

斜杭を用いた海上配管橋基礎の 地震時保有耐力法に基づく耐震設計例

前田勉¹・賀茂友裕²・右近八郎³・加藤浩司⁴

¹正会員 工修 東邦ガス(株)知多緑浜工場建設部（〒456-8511愛知県名古屋市熱田区桜田町19-18）

²正会員 工修 鹿島・五洋・東亜共同企業体（〒451-0045愛知県名古屋市西区名駅34-22）

³正会員 工修 鹿島 情報システム部（〒107-8502東京都港区赤坂6-5-30）

⁴正会員 鹿島 土木設計本部（〒107-8502東京都港区赤坂6-5-30）

1. まえがき

斜杭を用いた海上配管橋基礎に対して道路橋示方書¹⁾の方法により地震時保有水平耐力法設計（以下、「保耐法」）を実施した。道路橋示方書（以下、「道示」）は斜杭を想定した手法ではなく、このため斜杭に関しては、汎用的手法が確立されていないのが現状である。今回、複合非線形フレーム解析システムを適用し、斜杭に対する保耐法設計に関していくつかの知見が得られたので紹介する。

2. 解析対象

解析対象は、東邦ガス(株)知多緑浜工場に建設される図-1に示すような配管橋基礎である。

今回は、P5橋脚（橋軸方向）についての解析結果を紹介する。構造は図-2に示すとおり、杭径1,300mm、杭頭部肉厚22mmの鋼管16本を打込み角20°で放射状に打設する鋼管斜杭基礎である。海上部に建設されるため、設計海底面から約11.5m突出した杭となる。

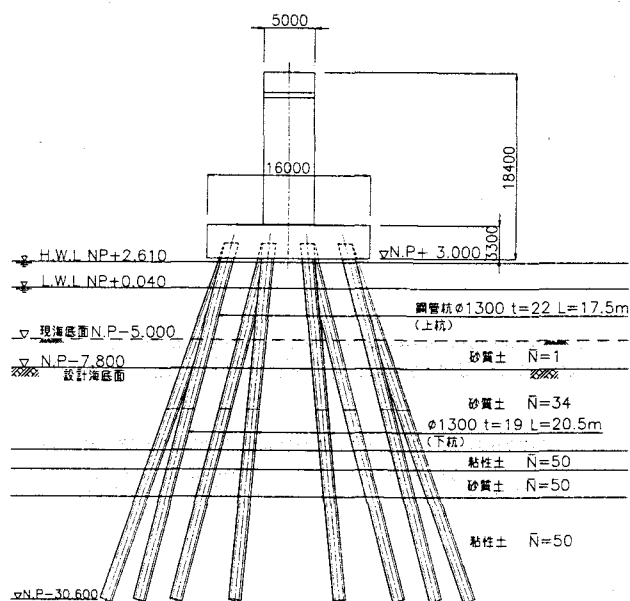


図-2 対象橋脚構造図

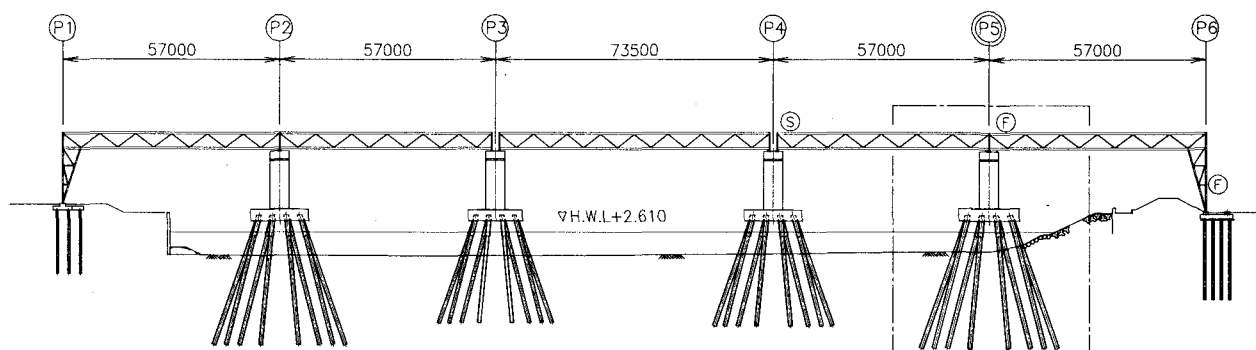


図-1 対象橋梁全体図

表-1 基本条件

重要度の区分	B種	重要な橋
地域区分	A	愛知県
地盤種別	I種	表-2参照

表-2 土質条件(P5)

