

ウォータージェットによるコンクリートの表面処理に関する一考察

中日本高速道路（株） 中央研究所⁽¹⁾ 緒方 紀夫
中日本高速道路（株） 中央研究所⁽¹⁾ 小野 聖久
(社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所⁽²⁾ 設楽 和久*
(社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所⁽²⁾ 谷倉 泉

Study on surface preparation for the unification of exist and newly placed concrete by water jet application

Key Words : concrete structure , repair , unification , water jet , surface preparation

1. はじめに

最近の道路橋の改築・改良工事においては、交通量の増大や過積載車などの大型車両の通行等により劣化の進んだ橋梁床版等の耐久性の改善、さらに阪神大震災に端を発した橋脚等の耐震性向上等の目的で、既設のコンクリート構造物に新コンクリートを打継いで補修・補強を行う事例が増加している。

このような補修・補強において新旧コンクリート構造物を一体化する上で、最も大切なことは、既設コンクリートと新コンクリートとの間で必要とされる打継目付着強度を確実に確保し、長期間にわたってこれを保持することである。しかし、この際に旧コンクリート構造物の表面処理方法や、要求される新旧コンクリートの付着性状については、明確な規定やその根拠が示されていないのが現状であった。そのため、経験的にブレーカーや各種ブラスト工法が用いられてきた。しかしながら、人力施工によるブレーカーでは、写真1、2に示すようにコンクリート表面にヘアクラックを生じたり、鉄筋に損傷を与えるなどの問題が生じて、補修後に再劣化が見られるケースもある。ウォータージェットではこのような損傷を生じさせることが少ないので、構造物に優しく耐久性の高い補修を可能とする。また、サンドブラストやスチールショットブラスト、その他のブラスト工法による効果については、ウォータージェットと比較したケースは少ない。

このようなことから、ウォータージェット工法の有効性を確認するためには、これらの各種工法を適用した打継目の付着試験で比較評価するのが妥当と考え、一連の試験を実施した。本論文では、劣化コンクリートに対する耐久性の高い補修技術を確立するため、ブレーカー等の手ばつり、ブラスト、ウォータージェットにより表面処理を行い、処理面の形状と付着力との関係について考察した。



写真1 ブレーカー処理面に生じたひび割れ

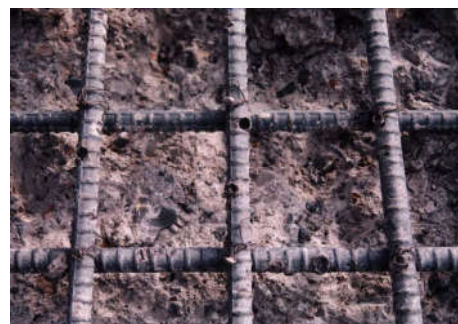


写真2 ブレーカーによる鉄筋の損傷

(1) Norio Ogata and Kiyohisa Ono (Expressway Research Institute of Central Nippon Expressway Company Limited, 1-4-1 Tadao Machida-City 194-8508, Japan)

(2) Kazuhisa Shidara and Izumi Tanikura (Japan Construction Method and Machinery Research Institute, Japan Construction Mechanization Association, 3154 Ohbuchi Fuji-City 417-0801, Japan)

2. 試験概要

本試験は、図1に示すように、床版を模したコンクリート版を作製して各種の表面処理を施し、その形状について観察と計測を行った後、処理面に新コンクリートを（厚さ 10cm）を打継ぎ、試験体とし新旧コンクリート間の付着力を測定したものである。新コンクリートの厚さは、付着力を確認するための直接引張試験に必要な長さを考慮し定めた。なお、この表面処理試験では、近年一般的に使われている揺動式ノズルは使用しておらず、X、Y方向の移動が自由にできるフレームに取付けた回転式ノズルのデータを採取した。

2.1 試験体

道路橋床版を模した図2に示すコンクリート版（縦 1m×横 1m×高さ 0.2m）を作製して各種の表面処理を施し、表面形状の観察と計測を行うこととした。新コンクリートの打設（厚さ 10cm）は下向きで、打継ぎ面を十分に清掃し表面乾燥飽水状態で実施した。また、品質の変動による試験結果への影響を避ける目的で、新コンクリートは十分に締固めた。

