

盛土中に建設された構造物の 地震時挙動把握のための基礎的検討

坂井公俊¹・田上和也²・室野剛隆³

¹正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

1. はじめに

河川橋梁などでは、盛土地盤中に橋脚が建設されている事例が見られる。この場合、盛土という振動系と橋脚という振動系のお互いが相互作用を及ぼしあうと予想されるが、その挙動に関してはほとんど解明されていない。

そこで本研究では、盛土地盤中に直接基礎を有する橋脚模型に対して、振動台実験を行い、地震時において盛土の存在が橋脚にどのような影響を与えるのか確認した。また、その結果に基づいて耐震性評価を行う場合の考え方についてとりまとめた。

2. 実験概要

実験は図1に示すように合計6ケースについて実施した。Case 1～3では各要素単体での挙動把握を目的としている。Case 4は橋脚の耐力（降伏震度）が盛土の耐力より高い場合を、Case 5は橋脚の耐力が盛土の耐力より低い場合を想定した。なお、Case 6は比較のために平地盤中に深く埋設された橋脚を想定

した。

模型地盤は、鋼製固定土槽内（長さ2.1m、幅1.1m）に硅砂6号を用いて作製した。軟弱盛土地盤は、相対密度が60%程度となるように空中落下法により作成した。なお、軟弱盛土地盤のみ地表面の崩壊を防ぐために、地表面10mm程度を霧吹きで含水状態とした。一方、硬質盛土地盤は、含水調整した試料を人力により撒き出し、締め固めることで相対密度が60%程度となるようにした。支持地盤は、相対密度が90%となるように空中落下法により作成した。

橋脚模型概要を図2に示す。橋脚模型は、鋼製模型橋脚とし、上部工慣性力の影響を考慮するために、橋脚模型天端におもりを設置した。

盛土および橋脚の固有振動数が20~30Hz程度であることを勘案して、加振波は、正弦波（10Hz30波）を基本とし、加速度レベルを徐々に大きくした。載荷実験装置は、鉄道総研が所有する中型振動台を用いた。主要な計測項目は、振動台、橋脚天端での加速度、変位、盛土－橋脚間の土圧（ロードセル）である。

