

報告 打撃工法によるハツリ処理で生じた微細ひび割れの定量的評価方法と打継ぎ界面の付着強度に関する研究

渡邊 晋也*1・後藤 昭彦*2・松本 政徳*3・宮永 憲一*4

要旨: ブレーカ等により発生した微細ひび割れを客観的に評価し、補修材との一体化について検討を行った。その結果、微細ひび割れの客観的な評価方法として、低真空で蛍光エポキシ樹脂を含浸させて画像解析により数値化することが可能である。また、ブレーカ等の種類が微細ひび割れの発生量に与える影響を検討した結果、コンクリートブレーカでは、工具質量が重くなると発生量が多くなることが確認された。ハツリ処理後に断面修復を行った場合、既設コンクリートの微細ひび割れ量が多くなることで、付着強度が低くなり打継ぎ界面の付着強度が低下することが判明した。

キーワード: ハツリ処理, 手持式動力工具, コンクリートブレーカ, 微細ひび割れ, 付着強度, 断面修復

1. はじめに

コンクリート構造物の部分補修に用いられる断面修復は、変状部をハツリ除去し、補修材で断面を修復する工法である。断面修復で重要な工程は、変状部を取り除く「ハツリ処理」であると考えられる。一般的にハツリ処理は、a)コンクリートブレーカ等の手持式動力工具（以下ブレーカ等と称す）を用いる場合と、b)ウォータージェットを用いる場合の2通りがある。これらの方法にはそれぞれに長所・短所が存在する。例えば、ブレーカ等を用いた場合には、手軽にハツリ処理ができるという長所があり、既設コンクリートに写真-1に示すような微細ひび割れや脆弱部を発生させる短所がある。一方、ウォータージェットを用いた場合には、微細ひび割れや脆弱部を発生させにくい長所があり、高圧ポンプやその他の機材が非常に大型で施工が大規模となるため、補修規模が小さい場合や、長時間の交通規制が実施できない場合などでは、コスト面や施工時間面において適用に課題があることなどの短所が挙げられる。

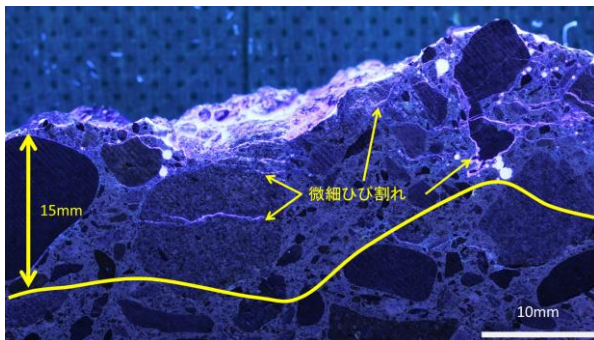


写真-1 ハツリ面の微細ひび割れの状況

補修・補強現場において既設コンクリートのハツリ処理は、ブレーカ等が最も多く用いられているのが現状である。

そこで本研究では、ブレーカ等によるハツリ処理が既設コンクリートに与える影響について検討を行った。検討項目としては、ブレーカ等で生じたコンクリート内部の微細ひび割れ評価に関する基礎的な検討と、各種ブレーカ等がコンクリート内部の微細ひび割れ発生量に与える影響およびコンクリート内部の微細ひび割れ量が打継ぎ界面の付着に及ぼす影響についてである。

2. 実験概要

本研究は、以下の項目について検討を行った。

2.1 コンクリート内部に発生した微細ひび割れ等の評価

コンクリート内部の微細ひび割れを評価する手法として、既往の研究を参考にし、簡易な方法である蛍光エポキシ樹脂接着剤を用いて微細ひび割れに含浸させ、画像解析による評価方法について検討を行った。検討項目は、a) 画像解析により評価できる最小ひび割れ幅の検討、および b) 蛍光エポキシ樹脂の浸透状況について、電子プローブマイクロアナライザー（以下、EPMA と称す）を用いた科学的評価と、画像解析に用いる画像との比較を行い、画像解析による微細ひび割れの評価について検討を行った。

2.2 ブレーカ等によりハツリ処理を施した場合の微細ひび割れの発生状況および打継ぎ界面の付着強度

ブレーカ等によりコンクリート内部に発生する微細ひび割れについて評価を行った。また、ブレーカ等によ

*1 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 研究員 博士 (工学) (正会員)
 *2 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)
 *3 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 技術課長 (正会員)
 *4 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 研究員

