

#

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#

#

#

(社) 日本建設機械化協会#建設機械化研究所⁽¹⁾ ##谷倉 泉 #

(社) 日本建設機械化協会#建設機械化研究所⁽¹⁾ 設楽 和久*#

日本道路公団#試験研究所⁽²⁾ 上東 泰 #

日本道路公団#試験研究所⁽²⁾ 野島 昭二 #

#

Performance test of water jet robot for removal of concrete structures

#

Key Words : water jet, concrete structure, repair, removal, chloride , evaluation method

#

1. はじめに#

近年、コンクリート構造物の老朽化が進み、それらの構造物に変状が発生している。変状は、塩害をはじめとしてアルカリ骨材反応、中性化、凍結融解など多岐に渡っており、対象部位もPC桁、RC床版、橋脚など広範囲に及んでいる。特に寒冷地で散布される塩化カルシウムや海からの飛来塩分による塩害では、コンクリート表面だけではなく鉄筋の背後にまで塩分が浸透しているため、この深さまで完全にはつり取る技術が不可欠となっている⁴⁾。今後、このような膨大な量の社会資本を健全かつ安全に維持管理していくためには、効果的で品質の高い補修・補強技術の保証が必要不可欠と言える。#

一方、我が国の高速道路等の既設コンクリート構造物に対する補修・補強工事においては、高速水噴流を利用したウォータージェットによる既設コンクリートの表面処理、はつり、切断、削孔等の処理が施されるようになってきた。従来のブレードによるはつりでは、衝撃により健全なコンクリートや鉄筋に損傷を与えたり、その影響によりコンクリート打継部の付着力の低下を招くなどの弊害が生じている。このため、そのような損傷を生じさせないウォータージェット技術の長所が最近特に注目されてきている²⁾。しかし、これらの維持管理分野におけるウォータージェット技術そのものは、まだ十分に確立されたものとはなっておらず、目的とする成果を得るための種々の調査・研究が進められてきているのが現状である。

このようなことから日本道路公団（以下、「JH」）では、コンクリート構造物の補修・補強工事におけるはつり処理にウォータージェットの特長を利用した工法を活かした手法を開発するため³⁾、平成9年度より実施してきた各種調査および施工実験を重ね、その成果をもとに平成12年度にはウォータージェット施工マニュアルを策定し、ウォータージェットはつり装置の性能試験方法を取りまとめた⁴⁾。そのマニュアルに基づき、(社) 日本建設機械化協会 建設機械化研究所では、ウォータージェットはつり装置の性能試験を実施する公的機関として、ウォータージェットはつり装置についての性能試験を実施している。

ここでは、1970年代からコンクリート構造物の補修にウォータージェット技術の応用を手掛けている欧州の事例と合わせて、このウォータージェット工法を用いたはつり処理性能試験結果の概要と課題等について紹介する。

2. 欧州におけるウォータージェットの利用状況^{5), 6), 7)}

欧州では、ウォータージェット技術は、橋梁、トンネル、ダムや原子力発電所などのコンクリート構造物全般の補修・

(1) ##Izumi Tanikura and Kazuhisa Shidara (Japan Construction Method and Machinery Research Institute, Japan Construction Mechanization Association, Fuji 417-0801, Japan)#

(2) Yasushi kamihigashi and Syoji Nojima (Expressway#Research Institute of Japan Highway Public Corporation, Machida 194-8508, Japan)

補強工事に広く利用されている。特に、コンクリート構造物のはつり処理にはウォータージェット工法が標準となっている国も多く見られる。 #

スイスでは、ブレーカによる施工を全面的に禁止しており、ロボットまたは人力把持によるウォータージェット工法を適用箇所ごとに使い分けて施工することとしている。イギリスにおいても簡易な補修はウォータージェットとショットクリートが基本とされている。スウェーデンやノルウェーでは、ウォータージェット工法の施工機械と技術者の認定制度（写真1，図1：認定試験用供試体）が確立されており，ここで紹介する性能試験においても，スウェーデンを訪問して調査した手法が参考になっている。 #

