

56. 深礎ナトム 自動吹付ロボットの開発

大豊建設㈱：*宮村誠一郎、中西 芳雄
夏目 茂

1. はじめに

現在、送電線用深礎基礎の土留めとして、ライナープレートが一般に使用されている。このライナープレートの代わりに吹付コンクリートを使用することによって、断面変化に柔軟に対応することができ、経済的な基礎設計が可能となる。

従来、熟練工が経験により行っていた吹付作業を吹付ロボットに代行させることにより、品質の均一化と作業環境の改善を図る。自動吹付ロボットに使われるコンクリート吹付機は山岳地でも運搬が容易な小型の吹付機で、比較的粉塵・リバウンドの少ない乾式を選定した。

この乾式吹付機による最適吹付条件を基礎実験で決定し、開発した自動吹付ロボットにより、送電線用深礎基礎内で実証実験を行った。

2. 吹付機械の選定

吹付機械は、公表されている資料や現地調査などにより、最も粉塵量やリバウンド量が少なく、軽量で扱いやすい乾式のSBS吹付機を選定した。

a) SBS吹付機の特長

- 1) 乾式吹付機なので、設備が簡便である。
- 2) ドライコンクリートの圧送に、ポケットフィールドを使用することにより、常時定量を間断無く送り脈流がない。
- 3) 添加水を最大100kgf/cm²の高圧で、3層のノズルからマテリアルホースに直角に噴射することにより、ドライコンクリートを圧送するエアに負けることなく、セメントと骨材の殆ど全てが水に補足され、水セメント比の一定なコンクリートができ、粉塵とリバウンド量が少ない。

b) SBS吹付機 (Model-C) の仕様

吐出量	1~8m ³ /h
最大骨材径	16mm
マテリアルホース径	40・50・65mm
エア消費量	4~18m ³ /min
最大吹付距離	水平1,000m・垂直150m

3. 基礎実験

基礎実験は、以下の項目について行い、各々の最適組み合わせを確認した。

- 1) ノズル間隔と吐出圧
- 2) 単位時間当たりの吹付厚（量）
- 3) 最適ノズル回転速度
- 4) 上向き・下向きによる吹付量
- 5) 最適最大骨材径

基礎実験用装置としては、吹付壁をコンクリートパネルにて、 $H=1.8\text{m}$ 、 $L=9.9\text{m}$ の鉛直で直線の壁を製作し、壁に平行にレールを設置して、その上に吹付ロボットを固定した走行架台を乗せた。架台には吹付ロボットの移動速度が調整できるようにインバーター付きモーターを取り付けた。



写真-1 基礎実験状況

吹付モルタルのリバウンド量の測定は、吹付完了後落下モルタルを集めその重量を測定し、付着量の測定は、壁に付着したモルタルを落とし、その重量を測定した。

リバウンド率は、下記の式による。

$$\text{リバウンド率} = \frac{\text{リバウンド量}}{\text{付着量} + \text{リバウンド量}}$$

- 1) ノズルの間隔と吐出圧

ノズル間隔を $0.70\text{m} \cdot 1.00\text{m} \cdot 1.30\text{m}$ の3パターン、吐出圧を各々 $1.0\text{kgf/cm}^2 \cdot 2.0\text{kgf/cm}^2$ の2パターンの組み合わせで試験を行った。

その結果、ノズル間隔 $1.00\text{m} \cdot$ 吐出厚 1.0kgf/cm^2 の組み合わせが、付着率 88% ・リバウンド率 12% で最適となった。

- 2) 単位時間当たりの吹付厚（量）

ノズル間隔 $1.00\text{m} \cdot$ 吐出圧 1.0kgf/cm^2 に固定し、吹付時間 $3\text{秒} \cdot 5\text{秒} \cdot 10\text{秒} \cdot 20\text{秒}$ の吹付厚・吹付幅（体積）を測定した。

その結果、厚さ・幅ともに吹付時間に比例して増加するが、 15秒 で自重により剥離落下する。最大吹付厚は、 18cm であった。以上の試験から、1層の吹付厚は、 10cm 以下が望ましい。