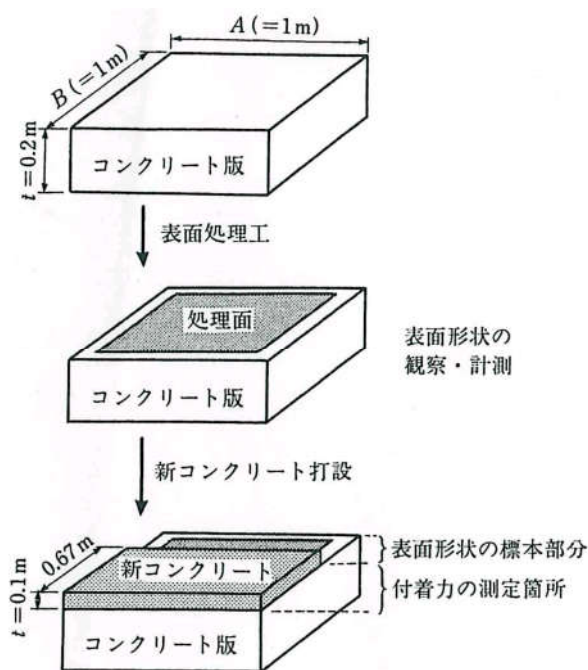
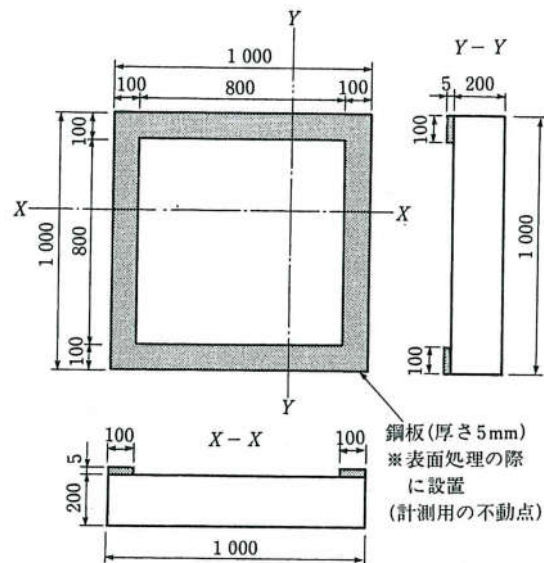


図1 試験の流れ



新旧コンクリートの種別	旧コンクリート	新コンクリート
寸法	1,000×1,000×200mm	1,000×670×100mm
コンクリート打設日	11月27日	旧コン打設翌年の6月18日
引張試験日	旧コン打設翌年の7月14日～7月23日	
7日強度	33.7N/mm ²	—
引張試験時の圧縮強度	44.6N/mm ² (材齢239日)	37.6～39.5N/mm ² (材齢26～35日)
粗骨材の最大寸法	20mm	25mm
使用セメント	早強ポルトランドセメント	早強ポルトランドセメント

図2 表面処理に用いた試験体（単位:mm）

2.2 表面処理の工種

本試験に用いた表面処理の工種を表1に示す。

(1) 人力施工

手ばつり工である人力施工は、ディスクサンダー、ビックハンマー、ハンドブレイカーの3種類の工具を使用した。ディスクサンダーは、回転するサンドペーパーをコンクリート表面に押し当て、研磨することで強度の期待できないレイタンス層を除去する。

一方、ビックハンマーとハンドブレイカーは、ともに機械先端のノミにより打撃を与え、コンクリート表面のレイタンスを破碎により除去するものである。

(2) ブラスト工法

ブラスト工法は、スチールショットブラスト、サンドブラスト、ドライブラストの3種類とした。

これらは投射材が表2のように異なっているものの、原理的にはこれらの投射材をコンクリート表面に吹き付け、レイトランス等を除去するものである。

(3) ウォータージェット工法

ウォータージェット工法とは、 $\phi 0.1 \sim 2\text{mm}$ 程度のノズルから音速 (340m/s) 以上の速度で水を噴射して得られる細噴流を用い、コンクリートの表面処理を行うものである。