りハツリ処理を行った試験体に断面修復を施した後の付着強度についても同時に検討を行った。

(1) ブレーカ等の定義

ブレーカ等は、ピストンによる打撃機構を有する工具であり、圧縮空気又は電気によって、往復するフリーピストンを内蔵し、これでたがね等を打撃し、この衝撃でコンクリートのハツリ等を行う工具である。ブレーカ等には、いろいろな種類があり、本研究ではブレーカ等の定義を一般に用いられている以下の定義に従った。

a) コンクリートブレーカ：

工具質量は、13.5kg～43.0kg で動力源は圧縮空気である。

b) ピックハンマー：

工具質量は、7kg～12.5kg で、動力源は圧縮空気である。

c) チッピングハンマー：

工具質量は、2.1kg～6.9kg で、動力源は圧縮空気である。

d) 電動ハンマー：

工具質量は、4.5kg～32kg で、動力源は電気である。

(2) 既設コンクリート概要

a) 使用したコンクリート

試験体には、早強セメントを用いて、呼び強度を 24 とした。使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。また、表-2 には各材齢のコンクリート強度を示している。材齢 28 日～5 ヶ月までは、φ100mm の円柱供試体を用いて測定し、材齢 5 年においては、φ100mm のコア供試体を採取し、圧縮強度および静弾性係数を測定している。その結果、ハツリ試験を行なった時のコンクリート圧縮強度は 37.0N/mm²、静弾性係数は 31.3kN/mm²であった。

b) 試験体寸法

供試体の形状寸法を図-1 に示す。供試体は、有筋のコンクリート版とし主鉄筋に D19、配力鉄筋に D16 を使用している。鉄筋かぶりは、純かぶりで 30mm とした。

(3) ハツリ処理概要

ハツリ作業状況を写真-2 に示す。ハツリ面積は小断面を模擬して、縦 0.67m×横 0.48m の大きさ 10 箇所を各種ブレーカの組み合わせにより、主鉄筋の下 2cm 程度（コンクリート表面から深さ 7cm 程度）までハツリ処理を行なった。なお、ブレーカ等を用いてハツリ処理をする作業員は同一人物とし、作業員の誤差をできるだけ少なくするように実施した。

使用したコンクリートブレーカは、10kg 級（工具質量 15.5kg）、20kg 級（工具質量 21.2kg）、30kg 級（工具質量 30.0kg）および電動ハンマー（工具質量 16.5kg）を用いている。なお、荒ハツリに要した作業時間は、10kg 級で 22 分、20kg 級で 14 分、30kg 級で 12 分および電動ハンマーで 33 分であり、工具質量が重くなること、動力源が空気の方がハツリ効率は良くなった。

ブレーカ等の組合せによる検証として、鉄筋近傍までは上記 4 種類のコンクリートブレーカをそれぞれ用いて荒ハツリを実施した後、鉄筋下までピックハンマー（工具質量 6.2kg と 7.3kg）、チッピングハンマー（工具質量 5.2kg）を用いて 3 条件で調整ハツリを行なった。なお、電動ハンマーの場合、小型の電動ハンマー（工具質量 4.5kg）を用いている。本研究で行ったハツリ工具の組合せを表-3 に示す。

表-1 使用したコンクリートの配合

呼び強度 (SL)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/A (%)	C	W	S	G	Ad
					(kg/m ³)				
24	8	4.5	59.5	46.9	263	156	884	1011	1.052

表-2 各材齢における圧縮強度と静弾性係数

試験材齢	圧縮強度	静弾性係数
	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
28日	23.4	-
31日	23.7	23.0
40日	25.3	23.4
5ヶ月	31.0	24.9
5年	37.0	31.3