#

#

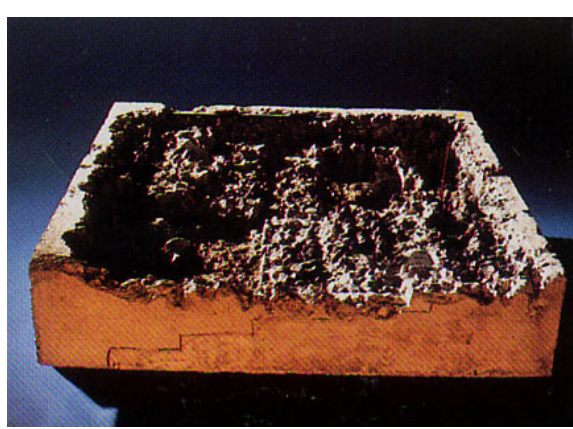
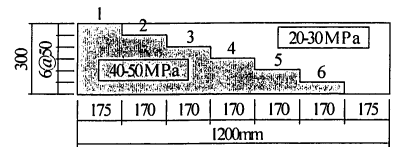
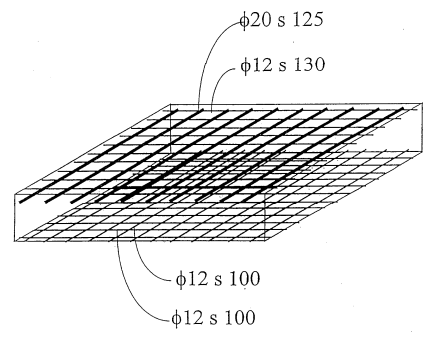
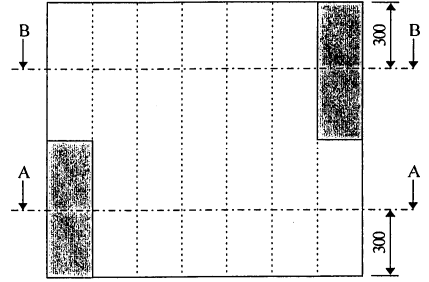


写真1 認定試験後の試験体
（スウェーデン方式）

Reinforcement



断面図



平面図

図1 スウェーデンにおけるW J 工法#
評価用供試体#

#

欧州におけるウォータージェットの利用状況を要約すると，比較的径の大きなノズルを備えた揺動式のロボットが多く用いられている他，端部処理等ではハンドガンも利用されている。実施工においては，はつり性能や経済性を考慮し，目的に応じて図2に示すような範囲で水量や水圧を調整している。同図における Hydrodemolition 領域がコンクリートのはつり領域として示されている。 #

