

大規模群杭基礎の地震応答特性の解析

松田 隆 後藤 洋三
徳永 正博
(本社 情報システムセンター)

Analyses on Earthquake Response Characteristics of Pile Group Foundation

Takashi Matsuda Yozo Goto
Masahiro Tokunaga

Abstract

The authors have newly introduced a pile group element based on the assumption of a ring model into the seismic analysis code (ABLE) for axisymmetric structures. This paper describes not only results of verification analyses of seismic observations for an actual above-ground storage tank, but also an investigation for soil-structure interaction behavior and the effects on pile group of this kind of structure.

The computational results of accelerations and member forces using ABLE show good coincidence with those of observations, respectively, and the applicability of ABLE for structures that have piles in groups is shown. From the study of soil-structure interactions, it is found that inertia force of the superstructure affects much more the member forces response than acceleration response. Furthermore, the distribution of pile group regarding acceleration and member forces and the effects of pile group are shown.

概 要

軸対称構造物を対象とした地盤～構造物～液体の連成系での地震応答解析法 ABLE に多重リング仮定の群杭要素を導入した。この報告は新たに導入された群杭要素の検証と、その要素を用いて大規模群杭基礎を有する地上式 LNG 貯槽における動的相互作用および群杭効果を解析した結果を述べるものである。

薄層要素法を用いた杭～地盤系の動的作用効果に関する解析結果との比較によって、地盤ばねと有効入力動に関して ABLE は薄層要素法の結果と良好な一致を示した。更に、地上式 LNG 貯槽の地震観測結果のシミュレーション解析から、加速度および杭断面力の応答について ABLE の妥当性を確認できる結果を得た。この ABLE を用い、上部構造物の質量の影響、有効入力動など動的相互作用に関する解析、および、群杭内の加速度と断面力の平面的な分布、単杭の地盤ばねとの比較から算定した群杭効率などの群杭の振動特性についても述べる。

1. まえがき

軟弱地盤上に建造される構造物には杭基礎がよく用いられるが、このような軟弱地盤では大きな地震動の増幅があるため基礎構造物にも大きな地震力が作用する。特に大規模なウォータフロント開発などでは、杭基礎を有する構造物は大型化し、複雑な構造形式をとる傾向にあり、基礎構造物の耐震設計がますます重要となる。そのため、震度法による従来からの設計法のみならず、実際の地震時挙動を忠実に反映できる合理的かつ詳細な耐震検討手法が必要とされている。

回転体要素を用いた動的有限要素法解析コード ABLE¹⁾は、地中円筒構造物を対象に開発されたもので既に多くの実績がある。さらに今回、ABLE に群杭要素が組込まれたことにより、群杭基礎を有する地上構造物にも適用できるようになった。従来、有限要素法では基礎杭を梁要素でモデル化することが多かったが、地上式 LNG 貯槽の基礎杭のように数百本単位にもなる杭を 1 本ごとにモデル化することは実用上困難である。そこで、

ABLE では軸対称解析の変位場を考慮したうえで、多重リング仮定を用い、中心軸から等距離にある杭群を一括してモデル化した。この群杭要素により、任意の位置にある杭群を効率よく表現することが可能となった。

本研究では、この群杭要素の妥当性の検証として、杭と地盤および杭と杭の相互作用を 1 本ごとに考慮している薄層要素法²⁾との比較をまず行った。次に、大規模な群杭への適用性の検討として、実在する地上式 LNG 貯槽で実施されている地震観測結果³⁾のシミュレーション解析を行った。

さらに本報告では、この種の構造物における動的相互作用効果を定量的に示すとともに、その重要性を述べる。また、群杭内の加速度と断面力の平面的な分布、単杭と群杭の地盤ばねの比較から動的な群杭効率を評価するなど、群杭の振動特性を検討した。