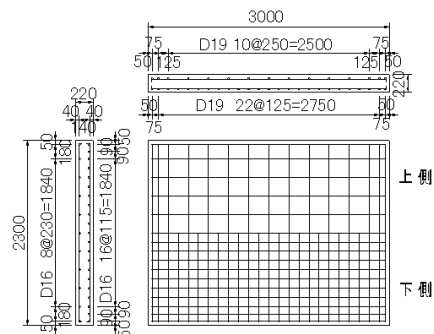


図-1 供試体の形状寸法



a) 荒ハツリ

b) 調整ハツリ



c) コンクリートブレーカ

d) チッピング・ピックハンマー

写真-2 ハツリ作業状況および使用工具

(4) 微細ひび割れの調査概要

ハツリ処理を行なった後、φ200mmのコアを1本採取し試験体とした。微細ひび割れの調査方法は、本研究で検討した蛍光エポキシ樹脂を含浸させ画像解析で求める方法としている。評価範囲は、コア試験体の中心(□100mm×100mm)としている。この範囲をコンクリートカッタで切断し切断面の20断面について、画像解析により調査した。

(5) 付着強度試験概要

各種ブレード等を用いてハツリ処理を行ったコンクリートに超速硬コンクリート(以下、補修材と称す)を打設し、直接引張試験により打継ぎ界面の付着強度を測定した。試験体の作製は、表-3に示したハツリ処理を行ったコンクリート版からφ200mmのコアを1本採取し、補修材を6cm打設した。打継ぎ界面には、ドライアウトを防止する目的で水湿しを行なっている。補修材を打設した後、5日間室内養生を行った後、φ75mmのコアを3本採取し、材齢7日で直接引張試験により付着強度を求めた。

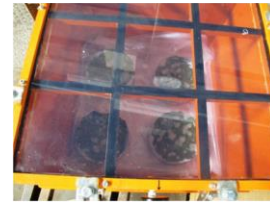
表-3 ハツリ工具の組合せ

No.	荒ハツリ	調整ハツリ
1	10kg級(15.5kg) コンクリートブレード	チップングハンマー(5.2kg)
2		ピックハンマー(6.2kg)
3		ピックハンマー(7.3kg)
4	20kg級(21.2kg) コンクリートブレード	チップングハンマー(5.2kg)
5		ピックハンマー(6.2kg)
6		ピックハンマー(7.3kg)
7	30kg級(30kg) コンクリートブレード	チップングハンマー(5.2kg)
8		ピックハンマー(6.2kg)
9		ピックハンマー(7.3kg)
10	16.5kg 電動ハンマー	電動ハンマー(4.5kg)



1.試験体の採取

2.樹脂を表面に滞留



3.真空脱泡

3. コンクリート内部の微細ひび割れの評価方法

3.1 既往の微細ひび割れの定量的評価方法

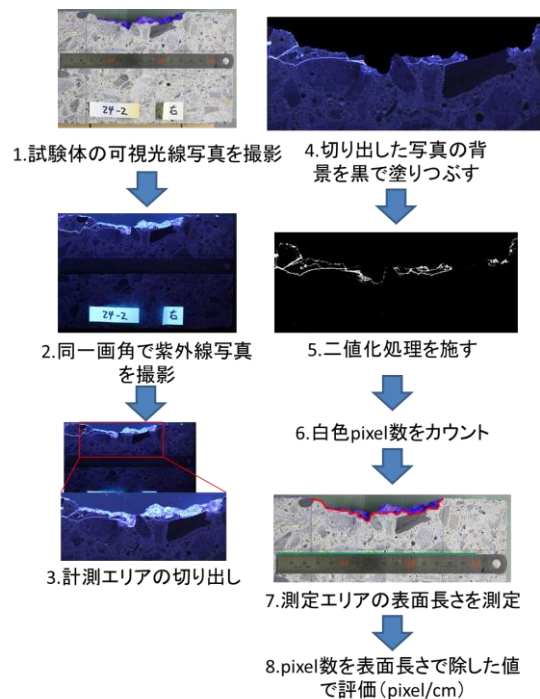
既往の微細ひび割れ定量評価方法としては、a) コンクリートの薄片を作製し、顕微鏡を用いて1mm²中に存在するひび割れ面積を算出する方法¹⁾、b) ひび割れに染料を染み込ませて観察する方法²⁾、c) 蛍光エポキシ樹脂を染み込ませて観察する方法³⁾、d) X線装置を用いる方法⁴⁾などが提案されている。これらの方法は、時間や手間が非常にかかることや、特別な機器が必要となる。その中でも、蛍光エポキシ樹脂を染み込ませて観察する方法が最も簡易な手法であると考えられる。

