

論文 高密度配筋下における充填検知センサを有効利用したかぶり厚さ測定手法の開発

金子 稔*1・南 浩輔*2・安田 正雪*3・坂井 孝*4

要旨: 打設時に、コンクリートが隅々まで充てんされていることを確認するため、鉄筋および型枠内部に設置した充てん検知センサを、コンクリートの硬化後も有効利用し、弾性波を用いたかぶり厚さを測定する手法を開発した。本手法は高密度配筋下および鋼繊維補強コンクリートのかぶり厚さの測定が可能であり、高密度配筋下での電磁誘導法や電磁レーダ法の適用範囲外の部分も測定できることを明らかとした。

キーワード: かぶり厚さ, 充てん検知センサ, 弾性波, 鋼繊維補強コンクリート, 高密度配筋

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質保証および維持保全の重要性が高まってきているが、コンクリート構造物のライフサイクルに大きな影響を及ぼすコンクリートの充てんのみならず鉄筋のかぶり厚さ確保は重要な管理項目である。そのため、これらに関わる非破壊試験による技術の確立が求められている。このうち、かぶり厚さ測定の非破壊試験では電磁誘導法や電磁レーダ法が広く一般に利用されている。しかし、これら方法はコンクリート内部に鉄筋が密に配置された場合や鋼繊維補強コンクリートのような電磁波が散乱する物質を多量に含む場合は、かぶり厚さの精度の良い計測は原理上難しいのが実状である。

一方、著者らは、コンクリート構造体の品質保証するための一手法として、コンクリートの打込みから出来形までの管理について、「充てん検知センサによるコンクリート充てん検知システム」などを既に開発し¹⁾²⁾、さらにコンクリート構造体内部に埋め込まれたこの充てん検知センサ（以下、センサと略す）を利用した弾性波による構造体の出来形管理などへの応用を提案している³⁾。そこで、高密度配筋などの部材についても鉄筋表面に予めセンサに取り付けることで、弾性波法によりコンクリート表面からセンサ間の距離が推定できることから、高密度配筋の条件下でのかぶり厚さ計測への利用が考えられる。

本報は、高密度配筋の試験体などの鉄筋にセンサを設置し、コンクリート打込み時の充てんをセンサで確認後、コンクリートの硬化後もこれを有効利用し、弾性波によるかぶり厚さ測定に関する実験結果をとりまとめたものであり、あわせて電磁誘導法や電磁レーダ法によるかぶり厚さ測定結果と比較検討したものである。

2. かぶり厚さの測定原理

かぶり厚さの測定で用いるセンサは充てん検知の際にコンクリート中に埋め込んだものを利用する。このセンサは写真-1 に示す形状で円板状の圧電セラミックスを約 18mm 角の樹脂ホルダーに取り付けたものである。コンクリートの充てん検知は、センサを予め型枠面や鉄筋等へ取り付け、コンクリート打込み時にセンサを可聴域の周波数（3～15kHz）で振動させ、その周波数特性を検出することによってセンサが周囲の物質（コンクリート、水、空気、他）を識別し、リアルタイムにコンクリートの充てんおよび未充てんを判別するものである。

かぶり厚さの測定方法を図-1 に示す。コンクリート硬化後に、充てんが確認されたセンサに向けて、コンクリート表面から市販の超音波式コンクリート品質検査器を用いて弾性波を入力すると同時にオシロスコープ

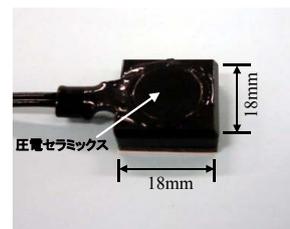


写真-1 充てん検知センサ

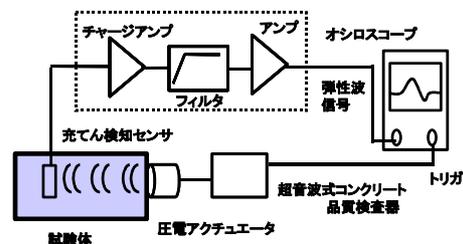


図-1 かぶり厚さ測定方法

*1 曙ブレーキ工業(株) 新商品開発室 主査 (正会員)