#

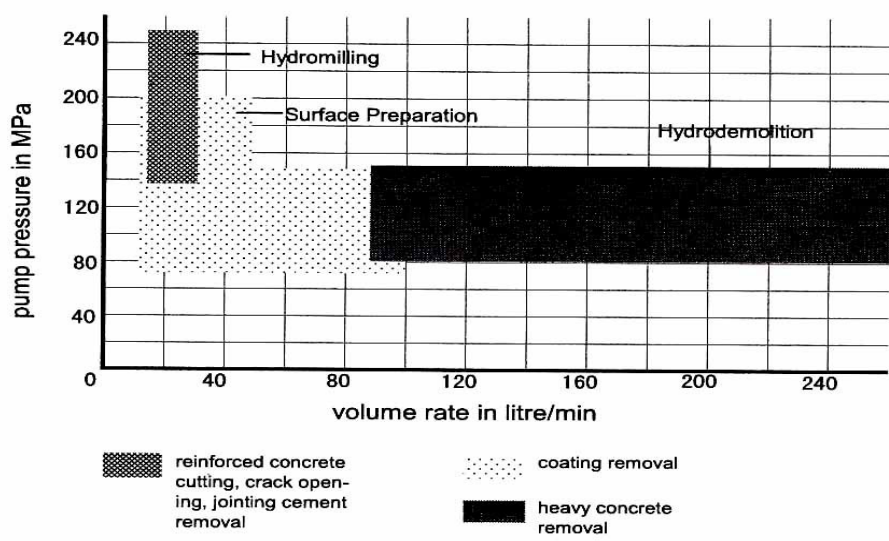


図2 Hydrodemolition の適用範囲#

また、スウェーデンを例にとってみると、これまで一般に、コンクリートのはつりには、機械式はつり（Mechanical removal）のひとつであるジャックハンマー（ブレーカ）が使用されてきた。この方法は、比較的安価な費用で作業員を選ばずに簡便に作業することが可能であるが、騒音、粉塵、鉄筋への損傷、健全なコンクリートへ及ぼすダメージ等の問題を有している。そのため、スウェーデンでは早くより補修基準（Bridge code 88）⁸⁾を定め、はつり工具の使用制限をしている。コンクリート構造物のはつりについては、はつり工具を重量、軽量、超軽量の3つに分類し、ブレーカの使用は禁止し、超軽量工具とウォータージェットとの併用は許容することとしている。また、補修の目的として、高品質な補修を行うこと、補修後の橋の寿命を延ばすこと、優れたコンクリート構造物を維持させることなどが明記されており、ウォータージェットによるはつり作業のみがその目的を満たすことができると記述されている。そして、コンクリート構造物をはつる場合にウォータージェットを適用した場合の利点として次の点を挙げている。①適度な凹凸を有し、清浄な表面が残る。②コンクリート面にはマイクロクラックが発生しない。③鉄筋にダメージを与えず、錆も除去される。④ウォータージェットが適切に使用されれば劣化コンクリートのみがはつられ健全なコンクリートは残る。⑤高圧水により、緩んでいる骨材が除去される。#

また、はつり後の新旧コンクリート間の付着性状に影響を及ぼす重要な因子として、①表面の洗浄性（クリーニング）、②マイクロクラックの有無、③レイトランスの存在、④締固め、⑤養生を挙げている。このうち、最初の3つの因子については、適切なウォータージェット処理の実施により問題を生じることもなく確実な施工が可能であり、さらに適切な締固めと養生により十分な付着強度が得られることが記されている。#

我が国におけるウォータージェット工法による補修は、現時点では機械の台数とオペレータの数が少ないほか、短期的には現状のブレーカなどの在来工法に比較して施工費用が高価となる傾向にあるが、長期的に見ると健全な処理面と高い付着力の確保により、耐久性の高い補修も可能になるものと考えられる。

#

3. 我が国における試験方法#

はつり処理性能試験では、受験するオペレータがウォータージェットはつり装置の動作やはつり条件をプログラミングし、図3に示す性能試験用の供試体を完全自動操作によってはつり処理し、処理後のコンクリートが所定の形状になっているかどうかを評価して証明することとなっている⁹⁾。#

