

回転貫入鋼管杭を用いた建築基礎の耐震補強工法

A Seismic Reinforcing System of Existing Building Foundations by means of Inclined Screw Piles

新井 寿昭*

後藤 教夫**

Toshiaki Arai

Takao Gotoh

鹿籠 泰幸***

Yasuyuki Shikamori

要 約

大地震時における基礎構造の耐震性が確保されていない建築物は多く存在しているが、基礎構造の耐震診断や補強の例は少ない。これは基礎構造の破壊が直ちに建物全体の崩壊にはつながらないと考えられていることのほか、耐震補強の実施にあたってはコストや施工面からの制約が多いことも要因の一つと考えられる。そこで、比較的狭隘な敷地でも施工可能で、かつ合理的に耐震性を確保できる回転貫入鋼管杭を用いた耐震補強のための斜杭工法について、実験および解析的研究を行った。本報では、工法の概要と性能を確認するために実施した振動載荷試験および原位置における実大水平載荷試験とそのシミュレーション解析結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工法の概要
- § 3. 振動載荷試験
- § 4. 静的水平載荷試験
- § 5. シミュレーション解析
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

建築物の基礎構造の耐震性に関しては、基礎構造の破壊が建築物の崩壊や人命の安全に直接影響を及ぼさないと考えから、基礎構造に対する大地震時の耐震性の検証は義務付けられてはおらず、現行基準を満足していない建築物であっても耐震診断・補強される例は少ない。しかし、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震において、杭基礎の破損により傾斜したと推定される建築物も見られた。上部構造の耐震診断や補強が行われて耐震性能が確保できたとしても、基礎構造の破壊により建築物が傾斜するようなことがあれば、地震後の建築物の機能維持や避難経路の確保に支障が生じて継続使用が不可能となり、建築物として取り壊しを余儀なくされることも

考えられ、建物の長寿命化や事業継続計画の観点から、基礎構造の耐震性を確保するための補強工法の確立が望まれる。

杭基礎の耐震補強工法としては、地盤改良あるいは増し杭工法による水平抵抗の増大を図ることが一般的であるが、建築物への適用にあたっては施工可能なスペースが限られていたり、建物を使用しながらの施工になる場合が多いことなど、特に施工性への配慮が必要となる。また、適用可能な工法が限定されることから、コスト面での配慮も必要である。そこで、敷地条件等の施工的な制約にも対応が可能で、かつ合理的に耐震性を確保できる回転貫入鋼管杭を用いた斜杭による増し杭工法について、杭基礎の耐震補強工法として用いるための研究開発をおこなってきた^{1)~2)}。斜杭は土木構造物等で用いられているが、鉛直支持力にも期待して杭先端を支持層まで打設されることが一般的で、水平荷重の負担が主となる場合の適用性については明らかではない。

本報では、工法の概要と耐震補強としての性能確認を目的とした振動載荷試験および斜杭工法の水平抵抗機構の把握を目的とした原位置における実大水平載荷試験、ならびにシミュレーション解析結果について報告する。

