

直接基礎構造物の地震時滑動に関する実験

高橋政秀1・木島久恵2・西村宣男3・嶽下裕一4

 ¹大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1) E-mail:takapa@civil.eng.osaka-u.ac.jp
²建設企画コンサルタント(株) (〒550-0004 大阪府大阪市西区靭本町3-5-25) E-mail:h_kijima@cpcinc.co.jp
³大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1) E-mail:nisimura@civil.eng.osaka-u.ac.jp
⁴日立造船 (〒550-0022 大阪市西区江戸堀2-6-33 フコク生命ビル) E-mail:dakeshita@hitachizosen.co.jp

直接基礎構造物の地震時における滑動に対する安全性を評価する場合,地盤-構造物間の摩擦係数を構 造物基礎と隣接する地盤の内部摩擦角などから推定している.しかし,摩擦係数は付着状態と滑動状態で は異なり,さらに地盤と構造物の接地状態,地盤特性,構造物の種類,地震波形の特性などによっても異 なる可能性がある.そこで本研究では土を用いて作成した地盤による直接基礎構造物の地震時滑動に関す る基礎的実験を行い付着状態と滑動状態の摩擦係数を推定し,地盤-構造物間の相対運動現象のメカニズ ムを明らかにする.

Key Words : spread foundation, slide, soil-structure, relative movement

1.はじめに

既往の地震応答解析では,地盤と構造物の相互作 用を厳密に考えずに,地震波形を直接構造物に入力 することによって構造物だけの解析が行なわれてき た.しかし地震時における地盤の影響を無視するこ とはできず,平成7年に発生した兵庫県南部地震^{1),} ^{2),3)}のような強地震においては地盤と構造物の接触 面で剥離や滑動などの現象が観測されている.

地震時に地盤と構造物の接触面で剥離や滑動など の現象が発生する可能性の最も高い構造物は,地中 に基礎を持たない直接基礎構造物である.この基礎 形式は,複雑な都市中心部や地下鉄などの地中構造 物が存在している地域に橋梁等の構造物の建設を行 なう場合に採用されるものである.このよう場合地 盤と構造物は固着と考えることができず,剥離と滑 動の相対現象も含めた相互作用を考慮した地震応答 解析が必要である.

地盤 - 構造物間の相対運動現象を解析で表現する には摩擦係数が必要であるが,これまでは摩擦係数 を構造物基礎に隣接する地盤の内部摩擦角などから 推定して解析を行っていた.しかし,摩擦係数は付 着状態と滑動状態では異なり,さらに地盤の接地状 態,地盤特性,構造物の種類,地震波形などによっ ても異なる可能性がある.そこで本研究では主に地 震時における直接基礎構造物の滑動現象に着目し, 数種類の地盤を用いて実験を行い,相対運動現象の メカニズムを解明することを目的とする.

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験装置側面図を図-1 に示す.板厚28mmの鋼板 で作成した1.5m四方,深さ0.8mの土槽に,地盤を3 層に分けランマーで締固め,1次実験の砂質土地盤 では約50cm,2次実験のまさ土地盤では約10cmの 深さで作成した.作成された地盤上に直接基礎構造 物に見立てたコンクリート床版を設置し,500kN級 (Dynamic)油圧アクチュエータで変位制御により 土槽を加振した.



土槽内に設置したレーザー変位計により構造物 -土槽間の相対変位を,地盤内に加速度計を埋め込み 地盤表層付近の加速度を,コンクリート床版に加速 度計を設置し構造物加速度をそれぞれ計測した.

(2) 実験ケース

地盤-構造物間の相対運動現象は構造物の接地状態によって変化することが考えられる.そこで本研究では滑動現象に影響を与える因子として,地盤-構造物間の接地圧,構造物の重心高さ,地震動の特性,地盤の種類を考える.

a)接地圧,構造物の重心高さ

直接基礎構造物に見立てたコンクリート床版に1 枚54.95kgの鉄板を載せることにより地盤 - 構造物間 の接地圧,構造物の重心高さを変化させる.鉄板の 枚数と地盤 - 構造物間の接地圧,重心高さの関係を 表-1に示す.

