

コンクリート構造物の健全度診断技術 の開発に関する共同研究報告書

—コンクリート構造物の非破壊検査マニュアル—



平成 6 年 7 月

建設省土木研究所
材料施工部コンクリート研究室
日本構造物診断技術協会

Copyright © (1994) 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。

コンクリート構造物の健全度診断技術 の開発に関する共同研究報告書

ーコンクリート構造物の非破壊検査マニュアルー

コンクリート研究室	室 長	河 野 広 隆
	主 任 研 究 員	渡 辺 博 志
日本構造物診断技術協会	理事・技術委員長	野 尻 陽 一
	技 術 委 員	山 田 一 宇
	技術分科会委員	阿 部 久 雄
	〃	内 田 明
	〃	宅 間 善三郎
	〃	丸 屋 剛

要 旨

コンクリート構造物の維持管理を合理化するための手法の一として、非破壊検査に基づく客観的な健全度診断を行ない、この診断結果に基づいて構造物の補修を実施する方法が注目を集めている。本報告書は、コンクリート健全度診断の要素技術である非破壊検査法について、測定誤差などに関する試験調査を実施し、その結果をとりまとめるとともに適切な計測方法についてマニュアルの形で提案したものである。

キーワード：コンクリート構造物、維持管理、非破壊検査、腐食、ひび割れ、かぶり

我が国の社会資本の整備は着実に進み、現在では膨大なストックを抱えるに至り、今後これらの既存の構造物の維持管理の合理化を行なうことがますます重要になってきている。これらの構造物のうちで多くを占めるコンクリート構造物については、基本的にはメンテナンスフリーであり、適切な、設計・施工・材料の選定がなされていれば、50年程度の供用期間内であれば維持管理のための特別な手段を講じなくとも十分可能であると考えられてきた。しかし、海岸近くに建設された構造物のように苛酷な環境にさらされるもの、あるいは材料・施工方法に問題があるものなどは劣化を生じ、構造物に要求される機能を満足するためには何らかの手当てが必要な場合もあるのが事実であり、コンクリート構造物についても、維持管理の合理化を図って行く必要がある。

コンクリート構造物の合理的な維持管理手法の一つとして、非破壊検査を駆使して構造物の劣化状況のモニタリング、健全度診断を行ない、この結果に基づいて補修計画を立てる方法が近年注目を集めている。この方法を採用することができれば、構造物の機能は絶えず高いレベルに保たれ、大規模な補修を実施しなければならないような状況に陥る可能性を非常に小さく押さえることができ、維持管理コスト・労力の合理化が図られる。

このような維持管理法は予防保全と呼ばれるものであるが、この方式の維持管理が実用化されるためには、構造物の健全度診断の基本をなすコンクリート構造物の非破壊検査手法が確立されていなければならない。コンクリート構造物の非破壊検査に関する技術開発は、これまでも精力的に行なわれてきたが、実務へ応用され始めてからまだ日が浅く、必ずしもその範囲適用や標準的な測定方法も十分確立された段階には至っていないのが現状である。

ここではコンクリート構造物の健全度を評価するうえで重要な指標を与えると考えられる、鉄筋腐食、かぶりおよび鉄筋位置、ひび割れ深さに関する非破壊検査を調査対象とし、測定精度、適切な診断結果を導くための標準的な計測方法、実施に当たっての留意事項について検討を行ない、一部計測マニュアルの形で結果をとりまとめた。

本研究を実施するに当たっては、現在市場に流通し比較的入手が容易な試験機器を用いた場合を念頭におき、それぞれについて一般的に成立することを記述したが、試験機器の仕様・性能の標準化がまだなされておらず、使用機器によっては一部あてはまらない内容もある可能性がある。従って、非破壊検査の実施に当たっては使用する機器の特性を十分熟知する必要があることを断っておく。

本書が、コンクリート構造物の非破壊検査を実施する技術者にとって、参考になれば幸いである。

目 次

第1部 序 論

第2部 鉄筋腐食の非破壊検査方法

第3部 鉄筋位置の非破壊検査方法

第4部 ひび割れ深さの非破壊検査方法

付 録 鉄筋コンクリートの非破壊測定実験

第 1 部 序 論

目 次

	頁
1. コンクリート構造物の維持管理と非破壊検査	1
2. 補修の実施時間と補修後の構造物の状況	3
2.1 調査概要	3
2.2 調査を行った構造物の劣化状況	3
2.3 構造物の補修時期と補修後の状況について	4
2.4 ま と め	7
3. 本報告書の内容	8
4. 注意事項	9

1. コンクリート構造物の維持管理と非破壊検査

コンクリート構造物は本来メンテナンスフリーな構造物であり、適切な設計・材料選定・施工がなされていれば50年程度の供用期間内ではごく簡単な補修のみで十分使用可能であるといえる。ところが、海岸付近の著しい腐食環境に建設された構造物、あるいは材料・施工方法、設計方法が不適切な場合、供用開始後数年で劣化を生じ、補修を行わなければ機能を維持できない場合があることも事実である。

新設コンクリート構造物の耐久性向上については、すでに塩化物総量規制、あるいはアルカリ骨材反応対策等を講じることにより種々の早期劣化を防止できることが明らかにされている。ところが、これは主として新設構造物に対する対応策であり、既存のコンクリート構造物のライフスパンをいかに長くするかといったことは十分検討されておらず、既設構造物の合理的な維持管理技術の開発が望まれている。

既存のコンクリート構造物をできるだけ良好な状態に保ち、長時間の使用に供するための維持管理法としては、

- 1) 高性能な補修材料の利用あるいは補修工法改善により、補修効果を向上させ、劣化を生じた構造物を大幅にグレードアップする方法。例えば、電気防食がこれに当たる。
- 2) 構造物の損傷が顕在化するたびに補修を頻繁に行う方法
- 3) 構造物の健全度をモニタリングし、必要に応じ構造物の劣化が余り進行していない状態で、早めの補修を実施する方法。予防保全方式の維持管理法。

等が考えられる。上記の方法は、それぞれ長所短所を有していて、どの方法を採用するのがよいかについては、現場・構造物の状況などによっても異なるので、一概には決められない。この中で、3)の方法に基づいて維持管理を行えば、コンクリート構造物の機能低下がほとんど無く、常に良好な状態に保たれるので、理想的な維持管理法といえる。しかし、モニタリング技術が不十分であったり、モニタリングの結果から補修要否の判定が適切ではない場合、過度の補修が行なわれ経済性の面で問題を生じたり、構造物の劣化損傷の進行を見逃し、簡単な補修のみではもはや機能回復が図れなかったり、補修後数年経過した後再び補修が必要となる場合が生じる可能性がある。すなわち、この維持管理方式がうまく機能するためには、①適切な補修時期の判断基準を明確化するソフト的な技術と共に、②構造物の健全度をモニタリングするハードな技術を確立する必要がある。

②に対応する技術は、鉄筋の腐食程度、鉄筋位置、ひび割れ深さの推定といったコンクリート構造物の非破壊検査である。

非破壊検査は構造物にほとんど損傷を与えることなく、構造物の劣化状況の客観的評価や劣化原因の推定を可能とするものである。近年、非破壊検査に関する研究開発が進み、検査結果の信頼性が向上し実務への応用が試みられていている。

では、予防保全方式の管理方法を採用したとして、それが十分機能しうるためには、対象となる構造物がどのような状態になった段階で、補修実施の判断を下せばよいか問題となる。この結果如何によって非破壊検査に要求される精度や目標も異なってくるものと考えられる。

ここでは、過去に補修を行ったコンクリート構造物の補修後の状況についてアンケートによる実態調査を実施し、補修後の構造物の状態と、補修直前の構造物の状態の関係を明らかにする観点からデータの整理を行なった。この結果から、補修後劣化が再び進行し、再補修をしなければならないような状況に陥ることなく、補修後の構造物の状況を良好にするには、構造物の劣化がどの程度進行した状態で対策を講ずるのがよいか、明確にすることができ、ひいては非破壊検査がどの程度の劣化を検出すべきか、すなわち予防保全方式の維持管理法の枠組みの中で、非破壊検査の位置づけが明らかになるものと考えられる。以下にその調査内容を紹介する。

2. 補修の実施時期と補修後の構造物の状況

2.1 調査概要

ここでは、昭和60年代に建設省管内で実施されたアンケートによるコンクリート構造物の補修実態調査結果¹⁾をもとに、コンクリート構造物の劣化状況と補修効果の関係ならびに補修後の構造物の状況補修工法、補修面積などについて検討を行った。

2.2 調査を行った構造物の劣化状況

図-1.1, 1.2に調査対象となったコンクリート構造物の劣化原因及び劣化程度の件数を示す。劣化程度の判定は、総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」で提案された「塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）」を参考に表-1.1のように定めた。



図-1.1 構造物の劣化要因別件数

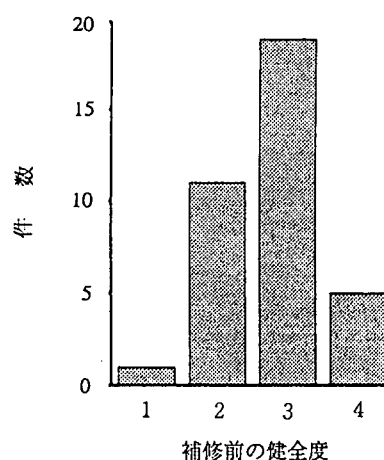


図-1.2 調査対象となった構造物の補修前の健全度

表-1.1 構造物の健全度判別基準

健全度	構 造 物 の 状 況
1	鋼材の腐食の進行により、部分的あるいは連続的な鋼材の露出または破断が認められたり、コンクリートの断面欠損が著しく認められる場合
2	鋼材の腐食の進行により、連続的なコンクリートのひび割れ、錆汁および剥離、剥落が認められる場合
3	ひび割れ、錆汁あるいはコンクリートの剥離が認められるが、その範囲や程度が小さい場合
4	ごく軽微なひび割れ、錆汁が認められる場合
5	損傷が認められない場合

劣化原因としては、塩害による劣化を生じたものが多いという結果になっていた。

図-1.3は補修工法別件数を示したものである。調査対象となった構造物は劣化がある程度進み、断面欠損をとまなうものが多かったため、プレバックド、パッチング工法による断面修復を行ったのち遮塩、防水塗装した事例が多かった。

図-1.4は、構造物の補修面積の分布を劣化程度別に示したものであり、その平均を表-1.2に示す。補修規模は、補修直前の構造物の健全度が低下するほど大きくなっていった。

表-1.2 補修前の健全度別補修実施面積（平均値）

補修前の構造物の健全度	平均補修面積 (㎡)
2 以下	1699
3	1399
4	290

2.3 構造物の補修時期と補修後の状況について

ここで調査対象となった構造物は、塩害による劣化を生じたものが多く、このため構造物の劣化状況も概略的には海岸線からの距離の影響が大きいものと考えられる。ここでは構造物の補修時の劣化状況と、補修後の構造物の劣化状況について検討することを目的としているが、当然塩害環境の厳しいところでは補修後早期に劣化する可能性は高くなる。したがって、構造物の建設地点が海岸線から100m以下の過酷な塩害環境にあるものと、100m以上のものに分類して検討を行った。

厳密には、塩害に対する環境条件は構造物建設地点の海岸線からの距離ではなく、飛来塩分量による分類の方が妥当と考えられるが、飛来塩分量の計測を行っていない構造物が多かったため、便宜上上記のような分類を行った。

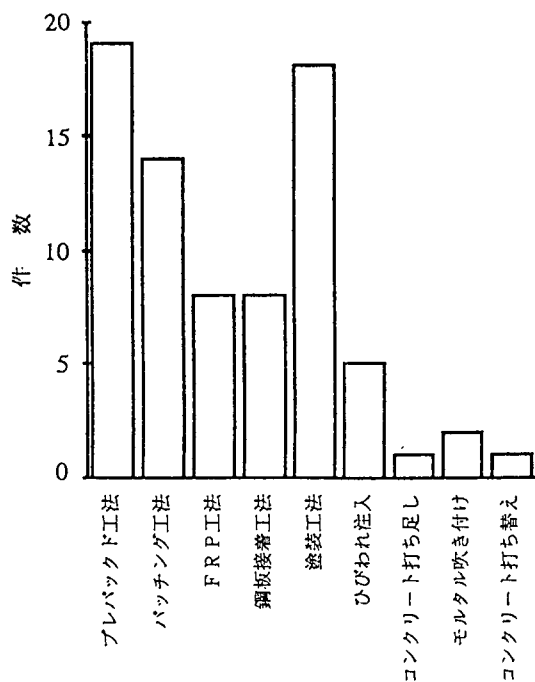


図-1.3 補修方法別件数

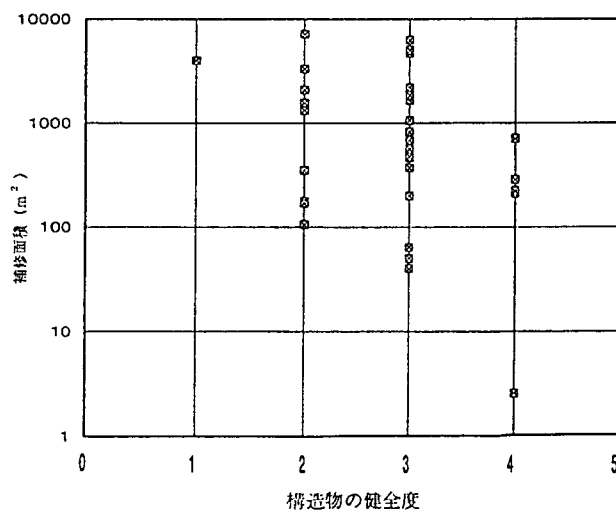


図-1.4 構造物の補修実施面積の分布状況

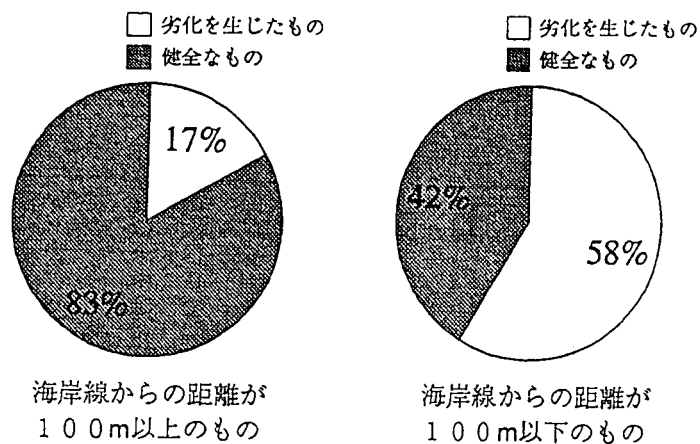
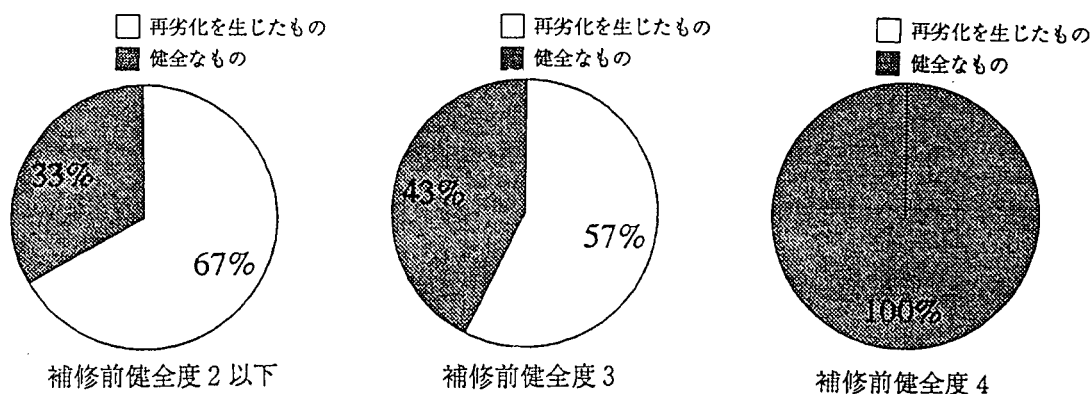
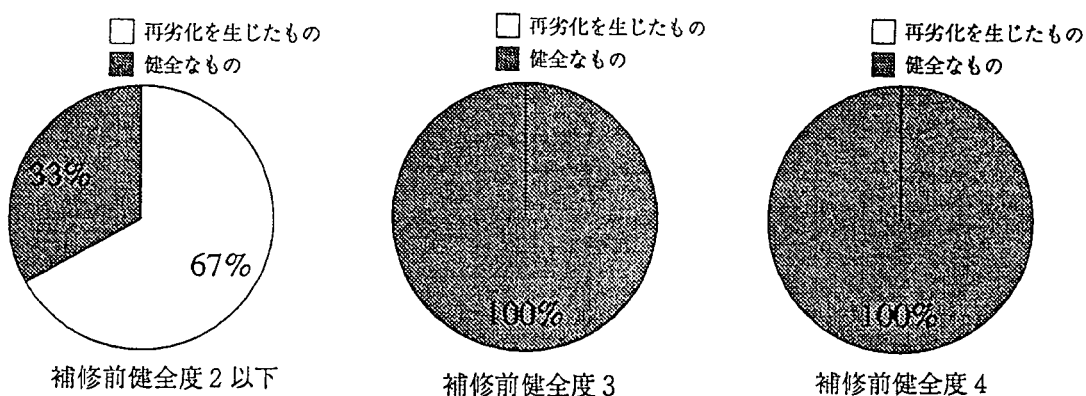


図-1.5 構造物建設地点の海岸からの距離別の補修後構造物状況



1) 海岸線からの距離が100m以下のもの



2) 海岸線からの距離が100m以上のもの

図-1.6 補修前の構造物の健全度と補修後の構造物の劣化の有無について

なお、塩害以外の要因で劣化を生じていた構造物は海岸線からの距離に関わらず、100m以上のものに含めて考えることとした。

図-1.5は補修実施後、錆汁の発生

表-1.3 補修後の構造物の状態観察と実施した時点の経過年数

構 造 物 の 種 別	測定実施年(平均)
補修後変状の認められた構造物	補修後4.5年
補修後変状の認められない構造物	補修後4.9年

などの何らかの劣化を生じた構造物の割合を、海岸線からの距離別に示したものである。補修後、構造物の状況を観測した時点までの経過年数は構造物により異なっていて、短いもので補修実施後2年経過時点で観測を行っており、長いものでは10年以上経過したのちに観測を行っている。補修実施から観測実施までの時間が短ければ当然劣化の生じる可能性は低くなるので、このような比較が意味を持つためには、経過年数に大きな開きがあってはならない。表-1.3は補修後劣化を認めた構造物と劣化を認めなかった構造物の補修実施後の経過年数の平均を示したものでそれぞれ4.5~4.9年とほぼ同じであった。このことから、劣化を認められたのが、単に補修実施後観測までの経過年数が長かったためではなかったことが確かめられる。

以上の結果から、補修後再劣化が生じるものは、海岸線からの距離が100m以内の過酷な環境にさらされたものに多いことが分かる。

一方、補修実施直前の劣化状況別に、補修後の構造物の劣化状況についてまとめたものを図-1.6に示す。海岸線からの距離が100m以内にある構造物では、補修前の健全度が2以下となり劣化が進行した状況で補修を行ったものは、そのうち2/3の構造物で変状が現れていた。健全度が3まで放置した後に、補修を実施した場合も半数以上の57%のものに変状が現れている。健全度4と比較的軽微な段階で補修を実施した構造物についてはその全てに変状が認められず、十分な補修効果が得られていることが分かる。

海岸線から100m以上はなれたコンクリート構造物でも同様に、健全度が2とかなり劣化が進行している構造物では2/3の構造物に補修後変状が現れていた。しかし、海岸線からの距離が100m以下の場合と異なり、健全度3の状態でも補修を実施したものは補修後変状が現れず、十分な補修効果が得られていることがわかる。

一方、図-1.7は再劣化を生じたものと生じなかったものについて、それぞれ補修方法の割合を示したものである。それぞれ補修工法の内訳にあまり差は見られない。たとえ、工法が同じでも用いる材料によってその効果は異なってくるので厳密なことはいえないが、両者の内訳にあまり差がなかったことから、補修工法の選定が補修後の構造物の劣化状況に差が出た原因とは言えないものと考えられる。

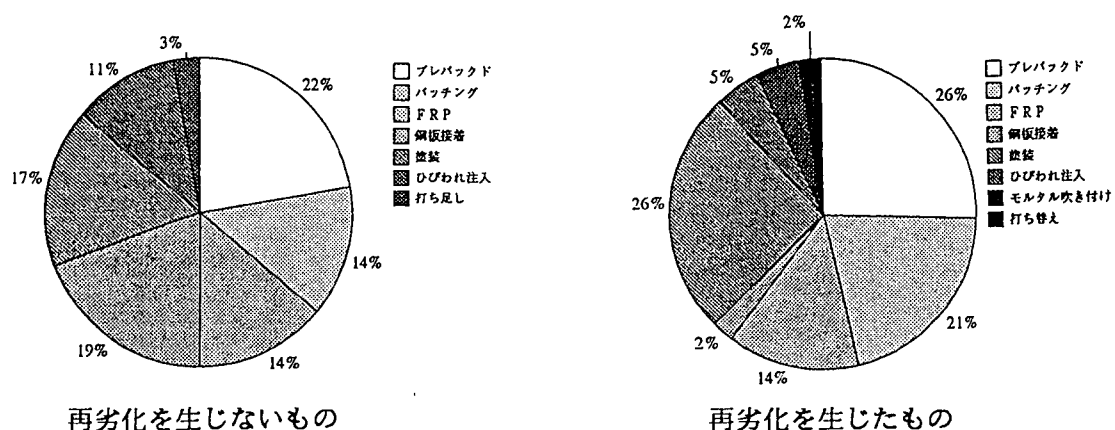


図-1.7 補修工法の内訳

2.4 ま と め

いずれの場合でも、構造物の健全度が4と劣化が比較的軽微な段階で補修を実施した場合、補修後の構造物の状況は健全に保たれていて、再度補修の必要に迫られる可能性は非常に低い。これに対し、健全度3以下の状態になった時点で補修を実施してものについては、海岸線より100m以内の環境条件が厳しい場合は、補修後再び劣化が生じはじめ、何らかの対応を迫られる場合が多くなるのに対し、海岸線より100m以上の地点にある構造物では、そのような心配がないものと考えられる。このことから考えると補修工事の労力・コストを削減し合理的な維持管理を実現するには、損傷が軽微なうちに補修を実施することが重要であること。とりわけ塩害環境の厳しいところでは、早期に構造物の損傷を見だし、補修などの対策を高じることが必要であることが分かる。

従って、コンクリート構造物の非破壊検査は、構造物の劣化が顕著になる以前の比較的軽微な変状を捕えうるものでなければならないものと考えられる。

3. 本報告書の内容

以上検討したとおり、コンクリート構造物の維持管理を合理化するためには、構造物に生じた劣化が余り顕著でないうちに、補修工事を行ったほうがよいこと、このためには非破壊検査を駆使し、コンクリートの劣化状況をモニタリングし、軽微な変状・劣化傾向を捕える必要があることを示した。

非破壊検査に要求されるこのような役割を満足するためには、その測定は、測定手法の原理原則を十分熟知したうえで、誤りのないように実施しなければならないことは言うまでもない。しかし、非破壊検査方法は、一般的に試験法が開発されてから比較的日子が浅いこと、実施頻度もそれほど多くなく試験方法そのものが十分には確立されていないこと、計測原理が電氣的・電気化学的方法あるいは超音波を利用した方法など、一般のコンクリート技術者にとってはなじみの薄い分野の知識を必要とすることなどから、必ずしも適切な方法で行われていない場合、あるいは試験法を十分熟知せずブラックボックス的に用いられる場合もあると考えられる。当然、誤った測定を行えば、誤った判断を犯す危険性も出てくる。

ここでは、非破壊検査が構造物を維持管理する技術者にとって身近になり、かつ適切な非破壊検査が行なえるよう、非破壊検査を適用するに当って熟知しておくべき、測定方法の基本原則、注意事項、一般的な計測方法について解説を加え、とりまとめたものである。とりまとめにあたり、過去の調査研究内容を参考としたが、必要に応じて試験計測も実施した。試験結果については、巻末の付録で紹介を行なっている。

コンクリート構造物の劣化状況・劣化傾向や劣化原因を特定するために必要となる非破壊検査項目をすべて列挙すると、膨大な数に昇ると考えられ、そのすべてについて検討を行なうことは事実上不可能である。よってここでは、これらのうち、

- 1) 非破壊的に測定可能なもの
- 2) コンクリートの劣化状況や劣化傾向、劣化要因を推定するうえで特に重要な情報を与えるもの
- 3) 比較的实施される頻度が多い一般的なもの

という条件を満たすものについて調査対象とした。具体的には以下の

- 1) 鉄筋腐食の非破壊検査
- 2) 鉄筋位置（配筋位置・かぶり）の非破壊検査
- 3) ひび割れ深さの非破壊検査

3つの方法についてとりあげた。

ここで適用の対象とした構造物は、橋梁上部工、あるいは橋脚などの土木用コンクリート構造物であるが、必ずしも適用範囲はこれらの構造物に限定されず、他のコンクリート構造物にも適用可能である。

4. 注意事項

ここでは、コンクリート構造物の非破壊検査を実施するうえでの、留意点、一般的な測定方法を記述しているが、用いる測定機器が異なると、その内容も異なってくる。本報告書を記述するにあたり、極力市場に出回っている多くの測定機器を対象としたが、そのすべてを網羅しているものではない。従って、非破壊検査を実際におこなうにあたっては、用いる測定機器の特性については、機器に付随する取り扱い説明書や計測機器の製造メーカーに問い合わせするなどして、十分把握しておく必要がある。

[参考文献]

- 1) コンクリート構造物の補修事例集、土木研究所彙報、第49号、昭和63年11月、建設省土木研究所



第2部 鉄筋腐食の非破壊検査方法

執筆者

阿	部	久	雄
内	田		明
片	岡	国	牟
小	林	茂	広
瀬	野	康	弘
山	本	明	雄
渡	辺	博	志



目 次

	頁
1. 序 論	15
2. 鉄筋腐食推定のための非破壊検査法	16
2.1 鉄筋腐食に関連する研究の概要	16
2.2 鉄筋腐食推定上の留意事項	18
2.3 用語の定義	20
3. 自然電位法と分極抵抗法	26
3.1 自然電位法	26
3.1.1 総 則	26
1) 目 的	26
2) 自然電位法の原理	26
3) 適用範囲	29
3.1.2 測定方法	30
1) 電位差計と照合電極の種類	30
2) 測定対象及び測定箇所	31
3) 測定の準備	32
4) 測定方法	33
5) 補正電位の測定方法	34
3.1.3 影響因子	35
3.1.4 鉄筋腐食の推定	36
3.1.5 測定結果のまとめ	38
3.2 分極抵抗法	40
3.2.1 総 則	40
3.2.2 測定方法	42
3.2.3 影響因子	45
3.2.4 4鉄筋腐食（速度）の推定	46
3.2.5 結果のまとめ方	48
4. ま と め	52



1. 序 論

コンクリート構造物中の鉄筋腐食の調査は、かぶりコンクリートをはつり、鉄筋を露出させ、腐食状況を直接目視により観察するのが最も確実な方法であるが、実際にはかぶりコンクリートのはつり作業はかなりの困難を伴う上、構造物に損傷を与えるため、必ずしも最良の方法とは言えない。

このような理由から、構造物に損傷を与えることなく鉄筋腐食を診断する方法の開発が行われ、例えば自然電位法を対象とした腐食性判定基準としてASTMあるいはBS規格が制定され、それに伴う腐食診断機器も開発され市販されるようになってきた。現在もなお、その判定精度の向上などの研究開発が進められ、実務への応用に努力が注がれている。このように、鉄筋腐食の非破壊検査は鉄筋コンクリート構造物の維持管理を適切に進めて行く上で非常に有効なものであり、今後一層の普及を図る必要がある。

そのため、ここでは鉄筋腐食の非破壊検査が、鉄筋コンクリート構造物を実際に管理する技術者にとってより身近に、かつ容易に適用できるようにするため、鉄筋腐食の原理、鉄筋腐食程度を推定するための測定方法、あるいは測定する上での留意点などを取りまとめた資料を作成したものである。

鉄筋腐食の非破壊測定方法には、鉄筋の腐食状況を推定するものと、腐食速度を推定するものがあり、それに応じて測定方法もいくつかのものが提案されている。

ここでは、それらの中でも測定機器や診断手法などの研究開発が進み、比較的使用実績の多い自然電位法と分極抵抗法を対象に記述した。

ただし、自然電位法や分極抵抗法の適用により鉄筋の腐食状況を推定できるが、よりの確な鉄筋腐食の診断を行なうには、これらの方法を単独で用いるだけでなく、かぶりの推定、コンクリート中の塩分量、コンクリートの中性化深さ、コンクリートの抵抗率の測定およびコンクリート構造物のひびわれ状況などの観測も行ない、これらの測定結果を総合して鉄筋の腐食性を判定することが望まれる。

なお、これらの測定法を適用する構造物としては、橋梁上部工などのコンクリート構造物を念頭においたが、擁壁、あるいはカルバートなどの一般大気中にある鉄筋コンクリート構造物にもその応用は可能であると考えられる。

ここに収録した測定法は、現段階で得られた知識において妥当であると判断されたものであるが、改善の余地はまだ残されていると考えられる。この点については、今後の測定データあるいは経験の蓄積により解決し、よりの確な鉄筋腐食の測定方法や診断方法が確立されることを望むものである。

2. 鉄筋腐食推定のための非破壊検査法

2.1 鉄筋腐食に関連する研究の概要

コンクリート構造物中の鉄筋などの鋼材の腐食状況を非破壊的に診断する方法としては、単純にはコンクリート表面のひび割れ、剝落および錆汁などの観測やハンマリングによる浮き、反発力および打音などの感覚的検査方法も取られるが、一方測定機器を用いる定量検査や診断方法の研究も盛んに行われている。

ここでは後者の測定機器を用いる電気化学的非破壊検査方法について述べる。表-2.1に各種電気化学的非破壊検査方法の測定概要と現場における測定作業上の適用性および診断に関わる測定精度について示す。

表-2.1 鉄筋の腐食診断に関する電気化学的非破壊検査方法

測定法の種類	測定概要と腐食状況の推定	適用性	精 度
自然電位法	鉄筋の自然電位を測定し、その腐食状況を推定	◎	○
分極抵抗法	微弱な電流を流し、その分極抵抗から測定時の鉄筋の腐食速度を推定	○	○
電気抵抗法	コンクリートの抵抗率を測定し、鉄筋の腐食状況を推定	○	△
表面電位差法	コンクリート表面の相対的電位差を測定し、その電位勾配から腐食を推定	◎	△

電気化学的検査方法は、金属表面の電気化学的抵抗性あるいは金属表面に接する液体電解質環境を電気化学的に数量化してその金属表面の腐食状況を評価する方法である。この方法は腐食工学の分野において確立された技術であり、この技術をコンクリート中の鉄筋腐食の診断に応用したものである。

しかし、大気に曝されるコンクリート表面では経年的な電気化学的変状を起こすことおよびコンクリート自体が不均一な固体電解質であることなどから電気化学的な測定上の誤差を含んで実測されることがあるので、その点を考慮した測定方法や診断方法が必要になる。

実際の鉄筋腐食に関わる検査現場では、一検査方法のみによりその腐食程度や状態を評価することはほとんど無く、各種検査方法を併用することが多い。

以下に、その主な鉄筋腐食診断手法の概要を述べる。

(1) 自然電位法 ^{1), 3), 7), 9), 10), 11), 12), 13), 17), 20), 21), 22), 24), 25), 27)}

電解質環境中におかれる金属は、その環境と金属種の表面状態により固有の電位すなわち自然電位を示すものである。一般に、電解質と言えばイオン電導の可能な液体電解質を指すが、コンクリートは固体ではあるが、水分を含む強いアルカリ電解質（初期pH12～14）と見なすことができる。この強アルカリ環境下での鉄筋表面は、強い不動態皮膜に覆われており、自然電位も貴な電位（約+100～-150mV vs CSE）を示し腐食は起こらない。

しかし、経年的にコンクリート表面から徐々に炭酸ガスや酸素などが侵入して中性化現象を起こす。中性化に加え塩素イオンなどの影響と内在する水分と酸素とにより鉄筋表面の不動態皮膜が破壊され活性状態となり、鉄筋の置かれる環境により電位的には卑な電位（約 $-150 \sim -600\text{mV}$ vs CSE）に移行し腐食が進行する。

したがって、鉄筋の自然電位を測定することにより鉄筋の表面状態を知ることができるのである。

自然電位法は、1950年代にStratful¹⁾ によってコンクリート橋床版の腐食調査に初めて利用され、アメリカでは、1977年にASTM規格 C876-77 (Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete) として制定され、その後1980年 (C876-80)³⁾ と1987年 (C876-87)⁷⁾ に改定され現在に至っている。また、1991年には、British Standard (BS 7361:Part 1:1991, Section 5. Reinforcing steel in concrete, Table 5. P.50)¹⁷⁾ も制定されている。何れの規格もコンクリート中の鉄筋の腐食状況を自然電位範囲と腐食確率で示している。

わが国では、1983年に日本コンクリート工学協会編集の「海洋コンクリート構造物の防食指針(案) -改訂版-」¹³⁾ の資料5に「コンクリート中の鋼材の電位測定方法の一試案」として自然電位法に関する測定規準案が紹介されている。

(2) 分極抵抗法 ^{2), 5), 8), 9), 12), 14), 15), 16), 18), 19), 23), 26), 27)}

分極抵抗法には、直流分極抵抗法と交流(AC)インピーダンス法とがある。前者の直流分極抵抗法は、鉄筋直上のコンクリート表面に接触液を含浸させたスポンジを介して対極と照合電極とを設置して鉄筋に微弱な電位差（ $10 \sim 20\text{mV}$ ）を負荷した時のその電位差と電流量からStern-Gearyの式²⁾を用いて分極抵抗を算出することにより腐食速度を求める方法である。

また、後者の交流インピーダンス法は、鉄筋と対極間に 0.1mHz （低周波） $\sim 100\text{kHz}$ （高周波）の周波数の異なる交流電圧 $10 \sim 20\text{mV}$ を負荷した時のインピーダンス（抵抗）を測定して、種々の数値情報から分極抵抗を求めて鉄筋の腐食速度を推定する方法である。ただし、高周波（ $10 \sim 100\text{kHz}$ ）側での測定は余り時間を要しないが、低周波（ $0.1 \sim 10\text{mHz}$ ）側では少なからず時間を要することおよび現場計測に際しては、この種の専門知識と熟練を必要とすることなどを考慮しなければならない。

最近では、鉄筋かぶり深さやコンクリートの抵抗率の影響などによる鉄筋への拡散電流域を特定するための装置の工夫や実験式を求めるための研究がなされている。

(3) 電気抵抗法

電気抵抗法は、直接コンクリート表面の抵抗率を測定して、鉄筋の腐食状況を間接的に評価する方法である。当然、抵抗率が低いほど腐食し易く、高いほど腐食し難いと評価される。

なお、この方法は、前述の自然電位法や分極抵抗法などとの組合せで用いられることが多い。測定方法は、コンクリート表面に等間隔で四極を設置し、外側の二極から一定の電流を流し、内側の二極で電位差を測定して抵抗率を求める方法で、一般的には四電極法と呼ばれている。

(4) 表面電位差法

表面電位差法は、土壌中のパイプラインの電食調査などでよく用いられる測定方法をコンクリート中の鉄筋の腐食調査に応用したものであり、この方法は2点間の地表面あるいはコンクリート表面の電

位勾配（電位差）を測定して電流方向を調べるのに利用される。具体的には電位差計のプラス、マイナス両端子にそれぞれ照合電極を接続して、プラス端子に接続した照合電極を測定面の近傍に固定し、マイナス端子に接続した照合電極を測定面の座標上を移動させながら格子状に電位差を測する方法である。

この測定法の利点はコンクリートをはつることなく測定が可能であるが、相対的な電位差の大小で腐食状況を評価することになるので熟練を要する。なお、格子状に実測されたコンクリート表面の電位差に、補正電位値を加算することで自然電位に換算することができる。

(5) コンクリート中の塩分量測定法

塩分は、鉄筋の不動態皮膜を破壊する働きをするばかりでなく、コンクリートの抵抗率を低下させるので腐食影響因子としては大きく扱われ、その研究報告も多い。

(6) 中性化深さ測定法と鉄筋かぶり測定法

大気中に含まれている炭酸ガス（約0.03%）がコンクリート表面から侵入し、セメントの主成分である水酸化カルシウムと反応して炭酸カルシウムを生成する。

一方、コンクリート中の鉄筋は水酸化カルシウムの強アルカリにより不動態皮膜で保護されているが、中性化現象により鉄筋の保護能力を失ったところへ、水と酸素の侵入があればいつでも鉄筋腐食を起こし得る環境が整うことになる。

また、コンクリートの性状によって中性化の進行速度は異なるものの、鉄筋かぶりが少なければそれだけ早期に中性化環境に置かれて鉄筋腐食を招く。

中性化深さと鉄筋かぶりの測定は、非破壊検査では欠かすことのできない測定法であり、これらと鉄筋腐食に関する研究も数多く報告されている。

2.2 鉄筋腐食推定上の留意事項

前述したように電気化学的検査方法は、コンクリート中の鉄筋腐食の非破壊検査に有効とされているが、電気化学的検査方法に不慣れな技術者が測定することも考えられる。ここでは鉄筋腐食推定上の共通的な留意事項と自然電位法および分極抵抗法における留意事項に分けて示す。

(1) 共通な留意事項

- ① 測定箇所の鉄筋とコンクリート表面間のかぶりコンクリートに浮き、ひび割れあるいは表面皮膜が存在して物理的に不連続が生じている場合には間違った測定結果を得ることがあるので、不連続部を避けなければならない。
- ② 鉄筋腐食の有無の確認は、可能な限り自然電位や分極抵抗の等高線図から数カ所を選択し、実際に鉄筋をはつり出してその腐食状態を検証し、鉄筋腐食の推定精度を高める必要がある。
- ③ 事前に測定部位のコンクリート表面の環境を整えるために、散水器あるいは噴霧器を用いて十分に湿潤状態にし、完全に浸透するのを確認した後に測定を開始する。

(2) 自然電位法における留意事項

- ① 自然電位測定に用いる高抵抗電位差計の入力インピーダンスは100MΩ以上が望ましくできれば

1000M Ω のものがよい。

- ② 正しい自然電位を測定するには、事前に使用する照合電極の誤差チェックを行う必要がある。そのチェック方法は常に安定した電位を示すプローブあるいは照合電極と前述の測定に使用する照合電極との間の電位差を測定することである。誤差があれば電位補正するか使用電極の改善が必要になる。
- ③ 自然電位の測定面は噴霧水により調整されるが、その測定環境（含水率）が最初と最後で大きく変化しない間に迅速に測定する必要がある。
- ④ 塩害を受けない内陸の鉄筋コンクリート構造物で、中性化が進んだ上に高乾燥状態にあるコンクリート中の鉄筋の自然電位は、鉄筋近傍の内部電位とコンクリート表面で測定される表面電位との間に少なくとも数10mV、大きくは数100mVの電位差が生じていることがあるので、そのための補正電位の測定は必要条件になる。

なお、大半は内部電位が表面電位よりも卑な電位である。

- ⑤ 測定された自然電位は、等電位線図を作成して腐食状況を面的に評価することが正しい判断を導く。
- ⑥ 半径10cm以内で測定された自然電位の差が、50, 100, 150mVと大きくなるほど腐食の度合いが高くなるので50mV間隔の等電位線図を作成し、他の測定データ例えばコンクリート抵抗率や塩分量との対比からより精度の高い腐食評価に繋げることできる。
- ⑦ 最貴電位と最卑電位間を等分に5分割以上行い、その際の自然電位の等電位線密度の高い谷部に腐食起点が存在することが多い。
- ⑧ 海洋あるいは海上の鉄筋コンクリート構造物で、海水の干満部や飛沫帯部の非常に含水率の高いコンクリート面では自然電位値が全体的に卑な値（例えば、-500~-600mV）であっても腐食が起こっていない場合がある。

また、海洋構造物は電気防食法を適用していることが多く、その影響で卑な値を示すこともあるので腐食状況を推定する上で注意を要する。

- ⑨ 大地と接する部分の橋脚や地下水の影響を受ける地下室内壁面は、コンクリート中の含水率が高いために鉄筋腐食がないにも係らず全体的に卑な電位を示すことがある。

(3) 分極抵抗法における留意事項

- ① 測定位置は、鉄筋の配筋状態を調査した上で、縦筋と横筋の交差部位を避けた鉄筋直上とすることが必要である。
- ② 将来の腐食速度を予測する場合には、分極抵抗値の経時変化を見る必要があるため、定期的な測定が必要になる。
- ③ 分極抵抗値から鉄筋の腐食位置を推定するためには、分極抵抗値の等高線図を作図することが有効である。

以上、自然電位法と分極抵抗法における「鉄筋腐食推定上の留意事項」について述べたが、何れの方法を採用するにしても、実際にはその他の腐食影響因子の測定結果との組合せにより鉄筋腐食を総合的

に評価しているのが実情である。

2.3 用語の定義

この報告書の用語を次のように定義する。

- (1) 自然電位(natural potential)…………… 一定の電解質中におけるその金属の固有の電位
- (2) 照合電極(reference electrode)…………… 金属の電位（自然電位、電極電位、固有電位、電位勾配、防食電位）を測定するために用いる基準となる電極
- (3) 表面電位(surface potential)…………… コンクリート表面で測定した鉄筋の自然電位
- (4) 内部電位(internal potential) ………… コンクリート内部の鉄筋の近傍で測定した自然電位
- (5) 補正電位(correct potential) …………… 内部電位と表面電位の差（ほぼ液間電位差に等しい）
- (6) 接地抵抗(grounding resistance) …… 金属が大地や水などに接地した時に生じる抵抗
- (7) 接触抵抗(contact resistance) ………… 主に2つの金属導体の接触部分に生じる抵抗のことで、例えば、物理的接触部となるスイッチの接点、電池と電球あるいは鉄筋と鉄筋間に生じる
- (8) 電圧降下(voltage drop) ……………… 電気抵抗 $R(\Omega)$ の導体に電流 $I(A)$ を流すと、 $R \times I$ に等しい電圧の降下を起こすことを言う、電解質や電線中を電流が流れる場合にも生じる
- (9) 電解質(electrolyte)…………… イオンに解離して電気（電流）を通すことのできる物質
- (10) 貴な電位(noble potential)…………… 通常あるいは比較の電位よりもプラス側の電位
- (11) 卑な電位(less-noble potential) …… 通常あるいは比較の電位よりもマイナス側の電位
- (12) 液間電位差(liquid junction potential)…………… 異なる濃度の電解質間に生じる電位差
- (13) 不動態(passive state)…………… 鋼材がコンクリートなどの電解質中で耐食性を示す状態
- (14) 中性化(neutralization) ……………… 炭酸ガスなどによりコンクリートのpH(13)がpH7側に変化する
- (15) 腐食面積率(corrosion area ratio) ……………… 単位表面積当たりの腐食面積の率(%)
- (16) 累加頻度図(cumulative frequency diagram) ……………… 同じ現象の頻度（率）を累加して示した図
- (17) 分極抵抗法(polarization resistance method) ……………… 鉄筋の腐食速度を電気化学的に評価する方法の一つで、測定方法には直流分極抵抗法と交流(AC)インピーダンス法がある
- (18) 直流分極抵抗法(linear polarization resistance method)…………… 一定の鉄筋面積に一定の直流電流を流した時の電位変化量とから分極抵抗を算出して鉄筋の腐食速度を求める方法
- (19) 交流インピーダンス法(AC impedance method)…………… 一定の鉄筋面積に低周波と高周波の異なる周波数の交流電圧を負荷し、インピーダンスの周波数特性から分極抵抗を求めて腐食速度を算出する方法
- (20) 対極(counter electrode)…………… 相対する一方の極、分極抵抗法では作用極(鉄筋)の一方極
- (21) 作用極(working electrode)…………… 分極抵抗法では鉄筋極を指す

- (22) 分極(polarization) 電流を流した時の分極電位(E_1)と自然電位(E_0)との電位差($E=E_1-E_0$)を言うが、分極には抵抗分極、濃度分極および活性化分極の3種がある
- (23) プローブ(probe) 検査、探査、試験などの装置のこと、鉄筋プローブなどとも言う
- (24) 腐食速度(corrosion rate) 金属の腐食の速さ [単位: mg/yr, mm/yr, mg/cm²·yr]
- (25) 低周波(low frequency) 周波数の低い波で一般的には100Hz(ヘルツ: 1周期波/秒)以下をさすが、相対的であり、分極抵抗法の研究では0.1~10mHz(ミリヘルツ)程度を用いている
- (26) 高周波(high frequency) 周波数の高い波で一般的には100Hz以上をさすが、相対的であり明確ではない、分極抵抗法の研究では1~100kHz(1,000~100,000Hz)程度を用いている
- (27) 電気二重層(electric double layer) 電気双極子(電荷+qと-qとが一对)が面上に連続的に分布した層のことで、例えば電解コンデンサーでその現象が起こる

[解説]

上記用語の内、本文中に詳細な説明のあるものについては省略し、特にここで説明をする必要のあるものについてのみ記述する。

- (1) 自然電位は、金属の種類、電解質の組成、液温、流速などの影響を受けて変化する。

例えば、各種環境中における鉄(Fe)の自然電位の実測値の差異について以下に示したので参考にされたい。

なお、自然電位の測定に使用された照合電極は飽和甘汞電極(SCE)と飽和硫酸銅電極(CSE)の2種類があるので区別して記述した。

- a. 飽和Ca(OH)₂水溶液(pH 12.7)中に黒皮付Feの自然電位 -150~-190mV vs SCE
- b. 飽和Ca(OH)₂水溶液(pH 12.7)中のみがきFeの自然電位 -220~-230mV vs SCE
- c. 飽和Ca(OH)₂+0.5%NaCl水溶液(pH 12.7)中のみがきFeの自然電位 -225~-460mV vs SCE
- d. 飽和Ca(OH)₂+0.5%NaCl水溶液(pH 12.7)中の黒皮付Feの自然電位 -460~-490mV vs SCE
- e. 飽和Ca(OH)₂+1.0%NaCl水溶液(pH 12.7)中の黒皮付Feの自然電位 -480~-510mV vs SCE
- f. 飽和Ca(OH)₂+1.0%NaCl水溶液(pH 12.7)中のみがきFeの自然電位 -450~-545mV vs SCE
- g. 温度20℃の土壌中の裸のFeの自然電位 -400~-600mV vs SCE
- h. 流速4m/s, 温度25℃の海水(pH 8.2)中におけるFe(鉄)の自然電位 約-610mV vs SCE
- i. 温度20℃のつくば市の水道水中のみがきFeの自然電位 約-700mV vs SCE

- (2) 照合電極を比較電極、参照電極あるいは基準電極などと呼ぶが、内容は同じである。

ただし、標準電極は、特に水素標準電極[水素電極(NHE)]のことを指しており、その電位を0Vと約束している。

なお、この水素標準電極は、構造上取扱いが面倒なことから通常は使用されない。また、照合電極の種類については、3.1.2の1)項「電位差計と照合電極の種類」の項で詳しく紹介するので参考にされたい。

(6) 接地抵抗は、金属の表面がある抵抗率を持つ土壌、水あるいはコンクリートなどの電解質に接地あるいは接水した時得られる抵抗である。

例えば、銅板や銅棒（接地極）の接地抵抗(R)の計算は、接地極の形状により以下に示す幾つかの近似式(2.1),(2.2),(2.3),(2.4)を用いて求めることができる。

・板状の場合の計算式例

$$R = 1.67 \cdot \rho \cdot A^{-0.727} \dots \dots \dots (2.1) \quad \rho: \text{接地極周囲の電解質の抵抗率}(\Omega\text{-cm})$$

$$R = (\rho / \sqrt{4\pi A}) \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_6 \dots \dots (2.2) \quad A: \text{接地極の表面積}(\text{cm}^2)$$

・棒状の場合の計算式例

$f_1, f_2 \dots, f_6$: 形状などの係数(-)

$$R = (\rho / 2\pi L) \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_6 \dots \dots (2.3) \quad L: \text{接地極の長さ}(\text{cm})$$

$$R = (\rho / 2\pi L) [2.3 \log(2L/r) - 1] \dots \dots (2.4) \quad r: \text{接地極の半径}(\text{cm})$$

$$L/r > 10$$

(8) 電圧降下(IR)は、ある抵抗(R)を持つ導体中を電流(I)が流れるときに生じる。その値は両者の積(I*R)に等しい。

例えば、図-2.1に示す陰極防食（電気防食）の条件では、電極と鉄筋間のコンクリートの抵抗(R)とその電圧降下(V)は、(2.5)式と(2.6)式から求められる。

$$R = \rho \cdot \ell / A \dots \dots \dots (2.5)$$

$$= 5\Omega$$

$$V = I \cdot R \dots \dots \dots (2.6)$$

$$= 20 \cdot 5$$

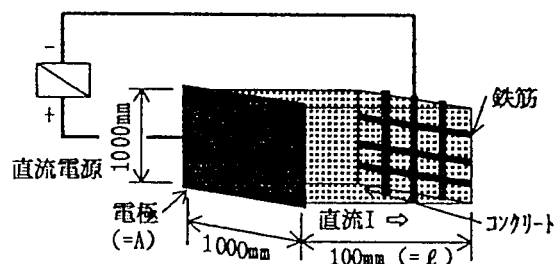
$$= 100\text{mV}$$

なお、図-2.2は図-2.1の電気防食（電解）試験における分極電位の連続記録結果の一例を示したものである。

すなわち、-200mVの自然電位が、約24時間後に平衡状態になり、約-500mVの分極電位になった様子を図示したものである。

確かに、-200mVから-500mVまで約300mVの分極が得られているが、分極には①抵抗分極、②濃度分極および③活性化分極の3種があり、前述した100mVの電圧降下は①の抵抗分極に相当するものである。

ところで、図中の分極 ΔE (=200mV)は何



[陰極防食条件]・コンクリートの断面積(A): 1m²
 ・コンクリートかぶり(ℓ): 0.1m
 ・電流密度(I): 20mA/m²
 ・抵抗率(ρ): 50Ω-cm

図-2.1 供試体に対する陰極防食(電気防食)事例

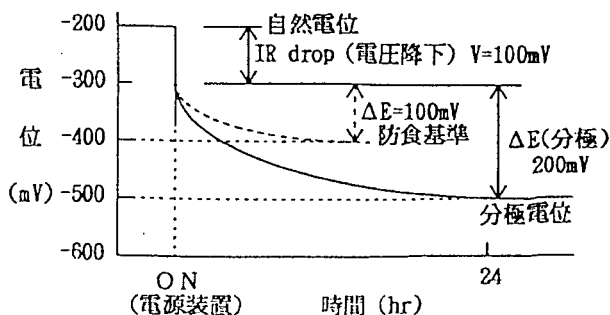


図-2.2 陰極防食における分極電位の連続記録例

かと言え、②の濃度分極（陽極に不溶性合金を用いる場合には溶解金属の濃度差が発生せず分極量は無視できる）と③の活性化分極の和であるが、電気防食では、活性化分極が必要であって、コンクリート中の鉄筋の防食に際しては、その分極量は100mVで良いとするのが通説(NACE,BS,JCI等)であり、単に分極と言っている。

- (12) 液間電位差は、拡散電位差(diffusion potential)とも言うが、濃厚液と希薄液の界面において、両液はその濃度差を解消しようとしてイオン(陽イオン、陰イオン)の拡散が行われることで電位差が現れる。この電位差は時間の経過と共にある値で動的平衡に達する。

例えば、0.1N塩酸と0.01N塩酸、0.1N塩酸と0.1N塩化カリ液間等にも液間電位差が現れる。

図-2.3に0.1N硫酸銅溶液と0.01N硫酸銅溶液中に銅極を設置した際に生じる液間電位差(拡散電位)を隔膜を介して一対の照合電極で測定した事例を示した。

なお、その際の液間電位差は、約6mVであり、実測起電力は36mVであった。

したがって、銅極のみによる電位差は30mV(36-6mV)である。

また、図-2.4にコンクリート供試体の液間電位差の実測例を示した。図中の斜線部のコンクリートは、約6ヶ月間水中に浸漬(17cm)し、上部の3cmは大気中に曝されていたものである。

液間電位差の測定は、電位差計と2本の同一の照合電極A,Bを用いて図のように設置して実測したところ約-40mVの液間電位差を得た。

今、斜線部のコンクリート中に、鉄筋があるものとし、その表面電位が-300mVと実測されたとすれば、鉄筋の真の自然電位(内部電位)は-340mV[-300+(-40)]となる。

しかし、中性化したコンクリート表面をはつり新しいモルタルで補修した場合には、イオン濃度が逆転して、逆に+数10~100mVの液間電位差を実測することがある。

- (15) 腐食面積率は、単位表面積当たりの腐食面積の率(%)のことである。

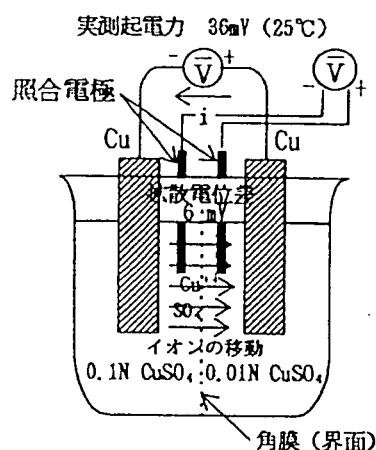


図-2.3 硫酸銅濃淡電池の液間電位差

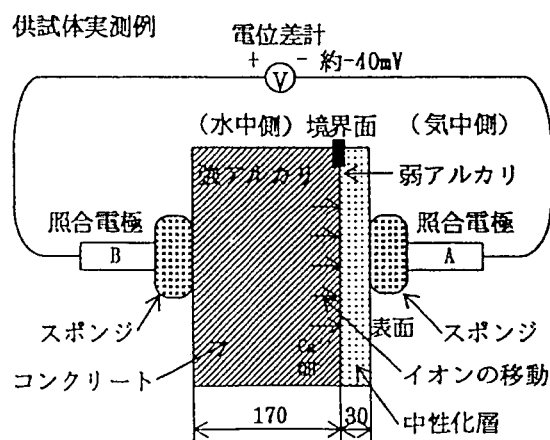


図-2.4 コンクリートの液間電位差の測定方法

例えば、図-2.5に示すように鉄筋の自然電位を測定した場合、測定される自然電位は、主にABC面の表面状態を反映した値であってADC面の影響は受け難い。

また、現場ではADC面の観察はほとんどできない。

したがって、腐食状況を評価するための対象面積(A_T)はABC面であり、その面積中に含まれる腐食面積(A_c)を求めて腐食面積率(A_p)を算出するのが妥当である。

以下にその計算式を示す。

- (a) 評価対象面積=半円周長(ABC長)×鉄筋観察長

$$A_T = \pi r \times l \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

- (b) 腐食面積率=(腐食面積/評価対象面積)×100

$$A_p = (A_c / A_T) \times 100 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

π :円周率

r :鉄筋半径(cm)

l :鉄筋観察長(cm)

なお、自然電位以外の測定項目、例えば分極抵抗、塩分量、かぶりなどと腐食面積率の関係を見る場合の腐食面積率の算出方法も同様とする。

- (16) 累加頻度図とは、同じような現象が起こる事項をX軸にとり、そのそれぞれの度数を百分率(%)にして、その累積値をY軸として作図したものである。

例えば、表-2.2に示す実施例の解析結果に基づき自然電位範囲とその度数から指示率を求め、それを累積して図-2.6のような累加頻度図を作成する。

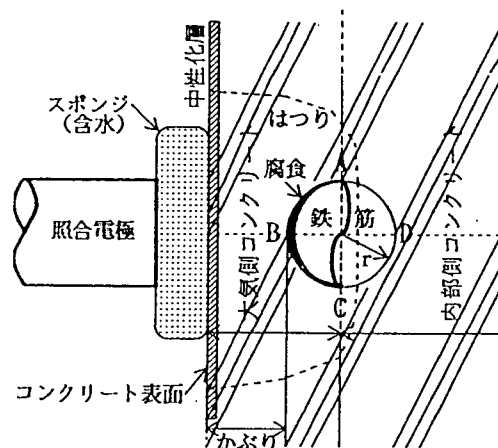


図-2.5 鉄筋の腐食状態観察範囲

表-2.2 供試体の電位範囲と度数分布

電位範囲(-mV)	度数	指示率 (%)	累加率 (%)
-50 < E	1	0.3	0.3
-150 < E ≤ -50	103	30.7	31.0
-250 < E ≤ -150	187	55.8	86.8
-350 < E ≤ -250	23	6.9	93.7
-450 < E ≤ -350	13	3.9	97.6
-550 < E ≤ -450	7	2.1	99.7
E ≤ -550	1	0.3	100

- * 電位最大値: -48mV
- * 電位最小値: -561mV
- * 有効データ数: 335点

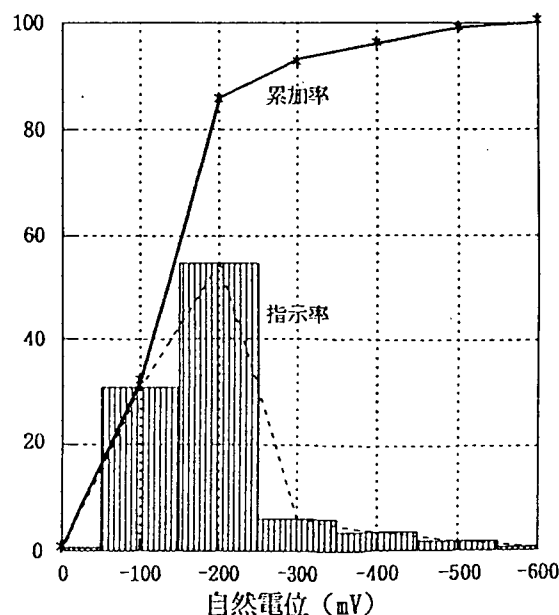


図-2.6 自然電位累加頻度図

(22) 分極には、抵抗分極、濃度分極および活性化分極の3種がある。

抵抗分極(electric resistance polarization)は、電解質(コンクリート)の抵抗や電極表面に生じる皮膜の電気抵抗(R)と電解(電気防食)電流(i)の積で電圧降下とも言い、電解中断で瞬時に消滅する。

濃度分極(concentration polarization)は、電解金属の濃度差により生じる濃淡電池の起電力のことで、液の攪拌や加熱で減少し、電解の中断で消滅する。微弱電流では無視できる値である。

活性化分極(activation polarization)は、電解において、電極反応が遅いことで起きる分極であり、水素過電圧(陰極で水素原子 $[H]$ を水素分子 $[H_2]$ にするための過剰エネルギー)の一種である。

3. 自然電位法と分極抵抗法

3.1 自然電位法

3.1.1 総 則

1) 目 的

自然電位法は、コンクリート構造物中の鉄筋などの鋼材の自然電位を測定して、その鋼材の腐食状況を推定するために用いる。

[解説]