3.2 微細ひび割れの定量的評価方法

本研究ではコンクリート内部の微細ひび割れを簡易に評価できる手法について検討する目的で、蛍光エポキシ樹脂を用いた手法に着目し、微細ひび割れを検出することとした。なお、既往の研究³⁾では、蛍光エポキシ樹脂を含浸させるために、真空脱泡を行っているが、その真空度は中真空で行っている。中真空は、特殊な設備が必要であることから、本研究では特殊な設備を必要としない低真空で実施した。その後、画像解析法を用いて、微細ひび割れを評価する方法について検討を行なった。

本研究で実施した微細ひび割れ等の定量評価試験体の作製方法および評価方法を図-2に示す。試験体の作製方法は、低粘度エポキシ樹脂(粘度100±50mPa・s(20℃))に蛍光エポキシ樹脂を主剤の1%添加したものを、ハツリ処理面に滞留させ、真空脱泡を行なった。真空脱泡の条件として、低真空-0.1MPaで60分間真空装

a) 定量評価試験体の作製方法



b) 評価方法

図-2 定量評価試験体の作製方法および評価方法

置に入れて樹脂を強制的にコンクリート内部へ浸透させた。その後、試験体をコンクリートカッターで切断し、紫外線ライト（20W：ピーク波長 352nm）を用いて、デジタル一眼レフカメラ（50mm マクロレンズ使用）により写真を撮影した（以下紫外線写真と称す）。撮影した紫外線写真を用いて、微細ひび割れに浸透したエポキシ樹脂の量を画像解析ソフトにより二値化処理して、その白色 pixel 数を算出した。なお、定量的な評価方法として、各断面でハツリ処理面の凹凸に差があることから、白色 pixel 数をハツリ表面の線長で除して値を評価値としている。

3.3 微細ひび割れ評価方法の最小幅

提案した微細ひび割れの測定方法を用いた場合の、最小ひび割れ幅について検討を行なった。検証には、3種類の試験体を用いて、その中から最小幅と思われ、なおかつ二値化した際に、白色 pixel として表示される任意のひび割れを各5点選定した。ひび割れ幅の測定は、画像解析ソフトを用いて実施している。測定に用いた代表画像を写真-3 に示す。この画像の分解能は $12 \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。画像解析から得られた測定結果を表-4 に示す。この結果、提案した微細ひび割れ評価方法では、最小で $20 \mu\text{m}$ まで二値化画像でひび割れと判断できることが判明した。

3.4 紫外線写真結果と EPMA 測定結果の比較

本研究で用いた微細ひび割れの調査方法は、蛍光エポキシ樹脂が発光したところを評価する方法である。従って、蛍光エポキシ樹脂が発光する箇所を微細ひび割れ部として定義している。しかしながら、蛍光エポキシ樹脂が含浸しているが、発光していない箇所もあるのではないかと考えた。そこで、EPMA を用いて蛍光エポキシ樹脂の含浸状況を分析した。対象とした箇所は3箇所としている。代表の紫外線写真を写真-4 に示す。また、同一箇所を EPMA により分析した結果を図-3 に示す。測定対象は、エポキシ樹脂であることから、塩素イオンおよび炭素イオンの結果を示している。その結果、EPMA の測定結果と紫外線写真の発光箇所は類似していることが判明した。なお、残りの2箇所についても同様の結果であった。このことから、本研究で用いた方法でも、微細ひび割れの評価ができることが判明した。

4. 各種ブレーカ等によりハツリ処理を施した場合の微細ひび割れの発生状況

コンクリートブレーカを用いてハツリ処理をした試験体の画像解析に用いた代表的な画像とその画像を二値化した画像を表-5 に示す。この二値化画像から白色 pixel をカウントし、コンクリート表面線長で除した結果を図-4 に示す。赤点 (N=20 断面) は、各断面での結果

