

地盤改良を用いた地盤免震基礎構造の免震特性に関する振動台実験

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○西村隆義 井澤淳 室野剛隆

1. はじめに

直接基礎構造は、上部構造物に入力される地震作用が頭打ちとなる免震特性が期待できるため^{1),2)}、この特性を積極的に利用することで合理的な設計が可能になると考えられる。著者らは、振動台による模型実験において、直接基礎がその免震特性により、杭基礎よりも慣性力の増大を抑えられることを明らかにした³⁾。ただし、直接基礎は地震時に沈下を生じる可能性があるため、地盤改良を併用することで免震特性と鉛直支持性能を併せ持つ地盤免震基礎構造を提案している³⁾。ここでは、地盤免震基礎構造のコンセプトを示し、その後、構造物の振動台実験を行い、地盤免震基礎構造の免震特性を検証した。

2. 地盤免震基礎構造のコンセプト

直接基礎は、底面に作用する鉛直応力の分布性状により、地震作用に抵抗する。図1に、直接基礎の抵抗モーメントと回転角の関係(M-θ関係)、および基礎底面の鉛直応力分布の変化(図中①→⑥)を概念的に示す。慣性力を受けない状態では、鉛直応力は基礎底面に一様に分布しているが(①)、慣性力を受けると鉛直応力分布に傾きが生じる(②)。傾きが大きくなると、基礎端部に浮き上がりを生じ始め(③:浮き上がり限界モーメント M_1 に相当)、M-θ関係において剛性低下を生じる(④)。更に慣性力が大きくなると、支持地盤の一部が鉛直応力の上限值に達し(⑤)、最終的には支持地盤の接地面積全域で上限値に達し、これ以上の慣性力に抵抗できない状態となる(⑥:最大抵抗モーメント M_{md} に相当)。この状態では、過大な沈下を生じる懸念がある。ここで、上記の抵抗モーメントと回転角の関係を免震効果の観点から整理すると、以下の3つの領域に分割することが出来る。

領域1：基礎は浮き上がりや地盤の塑性化を生じず、直接基礎は弾性応答する。(①→②)

領域2：基礎の浮き上がりや地盤の塑性化により構造物が長周期化し、免震効果が期待出来る。(③→⑤)

領域3：接地している地盤全域が塑性化し、沈下が増大していく。(⑥以降)

すなわち、直接基礎の免震効果を適切に発揮させるには、領域2を積極的に用い、かつ領域3には入らないようにするのがよいと考えられる。提案する地盤免震基礎構造は、直接基礎直下の地盤を補強または改良することで支持力を増加し、領域3の閾値である最大抵抗モーメント(⑥: M_{md})を増加させ、領域2における直接基礎の免震効果を最大限に生かすことに主眼を置いた構造形式である。ただし M_{md} の増加は、慣性力をより多く負担することを意味するため、免震効果を損なう懸念がある。最大抵抗モーメント時の直接基礎底面の力のつり合い変化を図2に概念的に示す。図に示すように、支持力が増加すると支持領域が狭くなるが、地盤反力の合力は自重だけで変わらず、アーム長が若干大きくなる程度なので、 M_{md} はそれほど大きくなるわけではない。よって、支持力を増加させても慣性力を過度に負担せず、沈下を抑制することが可能である。

3. 振動台実験による検証

2で示した地盤免震基礎のコンセプトを振動台実験により検証した。振動台実験は、図3に示すように通常の直接基礎(以下、基本ケース)と、地盤免震基礎構造(以下、改良ケース)の2ケースを実施した。

キーワード 直接基礎, 免震, 地盤改良, 振動台実験

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 耐震構造 TEL042-573-7394

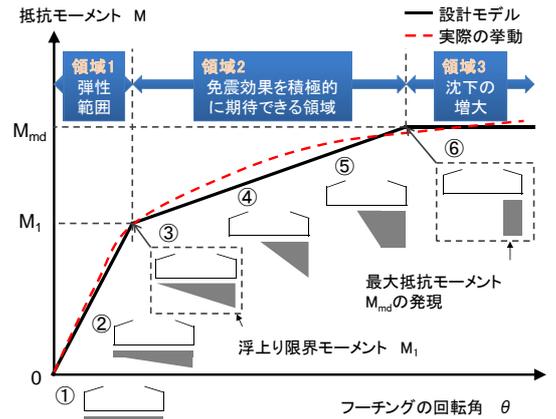
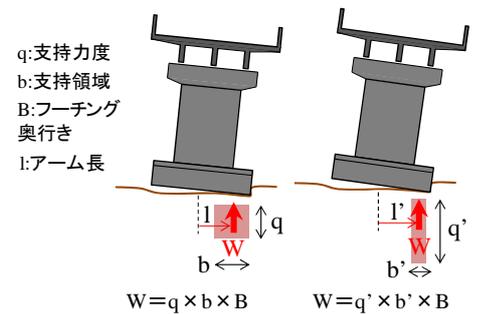


図1 直接基礎の抵抗モーメント—回転角関係と基礎底面に発生する応力分布の変化



(1) 通常の直接基礎 (2) 地盤免震基礎
図2 最大抵抗モーメント時の底面の力のつり合い

基本ケースは、軟弱地盤を模擬して構築した地盤上に、直接基礎模型を設置した。地盤免震基礎構造は、地盤に応じて改良方法を選択することになるが³⁾、今回は改良杭を用いた地盤改良を採用した。振動台は、鉄道総研の大型振動台および剛土槽を使用した。基礎層は粒度調整碎石(M40)をD値90%程度として作製し、その上に軟弱層を6号珪砂で相対密度が60%となるように作製した。改良杭($\phi=100\text{mm}$)は、豊浦砂にセメント、水およびベントナイトを添加して作製し、基礎の四隅にあたる位置に配置した。設置高さは、基礎底面から50mm下の位置から基礎位置までとした。橋脚模型はアルミニウム製で、実橋梁の1/20を想定して作製した。フーチング底面には、鉛直応力を確認するため、ロードセルを3箇所配置した。