*2 前田建設工業(株) 技術研究所 工修

*3 東洋建設(株) 技術研究所 主任研究員 (正会員)

*4 曙ブレーキ工業(株) 新商品開発室 チーフエンジニア

に弾性波発生の場合となるトリガ信号を送る。入力された弾性波を受振すると、センサの圧電セラミックスが電荷を発生し、それをチャージアンプにより増幅して、外乱ノイズを除去するフィルタを通すことにより弾性波の電気信号を得ることが可能となる。オシロスコープの画面上に表示される波形例を写真-2 に示す。弾性波発生トリガ信号から受信波形の現れるまでの時間を計測することで弾性波の伝播時間 (t) を求めることができ、これによって式(1)より、かぶり厚さ (C) を求めるものである。なお、本報では高効率探触子を製作し、グリスを使わずに測定を行った。

$$C = V \cdot t \quad (1)$$

ただし、V：コンクリートの伝播速度(m/s)

3. 実験の概要

実験は、予め所定の鉄筋（主筋）位置にセンサを取り付けた高密度配筋に普通コンクリートを打ち込んだ RC 試験体と、鋼繊維補強コンクリート（以下、SF コンクリートと記す）を打ち込んだ SFRC 試験体の 2 種類を製作して、コンクリート硬化後、コンクリート表面から弾性波法でかぶり厚さの測定を行うとともに、電磁誘導法や電磁レーダ法によるかぶり測定結果と比較検討した。

3.1 試験体の製作

試験体の形状・寸法は、縦横 1000mm、高さ 600mm の角柱である。型枠には塗装合板を用いた。縦筋（主筋）には D22 を横筋（配力筋）には D13 をそれぞれ配して、所定位置にセンサを取付けてコンクリートを打ち込んだ。打込みに際しては所定のかぶり厚さが得られるよう鉄筋が動かないように固定した。また、かぶり厚測定用に鉄筋上部を試験体上部に露出させた。RC 試験体の概要を表-1 および写真-3 に、SFRC 試験体の概要を表-2 および写真-4 に示す。コンクリートの配合を表-3 に示す。センサ取付け位置は写真-3 に示すように、同一配筋の 3 本の縦筋にはそれぞれ上段、中段、下段にセンサ各 1 ヶ、各段で示すと 3 ヶのセンサを取り付け、また各区間の中段横筋には 3 ヶのセンサを取り付けた。

コンクリートは呼び強度 30、スランプ 21cm の普通コンクリート 2.5m³ をアジテータ車で実験場まで運搬し、荷卸し試験で品質を確認後、RC 試験体型枠へ 2 層に分けてコンクリートを打ち込み、各層棒形の高周波振動機で十分締固めを行った。その後、アジテータ車内のコンクリートに対して鋼繊維（長さ 30mm、アスペクト比 50）を混入量が 1.0% となるよう所定量を投入して攪拌後、荷卸し試験後に、SFRC 試験体型枠へ SF コンクリートを打ち込んだ。コンクリートの品質試験結果を表-4、表-5 に示す。表-3 の SF コンクリートの配合は試験結果から換算したものを示した。SF コンクリートでは鋼繊維投

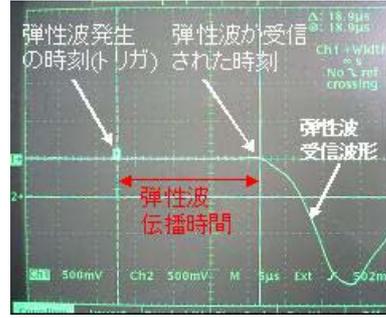
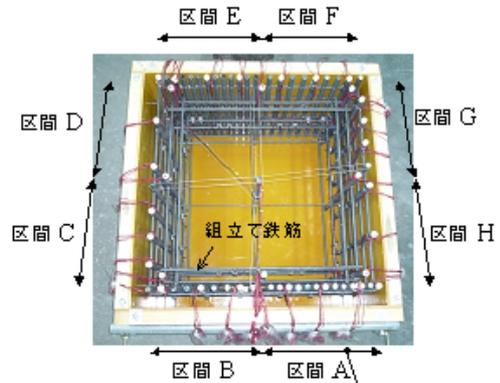


