

沈下防止板の鉛直支持力・水平支持力に関する検討

Vertical and Horizontal Bearing Capacity of Spread Foundation Made of Steel Plate

小林 一 樹 (こばやし かずき)

東日本旅客鉄道㈱東京工事事務所

岡 本 道 孝 (おかもと みちたか)

鹿島建設㈱札幌支店

林 篤 (はやし あつし)

東日本旅客鉄道㈱JR 東日本研究開発センター
フロンティアサービス研究所 課長

山 田 岳 峰 (やまだ たけみね)

鹿島建設㈱技術研究所 主任研究員

村 上 武 志 (むらかみ たけし)

鹿島建設㈱ IT ソリューション部

1. はじめに

鉄道駅周辺の線路上空は都市における貴重な空間資源である。しかし、ここにペDESTリアンデッキなどの構造物を構築する工事では、列車の安全運行を確保するために特殊な仮設が必要なこと、作業が列車運行停止時間内(すなわち夜間)に制限されることなどから、多額の工事費が必要であり、線路上空の空間利用を困難にしている。特に1日あたりの作業時間が極端に短く制限されることは、工事長期化の主因となっている。この傾向は杭などの基礎工事について特に顕著である。

そこで、筆者らは線路上空を利用した場所打ち杭の施工技術の開発を進めてきた。この工法は線路上空に構台を設け、その台上から場所打ち杭を施工するもので、基礎杭の昼夜連続施工を実施可能とすることに主眼をおいている。この時、構台本体と施工機械等の荷重を支持するための基礎が必要となるが、この基礎として、「沈下防止板」と称する簡易な直接基礎形式の構造を採用することとした。本稿では、新工法の概要および工法開発において、沈下防止板の鉛直支持力と水平支持力に関して行った検討の結果について紹介する。

2. 新工法の概要

新工法では、線路に隣接した用地に仮設した構台から線路上空に簡易構台を架設し、この構台上に掘削機などを配置して杭施工を行う。構台と地表の打設区間は、列車や鉄道利用者の防護を目的としたケーシングを設置する(図-1)。これによって施工上、最も時間を要する掘削作業をはじめ、作業の多くを昼間に実施することが可能となる。一つのスパンが完成した後、完成したスパンにクレーンを移動し、簡易構台を前方に設置するという作業を繰り返すことで、多スパン構造にも対応することができる。ここで、簡易構台上への大型機械の非積載、必要機械の分離配置などで上載荷重を低減させ、構台基礎の簡略化を図った。基礎の簡略化は簡易構台の架設作業を容易化し、より高速な施工を可能とするが、簡易構

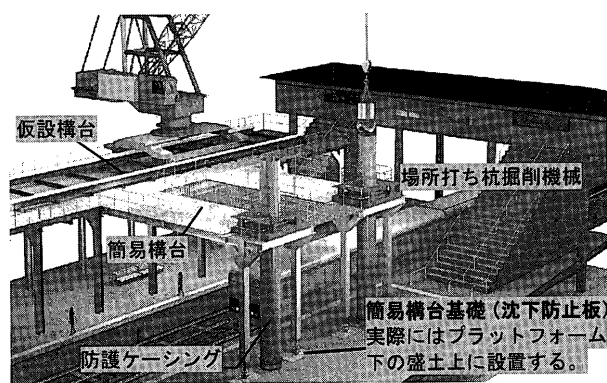


図-1 工法概要

台基礎にも、沈下防止板と呼称する覆工板などの一般建材で直接基礎を構築し、工事の省力化、資材の有効利用を図ることとした。ただし、簡易構台の安定性(地震時を含む)確保の観点から、以下の検討を行うこととした。

- ① 沈下防止板の鉛直支持特性と杭施工への影響調査
- ② 線路上空の仮設物に求められる耐震性能の確保を目的とした水平支持力向上技術の開発

3. 沈下防止板の鉛直支持性能と杭施工への影響

簡易構台は仮設物ではあるものの、営業線上空に設置されるものであり、高い安定性を持つ構造とする必要がある。また、沈下防止板については、十分な支持力を有すること、および並列する構台基礎の間に掘削される縦孔の孔壁に有害な変状を与えないことが要求される。近接して互いに影響を及ぼし合うと考えられる基礎に対する支持力評価方法、ならびに二つの基礎がその中間に位置する掘削孔へ及ぼす影響を確認することを目的とし、模型鉛直載荷実験ならびに三次元有限要素解析を実施した。

