

大阪ガス 正員 柳父行二
正員 頼 千元

1. はじめに

LNG地上タンク等の大容量液体貯槽の地震時挙動には、液動揺・液と貯槽の連成振動・地盤と杭の連成振動・動的群杭効果等の問題が指摘され、たくさんの研究成果が得られている。残された問題の1つに、液体が動揺した場合に杭基礎・地盤にどのような影響を及ぼすかといういわゆる上下連成がある。

超高層ビルは固有周期が数秒から10秒以上であるため、上部工の一部だけが慣性力になると考えられている。75000KL級LNGタンクはスロッシング固有周期が8秒前後であるので、スロッシングが発生した場合には杭基礎に及ぼす慣性力が小さくなっている可能性が高い。そこで、141本の杭よりなる基礎・地盤・貯槽模型を作製し、水を用いて振動実験を行ない、自由に振動する液体の地盤・基礎に及ぼす影響を調べた。

2. 相似律

地盤は波動方程式、杭は地盤からの反力項を持つ弾性梁方程式、液体動揺にはハウスナーのスロッシング固有周期の式を支配方程式とし、次元解析を行なった。

地盤

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = Vs^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

杭

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + keDy + \frac{w \partial^2 y}{g \partial t^2} + \frac{Ce}{L} \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

スロッシング

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1.84g}{R} \tanh(1.84 \frac{h}{R})}}$$

これらより、

$$t = \sqrt{l} = \sqrt{\frac{e}{\rho}}$$

y;鉛直座標	[L]
x;水平座標	[L]
t;時間	[T]
Vs;地盤のS波速度	[LT ⁻¹]
EI;杭の曲げ剛性	[ML ³ T ⁻²]
ke;地盤の反力係数	[ML ⁻² T ⁻²]
D;杭径	[L]
Ce;地盤の減衰定数	[MT ⁻¹]
T;固有周期	[T]
R;貯槽半径	[L]
h;貯槽液位	[L]
L;杭長	[L]
w;単位長さ当り杭重量	[MT ⁻²]

実験に使用する振動台の大きさ並びに加振能力を考慮すると相似律を満足させることができない。そこで、スロッシング固有周期だけは相似律にとらわれずに模型を作製した。

3. 模型及び実験方法

模型の基本相似比、諸元を表1、2に示す。スロッシングは相似律上の周期2.9秒を満足できず、地盤の振動(約0.6秒)に近い0.86秒となっている。

計測点は振動台加速度・変位、基礎底版加速度・変位、地盤加速度、杭加速度・曲げ歪の計43点である。実験方法は杭支持層からの地震波振動加振である。

液体振動による影響を明らかにするため、4種の固定荷重状態での比較実験も行なった。

表1 相似比一覧

	次元	相似比
長さ	lr	1/63.5
時間	tr	1/3
密度	ρr	1/1.7
Changの特性値β	lr ³	63.5/1
杭曲げ剛性	ρrlr ⁵ tr ⁻²	1/1.238*10 ¹⁰
上部工重量	ρrlr ³	1/4.353*10 ⁵
弾性定数	ρrlr ² tr ⁻²	1/761.65
S波速度	lrtr ⁻¹	1/21.17

4. 解析

慣用設計法による杭の耐震設計では、上部工慣性力が卓越すると考えられているが、埋設管のように荷重が小さい場合には地盤振動卓越の考え方が適用されている。しかし荷重が中間的な場合の取扱いは明確でなく、実際には地盤の振動に上部工慣性力の影響が加わるものと思われる。本実験では液体動揺による慣性力の低減を議論するので、地盤の振動による要素と慣性力による要素を分離しておく必要がある。固定荷重実験のデータより分離を試みた。(参考文献①)

＜地盤振動要素と慣性力要素の分離＞

まず各杭曲げ歪と基礎底版加速度の回帰分析を行ない、各測点について上部工荷重・地震波ごとの係数を得る。次に上部工荷重と杭曲げ歪の相関性を調べ、地盤振動要素と慣性力要素の分離を行なった。

