

(13)「パルス電磁力を用いた鉄筋コンクリート診断技術の開発と RC 擁壁への適用事例」

株式会社アミック

高鍋 雅則*

職業能力開発総合大学校

橋本 光男

株式会社千代田コンサルタント (正会員) 橋本 隆雄

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物における鉄筋の役割は大きく、引張り曲げ応力に弱いコンクリートの弱点をうまく補っている。その鉄筋が、コンクリートの中性化およびひび割れからの雨水の浸入などにより鉄筋の劣化が進行すると、鉄筋とコンクリートとの付着力が低下し構造物としての引張り強度が著しく低下する。また進行状況によっては、その部位の体積が何倍にも膨張し、コンクリートと鉄筋との間に亀裂が発生してしまう。その結果、ひとつ間違えれば大惨事となりかねない鉄筋コンクリート構造物の崩落・倒壊などの事故につながる。

鉄筋コンクリートの現状における診断技術としては、ひび割れや錆汁の発生等を見る目視検査、赤外線サーモグラフィや打音によるひび割れ及び剥離検査、放射線や超音波を使ったひび割れ深さ測定、検査、コア採取によるコンクリート強度及び中性化度測定、電磁波や電磁誘導法を利用した鉄筋位置及びかぶり厚測定などが多方面で検討、実施されている。一方でコンクリート内の鉄筋腐食状態の診断については、自然電位法を用いた手法などが報告されているが周辺の諸条件に左右されやすく問題もある状況である。本稿ではこれまでの手法と異なる鉄筋とコンクリートの剥離状況および鉄筋位置の推定ができる非破壊検査手法として電磁パルスを用いた鉄筋コンクリートの診断法を開発したのでここに紹介する。加えて RC 擁壁に電磁パルス法を適用したときの事例を他の非破壊検査手法との比較を行い適用性の検討を行った。

2. 装置の構成と原理

2.1 測定原理

本測定法は、鉄筋コンクリート表面から内部の鉄筋を直接振動させ、その健全性を評価する手法である。具体的な原理を以下に示す。

図 1(a)~(c)に電磁パルスを用いた鉄筋コンクリート診断装置の測定原理を示す。

- ・コイルにパルス大電流を流すと強力なパルス磁場が発生する。図 1 (a)
- ・このパルスにより導体に渦電流が誘起され、この渦電流と電流パルスによる磁場との相互作用により鉄筋が振動し音響が発生する。図 1 (b)
- ・コンクリート表面に伝わってくる音響を受信し鉄筋の状態によって変化する音響を解析する。図 1(c)

この手法は鉄筋を直接加振させているために超音波とは違った大きな弾性信号を得ることが出来る。また電气的に加振しているため打音法と違い再現性にすぐれている利点がある。

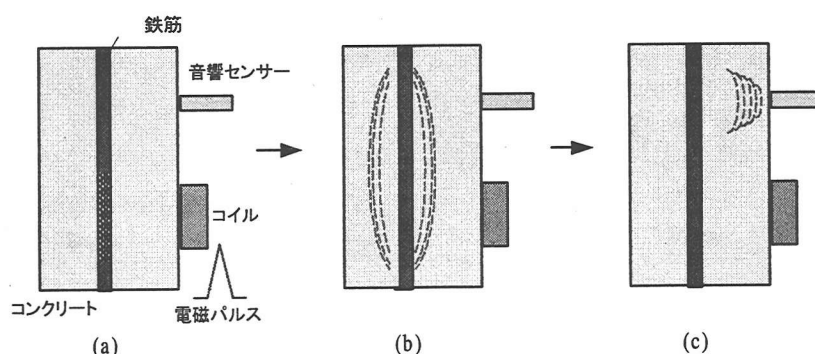


図 1 測定原理

キーワード : 電磁パルス, 鉄筋の状態, AE センサー, 鉄筋の位置, RC 擁壁

*〒230-0051 横浜市鶴見区鶴見中央 4-6-10 Tel:045-510-4317 Fax:045-510-4318 E-mail:Takanabe@d4.dion.ne.jp

またパルス電流発生と鉄筋の音響発生はほぼ同時と考えられることからセンサーが音響を受信するまでの時間差を利用し鉄筋の位置情報を得られることを特徴としている。

2. 2 装置の構成

図2に装置の構成図を示す。この装置は電磁パルスを発生させるコンデンサーバンク装置（電源部）と鉄筋より発生した音響を受信するセンサー部とで構成されている。電源部はコンデンサーに蓄えた電荷を大電流として放出するような構造となっておりコンデンサーの容量、及びコイルの仕様を変更することによりパルス幅を変更することができる。電流値は充電電圧を制御することにより任意に決定できる。音響受信センサー部はピエゾ素子を使用し音響を電気信号に変え増幅器、フィルターをへてアナログ波形表示、またAD変換装置を用いてデジタル信号として波形情報を取得する。本研究では150kHz共振タイプのAEセンサーを使用している。