§ 2. 工法の概要

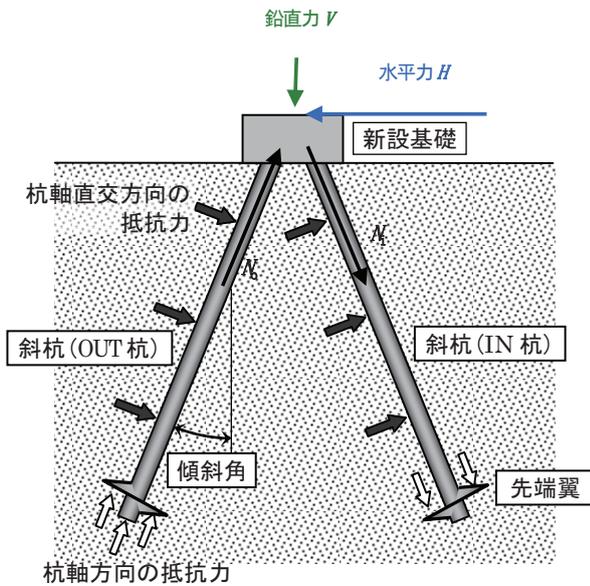
2-1 工法概要および斜杭の評価手法

本工法の概要を図-1に示す。杭を斜めに打設して、水

* 技術研究所建築技術グループ

** 建築設計部構造課

*** 技術研究所



図一 斜杭組杭工法の概要

平力に対し杭軸直角方向の杭材および地盤の抵抗力に加え、杭軸方向（押込みあるいは引抜き）の抵抗にも期待して、鉛直に打設した場合よりも大きな水平抵抗を得ることを目指した工法である。

本工法では、斜杭は図一に示したような荷重方向に対して傾斜方向が後方となる IN 杭と前方からなる OUT 杭からなる組杭として用い、斜杭組杭に加わる水平力は杭軸直角方向の抵抗力と杭軸方向の抵抗力の組み合わせにより負担される。杭としては杭軸方向の抵抗力を杭先端部で確保できるよう先端翼付き回転貫入鋼管杭を用いる。使用する回転貫入鋼管杭は、小型の施工機械で施工されるために、狭隘な敷地や施工スペースが限定された建築物にも適用可能である。

杭頭で剛結された組杭の評価は、①杭軸直角方向剛性 (K_{\perp}) および杭軸方向剛性 (K_{\parallel}) を評価、②組杭の負担荷重割合を算定、③単杭としての梁-ばねモデルあるいは弾性支承ばりの式による応力解析、の手順により杭体に発生する応力と変形を算定する。

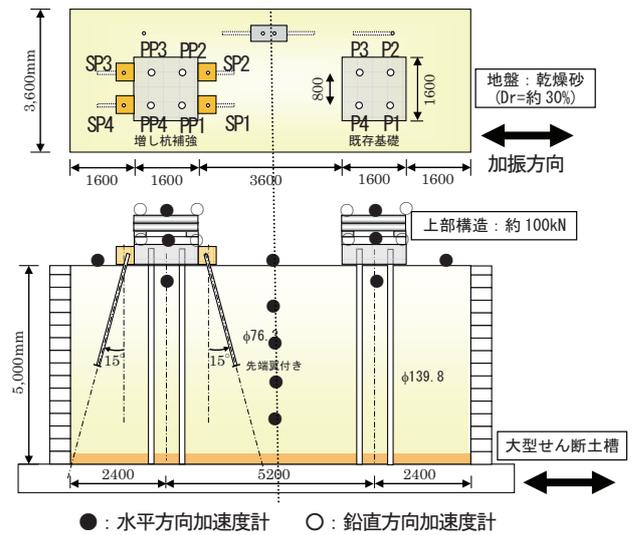
なお、既存杭を含む基礎全体として斜杭の負担荷重による鉛直方向反力の影響が大きく、基礎全体として剛床と見なせない場合などについては、補強杭と既存杭を一体としてモデル化して評価する必要がある。評価法の詳細については文献3)を参照されたい。

§3. 振動載荷試験

3-1 試験概要

振動載荷試験概要を図二に示す。直杭によって支持されたラフト（既存基礎）と既存基礎と同じ形状のラフトに斜杭を追加したラフト（増し杭補強基礎）を同一地盤上に設置して同時に加振し、増し杭（斜杭）による補強効果について検証した。

実験に用いた大型せん断土槽は、図二に示すように



図二 振動載荷試験の試験体概要

表一 試験体の諸元

既存基礎 (補強無)	ラフト	1.6 m × 1.6 m × 0.5 m (30 kN)
	上部構造	錘 (100 kN)
増し杭補強 (補強有)	杭	φ 139.8 mm, t = 3.5 mm, L = 5 m × 4 本
	ラフト	1.6 m × 1.6 m × 0.5 m etc (40 kN)
	上部構造	錘 (100 kN)
	増し杭	φ 76.3 mm, t = 2.8 mm, L = 2.6 m, 傾き 15° × 4 本