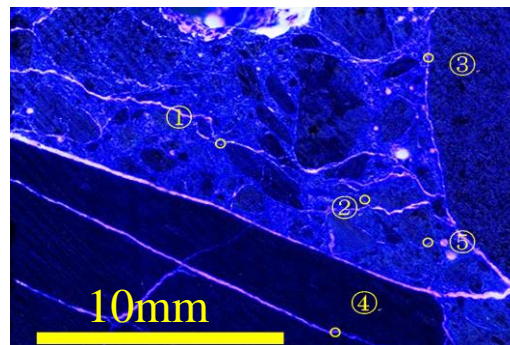


写真-3 ひび割れ幅の評価に用いた写真（試験体 No2）
（写真中の数字は測点を表す）

表-4 画像解析から得られた測定結果

測点	試験体No.		
	1	2	3
(μm)			
①	23	23	25
②	22	26	20
③	29	20	26
④	29	29	28
⑤	23	27	42
最小幅	22	20	20

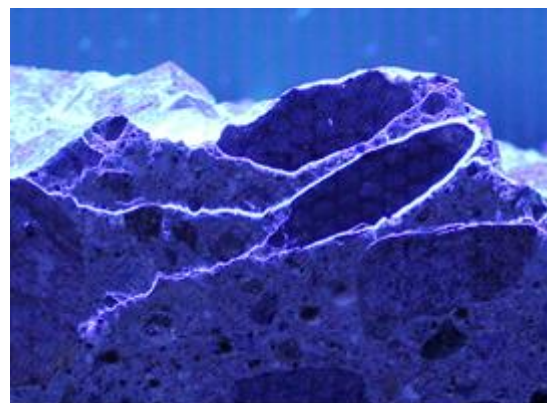
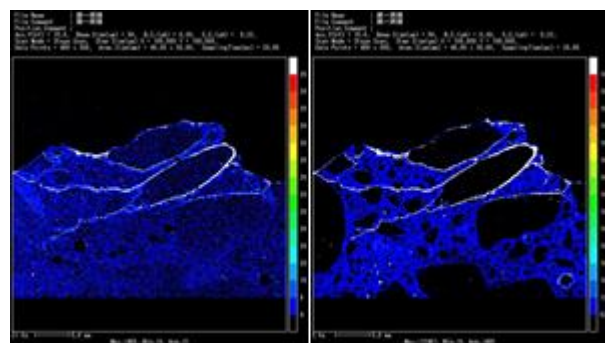


写真-4 測定対象の紫外線写真



a) 塩素イオン b) 炭素イオン

図-3 EPMA を用いた面分析結果

を示し、棒グラフは平均値を示している。その結果、コンクリートブレーカ 10kg 級で微細ひび割れを発生させる傾向が得られた。20kg 級, 30kg 級では有意な差は

見られない結果となったが、10kg級と比較した場合、微細ひび割れの発生量が多くなる。したがって、工具質量が重くなるほど、微細ひび割れの発生が多くなることが判明した。一方、電動ブレーカの場合、コンクリートブレーカと同様に微細ひび割れ等を発生させることが判明した。表-3に示した、ブレーカ等の組合せによるハツリ処理で生じた微細ひび割れ等の結果を図-5に示す。赤点(N=20断面)は、各断面での結果を示し、棒グラフは平均値を示している。調整バツリを行った場合、コンクリートブレーカの質量が軽いほど、微細ひび割れ発生量が少ないことがわかる。調整バツリに用いる工具による違いは、チッピングハンマー(5.2kg)を用いた場合、微細ひび割れ等が多くなる傾向が得られた。工具質量が重くなることで、徐々に微細ひび割れ等が少なくなる傾向が得られた。この理由として、ハツリ処理方法による違いが出ているのではないかと考えられる。軽い工具を用いた場合、エネルギーは小さい分、多点を打撃するのに対して、重い工具を用いた場合、打撃回数は少なくなる。また、打撃方法はコンクリート面に直角に押し当てるのではなく、斜め方向から削ぎとる方法でハツリ処理がなされていることから、打撃回数が少なくなれば、既設コンクリートへ与える影響は小さくなることが考えられる。したがって、工具質量が重くエネルギーの大きい工具の方が打撃回数は少なくなり、微細ひび割れが少なくなったことなどが考えられる。また、電気ハンマーを用いた場合、一般的にコンクリートブレーカより微細ひび割れ等が発生しにくいと考えられていたが、本実験の結果では、コンクリートブレーカと同等であることが判明した。

表-5 画像解析に用いた代表的な画像とその画像を二値化した画像

手持式動力工具	紫外線画像	二値化画像
コンクリートブレーカ 工具重量15.5kg		
コンクリートブレーカ 工具重量21.2kg		
コンクリートブレーカ 工具重量30.0kg		
電動ハンマー 工具重量16.5kg		

