

# 耐震補強目粗し処理対応の小型ウォータージェットシステムの開発

土井 暁 沼崎 孝義  
大本 絵利 浜田 耕史

## Development of Separable and Portable High-pressure Water Jet Machine for Roughening Work of Earthquake-resistance Construction

Satoru Doi Takayoshi Numazaki  
Eri Ohmoto Koji Hamada

### Abstract

This paper describes the development of separable and portable water jet system for use during the roughening work of earthquake-resistant construction. Roughening work performed during the construction process of earthquake-resistant renewal works is very noisy and generates vibration, similar to that during operation of conventional power machines such as the pitching machine. However, application of the water jet method lowers the noise and vibration. The separable and portable high-pressure water jet machine employs a rotating nozzle system and rotating measurement device. We introduced the water jet system at construction sites to reduce the generated noise and vibration, without compromising on the high efficiency achieved during construction processes of renewal structures.

### 概要

低騒音低振動で施工可能なウォータージェットの建築リニューアル工事への活用を推進するため、はつり作業が可能な分離式の小型ウォータージェットシステムを開発した。本装置の特徴は、構成機器が分離でき、現場内での搬送・設置が容易であること、ポンプがモータ駆動であり、低騒音で稼働できることなどである。耐震補強工事で有効となる目粗し作業に適用するため、噴射圧力とノズルの送り速度を変化させて目粗し深さを計測したところ、一定の深さで均一に目粗しできた。また、現場での運用を考慮し、平均目粗し深さを現場で簡易に計測する装置を開発した。実現場にて目粗し作業に適用した結果、低騒音低振動で施工できる他、十分な施工効率を有し、必要な目粗し状態の形成が可能であることを確認した。

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物のリニューアル工事や耐震補強工事では、既存のコンクリートの目粗しやはつり、切断、穴あけなどの作業が必要である。コンクリート部材の補修・解体作業には、油圧や空気圧を利用した動力型のピッチングマシンやカッター等が使用されている。しかし、激しい振動や騒音、粉塵が発生するため、はつり作業自体や周囲環境に対する改善・対策が求められている。近年では、従来の施工方法に代わり、超高压のウォータージェットを利用した工法が使用されつつある<sup>1)・2)</sup>。

本研究開発ではウォータージェット（以後、「WJ」と記す。）の長所である高い切削性や品質安定性、またノズルの移動のみで各種の作業に適用できる汎用性に着目し、目粗し処理を含む、はつり作業可能なWJを利用したシステムを開発した。本報では、開発したWJシステムの概要、目粗し処理の作業時に必要となる目粗し状態の精度管理方法、および耐震補強工事における目粗し作業への適用結果について報告する。

## 2. 開発システムの概要

### 2.1 開発の背景

筆者らは、コンクリート表層部除去のために必要な溝を切削する低騒音低振動工具としてのWJシステムを開発し、実用化へ向けて施工現場に適用してきた<sup>1)</sup>。溝の切削に作業を限定したため、出力を必要最小限（17kW）に抑えることができ、従来にない超小型で超高压のWJシステムを実現した。

一方、リニューアル工事では、既存のコンクリートの目粗しやはつり作業が多く、その低騒音低振動化も強く望まれている。これらの作業にWJを利用する場合は、高压水を噴射するノズルを回転させることで実現できる。しかし、はつり作業に適用するためには、より出力を大きくする必要があり、構成する各機器の大型化が必須となる。そこで、小型化とはつり作業を両立するための機器仕様と最適な要素技術を検討した。

### 2.2 システムの仕様

一般的に、建築のリニューアル工事では施工個所が建物の居住者に近接する場合が多い。このため、騒音やノズルの取り回しの問題から、WJシステムを屋外に設置して利用することは難しい。そこで、開発するWJシステムはコンクリートの目粗しやはつりが十分可能な仕様を満