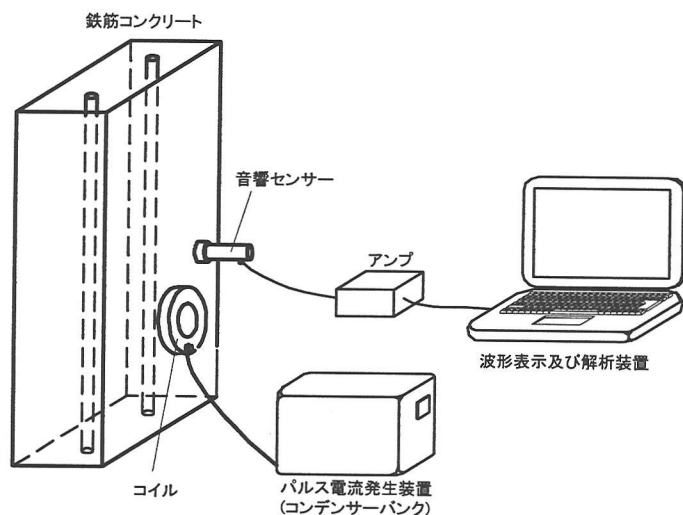


図2 装置の構成図

3. 鉄筋コンクリートへの適用

3. 1 鉄筋の挙動原理

本装置を鉄筋コンクリートに適用した場合、鉄筋の状態により受信波形にどのような変化が表れるかを実験で示すために図3(a)～(c)に示すような構成で波形を採取した。

図3(a)はセンサーを鉄筋に取付け鉄筋をコンクリートで覆っていない状態で波形を採取している。この場合パルス発生と同時に鉄筋から電磁力で大きく音響が発生し、自由振動していることが分かる。図3(b)はセンサーを鉄筋コンクリート中の鉄筋に取付け鉄筋をコンクリートで覆った状態で波形を採取している。このとき鉄筋のみの場合に比べ自由振動がコンクリートにより抑制されていることがわかる。図3(c)はセンサーをコンクリート表面に取付け波形を採取している。このとき鉄筋に直接センサーを取付けた場合に比べ受信感度は約1/10に低下するが良好に鉄筋の音響を捕らえている。また、図(b)に比べパルス発生から音響の受信までの時間差が認められる。時間差により鉄筋の深さが推定できることがわかる。

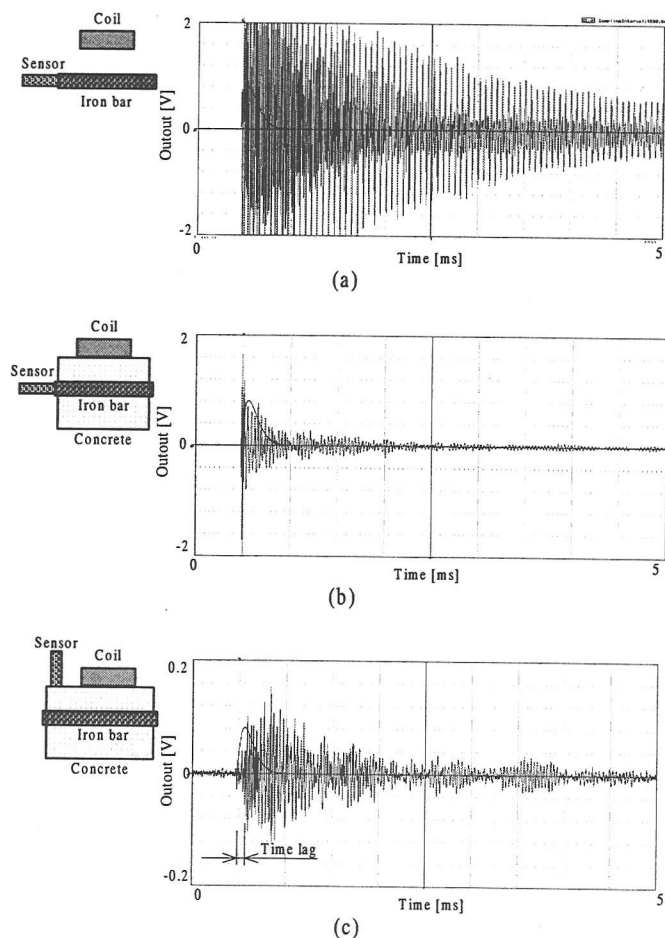


図3 鉄筋の挙動

3. 2 鉄筋とコンクリートの付着力による差異

鉄筋とコンクリートの付着力による差異を見るために図 4(a)～(c)に示すテストブロックを用いて実験を行なった。図 4(a)は正常なコンクリートブロック，図 4(b)は疲労試験機により鉄筋とコンクリートとに初期のひび割れを発生させたテストブロック。疲労試験は，ブロックを固定し鉄筋から振動を加え，その変位が変化したことを確認して加振を止めたものである。図 4(c)は鉄筋とコンクリートとの付着力がないテストブロックである。以下それぞれテストブロック A～C と呼ぶ。