標高 (NP)	地層 名	層 厚 (m)	N 値	γ (tf/m^3)	C (tf/m^2) 又は ϕ ($^\circ$)
-7.8m	T_{ms1} (上)	7.4	34	1.85	$\phi=35^\circ$
-15.2					
-17.7	T_{m1}	2.5	50	1.90	$C=60\text{tf}/\text{m}^2$
-20.4	T_{ms1} (下)	2.7	50	1.85	$\phi=39^\circ$
	T_{m1}	—	50	1.90	$C=60\text{tf}/\text{m}^2$

※当地盤は液状化しない

表-3 橋脚の照査結果

地震動の種類		タイプⅠ	タイプⅡ
破壊形態		曲げ破壊型	曲げ破壊型
固有周期	T	0.59sec	
橋脚の許容塑性率	μa	2.74	5.52
設計水平震度	k _{hc}	0.70	2.00
等価重量	W	1,680 tf	1,680 tf
等価水平震度	k _{he}	0.40	0.30
等価地震力	k _{he} ・W	672 tf	1,058 tf
地震時保有水平耐力	P _a	1,970 tf	2,151 tf
地震時保有水平耐力の判定		O.K.	O.K.
基礎の設計震度	k _{hp}	1.41(タイプⅡより)	

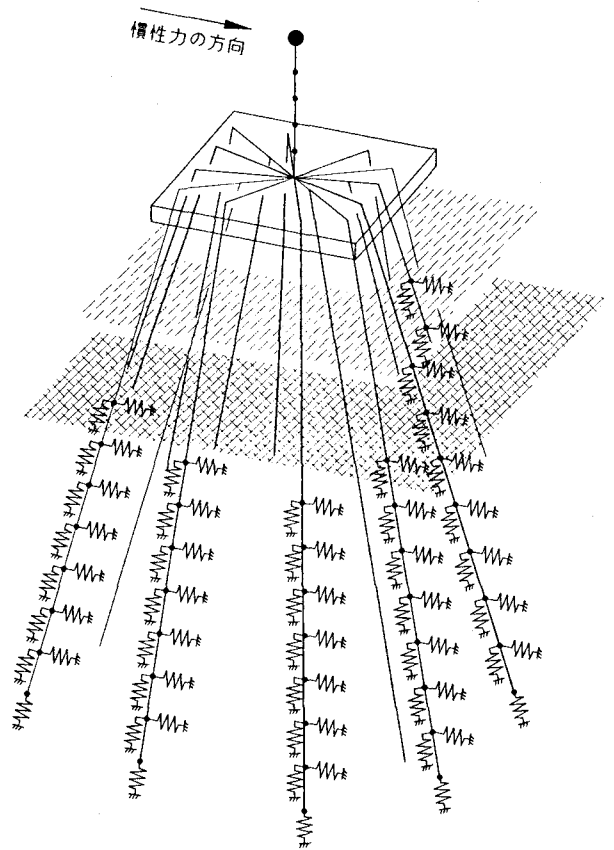
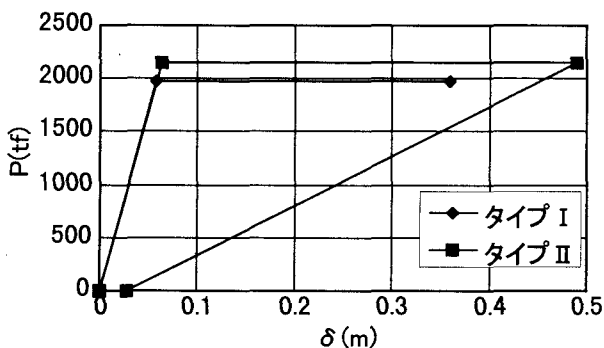


図-3 解析モデル

当基礎に関して、道示に準拠して保耐法による照査を実施した。基本条件を表-1に、地盤条件を表-2に、橋脚の照査結果を表-3に示す。橋脚の地震時保有水平耐力等より、当基礎の設計震度は $k_{hp}=1.41$ と算定される。

