

## 10. 遠心力吹付け工法の開発

三井建設㈱：\*伊藤 達男，長野 祐司  
東京電力㈱：飯島 政義

### 1. まえがき

深礎工法は人力を主体とした基礎杭の施工法であり、危険・苦渋作業であるが簡便な設備で済むので今日でも山岳・傾斜地に於ける橋脚基礎、電力鉄塔基礎等の重要構造物の基礎工法として広く利用されている。現在では第二東名神高速道路が着工され、橋脚の基礎に深礎工法が多く採用されている。また、電力需要の増大から、電力各社においても基幹送電線の容量拡大のために大型の鉄塔の建設が目立っている。これらの背景の下、深礎杭の品質、施工能率、安全性向上およびコスト削減を目標に遠心力を利用してモルタル土留め壁を構築する遠心力吹付け工法を開発した。

深礎基礎の掘削時の土留にはライナープレートが用いられてきた。この方法は坑内での人力による組立てであるために材料の搬入時の上下作業、地山が露出した状態での作業であり、苦渋・危険作業であった。また、組み立てたライナープレートと地山の隙間にモルタルのグラウトを行うが、時間的遅れによる周辺地山の弛みおよびグラウトの不確実さによって杭の周面摩擦力を考慮し難いという欠点が指摘されてきた。この欠点を補うために、過去には土留にコンクリートやモルタルを吹付ける工法が試みられた経緯がある。しかし、この吹付けには空気を用い、人力によるノズル操作で行うものであったために粉塵によって著しく作業環境が悪く、また、施工性も劣っていたために普及には至らなかった。

遠心力吹付け工法は簡便な装置と簡単な操作でモルタル吹付け土留めを完成させ、深礎杭の性能向上、コストダウンを可能とするものである。

### 2. 原理

一般的な吹付け工法は圧縮空気を用いて材料を吹付けている。これに対して本工法は空気を用いずインベラの回転により材料に遠心力を与えて（図-1 参照）、接線方向に飛び出させるものである。

原理的には吹付けではなく、投射と呼ばれる方法であるが、従来の吹付けと目的が同一であることから、以下、便宜的に吹付け工法と呼ぶこととする。

### 3. 開発内容

上記の基本的原理に基づいて試作機を製作し、試験吹付けを行った。試作機の概要を図-2 に示す。

ホッパーに蓄えられたモルタルは底部のスクリューによって下方に切り出される。このスクリューを停止することにより、モルタルの切り出しも停止するので、底蓋の役割を果たしている。スクリューはホッパーの上の駆動モータにより回転軸を介して駆動される。回転軸はスクリューの下に更に延長されていて、攪拌翼が付いている。急結剤(液体)噴射ノズルがスクリューと攪拌翼の中間位置に取付けてあ

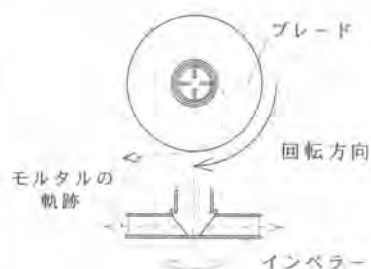


図-1 原理図

り、急結剤が添加・混合される。

急結剤が添加されたモルタルは重力でインペラの中心付近に落下し、インペラから遠心力を受けて全周に飛び出す。

試作機による試験結果より、装置の開発と同時に材料、管理方法の検討・開発が必要であることが判明した。以下、試作機による試験によって判明した開発テーマを示す。また、図-3、表-1には試作機を改良した実用機の構造と仕様を示す。

(1) スクリューフィーダの回転数とモルタルの切り出し量は一定の関係が全く成立せず、モルタルのワーカビリティによって大きく変化することが判明した。モルタルのスランブ値が10 (cm) 以下ではスクリューフィーダで取り出すことが出来ず、20 (cm) 以上ではスクリューフィーダが停止していてもインペラから流出する。これは均一な吹付けを行う目的に対して非常に大きな障害となると同時に適正な割合の急結剤の添加が困難になる。これらの問題解決のために、三つの方策を取ることにした。

#### ①パイプレータの装着

ホッパーの底のコーン部をゴム板製とし、電動パイプレータを取付けた。これにより、スランブ値が零に近いモルタルも流動化して取り出し可能となった。

#### ②モルタル吐出量検出装置

モルタルの吐出量がスランブによって大幅に変化することを防止するには定量的なあるフィーダを採用する方法がある。しかし、構造が複雑になり、清掃にも手間取ることから、スクリー式を踏襲することとし、後述の回転数の制御によって一定量の吐出量を確保することとした。この場合、吐出量を検出することが重