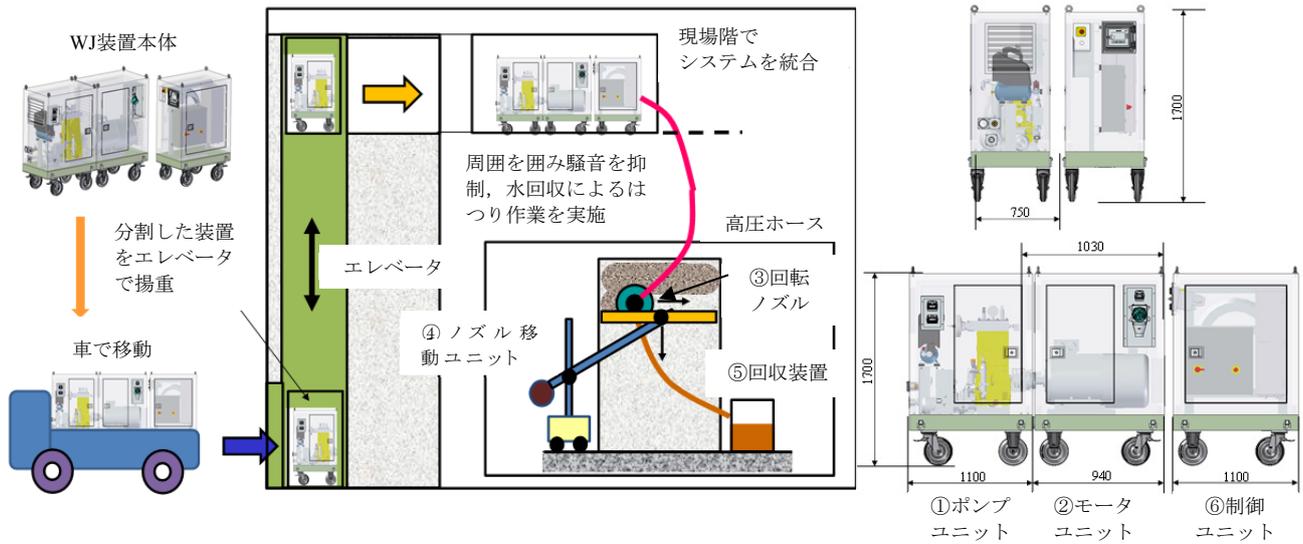


Fig. 1 分離式小型WJシステムの設計思想と各ユニットの大きさ

Application Image of Construction Work Using View of Small Size and Potable High Pressure Water Jet

足しながら、建物作業階まで容易に搬送できるまでの小型・軽量化を必要とする。そこで、一般的な建物の開口部形状、床の耐荷重および揚重方法となる一般の乗用エレベータサイズ（最大定員11人、間口800mm、奥行き1,400mm、高さ2,100mm、最大積載荷重750kg）を考慮し、装置の仕様を決定した。

一般に使用されているWJシステムは大型・高重量の場合が多い。このため、汎用装置を利用して上記の仕様を満たす外形寸法や重量の実現は難しい。ここではFig. 1に示すように、WJシステムの搬送時には、システムをユニットに分離することで搬送を容易にし、現場では各ユニットを目的階までエレベータで搬送し、設置個所で結合して使用する構成を採用した。WJ装置本体がなるべく作業現場に近く、騒音発生等が他空間から分離できる状態を確保可能にした。従来からの研究<sup>2)</sup>により、コンクリート面のはつり作業に必要な出力は、50kWが最低必要になる。そこで、モータ出力として55kWを選定し、最高噴射圧力は汎用大型WJシステムと同レベルの300MPaと設定した。

### 3. 開発システムの特徴

#### 3.1 システムの基本構成

開発したWJシステムは、①超高压の噴射水を発生するポンプユニット、②ポンプを低騒音で動作させる電動モータユニット、③目粗しやはつり作業のための回転ノズル、④回転ノズルを自動移動するノズル移動ユニット、⑤回転ノズルから噴射した水を回収する回収装置および⑥動作を制御する制御ユニットから構成される。

#### 3.2 分離式小型ウォータージェットシステム

3.2.1 WJ装置本体 基本構成の内、WJ装置本体は、

Table 1 分離式小型WJシステムの仕様  
Specification of Potable High Pressure Water Jet

圧力	最大 300MPa
流量	最大 8.5 l/min
出力	400V,55kW
ポンプ回転数	350-1,800rpm
ポンプユニット	W750×L1,100×H1,700mm,600kg
モータユニット	W750×L940×H1,700mm,670kg
制御ユニット	W750×L1,100×H1,700mm,400kg



Photo 1 分離式小型WJシステムの結合状況  
View of Potable High Pressure Water Jet System

超高压水を発生するポンプユニット、ポンプを駆動するモータユニットおよび制御ユニットから構成され、各ユニットはそれぞれ分離結合することができる。各ユニットは遮音性能の高い箱形の内部に収納されており、作業員1人で容易に移動が可能とした。Table 1 にその仕様を示す。

ポンプユニットは超高压(300MPa)の三連式プランジャーポンプ、ブースタポンプ(3MPa)、各種のバルブを制御するコンプレッサー等から構成される。給水タンクより送られた水はフィルターを介して超高压ポンプで加圧され、高圧ホースに排出される。

