

論文 非破壊試験によるひび割れおよび浮き等の補修効果の確認方法に関する研究

濱崎 仁^{*1}・伊野 仁士^{*2}・三浦 雅仁^{*3}・佐藤 大輔^{*4}

要旨：本論文では，コンクリートのひび割れ，仕上材の浮き，内部空隙を補修した場合の補修状況を，超音波法，X線法，電磁波レーダ法，赤外線法などによって非破壊的に評価する手法を検討したものである。ひび割れ注入材の充填状況については，超音波法の立上り時間差，振幅比により評価できる可能性を明らかにした。浮き部への充填状況については，セメント系の補修材料の場合，赤外線法の温度差より評価が可能であること，内部空隙については，電磁波レーダ法，X線法により評価が可能であることを明らかにした。

キーワード：ひび割れ，仕上材の浮き，補修効果，非破壊試験

1. はじめに

コンクリート構造物を長期にわたって使用するためには，ひび割れや仕上材の浮きなどの変状や劣化現象に対して，適切な補修を行うことが重要である。ひび割れの補修方法としては，注入工法，充填工法，被覆工法など様々な方法が提案されている¹⁾。また，モルタル等の仕上材の浮きに対しては，一般にピンニングや樹脂注入などが行われている。これらの補修が適切に行われない場合，補修の効果が期待できないばかりでなく，再劣化の原因になる可能性もある。したがって，補修が適切に行われているかを確認することが出来れば，適切な補修の実施，補修技術の信頼性の向上が期待できる。

本研究は，ひび割れおよび仕上材の浮き，内部空隙に対する様々な補修方法の補修効果を確認することを目的として，これらを模擬した試験体により，補修効果を確認するための検討を行っている。本報告では，補修を施した試験体について，X線，電磁波レーダ，超音波および赤外線サーモグラフィなどの非破壊試験を適用して，補修材料の充填性などを確認する手法の検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

(1) 試験体の仕様

試験体は，ひび割れ補修用試験体（以降，ひび割れ試験体と記す），仕上材の浮き補修用試験体（以降，浮き試験体と記す）および内部空隙補修用試験体（以降，空隙試験体と記す）の3種類とした。試験体の形状および寸法を図-1に示す。また，試験体の水準を表-1に，コンクリートの調合を表-2に示す。

試験体へのひび割れの導入は，試験体の側面を布粘着テープで拘束した状態で曲げ載荷によりひび割れを発生させた後，荷重を調整して想定したひび割れ幅に近くなるように調整した。なお，貫通ひび割れを想定した試験体以外では，ひび割れは貫通させていない。

浮き試験体は，浮き代（空気層）のない試験体では，コンクリート面にパラフィンを薄く塗布した上にモルタルを施工した。浮き代のある試験体では，所定の大きさ，厚さに切り取ったスタイロフォームをコンクリートに貼り付けた状態でモルタルを施工し，モルタルの硬化後に予め設けた注入口からアセトンを注入してスタ

*1（独）建築研究所 材料研究グループ 博士（工学）（正会員）

*2（株）ジャスト 調査診断第二部

*3（株）コンステック IT診断技術部本部

*4（株）コンステック 技術総合本部（正会員）

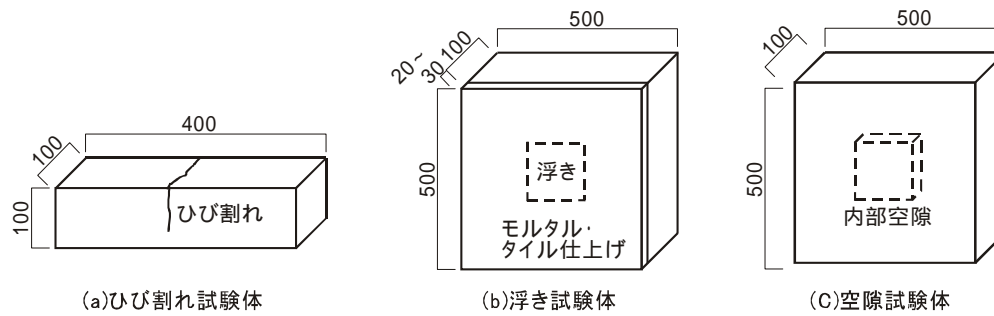


図-1 試験体の形状および寸法[mm]