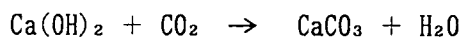
打設当初の健全なコンクリートのpHは13程度であり、その時の鉄筋は保護皮膜により不動態域にあり同時に自然電位は貴な電位を示し腐食は起こらないが、鉄筋は経年的に塩害や炭酸ガスなどの影響を受けて保護皮膜が破壊され不動態域から腐食域に達し、自然電位は卑な電位となり腐食に至る。自然電位法は、このように鉄筋の自然電位と腐食状況との間に大きな関係があると言う原理を利用して鋼材の腐食状況を推定するものである。

2) 自然電位法の原理

自然電位法は、コンクリートなどの電解質中に存在する鋼材が、その電解質環境に応じた電気化学的反応による鋼材の表面状態に応じた固有の自然電位を示す原理に基づくものである。

[解説]

コンクリートは水酸化カルシウムの強いアルカリ性により鉄筋表面を不動態皮膜で保護しているが、下式に示すように、経年的にコンクリート表面から透過する大気中の炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムとなり中性化が進行する。



しかし、中性化が直接腐食に関与するのではなく、中性化による保護能力の低下と塩分の存在による積極的な鉄筋表面の不動態皮膜の破壊部に、水と酸素の供給があって初めて鉄筋腐食に至るものである。

その腐食機構を図-3.1に示した。図中のAnode(陽極)部における反応とCathode(陰極)部における反応は同時に進行し式で示すと以下になる。

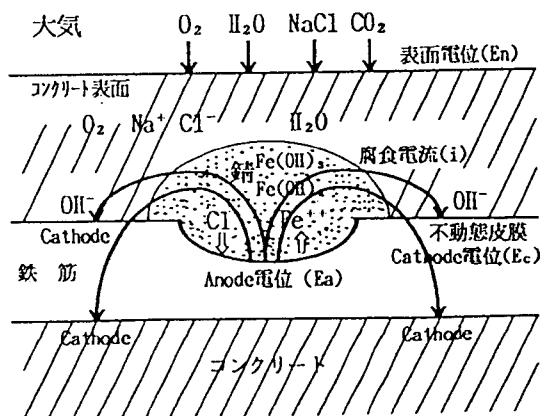
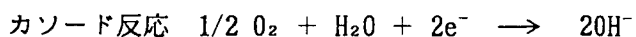
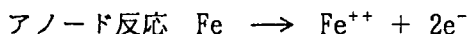
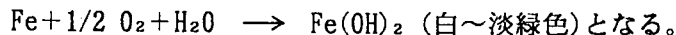


図-3.1 鉄筋の腐食機構図²¹⁾

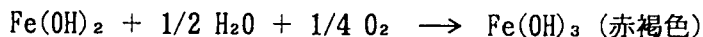
したがって、その全反応は、



図中の E_a はアノード(陽極)部の真の自然電位であり、 E_c はカソード(陰極)部の真の自然電位を示したものである。

しかし、実際の自然電位は、コンクリート表面で実測されるので、その自然電位値には $E_a \sim E_c$ 間の電位に加えて液間電位差などを含んでいる。

さらに、上記の反応により生じた水酸化第一鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ に溶存酸素 $(\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2)$ の供給があれば、水酸化第二鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ の赤錆が発生する。



なお、実際の錆は、鉄表面に水酸化第一鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ 、溶解度 $1.44 \times 10^{-4} \text{g}/100\text{gH}_2\text{O}$ があり、その上に水酸化第二鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ 、溶解度 $4.8 \times 10^{-9} \text{g}/100\text{gH}_2\text{O}$ が存在する混合物(赤錆)になっている。

このように鉄筋の表面に水と酸素が供給される活性的な腐食反応の存在により、鉄筋の自然電位はその活性程度と腐食状況に応じた値として反映される。

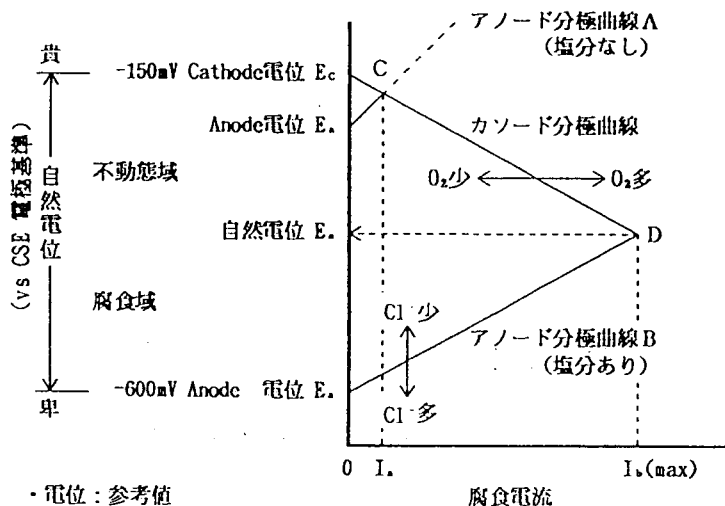


図-3.2 アノード/カソード分極曲線

前述したように、腐食反応はアノード反応とカソード反応から成り立っており、同時に進行している。

この関係をアノード分極曲線とカソード分極曲線とから解説する。

図-3.2はアルカリ性溶液中における塩素イオンを含まない場合のアノード分極曲線 A および塩素イオンを含んでいる場合のアノード分極曲線 B とカソード分極曲線の概念図を同時に示したものである。

この分極曲線は、強制的に電流を流して得られるものであり、実コンクリート中では起こり得ない曲線部は点線で示してある。

図中のアノード分極曲線 A, B とカソード分極曲線との交点 C, D の電位値は、何れも自然電位であり、この図のように C 点の自然電位が不動態域にあり極く微小な腐食電流 (I_a) では鉄筋腐食は起こらない。

これが D 点のように腐食域にある場合には、アノード部となる鉄筋表面から腐食電流 (I_b) が流出して、その電流に応じた鉄筋腐食を起こす。アノード部から流出した腐食電流は、同じ電流 (I_b) だけカソード

部へ流入する。

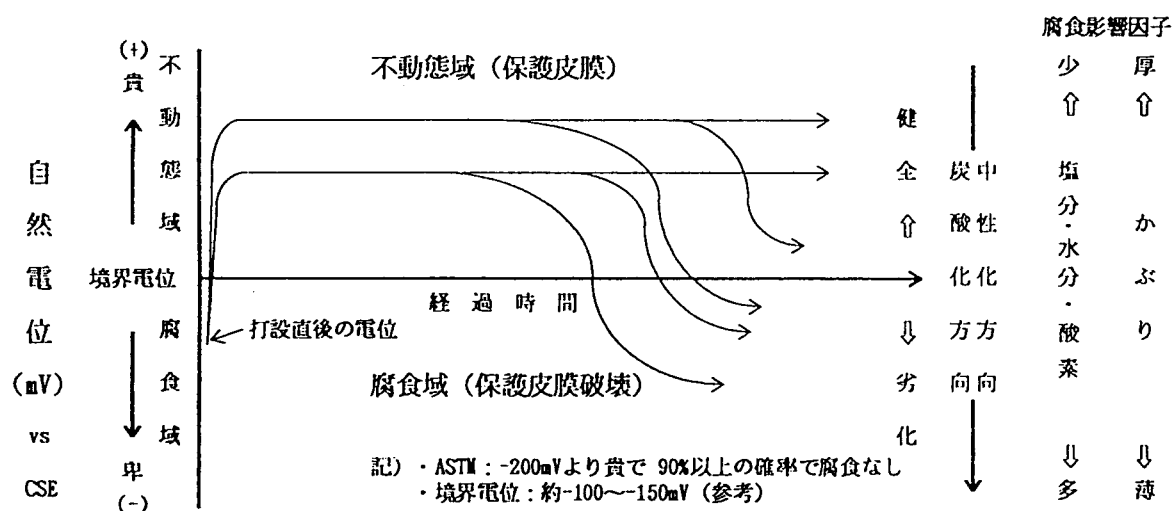
腐食電流は、アノード、カソード間の電位差とそれぞれの接地抵抗の大小によって決まるが、コンクリート中の鉄筋などの場合には、アノード、カソードの電流の流出入する面積を特定できないので求めることはできない。

なお、アノード分極曲線およびカソード分極曲線の勾配は、溶存酸素(O_2)や塩素イオン(Cl^-)濃度の多少で変化し、同時に自然電位も変わる。

以上のことから、自然電位は、鉄筋の腐食状況あるいは腐食環境を表現しているとも言える。

自然電位法は、このように自然電位と鉄筋の腐食状況との間に大きな関係があると言う原理を利用したものである。

また、図-3.3に自然電位の経時変化の概念図と自然電位と腐食影響因子との関係を定性的に示した。



3) 適用範囲

自然電位法は、大気中に曝された鉄筋コンクリート構造物のコンクリート表面に対して適用する。

[解説]

自然電位法は、例えば、橋梁上部工あるいは橋脚など様々な土木用鉄筋コンクリート構造物の大気中部に対して適用できる。

しかし、金属の自然電位は、本来均一な(液体)電解質中で測定されて始めて精度の高い値が実測されるものであり、コンクリートなどの多孔質な固体電解質では、コンクリート表面から鉄筋間で様々な不均一状態が存在するので必ずしも精度の高い自然電位が実測されるとは限らないので注意を要する。

自然電位の測定に際し、適切な測定状態が整っている条件とは、コンクリートと鉄筋とが水分などの電解質を介して密着状態にあることである。

したがって、図-3.4に示すように、コンクリート表面に設置された照合電極と鉄筋間に欠陥による空隙があった場合には、測定される自然電位値は照合電極に近い空隙端部の密着部の平均的な電位であり、必ずしも照合電極直下の電位が測定されないの
で、鉄筋の腐食評価に際しては注意を要する。

また、コンクリート表面への散布水が極部に集中して、連続した水垂れや水膜が生じた状態での電位測定を行わないこと、即ち散布水がコンクリートへ十分に浸透したことを確認した上で自然電位の測定を行うなどの配慮が必要である。

例えば、仮に図-3.5に示すように、健全な鉄筋直上のコンクリート表面に、水をしみこませたスポンジを介して照合電極を当てて自然電位の測定を行った場合に、スポンジから水垂れを起こし、その水垂れが下部のクラック部内部に連続して流れ込み腐食鉄筋に接触したとすれば、測定される自然電位値は、照合電極の設置直下の電位ではなく、腐食部の鉄筋電位を測定することになる恐れがあるので注意しなければならない。

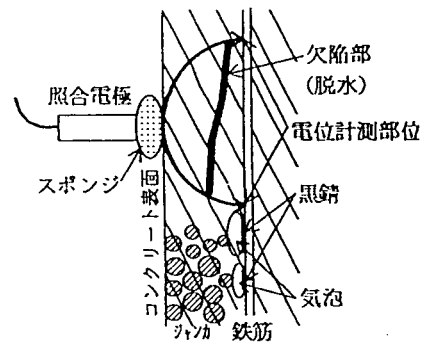


図-3.4 空隙部の電位測定部位

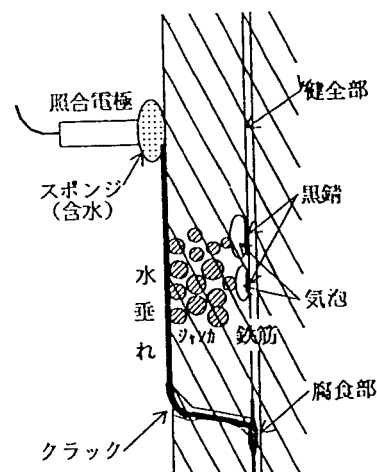


図-3.5 水垂れによる電位測定部位

3.1.2 測定方法

1) 電位差計と照合電極の種類

自然電位の測定は、①高抵抗電位差計(電位差計)、②照合電極および③鉄筋接続用リード線で構成された機材の組合せにより行う。

[解説]

(1) 電位差計の種類

電位差計としては、市販デジタル電圧計とコンクリート中の鋼材の自然電位を測定する目的で開発されたコンピュータ内蔵(RS-232C 付属)のものがあり、またその中には入力インピーダンスが、①10MΩ、②100MΩ、③1000MΩの3種類がある。コンクリートのような抵抗率の高い電解質に対し精度よく自然電位を計測するには、入力インピーダンスが100MΩあるいは1000MΩの電位差計を用いることが望ましい。

(2) 照合電極の種類と硫酸電極基準への換算方法

照合電極の種類は種々あるが、代表的な照合電極を4種類選択し、硫酸銅電極を基準とした場合の各照合電極電位(E_1)と各照合電極基準で直接鉄筋の自然電位を測定した場合のおおよその指示値を自然電位測定範囲(E)として表-3.1に示した。

また、図-3.6には硫酸銅電極基準による各照合電極電位(E_1)の測定方法を示した。

なお、硫酸銅電極以外の照合電極を用いて鉄筋の自然電位を測定した場合の電位差計の指示値(E)は(3.1)式により求めた。

$$E = E_0 (\text{自然電位計測範囲 vs CSE}) - E_1$$

$$= E_0 (\text{約} +200 \sim -600) - E_1 \dots \dots (3.1)$$

したがって、硫酸銅電極以外の照合電極を用いた場合には、硫酸銅電極基準に換算することが望ましく、その硫酸銅電極換算電位(E_0)は(3.2)式を用いて求められる。

$$E_0 = E + E_1 \dots \dots (3.2)$$

なお、照合電極の形式には、一点一点測定する筒型のものと、一度に連続して複数点の測定を可能にする回転型のものがあるが、照合電極内部の電解質は、ゲル状か固体のものでコンクリート表面を汚染させないものがよい。

表-3.1 照合電極の種類と照合電極電位(vs CSE)

照合電極の種類	照合電極電位 vs硫酸銅電極 E_1 (mV)	自然電位 計測範囲 E (mV)
硫酸銅電極基準(CSE)	0 (-0.90)	+200~-600
甘汞電極基準(SCE)	-74 (+0.56)	+274~-526
鉛照合電極基準(PRE)	-800 (-0.30)	+1000~-200
飽和塩化銀電極基準	-91 (-0.60)	+291~-509

・()内数値：25℃以下での電位補正值(mV/℃)
・25℃以上では符号逆転(- → +, + → -)

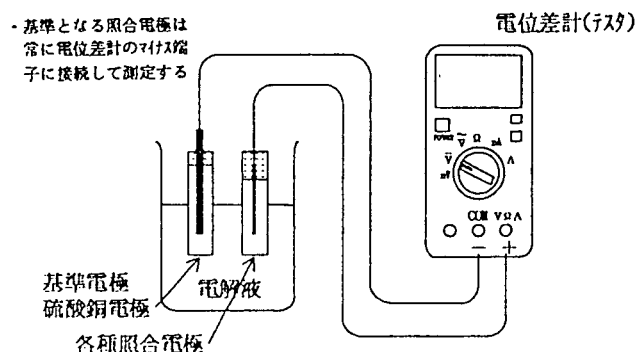


図-3.6 照合電極電位の測定方法(硫酸銅電極基準)

2) 測定対象および測定箇所

測定対象は大気中に曝された土木用鉄筋コンクリート構造物の鋼材とし、その測定箇所はその構造物の規模、構造あるいは環境などを考慮して決定する。

[解説]

測定対象は、大気中の鉄筋コンクリート構造物であれば全て含まれていると考えてよい。大事なことは、その測定箇所や個数の選定が構造物全体を評価するものでなければならないことである。そのためには、その構造物の大きさ、形状あるいは腐食環境などを考慮して測定箇所数などを決定しなければならない。

例えば、高速道路橋橋脚の鉄筋の腐食調査に自然電位法を用いる場合の測定箇所数の決定方法についての一例を示す。

この道路橋は、図-3.7に示すように海岸(環境)から約0.2~1.0km離れ、橋脚間隔約25m、3列(構造で20km(規模)に渡り築造されているものを想定したものである。

以下に、その橋脚の鉄筋の腐食状況を調査する場合の測定箇所数の決定方法と測定対象橋脚本数の算出方法の例を示した。

- (1) 塩害の影響情報を得る目的で、海岸からの距離0.2km、0.6km、1.0kmの橋脚をそれぞれ各3本、3列選定する。

ア橋脚：9本、イ橋脚：9本、ウ橋脚：9本

調査本数 合計27本

総本数=2,400本(=20,000m×3本/25m)

- (2) 調査期間および調査費用を考慮した上でア、イ、ウ列から適宜選定する。

ただし、重複する箇所は除くものとする。

- (3) 雨水と塩害の影響情報を得る目的で、橋脚の高さ方向と面方向を考慮して3段程度に層別する。

ただし、橋脚の高さが5m以下のものは、2段程度に層別するものとする。

- (4) 1か所1面の自然電位の測定面積は約1m²程度以上とする。

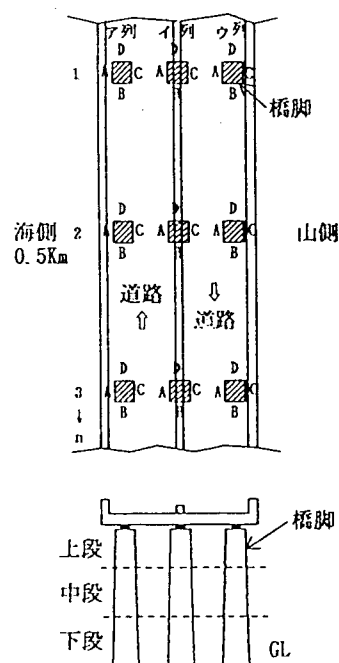


図-3.7 道路橋橋脚層別図

3) 測定準備

測定準備に際しては、自然電位の測定に必要な機材の準備、鉄筋のはつり出しおよびコンクリート表面への散水による測定環境の調査を行う。

[解説]

(1) 自然電位測定用準備機材

測定に必要な機材は、主に①～⑥の機材であり、⑦～⑯の機材は一般的に準備する機材である。

- ① 高抵抗電位差計……………自然電位を測定するための計器であり、入力インピーダンスが100MΩ以上のデジタル式の電位差計またはコンピュータが組み込まれた電位差計
- ② 計測用照合電極……………別表参照(表-3.1)
- ③ 電位照合用飽和硫酸銅電極……………測定に使用する照合電極を照合するための基準電極
- ④ テスタ(鉄筋導通試験用)……………市販のテスタ
- ⑤ 鉄筋接続用リード線……………鉄筋と電位差計間を接続するためのリード線
- ⑥ 散水機／噴霧器……………コンクリート表面を湿潤させるために必要
- ⑦ 鉄筋位置探知機……………鉄筋位置およびコンクリートかぶり厚さを測定する機器
- ⑧ フェノールフタレイン……………中性化状況の判断に必要
- ⑨ カメラ……………種々の現場写真をとるために必要
- ⑩ コードリール……………測定現場と電源間の配線に必要
- ⑪ 巻尺……………測定対象物あるいは位置などを測定するために必要
- ⑫ コンクリートハンマードリル……………鉄筋のはつり出しに必要
- ⑬ ハンマー……………コンクリートの浮きあるいは剥離状態の確認のために必要
- ⑭ ヤスリ……………鉄筋へのリード線の接続のための鉄筋表面の研磨に必要
- ⑮ スケッチブック……………ひび割れ状態などのスケッチに必要
- ⑯ ノギス、スケールなど……………中性化深さの測定、ひび割れ長さの測定などに必要

(2) 鉄筋のはつり出し

鉄筋のはつり出しは、以下に示す事項のために必要となるので、そのはつり箇所は出来るだけ測定面内かその近傍が望ましく、はつり作業に際しては、鉄筋を傷つけないように丁寧に行う。

- ① 鉄筋の腐食状態の観察(スケッチ、腐食面積率などの記録)
- ② 鉄筋を磨いた上、鉄筋接続用リード線を接続
- ③ 補正電位の測定(内部電位と表面電位との電位差の測定)[3.1.2 5)参照]

(3) 測定面へのマーキングと散水による測定環境の調整

測定面となるコンクリート表面に指定された測定間隔で格子状に油性黒色ペンなどで測定位置をマーキングする。次に、測定面が高乾燥状態になり自然電位の測定に支障をきたすことがあるので、測定面には十分にかつ均一に散水し、水が完全に浸透したことを確認した上で測定に入る。

4) 測定方法

自然電位の測定は、入力インピーダンスの高い(100MΩ以上)電位差計を用い、そのプラス端子には鉄筋に接続されたリード線を、マイナス端子には照合電極のリード線を接続し、照合電極の先端はコンクリート表面に含水させた脱脂綿やスポンジなどを介して接触させて測定する。

〔解説〕

自然電位の測定手順

(1) 筒型照合電極を用いる場合の測定手順

筒型照合電極を用いる場合の自然電位の測定は、図-3.8に示すように、脱脂綿などに水を含ませ、十分に絞ってコンクリート表面に当て、その上に筒型の照合電極を設置させて、鉄筋直上あるいは格子状に一点ずつ測定し記録する。

(2) 円盤状の回転式照合電極を用いる場合の測定手順

回転式照合電極の外周に高吸水性のスポンジを装着した回転式照合電極が国内外で開発され、線状や格子状測定を非常に効率よく行うことができるようになった。

なお、回転式照合電極と組み合わせる電位差計は、何れもコンピュータが内蔵されている。

その場合の測定手順の一例を以下に示す。

ただし、測定準備の段階で既に図-3.9に示すように測定位置がマーキングされ、散水による測定面の調整が行われたものとする。

- (a) 鉄筋とコンピュータ内蔵型電位差計(計器本体)間を鉄筋接続用リード線にて接続する。
- (b) 計器本体のファンクションキーなどを用いて測定条件を入力し、測定開始状態にセットする。

- (c) 次に、回転式照合電極を測定起点に接続させ、Y方向にセンサを連続走査させて指定条件でデータを順次取り込み本体に記憶・保存する。

なお、計器本体に記憶・保存された電位データは、電位分布図として処理される。

さらに、測定データはコンピュータに転送し等電位線図を表示させ、プリントアウトする。

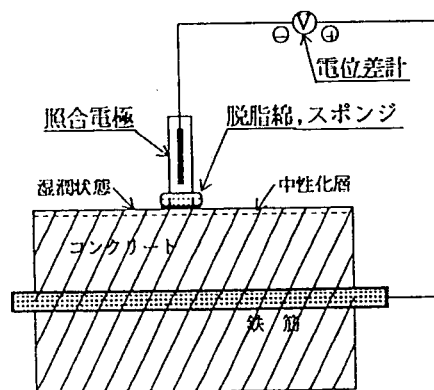


図-3.8 自然電位の測定方法

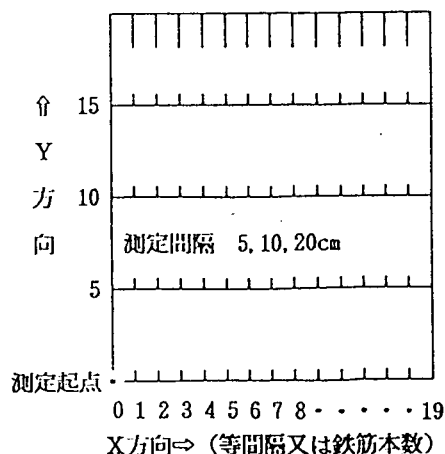


図-3.9 測定範囲のマーキング

5) 補正電位の測定方法

自然電位の測定では、かぶりコンクリートの性状によっては大きな液間電位差や電圧降下などの誤差を含んで実測されることがある。その誤差を補正するために補正電位の測定が必要になる。

補正電位は、表面電位と内部電位との実測値の電位差である。

[解説]

コンクリート中鉄筋の自然電位の分布状態をコンクリート表面から測定する場合には、鉄筋とコンクリート表面間のコンクリートの性状など(W/C、水分量、塩分量、アルカリ濃度差、中性化状態など)により、特にアルカリ濃度差による液間電位差(用語の定義を参照)が原因して真の自然電位が測定できないことがある。

その電位差を補正するために、図-3.10に示すように、予め鉄筋近傍の真の自然電位に近似した内部電位 E_2 との直上のコンクリート表面の自然電位 E_1 (表面電位)を照合電極と電位差計とを用いて測定し、その電位差 ΔE ($E_2 - E_1$)を補正電位として、コンクリート表面で格子状に測定された自然電位 E_0 にそれぞれ加算して測定面全体の自然電位を求める。

ただし、補正電位の測定に際しては、以下に示すような測定上の注意が必要になる。

- 1) 補正電位の測定は、自然電位の測定の前
後の何れかにおいて速やかに行うこと。
- 2) 補正電位測定孔の削孔に際し、ドリル先端は決して鉄筋に接触させないこと。
- 3) 測定箇所数は、同一測定面で3～5箇所程度とし、その削孔深さは非中性化層2～3cmとする。
- 4) 測定は、1箇所ですら3回程度測定し安定した値を記録し、全体の平均値を求めてその測定面の補正電位値とする。
- 5) コンクリート表面には散水し、補正電位測定用の孔中には散水しないこと。
- 6) コンクリート表面から水が垂れていないこと。
- 7) 孔中に挿入される照合電極先端のスポンジは、十分に水を切る(手で絞る)こと。

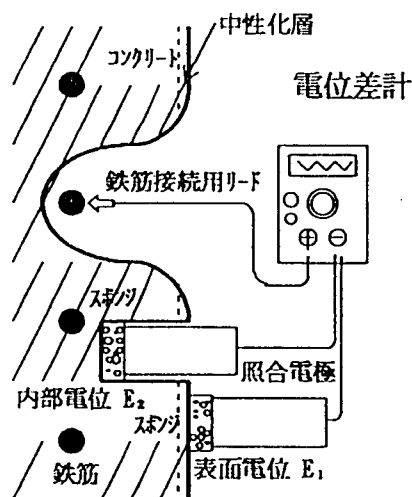


図-3.10 電位補正方法^{24)・25)}

3.1.3 影響因子

自然電位の測定に際し、電位差計、照合電極などの使用上および測定作業上に影響をおよぼす原因(因子)については、十分な検査、検定あるいは測定環境の調整などが必要である。

[解説]

自然電位法における測定上の影響因子について以下に述べる。

- 1) 自然電位測定に用いる電位差計の入力インピーダンスは、陽分極、陰分極あるいは電圧降下などの誤差を避けるために、100MΩ以上が望ましく、できれば1000MΩのものがよい。
- 2) 正しい自然電位を測定するには、事前に使用する照合電極の誤差チェックを行う必要がある。
そのチェック方法は、常に安定した電位を示す照合電極と使用電極との間の電位差を測定することにより行われる。もし、誤差が大きければ、照合電極あるいは使用電極の改善などが必要となる。
- 3) コンクリートの極く表面は、時として非常な乾燥状態と中性化などによりイオン電導を失うような状態となり、測定電位に誤差を与える。これを避けるために、事前に測定部位のコンクリート表面の環境を水などで調整するために散水器あるいは噴霧器を用いて十分に湿潤状態にし、完全に浸透するのを確認した後に測定を開始する。
なお、コンクリート表面に散布する湿潤液(接触液)は、コンクリート表面を汚染させないことを考慮して、水道水あるいは水酸化カルシウム[Ca(OH)₂]の飽和溶液を用いるのがよい。各種接触液と自然電位の安定時間に関する試験結果⁷⁾の概要を下記に[付記]したので参考にされたい。
- 4) 自然電位の測定は、測定面の含水状態が最初と最後で大きく変化しない間に格子状(碁盤目)に迅速に行う必要がある。
- 5) 塩害を受けない内陸の鉄筋コンクリート構造物で、中性化が進んだ上に高乾燥状態にあるコンクリート中の鉄筋の自然電位は、鉄筋近傍の内部電位とコンクリート表面で測定される表面電位との間に少なくとも数10mV、大きくは数100mVの液間電位差などを生じていることがあるので、そのための補正電位の測定は必要条件になる。なお、大半は内部電位が表面電位よりも卑な電位である。

[付記] 接触液種と自然電位の安定化時間について

接触液のコンクリートへの浸透により液間電位差や電圧降下を除去するに必要な時間は、コンクリートの材令やその置かれた環境などにより異なるので一概に論ずることはできないが、表-3.2にその一試験結果を要約して紹介する。この試験結果では、塩分の有無に関わらず水道水を用いてもよくまた実用的でもある。

表-3.2 接触液種と自然電位の安定化時間¹⁰⁾

接触液種	自然電位の安定化時間(分)	
	Cl ⁻ 0kg/m ³	Cl ⁻ 3kg/m ³
水道水	10	5
Ca(OH) ² 飽和溶液	25	25
人工海水	360 (安定せず)	360 (安定せず)
3% KCl	360 (安定せず)	360 (安定せず)

3.1.4 鉄筋腐食の推定

鉄筋腐食の推定は、実際にコンクリート表面上で測定した自然電位と鉄筋の実腐食状態とを対比させて行う方法と自然電位と腐食状況に関する規格や基準を用いて行う方法とがある。

また、他の腐食因子との組合せによって鉄筋腐食を評価することも行われている。

[解説]

自然電位法により鉄筋腐食を評価する場合には、以下に示すような事項を考慮する必要がある。

- 1) 自然電位と鉄筋の実腐食状態とを対比できる検証データを活用することで、より精度の高い腐食診断を可能にする。
- 2) 格子状に測定された表面電位に補正電位を加算して真の自然電位を求め、適切な電位の境界値を用いて等電位線図を作成し、腐食状況を面的に評価することが正しい判断を導く。
- 3) 半径10cm以内で測定された自然電位の差が、50,100,150mVと大きくなるほど腐食程度が大きくなるので50mV間隔で任意の等電位線図を作成し、他の測定データ、例えば含水率、コンクリート抵抗率および塩分量との対比からより精度の高い腐食評価に繋げることもできる。
- 4) 最貴電位と最卑電位間を等分に5分割以上行い、その最の等電位線密度の高い谷部に腐食起点が存在することが多い点に注意する。
- 5) 海洋の鉄筋コンクリート構造物で、海水の干満部の非常に含水率の高いコンクリート面では自然電位値が全体的に卑な値(例えば、 $-500 \sim -600\text{mV}$)であっても腐食が起こっていない場合がある。また、海洋構造物は電気防食法を適用していることが多く、その影響で卑な値を示すことがあるので腐食を判定する上で注意を要する。
- 6) 大地と接する部分の橋脚や地下水の影響を受ける地下室壁面は、コンクリート中の含水率が高いために鉄筋腐食がないにも係わらず全体的に卑な電位を示すことがある。

なお、コンクリート中鉄筋の腐食を評価するための基準としては、表-3.3に示すASTM(C876-80)とBS規格がある。この腐食評価基準は、腐食の起こる確率で示しており、鉄筋表面の腐食状態や腐食面積率などを表しているものでない。また、ASTMやBS規格の何れもコンクリート抵抗率の高い沿岸や内陸にある構造物に対しては、補正電位を考慮しなければ、より精度の高い腐食診断ができないことがあり、また間違った判断をすることがあるので注意を要する。

なお、鉄筋の腐食評価は、必ずしも自然電位の測定結果のみによって行われるわけではなく、例えば以下に示すような測定項目や検査項目などとの組合せによっても行われる。

- (1) 中性化深さの測定
- (2) 鉄筋かぶり厚さの測定
- (3) コンクリートの抵抗率の測定
- (4) 水分量の測定
- (5) 塩分量の測定

- (6) コンクリート表面の圧縮強度の選定
- (7) 自然電位分布図の等電位線密度
- (8) 一定距離間(10cm以内)の自然電位の最大電位差
- (9) ハンマリングによるコンクリートの浮きや剝離の確認
- (10) コンクリート表面の劣化状況の観察とスケッチ
- (11) 自然電位と腐食状況の関係を鉄筋のはつり出しにより確認

自然電位法による腐食評価の精度の向上のため、自然電位とコンクリート抵抗率、塩分量、かぶりおよび材令などとの組合せにより鉄筋の腐食状況を総合的に評価する方法も取られている。

以上のような測定結果、検査結果および実績に基づくデータや種々の鉄筋腐食に関する評価資料を活用して、その腐食の判定精度を高める努力がなされている。

表-3.3 ASTM規格とB S規格^{7), 17)}
(自然電位:CSE基準)

腐 食 ランク	A S T M 規 格		B S 規 格
	自 然 電 位 E(mv)	腐 食 確 率 P(%)	腐 食 確 率 P(%)
I	$E > -200$	90%以上の確率 で腐食なし	5%以下の確率 で腐食あり
II	$-200 \geq E > -350$	不 確 定	50%
III	$-350 \geq E$	90%以上の確率 で腐食あり	90%以上の確率 で腐食あり
(IV)	$-500 \geq E$	約半数の供試体 にクラック発生	

3.1.5 測定結果のまとめ方

報告書作成のための前処理として、各自然電位の測定結果に対して少なくとも測定年月日、測定番号などの測定条件を付し、次の手順により測定結果のデータ整理や解析資料のまとめを行うのがよい。

1) データ整理

- (1) 自然電位分布表データの整理
- (2) その他の測定結果および検査結果の整理
- (3) 写真帳の作成

2) 解析資料の作成および総合的腐食評価

- (1) 各種等電位線図の作成と解析
- (2) 累加頻度図の作成
- (3) 各種非破壊測定結果の解析
- (4) 自然電位値と各種非破壊測定結果とによる総合的な腐食評価

[解説]

測定結果のまとめ方は、色々あると思われるので一例を示すにとどめる。

なお、長期に渡る調査データは、測定データが非常に多くなり時として測定場所や測定番号を特定来なくなるなどの混乱をまねくことが考えられるので、事前に調査一覧表などを作成しておくことが望ましい。

その一覧表の一例を表-3.4に示したので参考にされたい。

表-3.4 ○○鉄筋腐食調査一覧表例

測定場所	測定番号	測定項目	測定年月日	測定条件	備考
○○橋脚135-01番 GL+2.0m (下部)	001	自然電位 抵抗率 塩分量 分極抵抗 中性化深さ かぶり深さ 含水率	(現場記入)	測定間隔 気象 温度 ひび割れの有無 その他	(現場記入)
○○橋脚135-01番 GL+5.0m (中部)	002	自然電位 抵抗率 中性化深さ		測定間隔 気象 温度 ひび割れの有無 その他	
○○橋脚135-01番 GL+8.1m	003	自然電位 抵抗率 中性化深さ		測定間隔 気象 温度 ひび割れの有無 その他	

「測定結果のまとめ」の次は「調査報告書」の作成を行うことになるが、調査報告書は、一般的に表紙、目次、本文、測定データ集、写真帳および参考文献などにより構成される。

ここでは、自然電位法によるコンクリート中鉄筋の腐食調査を行った場合の目次構成の一例を参考までに表-3.5として紹介する。

表-3.5 目次構成の一例

目次	頁
1. 調査概要(調査目的)	
2. 調査対象(調査箇所、調査項目、添付図)	
3. 調査関係者	
4. 調査期間	
5. 使用計器および機械(機械名、型式)	
6. 測定方法(主な機器の測定方法)	
7. 腐食診断基準	
8. 測定結果(測定結果データ集)	
8.1 自然電位の測定結果	
8.2 抵抗率の測定結果	
8.3 塩分量の測定結果	
8.4 かぶりの測定結果	
8.5 中性化深さの測定結果	
8.6 鉄筋の表面観察(腐食面積率、腐食ランク)	
8.7 コンクリート表面の観察(ひび割れ、浮きなど)	
9. 解析(統計処理：腐食面積率、腐食ランク／各測定結果)	
10. まとめ(全体評価)	
10.1 測定場所と腐食ランクの関係(一覧表)	
10.2 今後の維持管理対策	
[添付資料]	
(1) 添付図・調査対象全体図	
・調査箇所図	
(2) 測定結果データ集	
(3) 自然電位の等電位線図集	
(4) 現場写真集	
(5) 参考文献	

3.2 分極抵抗法

3.2.1 総 則

1) 目 的

分極抵抗法は、コンクリート構造物中の鋼材の腐食状況を評価するために用いる。

[解説]

鋼材の非破壊腐食モニタリング手法の代表的なものは、前述の『自然電位法』であるが、近年、盛んに研究開発が行われている新しい腐食モニタリング手法として分極抵抗法が挙げられる。同法では、将来の腐食状況の進展を推測するための重要な情報となる腐食速度を推定することが可能となる。

2) 原 理

分極抵抗法は、鉄筋腐食が電気化学的な反応により生じることを利用し、この時、発生する微小な電流(腐食電流)を推定するもので、測定法としては直流分極抵抗法と交流インピーダンス法がある。

[解説]

コンクリート中の鉄筋は水と酸素の作用により腐食を生じ、鉄筋表面において、式(3.3)および(3.4)に示されるような電気化学的な反応により、鉄錆(赤錆)を生成することが知らされており、アノード部とカソード部との電子の授受に伴い腐食電流が発生する(詳細は3.1.1の2)参照)。この腐食電流は、鉄筋の腐食速度を表すものであり、鉄筋の腐食状況を評価するための重要な情報となる。

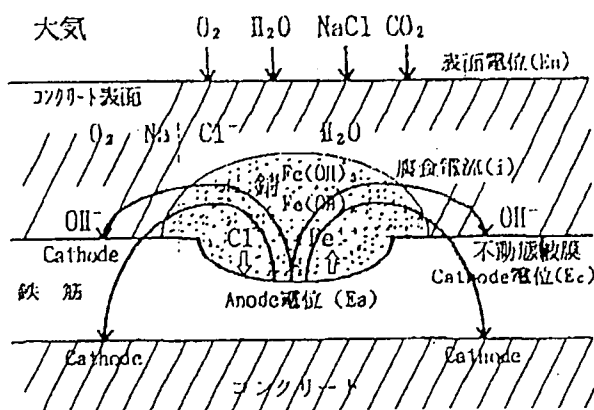
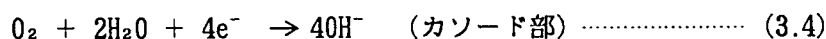
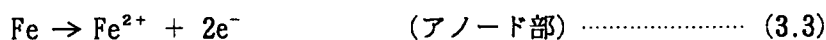


図-3.11 鉄筋の腐食機構図

腐食電流は鉄筋表面における内部電流であるため、直接測定することはできない。そのため、鉄筋に外部から微小な電位差(10～20mV)を負荷したとき、加えた電位差 ΔE と負荷により生じた微小電流 ΔI の間には、式(3.5)に示すような直線関係があることを利用し、式(3.6)に示すような分極抵抗と腐食電流との関係¹⁾ から、腐食電流を推定しようとするものである。

$$\Delta E = \Delta I \cdot R_p \quad \text{..... (3.5)}$$

$$I_{corr} = K \cdot \Delta I / \Delta E = K / R_p \quad \text{..... (3.6)}$$

ここで、 R_p ：分極抵抗(Ω)

I_{corr} ：腐食電流(A)

K ：金属の種類、環境等によって決定される定数

(既往の研究結果では $K=30\text{mV}$ 程度)

分極抵抗を求めるための手法として、直流分極抵抗法および交流インピーダンス法が挙げられる。

直流分極抵抗法では、式(3.5)を用いて分極抵抗を測定する。

交流インピーダンス法では、コンクリート中の鉄筋腐食反応を、図-3.12に示すように分極抵抗およびコンクリート抵抗に相当するような電気回路と考える。このような等価回路が形成されるコンクリート中の鉄筋表面に高周波(100～1000Hz)の交流電流(電圧)を与えると、容量成分 C_p は充電されず、電流は図中①の経路を通り、逆に、低周波(0.01～0.001Hz)を与えると、容量成分 C_p は充電され、電流は②の経路を通ることから、周波数を漸次変化させていけば、図-3.13に示すような周波数とインピーダンスの関係が得られ、分極抵抗 R_p とコンクリート抵抗 R_s を求めることができることとなる。交流インピーダンス法の利点としては、測定された分極抵抗 R_p の信頼性の向上および分極抵抗 R_p とコンクリート抵抗 R_s を同時に測定できることが挙げられる。

ただし、直流分極抵抗法で求めた R_p は交流インピーダンス法の R_s の成分を含んでいるため、両者の R_p では意味が異なることを注意する必要がある。

R_p ：分極抵抗
 R_s ：コンクリート抵抗
 C_p ：電気2重層容量

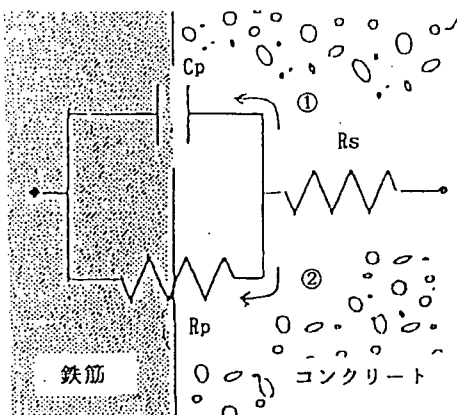


図-3.12 等価回路²⁾

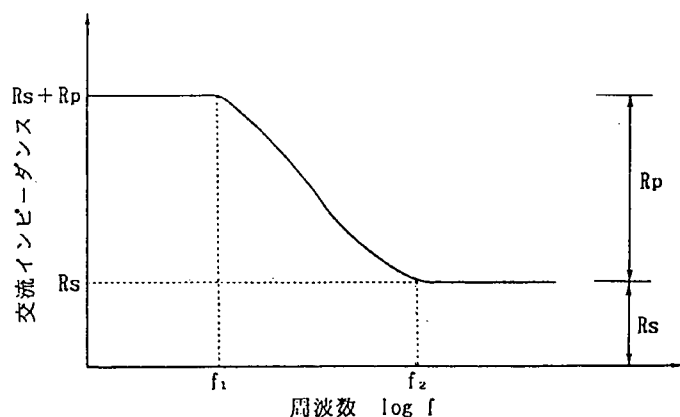


図-3.13 交流インピーダンスと周波数との関係

3) 適用範囲

分極抵抗法は、大気中部に曝された鉄筋コンクリート構造物のコンクリート表面に対して適用する。

[解説]

分極抵抗法は、コンクリート橋、トンネルなどの土木用鉄筋コンクリート構造物の大気中部のコンクリート表面に対して適用できる。

分極抵抗法は、電気化学的モニタリング手法の1つであるため、自然電位の場合と同様に、電流の経路となるかぶりコンクリートおよび鉄筋が良好な通電性を有することが、精度の高い測定をするための条件となる。そのため、コンクリート表面に通電性の悪い表面被覆がなされていたり、かぶりコンクリートの浮きなどが認められる箇所での適用は困難となる。また、測定点直下に大きな空隙やジャンカ等の不均一な状態が存在する場合、電流の経路は、電気抵抗の大きな空隙、ジャンカ部を避けて流れるため、必ずしも精度の高い測定値が得られないことがある(3.1.1.の3)参照)。

3.2.2 測定方法

1) 測定器

測定器は、①ポテンショスタット、②照合電極等を含むプローブ、③リード線などから構成される測定器を用いる。

[解説]

交流インピーダンス法では、高周波と低周波を重量させた定電流パルス(図-3.14参照)を与えられる装置が測定時間の短縮に有効である。また、測定対象としている鋼材の領域を明確にするため、コンクリート中を流れる電流の広がり限定するセンサ(二重リング式対極、図-3.15参照)も開発されている。ただし、対極の材質によっては、正しい測定ができない場合があるので留意が必要であるとの指摘³⁾もある。

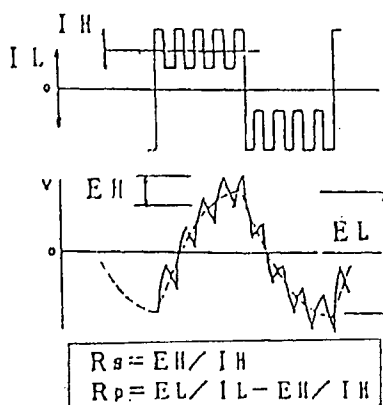


図-3.14 定電流二重パルス重量方式^{4) 5)}

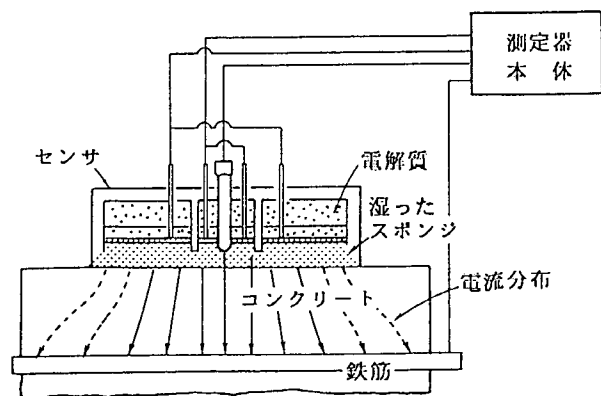


図-3.15 二重対極式センサー⁵⁾

2) 測定対象ならびに測定箇所

測定対象は大気中に曝された鉄筋コンクリート構造物中の鋼材とし、測定箇所はその構造物の規模、構造あるいは環境等を考慮して決定する。

[解説]

分極抵抗法は、様々な鉄筋コンクリート構造物の大気中にあるコンクリート表面部分に適用できる。

一般に、対象となる構造物の面積は大きく、全体を調査するためには膨大な時間と労力が必要となる。そのため、構造物の規模、構造あるいは環境などを考慮して、適切な調査箇所を選定する必要がある(3.1.2の2)参照)。

3) 測定の準備

測定に先立って測定面、測定点の選定、コンクリート表面の研磨、鉄筋のはつり出しなどの準備を行う。

[解説]

測定準備の手順例を以下に示す。

- (1) 調査対象面を選定し、入手可能であれば設計図、配筋図などをそろえる。
- (2) 鉄筋位置探知器などを用い、鉄筋位置およびかぶりを調べ、図-3.16のように鉄筋位置にマーカなどで印を付ける。

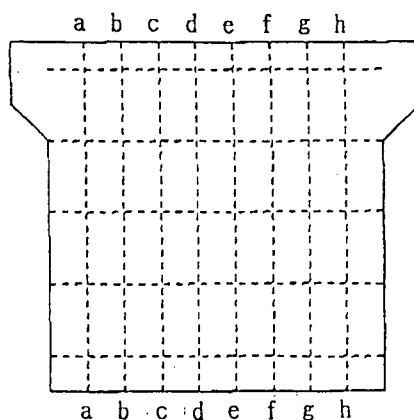


図-3.16 鉄筋位置探査後のマーク例

- (3) コンクリート表面にモルタル仕上げなどがなされている場合、モルタル層とコンクリート層の間の剥離などにより電氣的に大きな抵抗が生じ、測定が困難になったり、あるいは間違った測定結果を得ることがあるため、注意が必要となる。また、モルタル仕上げをしていない場合でもコ

ンクリート表面を平滑にし、ゴミなどを取り除くためにヤスリあるいは電動ブラシで表面を研磨する。

- (4) 測定点の設定は、上記(1),(2)での鉄筋位置調査結果を基に、図-3.17のように鉄筋上に設定する。特に、鉄筋が格子状に配置され、縦筋と横筋を区別したい場合、縦筋と横筋の交点を避け、各辺中央に測定点を設定する。

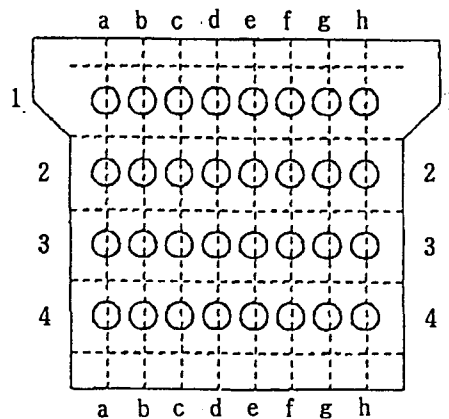


図-3.17 測定点のマーク例

- (5) 測定面において、鉄筋の露出している箇所がある場合、そこから作用極をとる。鉄筋が露出していない場合、適当な箇所のコンクリートに穴を開けて、鉄筋を露出させ、さらに、鉄筋接続部をヤスリで磨き、錆などを落とし、接触抵抗を十分小さくする必要がある。また、すべての鉄筋間に導通があるか否かを確認するため、作用極と異なる箇所の鉄筋を露出させ、テストを用いて鉄筋間の抵抗値を測定する。抵抗値が50程度以下であれば、導通があるものとする。
- (6) かぶりコンクリートを十分に湿潤状態にするため、測定面に水を散水器、噴霧器などで散布する。また、測定途中でコンクリート表面が乾燥する場合には、随時水を散布し湿潤状態を保つ。
- (7) センサの点検およびセンサがコンクリート表面と十分接触しているか否かを確認する。

4) 測定方法

はつり出した鉄筋から作用極をとり、測定点にセンサーを当て、測定を行う。必要に応じて、測定値の補正を行う。

[解説]

前述の測定の準備終了後、鉄筋腐食センサの作用極を図-3.18に示すように接続する。次に、測定点にセンサを当て、測定値を読みとる(コンピュータなどのメモリに記憶させる)。また、必要に応じて測定値の補正を行う。

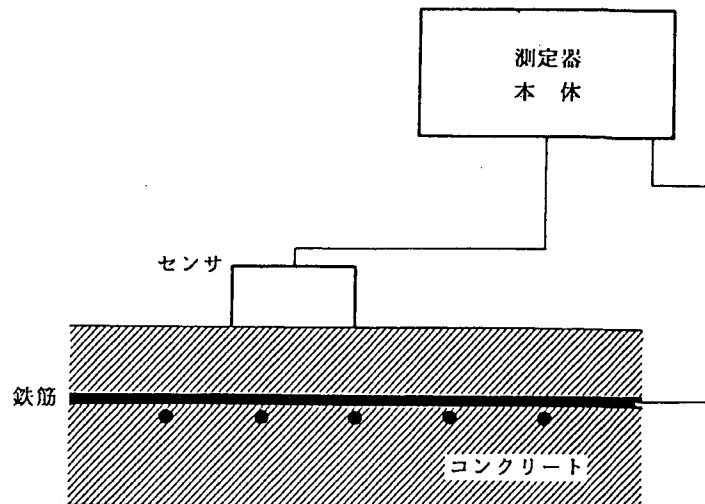
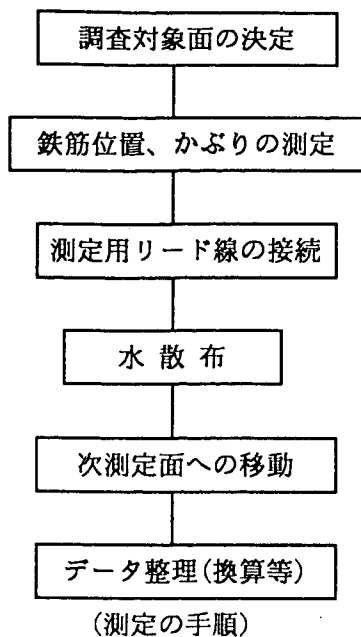


図-3.18 測定方法の概要

3.2.3 影響因子

分極抵抗の測定に際し、測定器および測定作業上に影響を及ぼす因子について、十分な検査、検定あるいは測定環境の調整などが必要である。

[解説]

測定値に影響を及ぼす主な因子を以下に示す。

- 1) 測定器に起因するもの：測定器(照合電極)の精度・安定性など
- 2) 測定者、測定方法に起因するもの：測定の前準備(散水)、鉄筋との接続状況、センサとコンクリートとの接触状況など
- 3) 構造物に起因するもの：含有塩化物量、かぶり、中性化、鉄筋間の電氣的接続状況など

分極抵抗測定時(測定前)に、できる限りの影響因子を取り除くこと、または影響因子を定量的に把握しておくことが望ましい。

特に、コンクリートの電氣的な抵抗は、かぶりコンクリートの品質(かぶり、含有塩化物量、含有水分量など)に影響され、その影響程度が著しく大きな場合には、分極抵抗がマスキングされ、正しい測定値を得られない。

影響程度の定量的な把握は、まだ十分に解明されていないものの、影響程度を極力小さくするため、測定時に測定箇所のかぶりコンクリートを十分湿潤にし、コンクリートの電氣的な抵抗を小さくすることが肝要となる。

3.2.4 4 鉄筋腐食(速度)の推定

分極抵抗から得られる腐食電流を用いて、コンクリート中の鉄筋腐食に関する情報を推定することができる。

[解説]

腐食電流(密度) I_{corr} は、電気化学的に次式で表される。

$$I_{corr} = K \cdot (1/R_p) \quad \text{..... (3.7)}$$

ここで、 K 値は換算係数で、金属の種類や金属がおかれる環境によって決まるものである。既往の研究^{1), 6), 7), 8)}では、 K 値として20~30mVが報告されており、分極抵抗 R_p が測定されれば式(3.7)から腐食電流 I_{corr} が求められる。

腐食電流は腐食の進行に伴い、図-3.19のように変化するものと推測され、調査時に得られた分極抵抗から、その時の腐食状況(腐食の有無)の推定が可能となる。分極抵抗と腐食の有無との関係についての既往の研究結果を表-3.6に示す。現状では、まだ十分に信頼性の高い指標とは言えないため、評価の信頼性を増すために、測定箇所を面的に捉え、測定値の相対的な評価を行うこと、腐食の可能性が高いと推定される箇所(分極抵抗の小さい箇所)を選定し、かぶりコンクリートをはつり、鉄筋腐食の有無を確認することが望ましい。

また、期間 $t_1 \sim t_2$ 間の腐食電流 I_{corr} の時間積分値(図-3.19中の斜線部)は、その期間の鉄筋の腐食減量と正の相関を有し、ファラデーの第2法則より、腐食減量は式(3.8)から、腐食速度は式(3.9)から求められる。分極抵抗と腐食面積・減量との関係について示されている既往の研究結果を図-3.20~24に示す。

$$\text{腐食減量 } W (\text{mg/cm}^2) = \frac{a}{c} * \int_{t_1}^{t_2} I_{corr} dt \quad \text{..... (3.8)}$$

$$\text{腐食速度 } \dot{W} (\text{mg/cm}^2/\text{s}) = \frac{1}{t_2 - t_1} a/c * \int_{t_1}^{t_2} I_{corr} dt \quad \text{..... (3.9)}$$

ここで、

I_{corr} ; 腐食電流 (A/cm^2)

W ; 腐食源流 (mg/cm^2)

$\dot{W}$; 腐食速度 ($\text{mg/cm}^2/\text{s}$)

a ; 鉄の1グラム当量 (27900mg)

c ; 1クーロン (96,500A*s)

上述のとおり、腐食電流は経時的に変化するもので、1つの測定結果は、その時の腐食状況評価の目安になるもので、信頼性を向上させるため、定期的な測定(少なくとも1回/年程度)を行うことが望ましい。特に、腐食進行の将来予測を行う場合、腐食電流の経時変化を把握することが必要不可欠な情報になるものと考えられる。

分極抵抗による腐食評価に関して、今後、実構造物におけるデータの蓄積も含めた一層の研究開発が望まれる。

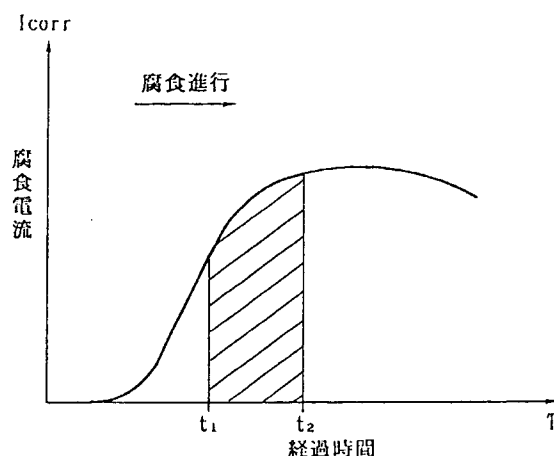


図-3.19 腐食電流の経時変化概念図

分極抵抗 R_p と鉄筋腐食の有無との関係

表-3.6 分極抵抗 R_p と鉄筋腐食の有無との関係
(単位: $k\Omega \cdot cm^2$)

研究例	腐食部	健全部
大城ら(フィールド) ⁹⁾	4.0未満	14.0以上
後藤ら(フィールド) ⁴⁾	10.0未満	25.0以上
本橋ら(室内) ¹⁰⁾	4.0未満	4.0以上
小林ら(室内) ¹¹⁾	10.0未満	30~50
メーカー(A社)	5.0未満	10.0以上

分極抵抗 R_p と腐食面積・減量との関係

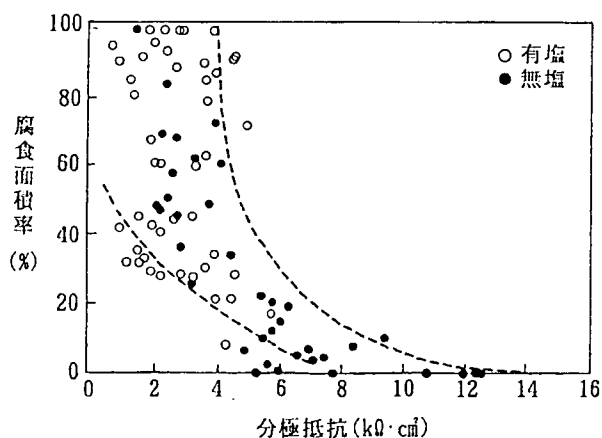


図-3.20 分極抵抗と腐食面積率との関係⁹⁾

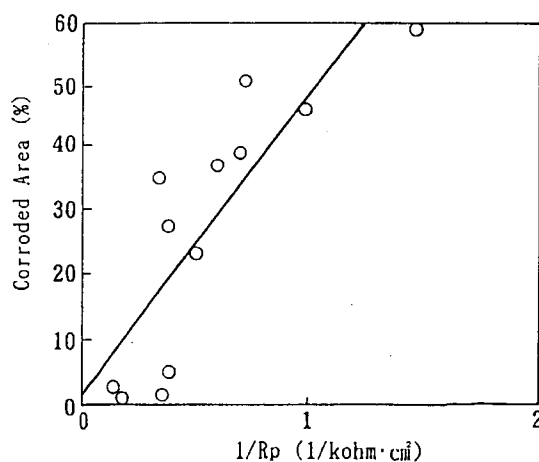


図-3.21 分極抵抗の逆数と腐食面積率との関係⁵⁾

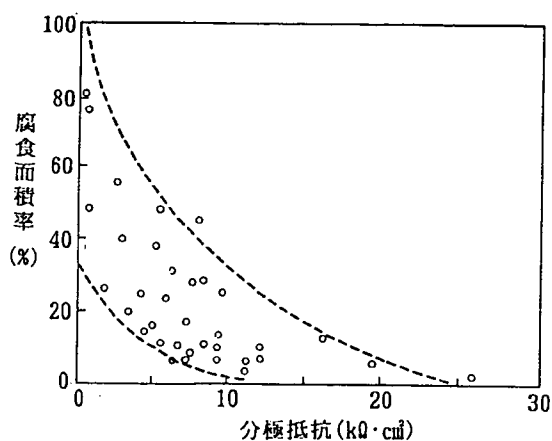


図-3.22 分極抵抗と腐食面積率との関係⁴⁾

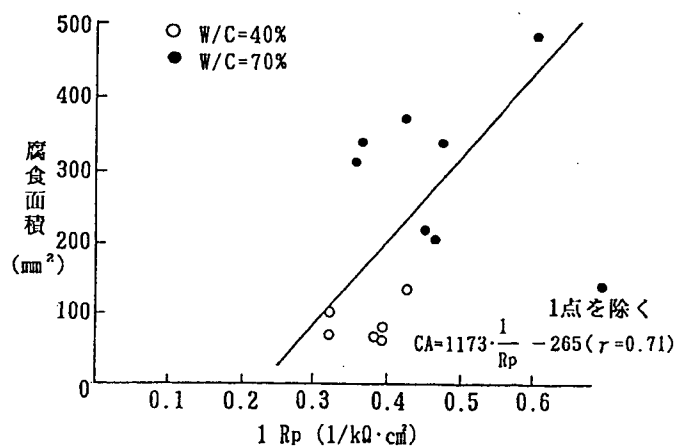


図-3.23 分極抵抗の逆数と腐食面積との関係¹⁰⁾

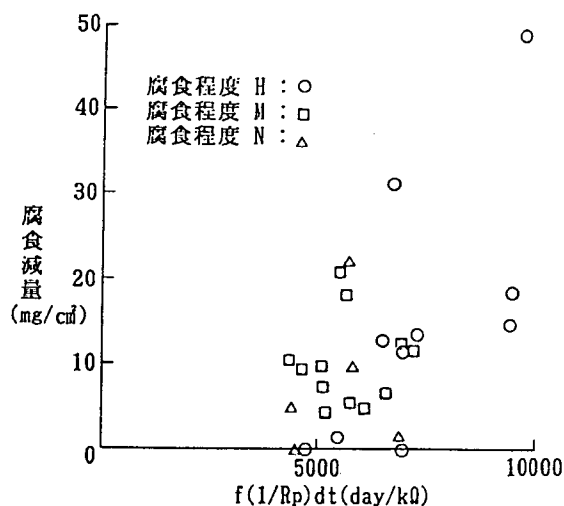


図-3.24 分極抵抗の逆数の時間積分値と腐食減量との関係¹²⁾

3.2.5 結果のまとめ方

報告には、以下の項目のうち必要なものを記録する。

- 1) 対象構造物、部材名
- 2) 測定年月日、測定者
- 3) 環境条件(天候、温度、湿度など)
- 4) 対象構造物のプロファイル(竣工年月日、コンクリート配合、配筋図など)
- 5) 測定箇所(コンクリート表面)のスケッチまたは写真
- 6) 使用した測定機器名
- 7) 分極抵抗値の等高線図
- 8) 影響因子(含有塩化物量、中性化深さ、かぶり厚さなど)
- 9) 腐食状況の評価
- 10) その他特記事項

〔解説〕

測定結果のまとめ方は、“3.1.5 測定結果のまとめ方”に準拠する。

特に、測定箇所を面的に把握し、各測定値を相対的評価することが望ましく、図-3.25に示すような分極抵抗の等高線図を作成する必要がある。

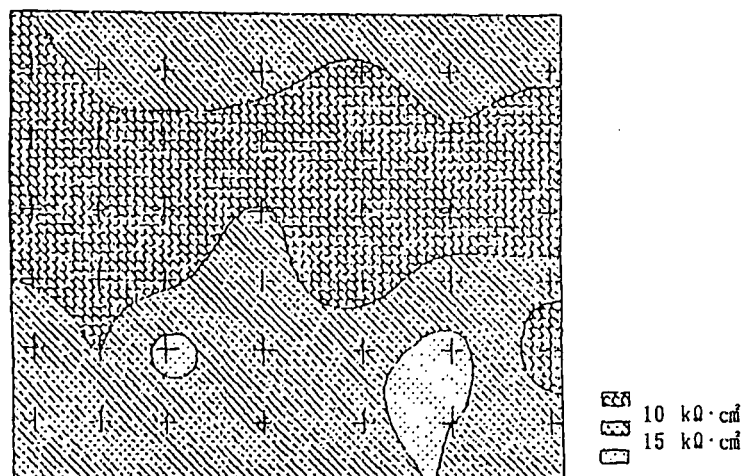


図-3.25 分極抵抗の等高線図例

〔参考文献〕

- 1) 水流 徹ら；腐食技術、Vol.28, No.12, 1979.
- 2) 後藤ら；塩害環境下におけるRC構造物の腐食評価法について、JCI、自然環境とコンクリートの性能に関するシンポジウム、1993.
- 3) 小林ら；コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3 鉄筋腐食の診断
- 4) 後藤ら；電位ステップ法を用いたコンクリート中鋼材の腐食モニタリングのフィールド適用性、JCI年講、1991.
- 5) 後藤ら；交流インピーダンス法による鉄筋腐食モニタリング法、土木学会年講 1990.
- 6) 横 田；電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価、JCI年講、1990.
- 7) 岡田ら；分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修規準について、JCI年講、1983.
- 8) Feliu, S et al; On-site Determination of the Polarization Resistance in a Reinforced Concrete Beam, Corrosion Engineering, Vol.44, No.10, 1988, pp.761-765.
- 9) 大城ら；コンクリート中の鉄筋の腐食評価法について、JCI年講、1991.
- 10) 本橋ら；非破壊検査法の鉄筋腐食モニタリングへの適用性に関する一実験、NSI、1992.
- 11) 小林ら；鋼材の腐食診断への分極抵抗法の適用、JCI、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム、1988.
- 12) 宮川ら；コンクリート中の鋼材腐食の非破壊測定法と劣化診断について、JCI、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム、1988.

