耐震杭の水平挙動とその耐震性能に関する研究

Study on Horizontal Behavior and Earthquake Resistant Capacity of an Earthquake-proof Pile Guarded with Outer Sheath Pile

竹内　章博*　　阿世賀　宏**
Akihiro Takeuchi　Hiroshi Asega
武内　義夫*
Yoshio Takeuchi

要　約

地震時において上部構造の慣性力による水平力が杭に作用した場合，最大応力は，常時鉛直荷重の場合と同様に杭頭に発生する．この最大応力に起因する杭頭部の損傷・破壊は，兵庫県南部地震でも多数発生しており，杭頭近傍における耐震性能の確保が望まれている．

そこで著者は，大地震時においても杭頭部の損傷を回避し，鉛直荷重の支持性能を保持することを目的とした新たな「耐震杭」を提示している．本研究では，砂地盤を用いた模型耐震杭について水平載荷実験を実施し，耐震杭の解析方法を検討するとともに，同杭の基本的水平挙動および杭頭水平力の支持機構について考察を行っている．これらの検討結果より，本研究で提示した耐震杭は，通常用いられているストレート杭に比して極めて顕著な耐震性能を有していることが判明した．

目　次

§１．はじめに
§２．耐震杭
§３．解析方法
§４．実験概要
§５．地盤の変形係数（E_s）の非線形性状
§６．実測挙動と理論解析
§７．耐震杭の耐震性能
§８．おわりに

§１．はじめに

地震時における杭の設計では，上部構造の慣性力により杭頭に作用する水平力および地盤変形が対象となるが，一般的には，前者の水平力による応力が後者に比して大きいと言えよう．また，前者の水平力が作用した杭の最大応力は，常時鉛直荷重の場合と同様に，杭頭に発生するため，地震時の被害も杭頭に集中し発生している．これらの観点より，著者は，新たな耐震杭を提示し，その耐震性を検討している[1]．

耐震杭は，通常のストレート杭（以下，本杭）の外周に長さの短い外管杭を打設した杭である．この耐震杭は，地震時水平力の大部分を外管杭に負担させ，建物荷重を支持する本杭の水平力を低減し，地震時の杭頭破壊による建物の傾斜・倒壊等を回避することを目的としている．

本研究では，砂地盤を用いた模型耐震杭に関して載荷実験および理論解析を実施し，耐震杭の基本的水平挙動および杭頭水平力の支持機構について考察を行っている．

§２．耐震杭

図―1に，本研究で提示した耐震杭の概略を示した．

同耐震杭は，本杭（MP）とその外周に設置した杭長（LO）の外管杭（OP）から構成し，両杭の杭間にはクリアランスを設け，中空としている．

本耐震杭では，外管杭に地震時の水平力の大部分を分担させ，本杭には主として長期および短期の鉛直荷重を支持させることを目標としている．外管杭の杭頭は固定とし，杭先端は自由としている．また，本杭の杭頭条件には，固定およびピンを導入している。

なお，通常のストレート杭の場合，杭頭をピンとすると，杭に発生する最大曲げモーメントは，杭頭固定時の約6割に低下するが，杭頭変形は2倍となるため，過大変形が発生する可能性がある．そこで，本耐震杭では，本杭の杭頭をピンとした場合においても，外管杭を設置することにより，変形を抑制することも狙っている．

*技術研究所技術研究部建築技術研究課
**技術研究所技術研究部

§3．解析方法

図−2に，耐震杭の水平挙動解析モデルを示した．本解析では，従来のE_S-y法[2]と同様に，地盤の変形係数(E_S)の深さ方向の分布，非線形性状，また杭材の弾塑性性状を導入できるよう地盤および杭を層分割している．

また，上記解析方法では，各層の曲げ剛性（EI）およびE_Sを層上端の曲げモーメント（M）および変形（y）の関数でそれぞれ与えているが，両値は，同一層内では，一定と仮定している．この仮定に基づき，耐震杭・本杭の各層の基本方程式は（1）および（2）式，また，外管杭の同方程式は（3）式で与えている．

