

(181) 箱型埋設構造物と地盤の動的相互作用に関する模型振動実験

前田建設工業(株) 正会員 大嶋 義隆
埼玉大学 工学部 正会員 渡辺 啓行

1. はじめに

原子力発電所の屋外重要土木構造物である取水ピットや海水ポンプ室等の、横断面積に比べて長手方向の比較的短い箱型埋設構造物の地震時挙動は、2次元問題として対処するには無理があり3次元の問題として取り扱うのが妥当であろう。例えば、2次元では紙面に平行となる外壁面と地盤との動的相互作用のモデル化は困難であるが構造物の挙動に大きな影響を与えらると思われる。しかしながら、この影響については未解明な点が多い。また、地盤の非線形性と地震時土圧の関係も明らかになっていない。そこで筆者達は砂地盤中に構造物模型を設置した連成系模型を作成し振動実験を実施した。以下にその概要を報告する。

2. 実験方法

2. 1 地盤模型の振動実験

模型地盤材料には気乾状態の岐阜砂を用いた。これを振動台上のせん断土槽内に加速度計設置深さまで気中落下により詰め、300gal, 25Hzの振動を加えて沈下分の砂を補充しながら締め固め、沈下が進行しないことを確認した後加速度計を設置した。この操作を地表面まで繰り返した後さらに再度振動締め固めを行った。なお、加速度計はせん断土槽の中央部に図-1のように設置した。振動実験は水平方向正弦波による共振実験とし、入力加速度は 50, 100, 200galの3通り、振動数は10Hz~60Hzの範囲で変化させた。

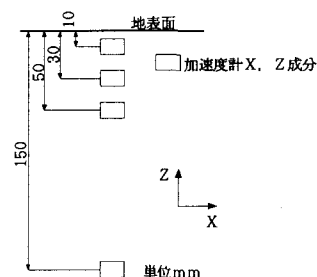


図-1 地盤模型(自由地盤)の加速度計配置図

2. 2 構造物-地盤連成系模型の振動実験

本実験では原子力発電所海水ポンプ室のように構造物天端が地表面と一致するような箱型埋設地中構造物を対象とし、地盤は厚さ50m, せん断波速度200m/sの砂層地盤を想定した。実験はこの構造物、地盤を 1/100に縮尺した模型について行った。この際、構造物模型はアクリル板にて製作し、その諸元は香川・国生の相似則に基づき表-1のように決定した。また、構造物の剛性の影響を検討するために壁厚 0.5cmの模型も製作した。連成系模型は地盤模型と同様に、構造物或いは加速度計の設置レベル毎に十分振動締め固めを行い作製した。構造物-地盤連成系模型と計測機器の配置図を図-2に示す。加振条件は地盤模型の場合と同様である。

表-1 相似則による模型の目標値と実現値

Quantity	Law of Similitude	Value of Every quantity		
		Prototype	Target value	Attained Value
RC	Length(mm)	30000	300	300
	Height	15000	150	150
	Width	21000	210	210
	Thickness	1500	15	15
RC	Density(g/cm ³)	2.4	1.825	1.19
	Young's Modulus(kgf/cm ²)	$1/(\lambda/\eta)^{1/2}$	2.09×10^4	$2.4 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^4$
	Depth of Layer(mm)	$1/\lambda$ (1/100)	50000	500
Soil	Density(g/cm ³)	$1/\eta$ (1/L 315)	1.8	1.369
	Vs (m/sec)	$(\eta/\lambda)^{1/4}$	200	68
				58~76 ^{*1)}

*1): 模型地盤の加振変形共振曲線より1/4波長則で計算した値。

3. 実験結果と考察

3. 1 地盤振動特性

図-3は加速度共振曲線、図-4は応答加速度の時系列波形である。

(1) 水平方向加速度の応答特性

入力加速度が大きくなると応答倍率が低下するとともに共振振動数が低振動数側にシフトしている。これは、本実験では地盤材料の非線形特性が顕著に現れていることを示している。

