

報告 港湾構造物の塩害劣化補修工事へのウォータージェットの適用

村松 道雄*¹・羽瀧 貴士*¹・金田 聡*²・関 晃一*³

要旨：ウォータージェットは、コンクリート構造物の健全な部分に損傷を与えることなくはつり取る手段として注目されている。この技術の基本特性を事前に陸上で供試体を使用して確認し、実際に港湾構造物の補修工事に採用した。本文は、採用したウォータージェット工法のシステムの内容、コンクリートはつり工の効率・出来形、さらに使用水の処理方法について報告するものである。

キーワード：ウォータージェット、コンクリートはつり工、栈橋構造物、劣化補修工事

1. はじめに

塩害劣化に対する補修工事として断面修復工法を適用する場合、既に塩化物が多量に含まれているコンクリートは全て取り除くことが基本とされている。一般にコンクリートをはつり取る作業は、圧搾空気を使用するコンクリートブレーカー等により行われているが、近年、コンクリート構造物の健全な部分にまでマイクロクラックを発生させることが分かってきた^{1), 2)}。また、環境問題への取組みから振動、騒音への配慮が求められているうえ、部材底面に対する作業は姿勢が悪く施工効率低下も避けられない。

そこで、コンクリート健全部に損傷を与えずにはつり取ることができ、ロボット化された手段としてウォータージェット（以下、WJ）によるはつり技術が注目されてきている³⁾。すでに採用事例も多数あるが、港湾RC構造物の劣化補修工事に適用されている事例は少ない⁴⁾。

今回WJ工法を適用した栈橋構造物では、一般にコンクリートへの塩化物イオンの浸透が多く鉄筋かぶりも大きいためにはつり深さが大きくなる場合が多く、海洋環境での施工ではWJの使用水の適切な処理が厳しく求められるという特殊性がある。そこで今回は、WJ工法の基

本特性を確認するため事前に陸上で供試体実験を行い、その結果をもとにLNG受け入れ栈橋の塩害劣化対策にWJ工法を適用した。

2. 事前実験内容

事前実験に使用した供試体は、図-1に示すように補修対象構造物を想定して作成した梁・スラブ構造を有するT型供試体であり、梁底面が足場からの高さ1.0mのレベルになるように設置した。事前実験時のコンクリート圧縮強度は20.8N/mm²程度であった。

使用した機械は、表-1に示す揺動式高圧型

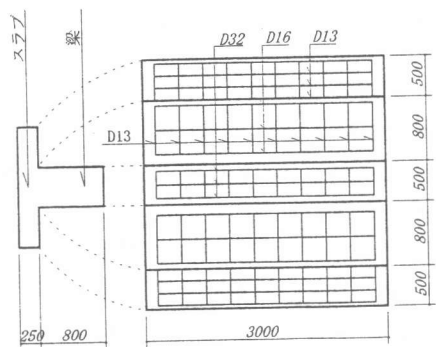


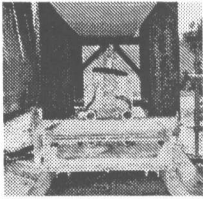
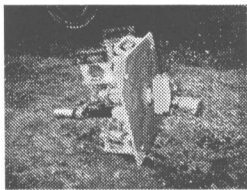
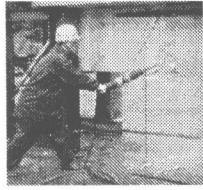
図-1 事前実験供試体

*1 東亜建設工業(株)技術研究所材料・構造研究室研究員（正会員）

*2 東亜建設工業(株)千葉支店袖ヶ浦作業所

*3 東京ガス(株)袖ヶ浦工場施設部LNG機械グループ

表－１ 使用機械の外観

名称	ロボットA(揺動式)	ロボットB(旋回式)	コンクリートブレーカー
装置外観			

表－２ WJロボットの基本仕様

名 称	ロボットA	ロボットB
型 式	揺動式	旋回式
最大圧力(MPa)	100	250
最大水量(L/min)	190	30
ノズルチップ(mm)	3(可変)	1(可変)
ノズルヘッド重量(kg)	90	40
寸法(L×W×H,mm)	2480×1050×1590	1145×150×220
スタンドオフ	300mm以下	20～30mmを確保
ポンプ	10t車搭載	8t車搭載
原動力	油圧駆動	エア駆動