要である。吐出量の検出はモルタルの充填された吹付け機全体重量をロードセルで秤量し、その重量が時間とともに減少することに着目し、その減少量を時間で微分することによって単位時間の吐出量を算出することとした。

#### ③インバータ制御による回転数制御

予めモルタルの吐出量を定めておき、これに見合う急結剤(液体)量を計算によって求めて、急結剤圧送ポンプの吐出量を設定する。急結剤圧送ポンプは定量的な優れた体積型を用いている。一方、モルタルの吐出量はスランブ値によって様々であるが、前項のモルタル吐出量検出装置によって知ることができる。スクリーウの回転数をインバータにより調節可能としたことにより、予め定めた吐出量にすることができ、急結剤の適正な添加が可能となると同時に、均一な厚さの吹付けに寄与することとなった。

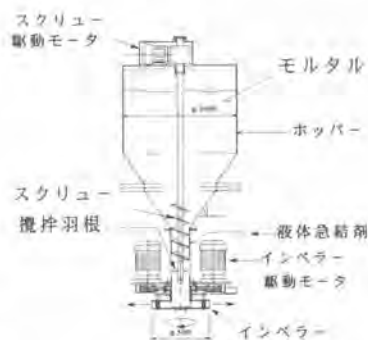


図-2 試作機

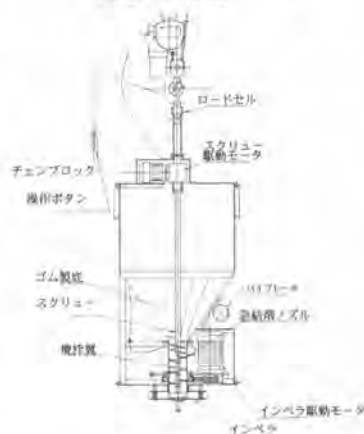


図-3 実用機

表-1 実用機の緒元

吹付け機	吐出能力	3~8 m <sup>3</sup> /h
	インペラ径、回転数	500 mm、300~900 rpm
	スクリーウ回転数	30~180 rpm
	ホッパー容量	0.6 m <sup>3</sup>
チェンブロック	電動機給出力	5.3 kw
	質量	500 kg
急結剤ユニット	最大吊り下げ荷重	19.6 kN
	揚程	2.5 m
急結剤ユニット	タンク容量	100 l
	ポンプ能力	3.5 l/min × 1170 kPa
	質量	550 kg

## (2) 液体急結剤の混合・攪拌方法

当初は液体急結剤を1/4インチホースでノズルより吐出させた。モルタルとの攪拌はスクリーと同速回転の攪拌翼で行った。その結果、攪拌が不十分であることが判明した。スクリーの回転数は、スランブによって異なるが、仮に6(m³/h)の吐出量とするためには40~90rpm程度である。一方、インペラ回転数は吹付ける地山までの距離によって適正値は異なるが、400~650rpmである。攪拌効果を上げるために、攪拌翼をスクリー軸と切り離し、インペラから延長した軸に取付け、高速で攪拌することとした。

液体急結剤はおよそ2.3(l/min)程度と少量であるのでノズルから噴霧するためにはノズル径を小さくする必要が生ずるが、モルタルと急結剤が反応して詰まりを生じ易く、逆にノズル径を大きくすると吐出流速が下がりモルタルが入り込んで同様に詰まり安くなる。液体急結剤ホースに圧縮空気を混入させて大口径ノズルから噴霧状態で吐出させることにより、これらの問題を解決した。同時に、作業終了時に急結剤ポンプの停止後に圧縮空気を送り続けることにより、ホースの中の急結剤を押し出すことが可能となり、清掃が容易となるメリットも生じた。以上の対策により、良好な攪拌効果を得られることとなった。