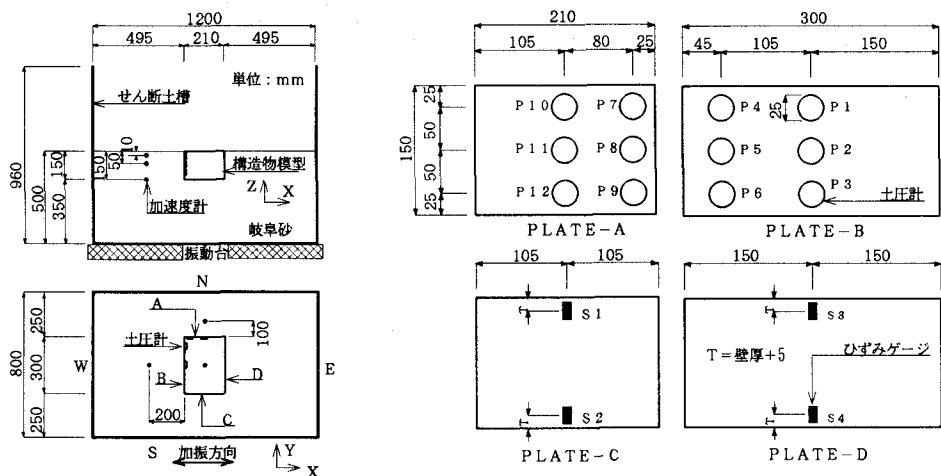


図-2 構造物-地盤連成系模型と計測機器配置図

(2) 上下方向加速度の応答特性と時刻歴波形の特徴

水平方向加速度と同様に入力加速度が大きくなると応答倍率は小さくなるが共振曲線は明確なピークを持つ。ピーク値の応答倍率は水平方向の値と同等またはそれ以上の値を示している。また、入力加速度の増加とともに共振曲線は低振動数側にシフトするが、50galでは32Hz、100galでは30Hz、200galでは22Hzより低い振動数では上下方向加速度は生じない。図-3の低振動数領域の若干の応答倍率は加速度計測時の電気ノイズによる波形をパソコンで機械的にデータ処理したために生じたものである。図-4は 200gal、35Hzの正弦波による加振実験時の定常状態の応答波形である。水平方向応答加速度は35Hzで振動しているが、上下方向応答加速度はその2倍の70Hzの振動数を持つ。上下方向応答加速度が水平方向応答加速度の2倍の振動数となる特徴は他の振動数についても同様である。

(3) 上下方向加速度の生じるメカニズム

この現象は、地盤のダイレイタンスが原因と考えると説明できる。すなわち、せん断ひずみが小さいうちはせん断変形のみ起こるので水平方向振動のみが生じるが、大きくなると体積変化を伴うせん断変形となり、それが上下振動を引き起こすのである。この時上下振動の振動数は水平振動の2倍となる(図-5)。

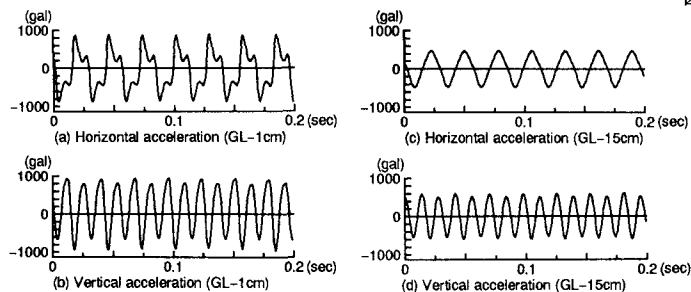


図-4 地盤振動実験の応答加速度時刻歴波形(200gal, 35Hz)

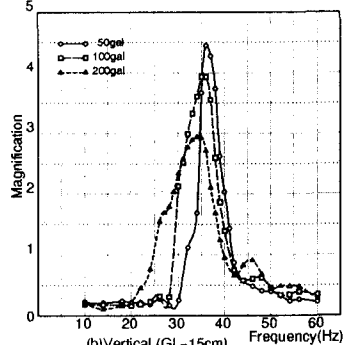
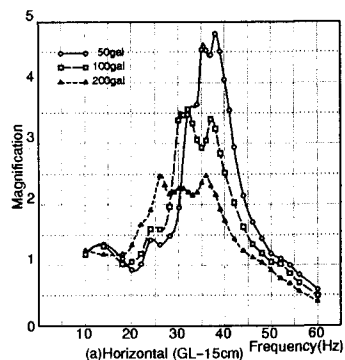


図-3 地盤振動実験の加速度共振曲線

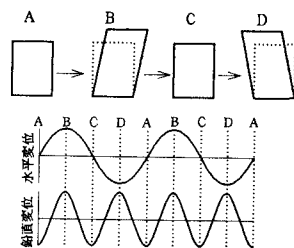


図-5 鉛直振動が生じるメカニズム

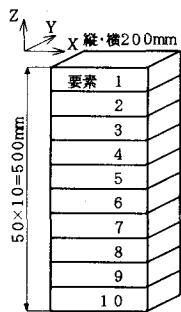


図-6 要素分割図

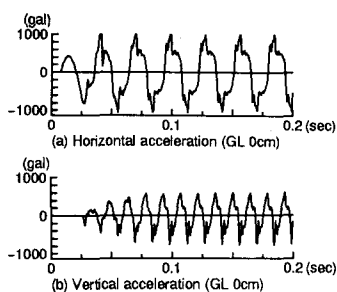


図-7 地表面の応答加速度 (計算値)