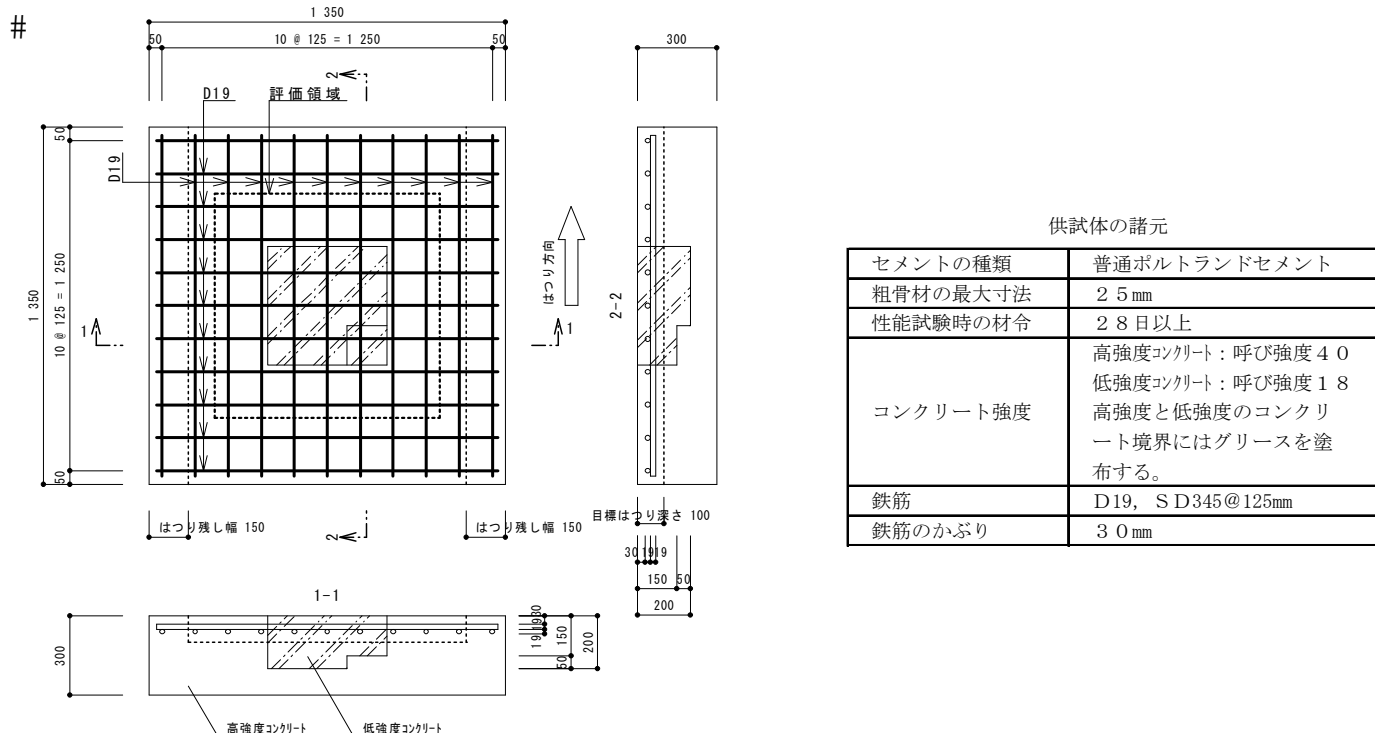


図3 日本における試験供試体（JH方式）#

#

具体的な内容は次のとおりである。#

(1) 試験供試体#

試験供試体は、健全部と脆弱部を再現した高強度コンクリートおよび低強度コンクリートで構成された鉄筋コンクリート供試体である。コンクリート強度は高強度部が呼び強度 40、低強度部が呼び強度 18 とし、高・低強度コンクリートの強度差が $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上となるようにしている。模擬ひび割れに対するウォータージェットの水くさび効果を確認するため、高強度コンクリートと低強度コンクリートの境界面にはグリースを薄く塗布している。鉄筋仕様は、J Hにおける床版の標準設計の代表的なものとして、鉄筋径が D19、ピッチが 125mm の格子配置で、かぶり厚は 30mm としている。#

また、各試験毎に供試体の製作に用いるレディーミクストコンクリート工場を変え、骨材やコンクリート配合は異なるものとしている。#

(2) はつり処理の方法#

ウォータージェット機械によるはつりは、供試体を水平に定置した状態で、下向きにはつり処理し、進行方向は一定方向としている。また、処理範囲が確実に限定できることを確認するため、はつり装置の進行方向に対して試験供試体の両サイド端部を 150mm 程度残す必要がある。さらに、完全自動操作により設定した処理範囲全面を 1 回処理することを 1 掃行と呼ぶこととし、はつり試験では 3 回以内の掃行で処理を終えなければならない。1 回の掃行中、ウォータージェット機械の制御因子（水圧、水量、スタンドオフ等）は変えてはならず、ただし、各掃行ごとには制御因子を変更してもよい。なお、各掃行後には処理面の清掃（はつりガラ）の除去を行うことができる。#

(3) 評価方法#

本試験を終えた試験体は、鉄筋を切断除去した後、レーザー変位計による形状測定を代表測線 8 断面で行い、試験体中央部 $850\times 850\text{mm}$ の評価領域において、表 1 に示す評価項目について所定の評価基準に従って評価することとしている。#

表 1 はつり処理面の評価基準#

評価項目#		評価基準#	確認方法#
セ レ ク テ ィ ビ テ ィ #	端部の# はつり残し#	両端部は 150mm 程度はつり残す $\pm 50\pm 25\text{mm}$ #	スケール#
	適正度#	選択的除去率が低強度部 60% 以上# 高強度部 30% 以下#	レーザー変位計に# よる形状測定#
	ピット#	ピットの数 3 個まで可# ピットの定義：直径 32mm 以下、# 深さ 48mm 以上の穴#	ノギス#
平 坦 度 #	鉄筋裏の# はつり残し#	鉄筋に到達するような鉄筋裏側のはつり残しはあ ってはならない#	目視#
	うね#	高さ 35mm 以上のうね（不陸）の総延長が# 900mm 以下#	スケール#
	表面粗さ#	62.5mm ピッチ（鉄筋間隔の 1/2）の区間での高低 差が 7p p 以上#	レーザー変位計に# よる形状測定#
	はつり深さ#	目標はつり深さ 10cm に対して $\pm 2\text{cm}$ #	レーザー変位計に# よる形状測定#

評価に当たっては、試験体のコンクリート形状が以下の 2 点の性能を満足しているかどうかを確認する。#

① セレクティビティ：周辺に悪影響を与えず、脆弱な部分（低強度部）をはつり取る性能#

② 平坦度：鉄筋の有無にかかわらず、目的のはつり深さまではほぼ平坦にはつり取る性能#

上記①は劣化損傷部を模擬的に表している低強度部をはつりとれるかどうかという選択的はつり性能を評価するも

のである。②は塩分が含浸していると想定した深さ 10cm 程度まで、ほぼ均一な面に仕上げられるかどうかを評価するものである。#

セレクトィビティおよび平坦度についての合否判定は、それぞれに対する評価項目のすべてが評価基準を満たしている場合に合格とし、受験した装置に対して、図4に示す領域Ⅰ～Ⅳの判定により性能を分類している。#