これらのテストブロックに電磁パルスを適用した場合の波形をそれぞれ図 5 に示す。このときセンサーは鉄筋とコンクリート表面それぞれに取付けて波形を採取した。

センサーをコンクリートに取付けた場合 A, B のテストブロックでは応答波形が明確に現れているのに対して C のテストブロックはほとんど波形の応答がみられない。

(図 5(a)-2,(b)-2,(c)-2) これは鉄筋とコンクリートとの付着力が低下しているため鉄筋－コンクリート間の音響の伝達損失が大きいといえる。また A のテストブロックの立ち上がりに比べ B のテストブロックの立ち上がりが緩やかになっている。

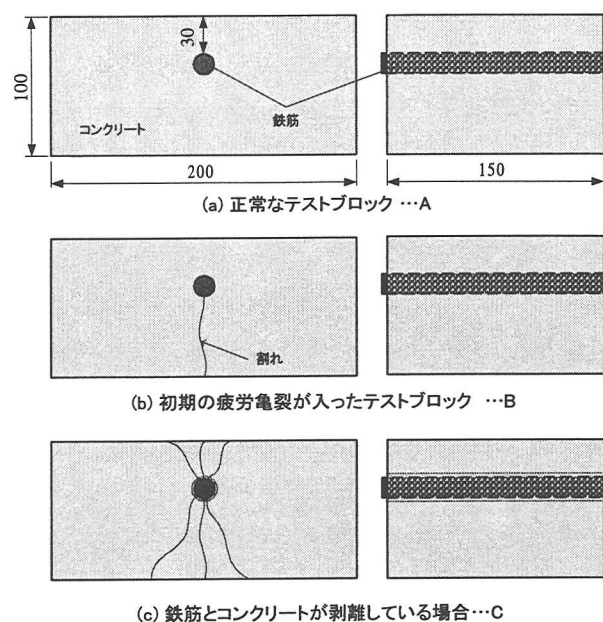


図 4 テストブロックの外観

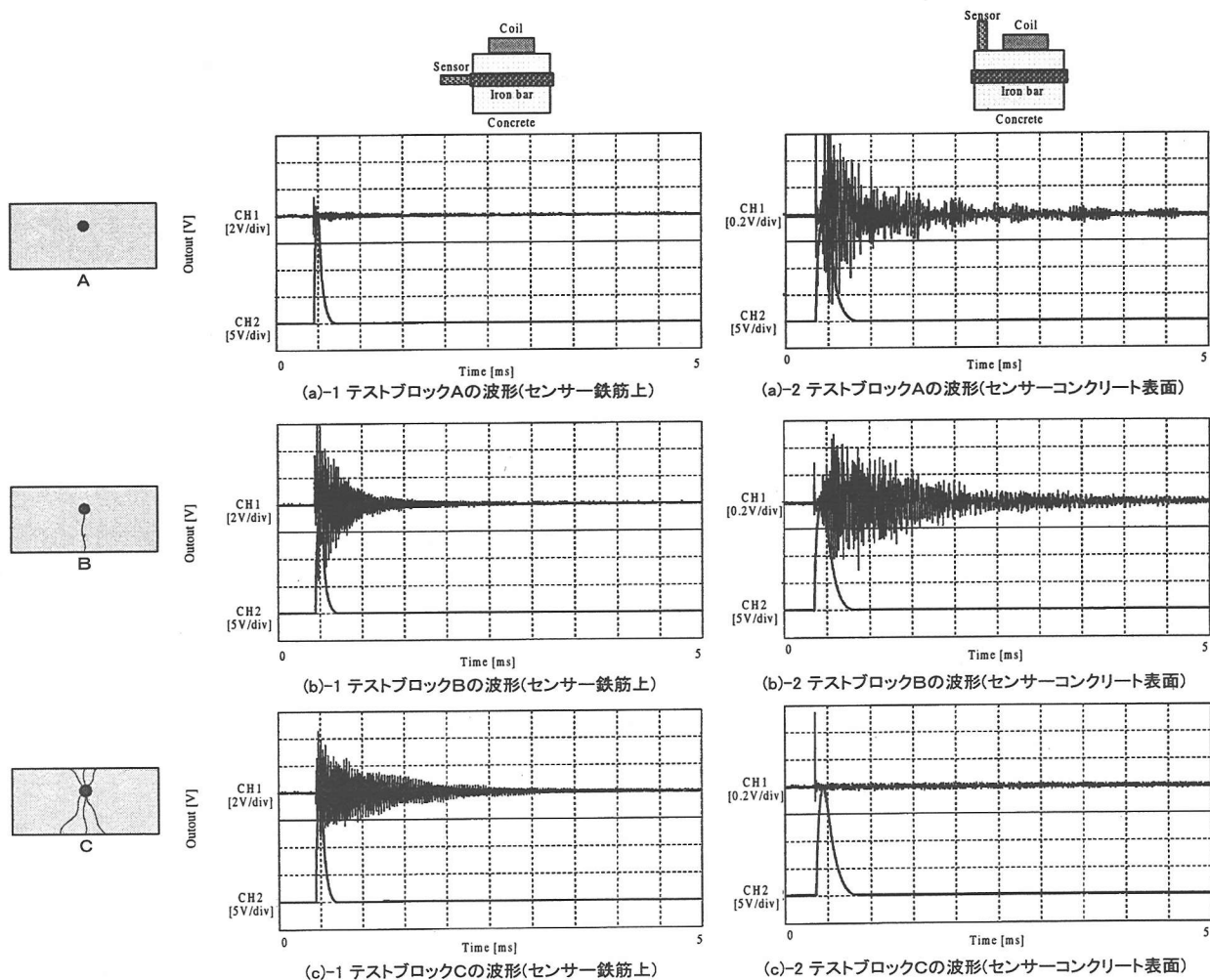


図 5 各テストブロックに適用したときの波形

センサーを鉄筋に取付けた場合は付着力のないものほどより自由振動していることがわかる。

(図 5(a)-1,(b)-1,(c)-1)