幅 3.6 m × 長さ 10 m × 深さ 5 m で、外枠は振動載荷時にはせん断変形する構造となっている。地盤は、先に杭を設置してから気乾状態の珪砂を土槽中に投入し、高さ 50 cm づつ 10 層に分けてタンパーで締固めて作製した。既存基礎、増し杭補強基礎の既存杭に相当する直杭は φ 139.8 mm, t = 3.5 mm の鋼管杭で杭先端は土槽底部にボルトで固定した。補強用の増し杭となる斜杭は傾斜角 15°, φ 76.3 mm, t = 2.8 mm の鋼管杭で先端に φ 200 mm の翼を取り付けた。ラフトは 1.6 m 角の鉄筋コンクリート製で、ラフト上には周期を中低層建物程度に相当する固有周期（設計値 0.09 秒）に調整するためにゴム支承を間に介して上部構造を模擬した重錘（100 kN）を設置した。計測は図二に示したように、加速度計を振動テーブルおよび地盤中・ラフト・重錘に設置した。また、ラフトおよび重錘の変位は非接触の変位計により、杭応力はひずみゲージにより測定した。

入力波は、Sweep 波 (0.2~50 Hz)、El Centro NS 波 (原波 × 25%)、Taft EW 波 (原波 × 25%)、JMA Kobe 波 (原波 × 20%) を用いた。なお、振動載荷試験結果の加速度記録を用いて同定した地盤の平均せん断波速度は 115.9 m/s、固有周期は 0.16 秒 (6.18 Hz) であった。

3-2 増し杭の補強効果

振動載荷試験のうち JMA Kobe 波の主な試験結果について、増し杭の補強効果に着目して以降に示す。

既存基礎の既存杭 (P1) および増し杭補強基礎の既存杭 (PP1) それぞれの杭頭曲げモーメントが最大となっ

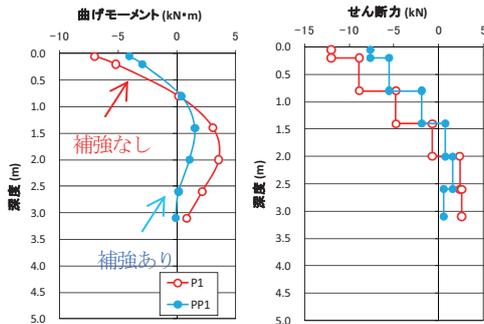


図-3 既存杭の応力分布の比較

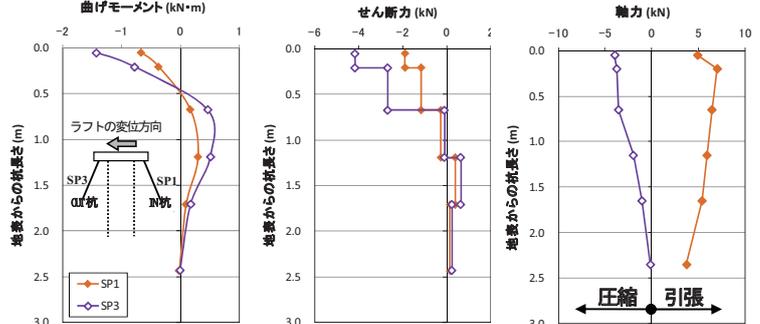


図-4 増し杭(斜杭)の応力分布

た時刻の曲げモーメントおよびせん断力の深さ方向分布を図-3に示す。ここから、増し杭補強により既存杭の曲げモーメントは深さ方向全長で低減していることが確認された。また、増し杭補強基礎における同時刻での増し杭の曲げモーメント、せん断力、軸力の深さ方向分布を図-4に示す。ここから、杭頭曲げモーメントが最大となる時刻において、押し込み側に傾斜したOUT杭となっているSP3の方が、引抜き側に傾斜したIN杭となっているSP1より発生応力は大きく、負担水平力が大きくなっていることがわかる。これは、水平変位が大きくなるとOUT杭の負担割合が増大していくことが推察され、地盤の抵抗機構や群杭効果によるものと考えられるが、振動载荷時には杭-上部構造全体系の剛体回転などの挙動も影響している可能性がある。

