

京都大学工学部 正会員 足立紀尚, 木村 亮
 京都大学大学院 学生員 張 鋒, 亀井宏之

1. はじめに

現在, 我が国では基礎の設計法に限界状態設計法を導入しようとする気運が高まっており, 杭基礎においてもその終局水平挙動を明確に把握することが必要となってきた。そこで, 平成5年9月, 阪神高速道路公団の湾岸線岸和田大橋における仮設ベントに用いられた基礎杭に対して, 単杭と9本群杭(場所打ちコンクリート杭)の現場大変位水平載荷試験が行われた。本試験は杭頭変位量が杭直径($D=1.2\text{m}$)の20%~30%におよぶ破壊試験である。本論文では, 単杭に関して試験結果を示すと同時に, 3次元弾塑性有限要素法(GPILE-3D)¹⁾を用いて解析し, 結果の比較を行った。

2. 実験の概要²⁾

載荷試験地は, 3年前に埋立された大阪府岸和田旧港の埋立地であり, 試験杭は, 阪神高速道路公団の湾岸線岸和田大橋の建設における仮設ベントに用いられた単杭および3×3の9本群杭である。試験杭はベント工法で設置された場所打ちコンクリート杭であり, 杭長 L は30.4m, 杭径 D は1.2mである。Fig.1は載荷試験杭の配置図を示す。単杭の載荷方法は, 片方向多サイクル繰返し方式により行い, 載荷は125tfまで7サイクルで実施した。また, 載荷時間は処女荷重時には15分間, サイクル間の無荷重時(0荷重時)は15分間, 履歴荷重段階時は3分間一定荷重を保持させるものとした。Fig.2は載荷試験周辺地盤の条件を示している。地盤は上層約10mが砂礫主体の埋立層であり, 下層は粘性土層と砂質土層の互層である洪積層が分布している。

3. 3次元弾塑性有限要素法(GPILE-3D)の概要

3-1 GPILE-3Dの概要

GPILE-3Dは, 木村ら³⁾により擬似3次元のGPILEから3次元化したGPILE-3Dへと開発された。当初は, 連立方程式の解法に共役傾斜法を用い, 降伏規準をDrucker-Pragerの規準とし, Associated flow ruleを適用して求まるものとした。また, 杭要素には, コラム要素を採用していた。ところが, 杭の終局挙動を適切に表現することが困難であったために, 杭要素を非線形弾性体とし, 曲げを表現できるビーム要素を導入した。また連立方程式の解法も, 共役傾斜法から正解の得られる直接法の一つであるLDLT法とした。このGPILE-3Dを用いて遠心模型実験への適用性を実証し⁴⁾, さらに, 平成2年度に阪神高速道路公団梅田入路の撤去工事に際して行われた単杭および2本群杭の現場大変形水平載荷試験に対して解析の適用性を実証した⁴⁾。本報告では, このGPILE-3Dを用いて, 前述の梅田の解析と同様な方法で2.で示した現場実験の解析を実施した。

3-2 解析手法

杭の非線形性は, 曲げモーメント(M)と曲率(Φ)の関係で表現した。M- Φ 曲線⁵⁾をFig.3に示す。ここでは, M- Φ 関係をクラック(C), 降伏(Y), 極限(U)というトリリニアのモデルとして表し, 3点を(1)式のハイパボリック関数で近似した。

$$M^{1+a} + bM = bE_0J\Phi \quad (1)$$

ここに E_0 は初期弾性係数, a と b はパラメータである。

Analyses on Ultimate Behavior of Lateral Loading Single Pile by 3-Dimensional Elasto-Plastic FEM

by Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA, Feng ZHANG, and Hiroyuki KAMEI (Kyoto Univ.)

