

線路上空からの線間杭打ち 工法



小林 一樹* 林 篤* 野澤 伸一郎*

線路上空における建築物の構築は、作業が夜間の短時間に制限されるため、一般建築物と比較して工期が長く、工事費も大きくなる。そこで、線路上空を利用することにより、昼間の列車運行時間帯も作業を継続して行うことにより、線路上空構造物の工期短縮、コストダウンを図る工法を開発した。

この工法では線路上空を作業スペースとして利用するが、このときに使用する線路上空の作業構台について、地表に設置する簡易な直接基礎の支持力に関する検討、地震時に作用する水平力の検討を行った。また、構台上に設置するために開発した軽量小型掘削装置の性能試験を行った。これらの結果から、線路上空からの線間杭打ちシステムを確立した。

キーワード：線路上空建築物、場所打ち杭、アースドリル工法、簡易構台、沈下防止板

1 はじめに

線路上空は都市空間の貴重な開発資源として注目されている。線路上空を活用するために人工地盤などを設置する場合、線間やホーム上に杭や柱を建てる必要がある。しかし、線路閉鎖や電停止等の制約により、作業時間が夜間の短時間に制限されることや、特殊な機械を利用することから、多大な時間と費用を要している。このため、線路上空の活用は難しかった。

線路上空から杭の施工を行うことによって作業時間の制約は大幅に緩和される。本研究開発では線路上空から杭を打設するシステムを構築するための技術を個別に開発してきたので、それぞれについて述べる。

2 工法概要

施工規模や形状により、施工法を2つにわけ、A工法、B工法とした。両工法の概要および施工順序を紹介する。

2.1 A工法

A工法は橋上駅のように比較的小規模な線路上空構造物を対象とした工法である(図1)。その手順は、

- 基礎となる沈下防止板を設置する。軌道敷に隣接した作業構台から、簡易構台を線路上空に張り出す。
- 小型掘削機を使用して線間の基礎杭を打設する。
- 柱・梁・スラブを仮設構台上から架設する。
- 構築した本設構造物を作業構台として利用し、～の作業を行う。

では簡易構台の架設・撤去、機械の移動は作業構

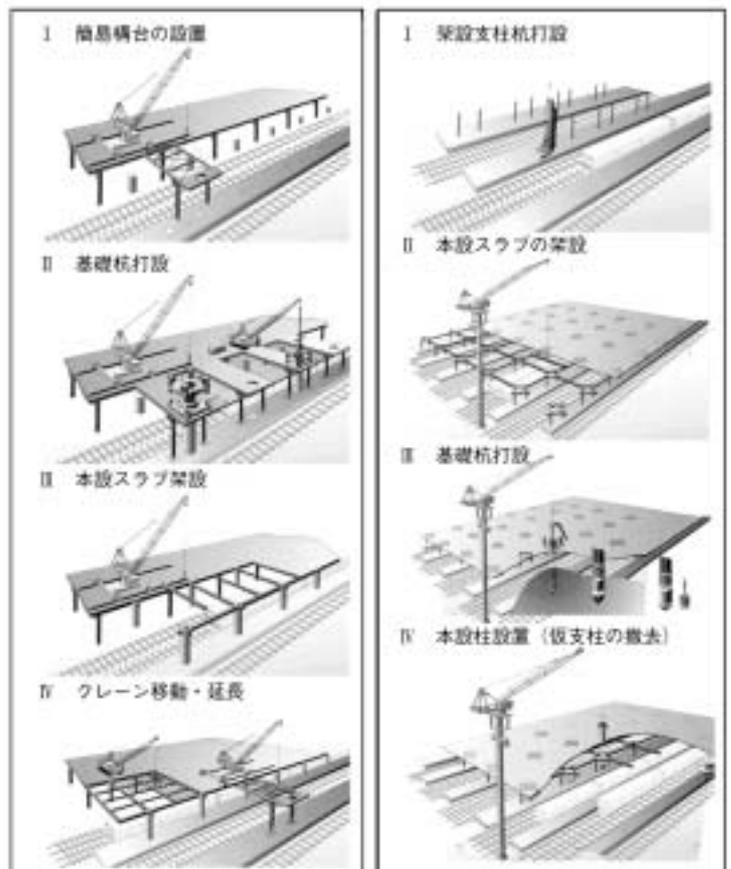


図1：A工法の施工手順

図2：B工法の施工手順

台上に設置したクレーンを使用して施工し、軌道面・ホーム面を極力使用しない。図中の簡易構台上では、今回開発した小型掘削機を用いたアースドリル工法を用いているが、リバース工法も利用可能である。