＜相当上載荷重＞

Cpi = Xpi - Bpi

Api;p杭i測点での慣性力係数 (歪/荷重/加速度)

Bpi;p杭i測点での地盤振動係数 (歪/加速度)

Xpi;p杭i測点での曲げ歪の加速度に対する回帰係数 (歪/加速度)

なるCpiを導入すればCpiは慣性力分(歪/加速度)となる。Api(歪/荷重/加速度)とCpi(歪/加速度)の相関を調べ回帰係数を求めれば相当上載荷重が得られる。実荷重と各実験より求めた相当上載荷重を表3に示す。表3よりこの方法が有効である事がわかる。

＜液体貯槽の相当上載荷重＞

表2 模型諸元

上部工を水タンクとした場合も同じ方法で相当上載荷重を求めた。表3に示す通り実荷重よりかなり小さい。液体貯槽を貯槽・底版の固定荷重と液体荷重に分けて考えると、液体は約30%しか慣性力として杭基礎に影響していない事がわかる。

5. 結語

液体振動の固有周期が相似律を満足しない事を承知で液体と地盤・基礎との上下連成振動実験を行なった。

地震によるエネルギーが一瞬に消費されず、一部が液体動揺のエネルギーになると考えると、実タンクでも慣性力は低減すると考えられる。スロッシングが発生すれば杭基礎耐力には余裕が生まれると考えて良いのではないだろうか。最後に、本実験を進めるにあたり(株)大林組技術研究所の皆様に変なお世話になりました。厚くお礼を申し上げます。

(参考文献)

- ①貯槽杭基礎の模型振動実験 頼・柳父 第17回土質工学研究発表会 S58.6
- ②地上タンク杭基礎の模型振動実験 頼・柳父 第37回土木学会年次学術講演会 S57.10
- ③円筒貯槽杭基礎の模型振動実験 頼・柳父 第16回土質工学研究発表会 S57.6

	原型	模型	相似比
容量	75,000 K L	18.265 L	相似律不成立
貯槽内径	57.6m	466.2mm	1/62.4
最高液位	28.8m	107mm	相似律不成立
スロッシング			
固有周期(1次)	8.14秒	0.861秒	相似律不成立
液体重量	36375t	18.265kg	相似律不成立
基礎底盤・貯槽重量	28989t	2.694kg	相似律不成立
基礎底盤直径	62m	500mm	1/63.5
杭本数	546本	141本	1/1
杭直径 D(杭幅)	609.6mm	9.6mm	1/63.5
杭長	609.6mm	2.0mm	断面形状変更
杭の曲げ剛性	30m	470mm	1/63.5
杭間隔	2.934*10 ¹¹ kgcm ²	19.332kgcm ²	1.238*10 ¹⁰
杭1本当り	2.6m(4.26D)	40.9mm(4.26D)	1/63.5
上載荷重(空液)	35.6t/本	81.8g/本	1/4.353*10 ⁵
上載荷重(満液)	101.4t/本	232.8g/本	1/4.353*10 ⁵
地盤S波速度			
(表層)	-----	2.835m/s	1/21.71
(杭支持層)	-----	7.8m/s	1/21.71
地盤固有周期	-----	0.619秒	1/3

表3 上部工相当上載荷重

模型名	実荷重	タフト 相当荷重	八戸 相当荷重	エルセントロ 相当荷重
141PFL(固)	34.58kg	35.48kg	35.98kg	34.04kg
141PHF(固)	15.29kg	16.17kg	15.52kg	18.07kg
141PEM(固)	12.15kg	13.57kg	13.74kg	14.26kg
141PNW(固)	2.29kg	3.03kg	2.59kg	3.12kg
141P水張(液)	20.96kg	8.22kg	7.47kg	7.70kg
(固定)	2.69	2.69	2.69	2.69
	+	+	+	+
(液)	18.27	5.53	4.78	5.01
		(30.3%)	(26.2%)	(27.4%)