モータユニットは、高トルクモータおよび減速ギアで構成され、低回転数でも安定した出力が得られるよう調整されている。また、本ユニットでも極力小型・軽量化設計を行なった。

モータとポンプユニットの接合は非常に容易であり、ユニット外部に出た円錐状の突起を結合させることで、各軸がかみ合う方式となっている。Photo 1 にWJ装置本体の結合状況を示す。

制御ユニットでは主にモータの回転を制御し、ポンプから排出される高圧水の圧力、流量を調整する。噴射圧力は最小20MPa～最大300MPaを適時設定することができる。また、ユニットの操作は有線による遠隔操作が可能であるため、現場状況を確認しながら操作できるほか、非常時の即時停止にも対応できる。

高圧水を噴射するノズルには、目粗し処理やはつり作業のための既製の回転ノズルを採用した (Photo 2)。ノズル周囲は、WJの排水やがらの飛散を抑制するための防護カバーで密閉され、外部から真空吸引することで、排水とがらを吸出分離する。これにより、作業現場の漏水を防ぐことが可能となった。なお、切断作業時にはアプレシブ用ノズルを設置することで機能変更可能である。

**3.2.2 ノズル移動ユニット** WJシステムのノズル移動ユニットは、ノズル送り装置と可搬式移動台ユニットから構成され、作業内容に応じて、個別に開発・導入した。コンクリート面の目粗しや切断用として、直線および環状軌道に沿って移動するノズル送り装置を開発した。直線軌道は端部を固定することで、任意の角度の切削が可能であり、また環状軌道では曲率を変化させることで、任意の環状軌道に対応できる。各ノズル送り装置は3軸移動可能な可搬式移動台ユニットに設置され、遠隔操作により所定速度で移動させることができる。可搬式移動台ユニットは鉛直面、天井面および床面での作業に対応し、水平移動と垂直移動および回転軸を利用して容易にノズル位置を移動できる。このため、盛換え時間の短縮に寄与することができる。回転ノズルとノズル送り装置の仕様およびその外観をTable 2 およびPhoto 2 に示す。

### 3.3 低騒音性能

モータユニットおよびポンプユニットは消音パネルで囲っており、また、駆動機構をモータにすることでポンプ周囲の騒音は、82.3dB (1m)、69dB (10m)となる。一般的なWJシステムの動作音圧レベルが、約100dB(1m)、約85dB(10m)であることと比較すると、十分な低騒音性能を保有していることが分かる。壁を隔てた場所や屋外では、その動作騒音はほとんど確認できなくなる。また、回転ノズルは、噴射水を回収するためのカバーで覆われている。このため、作業箇所から発生する騒音も低減できる。気中に噴射すると、近傍での騒音は110dB以上のジェット騒音となるが、作業時の騒音はTable 3 に示すように掃除機よりも小さな音圧レベルとなる。

## 4. 目粗し状態の定量化と簡易測定法

WJによる目粗し処理の特徴は、コンクリート表面の仕上げが一定の粗さに制御できることにある。また、表面の脆弱な部分を除去するため、目粗し処理された表面はコンクリート強度に比例した安定した固着抵抗を期待できる。そこで、目粗し作業に必要な目粗し面の状態を評価するための測定方法と、その表面粗さの管理方法を検討した。



Photo 2 回転ノズルとノズル移動ユニット  
View of Rotation Nozzle and Traverser System

Table 2 回転ノズルとノズル送り装置の仕様  
Specification of Rotation Nozzle and Traverser

作動圧力	最高 300 MPa
回転直径	140 mm
ノズル数	8
オリフィス	0.25 and 0.15 mm
回転数	240 - 3,000 rpm
重さ	7.4 kgf
移動距離	1,000, 1,500, 2,000 mm
移動速度	0 - 65 mm/s

Table 3 開発したシステムの噴射時の騒音  
Comparison of Sound Pressure Level of Machines

音圧レベル	イメージ	音圧レベル (作業位置から5m)	建屋内 (作業位置から1mの箱番内)
50dB	図書館		ミリドカ
60dB	病院・ホテル	本システム (10m)	本システム
70dB	電話ベル	本システム	低騒音ウォールソー
80dB	電車内掃除機	本システム (1m) 低騒音ウォールソー	チップパー
90dB	カラオケ	チップパー	消音ブレーカー
100dB	ガード下 (電車通過時)	消音ブレーカー	ブレーカー
110dB	クラクション (2m)	ブレーカー	