2. 群杭要素

群杭のモデル化には多重リング仮定を用いた。この仮定は、図-1 に示す同一円筒上にある複数の杭を、剛性

と質量が等価な円筒状要素に置換することである。

中心軸からの距離が r_1 で z 軸方向には節点 m, n 間にある杭群と等価な剛性をもつ円筒要素 (図-2) の剛性行列 K を誘導する。杭1本当たりの節点部材力 p ~ 変位 u の関係は各節点6自由度としたときの梁理論によって次のように与えられる。

$$p = ku \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 p : 部材力ベクトル (図-2 参照)

k : 部材座標系における剛性行列

u : 節点変位ベクトル (図-2 参照)

$$k = \begin{bmatrix} k_a & 0 & 0 \\ 0 & k_b(x) & 0 \\ 0 & 0 & k_b(y) \end{bmatrix} \quad (\text{剛性行列})$$

$$k_a = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 & -k_2 \\ 0 & 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (z \text{ 軸方向の軸とねじり成分})$$

$$k_b(\lambda) = \begin{bmatrix} k_3 & -k_1 & -k_4 & -k_4 \\ -k_3 & k_1 & k_4 & k_4 \\ -k_4 & k_4 & k_5 & -k_6 \\ -k_4 & k_4 & -k_6 & k_5 \end{bmatrix} \quad (\lambda \text{ 軸まわりの曲げとせん断成分})$$

ここに、 $k_1 = EA/l, k_2 = GJ/l, k_3 = 12EI(\lambda)/l^3$

$k_4 = 6EI(\lambda)/l^2, k_5 = 4EI(\lambda)/l, k_6 = 2EI(\lambda)/l$

l : 部材長, E : 縦弾性係数, A : 断面積

G : せん断弾性係数, J : ねじり定数

$I(\lambda)$: λ 軸まわりの断面2次モーメント

次に、同心円上にある R 軸から角度 ϕ での杭の節点変位は次式に従うものと仮定する。

$$\left. \begin{aligned} u(\phi) &= U \cdot \cos \phi, & \theta_x(\phi) &= \Theta_x \cdot \sin \phi \\ v(\phi) &= -V \cdot \sin \phi, & \theta_y(\phi) &= \Theta_y \cdot \cos \phi \\ w(\phi) &= W \cdot \cos \phi, & \theta_z(\phi) &= \Theta_z \cdot \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$: 部材座標系変位 u

$U, V, W, \Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$:

全体座標系の最大変位 U

上式は座標変換行列 A (対角行列) を用いることで次のように表せる。

$$u = AU \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\text{diag}(A) = \{c, c, s, s, -s, -s, c, c, c, s, s\}$

$c = \cos \phi, s = \sin \phi$

同心円上の杭群に関して、内力のなす仮想仕事の総和 $\sum u_i^T k_i w_i$ と外力 $\sum u_i^T p_i$ のなす仮想仕事の総和に関して仮想仕事の原理を適用すると、群杭の要素剛性 K が以下のように求められる。

$$(\text{外力の仮想仕事}) \quad U^T T = \sum_{i=1}^n u_i^T p_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$(\text{内力の仮想仕事}) \quad \sum_{i=1}^n u_i^T k_i u_i = U^T \left(\sum_{i=1}^n A_i^T k_i A_i \right) U$$

$$(\text{釣合式}) \quad P = KU \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 K : 要素剛性行列 $\sum A_i^T k_i A_i$