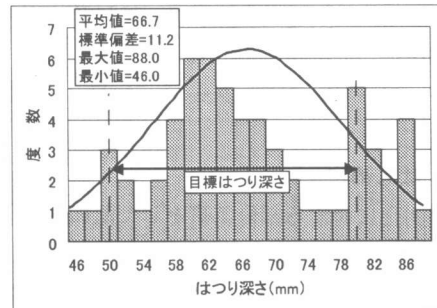
(ロボットA)と旋回式超高圧型(ロボットB)の型式の異なるWJロボット2種類である。ロボットの基本仕様を表－２に示す。また比較としてコンクリートブレーカー(重量 20.0kg, 機長 555mm, シャンク寸法 $\phi 30 \times 87\text{mm}$, 圧気消費量 $1.4\text{m}^3/\text{min}$)を使用した人力はつりも行った。

目標としたはつり深さは鉄筋が露出する程度とし、梁側面においてスターラップのかぶり厚さが約 50mm, 主筋裏において約 80mm であるため、50mm～80mm とした。

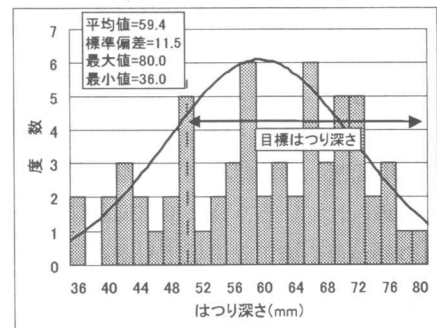
3. 事前実験結果

はつり面の状態は、櫛状の「型どりゲージ」を使用してはつり深さを測定し、側面の 200mm 間隔の 2 測線に対して、10mm 間隔で深さを求め、度数分布をとり標準偏差を算出した。測定結果を図－２～図－４に示す。

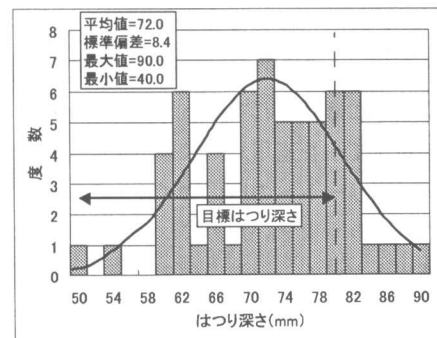
目標はつり深さに対して、ロボットAでは目標はつり深さの範囲を超えて若干深いところと浅いところが見られるが、平均値が 66.7mm であり目標深さ中心に近い値であった。それに比較して、ロボットBでは平均値が 59.4mm であり若干浅めに仕上がっていること、コンクリートブレーカーによる平均値は 72.0mm であり若



図－２ ロボットAによるはつり精度



図－３ ロボットBによるはつり精度



図－４ コンクリートブレーカーによるはつり精度

干深めにはつり取られていることが分かる。

はつり精度として標準偏差及びはつり深さの

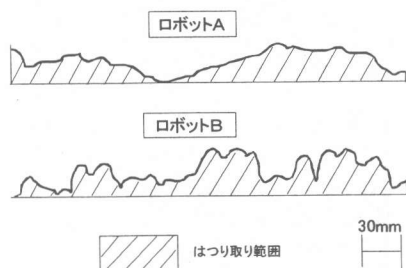


図-5 処理後の表面状態

(最大値-最小値)を比較すると、ロボットA、Bで大きな差はなかった。しかし表面形状の平坦度に関して、測線上の凹凸数が少ないほど平坦度が高いと考えると、図-5に示す型どりゲージによる測定結果のように、ロボットAの表面状態に比較してロボットBの方は凹凸数が多く平坦度が低かった。ロボットAでは使用水量が多く破壊力(圧力×水量に依存する)が大きいため、はつり取られたコンクリート片が大きくなったのに対して、ロボットBでは使用水量が少なく破壊力が小さいために、はつり片が小さくノロ状になっていた。よって、ロボットBではモルタル分のみが除去されて粗骨材が取り残された状態となったことが平坦度を低くしていると考えられる。

それに比較してコンクリートブレーカーによるはつり精度は、標準偏差が8.4mmと小さくばらつきが少ないうえ平坦度が高かった。これは作業員が目で見ながら作業を行うことで微調整が可能なためと考えられる。しかし、表面に浮きやひび割れが目視によって確認された。

また施工効率については、ロボットAは0.21~0.24m³/hr、ロボットBは0.016~0.023m³/hrであり、破壊力の差が効率に反映されたと考えられる。なお、コンクリートブレーカーによる場合、0.108m³/hr・人であった。