（Ⅰ）本杭

外管杭部分：$EI_M(M_M)\dfrac{d^4y_M}{dx^4}=0$　　(1)

外管杭以深：$EI_M(M_M)\dfrac{d^4y_M}{dx^4}+E_{SM}(y_M)\cdot y_M=0$　　(2)

（Ⅱ）外管杭

$$EI_O(M_O)\frac{d^4y_O}{dx^4}+E_{SO}(y_O)\cdot y_O=0 \qquad (3)$$

ここに，サフィックスのM，O：本杭および外管杭，x：層上端からの深さ，y：xにおける変位，EI：曲げ剛性，E_S：地盤の変形係数．

(1)～(3) 式は，EIおよびE_Sを同一層内で定数と設定することにより一般解が求められる．また，各層一般解の積分定数は，杭頭および杭先端の境界条件，各層境界における連続条件を導入することにより求められる．

しかしながら，各層のE_Sは，層上端の変形の関数で与えているため上記の解は一義的に求められない．そこで，実際の解は，各層において仮定したE_Sと解析値の層上端の変形の関係が，与えられたE_S-y曲線（5章を参照）を満足するまで繰り返し計算を行い求めている．

§4．実験概要

4−1　杭および地盤

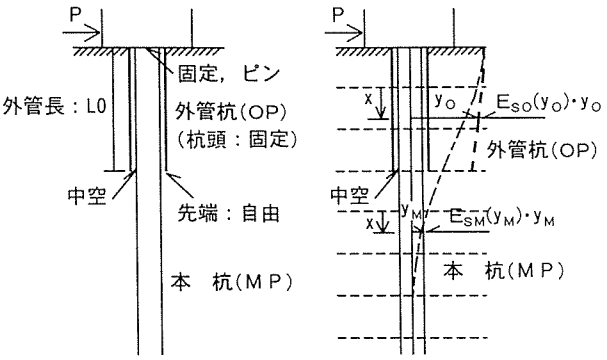
表−1に，模型耐震杭の諸元を，**図−3**に，実験に用いた土層，杭の配置および載荷方法等を示した．

本杭（MP）および外管杭（OP）の杭材には，アクリルを用いている．なお，アクリルのヤング係数の値は，材料実験により求めた，3.42×10^5(N/cm^2)を採用している．

地盤は，杭を配置した後，乾燥した山形珪砂5号を自由落下させ作成している．また，本実験では4本の杭の杭頭をフーチングで連結し，フーチングが回転しないように載荷している．

4−2　実験項目および測定項目

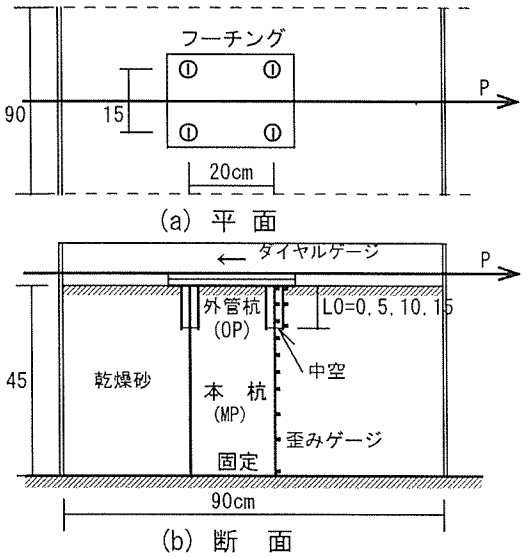
耐震杭の水平載荷実験は，以下の各組み合わせについて行った．



図−1　耐震杭　　図−2　解析モデル

表−1　模型耐震杭の諸元

	本杭	外管杭
断面形状	矩形	円筒形
断面寸法	幅　厚さ 2 cm　0.3cm	幅　厚さ 4 cm　0.2cm
杭長	45cm	5，10，15cm
曲げ剛性	1.54×10^3N・cm^2	1.48×10^7N・cm^2