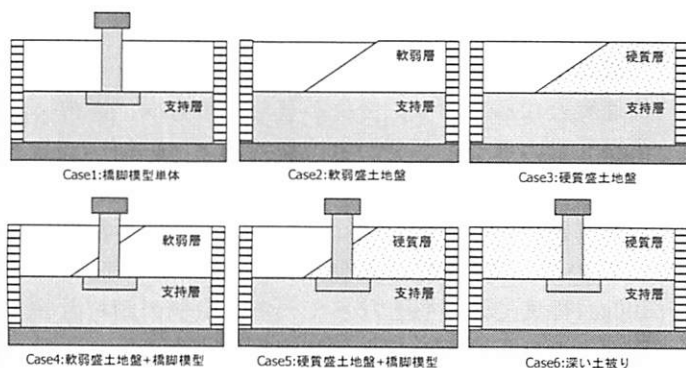


図1 実験ケース



図2 橋脚模型概要図

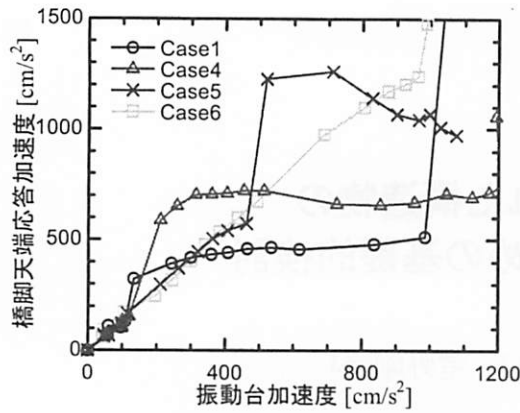


図3 加振加速度－橋脚天端応答加速度

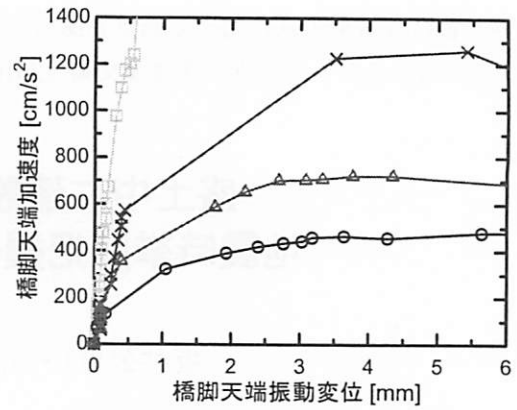


図4 橋脚天端加速度－変位（最大値）

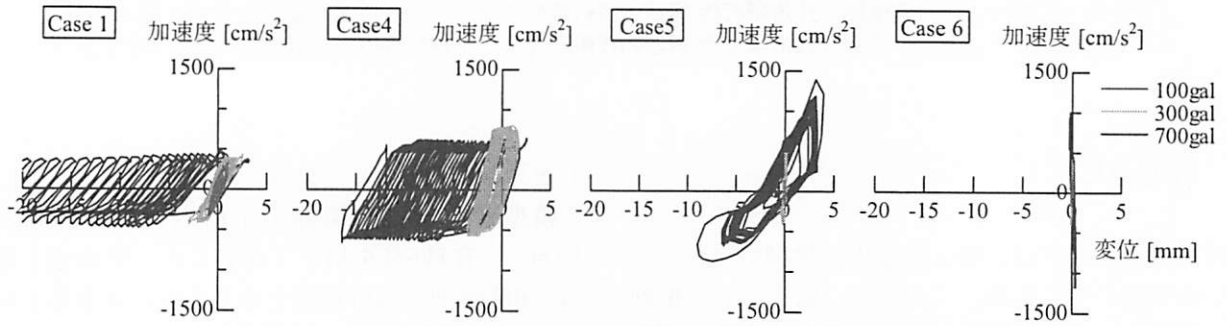


図5 橋脚天端加速度－変位

3. 実験結果

(1) 橋脚天端の最大加速度，最大変位

加振加速度の最大値と橋脚天端応答加速度の最大値との関係を図3に示す。また、橋脚天端の加速度－変位関係を図4に示す。ここで変位の符号は橋脚が盛土を押し込む方向がプラスである。

Case 1の橋脚単体では、入力150galで他のケースよりも応答が大きくなり、300gal程度からは応答加速度が頭打ちになっている（図3）。これは直接基礎が浮き上がりを開始（画像で確認）したためである。その結果、図4に示すように変形が急激に増大している。このような特性は既往の直接基礎の振動実験でも確認されている。なお、最終的に橋脚は転倒した。

Case 4の軟弱盛土中の橋脚は、200gal程度の入力から急激に応答加速度が大きくなっている（図3）。盛土の崩壊が当該加速度で発生（目視確認）しており、盛土の変形が橋脚に作用として働いたために、応答加速度が大きくなったものと考えられる。また、700gal程度で応答加速度が頭打ちになっている（図4）、これは直接基礎が浮き上がりを開始したためと考えられる。浮き上り限界加速度が、Case 1と200～300gal異なるが、これはCase 4では橋脚背面の土の自重により、浮上りに対する抵抗が大きくなっ

たためである。

Case 5の硬質盛土中の橋脚は、450gal程度までの加振では応答は入力と共に線形的に大きくなっている。しかし、500gal加振において急激に加速度応答が大きくなった（図3）。この理由については(2)で考察する。

Case 6の平地盤中橋脚は、入力レベルの増加に伴う急激な応答増大も見られず、ほぼ線形的に応答が大きくなっている。他のケースに比べて地盤が安定していることを示唆している。