これに用いるウォータージェットは、水の噴流形式とノズルの制御方式により表3のように分類される。図3にそれぞれのノズルの噴流形式と制御方法を示す。

本試験では、この3種類のノズル形式について、水圧、水量、処理回数 (=パス回数) を変化させて用いた。

表1 表面処理の工種

表面処理工 の種別	試験体 記号	設 定 条 件							備 考		
人力施工	A	ディスクサンダー		電動式							
	B	ピックハンマー		電動式							
	C	ハンドブレーカー		圧縮空気							
ブラスト 工	D 1	スチールショット ブラスト		投射 密度	50 kg/m ²						
	D 2				150 kg/m ²						
	D 3				250 kg/m ²						
	E 1	サンドブラスト		噴射 密度	10 kg/m ²						
	E 2				20 kg/m ²						
	E 3				30 kg/m ²						
	F	ドライブラスト		4 kg/m ²							
ウォーター ジェット 工	G 1	回転揺動ノズル		水圧 MPa	50	流量 l/min	3.0	処理 回数	3	エネルギー 密度 kwh/m ²	3.13
	G 2				100		4.2		2		3.07
	G 3				150		5.2		1		3.01
	H 1	扇形ノズル			100		6.7	1	2.66		
	H 2				150		8.3	1	2.68		
	I 1				回転ノズル(高圧) 1 本ノズル		50	6.8	6		1.53
	I 2	100	9.6				1	0.76			
	I 3	100	9.6				2	1.52			
	I 4	100	9.6				4	3.05			
	I 5	150	11.8				1	1.49			
	I 6	200	13.6				1	1.51			
	J 1	回転ノズル	4 本ノズル		70		77.0	—	-----		
	J 2	(低圧)	2 本ノズル		66		22.0	1	2.20		
	無処理	K	無処理								

表2 ブラストの種類と投射材の種類

	スチールショット ブラスト	サンドブラスト	ドライブラスト
投射材	鋼球 径 1.4mm	砂 3 号珪砂	ドライアイス ペレット

表3 ウォータージェットのノズルと表面処理方法

ノズル形式	水の噴射形状	ノズルの駆動形式	処理幅(mm)
扇 形 ノ ズ ル	平 射	固 定	20～50
回転揺動ノズル	直 射	回転揺動	50～200
回 転 ノ ズ ル	直 射	旋 回	50～200

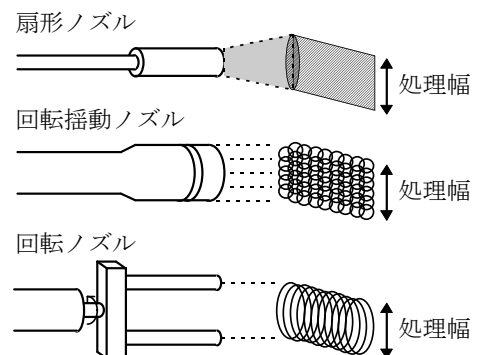


図3 ノズル形式と制御方法

2.3 表面形状と付着力の測定

表面処理を施した面について、目視や写真撮影による外観調査と処理後の表面形状を定量的に把握するため、レーザー変位計を用いた測定を行った。測定は、レーザー変位計を用いて0.1mm間隔でコンクリート版の処理面の高さを測定した。測定は、1試験体あたり縦、横方向各1測線、計2測線について実施した。

試験体から、図4に示す要領でコアボーリング機によりコア（直径φ100mm、長さ200mm）を採取し、コア端部の整形、治具の取付けを行った後に30tf万能試験機により直接引張試験を行った。

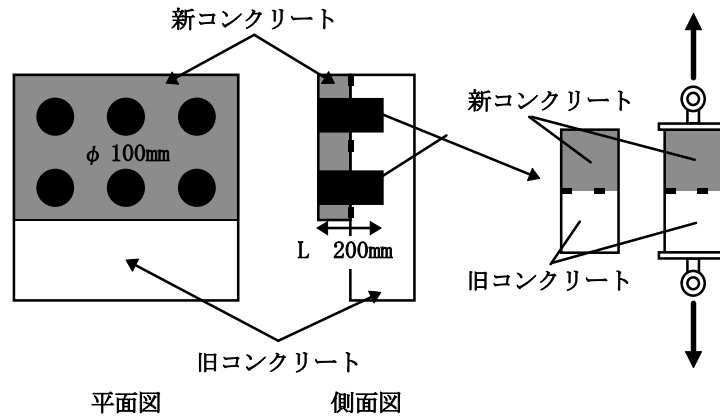


図4 コア採取の位置と引張試験方法

3. 試験結果と考察

(1) 表面処理後の外観

外観写真とレーザー変位計による計測結果のうち、特徴的なものについて、その表面の一部を図5に示す。

①人力施工

ディスクサンダーの場合、処理前より表面が滑らかに仕上がったが、処理深さも浅く、レイタンス層の除去が十分にできない。一方、ピックハンマーとハンドブレードで処理したものは、表面の凹凸が大きく不規則であり、骨材も破碎されていた。また、ハンドブレードの方が、より表面の凹凸と処理深さが大きく、表面ではひび割れの発生が確認された。