なお、質量行列の誘導方法は上記の剛性行列と同様の方法による。

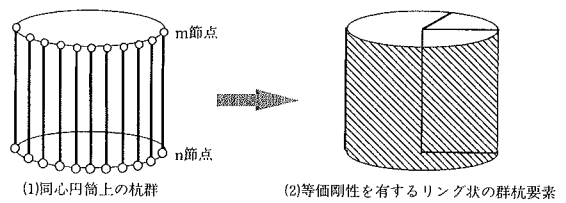


図-1 群杭要素へのモデル化

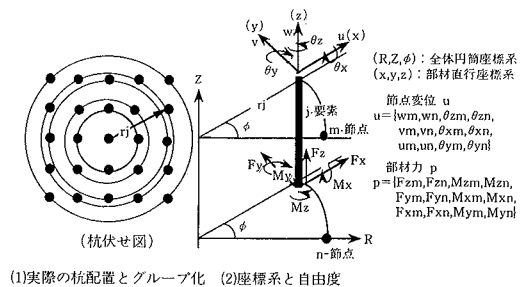


図-2 群杭要素の自由度

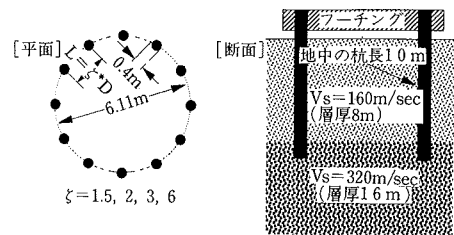


図-3 検討モデル

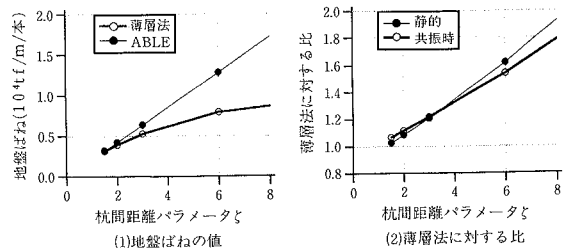


図-4 地盤ばねと杭間距離の関係

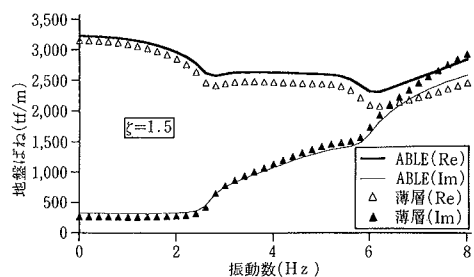


図-5 地盤ばねの振動数依存性

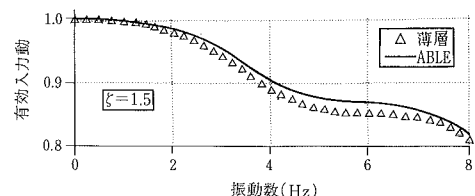


図-6 有効入力動の振動数依存性

3. 薄層法との比較による検証

3.1 解析モデル

前節で誘導した群杭要素の精度の検討を杭モデルを有する薄層要素法³⁾SPRINT による解析結果と比較することで行った。ここで用いた薄層要素法は1本ごとの杭と地盤、杭と杭の間の動的な相互作用を直接的に評価していることから精度の高い解析法と言える。解析モデルを図-3に示す。解析パラメータは杭径Dを基準とした杭間距離L(=ξ・D)である。

3.2 地盤ばねの比較

図-4(1)に杭間距離パラメータξと杭1本当たりの地盤ばねを、同図(2)にABLE(a)の薄層法(s)に対する比(a/s)の関係を示す。同図(2)の比(a/s)のうち、静的とは振動数が零のときの値であり、共振時とは地盤の共振振動数2.8 Hzにおける値である。杭間距離が小さくなるに従い比(a/s)は1, すなわちABLEの解が正解とみなせる薄層法の解に収束することが分かる。通常、群杭はξを2~3とすることが多く、この範囲でリング仮定の群杭要素の妥当性が認められる。ここで、群杭要素のほうが大きなばね値を示すのは、実際の杭が接する面積より大きなリングの外周面が地盤に接し、その余分な反力が地盤ばねに加わるためである。

図-5に杭間距離パラメータξが1.5のときの地盤ばねの比較を示す。同図から、ABLEはほぼ薄層要素法と一致していることが確認できる。

3.3 有効入力動の比較

地盤下方からの入力に対する群杭要素の検証を行う。ここでは、基礎構造物の振動を構造物のない自由地盤の振動で割った有効入力動⁴⁾が比較の対象である。図-6に有効入力動を示す。振動数の上昇に伴い有効入力動が減少する傾向をABLEはほぼ表現している。このことから、地盤下方からの入力、すなわち、地震波入力に対してもABLEの群杭要素は妥当であると考えられる。

4. 地震観測のシミュレーションによる検証

4.1 解析対象と入力地震波

実在する地上式LNG貯槽の地震観測³⁾が解析対象である。このLNG貯槽の側壁および屋根は貯液を保持する内槽と、その外側の保冷材を保持する外槽で構成されている。杭基礎は直径60 cm, 長さ30 mの鋼管杭546本からなり、二重スラブ形式の鉄筋コンクリート製床板を介して貯液と貯槽の荷重を受けている。

加速度計は内槽、基礎床板、および周辺地盤にアレー配置されている。このうち、本解析では内槽の側壁頂部(R測点)、基礎床板上(B測点)の加速度記録、および入力波の設定のために地盤のG測点の加速度記録を使用した。杭に発生するひずみは図-7に示す群杭の最も中心に近い位置のC杭, 外側端部に位置するN杭(加振方向側)とT杭(加振直角方向側)の3本の杭において高感度ひずみ計を用い計測されている。