鉄板枚数	0	2	4	6	8
質量(kg)	62.50	172.40		392.20	502.10
接地圧(kN/m ²)	2.45	6.76		15.38	19.68
重心高さ(cm)		9.97	13.25		19.18

表-1 鉄板枚数と接地圧,重心高さの関係 b)入力波形

アクチュエータから土槽に変位制御で入力する波 形は,図-2 に示す振幅の増幅定常減衰波形,図-3 に示す周波数の増幅定常減衰波形,図-4 に示す不規 則波形の三種である.振幅の増幅定常減衰波形につ いては周波数を3~7Hzの範囲で変化させ,周波数の 増幅定常減衰波形については振幅を3.5~7.5mmの範 囲で変化させた.



不規則波形としては,兵庫県南部地震時のJR西 日本鷹取駅構内の加速度記録を積分し変位に変換し たものを入力した.^{4),5)}

c) 地盤種類

本研究では地盤材料として1次実験では砂質土を 2次実験ではまさ土を用いた.また砂質土地盤にお いては表層を乾燥させた場合と表層付近に砕石をば ら撒いた場合においても実験を行なった.

(3) 土質試験結果

図-5 に実験に用いた砂質土とまさ土の粒度分布を, 表-2 に土質特性を示す.



指標	まさ土	砂質土	
D ₅₀ (mm)	0.51	0.52	
土粒子密度(g/cm ³)	2.75	2.63	
間隙比	0.64	0.61	
内部摩擦角(deg.)	26.20#	40.35	
粘着力(kPa)	63.81#	5.69	
含水比(%)	16.03#	3.92	
乾燥密度(q/cm ³)	1.75#	1.62	

#印は,標準締固め仕事量の20%のもとで求めた[.] また,まさ土の乾燥密度は最大乾燥密度

3. 実験結果

(1) 滑動限界加速度

構造物が滑動をはじめる瞬間を滑動限界 _{cr}とよび,そのときの地盤表層付近の加速度を滑動限界加速度と呼ぶこととする.つまり滑動限界加速度は, それを超える加速度で加振されると構造物の滑動がはじまることを示している.

振幅の増幅定常減衰波形(4Hz)の実験結果を例 に滑動限界の測定方法を説明する.構造物-土槽間 の相対変位が発生する,すなわち滑動を開始するこ の時刻が滑動限界である.またこの時刻から地盤と 構造物が再び付着状態になるまで構造物の加速度と 地盤表層の加速度に差が生じる.これは地盤-構 造物間に働く摩擦力が静止摩擦力から動摩擦力に入 れ替わったためである.

(2) 滑動限界の地盤特性に対する依存性

図-6 に地盤特性と crの関係を示す.aは砂質土 (普通地盤),bは砂質土(表層乾燥地盤),cは砂 質土(表層砕石地盤),dはまさ土(普通地盤)で ある.入力した波形は振幅の増幅定常減衰波形であ り,鉄板枚数および周波数は凡例に示している.砂 質土地盤での crは約350galから450galを推移してい るのに対し,まさ土地盤では約750galから800galに 達している.地盤特性の影響が強くみられ,砂質土 地盤より粘性土を含んだまさ土のほうが滑りにくい といえる.

(3) 滑動限界の地震動の特性に対する依存性

図-7 に地震動の振幅と grの関係を,図-8 に地震動の周波数と grの関係を示す.400~500gal付近の データは砂質土地盤での結果である.鉄板の枚数すなわち接地圧または重心高さの違いにより上下にばらついているが,地震動の振幅及び周波数の影響はないことがわかる.また不規則波形を入力した場合も grlは他の波形での値とほぼ等しくなり, grl地震動の特性に依存性が小さい.