②ブラスト工法

ドライブラストを除けば、処理面には粗骨材が点在して現れ、セメントペーストと共に骨材表面が研掃されていた。このため表面の凹凸は小さく、滑らかであった。

③ウォータージェット工法

水を噴射するノズルの形式、水圧、パス回数によって、表面の凹凸に差が見られた。凹凸が小さい場合は、噴流が骨材周囲のセメントペースト分のみを除去し、凹凸が大きい場合は、噴流がセメントペーストと共に骨材も除去されている。

(2) 表面処理後の表面形状

① 面積増加率: S

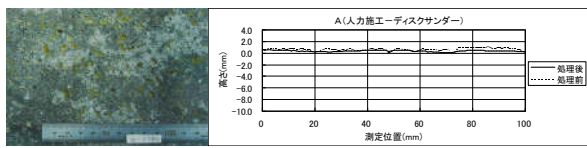
処理後の表面形状に凹凸が著しい場合は、コンクリート表面に設けた測線上の距離が長くなる(図6, 図7)。

ここでは、式(1), (2)よりこの距離を求め、この積を処理面の表面積 $\tilde{A}$ として仮定した。

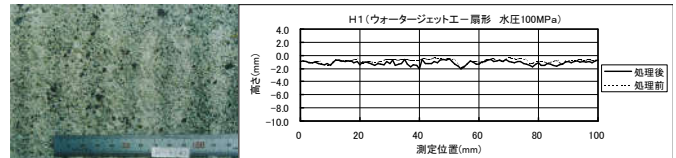
$$\tilde{L}_x = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta z_i^2} \quad (1)$$

ただし、 Δx_i :測定間隔, Δz_i :高さの差 (x 方向)

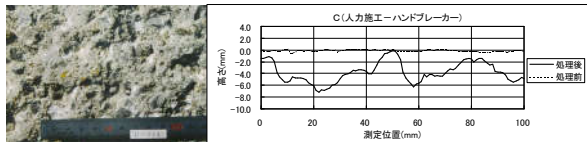
$$\tilde{L}_y = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} \quad (2)$$



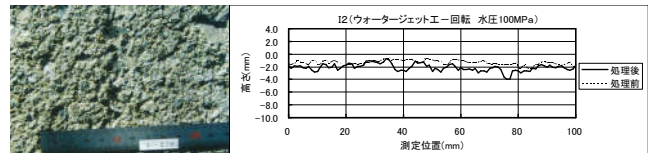
(a) A 人カーディスクサンダー



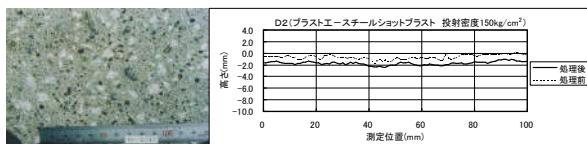
(e) H1 ウォータージェット扇形ノズル
水圧 100MPa 流量 6.7 l/min エネルギー密度 2.66kwh/m²



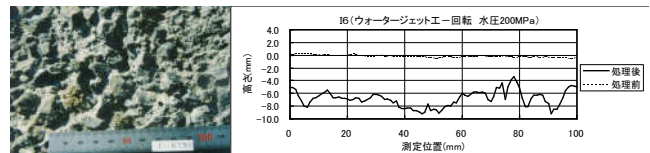
(b) C 人カーハンドブレイカー



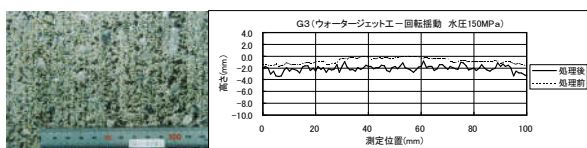
(f) I2 ウォータージェット回転ノズル
水圧 100MPa 流量 9.6 l/min エネルギー密度 0.76kwh/m²