4.1 回転式目粗し面計測装置

目粗し計測には、通常レーザー距離計をリニアガイドで直線移動させ、その直線に沿った切削深さのデータが使用される。こうした計測は、実験室や広い作業場所では可能であるが、実際の目粗し現場での計測位置は梁下や垂直面である場合が想定され、場所も狭く簡易に計測するのは難しい。目粗し計測が確率的なサンプルデータであるならば、計測は直線である必要はなく、領域を限定した複数のサンプルデータを用いることも可能と考えられる。

本開発では、レーザー距離計を円周上に回転させながら計測し、ある特定領域を集中的に計測する簡易な装置を製作し、従来装置との比較やそれを用いた計測実験を実施した。開発した回転式目粗し計測装置の外観をPhoto 3 に示す。装置は筒状(直径140mm)で、その内部にレーザーが半径および円周方向に定速度で移動する。計測部はアクリルで覆われ、その端部を目粗し面に当て、計測する。Fig. 2 に装置の計測範囲、Table 4 にその仕様を示す。通常計測では最大半径45mmの円周からピッチ5mmで最小径5mmの円周上をレーザーが定速度で移動し、切削深さを計測する。

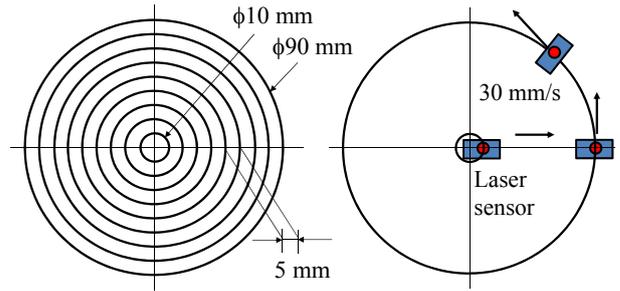


Fig. 2 目粗し面計測装置の計測範囲 Principle of Rotation-type Roughing Device

Table 4 回転式目粗し面計測装置の仕様 Specification of Rotation-type Roughing Device

計測間隔 : $M_r$	0.1 ~ 1.0 mm
半径方向の解像度 : $R$	1 ~ 45 mm
サンプリング・レート : $v$	6 ~ 30 mm/s
計測数 : $n$	1415 ( $M_r = 1.0$ ) 7074 ( $M_r = 0.2$ )
レーザー 解像度 : $d$	240 - 3,000 rpm

4.2 回転式装置による計測手法の検証

コンクリートの目粗し状態を評価する手法には、

- 1) 十点平均粗さ  $Rz$
- 2) 二乗平均粗さ  $Hrms$
- 3) 中心線平均粗さ  $d_{ave}$
- 4) フーリエ振幅の最大値比  $Hfur$
- 5) 負荷曲線に基づく負荷値  $Rk$

など、多くの評価手法が用いられている<sup>3), 4)</sup>。本計測では、現場作業での目粗し面の管理を考慮し、最も高速処理できる、計測した最小深さ $d_{min}$ と各切削深さ $d_i$ との差を平均した平均深さ $d_{ave}$ を採用した。Fig. 3 に計測の評価手法の概略を示す。

本評価方法の妥当性を検証するために、本装置と従来

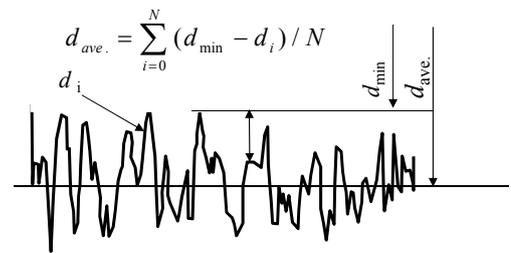
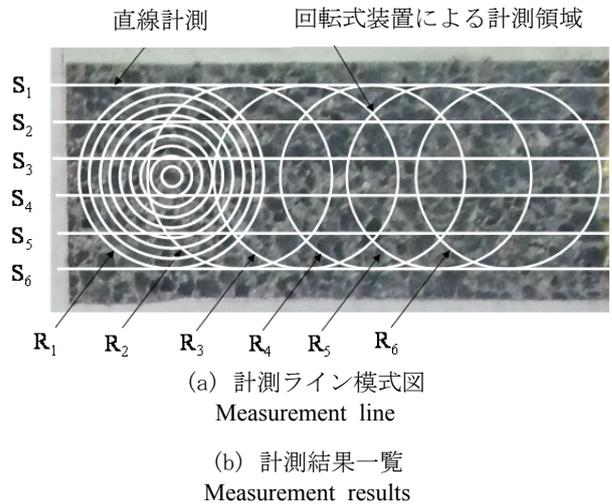