模型鉛直載荷実験は単独基礎および二つの基礎が並列して近接する場合の2ケースについて行った。模型地盤は関東地方の表層地盤を対象とし、神奈川県で採取したロームを締固めて作製した。また、模型基礎は150

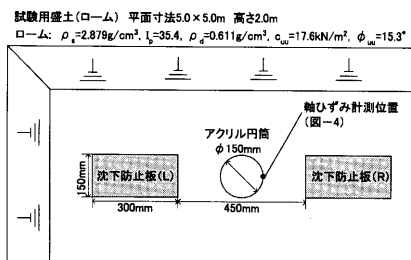


図-2 試験平面概要 (並列基礎)

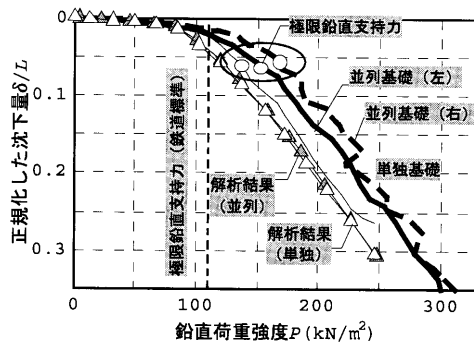


図-3 荷重沈下関係 (鉛直載荷試験)

mm (W) × 300 mm (L) の鋼板で、並列基礎のケース (図-2) では、二つの基礎中央に杭造成過程において使用する孔壁防護用ケーシングを模したアクリル管 (φ150 mm, $t=3$ mm) を地盤削孔後に圧入した。実験では毎秒0.17~0.2 (kN/m²) の速度で荷重を増加させて載荷した。これは、並列基礎を模したケースで、二つの基礎の沈下量が同一となるように制御することを意図したためである。一方、三次元有限要素解析は、載荷実験結果の妥当性検証、および実構造における基礎の挙動予測を目的として実施した。地盤は三軸圧縮試験 [UU] の結果を参考に、応力~ひずみ関係をバイリニア型の非線形弾性モデルで表現した。

荷重~沈下関係、アクリル管の軸方向ひずみの分布をそれぞれ図-3~4に示す。なお図-3には有限要素解析から得られた荷重~沈下関係も併記した。また、試験後の地盤断面を口絵写真-15に示す。

鉄道構造物等設計標準¹⁾ (以下、鉄道標準とする) をもとに算出される極限鉛直支持力は、単独基礎の試験で観測された極限鉛直支持力の約80%に相当し、おおむね妥当な値が設計上の安全側に得られた。試験から得られた並列基礎の極限鉛直支持力は単独基礎の支持力をやや上回る傾向にあるものの、有限要素解析結果では基礎近接の影響は、小さなものとなっていることから、今回想定される程度の基礎近接が、鉛直支持力に及ぼす影響は小さく、沈下防止板の鉛直支持力は鉄道標準に記載されている支持力評価式で評価可能と判断した。実験後の地盤断面の観察では、深度1.4 L 以深では明確な地盤変形は認められなかった。一方で、図-4 からアクリル管には、深度0.3~1.3 L の区間でひずみが発生し、それより深い位置では有意なひずみの発生を観測できなかった。以上を勘案すると、孔壁防護用のケーシングの根入れは深さ1.5 L か、それ以上を確保する必要があると推測さ

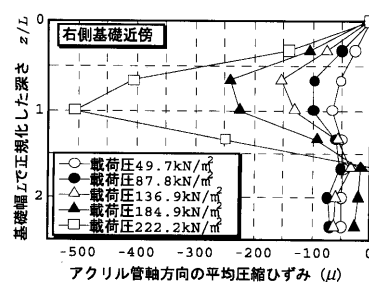


図-4 アクリル管の軸ひずみ分布 (並列基礎)