図−3　模型実験

［本杭の杭頭条件］――――［外管杭長さ（LO）］

固定，ピン　<――――>　5，10，15cm

なお，本実験では，2章でも述べた如く，外管杭の杭頭条件を固定，また杭先端条件を自由とし，本杭の杭先端条件を固定としている．

また，耐震杭との比較のため，本実験では，外管杭無しの本杭のみの場合および外管杭のみの場合の載荷実験をも実施している．

外管杭の杭長（LO）の5，10，15cmは，杭頭固定の本杭のみの曲げモーメント分布における第1零点，地中部最大値，第2零点深さにほぼ対応させた長さである．

測定は，杭頭変形（ダイヤルゲージ）および本杭，外管杭の応力（歪みゲージ）について行った．

また，上記の実験は，地盤に乾燥砂を用いているため，各実験項目に対して複数回実施している．

§5．地盤の変形係数（E_s）の非線形性状

本砂地盤の杭頭変形（y）に対する地盤の変形係数（E_s）は，杭頭を固定とした長さ45cmの本杭のみの，また杭長5cmの外管杭のみの実測杭頭荷重－杭頭変形曲線から，E_sを一定とした弾性解を適用し求めている[3]．なお，外管杭の場合には，杭先端を自由とした有限長の杭の理論解を適用している．また，上記方法により求めたE_sとyの関係は，その非線形性状を解析に導入するため，同曲線の非線形性状を検討しy＝0.5cm時の$E_{S(0.5)}$の値（以下，基準変形係数）で無次元化している．本砂地盤における基準変形係数$E_{S(0.5)}$の値は，下式の如くである．

本　　杭：$E_{S(0.5)}=2.7\mathrm{N/cm^2}$　(4)

外 管 杭：$E_{S(0.5)}=3.7\mathrm{N/cm^2}$　(5)

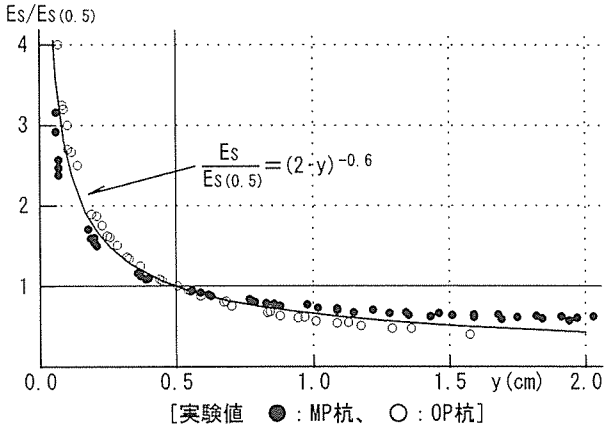
図－4に，上記方法を適用し，本杭（MP）のみの実測杭頭荷重-杭頭変形曲線より求めた$E_S/E_{S(0.5)}$とyの関係（●）を，外管杭長さLO＝5cm時の外管杭（OP）のみの場合の同関係（○）と対比して示した。

E_sの非線形性状は，本杭（●）と外管杭（○）で良く一致している．そこで，以下の解析では，図中に示した如くE_sの非線形性状を（6）式で評価し，本杭および外管杭部分に導入している．

$$\frac{E_S}{E_{S(0.5)}}=(2\cdot y)^{-0.6} \qquad (6)$$

水平挙動解析時の本杭および外管杭の$E_{S(0.5)}$の値は，深さ方向に対して増加させているが，同分布は前述の(4)および（5）式の$E_{S(0.5)}$値を基準的値とし，砂地盤の特性をも考慮し，解析値の変形および曲げモーメントが実測値とほぼ一致するよう設定している．

なお，深さ方向に対して増加させた解析時の$E_{S(0.5)}$の分布は，前述の（4）および（5）式による値と対比して，次章の解析結果の図中（**図－7**を参照）に示している．