#

4. 試験結果#

性能試験はこれまでに全 12 ケースを実施した。その際に使用されたウォータージェットはつり装置等の一例を写真2～6に示す。また、はつり後の形状写真と断面形状を図5に、性能試験結果一覧を表2に示し、以下に説明する。#

#

#

#

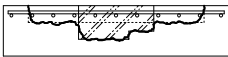
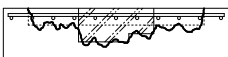
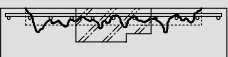
評価基準		セレクトィビティ	
		合格	不合格
平坦度	合格	〔領域Ⅰ〕 選択的かつ平坦なはつり 	〔領域Ⅱ〕 選択的にははつれないが、平坦にはつれる 
	不合格	〔領域Ⅲ〕 平坦にははつれないが、選択的にはつれる 	〔領域Ⅳ〕 選択的にはつれず、平坦にもはつれない → 適用不可 

図4 はつり処理性能の判定#

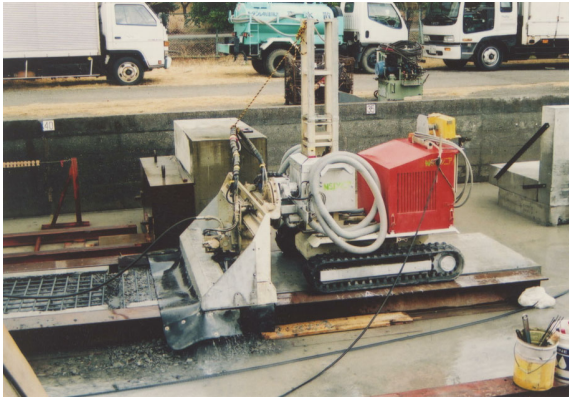


写真2 揺動式ロボットタイプ (重量 1.8tf)

#

#



写真3 揺動式ロボットタイプ (重量 2.4tf)
(ノズルはブームの先端に取付け)

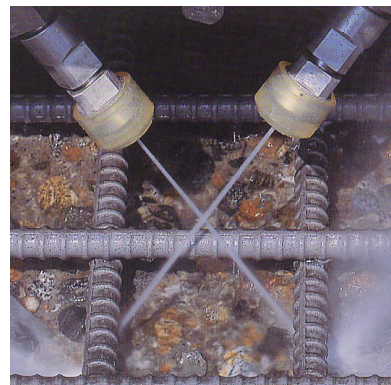
#

#



写真4 高圧ブランジャーポンプ搭載はつりユニット#
(最大圧力 100MPa、最大水量#170 ℓ/分) #

#



#

#

写真5 フレーム式はつりシステム（旋回式ノズル）#

写真6 旋回式ノズル#

#

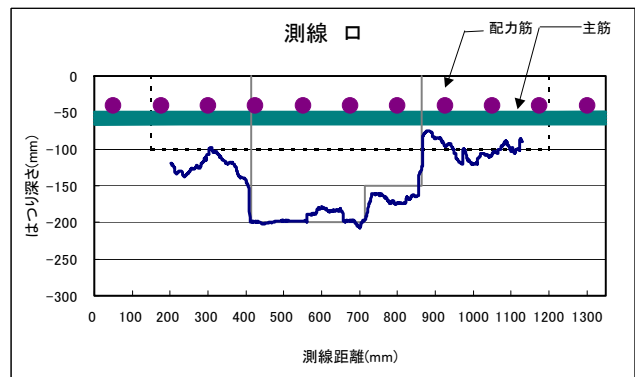
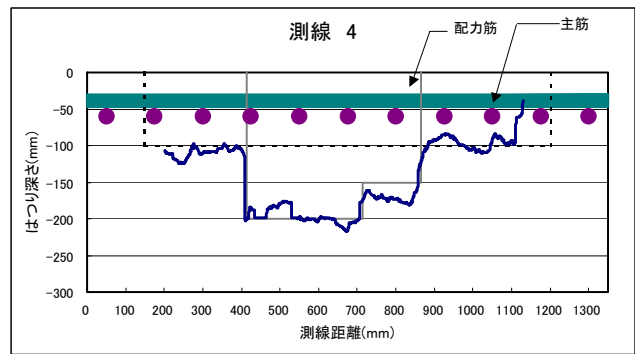
表2 性能試験結果#