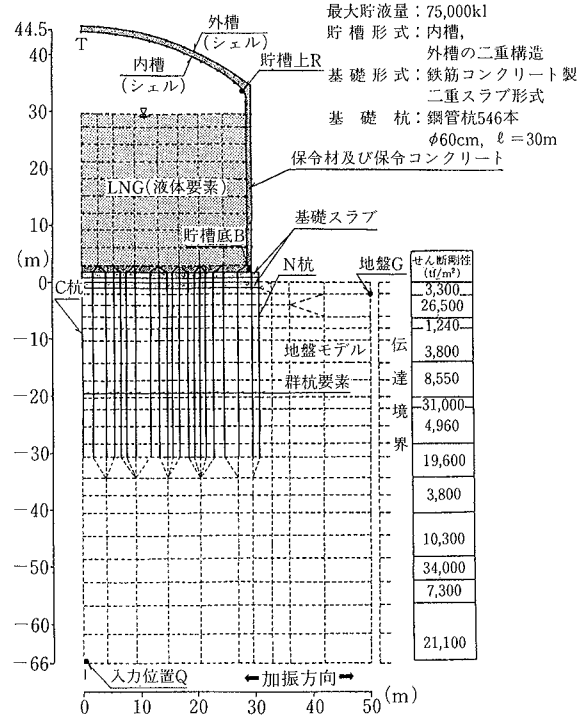


図-7 解析モデル

表-2 最大応答値

表-1 地震時の状況

LNG液深 (m)	スロッシング (1次)	
	周期 (sec)	振動数 (Hz)
26.32	8.56	0.12

測点位置	a観測 (gal)	b解析 (gal)	比b/a
地盤 GL-30m	4.47	4.24	0.95
地盤 GL-3m	7.08	6.16	0.87
地表面 G	6.74	6.49	0.96
内槽側壁上部 T	9.27	10.13	1.09
底板水平 B	6.06	5.13	1.18
底板端部上下 U	4.72	5.75	1.22

ここでの解析は線形で行うため、入力地震波は微小なものを用いた。このとき、地表面での最大応答加速度は7 galである。解析上の基礎に与える入力波は、重複反射理論によりGL-3 m (G測点)の記録を下部の地盤境界位置Qまで戻した結果を使用した。地震時の貯槽の液深は表-1に示すように26.3 mとほぼ満液状態である。

4.2 解析モデル

図-7に解析モデルを示す。地盤のせん断剛性は微小振動を対象としていることから、PS検層結果を用い設定した。地盤の主要な固有振動数は0.83, 2.3 Hzとなる。

内槽および外槽はシェル要素で、断熱材はソリッド要素で、LNGは液体要素で、それぞれモデル化した。地盤の減衰は3%に、構造物の減衰は2%に仮定した。また、LNGの内部減衰はバルジングの固有振動数2.7 Hzにおいて0.5%となるように設定した。

4.3 シミュレーション解析結果

貯槽の加速度応答波形とそのフーリエスペクトルを図-8に、応答加速度の最大値を表-2にそれぞれ示す。応答波形形状およびその最大値に良好な一致が認められ

る。フーリエスペクトルの比較においても、最大振幅を示す振動数は少々異なるが、全体的な傾向はよく再現できている。このことから、ABLEの加速度応答に関する再現性が確認できる。

外側部のN杭の曲げモーメント波形と軸力波形およびそのフーリエスペクトルを図-9に示す。観測結果は杭両端のひずみの値 S_1, S_2 を式(6)に従い曲げモーメント M と軸力 A の両断面力に換算している。

$$A = (S_1 + S_2) / 2 \cdot Ad \cdot E$$

$$M = (S_1 - S_2) / 2 \cdot Z \quad \dots\dots\dots(6)$$

Ad: 断面積, E: ヤング率,
Z: 断面係数, S_1, S_2 : ひずみ

ここでも解析は観測の全体的な傾向と良好な一致を示しているが、最大応答値およびフーリエスペクトルの最大振幅は、解析の方が大きくなっている。ただし、数ミクロンの微小ひずみから断面力を評価していることから、観測にはひずみ計の計測誤差が含まれている。また、シミュレーションでは考慮していない地震動の上下動成分の影響が観測には含まれており、特に、ひずみの和で評価している軸力にその影響が大きい。これらのことを考慮に入れば、解析と観測に加速度記録ほどの一致度はないものの、ABLEによる杭断面力の計算結果に大きな誤りはないと言える。