3. 解析モデル

(1) 杭基礎の解析モデル

解析モデルは、図-3に示すような3次元モデルとし、地中部には非線形地盤バネを考慮した。杭体は非線形のビーム要素、フーチングは剛体とした。フーチング部から上部もビーム要素とし、質量を各節点に分散させた。上部工荷重は、設計振動単位を考慮し、自重としての質量と慣性力算出用の質量の2種類を評価した。モデルは3次元とし、複合非線形フレーム解析システム²⁾により解析を行った。

(2) 杭軸方向の抵抗特性

a) 杭体のM- ϕ 関係の設定

杭体に関しては、道示では死荷重が作用した時の杭頭反力を軸力としてM- ϕ 関係を算出してよいとしている。

しかし当基礎の場合、斜杭を使用していることから

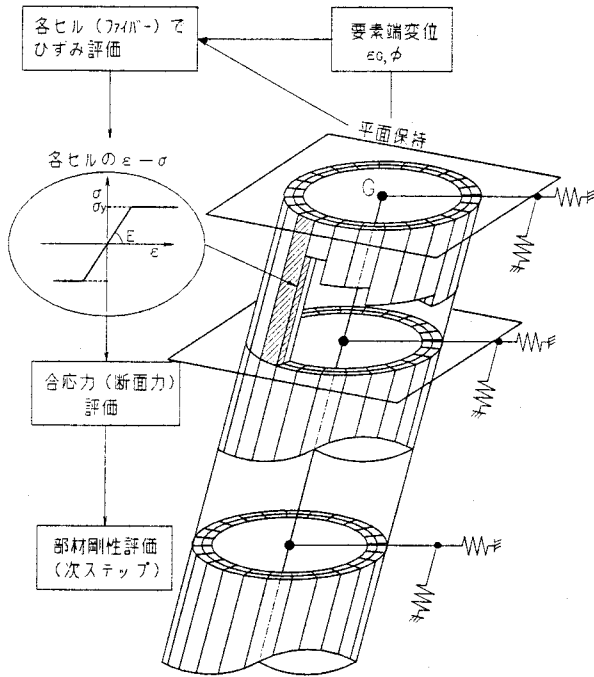


図-4 杭体のモデル化

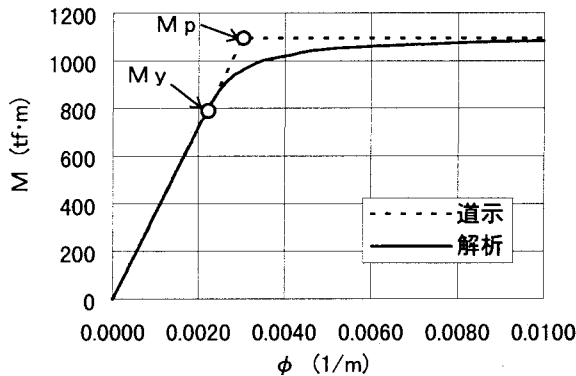


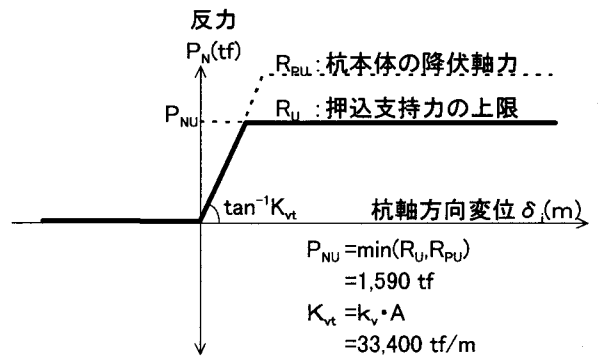
図-5 軸力・自重相当時の単杭のM-φ関係

ら水平力の増加が直接軸力増減に影響し、杭の降伏モーメントも大きく変動することから、道示で規定するような一律のM-φ関係を設定することができない。また二曲曲げの問題についても考慮する必要があることから、解析においては、杭体を図-4に示すような半径方向2分割、円周方向24分割したファイバーモデルにおきかえ、その各ファイバーにバイリニア型の応力～ひずみ関係を設定した。参考のため、当モデルによる自重相当軸力作用時の単杭のM-φ関係を図-5に示す。

b) 杭軸方向地盤バネの設定

当基礎の斜杭は放射方向に打込み角を持っているため、地震時慣性力方向と直角に近い方向に傾斜して打ち込まれている杭は軸力よりも曲げモーメントが卓越して地中部の最大モーメント位置での応力がクリティカルになる可能性がある。また、鋼管杭地中部で断面変化されていることから、断面変化部の応力も把握する必要がある。そこで、道示に