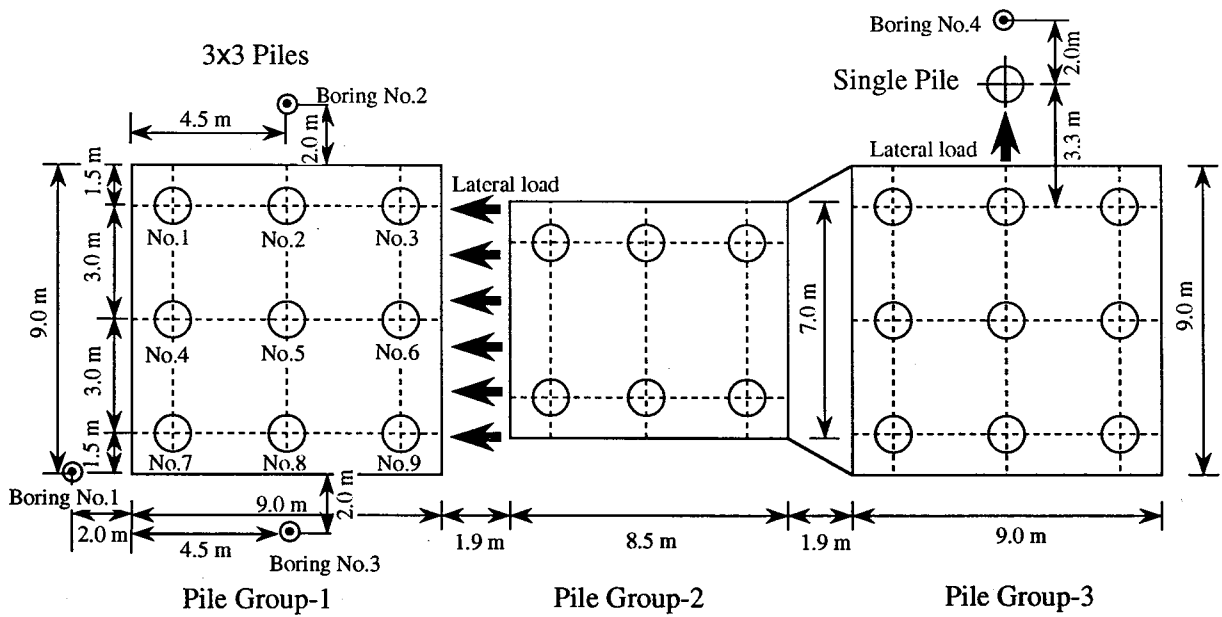


Fig. 1 載荷試験杭の配置図

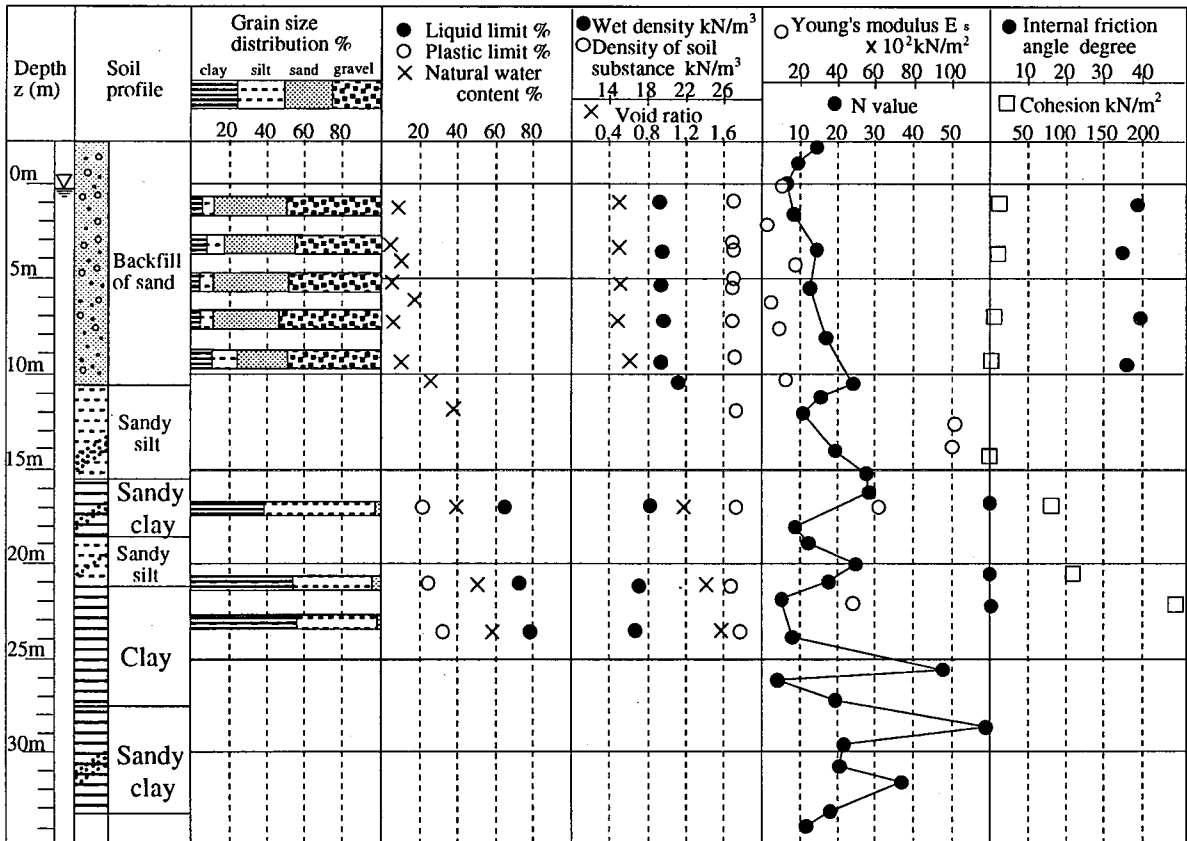


Fig. 2 載荷試験地の地盤条件

また、試験杭は軸方向に鉄筋の変化部があり、変化部の上部(Upper Part)と下部(Lower Part)のM- Φ 関数を別々に設定している。Fig. 3でC, Y, Uの3点を決定するには、コンクリートおよび鉄筋の応力~ひずみ関係が重要である。図中のUpper Partにおいて、Case-2はコンクリート、鉄

筋ともに道路橋示方書の設計基準⁶⁾に基づいて決定したものである。しかし、本載荷試験は非常に大きな変形を与えるものであり、鉄筋の降伏をより適切に表現できるモデルを採用する必要がある。