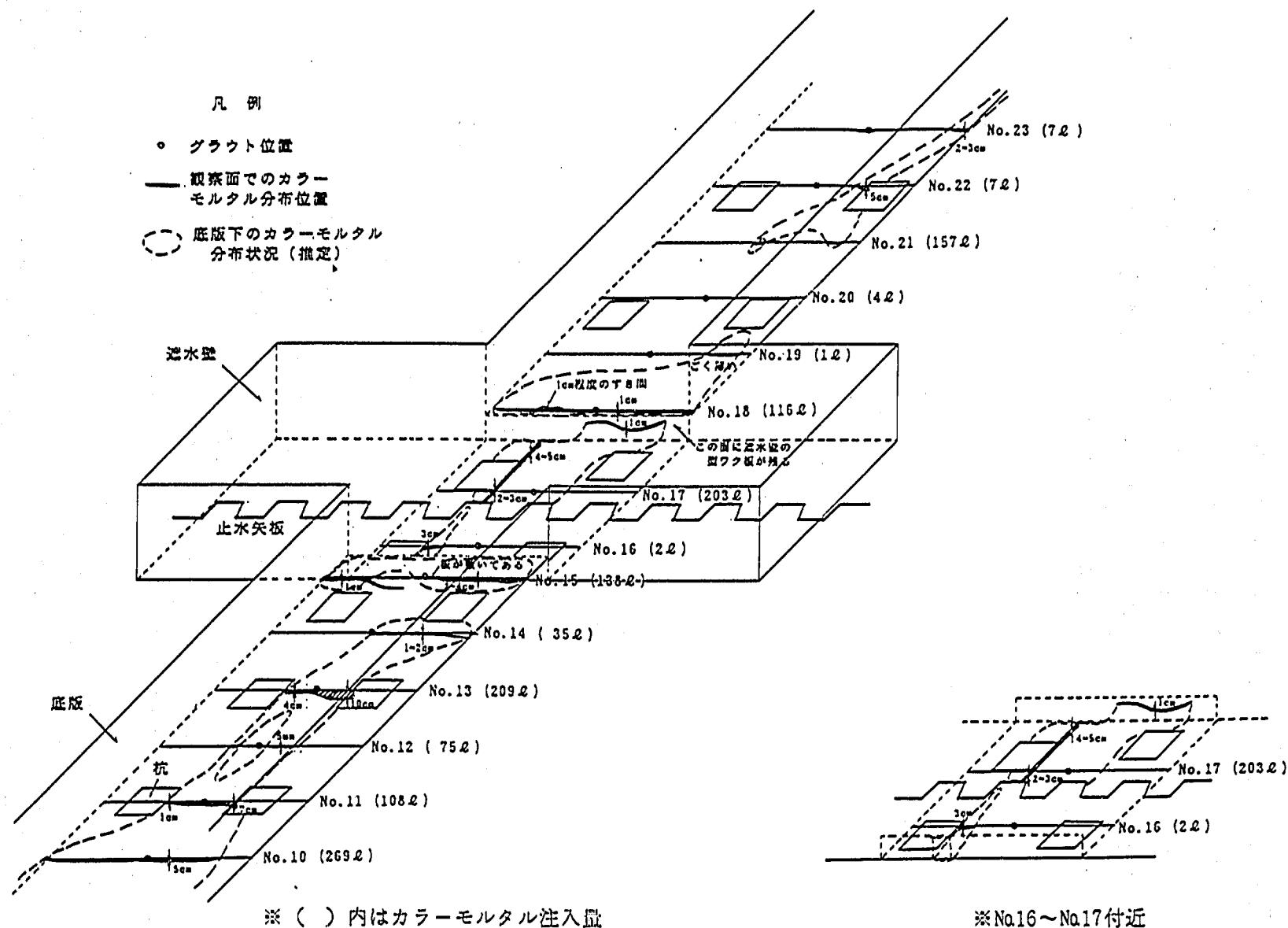


図- 6.2 底版下観察結果一覧図

結論と今後の問題点

今年度の実験調査の目的は、樋門樋管のような河川構造物の周辺の状況を非破壊的に探査する機械の適用性を明らかにすることであった。実験及び調査の結果が示すように、電波レーダ（地下レーダ）による探査の適用性が高く、センサーとしての電波レーダを用いることの妥当性が示された。しかも、比較的高い周波数を用いるタイプの方が適用性が高いことが分かった。ただし、現状のレーダでは映像が明確ではなくパターンの解釈に困難が付きまとうという問題点がある。この問題点を解決するためには、レーダの性能向上、測定方法の開発を軸とした、これからの研究が必要であると思われる。

堤体の非破壊調査機器に
関する調査

I S S N 0386-5878
土 研 資 料 第2762号
平成元年2月 (1989)

長 健次, 苗村 正三
境 友昭

要 旨 樋門樋管の周辺の空洞や緩み等を非破壊的に探査する技術の実用性の試験をモデル及び実際の樋門を用いて行った結果を示す。探査方法として、弾性波を用いた方法と電磁波による地下レーダを用いた。実験及び現地調査の結果、弾性波での探査では十分な探査精度が得られず、地下レーダによる探査の方が実用性に優れることが分かった。

キーワード：非破壊検査、電磁波、レーダー、河川構造物

郵便はがき

郵便切手を
はって下さ
い

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
施工研究室
御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2762号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印