れる。

なお、誌面の都合上、結果は割愛したが、実構造挙動予測を目的として実施した解析も実験結果と同様な結果を与えていたことがわかった。

4. 沈下防止板の水平支持力とその向上技術

4.1 直接基礎の水平支持力と考案した対策技術

地震時の簡易構台の安定性確保の観点から、沈下防止板の水平支持力について検討を行った。鉄道標準では直接基礎の水平支持力を、基礎底面と地盤との摩擦成分、前面地盤の受働抵抗 (根入れがある場合) を考慮して評価する。このうち、摩擦成分は、次式で評価される。

$$R = f_{rs} V_d \tan \delta + f_{rc} A' c' \quad (1)$$

R : 基礎の水平支持力における摩擦成分

f_{rs}, f_{rc} : 地盤抵抗係数

V_d : 設計有効鉛直荷重

A' : フーチング底面の有効断面積

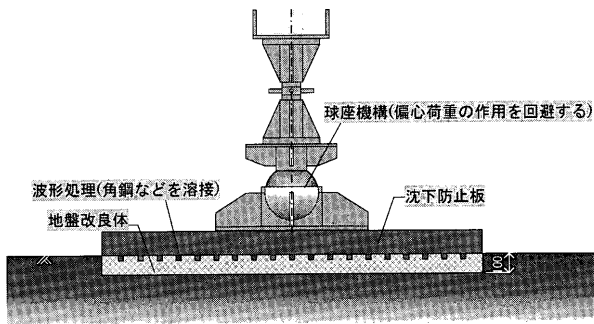
c' : 基礎底面と地盤の付着力

δ : 基礎底面と地盤の摩擦角

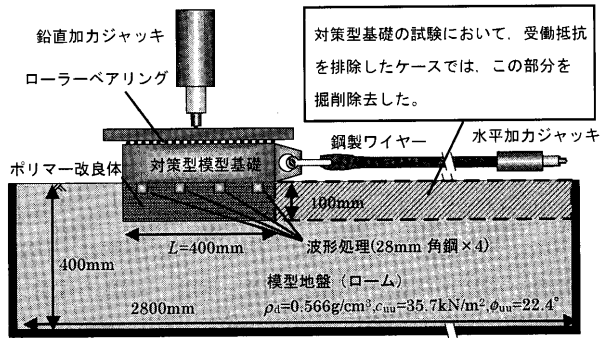
(1)式にかかわる強度定数のうち、 c' は一軸圧縮強度 q_u に1/3~1/2 を乗じた値として、 δ は内部摩擦角 ϕ に2/3~1 を乗じた値として評価することが指示されており、これら強度定数に乘じる係数は施工条件等 (現場打ち、もしくはプレキャスト) を考慮して設定することとなっている。このように直接基礎の水平支持力にかかわる強度定数を、地盤の強度定数を低減させて評価するのは、基礎と地盤の密着性の確保が難しく、基礎底面が潜在的構造弱部と認識されているためと推測される。

今回のように、鋼板を基礎として用いる場合は、プレキャスト基礎を用いる場合に準拠すると推測されたが、それよりも更に支持力が低下することも予想されたため、模型水平載荷実験を実施し、沈下防止板の水平支持力を改めて確認することとした。併せて、耐震性能向上を目的とした水平支持力対策型基礎 (以下、対策型基礎: 図-5) についても検討を行った。対策型基礎では、基礎に作用する水平外力を基礎地盤内に効率的に伝達させることを意図し、基礎直下地盤の表層を通常施工される基礎砕石厚と同等厚まで、地盤改良体で置換するものとした。これによって基礎~地盤間の密着度が改善されるとともに、水平外力を地盤内に伝達し、せん断面を地盤内に形成させることで、基礎の水平支持力を地盤の強度定数で評価することができる。また、固化体の造成によって基礎と地盤境界における付着性が改善することも予想

論文



図—5 水平支持力対策工の概要



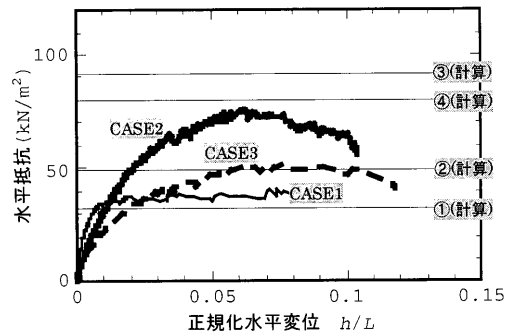
図—6 試験断面概要(対策型基礎)

