

橋梁基礎免震工法の開発

－ 大型振動実験 －

田村 保* 大島 貴充*
高野 真一*

要 旨

軟弱地盤に橋梁基礎を建設する場合を想定し、従来一体となっている橋脚下部と基礎を分離し、その間にすべり材で形成される免震層を設ける構造を提案した。その免震層を有する橋脚基礎の振動特性および耐震性能を調べるために、免震層を形成する材料としてテフロン・砂層を選定し大型模型振動実験を実施した。レベル1地震動の場合には従来型と同様な挙動を示し、レベル2のような大きな地震動を受けた場合、応答加速度・杭のひずみともに低減効果があることが確認された。また、免震層の材料により振動特性が変化することがわかった。

1. はじめに

軟弱地盤に橋梁基礎を建設する場合、従来の構造では耐震性能を高めるために大規模な基礎が必要となりコストが嵩むことが多い。そこで、従来一体となっている橋脚下部と基礎を分離し、その間にすべり材で形成される免震層を設け、レベル2地震動のような強い地震力を受けたとき、橋梁下部構造と基礎構造間にすべりを許容する構造を提案した。免震層においてすべりを許容することで、免震層での摩擦減衰を期待でき、地震エネルギーを吸収・逸散させて被害が軽減できる。また、基礎への応答が低減することで基礎構造の簡素化を図ることができコスト低減にもつながる。ここでは、その免震層を有する橋脚基礎の振動特性および耐震性能を調べるために実施した大型模型振動実験について報告する。

2. 実験概要

2.1 模型概要

実験対象は一般的な杭基礎橋脚¹⁾とし、過度なロッキングを防止するためフーチング寸法を12m×12mに変更して用いた。実験模型は線形相似則に従って、縮尺1/10の断面を決定した。模型材料としては、場所打ち杭については、アルミニウム製パイプ(φ=50mm、t=3.0mm)を使用し、橋脚については、実物同様鉄筋コンクリート製とした。上部工については重量が相似則に適合するように、鉄板を使用した。地盤については、振動台上に2.0m×4.0mの鋼製枠を設置し模型実験用の土槽(H=1.5m)とした。地盤材料には相馬珪砂5号を使用した。地盤は、段階加振によって地盤が締固まらないよう目標相対密度を70%に設定した。なお、加振方向は橋軸方向とした。図-1、2、3にそれぞれ実験模型全景、

杭基礎模型、橋脚模型を示す。また、図-4に実験模型寸法および計測位置図を示す。計測器は、橋脚および地盤の応答加速度を調べるために加速度計を、橋脚のすべりやロッキングを調べるためにレーザー変位計を、杭のひずみを調べるためにひずみ計をそれぞれ設置した。