(4) 滑動限界の接地圧に対する依存性

図-9 に接地圧と grの関係を示す.接地圧は鉄板の枚数で調整したため重心高さと共に大きくなる. よって今回の実験では grと接地圧の関係は構造物 重心高さによるそれと同じになる.砂質土地盤では 接地圧に対する依存性はほとんどみられない.これ に対し,まさ土地盤では接地圧及び重心高さの違い により grにゆるやかな右下がりの傾向がみられる. 地盤 - 構造物間に式(1)で示す最大せん断力 が作 用すると仮定する.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \tag{1}$$

これを _{cr}で表わすと式(2)のようになる.

$$\alpha_{cr} = 980 \frac{c}{\overline{\alpha}} + 980 \tan \phi \tag{2}$$

ここで, 🕝 : 接地圧

:滑動限界加速度 (gal)

式(2)よりこの右下がりの傾向は地盤 - 構造物間 に粘着力が存在するためであると考えられる.

(5) 滑動限界の構造物の重心高さに対する依存性

図-10 に構造物の重心高さと GRの関係を示す.前 節で述べたように図-9 と同形となる.重心高さが大 きくなると構造物加速度による水平力により,接地 圧の偏心量が大きくなり地盤-構造物間の接触面に おける直応力の分布に変化が生ずる.構造物加速度 がある値より大きくなると接触面で部分的な剥離が 起こり,さらに構造物加速度が大きくなると転倒す る.

部分的な剥離が発生している場合,剥離が生じて いる部分で粘着力が有効でなくなるのでその影響を 考える.応力が直線的に分布すると仮定すると剥離 を考慮したは式(3)のようになる.





今回の実験ではまさ土地盤の鉄板枚数が6枚以上 の場合に剥離が発生する可能性がある.しかしこの 影響を考慮しない場合とのずれは鉄板6枚で約-6gal, 鉄板8枚で約-8galと小さく重心高さの影響はほとん どないといえる.

(6) 相対変位の履歴変化

構造物は一回の地震動で複数回滑る可能性がある. そこで付着と滑動が繰り返されることによって,滑 りやすくなるなどの影響がないかを調べる.構造物 - 土槽間の相対変位に対し図-11 のような補正基線 に基づき補正をおこない,一つの波による滑動量を 求める.このような補正が必要となる理由は,地盤 表面が均質でなかったこと,水平でなかったことが 挙げられる.補正後の滑動量を図-12 に示す.図-12 から滑動が繰り返されても滑動量はほぼ一定であり, 滑動の回数に対する滑動量の依存性はないことがわ かる.

表-3 粘着力,摩擦係数の推定

	静止摩擦係数	粘着力	(kN/m ²)
まさ土	0.626		0.336
砂質土	0.434		0.0942



図-12 補正後の滑動量

(7) 粘着力,静止摩擦係数の予測 式(2)より地盤 - 構造物間の接触面における静止摩 擦係数,及び粘着力の推定を行なった.結果を表-3 に示す.

やはりまさ土と砂質土の結果は大きく異なってお り,接触面に働く摩擦力は地盤特性に強く依存して いるといえる.

4.まとめ

滑動現象は地震波形に対応して生ずるが,今回の 実験では応答を支配しているのは地盤-構造物間の 摩擦力のみである.滑動限界加速度に対する各依存 性の考察から,地盤-構造物間の静止摩擦力は主に 静止摩擦係数と粘着力によって支配される.また接 触面に粘着力がある場合,構造物重量のみが異なる ものに同じ地震波を入力したとすると,重量の大き い物の方が滑動しやすくなる.

参考文献

- 1) 土木工学会: 阪神大震災震害調査緊急報告会資料,同 第二次報告会資料,1995.
- 2) 兵庫県南部地震道路橋地震対策委員会:兵庫県南部地 震における道路橋の被災に関する調査中間報告,1995.
- 3) 宮島信雄,平野昌治:兵庫県南部地震における軟弱地 盤中の地震特性に関する一考察,地震工学研究会発表 会講演論文集,第二分冊,1997.
- 4)日本建築学会:地震動と地盤 地盤震動シンポジウム 10年の歩み .
- 5) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1970.

(2003.10.8 受付)