またテストブロック A, B 波形の FFT 演算による周波数特性を図 6(a), (b)に示す。これらを比べると、B のテストブロックにより特徴的な周波数が表れている。このことは鉄筋がより自由振動しコンクリートによる拘束力が失われてきているといえる。このように FFT 演算結果は、鉄筋とコンクリートの付着の差を明確に判別できることがわかる。

3. 3 センサー受信までの時間差との関係

パルス発生からセンサー受信までの時間差が得られるといった特徴を利用して、図 7 に示すテストブロックを使用して音源の発生位置を探ってみた。このテストブロックは鉄筋の中心部のみコンクリートと接触しておりこの中心部より音響が発生するような構造となっている。この中心を原点(0,0)としそれぞれの点のパルス発生からの時間遅れを測定した。一例として位置(-1,0), (2,1) にセンサーを取付けたときの波形を図 8 に示す。CH1 は位置(-1,0)のセンサー受信波形, CH2 は位置(2,1)のセンサー受信波形である。時間差が明確に分かるように時間軸を $50\mu\text{s}/\text{div}$ に拡大してある。音源からの距離が異なるためにパルス発生からセンサー受信には時間差が認められる。このようにしてそれぞれの時間差から時間差と距離の関係を表したものを図 9 に示す。時間差と発信源の距離の関係はほぼ比例関係にあるといえる。これらの情報を利用すると鉄筋の位置情報、発信源の特定ができることがわかる。

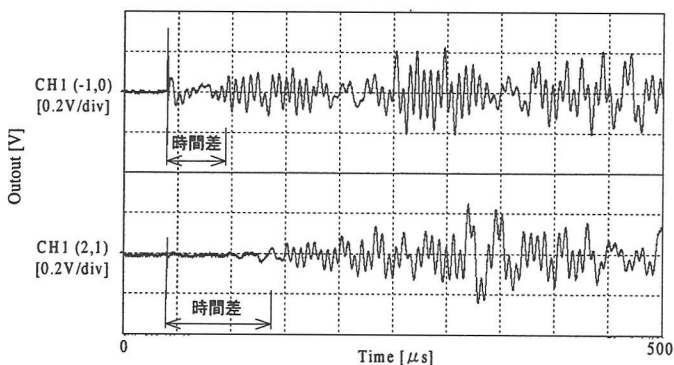
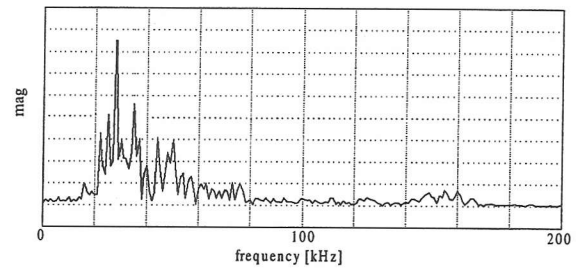
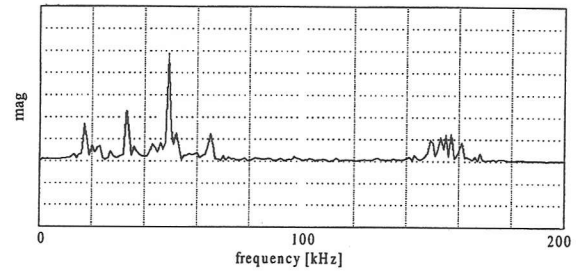