5. 大規模群杭基礎の地震時応答特性

5.1 動的相互作用効果の検討

地盤をはぎ取り基礎を固定にすることで動的相互作用効果を全く考慮しないモデル(図-10参照。以後、固定モデルと称す)ができる。この固定モデルと前章で検証されたモデル(以後、基本モデルと称す)を比較することで動的相互作用の効果が出ることができる。

図-11に貯槽上Rの応答波形とフーリエスペクトルを示す。固定モデルの応答振幅は基本モデルの応答振幅よりかなり大きく、位相も異なっている様子が明瞭に現れている。また、フーリエスペクトルから、観測と基本モデルの両者は2.3 Hz付近にピークを持つのに対し、固定モデルはほぼ1 Hz高い3.2 Hz付近にピークがあること、固定モデルの最大スペクトル強度は地震観測の2.5倍程度大きいこと、などがわかる。

このように、地盤との動的相互作用を考慮しないと構造物の動的応答特性は適切な表現がなされず、過度な応答になることが示された。

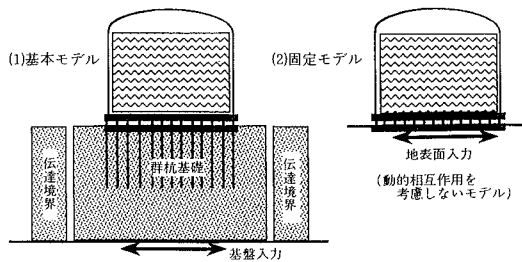


図-10 検討モデル

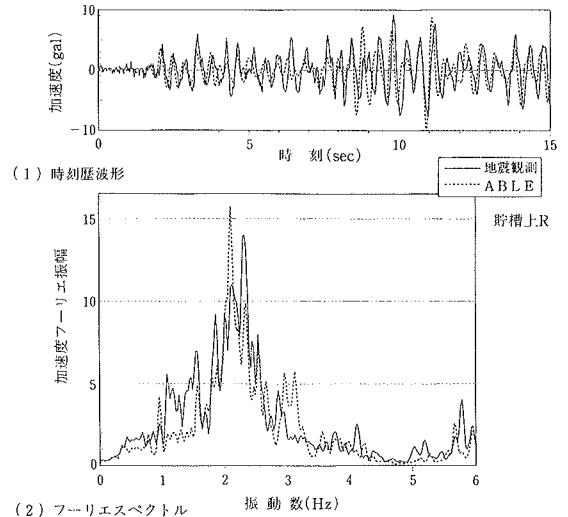


図-8 加速度応答の比較

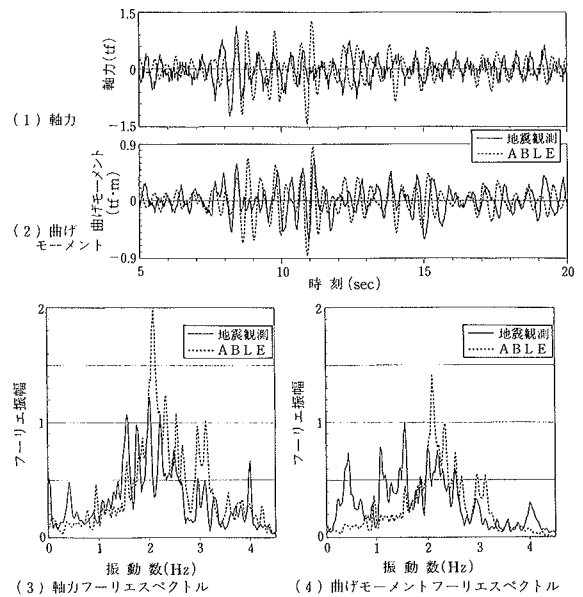


図-9 断面力の比較

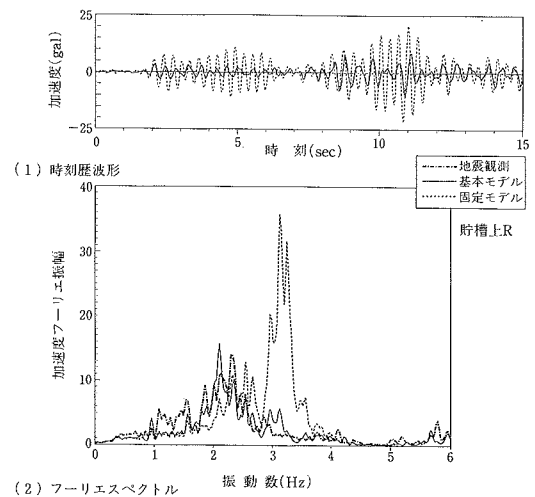


図-11 動的相互作用効果の影響

5.2 有効入力動について

動的相互作用効果のうち基礎構造物への有効入力動の減少に関する解析を示す。図-12に振動数領域での有効入力動(3.3節参照)を示す。同図から、有効入力動は振動数の上昇と共に低下、すなわち自由地盤の増幅特性より小さくなるのがわかる。なお、0.8 Hz, 2.3 Hz など極値を示す振動数は地盤の固有振動数に当たる。