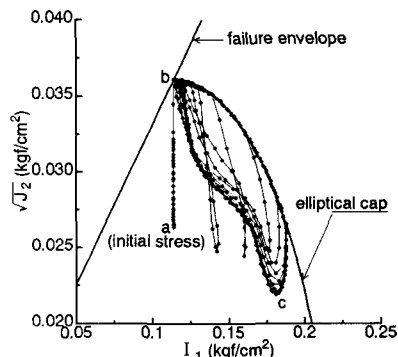


図-8 要素10の応力経路

(4) FEMによる弾塑性動的応答解析

地盤は Capを持つDrucker-Prager材料とし、弾性域では初期せん断弾性係数を35Hzで共振するよう調整した物性値を与えた。図-6は解析モデルで側面はZ座標が同じ節点を同一変位の条件で拘束し、下端は固定境界でX方向に200gal, 35Hzの正弦波を入力した。図-7は地表面の応答加速度で図-4の波形の特徴をよく表している。図-8は要素10の応力経路を三次元主応力空間内の子午面上で表したものである。図中のa～bで応力が変化する間は水平動のみ発生するが、破壊包絡線に達すると上下動が生じ始めb～cのサイクルで定常状態になる。要素10で発生した上下動は地表面まで伝播する。

3. 2 地盤—構造物連成系モデルの振動特性

図-9は壁厚 1.5cm模型の場合の加速度共振曲線である。構造物天端の共振曲線は地盤のものと水平、上下ともに形状がよく似ている。これは構造物の応答が地盤の振動に支配されているためと考えられる。表-2は最大応答倍率と共振振動数に関して自由地盤と連成系の地盤の場合を比較したものである。図-10は動土圧の測定結果で、縦軸は動土圧Ptを静止状態の土圧 Pstで除し無次元化してある。図-11は曲げひずみ周波数応答関数である。これらの図及び表から連成系の振動応答には次のような特徴がみられる。

表-2 最大応答倍率と共振振動数の比較 (GL-15cm)

入 力 加速度	水平方向		上下方向	
	地 盤	連成系	地 盤	連成系
50 gal	4.8(38)	5.8(42)	4.5(36)	2.2(41)
100 gal	3.6(32)	4.0(40)	3.9(35)	3.5(36)
200 gal	2.5(26)	2.7(28)	2.9(34)	2.9(34)

() 内は共振振動数 単位:Hz

(1) 水平方向加速度の応答特性

自由地盤と比べると共振振動数は高い方へ移行し応答倍率は増大している。これは構造物の存在によって地盤のせん断ひずみが小さくなり、等価線形解析法で表現するところの剛性低下が少なく減衰も小さくなったためと考えられる。この傾向は入力加速度が小さいほど顕著である。

(2) 上下方向加速度の応答特性

共振振動数は50gal, 100gal入力時には自由地盤の場合より高い方へ移行するが、最大応答倍率は 100gal, 200gal, 50gal入力の順に小さくなり自由地盤応答の場合と異なる。この現象は 3. 1 (3)で示したメカニズムにより水平方向加速度の応答特性と矛盾なく説明できる。すなわち、50gal, 100gal入力時には構造物の影響で地盤のせん断ひずみが小さく、それに伴う体積変化も減少するので上下方向振動が小さくなったと考えられる。上下方向振動は水平方向振動よりも構造物の影響を強く受けるようである。

(3) 動土圧の特徴

図-10 の場合、振動方向と平行な壁面に作用する動土圧は垂直な壁面の動土圧よりも大きく、その波形の振動数は2倍である。振動数が2倍となるのは上下方向加速度の特徴と一致し、動土圧が上下動によっても発生することを示している。垂直な壁面に作用する動土圧は水平動と上下動の動土圧の重ね合わせである。

(4) 構造物に生じる曲げひずみの応答特性

図-11 は構造物の剛性が大きい場合には、振動方向と平行な壁面の曲げひずみが垂直な壁面よりも大きく

なる場合があることを示している。3. 2 (2), (3) と合わせて考えると上下動による動土圧は水平動による動土圧よりも構造物と地盤の動的相互作用の影響を強く受け、構造物の断面設計に大きな影響を及ぼすようである。