以上の実験結果より、ロボットAを採用した。さらに鉄筋裏側に残存する凹凸の除去を試みたが、全てを除去するのは困難であることが確認されたため、実施工では鉄筋露出までをWJ工法で速やかにはつり取った後に、チップングハ

ンマー(重量5.5kg、機長340mm、シャンク寸法φ17.5×60mm、圧気消費量0.4m³/min)による仕上げを行う方法を採用することとした。

4. 補修工事実績

4.1 工事概要

補修工事の対象構造物は、護岸から300mほど沖合に位置する、LNG受け入れ栈橋プラットフォームである。補修箇所は過去の調査結果より最も劣化の著しい着船側前面であった。

WJ工法による施工は、人力はつりでは効率低下する梁底面及びスラブ底面の計51m²に

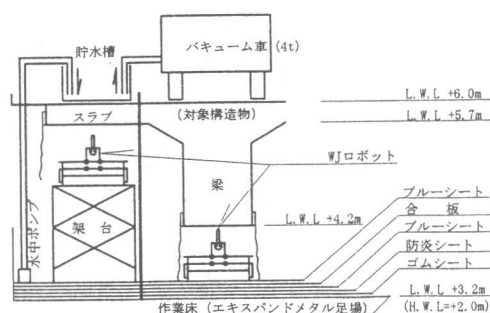


図-6 施工状況断面図

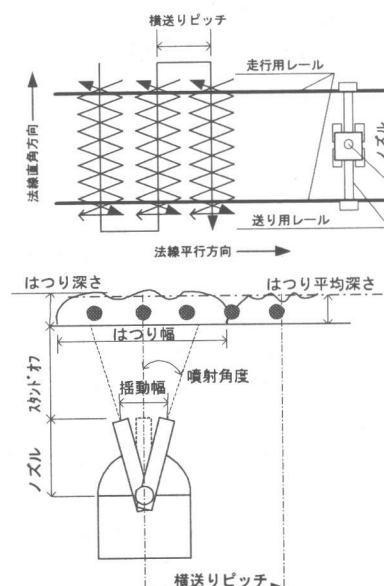


図-7 WJロボット動作状況

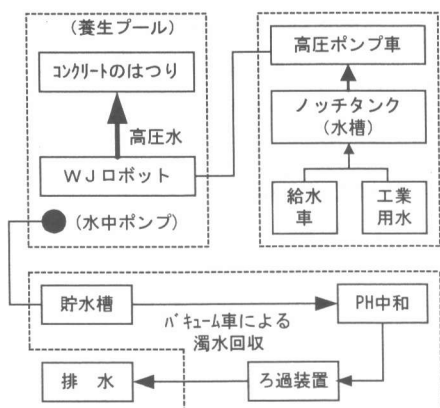


図-8 WJ工法システム

採用した。対象構造物のコンクリートのかぶり厚さにばらつきがあるが、最終的なはつり深さは鉄筋の裏側 10～35mm までを目標とした。そのうちWJ工法では鉄筋の表面を露出させる程度から鉄筋裏 35mm までを目標とし、梁底面で 120～185mm、スラブ底面で 40～95mm として、除去しきれない箇所はチッピングハンマーで仕上げはつりを行うこととした。なお、梁側面と一部の異形部の梁底面は、事前実験と同様のコンクリートブレーカーを用いて施工した。

作業状況図を図-6に、ロボット動作状況を図-7に、WJ工法システムを図-8に示す。

4.2 施工要領

(1) コンクリートはつり工

主な使用機械は、事前実験で使用した高圧ポンプ(最大吐出圧 100MPa, 最大流量 190 $\frac{\text{L}}{\text{min}}$) 及びノズルユニットと車輪が一体となりレール上を移動できる小型WJロボットである。本ロボットは、各設定後はプログラム制御による自動走行となり、オペレーターは始動と停止を遠隔操作することになる。

はつり作業状況を写真-1及び写真-2に示す。構造物に対応した長さ 1.5m の走行用レールを製作し、スラブ底面に対してはレベル調整して組み立てた架台上に、梁底面に対しては作業床上にそれぞれ設置して作業を行った。WJロボットは、図-7に示すように左右にノズルを振りながら進み、コンクリート面を帯状には