2.2 B工法

B工法は主に面線数の多い駅での大規模な工事を対象とした工法である(図2)。手順は、

鋼管打込み式による簡易な仮設杭を打設し、仮支柱を建てる。

本設の梁・床版を架設する。

本設床上から基礎杭を施工する。

柱を設置し、仮支柱を撤去する。

では小型・軽量で高速施工が可能な鋼管杭打ち装置を新規開発している。これを隣接地等に設置したクレーンにより移動して仮設杭の打設を行なう。仮設杭・柱に支持された本設床版には仮設開口を設け、ここから基礎杭・本設柱の施工を行なう。

AB両工法とも、線路上空と地面の間は、杭径より一回り大きい鋼管(セーフティガード管)で防護し、駅利用者と列車の安全を確保している。セーフティガード管は地表部分の崩壊を防止するために地中に圧入するが、地中部分は施工後にソケット鋼管継手として杭と柱の接合に利用する。

2.3 工法の効果

本工法(A工法)を利用して、2面3線の駅に1400m²の人工地盤を構築するケースで試算を行った。施工順序の特徴から、線路上空階の床板までを一括して比較したところ、工費・工期ともに10%程度縮減できることがわかった。

3 工法の課題

- 工法成立のために以下の課題を解決する必要があった。
- 沈下防止版(簡易構台の基礎)の鉛直支持力特性の確認(A工法)
- 沈下防止版の水平抵抗の検討(A工法)
- 簡易構台上に設置する掘削機械の開発(AB工法)
- 上記の課題について述べていく。

4 沈下防止版の支持力確認試験

4.1 試験の目的

短時間に簡易構台を設置するために、簡易構台自体を軽量化するとともに、その基礎構造を簡易な板状の直接基礎とした。これを沈下防止版と称しており、杭孔の両側に配置する形とした(図1)。

山手線の線路敷で行った既存の調査¹⁾によれば地表付近はN=3~6程度の弱い地盤である。このような地盤上における支持力算定式の適用可能性、掘削孔が沈下防止版支持力に与える影響、沈下防止版どうしの近接配置画が支持力に与える影響の確認を目的として模型鉛直載荷試験を行った。

4.2 試験方法

関東ロームの粘性土を使用し、沈下防止版と、ケーシング(セーフティガード管の地中部)で保護された掘削孔を、鉄板とアクリル管により模擬した(表1)。作成した地盤はN=5程度の地盤であった。

沈下防止版を模した鉄板に載荷を行い、沈下防止版および周辺の沈下量、荷重、アクリル管のひずみを測定した。

4.3 試験結果

地盤の破壊は、地中変位が沈下防止版の直下に集中した局所せん断破壊の性状を示し、基礎の近接度合い、杭

表1: 載荷試験ケース

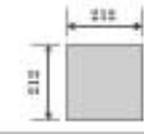
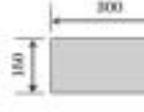
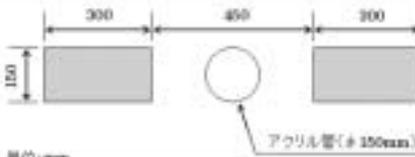
CASE	試験内容(平面図)	目的・方法
予備		CASE1, CASE2の予備試験
CASE 1		沈下防止版の支持特性を把握する
CASE 2		近接する沈下防止版間杭を打設する際のケーシングへの影響を確認する。



図3: 支持力試験

孔の影響はほとんど見られなかった(図3)。この試験で得られた極限荷重強さ、鉛直方向地盤反力係数を鉄道構造物等設計標準²⁾による計算結果と比較すると、概ね設計計算結果の方が試験結果よりも小さく、安全側の結果が得られることから、設計標準の適用は可能であると判断した。