写真-2 伝播時間計測画面

表-1 RC 試験体の概要（普通コンクリート）

区間	鉄筋			センサ取付け個数
	種別	設計かぶり (mm)	間隔, あき (mm)	
A	縦筋 D22	63	35, 13	各段 3
B			50, 28	各段 3
A, B 共通	横筋 D13	50	間隔 100	中段各 3
C	縦筋 D22	63	100, 78	各段 3
D			200, 178	各段 3
C, D 共通	横筋 D13	50	間隔 100	中段各 2
E	縦筋 D22	33	35, 13	各段 3
F			50, 28	各段 3
E F 共通	横筋 D13	20	間隔 100	中段各 3
G	縦筋 D22	33	100, 78	各段 3
H			200, 178	各段 3
G H 共通	横筋 D13	20	間隔 100	中段各 3

注) センサ取付け位置は、縦筋は上段、中段、下段



Aの配筋:横筋 D13@100, かぶり厚さ50mm
縦筋 D22@ 35, かぶり厚さ63mm

センサ
縦筋上段, 中段, 下段に各3ヶ
横筋中段に各3ヶ



写真-3 RC 試験体の概要

入時の攪拌で空気量の巻き込みが多くなったので、SFRC試験体への SF コンクリートを打込みでは振動機で十分締め固めた。なお、いずれの試験体でもかぶり厚さが小さい箇所に設置したセンサ位置でコンクリートの充てんが完了したことを、充てん検知システム装置を用いて確認しながら打込み・締め固めを行った。万一、センサ周囲にコンクリートが充てんされていない場合には、後述の弾性波測定が不能となる。試験体の型枠は材齢 1 日に脱型し、その後はひび割れ防止のため湿布で覆い、さらにビニルフィルムで覆って材齢 56 日まで温度 20℃の恒温室内で養生し、その後温度 10~20℃の室内で保管した。

3.2 弾性波によるかぶり厚さの測定

弾性波によるかぶり厚さ測定は、材齢 1 日、3 日、7 日、28 日、91 日に実施し、かぶり厚さは同一条件のセンサで得られた値の平均値とした。なお、弾性波法でかぶり厚さを算出する際に用いたコンクリートの伝播速度は、試験体と同一のコンクリートを用いて作製したφ10cm×20cm の円柱供試体とφ15cm×30cm の円柱供試体（試験体と同条件で保管した現場封かん養生）の伝播時間を市販の伝播時間計測装置（インパルス方式、出力電圧 500V）を用いて前述と同材齢で測定した。φ10cm×20cm の円柱供試体は強度試験に供した。

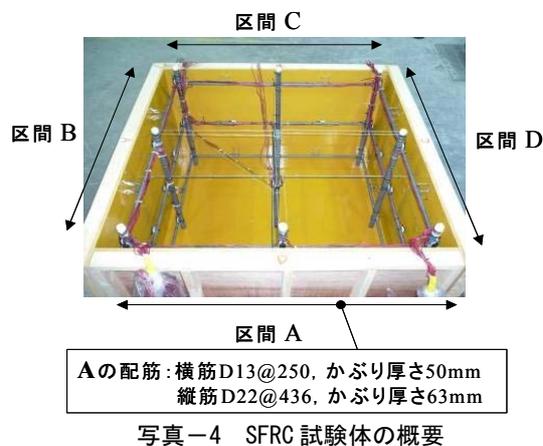


表-2 SFRC 試験体の概要 (SF コンクリート)