試験結果から斜杭の水平力は杭の曲げ抵抗と軸方向の抵抗力で負担されると判断されることから、杭頭部のせん断力Qおよび軸力Nの値から、(1)式により増し杭の負担水平力を算定した。

$$H = Q \cdot \cos \theta + N \cdot \sin \theta \quad (1)$$

この増し杭の負担水平力Hと杭頭軸力Nの関係を図-5に示す。図中の傾き(N/H)が軸力の負担率を示しており、全時刻で30~50%で推移していることがわかる。さらに、既存杭および増し杭の計測結果から得られた杭頭部のせん断力Qの和を総水平力Pとして、(1)式で求めた増し杭負担水平力Hとの関係を図-6に示す。この傾き(H/P)が増し杭の負担率を示しており、加振方向によらず全時刻で30~40%の範囲で、増し杭補強基礎の既存杭において既存杭基礎に比べて最大曲げモーメントが35%低減していた結果と対応していると考えられる。同様の評価をTaft波、El Centro波でも行った結果、軸力の負担率は40~50%、増し杭負担率は30~40%とほぼ同等の結果が得られた。

以上から、斜杭を用いた増し杭補強基礎では既存杭の発生応力の低減効果(補強効果)が認められ、補強効果のうち一定の割合は斜杭の軸方向の抵抗力で負担されていることが確認された。

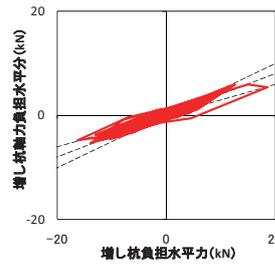


図-5 増し杭軸力負担率

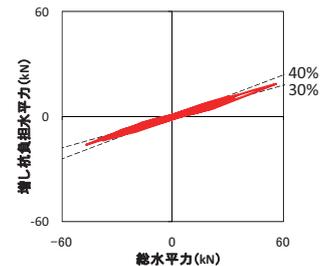


図-6 増し杭負担率

§ 4. 静的水平载荷試験

4-1 試験概要

原位置で実施した実大静的水平载荷試験の試験体諸元を表-2に示す。試験体O1は直杭1本のみで構成され、O2およびO3は直杭1本と斜杭2本で構成される組杭となっている。O2とO3では载荷方向が異なっている。杭はいずれも先端閉塞の鋼管杭(直径:φ216.3mm,厚さ:t=8.2mm,鋼種:STK490)で、φ550mmの先端翼を有する。斜杭の傾斜角は15°とし、杭上部はRC造のラフトで剛結されている。試験地の地盤柱状図および標準貫入試験(SPT1)によるN値、スウェーデン式サウンディング試験(SWS)による換算N値を図-7に示す。各試験体位置のSWS試験の結果はほぼ同様の分布を示しており、地盤条件のばらつきは少ない。各試験体の直杭、斜杭ともに杭先端はGL-6.2mの洪積シルト層に定着させている。なお、O2では载荷方向の前方に位置する杭(SP2)をOUT杭、後方に位置する杭(SP1)をIN杭と称する。载荷は反力壁に固定した油圧ジャッキによって行い、段階载荷方式による1方向単サイクル载荷とした。

表-2 試験体の諸元

No.	杭の構成	ラフト・杭の仕様
O1	直杭単杭	ラフト: 600 × 600 × 600
		直杭: φ216.3(t=8.2), L=6.2m, 先端翼φ550(t=22)
O2 (平行)	組杭 (直杭1本 +斜杭2本)	ラフト: 1800 × 600 × 600
		直杭: φ216.3(t=8.2), L=6.2m, 先端翼φ550(t=22) 斜杭: φ216.3(t=8.2), L=6.44m, 先端翼φ550(t=22)
O3 (直交)	組杭	ラフト: 600 × 1800 × 600
	(O2と同じ)	杭: O2と同じ

(単位: 特記以外は mm)