図-1 実験模型全景



図-2 杭基礎模型



図-3 橋脚模型

*本社土木設計部

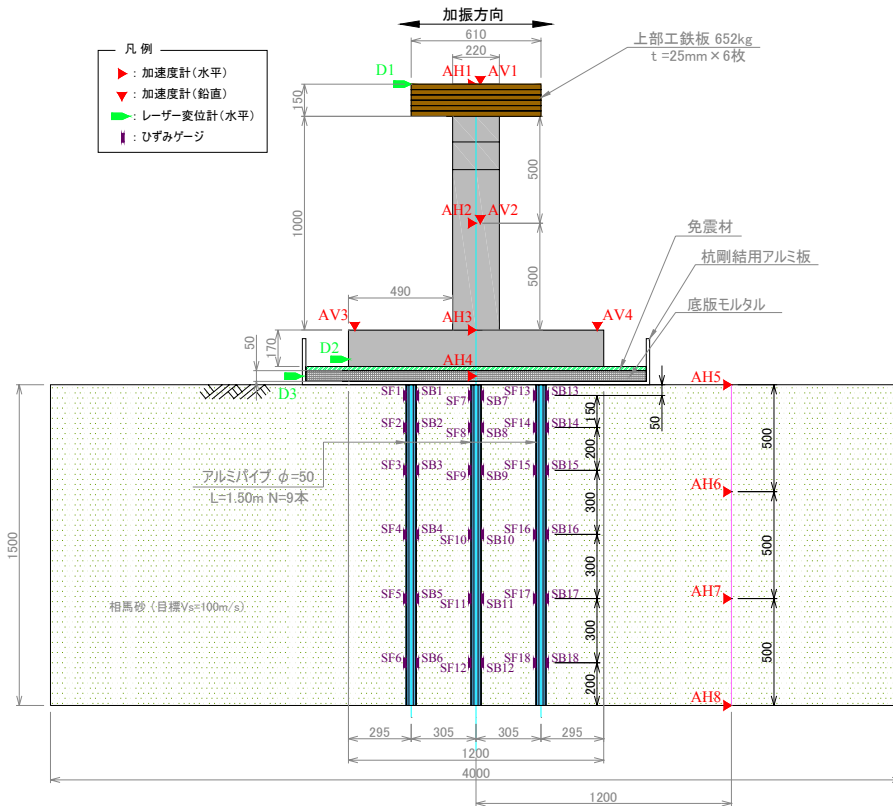


図-4 実験模型寸法および計測位置図

2.2 入力加振波形

入力加振波形には、正弦波と地震波を用いた。正弦波は、最大加速度100Gal、200Gal、300Galの3ケースについて加振振動数を1Hz～30Hzまで変化させた。波数は10波とし、前後に漸増漸減波を1波ずつ加えた。入力加振波形の一例を図-5に示す。地震波は、「道路橋示方書・同解説」V 耐震設計編(平成14年)6.3で規定されている地震波を用いた。本実験では、その中でⅢ種地盤のレベル1、レベル2タイプⅠ、レベル2タイプⅡで示されているそれぞれの波形のうち1波形を選択した。その波形を、作製した模型地盤の条件で次元地震応答解析を行い、基盤に引き戻したものを入力加振波とした。入力加振波の作成に用いた地震波形の時刻歴およびフーリエ振幅スペクトルを図-6、7、8に示す。

また、入力波のケース毎の地盤の入れ替えは行わず段階加振を行った。

2.3 免震層材料

免震層の材料には、摩擦係数が0.2程度のテフロンと摩擦係数が0.5程度となる相馬砂の2種類を用いた。なお、免震構造の効果を検討するため、底版とフーチングをボルトで剛結することにより従来型の一体構造とした非免震のケースについても加振実験を行った。テフロン・砂の摩擦係数は加振前に滑動試験を実施して調べた。

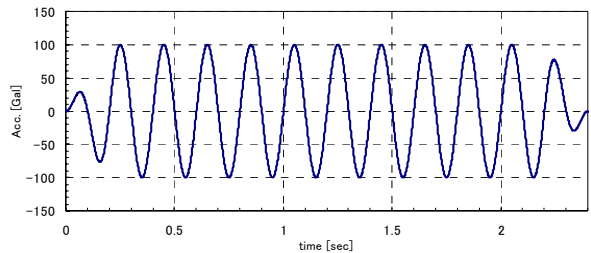


図-5 入力加振波形(正弦波 100gal、10波、5Hz)