4. まとめ

地盤のダイランシー特性によって水平方向の加振が上下動を励起すること、この現象の特徴は弾塑性動的応答解析でシミュレーションでできることがわかった。さらにこの励起された上下動のために地中構造物には全面に動土圧が作用すること、その動土圧の特徴は加振方向と平行な壁面に顕著に表れること、構造物と地盤の動的相互作用の影響は水平動より上下動に大きいことがわかった。

本研究の実験とデータ整理に関して八木橋功氏（地域振興整備公団）に御協力を頂いた。ここに記して感謝致します。

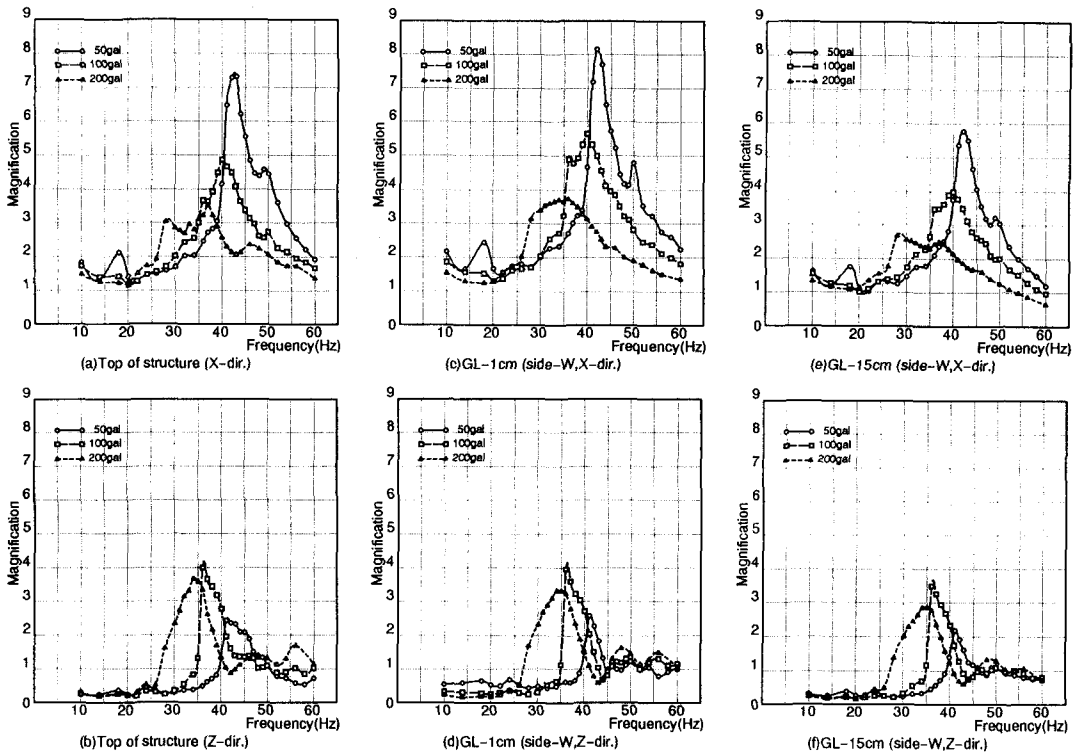


図-9 構造物-地盤連成系モデルの加速度共振曲線

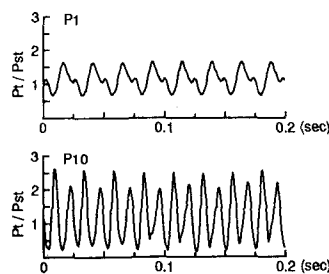
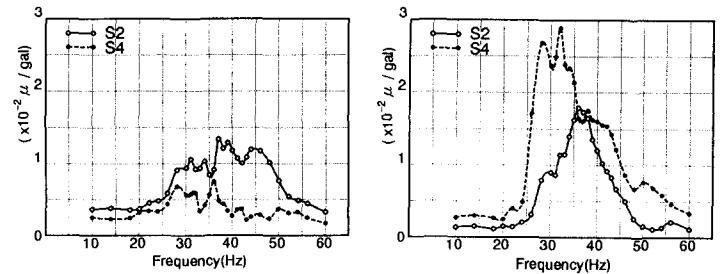


図-10 動土圧の時刻歴波形
(壁厚1.5cm模型, 100gal, 40Hz)



(a) 壁厚1.5cm模型

(b) 壁厚0.5cm模型

図-11 曲げひずみ周波数応答関数(200gal)