付 録 3

[参考文献]

- 1) Stratful.R.F:The Corrosion of Steel in a Reinforced Concrete Bridge,Corrosion,Vol.13(1957)
- 2) Stern,M.& Geary,A.L.;J. Electrochemical Society,104 p56 (1957)
- 3) ASTM C876-80 Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (1980)
- 4) A.P.Crane:Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. P.204 (1983)
- 5) 岡田ら:コンクリート工学年論報 分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修規準について (1983)
- 6) 岸谷、西澤、他:コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(I)P.103-111 (1986.4)
- 7) ASTM C876-87 Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (1987)
- 8) S.Feliu et al; ON SITE DETERMINATION OF THE POLARIZATION RESISTANCE (1987)
- IN A REINFORCED CONCRETE BEAM, CORROSION 87, PAPER No.145
- 9) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集 JCI-C14 (1988.5)
 - [12] 自然電位測定によるコンクリート中の鉄筋の腐食診断 山本、井川、寺田、坂本、片脇
 - [13] 自然電位法によるコンクリート中の鉄筋腐食度の推定 福川、財津
 - [14] 自然電位法の非破壊的鉄筋腐食検査手法への実用化について 武若、小林
 - [15] コンクリート中鋼材腐食の非破壊測定手法と劣化診断について 宮川、井上、小林、藤井
 - [16] RC床版の自然電位法による鉄筋腐食検査と適用性に関する考察 橘、作田、前田、富沢、梶川
 - [17] コンクリート中の鉄筋腐食評価方法について 望月、山田、森川、加納、伊藤
 - [18] 鋼材の腐食診断への分極抵抗法の適用 小林、辻、星野
- 10) 建設省土木研究所 地質化学部化学研究所 (財)土木研究センター (1988.8)
 - 「コンクリート構造物の電気防食に関する共同研究報告書」 第14号
- 11) K.Hladky,D.G.John & J.L.Dawson;DEVELOPMENT IN RATE OF CORROSION MEASUREMENTS (1989.4)
 - FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES,CORROSION 89.PAPER No.169
- 12) 武若耕司:コンクリートの非破壊検査方法(原理と手法)-鋼材腐食- コンクリート工学 Vol.27,No.3 (1989)
- 13) 日本コンクリート工学協会:海洋コンクリート構造物の防食指針(案) -改定版- (1990)
- 14) 後藤 他2名:コンクリート工学年論報[1090]交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング (1990)
- 15) 横田:コンクリート工学年論報[1093]電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価 (1990)
- 16) 後藤、他:土木学会年講 交流インピーダンス法による鉄筋腐食モニタリング法 (1990)
- 17) British Standard 7361 : Part 1:Section 5. Reinforcing steel in concrete (1991)
- 18) 大成、他2名:コンクリート工学年論報[1084] コンクリート中の鉄筋の腐食評価法について (1991)
- 19) 後藤、他3名:コンクリート工学年論報[1087] 電位ステップ法を用いたコンクリート中鋼材の腐食 (1991)
 - モニタリングのフィード適用性
- 20) 笠井 浩 他2名:日本建築学会大会学術講演梗概集[1114] P.227-228 (1991.9)
- 21) 片岡国牟:自然電位法による最新非破壊診断技術の紹介 配管と装置 VOL.8 (1992)
- 22) 片岡、内堀:第39回腐食防食討論会講演集 腐食防食協会 B-111 P.175-178 (1992.10)

- 23) 本橋 他：非破壊検査法の鉄筋腐食モニタリングへの適用性に関する一実験 NSI (1992)
- 24) 笠井、和美、内堀、片岡：鉄筋腐食診断システムの開発と実構造物における測定技法 (1993.9)
の検討 日本建築学会大会学術講演梗概集[1118]p.235-236
- 25) KASAI,WAMI,UCHIBORI,KATAOKA:NEW CORROSION DIAGNOSIS SYSTEM AND (1993.10)
ITS APPLICABILITY TO EXISTING STRUCTURES,DBMC6 VOL.2 P.893-902
- 26) 後藤、他：塩害環境下におけるRC構造物の腐食評価法について JCI シンポジウム (1993)
- 27) 小林豊治、米沢敏男、出頭圭三著、小林一輔編集：鉄筋腐食の診断、森北出版 (1993)

4. ま と め

本編では、鉄筋の腐食程度を非破壊的に推定する手法として、自然電位法と分極抵抗法の2つについて、腐食の原理や解説を交えつつ、標準的な測定方法などを示した。

自然電位法は、その目的が測定実施時点でのコンクリート中の鋼材の腐食程度の評価に力点が置かれているのに対し、分極抵抗法は測定実施時点での鋼材の腐食速度評価に力点が置かれていて、両測定法の目的は若干異なっている。

従って、実コンクリート構造物への適用に当たっては、両者の特徴・実績などを考慮した上で、測定方法の選択を行うのが良い。これらの測定結果から、鉄筋の腐食を推定する際には、推定結果にどの程度の信頼性を要求するかによって測定後の対応を考える必要がある。

例えば、鉄筋腐食の推定結果に高い精度を要求する場合には、一部のかぶりコンクリートをはつり落とし、鉄筋腐食程度の目視観察による確認を併用することが望ましい。

また、測定実施後一定期間を経た後に再測定を実施し、これらのデータの比較検討を行うことにより、得られた自然電位や分極抵抗の値の信頼性などが判断できる上、鉄筋の腐食状況の時間的推移についても推定が可能となる。

ここでは、標準的な測定方法を記述しているので、その内容を十分理解した上で、適切な測定が行われることを望むものである。

第3部 鉄筋位置の非破壊検査方法

執筆者

小林茂広

高山仁志

宅間善三郎

山口勝

山中勘詞郎

渡辺博志



目 次

	頁
1. 序 論	57
2. 鉄筋位置推定のための非破壊計測法	58
2.1 鉄筋位置計測に関する研究の概要	58
2.2 留意事項	62
3. 電磁誘導法と電磁波反射法	63
3.1 電磁誘導法	63
3.1.1 総 則	63
3.1.2 測定方法	63
3.1.3 鉄筋位置およびかぶり測定上の影響因子	65
3.2 電磁波反射法	66
3.2.1 総 則	66
3.2.2 測定方法	68
3.2.3 鉄筋位置およびかぶり測定上の影響因子	69
4. ま と め	70



1. 序 論

鉄筋コンクリート構造物の劣化状況を見ると、塩害や凍害といった環境条件に起因するものや、アルカリ骨材反応等の材料条件に起因するものの他に、かぶり不足に起因すると推定される劣化も存在する。一般に、鉄筋コンクリート構造物の設計では、構造物に必要とされる耐久性を確保するために、構造細目として最小かぶりが規定されている。施工に際しては鉄筋組立時にスペーサを用いて、設定されたかぶりが満足されるよう注意が払われているが、コンクリート打ち込み時の鉄筋の移動や、型枠立ち上げの精度などの問題から、かぶりが不足する場合が皆無であるとはいえない。

鉄筋腐食の原因となる中性化や、塩化物イオンの浸透はコンクリート表面から進行するものであるので、かぶりの不足はコンクリート構造物の劣化速度に密接に関連するものであり、かぶりの計測によりコンクリート構造物の健全度の診断や構造物の将来の耐久性予測を行う上で、非常に重要な情報を得ることができる。

コンクリート構造物の健全度を診断するために、近年鉄筋腐食程度やひび割れ深さの測定が行われるようになってきた。これらの測定を良好な精度で実施するためには、測定に先立って、鉄筋の位置・かぶりなどの配筋状態を知っておく必要がある。すなわち、鉄筋位置の測定は、これらの非破壊検査の予備試験としての要素も持っている。

このように、鉄筋位置・かぶりの測定は、非破壊検査を利用したコンクリート構造物の健全度の診断には欠かすことのできない重要なものであり、これまでも各方面で技術開発が行われ、市販機器も数多く現れるようになった。

ここでは、これらのうち比較的使用頻度が高く、簡易な機器構成で計測可能な、電磁誘導法と電磁波反射法を取り上げ、計測に際しての留意事項について記述した。測定の目的は、鉄筋位置を推定することにより、他の非破壊検査のための予備情報を得ることと、かぶり不足による早期劣化の可能性を判断することの2つを想定している。計測対象は橋梁上部工などのコンクリート構造物であるが、計測原理から考えると必ずしもこれに限定されるものではないと考えられる。

2. 鉄筋位置推定のための非破壊計測法

2.1 鉄筋位置計測に関する研究の概要

鉄筋位置の探査手法は、大きく分けて電磁誘導法、放射線透過法、電磁波反射法および超音波法がある。

電磁誘導法は、コイルが巻かれたプローブに一次交流電流を流して交流磁場を発生させ、その磁場中に鉄筋が存在した場合に生じる二次電流から、発生した電圧の変化を把握し、コンクリート中の鉄筋の位置、かぶり、径を評価するものである。放射線透過法は、医療分野で使われる、いわゆるX線法と同様のものであり、コンクリート構造物に放射線を透過させ、鉄筋により生じる影を解読する方法である。電磁波反射法は、レーダー法と称されるもので、放射した電磁波が、電氣的に性質の異なる物質境界の存在により反射される現象を活用した測定手法である。また、超音波法は、コンクリート中を伝播する音波が、鉄筋などの異物の境界面で反射あるいは回折する性質を利用したもので、送信探触子からコンクリート中に伝播した超音波の反射音を受信探触子で検出し、その間の所要時間を用いて距離を算出し、鉄筋位置を計測する。

この4方法の技術的・経済的な評価を表-2.1に示す。

表-2.1 鉄筋位置計測手法の評価

測定手法	精 度	使い易さ	実 績	経 済 性	そ の 他
電 磁 誘 導 法	○	◎	◎	◎	—
放射線透過法	○	△	○	△	要資格
電磁波反射法	○	◎	◎	◎	—
超 音 波 法	△	◎	○	◎	—

◎：優れている、○：普通、△：劣る

この4方法のうち、放射線透過法は実際の使用にあたっては法的な規制等の特殊性があるのでここでは触れないこととし、また、超音波法も精度面でやや問題があるので除外し、電磁誘導法および電磁波反射法について、以下に説明する。

1) 電磁誘導法

電磁誘導法による鉄筋探査装置は、磁場を形成し、その影響度を求めるためのプローブと、磁場の変化により発生した電圧を測定するための測定計器により構成される。

測定原理

電磁誘導法の原理を図-2.1に、フローを図-2.2に示す。

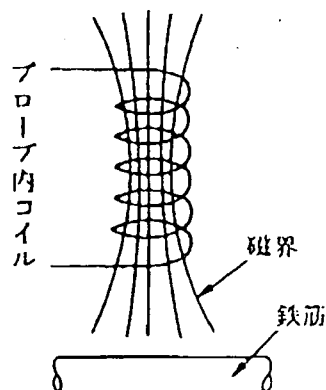


図-2.1 電磁誘導法の原理
(魚本他、コンクリート構造物の
非破壊検査、P.104、森北出版)

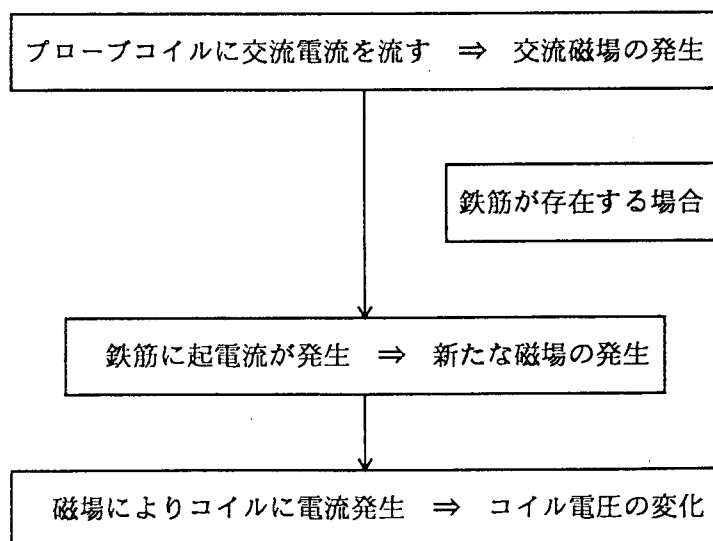


図-2.2 電磁誘導法の測定フロー

このコイル電圧の変化は、鉄筋の径・寸法やコンクリート表面からの距離により変化するため、この関係を活用して、鉄筋のかぶり、位置あるいは鉄筋径等を評価している。

なお、発生する電圧の変化には、鉄筋径とかぶりが影響するため、鉄筋径の推定にあたっては、図-2.3に示したように、鉄筋との距離をスペーサー等を用いて人為的に変化させて求める手法も考案されている。

鉄筋径の推定

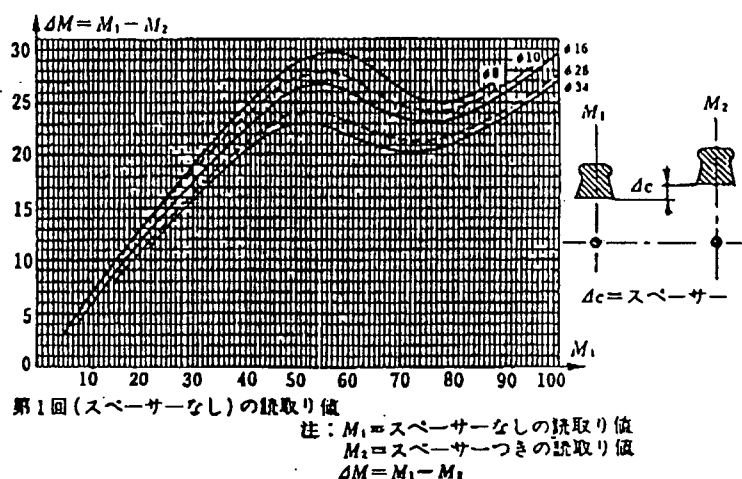


図-2.3 鉄筋径測定例
(魚本他、コンクリート構造物の
非破壊検査、P.107、森北出版)

2) 電磁波反射法(レーダー法)

この手法は、元々は地中埋設物や地盤下の空洞探査を目的として、装置の開発および実用化が進められたものである。

コンクリート構造物へ適用されはじめてから日が浅いが、鉄筋探査あるいは豆板、ジャンカなどの欠陥部の把握に利用されている。

測定原理

電磁波反射法では、図-2.4に示したように、アンテナからコンクリート表面に向けて放射された電磁波が、コンクリート内部に進行し、コンクリート中に存在する電気的な性質の異なる鉄筋、空洞などの境界面などにより反射され、受信アンテナでキャッチされる。電磁波が放射されてから、対象物で反射されて再びアンテナで受信されるまでの時間と電磁波の速度から、鉄筋あるいは欠陥部までの距離を求める方法である。

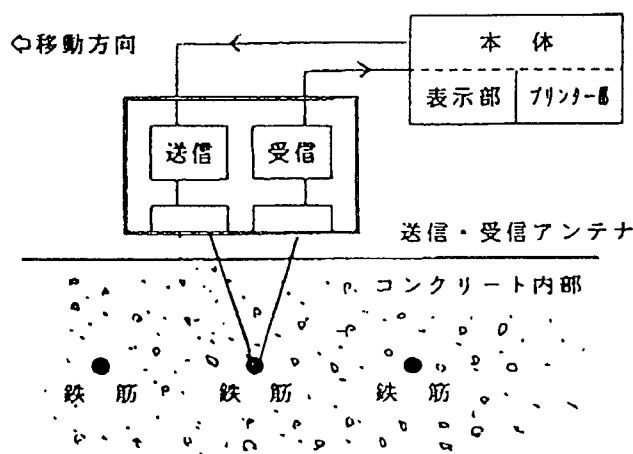


図-2.4 測定原理図

コンクリート中での電磁波の伝播速度 V は、次式で表される。

$$V = C / \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.1) \text{ 式}$$

C : 真空中(空気中)での電磁波の速度($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

ϵ_r : コンクリートの比誘電率(おおむね6~10程度)

対象物との境界面までの距離Dは、発信時刻から反射波の受信時刻までの時間差Tより、次式で算出する。

$$D = VT/2 \quad \text{..... (2.2) 式}$$

対象物との境界面までの距離Dを算出する基となる電磁波の速度は、(2.1)式に示したように、コンクリートの比誘電率の影響を大きく受ける。比誘電率の大小は、コンクリートの組成等の影響があるが、含水率の影響がきわめて大きい。精度を向上させるためには、この補正が重要なポイントである。反射波形の模式図を図-2.5に示す。

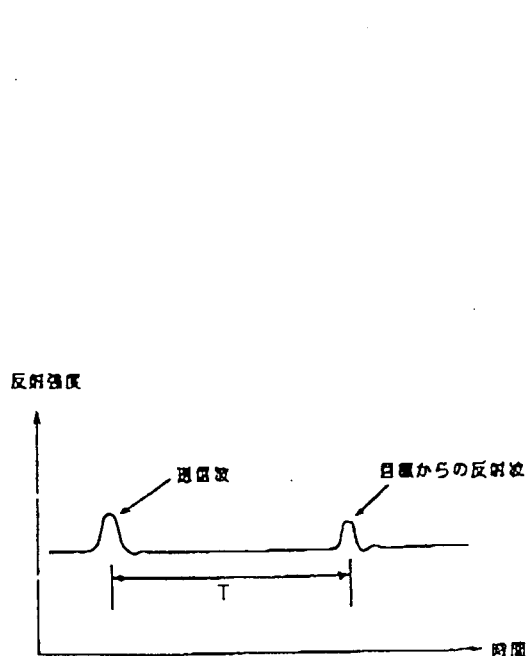


図-2.5 反射波形の模式図

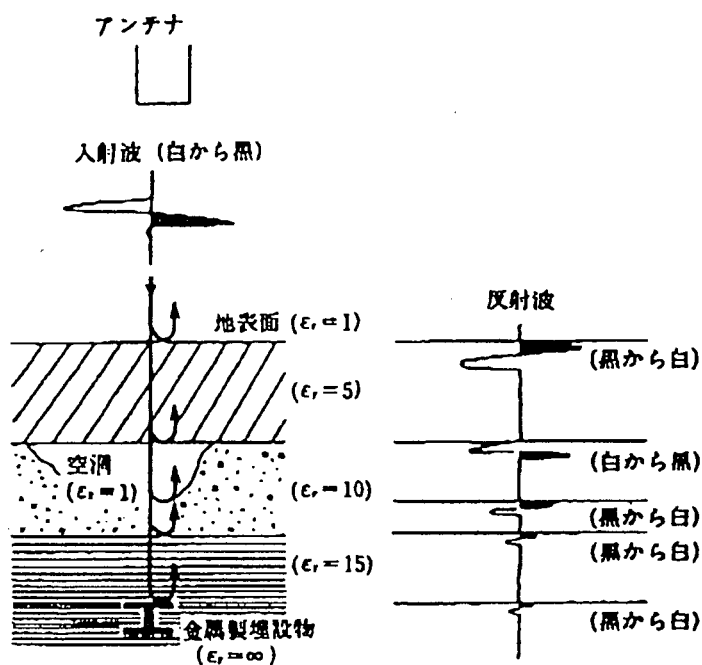


図-2.6 反射した電磁波の波形
(江川等、電力土木誌、No.203 1986)

また、対象物の材質などは、図-2.6に示したように、反射波の波形を観察することにより判断することができる。

- 反射波の特徴.....
- ①比誘電率の小さな物質から大きな物質へ電磁波が入射する場合には、反射波の位相は反転する。
(空洞からコンクリート、コンクリートから鋼材、など)
 - ②比誘電率の大きな物質から小さな物質へ電磁波が入射する場合には、反射波の位相は反転しない。
(コンクリートから空洞、など)

2.2 留意事項

実鉄筋コンクリート構造物へ電磁誘導法・電磁波反射法を用いて鉄筋位置を探索することは、これまでしばしば行われてきており、実績も上がってきているが、なおもいくつかの問題点がある。以下に、それらの問題点を列記する。

1) 電磁誘導法

- ① コンクリート中に、金属のような磁性体が存在すると正確な計測が不可能である。細骨材中に砂鉄などが含まれている場合に問題となることがある。
- ② 鉄筋が隣接していると、磁場の形成が相互に影響されるため、両鉄筋を分離して評価することが難しい。
- ③ 鉄筋径およびかぶりをパラメータとしているため、どちらか一方が既知でなければ、判断ができない。この問題点を克服するために、半値幅を用いる方法や、位相を検出することにより鉄筋径とかぶりを同時に求める方法が検討されている。
- ④ 測定者の判断に委ねられた部分がかなりあり、個人差が生じやすい。特に、かぶりの評価が難しい。

2) 電磁波反射法

- ① 対象物との境界面までの距離を算出する基となる電磁波の速度は、コンクリートの比誘電率の影響を大きく受ける。比誘電率に対しては、含水率の影響がきわめて大きく、精度を上げるためには比誘電率の補正を行う必要がある。
- ② 反射波の観察において、測定者の判断に委ねられた部分かなりあり、個人差が生じやすい。
- ③ 鉄筋配置が密な場合は、電磁波が鉄筋の表面で反射されるため、より深い位置の状況を把握するのが困難である。装置にもよるが、鉄筋ピッチが100mm以下となると分解能(解像度)が低下する。
- ④ 現時点では、測定しうる深さには制約があり、20cm程度までである。

上記のように、両方法ともいくつかの問題点を有しており、精度を上げるためには、はつりによる確認を行うことが望ましい。

3. 電磁誘導法と電磁波反射法

3.1 電磁誘導法

3.1.1 総 則

1) 目 的

電磁誘導法はコンクリート中の鉄筋位置およびかぶりを計測するために適用される。

〔解説〕

電磁誘導法はコンクリート中に存在する鉄筋によりプローブコイルに誘導される電圧を利用して鉄筋の位置やかぶりを計測するものである。鉄筋の径は一部の機器を除いては（（財）国土開発技術センターの技術審査を受けた機器）比較的困難であるので、ここでは対象に含めなかった。ただし半幅値を用いる方法やコイルに誘導された三次的電流の位相を検出することにより、鉄筋径も合わせて計測できるシステムも開発されているので、鉄筋径の推定の必要がある場合は参照されたい。

2) 適用範囲

この方法は、一般的にかぶりが200mm以内で、鉄筋径が6mm以上、隣接する鉄筋の中心間隔が100mm程度で配置された鉄筋の検出に用いることが望ましい。

〔解説〕

電磁誘導法はプローブ等コイルから距離が遠くなるほど、磁性体である鉄筋に流れる電流は小さなものとなり、又その鉄筋に生じる起電流も小さなものとなるため、有為な差として判別することが困難となる。又鉄筋のかぶりより鉄筋間隔が小さい場合には、その鉄筋の影響を排除することができないため特にかぶりが10cmを超える場合隣接鉄筋間隔も配慮して行うことが望ましい。

3.1.2 測定方法

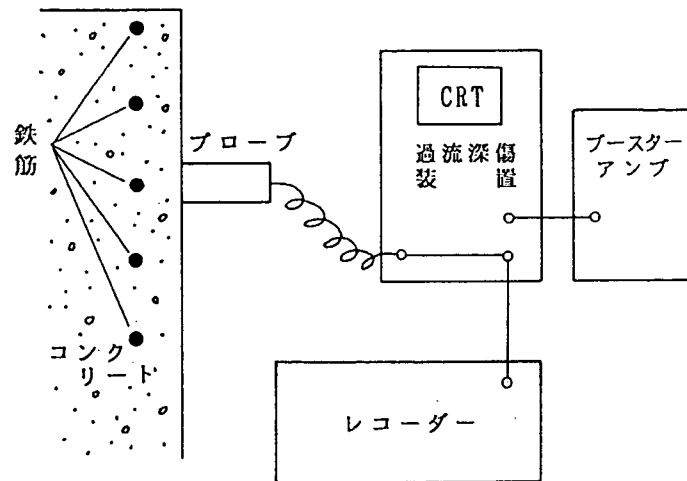
1) 計測機器

計測機は、基本的に磁場をつくりだし、その影響を求めるプローブ（コイル等が配置されている）と、誘導された電圧を検出する計器からなっている。

使用プローブについては、かぶりが浅い場合、深い場合の使い分けを行う。

〔解説〕

計測機器の簡単な構成を示す。



2) 測定対象並びに測定箇所

測定対象は、一般の鉄筋コンクリート構造物で最も外側に位置する(コンクリート表面に近い)鉄筋とする。

〔解説〕

この方法により検出できる鉄筋は、鉄筋間隔が広い場合を除いて、一般的には最も外側に位置する鉄筋であり、多段配置された内側の鉄筋の検出は困難である。

3) 測定準備

使用機器の選択により、取り扱い要領、機器特性が異なる場合があるので、使用前に取り扱い要領書等で確認のこと。

かぶりが浅い場合浅筋用、深い場合は深筋用による使用プローブの選択を行う。

〔解説〕

- ・鉄筋コンクリート構造物の配筋状況は、桁等の梁部材、床版、橋脚等の柱部それぞれについて、概ね一定の傾向がある。従って、鉄筋探査において、設計図等を参考にすると同時にこの特性を熟知の上行うことが、望ましい。
- ・なお、高精度の測定を実施したい場合には、検出された鉄筋の代表箇所について、かぶりコンクリートを研る等して、推定値と実測値の照合を行ない、機器計測について信頼性を確認することが望ましい。
- ・使用環境、例えば雨の日や多湿で使用する場合、高温雰囲気中使用する場合、計測器の故障等の原因となるので、留意すること。

4) 鉄筋位置およびかぶりの推定方法

鉄筋位置は、プローブコイルに誘導された電圧がピークになった位置の直下にあると判断する。かぶりは、出力電圧とかぶりの検出曲線をもとに推定する。

〔解説〕

- ・ 出力電圧とかぶりの検定曲線からかぶりを推定する場合、鉄筋径が既知である必要がある。鉄筋径については既存の設計図書等を参考にするが、図面等が存在しない場合、過去の計測データ等を参考として推定する。
- ・ かぶりについて高精度が要求される場合、代表箇所を所る等して実測を行ない推定値との照合を行うことが望ましい。

3.1.3 鉄筋位置およびかぶり測定上の影響因子

測定されたプローブコイルの出力電圧は使用環境等で影響を受ける場合があるので、できる限りこれらの要因が推定結果の誤差に結びつかないよう機器の調整等を行っておくことが望ましい。

〔解説〕

一般に出力電圧は次の影響を受けるものと考えられる。

- ・ 測定器は高感度のため、プローブ温度変化の影響を受けることがあるので、特に細径鉄筋の場合 0 点調整はその都度行うことが望ましい。
- ・ プローブは、急激に動かすと地磁気の影響をうけることがあるので、ゆっくりとスムーズに動かすこと。
- ・ 強力な磁界や誘導のある場合、誤差の原因または使用困難な場合もあるので留意すること。
(例えば、発・変電所、電車の線路上等)
- ・ 下記の場合逆反応を示すことがあるので留意が必要
高炉セメントを使用したもの、金属酸化物を含む骨材を使用したもの、コンクリート表面に鉄又は酸化物を含んだもの等コンクリート中に鉄分を含んだものが存在する場合。
- ・ 水中での使用は防水タイプを使用すること。

3.2 電磁波反射法(レーダー法)

3.2.1 総 則

1) 目 的

電磁波反射法(レーダー法)はコンクリート中の鉄筋位置およびかぶりを推定するために適用される。

〔解説〕

電磁波反射法(レーダー法)は、電磁波をアンテナからコンクリートに向けて放射し、その電磁波がコンクリートと電氣的性質の異なる物質、例えば鉄筋・空洞等の反射物体との境界面で反射され、再びコンクリート表面に出て表面近くに置いた受信アンテナに到達するまでの時間から、反射物体までの距離を計測するものである。

2) 適用範囲

この方法は、一般的にかぶりが200mm以内で、鉄筋径が6mm以上、隣接する鉄筋の中心間隔が100mm程度で配置された鉄筋の検出に用いることが望ましい。

〔解説〕

コンクリートの測定対象物(鉄筋)から反射パルスが十分受信出来ることが必要であり、コンクリートの質がほぼ均一であることが望ましい。

測定結果は、コンクリート内の垂直断面の形でモニター画面及びデータ記憶などアンテナを移動させながら測定出来、又後での再生表示機能により、再生可能である。

3) 測定準備

AC電源を用いる場合は電源切替えスイッチをAC側に、またバッテリー電源を用いる場合はDCスイッチに切替える。

本体表示器とアンテナをケーブルで接続する。

表示能力を浅筋用か深筋用に切替える。

〔解説〕

- ・ 携帯用計測器であり、AC電源または専用バッテリーでの使用が可能。
- ・ 信号ケーブルがねじられたりすると断線、性能低下の原因になるのでねじ等ないように注意する。
- ・ コンクリートの表面から深い部分を強調したい時は“浅”“深”切替えにより調整を行う。

4) 鉄筋位置およびかぶり厚の推定方法

電磁波をコンクリート表面から内部に向けて放射し、その電磁波がコンクリートと電気的性質の異なる鉄筋や空洞で反射され、再び受信アンテナに到達するまでの時間から鉄筋までの距離を知ることができる。コンクリート中の比誘電率を ϵ_r とすると、空気中の電磁波の速度が $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ であるのでコンクリート中における電磁波の速度は

$$V = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m/s})$$

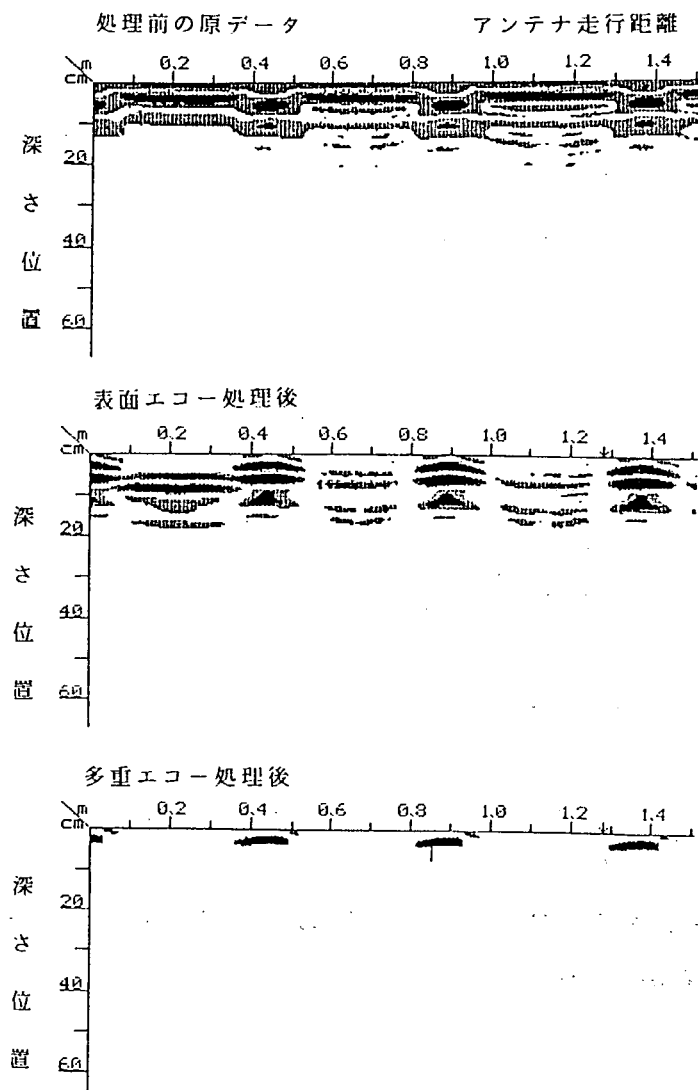
鉄筋までの距離 D は、送信時刻から反射波の受信時刻までの時間差 T から下式で求める。

$$D = 1/2 VT (\text{m})$$

〔解説〕

- ・電磁波反射法(レーダー法)では、エコー波が発生するので、エコー波処理を適切に行った後で推定することが望ましい。

画像処理の例



3.2.2 測定方法

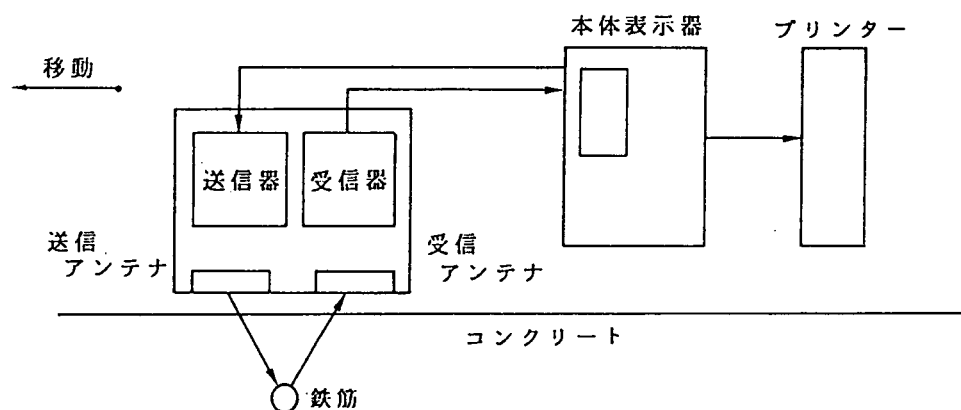
1) 計測機器

計測機器は本体表示器と計測アンテナ及びプリンタ部分から構成される。

〔解説〕

- ・送信アンテナから電磁波を放射し受信アンテナで反射波を検出する。（送信アンテナと受信アンテナは一体化している。）
- ・本体表示器は反射波形（Aモード）と画像解析された垂直断面図（Bモード）の切替えができる。
- ・本体表示器で表示されるデータは接続のプリンターで印刷することができる。

電磁波計測の機器構成例



2) 測定対象並びに測定箇所

測定対象は一般の鉄筋コンクリート構造物で最も外側に位置する（コンクリート表面に近い側）鉄筋とする。

〔解説〕

- ・コンクリートの測定対象物から反射パルスが十分受信できることが必要であり、コンクリートの質がほぼ均一であることが望ましい。
- ・測定は最も外側に位置する（コンクリート表面に近い）鉄筋であり、多段配置の場合の内側の検出、異物の内側の検出は困難である。

3.2.3 鉄筋位置およびかぶり測定上の影響因子

コンクリート中の測定対象物からの反射パルスが十分に受信できることが必要であり、コンクリート性状の影響を受け易いので、できるだけこれらの要因が測定結果の誤差に結びつかないように配慮することが望ましい。

〔解説〕

- ・対象物とコンクリート面までの距離を算出する基となる電磁波の速度は、コンクリートの比誘電率の影響を受易い。比誘電率に対しては、含水率の影響がきわめて大きく、精度を上げるためには比誘電率の補正を行う必要がある。ただし、コンクリート断面における含水率を把握することは困難なため、部分的に斫り法により確認調査により推定結果との照合を行うことが望ましい。
- ・橋梁の梁下端等、密に配筋された主筋あるいはSRC造における鉄筋部材の影響を受ける配力筋などの計測において、水平ピッチの分解能不足のため鉄筋本数の選別が難しい場合がある。
- ・コンクリート中に送信する電磁波はアンテナの中央部から発進されるので、幅の狭い部材(梁、橋脚等)の端部(約10cm程度)の計測には、端部補助治具などを用いる工夫が必要。

4. ま と め

鉄筋位置の非破壊探査は、これまでも比較的実績が多く、その測定精度も概ね明らかにされてきている。ここで示した試験方法に共通する問題点としては、測定対象となる鉄筋が外側（いわゆるコンクリート表面に近い）の鉄筋のみであり、多段配置された内側の鉄筋に対する情報を得ることが難しいことである。ここでは、かぶりの不足による鉄筋の腐食性を調査することを第1の目的としたので、外側の鉄筋のみが測定対象となっても余り問題はないと考えられる。

しかし、鉄筋の探査にはこれ以外の利用目的、例えば竣工が古く設計図書が現存していない鉄筋コンクリート構造物の配筋図の復元、あるいは、構造物からコンクリートのコアを採取する際の鉄筋・ケーブルの切断の回避等に用いられる場合も非常に多いと考えられる。この場合には、外側の鉄筋だけではなく、内側の鉄筋も正確に位置を計れるものでなければならない。

正確を期すためには、現時点では電磁誘導法・電磁波反射法に加え、X線撮影やコンクリートのはつりにより鉄筋を露出させ、鉄筋位置を実測で確認する方法を併用することが望ましいと考えられる。今後いっそうの研究開発により、測定精度の向上のみならず、鉄筋間隔が非常に密な場合の測定方法の開発や内側鉄筋の測定法の開発が行われることを期待するものである。

第4部 ひび割れ深さの非破壊検査方法

執筆者

伊	藤	祐	二
内	田		明
小	林	茂	広
込	山	貴	仁
長	尾		晃
野	永	健	二
丸	屋		剛
水	嶋	茂	幸
山	口	哲	夫
山	中	勘	詞郎
渡	辺	博	志



目 次

	頁
1. 序 論	75
2. ひびわれ深さ推定のための非破壊測定法	77
2.1 ひびわれ深さに関連する研究の概要	77
2.2 ひびわれ深さ推定上の留意事項	80
3. 各種測定法	83
3.1 伝播時間による測定方法	83
3.1.1 総 則	83
3.1.2 測定方法	84
3.1.3 影響因子	85
3.1.4 ひびわれ深さの推定	87
3.1.5 結果のまとめ方	87
3.2 直角回折波法による測定方法	88
3.2.1 総 則	88
3.2.2 測定方法	89
3.2.3 影響因子	90
3.2.4 ひびわれ深さの推定	91
3.2.5 結果のまとめ方	91
4. ま と め	93

1. 序 論

コンクリート構造物に何らかの劣化現象が生じ始めると、その劣化要因に応じて、構造物にさまざまな変状がみられるようになる。コンクリートに発生するひび割れはその中でも最も一般的なもののひとつである。ひび割れは、コンクリートに発生している応力状態（分布）、変形状態を反映しているため、その発生パターンを調査することにより構造物の劣化原因を探る手がかりを得ることがでる。

ひび割れの発生が構造物に与える問題点としては、水密性を要求される構造物を除くと、一般的には、ひび割れの発生により外部からの塩分や炭酸ガスの供給経路ができ、これによりコンクリート中の鋼材の腐食が生じるところにある。ひび割れ幅が大きいほど、塩分や炭酸ガスの侵入経路が広まるので、鋼材の腐食の可能性も増大することになる。従って、ひび割れ幅を測定することにより、鉄筋コンクリート構造物の劣化状態や将来にわたっての劣化の可能性の目安を得ることが可能である。

このように、ひび割れの調査は構造物の劣化要因と、構造物の劣化程度の判断を下すために、主としてひび割れパターンとひび割れ幅について行われるのが一般的である。

ここで、ひび割れ深さの調査を上記のひび割れ幅ならびにひび割れ発生パターンの調査に含めることができれば、ひび割れがかぶりコンクリートを貫通し、鋼材位置を越えるところまで進展しているのか、あるいは非常に浅いひび割れであり、鋼材腐食につながらないものなのか、判定することが可能となり、一層重要な情報が得られるようになる。

コンクリートに発生したひび割れの深さの測定は、これまで超音波を利用した手法について技術開発がすすみ、計測機器も市販され容易に入手可能であることから、計測の実施そのものは必ずしも困難なことではない。しかし、測定方法が十分確立されているとは言えず、計測を実施する技術者にある程度の経験や知識が要求されるといった面もある。すなわち、計測原理、計測にあたっての留意点、誤差要因、適用した計測方法の適用範囲など熟知せずに計測を実施した場合、適切な測定結果が得られない場合がある。また、適切でない計測結果が得られても、適用可能範囲にはない条件の下で適用したために誤差が生じたものか、計測方法に初歩的なミスがあったため誤差が生じたものなのか判断を下すことができない場合も生じうる。

このような考えから、ここではコンクリート構造物に発生したひび割れの深さの計測を実施に当たっての参考となるよう、適切な計測法、誤差要因等について、これまでの計測実績やここで新たに実施した試験結果に基づいてとりまとめたものである。なお、超音波を利用してひび割れ深さを推定する計測結果は、現在数種類のものが市場に流通し、入手可能である。これらの計測機器は、詳細にはそれぞれ特性あるいは特徴が異なっている。ここでは極力多くの計測機器に共通する項目を述べたが、一部には機種により本報告書の記述内容が当てはまらない場合もあるので、実際にひび割れ深さの測定を行う場合は、用いる機種の特性を十分熟知しておく必要がある。

ここに収録した計測方法は、現場への適用実績や、計測方法の一般性などを考慮し、伝播時間に基づく方法と、直角回折波を利用した方法の2通りのものとした。

適用構造物は、橋梁上部工他の鉄筋コンクリート構造物であるが、計測方法により、適用可能範囲が異なると考えられるので、詳細については該当する項を参照して頂きたい。

なお、本文の記述に当たり本委員会で検討を重ねた結果、満足な結論が得られなかった問題として、ひび割れ先端の定義の明確化がある。実構造物で、ひび割れが生じた後長時間が経過したものは、雨水の浸透などによりひび割れ先端付近に遊離石灰などが析出し、これが部分的に再度付着し、いわゆるひび割れの目詰まりが起こる可能性がある。また、このような目詰まりが起こらなくとも、ひび割れ先端部分のひび割れ幅の非常にせまい部分では、ひび割れ間の空気層が薄く、超音波（P波）が透過し、測定原理からはひび割れであるとは見なせないことになる。この様な場合、ひび割れのどの部分をひび割れの先端とするのが妥当であるか、その判断が非常に難しい。この問題点については、今後の調査研究により明確にされるものと考えられる。

ここでは、超音波が直接伝播せず、迂回して伝播するのに十分な間隔が確保されているところまでをひび割れ先端と見なした。実験ではひび割れの先端が明確になるよう、人工ひび割れを導入した供試体で測定を行った。

2. ひび割れ深さ推定のための非破壊測定法

2.1 ひび割れ深さに関連する研究の概要

ひび割れ深さの推定のための非破壊測定法としては、大きく分けて超音波伝播速度法、衝撃弾性波法などがある。

実用レベルに達しているか、あるいは近いものとしては、超音波伝播速度法に属する各種測定方法があり、BS法のように既に英国規格として標準化されている手法もある。

実用化されているひび割れ深さの測定方法を、図-2.1に示す。

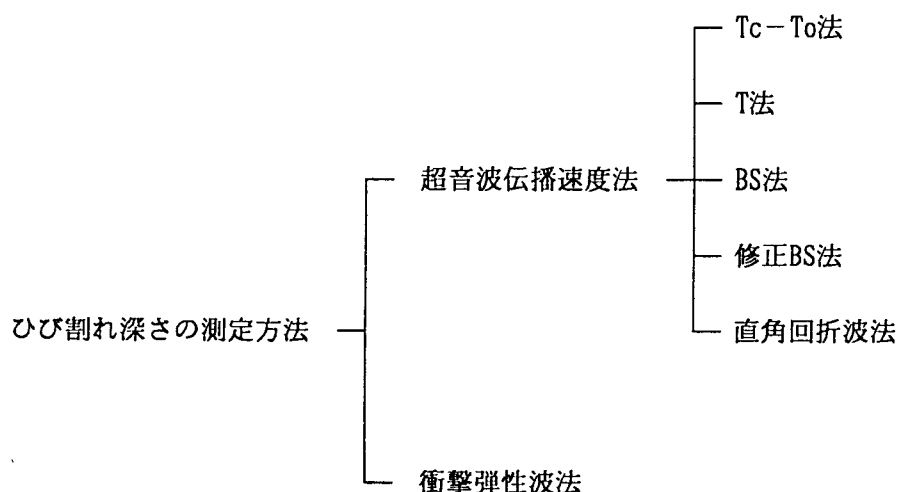


図-2.1 ひび割れ深さの測定方法

図-2.1に示した各測定方法について、その概略を以下に述べる。

1) Tc-To法

Tc-To法の特徴は、測定対象であるコンクリート部材において、ひび割れ部と健全部について測定を行い、両者のデータ比較によりひび割れ深さを算出することである。

本法では、ひび割れ部分を中心として、送信探触子と受信探触子を図-2.2に示すように等間隔で設置する。送信探触子(T)から出た縦波超音波が、図中の点線のようにコンクリート中を進み、ひび割れ先端部を経由して受信探触子(R)に到達するまでの時間Tcを求める。比較用として、同一のコンクリート部材でひび割れの無い部分を対象に、同様の送信探触子と受信探触子との距離Lを超音波が伝播する時間Toを求め、式(2.1)で、ひび割れ深さdを評価する方法である。

また、コンクリート中での超音波の伝播速度(Vc)が明らかである場合、式(2.2)によりひび割れ深さdを評価する方法もある。

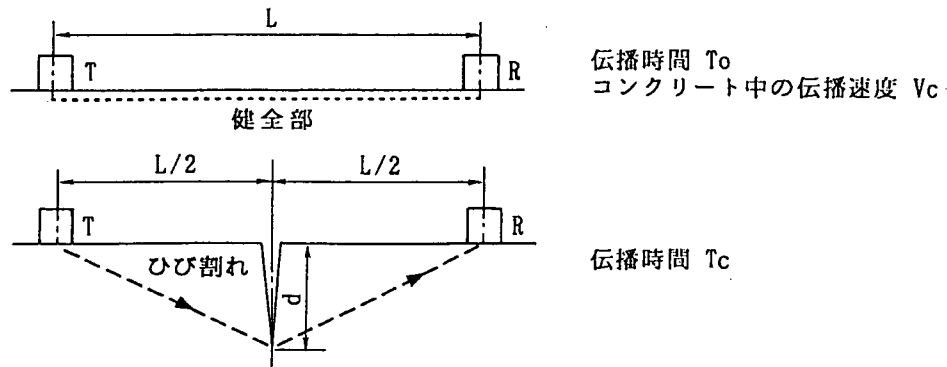


図-2.2 Tc-To法測定図

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{\{(Tc/To)^2 - 1\}} \quad \dots\dots (2.1)$$

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{(VcTc)^2 - L^2} \quad \dots\dots (2.2)$$

2) T法

T法の特徴は、受信探触子を順次移動させ、ひび割れによる超音波の伝播時間の遅れを、作図したグラフ上より読み取る点にある。

T法では、ひび割れから L_1 離れた位置に送信探触子を固定する。

受信探触子を、図-2.3に示すように送信探触子から一定間隔 l_0 で移動させ、各点(送信探触子から $l_0, 2l_0, 3l_0, \dots$)における伝播時間($t_1, t_2, t_3, \dots$)を測定する。得られた伝播距離～伝播時間の関係、 $l_0 \sim t_1, 2l_0 \sim t_2, 3l_0 \sim t_3$ をグラフ上にプロットし、「走時曲線」を作成する。

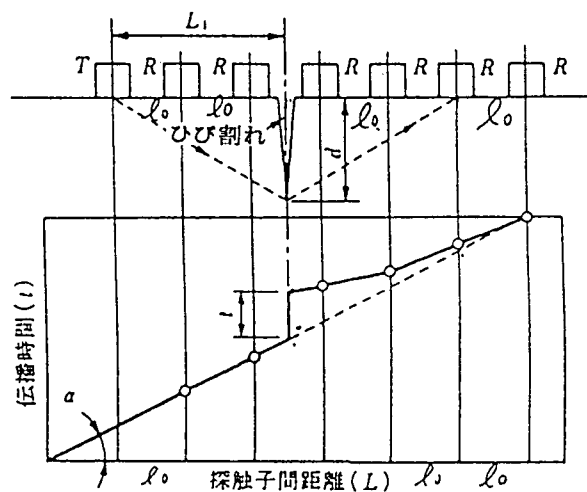


図-2.3 T法測定図(走時曲線)

グラフより、ひび割れに起因する不連続位置を求め、遅延時間 t を算出する。

ひび割れ深さ d は、式(2.3)で求める。

$$d = \frac{t \cot \alpha (t \cot \alpha + 2L_1)}{2(t \cot \alpha + L_1)} \quad \dots\dots (2.3)$$

3) BS法および修正BS法

BS法および修正BS法の特徴は、ひび割れ部分を中心に送信探触子と受信探触子を定間隔(150mm・300mm、あるいは $a \cdot na$)に設置し、各々伝播時間を求める点にある。

ただし、ひび割れから送信探触子および受信探触子までの距離は、BS法ではひび割れから探触子端部までの距離とされており、修正BS法では探触子中心とすることが多い。

150mmあるいは a 間隔の場合の伝播時間 t_1 、300mmあるいは na 間隔の場合の伝播時間 t_2 を求め、ひび割れ深さ d を、BS法は式(2.4)で、修正BS法は式(2.5)で求める。

なお、修正BS法とは、BS法を各研究者がアレンジしたものの総称であり、BSにおいて明文化された正式な規定ではない。

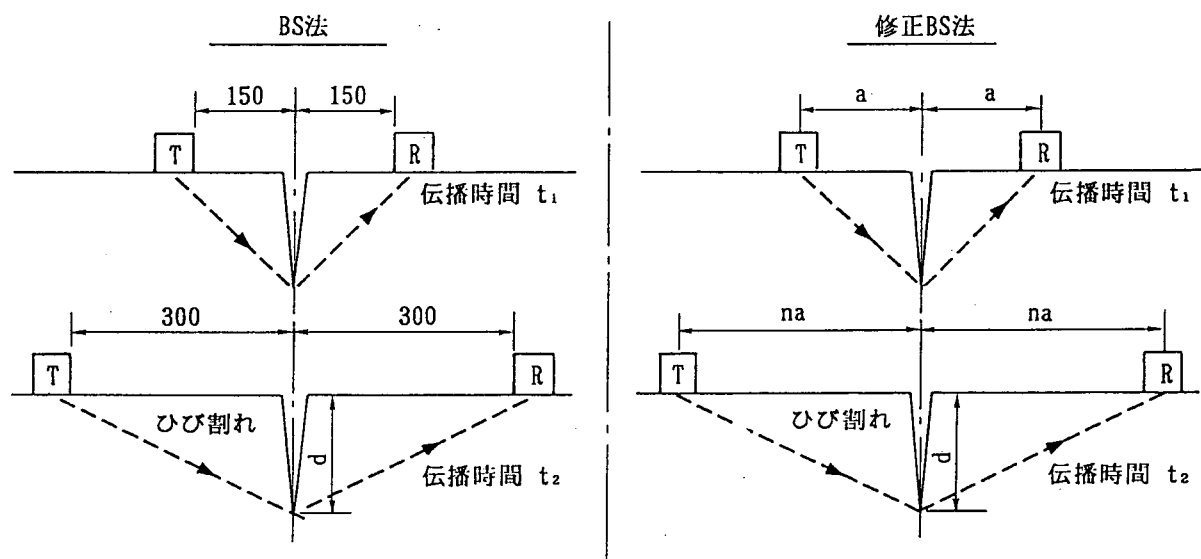


図-2.4 BS法および修正BS法測定図

$$d = 150 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad \dots\dots (2.4)$$

$$d = a \sqrt{\frac{n^2 \cdot t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad \dots\dots (2.5)$$

4) 直角回折波法

直角回折波法の特徴は、受信探触子で得られた波形を観察し、その位相が反転する現象を活用する点にある。

受信波形を観察する方式と波形の変化を装置内部で自動的に読み取る方式がある。

測定は、ひび割れ部分を中心にして送信探触子および受信探触子を等間隔 a で移動させていくと、 $a =$ ひび割れ深さ d となった位置で、受信波形の位相が変化する。この位置 a を測定することによりひび割れ深さ d を求めるものである。

5) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法は、発生する波の伝播時間を測定する点では、超音波伝播速度法と同じであるが、波の発生をハンマー等の打撃による点が異なる。

コンクリートをハンマーなどで打撃して発生させる衝撃弾性波法は、電気的な方法による超音波伝播速度法に比べて、発生エネルギーが大きいため、減衰が少なく、伝播距離も大きいとされる。測定は、一般的にはT法と同様の方法で行われる。

2.2 ひび割れ深さ推定上の留意事項

現在、実際に行われている、超音波を用いた非破壊検査法によるひび割れ深さ推定上の留意事項について述べることにする。なお、ここで対象とするひび割れ深さ推定方法は、 $T_c - T_o$ 法、BS法・修正BSおよび直角回折波法であり、既往の研究の成果、ならびに今回実施した共同実験での結果をもとに、一般的であろうと予想される留意項目についてとりまとめたものである。

2.2.1 共通

- ① $T_c - T_o$ 法、BS法および修正BS法はひび割れ深さの算出に際し、図-2.5に示すようにいずれも、超音波は発信側の探触子からひび割れ先端に直進し、さらに、ひび割れ先端から受信側の探触子に直進する経路を通ることを基本原理としている。したがって、この基本原理にそぐわない場合は計測精度が劣ることとなる。鉄筋の影響による超音波やコンクリート表面を伝播する超音波を受信する場合や、

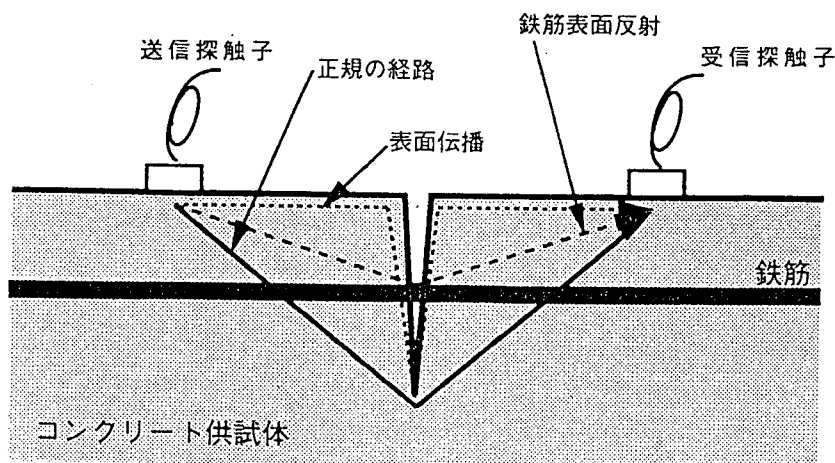


図-2.5 コンクリート中での超音波の伝播経路

ひび割れがコンクリート表面から内部に垂直に入っていない場合がこれに相当する。これらの影響については、推定に携わる技術者がその影響があるか否かを判断する。

② ひび割れから探触子までの水平距離が50mm以内になると、50mmよりも深いひび割れではコンクリート表面を伝播する波を受信する場合がある。したがって、探触子の性能および指向性を十分考慮した上で測定するものとし、場合によっては鉄筋からの水平距離が50mm以内では計測を行わないことも考慮する。ひび割れ深さ推定に関する鉄筋の影響を排除するためには、鉄筋からの水平距離を150mm程度以上とした方がよい場合がある。また、鉄筋の方向と探触子配置方向を一致させないように探触子の配置を行ない、鉄筋の影響をできるかぎり排除するような工夫も一部なされている。

