

(39) 粘土地盤に設置されたプラットホーム基礎の模型振動実験

清水建設(株)研究所 正員 ○森 信夫 石川 裕
平山彰彦 小林 浩

1. まえがき

粘土は砂と異なり、繰り返し荷重を受けても液状化のように破局的な現象は起こさないと考えられるが、砂におけると同様な間隙水圧の発生により軟弱化し、構造物に不同沈下やすべり等を誘発する原因となる可能性がある。特に、着底式のプラットホーム等の海洋構造物の場合には、繰り返し荷重として通常考慮すべき地震力の他に、波力も無視し得ない荷重条件であり、上述のような現象は海洋構造物の設計上重要な検討項目であると考えられる。本研究は、通産省より(注)日本海洋開発産業協会が委託を受けて実施した「昭和57年度海洋石油生産プラットホーム開発調査」の一環として、軟弱粘土地盤上にプラットホーム基礎が設置された場合を想定して、模型振動実験を実施し、繰り返し荷重作用時の粘土地盤中の間隙水圧変化を検討したものである。実験の結果、加振加速度の増大に伴い地盤中の間隙水圧上昇は顕著となり、水圧上昇が大きくなれば基礎に沈下や傾斜が生じることが明らかになった。

2. 実験概要

2.1 実験におけるモデル化

実際のプラットホームが置かれている条件は、荷重条件、構造条件等非常に複雑であり、模型振動実験においてこのような複雑な条件を組み入れることは困難である。本研究では、加振時の地盤中の間隙水圧変化に着目するため、以下に示すような簡略化を行った上で実験を行った。

- (a) プラットホームはケーソン基礎部のみをモデル化し、角型タイプで着底方式のものを考慮する。
- (b) 地震時に基礎部に作用する動水圧は考慮しない。
- (c) 地盤は一様で飽和な粘土地盤とする。
- (d) 間隙水圧上昇の測定を容易にするため、基礎部直下での粘土地盤の過圧密比は1に近い状態とする。
このため、基礎部の接地圧は粘土地盤作成時の圧密荷重に近い値とする。
- (e) 入力波形は、粘土地盤および基礎部の固有の振動特性を把握するため、種々の周波数成分を含むホワイトノイズを用いる。また、加振は1方向加振とする。

2.2 実験装置

模型振動実験の概要を写真-1に示す。実験は土槽内に粘土地盤を作成し、基礎模型を設置した後、振動台を加振する方法により行った。振動台は幅4m、長さ5mで電気油圧制御方式である。土槽は鋼製で、寸法は長さ3,600mm、幅600mm、高さ725mmである。土槽長手方向の側壁には、粘土地盤がせん断振動するように長さ100mmの緩衝用スポンジを取付け、短手方向の側壁には摩擦抵抗を緩和するため、厚さ2mmのテフロンシートを取付けた。また、土槽底面には粘土地盤との滑りをなくすために、高さ50mmの鋼製の突起を取付けた。

2.3 粘土地盤および基礎模型

粘土地盤の試料としてはカオリン粘土を用いた。地盤の作成はスラリー状にしたカオリンを圧密する方法によった。圧密は層厚10~20cmずつ4層に分けて行い、最終的に60cm厚の粘土地盤を作成した。なお、圧密荷重は、いずれの層においても400gf/cm²であった。

粘土地盤の物理特性を表-1に示す。また、粘土

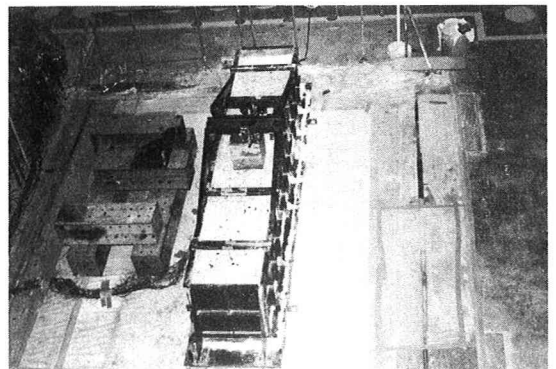


写真-1 模型振動実験の概要

地盤の均一性を把握するため、各層圧密終了後、簡易ベーン試験機（ベーン寸法は高さ3 cm、幅3 cm）を用いて、せん断強さを測定した。試験結果を図-1に示すが、これより各層共均等なせん断強さが得られており、地盤は均一なものであることがわかる。