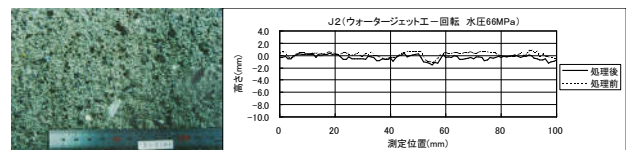
(c) D2 ブラストスチールショットブラスト
投射密度 150kg/m²



(g) I6 ウォータージェット回転ノズル
水圧 200MPa 流量 13.6 l/min エネルギー密度 1.51kwh/m²



(d) G3 ウォータージェット回転揺動ノズル
水圧 150MPa 流量 5.2 l/min エネルギー密度 3.01kwh/m²



(h) J2 ウォータージェット回転ノズル
水圧 66MPa 流量 22.0 l/min エネルギー密度 2.20kwh/m²

図5 表面処理後の外観と表面形状の測定結果

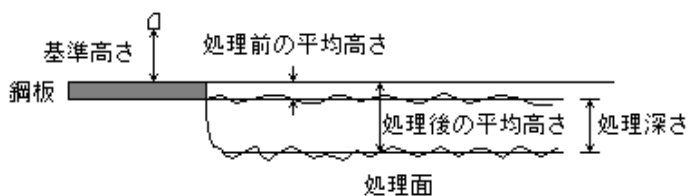


図6 処理面の平均処理深さ算出方法

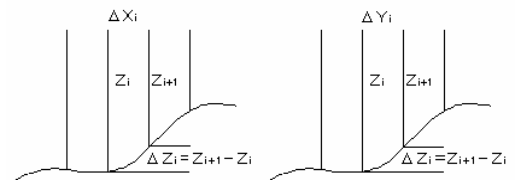


図7 測線の累計距離算出方法

ただし, Δy_i :測定間隔, Δz_i :高さの差 (Y 方向)

$$\tilde{A} = \tilde{L}_x \times \tilde{L}_y \quad (3)$$

$\tilde{L}_x$: X 方向-表面処理後の累計距離の平均値, $\tilde{L}_y$: Y 方向-表面処理後の累計距離の平均値
同様に処理前の表面積を仮定する。

$$\tilde{a} = \tilde{l}_x \times \tilde{l}_y \quad (4)$$

$\tilde{l}_x$: X 方向-表面処理前の累計距離の平均値, $\tilde{l}_y$: Y 方向-表面処理前の累計距離の平均値
ここで, 表面処理後における面積の変化を面積増加率 S として次式で表す。

$$S = \tilde{A} / \tilde{a} \quad (5)$$

② 処理深さ : $\bar{H}$ (処理面の平均深さ)

非処理面を基準として処理後の平均深さ $\bar{h}_2$ から, 処理前の平均深さ $\bar{h}_1$ を差し引いた値である。

$$\bar{H} = \bar{h}_2 - \bar{h}_1 \quad (6)$$

(3) 表面形状の測定結果

各表面処理における面積増加率 : S , 処理深さ : $\bar{H}$ を図 8, 図 9 に示す。

① 人力施工

ディスクサンダー(A)は面積増加率が 1 を下回り, 処理深さは 0.3mm 程度となった。一方, 表面の凹凸が顕著に現れたハンドブレイカー(C)は, 処理後の面積が 2 割以上増加し, 処理深さは 5mm 以上となった。