図 8 (-1,0),(2,1)にセンサーを配置したときの波形



(a) テストブロックAの周波数解析



(b) テストブロックBの周波数解析

図 6 テストブロック A,B の周波数解析波形

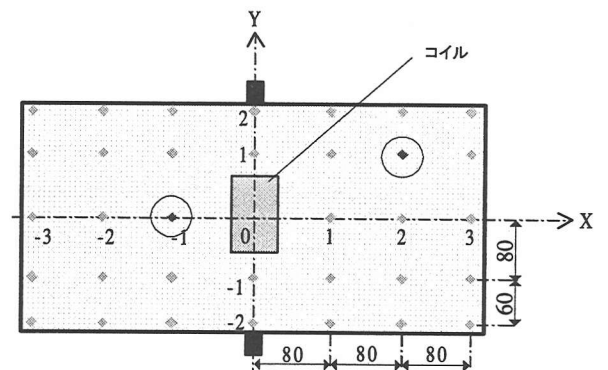


図 7 時間差測定用テストブロック

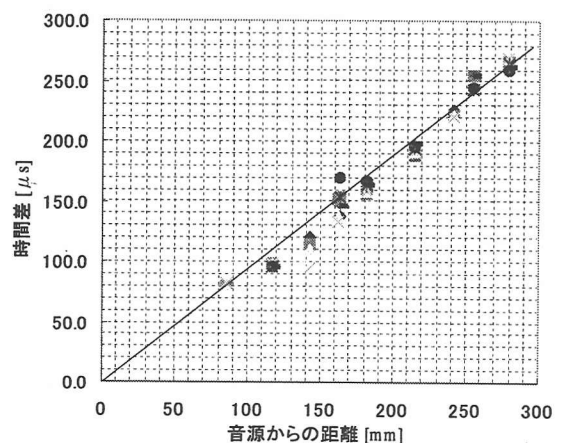


図 9 時間差－音源からの距離

3. 4 鉄筋径とかぶり厚さとの関係

鉄筋径を D10 から D25 まで、かぶり厚さを 30mm から 75mm まで変化させたときのかぶり厚さと波高値の関係を図 10 に示す。先に示した時間差の情報とあわせ鉄筋の位置および鉄筋径の推定が可能である。

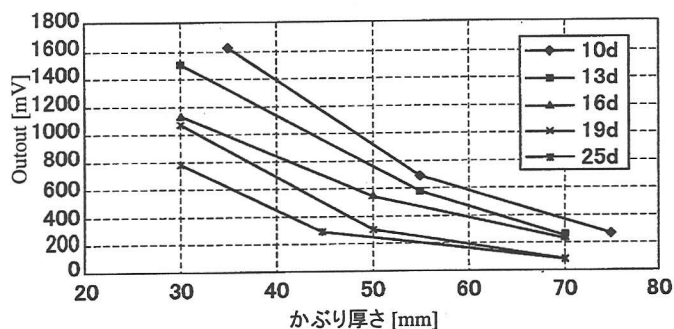


図 10 鉄筋径とかぶり厚さとの関係

4. RC 擁壁への適用

4. 1 RC 擁壁の目視状況

この電磁パルス法を適用した RC 擁壁の状況写真を写真 1, 2 に示す。写真 1 の RC 擁壁を調査箇所①、写真 2 の RC 擁壁を調査箇所②とした。調査箇所①の RC 擁壁は建設から 28 年経過しており、調査箇所②の擁壁は建設から 20 年経過している。調査箇所①の擁壁は鉄筋の露出箇所が認められその鉄筋には軽微な腐食が認められた。調査箇所②の擁壁には上部から下部にかけてひび割れが認められた。ひび割れ部には白色生成物が認められた。