入力波は、2Hzの正弦波10波を最大加速度を増加させて段階加振した。入力波の最大加速度は、100, 170, 240, 370galとした。

4. 実験結果

図4に、370gal入力時の模型天端位置での水平加速度と模型の鉛直変位の時刻歴応答を示す。加速度に着目すると、どちらのケースも約400galで応答加速度が頭打ちを示しており、支持力増加による応答加速度の増加は見られなかった。鉛直変位に着目すると、4~7秒付近までは、どちらのケースも5mm程度の振幅で変位している。その後、基本ケースは7.5秒以降で鉛直変位が急激に増大し、模型が沈下していく傾向が確認できる。改良ケースは、変位の増大は見られなかった。

加速度の頭打ちを詳細に確認するため、基本ケースの5.5秒付近を例に、ロードセル(①~③)で計測した鉛直応力の時刻歴を加速度とともに図5に示す。鉛直応力の時刻歴を見ると、①、②の順に鉛直応力が0に達しており、端部から中心にかけて浮き上がる様子が見られる。一方③では鉛直応力が増加し、②が浮き上がるとほぼ同時に頭打ちとなった。加速度の応答は、浮き上がりが進行するにつれ徐々に頭打ちとなった。

図6にロードセル③位置における鉛直応力と沈下量の関係を示す。沈下量が正の領域では、底面応力が、基本ケースが約30kPa、改良ケースが約80kPaで応力の頭打ちがみられ、地盤改良により支持力が増加していることが確認できる。図6のAでは過大な沈下を生じていないが地盤の剛性低下しており、これは地盤の一部が塑性化した状態と考えられる。すなわち、図1の領域2に対応し、図5の5.5秒付近もこれに相当する。また図6のBでは、基本ケースが基礎底面と接地している全域で塑性化が生じる領域3に入り、沈下の増大につながっていると考えられる。これは図4の7.5秒以降にみられる沈下の増大に対応している。

5. おわりに

本研究では、地盤免震基礎構造のコンセプトを示し、振動台実験により検証を実施した。その結果、以下の知見が得られた。①直接基礎は浮き上がりや地盤の塑性化により、応答加速度の頭打ちを生じる免震特性を発揮する。また、支持力を増加させても、応答加速度の増加は見られなかった。②地盤改良等を用いて沈下対策を行うことで、直接基礎の免震特性と鉛直支持性能を満足する構造が構築可能である。

参考文献 1) 林康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果，日本建築学会構造系論文集，第485号，pp. 53-62, 1996.7, 2) 羽矢洋，西村昭彦：大地震力を考慮した直接基礎の設計法の提案，土木学会論文集，No.595/VI-39, pp. 127-140, 1998.6, 3) 西村隆義，本山絃希，井澤淳，室野剛隆：地盤改良併用型直接基礎の免震効果に関する実験的研究，第31回土木学会地震工学研究発表会報告集，2011

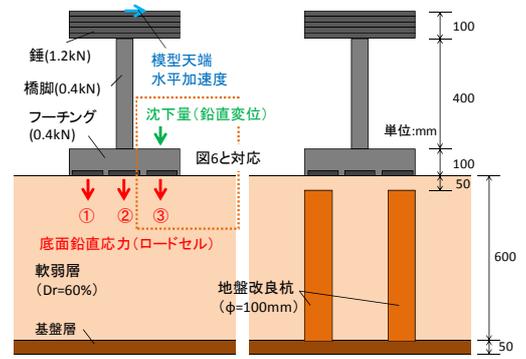


図3 振動台実験概要(左:基本ケース,右:改良ケース)

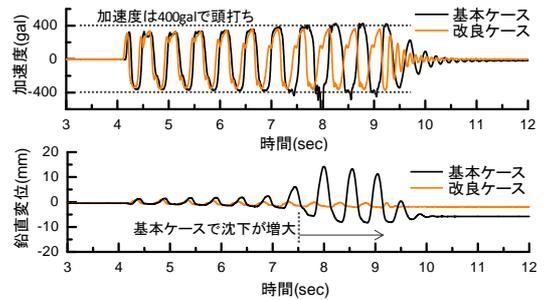


図4 時刻歴応答波形(上:水平加速度,下:鉛直変位)

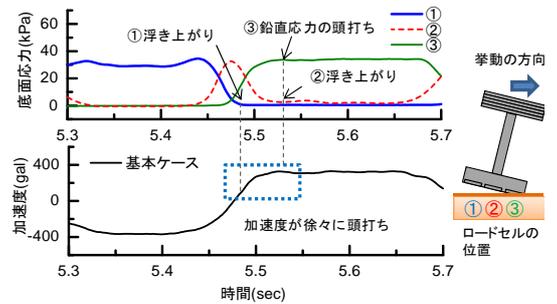


図5 鉛直応力と加速度の時刻歴応答波形(基本ケース)

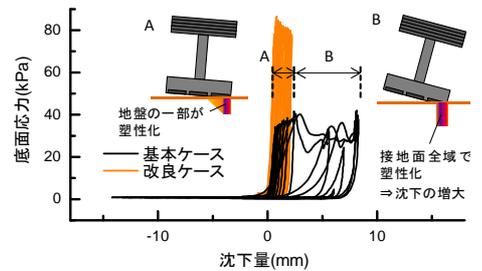


図6 底面の鉛直応力-沈下量関係