イロフォームを溶解し、試験体から排出した。

空隙試験体は、コンクリートの打設時に予め所定の大きさのスタイロフォームを埋め込み、コンクリートの硬化後にドリルで穿孔して、アセトンを注入し、スタイロフォームを溶解した。

(2) 補修方法

本実験において試験体に施工した補修工法の一覧を表-3 に示す。各試験体には比較用に無補修の試験体を用意した。

(3) 補修状況の確認方法

(a) ひび割れ補修の確認

超音波を用いた二探触子法により、試験体上面のひび割れを挟んだ場合と挟まない場合での透過波形を比較した。入力した波形は、200回の繰り返しパルス波とし、探触子の中心間距離を100mm および 80mm とした。探触子は、直径

20mm、共振周波数は2MHzのものを使用した。

表-1 試験体の水準

種類	要因	水準
ひび割れ	ひび割れ幅	0.3mm/0.8mm
浮き	大きさ	10cm 角/20cm 角
	浮き代	0mm/2mm
	仕上げ種類	モルタル/タイル
空隙	空隙大きさ	1×1×1cm/5×5×2cm/ 10×10×2cm
	空隙位置	表面から 1cm/2cm/4cm

表-2 コンクリートの調査

W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		C	W	S	G	AE
60	48.3	178	297	861	950	3.15

(b) 浮き部補修の確認

浮き部への充填状況の確認は、打診法、赤外線法、X線法、電磁波レーダ法により行った。

表-3 試験体に施工した補修工法

試験体	分類	工法名	仕様
ひび割れ	注入工法	エポキシ樹脂注入工法	2液型・中粘度形エポキシ樹脂・低圧注入 1液型・超低粘度エポキシ樹脂・自己充填型
		セメント系注入工法	微粒子セメント・低圧注入 注入前に珪酸質水溶液を浸透
	表面被覆工法	エポキシ樹脂被覆工法	可とう性エポキシ樹脂
		セメントスラリー被覆工法	高弾性セメントフィラー
	充填工法	Uカットシール工法	可とう性エポキシ樹脂
	複合法	ピンネット工法	T型アンカーピン・ガラス繊維ネット・SBR系ポリマーセメントモルタル被覆
	簡易工法	セメント擦り込み工法	超速硬固形セメント擦り込み
浮き	注入工法	ピンニング樹脂注入工法	中粘度形エポキシ樹脂
		アンカーピン樹脂注入工法	中粘度形エポキシ樹脂・注入口付アンカーピン
		アンカーピンセメント系注入工法	アクリル系ポリマーセメントスラリー注入材 超微粒子セメント系注入材・注入口付アンカーピン
	複合法	ピンネット工法	T型アンカーピン・ガラス繊維ネット・SBR系ポリマーセメントモルタル被覆
空隙	注入工法	樹脂注入工法	高粘度形エポキシ樹脂
		セメント系注入工法	アクリル系ポリマーセメントスラリー系注入材 超微粒子セメント系注入材

打診法は、打診ハンマーを用いて、試験者が浮き部分の判別の可否を3段階(明瞭に判別可能・不明瞭だが判別可能・判別不可能)に評価を行った。赤外線法は、測定前に試験体表面側2mの位置から、オイルヒーター(出力38kW)を用いて10分間加熱し、加熱直後、5分後、10分後に熱画像を測定した。

(c) 内部空隙補修

内部空隙の確認は、電磁波レーダ法、X線法により行った。測定方法は、電磁波レーダ法については、市販の装置を用い、試験体表面から探査を行った。X線法については、試験体裏面にX線フィルムを設置して、表面よりX線を照射した。X線の管電圧は80kV、照射時間は6秒、照射距離は1mとした。

3. 測定結果および考察

3.1 ひび割れ補修の状況

写真-1 にひび割れ部への補修材の充填状況の例を示す。エポキシ樹脂系の補修材では、ほぼひび割れの先端まで樹脂が注入されていた。セメント系の注入工法ではひび割れ深さの1/2から2/3程度まで補修材が注入されており、注入された先端部のひび割れ幅は0.08~0.10mm程度であった。

図-2 に健全部およびひび割れ部での超音波の透過波形の例を示す。波形の特徴として、注入工法の場合には、立上り時間、最大振幅は健全部とほぼ同じである。被覆工法などのようにひび割れ部への注入がされない補修工法の場合や補修を行わない場合には、波形の立上り時間が遅くなり、最大振幅は小さくなる傾向にある。