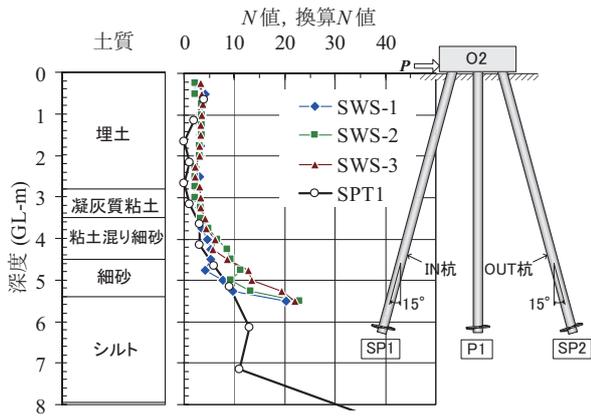


図-7 土質柱状図, N 値および換算 N 値

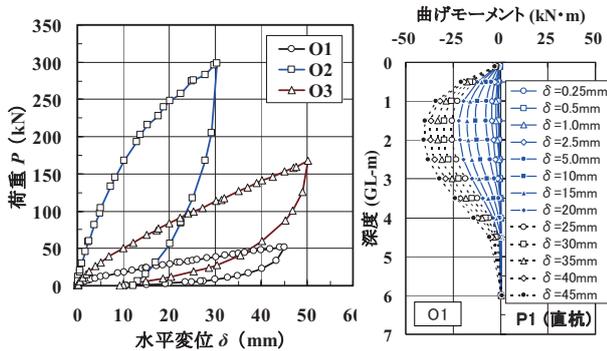


図-8 荷重-変位関係

図-9 曲げモーメント分布 (O1)

4-2 静的水平載荷試験結果

各試験体の水平荷重 (P) - 水平変位 (δ) 関係を図-8 に示す. 直杭 1 本の O1 に対して, 斜杭 2 本を追加した O2 の同変位時の荷重は 7~9 倍で推移している. 一方, O2 と同諸元で載荷方向をその直交方向とした O3 の荷重は, O1 の 3 倍で推移している.

O1 の曲げモーメントの深さ方向分布を図-9 に示すが, O3 の直杭および斜杭の曲げモーメント分布もほぼ同様の傾向を示した.

杭のひずみ測定値から算定したせん断力 Q, 軸力 N (杭全長の平均値) を用いて, O2 の杭 3 本の水平抵抗力の和 H を (2) 式により求めた. さらに, 直杭の水平力負担率 r_{p1} , 斜杭の水平力負担率 r_{sp1} , r_{sp2} および斜杭の軸力の水平成分の割合 r_{sp1a} , r_{sp2a} を (3)~(7) 式で定義した (図-10 参照).

$$H = Q_{p1} + (Q_{sp1} + Q_{sp2}) \cdot \cos \theta + (N_{sp1} + N_{sp2}) \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$r_{p1} = Q_{p1} / H \quad (3)$$

$$r_{sp1} = (Q_{sp1} \cdot \cos \theta + N_{sp1} \cdot \sin \theta) / H \quad (4)$$

$$r_{sp2} = (Q_{sp2} \cdot \cos \theta + N_{sp2} \cdot \sin \theta) / H \quad (5)$$

$$r_{sp1a} = N_{sp1} \cdot \sin \theta / H \quad (6)$$

$$r_{sp2a} = N_{sp2} \cdot \sin \theta / H \quad (7)$$

ここで, 添字の p1 は直杭, sp1 は IN 杭, sp2 は OUT 杭を表し, θ は傾斜角を表す. 図-11 に示すように, 直

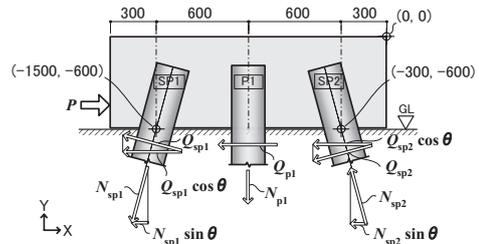


図-10 水平力の釣り合い (O2)