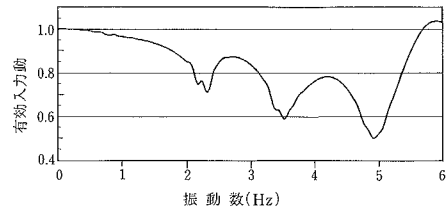


図-12 有効入力動

5.3 上部構造物の慣性力の影響の検討

ここでは、液体を含む上部構造物の質量を零としたモデル(以後、零マスモデルと呼ぶ)と基本モデルを比較することで質量の効果を検討する。応答波形に関して、零マスモデルと基本モデルの比較を図-13に示す。貯槽上Rでの零マスモデルの応答振幅は基本モデルに比べて小さく、位相は基本モデルのそれから短周期側にずれている。これに対して、貯槽底Bの振幅では零マスモデルと基本モデルの間の差異は少なく、逆に11秒付近のように零マスモデルの方が大きくなる時間帯もある。

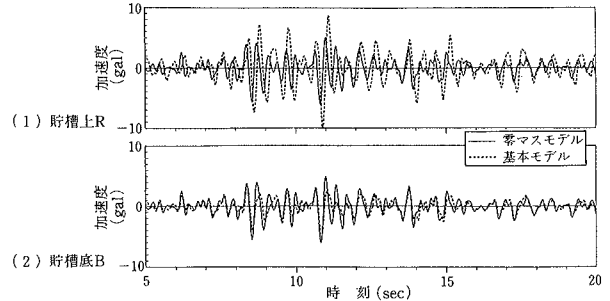


図-13 加速度応答に与える慣性力の影響

貯槽の水平動と回転動に関して、零マスモデルの基本モデルに対する比を図-14に示す。回転動に関する比は6 Hz以下の振動数領域でかなり小さく、質量がない場合はほとんど回転しないことが確認できる。これに対して水平動は2.4 Hz以上の振動数領域で1より大きくなっており、水平動成分の占める割合が大きくなるのが分かる。図-15はこの現象を模式的に示している。

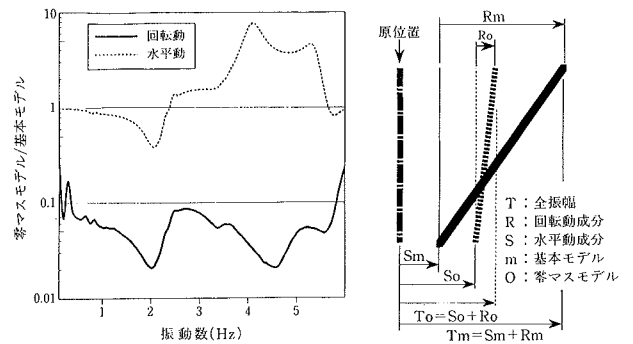


図-14 水平動と回転動に与える慣性力の影響

図-15 水平と回転の運動

断面力応答波形の比較を図-16に示す。最大値の低下率は外側部杭の曲げモーメントで96%, 軸力で89%, 中心部杭の曲げモーメントで65%である。貯槽上Rの応答加速度が上部構造物の質量をなくしたことで39%低下したのに対して、断面力の低下率は著しい。