そこで、式(1)により、健全部およびひび割れ部での超音波の透過深さを求め、補修工法ごとに健全部とひび割れ部の差を求めた。式(1)は、超音波の透過経路がひび割れ部を頂点とする二等辺三角形であると仮定したものである。なお、健全部の場合、透過深さは、いずれも表面から20~30mmの深さであった。

$$D = \frac{1}{2} \sqrt{v^2 t^2 \times 10^{-6} - a^2} \quad (1)$$

ここに、 D : 透過深さ(mm)

v : 超音波伝播速度(=4000m/s)

t : 立上り時間(s)

a : 探触子内法寸法(=80mm)

また、健全部での最大振幅とひび割れ部の透過波形の最大振幅の比を最大振幅比として求め

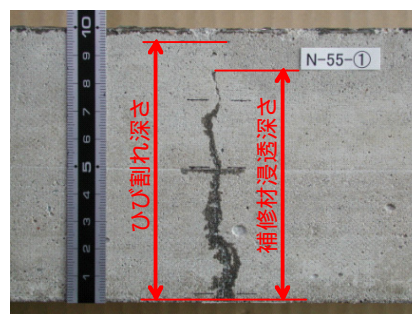


写真-1 ひび割れ側面の状況の例 (エポキシ樹脂注入工法)

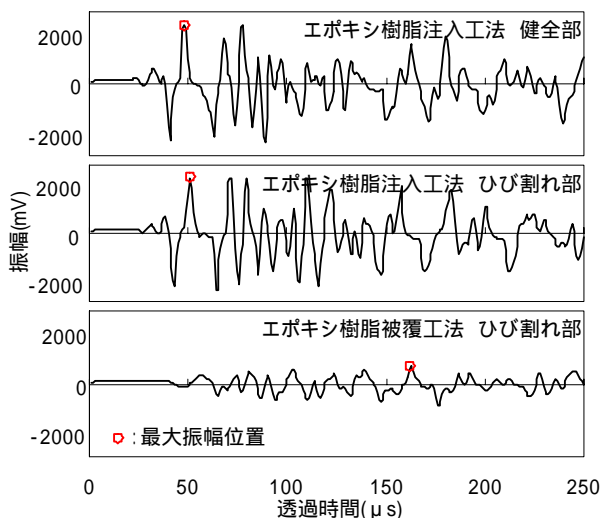


図-2 超音波の透過波形の例

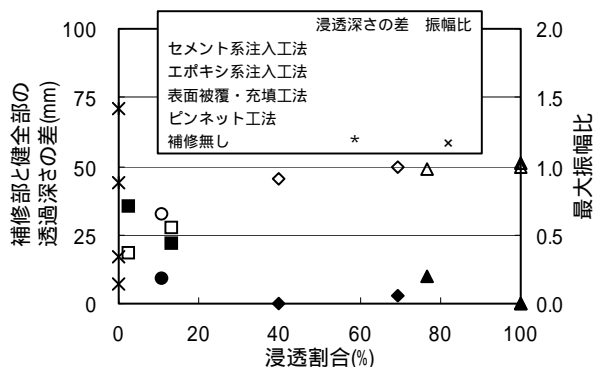


図-3 補修材の浸透割合と透過深さの差および最大振幅比の関係

た。最大振幅の位置は図-2 中に示している。これらと試験体側面でのひび割れ深さに対する補修材の浸透深さの比を浸透割合としてその関係を表したものが図-3 である。

注入工法の場合，超音波は健全部とほぼ同じ深さを透過しており，透過深さの差は小さい。表面被覆工法や補修材が充填されていない工法の場合には，ひび割れの深さ方向の先端に近い部分で透過するため，透過深さの差が大きいの。ピンネット工法では，表層部にポリマーセメントモルタルの層があるため，超音波がその部分を透過することで計算上の透過深さの差が小さくなっている。振幅比は，超音波の経路にあたる部分に補修材が注入されている場合には，健全部とほぼ同じで，ひび割れ部への充填がない場合には小さくなる。以上のことから，ひび割