区間	鉄筋			センサ取付け個数
	種別	設計かぶり (mm)	間隔 (mm)	
A	縦筋 D22	63	446	各段 3
	横筋 D13	50	250	中段各 2
B	縦筋 D22	53	446	各段 3
	横筋 D13	40	250	中段各 2
C	縦筋 D22	43	446	各段 3
	横筋 D13	30	250	中段各 2
D	縦筋 D22	33	446	各段 3
	横筋 D13	20	250	中段各 2

注) センサ取付け位置は、縦筋は上段、中段、下段

3.3 電磁波レーダ法、電磁誘導法によるかぶり厚さ測定

電磁波レーダ法によるかぶり厚さ測定は縦筋の上段のみとし、電磁誘導法によるかぶり厚さ測定は縦筋の上、中、下段で実施した。以下に両測定法の特徴を示す。

(1) 電磁波レーダ法

本報では電磁波レーダ法による計測は市販品（探査深度：約 150mm、精度±2mm）のアンテナ部およびコンピュータ部からなる装置を使用した。電磁波を送信アンテナからコンクリート内部に向け放射すると、電磁波はコンクリートと電気的性質の異なる物質の境界で反射する。埋設物から反射して戻ってきた反射波信号を、受信アンテナで受信し処理することにより、目標物の位置が検出され、送信から受信までの時間を測定することで、埋設物の位置やかぶりが求まる。一般的に、取扱いが簡便で短時間で結果が得られる手法であるが、作業者の経験や技量に依存するところの多い手法である。また、比

表-3 コンクリートの配合

種類	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
					W	C* ¹	S* ²	G* ³	Ad* ⁴	SF* ⁵
普通コンクリート	21	51.2	4.5	50.3	170	332	879	896	3.15	—
SFコンクリート	16	51.2	9.0	50.3	160	313	828	844	2.97	80

*1: 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)

*2: 神栖市産陸砂 8 割 (表乾密度 2.56g/cm³, 粗粒率 2.50),

桜川市産砕砂 2 割, (表乾密度 2.62g/cm³, 粗粒率 2.97)

*3: 桜川市産碎石 2005 (表乾密度 2.65g/cm³, 実積率 60%)

*4: 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)

*5: SF (鋼繊維) : 密度 8.00g/cm³

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	気温 (°C)
普通コンクリート	20.5	6.0	28.0	25.0
SF コンクリート	16.0	9.0	29.0	25.0

表-5 コンクリートの強度試験結果 (10φ×20cm)

種類	現場封かん養生					標準養生 材齢 28 日
	材齢 1 日	材齢 3 日	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日	
普通 コン クリ ート	10.1	21.4	29.6	37.0	41.0	39.0
	2.291	2.289	2.284	2.281	—	2.300
SF コン クリ ート	3762	4123	4247	4430	4467	4508
	10.9	21.5	28.1	34.5	—	37.1
コン クリ ート	2.248	2.249	2.265	2.255	—	2.287
	3564	3923	4089	4220	4189	4353

注) 上段: 圧縮強度 (N/mm²), 中段: 密度 (g/cm³)
下段: 伝播速度 (m/s)

誘電率の設定が重要であり、かぶり厚さが鉄筋間隔よりも小さい必要がある。

(2) 電磁誘導法

本報では電磁誘導法による計測は、市販品のプローブと表示部からなる装置（鉄筋径 22mm の場合の測定範囲：90mm 以下、精度±5mm）を使用した。高透磁性の U 型コアの両端にコイルを巻いたプローブの一方のコイルに交流電流を流したとき、他方のコイルに誘起される電流を検出する仕組みになっている。電磁誘導法は、鉄筋径か、かぶり厚さの一方が既知である場合、比較的精度良く他方を推定することができる。一般的に、かぶり厚さより配筋条件が測定結果に影響を及ぼし、配筋が密な場合は測定が困難となる。