項 目		基 準	揺動式 (9ケース)		旋回式 (3ケース)	
水圧 (MPa)		－	50～150			
水量 (ℓ/分)		－	100～200			
スタンドオフ (mm)		－	20～50			
セ レ ク テ ィ ビ テ ィ	端部の はつり残し	150±25mm	○		○	
	適正度 (除去率)	低強度60%以上	70.3～100.0%	○	79.5～86.0%	○
		高強度30%以下	0.7～15.3%		0.4～1.4%	
		ピット	3個以下	○		○
平 坦 度	はつり 残し	鉄筋に接したもの はないこと	○ or ×		○	
	うねの長さ	900mm以下	○ 0～563mm		○ 0mm	
	表面粗さ	62.5mmピッチで 7mm以上の差	○ 7.2～10.4mm		○ 7.3～8.3mm	
	はつり深さ	10±2cm	○ 9.5～11.3cm		○ 9.6～10.6cm	
評 価		セレクトィビティ	○		○	
		平坦度	○ or ×		○	
		判 定	領域Ⅰ or Ⅲ		領域Ⅰ	

#

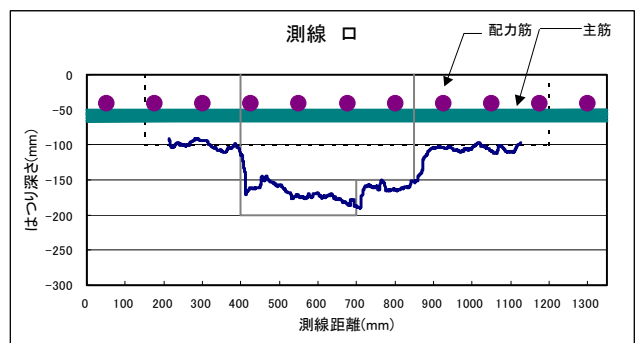
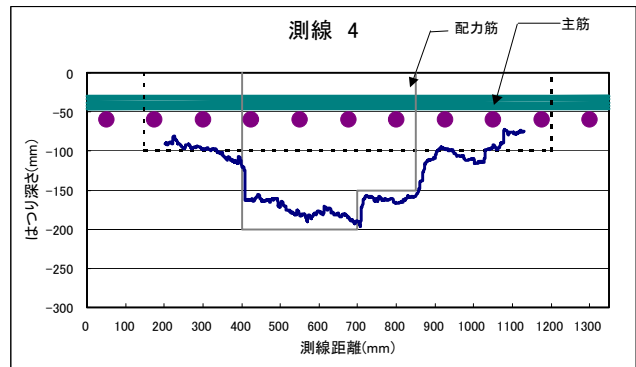
(1) ウォータージェットはつり処理装置の種類#

試験に用いられたウォータージェットはつり装置は、ロボット式（10 ケース）とフレーム式（2 ケース）の2 種類であった。ロボット式は、ノズルをベースマシンのブームの先端に取り付け、天井、床面、壁面を自在にはつることができる機能を備えている。フレーム式はセットした面に平行な面のみ処理が可能であるが、構造物や足場の状況に応じて#



ケース 1 揺動式（低水圧大水量）

#



ケース 2 旋回式（低水圧大水量：衝突噴流）

図5 はつり処理後の供試体の形状#

現場の作業環境に合わせた柔軟な施工も可能となる。また、ノズル形式は揺動式（9 ケース）と旋回式（3 ケース）に大別され、旋回式では2本のノズルから出す水噴流を衝突させて深さ制御が行えるものも見られた。#

（2）はつりの条件設定

はつり時のウォータージェット制御条件については、圧力は概ね50～150MPa程度で、流量は100～200ℓ/分程度の低圧大水量タイプがほとんどである。これは欧州から導入したはつりロボットが多く使われていたことによると思われる。また、はつり時の掃行回数は2回～3回で、1掃行当たりのパス数は1～3パスであり、スタンドオフは20～50mmと様々である。###