5 沈下防止板の支持力解析

5.1 解析の目的

鉛直支持力について、設計標準の適用が出来ることが実験スケールにおいてはわかったので、実物スケールの挙動を予測することを目的としてシミュレーションを行った。

5.2 シミュレーション方法

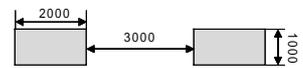
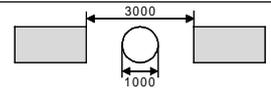
解析に用いる地盤の物性値は、三軸圧縮試験(UU試験)から得られた応力-ひずみ曲線をバイリニアでフィッティングする事によって弾性係数および強度定数を決定した。

模型試験の再現性は良好であったので、同じ物性値を用いて実物大の場合の検討を行った。Case3~8では、基礎の近接の度合いの影響確認や、掘削孔防護の安全性の検討を加えている(表2)。

5.3 ケーススタディーの結果

ケーススタディーを通して次の項目を確認することが出来た。

表2：シミュレーションケース

解析ケース	内容・沈下防止板形状	目的
Case1	シミュレーション解析のCase1	Case1の形状を実大で解析する。
Case2	シミュレーション解析のCase2	Case2の形状を実大で解析する。
Case3		・支持特性の把握 ・Case1と比較し、沈下防止板の形状が支持特性に及ぼす影響を把握
Case4		・近接2基礎の支持特性把握
Case5		・Case6と同様の沈下防止板形状で基礎間隔の違いによる支持特性の影響を把握
Case6		・実験Case2においてケーシングによる防護を行わない場合。
Case7		・Case2において、ケーシングの根入深さを3.3mとし、支持特性への影響とケーシングに伝達する力を把握する。
Case8		・Case2において、ケーシング厚さを10mmとする。

単位：mm

・近接する2基礎は離隔が3.0m(1.5B)程度以上離れると、単一基礎の支持力と同等となる。

・地盤中の降伏領域は深度方向に1.3m程度で、安全率1.5以下の範囲はおよそ1.5mより浅い範囲である。本支持力解析からは、ケーシングの根入れ深さは3m程度でよい。

これらのことから、沈下防止板の設計においては、N値が3程度の地盤であると想定し、設計標準による支持力から、必要面積を求め、上に示すようなことに注意して配置をすればよいことになる。設計荷重に関しては次節に示す。

6 沈下防止板の水平抵抗の検討

6.1 水平抵抗の検討目的

簡易架設構台にかかる水平力は線路に隣接する仮構台に負担させる設計とするが、施工状況によっては沈下防止板が水平力抵抗を負担せざるを得ない場合も考えられる。沈下防止板は鋼板を想定し、地盤に直接設置することを前提としているが、通常的设计において鋼板と地盤の粘着力を見込むことはないと考えられる。そこで、実験によって地盤が本来持つ粘着力の確認を行い、設計に反映させるとともに、水平抵抗力が不足する場合の対策の検討を目的とした。

6.2 沈下防止板で受け持つ水平力の検討

線路上空の簡易架設構台にかかる水平力および各支点にかかる水平力をフレーム解析によって検討した。沈下防止板と柱の接続は球座構造とし、沈下防止板には鉛直力と水平力のみが作用する。

次のものを設計荷重として考慮した(図4)。

- (1) 自重
 - a. 鋼材
 - b. 覆工板
 - c. 軽量覆工板
- (2) 機械重量
- (3) 機械トルク荷重
- (4) セーフティガード管
- (5) 地震時慣性力
- (6) 作業荷重

解析の結果から、ブレース等によって平面剛性を高めた簡易構台では、沈下防止板は水平力をほとんど負担しないことがわかった。しかし、目的でも述べた理由から、実施工に向け、沈下防止板によって

もある程度水平力に抵抗する方法を準備しなくてはならない。

6.3 水平力対策工

沈下防止板の水平抵抗力を確保するために、沈下防止板底面を改良し、地盤との密着を図ることとした。そのために表層を改良体によって置換し、鋼板底面には角鋼を配置することとした(図6)。

地盤の粘着力を最大限に引き出すために改良体に要求される性質は地盤と改良体の変形係数が同程度で、地盤より強い強度を持つことである。改良体はポリマー系の改良体を用いることにした。