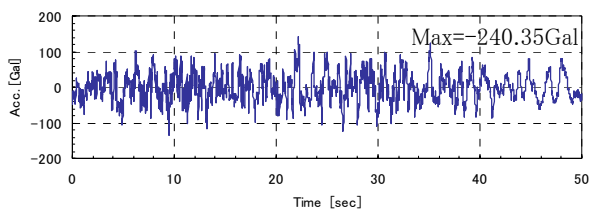


図-6 レベル1波形の時刻歴・フーリエ振幅スペクトル

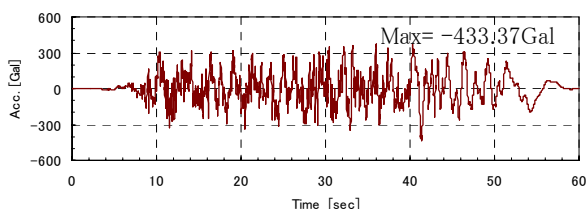


図-7 レベル2タイプI波形の時刻歴
・フーリエ振幅スペクトル

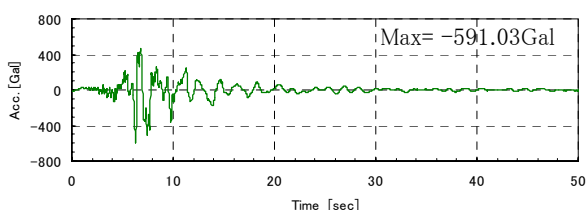


図-8 レベル2タイプII波形の時刻歴
・フーリエ振幅スペクトル

3 実験結果

3.1 摩擦試験

実験に先立ち、テフロン及び相馬珪砂5号の静止摩擦係数を求めるため引張試験を実施した。結果を表-1、2に示す。

表-1 テフロン静止摩擦係数

	荷重 F(N)	重量 M(N)	静止摩擦係数 μ
1回目	2041.01	15033.2	0.136
2回目	2290.31	15033.2	0.152
3回目	2194.89	15033.2	0.146
平均値			0.145

表-2 相馬珪砂5号静止摩擦係数

	荷重 F(N)	重量 M(N)	静止摩擦係数 μ
1回目	8884.792	15033.2	0.591
2回目	8481.098	15033.2	0.564
3回目	8606.565	15033.2	0.573
平均値			0.576

3.2 正弦波加振結果

実験結果として、入力最大加速度200Galの場合の加振振動数に対する各最大応答値の関係を図-9～12に示す。

最大加速度比(橋脚天端/入力)および杭頭最大曲げひずみについての周波数特性は類似の傾向を示しており、免震層を採用する場合はいずれも、非免震の場合と比較してその応答値が1/2～1/3に低減している。免震(テフロン)の場合は、明確なピークがなくなっており、非免震構造の固有振動数近くで特に大きな低減効果が見られる。また、免震(砂層)の場合は応答が低減しているもののピークは存在し、卓越する振動数は非免震よりも小さくなる傾向が見られる。橋脚最大すべり量および最大ロッキング角については、免震(テフロン)の場合、5Hz程度から振動数が小さくなるに従ってすべり量が急激に増大する傾向を示した。免震(砂層)の場合は、4～5Hzでわずかにすべりが発生している程度で大きなすべりの発生はないが、14Hz付近でロッキングが卓越した。非免震でもロッキング角度が免震(砂層)と最大値で同程度発生しているが、これは非免震の場合基礎の変形によるもの、砂層の場合はロッキングの影響もあると考えられる。また、免震(砂層)のロッキングが卓越する振動数は非免震の場合における橋脚の回転が卓越する振動数と比較して低振動数方向へ幅が広がる傾向が見られた。

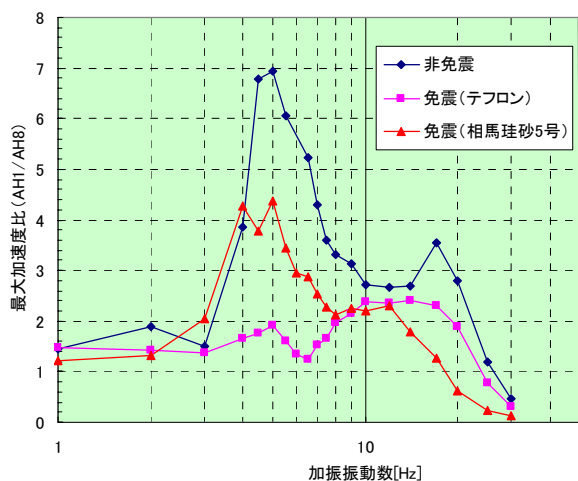


図-9 共振曲線 200gal-最大加速度比(AH1/AH8)