4. 実験結果と考察

4.1 センサを利用した弾性波によるかぶり厚さ

センサを利用した弾性波によるかぶり厚さの測定では、基準となる弾性波速度が必要となる。本報では、試験体と同じ材料および環境で養生した供試体（φ15cm×30cm）から得られた図-2 に示す弾性波速度を用いた。弾性波速度は普通コンクリートの方が SF コンクリートよりもやや大きいですが、いずれも材齢 1 日から材齢 3 日までに急激に大きくなり、その後材齢 28 日にかけて緩やかに増加するが、材齢 28 日から材齢 91 日ではほぼ頭打ちとなった。

図-3 に配筋条件に関わらず材齢を指標とした全てのかぶり厚さの誤差（センサを利用した弾性波によるかぶり厚さの測定値とノギスによる実測値との差の平均値）を試験体別に示す。各材齢のかぶり厚さ測定時に、図-2 に示した弾性波速度を用いてかぶり厚さを算出したものであるが、いずれの試験体でも材齢によらず安定した測定精度が確保できることがわかる。このことから、センサを利用した弾性波によるかぶり厚さの測定手法は、材齢に関わらずに適用できるものと考えられる。

各試験体の各配筋条件におけるかぶり厚さの誤差の平均値を図-4 と図-5 に示す。RC 試験体では、鉄筋間隔が 35~200mm の縦筋ではかぶり設計値が 63mm のグループ（A から D 区間）の誤差は約 9.6mm で、かぶり設計値が 33mm のグループ（E から H 区間）の誤差は約 4.8mm であり、鉄筋間隔に関わらず誤差の実測値に対する比率は約 15%であった。SFRC 試験体では、縦筋のかぶり厚さの設計値が 33mm~63mm において、かぶり厚さが小さいほどかぶり誤差は小さいものの、鉄筋間隔に関わらず誤差の実測値に対する比率は約 12%であった。これらのことから、センサを利用した弾性波によるかぶり厚さの測定手法は鉄筋間隔には影響されないが、今回用いた弾性波速度によるかぶり厚さ算出の結果では、か

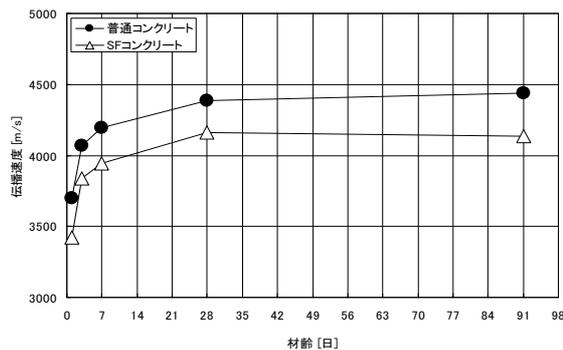


図-2 材齢と伝播速度の関係

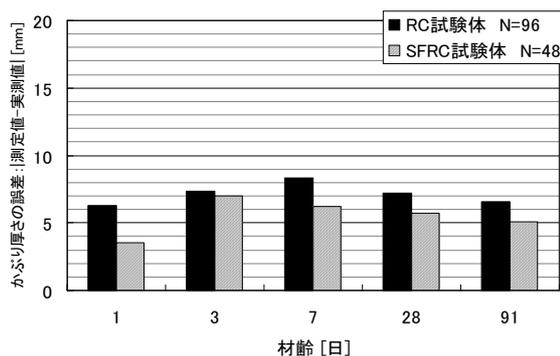


図-3 材齢とかぶり厚さの誤差

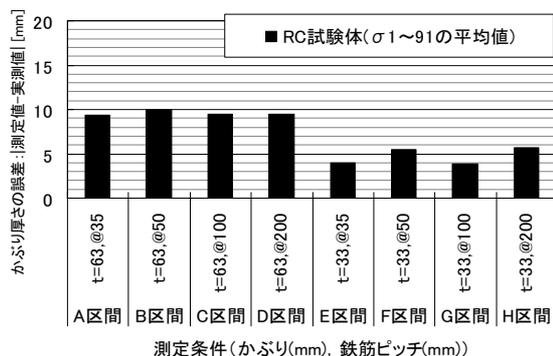


図-4 かぶり厚さの誤差 (RC)