図－4　変形係数の非線形性状

§6．実測挙動と理論解析

6－1　杭頭荷重-杭頭変形曲線

図－5（a）に，本杭の杭頭を固定とし，外管杭の長さをLO＝5，10，15cmとした耐震杭とストレート杭（本杭のみの場合：SP）の杭頭荷重（P）－杭頭変形（y）曲線を，3回の実験値と解析値を対比して示した．また，**図－5（b）**には，本杭の杭頭をピンとした場合を示した．

解析値は，両杭頭条件の場合とも実験値と良く対応し，実験値に現れている非線形性状をも良く説明している．

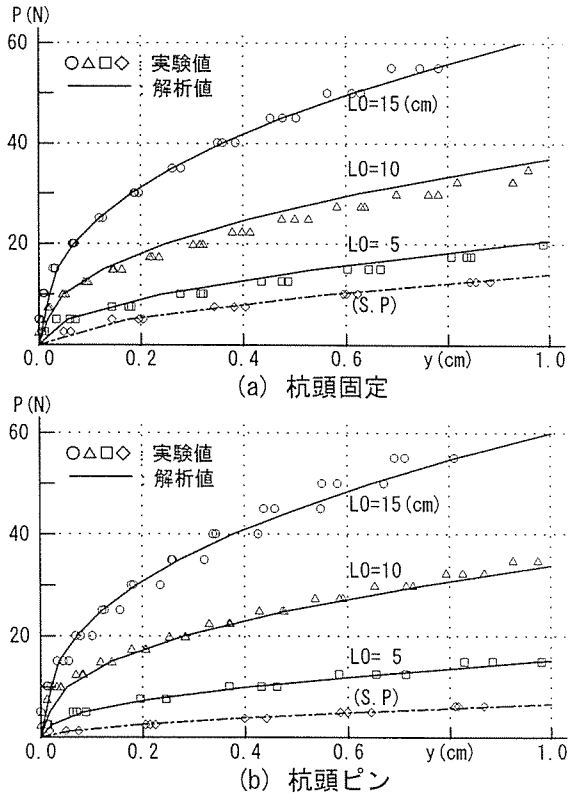
同一杭頭荷重時における耐震杭の杭頭変形は，両杭頭条件の場合とも，ストレート杭（SP）の値に比して，外管杭長さ（LO）が長いほど大きく低減され，外管杭の設置効果が明確に認められる．

本杭の杭頭を固定とした場合の荷重-変形曲線を，杭頭ピンの同曲線と比較すると，以下の性状が認められる．

ストレート杭の場合，E_sを一定とした弾性理論解では，杭頭固定に対する杭頭ピンの杭頭変形量の比は2倍となる[3]．一方，本実験では，同値の比は約2.5倍と大きな値を示しているが，これは，変形が大きくなるほど値が減少する砂地盤のE_sの非線形性状に起因している．

また，耐震杭の場合，杭頭ピンの杭頭荷重－杭頭変形曲線は，LOが長くなるほど，杭頭固定の同曲線に近づき，LO＝15cmでは，両者の曲線がほぼ一致してくる．

以上の如く，本杭の杭頭がピンの場合においても，耐震杭の杭頭変形は，外管杭が長いほど，杭頭固定時の値に近づき，外管杭の変形抑制効果が明確に認められる．



図－5　杭頭荷重－杭頭変形曲線

6−2　杭頭荷重-最大曲げモーメント曲線

図−6(a)に，杭頭を固定とし，外管杭長さをLO＝5，10，15cmとした耐震杭・本杭とストレート杭（SP）の杭頭荷重（P）−杭頭曲げモーメント（BM）曲線を3回の実験値と解析値を対比して示した．また，図−6（b）には，杭頭をピンとした地中部最大曲げモーメントの場合を同様にして示した．