③ 受信波をオシロスコープで観察して波の伝播時間を測定する方法では、多点の計測によりひび割れ回折波と鉄筋反射波を区別することが可能である。しかし、50kHz程度の周波数の波では、伝播性能はよいもののその立上り部が不鮮明になり、正確な計測が困難な場合がある。受信した超音波の第1波以降をオシロスコープ上でとらえて、波を取捨選択して適切なものを取り出し、この操作により、伝播時間を決定してひび割れ深さを推定する手法も提案されているが、波の判別にかかなりの熟練を要するので必ずしも容易ではない。

④ 探触子の周波数を大きくしても、波形を読み取る方法によらない場合、必ずしも精度が向上するとは限らない。

⑤ 送信探触子と受信探触子の発信部および受信部を、探触子のどの部分とするかは、ひび割れ深さ推定に大きな影響を及ぼす。コンクリート表面で探触子間隔を変化させて伝播時間を測定し、伝播時間が0になるときの探触子間隔を外挿して算出することにより、発信部および受信部を推定することができる。

ただし、超音波の入射角などの影響を十分に検討した上でこの位置を用いる必要がある。

⑥ コンクリート表面が平滑ではなく、探触子とコンクリートの接触が不完全な場合、安定した測定ができない。

2.2.2 Tc-To法

① Tc-To法は、Vcの測定誤差がひび割れ深さの推定に大きな影響を及ぼす場合があり、これ以外にも誤差要因は多くある。したがって、Vcの計測あるいはToの計測はできるかぎり正確に行う必要があるが、ここでの検討結果からも明らかなように、高精度の伝播時間計測を行うことができて、ある程度の誤差(10-20mm)は避けられない。

② ひび割れ深さに対して送信探触子と受信探触子の配置間隔がとくに大きい場合、ひび割れ深さ推定に関する誤差が大きくなる傾向にある。

③ 発信および受信位置を探触子の中心とするか内側とするかを明確にしてひび割れ深さを算出する。いずれの位置でも、探触子間距離は125mm以上が測定精度はよいようである。

④ Vcを用いてひび割れ深さを推定する場合、Vcの測定誤差がひび割れ深さの推定誤差に大きく影響を及ぼす。

2.2.3 BS法・修正BS法

- ① 送信探触子と受信探触子の配置間隔 A_1 と A_2 の値($A_1 < A_2$)は、 A_1 を100mm程度以上、 A_1 と A_2 の差100mm程度以上とするのが望ましい。 $A_2/A_1 = n$ とすると、測点と探触子内側の距離は $n = 1.5 \sim 3.0$ とするのがよいようである。
- ② 虚数が算出される場合は測定不可能として明記する。

2.2.4 直角回折波法

- ① 本方法は、探触子とひび割れとの距離がひび割れ深さに相当するものであり、その測定精度が誤差要因となる。
- ② 鉄筋の影響の除去などには熟練を要する。

3. 各種測定法

3.1 伝播時間による測定方法

3.1.1 総 則

(1) 原 理

送信探触子から送られた超音波がパルス受信探触子に到達するまでに要した時間を測定し、この時間からひび割れ深さを推定するものである。

〔解 説〕

超音波送信側の探触子中の圧電体に直流電圧を印可・放電することによりコンクリート中に超音波を放射すると、コンクリート中に弾性振動が発生する。この振動を受信側の探触子で捉え、再び電気信号に変換して、送信側の探触子から受信側の探触子に到達するまでの時間を読み取り、三角関数を用いて伝播距離を逆算することにより、ひび割れ深さを推定する。送信側の探触子から受信側の探触子に到達するまでの時間のみをデジタル表示する飽和増幅方式と受信波をオシロスコープに表示し、伝播時間、信号強度、および位相などを観察する受信波観察方式がある。

コンクリート中を伝播する超音波には縦波、横波、および表面波があり、一部に横波や表面波を利用している機種も存在するが、適用上の制限が多いため、ここでは縦波の使用を前提として記述する。

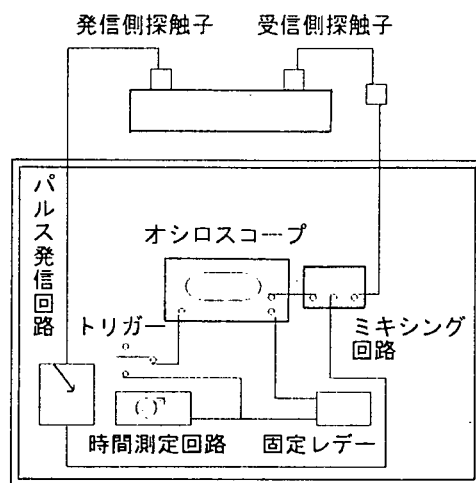


図-3.1 超音波測定器の概要

伝播時間をもとにひび割れ深さを推定する方法は、第2章の2.1に示した通りであるが、一般的にはBS法、修正BS法、 $T_c - T_0$ 法が主に用いられる。これらの方法はいずれも、送信探触子から送られた超音波が、ひび割れ先端に向かって直進し、ひび割れ先端で回折し、また受信探触子に向かって直進する経路をたどるものと仮定し、その幾何学的条件（直角三角形のピタゴラスの定理）から、ひび割れ深さを

逆算して求めるものである。したがって、本方法が適用されるには次の条件すなわち、①伝播時間が正確に測定できること、②ひび割れ深さを推定する際に仮定した伝播経路をたどった超音波をとらえられること、が満足されなければならない。

伝播時間を正確に測定するためには、適切な測定手順に従う必要があり、その標準的な方法を3.1.2に示している。一方、ひび割れ深さ測定に際して仮定した伝播経路における受信が満足されない場合として、例えばひび割れをまたいで鉄筋が入っている場合などがある。この点については3.1.3影響因子の項あるいは付録として収録した実験結果を参照されたい。

(2) 適用範囲

この測定方法はコンクリート表面に現れているひび割れの深さの測定に適用する。

〔解 説〕

コンクリートを主構造部材とするあらゆる構造物について上記のひび割れの深さの推定に適用する。測定作業の難易度、あるいは推定値の信頼性等に差異があらわれる点を除けば、あらゆる発生原因、および表面形態のひび割れに対して適用できる。また、表面に仕上げ材が施されている場合には、これを除去するか、あるいは仕上げ材が推定値に与える影響を計算にて除去しうる場合にのみ適用可能とする。

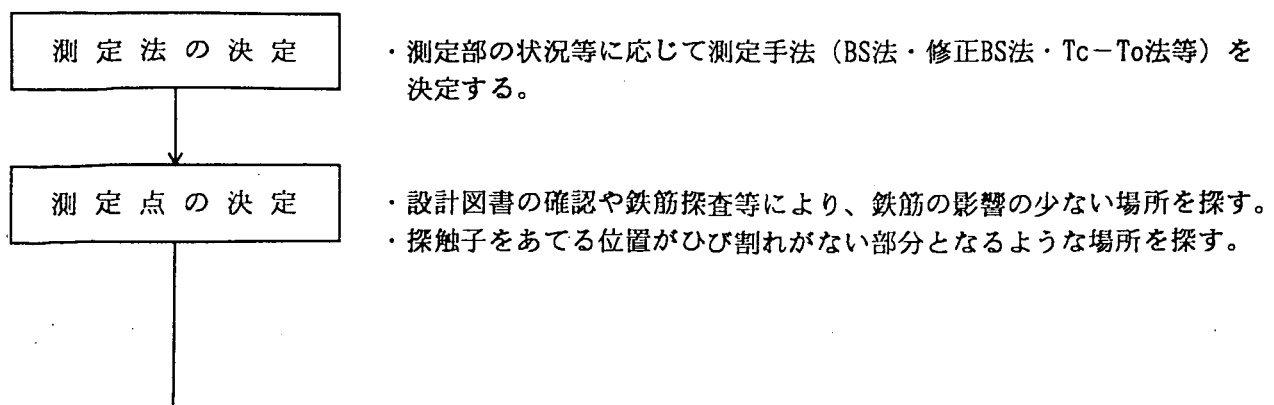
3.1.2 測定方法

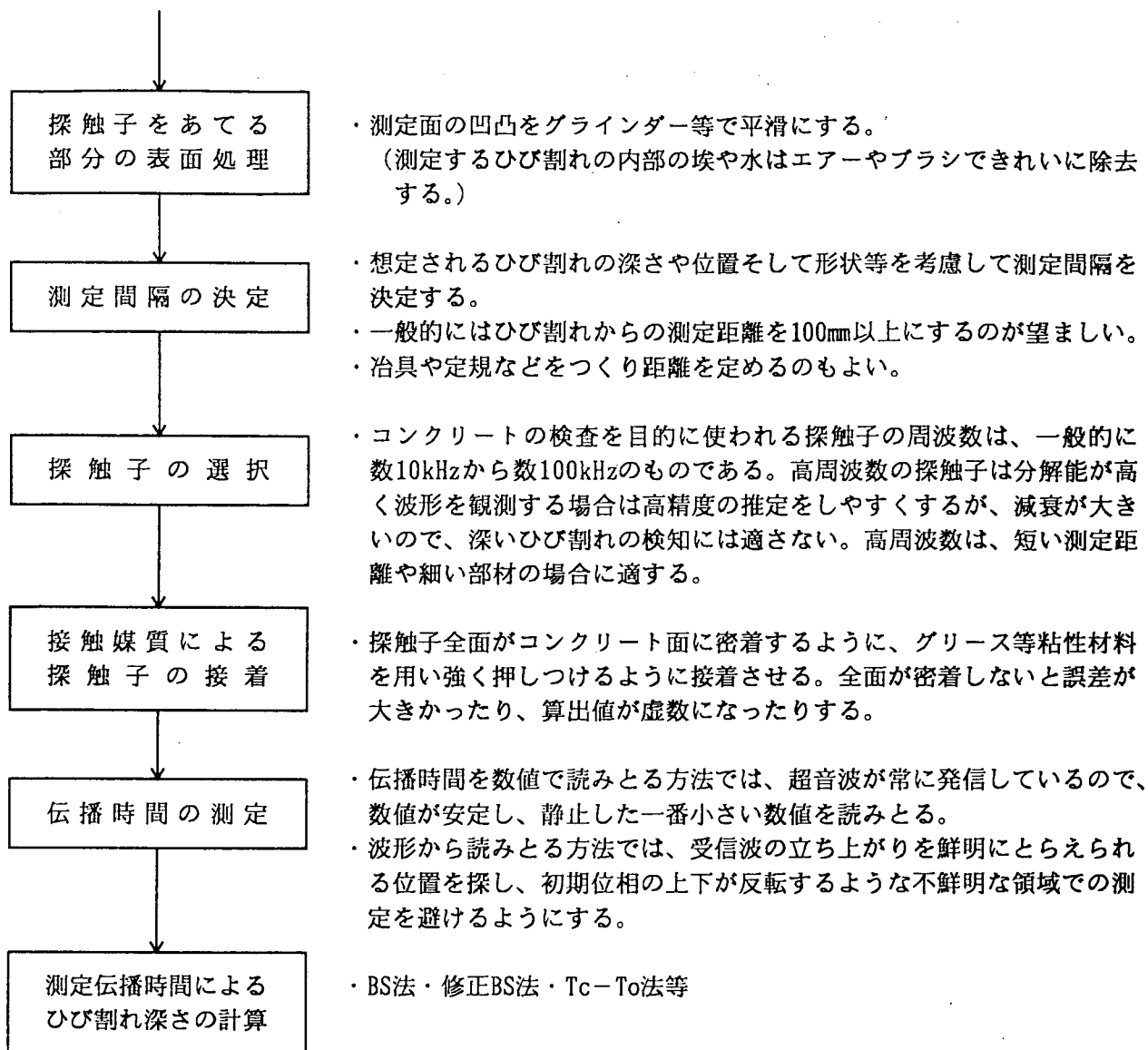
測定原理に述べた方法により測定する。(測定手法としてはBS法・修正BS法・Tc-To法などがあり、測定目的および測定場所の状況に応じ選択することができる。)

〔解 説〕

測定手順を追って測定上の対処法を簡単に説明する。

＜測定手順＞





3.1.3 影響因子

測定結果および精度等判断に影響する因子として下記のようなものが考えられる。

- | | |
|---------------------|------------------------|
| 1) 探触子のコンクリート面への密着度 | 5) 振動子の周波数 |
| 2) 探触子設置間隔の測定距離の誤差 | 6) ひび割れ表面部の状況（長さ・幅・形状） |
| 3) 鉄筋影響の有無 | 7) ひび割れ内部の状況（方向・目詰まり等） |
| 4) 測定部探触子設置場所の状況 | 8) その他 |

〔解 説〕

- 1) 探触子と測定部材コンクリート面の密着度が確実でないと、受信した超音波の振幅が小さくなるため、飽和振幅方式の場合、トリガーがかからず、第1波の立ち上がりをとらえることができなかった

り、伝播時間の測定に誤差を生じることがある。

また本来コンクリート面と探触子は面接触となるべきところが、点接触となり、探触子とひび割れの間の距離にくるいが生じることがある。

- 2) 探触子配置間隔に誤差が生じると、たとえ伝播時間が正確に測定されていても、ひび割れ深さを算出する際に想定する幾何学的条件が変化し、結果的にひび割れ深さ推定値に誤差を生じることとなる。
- 3) 鉄筋が存在する場合、鉄筋位置・探触子位置・ひび割れ深さの3つの条件設定によっては鉄筋を透過して伝播する波が、ひび割れ先端で回折して到達する波よりも早く探触子に届くため、これを第1波としてとらえてしまう場合がある。これを伝播時間としてしまうと、当然のことながら、ひび割れ深さの推定は不可能となる。この影響度合いについては付録資料に実験結果を添えて推察を行っているので、そちらも参照されたい。
- 4) この因子で特に問題となるのはコンクリートに生じているひび割れ間隔が狭く、十分なひび割れ～探触子間隔が確保できない状態に陥るときである。ひび割れ～探触子間隔が小さくても、探触子の指向性によっては測定可能であるが、場合によってはひび割れ先端を回折して伝播した波をとらえきれない場合がある。この点についても付録の資料に記述しているので、参照されたい。
- 5) 振動子の周波数は市販されている機器によって数10～数100kHzと、かなり異なっている。周波数が大きくなるほど、一般的に超音波はコンクリート中を伝播するときの減衰が大きく、ひび割れ深さが深かったり、探触子の間隔が広くて伝播距離が長くならざるを得ない場合は正確な計測が行えない可能性がある。

一方、周波数が小さくなると、コンクリート中の伝播性能が良くなり、伝播距離が長くなっても計測可能となるが、受信波の立ち上がりが不鮮明になる。この場合、測定機器本体のゲインを大きくし、極力立ち上がりが鮮明になるような配慮を行わなければ、正確な超音波伝播時間の測定ができないので注意が必要である。

- 6) ひび割れ深さの推定を行う際、測定に先立ちコンクリート表面でのひび割れ状況(幅、長さ、形状)を観測するのが一般的である。ここで、ひび割れ状況が例えばアルカリ骨材反応に起因したものである場合、ひび割れが曲線的に発生しているので、ひび割れ先端を回折して伝播する経路のうち、その最短距離となる経路の特定が困難であり、伝播時間を計測してもひび割れ深さの算出が不可能となる。ひび割れ幅の影響については7)で述べる。

- 7) ひび割れが内部で目づまりを起こしている場合、この接触点を透過して超音波が伝播する可能性があるので、実際に生じているひび割れ深さよりも浅く推定される場合がある。

一方、ひび割れ幅が極端にせまい場合については次のような理由で、ひび割れ深さの推定が不可能となる。一般に、ひび割れ深さの推定で用いている超音波は縦波(粗密波)であり、空気中も伝播し得る波である。したがって、ひび割れ幅が狭く、ひび割れ間の空気層が非常にせまい場合、ひび割れ間を直接伝播する波の振幅が無視し得なくなり、受信探触子で第1波として観測されてしまうことになる。

- 8) その他、温度や骨材寸法などで影響を受ける場合がある。

3.1.4 ひび割れ深さの推定

伝播時間の測定からひび割れ深さを推定する場合、主としてBS法・修正BS法・Tc-To法を用いて推定する。

〔解 説〕

伝播時間の測定から、ひび割れ深さを推定する場合、主としてBS法・修正BS法・Tc-To法により行うこととした。どの方法を用いるかは、現場の状況に応じ、推定誤差が極力少なくなるように設定すべきである。探触子間隔のとり方については、第2章2.2の留意事項を参考にして決定するとよい。

3.1.5 結果のまとめ方

ひび割れ推定結果の報告に際しては、ひび割れ深さ推定結果のみでなく、測定位置や伝播時間の測定条件もあわせて報告することが望ましい。

〔解 説〕

表-3.1に調査結果として報告することが望ましい項目を列挙する。ひび割れ深さの推定値は超音波伝播時間の測定方法、鉄筋の配筋状態によって、その誤差が変化する。したがって、ひび割れ深さの推定結果の信頼性を評価するため、表-3.1に示した項目も報告することが望ましいとした。

表-3.1

調 査 結 果

- 1) 外観状態
- 2) 測定位置
- 3) 配筋状況
- 4) 使用した超音波測定器
- 5) 使用した探触子の種類（周波数、径など）
- 6) 測定方法（計算方法、探触子間隔など）
- 7) ひび割れ深さ推定値
- 8) その他の特記事項

〔3.1の参考文献〕

魚本健人、加藤潔、広野進：コンクリート構造物の非破壊検査、森北出版、pp.27-75, 1990.5.

谷川恭雄、ほか：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書、（社）日本コンクリート工学協会、pp.259-263, 1992.3.

3.2 直角回折波法による測定方法

3.2.1 総 則

(1) 原 理

コンクリートに超音波パルスを送ると、ひび割れの先端から送波方向と直角に回折波が進む。この直角回折波をコンクリート表面で受信し、ひび割れと受信位置の距離 a から、ひび割れ深さ d を求める。

〔解 説〕

この方法では、長波長の縦波を使用し、図-3.2に示すように超音波パルスの第1波の直角回折波で測定する。測定原理と受信波形をひび割れ深さが100mmの場合を例にとり、それぞれ図-3.3および図-3.4に示す。ただし、図に示した測定原理により測定できない装置では、ひび割れ深さを推定できないことがある。

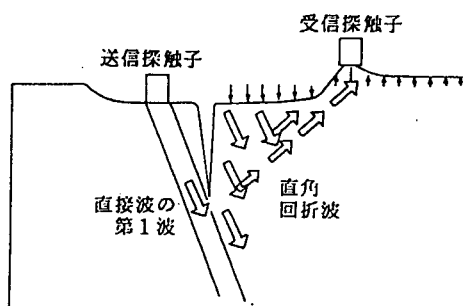


図-3.2 ひび割れ測定の方法と探触子位置

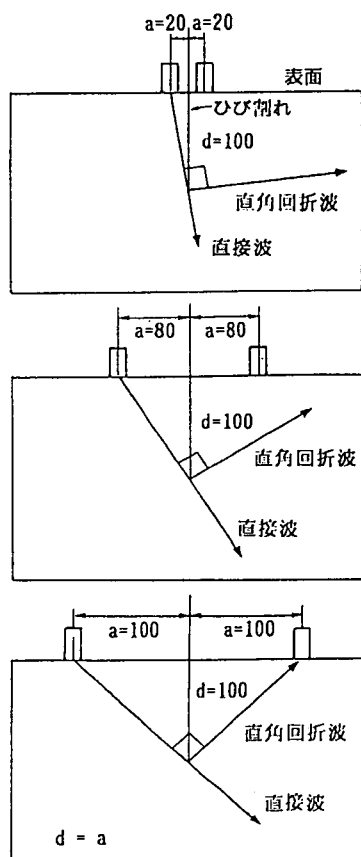
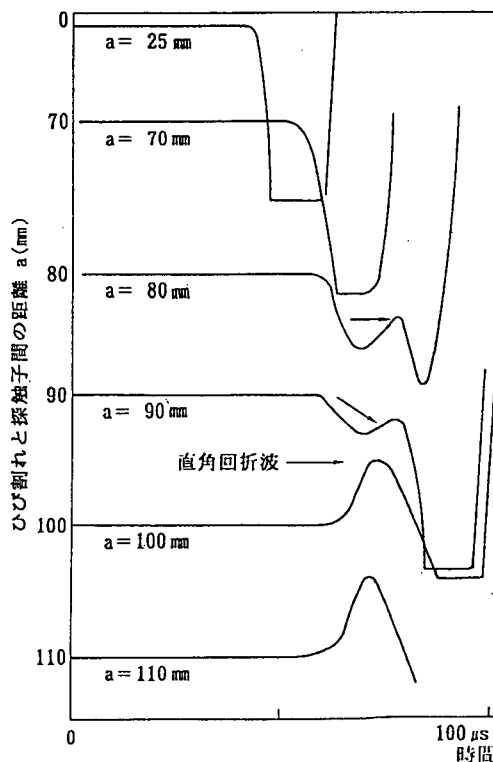


図-3.3 測定原理の一例



ひび割れと探触子の間隔を広げると、受信第1波は上向きとなる。この位置が $d=a$ の位置

図-3.4 受信波形の一例

(2) 適用範囲

この測定法はコンクリート表面に現われているひび割れの深さの測定に適用する。

〔解 説〕

本測定で測定できるひび割れ深さの範囲は一般に5mm～500mmである。ただし、使用する探触子には測定できるひび割れ深さに範囲があるので、測定されたひび割れ深さがこの範囲をはずれた場合は、探触子をかえて再度測定することがのぞましい。

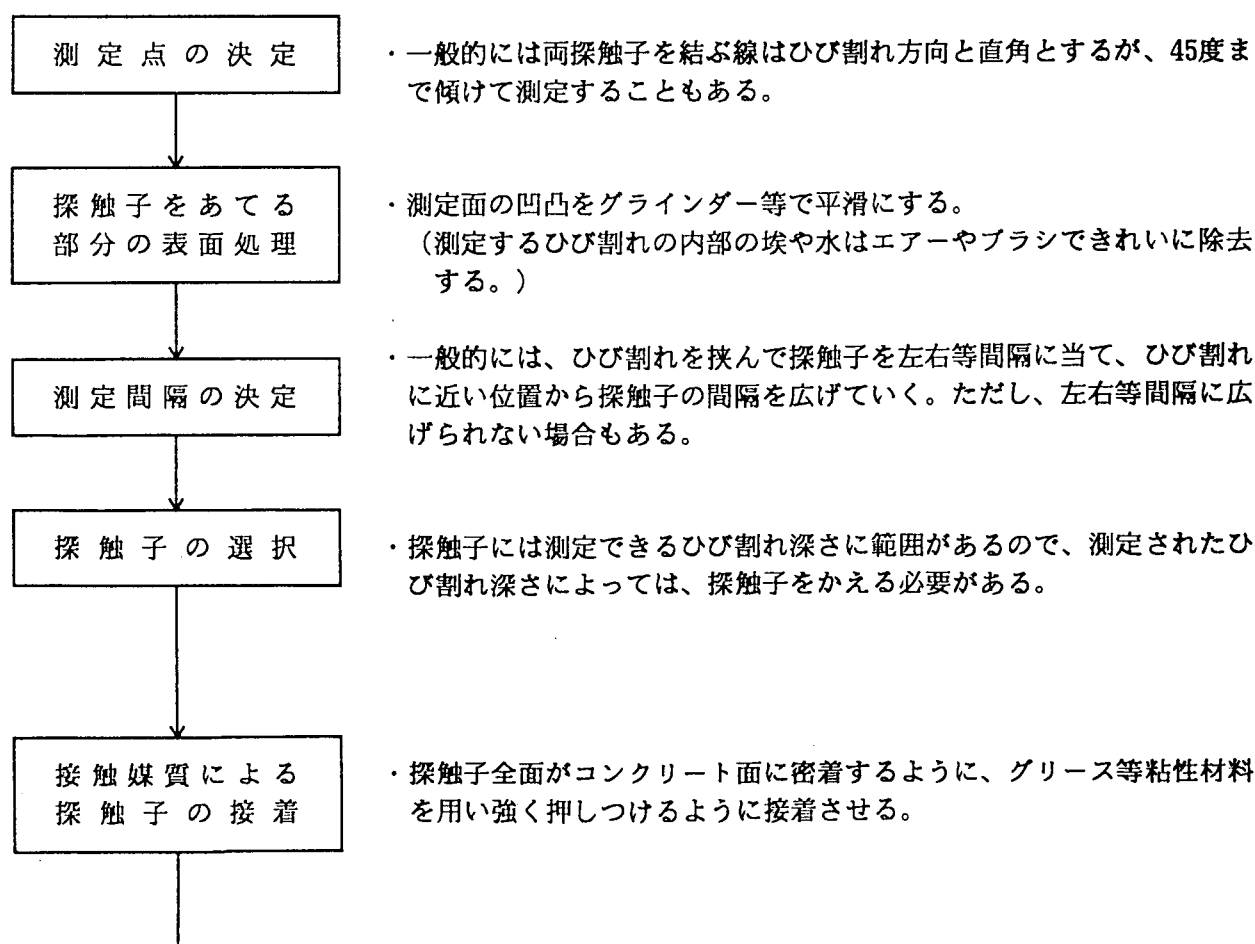
3.2.2 測定方法

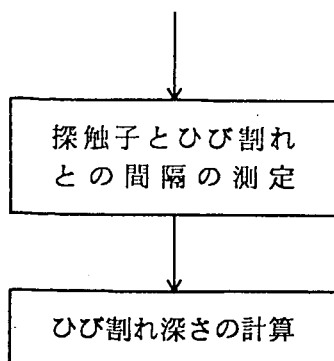
測定原理に述べた方法により測定する。

〔解 説〕

測定手順を追って測定上の配慮と対処法を簡単に説明する。

＜測定手順＞





・コンクリート表面で直角回折波の第1波を受信したとき、図-3.5に示す受信探触子とひび割れとの間隔 a を測定する。ただし、図-3.6に示すように、左右等間隔でない場合は、送信探触子とひび割れとの間隔 b も測定する。

・探触子が左右等間隔の場合 ひび割れ深さ $d = a$

・探触子が左右等間隔でない場合 ひび割れ深さ $d = \sqrt{a \cdot b}$

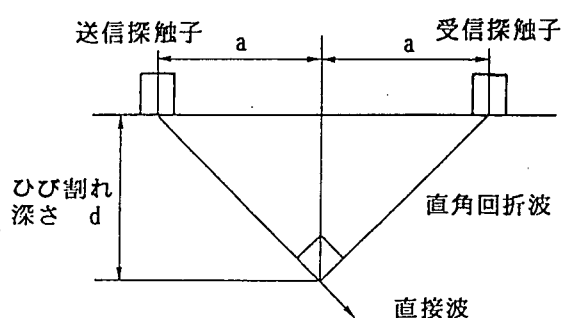


図-3.5 探触子が左右等間隔の場合

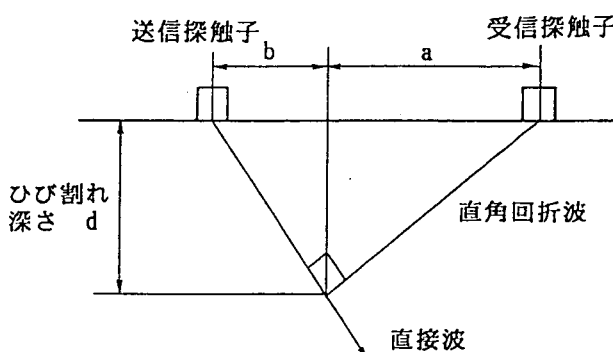


図-3.6 探触子が左右等間隔でない場合

3.2.3 影響因子

測定結果および精度等判断に影響する因子として下記のようなものが考えられる。

- | | |
|---------------------|------------------------|
| 1) 探触子のコンクリート面への密着度 | 4) 測定部探触子設置場所の状況 |
| 2) 探触子設置間隔の測定距離の誤差 | 5) ひび割れ表面部の状況（長さ・幅・形状） |
| 3) 鉄筋の影響 | 6) ひび割れ内部の状況（方向・目詰まり等） |

〔解説〕

1) 探触子と測定部材コンクリート面の密着度が確実でないと、受信した超音波の振幅が小さくなるため、直角回折波の立ち上がりをとらえることができない場合がある。

また本来コンクリート面と探触子は面接触となるべきところが、点接触となり、探触子とひび割れとの間の距離に、くわいが生じることがある。

2) 探触子配置間隔に誤差が生じると、直角回折波を受信した時点が正確に測定されていても、ひび割れ深さを算出する際に誤差を生じることとなる。

3) 鉄筋による反射で直角回折波が受信されるため、ひび割れ先端での直角回折波を受信することができない。この影響を極力避けるために、図-3.7に示すように、鉄筋軸方向に対して45度以内に探触子をあてる方法も提案されている。

- 4) この因子で特に問題となるのはコンクリートに生じているひび割れ間隔が狭く、十分なひび割れ～探触子間隔が確保できない状態に陥るときである。
- 5) ひび割れ深さの推定を行う際、測定に先立ちコンクリート表面でのひび割れ状況（幅、長さ、形状）を観測するのが一般的である。ここで、ひび割れ状況が例えばアルカリ骨材反応に起因したものである場合、ひび割れが曲線的に発生しているので、ひび割れ深さの算出が不可能となる。
- 6) ひび割れが内部で目づまりを起こしている場合、この接触点を透過して直角回折波が伝播する可能性がある。

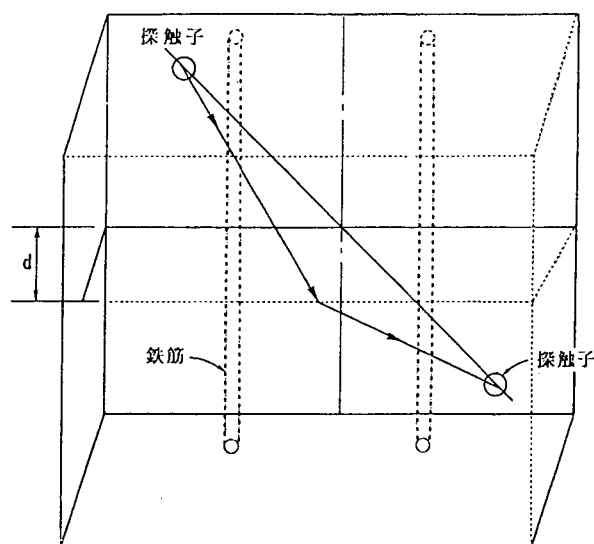


図-3.7

3.2.4 ひび割れ深さの推定

ひび割れ深さの推定は、直角回折波を受信した時点の探触子とひび割れとの間隔を測定することにより求める。ひび割れ深さの信頼性を向上させるためには、複数の測点を設定し計測することがのぞましい。

3.2.5 結果のまとめ方

ひび割れ推定結果の報告に際しては、ひび割れ深さ推定結果のみでなく、測定位置や伝播時間の測定条件もあわせて報告することが望ましい。

〔解 説〕

表-3.2に調査結果として報告することが望ましい項目を列挙する。ひび割れ深さの推定値は鉄筋の配筋状態などによってその誤差が変化する。したがって、ひび割れ深さの推定結果の信頼性を評価するため、表-3.2に示した項目も報告することが望ましいとした。

表-3.2

調 査 結 果	
1)	外観状態
2)	測定位置
3)	配筋状況
4)	使用した超音波測定器
5)	使用した探触子の種類（周波数、径など）
6)	測定方法（探触子間隔・位置など）
7)	ひび割れ深さ推定値
8)	その他の特記事項

[3.2の参考文献]

山口哲夫、丸茂文夫：コンクリート構造物における超音波試験法の改善、コンクリート工学年次論文集、
Vol.15, 1993

4. ま と め

ここでは、超音波を利用してコンクリートに生じたひび割れの深さを推定するための方法として、伝播時間による方法と、直角回折波による方法の2つを取り上げて測定方法ならびに留意点を述べた。

伝播時間の測定から、ひび割れ深さを推定する場合の推定精度の良否は、伝播時間を正確に測定できる機器を用いているという前提条件のもとでは、受信探触子によって受信された第一波がひび割れ算出の際に想定している超音波伝播経路をたどったものかどうかにかかっている。鉄筋の表面で反射して到達した超音波やコンクリートの表面を伝播する超音波など、ひび割れ深さ算出の際に想定している超音波伝播経路以外のものを第一波としてとらえてしまった場合、得られる推定値は全く無意味なものとなってしまう。超音波伝播時間によるひび割れ深さの推定法の適用範囲は、超音波伝播距離が異常に長く伝播する超音波をとらえきれないような場合を除いては、この点で限定されてしまう場合が多いと考えられる。

このため、ひび割れ深さの推定が可能かどうか、ひび割れ深さの推定値が十分信頼できるものであるかどうか判断するためには、鉄筋位置をあらかじめ設計図書あるいは第3部で示した鉄筋位置の探査などを行い確認しておくこと、続いて、鉄筋の配筋状態に対して、探触子をどのような位置で配置して計測を行っていて、鉄筋の影響を受けやすい測定になっていないか判断することが重要である。

飽和増幅方式の超音波伝播時間の計測では、得られる超音波伝播時間の実測値は受信探触子に到達した第一波に限定されるが、受信波観察方式では第一波以降の後続波が観測でき、この後続波の中から、ひび割れ深さ推定の際に仮定している経路をたどった超音波をピックアップし、この伝播時間を求められる可能性があり、実際一部にはこのようなアプローチが試みられている。しかし、このような測定方法には次のような問題点も存在する。そのいくつかを列挙すると次の通りである。

- 1) 異なる経路を伝播して受信探触子に到達して観測される複数の超音波について、それぞれ個別に時間軸状で分離が可能でなければならない。すなわち、異なる経路を伝播して到達する超音波の伝播時間の時間差を十分分離できるように、入力される超音波の継続時間を短くしなければならない。このためには、送信探触子内の振動子の動きをコントロールし、パルスに近い超音波を発生させなければならないが、これは現状からするとかなり困難である。また、入力する超音波の周波数帯域を高くすることによっても達成されるが、この場合コンクリート中の超音波の伝播性能が低下したり、超音波の指向性が問題となる。
- 2) 第一波以降の後続波をとらえて、その立ち上がりを見い出して伝播時間を決定するには熟練を要し、測定技術者の経験に基づく判断が必要となる。この判断方法を客観的に決めることが難しく、主観的な判断に陥りやすい。
- 3) コンクリート中を伝播する超音波はすべてP波と仮定しているが、実際にはS波や表面波も含まれるので、第一波以降の後続波がP波であるかどうか判定が困難である。

このような問題点があるため、ここでは伝播時間を用いてひび割れ深さを推定する方法としては、すべて受信した第一波を利用する方法に限定して記述を行い、後続波を用いる方法については言及しなかった。

第一波以降の超音波を利用することが出来れば、超音波伝播時間を利用したひび割れ深さ推定法の適用

範囲が拡大する。この方法の実用化に向けた研究開発が今後進められることを望むものである。

一方、直角回折波法はひび割れ先端で直角に回折する波がコンクリート表面に到達すると、受信される超音波の立ち上がりの位相が変わることを利用しているもので、ひび割れと探触子の距離を測定することにより直接的にひび割れ深さを推定することが可能となる。この方法においても、鉄筋が存在する場合は、適切なひび割れ深さを推定するために、探触子の配置位置に注意する必要がある。実務に応用する場合、試行的に測定を行い、受信波の立ち上がりの位相がどのような探触子の位置の場合に変化するか、経験しておくことが、適切な測定を行うためには望ましいと考えられる。

付 録 コンクリート構造物の非破壊測定試験



目 次

	頁
付録-1 コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する試験計測について	99
1. 概 要	99
2. 試験結果	99
3. ま と め	101
付録-2 鉄筋位置の非破壊試験結果	123
1. 供試体の概要	123
2. 計測手法	123
3. 測定結果	125
4. ま と め	128
付録-3 ひび割れ深さの試験計測結果	129
1. 概 要	129
2. 実験方法の概要	129
3. 無筋供試体でのひび割れ深さ推定誤差に関する考察	131
4. 鉄筋のある場合のひび割れ深さの推定	149
5. 直角回折波法・伝播時間法（波形観測方式）によるひび割れ深さ推定結果	156
あ と が き	160
非破壊検査の実施状況	163
共同研究者名簿	168



付録－1 コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する試験計測について

1. 概 要

既存の非破壊試験機器の精度確認、および測定可能範囲を明らかにすることを目的とし、平成5年2月に土木研究所構内で鉄筋コンクリート供試体の鉄筋腐食に推定のための試験計測を行った。その結果をここで述べることとする。

2. 試験結果

2.1 供試体および計測法の概要

図－1.1に示す2体のRC柱供試体について、自然電位法・分極抵抗法にて計測を行った。ここで、B－1供試体は暴露期間が5年、B－2供試体は暴露期間が10年程度のものである。供試体は土木研究所で載荷試験を行いひび割れを入れたのちに構内に暴露されたものであり、鉄筋の腐食は、ひび割れを通して酸素、二酸化炭素、水が進入して生じたものであろうと予想される。海岸からの距離は遠くはなれており、塩化物イオンの影響はほとんどない供試体であった。鉄筋腐食の測定を行う前に、供試体の中性化深さを計測した結果を表－1.1に示す。測定は時間的な制約から、全面を計測することはできなかった。ここでは、それぞれの計測結果と、かぶりコンクリートをはつり落とし鉄筋の腐食状況を目視確認した結果の整合性、および計測機器・計測者間の自然電位の測定結果のばらつきがないかどうか検討を行うことを目的とした。計測に先立ち、供試体表面を5cmピッチのメッシュに分け、これを目印として計測を行った。計測時には、表面にあらかじめ水を噴霧し水がコンクリート表面から浸透し、表面の濡れがなくなった後に計測を開始した。

計測後、かぶりコンクリートをはつり落として、鉄筋を露出させ腐食状況を確認した結果を図－1.2および写真－1.1に示す。全般的に腐食状況は、当初予想したほどではなかったが、コンクリート剥落部から10cm程度の領域・部材端のひび割れ集中箇所付近の鉄筋は腐食していた。計測時には配筋状態の計測は行わずに、直接自然電位および分極抵抗の計測を行った。

表－1.1 中性化深さ測定結果

供試体	計 測 値 (mm)				平均値(mm)
B－1	3.5	4.8	4.4	5.7	4.6
B－2	4.9	6.6			5.8

2.2 計測結果の検討

2.2.1 全般的な傾向

コンクリート表面で測定した自然電位の計測例を図-1.3その1～その5及び表-1.2に示す。この結果からみると、腐食領域の所で自然電位が谷になっており、自然電位の分布からおおよその腐食位置は推定可能であるといえる。ただし、ASTMの基準から考えると、かなり貴な電位で腐食が生じていることがわかり、ASTM基準を用いた鉄筋腐食の判定はここで行なったような塩害以外の要因で鉄筋が腐食した部位には適用不可能であると考えられる。

自然電位計測値の補正方法は、計測者によって異なっていて、1) コンクリートの一部を削孔して鉄筋を露出させこの鉄筋の表面で計測された電位と、この近傍で計測された電位の差を補正電位とするもの（大体-85～150mV程度）、2) 温度補正を行うもの（気温が20℃の状態を基準とし1℃変化するごとに7mV程度の補正を行うもの）が行なわれていた。

2.2.2 計測した自然電位の値の信頼性について

1) 同一機器を用いた場合の計測結果について

図-1.4.1～1.4.3に同一機器を用い、同一面を計測した場合の自然電位の値の比較結果を示す。図-1.4.1は同一試験者による結果、図-1.4.2および図-1.4.3は異なる試験者による計測結果である。いずれも、計測値間のばらつきは比較的低く計測値の信頼性は高いといえ、少なくとも相関係数にして0.76以上であった。このことから、同じ計測機器を用いると、異なる試験者により計測されても、得られる自然電位の値はほぼ同じで、かなり再現性が高いといえる。

ここで、相関係数が0.76の場合について2つの計測値の標準偏差は $\sigma = 35\text{mV}$ 程度であった。すなわち、同一機器を用いて計測者が異なる場合の、自然電位の計測結果については35mV程度の誤差は避けられないことが分かる。

2) 異なる機器を用いた場合の計測結果について

異なる機器を用い、異なる計測者が同一箇所の自然電位を計測した結果を比較したものを図-1.5に示す。以前に示した結果を比較すると、相関性はかなり低下しておりばらつきが大きくなっている。相関係数は0.47まで低下しており計測値間の標準偏差は、43mVであった。ここで、ふたつのデータを直線回帰しその切片を求めたところ、81mVであった。（比較した内1つは2.2.1で示したかぶりコンクリートの電位補正を行ったもの、他方は補正を全く行っていないものである）図-1.5中、丸でプロットしたものが電位補正を行っているものである。図を見ても明らかなとおり、自然電位の計測値にいて零点の移動が生じている。ここで、補正電位を取り除いた後に比較した結果を図中*で示している。このデータをもって両者の直線回帰を行ったところ、切片は-4mV、傾きは1.1となり、ほぼ原点を通る傾き45°の直線上にあることが分かる。すなわち、補正電位のとり方によりドリフトが生じるが、電位補正の条件を統一すれば、両者はほぼ同様の値を示す。

ASTM基準のように自然電位の絶対値による腐食の判定を考えた場合、この補正電位は重要な意味を持つが、計測面の範囲内でどの領域が腐食傾向にあるかを相対的に判断する場合は、自然電位の計測結果を計測面内で相互比較することになり、計測位置による補正電位の値が同じであれば、補正電位

は不要となる。ここで行なった計測結果から判断すると、補正電位のとりかたに相互に差があったが、ドリフトを取り除くと異なる機器間でも測定電位を相互比較すると傾き 45° の直線上にあるので、腐食領域の判断はある程度可能であることが分かる。

2.2.3 自然電位の計測値に基づく腐食判定について

ASTM基準あるいはBSの基準では、自然電位の計測値から腐食判定を行っている。これらの指針によると -350mV がしきい値となっている。しかし、ここでの計測結果からすると、 -350mV よりも貴な電位ですでに腐食が始まっており、既存の基準では必ずしも適切な判定ができないことが分かる。ここでは、鉄筋の腐食がどの程度の電位から生じているか明らかにするための検討を行った。

図-1.6は、計測された電位を腐食していた箇所と健全であったところに分けて、電位の頻度図を示したものである。この図より、腐食部分の方が卑な電位にあることが分かる。しかし、健全部と腐食部いずれも電位の分布状況に広がりがあり、明確な区分ができないことが分かる。この図に基づく腐食判定を行うと以下ようになる。

上記表から判断すると -60mV 以上の自然電位を示した箇所は健全であるといいきってよく、一方 -250mV 以下の自然電位を示した箇所は、腐食しているといいきってよいようである。しかし、このような条件で考えると、 $-60\text{mV} \sim -250\text{mV}$ の間に存在するデータの判定ができず、グレーゾーンにある点が非常に多く53%のデータの判断ができないことになる。また、先にも述べたとおり、測定される自然電位の計測値に含まれる誤差があることから、このような判断基準を設定しても、その判断結果の信頼性は必ずしも大きいとはいえないと考えられる。従って、鉄筋腐食状況の判定に高い信頼性を求める場合は、自然電位測定結果から等高線図で表し、谷となった箇所のかぶりコンクリートのはつり・目視による鉄筋腐食状況の確認は必要となるであろうと考えられる。

2.2.4 分極抵抗法による測定

今回の測定では、自然電位法だけではなく、分極抵抗法による計測も行った。分極抵抗法は基本的には、その時点の腐食状況を表現するものではなく、腐食速度を表すものである。今回の計測結果からすると、供試体の状態は健全であり、分極抵抗はB1供試体で $5.0 \sim 10.8\text{k}\Omega\text{cm}^2$ 、B2供試体で $7.2 \sim 16.3\text{k}\Omega\text{cm}^2$ となっており、著しい腐食は今後生じにくいと判断された。

3. ま と め

以上をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 供試体が当初予想されたより、比較的健全であったため、腐食箇所は少なかった。
- 2) 腐食が、ASTM基準などで想定されている塩害による腐食ではなかったため、ASTM基準よりかなり貴な電位で腐食が生じていた。
- 3) 自然電位の測定値のばらつきなどを総合して考慮すると、今回の計測結果から腐食の判断基準を確立することは難しいと考えられる。
- 4) 腐食部と、電位の等ポテンシャル線図を比較すると比較的よく一致しており、この図から腐食箇所の判断は可能であると考えられる。

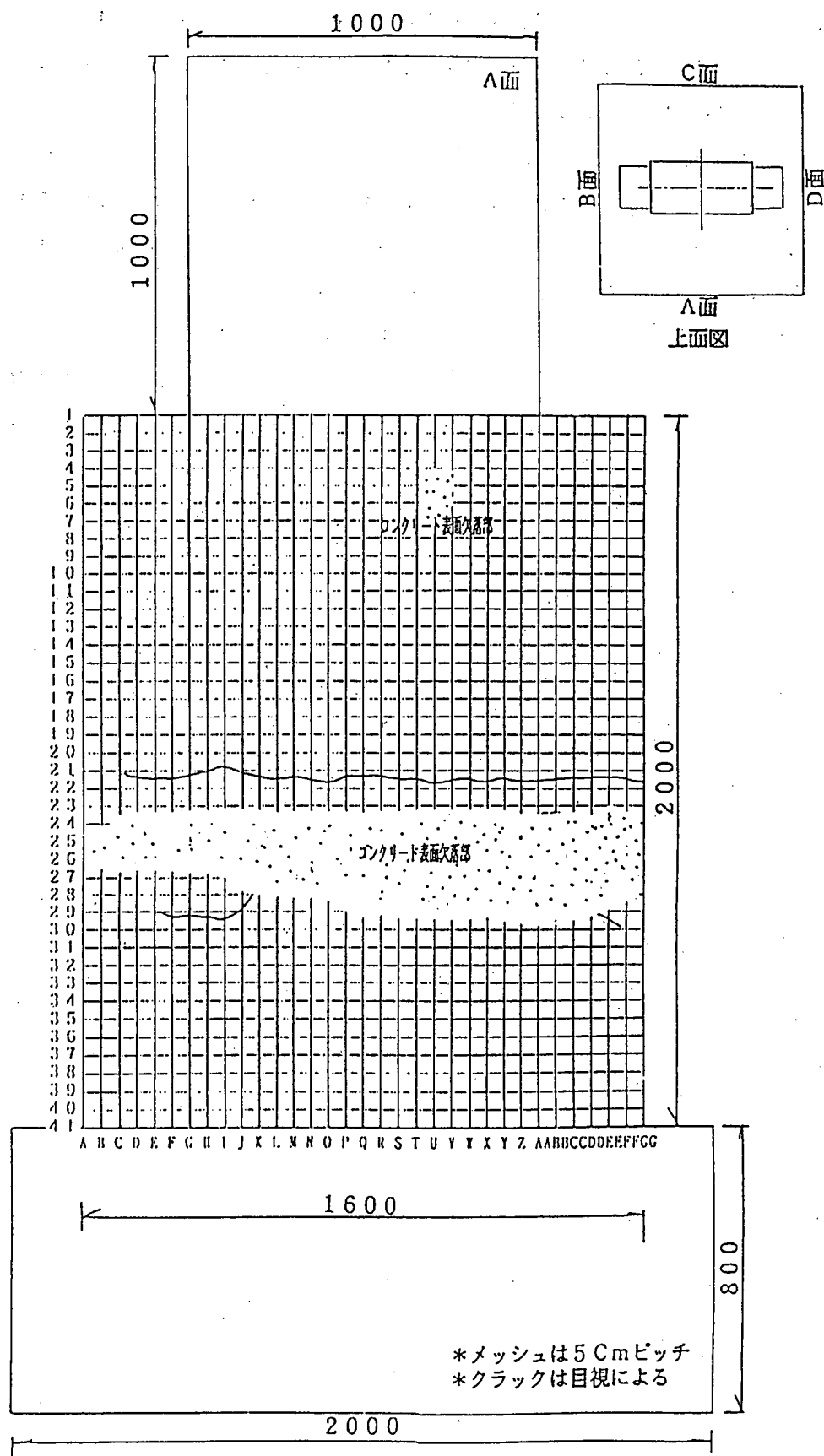


図-1.1 試験体寸法および基準記号（供試体B1-A面）その1

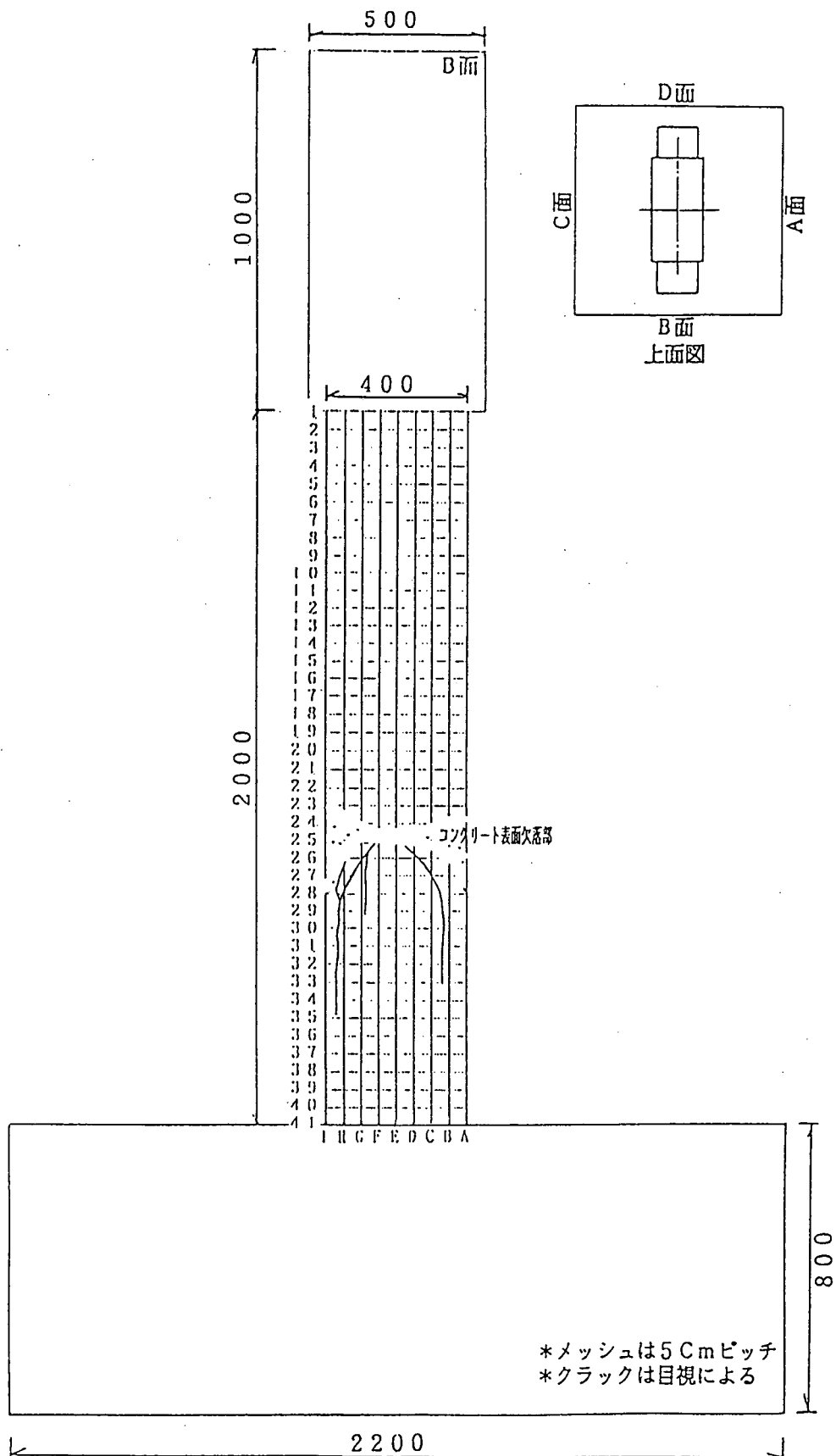


図-1.1 試験体寸法および基準記号（供試体B1-B面）その2

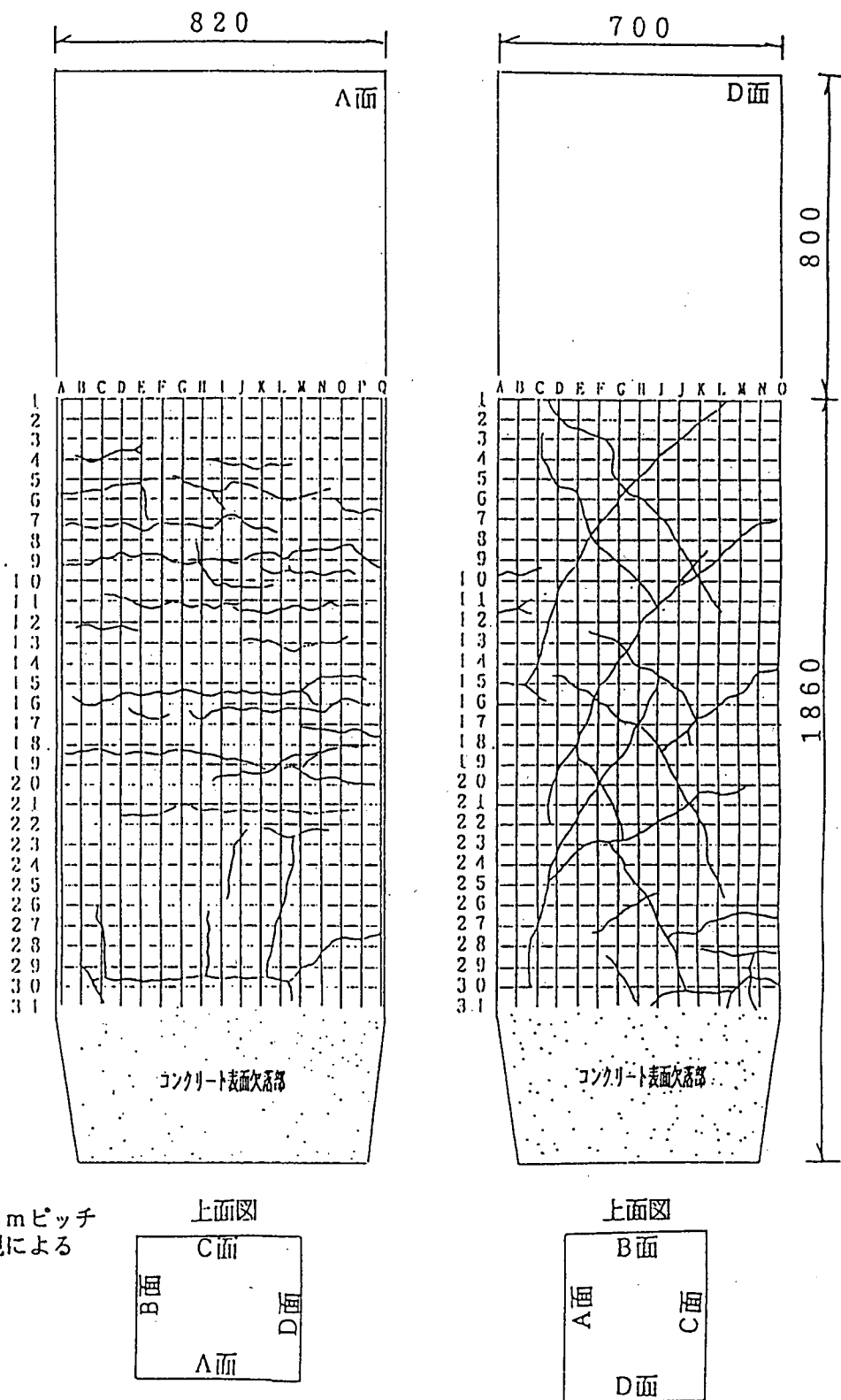
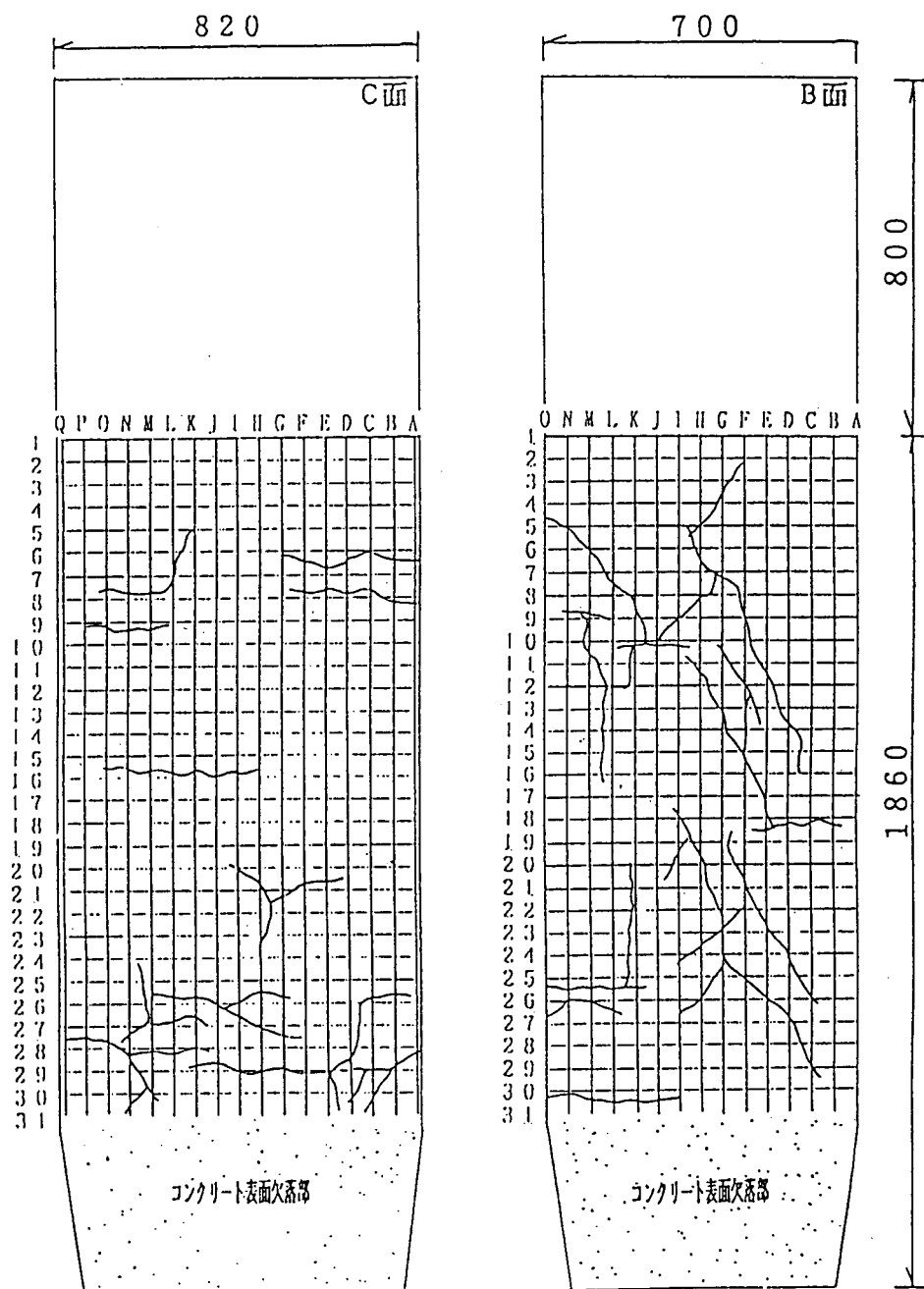