5. 微細ひび割れの発生量と打継ぎ界面の付着強度に関する検討

各コンクリートブレーカおよび電動ブレーカでハツリ処理を行った場合の付着強度を図-6に示す。赤点(N=3)は各付着強度を示し、棒グラフは平均値を示している。その結果、全ての試験体で付着強度が1.0N/mm²を下回る結果となった。また、微細ひび割れ発生量が多い20kg級のコンクリートブレーカが最も付着強度が低い結果となった。コンクリートブレーカの工具質量との関係は明確ではなかった。

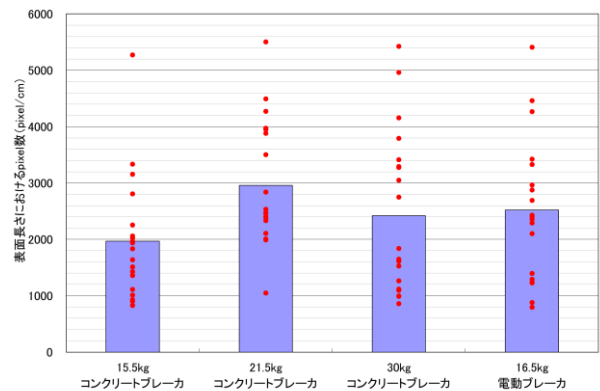


図-4 コンクリートブレーカを用いた場合の微細ひび割れ量

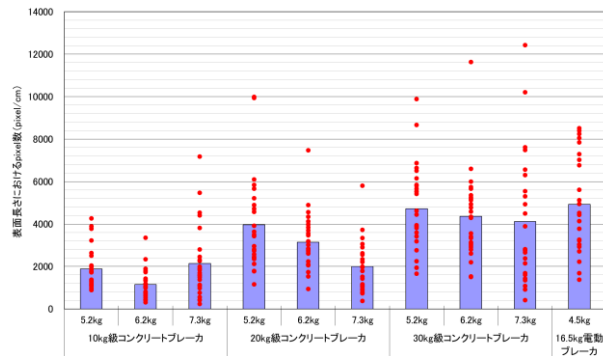


図-5 ブレーカ等の組合せによる微細ひび割れ量

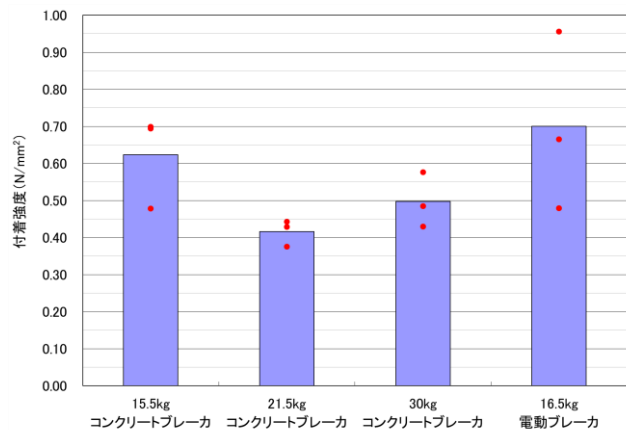


図-6 各コンクリートブレーカおよび電動ブレーカでハツリ処理を行った場合の付着強度

図-7 にブレーカ等の組合せによるハツリ処理を施した場合の付着強度の結果を示す。赤点 (N=3) は各付着強度を示し、棒グラフは平均値を示している。その結果、全ての試験体で、付着強度 $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ を下回る結果となった。微細ひび割れの発生量が少ない ($2000\text{pixel}/\text{cm}$ 以下)、 10kg 級コンクリートブレーカの3種類と 20kg 級コンクリートブレーカ+ 7.3kg ピックハンマーの4試験体については、他のハツリ方法よりも付着強度が大きくなる傾向が見られた。電動ブレーカについては、表面長さにおける pixel 数は大きいものの、付着強度は他の組合せよりも付着力が大きくなる傾向が見られた。