一方、基礎模型は長さ、幅ともに300mm、高さ340mm鉛製であり、模型の接地圧は385 gf/cm²である。

2.4 加振および計測

粘土地盤および基礎模型の振動性状を把握するため、地盤内および基礎模型には図-2に示す各変換器を設置した。

振動台への入力波形はホワイトノイズを用い、入力の最大加速度を段階的に増加する方法により加振した。加振は6段階の加速度レベルに行った。土槽底部の加速度計で記録された各段階の最大加速度を表-2に示す。各段階の加振時間は20秒であり、加振終了後30分間放置した後、次段階の加振を行った。

3. 実験結果および考察

図-3にTest No.2およびTest No.4の基礎模型直下の地盤（AX-11）の応答加速度時刻歴を示す。図には後述するように、FLUSHを用いて実験をシミュレートした結果も合わせて示してある。図-4には同じく地盤の周波数伝達関数を示した。図-4において、5~10Hzのピークは基礎模型から離れた自然地盤（例えばAX-14）の伝達関数には見られないことから、基礎模型のロッキング振動の卓越振動数であると考えられる。これに対し20Hz以上のピークは粘土地盤の卓越振動数であると考えられ、入力加速度の大きなTest No.4において卓越振動数の低下が見られる。図-5は入力加速度の増大に伴う粘土地盤および基礎模型のロッキングの卓越振動数の変化を示したものである。この図より、入力加速度の増大に伴い、特に粘土地盤の卓越振動数の低下が顕著であり、地盤の非線形振動特性がよく現われている。

表-1 物理試験結果

粒度	シルト分 (%)	34.9
	粘土分 (%)	65.1
コンシステンシー	液性限界 w_L (%)	44.2
	塑性限界 w_p (%)	27.6
	塑性限界 I_p (%)	16.6
自然状態	比重 G_s	2.79
	含水比 w (%)	35.6
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.828
	間隙比 e	1.091
	飽和度 S_r (%)	99.3

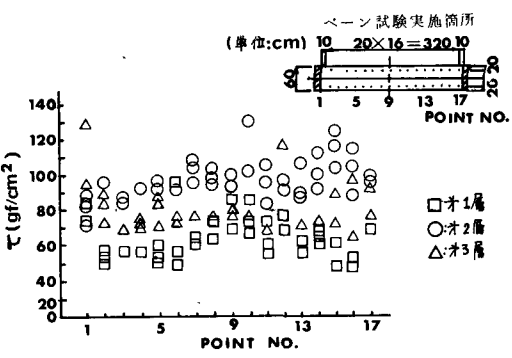


図-1 ベーン試験結果

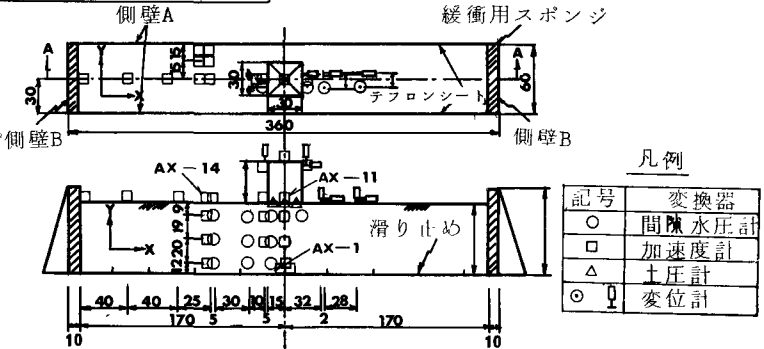


図-2 変換器設置位置

表-2 入力加速度の最大値

Test No.	最大入力加速度(gal)
1	57
2	98
3	122
4	243
5	388
6	475

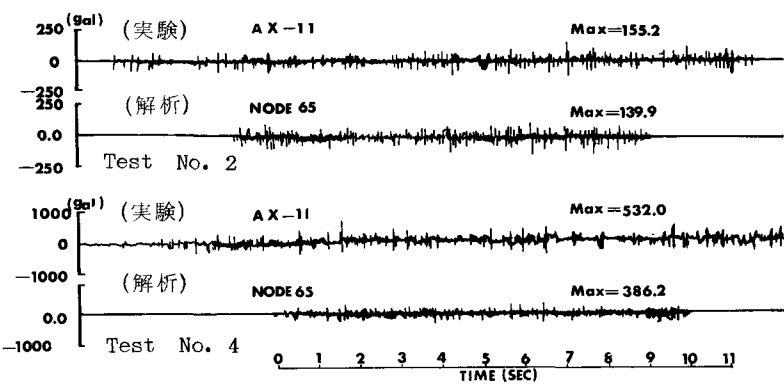


図-3 応答加速度時刻歴

図-6はTest No.4の基礎模型直下の地盤の加振中および加振終了後の過剰間隙水圧比を示したものである。間隙水圧の零点はTest No.1を実施する前に設定したものである。図より間隙水圧は振動しながら上昇し、加振終了後は時間の経過とともにゆっくり消散してゆくことがわかる。また、同図(b)より基礎模型直下の地盤でも比較的浅い位置(過圧密比が1に近い)では、間隙水圧上昇量が顕著であるのに対し、深くなる(過圧密比が大きくなる)につれて、上昇量が小さくなることわかる。このように顕著な間隙水圧の上昇が見られたのは、Test No.4以降である。