れ部への補修材の充填状況を立上り時間より求めた浸透深さおよび最大振幅比によって評価できると考えられる。

3.2 浮き部補修の状況

図-4 に浮き部を補修した試験体の赤外線画像の例を示す。図中の四角は，事前に施工した浮き部分（人工欠陥）である。また，表-4 に測定を行った試験体の健全部と浮き部の温度差の一覧を示す。なお，試験体には人工欠陥以外にも浮きが生じているが，ここでの浮き部の温度は事前に施工した浮き部分の中心部の温度，健全部の温度は，浮き部分から 50mm 水平にずらした点で浮きがない部分の温度である。

浮き代のある浮き部分では，健全部に比べて 2～5 程度温度が高くなっているが，浮き代がない場合には，温度差は小さい。また，微粒子セ

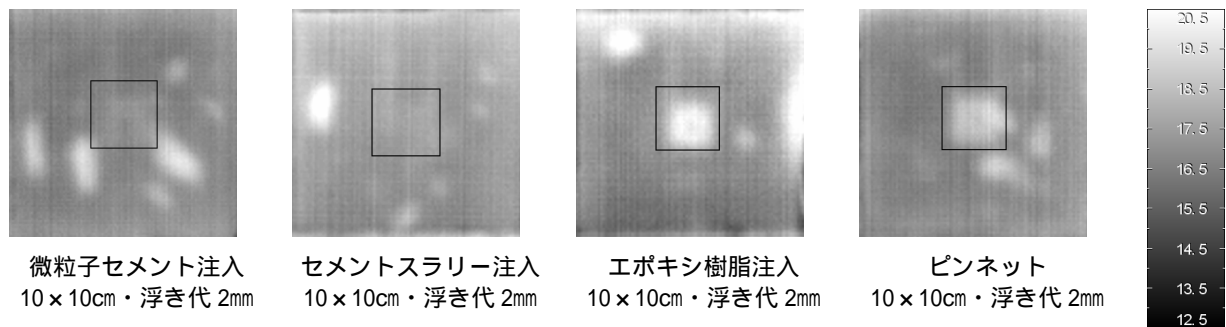


図-4 浮き補修部の赤外線画像の例

表-4 浮き部および健全部の温度差の一覧

大きさ	浮き代	仕上げ	補修工法	健全部と浮き部の温度差 ()			打診での判断 ^注
				加熱直後	5 分後	10 分後	
10 × 10cm	0mm	モルタル	無補修	-0.1	0.0	-0.1	×
			エポキシ系注入	0.0	-0.1	0.0	
			微粒子セメント注入	-0.2	-0.1	-0.1	×
			ピンネット	0.3	0.3	0.0	
	2mm	モルタル	無補修	2.7	2.2	2.0	
			エポキシ系注入	1.5	1.1	0.6	
			セメントスラリー注入	0.1	0.3	0.2	
			微粒子セメント注入	0.3	0.4	0.1	
		タイル	無補修	3.0	3.1	2.4	
			ピンネット	1.7	2.2	2.3	
20 × 20cm	2mm	モルタル	無補修	4.7	4.2	3.6	
			エポキシ系注入	1.2	1.2	0.8	
			セメントスラリー注入	0.4	0.3	0.1	
			微粒子セメント注入	0.5	0.4	0.2	
		タイル	ピンネット	2.2	2.4	2.4	
			無補修	2.3	2.4	2.5	
			ピンネット	3.1	2.9	2.4	

注：記号は，○：明瞭に判別が可能，△：不明瞭だが判別が可能，×：判別不可能

メント系およびセメントスラリー系（以降セメント系と記す）の注入工法の場合には、健全部との温度差は小さいが、エポキシ樹脂注入工法の場合、補修無しの場合と比較すると小さいものの、0.5～1.5 程度の温度差が生じている。また、打診での判断の可否と温度差の程度は、同様の傾向である。

図-5 にモルタル仕上げで浮き部の大きさが10cm角の場合、同じく図-6 に大きさ20cm角の場合、図-7 に大きさ10cm角、浮き代0mmの場合とタイル仕上げで大きさ10cm角の場合の補修部と健全部の温度差の経時変化を示す。なお、浮き代はすべて2mmである。

セメント系の注入工法では、補修無しの試験体に比べ相対的に温度差が小さく、健全部との温度差は0に近い。また、温度差の経時変化は、加熱直後より5分後のほうが温度差が大きくなる。エポキシ樹脂系の注入工法では、補修無しの試験体に比べ相対的には温度差は小さくなるものの、明瞭な温度差が確認される。また、温度変化の傾向も補修無しの場合と同様である。これは、補修材料の熱伝導率が、セメント系はコンクリートに近いため、浮き部への補修が適切に行われた場合には、温度差が小さくなり、エポキシ樹脂の場合には、熱伝導率が空気層とコンクリートの中間の値となるため、若干の温度差として表れると考えられる。