② ブラスト工法

面積増加率については投射材の投射・噴射密度の影響は小さく, 処理後の値はいずれもほぼ 1 に等しい。

一方, 処理深さは 0.06~2.93mm となり, 投射材の投射・噴射密度が大きくなるほど増加することが分かる。

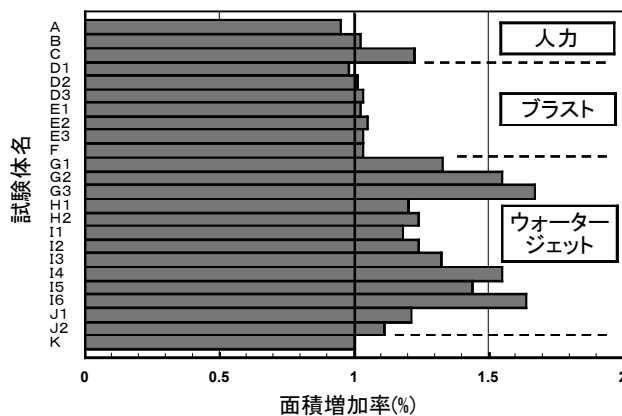


図 8 各表面処理と面積増加率

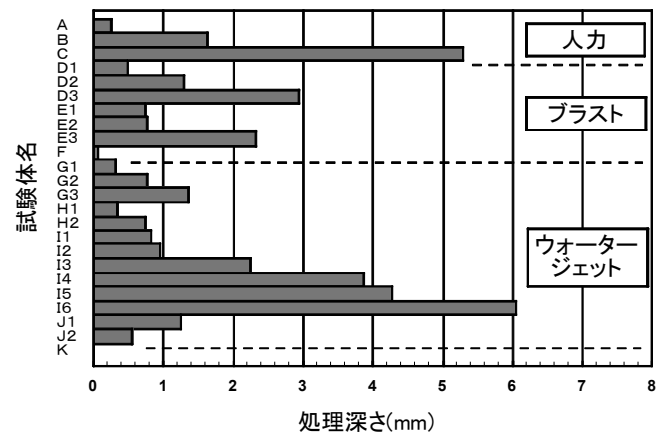


図 9 各表面処理と処理深さ

③ ウォータージェット工法

ウォータージェット工法の場合, 面積増加率は 1.11~1.67, 処理深さは 0.31~6.05mm と広く分布し, ノズルの形式, 水圧, 流量, ノズルの移動速度, パス回数の影響を受けている。そこで, 噴射する水のエネルギー (エネルギー密度), 水圧と表面形状の関係を図 10, 図 11 に示す。

ここで, エネルギー密度とは以下の式で表され, 水圧, 流量, ノズルの移動速度, パス回数によって求められる。

$$\begin{aligned} \text{エネルギー密度 (kWh/m}^2\text{)} \\ &= \text{水動力/処理能力} = \text{水動力} / \{ (\text{移動速度} \times \text{処理幅}) / \text{パス回数} \} \\ &= (\text{水動力} \times \text{パス回数}) / \{ (\text{移動速度} \times \text{処理幅}) / \text{パス回数} \} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{水動力 (kW)} = P \times Q / 60 \quad (8)$$

P : 水圧 (MPa), Q : 流量 (l/min)

処理能力 (m²/h) : (移動速度 × 処理幅) / パス回数

図10はエネルギー密度と表面処理形状の関係について示したものである。これより、処理後の表面形状はエネルギー密度の大小に直接影響されないことが分かる。

図11はエネルギー密度が等しい条件について、水圧と表面形状の関係を示したものである。これより、水圧が大きいほど水動力も増加することから、面積増加率、処理深さ共に大きくなることが分かる。

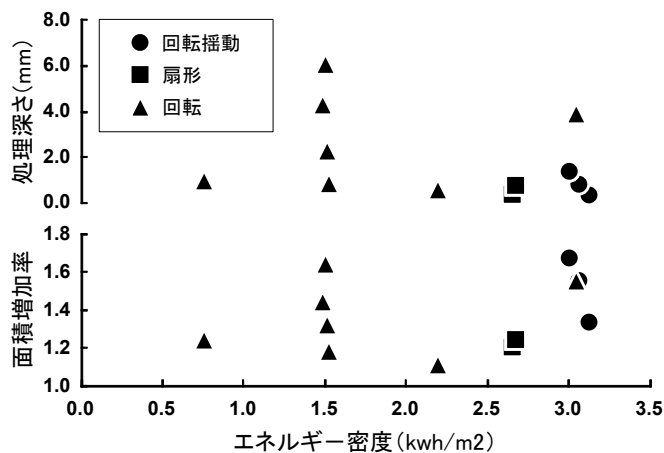


図10 エネルギー密度と表面処理形状

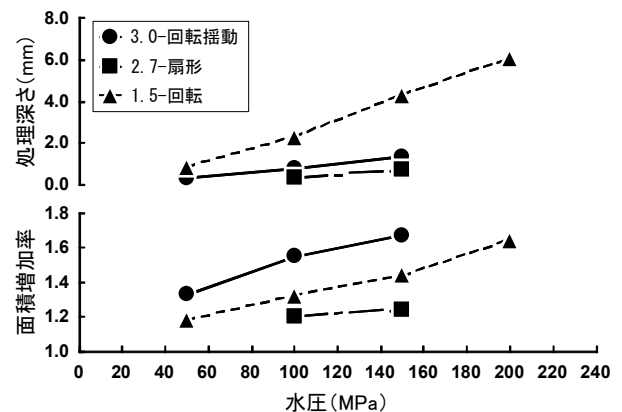


図11 水圧と表面処理形状 (同エネルギー密度)