図-1.1 試験体寸法および基準記号（供試体B2-A.D面）その3



*メッシュは5Cmピッチ
*クラックは目視による

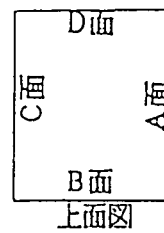
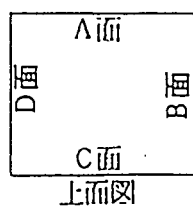


図-1.1 試験体寸法および基準記号（供試体B2-B.C面）その4

B-1 (A 面) 腐食状況

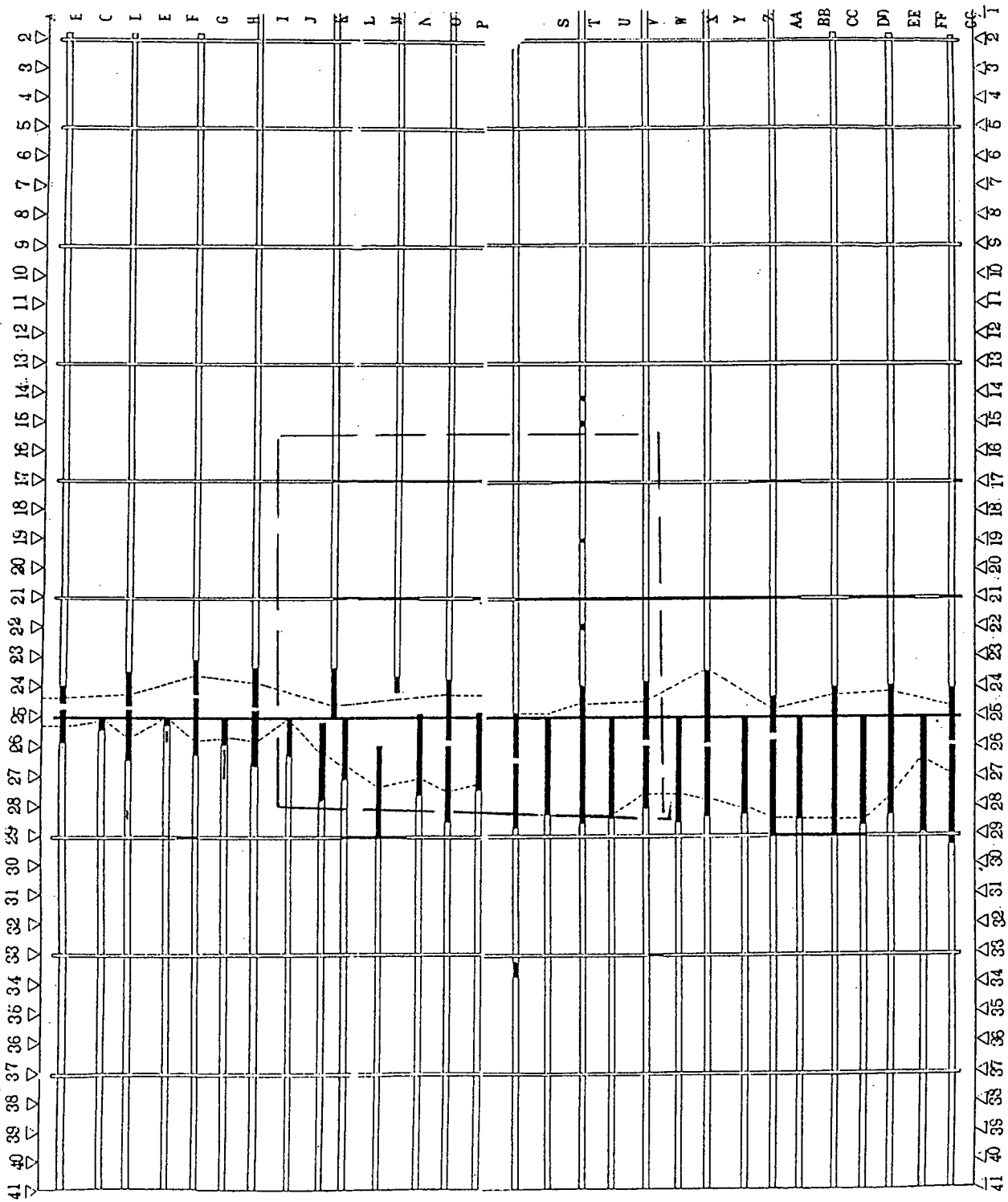


図-1.2 かぶりコンクリートはつり後の腐食状況の観察結果 その1

B-I (C 面) 腐食状況

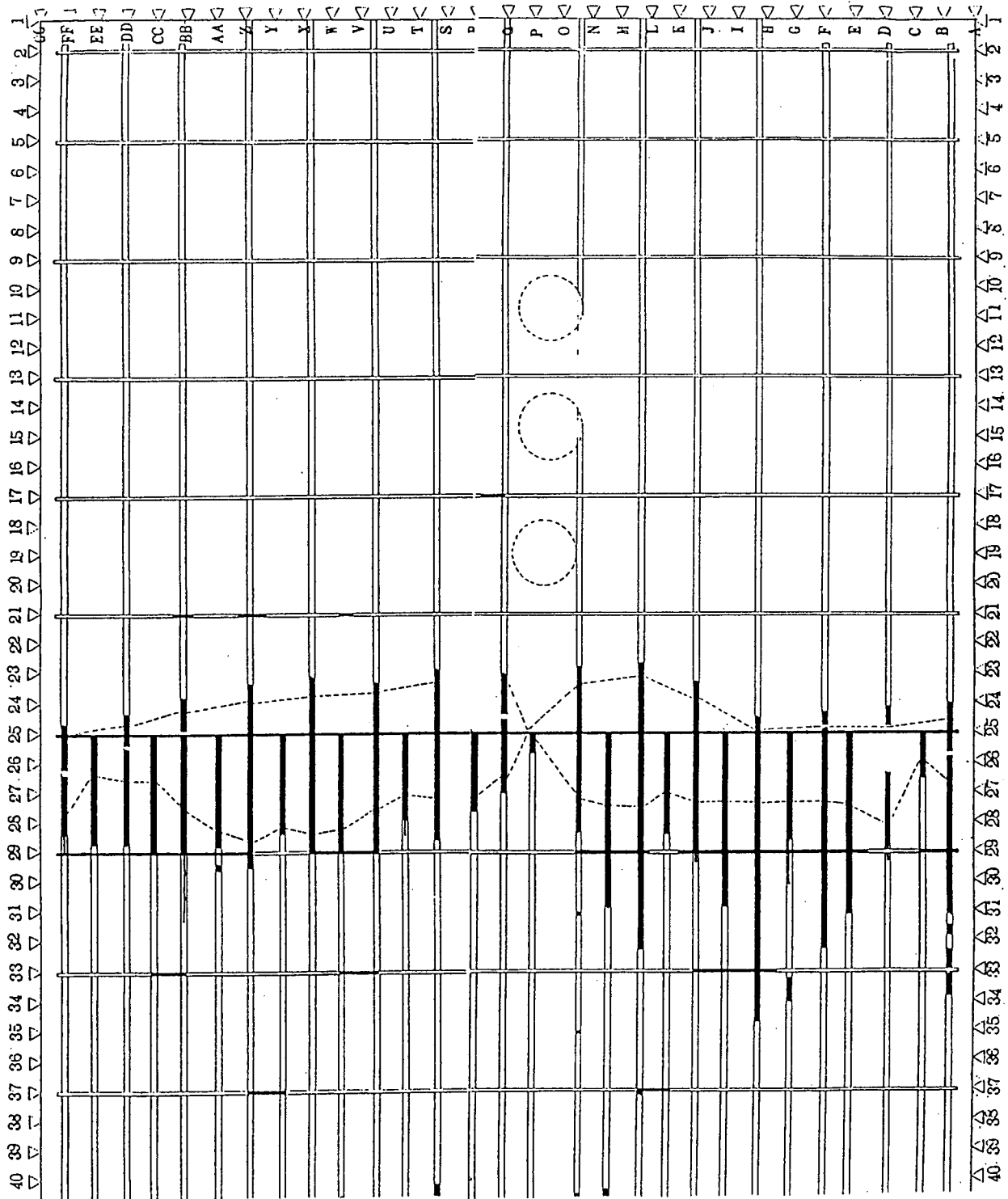


図-1.2 かぶりコンクリートはつり後の腐食状況の観察結果 その2

B-II (A 面) 腐食状況

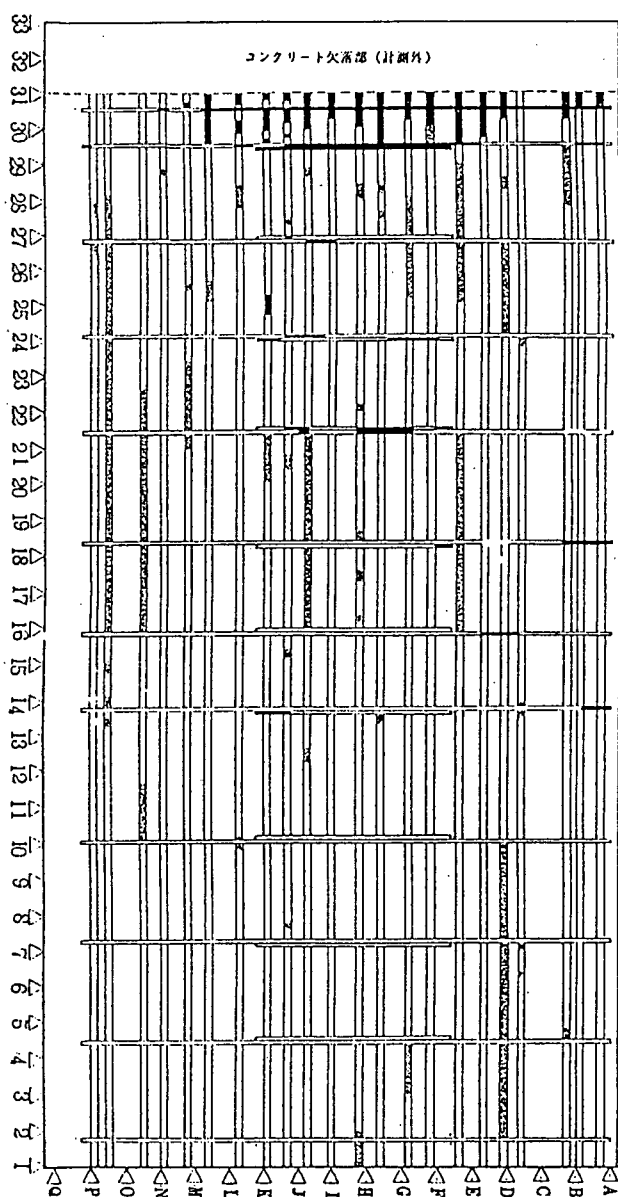


図-1.2 かぶりコンクリートはつり後の
腐食状況の観察結果 その3

B-II (C 面) 腐食状況

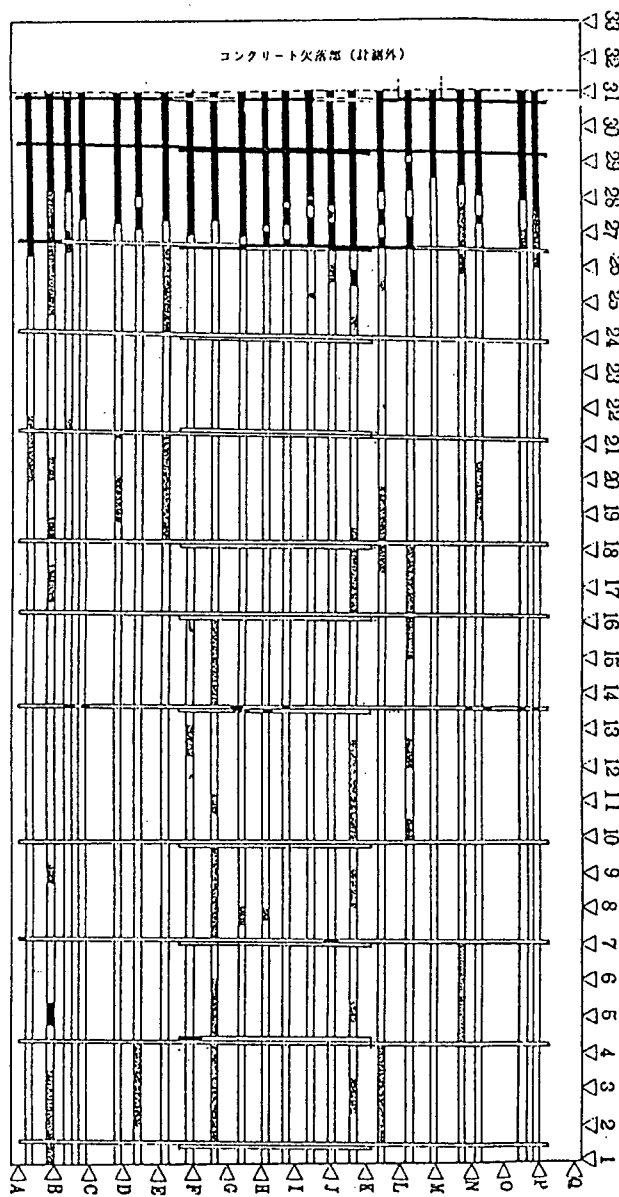
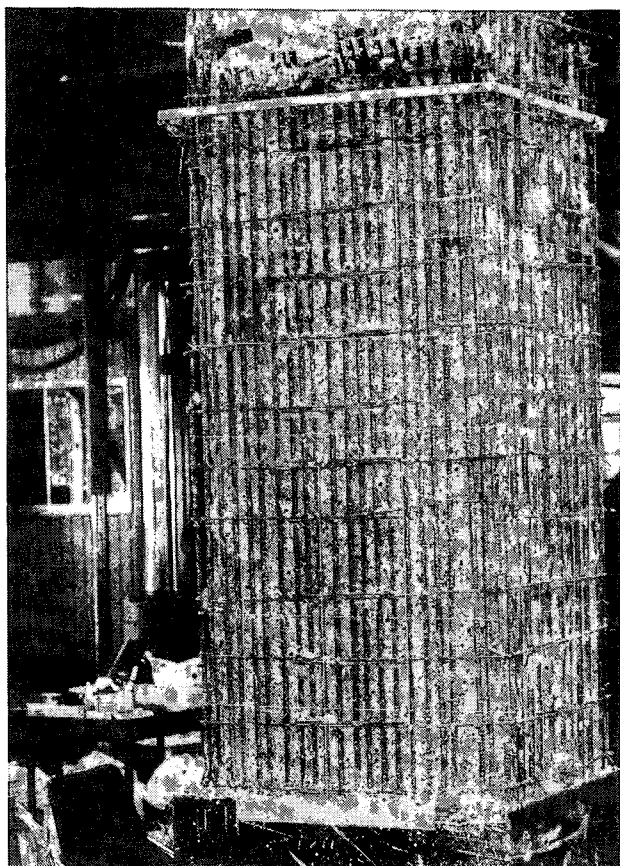


図-1.2 かぶりコンクリートはつり後の
腐食状況の観察結果 その4

B-1 (A面) 枠部拡大写真



写真-1.1 鉄筋腐食状況 (その1)



B-II (A 面)

腐食状況

B-II (C 面)

腐食状況

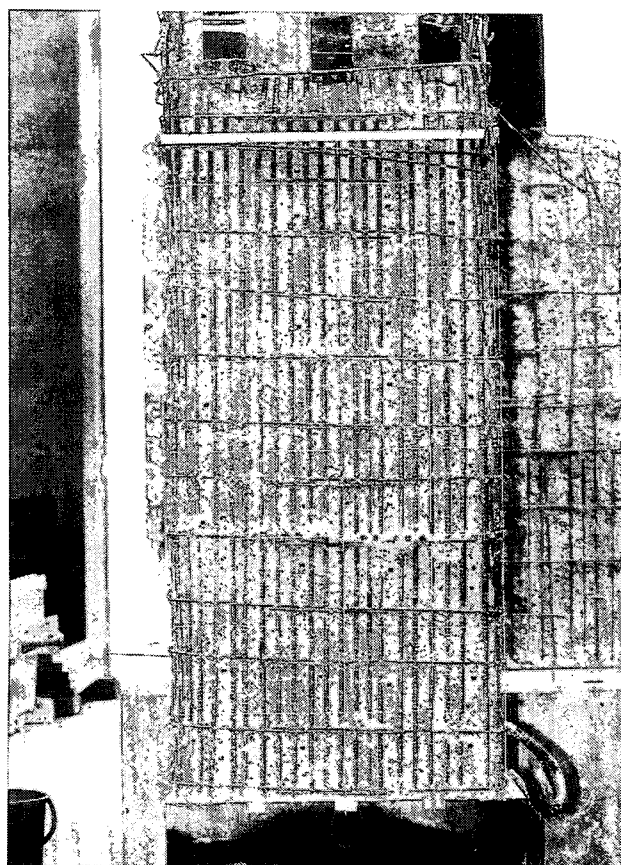


写真-1.1 鉄筋腐食状況 (その2)

B-2 供試体 A面上部の腐食状況

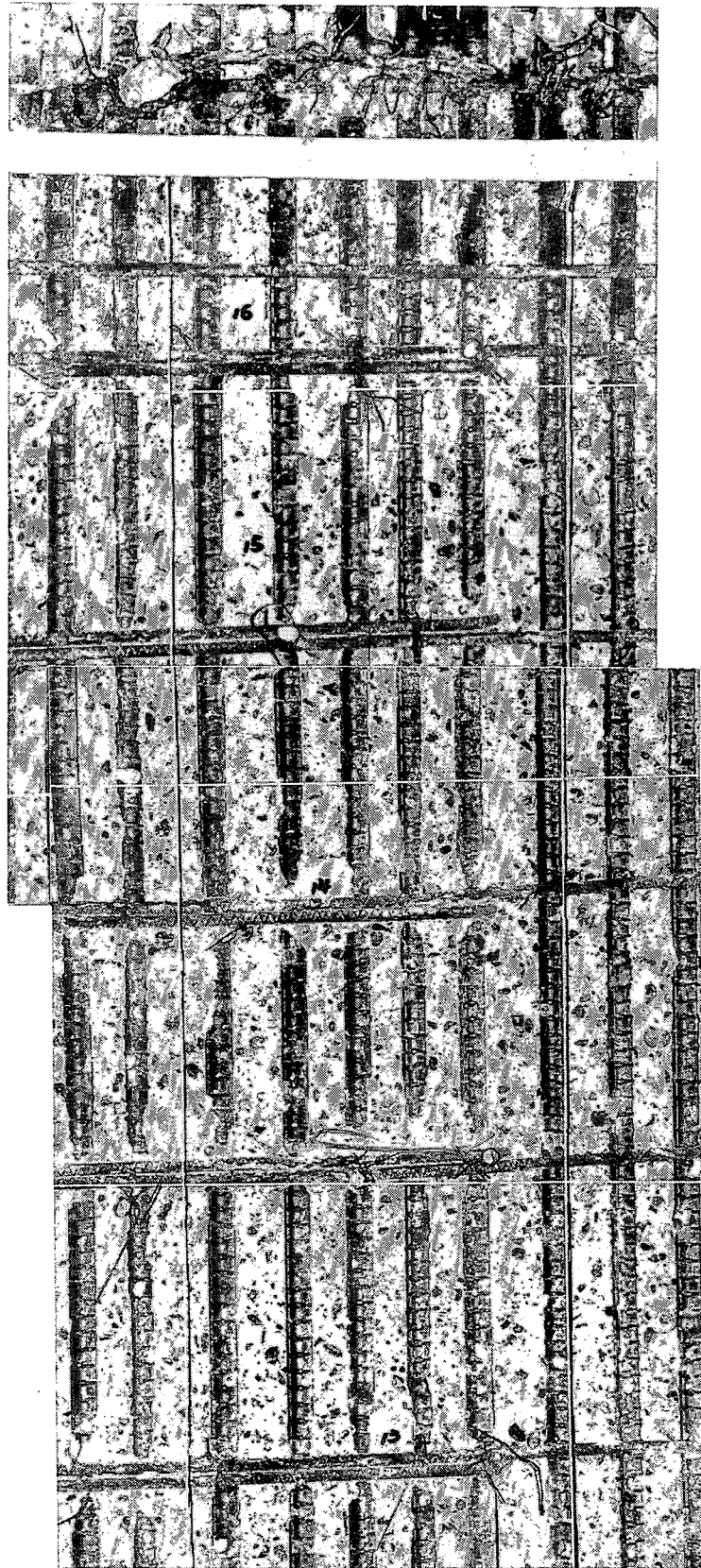


写真-1.1 鉄筋腐食状況（その3）

C 面上部の腐食状況

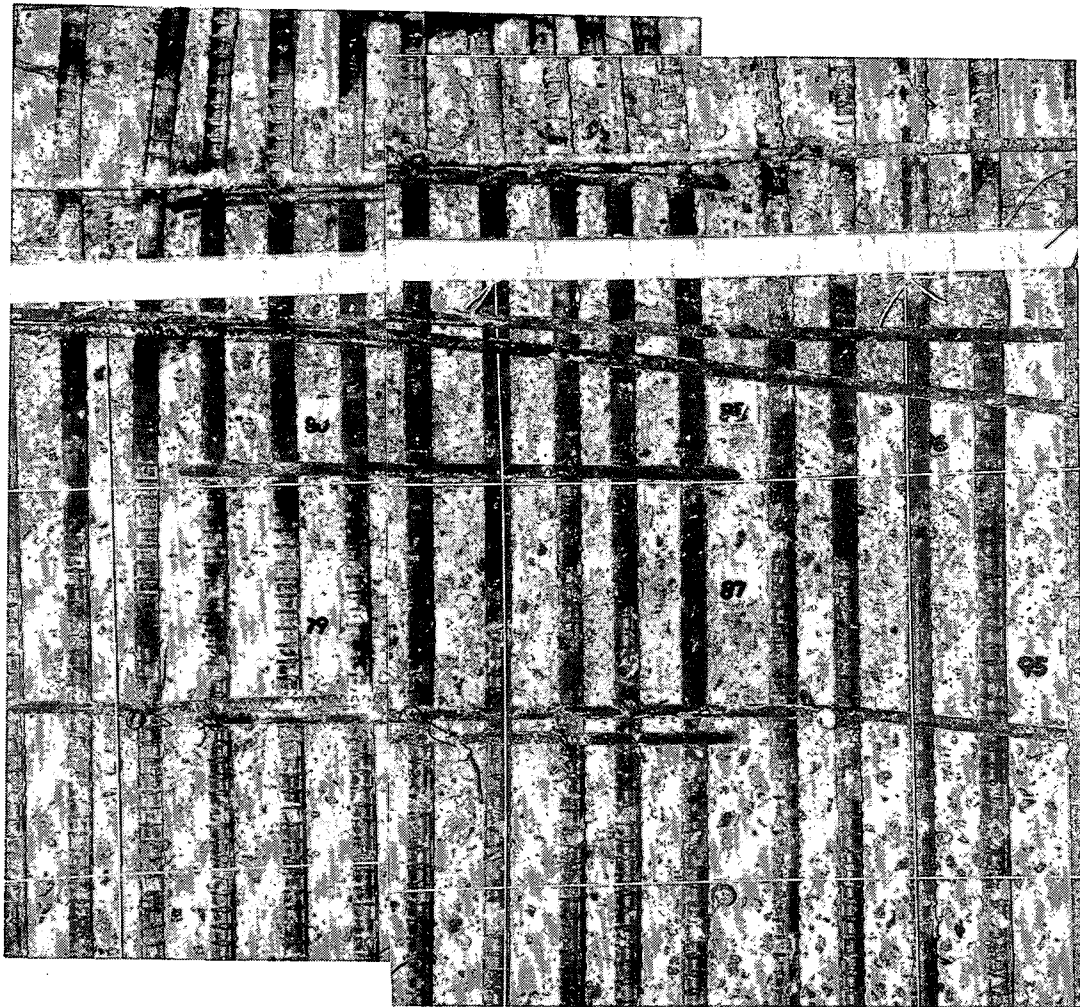


写真-1.1 鉄筋腐食状況（その4）

B-2 A面計測結果

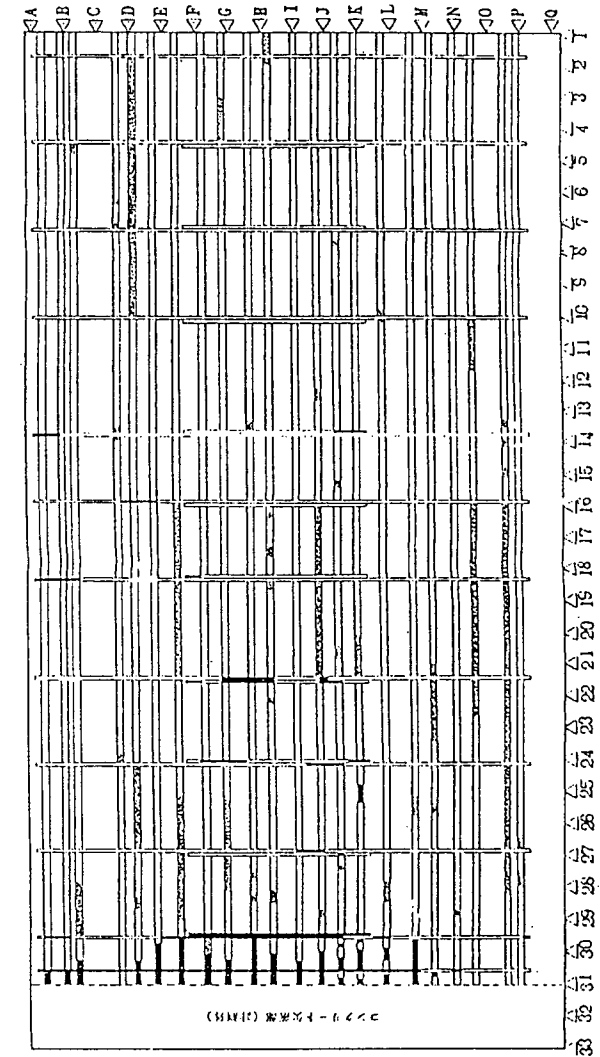
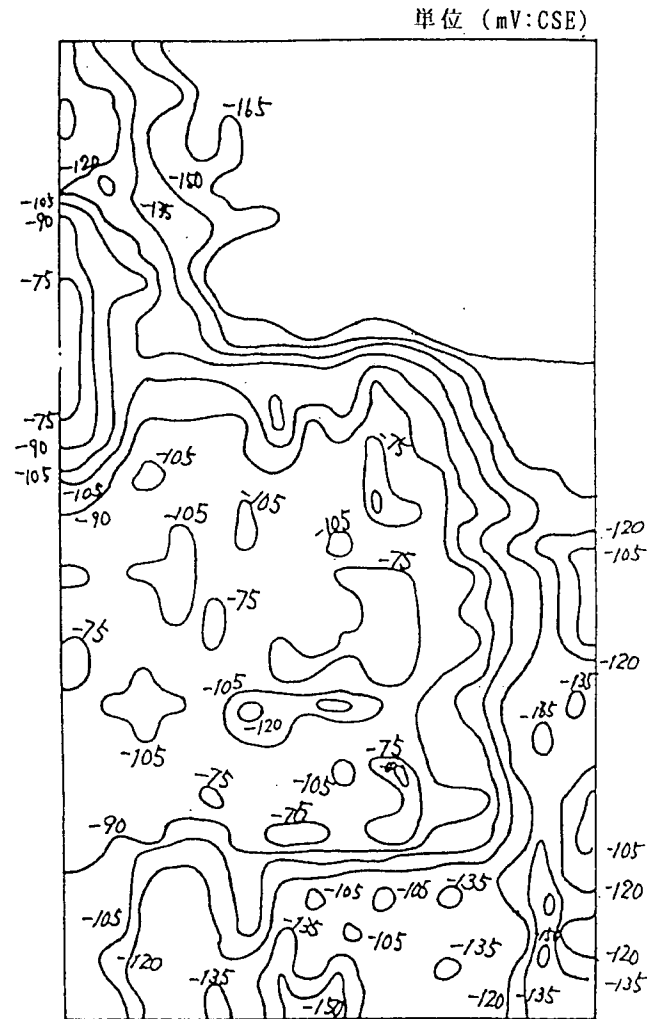
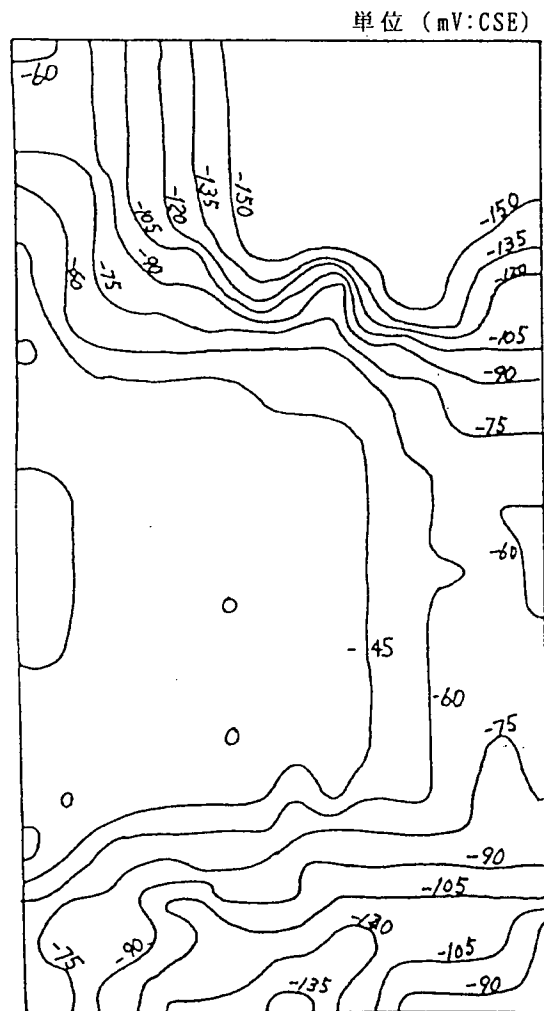


図-1.3 計 測 例 (その1)

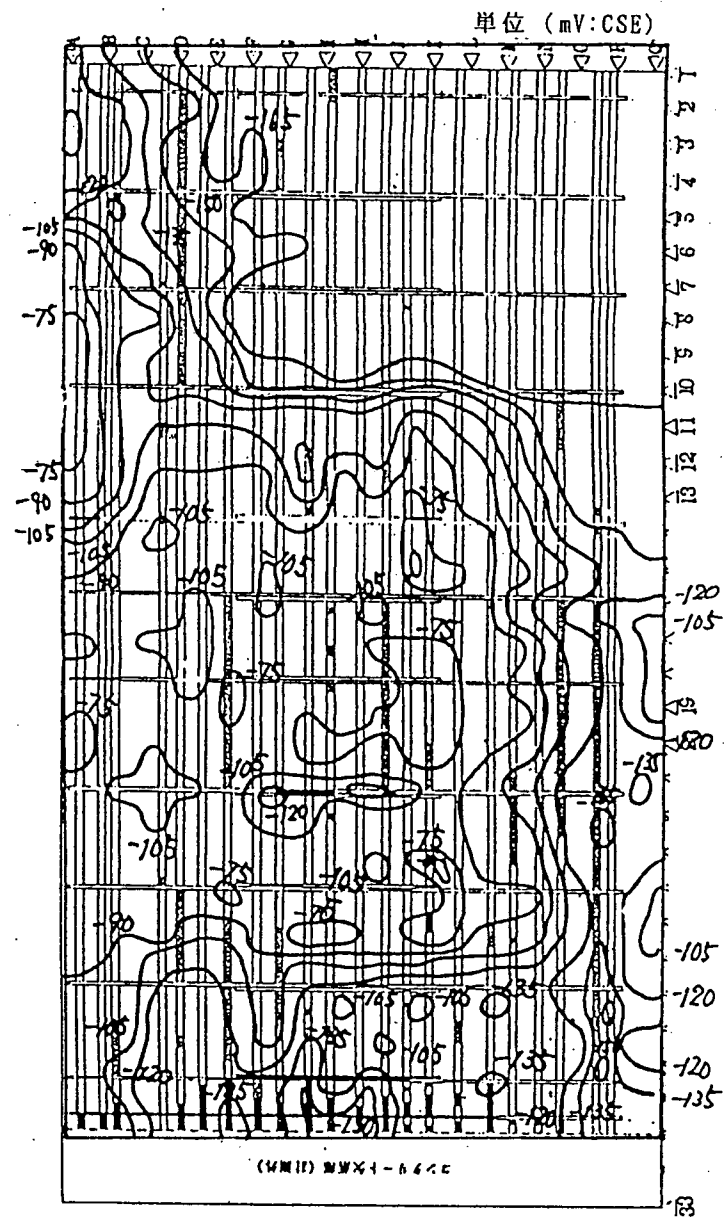
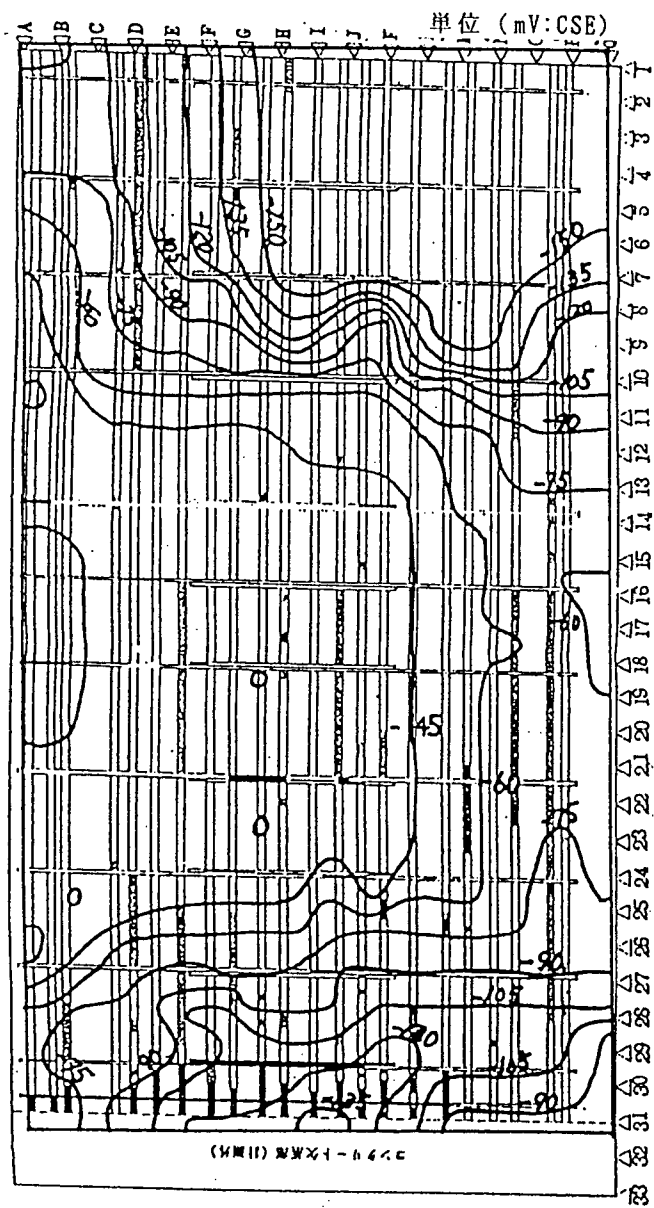


図-1.3 計 測 例 (その2)

B-2 A面計測結果

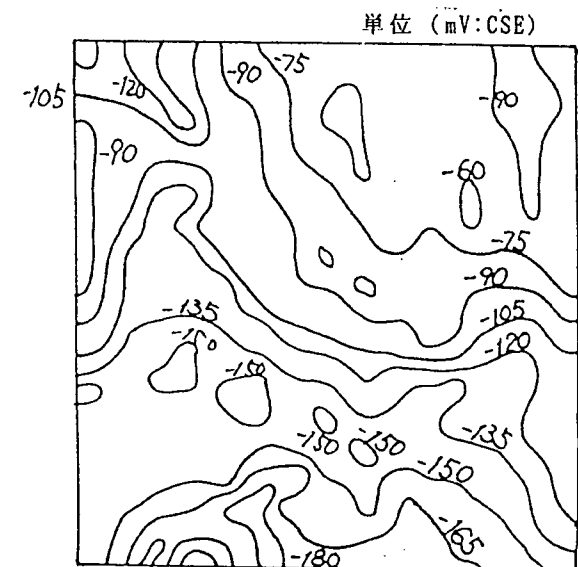
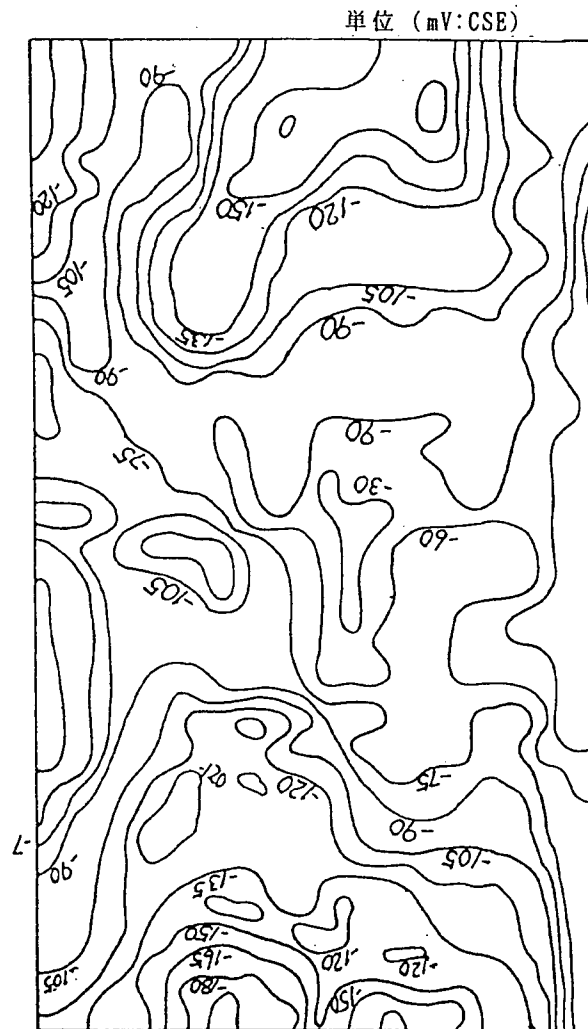
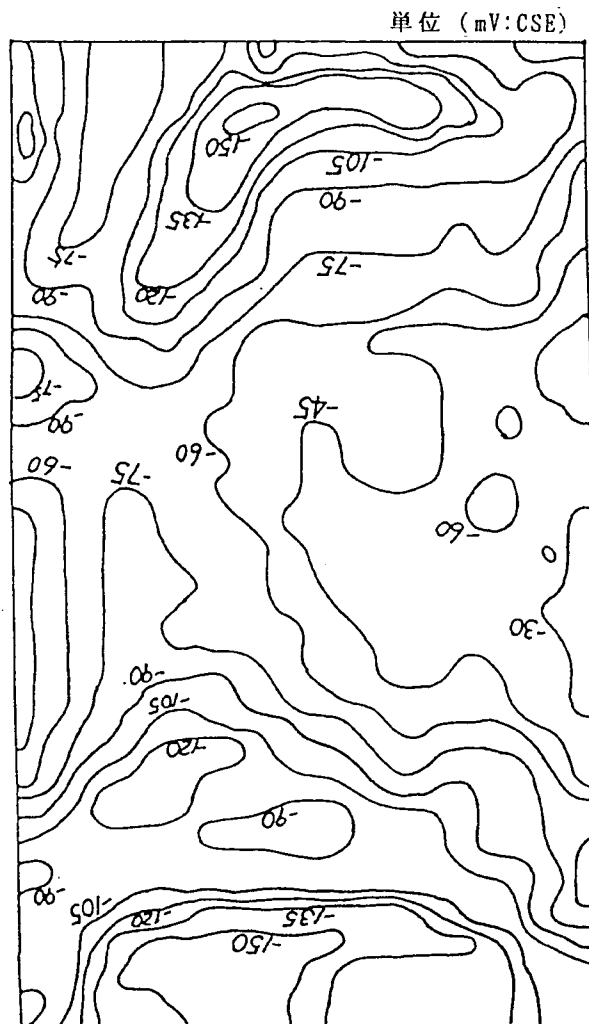


図-1.3 計 測 例 (その3)

B-2 C面計測結果

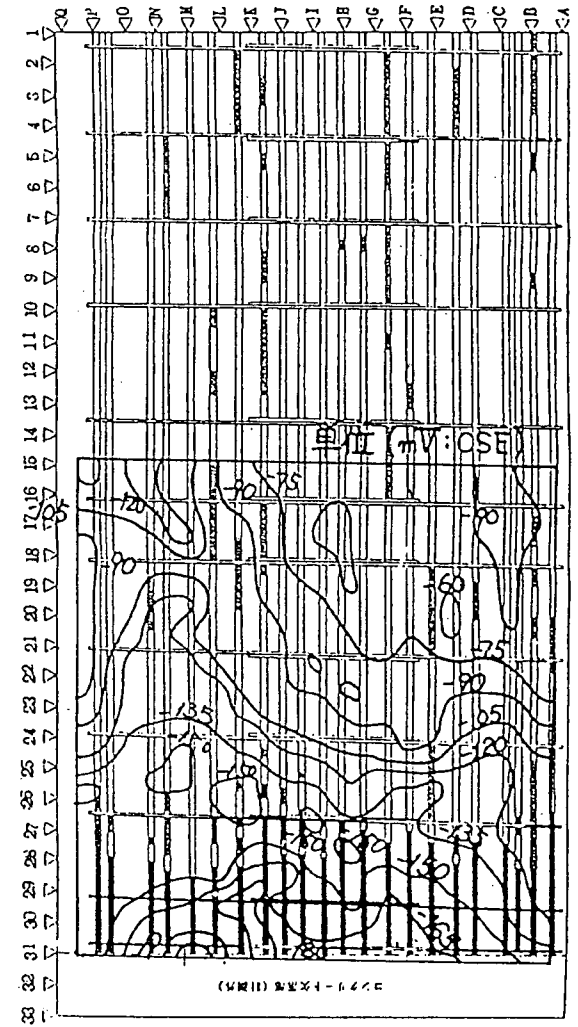
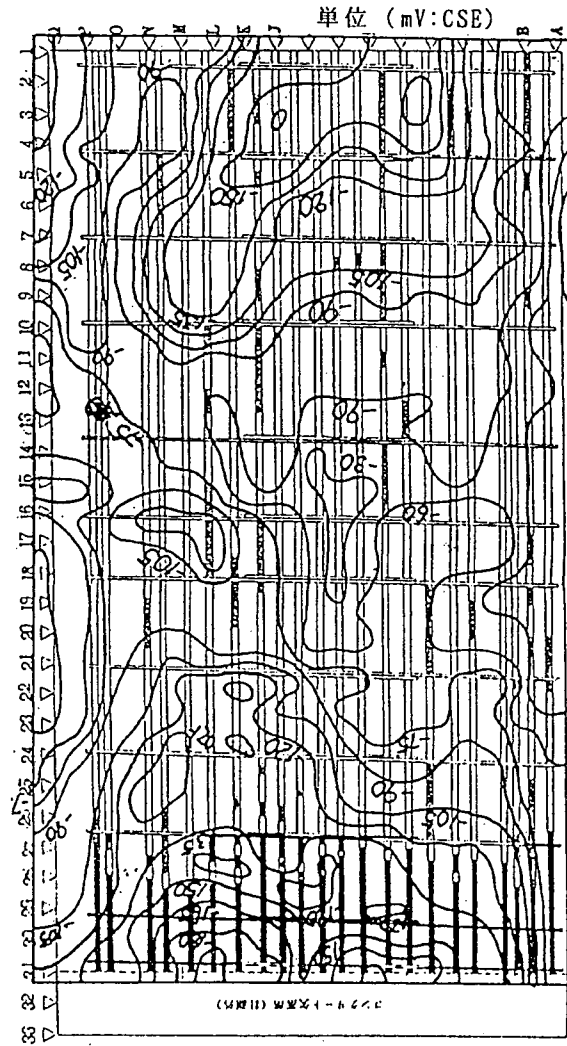
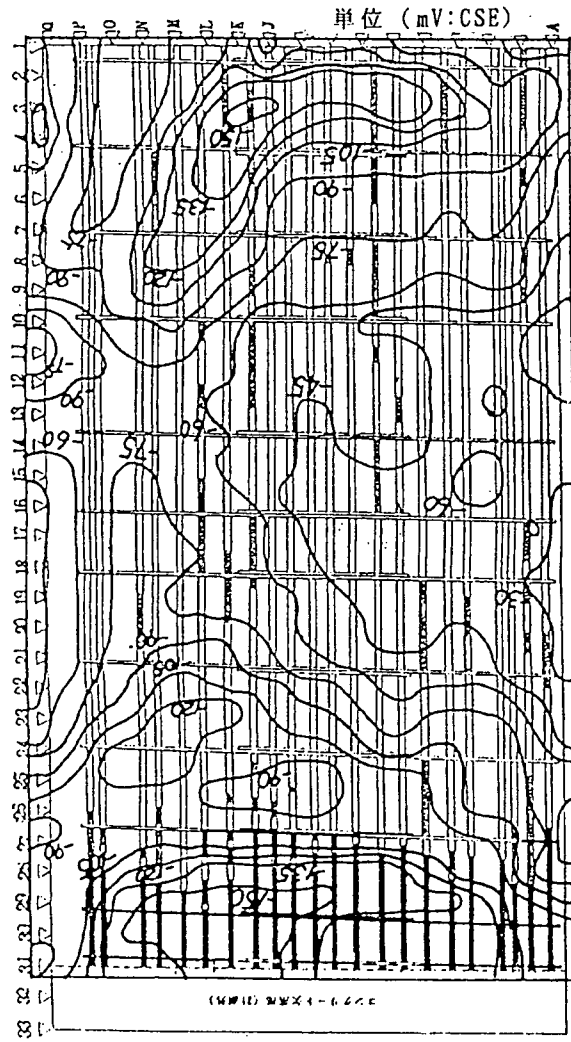
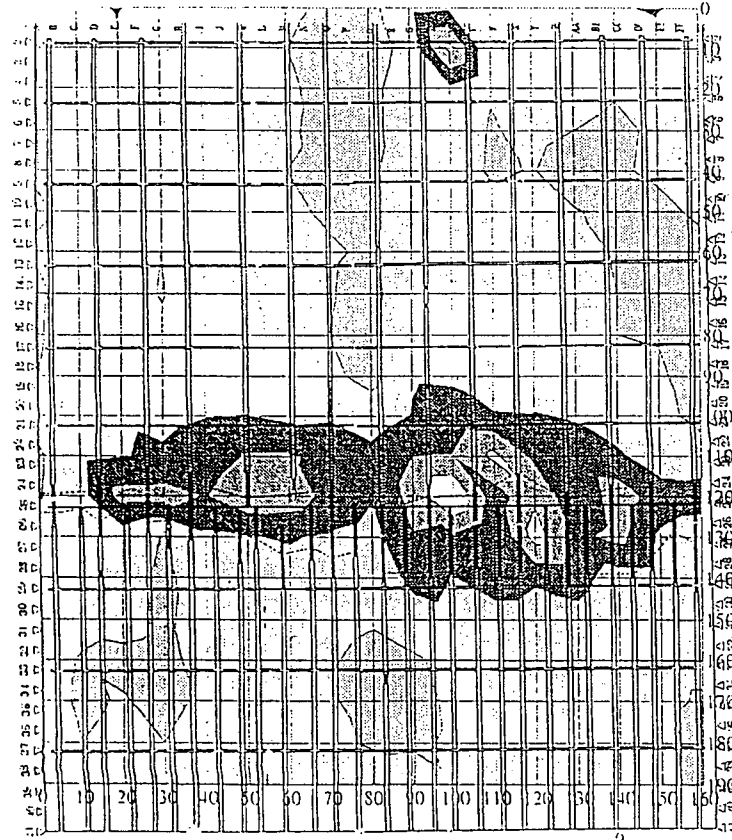


図-1.3 計 測 例 (その4)

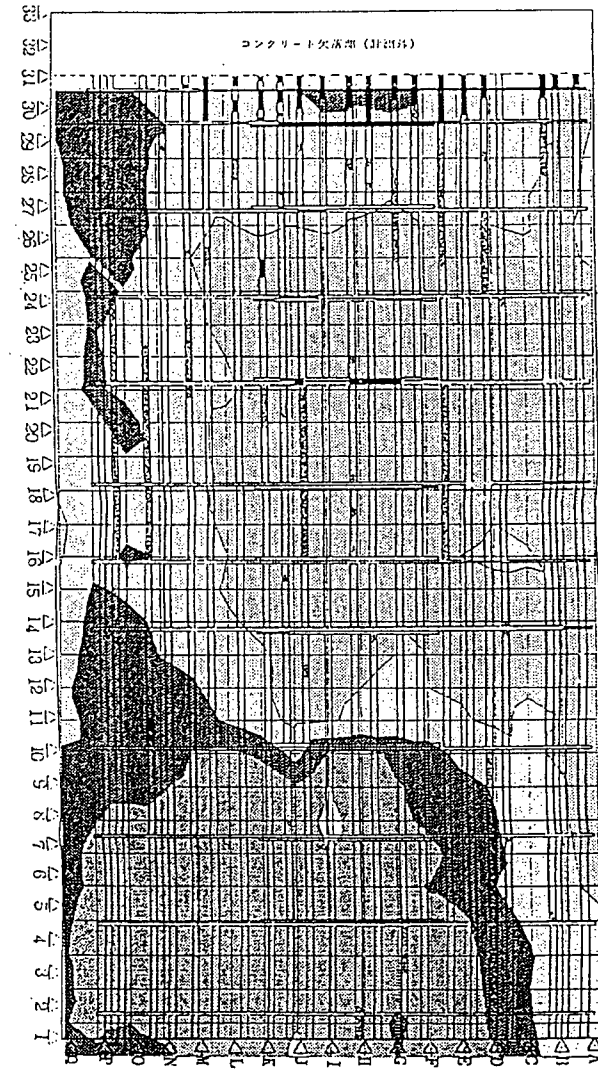
B-1 A 面



— -500--400 — -400--300 — -300--200 — -200--100 — -100-0

図-1.3 計 測 例 (その5)

B-2 A 面



— -300--250 — -250--200 — -200--150 — -150--100 — -100--50 — -50-0

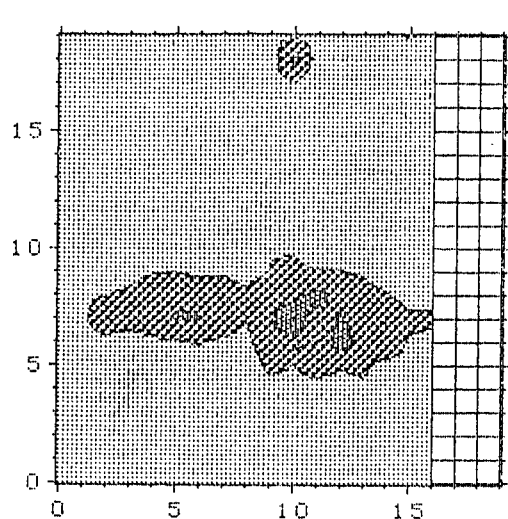
図-1.3 計 測 例 (その6)

表-1.2 自然電位データの一例(その1)

測定条件及び自然電位測定データ																					
測定条件		ASTM規格とBS規格																			
ファイル名	B1A10-1.TRD	自然電位と腐食確率の関係 基準電極：飽和硫酸銅電極																			
ファイル番号	00																				
測定日時	050224/01317	腐食 ランク	自然電位範囲 E (mV)	ASTM規格		BS規格															
追加測定日時	000000/0000			腐食確率 P (%)		腐食確率 P (%)															
測定番号	000	I	E > -200	90%以上の確率 で腐食なし		50%以上の確率 で腐食あり															
測定場所	DOKEN																				
測定間隔(cm)	10	II	200 ≥ E > -350	不確定		50%															
X 個数	20																				
Y 個数	05	III	350 ≥ E	90%以上の確率 で腐食あり		95%以上の確率 腐食あり															
電極	鉛																				
換算	硫酸銅	(IV)	350 ≥ E	約半数の供試体 にクラック発生																	
かぶり(mm)	035																				
ひび割れ	少ない																				
距離(km)	30																				
経過年数(Yr)	5																				
気象	晴れ																				
温度(℃)	10																				
電位差データ数	400																				
抵抗率データ数	0																				
塩分データ数	0																				
自然電位測定データ																					
換算電極：硫酸銅																					
電位補正值(mV) -85																					
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19 (X)	
19	-168	-168	-197	-158	-192	-153	-144	-70	-70	-173	-188	-158	-153	-192	-192	-207	-158	*	*	*	mV
18	-139	-158	-183	-105	-129	-105	-105	-17	-31	-144	-422	-114	-129	-163	-139	-178	-124	*	*	*	mV
17	-134	-153	-183	-144	-139	-134	-129	-46	-61	-168	-188	-109	-119	-134	-109	-144	-114	*	*	*	mV
16	-114	-134	-178	-129	-148	-144	-119	-61	-65	-168	-168	-90	-129	-100	-80	-114	-129	*	*	*	mV
15	-109	-124	-129	-109	-144	-119	-100	-70	-80	-158	-153	-85	-105	-51	-85	-119	-163	*	*	*	mV
14	-90	-124	-124	-109	-153	-114	-114	-90	-80	-153	-158	-144	-148	-105	-80	-70	-119	*	*	*	mV
13	-109	-129	-134	-100	-158	-134	-109	-109	-90	-148	-158	-178	-178	-144	-90	-70	-65	*	*	*	mV
12	-85	-139	-134	-95	-168	-144	-134	-105	-70	-163	-168	-148	-158	-134	-100	-75	-65	*	*	*	mV
11	-90	-158	-148	-114	-168	-139	-124	-100	-70	-183	-178	-119	-139	-158	-100	-90	-51	*	*	*	mV
10	-100	-158	-168	-163	-163	-148	-129	-119	-70	-192	-188	-100	-153	-158	-105	-124	-17	*	*	*	mV
9	-134	-178	-192	-178	-197	-202	-178	-188	-148	-207	-236	-217	-207	-192	-139	-139	-61	*	*	*	mV
8	-109	-178	-197	-212	-246	-310	-310	-275	-231	-300	-305	-422	-275	-241	-217	-148	-158	*	*	*	mV
7	-95	-173	-334	-339	-295	-373	-354	-266	-207	-334	-500	-246	-383	-217	-358	-246	-236	*	*	*	mV
6	-148	-158	-158	-95	-183	-197	-207	-188	-168	-295	-285	-197	-437	-280	-329	-188	-153	*	*	*	mV
5	-163	-134	-124	-80	-153	-168	-173	-158	-114	-241	-197	-266	-217	-231	-158	-158	-129	*	*	*	mV
4	-144	-119	-129	-85	-139	-163	-168	-144	-114	-144	-173	-148	-144	-178	-124	-148	-114	*	*	*	mV
3	-124	-95	-80	-70	-144	-148	-144	-109	-56	-90	-124	-144	-134	-163	-134	-124	-124	*	*	*	mV
2	-124	-90	-105	-75	-119	-139	-144	-114	-22	-70	-119	-129	-114	-139	-109	-119	-90	*	*	*	mV
1	-124	-100	-114	-100	-144	-139	-158	-129	-80	-85	-114	-134	-114	-158	-119	-134	-56	*	*	*	mV
0	-119	-129	-153	-144	-168	-144	-178	-144	-197	-148	-109	-129	-129	-183	-139	-139	-51	*	*	*	mV
(Y)																					

表-1.2 自然電位データの一例(その2)

A S T M分割による自然電位分布図

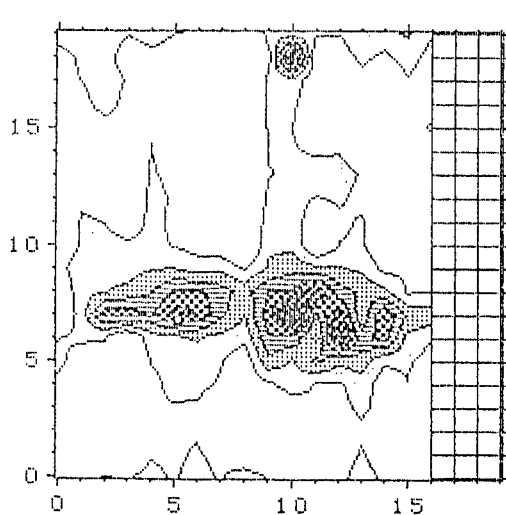


ファイル名 B1A10-1.TRD
 ファイル番号 00
 測定日時 050224/01317
 追加測定日時 000000/0000
 測定番号 000
 測定場所 DOKEN

換算電極 硫酸銅
 電位最大値(mV) -17
 電位最小値(mV) -500
 電位補正值(mV) -85
 有効データ数 340
 分割形式 準ASTM分割

電位度数分布		度数	指定率(%)
分布範囲(mV)			
0 < 電位		0	0.0
-200 < 電位 ≤	0	296	87.0
-350 < 電位 ≤	-200	36	10.6
-500 < 電位 ≤	-350	7	2.1
電位 ≤	-500	1	0.3

任意分割による自然電位分布図



ファイル名 B1A10-1.TRD
 ファイル番号 00
 測定日時 050224/01317
 追加測定日時 000000/0000
 測定番号 000
 測定場所 DOKEN

換算電極 硫酸銅
 電位最大値(mV) -17
 電位最小値(mV) -500
 電位補正值(mV) -85
 有効データ数 340
 分割形式 自在分割

電位度数分布		度数	指示率(%)
分布範囲(mV)			
-150 < 電位		205	60.1
-200 < 電位 ≤	-150	91	26.8
-250 < 電位 ≤	-200	20	5.9
-300 < 電位 ≤	-250	8	2.4
-350 < 電位 ≤	-300	8	2.4
-400 < 電位 ≤	-350	4	1.2
-450 < 電位 ≤	-400	3	0.9
電位 ≤	-450	1	0.3

