

土のうを敷設した直接基礎橋脚の 振動台試験による地震時挙動の評価

日野 篤志¹・室野 剛隆²・豊岡 亮洋³・土井 達也⁴

¹正会員 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング 構造技術部
(〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工博 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター

³正会員 工博 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

⁴正会員 工修 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

1. はじめに

近年の我が国においては、2011年の東北地方太平洋沖地震や2016年の熊本地震といった大規模地震が立て続けに発生しており、近い将来には首都直下地震や南海トラフ地震等の大規模地震の発生が危惧されている。地震が発生すると土木構造物には、揺れによる影響や津波や断層変位などといった随伴事象による影響が発生し、場合によっては構造物が損傷・崩壊する結果となる。その中で、地震動の揺れによる影響について考えてみると、構造物の揺れを低減させ損傷や崩壊を抑制する方法に免震や制震といった対策が挙げられ、昨今利用が拡大されつつある。しかしながら、免震や制震といった対策は、デバイスを用いることが一般的であるため、費用やメンテナンスの観点から導入が消極的であるのも土木分野の現状といえる。

一方で、構造物の基礎形式の1つである直接基礎にはその支持機構から、地震時にフーチングが浮き上がることによって免震や制震のように地震動の揺れを低減させる効果が広く知られている¹⁾。そのため、構造物の基礎に直接基礎を用いた場合には、構造物を支持する機能に加えて揺れを低減させる効果も得られるため効率的に構造物を揺れによる損傷から守ることができる。ただし、直接基礎には支持地盤の条件や用地境界の制約により使用が制限される場合も多く、他の基礎形式と比較すると利用できる条件が狭いといった特徴もある。

そこで、本研究では直接基礎の適用可能となる地盤条件を拡大するために、直接基礎底面に土のうを

敷設することで直接基礎として成立するために必要な支持力を補うことを想定している。土のうは安価な土木材料であり、多種多様な利用が可能なため多くの研究開発が行われている^{例え ば 2), 3)}。また本研究において土のうを敷設した直接基礎形式は、表層から数メートルの範囲が軟弱で直接基礎の利用が困難な地盤での適用を想定している。

本稿では、この土のうを敷設した直接基礎橋脚の地震時挙動を評価するために、橋脚模型を用いた加振試験を行った。加振試験結果をもとに、橋脚の支持性能を支持地盤上の橋脚と比較するために、振幅を変化させた加振ごとに支持力に関する項目として最大応答加速度、地盤の剛性に関する項目として地盤に対する構造物の伝達関数について整理を行った。

2. 試験概要

土のうを敷設した橋脚と支持地盤上の橋脚について挙動の比較を行うために、土のうの設置状況と段数をパラメータにして、表-1に示す4ケースについて模型を用いた加振試験を実施した。

(1) 試験装置および模型

a) 試験装置

試験装置には、幅2m、高さ1.4m、奥行き1.1mの固定土槽を用いることとし、土槽中に実物の1/25スケールの橋脚模型を2基設置した。

b) 橋脚模型

橋脚模型は、現行の耐震設計基準に基づいて設計

表-1 試験ケース一覧

ケース	土のう段数	備考
Case1	0	
Case2	3	支持地盤内に土のうを設置
Case3	3	緩い地盤中に土のうを設置
Case4	5	

された橋脚⁴⁾のディテールを用いて高さ約 400mm、フーチング幅 300mm×300mm の模型を用いた。桁の重量を再現するために、橋脚天端には 75kg のウェイトを設置した。

c) 地盤

地盤の条件としては、支持地盤に粒度調整砕石 M40、橋脚周辺の埋戻し部に東北硅砂 6 号を使用した。地盤の締め固め強度は支持地盤で D 値 90%、埋戻し部で相対密度 $Dr=60\%$ を目標値として地盤を設置した。

d) 土のう模型

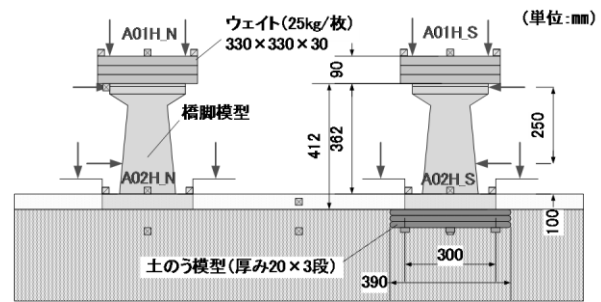
土のうについては、1 枚で橋脚のフーチング下面を覆える大きさとして、幅 400mm×奥行き 400mm×厚さ 20mm とした。土のう袋の材質には、鉄道分野において使用実績⁵⁾のあるジオテキスタイルを用いることとし強度に対して相似則を考慮して、高密度ポリエチレンのネット（網目ピッチ：縦糸 1.8mm、横糸 2.8mm）を用いた。間詰め材には鹿島硅砂 2 号を用いた。土のうの設置状況を図-2 に示す。