6. 表面長さにおける pixel 数と付着強度の関係

図-8 に表面長さにおける pixel 数と付着強度の関係を示す。対象としたデータは、コンクリートブレーカとブレーカ等の組合せで得られた結果を用いている。その結果、表面長さにおける pixel 数が大きくなると、付着強度は小さくなる傾向が確認された (相関係数: 0.74)。この結果から、表面長さにおける pixel 数は、既設コンクリートのダメージ程度を把握する指標として有効であることが考えられる。

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリート内部に発生した微細ひび割れの評価は、蛍光エポキシ樹脂を低真空脱泡により浸透させて、試験体を切断したものを画像解析により評価することで評価が可能である。
 - (2) コンクリート内部に発生した微細ひび割れの定量的な評価は、表面長さにおける pixel 数を用いて評価することを提案した。
 - (3) ブレーカ等により発生する微細ひび割れについて検討した結果、荒バツリに用いる工具は、工具質量が重くなることで、既設コンクリートに発生する微細ひび割れが多くなる傾向があることが判明した。一方で、調整バツリに用いる工具については、工具質量が大きくなることで、微細ひび割れの発生量が少なくなる傾向があることが判明した。
 - (4) どのブレーカ等を用いても、打継ぎ界面の付着強度が小さくなる結果得られた。
 - (5) 電動ブレーカについては、表面長さにおける pixel 数は大きいものの、付着強度は他の組合せよりも付着力が大きくなる傾向が見られた。この傾向については、今後検討を行うこととする。
 - (6) コンクリート内部の微細ひび割れと打継ぎ界面の付着強度には相関があることが判明した。
- 以上の結果、ブレーカ等を用いたハツリ処理により発

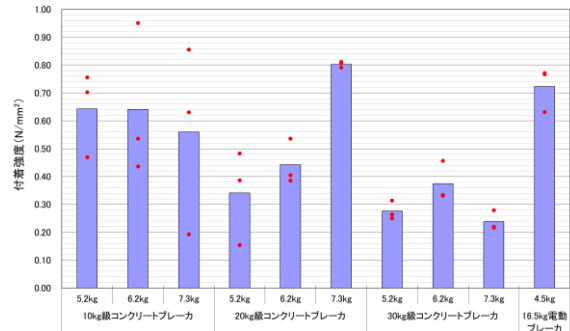


図-7 ブレーカ等の組合せによるハツリ処理を施した場合の付着強度

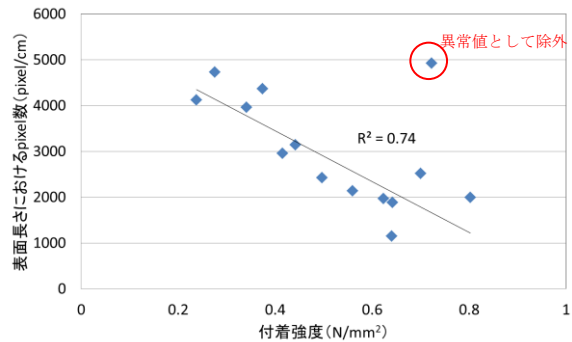


図-8 表面長さにおける pixel 数と付着強度の関係

生した微細ひび割れの発生量と付着強度には相関を有することがわかったが、いずれのブレーカ等を用いたハツリ処理の状態でも付着強度が小さいので、微細ひび割れの除去もしくは補修方法を検討する必要がある。

謝辞: 本研究で実施した EPMA 測定をショーボンド建設(株) 補修工学研究所の協力を得た。ここに付記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉本彰, 川上正史: 圧縮荷重によるペーストクラックの成長, 材料, 22(240), pp.865-869, 1973
- 2) 藤倉裕介, 青景平昌: 補修・補強工事におけるコンクリート切削面の損傷程度が打ち継ぎ後の付着強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol28, No.1, pp.1709-1715, 2006
- 3) 岩城圭介, 加藤淳司, 平間昭信, 塩谷智基: 微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol26, No.1, pp.999-1005, 2004
- 4) 大塚浩司: X線造影撮影による鉄筋コンクリートの微細ひびわれ検出, コンクリート工学年次論文集, Vol10, No.3, pp.145-150, 1988
- 5) 渡邊晋也, 堀井久一, 谷倉泉, 後藤昭彦: コンクリート打継ぎ面の内部に生じた脆弱部および微細ひび割れの補強方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol34, No.1, pp.1660-1665, 2012