杭先端



杭周面

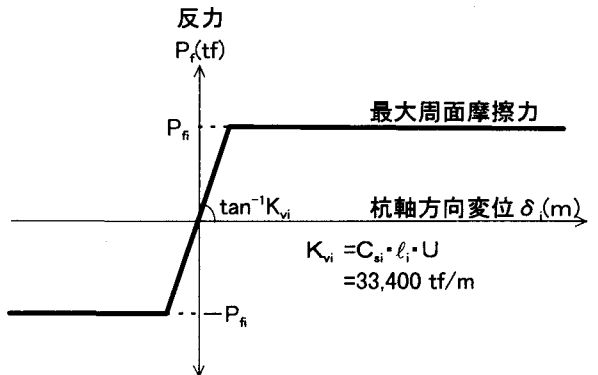


図-6 杭軸方向の地盤抵抗特性

水平地盤反力度

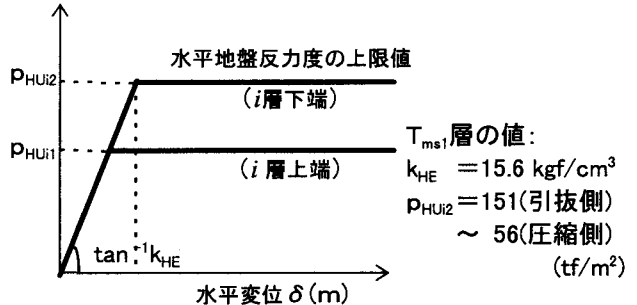


図-7 杭軸直角方向の地盤抵抗特性

示される杭頭バネに代わり、地中部の軸力分布を考慮できるよう、周面摩擦分を分布バネとした。

杭軸方向の地盤抵抗特性を図-6に示す。バネ値は、 $C_s - k_v$ 法³⁴⁾により下式で評価した。

$$C_s = \begin{cases} 0.036 N & (\text{砂質土}) \\ 0.058 N & (\text{粘性土}) \end{cases} \quad (\text{kgf/cm}^3)$$

$$k_v = 1.62 \frac{28 N}{30} \cdot \left(\frac{D}{30} \right)^{-3/4} \quad (\text{kgf/cm}^3)$$

(3) 杭軸直角方向の抵抗特性

杭軸直角方向の地盤バネの設定にあたっては、当基礎が斜杭のため、杭の傾きを考慮したバネ反力の上限值を設定した。杭軸直角方向の地盤抵抗特性を図-7に示す。

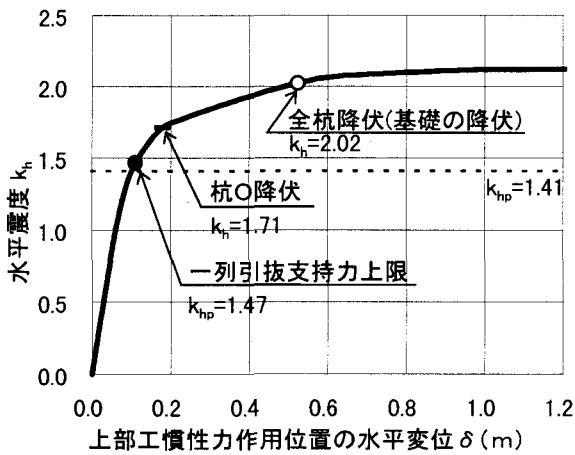


図-8 基礎の震度-変位曲線

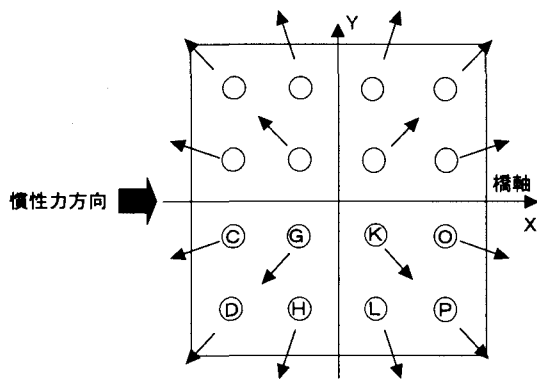


図-9 杭の配置図

4. 解析結果

(1) 基礎の耐力

解析から得られた $kh-\delta$ 曲線を図-8に示す。

基礎の耐力は基礎の設計震度 $k_{hp}=1.41$ よりも大きく、耐力的には十分であることが確認された。

震度の増大に伴う当基礎の挙動については以下の特徴が認められる。まず引張側の杭C及びD(図-9参照)が周面摩擦力の上限に達して支持力を失い、その結果押し込み側の杭の軸力が急増して杭Oが降伏に至る。その後は変形の増加度合いも大きくなり、全杭が降伏に達して耐力を失う。