- 3) 最適ノズル回転速度

ノズル間隔 $1.00\text{m} \cdot$ 吐出圧 1.0kgf/cm^2 に固定し、回転（水平移動）速度を $0.075\text{m/s} \cdot 0.100\text{m/s} \cdot 0.125\text{m/s} \cdot 0.150\text{m/s}$ の4パターンで、付着厚・付着率・リバウンド率を測定した。

その結果、付着厚は、速度の遅いほど厚いが、速度 0.125m/s が付着率 86% ・リバウンド率 14% と最適であった。

- 4) 上向き・下向きによる吹付量

ノズル間隔 $1.00\text{m} \cdot$ 吐出圧 1.0kgf/cm^2 に固定、回転速度を一定にして、上向き・下向きの2パターンで、吹付厚・吹付幅を測定した。

その結果、付着量は上向きが吹付厚で30%、吹付幅で40%多く上向きが適している。

5) 最適最大骨材径

ノズル間隔1.00m・吐出圧1.0kgf/cm²・旋回速度を0.125m/sに固定し、最大骨材寸法を1mm・5mm・10mm・15mmの4パターンで、吹付厚・リバウンド量を測定した。

その結果、最大骨材径1mmの場合は、モルタルが飛散してリバウンド量測定不能であった。最大骨材径10mmが付着量86%・リバウンド量14%で最適であった。

以上、基礎実験の結果により、ノズル間隔1.00m・吐出圧1.0kgf/cm²・1層の吹付厚10cm・ノズル旋回速度0.125m/s・最大骨材径10mmで上向吹付けが最適となった。

4. 実証実験施工

試験施工地	岐阜県恵那市				
基礎種別	送電線深礎基礎				
深礎基礎杭径	φ3,700mm				
深 さい	H=15,00m				
土 質	G.L. ~ 2.4m	N値 7~50の崖錐			
	2.4m ~ 15.0m	N値 49~107の花崗閃緑岩			
地表勾配	約30度				
資材運搬方法	ケーブルクレーン(最大吊り上げ荷重3t)				

1) 深礎掘削坑の安定性・コンクリート吹付厚の検討

解析は、簡略で設計上安全側の結果が予測される2次元平面ひずみモデルを採用した。

・地盤の特性

	単位重量 (t/m ³)	弾性係数 (t/m ²)	ポアソン比	粘着力 (t/m ²)	摩擦角 (度)
G.L. ~ 2.4m	1.8	700	0.33	1.0	45
2.4m ~ 15.0m	2.0	16,000	0.30	9.0	30

・吹付コンクリートの特性

弾性係数	E = 2,000 tf/m ²
圧縮強度	σ _c = 120kgf/cm ²
許容応力度	σ _{ca} = 40kgf/cm ²
吹付コンクリート厚	t = 10cm

・深礎基礎掘削ピッチ

80cm

・解析結果



写真-2 吹付ロボット全景

掘削時の地山の安定性に関しては深礎底部付近で局所安全率が1.0~1.5の領域が見られるが、せん断破壊に至るまでは至っていない。局所的な破壊が認められるが、地山の安定性に影響を及ぼすものとは考えられない。掘削終了時の地山の变形では、底面の変位量は最大値で3.3mm、側壁の変位量は最大値で2.7mmと小さい値となっている。

吹付コンクリートの安定性に関しては、吹付コンクリートに発生する周方向の応力 σ_c と許容応力 σ_{cs} に対する安全率は、1.3以上を確保しており、安定性はよい。