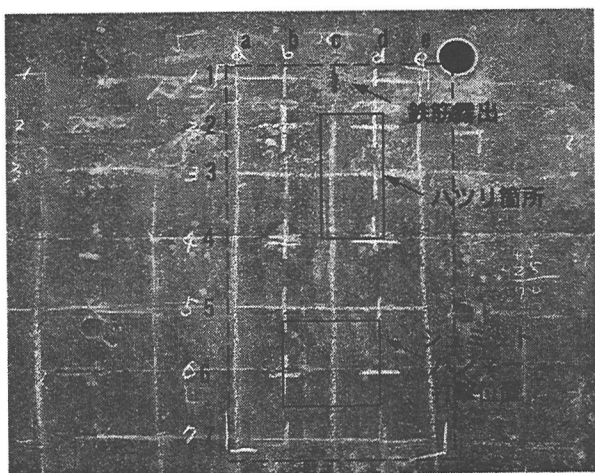


写真 1 RC 擁壁調査箇所①

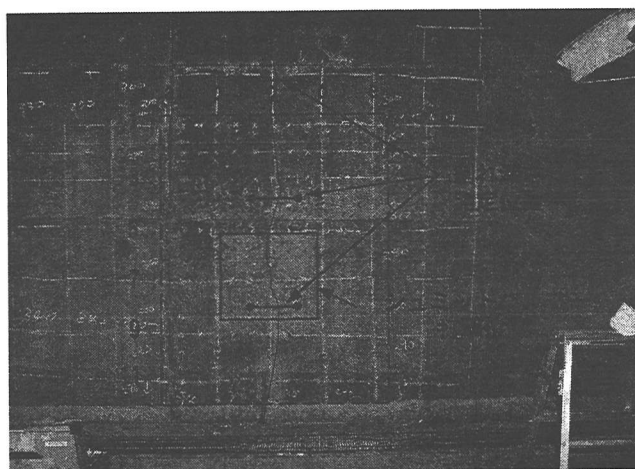


写真 2 RC 擁壁調査箇所②

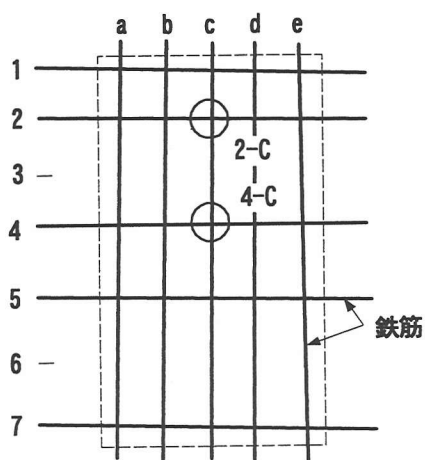


図 11 電磁パルス測定位置①

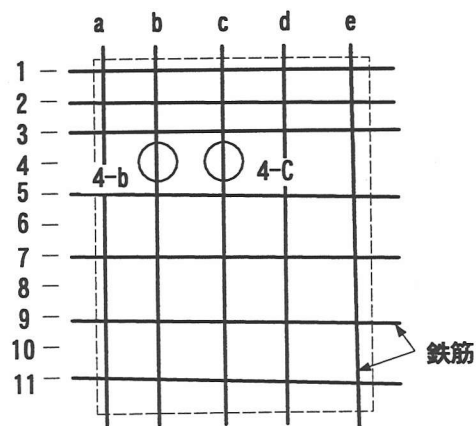


図 12 電磁パルス測定位置②

写真 1, 2 内にはシュミットハンマー測定位置, ハツリ箇所, 電磁パルス法を適用した箇所が記載されている。鉄筋の配筋状況, 電磁パルス法を適用した部位の詳細を図 11, 12 にそれぞれ示す。

また鉄筋はあらかじめ電磁波(レーダー)や電磁誘導法を使った試験によりおよその配筋およびかぶり厚さが既知となっている。

4. 2 かぶり厚さ, 腐食との関係

測定は図 13 に示すように鉄筋の直上にコイルを設置しセンサーをコイルの中心から左右 80mm の位置に配してある。

電磁パルス法を適用した時の時間軸波形例として図 11 の 2-C および 4-C の位置で測定した波形を図 14(a),(b)に示す。図より明らかに信号強度の違いが認められることから鉄筋のかぶり厚さが変化していることがうかがえる。時間遅れ, 波高値から推定するかぶり深さは 2-C で 23mm, 4-C で 55mm であった。またコンクリートと鉄筋の付着力がないときに見られるような波形は認められなかったため, 腐食は進行していないものと診断できた。

調査箇所①の鉄筋露出部下部をハツリ, 鉄筋を露出させたときの状況を写真 3 に示す。露出鉄筋部のかぶり厚さは, コンクリートハツリ結果から 20mm から 50mm まで変化している。ハツリ箇所の鉄筋は, 若干表面に錆が認められたが著しい腐食は認められず良好な状態であった。加えてフェノールフタレインを適用し中性化度を測定した状況を示す。コンクリートの中性化は表面から 10mm~30mm 程度であり鉄筋は腐食環境にないといえる。

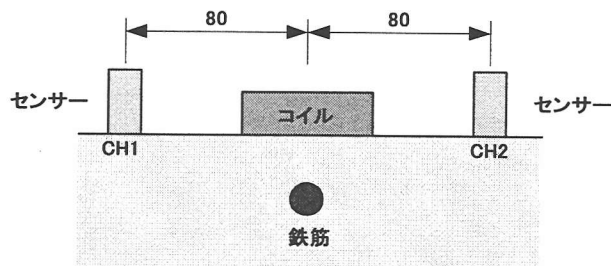


図 13 コイル-センサー位置関係

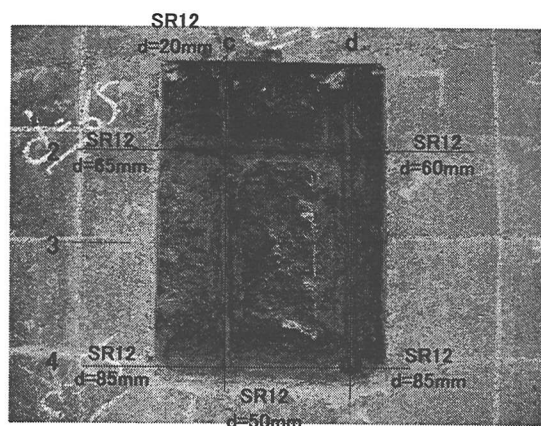
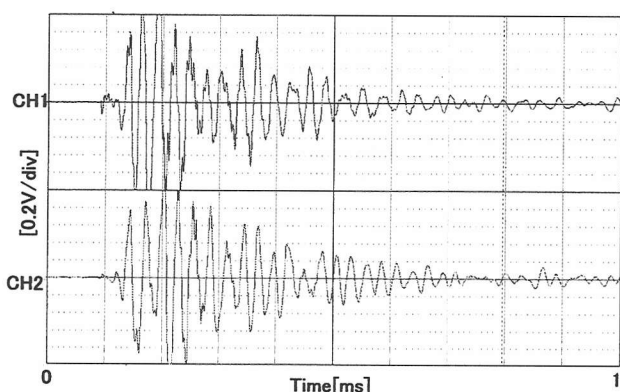
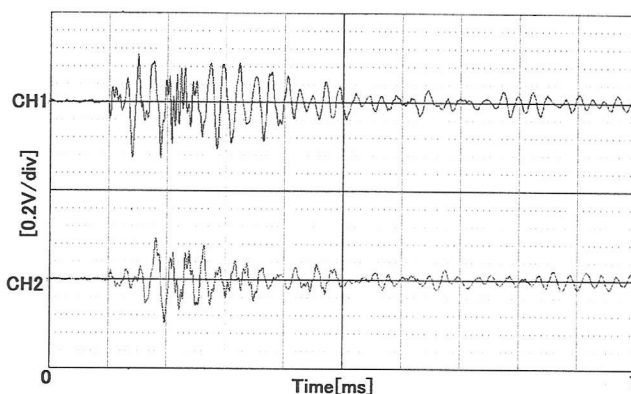