なお、ここでは最外縁部の応力度が降伏状態に達した時を杭の降伏、全杭が降伏した時を基礎の降伏と定義した。

基礎降伏時の変形図を図-10に示す。引抜側の杭が支持力を失って抜け上がっている。

また、杭O各ファイバー要素の $\epsilon-\sigma$ の履歴を図-11に示す。圧縮側の杭Oでは基礎降伏時に下杭上端においてほぼ全断面で降伏に近い圧縮応力が発生している。

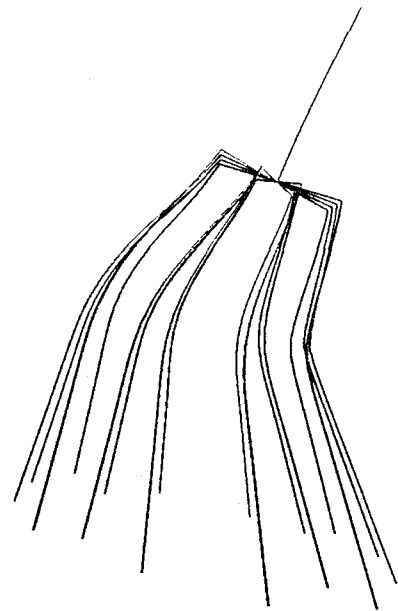


図-10 基礎降伏時変形図

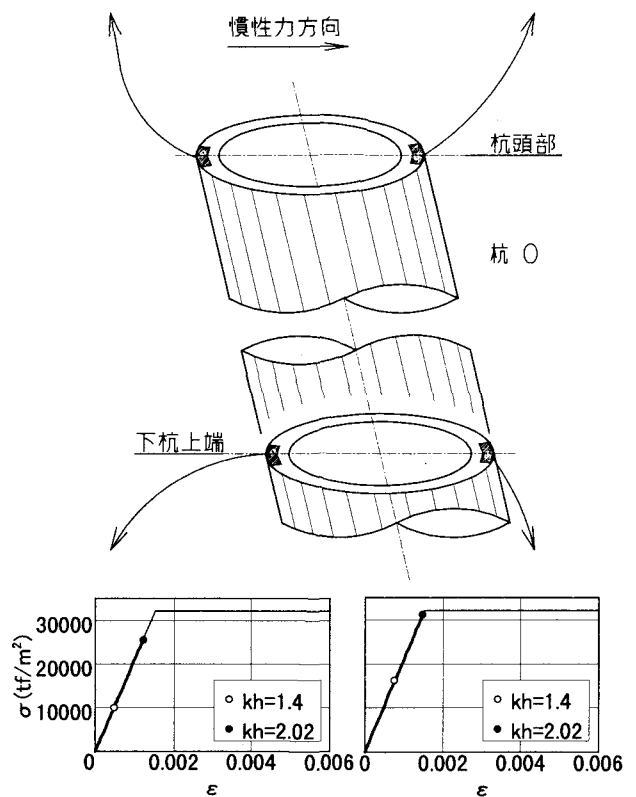
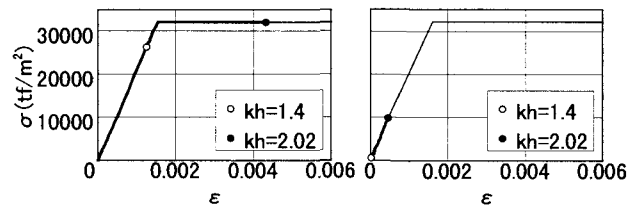


図-11 各ファイバーの $\epsilon-\sigma$ 履歴曲線(杭O)