## (3) 全周への均一厚さの吹付け

全周に均一厚さで吹付けるためには、インペラ全周から均一に飛び出させると同時に時間的に吐出量に変動がなく、上下運転を一定速で行う必要がある。

試作機では攪拌翼の回転数がスクリーの回転数(0~90rpm)と同じであった。この場合、モルタルがインペラの中心付近に落ちるが、一方に偏る傾向があり、方向によって厚さに差が生じていた。この欠点は前記の攪拌翼の回転をインペラ回転数(400~650rpm)と同じとすることにより解決した。時間的な吐出量の変動は吐出量を検出して、スクリー回転数を調節することで解決した。上下運転を一定速で行うことは、クレーンでは相当困難であることが判明し、これが上下方向厚さの不均一の原因となっていた。同時に吹付け範囲の上下を正確にすることも困難であった。解決方法として、専用の電動チェンブロックを使用し、揚重及びおおよその位置決めはクレーンとし、吹付け作業はチェンブロックで行うこととした。電動チェンブロックは高速・低速の2段速とした。

## (3) インペラの回転制御

対象とする深礎径は2.5~5.0mとしている。インペラの回転速度はそれぞれの径によって適正値があることが予想され、特にモルタルの強度、リバウンド率に影響を与えることが予想された。そのためインペラの回転数はインバータ制御の可変速とし、数多くの試験により、深礎径と適正な回転数の範囲を求めた(表-2)。

(4) 適正なモルタル配合と急結剤の特性 モルタルの適正な配合を決定するためにS/Cを2.5~4.0、W/Cを45~68%、急結剤の添加率をセメント重量比で4~12%の範囲で変化させ、実際に実用機で吹付けを行って材齢と強度の関係を求めた。このとき、スランブ値を12~15cm

表-2 インペラ回転数

深礎直径 (m)	インペラ回転数 (rpm)	吐出速度 (m/sec)
2.5	400~450	10.5~11.8
3.0	450~500	11.8~13.1
3.5	500	13.1
4.0	500~550	13.1~14.4
4.5	550~600	14.4~15.7
5.0	600~650	15.7~17.0

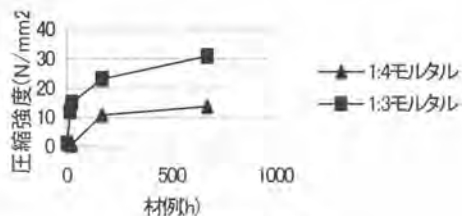


図-4 強度発現例

なるように W/C を調整したが、スランプ値が低すぎる場合は高性能 AE 減水剤を使用するものもあった。一例として、1:4 モルタルと 1:3 モルタルの強度発現の比較例とその配合を図-4、表-2 に示す。

表-3 配合例

	(1m <sup>3</sup> 当たり)			
	水(kg)	セメント(kg)	最骨材(kg)	急結剤(kg)
1:4モルタル	260	390	1557	27.3
1:3モルタル	250	500	1500	35.0

\*普通ポルトランドセメント  
\*液体急結剤(ナミックType-L)

強度発現に極端な差があることが分かる。理由はいくつか考えられるが、バラバラになって飛んで、壁面に付着する際、貧配合の 1:4 モルタルはペースト分が不足していることが最大の原因と考えられる。観察によれば、1:4 モルタルはポーラスであり比重も小さいことからこのことが推定される。従って、本工法では 1:3 モルタル以上のセメント量が適当と判断された。

#### (5)強度と内空変位の管理方法

吹付けコンクリートの初期強度試験方法として通称プルアウト法(JHS 702)が代表的である。この方法は NATM 工法を念頭においたものである。本工法にこの試験法を用いることは当然可能であるが、装置の性質上、インペラから全周に吹付けられるために、プルアウト試験型枠に集中して吹付けることが出来ない。そのために実杭以外の場所で試験吹きをする場合は材料の無駄が発生し、実杭においておこなった場合は欠損部分が生じて補修に労力がかかることになる。このような不具合を避けるために簡易な強度確認方法の必要性が生じ、各種の方法の比較実験を行った。

プルアウト法を基準として、低強度シュミットハンマ、軟岩ペネトロメータ(土木学会「軟岩の調査・試験の指針」昭和 55 年 1 月)、コア強度試験(JIS A 1170)を比較したところ、軟岩ペネトロメータが良い相関を示し、強度管理には十分であると判断した。

トンネルの内空変位を計測する方法として従来からコンバージェンスメジャがあり、これが深礎の吹付けの場合にも使用された経緯があった。しかし、深礎の場合には掘削が進行すると、十分な足場の無いことから、危険・不安定な姿勢での計測を余儀なくされ、その結果十分に信頼できるデータが採取出来ない欠点があった。