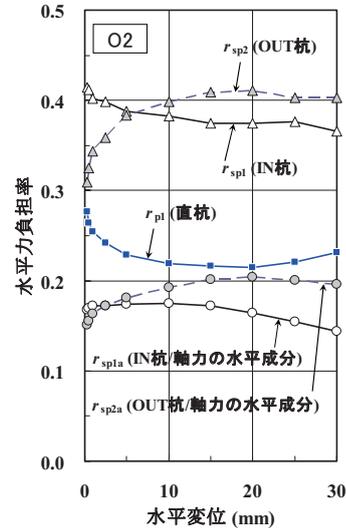


図-11 水平力負担率 (O2)

杭の水平力負担率 (r_{p1}) は全水平抵抗力の 24%前後で推移しているのに対し, 斜杭は IN 杭 (r_{sp1}) で平均 39%, OUT 杭 (r_{sp2}) で平均 37%を負担している. 斜杭の負担率のうち, 軸力の水平成分が IN 杭 (r_{sp1a}) で平均 17%, OUT 杭 (r_{sp2a}) で平均 18%を占めており, それらを合計すると全水平抵抗力の 30%強を斜杭の軸力によって負担していたことがわかる. この結果は, 3 章に示した振動載荷試験とも概ね対応している.

なお, O2 ではせん断力 Q と軸力 N の分担はほぼ同程度であるのに対して, ここでは示していないが O3 では軸力 N の発現はごく小さく, 水平抵抗に対する軸力の影響は, 載荷方向と斜杭の傾斜方向に依存する傾向が認められた²⁾.

§5. シミュレーション解析

ここでは, 4 章に示した原位置に施工された実大杭を用いた静的水平載荷試験を対象に, 3 次元有限要素法によるシミュレーション解析と, 斜杭の角度をパラメータとした解析的検討結果を示す.

5-1 解析概要

解析モデルを図-12 に示す. 地盤には弾塑性性を考慮したソリッド要素を用い, 表層と支持層の 2 層地盤 (表-3) として深さ 20 m までをモデル化した. 杭には梁要素

表-3 地盤諸元

	下限深度 (GL-m)	ρ (kN/m ³)	変形係数 (MN/m ²)	ν
表層	5.5	15.5	5.5	0.4
支持層	20.0	16.5	15.9	0.4

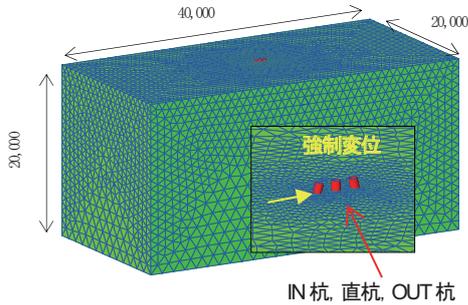


図-12 解析モデル

を用い、杭の体積を考慮するために地盤に杭径相当の空洞を設け、その中心に梁要素を設置して同一深度に位置する杭節点とその周囲の地盤節点を線形結合した。各杭の頭部は同一変形となるように境界条件を設定した。なお、斜杭については先端翼径相当の板要素を設けた。杭はSTK490相当の鋼管杭 ($E_p=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$) とし、線形とした。地盤の変形係数は水平荷重試験結果に基づいて1mm変形時の地盤反力係数からの逆算値を初期値として設定し、降伏条件にはMohr-Coulombモデルを用いた。解析では、実験と同位置に設定した荷重点に強制変位を与えるものとした。

5-2 シミュレーション解析結果

実験結果と比較した荷重-水平変位関係を図-13に示す。O1~O3いずれの試験体に対しても、解析結果は初期剛性と大変位時までの剛性低下とともに、実験結果を良く再現できている。