e) 計測装置

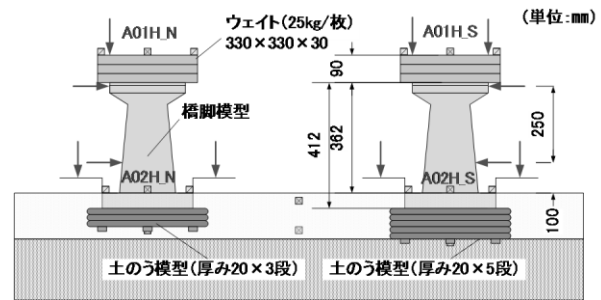
計測装置については、橋脚天端、フーチング上端における水平と鉛直方向の変位と加速度、周辺地盤における水平加速度、フーチング下面および土のう下面における鉛直応力の計測を実施した。なおサンプリング周波数はいずれも 500Hz とした。

(2) 試験ケースおよび入力地震動

試験は前述したように表-1 の土のうの有無や段数をパラメータとした 4 ケースを実施した。なお、試験装置の都合上、Case1 と Case2、Case3 と Case4 を同時に土槽内に設置して加振を行った。入力時震度波形は、鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）⁶⁾ に示される L2 地震動スペクトル I の地震動（G3 地盤）とし、相似則⁷⁾を考慮して時間軸の調整を実施した（図-3）。加振ケースとしては、図-3 の入力波の振幅を 100gal から 900gal までを 100gal 刻みで 9 ケースの加振を実施した。なお、試験体の状態を確認するために、各加振の間には振幅 100gal のホワイトノイズによる加振もあわせて実施した。



(a) Case1 および Case2



(b) Case3 および Case4

図-1 試験体の概要

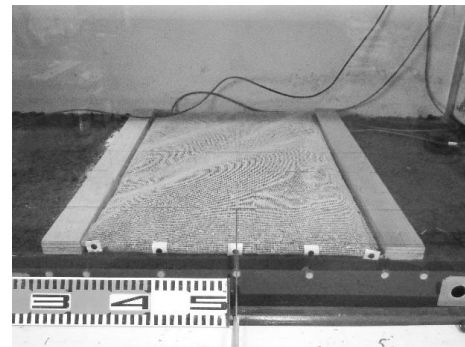


図-2 土のう模型の設置状況

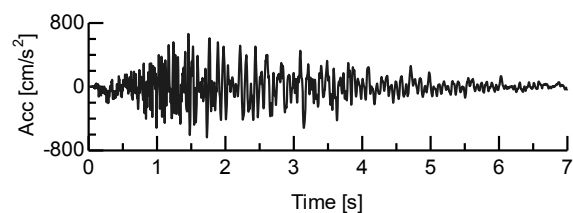


図-3 入力地震動波形の例（振幅調整前）

3. 試験結果の整理

(1) 最大応答加速度の分布

加振レベルごとの橋脚天端位置における最大応答加速度の分布を図-4に示す。なお、各波形の最大応答加速度を抽出する際には、20Hzのローパスフィルターによる処理を行った波形を用いた。Case1からCase4の全体の傾向としては、入力加速度が400gal程度までは応答加速度の増加は見られるものの、そ

れ以降で応答加速度は頭打ちを示しており、支持地盤上のCase1と同様に土のうを設置したケースについても直接基礎の浮き上がりによる免震効果が確認することができた。また、その頭打ちを示す応答加速度の値については、土のうを5段設置したCase4の値が若干低くなっているものの、それ以外のケースはCase1と同等の値となっており、土のうを設置した橋脚の支持力性能は、支持地盤上の橋脚と同等と言える。

(2) 加振ごとの伝達関数

次に主要な加振レベルごとに構造物天端位置におけるフーチング位置に対する伝達関数を整理した結果を図-5に示す。初期において、支持地盤の橋脚

(Case1)は土のう上の橋脚と比較して伝達関数が卓越する振動数の値が12Hzと他のケースより高く、地盤の剛性が高いことがわかる。土のう上の橋脚については、いずれも10Hz程度の振動数の値であり、初期状態においては土のうの設置状況や段数による違いは見られない。加振レベルが小さいうちは、いずれのケースも同様の伝達関数の形状を示すものの、加振レベルが大きくなると低振動数側の卓越が鈍化していき高振動数領域の卓越が大きくなり、その値のばらつきは大きくなっている。加振後の伝達関数については、振幅600galの加振までは波形にいずれも大きな変化は見られず、Case1の支持地盤相当の剛性と復元力を有していることがわかる。土のうを緩い地盤に設置した橋脚(Case3)と土のうを5段設置した橋脚(Case4)では、600gal以降の加振において土のうを5段設置した橋脚の卓越振動数が徐々に低下しているため塑性化が進んだことがわかる。