Case-1は鉄筋の応力~ひずみ関係にFig. 4のPark-Pauleyモデル⁷⁾を採用して決定したもので

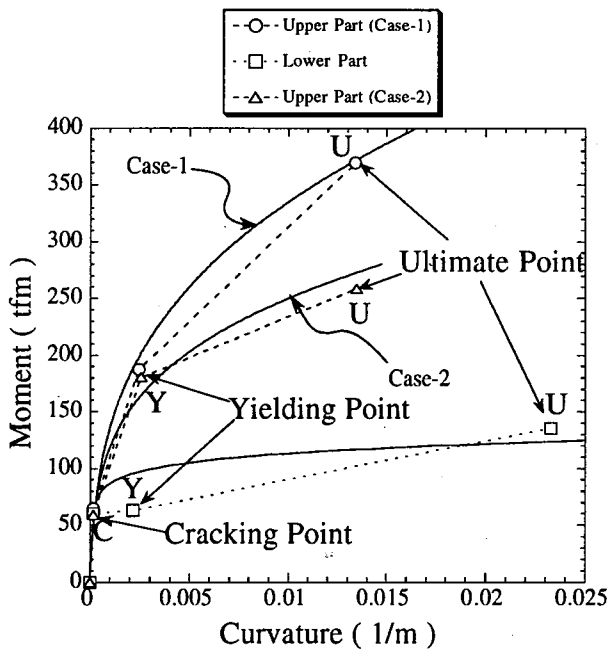


Fig.3 M-φ関係

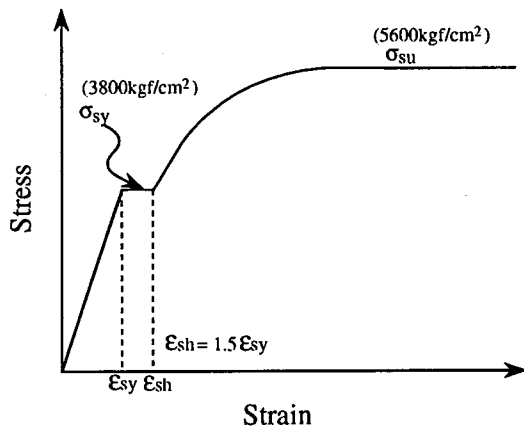


Fig.4 Park-Pauleyモデル

ある。すなわち、道路橋示方書では σ_{sy} だけ用いるのに対し、Park-Pauleyモデルでは σ_{sy} だけでなく、 σ_{su} を用いたモデルである。Table 1は、それぞれのケースにおいて用いたコンクリートの σ_c と鉄筋の σ_{sy} を示す。本報告では、Case-1およびCase-2の2ケースについて解析結果を示す。