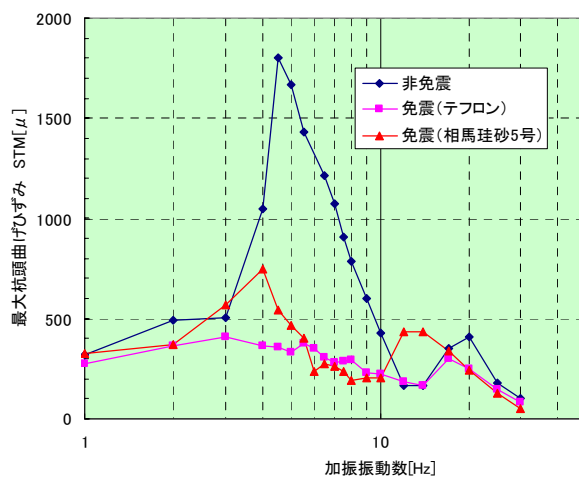


図-10 共振曲線 200gal-最大杭頭曲げひずみ
(STM1=(SF1-SB1)/2)

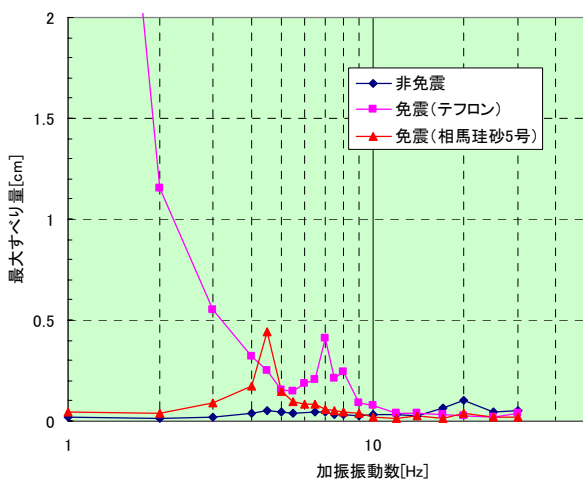


図-11 200gal-最大すべり量(DIS2-DIS3)

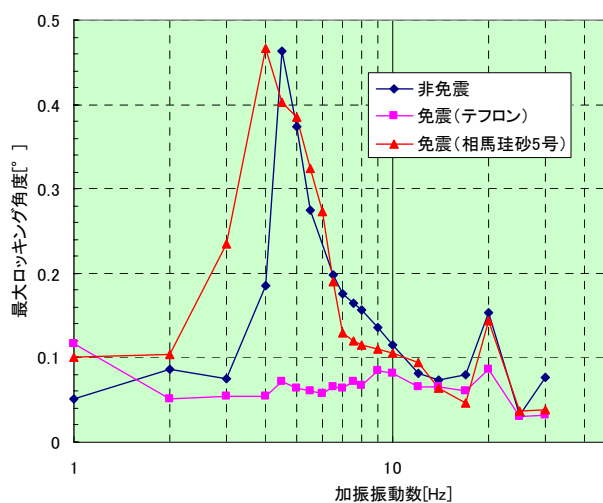


図-12 200gal-最大ロッキング角度

3.3 地震波加振結果

表-3に非免震、免震(テフロン)、免震(砂層)のそれぞれの各応答の最大値の一覧を示す。

レベル1の場合、免震層を採用したケースでも顕著なすべりは発生していない。免震(砂層)では、わずかに応答加速度が増加しており、これはロッキングによる影響であると考えられる。しかし、非免震と免震(テフロン・砂層)いずれのケースとも杭のひずみに変化がないことより基礎部分に関しては、ほぼ同様の挙動を示したと考えられる。

一方、レベル2の場合、非免震と比較して、免震(テフロン)のケースでは橋脚天端加速度は大きく低減したが、残留変位・すべり量が大きく発生した。残留変位はレベル2タイプIIの場合に100mmにもなった。免震(砂層)のケースにおいてもすべりが発生し、橋脚天端加速度が低減しているのがわかる。また、ロッキング現象がわずかであるが発生した。杭に発生した最大曲げひずみについては、非免震と比較して免震(テフロン)の場合は大きな低減効果が見られたが、免震(砂層)の場合は大きな変化が見られなかった。