ポリマー溶液の種類と添加量、使用材料(ローム、ローム+豊浦砂混合土、豊浦砂)などをパラメータとして検討を行い、強度、変形係数、施工性などを考慮し、改良体を表4のような配合とした。

表3：改良体の配合

調合済ポリマー溶液 (g)	37.9
豊浦砂 (乾燥状態) (g)	100.0
ポリマー溶液の調合	
5%ポリマー溶液 (g)	100.0
架橋剤 (g)	6.26
乳酸 (ml)	1.7
(g)	2.049
(目標pHとなるように調整)	
調合済溶液の目標pH	3.3

試験ではローム系の粘性土の模型地盤を作成し、対策の有無で2種類の試験を行った。

載荷装置は、沈下防止板を介して地盤に所定の上載圧を与え、水平油圧ジャッキを用いて応力制御方式で基礎に水平荷重を与える仕組みとし、基礎の水平変位、沈下、傾斜の観測を行った(図5)。

模型基礎は鉄板で作製し、基礎幅は模型地盤幅と等しく、実物の縮尺1/5に相当する400mm×400mmとした(図6)。底盤部には100mmピッチで28mm×28mmの角鋼を取り付けた。模型地盤作成後、基礎直下部を100mm掘削除去し、改良体を流し込み、基礎を設置した。

試験から得られた水平荷重～水平変位関係および上載圧～水平変位関係を図7に示す。なお、水平変位は基礎幅L (=400mm) で正規化した値である。

初期変形係数は対策型基礎の方が小さいが、限界水平抵抗、最大水平抵抗とも無対策を上回っており、対策の

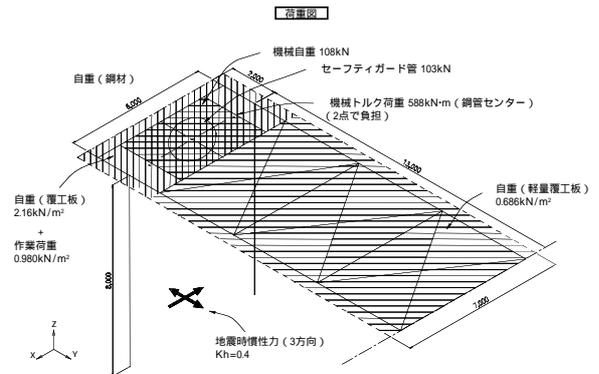


図4：解析に用いる荷重

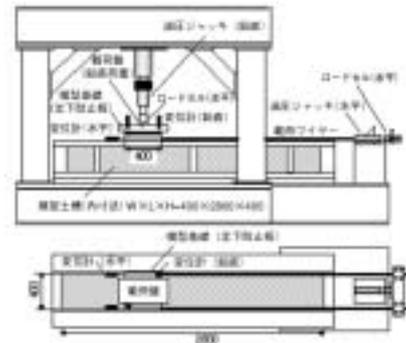


図5：載荷装置

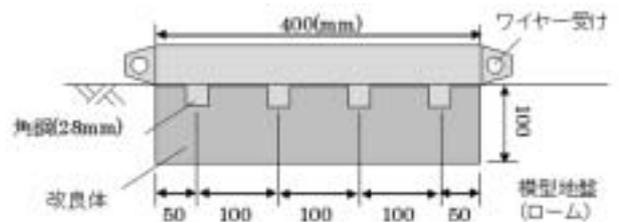


図6：模型基礎模式図

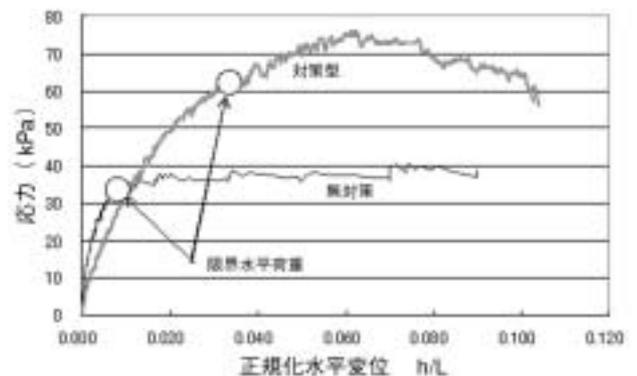


図7：水平変位荷重関係

効果を確認することができる。対策後の水平抵抗力は、地盤の粘着力と改良部分までの前面抵抗を合わせた値に近かった。そのため、粘着力を設計支持力としてみても十分に安全であると考えられる。