地盤の応力～ひずみ関係は弾完全塑性とし、降伏条件に(2)式のDrucker-Pragerの降伏規準を用いた。

$$f_y = \sqrt{J_2} - 3\alpha\sigma_m - \kappa_s = 0 \quad (2)$$

ここに J_2 は偏差応力の第2不変量、 σ_m は平均主応力、 α と κ_s は(3)(4)式のように内部摩擦角 ϕ と粘着

Table 1 コンクリートと鉄筋の材料定数

	σ_c (kgf/cm ²)	σ_{sy} (kgf/cm ²)
Case-1	360	5600 (σ_{su})
Case-2	300	3800

Table 2 解析に用いた地盤定数

	E (tf/m ²)	ν	c (tf/m ²)	ϕ (°)
第1層	2800	0.333	0.0	33.9
第2層	2550	0.333	0.0	33.4
第3層	2000	0.380	6.25	0.0
第4層	4400	0.333	0.0	37.0

力 c から求められる材料定数である。

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{9 + 3\sin^2 \phi}} \quad (3)$$

$$\kappa_s = \frac{3c \cos \phi}{\sqrt{9 + 3\sin^2 \phi}} \quad (4)$$

また、解析に用いた地盤定数をTable 2に示す。深さの順に第1層は埋立層、第2層は層厚約10mの砂層、第3層は粘性土層、第4層は砂質粘性土となっている。変形係数については、Fig.2の白丸で示したように孔内水平載荷試験によって計測されているが、本解析においては変形係数Eを標準貫入試験のN値から $E=20N$ として算定した。また、 K_0 値は0.5とした。

解析に用いた単杭の有限要素メッシュをFig.5に示す。メッシュの節点数は2470、要素数1944である。また、荷重は地表面高さ0.9mのところにあり、z方向の最上部のメッシュは、弾性係数の非常に小さい値をもつDummy要素としている。