また、レベル2タイプIIの加振結果については、図-13、14にケースごとの応答加速度の時刻歴を、図-15~19に応答変位量の時刻歴を示す。

表-3 地震波加振結果一覧表

項目	最大天端加速度 AH1 (Gal)			杭頭曲げひずみ STM1 (μ)			杭頭曲げひずみ STM7 (μ)			杭頭曲げひずみ STM13 (μ)		
	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層
実験ケース	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層
レベル1	255.9	223.4	310.4	231.7	217.8	199.2	216.4	179.3	177.3	計測不良	210.4	263.6
レベル2タイプ	868.2	549.3	774.9	908.9	734.6	928.1	625.0	547.2	630.4	"	624.0	837.8
レベル2タイプ	1133.8	428.4	769.9	1149.2	693.1	1111.1	1054.3	508.8	829.9	"	628.2	1088.7
項目	フーチング加速度 AH4 (Gal)			杭頭軸ひずみ STN1 (μ)			杭頭軸ひずみ STN7 (μ)			杭頭軸ひずみ STN13 (μ)		
	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層
実験ケース	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層
レベル1	194.3	191.6	200.9	86.5	74.1	79.2	32.7	26.8	39.9	計測不良	82.5	114.7
レベル2タイプ	662.8	774.5	766.9	241.0	133.2	239.5	144.5	57.8	76.3	"	157.1	252.2
レベル2タイプ	860.6	663.1	886.2	331.0	132.8	237.1	227.0	46.8	126.1	"	146.8	256.7
項目	天端最大水平変位 D1 (mm)			残留水平変位 D1 (mm)			最大すべり量 D2-D3 (mm)			最大ロッキング角 ATAN((D1-D2)/H) (度)		
	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層
実験ケース	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層	非免震	テフロン	砂層
レベル1	1.9	1.9	2.9	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.4	0.04	0.06	0.09
レベル2タイプ	7.0	91.9	17.8	0.0	80.7	6.7	0.4	87.8	7.9	0.17	0.17	0.39
レベル2タイプ	13.0	101.9	31.4	1.1	99.4	16.3	0.3	97.6	16.2	0.24	0.22	0.53

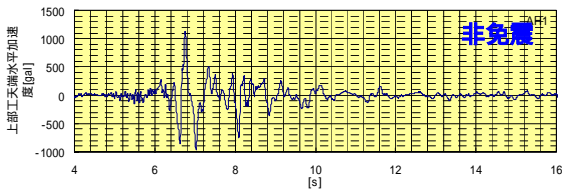


図-13 上部工天端水平加速度(レベル2タイプ)

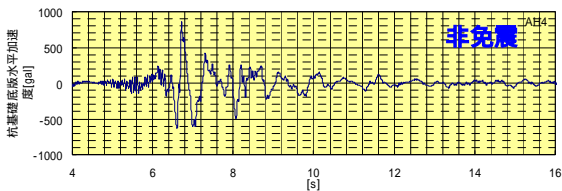


図-14 フーチング水平加速度(レベル2タイプ)

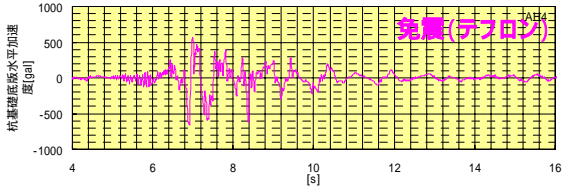


図-15 上部工天端水平変位(レベル2タイプ)

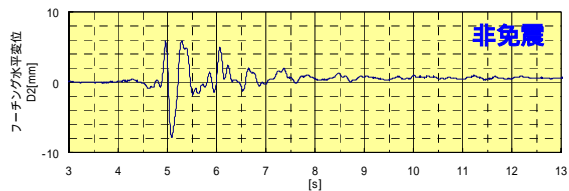


図-16 フーチング水平変位(レベル2タイプ)