7 簡易構台上に設置する掘削機械の開発

7.1 アースドリル工法の導入

線路上空からの線間杭打ち工法の開発は、杭打ち工法自体を開発するものではなく、通常用いられる全ての工法を用いることが可能なシステムである。空間的制約のある場合にはTBH杭工法や深礎工法の適用が多い。しかし、空間的制約がなく、空頭を自由に利用できる場合には、建築工事で多く用いられるアースドリル工法の利用が可能であり、また、経済的である可能性がある。アースドリル工法を本設杭の施工法の1つとして検討した。

アースドリル工法の杭打機は、ドリリングバケットの回転によって掘削を行い、バケットを吊上げて排土を行なうという2つの機能を備えた大型の重機である。しかし、線路上空の簡易構台にこのような大型の重機を積載することはできないため、ドリリングバケットに回転を与える機能と排土機能を分離し、回転部分のみを簡易構台上に設置することにした。また、建築物の基礎で多く採用される拡底杭の施工が可能な性能を持たせることにし、これを「分離型アースドリル拡底掘削機」と呼ぶこととした(図8)。

7.2 掘削試験の目的

掘削機械は既存の全周回転掘削機(パワージャッキ)を用いることにした。掘削機に、ケリーバに回転を伝えるための治具の取り付けや、回転数の改造を行い、ドリリングバケットによる回転掘削機能を持たせた。また、過大な出力を低下させ、機械自体の軽量化をした。

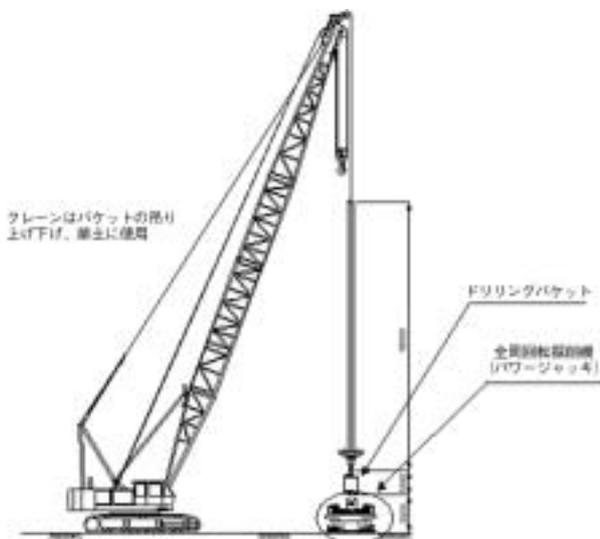


図8：分離型アースドリル式杭打ち工法

杭孔の鉛直性や施工速度の確認をとおしてこの掘削機の施工能力の確認を行った。

7.3 試験の実施

軸部杭径1.0m、拡底径1.5m、杭長20mの拡底杭を想定し、掘削試験を行った(図9)。

7.4 掘削試験

鋼管の圧入では回転トルク、押し込み力、回転数を測定し、建て込み深度0.5mごとの押し込み時間を測定した。建て込みはGL-6.5mまで行った。

軸部の掘削は、改造した全旋回掘削機を用いて、クレーンで吊り下げたケリーバとドリリングバケットを回転させ掘削を行い、回転トルク、押し込み力、回転数を測定し、1バケットの掘削深度を一定にして1バケットごとの掘削時間を測定した。回転数は低速、中速、高速の3種類で実験し、中速は通常アースドリル掘削を行う際の速度(7rpm程度)、低速を5rpm程度、高速を8~9rpmとした。

所定の掘削長の掘削後、底部の拡底(1500mm)掘削を行なった。また、杭の鉛直性の確認も含め、掘削孔の測定(超音波孔壁測定)を行った。

7.5 掘削機の試験の結果

鋼管の圧入とドリリングバケットを用いた掘削では、いずれも途中から押し込み力が必要になった。しかし、実際の施工においては、全旋回掘削機を設置する簡易構台重量自体が反力ウエイトとなり、十分な押し込み力(反力)が得られるため、特別な反力設備を必要とせず既存の機械と同等の施工能力を確保できることがわかつ