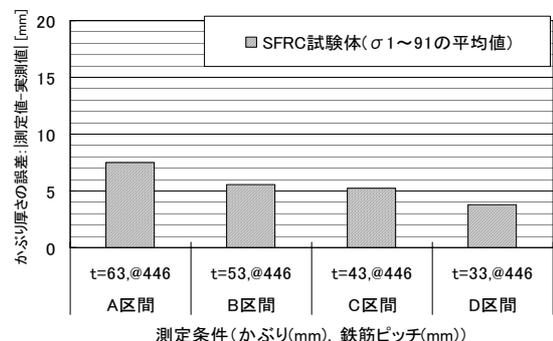


図-5 かぶり厚さの誤差 (SFRC)

ぶり厚さに関わらず概ね 15%程度の測定誤差を有しており、測定精度をさらに向上させるためにはかぶりコンクリートの弾性波速度を正確に捉えることが必要であると考えられる⁴⁾。

次に、計測位置（試験体の上段、中段、下段）や、縦筋（主筋）と横筋（配力筋）別に、かぶり厚さの測定結果を図-6 および図-7 に示す。試験体の高さ方向の測定位置の違いが測定結果に及ぼす影響は明確ではない。しかしながら、弾性波速度は強度、配筋条件、内部欠陥、計測距離および計測部位など様々な要因が影響を及ぼすことが知られており、今後、試験体からコアを採取し、高さ方向の密度などを確認する予定である。

一般に、コンクリート構造体における弾性波を用いた測定方法は、構造体表面からのみの計測となるため、計測したい位置と、情報を得ることが可能な位置に乖離が生じ、真の弾性波速度を確認することが困難な状況がしばしばみられる。そのため、充てん管理に用いたセンサを内部に埋設されたセンサとして有効利用することで、計測対象物内部の弾性波速度を直接取り出し、精度向上に資することが可能であると思われる。

4.2 電磁波レーダ法及び電磁誘導法によるかぶり厚さ

今回は両方式とも仕様範囲外の部分もあるが、比較のため測定を行った。図-8~図-10 に RC 試験体および SFRC 試験体における電磁波レーダによる反射映像を示す。電磁波レーダでは、適用可否を判定する指標として、計測範囲内で表面反射波の影響を除去（減算処理）することができ、各鉄筋のかぶり厚さを求めることができるか否かを判断材料とした（埋設物が鉄板のように連続的な形状を示すものは、平均的なかぶり厚さが算出可能としても適用範囲外とした）。

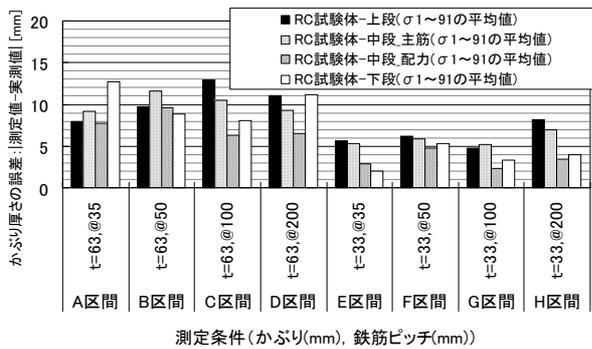


図-6 計測位置とかぶり厚さの誤差 (RC)

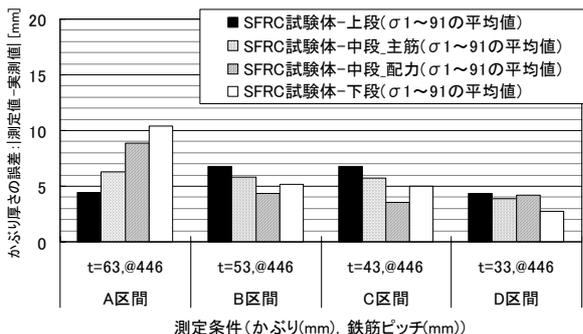


図-7 計測位置とかぶり厚さの誤差 (SFRC)