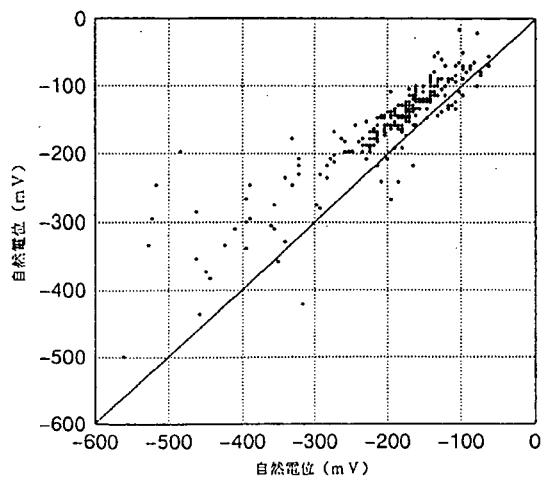


図-1.4.1 同一機器での測定結果(同一試験者)

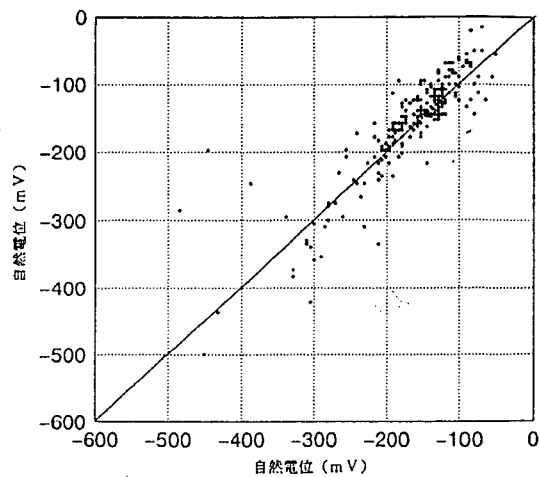


図-1.4.2 同一機器での測定結果(異なる試験者)

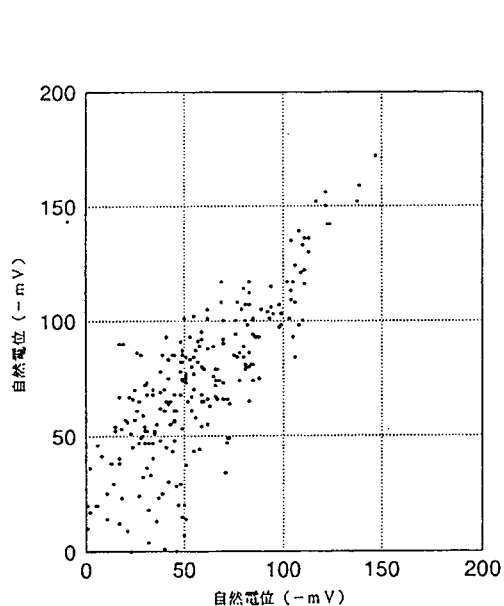


図-1.4.3 同一機器での測定結果
(異なる試験者)

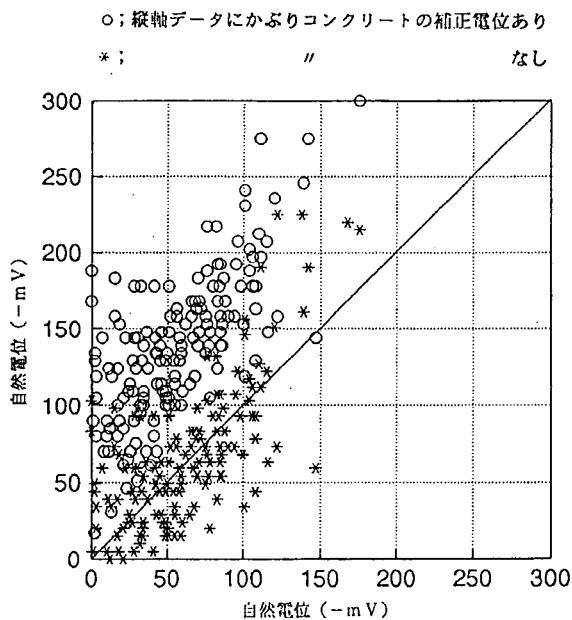


図-1.5 異なる機器で異なる
試験者が行った測定結果

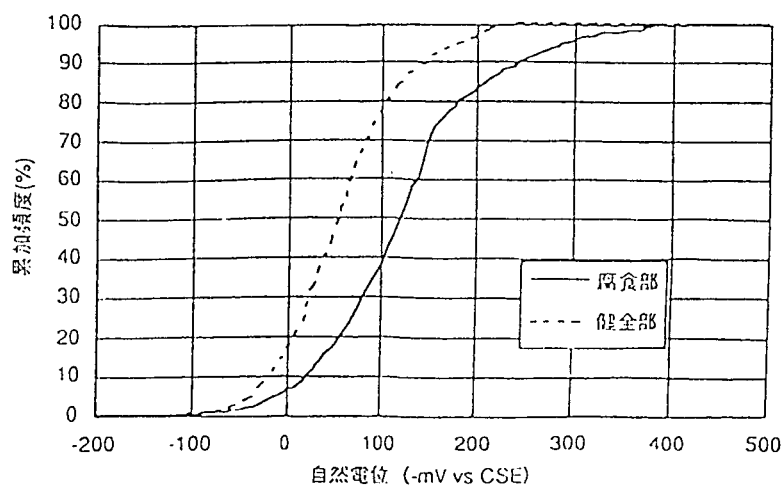
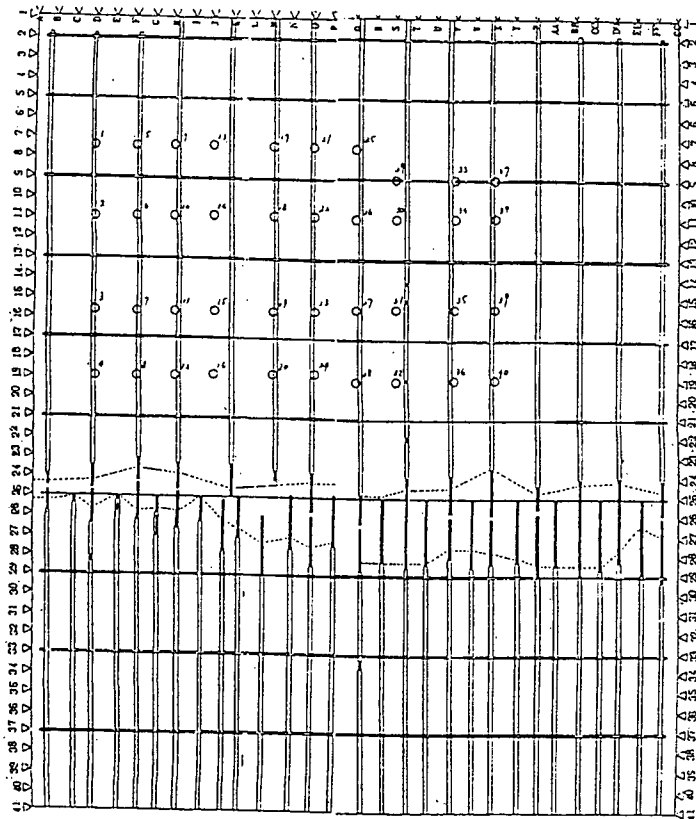
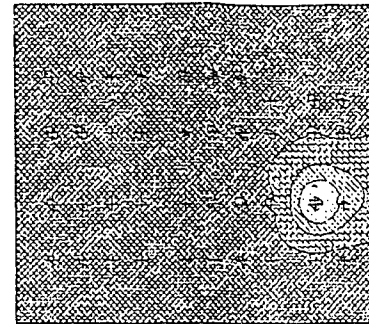


図-1.6 累加頻度図

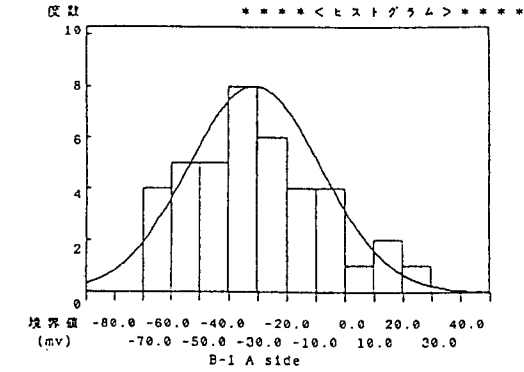
腐食状況及び測定点



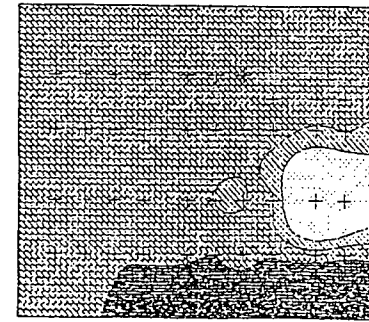
自然電位測定結果



供試体B-1の電位分布図



分極抵抗測定結果



供試体B-1の分極抵抗(Rp)の分布図

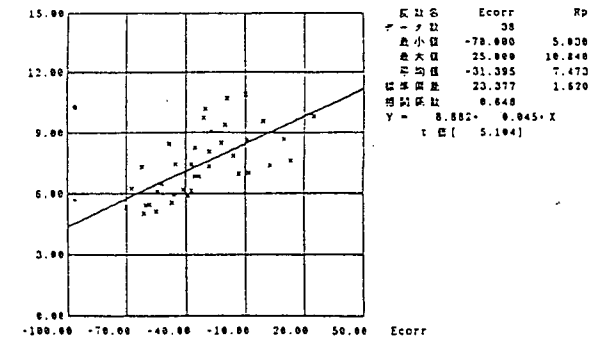
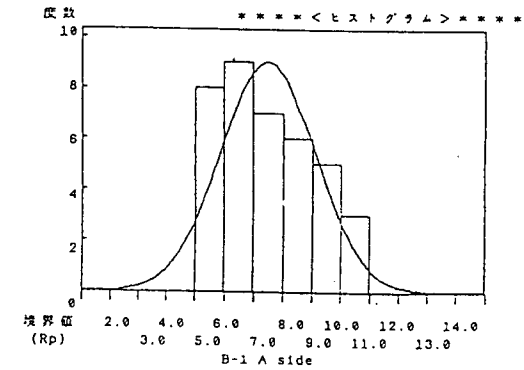
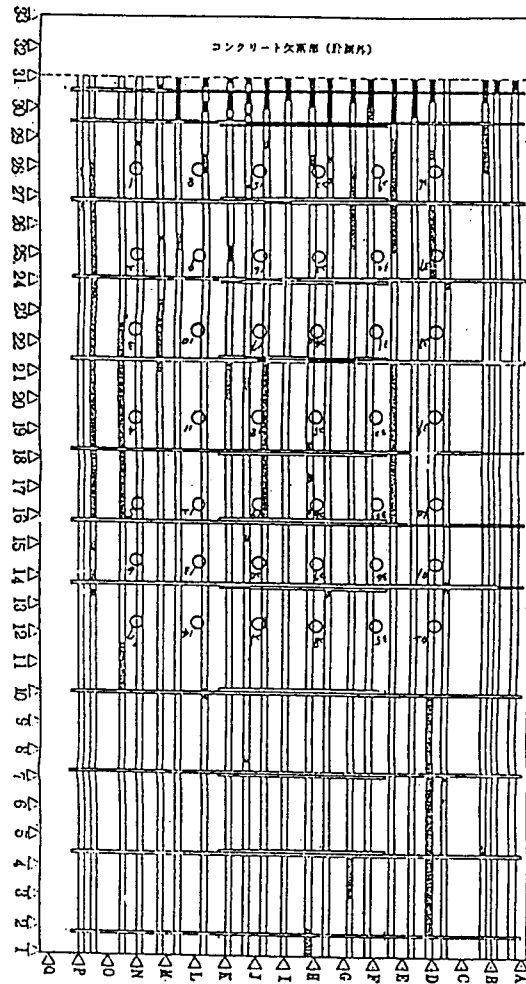
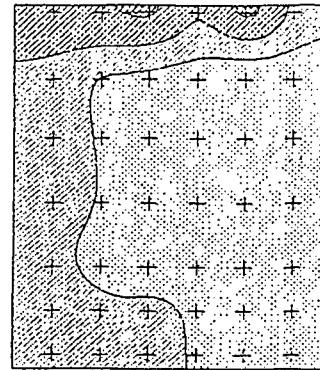


図-1.7.1 B-1 供試体A面試験結果

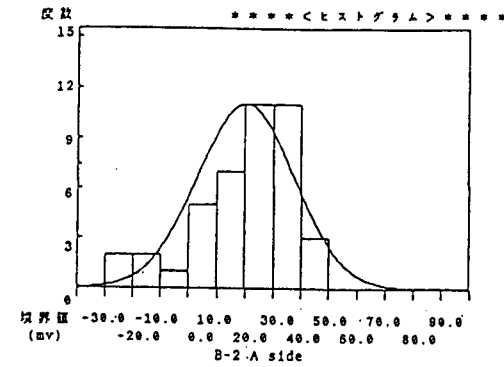
腐食状況及び測定点



自然電位測定結果



20mV vs Ag/AgCl
0 20
2000
図2

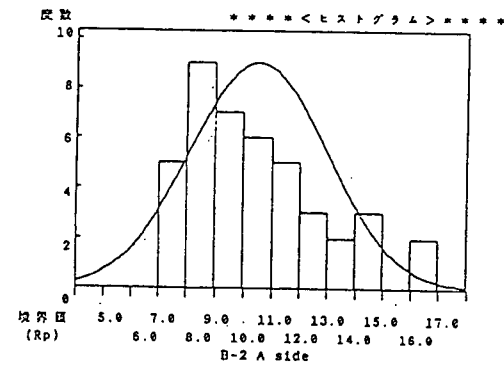


図数番号	1
図数名	Ecorr
図数	42
最小値	-23.000
最大値	43.000
平均値	20.048
標準偏差	17.185
ひずみ	-0.953
とがり	0.448

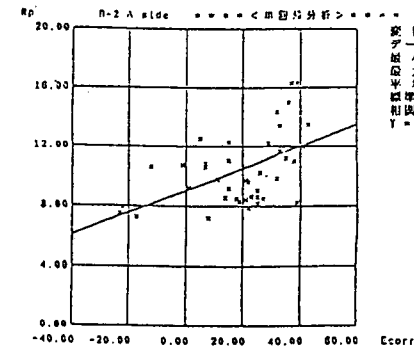
分極抵抗測定結果



10kΩ
15
2000
図3



図数番号	2
図数名	Rp
図数	42
最小値	7.180
最大値	16.300
平均値	10.500
標準偏差	2.429
ひずみ	0.769
とがり	-0.104



図数番号	3
図数名	Rcorr
図数	42
最小値	-23.000
最大値	43.000
平均値	20.048
標準偏差	17.185
相関係数	0.326
Y = 9.010 + 0.074 * X	
t 検定	3.911

図-1.7.2 B-2 供試体A面試験結果

付録－2 鉄筋位置の非破壊試験計測結果

1. 供試体の概要

供試体は全部で3体であり、それぞれ表－2.1に示す特徴を有する。各供試体の配筋状況を図－2.1に示す。

2. 計測手法

計測は電磁波反射法および電磁誘導法により行った。

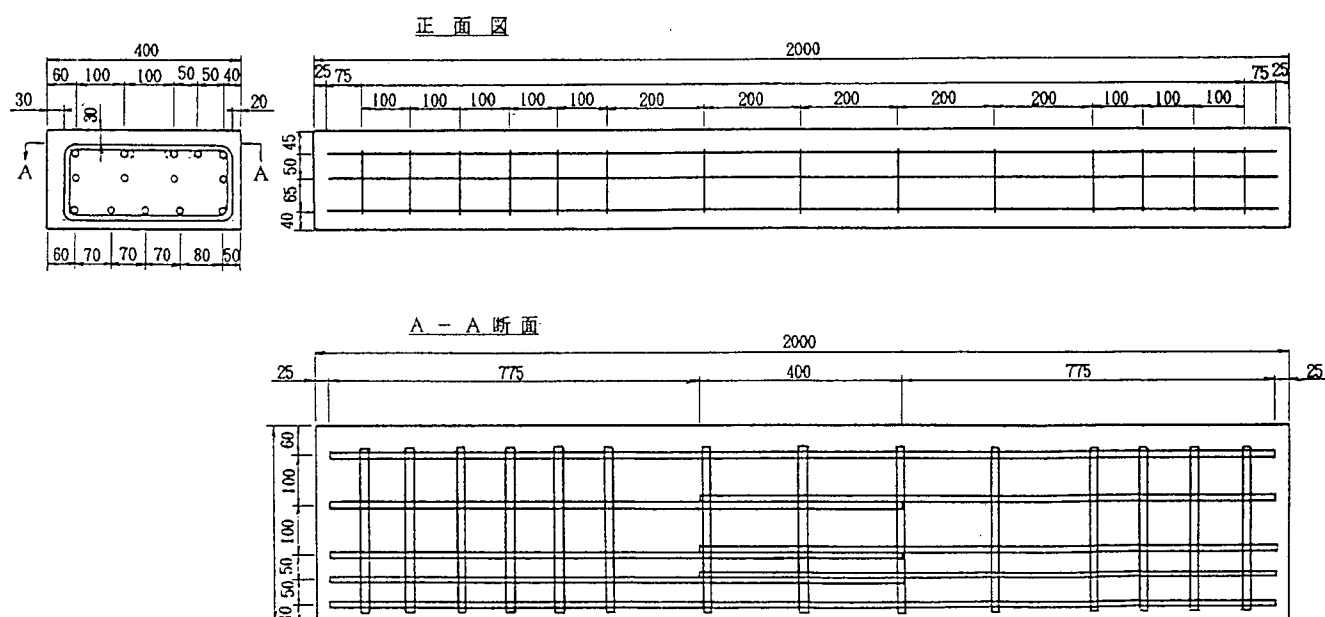
計測方法を表－2.2に示す。

表－2.1 供試体の特徴

供試体番号	特 徴
供試体A1	一般のはり形状の構造部材に現れる配筋状態。かぶりは30mm。主鉄筋間隔は最低で50mm。スターラップは100mm～300mm。重ね継手あり。
供試体A2	一般のRC床版で現れやすい配筋状態。橋軸直角方向はD19、橋軸方向はD16、鉄筋間隔は150mm程度であることを考慮。
供試体A3	一般のポステンPCはり部材に現れやすい配筋状態。かぶりは35軸mm。方向鉄筋の間にPC鋼材が入っている。(供試体では、38mm鉄筋を配筋することによりこの状況を模擬的に再現した) 主隔筋間は100mm程度

表－2.2 計測手法

測定方法	番号
電磁波反射法	①
電磁誘導法	②
電磁誘導法	③
電磁波反射法	④



図－2.1 A-1 供試体配筋図(その1)

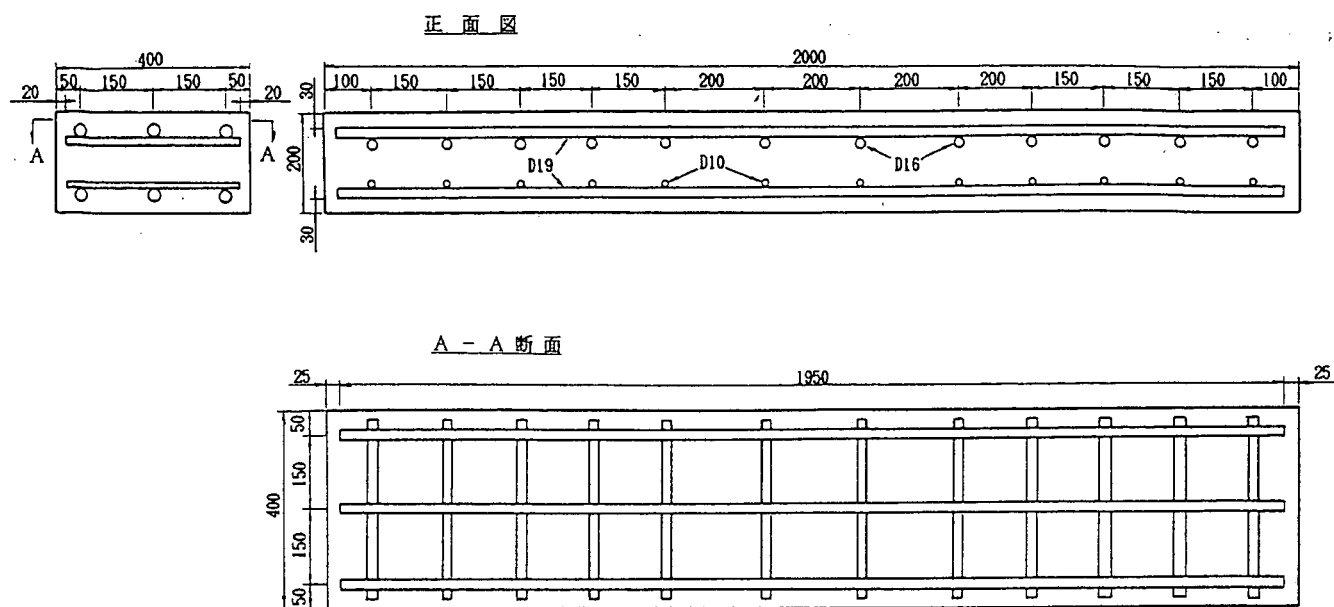


図-2.1 A-2 供試体配筋図(その2)

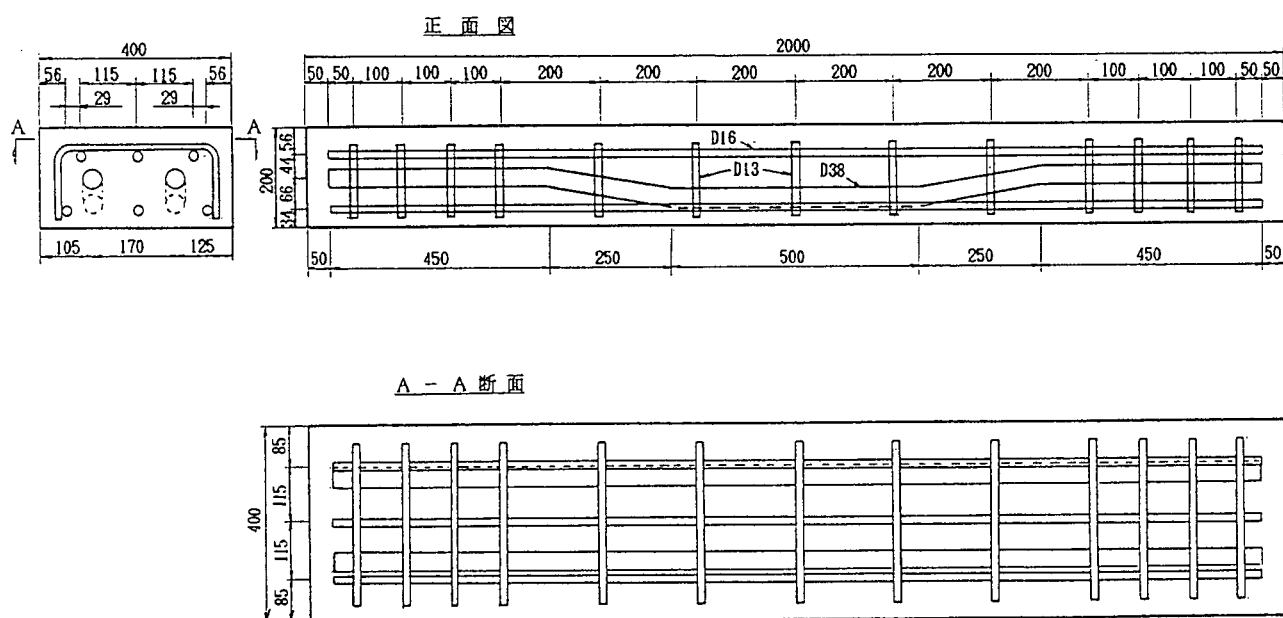


図-2.1 A-3 供試体配筋図(その3)

3. 測定結果

3.1 鉄筋位置の測定結果

各計測方法による鉄筋位置の測定結果を図-2.2に示す。ここで、横軸は鉄筋位置の誤差、縦軸はそれ以内の誤差が出た頻度を示す。図中には各区間に2つの頻度が存在しているが、左は鉄筋中心位置から測定した誤差、右は鉄筋側面から測定した誤差である。その定義から、鉄筋側面から測定した誤差の方が小さくなっている。各計測間には誤差の出方に差があるが、おおよそ10mm以内に収まっていることが分かる。ここで、鉄筋位置の測定誤差が大きくなっている箇所について検討を行う。図-2.3は鉄筋のかぶりと、鉄筋位置の測定誤差について示したものである。ここで、白抜きの点はレーダー法によるもの網掛けの点は電磁誘導法によるものである。かぶりの大きいものの方が鉄筋位置の測定誤差が大きくなっている傾向にも見えるがかぶりが80mm以上のところでは誤差は小さくなって必ずしもその傾向は明確ではなかった。一方、図-2.4は鉄筋中心間隔と鉄筋位置の誤差の関係を示したもので、左が電磁誘導法によるもの、右が電磁波反射法によるものである。この図から、鉄筋間隔が小さくなるほど鉄筋位置の測定誤差は大きくなっている。これは、これまでの指摘と一致しており、鉄筋間隔の密なところでの鉄筋位置の測定の難しさを示しているといえる。また、この傾向はいずれの測定手法を用いても同じであることが分かる。いずれも、鉄筋間隔が100mm以内になると、安定した測定結果が得られない場合が多くなると考えらる。

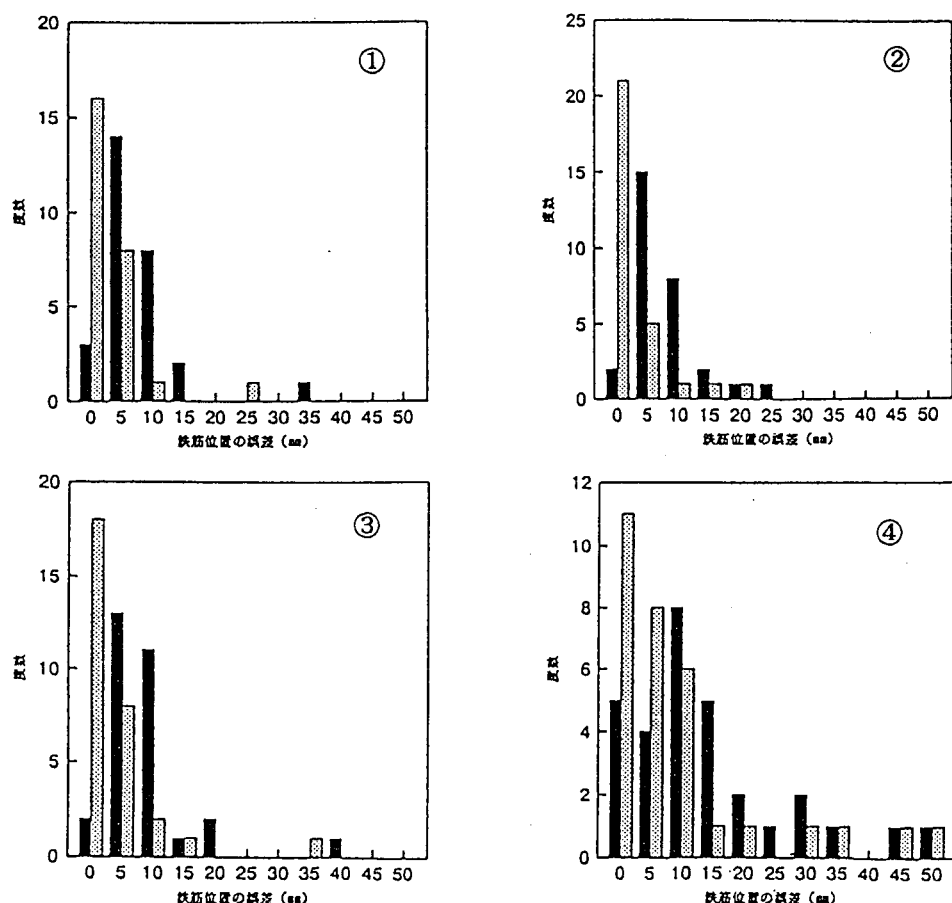


図-2.2 位置測定誤差

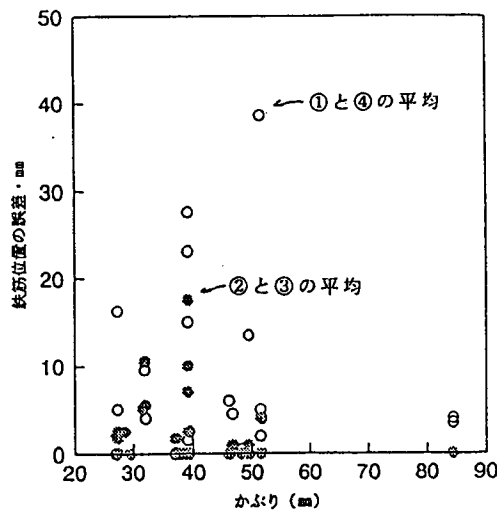


図-2.3 かぶりと位置測定誤差の関係

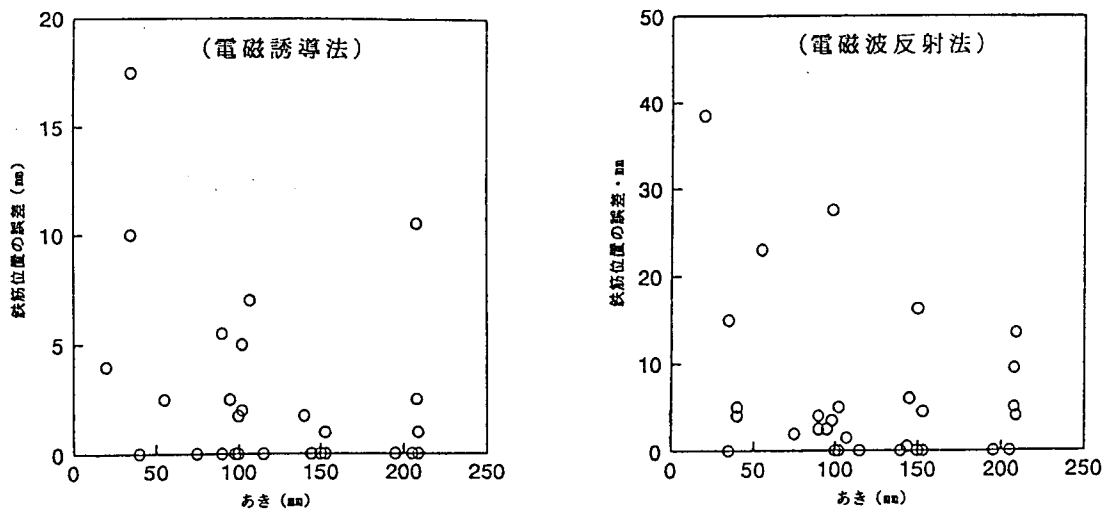


図-2.4 鉄筋間隔と位置測定誤差の関係

3.2 鉄筋かぶりの計測誤差

鉄筋かぶりの計測結果を図-2.5に示す。①および④を除いてかぶりの測定誤差はほぼ $\pm 10\%$ 以内に入っていた。ここでは、3.1と同様、かぶりの誤差と鉄筋間隔の関係について検討することとする。鉄筋間隔とかぶり誤差の関係を図-2.6に示す。やはり、鉄筋間隔が狭いほど計測誤差は大きくなっていることが分かる。図中、鉄筋間隔があまり小さくなくても、鉄筋かぶりの測定誤差が大きくなっている箇所が見受けられる。このデータは、供試体A-2の横方向鉄筋を測定した点を表すものである。ここでは、鉄筋間隔があまり狭くなく、また、配筋状態も縦横に単純に配置されている箇所であり、計測誤差がなぜ大きくなったか、その理由が明確にできなかった。

鉄筋間隔が小さくても、かぶりが小さければ隣接する鉄筋の影響はあまり大きくならないと考えられる。このことを考慮し、ここでは鉄筋のあきをかぶりで除して無次元化し、この無次元化したあきに対するかぶりの測定誤差について調査した。この結果を、図-2.7に示す。この結果から、あきを無次元化しても同様の関係が得られていることが分かる。

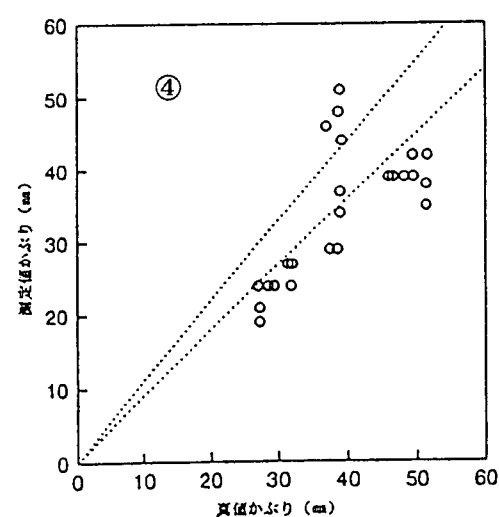
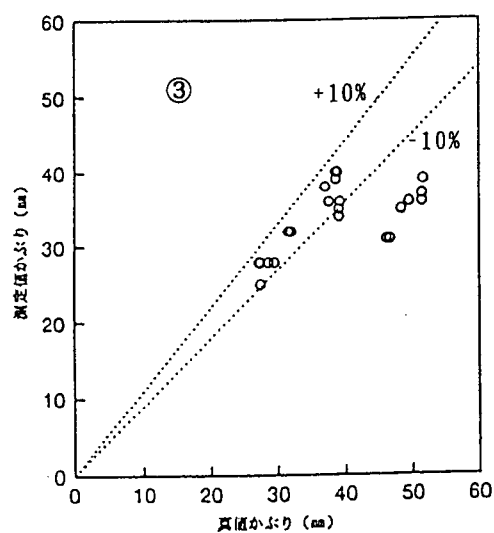
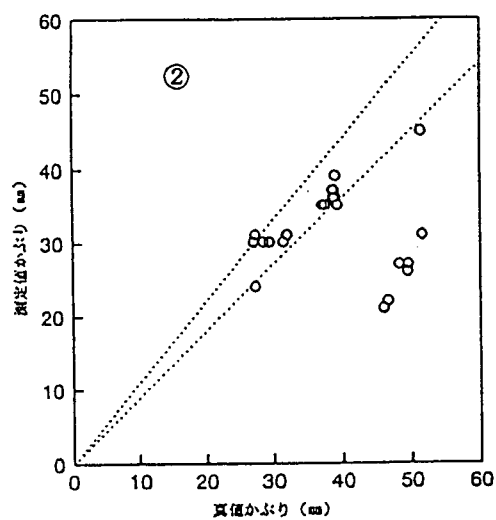
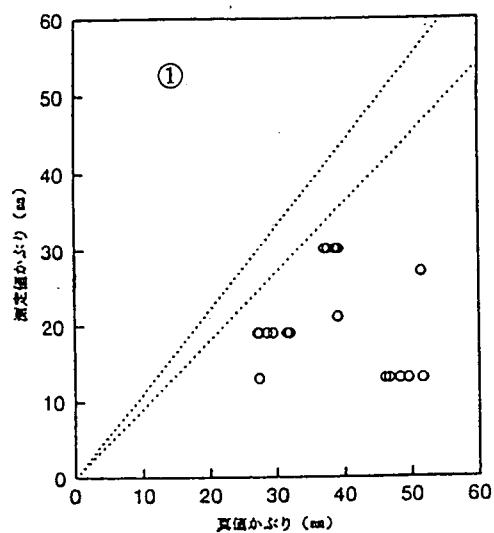


図-2.5 かぶりの真値と測定値の比較

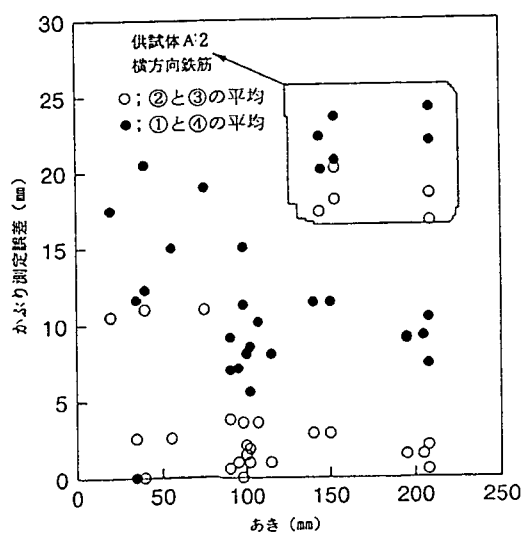


図-2.6 あきとかぶり測定誤差の関係

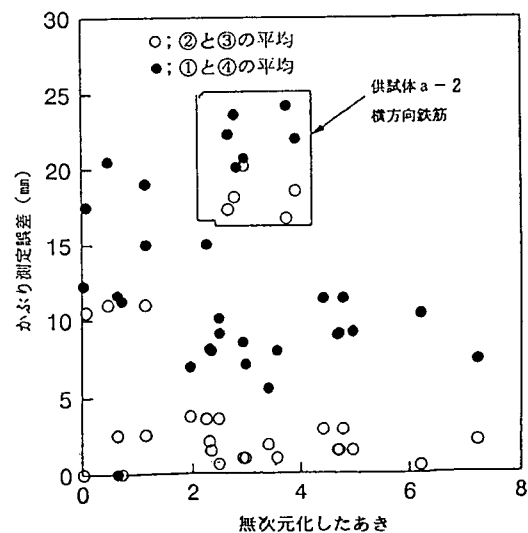


図-2.7 無次元化したあきとかぶり誤差の関係

4. ま と め

- 1) 今回の計測結果からすると電磁誘導法によった方が計測誤差は小さくなっていた。
- 2) 鉄筋の位置の誤差は10mm程度となっているが、鉄筋間隔が小さくなると位置の推定誤差は大きくなる傾向が認められた。
- 3) 鉄筋のかぶりの推定誤差は $\pm 10\%$ 程度にはば取まっていた。
- 4) 鉄筋のかぶりの測定誤差も鉄筋間隔が狭いほど大きくなっていた。この関係を一般化するため、鉄筋のあきをかぶりで除して無次元化して表しても、同様の結果が得られることが分かった。

付録－3 ひび割れ深さの試験計測結果

1. 概 要

超音波伝播時間の計測をもとにひび割れ深さを推定する方法は、BS法、修正BS法、Tc-To法といった形で提案され、実務へも応用される等、実績も上がりつつあるが、不明確な点もまだあるのが現状である。問題点のいくつかを列挙すると、

- 1) 超音波伝播時間や探触子配置距離の誤差が、ひび割れ深さ評価結果にどの程度誤差を及ぼすのか
- 2) 探触子からひび割れ位置までの距離として、探触子のどの位置を採用すれば良いか
- 3) BS法、修正BS法、Tc-To法いずれも同一の原理に基づいているが、それぞれの長所短所があるか
- 4) 実構造物は鉄筋が入っているが、鉄筋の影響はどの程度存在するか

が明確でないことが挙げられる。ひび割れ深さの計測を実施するに当たっては少なくとも以上の点について明らかにしておかなければ、適切な計測は行われないものと考えられる。

ここでは、超音波伝播時間の計測に基づいてひび割れ深さを推定する場合の上記の問題点を明らかにするため、人工ひび割れを導入した供試体を用いて試験計測を行い、その結果をとりまとめた。

また、直角回折波法による計測も実施し、計測誤差の程度について調査を行った。

2. 実験方法の概要

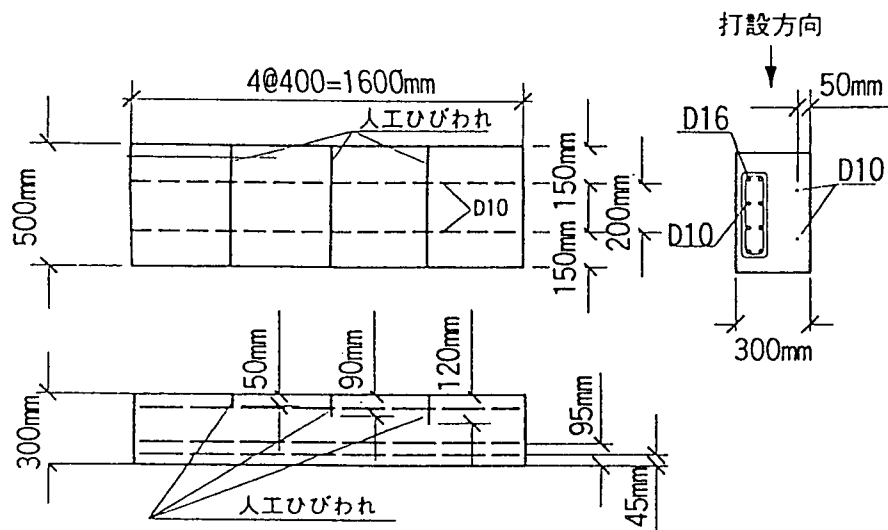
2.1 試験供試体の概要

供試体は全部で4体であり、それぞれの供試体には3本ずつ人工ひび割れを導入している。各供試体の諸元ならびにひび割れ深さを図－3.1に示す。また供試体の特徴を表－3.1に示す。

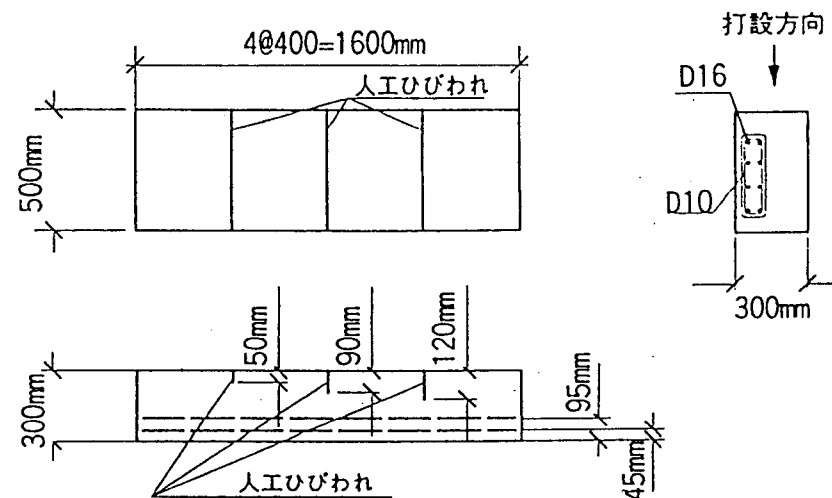
表－3.1 各供試体の特徴

供試体番号	各 供 試 体 の 特 徴
1	鉄筋入り供試体(D10)鉄筋は2本で鉄筋の影響を受けやすい。
2	鉄筋入り供試体(D10)鉄筋は1本で場所により鉄筋の影響は異なる。
3	無筋供試体
4	鉄筋入り供試体(D25)鉄筋は部分的に2本。場所により鉄筋の影響は異なる。

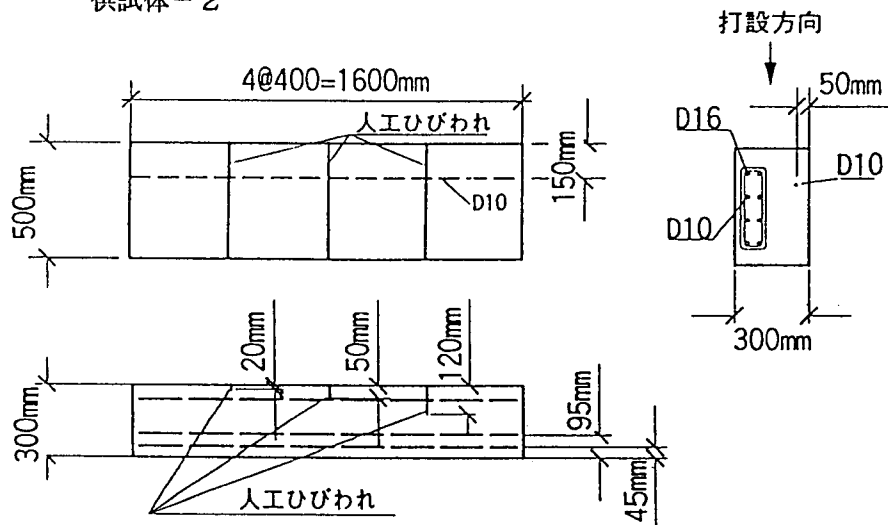
供試体-1



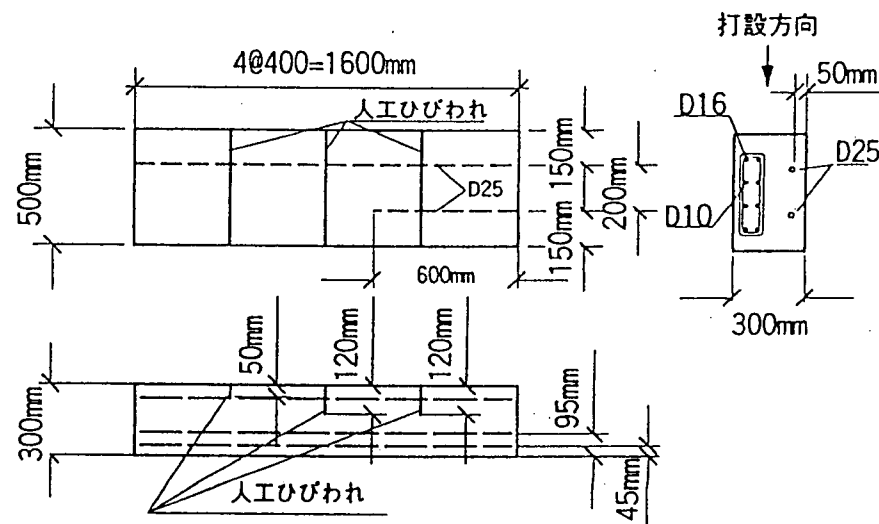
供試体-3



供試体-2



供試体-4



※鉄筋のかぶりは純かぶり

図-3.1 供試体諸元

2.2 計測方法の概要

計測は以下の方法を用いた。

- 1) 受信した超音波の波形を観察することなく機械的に波形の立ち上がりを判断し、超音波伝播時間を計測する方法。用いた探触子の卓越周波数は約50kHz
- 2) 同上。ただし、用いた探触子の卓越周波数は約200kHz
- 3) 受信した超音波の波形を観察し、受信波の立ち上がりを観測者が判断して決定する方法。用いた探触子の卓越振動数は約50kHz
- 4) 同上。ただし、用いた探触子の卓越振動数は約500kHz
- 5) 受信した波形の最初の立ち上がりの位相によりひび割れ深さを直接推定する方法。

ひび割れ深さの計測地点は、図-3.2のように各ひび割れに対し、4箇所ずつ計測を行った。

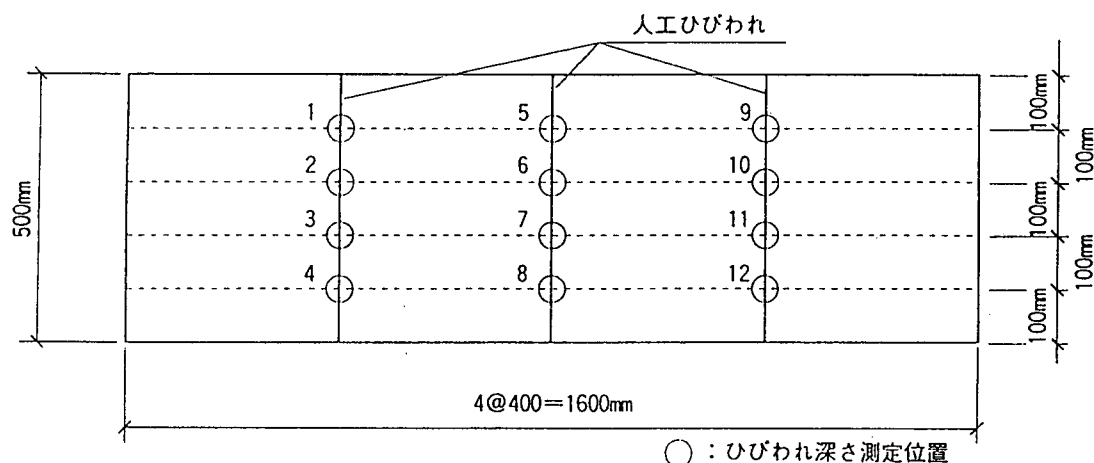


図-3.2 ひび割れ深さ測定位置

3. 無筋供試体でのひび割れ深さ推定誤差に関する考察

3.1 超音波伝播速度 V_c を用いたひび割れ深さ推定の際の誤差要因

ここでは、最も一般的と考えられる前節1)による計測結果をもとに $T_c - T_o$ 法を用い、コンクリートの超音波(P波)伝播速度を用いて無筋供試体のひび割れ深さを推定する際の誤差について検討を行った。

3.1.1 測定誤差の要因

$T_c - T_o$ 法を用いてP波速度を介してひび割れ深さを推定する場合、 V_c の計測～ひび割れ間の超音波伝播時間の計測～ひび割れ深さ推定という手順を踏むことになるがこの測定の工程でそれぞれ誤差を生じる可能性がある。これをまとめると表-3.2および図-3.3～図-3.7のようになる。

3.1.2 計測時点での誤差がひび割れ推定誤差に与える影響

誤差要因は計測時点の誤差に帰すべきもの(V_c の誤差、 t 誤差、 a 誤差)と仮定そのものに問題があるもの(伝播経路仮定の間違い、探触子基準点の間違い)に大別できる。ここでは、計測時点での誤差が、ひび割れ深さ推定結果にどのような影響を与えるかについて検討を行う。 V_c 、 a 、 t の誤差をそれぞれ δV_c 、 δa 、 δt とすると(式3.1)から各誤差について影響が定式化できる。

すなわち、ひび割れ深さの推定値(y およびその誤差 δy)は、

$$y = \sqrt{\left(\frac{V_c t}{2}\right)^2 - a^2} = f(V_c, t, a) \quad (3.1)$$

$$\delta y = \frac{\partial f}{\partial V_c} \delta V_c + \frac{\partial f}{\partial t} \delta t + \frac{\partial f}{\partial a} \delta a \quad (3.2)$$

となる。上式において微係数は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial V_c} &= \frac{t^2 V_c}{4y} = \frac{t}{2 \cdot \cos \theta} \\ \frac{\partial f}{\partial t} &= \frac{t V_c^2}{4y} = \frac{V_c}{2 \cdot \cos \theta} \\ \frac{\partial f}{\partial a} &= -\frac{a}{y} = -\tan \theta \end{aligned} \quad (3.3)$$

表-3.2 各計測行程での誤差要因

計 測 行 程	誤 差 要 因
コンクリートの超音波伝播速度(Vc)を求める。	図-3.3の方法でVcを求めるが、得られたVcには誤差が含まれる(Vc誤差)
ひび割れをまたいで探触子を配置し、ひび割れを迂回して伝播する超音波の伝播時間を計測する。	探触子をあらかじめ決められた位置に設置するが、図-3.4に示すように設置位置には幾らかの誤差が含まれる。(a 誤差) 受信した超音波の波の立ち上がり部分を捕らえて(図-3.5)、超音波伝播時間を測定するが、ここで誤差が含まれる。(t 誤差)
超音波の伝播経路を仮定しひび割れ深さ(y)を計算で求める。	超音波伝播経路を図-3.6に示したようにひび割れ先端で回折して到達すると仮定しているが、別の経路を伝播する可能性がある。すなわち、超音波伝播経路の仮定に問題がある。(伝播経路仮定の間違い) ひび割れ～探触子間を探触子前面で取るか、探触子中心で取るか色々な仮定ができるが(図-3.7)、この仮定が実際と異なっている可能性がある。(探触子基準点の仮定の間違い)

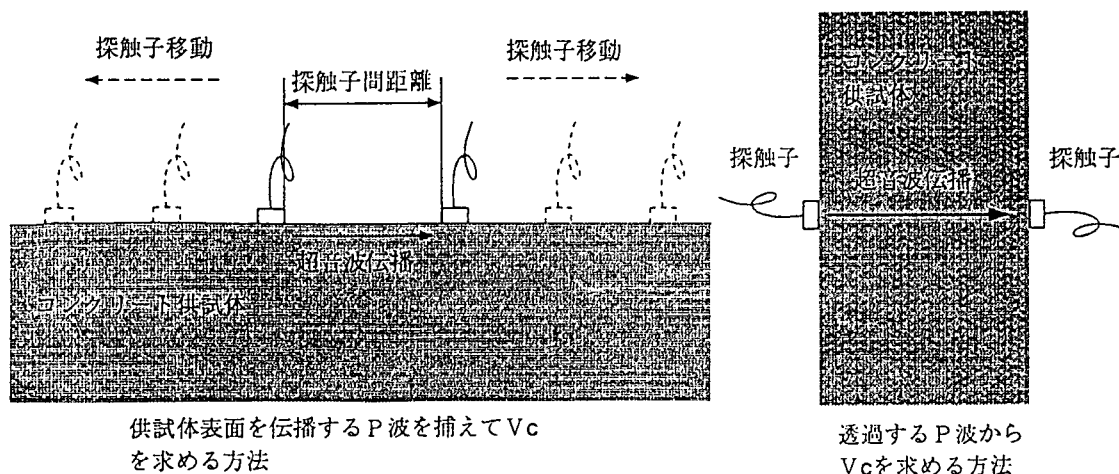


図-3.3 Vcの誤差

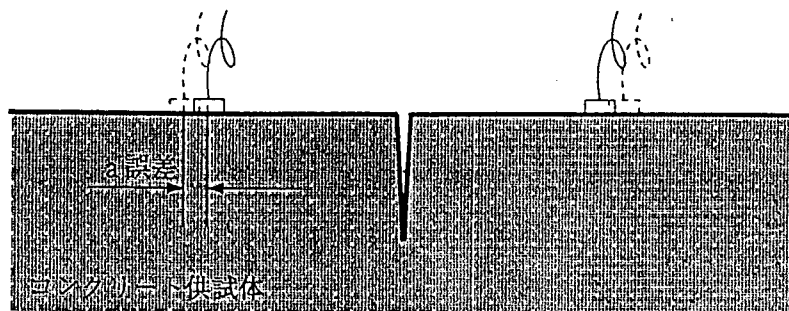


図-3.4 探触子設置位置のずれ

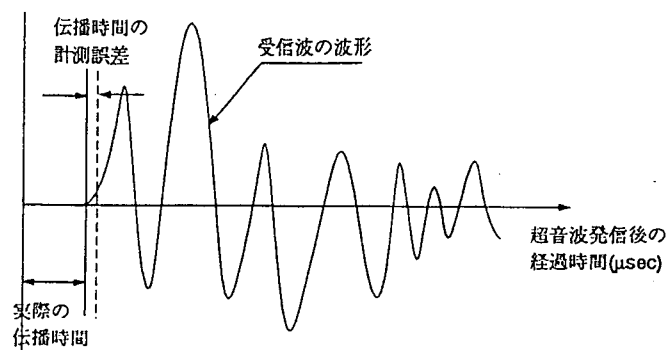
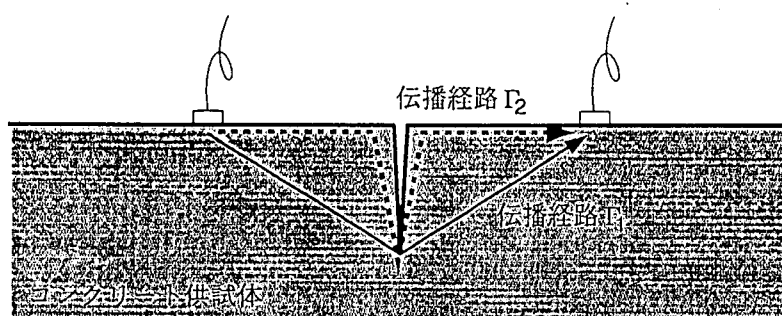
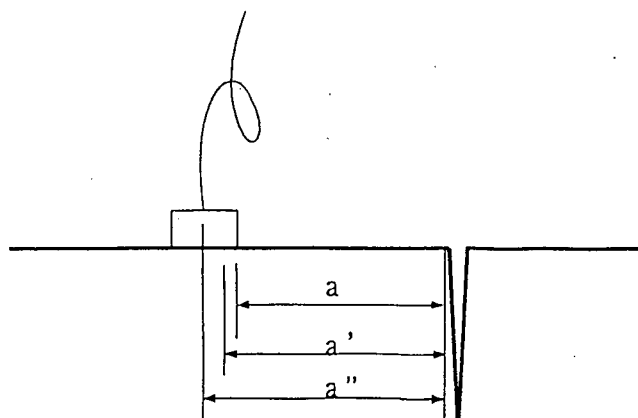


図-3.5 受信波立ち上がり位置の読みとり時の誤差



超音波の伝播経路は $\Gamma 1$ と仮定しているが $\Gamma 2$ の経路で伝播した超音波を計測している可能性がある。

図-3.6 伝播経路家庭の誤り



探触子～ひびわれ間での距離として a , a' あるいは a'' のどれを採用すべきか明確でない。すなわち、探触子の起点が明確ではない。

図-3.7 探触子基準点の誤り

式3.3を見るとわかるとおり、各誤差要因の影響は探触子位置関係によって異なることがわかる。特に、探触子がひび割れ深さに比較してかなり離れた場合、入射角 θ が大きく、計測時点でのわずかな誤差がひび割れ深さ推定値に大きな誤差となって現われることが分かる。ここでは、供試体3の条件を想定して、表-3.3の通りとしひび割れ深さの推定誤差の試算を行った。式3.3に示した微係数を計算した結果を表-3.4に示す。この結果から、 V_c を用いてひび割れ深さの推定を行った場合、 V_c の誤差による影響が大きくなりやすいことが分かる。表-3.4は、 V_c の誤差として $0.1\text{mm}/\mu\text{s}$ 、伝播時間 t の計測誤差として $1\mu\text{s}$ 、探触子設置位置の誤差を 2mm と仮定したときのひび割れの推定誤差を示す。

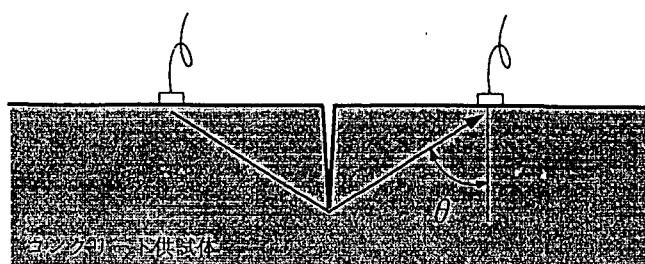


図-3.8 θ の定義

表-3.3 誤差の試算条件

$V_c = 3.7\text{mm}/\mu\text{s}$	$y = 50\text{mm}$	$a = 50\text{mm}$
		$a = 100\text{mm}$
		$a = 150\text{mm}$
	$y = 90\text{mm}$	$a = 200\text{mm}$
		$a = 250\text{mm}$
	$y = 120\text{mm}$	$a = 300\text{mm}$

表-3.4 ひび割れ深さ推定値の誤差要因とその影響度

V_c	3.7	$\text{mm}/\mu\text{s}$
δV_c	0.1	$\text{mm}/\mu\text{s}$
δt	1	μs
δa	2	mm
y	50	mm

a (mm)	合計誤差	V_c 誤差	t 誤差	a 誤差
50	7.32	2.70	2.62	2.00
100	14.89	6.76	4.14	4.00
150	25.36	13.51	5.85	6.00
200	38.60	22.97	7.63	8.00
250	54.57	35.14	9.43	10.00
300	73.25	50.00	11.25	12.00