なお、振幅900galの加振後では、波形のばらつきが見られ土のうを5段設置したCase4以外は卓越振動数が初期の値より高くなる傾向を示した。これは、試験状況からも周辺地盤が直接基礎底面に流入してきたためと推察される。

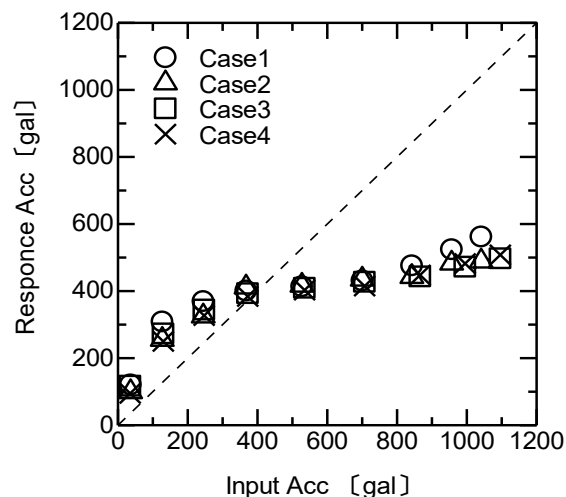


図-4 最大応答加速度の分布

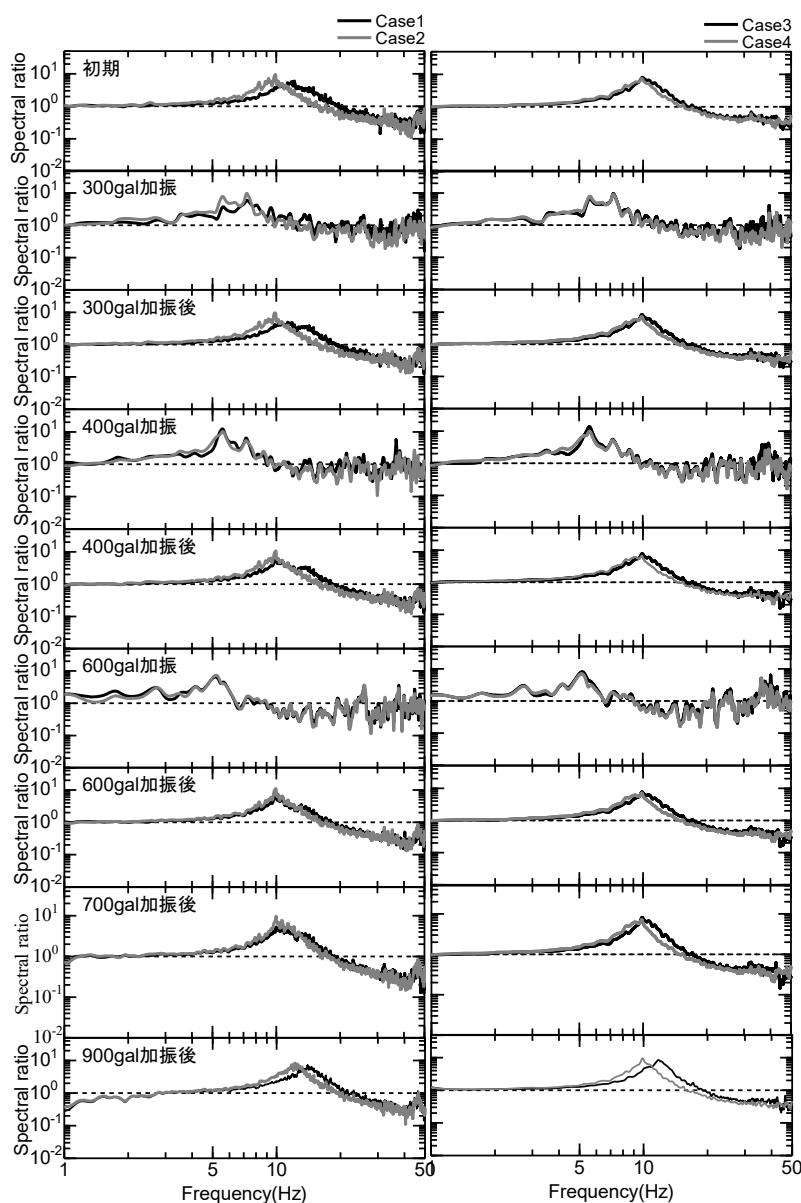


図-5 伝達関数の変化

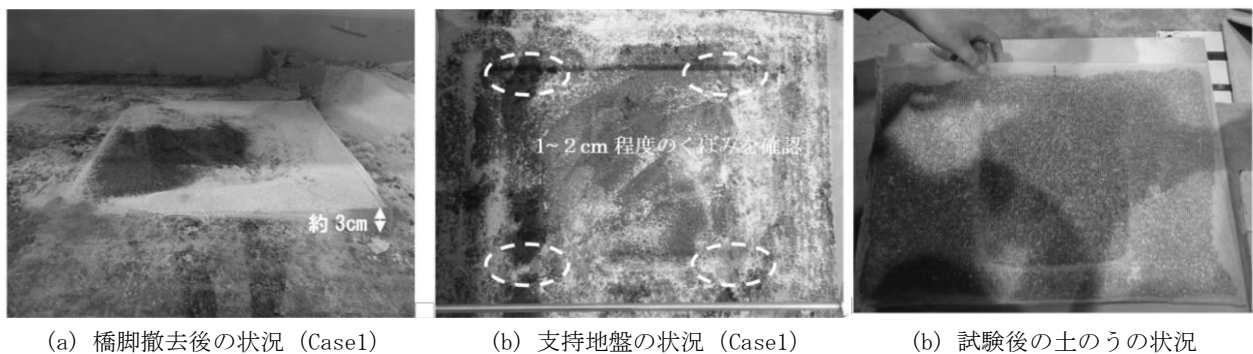


図-6 試験後の状況

(3) 試験後の状況確認

Case1 および Case2 の試験終了後に橋脚を撤去し、フーチング底面の地盤の状況について確認を行った。確認を行った結果、支持地盤上の橋脚 (Case1) ではフーチング下面に周辺の埋戻し土 (東北珪砂) が流入しており、3cm 程度の厚みになっている箇所も存在した。また、その砂を撤去すると、四隅に 1 ～2cm 程度のくぼみが支持地盤上に存在していた。これはフーチングが浮き上がる際に先端に応力が集中するため支持地盤の損傷が発生したと考えられる。次に、支持地盤中に土のうを敷設した橋脚 (Case2) では、上記のような埋戻し土が土のうを覆うような現象は確認できなかった。ただし、土のうは間隙が多いため流入した埋戻し土が土のう内に通過した可能性は否定できない。また、土のうの損傷について確認を行ったが、土のう袋に破れや擦れといった損傷は確認できなかった。土のう袋の損傷については、他のケースでも確認できなかった。

4. まとめ

表層数メートルの範囲が軟弱な地盤において、構造物の基礎を直接基礎化するために、土のうを敷設した直接基礎橋脚を提案し、加振試験によってその性能について確認をおこなった。その結果以下のような知見が得られた。

- ・ 土のうを敷設した橋脚は、支持地盤上の橋脚と同等の加速度において応答加速度の頭打ちを示す結果となり、本条件下では支持地盤上の橋脚と同等の支持力を有することがわかった