図-16 断面力に与える慣性力の影響

杭に発生する断面力は地盤変形に追従した杭体の変形によるものと、上部構造物の慣性力が反力として作用したものの和と考えられる。この構造物の場合、上部構造物の慣性力が占める割合がかなり多いことは先に示した断面力の低下率の大きさからわかる。現行の指針類に多く取入れられている震度法を基本とした設計法は杭頭に上部構造物の慣性力を作用させる方法を採用しているが、ここでの結果はその妥当性を示す方向にある。ただし、中心部の杭では地盤の変形に伴う断面力の割合は35%と無視できない値となっている。

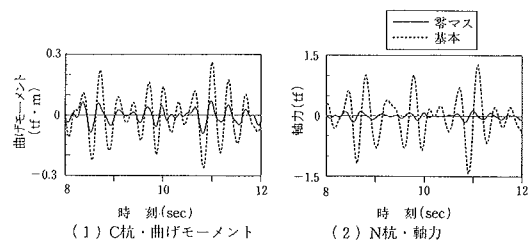


図-16 断面力に与える慣性力の影響

5.4 群杭の振動特性の検討

単杭の地盤ばねと群杭1本当当たりの地盤ばねとを比較することにより、群杭効率を算定した。使用したモデルを図-17に示す。このとき、基礎が回転しないようにその部分を水平ローラーで支持した。単杭は群杭と同じ条件の地盤にあり、杭頭条件も群杭のそれと同様に接地していないフーチングへ剛結している。

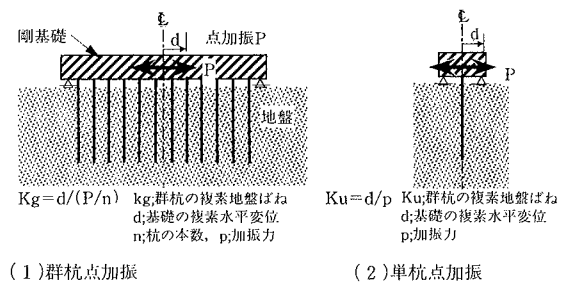


図-17 群杭効果検討用のモデル

群杭の杭1本当当たりと単杭の地盤ばねとの比較を図-18に示す。群杭の復元力に關与する実部は単杭のそれに比べて小さい。また、群杭の地盤ばねの実部は地盤の固有振動数で変化するのに対して、単杭は一樣に振動数に比例して低下するのが特徴的である。減衰力に關与する

虚部では、群杭は0.84 Hzまでは小さく、その振動数を越すと振動数と共に増大し単杭より大きくなる。

振動数が零の静的な地盤ばねに関して、群杭の単杭に対する比を群杭効率とした時、この構造物基礎の群杭効率は5.33になる。群杭効率が杭本数 n のべき乗 m で評価 (n^m) できると仮定すれば、この場合 $m=0.266$ となる。杭長の1/3に当たる深さ10 m位置での中心部C杭と外側部杭N、T杭を対象に群杭の加速度の平面的な分布をみている。図-19は地盤下部の変位振幅に対する加速度の伝達関数を示している。杭応答は地盤応答にほぼ追従するが、地盤の2次共振振動数2.3 Hz以上では、杭の振幅は地盤のそれより小さい。中心と外側の杭間に応答振幅の差はほとんどなく、ここで検討した6 Hz以下において、杭の加速度応答は半径方向位置に影響されない。

杭のせん断力の伝達関数を図-20に示す。0.12 Hzのピークは内部液体のスロッシングによるもので、それ以降のピークは地盤の共振振動数と一致している。杭加速度の伝達関数には0.12 Hzのピークはなく、断面力だけに現れていることが特徴的である。ただし、実際の地震応答では長周期域の入力は小さいのでスロッシングによる断面力は小さくなると考えられる。