そこで本工法の開発に伴って図-5 に示す新しい内空変位測定法を開発した。吹付け前の地山に沿ってピアノ線(φ 0.4mm)を入れた硬質ナイロンチューブ(外径 6.0mm、内径 4.0mm)を釘等を用いて地山に取付ける。両端は吹付け後に計

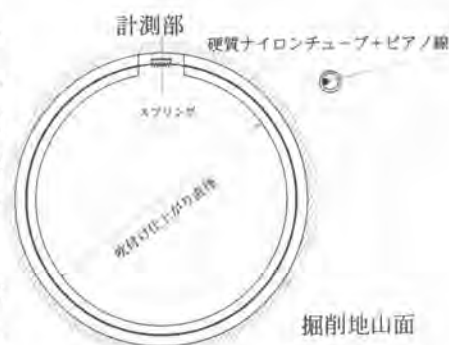


図-5 内空変位測定法

測装置を取付けるために吹付け時の養生をしておく。吹付けによって硬質ナイロンチューブはモルタルに埋没することになる。端部は吹付け直後の低強度の間に養生を取り外し、ピアノ線の両端をスプリングで引き寄せる。土圧等により周長が減少した場合はモルタルに埋没した硬質ナイロンチューブの長さは減少するが、ピアノ線の長さは変わらないのでスプリングの力で抜け出ることになり、スプリング長が短くなる。仮に深礎径 3000mm でモルタルに 300×10<sup>-6</sup> の歪が生じた場合は 2.8mm の周長の減少となり十分に検出可能である。この方法は簡易な方法で、入坑・出坑時に簡単に内空変位を読みとることが出来る。

## (6)土留めの設計方法

吹付けモルタル、コンクリートの初期強度は極めて低い時間とともに強度が増すので時間を考慮した計算方法がより現実に即している。更に、土質の細かい条件を考慮した計算を行う場合には有限要素法が必要となる。本工法の開発にあたって、平行して専用の『FEM深礎掘削解析ツール』を開発した。このFEM解析プログラムはWindows'95~'98の環境で動作し、特別な知識を必要としないで手軽に使用できることを旨としている。解析条件は次の通りである。①軸対称モデルとしている ②ステップ掘削を考慮している ③吹付けモルタル、コンクリートはステップ毎に材齢による強度の増加を考慮している ④地山特性は $\gamma$ 、 $C$ 、 $\phi$ 、 $E$ 、 $\nu$ を用い、破壊基準(モール・クーロン)に達した場合には $E$ を1/100に低減、 $\nu$ を0.49に変化させる(バイリニア法)を採用している。

## 4. 実施工の状況

### (1)送電線鉄塔基礎の例

東京電力(株)では、福島県川内村~栃木県今市市までの超高压送電線鉄塔工事(南いわき幹線新設工事)の55基(220本)の深礎工事に本工法を採用した。その後、葛野川幹線、西群馬幹線、北栃木幹線、新所沢幹線等の一部に本工法を採用している。図-6、写真-1に施工イメージと吹付け状況を示す。

図-6に示すように、一般に大型の鉄塔建設には専用のジブリレーンが使用される。このジブクレーンを用いて吹付け位置に吹付け機を吊り下ろす。地上の運転制御ユニット(急結剤ポンプ内蔵)と吹付け機の間を急結剤ホースと制御ケーブルで連結する。地上操作員はインペラー、急結剤ポンプ、スクリュウを起動する。

坑内操作員は吹付け具合を観察しながら電動チェンブロックを操作して吹付け機を上下させながら所定の範囲を吹付ける。地上操作員はモルタルの吐出量が計画値となるようにスクリュウの回転数を調整する。

坑内の吹付け状況を写真-1に示す。坑内操作員はチェンブロックの位置付近に作業足場を設けここから吹付け状況を観察しながら操作する。吹付け高さは地山の自立安定によるが2mを限度としており、この例でも2mである。写真の状況は吹付け時であり、粉塵が極めて少ないことが判る。

### (2)高速道路橋の基礎の例

高速道路の橋梁基礎として10件以上、一般国道の橋梁基礎に数件の実績がある。写真-2は高速道路橋脚の深礎施工の状況である。吹付け機をクレーンで吊り上げ、坑口でミキサ車よりホッパーにモルタルを投入しているところである。