写真-1 梁底面はつり状況

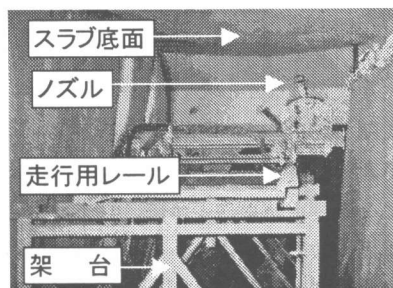


写真-2 スラブ底面はつり状況

表-3 実施工時WJ設定

設定項目	梁底面	スラブ底面
圧力 (MPa)	75	
吐水量 ($\frac{\text{L}}{\text{min}}$)	150	
スタンドオフ (mm)	50	200
ノズル揺動幅 (mm)	40	
ノズル揺動数 (回/分)	180	
送り速さ (m/分)	6.0	
パス数 (回)	2	

つり取っていく。

目標はつり深さを確保するため、施工初めにスタンドオフ（ノズルとコンクリートの離間距離）、ノズルの揺動数、ノズルの送り速さ、パス数（同一ラインにおける送り用レール上走行回数）の調整を行った。コンクリートの圧縮強度や劣化度等により、ひとつの構造物中においても場所によってコンクリートの質が異なる。よって、同じ設定で均一にはつり取ることができないため、対象部材に適した設定とすることが必要である。設定の詳細を表-3に示す。梁部材とスラブ部材に対するスタンドオフは、梁底面に対しては 50mm、スラブ底面に対しては 200mm と設定を変えて行った。なお、はつり取ったコンクリートの圧縮強度は、梁下面で

63.0N/mm²,スラブ下面で60.0N/mm²であった。

(2) 排水処理工

梁底面から作業床(エキスパンドメタル足場)まで1.0mと限られたスペース内での作業であるため、はつり後の水は栈橋外に搬出するシステムとした。海上汚濁を発生させないため図-6に示すように足場上にゴムシート、防災シート、合板、ブルーシートを敷きプール状に徹底した養生を行い、ここからプラットフォーム上の貯水槽に汲み上げた。そして、貯水槽内の水はバキューム車を使用して栈橋上から搬出し、処理設備として設置した中和処理タンク及びろ過装置にて処理を行った。排水基準値内であることを確認後排出し、一方養生プール内の残材は回収し産業廃棄物処分とした。

4.3 施工結果

WJ工法によるはつり工は、ロボット1台に対して4人(操作員1人+作業員3人)の構成で行った。WJによるはつり処理後の表面状態を写真-3に示す。鉄筋の裏側は完全にはつり取れず、部分的に凹凸を残す状態であった。

はつり後の表面出来形を「型どりゲージ」により測定し、事前実験同様に10mm間隔で深さを求めた。梁1本に対して2測線の計測結果を図-9に、スラブ1面に対して3測線の計測結果を図-10に、統計数量をまとめたものを表-4に示す。はつり深さの平均値が目標はつり深さ範囲に入っていることが確認でき、過剰に深い場所のない仕上がりとする事ができた。

はつり精度として標準偏差を比較すると、梁底面の15.7mmに対してスラブ底面では13.0mmであり、ばらつきが小さく精度が高かった。また、スタンドオフ以外を同じ設定とした場合はつり深さが梁では平均124mm、スラブでは平均53.8mmとなったので、スタンドオフがはつり深さに影響を及ぼすことが明確である。よって、使用機械や施工条件に応じたスタンドオフを確認する事が重要であり、その後送り速さ等を微調整することで、平坦度の高い処理面が得られると考えられる。なお、目視観察

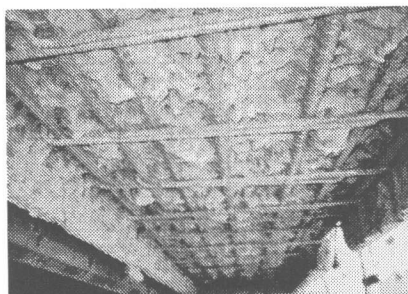


写真-3 梁底面はつり処理面

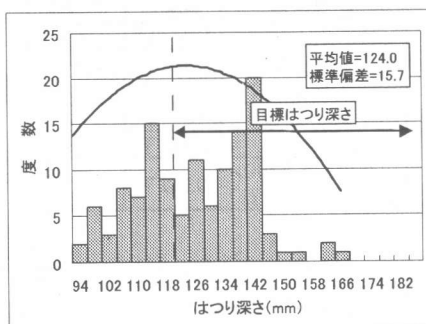


図-9 梁底面はつり精度

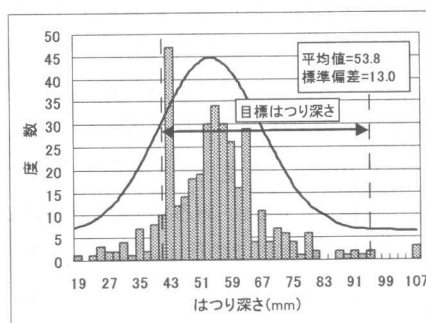


図-10 スラブ底面はつり精度

表-4 はつり精度結果一覧

設定項目	梁底面	スラブ底面
標本数(個)	124	372
平均値(mm)	124.0	53.8
標準偏差(mm)	15.7	13.0
最大値(mm)	166.0	107.0
最小値(mm)	94.0	19.0
(最大-最小)(mm)	72.0	88.0