Fig. 3 目粗し状態の評価方法 Calculation Method of Roughing Surface



	n	1	2	3	4	5	6	平均値
$R_n$ mm		4.403	4.576	4.649	4.592	4.531	4.437	4.531
$S_n$ mm		4.521	4.601	4.433	4.521	4.632	4.353	4.511

Fig. 4 回転式と直線式粗さ計測結果の比較 Comparison of Roughing Depth Using Rotation-type Device and Straight-type Device

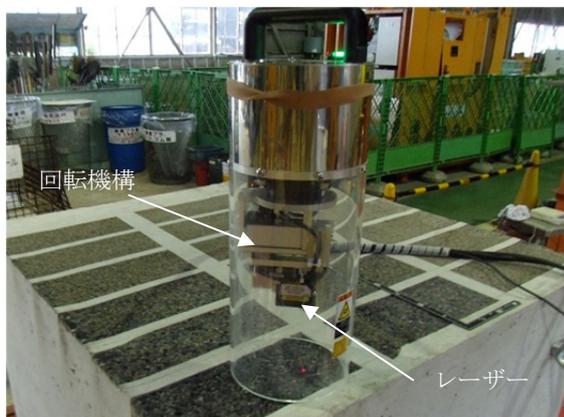


Photo 3 回転式目粗し面計測装置 Rotation-type Roughing Measurement Device

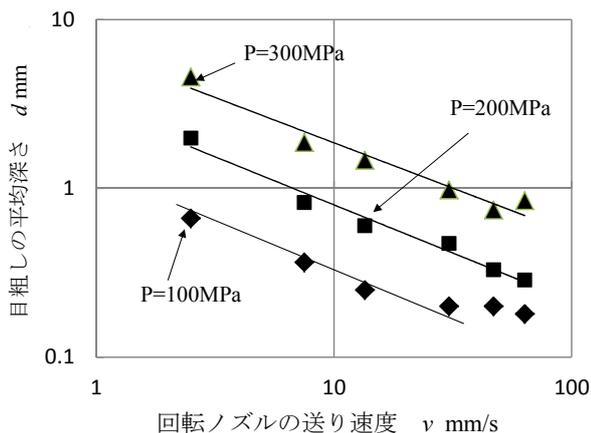


Fig. 5 圧力と送り速度による目粗し面の平均深さ  
Comparison of Roughing Depth Using Rotation-type Device for Upper Pressure and Feed Rate of Nozzle

までの直線式の計測装置を用いた粗さ計測を行い、その比較を実施した。Fig. 4-(a) に示すように、回転ノズルを用いて目粗しした面に対して、回転式装置による計測領域6点 (R1~R6) と直線式による計測6点 (S1~S6) の粗さを計測した。Fig. 4-(b) に各測定点の平均深さとその平均を示す。両者を比較した結果、両装置による計測差はほとんどない。なお、より広い範囲の計測でも回転式装置で計測した複数点の平均は、直線計測の平均とほぼ等しくなることを実験計測で確認している。

### 4.3 目粗し面状態とシステムの出力設定

回転ノズルを用いた目粗し状態とその平均深さを得るため、噴射圧力と回転ノズルの移動速度をパラメータとした目粗しサンプルを作製した。Photo 4 に目粗し試験体 (圧縮強度 $30\text{N/mm}^2$ ) を、Fig. 5 に回転式目粗し計測装置で計測した平均深さの関係を示す。噴射圧力が高い程、また回転ノズルの移動速度が遅い程、平均深さは大きくなる事が分かる。噴射圧力が等しい場合は、平均深さは、ノズル移動速度の1/2乗に比例して小さくなる事が分かる。なお、圧縮強度が10, 20および $40\text{N/mm}^2$ の計測データでも同様の傾向があり、こうしたデータは次章で示すような実際の目粗し処理の施工時におけるWJシステムの各パラメータ設定に有効な指標となる。

## 5. 耐震補強工事の目粗し作業への適用

### 5.1 実適用への対応

耐震補強工事の対象建物は、関西地区にある某歴史的建造物 (築後約90年経過) である。建物躯体コンクリートと外付け補強の鉄骨との附着性を高めるため、開発システムを利用した目粗し作業が選定された。目粗し部は、建物外側の鉄骨補強材が接着される梁および柱外面 (約 $150\text{m}^2$ ) であり。対象となる建物の耐震補強部をPhoto 5 に示す。本建物には多くの事業者が雑居する使