ピンネット工法の場合には、浮き部分には補修材が充填されないため補修無しの場合に近い温度差となる。タイル仕上げの場合には、表層部の熱容量が大きくなるため、加熱終了後、さらに温度差が大きくなる。また、浮き部の大きさが大きくなるほど温度差が大きくなる。以上のことから、浮き部への補修状況を評価する場合、セメント系の補修材については、補修部とその周辺の健全部の温度差がほぼ0になることにより評価が可能である。エポキシ系の補修材については、温度差による評価は困難である。

3.3 内部空隙補修の状況

図-8 に電磁波レーダ法による内部空隙の補修

前後の探査結果の例（Bモード波形）を示す。また、図-9 にX線法による補修前後の空隙部の画像を示す。図中に波線で示した空隙の大きさは、10cm×10cmで厚さ2cmである。

補修前には、いずれの試験体でも空隙部からと思われる反射波（各図白囲み部分）が確認できる。補修後には、セメント系の補修工法の場合、反射波が不明瞭となる。ただし、微粒子セメントの場合には、図-9 に示す未充填部からと思われる反射波が確認される。エポキシ樹脂の場合は補修前後ともに空隙部での反射波形が明瞭に確認される。今回の実験では、定量的な評

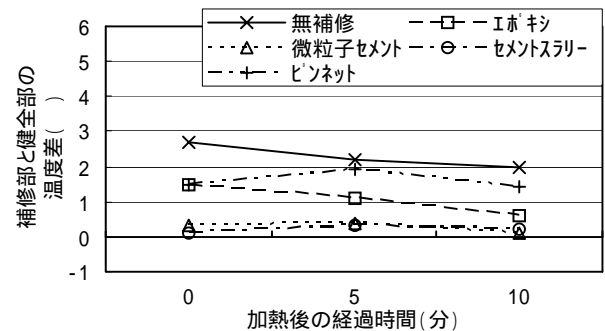


図-5 温度差の経時変化（10cm角・浮き代2mm）

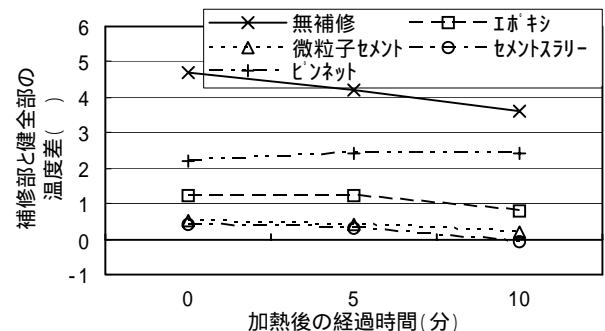


図-6 温度差の経時変化（20cm角・浮き代2mm）

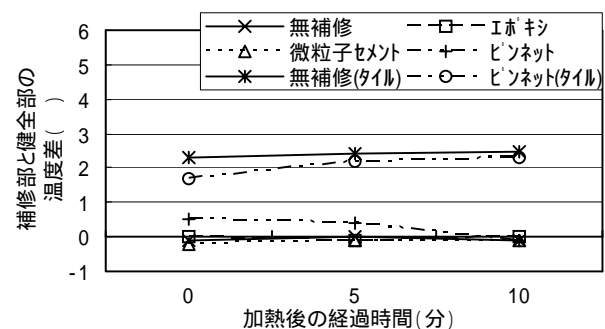


図-7 温度差の経時変化（10cm角・浮き代0mm・モルタル仕上げおよび浮き代2mm・タイル仕上げ）

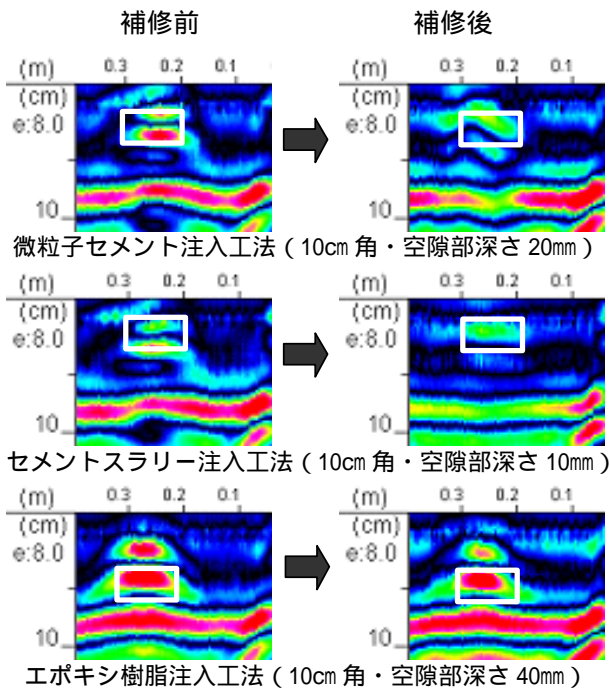


図-8 電磁波レーダ法による内部空隙の補修前後の探查結果の例（丸囲みが空隙部）

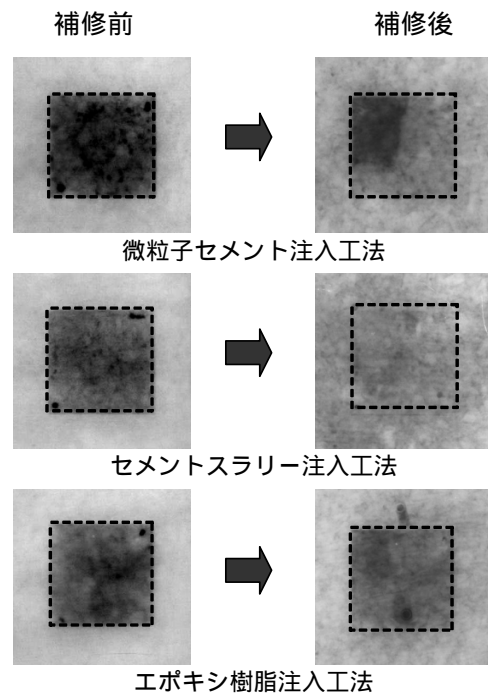


図-9 X線法による内部空隙の補修前後の探查結果の例