(2) 橋脚背面ロードセルによる土圧測定結果

100gal, 300gal, 700gal加振時の橋脚背面のロードセルによる土圧～変位関係を図5および図6に示す。図は地震時増分土圧を示している（静止土圧がゼロ）。なお、符号は盛土を押し込む方向がプラスとした。

橋脚単体（Case 1）では±400galが浮き上り限界加速度となっており、変位が著しく負方向に進行・累積していることが分かる。最終的には転倒に至った。

軟弱盛土中の橋脚（Case 4）も徐々に変形が累積している。加速度は負側で600gal程度、正側は700gal程度で頭打ちとなっている。負側の頭打ちは、背面土の自重による浮き上り限界加速度の上昇に起因するものであると解釈できる。正側の頭打ちは背

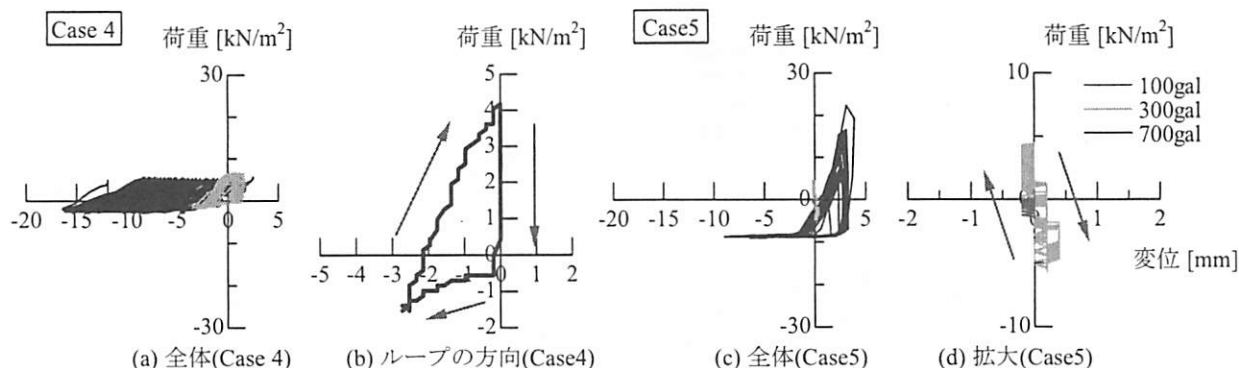


図6 橋脚背面ロードセル橋脚天端変位

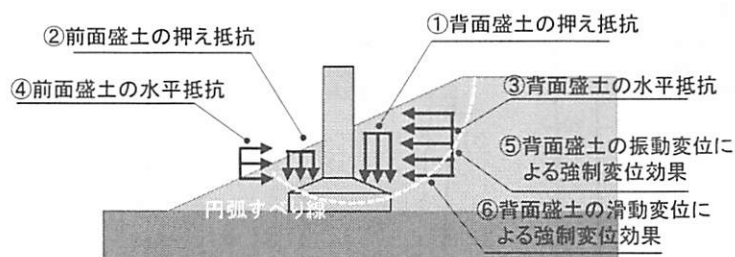


図7 盛土-橋脚系における相互作用の概念図

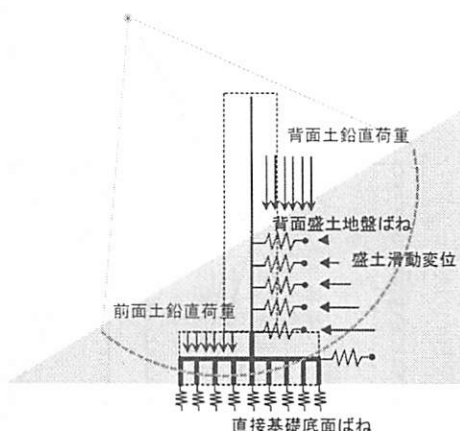


図8 設計解析モデル

面盛土の受働抵抗に起因するものである。もう少し詳細に土圧～変位ループを分析すると、橋脚が盛土と逆方向へ変形する際には静止土圧相当が作用（図中はゼロ）し、変形が反転すると直後に土圧が発現されており、直角三角形形状のループ形状を有している。このことから、盛土の滑動に伴い橋脚と盛土は常に接している状態であったことが分かる。その結果、押寄せる土塊の存在により正側に変形が戻れず、変位が負側に累積したものと考えられる。なお、橋脚背面土の押え効果によりCase1のような転倒は防がれている。