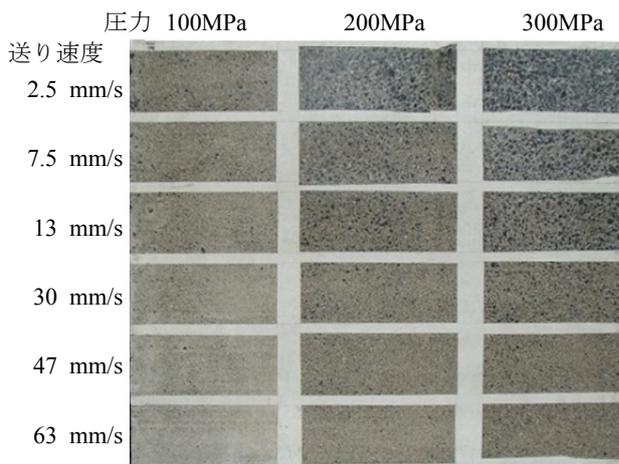
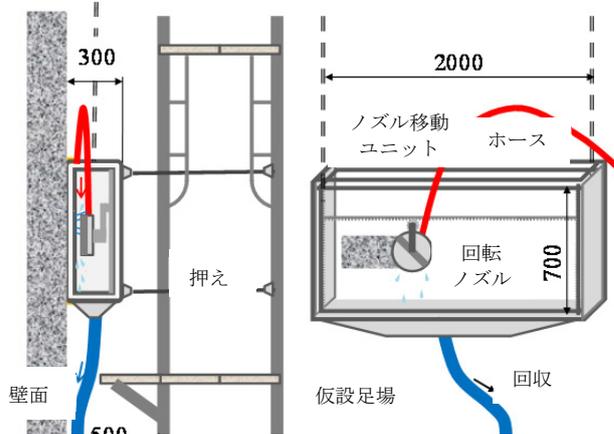


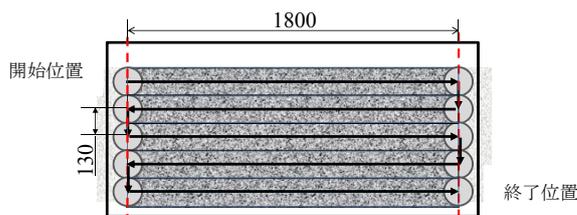
Photo 4 各種目粗し状態のサンプル  
Samples of Roughing Surface Using Water Jet with Rotation Nozzle