（3）はつり性能#

図5の断面形状と表2の性能試験結果を見ると、ウォータージェット工法によるはつり処理は、ノズルのタイプによって処理面の形状が異なっており、以下の傾向が見られた。#

① セレクティビティに関する性能#

揺動式、旋回式ともに、端部のはつり残し、適正度（除去率）、ピットの基準に対して良好な結果が得られた。このうち、各種の機械とオペレータによるはつり後の高・低強度コンクリートの除去率の値を図6にプロットした。同図から、揺動式、旋回式のいずれの場合も、選択的はつり性能は合格レベルに達している。旋回式のはつりについては、最大深さ20φまでの低強度部の除去率は最大86%であり、その直下の高強度部までには達していないケースがほとんどであるのに対し、揺動式は高強度部の除去率が15%にまで至っているが、はつり範囲が高・低強度部の境界まで到達している（低強度部を100%除去）ケースも見られた。このことから、揺動式は選択的はつりに対して有効であり、なおかつ、脆弱部が深い場合には有利となりえることも推定される。#

② 平坦度に関する性能#

旋回式は、はつり残しや平均はつり深さなどの評価基準を全て満足した結果となった。一方、揺動式は鉄筋下のはつり残しが生じたケースと、高さ35mm以上のうねが残ったケースが全9ケース中で2ケース見られた。このことから、試験ケースはまだ少ないが、旋回式は揺動式に比べると平均的な深さ制御のはつり性能に優れる性能が見られた。#

（4）はつりに工夫を要する点#

試験結果の可否に関して非常に微妙な判断を必要としたのが、平坦度を評価する際のはつり残しであった。はつり試験終了後のコンクリートの一部が鉄筋に少しでも接していれば不合格とするものであるが、評価領域の鉄筋をガス切断・除去した際、コンクリート表面に鉄筋の形状が残らないように水処理ができていれば合格とした。コンクリート表面から下側鉄筋の下端までは約7cmであり、はつりの平均深さはさらにその下5cmの合計12cmの深さまで許容されるため、はつり過ぎない範囲でうねを残さないはつり方を工夫すればはつり残しの心配は少なくなる。各掃行におけるはつり深さの設定とともに、この点が合格する上で最もノウハウを要する点でもある。#

これら一連の試験により、ウォータージェットをコンクリートのはつり処理に適用する場合、ノズルの種類、水圧、水量、スタンドオフなどの違いが、処理面の形状に大きく影響することが明らかとなった。特に当初、非常に密に配筋されたJH仕様の供試体において、鉄筋背面のコンクリート除去は非常に困難であることが推測されていたが、ノズルのランス角、振り角、揺動のピッチ、装置の移動速度など、多くのパラメータの適切な条件設定がそれを可能とすることを裏付けることができたと考える。#

なお、スウェーデン基準による評価試験において、CONJET社が合格した際のはつり設定条件（揺動式）を参考までに表3に示す。#

#

5. まとめ#

- （1）ロボット式、フレーム式によるはつり性能の差はほとんど見られなかった。ただし、フレームは十分な剛性を保持したものである必要がある。#
- （2）揺動式および旋回式ともに、はつり性能に大きな差は認められなかった。ただし、これまでに実施した試験結果によると、揺動式はセレクティビティに対する性能が、旋回式は平坦度に対する性能が若干優れているケースが見受けられた。#
- （3）各社各様のはつり装置およびはつり条件の設定であったが、異なった条件で製作した供試体に対し、適切な条件設定を行うことにより、基準値を合格するはつりが可能である。#

表3 スウェーデンの認定試験に合格した際の#
W J はつり設定条件の一例#

項 目	CONJET社 (揺動式)
噴射圧力 (bar)	610
ノズル径 (mm)	3.5
噴射流量 (リットル／分)	178
ノズル移動速度 (m／分)	4.5
揺動回数 (回／分)	180
ステップ幅 (mm)	25～30
ロボット進行速度 (cm／分)	12.6
m ² 当たり はつり時間 (分)	24
はつり回数	3
スタンドオフ (mm)	15～20