配筋条件に関わらずかぶり厚さが増すと、埋設鉄筋の判別が困難になり、鉄筋ピッチが 50mm 以下 (D22 仕様) の場合、個別に鉄筋を判別することが困難となる。また、SFRC 試験体は内部に存在する磁性体により、入力電磁波が散乱し、鉄筋を識別することができない。電磁波レーダ法においては、以下の 2 方法によって比誘電率を設定し、かぶり厚さを算出した。

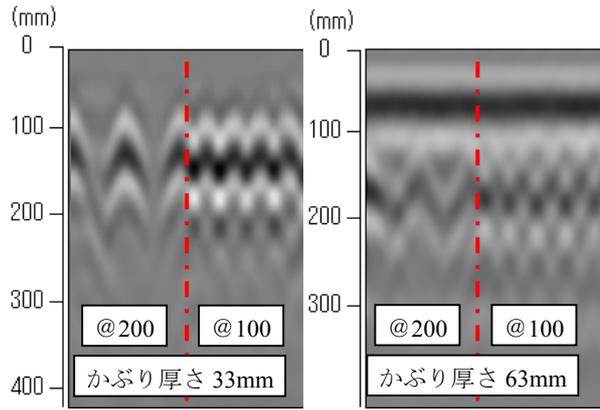


図-8 反射映像 (RC 試験体 : @200mm, @100mm)

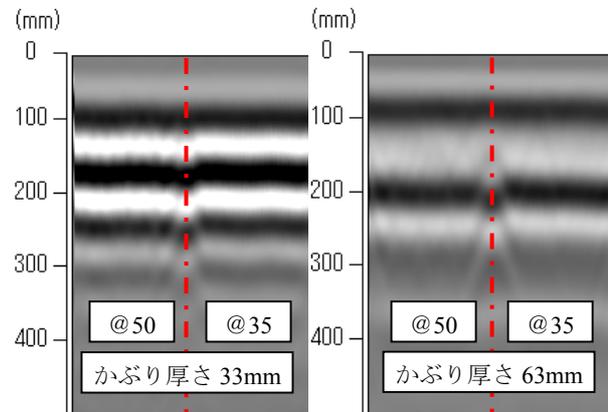


図-9 反射映像 (RC 試験体 : @50mm, @35mm)

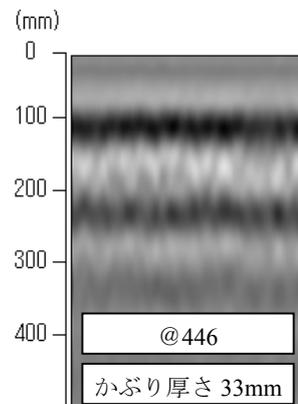


図-10 反射映像 (SFRC 試験体 : @446)

①計測面に配置される任意の鉄筋において実測値と計測値が一致するように比誘電率を設定し、得られた比誘電率を用いて計測面内の各鉄筋のかぶり厚さを算出（以下、単一 ϵ ）。

②計測面に配置される全ての鉄筋において実測値と計測値が一致するように比誘電率を求め、得られた比誘電率の平均値を用いて再度各鉄筋のかぶり厚さを算出（以下、平均 ϵ ）。

図-11、図-12に電磁波レーダ法および電磁誘導法によるかぶり厚さの計測結果と、センサを用いた弾性波によるかぶり厚さとの比較結果を示す。

図-11については、手法の比較を目的として比較的長期の材齢データを用いた。図-12については、配筋条件の影響を比較するため材齢1~28日のデータを用いた。

電磁波レーダ法および電磁誘導法はかぶり厚さが小さいほど測定誤差が小さくなる。また、電磁波レーダ法は配筋条件および比誘電率の設定によって測定精度に大きな差を生じる。ただし、単一 ϵ の場合、測定精度はかぶり厚さと鉄筋間隔に比するが、平均 ϵ の場合、一概に表すことができない。