以上の結果より、深礎掘削坑および吹付コンクリート厚の10cmは安定である。

2) 吹付機および吹付ロボット

吹付機は、SBSを使用した。吹付ロボットは、基礎実験の結果から下記の仕様で製作した。

・吹付ロボットの仕様

深礎基礎杭径 3,700mm 対応

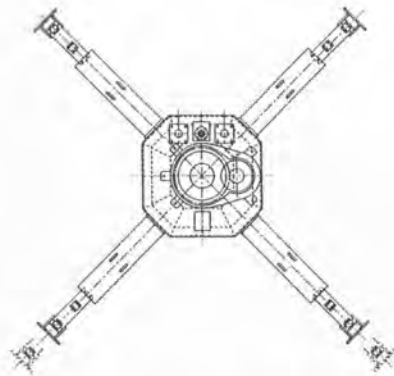


図-1 吹付ロボット平面図

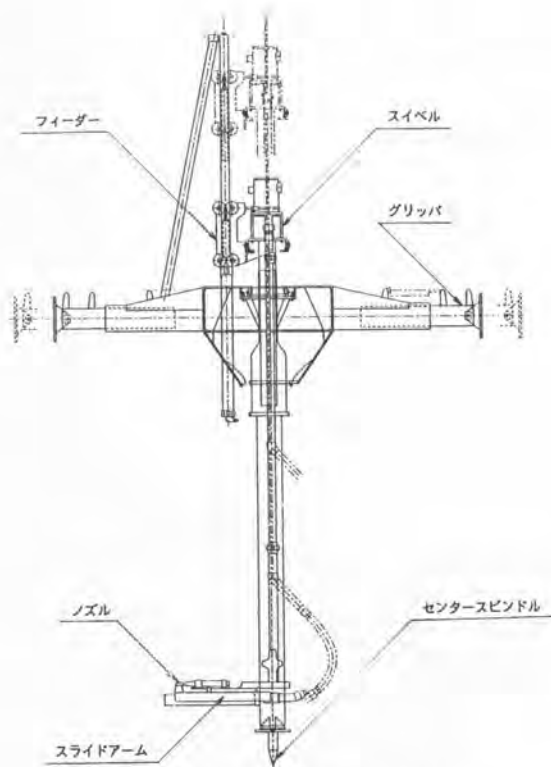


図-2 吹付ロボット正面図

旋回範囲 360° 全旋回
 ノズル水平ストローク 100mm
 ノズル上下ストローク 1,000mm
 回転数 0~2.6 rpm
 グリッパ伸縮範囲

min φ3,314mm~max φ3,914mm

・吹付ロボットの設定諸元

吹付面とノズルの間隔 1.00m
 吐出圧 1.0kgf/cm²
 吹付面ノズル旋回速度 0.125m/s
 吹付回数 2層

吹付ロボットは、最下部より旋回しながら上昇し、既吹付箇所まで達すると旋回しながら下降する。

3) コンクリート材料

配合：セメント 360kg・水 180kg・細骨材676kg・粗骨材1,086kg・急結剤25.2kg
 最大骨材寸法を10mmとし、最寄りの生コン工場よりドライコンクリートを搬入した。

4) 発破による影響

発破深さ 0.8m
 発破体積 8.6m³
 削孔本数 48本
 爆薬量(最大) 2.4kg
 雷管段数 0~5

発破間隔は、吹き付け完了24時間後とした。その結果吹付コンクリートに、クラック等の異常はなかった。

5) 計測

・地表面の沈下：測定の結果、沈下はほとんど見られなかった。

・内空変位：3段階の注意レベルの基準を求め、注意レベルⅡの基準値11mmを管理基準とした。変位測定の結果、最大変位量は、3.4mmであった。また、吹付厚は、設計厚100mmに対し、測定値平均125mmであり設計値以下はなかった。

5. 考察



写真-3 吹付機全景



写真-4 吹付状況

基礎実験で得られた最適データを吹付ロボットの各諸元に設定し、地上からの遠隔操作により、深礎基礎杭1脚ではあるが、定量・自動吹付で所定の成果が得られることが確認できた。

深礎掘削坑の安定および吹付コンクリートの安定は、設計値通りであることが確認された。

この実験の目的の1つである、品質の均一化・作業環境の改善は、達成されたと思われる。

任意断面に対応する吹き付けも、ノズルを前後し一定間隔を保つことにより、十分対応可能だと思われる。また、施工の経済性も、吹付材料は生コン工場よりドライコンクリートで搬入し、1基の吹付プラントで数本の深礎基礎杭を同時に施工する、1回の吹付高さを2m程度にする等の方法により、工事費を低減できると思われる。



写真-5 吹付完了

6. おわりに

この実験成果を生かし、今後、設計・施工の改良を重ねることにより、安定した吹付コンクリート強度の確保、自動化による施工精度の向上を図っていきたい。

最後に、工事の計画および実験施工にあたり、ご指導、ご協力いただきました関係各位に対し、深く感謝の意を表します。



写真-6 現場全景