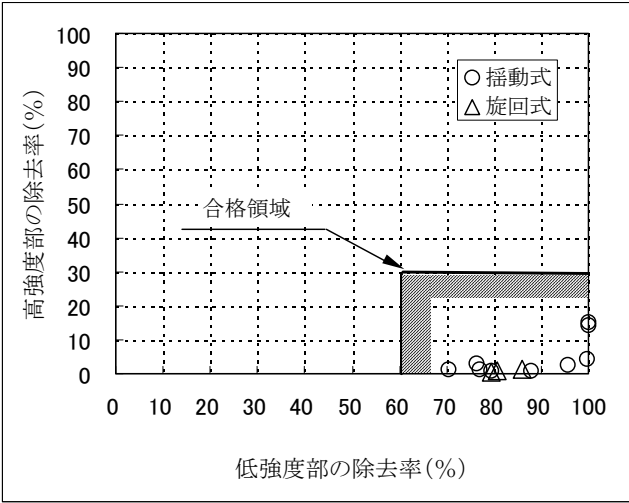


図6 高・低強度コンクリートの除去率#

6. 今後の課題#

今後の実構造物に対する確実で安全な補修・補強工事に向けては、さらに検討すべき次のような課題が残されている。#

(1) はつりが容易に行えない箇所処理#

揺動式の機械の場合、鉄筋下のはつり残しや過大なうねが残ったケースが見られたが、このはつり残しに対する処置としては、ハンドガン式のウォータージェットや小型軽量電動ピックの使用が考えられる。特に、D32 などの太径の鉄筋が密に配置されているコンクリート構造物に対するはつり方については工夫が必要である。さらにロボット等がアプローチできない狭隘な箇所に対してもハンドガン等は有効な手法になると考えられる。#

(2) はつり時の構造物の挙動予測、対策#

P C 桁などのコンクリート構造物の補修・補強工事においてはつりを行う場合、P C 鋼材の緊張によりコンクリートには非常に大きな圧縮力が導入されているため、はつりによって断面が減少したケースについて予備解析等の検討が必要である。解析結果に応じ、必要であればバントを設置して支持点を設けたり、はつり位置・順序を考慮し、損傷の種類に応じて適切な条件ではつり処理を行う必要がある。#

(3) 断面修復の方法#

ウォータージェットではつった後の断面修復の方法としては、吹付けコンクリート、高流動コンクリート打設等による施工が考えられるが、橋梁等のコンクリート構造物に対する吹付けコンクリート材料等の評価基準がまだ十分に整備されていないため、早急に断面を修復する手法を整える必要がある。#

7. おわりに#

ウォータージェットはつり処理性能試験の結果、劣化したコンクリート構造物のはつり処理に対する我が国のウォータージェット技術は、十分適用できるレベルにまで達してきていることが明らかとなった。今回の一連の試験では、選定ノズル、水量、水圧等の制御条件がある程度限られたものとなっているが、今後は、経済性、安全性、環境条件等を考慮し、施工速度、騒音対策、水処理等を踏まえた合理的で効率の良いはつり装置の開発が待たれる。

また、コンクリート構造物の補修・補強のニーズは今後ますます増加すると思われるが、欧米と比べてわが国においてはウォータージェットはつり装置の保有台数やオペレータの数が著しく不足している。さらに、はつり後の吹付けコンクリート等による断面修復技術の確立が望まれるところである。今回紹介したような性能試験を通じて、安全で確実

なはつり処理が可能な施工機械が数多く普及し、補修・補強に対する的確な判断と質の高いはつり処理が行えるエンジニアリング能力を備えた優秀な技術者が数多く現場に送り出されることが期待される。

現時点（平成13年12月）では、すでに7社（オペレータ12名）がこの性能試験を受験して合格しており、引き続き試験を継続していく予定である。

#

〔参考文献〕 #

#

- 1) 出雲淳一，谷倉 泉，上阪康雄：欧州における補修・補強技術最新事情 —2000 年欧州土木構造物補修・補強調査から—，Re+tech，平成13年3月，vol. 5，pp. 22～28###
- 2) 岡井賢一・森山 守・登坂知平・小澤郁夫：塩害を受けた橋りょう上部工の全面修復—北陸自動車道#手取川橋—，コンクリート工学，Vol. 34，No. 2 ， pp. 33～40（1996. 2） #
- 3) 八尋暉夫．最新ウォータージェット工法．鹿島出版会，1996#
- 4) ウォータージェット施工マニュアル，日本道路公団 技術部構造技術課，平成12年6月
- 5) 98 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 建設機械化研究所，平成10年12月
- 6) 99 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 建設機械化研究所，平成12年2月
- 7) 00 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 建設機械化研究所，平成13年3月
- 8) Bridge code 88 ， 7. MAINTENANCE, REPAIR AND STRENGTHENING, Swedish National Road Administration, Road and Bridge Design Department Bridge Technology Section, 1988年12月#
- 9) 紫桃孝一郎・上東 泰・野島昭二・吉田 敦：ウォータージェット技術を利用した新旧コンクリート構造物の一体化処理，コンクリート工学，Vol38，No. 8 ， pp. 40～54（2000. 8） #

#