本報告では、荷重ステップは2fごとの60ステップ(120f)で行い、ワークステーションSPARC IIで計算を実施したが、約12時間の計算時間を要した。

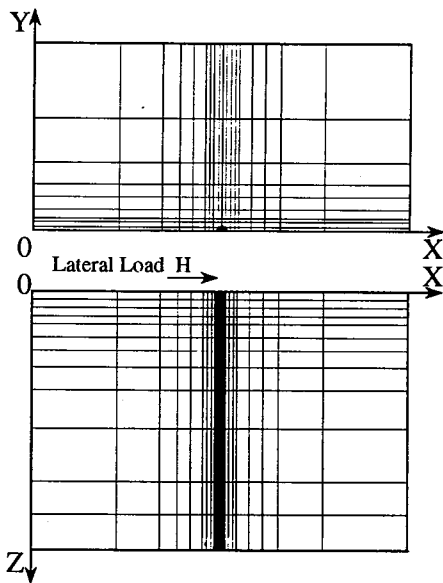


Fig.5 有限要素メッシュ

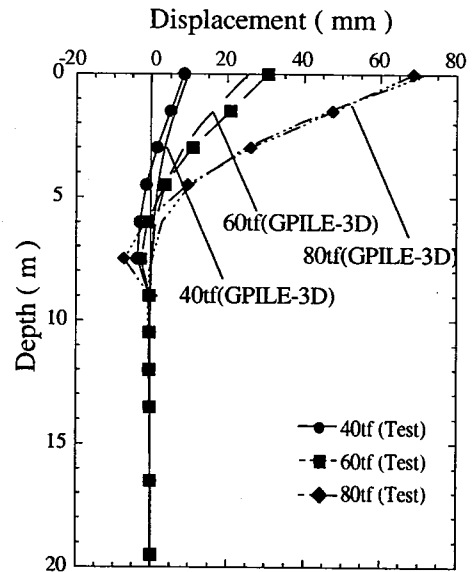


Fig.7 杭体変位分布

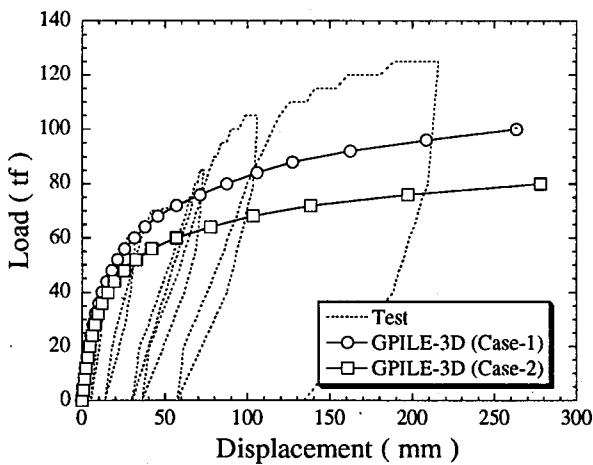


Fig.6 載荷点の荷重変位関係

4. 試験結果と解析結果との比較²⁾

4-1 荷重～変位関係

Fig.6に載荷点の荷重～変位関係を示す。実験では荷重が70tf～75tf間で変位が急増している。載荷装置はジャッキ～ロードセル～スペーサー～杭体の順で伝達する構造としていたが、実験事実として75tf載荷時にスペーサーに座屈が発生し、1時間半載荷を停止していた。また、75tfで地盤が極限に達したかのように思われたが、再載荷した時に地盤が再び強くなったような挙動を示した。Fig.6は解析結果と実験結果の比較を示している。Case-2の曲線はM-Φ関係と地盤を道路橋示方書の設計基準に基づいて算定したモデルを採用し、それに対しCase-1の曲線は、杭の終局状態をより適切に評価するために鉄筋の応力

～ひずみ関係にPark-Pauleyモデルを導入して算定したM-Φ関係を用いて行った解析結果である。Case-2では、スペーサー座屈の75tfまでは解析結果と実験結果は非常に良く一致しているが、実験では75tf～100tfまで荷重が急激に増加しているため解析によってその後の終局状態をうまく表現することができなかった。

4-2 杭と地盤の水平変位分布

実験では、杭体の変位は深さ6m付近に第1不動点があり、深さ9m付近に第2不動点がみられる。第1不動点深さは、荷重増加に伴い次第に深くなっている。Fig.7は、このような現象と解析結果とを比較したものである。解析では、第1不動点や第2不動点の違いを表現することはできなかったが、全体的な変位の傾向は実験結果とよく一致している。さらに、Fig.8は杭中心から2.4m載荷方向に離れた位置(K-1)の地中変位である。杭前方の地中変位について、杭に近い地中の変位はFig.7で示す杭体変位と同じような傾向になるが、解析で求めた地中変位分布は載荷点からの距離が遠いところの分布傾向になっている。実験結果と比較すると、定性的にも定量的にも一致しなかったが、これは解析において杭前面の地盤が完全に降伏していることに原因があると考えられる。

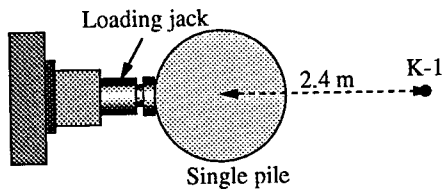
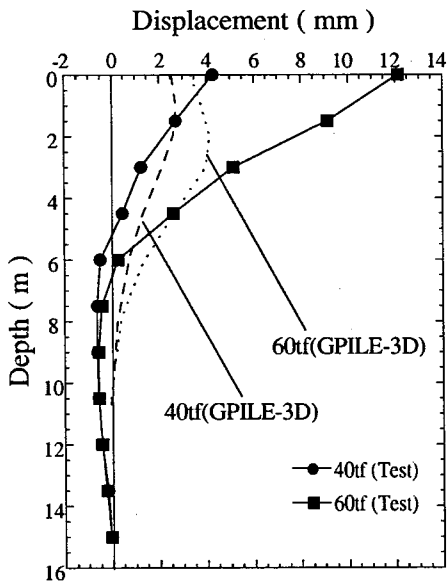