硬質盛土中の橋脚（Case 5）は、加速度は負側で600gal程度、正側は1000gal以上作用している。負側の頭打ちは、背面土の自重による浮き上がり限界加速度の上昇に起因するものなので、Case4とCase5ではほぼ同じ値となっている。一方、700gal加振では、橋脚が盛土と離れる方向に変形する場合には土圧が負の一定値（主働状態）となり、橋脚が盛土方向へ変形する際には、橋脚が元の位置よりも左（－）にあるときには土圧はマイナス、右（＋）にあるときは急激に大きな土圧が働いている。これは盛土が自立（崩壊せず）しており、負側への変形を助長することなく、橋脚が盛土方向に変形する場合は抵抗と

して作用していることを表わしている。その結果、正側の加速度が急激に大きくなったものと思われる。

4. 耐震設計への応用

実験から盛土～橋脚系に見られる相互作用としては、図7に示すような効果がある。

（抵抗効果）

- ① 橋脚背面盛土の押え抵抗効果
- ② 橋脚前面盛土の押え抵抗効果
- ③ 橋脚背面盛土の水平抵抗効果
- ④ 橋脚前面盛土の水平抵抗効果

（作用効果）

- ⑤ 盛土の振動変位による強制変位効果
- ⑥ 盛土の滑動変位による強制変位効果

上記①と②はそれぞれ橋脚が左右方向にロックングする場合に発現される。③と④はそれぞれ右左方向に変形する場合に発現されるが、一般には盛土の安定を考えると設計上④は無視すべきである。なお、これらの抵抗効果は、盛土が存在している限り発揮される。