されたが、基礎と改良体の付着の確実性を更に増すために基礎下面に角鋼などを溶接し、簡易な波形処理を施すこととした。

4.2 水平載荷試験

模型水平載荷試験は平面ひずみ条件において、無対策基礎(CASE 1)および対策型基礎(CASE 2)、ならびに対策型基礎において、改良体前面地盤を掘削除去し、受働抵抗を排除したケース(CASE 3)について実施した(図—6)。模型地盤は、長さ2.8 m、深さ0.4 mの鋼製土槽内に神奈川県産のロームを目標締固め度90%として転圧作製した。模型地盤の作製後、表面に模型基礎(基礎幅 $L=400$ mm)を設置し、上載圧(約40 kN/m²)を作用させた後、0.2 kN/stepで水平荷重を増加させて水平載荷を行った。対策型基礎で使用する地盤改良体にはポリマー溶液と豊浦砂を混合した材料を用いた。置換厚は基礎砕石厚を参考に100 mmとした。改良体の一軸圧縮強度 q_u は約300 kN/m²で、模型地盤の q_u (63.6 kN/m²)の3倍以上の値が確認された。一方、変形係数は、模型地盤の変形係数(3.8 MN/m²)とほぼ等しい4.0 MN/m²で、高強度ではあるが、地盤と同程度の変形性能を有する改良体を用いた。

図—7に試験から得られた荷重～変位関係を示す。なお、水平変位 h は基礎幅 L によって正規化した。ここから、対策工の実施によって基礎の水平支持力が約2倍に増加したことが分かる。図中には鉄道標準をもとに算出した基礎の水平支持力($c' = q_u/3$, $\delta = 2/3\phi_{uu}$: 基礎と地盤の密着が悪い場合を想定、図中①)を併記した。評価結果は実験結果よりやや小さめの値を与えているが、一方、無対策基礎の実験結果と同等の値を与えていることがわかる。対策型基礎の実験では、口絵写真—16に示



図—7 荷重～変位関係

すように、せん断面は地盤内に形成されており、支持力評価に際しては、模型地盤のせん断強度が有効に発揮されていると考え、基礎直下部について観測されたせん断面に沿って $c' = q_u/2$, $\delta = \phi_{uu}$ の強度が発揮されるものとして計算した(図中②)。この結果は、対策型沈下防止板の実験で、改良体前面地盤を掘削除去したケースの実験結果と比較的良好一致しており、改良体の構築によって基礎の支持力が地盤のせん断強度によって評価できるようになることを示唆する結果となった。図中③の計算結果は、 $c' = q_u/2$, $\delta = \phi_{uu}$ の強度が観測されたせん断面に沿って発揮され、なおかつ、改良体前面地盤の受働抵抗も考慮して求めた結果だが、いずれの実験結果をも上回る値が得られた。一方、図中④は、③とはほぼ同様の方法で求めた結果だが、改良体前面と地盤の摩擦を無視した点異なる。こちら、実験結果を上回る傾向は同じだが、③よりも実験結果に近い値を与える結果となった。今回のような基礎形式では、基礎直下以外での応力レベルが小さいため、改良体前面と地盤間の摩擦が有意な大きさに発現されないと便宜的に考えることもできるが、口絵写真にも示したように、当形式の基礎の水平支持力には、改良体のせん断変形の効果やせん断面の発達方向等が複雑に影響しており、合理的な支持力評価には、これらの影響を考慮する必要がある。また、実際の直接基礎の水平支持力問題には、三次元的な効果も含まれるため、これに関しても併せて検討が必要と思われる。

いずれにしても、以上の検討から、簡易な対策を施すことで、改良体前面の受働抵抗は考慮できないまでも、水平支持力(摩擦成分)を地盤本来の強度定数を用いて評価可能な程度には、パフォーマンスを向上させることが可能であることが確認できた。

5. ま と め

建設工事全般の合理化、低コスト化が進む中、今後は、現場仮設において、覆工盤などの鋼板を用いて簡易な基礎を構築するケースも予想される。そのような際に、本稿の内容が参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説、基礎構造物・抗土圧構造物編、1997。

(原稿受理 2003.12.9)