注) この表でいう V_c 誤差とは、 V_c に δV_c だけ誤差があったときのずれをmm単位で表現したもの

V_c	3.7	$\text{mm}/\mu\text{s}$
δV_c	0.1	$\text{mm}/\mu\text{s}$
δt	1	μs
δa	2	mm
y	90	mm

V_c	3.7	$\text{mm}/\mu\text{s}$
δV_c	0.1	$\text{mm}/\mu\text{s}$
δt	1	μs
δa	2	mm
y	120	mm

a (mm)	合計誤差	V_c 誤差	t 誤差	a 誤差
50	6.41	3.18	2.12	1.11
100	10.42	5.44	2.77	2.22
150	16.12	9.19	3.60	3.33
200	23.40	14.44	4.51	4.44
250	32.22	21.20	5.46	5.56
300	42.56	29.46	6.44	6.67

a (mm)	合計誤差	V_c 誤差	t 誤差	a 誤差
50	6.64	3.81	2.00	0.83
100	9.57	5.50	2.41	1.67
150	13.77	8.31	2.96	2.50
200	19.18	12.25	3.60	3.33
250	25.76	17.32	4.28	4.17
300	33.49	23.51	4.98	5.00

この試験結果から明らかなとおり、ひび割れ深さに比べて探触子間隔が広い場合、 θ が大きくなり誤差が大きくなることが分かる。このことから、正確なひび割れ深さをこの方法で求める場合には、正確なコンクリートの超音波伝播速度を求めること、ひび割れに対して、探触子間隔を広くし過ぎないことが重要となる。

3.1.3 ひび割れ～探触子間距離の仮定ミスが及ぼす影響

ひび割れ～探触子間距離の誤差も先に示したとおり、ひび割れ深さ推定誤差につながる。このため、探触子が面接触タイプのものでかつ、探触子の面積が大きい場合、探触子のどの位置に起点を取るかを明確にする必要がある。市販されている測定機器の探触子の大きさはそれぞれ計測機器によって異なっているが、この項では直径50mmで供試体表面と面接触するタイプのものを用いて測定を行なったデータをもとに記述している。なお、コンクリート供試体表面の凹凸が激しい場合、面接触の探触子を用いても、実際には探触子とコンクリート表面が点接触する可能性がある。ここでは、このようなことがないように、コンクリート供試体作製時には表面の平坦性が十分出るよう配慮すると共に、グリースを塗布し、均一な接触状態となるよう計測時点でも注意を払った。探触子のどの位置を起点と取るかによって、ひび割れ～探触子間距離は異なり、最大で25mmの探触子位置の誤差が生じることとなる。ここでは、無筋供試体No.3での実測結果をもとに、探触子のどの位置が起点となっているか検討を行なった。ひび割れを回折して到達したと考えられる超音波の伝播時間の計測値を t とし、コンクリートの超音波伝播速度を V_c 、ひび割れ深さの真値を y とし、これらの計測値に誤差が含まれていないと仮定すると、ひび割れ～探触子間距離 a' は次式により逆算できる。

$$a' = \sqrt{\left(\frac{V_c \cdot t}{2}\right)^2 - y^2}$$

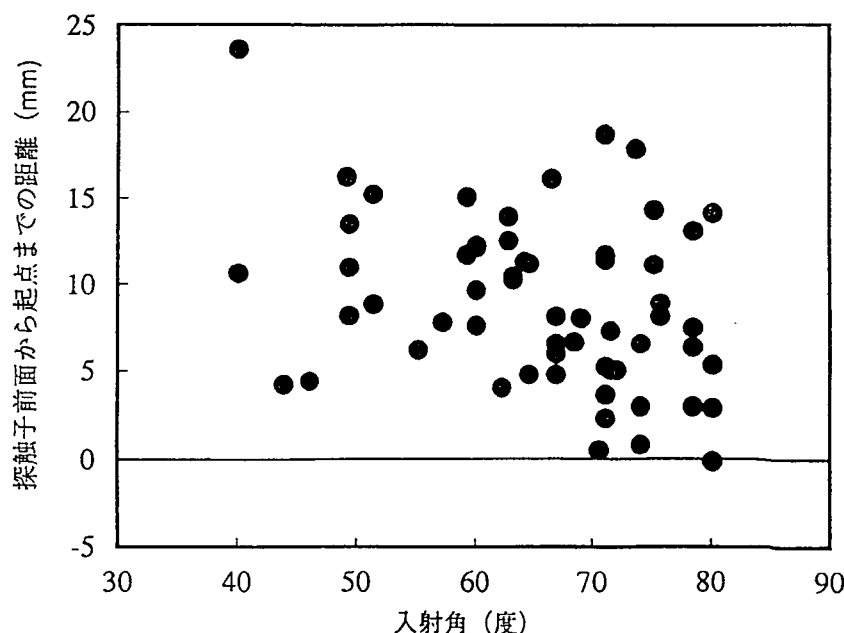


図-3.9 超音波の入射角と探触子の起点位置の関係

a' の算定結果から、起点位置と θ の関係を図-3.9に示す。 t 、 V_c の値に誤差が含まれているにもかかわらず、これらを真値とみなしてひび割れ～探触子間距離 a' を逆算しているため厳密なことはいえないが、探触子の起点は必ずしも一定であるとは考えにくいことが分かる。また、入射角 θ との間に明瞭な関係を認めることができなかった。しかし、起点はほぼ $0 \sim 25\text{mm}$ (探触子中央) の間にあることがわかる。また、その平均は 9.0mm であった。

次に、探触子の起点を探触子前面、前面から 9mm 、探触子中央と3通りの仮定を行ないそれぞれ対てひび割れ深さの推定を行なった。この結果を図-3.10(探触子の起点を探触子前面に設定した場合)、図-3.11(探触子の起点を前面から 9mm 探触子中心側にずらした所に設定した場合)、図-3.12(探触子の起点を探触子中心に設定した場合)に示す。探触子の起点を、探触子前面から探触子中心方向に動かすにつれ、ひび割れ深さの推定値は真値に比べて小さくなる。また、ひび割れ深さを求める際、平方根の中が負の数となり虚数値となる場合も増加する。従って、ここで用いた計測装置に関しては、探触子の起点を探触子中心と設定することは妥当ではなく、探触子前面から 9mm 内側に入ったところとすることが望ましいことが分かる。

図-3.10～3.12では、ひび割れと探触子間隔を探触子前面で計って 50mm 間隔で 300mm まで設定して計測を行なった結果からみちびかれるひびわれ深さの推定値を示しているが、 50mm ではいずれもかなり誤差が大きく正確な計測が行なわれていないことが分かる。一方、 300mm の場合も、全般的に誤差が大きくなっていることが分かる。後者については、前節で示したとおり入射角 θ が大きい場合で、ひび割れ深さの推定誤差が大きくなりやすいためであると考えられる。前者の場合、すなわちひび割れ探触子間距離が 50mm では、先の検討結果からすると、計測誤差が小さくなるはずであるが逆の結果が得られている。これは、超音波伝播経路の仮定に問題があったと考えられる。この点については次に検討を行なう。

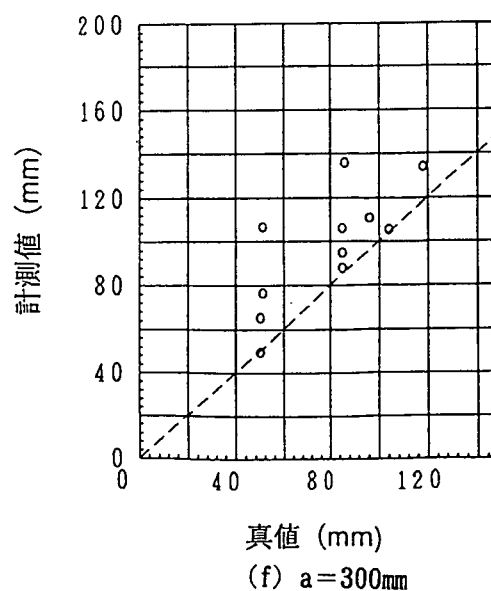
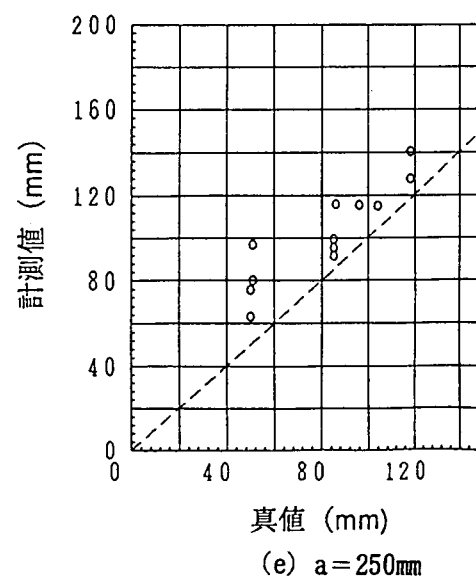
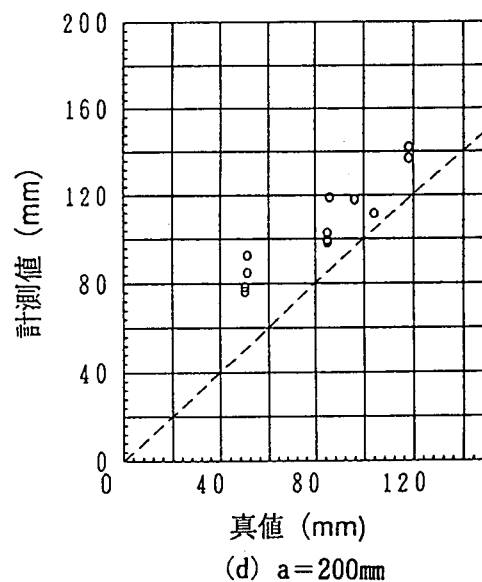
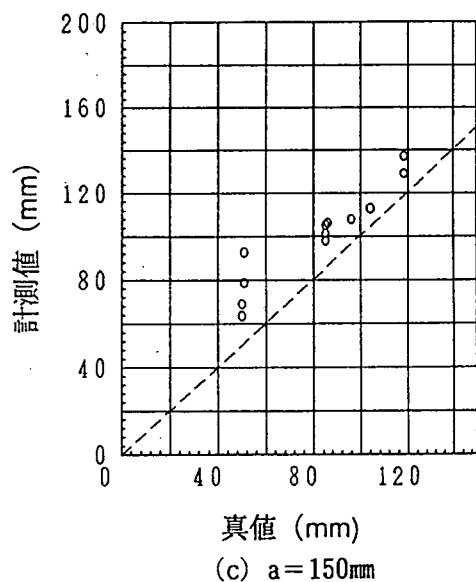
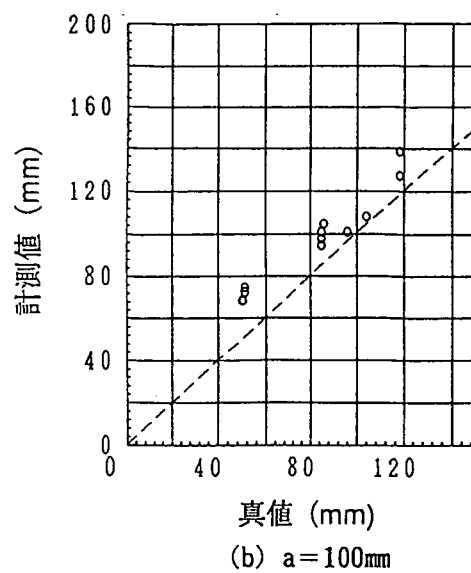
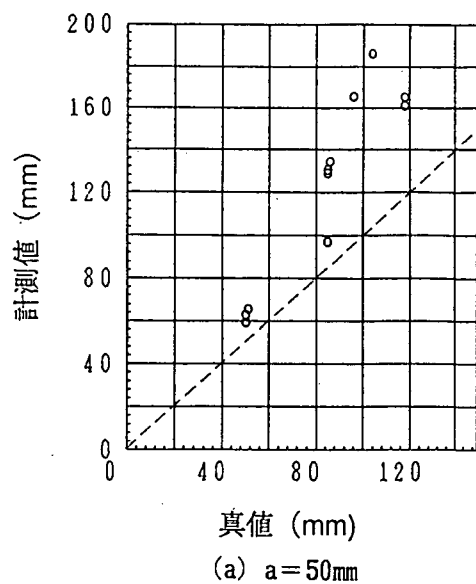
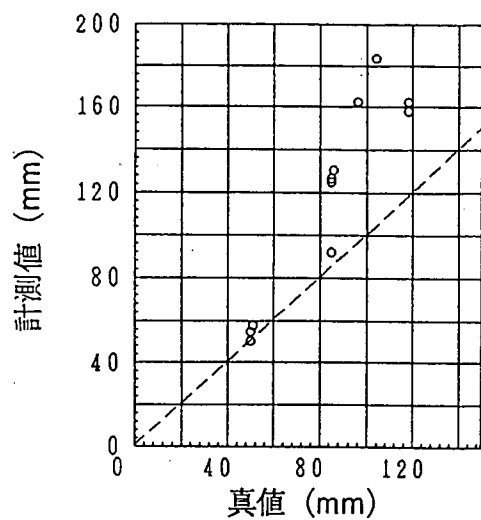
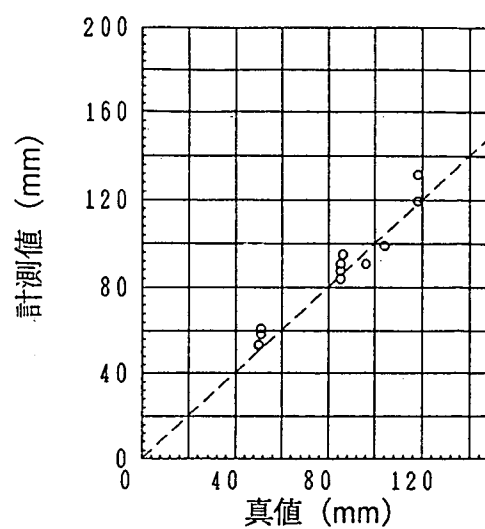


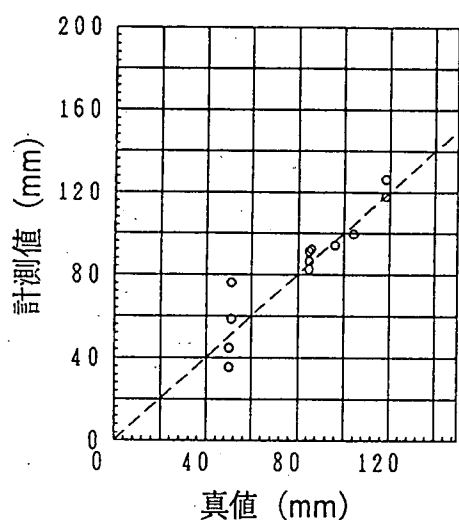
図-3.10 ひび割れ深さの推定値と真値の関係(起点は探触子前面)



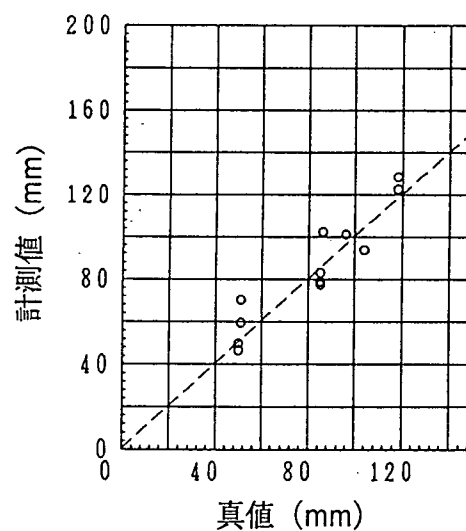
(a) $a=50\text{mm}$



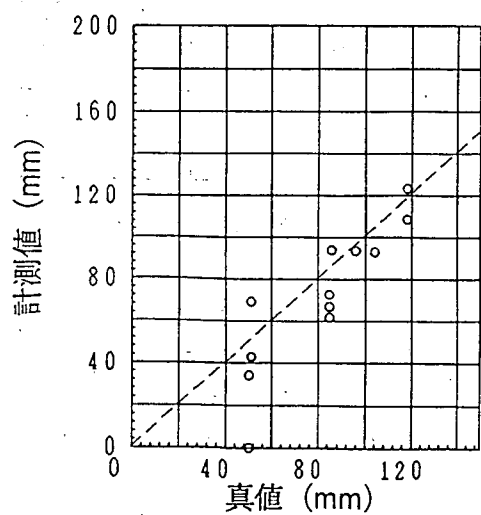
(b) $a=100\text{mm}$



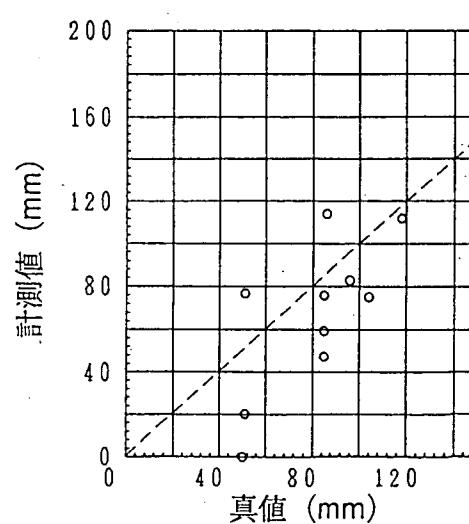
(c) $a=150\text{mm}$



(d) $a=200\text{mm}$

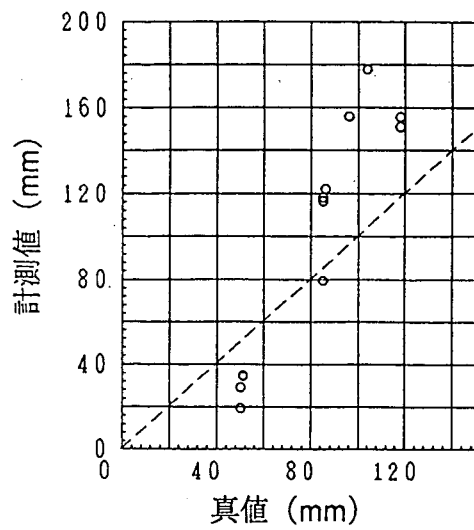


(e) $a=250\text{mm}$

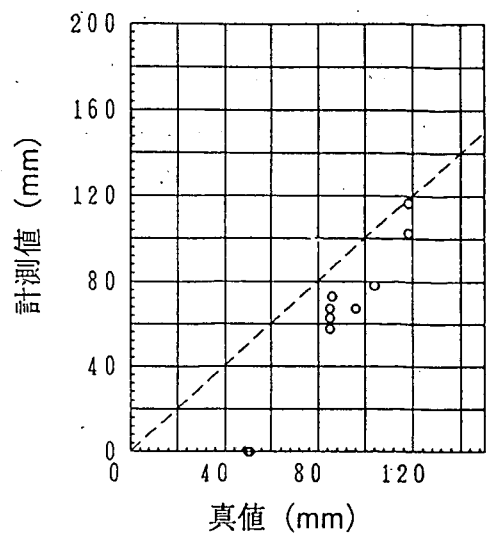


(f) $a=300\text{mm}$

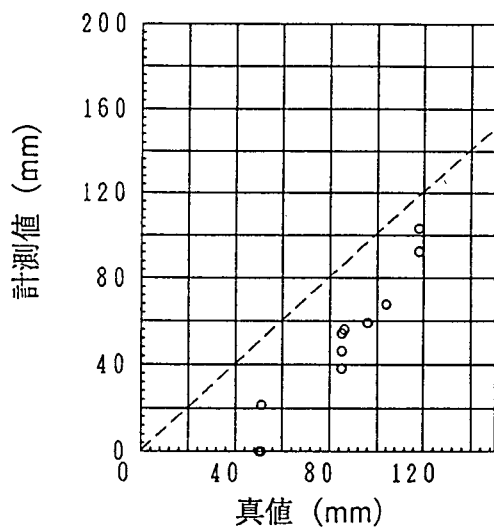
図-3.11 ひび割れ深さの推定値と真値の関係(起点は前面から9mm中央へ)



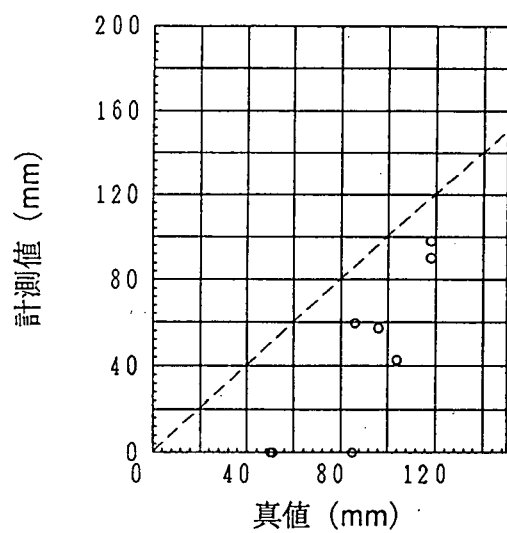
(a) $a=50\text{mm}$



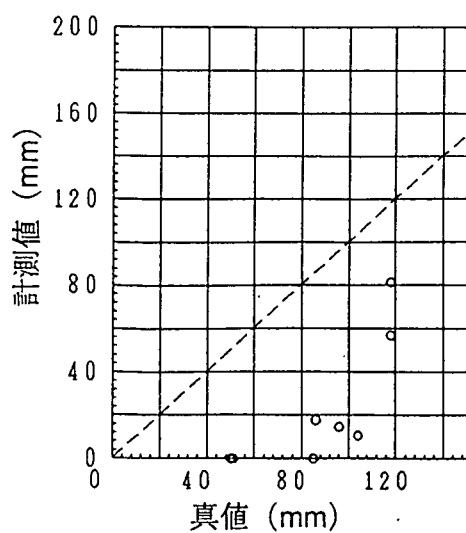
(b) $a=100\text{mm}$



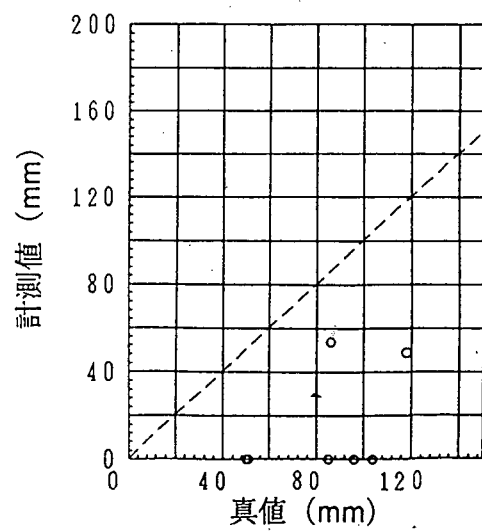
(c) $a=150\text{mm}$



(d) $a=200\text{mm}$



(e) $a=250\text{mm}$



(f) $a=300\text{mm}$

図-3.12 ひび割れ深さの推定値と真値の関係(起点は探触子中央)

3.1.4 超音波伝播経路の仮定の誤りの影響

図-3.4に示したとおり、超音波伝播経路を「1」を仮定しているが条件によっては、「2」の経路を辿るものも捕えている可能性がある。これ以外にも、様々な伝播経路を仮定することができるがここでは簡単のため上記の2つの経路を想定することとした。供試体3に設けられた測点1~12において、ひびわれ~探触子間の距離を50mm~300mmまで50mmピッチに変化させたときの、超音波伝播時間の実測結果と「1」および「2」の経路を仮定したときの伝播時間の理論値を比較した結果を図-3.13に示す。

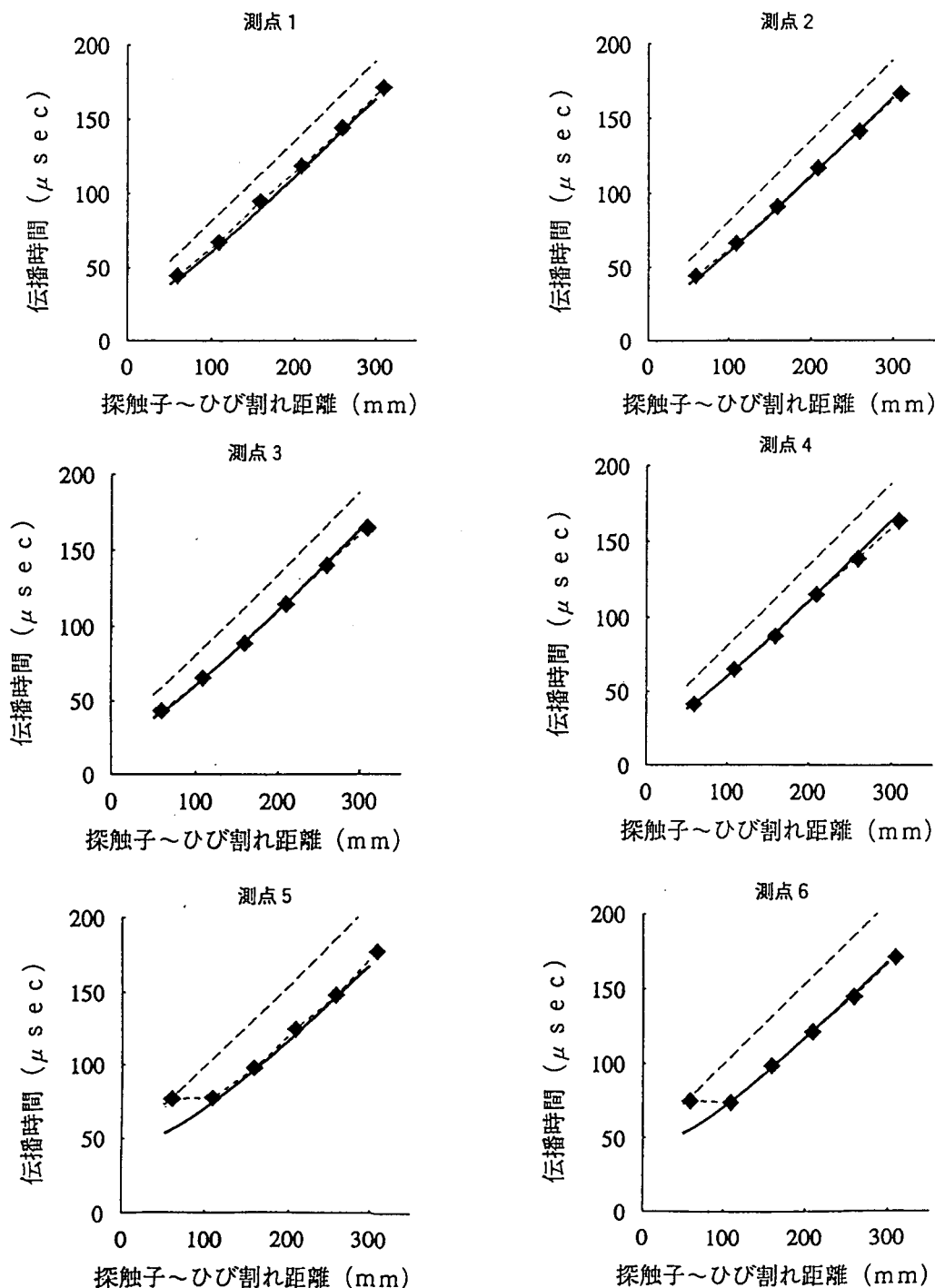


図-3.13 無筋供試体の各測定点における探触子~ひび割れ間距離と伝播時間の関係(その1)

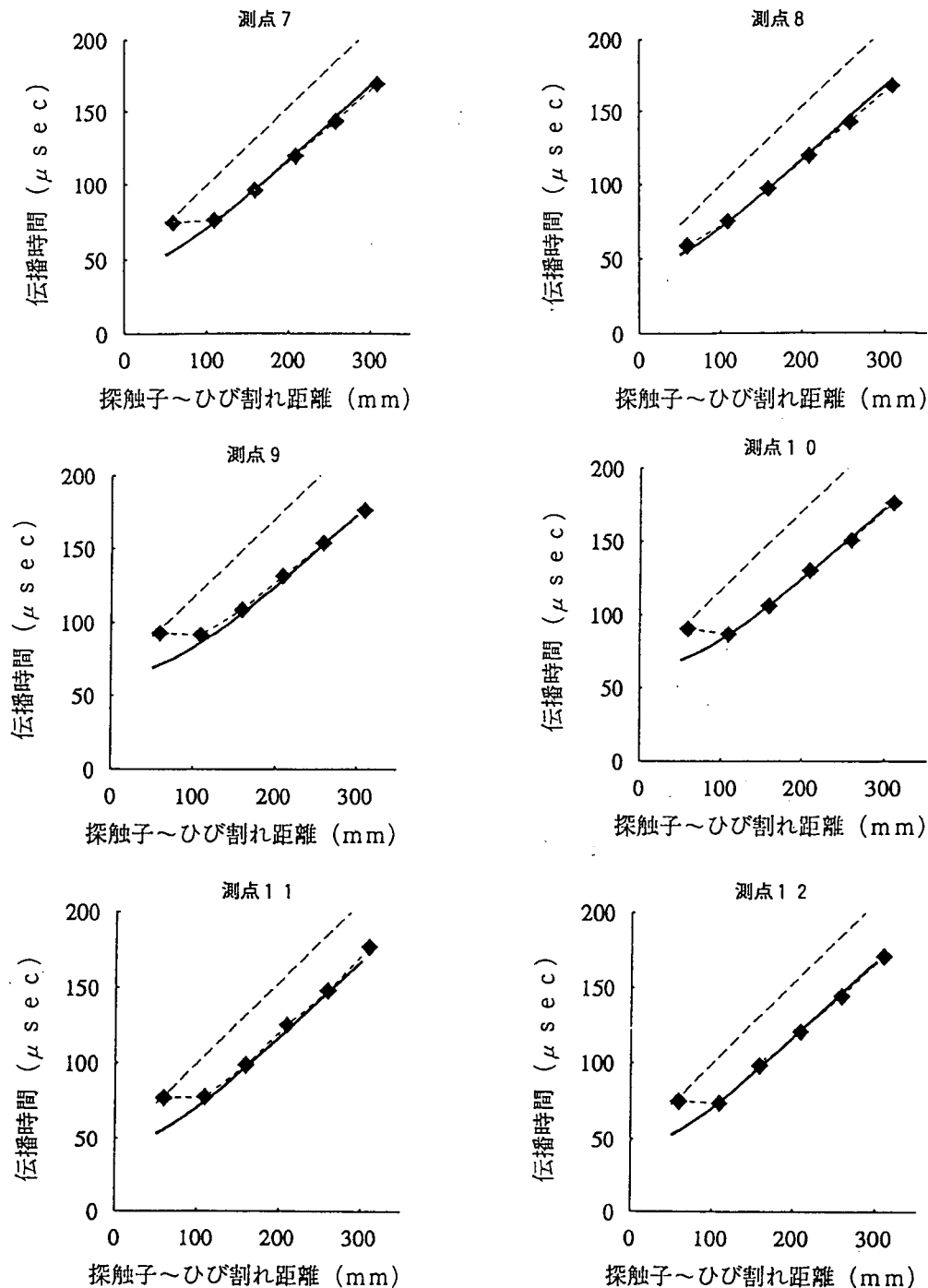


図-3.13 無筋供試体の各測定点における探触子～
ひび割れ間距離と伝播時間の関係(その2)

図中のプロットは実測結果を、実線はΓ1の経路を辿ったときの理論値、点線はΓ2の経路を辿ったときの理論値をそれぞれ示している。ひび割れ深さを50mmに設定した測点1～4では実測値とΓ1の経路を辿った場合の理論値はよく対応しているが、ひび割れ深さが90mm、120mmと設定されている測点5～12では、探触子～ひび割れまでの距離が50mmの場合、経路Γ2を仮定して求められる理論値に対応していることが分かる。すなわち、ひび割れ探触子間隔を50mm程度に設定すると、ひび割れ深さを推定する際に仮定している超音波伝播経路を辿るものをうまく捕えることができず、表面を伝播して到達している

超音波を捕えていることが分かる。ただし、測点8での計測結果を見ても分かるとおり、捕えられた超音波は「1」の経路を伝播したものであるといえ、受信された超音波が、どちらの経路を辿ったものかをあらかじめ確実に判断を下すことは困難であると考えられる。

以上の考察から、ひび割れ深さよりも数十ミリ以上小さい距離しか探触子を離していない場合は、表面を伝播して到達している超音波を捕えやすいので注意が必要であると考えられる。

3.1.5 入射角とひび割れ深さの推定値の関係

ここでは、探触子への超音波の入射角とひび割れ深さの関係について検討を行った。

ひび割れ深さについては真値との比をとり、入射角 θ と測定値/真値を求めた結果を図-3.14に示す。 θ が 40° 以下の場合、比は1より大きくなる。一方、 $\theta = 60^\circ$ 以上では、測定値のばらつきが大きくなっていることがわかる。 40° 付近から 60° 程度までが安定した測定のできる範囲であると考えられる。

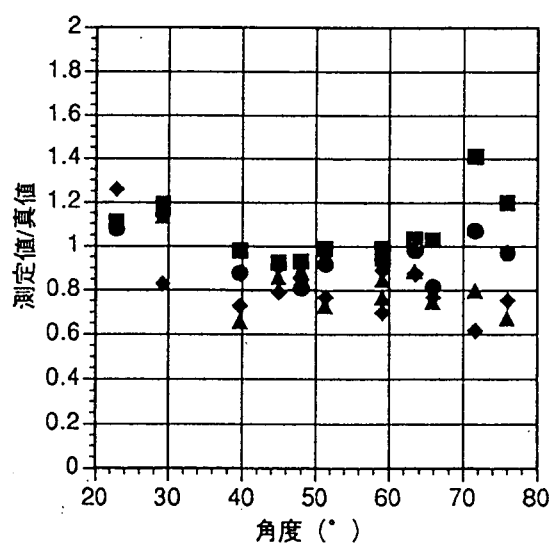


図-3.14 入射角 θ と測定値/真値の関係

3.2 Tc-To法での誤差要因(その2)

前節では、コンクリート中の超音波伝播速度を介してひび割れ深さの推定を行なう方法について、誤差要因を検討したが、ここでは、TcおよびToからコンクリートの超音波伝播速度を介することなく、ひび割れ深さの推定を行なう方法について検討を行なう。

3.2.1 誤差要因について

この方法によりひび割れ深さを求める場合、次の計算式を用いることとなる。

$$y = \frac{a}{2} \sqrt{\left(\frac{T_c}{T_o}\right)^2 - 1}$$

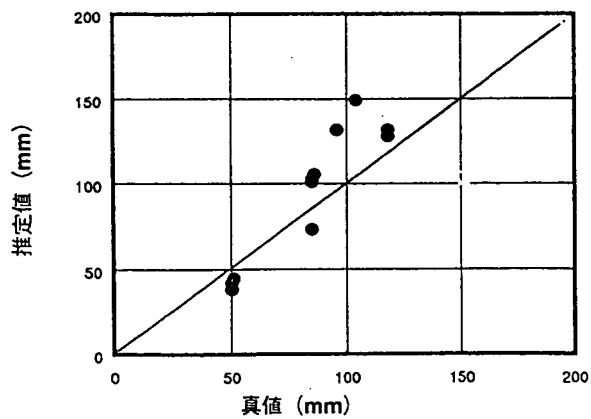
この計測においても、前章で検討したように、超音波伝播時間の計測値(T_c および T_0)あるいは探触子からひび割れまでの距離(a)に誤差が生じた場合、ひび割れ深さの推定値に誤差が生じる。ここで、 T_c および T_0 、 a に誤差があったときのひび割れ深さ推定値の誤差を上式を用いて算定した結果表-3.5に示す。ここでも、 T_c および T_0 の計測誤差がひび割れ深さの推定値の誤差に及ぼす影響は、ひび割れ深さに対して探触子からひび割れ間での距離が大きくなるほど顕著になっていることが分かる。また、先の結果とは異なり、探触子からひび割れまでの距離の及ぼす影響は小さくなっていることと、これについて正の誤差が生じていると（実際の探触子ひび割れ間距離よりも大きなひび割れ間での距離を想定した場合）大きくなるような誤差を与えることが分かる。図-3.15にひび割れ深さを推定した結果を示す。ここでは、ひび割れ～探触子間の距離を定める際、探触子前面を起点とした場合、探触子前面から9mm探触子中央より設定した場合、探触子中央を起点にした場合の3通りについてひび割れ深さの推定を行なった。先の検討結果から、ここで用いた探触子では平均的に探触子前面から9mm入ったところを起点となっていることを示した。ここでも、この場合がもっともひび割れ深さの推定値と真値に近い結果が得られている。また、探触子前面に起点を設定した場合はひび割れ深さの推定値が浅く、探触子中央に設定した場合はひび割れ深さの推定値が深くあるいは虚数として算定されていることが分かる。

一方、ひび割れ深さが50mmと浅いものについては、ひび割れ深さの推定結果に誤差が大きく含まれること、探触子とひび割れ間の距離が短い場合、誤差が大きく出ることなどは、前章の検討結果同一のものである。

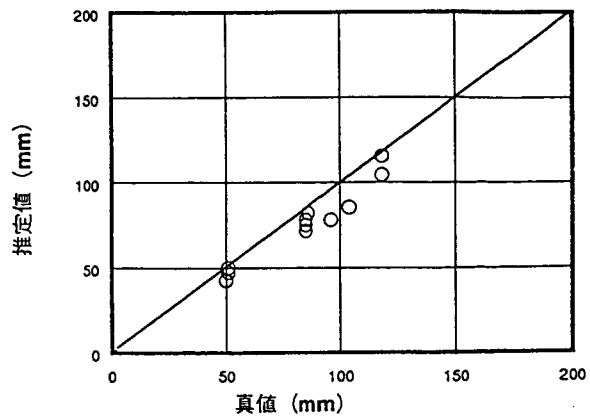
従って、本方法にしたがってひび割れ深さを推定する場合にも、前章で得られた結論と同様の配慮をすることが正確なひび割れ深さの推定には重要であることが分かる。

表-3.5 T_c, T_0 の測定誤差がひび割れ深さの推定値に及ぼす影響

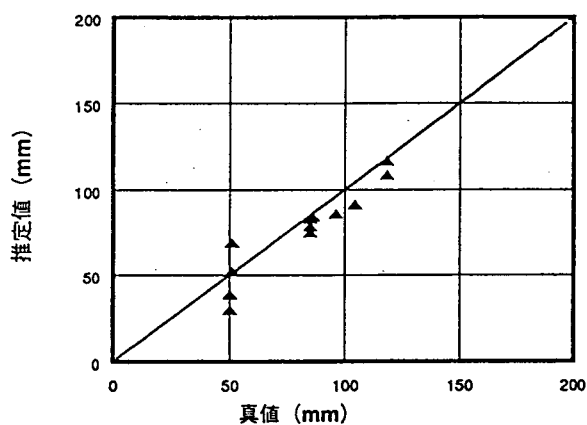
ひび割れ 深さ(y) (mm)	ひび割れ～ 探触子間 隔(a)(mm)	aの1mmの誤差 によるyの推定値 誤差(mm)	T_c の1 μ secの誤差 によるyの推定値誤 差(mm)	T_0 の1 μ secの誤差 によるyの推定値誤 差(mm)
50.0	100.0	0.2	2.1	-2.3
50.0	150.0	0.2	3.0	-3.1
50.0	200.0	0.1	3.9	-4.0
50.0	250.0	0.1	4.8	-4.9
50.0	300.0	0.1	5.7	-5.8
90.0	100.0	0.4	1.4	-1.9
90.0	150.0	0.3	1.8	-2.1
90.0	200.0	0.2	2.3	-2.5
90.0	250.0	0.2	2.8	-2.9
90.0	300.0	0.1	3.3	-3.4
120.0	100.0	0.6	1.2	-1.9
120.0	150.0	0.4	1.5	-1.9
120.0	200.0	0.3	1.8	-2.1
120.0	250.0	0.2	2.2	-2.4
120.0	300.0	0.2	2.5	-2.7



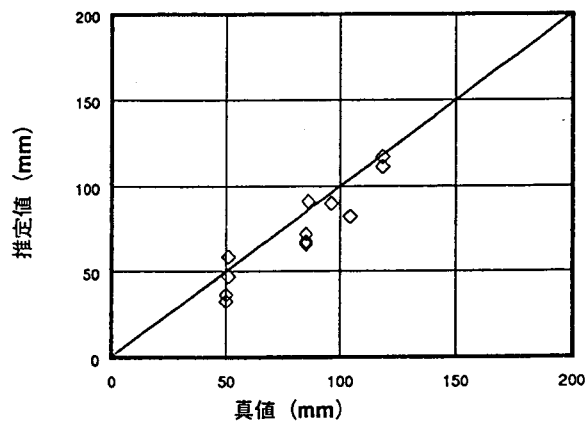
(a) $a=50\text{mm}$



(b) $a=100\text{mm}$

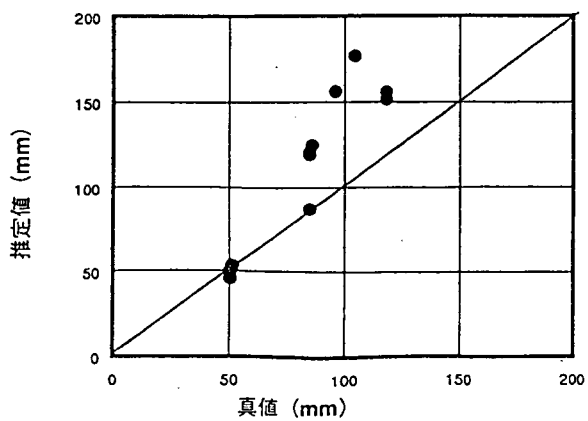


(c) $a=150\text{mm}$

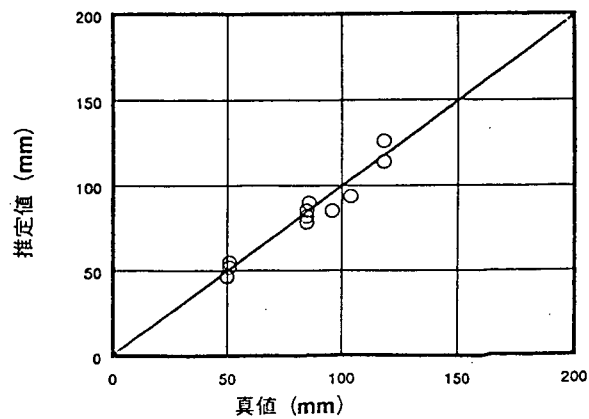


(d) $a=200\text{mm}$

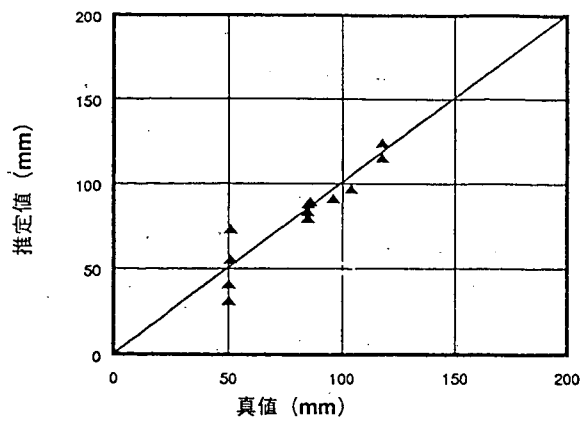
図-3.15 a の値を変化させた時のひび割れ深さ推定値
(その1; 探触子前面を起点とした場合)



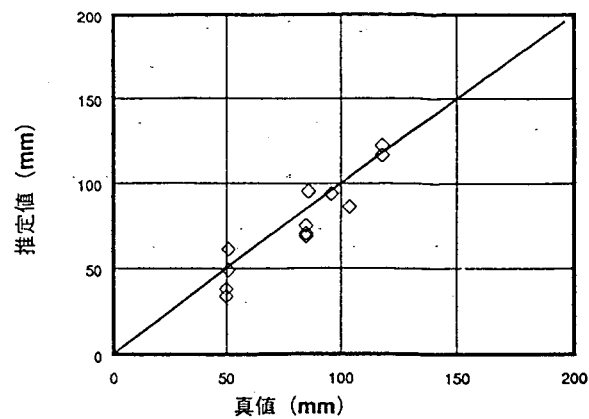
(a) $a=50\text{mm}$



(b) $a=100\text{mm}$

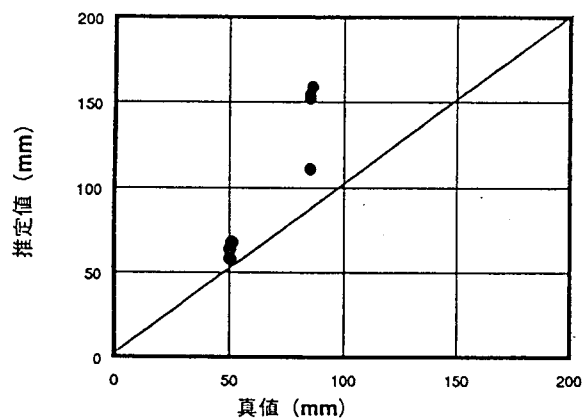


(c) $a=150\text{mm}$

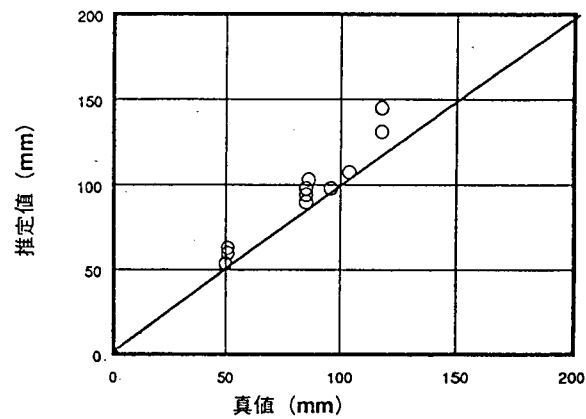


(d) $a=200\text{mm}$

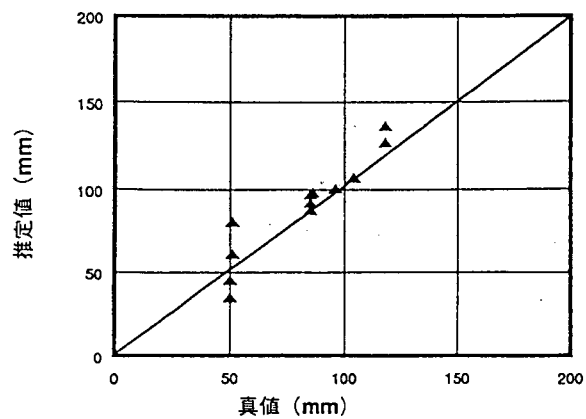
図-3.15 a の値を変化させた時のひび割れ深さ推定値
(その2; 探触子前面から9mm中心に移動したところを起点とした場合)



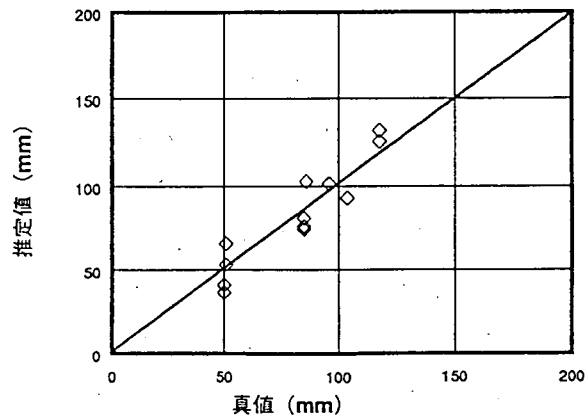
(a) $a=50\text{mm}$



(b) $a=100\text{mm}$



(c) $a=150\text{mm}$



(d) $a=200\text{mm}$

図-3.15 a の値を変化させた時のひび割れ深さ推定値
(その3; 探触子中央を起点にした場合)

3.3 BS法(修正BS法)での誤差要因

修正BS法での計測では、探触子～ひび割れ間での間隔を a_1 、 a_2 と変化させ、それぞれの場合の超音波播時間 t_1 、 t_2 を計測することによりひび割れ深さ y を次式にて推定する。(図-3.16) ここで想定される誤差要因としては、 a_1 、 a_2 の誤差ならびに t_1 、 t_2 の誤差である。また、超音波の伝播経路は図に示した経路を辿ることと仮定している、これ以外の伝播経路を辿る超音波を拾って伝播時間を求めた場合には、これも誤差要因になる。これまでの検討結果から、 a_1 として50mmを採用した場合、上記の経路を辿らない場合があり、一方 a_1 がそれ以上の場合では、概ね上記の経路を辿っていることから、以下では $a_1 > 50\text{mm}$ の場合のみ考えることとし、超音波伝播経路の仮定には誤りがないものとして検討を行なうこととする。

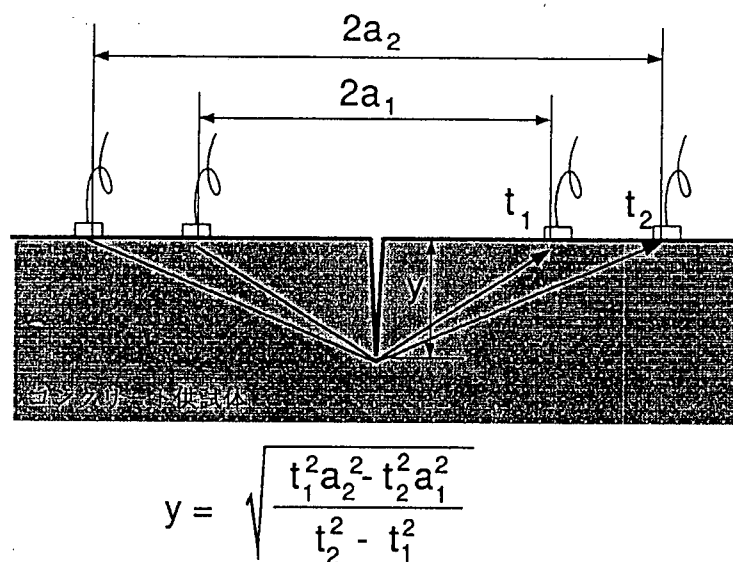


図-3.16 修正BS法でのひび割れ深さ推定方法

3.3.1 各要因によるひび割れ深さ推定誤差

ここでは、ひび割れ深さ y の推定式をもとに、 a_1 、 a_2 の誤差ならびに t_1 、 t_2 の誤差が y にどの程度誤差を生むことになるか検討を行なった。ひび割れ深さは50mm、90mm、120mmと3通り設定し、探触子の位置 a_1 を100mm、150mm、200mm、 a_2 を150mm、200mm、250mm、300mmと仮定し、 t_1 および t_2 にそれぞれ1secの誤差があり、 a_1 、 a_2 に2の誤差が生じていた場合の、ひび割れ深さの推定値の誤差を計算した結果を、表-3.6に示す。全般的傾向としては、 a_1 と a_2 の差が小さいほど誤差は大きくなること、 a_1 と a_2 差が同一であれば、これらが大きくなるほど誤差は大きくなる事が分かる。

3.3.2 実測結果との比較

ここで実施した超音波伝播時間の計測から修正BS法を適用し、ひび割れ深さの推定値を求め、これと真値の差を誤差とし、誤差の標準偏差を求めた結果を図-3.17に示す。実測による誤差の標準偏差は、計算で予測されたものに比べかなり小さくなっている。この理由は、計算で予測した誤差は、 a_1 、 a_2 、 t_1 、 t_2 すべての要因による誤差の絶対値を単純に足し合わせたためである。すべての要因につ

いて、ひび割れ深さの推定値の誤差がもっとも大きくなるような最悪の条件での、算定結果を求めたためである。

しかし、 a_1 、 a_2 に対する誤差の標準偏差はそれぞれ、計算で推定されるものとほぼ同様の傾向を示しているものと考えられる。

3.4 ま と め

以上をまとめると次のとおりである。

- 1) ひび割れ深さに対し、探触子～ひび割れ間での距離を小さくし過ぎると、必ずしもひび割れ深さを推定する際に想定している経路を辿らない超音波の伝播時間を計測する場合がある。
- 2) 上記の項目は、超音波伝播時間に基づいてひび割れ深さを推定するTc-To法、BS法、修正BS法いずれの計測方法を採用する場合にも共通して、ひび割れ深さの推定値の誤差を大きくする要因となる。
- 3) コンクリート表面と面接触する探触子を用いたとき、ひび割れ～探触子まで距離を定義する際に、探触子の起点を定義する必要があるが、ここで用いた探触子では、この起点が探触子の前面あるいは探触子中央のいずれでもなく、ちょうどその中間付近に存在していえることが明らかになった。
- 4) ただし、この起点位置については、計測地点ごとにばらついていて明瞭な傾向を見いだすことはできなかった。
- 5) コンクリート中の超音波伝播速度に基づいてTc-To法によりひび割れ深さを推定する場合、ひび割れ深さ推定値に及ぼす超音波伝播速度の影響が大きい。このため、正確なひび割れ深さを推定するためには、超音波伝播速度を性格に計る必要がある。
- 6) Tc-To法によりひび割れ深さを推定する場合、ひび割れ深さに比べて探触子間隔を大きくし過ぎるとひび割れ深さの推定値には誤差を含みやすい。
- 7) BS法（修正BS法）を用いてひび割れ深さを推定する場合、探触子～ひび割れ間での距離を2通り設けて超音波伝播時間を計測することになるが、この2点の計測地点が近くなり過ぎると、ひび割れ深さの推定値に誤差が生じやすくなる。ある程度誤差を縮めるためには、100mm以上の間隔を確保することが必要である。

表-3.6 修正BS法での t_1, t_2 の誤差がひび割れ深さ推定値の誤差に及ぼす影響

V_c	3.7 mm/ μs
δt_1	1 μs
δt_2	1 μs
δa_1	2 mm
δa_2	2 mm
v mm	50

a_1 (mm)	a_2 (mm)	t_1 項	t_2 項	a_1 項	a_2 項	誤差合計mm
100	150	8.3	5.9	8.0	6.0	28.1
100	200	5.9	3.2	5.7	3.3	18.0
100	250	5.1	2.2	5.0	2.4	14.7
100	300	4.8	1.8	4.6	1.9	13.0
150	200	14.2	10.9	14.6	11.4	51.1
150	250	9.5	5.9	9.8	6.3	31.4
150	300	8.0	4.2	8.2	4.4	24.9
200	250	22.0	17.8	23.1	18.9	81.9
200	300	14.1	9.6	14.8	10.2	48.7

注) t_1 項とは、 t_1 の測定値に δt_1 だけ誤差が出た場合のひび割れ深さ推定誤差 () を示す。

誤差合計は t_1, t_2, a_1, a_2 による誤差によるひび割れ深さ推定値の誤差を合計したものである。

V_c	3.7 mm/ μs
δt_1	1 μs
δt_2	1 μs
δa_1	2 mm
δa_2	2 mm
v mm	90

a_1 (mm)	a_2 (mm)	t_1 項	t_2 項	a_1 項	a_2 項	誤差合計mm
100	150	6.8	5.2	5.4	4.8	22.2
100	200	4.4	2.7	3.6	2.7	13.4
100	250	3.7	1.9	3.0	1.9	10.5
100	300	3.4	1.5	2.7	1.5	9.1
150	200	9.9	7.9	9.2	7.8	34.7
150	250	6.3	4.2	5.9	4.3	20.7
150	300	5.2	2.9	4.8	3.0	16.0
200	250	14.1	11.7	13.9	11.9	51.6
200	300	8.8	6.2	8.7	6.4	30.2

V_c	3.7 mm/ μs
δt_1	1 μs
δt_2	1 μs
δa_1	2 mm
δa_2	2 mm
v mm	120

a_1 (mm)	a_2 (mm)	t_1 項	t_2 項	a_1 項	a_2 項	誤差合計mm
100	150	7.1	5.8	4.9	4.9	22.7
100	200	4.4	2.9	3.0	2.7	13.0
100	250	3.5	2.0	2.4	1.9	9.9
100	300	3.1	1.5	2.2	1.5	8.4
150	200	9.2	7.6	7.8	7.0	31.6
150	250	5.7	3.9	4.8	3.8	18.3
150	300	4.6	2.7	3.9	2.7	13.9
200	250	12.3	10.3	11.4	10.1	44.1
200	300	7.5	5.4	7.0	5.4	25.3

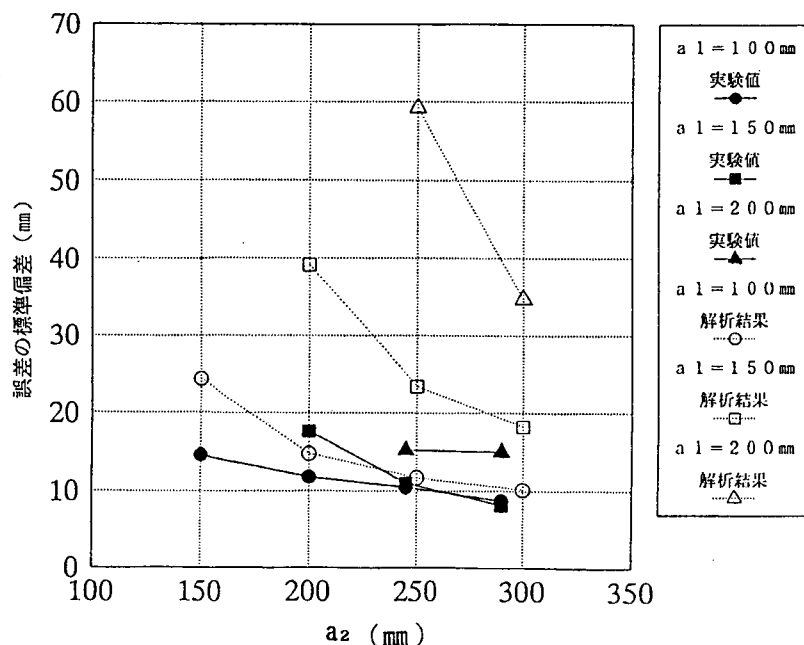


図-3.17 a_1, a_2 の値によるひび割れ深さ値推定の誤差の標準偏差

4. 鉄筋のある場合のひび割れ深さの推定

4.1 ひび割れ深さ推定に当たっての誤差要因

これまでは鉄筋のない場合について考察を行ってきたが、鉄筋のある場合についても、これまでと同様の誤差要因が予想される。ただし、鉄筋がひび割れをまたいでいる場合には、これまで扱った誤差要因に加え、鉄筋の存在により鉄筋表面で反射した波がひび割れ先端を回折して到達する波よりも先に受信側の探触子に到達する可能性が大きくなり、ひび割れ深さを推定するうえで想定している経路を辿らない波を拾い伝播時間を誤って計測することによる誤差要因も入ってくる。また、鉄筋内の超音波伝播速度は、コンクリート中の超音波の伝播速度よりも大きいため、一部鉄筋中を伝播した超音波が正規の経路を辿る超音波よりも先に到達することも考えられる。

このように鉄筋が介在する場合に正確なひび割れ深さを推定するには、鉄筋の影響を排除しうるような計測法を提案するか、あるいは鉄筋の影響を受けずに計測できる計測ポイントを見つけるか、いずれかの対応が必要となってくる。