次に、⑤は盛土高さが高い場合など、盛土本体の動的振動変位が大きい場合に考慮すべきであるが、

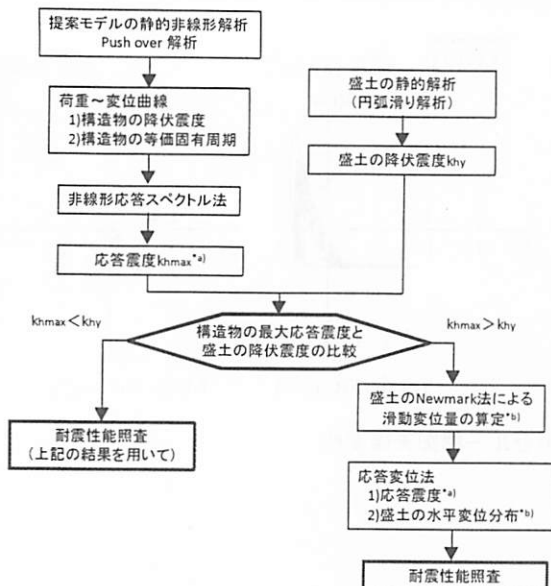


図9 設計フロー

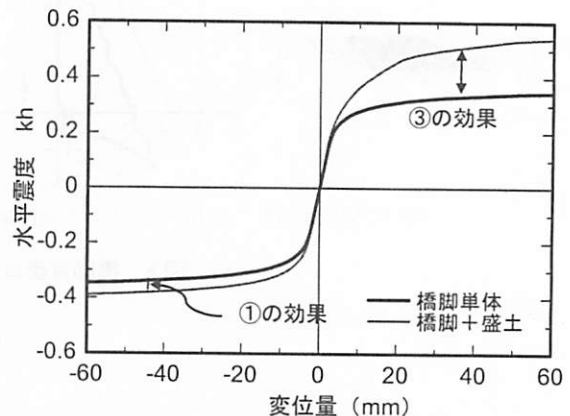


図10 提案した設計モデルによる水平震度－変位関係

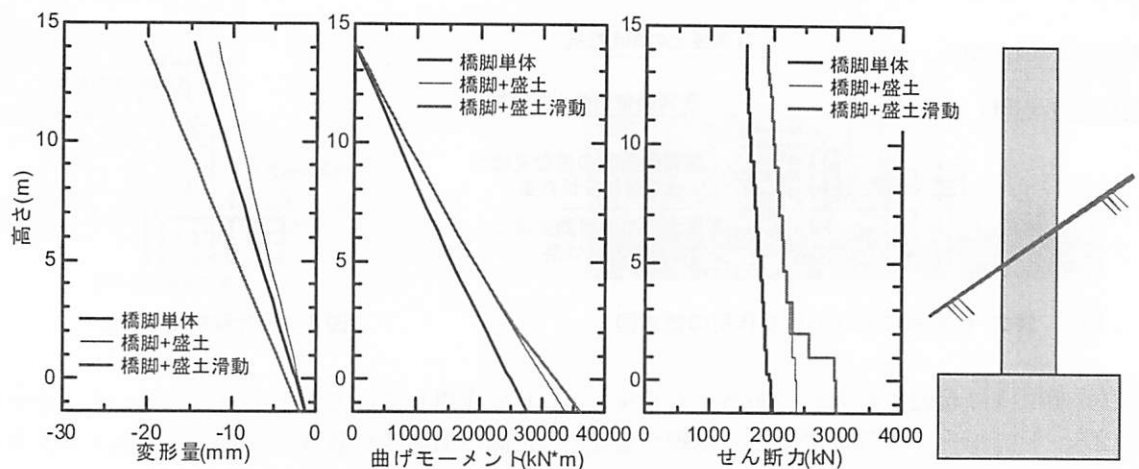


図11 提案した設計モデルによる変形・断面力比較

通常規模の盛土では設計上無視できる。⑥は盛土が円弧滑りを起こした場合に片方向に累積的に作用する効果である。

以上の特性を勘案して、本検討では、図8に示す設計計算モデルを提案した。本モデルを用いた耐震性能照査の手順のフローチャートを図9に示す。設計の流れは一般的な耐震照査と全く同じであり、設計実務的にも十分な精度と手間で盛土中に埋設された構造物の耐震性能照査が可能になる。

図10および図11にその一例を示す。図10は各要素の静的非線形解析より得られた橋脚天端の水平震度－変位関係を、図11は最大応答震度時の変形・断面力を比較を示したものである。

解析は、相互作用の効果として、①背面盛土の押さえ抵抗、③背面盛土の水平抵抗および⑥背面盛土の滑動変位による強制変位効果を考慮した。

図によれば、盛土の抵抗作用により剛性、耐力とも上昇し、橋脚単体に比べると盛土の存在により変

形量は小さくなる。しかし、盛土の滑動が加わると変形は累積的に進行することになる。一方、盛土の存在により耐力が増大することにより、地震時にはそれだけ大きな慣性力を背負うことになり、橋脚単体に比べると大きな曲げモーメントとせん断力が発生することに注意が必要である。さらに、盛土が滑動した場合には、橋脚下端で局所的に曲げモーメントとせん断力が増大する。

5. まとめ

盛土－橋脚系の振動実験により、動的相互作用の特性を把握し、その結果を反映させた設計解析モデルと照査方法を提案した。現在、FEM解析によるメカニズムの精査と提案モデルの改良を行っている。

ただし、実務的課題としては、抗土圧構造物の設計法との連続性をどう考えるか、という課題が残っており、今後検討を進める予定である。