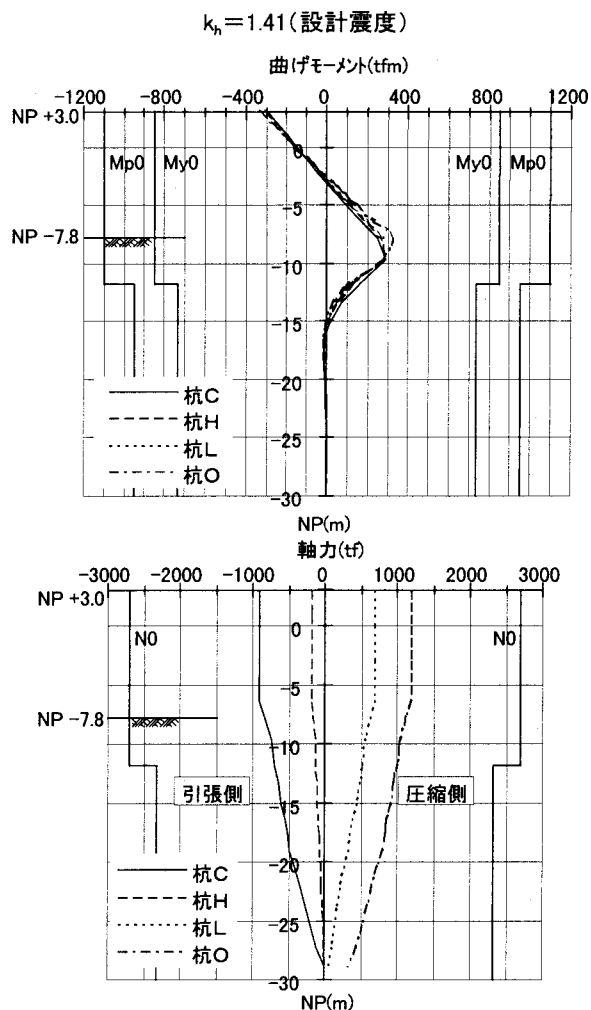


図-12 杭の断面力図

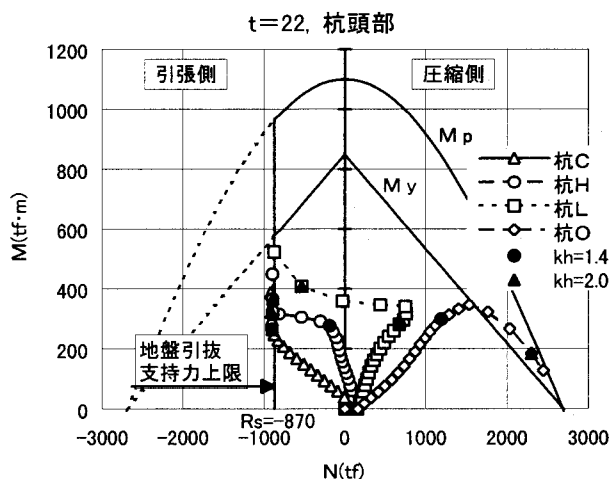


図-13 M-N履歴曲線

(2) 杭の断面力

基礎の設計震度時及び降伏時の杭の断面力図を
図-12に示す。

杭Oに関しては軸力が卓越し、杭C、Hに関しては地盤の引抜き抵抗が取れず軸力は増大せずに曲げモーメントが卓越している。

図-13にはM-N履歴曲線を示す。

杭Oの杭頭部で最初に降伏に達し、その後は引抜き側の杭の地中部のモーメントが大きくなることで杭全数の降伏に至っていることがわかる。

また、杭Oの最終的なモーメントが杭頭部、下杭上端とも小さく、軸力増加の影響を受けて曲げに対する耐力が大幅に低減されていることも確認できる。

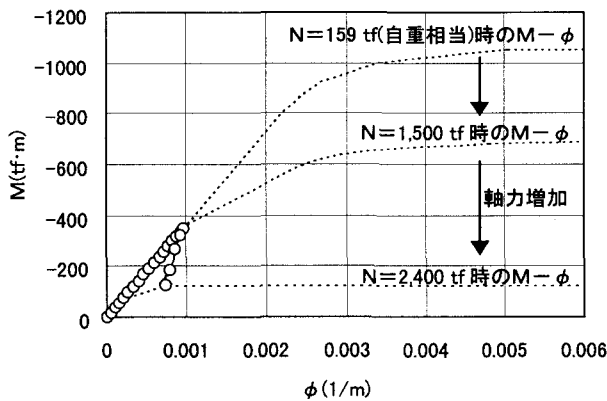


図-14 杭のM-φ曲線

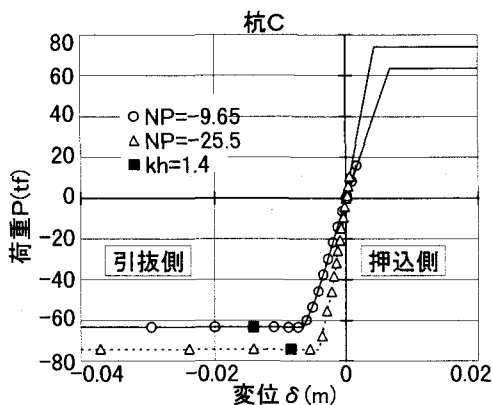


図-15 周面分布バネP-δ履歴の一例

図-14に、解析により結果的に得られた圧縮側の杭OのM-φ履歴を示す。図-5に示したM-φ関係とは大きく異なることがわかる。すなわち、杭の軸力約1,500 tf ($M=350 \text{ tf} \cdot \text{m}$, $k_h=1.69$ に相当)までは杭体は弾性範囲内にあるが、それを超えて慣性力が大きくなると、杭の軸力増に伴って小さくなってきている杭体の降伏曲げモーメントに発生モーメントが達し、その後曲げモーメントM、曲率φとも低下する。その際には杭体特性の非線形領域を辿ることになり、結果として図-14に示す履歴が得られた。

(3) 地中部断面力

杭軸方向地盤バネを分布バネで評価し、地中部においても杭の耐力を評価した。図-13の地中部(下杭上端)のM-N関係を見ると、最終的にはこの部分で最後の杭の降伏、すなわち基礎の降伏に至っている。斜杭の場合、地中部分の軸力分布を把握するために軸方向バネを分布バネとすることが望ましいことがわかる。図-15に周面分布バネのP-δの履歴の一例を示す。