解析値の曲線は，両杭頭条件の場合とも，前項の荷重-変形曲線の場合と同様に，実験値の非線形性状を全体的に良く説明している．なお，特に杭頭ピン，外管杭長さLO＝15cmの場合，杭頭荷重が大きく（P＞40N）なるにつれて，実験値と解析値に差異が認められるが，これは，実験時に発生した杭頭フーチングの回転に起因している．

両杭頭条件の場合とも，耐震杭・本杭の最大曲げモーメントは，ストレート杭（SP）に比して低減されており，この傾向は外管杭長さ（LO）が長いほど顕著になる．

以上の如く，耐震杭・本杭の最大曲げモーメントにおいても，外管杭の設置効果が明確に現れている．

6−3　変形および曲げモーメント分布

図−7（a）に，杭頭を固定とした，杭頭水平荷重P＝20N時の，耐震杭の本杭（MP），外管杭（OP）およびストレート杭（SP）の変形，曲げモーメント分布を，実験値と解析値を対比して示した．また，図−7（b）には，杭頭をピンとしたP＝10N時の場合を示した．なお，図中には，解析に導入した基準変形係数$E_{S(0.5)}$の分布を（4）式および（5）式による$E_{S(0.5)}$と対比して示した．

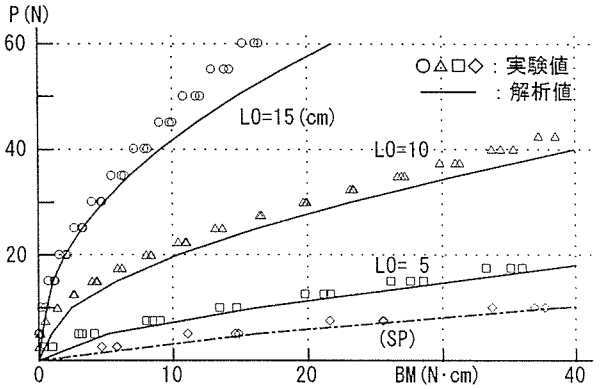
解析値は，両杭頭条件の場合とも，実験値の杭頭変形および曲げモーメント分布を全体的に良く説明している．

耐震杭・本杭の変形曲線の性状は，両杭頭条件の場合とも，ストレート杭（SP）のそれに近似している．一方，外管杭の変形は，その曲げ剛性が非常に高いため，ほぼ剛体的な変形性状を示している．

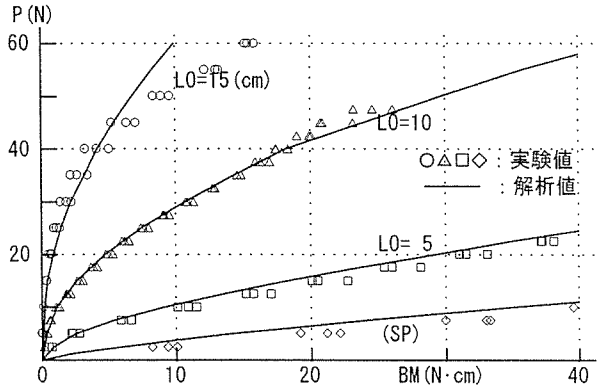
杭頭が固定の場合の耐震杭・本杭の杭頭曲げモーメントは，ストレート杭（SP）の値に比して，外管杭長さ（LO）が長いほど大きく低減され，その低減効果は，地中部の最大曲げモーメントに対しても認められる．