写真 3 調査箇所①ハツリ状況



(a) 位置 2-C 電磁パルス採取波形



(b) 位置 4-C 電磁パルス採取波形

図 14 調査箇所①電磁パルス採取波形

また表面のコンクリート強度をシュミットハンマーで測定した結果および調査箇所①のコア試供体より求めた圧縮強度を表 1 に示す。

シュミットハンマーによる反発度の測定は日本建築学会「コンクリート強度推定のための非破壊試験マニュアル」に従ってコンクリート強度を推定した。推定式には日本建築学会推定式

$$F(s)=\alpha\times\{7.3\times(R_0+\Delta R_1+\Delta R_2)+100\}\times9.8\times10^{-2}\text{ (N/mm}^2\text{)}$$

コア試供体とシュミットハンマーによる圧縮強度の比較換算式は

$$F(s)=\{1.1749\times(R_0+\Delta R_1+\Delta R_2)-18.458\}\times9.8\times10^{-2}\text{ (N/mm}^2\text{)}$$
 で算出した。

コア共試体の圧縮強度試験は日本工業規格 JIS A 1108 「コンクリート強度試験方法」に従って行った。圧縮強度は 25.9～27.8 N/mm² であった。

当時の設計基準強度から照らし合わせ、調査箇所①のコンクリート強度は現状では問題ないといえる。

表 1 測定箇所①の推定コンクリート強度

シュミットハンマーによる推定コンクリート強度(調査箇所①)

反発度					平均反発度			有効反発度	補正值			推定強度	
					(R')	R*1.2	R*0.8	(R0)	方向	表面	材齢(日)	日本建築学会式	コア試供体換算式
									(ΔR1)	(ΔR2)	(α)	(N/mm2)	(N/mm2)
40	34	34	37	38	38.7	46.5	31.0	38.7	横	なし	10220	21.4	27.0
40	36	42	37	38					0	0	0.570		
41	41	37	42	36									
36	39	42	36	36									
36	44	47	43	36									

コア共試体の圧縮強度試験結果(調査箇所①)

No.	高さ(mm)			直径(mm)			断面積 (mm2)	h/d	最大荷重 P(kN)	補正 係数	圧縮強度 (N/mm2)
	h1	h2	平均	d1	d2	平均					
1	146.6	146.7	146.7	73.5	73.5	73.5	4243	1.995	110	1.000	25.9
2	146.7	146.7	146.7	73.5	73.5	73.5	4243	1.996	118	1.000	27.8

4. 3 ひび割れとの関係

調査箇所②のひび割れ箇所の幅および超音波を用いた推定割れ深さを測定した。ひび割れ深さは図 15 に示すように超音波の送信、受信センサーを用い、割れをまたぐ形で測定する。測定結果を図 16 に示す。

調査箇所②で電磁パルス法を適用した時の時間軸波形例として図 12 の 4-b および 4-C の位置で測定した波形を図 17(a),(b)に示す。

4-b で採取した波形には 1CH, 2CH の差は認められないが, 4-C で採取した波形には CH2 で信号強度の低下が認められる。これは CH2 側で音響の伝達を遮っている割れがあるためと思われる。波形の時間遅れ、波高値から求めた縦筋のかぶり深さは、4-b で 37mm、4-C で 43mm であった。超音波で求めた割れの推定深さが 42～231mm の範囲にあるため鉄筋は腐食環境にある可能性が考えられるが、波形からの情報では付着力が低下したような信号は見受けられなかった。本パルス測定では、左右の 2 つのセンサーを用いているため、割れが存在してもその鉄筋の付着力

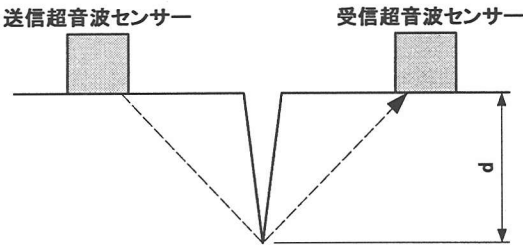


図 15 ひび割れ深さ測定模式図

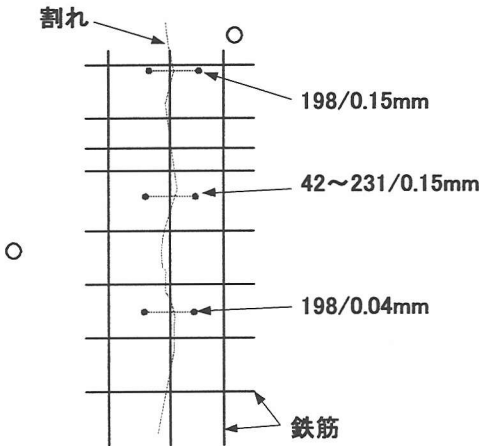


図 16 ひび割れ深さ／幅測定結果

と割れの程度を評価できることが少ない。割れでも、剥離状の場合は音をほとんど伝えないので区別できる。また目視の結果、白色生成物は認められたが、茶色の錆汁は見受けられなかった。