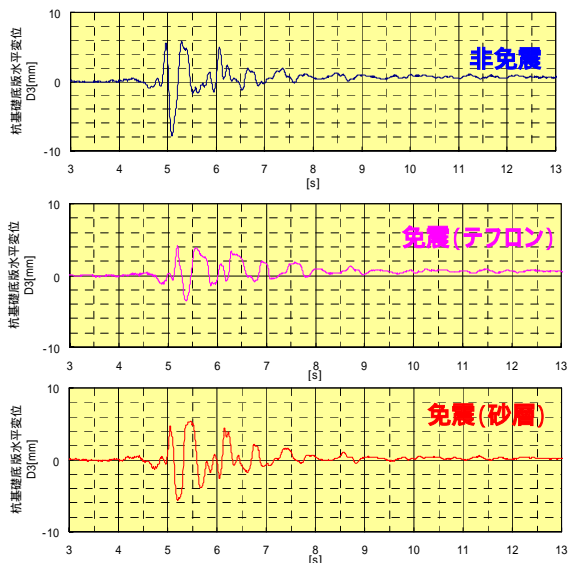


図-17 杭基礎天端水平変位(レベル2タイプ)

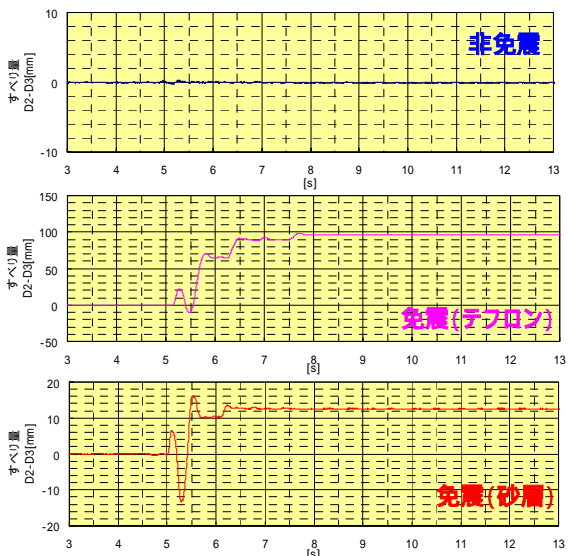


図-18 すべり量(レベル2タイプ)

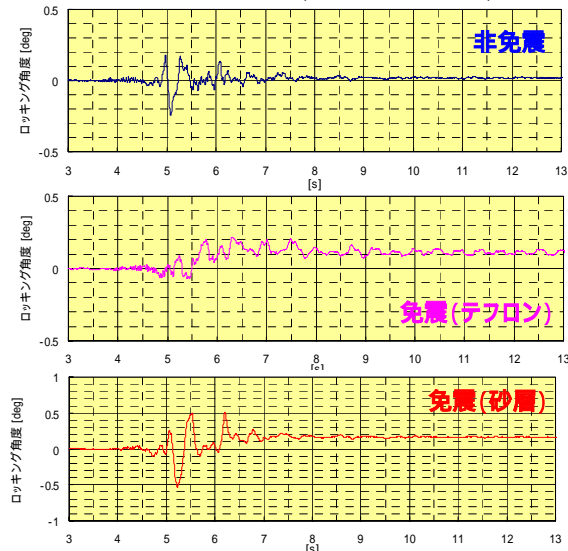


図-19 ロッキング角度(レベル2タイプ)

4.まとめ

橋脚下部と基礎との間に免震層(テフロン・砂)を有する橋脚基礎の振動特性および耐震性能を調べるために大型模型実験を行った。従来構造と比較して、免震(テフロン・砂層)の場合はいずれも応答加速度の低減効果が確認された。特に免震(テフロン)の場合は、応答加速度・杭のひずみともに大きく低減することがわかった。

免震層による応答振動特性は、使用する材料により変化することが確認された。免震(テフロン)において大きなすべりが発生し、残留した。免震(砂層)の場合においては、大きなすべりは発生しなかったがわずかなロッキングの発生が確認された。

今後は、すべり量やロッキングが制御可能な橋脚構造や免震材料(摩擦係数)の選定、実験・解析による検討を進めていく予定である。

参考文献

1)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997

謝辞

なお、本研究は、早稲田大学、(株)オリエンタルコンサルタンツとの共同研究として実施したものである。実験にあたり貴重なご助言をいただきましたことに謝意を表します。