一方，杭頭がピンの場合，本杭の地中部最大曲げモーメントは，外管杭長さLO＝5cmの場合でも，SP杭の約1/4に減少し，その減少率は杭頭固定時の値に比して大きい．

以上の如く，耐震杭の変形，また本杭の曲げモーメントは，両杭頭条件の場合とも，外管杭の設置によりストレート杭に比して大きく減少することが判る．

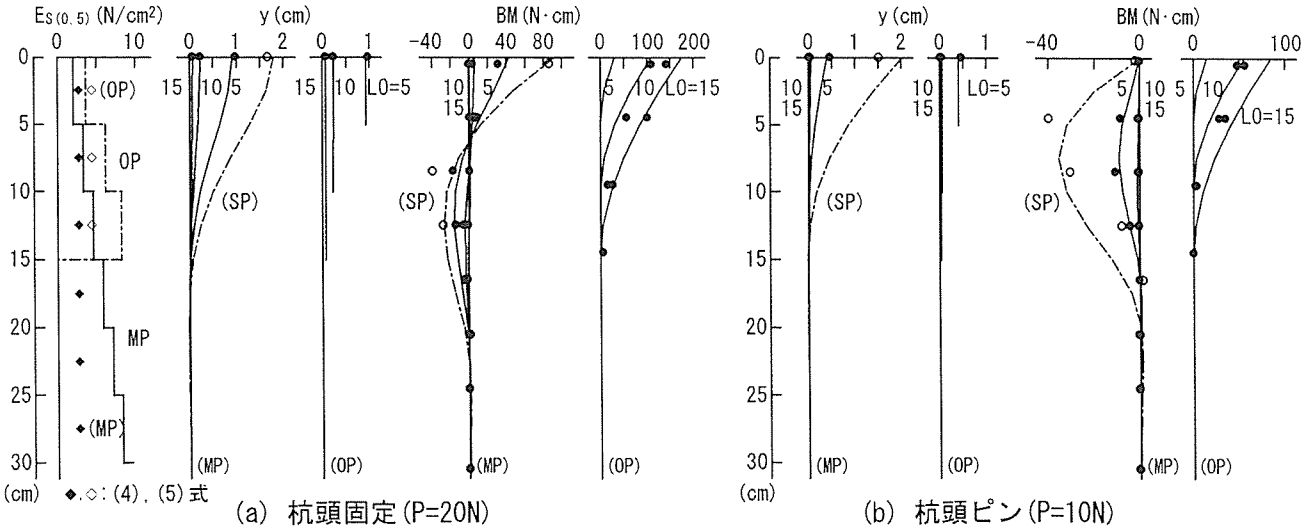


(a) 杭頭固定（杭頭）



(b) 杭頭ピン（地中部最大）

図−6　杭頭荷重−最大曲げモーメント曲線



(a) 杭頭固定（P=20N）　　(b) 杭頭ピン（P=10N）

［耐震杭 ——：解析値，●：実験値，　SP杭 ------：解析値，○：実験値］

図−7　変形および曲げモーメント分布

§7．耐震杭の耐震性能

前章までは，耐震杭・本杭の杭頭条件および外管杭長さを変化させた場合の耐震杭の水平挙動について示してきた．

本章では，外管杭を有しないストレート杭に対する耐震杭の杭頭変形および本杭の曲げモーメントの比率（低下率）と外管杭長さの関係，また耐震杭の水平挙動を支配する本杭と外管杭の杭頭水平荷重の分担率と外管杭長さの関係について検討している．

また，本章の検討では，これまで示したように解析値が実験値を良く説明していることより，解析値を採用している．さらに，ストレート杭と耐震杭の各値の比較は，同一杭頭水平荷重について行っているが，同杭頭荷重は，模型実験における変形および曲げモーメントの測定範囲を対象とし，杭頭固定の場合，P＝10および20N，また杭頭ピンでは，P＝5および10Nとしている．

7−1　杭頭変形の低下率

図−8（a）に，杭頭が固定の，ストレート杭（SP）の杭頭変形に対する耐震杭の同変形の比率（α_y）と外管杭長さ（LO）の関係を，杭頭水平荷重（P）をパラメータとして示した．また，**図−8（b）**には，杭頭がピンの場合を同様にして示した．

杭頭が固定の場合，α_yと外管杭長さ（LO）の関係における杭頭荷重の影響についてみると，P＝20Nのα_yは，P＝10Nの値に比してやや大きな値を示しているが，α_yとLOの関係の性状は，両杭頭荷重の場合とも良く対応している．また，耐震杭の杭頭変形は，LO＝5cmの外管杭を設置することにより，ストレート杭（SP）の値の約1/2に抑制され，LO≧10cmとすると約1割以下になる．