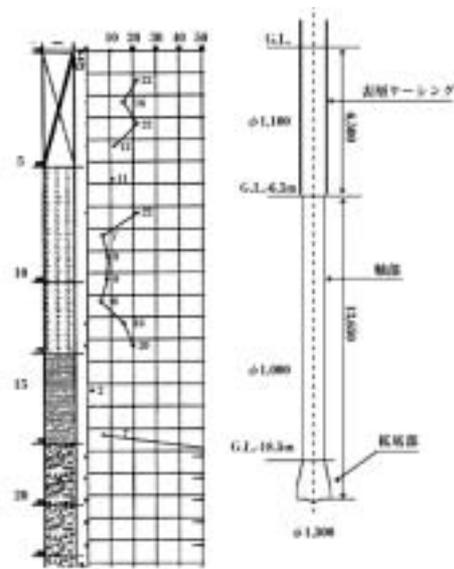


図9：試験掘削形状

た。杭孔の施工精度に関しては、東西方向の鉛直性が1/670、南北方向では1/500の傾斜となっており、一般的な場所打ち杭の管理基準 1/100⁴⁾を満足するものであった。また、拡底部では所定の形状を確保できていることが確認できた。

8 まとめと今後の方針

本研究開発では、各技術要素の検討を通して線路上空を利用した杭の施工法の可能性を検討してきた。

沈下防止板については、鉛直支持力は鉄道標準の設計が適用でき、水平抵抗力は必要により地盤の粘着力まで設計に利用することが出来る対策を考案した。

簡易構台は標準的な構造を示し(図12)設計に必要な荷重を整理した。

本設の杭打ち機については、線路上空からの施工に適する様にアースドリル工法を改良し、工法の1つに加えることができた。このようなことから、A工法についての技術が確立している。

B工法では、鋼管杭の急速施工法の開発を行ったが、超高周波パイロハンマを応用した鋼管杭打ちは、騒音が大きく、対策を引き続き検討している。

今後は、橋上駅工事などの実施工への導入を検討し、さらに現場に適したシステムの洗練、機能向上、安全設備の付加を図っていくことにより、技術を成熟化させていく必要がある。

本工法は線路上空のイメージと昼間の明るい施工のイメージから、「スカイパイリング」と名付けた。

最後に本報告は2001年度から鹿島建設(株)と行った共同研究開発の成果である。



図11：軸部掘削状況

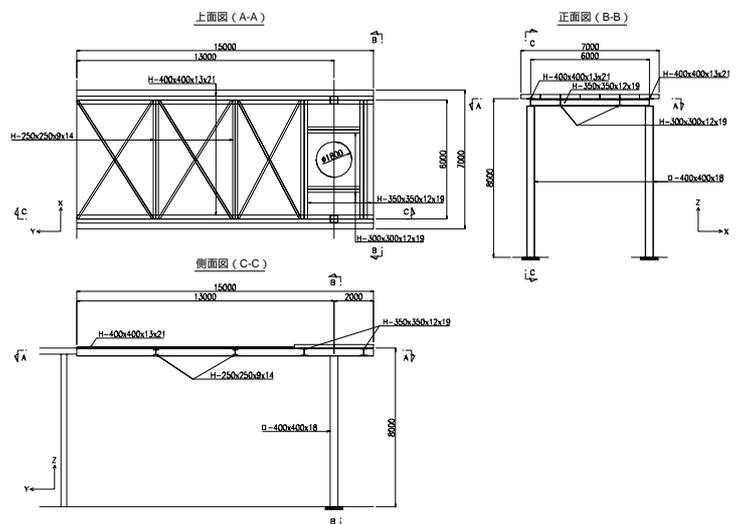


図12：参考図 簡易構台



図10：セーフティガード管(口元管)建て込み状況

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道：山手線(上)代々木原宿間地質調査，1990.11.
- 2) 運輸省鉄道局，鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物，丸善，2000.
- 3) 東日本旅客鉄道：線路上空構造物架設計画の手引き，1999.
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS4 地業および基礎スラブ工事，1997.