半径方向の杭頭部断面力について中心からN杭方向への分布(振動数2.3 Hz)を図-21に示す。軸力分布は外側に向かい増大し、杭の配置パターンが変わる25 m付近から急激に増大する。これは貯槽に作用する転倒モーメントが側壁によって上下方向の軸力として基礎の外縁部に伝えられるためと思われる。せん断力と曲げモーメントは中心からの距離が25 mまでは距離と共に減少していき、それより外側では増大する。この増加は周辺地盤の反力を外縁部の杭が受けるためと考えられる。

6. まとめ

大規模な群杭を有する地上式LNG貯槽について検討した結果、以下のことが確認できた。

- ① 構造物の加速度および杭の断面力応答に関する解析結果は振幅・位相ともに観測結果と良好な一致を示し、解析方法の妥当性が認められた。
- ② 地盤との動的相互作用を考慮しない場合の構造物の応答は考慮した場合の約2倍の値となる。
- ③ 上部構造物の慣性力の影響は構造物の応答加速度より杭の断面力に大きな影響を与える。
- ④ 杭に発生する断面力は上部構造物の慣性力による反力が支配的であるが、杭の位置によっては地盤の変形に伴う杭体自体の変形による断面力も無視できない。
- ⑤ 地盤下部からの入力に対して、群杭の杭位置の違いによる加速度応答特性の変化はほとんど見られない。
- ⑥ 構造物内の液体のスロッシングは杭の加速度応答にほとんど影響せず、杭の断面力に影響する。
- ⑦ 群杭効率を杭本数 n のべき乗 m で表せると仮定したとき、 m は0.266になった。

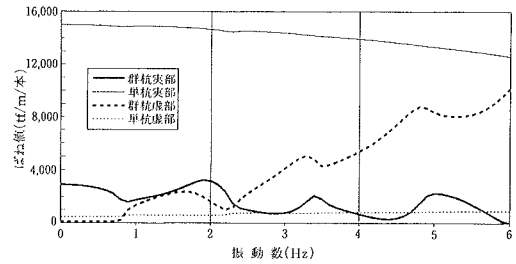


図-18 地盤ばね(群杭と単杭の比較)

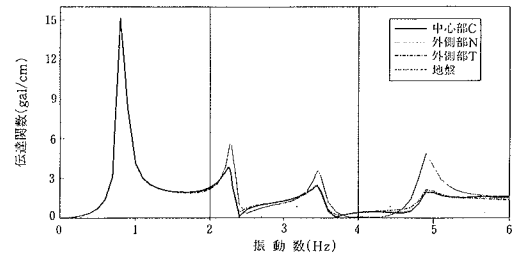


図-19 杭加速度の伝達関数

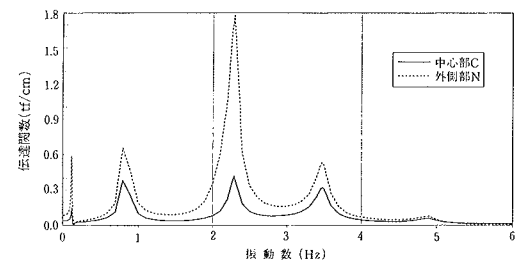


図-20 杭のせん断力の伝達関数

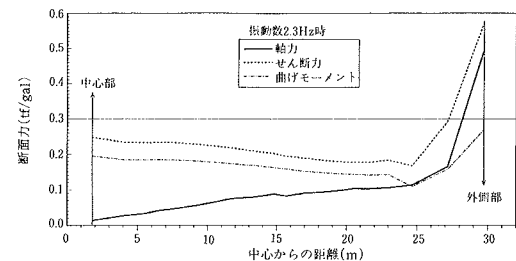


図-21 杭の断面力の水平方向分布

参考文献

- 1) 後藤洋三, 白砂 健, 河村秀紀, 徳永正博: 液体—構造物—地盤連成系地震応答解析手法について, 大林組技術研究所報, No. 27, p. 54~58, (1983)
- 2) 安井 譲, 高野真一郎, 表 佑太郎: サブストラクチャー法を用いた群杭基礎の三次元地震応答解析(その1, その2) 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p. 277~280, (1989)
- 3) 柳父行二, 後藤洋三: 群杭基礎を有するLNG地上式貯槽の地震応答とその解析, 第7回 日本地震工学シンポジウム, p. 1867~1870, (1986)
- 4) 土木工学会編著: 動的解析と耐震設計(第二編 動的解析の方法), 技報堂出版, p. 230~240, (1989)