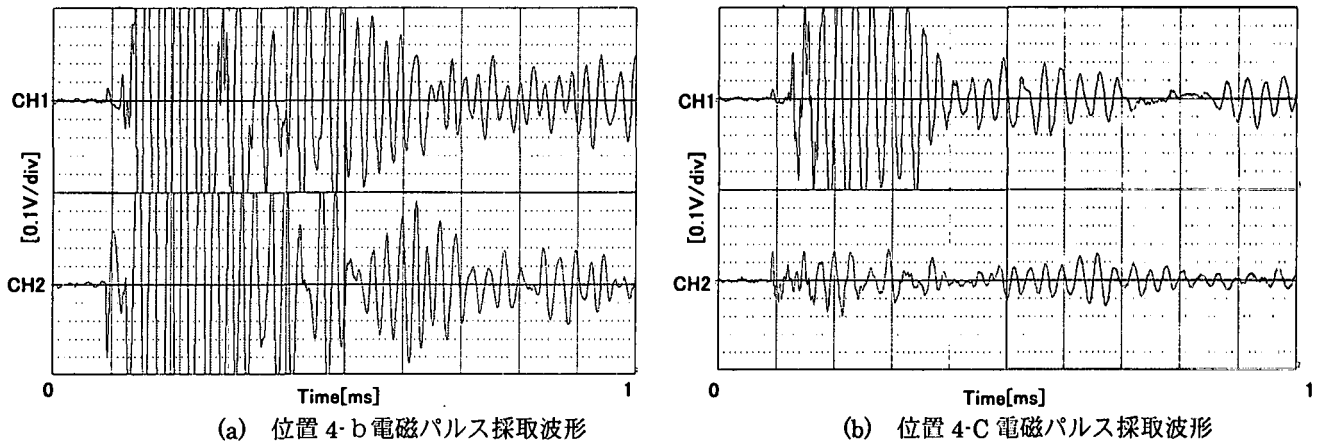


図 17 調査箇所②電磁パルス採取波形例

鉄筋探査による推定かぶり深さは、4-b、4-C の位置ともに約 40mm であった。
また表面のコンクリート強度をシュミットハンマーで測定した結果および調査箇所②のコア試供体より求めた圧縮強度を表 2 に示す。コア共試体の圧縮強度は 33.0～36.5 N/mm²であった。シュミットハンマーで推定した強度は若干低い値となっている。
調査箇所②のコンクリート強度も特に問題ないといえる。

表 2 測定箇所②の推定コンクリート強度

シュミットハンマーによる推定コンクリート強度(調査箇所②)

反発度					平均反発度			有効反発度	補正値			推定強度		
					(R')	R*1.2	R*0.8		(R0)	方向	表面	材齢(日)	日本建築学会式	コア試供体換算式
										(ΔR1)	(ΔR2)	(α)	(N/mm2)	(N/mm2)
45	44	43	40	42	44.0	52.8	35.2	44.0	横	なし	7300	24.7	33.2	
40	47	38	48	47					0	0	0.600			
48	45	44	46	41										
45	45	45	42	38										
48	49	49	38	42										

コア共試体の圧縮強度試験結果(調査箇所②)

No.	高さ(mm)			直径(mm)			断面積 (mm2)	h/d	最大荷重 P(kN)	補正 係数	圧縮強度
	h1	h2	平均	d1	d2	平均					(N/mm2)
1	146.7	146.8	146.8	73.5	73.5	73.5	4241	1.997	155	1.000	36.5
2	146.8	146.9	146.9	73.5	73.5	73.5	4243	1.998	140	1.000	33.0

5. まとめ

今回、鉄筋とコンクリートとの付着状態を調査する目的で、電磁パルス法を開発し RC 擁壁への適用を試みた。同時に他のコンクリート非破壊検査との比較を行った。
実験の状態では、鉄筋の付着状態の差異が明確に現れたわけだが、現場での適用においては鉄筋の状態が比較的良好であったため、付着状態に関しては明確な差異が認められなかった。ただし鉄筋のかぶり厚さの違い、割れなどの音響を遮るものに対する検出は明確に現れていた。かぶり厚さの測定において実測値、又は他の非破壊検査の手法と比べ多少のばらつきが認められたが、各測定位置による音速の影響、コンクリート強度の違いによる音響伝達の差異などさまざまな要因が考えられる。
今後、これらのパラメータを考慮する音速演算の手法、センサー数の増加により、より多くの音響情報を取得でき、現場で取り付けが容易な小型装置の構築を考え改良していく。