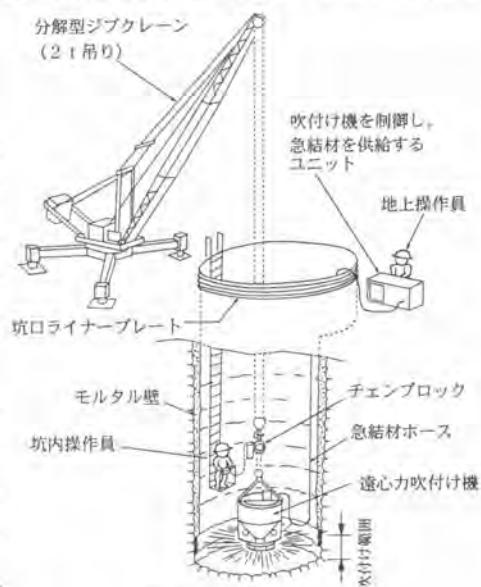


図-6 施工イメージ



写真-1 作業状況(南いわき幹線)

## 5. 遠心力吹付け工法の利点と適用上の注意点

従来の深礎の土留めはライナープレート工法が一般的であった。ライナープレートは幅 50cm のピースを人力でボルトを用いて組み立てるもので、自動化は困難である。掘削時の整形に当たっては、一部の掘削不足があるとライナープレートの組立てに支障が生ずるので過大に掘削する傾向がある。特に、転石層、中硬岩では発破工法となり、過大掘削となり勝ちである。



写真-2 道路橋橋脚基礎

地山の緩み防止の観点からは一段毎にライナープレートの裏側にグラウトを行う必要があるが、能率低下の原因となると同時に充填性に疑問が残る。背面にグラウトパイプを設置し、杭体の完成後にまとめてグラウトする方法もあるが、放置時間が長いことから地山の緩みも懸念され、また、充填性に問題がある。過去、公的機関による実杭の載荷試験によると杭周面の摩擦が小さく、地山の緩み、グラウトの不完全さを想定させる結果が報告されている。このような観点から、従来は深礎杭の周面摩擦は考慮しない設計が一般になされていた。

本工法は掘削後に速やかに土留めを施工するために地山の緩みを防止すると同時に地山にただちに吹付けるために全く空隙を残すことが無い。日本道路公団では、吹付けによる土留めを行った深礎杭の周面摩擦を考慮するように設計要領を改訂した。

送電線鉄塔では風荷重、地震時荷重、コーナー部で引揚げ耐力が支配的である。この観点から、東京電力では土留めに吹付け工法を積極的に取り入れることを検討してきた。過去、コンクリート吹付けの実績は相当の数にのぼるが、圧縮空気式で、人力で行っていたために作業環境(粉塵)、作業性が悪く、本格的な採用には至らなかった。本工法は低粉塵(0.5mg/m<sup>3</sup>程度)、低リバウンド率(10%程度)で機械化がなされており、本格的な採用が可能となった。

本工法の適用に当たって地山からの湧水は最も注意すべき点である。少量の湧水は水抜きパイプ、金網などの対策で吹付けは可能であるが、大量の湧水の場合は施工が困難となる。また、地山は自立すると同時に、吹付けられたモルタルの強度が発現するまでにその重量に耐える必要がある。本工法は岩のみならず土砂にも適用可能であるが、特に土砂においては上記の条件が必要となる。

## 6. あとがき

本開発は比較的短期間で実用化のレベルに達し、現在までに送電線鉄塔深礎基礎、道路橋深礎基礎に約 330 本の実績を持つに至っている。これは施工の機械化によって作業環境と効率の良い施工が行われると同時に性能の優れた深礎杭が施工可能になったために基礎の経済設計が可能になったことに負っている。しかし、施工条件、特に湧水についての問題が残されており、本工法のより一層の普及のために更に改良を進める所存である。

最後に、本工法は東京電力(株)送変電建設本部、同 UHV 送変電建設所が中心となり、三井建設(株)、(株)関電工、(株)岳南建設、(株)佐藤建設工業、(株)東光電気工事、(株)千歳電気工業、(株)サンテック、(株)ヒメノ、(株)山加電業(株)で共同開発したものであり、関係各位に謝意を表します。また、橋梁深礎基礎への導入に当たっては、日本道路公団の技術部、企画部、各建設局には深いご理解と施工上のご指導をいただいた。ここに深謝の意を表します。