Photo 5 適用物件の外付け耐震補強面  
Building that Earthquake Resistant Constructs



(a) X-Y移動機構の設置方法  
Arrangement of X-Y Traverser



(b) 回転ノズルの移動経路  
Nozzle Traverse lines

Fig. 6 X-Y移動機構と回転ノズルの設置・移動方法  
Schematic of X-Y Traverser with Rotation Nozzle



Photo 6 X-Y移動装置の設置状況  
Arrangement of X-Y Traverser at Working Site



Photo 7 ハンドガンによる目粗し処理  
Roughing Work Using Hand-type Gun

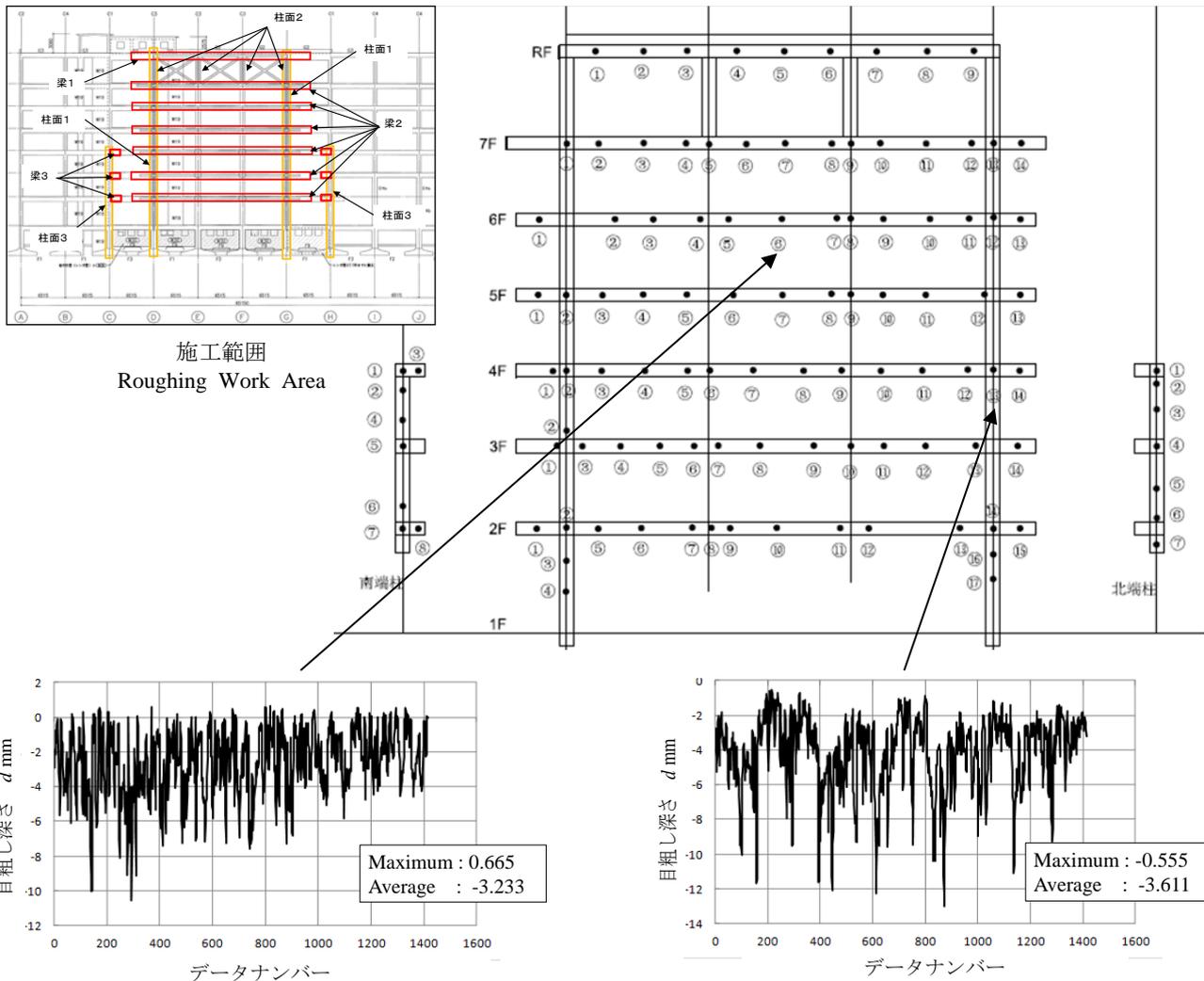


Fig. 7 目粗し領域と粗さ評価点および代表的な計測結果  
Measurement Points of Roughing Surface and Typical Roughing Data

目粗し処理を行う際には、以下の対応が必要となる。

- 1) 低振動，低騒音化 屋上スペースを有効活用して本システムを適用することで、ポンプの駆動騒音を低下させる。このため装置は分離して屋上まで個別搬送し、屋上にて再組立し配置した。居住者との距離を保つことで、騒音，振動の低減を実現した。

- 2) WJの飛散防止および回収 目粗しを行うための回転ノズルは密閉式であり、噴射した高圧水やがらはバキュームポンプで吸引することで、WJの飛散を極力低下させた。
- 3) 目粗し面の計測 回転式の目粗し計測装置を用いて、代表域の目粗し面を計測した。目標値としては、



(a) 目粗し面の状況  
Roughing Surface



(b) あと施工アンカー打設状況  
After Anchor Placing

Photo 8 目粗し処理後の状況  
Wall Surface after Roughing Work



(a) グラウト接合後の状況  
After Grout Connecting



(b) 補強工事完了後の外壁面  
Outer Wall after Earthquake Resistance Constructs

Photo 9 耐震補強状況  
Earthquake Resistance Constructs

目粗し面の平均深さが3mm以上となるように管理した。

4) ノズル移動の自動化 目粗し作業は、主にX-Y移動機構に取り付けた回転ノズルによる自動化作業で行い、入隅などの自動化できない一部を手動作業で実施した。製作したX-Y移動機構の概要をFig. 6 に示す。X-Y移動機構は1回の設置で、回転ノズルを横方向2,000mm、縦方向700mmまで移動させることが可能である。ノズル移動を自動化することで、作業効率の向上、作業の省力化および安全性を確保した。

X-Y移動機構は屋上に設置した移動ガイドからウインチで吊下げ、目粗し部位で固定した。次いで回転ノズルを目粗し面に合わせて調整し、X-Y移動機構を仮設足場からのサポートで固定した（WJの反力は約40Nであるため、仮設足場で十分に固定できる）（Fig. 6-(a)）。