Fig.8 杭前方の地中変位分布と計器配置図

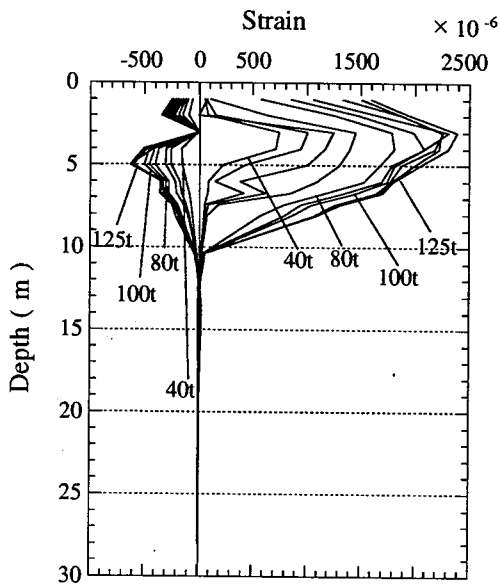


Fig.9 鉄筋計のひずみ分布

4.3 ひずみ分布と曲げモーメント分布

Fig.9は、試験杭体に設置した鉄筋計のひずみ分布である。引張側のひずみは深さ3m~4m付近で荷重が増大するにしたがい急増しており、ここで杭体コンクリートにクラックが発生したと思われる。また、ひずみが0となる深さは、荷重レベルに関係なく12m付近であり、埋立層の

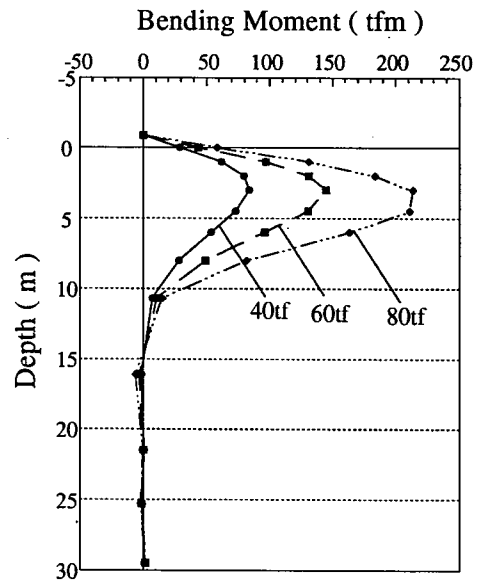


Fig.10 曲げモーメント分布

境界とほぼ一致している。Fig.10には、曲げモーメント分布の解析結果を示している。最大曲げモーメントの発生位置は深さ3m付近であり、Fig.9の最大引張ひずみ発生位置と一致した。また曲げモーメントが0になる深さも同様にひずみが0になる深さとほぼ一致している。

4.4 杭周辺地盤の塑性域

Fig.11は杭周辺地盤の塑性域を示している。杭前面には圧縮による塑性域が生じ、背面には引張の塑性域が生じる。杭前方の圧縮の塑性領域は地表面では大きく、深くなるにつれその領域は小さくなり、実際の地盤の挙動をよく表現している。しかし、引張の塑性域は杭の側方かなり離れた要素にも生じ、実際の現象に一致していないことがわかる。塑性領域の圧縮・引張は、Fig.12のように平均主応力からの増減で決定しており、引張は、初期応力から降伏線に至る距離が近いいため引張降伏をおこしやすい。また、地盤は弾完全塑性としたために、解析では要素が降伏線を越えたとき、その要素の応力状態は変化しないようにしている。