ここでは、鉄筋のある供試体について超音波伝播時間を計測し、ひび割れ深さの推定、計測された超音波の伝播経路などについて検討を行なうこととした。

4.2 鉄筋が介在する場合の超音波伝播経路について

ここでは、鉄筋がある場合の超音波伝播経路について図-3.18に示すような4通りの経路を仮定した。経路Γ1、経路Γ2は鉄筋のない場合に想定したものと同様である。経路Γ3は鉄筋表面で反射するものである。経路Γ4ではコンクリート中を伝播する超音波が鉄筋中に入る位置によって受信側の探触子で計算される伝播時間が異なる。従って、ここでは超音波伝播時間が最短となる経路を計算で求め、これを経路Γ4と考えた。鉄筋中の超音波伝播速度は5.12km/secと仮定した。

4.3 計測結果に基づく超音波伝播経路の推定

4.3.1 鉄筋が1本の場合

供試体2および供試体4の一部は、鉄筋が1本のみ配置されていて、鉄筋の径が異なっている。それぞれひび割れを4つの地点で計測を行なっている。各地点での超音波の伝播時間を計測し、想定した4つの超音波伝播経路(Γ1~Γ4)を仮定して超音波伝播時間をあらかじめ計算しておき、計測値がどの値にもっとも近いかな比較を行なった。

この結果を図-3.19および図-3.20に示す。図-3.19はひび割れ深さ120mmで測点9~12での計測結果を示す。横軸は、ひび割れ~探触子前面までの距離を示す。各測点と、鉄筋までの水平面上での距離は測点9,10では50mm、11では100mm、12では150mmである。図-3.19の測点9および10での測定結果はいずれも探触子~ひび割れ間の距離が200mm以内では鉄筋表面で反射して到達する経路(Γ3)を辿った場合の伝播時間にはほぼ一致している。このことから、鉄筋から測線までの水平距離が50mm程度の場合、第1波として計測される波は鉄筋表面反射波で、ひび割れ深さを推定するうえで想定している経路を辿っていないことからここで用いた計測装置では、この領域でのひび割れ深さの推定は困難で

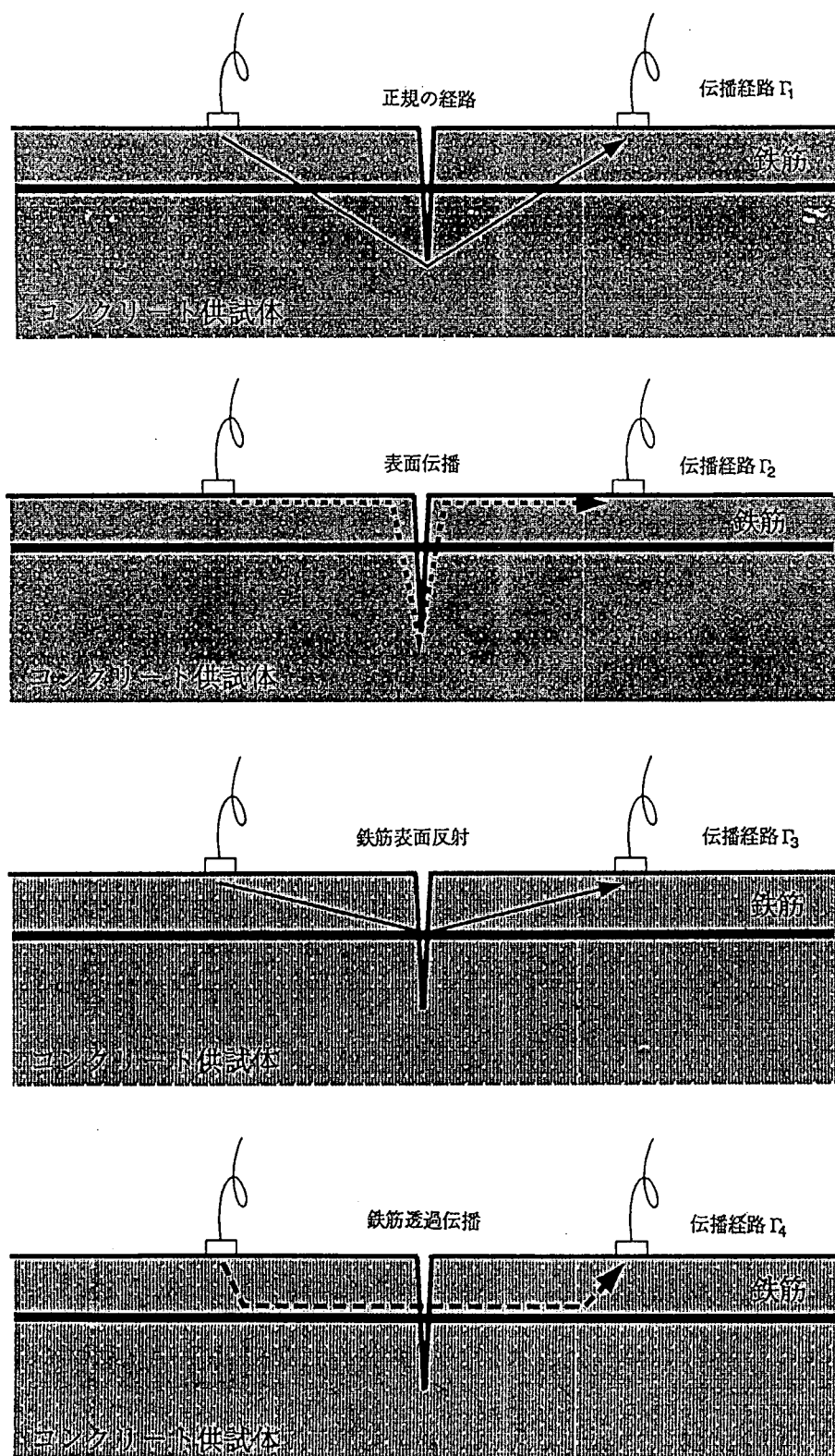


図-3.18 超音波伝播経路

あると考えられる。一方、探触子～ひび割れ間の距離が250, 300mmの場合は、鉄筋表面ではなく、ひび割れ先端を回折した超音波伝播時間にはほぼ一致していることが分かる。この理由については必ずしも明確ではないが概ね次のように推定されると考えられる。ここで用いた計測機器は、装置内部でト

リガーをかけて伝播時間のみをデジタルで表示するものであることから考えると、第1波の振幅が機器内部で想定されているトリガーレベルよりも大きいかどうかで、伝播時間が大きく異なると予想される。測点9および10では鉄筋表面で反射した超音波のレベルは小さいものの、探触子～ひび割れまでの距離が短い場合は、トリガーレベル以上に達してこの波を拾って伝播時間を計測された。しかし、コンクリート中を伝播する超音波は、伝播中に減衰するため、探触子～ひび割れまでの距離が長い場合超音波の振幅が小さくなり、トリガーレベルを下回ったために、この超音波を拾うことができなかったものと考えられる。一方、鉄筋中を透過して伝播する超音波は、探触子～ひび割れまでの距離が100mm以上のところでは鉄筋表面を反射して到達する超音波よりも先に到達するが、この超音波は拾っていないことが分かる。

測点11ではそれぞれの経路を伝播して到達する超音波の伝播時間がそれぞれ接近しているので、明確な判断を下すことができない。

測点12では、鉄筋までの距離が大きいため鉄筋を介して伝播するよりもひび割れ先端を回折して到達する超音波の方が第1波となるため、計測結果もひび割れ先端を回折して到達すると仮定してえられた伝播時間と近い値を示している。すなわち、鉄筋を介して到達する超音波よりもひび割れ先端を回折して到達する超音波の方が先に到達するような位置に選べば、鉄筋の影響はほとんどでないことが分かる。

図-3.20は同様の計測を200MHzの探触子（高周波型）を用いた場合の計測結果であり、図-3.19と同様の結果を示していることが分かる。すなわち、この範囲で探触子の卓越周波数を変化させても、ほとんど上記の傾向を変えることはできないと考えられる。

図-3.21はやはりひび割れ深さが120mmの場合で鉄筋径は25mmのものを用いた場合である（供試体4の測点5～8）。この場合も、鉄筋からの水平距離が150mm以上でひび割れ先端を回折して到達する超音波が第1波となる場合は安定して、ひび割れ先端での回折波を拾うことができているが、これより測定地点が鉄筋に近づいた場合は、鉄筋の影響を受けていることが分かる。ただし、供試体2での計測結果とは異なり、鉄筋中を透過していると考えられる超音波を拾っている場合が多いことが分かる。これは鉄筋径が太く、鉄筋中を透過する超音波のレベルが大きくなったためであると考えられる。

ここまで示した計測結果は受信した超音波の波形を観察することなく、伝播時間を表示する飽和増幅方式の機器を用いた結果であるが、鉄筋での反射波の影響をより詳しく検討するため、波形観測式の計測機器で（探触子の卓越周波数が50kHz）受信波形を観察した。この結果を図-3.22に示す。ここで示した波形は、ひび割れ～探触子中央までの距離が50mmで、供試体2のひび割れ深さ120mmの箇所、鉄筋の直上から50mmづつ探触子を離して計測を行い、得られた超音波の波形を示したものである。図中①は鉄筋直上、⑥は鉄筋から水平距離で250mm離れた場合の波形である。また受信波形の時刻歴中に矢印を示しているが、この位置が第一波の立ち上がりと判断されるところである。

この結果からも分かるとおり、鉄筋位置から測定地点までの水平距離が100mmまで（図中①～③まで）はそれより水平距離が大きい場合（図中④～⑥）よりも立ち上がり位置が速くなっていて、鉄筋の影響が現われていることが分かる。①での観測波形を見ると第一波の立ち上がりが逆方向になっている。

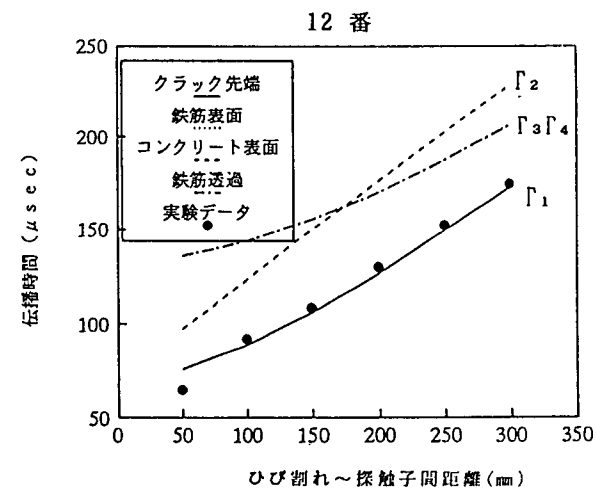
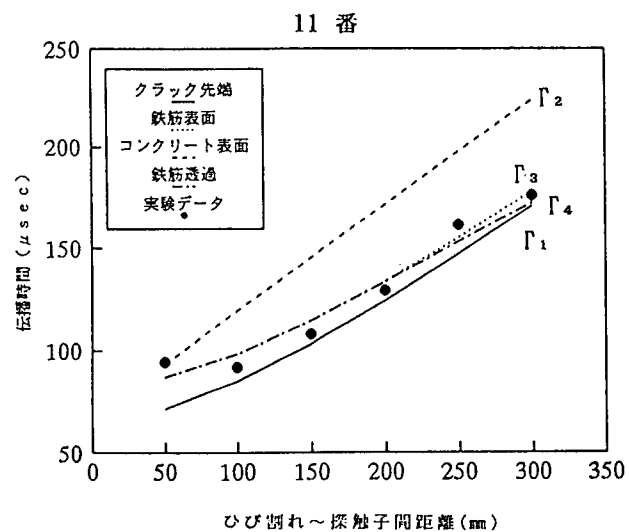
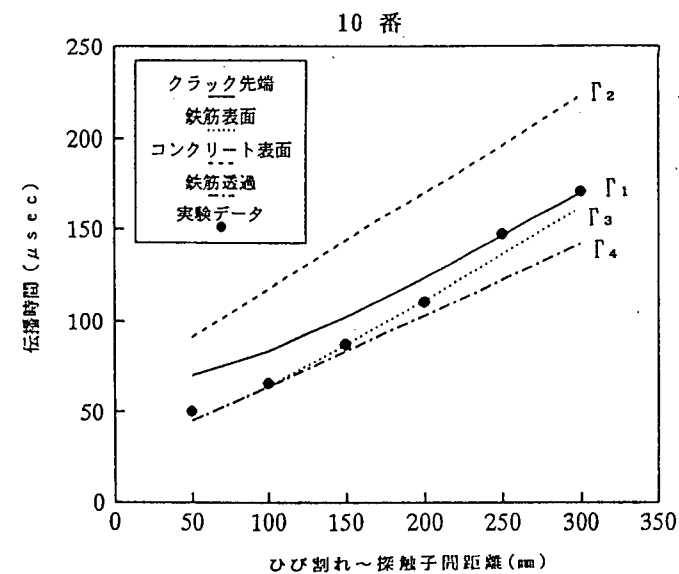
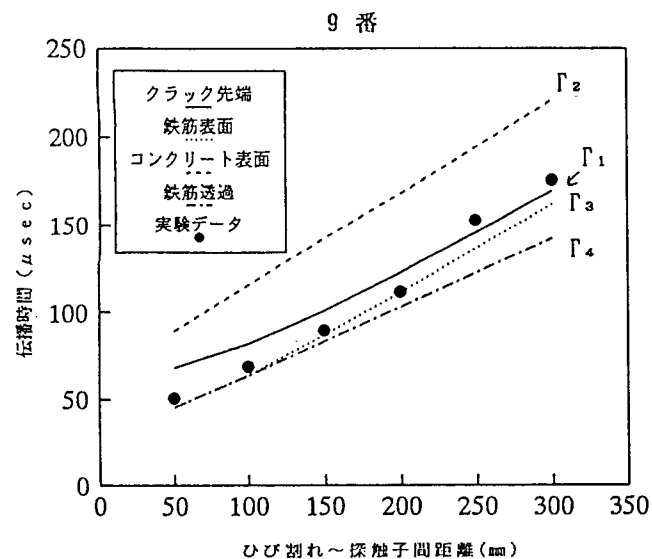


図-3.19 供試体2の測点9～12における超音波伝播時間の測定値と理論値の比較 (54kHz)

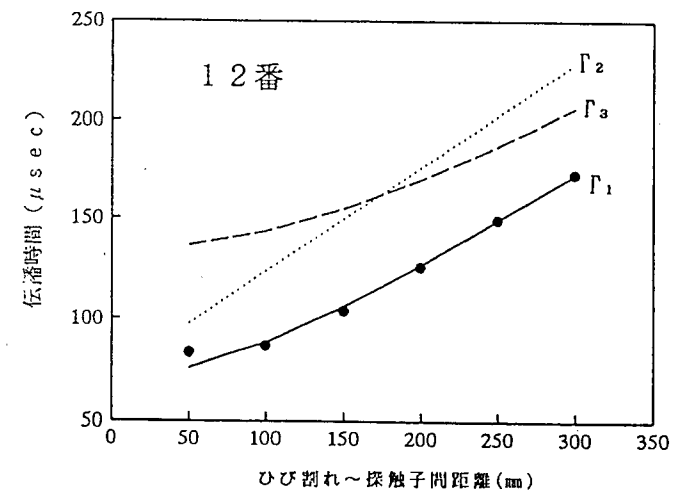
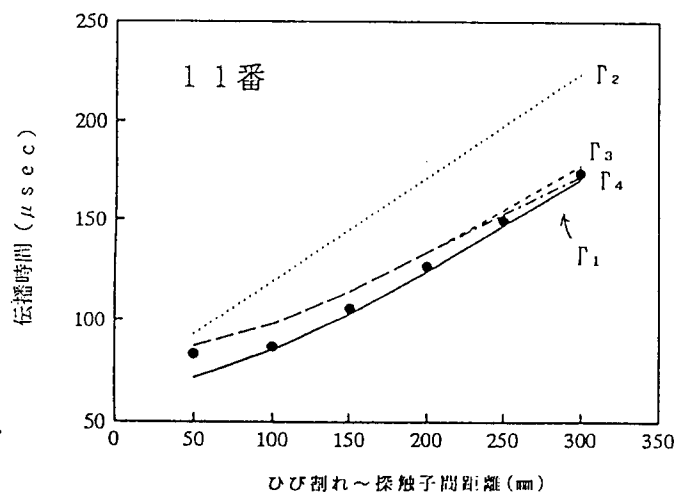
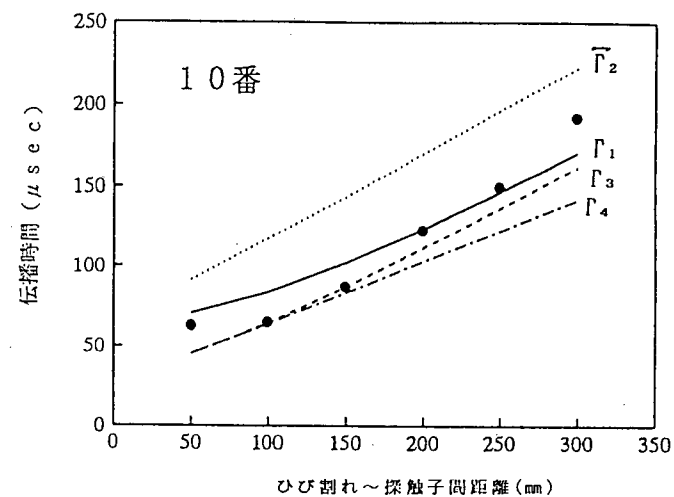
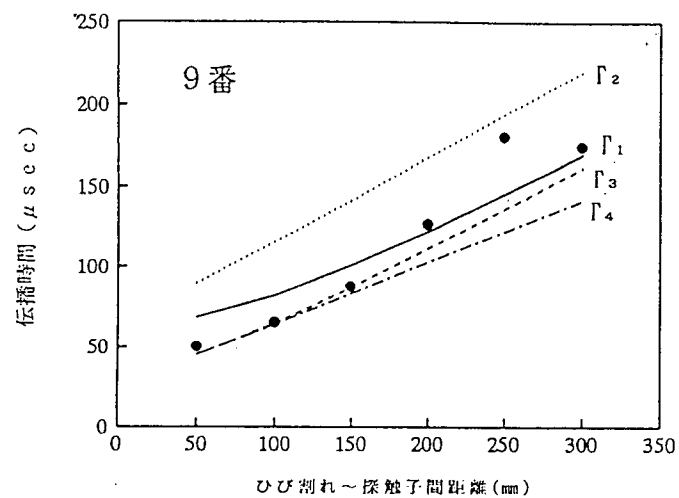


図-3.20 供試体2の測点9～12における超音波伝播時間の測定値と理論値の比較
(200kHz)

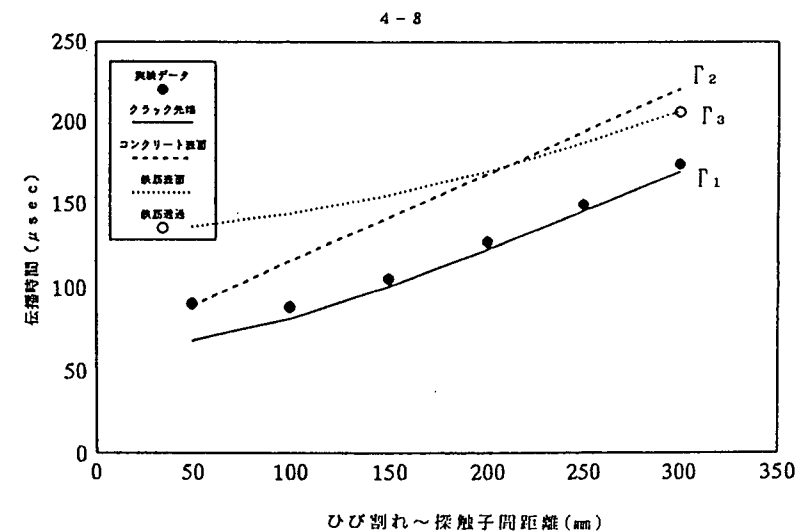
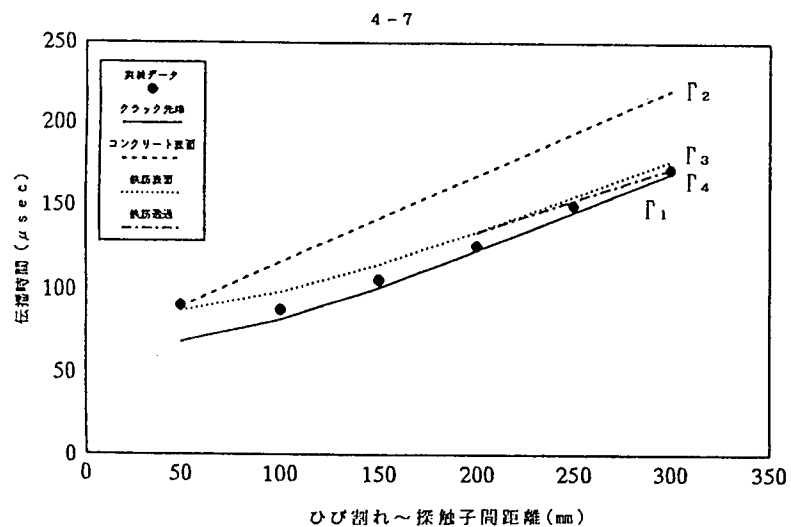
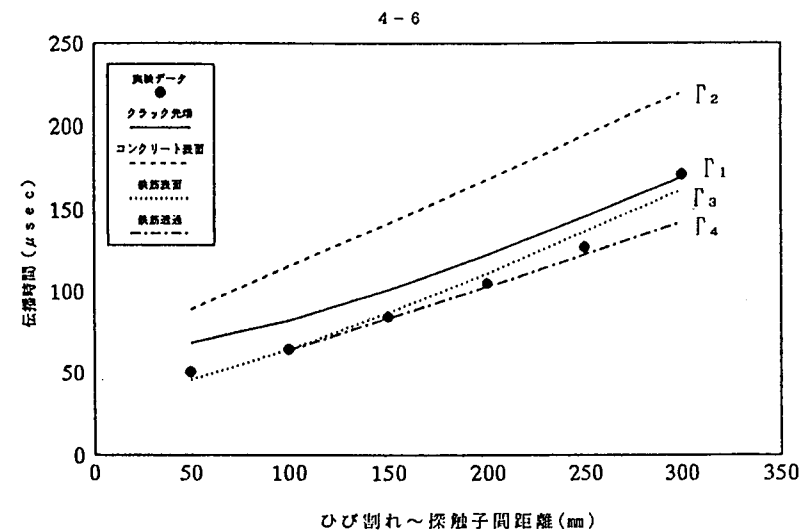
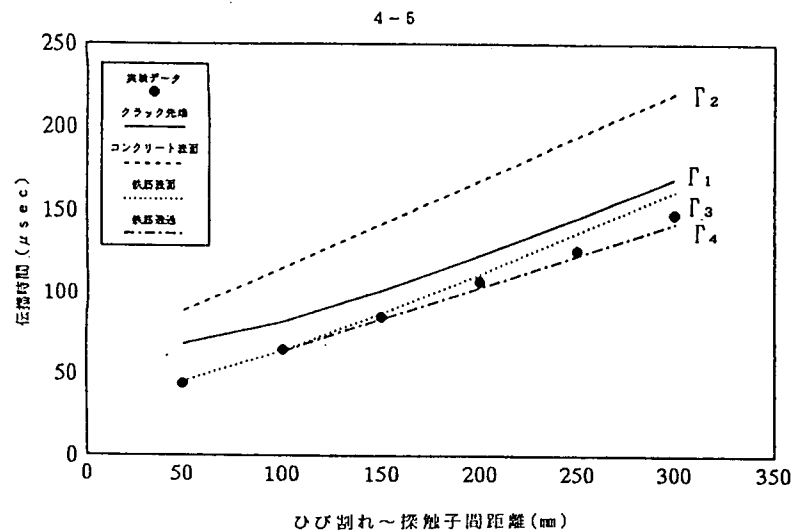


図-3.21 供試体4の測点5～8における超音波伝播時間の測定値と理論値の比較 (54kHz)

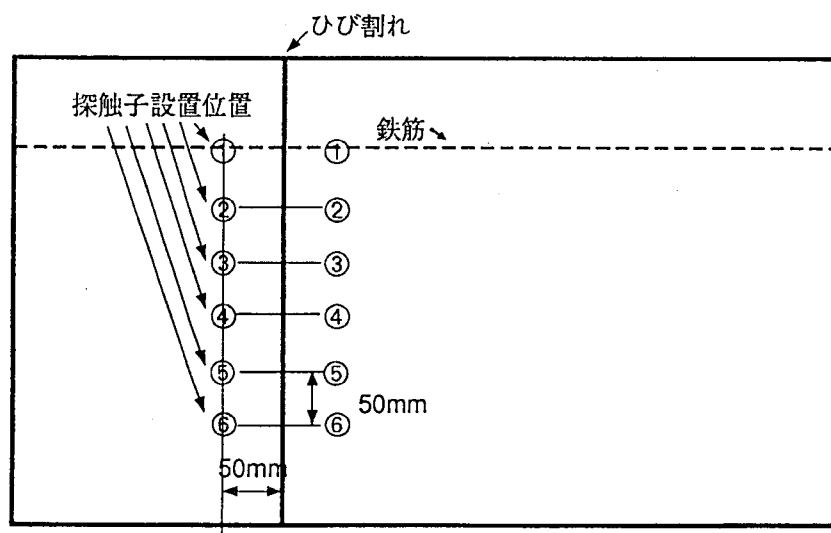
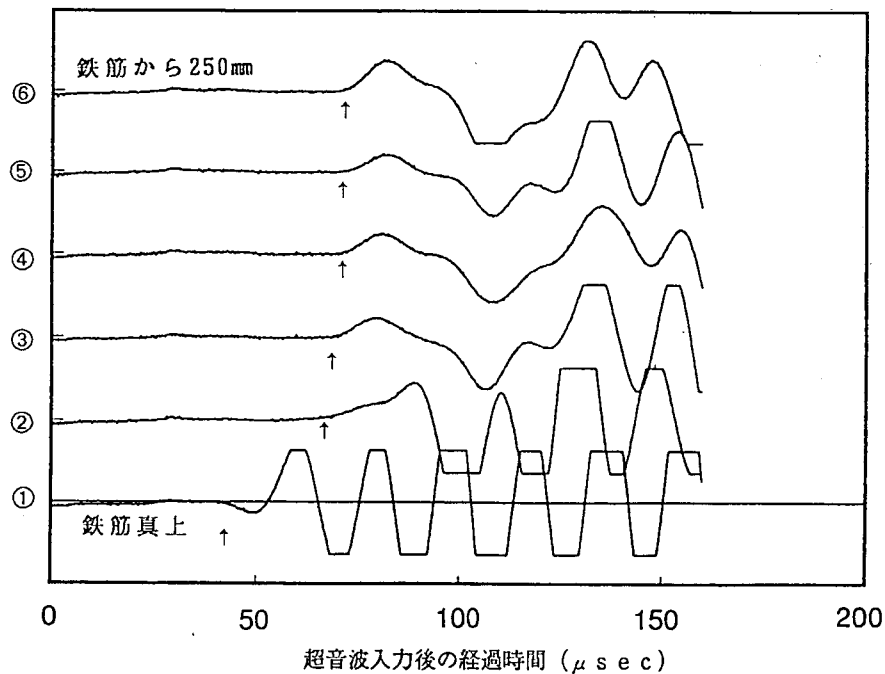


図-3.22 供試体2のひび割れ深さ120mmの所の受信波観測結果

鉄筋反射波は位相が逆転すると言われてきたが、この現象はここでも観測されている。また、②③での観測波形の立ち上がりは④～⑥に比べて不明瞭であり、やはり鉄筋の影響が含まれていることが予想される。ただし、鉄筋の反射波を排除し、ひび割れ先端で回折した波を取り出すこと(波形の分離)は不可能であることが分かる。

従って、計測地点は鉄筋から水平距離で150mm程度はなれなければ、ひびわれ先端で回折した超音波の正確な伝播時間の計測は難しいと考えられる。

4.3.2 鉄筋が2本の場合

供試体1あるいは供試体4の一部はひび割れを介して2本の鉄筋が配置されている。このため、複数の鉄筋の影響を受け、いずれの計測位置においても適切なひび割れ深さの推定が困難な状況になっ

ている。ここでも、4.3.1でおこなったのと同様、各計測地点において、ひび割れ～探触子間の距離と、超音波の伝播時間の関係を計測することにより、計測された超音波の伝播経路を推定することとした。

供試体1の測点5～8（ひび割れ深さ90mm）および測点9～12（ひび割れ深さ120mm）での結果を図-3.23、3.24に示す。この結果を見ると、ひび割れ先端で回折した場合の経路にやや近いものの、誤差が生じていて、鉄筋が1本の場合のように、受信した第一波がどの経路を辿ったものなのか明確ではない。ここでは鉄筋間隔が狭く、いずれの計測地点でも鉄筋の影響を受けたためにこのような結果になったものと考えられる。

4.4 ま と め

超音波伝播時間を用いて、ひび割れ深さを推定する場合、受信した超音波の第一波は、ひび割れ深さを推定する際に仮定した経路を辿っていなければ、試験法そのものが成立しない。鉄筋の存在により、ひび割れ先端での回折経路以外に、鉄筋表面での反射、あるいは鉄筋透過といった超音波伝播経路を作り出すため、正確なひび割れ深さの推定が、不可能になることが明らかとなった。ただし、鉄筋の配置位置と、超音波伝播時間の計測地点の位置関係により、鉄筋表面あるいは鉄筋透過といった超音波伝播経路を辿るよりもひび割れ先端での回折経路を辿ったほうが、早く受信探触子に到達する場合は、鉄筋の影響を考えなくてもよいものと考えられる。鉄筋間隔が広い場合、このように鉄筋の影響が出ないところまで探触子の設置位置を離すことにより、ひび割れ深さの推定は可能であるが、鉄筋間隔が狭い場合、鉄筋の影響を受けない位置を見いだすことが困難となる場合もあると考えられる。

なお、受信波を観測することにより鉄筋の影響を受けていることが判定できるが、鉄筋の影響によって到達した超音波の分離は50kHzの探触子の場合ほぼ不可能であり、周波数を大幅に大きくするなどの検討が必要であると考えられる。

5. 直角回折波法・伝播時間法（波形観測方式）によるひび割れ深さ推定結果

これまでは主として、超音波伝播時間法（飽和増幅方式）による測定結果について述べてきたが、ここでは、直角回折波法・伝播時間法（波形観測方式）によるひび割れ深さ推定結果について報告する。

ここで示した伝播時間法は原理そのものは、これまで述べたものと同様であるが、熟練した技術者の判断により、適宜第一波以降の後続波を取り上げて、伝播時間を測定しているものである。ひび割れ深さの推定には $T_c - T_o$ 法を採用している。

ひび割れ深さの推定が困難となるのは、ひび割れ深さに対して、鉄筋が浅い位置に存在する場合である。特にひび割れ深さの推定が困難であったと考えられる、供試体1の測点9～12、供試体2の測点9～12、供試体4の測点5～8および9～12について（いずれもひび割れ深さの真値は約120mm）、ひび割れ深さの推定結果を図-3.25に示す。この結果から、ひび割れ深さの推定結果の精度はかなり良好であるといえる。ただし、供試体4の測点9～12では伝播時間法にやや大きな誤差が生じていて、鉄筋の影響の排除が困難であったものと考えられる。

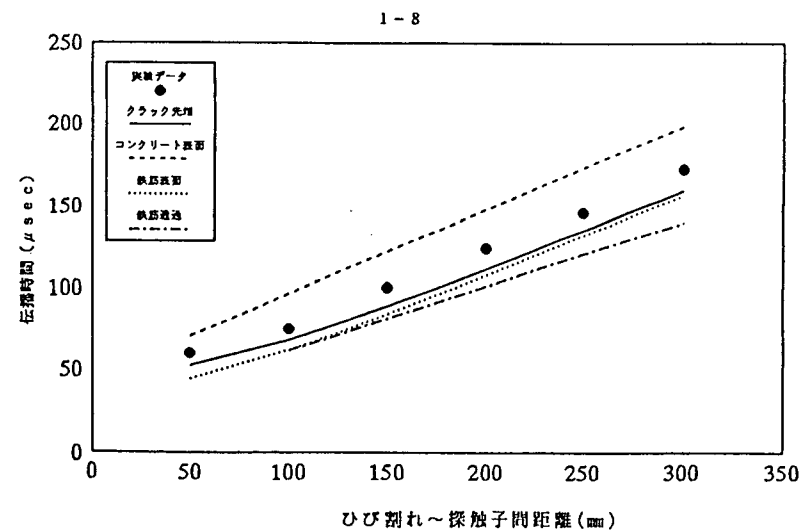
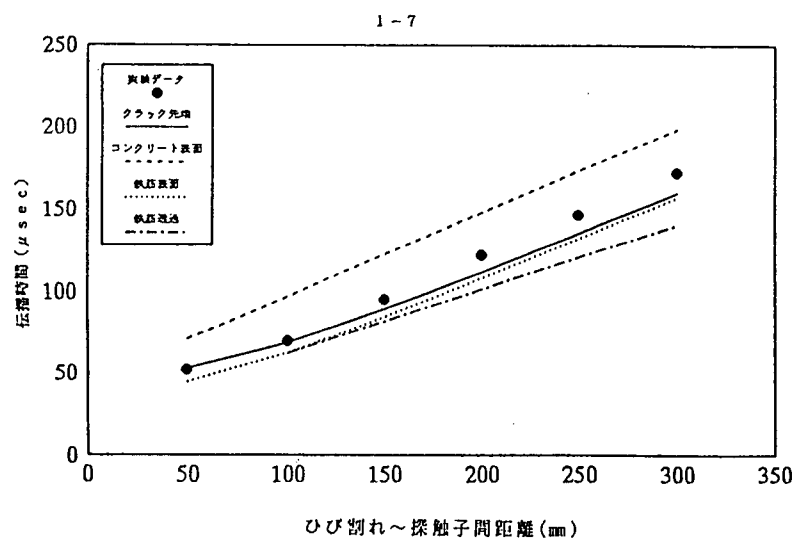
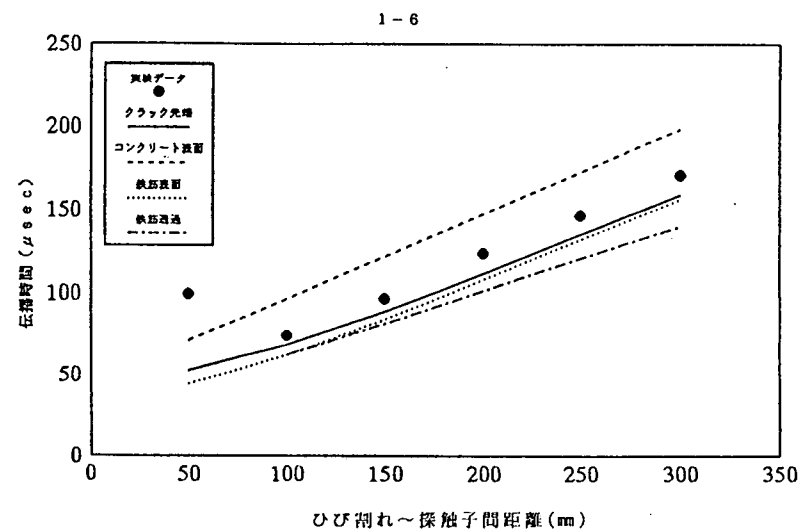
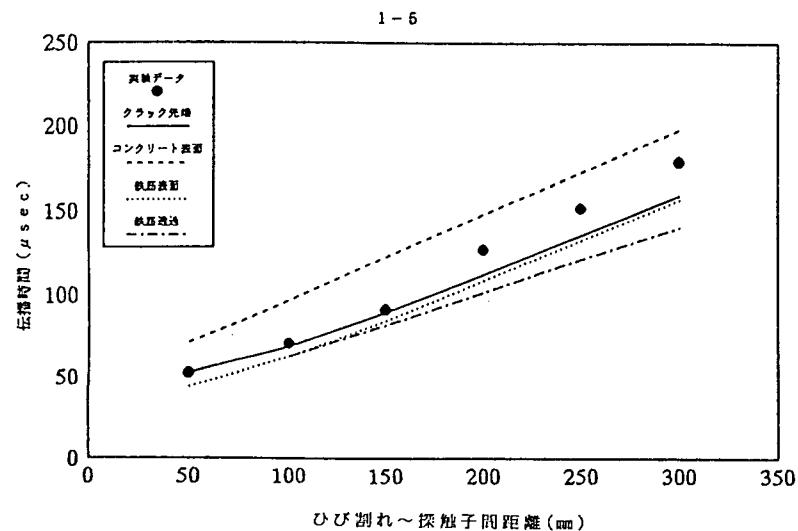


図-3.23 供試体1の測点5～8における超音波伝播時間の測定値と理論値の比較

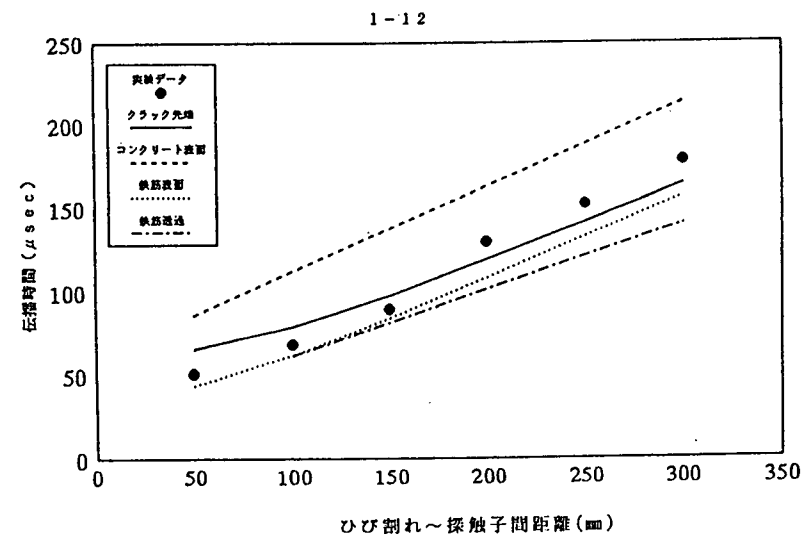
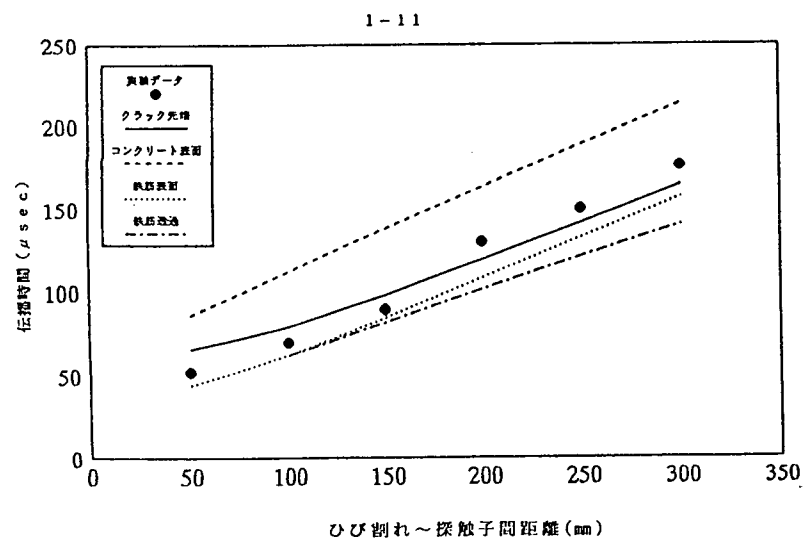
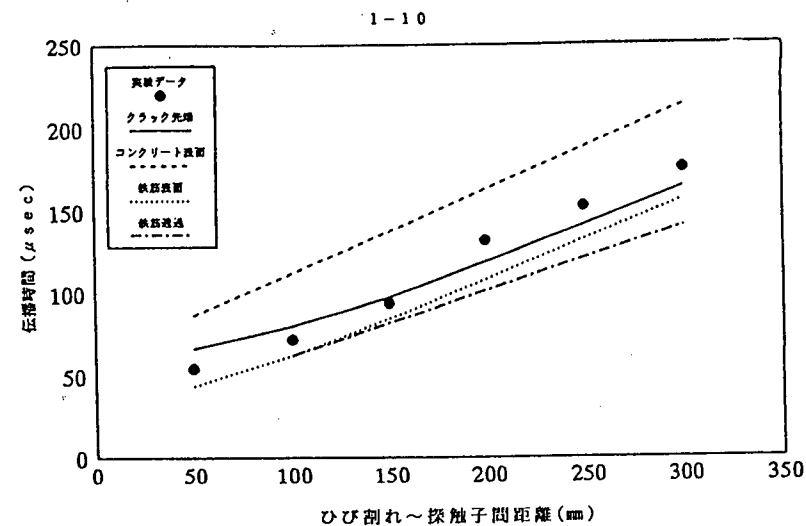
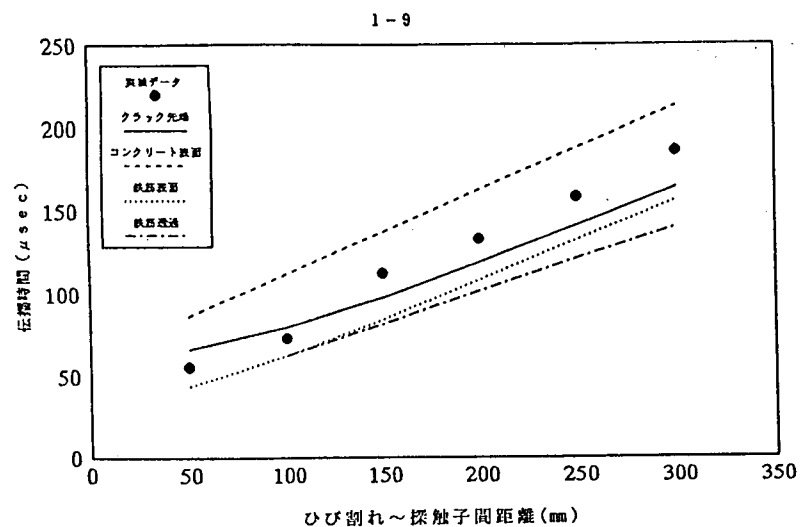


図-3.24 供試体1の測点9～12における超音波伝播時間の測定値と理論値の比較

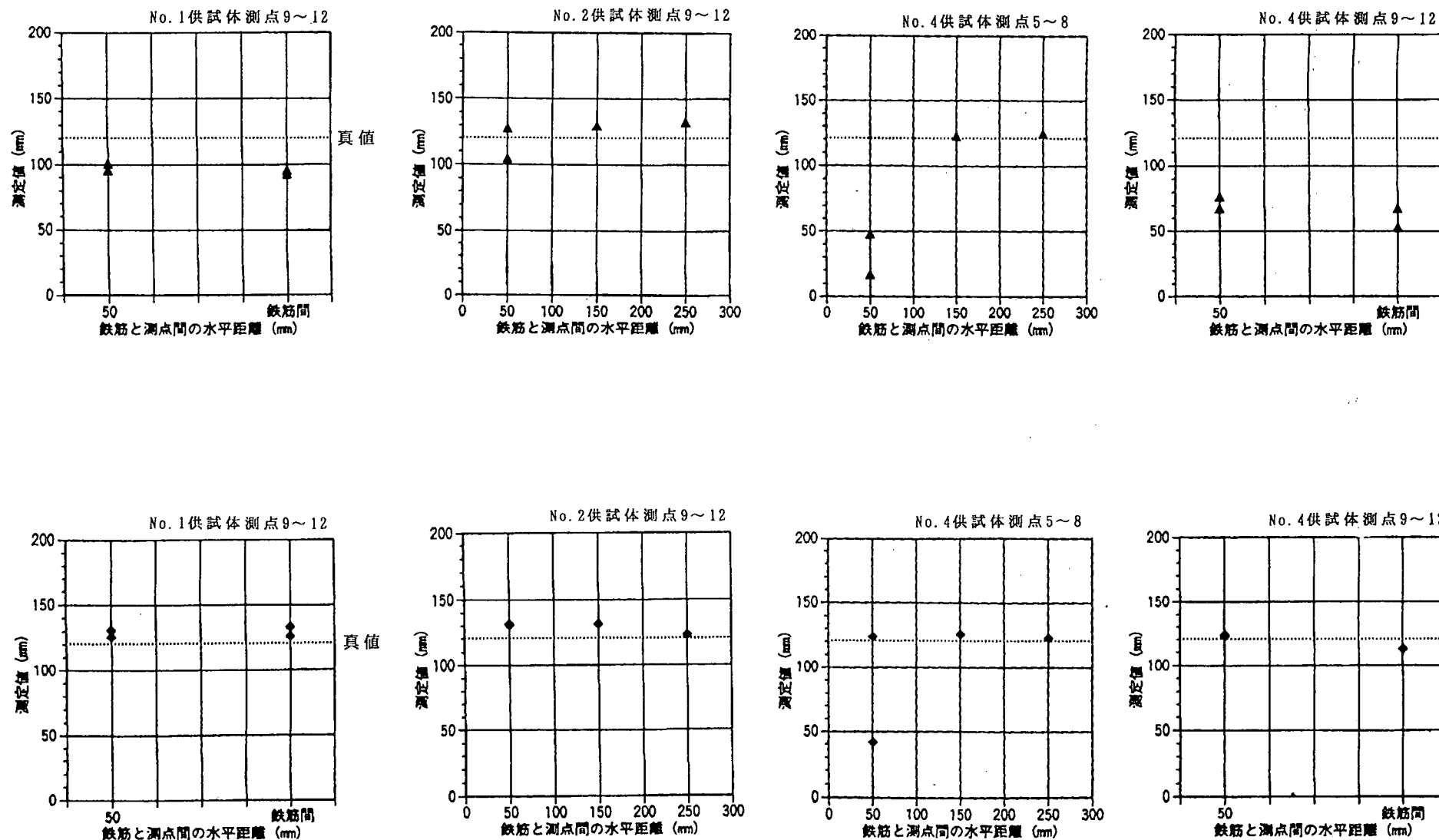


図-3.25 超音波伝播時間(波形観測方式)(上段)及び直角回折波法(下段)によるひび割れ深さ推定結果

あ と が き

本報告書は、まず第1部で、コンクリート構造物の補修実態調査結果を紹介し、維持管理の合理化の一部として、構造物の健全度診断が重要なこと、構造物のおかれる環境条件によって異なるが、非破壊検査には、比較的軽微な劣化をとらえることが要求されることを示した。第2部～第4部では、鉄筋の腐食、鉄筋位置、ひび割れ深さの非破壊検査手法について、原理・標準的な測定方法、測定にあたっての留意事項について記述した。また、供試体レベルでの非破壊検査の試験計測結果を示し、測定誤差について検討した結果を付録として収録した。

コンクリート構造物の非破壊検査方法は、通常のコンクリートの材料実験などと異なり、さまざまな配筋状態・ひび割れ状況・環境条件におかれた実構造物が対象となるので、実施にあたってはその状況に応じて臨機応変に対処すべきであるが、試験法の成り立ちや原理から考えて、必ず遵守すべき項目があると考えられる。本マニュアルは、可能なかぎりこれらの項目を収録し、留意事項もあわせて述べたつもりである。

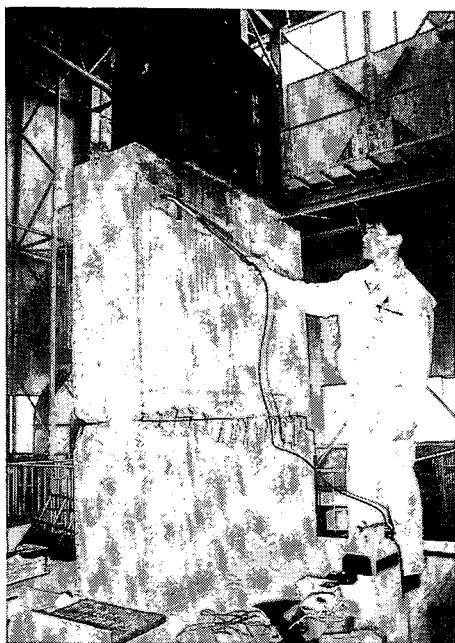
しかし、一部には、実験室レベルの内容にとどまった所もあり、本マニュアルを参照しただけでは、実構造物への適用において、判断に迷う箇所もある可能性がある。

今後、試験法の精度向上とともに、現場への適用性の拡大のため、調査研究を継続してゆく所存である。

非破壊検査の実施状況



供試体への散水



自然電位測定



写真-1 鉄筋腐食の非破壊検査実施状況（自然電位法）

供試体への散水



自然電位測定

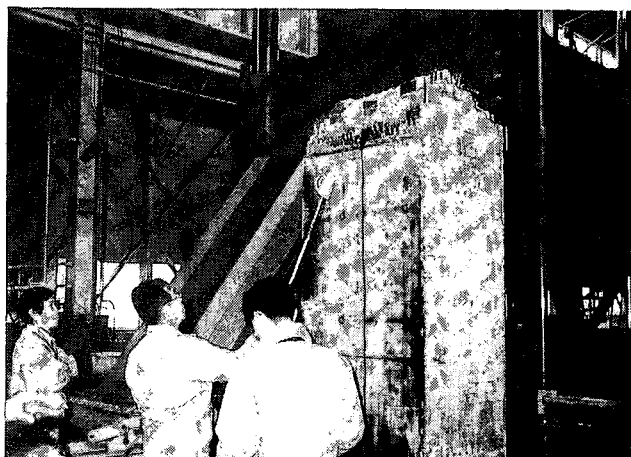
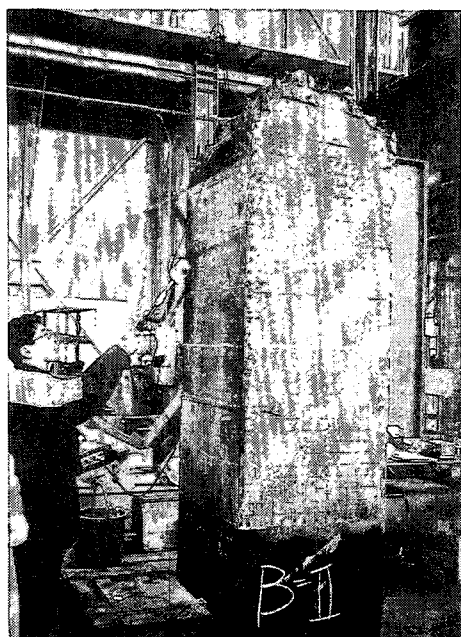


写真-2 鉄筋腐食の非破壊検査実施状況

自然電位測定



電極の様子

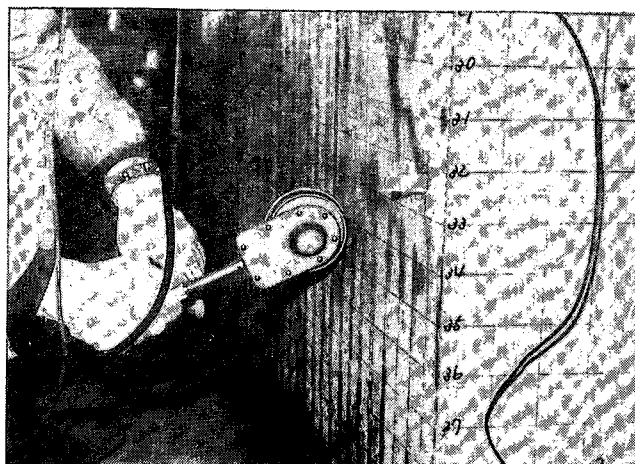
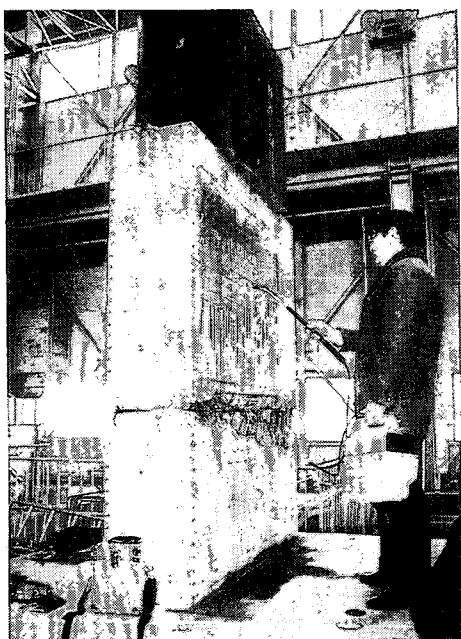


写真-3 鉄筋腐食の非破壊検査実施状況

供試体への散水



分極抵抗の測定



写真-4 鉄筋腐食の非破壊検査実施状況（分極抵抗法）

削 孔



フェノールフタレイン噴霧

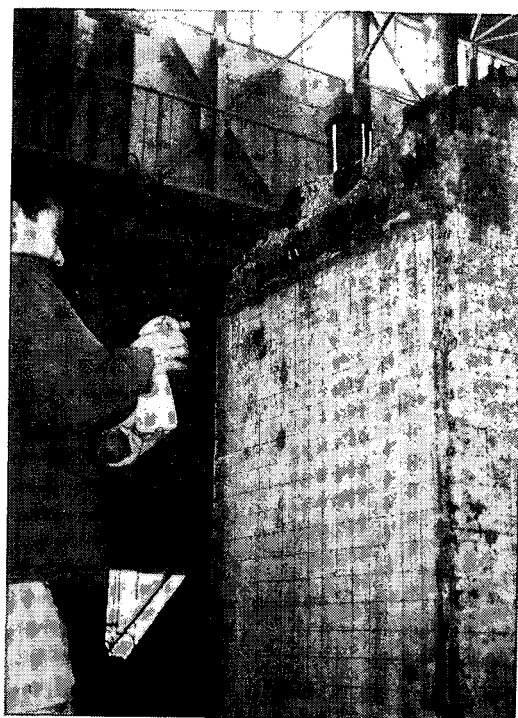
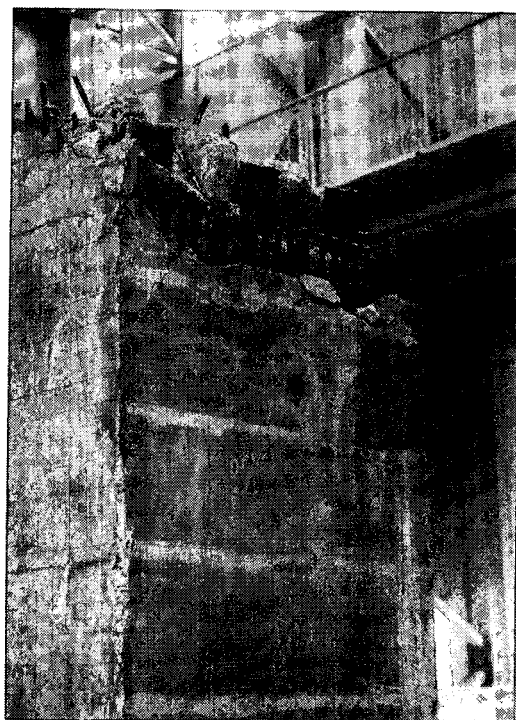


写真-5 中性化深さの測定

コンクリートの発色



中性化深さ測定



写真-6 中性化深さの測定

プローブの移動(電磁誘導法)



グリース塗布



アンテナの移動(電磁波反射法)



探触子を軽く固定



結果の分析(電磁波反射法)



受信波の観測

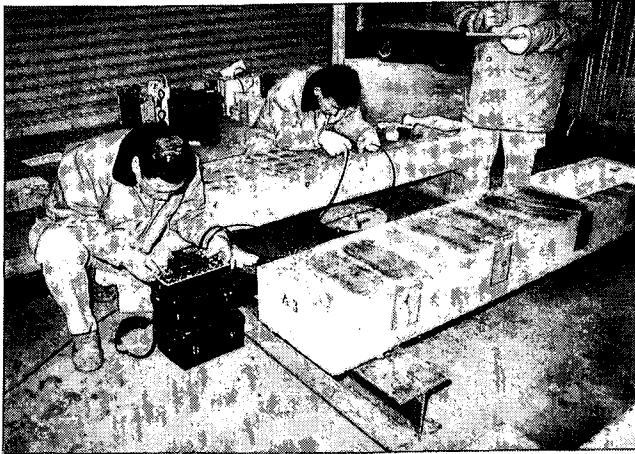


写真-7 鉄筋位置の非破壊検査

写真-8 超音波を利用したひび割れ
深さの非破壊検査実施状況

探触子間隔の確認



探触子間隔の確認



写真-9 超音波を利用したひび割れ深さの非破壊検査実施状況

直角回折波法による測定



直角回折波法による測定



写真-10 超音波を利用したひび割れ深さの非破壊検査実施状況

共同研究者名簿

建設省土木研究所

材料施工部コンクリート研究室

室長	河野 広隆
主任研究員	渡辺 博志

日本構造物診断技術協会

技術委員会

技術委員長	野 尻 陽 一	(鹿島建設株式会社)
技 術 委 員	山 田 一 宇	(前田建設工業株式会社)
幹 事 委 員	阿 部 久 雄	(清水建設株式会社)
〃	内 田 明	(前田建設工業株式会社)
〃	宅 間 善三郎	(オリエンタル建設株式会社)
〃	長 尾 晃	(常磐興産株式会社)
〃	野 永 健 二	(株式会社銭高組)
〃	丸 屋 剛	(大成建設株式会社)
委 員	伊 藤 祐 二	(株式会社フジタ)
〃	江 口 博 昭	(三信建設工業株式会社)
〃	片 岡 国 牟	(日本防蝕工業株式会社)
〃	小 林 茂 広	(大阪セメント株式会社)
〃	込 山 貴 仁	(株式会社コンステック)
〃	瀬 野 康 弘	(東急建設株式会社)
〃	高 山 仁 志	(中外テクノス株式会社)
〃	林 啓 司	(株式会社安部工業所)
〃	松 村 英 樹	(新構造技術株式会社)
〃	水 嶋 茂 幸	(東京技工株式会社)
〃	山 口 哲 夫	(株式会社東横エルメス)
〃	山 口 勝	(株式会社小野田[(株)クレオ])
〃	山 中 勘詞郎	(富士物産株式会社)
〃	山 本 明 雄	(鹿島建設株式会社)
〃	吉 田 明	(株式会社緑興)

コンクリート構造物の健全度診断技術
の開発に関する共同研究報告書
ーコンクリート構造物の非破壊検査マニュアルー

ISSN 0386-5878
共同研究報告書 第106号
平成6年7月(1994)

要 旨

コンクリート構造物の維持管理を合理化するための手法の一として、非破壊検査に基づく客観的な健全度診断を行ない、この診断結果に基づいて構造物の補修を実施する方法が注目を集めている。本報告書は、コンクリート健全度診断の要素技術である非破壊検査法について、測定誤差などに関する試験調査を実施し、その結果をとりまとめるとともに適切な計測方法についてマニュアルの形で提案したものである。

キーワード：コンクリート構造物、維持管理、非破壊検査、腐食、ひび割れ、かぶり

○

郵便はがき

41円切手
をはって下
さい。

305-□□

建設省土木研究所
材料施工部コンクリート研究室
御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 001

No. 001

配布先氏名

配布先住所

○

共同研究報告書 第106号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印