Fig. 6-(b) に示すように、X-Y移動機構内部に設置された回転ノズルは、上部左端から下部右端まで、X方向に1,800mm、Y方向に420mm、ピッチ130mmで移動できる。梁の目粗し（幅約650mm）では2.5往復、柱の目粗し（幅約540mm）では2往復させることで1回の作業が完了す

る。柱部では、X-Y移動機構を縦方向に吊下げ、梁の目粗し作業と同様の作業を実施する。

## 5.2 目粗し作業と計測

5.2.1 目粗し作業 目粗し作業（夜間作業）は、当初の計画通り、X-Y移動機構の設置、目粗しおよび盛替えの手順に沿って実施された。回転ノズルの噴射圧力は250MPa、流量6 l/min、送り速度5~30mm/s とし、1回の送りで平均切削粗さ3mm以上の目粗し処理を施した。目粗し面のコンクリートには強度が高い場所や低い場所が混在したため、送り速度を適時最適速度に調整した。特に強度が高い部分はノズルの2度送りを実施し、ほぼ均一な目粗し面を施工できた。なお、目粗し範囲内には入隅部や角部、突起物があり、X-Y移動機構が設置できない場所がある。その領域では、ハンドガンによる目粗し作業を実施した。目粗し作業状況をPhoto 6~7 に示す。

耐震補強のための目粗し処理が必要な領域は、

- 1) 梁部：各階、長さ約24m、幅650mm、2階～屋上  
(7梁)
- 2) 柱部：各柱、高さ約25m、幅600mm、4本

高さ約12m, 幅600mm, 2本となり, 目粗し処理する面積は150m<sup>2</sup>となる。前節で示したX-Y移動機構を用いて, 順次盛替えながら効率よく目粗し作業できた。

**5.2.2 作業騒音の測定** 目粗し作業時の屋内音圧レベルを騒音計にて計測した。屋上に設置したWJ装置本体の直下における7階居室での音圧レベルは60dB以下の暗騒音であり, 振動レベル45dB以下の無振動であった。また, 梁部および柱部の目粗し作業に接する屋内騒音レベルは62dBであり, 振動レベルは50dBであった。

**5.2.3 目粗し面の計測** 目粗し作業を実施後, 目粗し面の深さを計測した。計測方法は, 4章に示した評価手法を使用し, 主に梁部(柱間で約3点)および端部柱部の総計110点を対象とした。計測状況と, 計測点および代表的な目粗し波形をFig. 7に示す。計測したすべての点で平均深さは3mm以上となり, 当初計画した目粗し面の平均深さ(3mm)を達成することができた。回転式の目粗し計測装置は狭い仮設足場内でも容易に使用でき, 即座に平均粗さが確認できるため, 目粗し処理の即時評価に有効なツールであることが確認できた。

目粗し作業の終了に伴い, あと施工アンカー打設, 補強鉄骨の接合, グラウト打設等が実施され, 当初予定の工期内で耐震補強工事は完了した。目粗し面の状況をPhoto 8(a)に, あと施工アンカー打設後の状況をPhoto 8(b)に, グラウト打設後の状況をPhoto 9(a), 補強後の外壁面をPhoto 9(b)に示す。

## 6. おわりに

本研究開発ではWJの建築リニューアル工事への適用範囲の拡大を狙い, 目粗し処理対応の小型WJシステムを開発して, 耐震補強工事のコンクリート面の目粗し作業に適用した。

本システムは, ユニットごとに分離できるために搬送が容易であること, ポンプがモータ駆動であり, 低騒音で稼働できることが確認できた。

また, 均質な目粗し作業が可能な特徴を有効利用するため, 目粗し面計測装置を開発し, 実際の目粗し処理の管理に適用した。その結果, 目的とする粗さの管理が短時間で簡易に可能であることを実証できた。

今後は, 耐震補強工事のみでなく, 各種のリニューアル工事への利用が可能と考えられる。

最後に, 本開発および現場適用にご協力頂いた関係各位に, 記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 土井暁, 他: リニューアル工事用小型ウォータージェットシステムの開発, 大林組技術研究所報, No. 75, 20, (2011)
- 2) 井上文宏, 他: コンクリート橋梁補修工事におけるウォータージェットはつり工法の適用, 日本ウォータージェット学会論文集, Vol. 13, No. 2, pp. 28~35, (1996)
- 3) JIS規格: JIS B 0601-1994, 2001, (表面粗さ)
- 4) 武井一夫: “コンクリート打継ぎ面の界面粗さの評価方法”, 日本建築学会構造系論文集, No. 455, pp. 7~19, (1994)