(4) 有限変形を考慮した解析

海上に突出した形式に対し、有限変形を考慮した

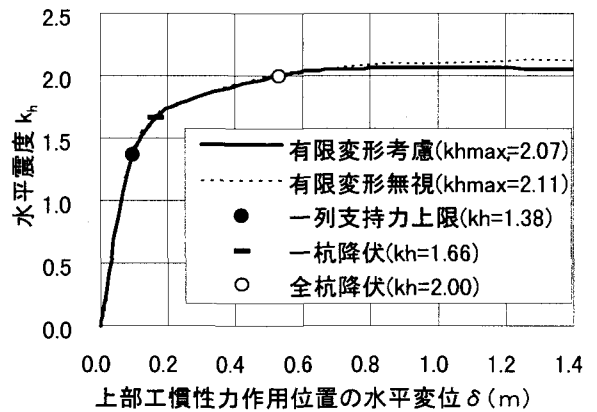


図-16 有限変形考慮時の k_h -δ曲線

解析(幾何学的非線形解析)を実施した。 $k_h \sim \delta$ 曲線を図-12に示す。

その結果、2%程度の耐力低下があるものの、当基礎では明らかな座屈(構造不安定性)は生じないことが確認できた。

5. まとめ

斜杭を用いた海上配管橋基礎に対して道路橋示方書の方法により地震時保有水平耐力法設計を実施した。今回の斜杭に対する保耐法設計に関して以下の結果が得られた。

- ①当基礎では、まず引抜き側の杭が引抜き支持力を失い、杭体の降伏を誘発して基礎の降伏に至った。
- ②当基礎では、斜杭の軸力変動が大きいため、結果として得られたM-φ関係は軸力変動を考慮しない場合とは大きく異なることが確認された。
- ③杭軸方向の地盤バネを分布バネで評価することにより、地中部の軸力分布を考慮した耐力評価が可能であり、当基礎が地中部の曲げモーメント卓越部分で全杭降伏に至ることを確認した。
- ④海上に突出した形式に対し、有限変形を考慮した解析を実施した結果、2%程度の耐力低下があるものの、当基礎では明らかな座屈は生じないことを確認した。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 I 共通編, IV 下部構造編, V 耐震設計編, 日本道路協会, 1996.12
- 2) 沖見芳秀, 右近八郎: 複合非線形フレーム解析システムの開発, 土木学会誌「技術最前線」, 1995.1
- 3) 杭基礎設計便覧, 日本道路協会, 1992.10
- 4) 岡原美知夫, 中谷昌一, 松井謙二: 杭の鉛直及び水平方向の支持特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.37A, 1991