5. まとめ

3次元弾塑性有限要素法(GPILE-3D)は荷重変位関係において杭径の約6%の変位レベルでは非常

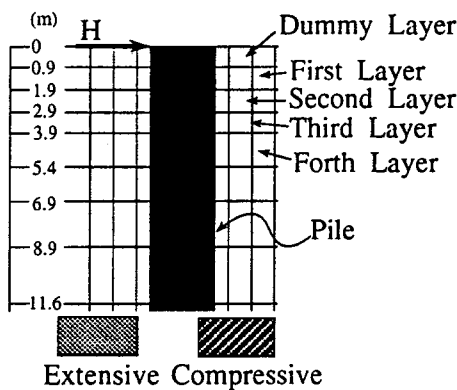
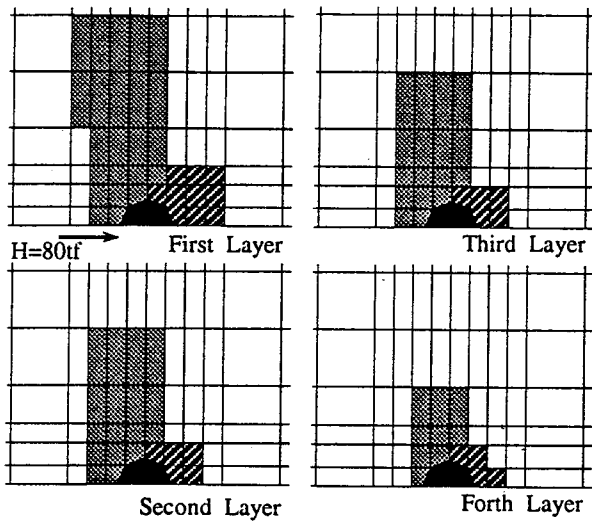


Fig.11 塑性領域

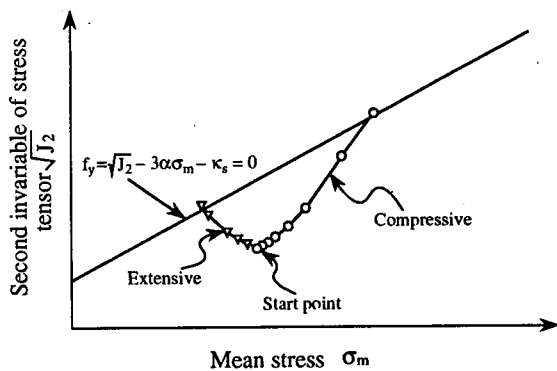


Fig.12 応力経路

に実験とよく一致した結果が得られた。しかしながら、今回のケースでは使用限界状態までは表現できるが、完全な終局限界状態までは表現することができなかった。

場所打ち杭の大変形水平挙動を解明するためには、杭と地盤双方の非線形性を適切に考慮し、地盤においてはさらなる改良した構成モデルを導入することが重要である。また、本来杭

の解析では単杭で地盤条件や杭の条件を決定することにより群杭の挙動をどの程度表現できるかが重要課題であり、現在9本群杭の解析を実施している。

***参考文献**

- 1) 足立紀尚・木村 亮・森本 輝：水平力を受ける2本群杭の遠心模型実験と3次元FEM解析，第28回土質工学研究発表会講演集，pp.1789-1792，1993.
- 2) 石井康裕・前川義男・村田直二・米村慶一・溝口裕稔：実杭を用いた単杭の大変形水平載荷試験，第29回土質土質工学研究発表会講演集，pp.1591-1594，1994.
- 3) 木村 亮・柴田 徹・八嶋 厚：杭の水平抵抗に関する3次元弾塑性FEMの開発，第26回土質工学研究発表会講演集，pp.1445-1446，1991.
- 4) 足立紀尚・木村 亮・張 鋒・亀井宏之：3次元弾塑性FEMによる場所打ち杭の大変形水平載荷時の挙動解析，第29回土質土質工学研究発表会講演集，pp.1583-1586，1994.
- 5) 木村 亮・中林正司・浜田信彦・友永則雄・伊藤恭平：場所打ち杭の大変形水平載荷時の挙動，第27回土質工学研究発表会講演集，pp.1591-1594，1992.
- 6) 道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），社団法人日本道路協会，pp.71-79，1990.
- 7) 古田 均：橋梁構造物の総合健全性評価に関する調査研究，土木学会関西支部研究グループ報告書，pp.170-171，1990.