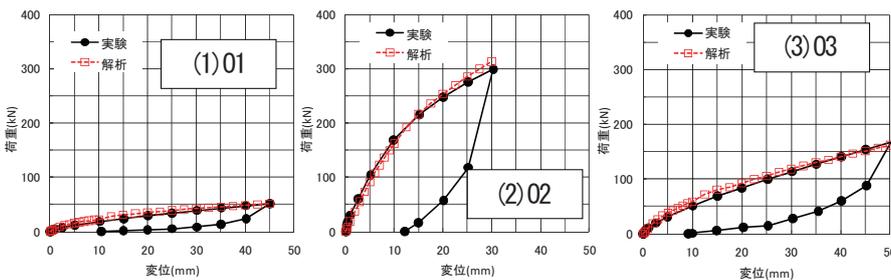


図-13 荷重-変位関係

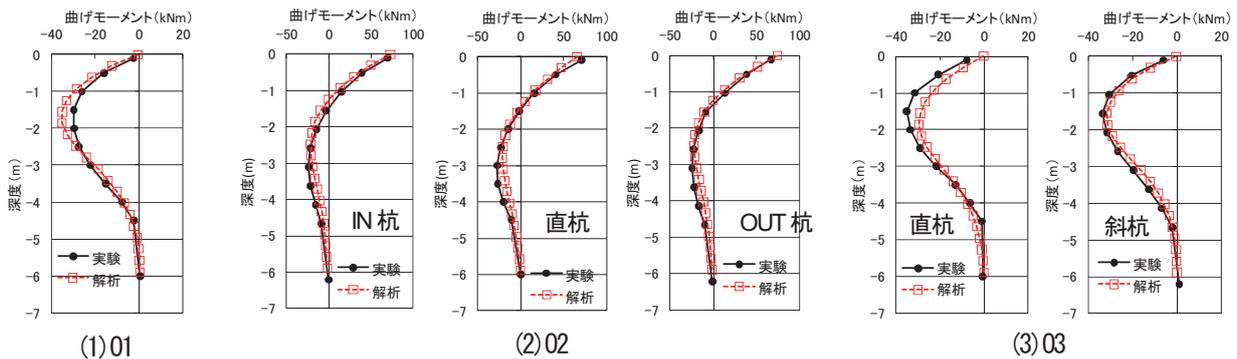


図-14 杭の曲げモーメント分布 (杭頭変位 30 mm)

実験結果と比較した杭の曲げモーメント分布 (杭頭変位 30 mm 時) を図-14に示す。O2では直杭に加えて、荷重方向に対して後方側のIN杭, 前方側のOUT杭の結果も示す。なお、O3の斜杭については2本の平均値で示している。O1およびO2ともに、解析結果は実験結果と良く整合している。O3では、直杭の解析結果は、杭頭部から地中部で最大値を示しているGL-2m付近まで実験結果に対して過少評価している。これは、実験時に試験体に生じたねじれと、杭頭部の拘束条件を解析では完全に模擬できていないためと考えられる。なお、斜杭の解析結果は実験結果と良く対応している。

5-3 斜杭の角度をパラメータとした解析的検討

5-2に示した結果から、解析モデルは実験結果を良く再現できることが明らかとなった。ここでは、杭頭の境界条件が異なる各試験体に対して、同一の境界条件を設定した解析モデルにより斜杭の角度を0~20°に変化させた解析を実施し、斜杭角度と荷重方向に対する斜杭の傾斜方向の影響について検討した。荷重方向に斜杭が傾斜しているモデル (以降、O2モデル) と荷重直交方向に斜杭が傾斜しているモデル (以降、O3モデル) の荷重-変位関係を図-15に、直杭に対する割線剛性比-変位関係を図-16に示す。

O2モデルでは、斜杭の角度が大きくなるにしたがって初期剛性と同変位時の荷重値は大きくなるのがわかる。O2モデルの直杭に対する斜杭の割線剛性比は、剛性が低下する5mm程度以降に変位の増大とともに大きくなっており、それぞれ1.05~1.07倍 (5°), 1.16~1.25倍 (10°), 1.28~1.38倍 (15°), 1.54~1.71倍 (20°) となっている。これは変位の増大にともない水平力に対する軸方向抵抗力が増加しており、特にOUT杭の挙動が影響

しているためと考えられる。一方、O3モデルでは、斜杭の角度の増加にともなう初期剛性と同変位時の荷重値に大きな差異はなく、斜杭の角度による影響は小さいことがわかる。

O2モデルの5°および15°の水平力負担率を図-17および図-