図-7は加振終了時の間隙水圧比と実験終了時の沈下および傾斜の関係を示したものである。間隙水圧比が小さい間は基礎の沈下や傾斜が見られないのに対し、間隙水圧比が0.5程度以上になると基礎の沈下や傾斜が著しく生じている。

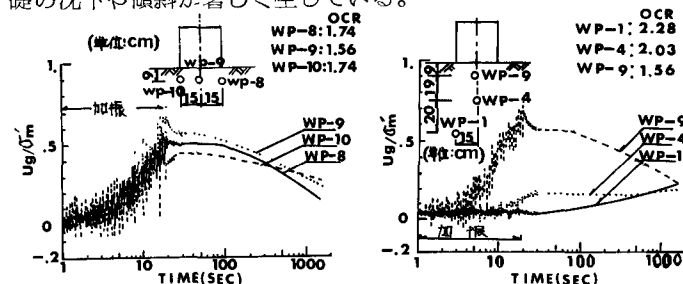


図-6 過剰間隙水圧の時刻歴 (Test No. 4)

4. 解析による検討

4.1 解析手法および条件

以上で述べた模型振動実験を全応力解析法によりシミュレートした。解析に用いたプログラムは、最近各方面でよく用いられているFLUSHである。

図-8に解析モデルを示す。モデル化に当っては粘土地盤の対称性を利用した。また、解析に用いた地盤の諸定数は、土槽から切り出した粘土の供試体に対して実施した各種の材料試験結果から設定した。図-9および図-10には、これらの試験結果のうち、せん断剛性のひずみ依存性および減衰定数と剛性低下率との関係を示した。

また、初期せん断剛性は初期有効拘束圧に影響されるが、ここではFLUSHの解析に先立ち、初期応力解析により基礎模型設置後の初期拘束圧を算出した上でFLUSH

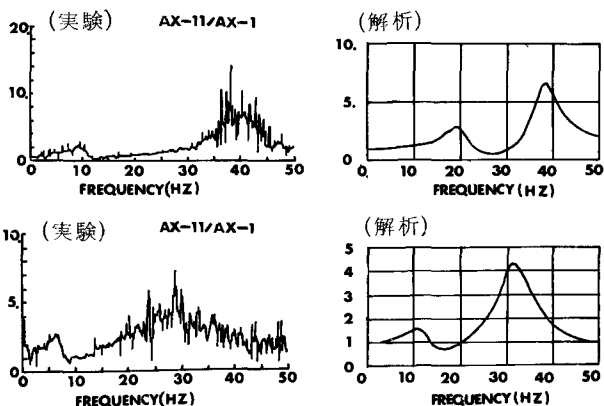


図-4 周波数伝達関数

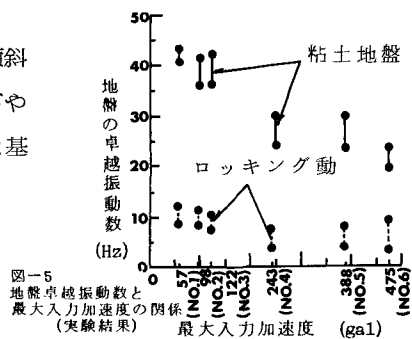


図-5 地盤卓越振動数と最大入力加速度の関係 (実験結果)