では、事前実験と同様に人力はつりのはつり精度が最も良好であった。

施工効率を表-5に示す。施工時間には養生、廃材処理、配置換え等の時間を含んでいる。WJロボットの施工効率は梁底面で約0.079m³/hr、

表－５ 施工効率

施工方法	部位	施工効率
ウォータージェット	梁底面	0.079(m ³ /hr)
	スラブ底面	0.013(m ³ /hr)
コンクリートブレーカー	梁底面	0.037(m ³ /hr)
	梁側面	0.049(m ³ /hr)
チッピングハンマー※	底面	0.021(m ³ /hr)

※チッピングハンマーは全面仕上げに使用した

表－６ 水質検査結果

管理項目	基準値	測定値
PH	6.6～8.5	7.9
SS(mg/ℓ)	19以下	3.4
COD(mg/ℓ)	9.5以下	4.2
窒素(mg/ℓ)	19以下	1.2
磷(mg/ℓ)	2.8以下	0.1
ホルマンヘキサン抽出物質(mg/ℓ)	0.9以下	0.1

スラブ底面で約 0.013m³/hr であった。梁部材に比較してスラブ部材の施工では、架台の組立てやレベル調節の時間も必要のために施工効率が大幅に低下した。ただし、コンクリートブレーカーによる施工効率約 0.037m³/hr と比較すると、梁底面のように配置換え等が容易な箇所では、W J 工法の施工効率が良好であった。また、チッピングハンマーを使用して行った仕上げはつりは、処理面に凹凸があるためにはつり取りやすく、鉄筋の裏側までの仕上げは容易であった。

本工事は、梁・スラブ構造に対する海上吊り足場上での作業であるため、施工面積が比較的小さく、作業スペースが狭い中で行われた。従って、ブロック間の移動にあたっては梁の下を通らなければならない、その都度機器材の解体・設置が伴い時間を要した。更に栈橋は供用中であり、連続運転できない状況も重なって施工条件は非常に厳しかった。

4.4 排水処理

処理量は全体ではつり使用水 110m³、残材 10m³ であった。この使用水は pH=10.2 のアルカリ性であり、これに希硫酸 30kg を添加して中和処理を行い、ろ過装置を 3 回通過させた後に基準値内であることを確認して排水した。排水基準値及び水質検査結果を表－６に示す。

5. おわりに

本検討において以下のことが確認された。

- (1) W J 適用の際には、対象部材と使用機械に応じた適切なスタンドオフを確認することが重要であり、事前に W J ロボットの設定等を確認する試験を行うことが有効であると考えられる。
- (2) W J 工法に使用した水は、回収・搬出し中和処理装置及びろ過装置により適切な処理をすることで排水基準を満たし、W J ロボットの稼働に影響を及ぼすことなく処分することができる。
- (3) 梁底面のように配置換え等の作業が容易な箇所では W J 工法の施工効率が高かったことから、今後、小型・軽量化、設置方法の改良等を進めることで施工効率の改善が可能であると考えられる。

最後に、本報が今後同様の工事へ W J 工法を適用する際の参考となれば幸いである。ここに、本実験にご協力頂いた流域計画(株)、栗田エンジニアリング(株)の皆様に感謝します。

参考文献

- 1) 岡井賢一，森山 守，登坂知平，小澤郁夫：塩害を受けた橋梁上部工の全面修復―北陸自動車道 手取川橋―，コンクリート工学，Vol.34，No.2，pp.33-42，1996.2
- 2) 石村勝則，山口雅人，渡辺浩志，穂崎俊夫：塩害を受けた PC 単純 T げた橋の断面修復―北陸自動車道 大慶寺川橋―，コンクリート工学，Vol.38，No.7，pp.34-40，2000.7
- 3) 紫桃孝一郎ほか：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，Vol.38，No.8，pp.40-54，2000.8
- 4) 村松道雄ほか：ウォータージェットと永久型枠を用いた LNG 受け入れ栈橋の補修，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，V-396，2000.9