(4) 付着力

図12は、付着強度の最小値、最大値、平均値をまとめたものであり、表面処理方法で結果が大きく異なった。

① 人力施工

人力施工の場合、他のブラスト工法やウォータージェット工法と比べて付着力は小さく、それらの最小値は処理を行わずに新コンクリートを打継いだ無処理(K)の場合に比べても小さい、ディスクサンダーでは表面の凹凸や処理深さが小さく、表面処理が十分でなかったこと、ピックハンマー、ハンドブレイカーではノミの打撃によるヘアクラックの影響が表れたものと考えられる。

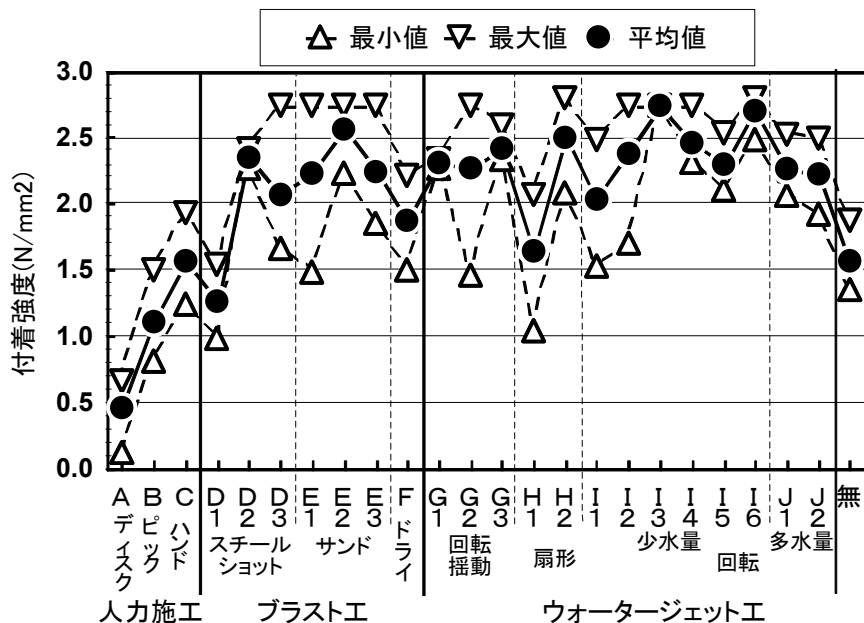


図12 直接引張試験結果

② ブラスト工法とウォータージェット工法

スチールショットブラストの投射密度が $50\text{kg}/\text{m}^2$ (D1) の時と、ウォータージェット工法の扇形ノズルの水圧が 100MPa (H1) の時、他の条件に比べて付着強度の最小値が小さく、一般的に打継目に必要な付着力と言われている $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ を下回った。これらは、処理深さが 0.5mm 以下と小さく、表面処理が十分でなかったためと推定される。

(5) 表面処理形状と付着力

① 面積増加率と平均付着力

図 1 3 に面積増加率と平均付着力の関係について示した。面積増加率は処理面の凹凸状態を表しており、表面処理前に比べ凹凸が少ないと 1 未満、逆に凹凸が大きいと 1 以上の値となる。

ブラスト工法は投射材の材質、投射・噴射密度に関係なく、面積増加率の値が $0.98\sim 1.05$ とほぼ一定であるのに対し、平均付着強度は $1.26\sim 2.56\text{N}/\text{mm}^2$ と幅広く分布した。

一方、ウォータージェット工法では、平均付着強度の分布が $1.64\sim 2.74\text{N}/\text{mm}^2$ とブラスト工法とほぼ同様な分布となったのに対し、面積増加率は $1.11\sim 1.67$ とブラスト工法に比べ幅広く分布した。

これより、処理面の面積増加率（凹凸の程度）は一定レベルを超えると付着力に与える影響は小さいことがわかる。

② 平均処理深さと最小付着力

平均処理深さと最小付着力の関係について図 1 4 に示す。

これより、処理深さが $0\sim 1.0\text{mm}$ 間の最小付着強度は、 $1.0\sim 2.3\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲に分布し、ブラスト工法とウォータージェット工法の双方で無処理の試験体を下回る条件がある。

ブレイカー等を用いた人力施工による表面処理では、期待する付着力が確保できないことから、用途を限定する必要があると判断される。一方、ブラスト工法とウォータージェット工法は、一定の処理深さを確保できれば、 $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の付着力を確保できることが分かる。