価には至っていないが、セメント系の補修工法の場合には、補修後の反射波形より充填性を評価できる可能性がある。ただし、実際の建物では、鉄筋や埋設物の影響を受けるため、判別が困難になる場合もある。

X線法では、空隙部はX線の透過量が多くなるため、色の濃い部分として表れる。セメント系の補修材では、補修後には空隙部の判別が困難となる。微粒子セメント系の左上部は補修材が充填されていない部分と思われる。エポキシ樹脂系の場合には補修前後の差は明瞭でない。また、今回の実験では、濃淡の差を判別可能な空隙部分の厚さは2cmであったが、X線での判別は健全部との濃淡の相対的な比較となるため、コンクリートの厚さが大きい場合には、判別可能な最小厚さも大きくなると思われる。

セメント系の補修材は、比重が2.0程度であり、コンクリートに近いため、X線の遮蔽度合いもコンクリートとほぼ同様であると思われる。これに対して、エポキシ樹脂は比重が1.3程度であり、エポキシ樹脂が空隙部に充填されてもコンクリートとの境界部で電磁波を反射し、また、X線を透過させやすいものと考えられる。

4. まとめ

- (1) ひび割れ部の補修材の充填状況は、超音波の立上がり時間差、最大振幅比の組合せにより評価が可能である。
- (2) 仕上材の浮きに対する補修材の充填状況は、セメント系の材料の場合には、健全部との温度差が0に近づくことで評価が可能である。
- (3) 内部空隙の充填状況は、セメント系の材料の場合には、電磁波レーダ法、X線法によって評価できる可能性がある。
- (4) エポキシ樹脂系の補修材料の場合、赤外線、電磁波レーダ、X線等での充填状況の評価は困難であり、打診等による評価が望ましい。

謝辞

本研究は、共同研究「建築物の改善改修要素技術の開発と技術マップの検討」の一環として実施したものであり、共同研究参加各位の貴重な御教授を賜った。実験にあたっては、タケモル工業(株)、太平洋マテリアル(株)、日本化成(株)、コニシ(株)、(株)アストンの多大な協力を賜った。ここに記して深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2003-、日本コンクリート工学協会、技報堂、pp.85-107、2003