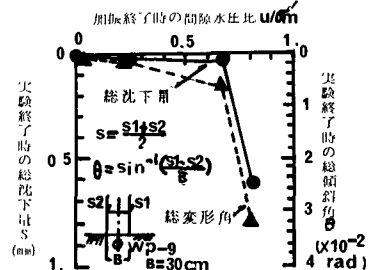


図-7 総沈下量、総変形角と間隙水圧比の関係

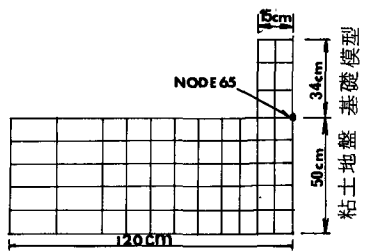


図-8 解析モデル図

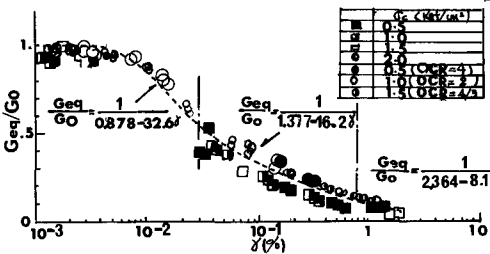


図-9 剛性低下曲線

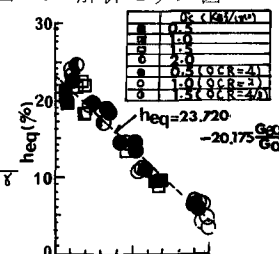


図-10 減衰定数と剛性低下率の関係

S Hに用いる初期せん断剛性を設定した。

解析は模型振動実験行った6段階のうち、Test No. 2, 4, 5の3段階に対し行った。解析に用いた入力地震波は、各段階とも振動実験において土槽底部(A X-1)において記録された波のうち、最大値を含む10秒間を取出して用いた。

4.2 解析結果および考察

先に示した図-3、図-4にはTest No. 2およびTest No. 4の解析結果を併記してある。加速度レベルの比較的小さいTest No. 2では応答加速度時刻歴、周波数伝達関数のいずれも実験と解析はよく一致していると言っていることができる。これに対し、Test No. 4では解析による粘土地盤の卓越振動数は実験結果より大きく現われており、それに伴い、加速度時刻歴の最大値にも差を生じている。図-11は入力加速度の増大に伴う地盤の卓越振動数の変化を解析と実験と比較したものであるが、この図からもTest No. 2では解析結果は実験をよくシミュレートしているものの、Test No. 4, 5では解析による地盤の卓越振動数は実験結果より大きくなる傾向がうかがえる。先に述べたように、Test No. 4, 5では基礎模型直下の地盤において比較的顕著な間隙水圧上昇が見られた場合であり、間隙水圧の上昇による粘土地盤の軟弱化(剛性の低下)をF L U S Hによる解析では十分にとらえきれないことが一原因であると考えられる。

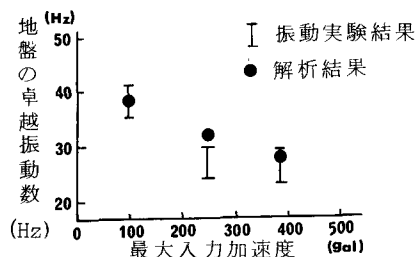


図-11 地盤卓越振動数と最大入力加速度の関係
(実験結果と解析結果との対比)

のであるが、この図からもTest No. 2では解析結果は実験をよくシミュレートしているものの、Test No. 4, 5では解析による地盤の卓越振動数は実験結果より大きくなる傾向がうかがえる。先に述べたように、Test No. 4, 5では基礎模型直下の地盤において比較的顕著な間隙水圧上昇が見られた場合であり、間隙水圧の上昇による粘土地盤の軟弱化(剛性の低下)をF L U S Hによる解析では十分にとらえきれないことが一原因であると考えられる。

5. 結 論

本研究では軟弱な粘土地盤上に設置されたブラットホーム基礎を想定した模型振動実験を行い、主として地盤中に生じる可能性のある間隙水圧の変化に着目した上で、種々の検討を行った。以下に得られた成果をまとめる。

- (1) 一様な粘土地盤上に基礎模型を設置して振動実験を実施した結果、加振加速度が大きくなると(Test No. 4以降)で、基礎周辺部の地盤で顕著な間隙水圧上昇が見られた。特に、地盤の過圧密比が1に近いほど蓄積される過剰間隙水圧量は大きく、過圧密比が2を越える位置での水圧上昇量は小さい。
- (2) 間隙水圧上昇が大きくなると、それに付随して基礎模型に沈下や傾斜が生じる。今回の実験では、基礎模型直下の地盤の間隙水圧が初期有効拘束圧の5割程度以上まで上昇すれば基礎模型に著しい沈下、傾斜が生じた。
- (3) 全応力解析法の1つであるF L U S Hにより振動実験結果をシミュレートした。応答加速度で実験、解析を比較した結果、加速度レベルが小さい場合はよい対応が見られたが、間隙水圧上昇が顕著なケースでは、解析による地盤の卓越振動数は実験結果より大きくなる傾向が現われた。

本研究では相似則が明確でないこともあり、ここで得られた量的な結果を直接実現象へ結びつけるには早計ではあるが、特に海洋構造物の場合には、波力と地震力の組み合わせ荷重条件も考えられることから、このような繰り返し荷重下での粘土地盤の間隙水圧上昇、軟弱化に対する検討は必要不可欠な課題である。粘土に関しては、このような動的な特性に関する研究の蓄積は少ないところから、今後さらに検討を加える必要があるものと考えられる。