- ・ 土のうを敷設した橋脚は、支持地盤上の橋脚と比較すると剛性は 1 割程度低いものの、加振後の残留変形による剛性の低下は確認されなかった
- ・ 土のうの設置方法や段数については、支持力

に関する影響は小さいが、剛性については加速度が大きくなると土のうの段数が多い場合には塑性化し易い可能性がある

- ・ 土のうの袋材料にジオテキスタイルを用いることで、土のう袋の損傷は回避することができる

これらの結果より、土のうを配置することで、支持地盤上の橋脚と同等の性能を確保することができるとわかった。したがって、土のうを用いることで、低コストで直接基礎を実現することが可能となり、浮き上がり効果による揺れの低減までを期待することができる。今後は、本試験結果から土のうと地盤の動的相互作用に関して深度化を図るとともに、数値解析によって土のうの効果を定量的に評価する予定である。

参考文献

- 1) 林：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，1996
- 2) 松岡元，劉斯宏，長谷部智久，島尾陸：土のう積層体の変形・強度特性と設計法，土木学会論文集 No.764Ⅲ-67，PP.169-181，2004
- 3) 山本春行，松岡元，島尾陸，長谷部智久，服部真人：土のう積層体の繰返しせん断特性と減衰乗数，第38回地盤工学研究発表会，2003
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 設計計算例 直接基礎橋脚，2016
- 5) 野中隆博，小島謙一，米澤豊司，佐藤貴史，森野達也，青木一二三：パイルスラブ式盛土における改良杭頭部ジオテキスタイル土のうの特性評価，ジオシンセティックス論文集第27巻，2012
- 6) 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，2012
- 7) 香川崇章：土構造物の振動模型実験における相似則，土木学会論文報告集第275号，1978