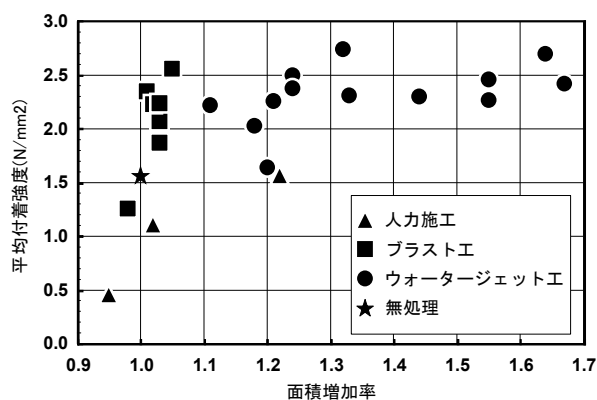


図 1 3 面積増加率と平均付着力

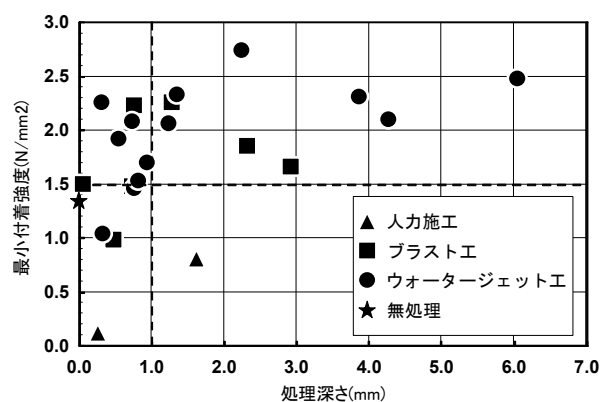


図 1 4 平均処理深さと最小付着力

4. まとめ

① ウォータージェット工法を用いて適切な処理がなされた場合は一体化に適した処理面が得られ、打継いだコンクリートと良好な一体化性状が保たれる。一方、ブレイカー等を用いた人力施工ではコンクリート表面に損傷が生じ、十分な付着力が得られないことが明らかとなった。

② 打継ぎによって新旧コンクリートの一体化を図るうえでは、 $1\sim 2\text{mm}$ 以上の深さまで表面処理を行えば十分な付着力を確保でき、必ずしも表面に凹凸をつける必要はない。新旧コンクリートの打継ぎにおいて重要なのは表面処理の方法であり、ウォータージェットはそれを可能にする有効な手法となることがわかった。すなわち、耐震補強や各種劣化対策としてのコンクリートの巻立て、表面被覆の事前処理としてもその適用範囲を広げていくことが可能と思われる。

5. おわりに

本研究は、コンクリート構造物に生じる各種の劣化・損傷に対し、ウォータージェット工法を利用した合理的な補修技術に関する試験・研究を行ったものである。

その結果、コンクリート構造物の新旧コンクリート一体化のための表面処理技術としてウォータージェット工法を適用することは、更なる耐久性向上に向けて有効な手段であることが確認できた。今後はコスト縮減に向けた施工の合理化、都市内における騒音の低減、処理水の回収と水処理技術の効率化などを図り、ウォータージェット工法の更なる性能向上を図っていきたいと考えている。

ここで紹介したようなウォータージェット工法を利用した補修技術が、安全で耐久性の高い維持管理システムを構築していくうえでの一助となればと考えている。

謝辞： 本研究は、「新旧コンクリート構造物の一体化に関する検討会（座長 日本大学理工学部土木工学科 山崎 淳教授）」を設置し、その検討内容を反映しながら進めたものであり、座長はじめ検討会メンバーより貴重なご指導、ご助言をいただいた。また、実験にあたっては、日本ウォータージェット施工協会に協力していただいた。ここで関係者の皆様には誌面を借り、深謝の意を表したい。

〔参考文献〕

- 1) 欧州土木構造物補修・補強調査 報告書，社団法人 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所，1998, 1999, 2000, 2001, 2004
- 2) 谷倉 泉・設楽和久・上東 泰・野島昭二：ウォータージェット工法を用いたコンクリート構造物のはつり処理性能試験，日本ウォータージェット学会，第16回研究発表講演会 論文集，pp. 53～62（2002. 1）
- 3) 米国土木構造物補修・補強調査 報告書，社団法人 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所，2002