電磁誘導法では、かぶり厚さを算出することができたが、配筋条件が厳しく、計測位置周辺に存在する配力筋などの影響により計測感度が低い結果となっている。特

にかぶり厚さの大きい箇所ではかぶり厚さの誤差が大きくなっている。なお、SFRC試験体では測定値が極めて小さい値であった。

センサを利用した弾性波によるかぶり厚さの測定方法は、電磁波レーダ法との比較において、かぶりの厚い部分では同等以上の精度が得られ、電磁誘導法との比較においては、かぶり厚さに関係なく、これを上回る精度で測定することができた。

5 まとめ

高密度配筋のRC試験体および鋼繊維補強コンクリートを用いたSFRC試験体で、内部鉄筋に設置したセンサを利用した弾性波を用いて、かぶり厚さを測定した結果をとりまとめると、以下のようである。

- (1) 充てん検知で用いたセンサを利用して、弾性波伝播時間が計測可能であり、高密度配筋下および鋼繊維補強コンクリートでかぶり厚さの測定が可能である。
- (2) 材齢に応じたコンクリートの伝播速度を用いることで、かぶり厚さの測定結果の誤差への材齢の影響は小さくできる。
- (3) かぶり厚さの測定結果には鉄筋間隔の影響は受けず、かぶり厚さが大きくなると測定誤差が大きくなるが、かぶり厚さに対するその比率は大差がない。

なお、今回は高効率探触子を製作し、これを用いてグリスを塗布せずに弾性波を入力したが、グリス無しの場合探触子と試験体との接触のしかたによっては弾性波が入りにくい状況が見られた。また、誤差としてはかぶり厚が大きくなる傾向にあった。今後はグリスを使用して感度を向上させるなど精度向上への取り組みを行ってゆく。

参考文献

- 1) 金子 稔ほか：振動を利用したコンクリート充てん検知システムに関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp1527-1532，2002
- 2) 高橋宏治ほか：コンクリート振動締め検知システムの現場適用，土木学会 第60回年次学術講演会講演概要集，pp545-546，2005
- 3) 南 浩輔ほか：振動解析技術を用いたコンクリート構造物の品質管理システムに関する基礎的研究，土木学会 第62回年次学術講演会講演概要集，pp9-10，2007
- 4) 森濱和正ほか：非破壊試験によるコンクリート品質、部材厚さ、かぶり厚さの検査方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.1, 2001, pp.511-516，2001

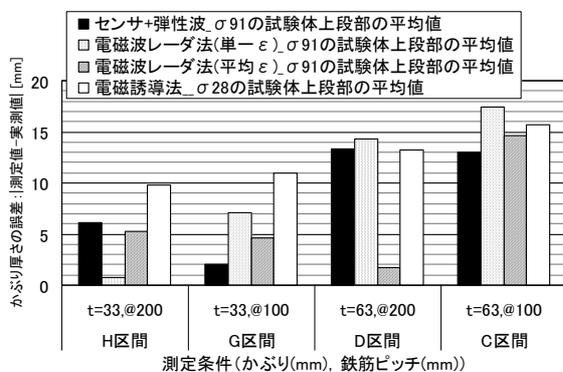


図-11 かぶり厚さの誤差（電磁波レーダ，電磁誘導法）

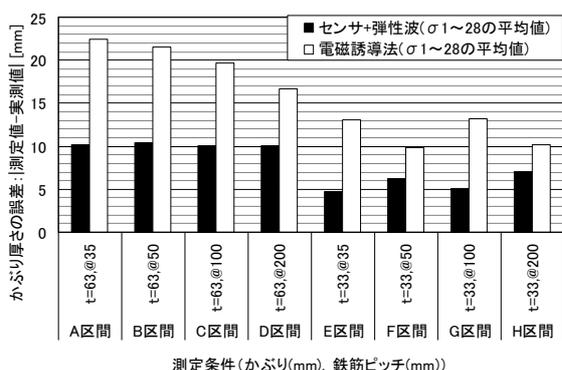


図-12 かぶり厚さの誤差（電磁誘導法）