一方，杭頭がピンの場合も，杭頭荷重P＝5および10Nのα_yには大きな差異が認められず，LO＝5cmの外管杭を設置することにより，α_yは0.2，LO≧10cmでは0.1以下と，ストレート杭に比して大きく低下している．また，このLOに対するα_yの低下率は，上記の杭頭固定の場合と比較して2倍以上大きいことが判る．

7−2　本杭の最大曲げモーメントの低下率

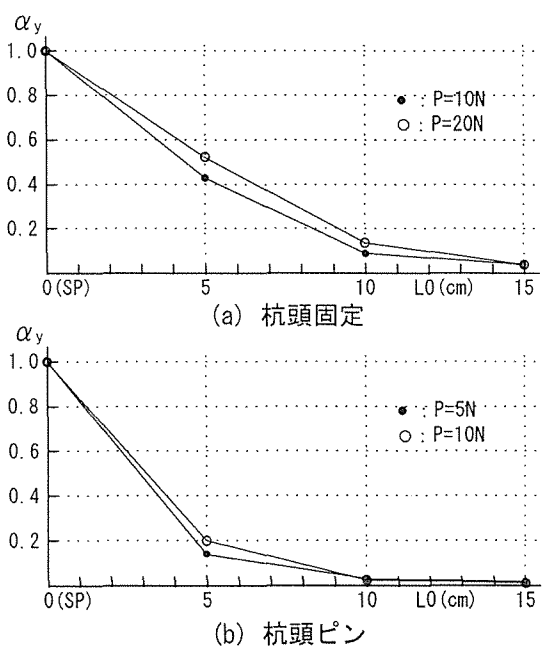
図−9（a）に，杭頭が固定の，ストレート杭（SP）に対する耐震杭・本杭の最大曲げモーメントの比率（α_{BM}）と外管杭長さ（LO）の関係を，杭頭水平荷重（P）をパラメータとして示した．また，**図−9（b）**には，杭頭がピンの場合を同様にして示した．

なお，最大曲げモーメントの値は，6-2節でも述べた如く，杭頭固定の場合，杭頭部の値を，また杭頭ピンの場合，地中部最大値を採用している．

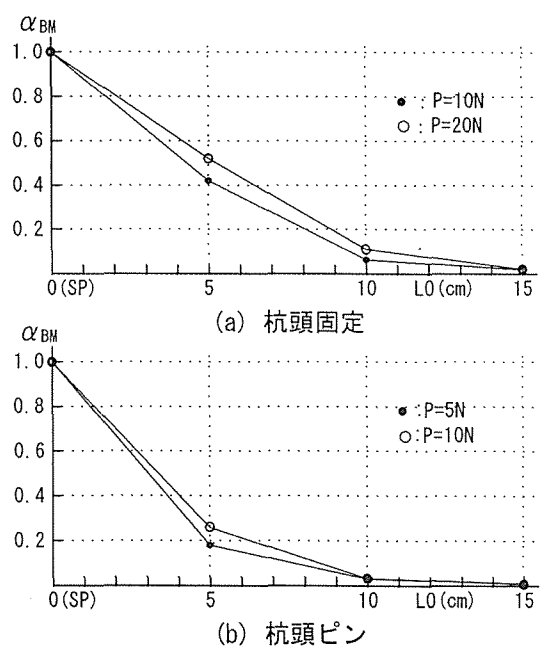
杭頭が固定の場合，外管杭長さ（LO）の増加に伴うα_{BM}の減少性状は，前節のα_yと同様に，杭頭荷重P＝10および20Nの場合ともほぼ一致している．α_{BM}の値は，外管杭長さLO＝5cmで約0.5，LO≧10cmでは0.1以下となり，本杭の最大曲げモーメントは，ストレート杭の同値に比して大きく低減されている．

一方，杭頭がピンの場合，α_{BM}の値を，上記杭頭固定の場合と比較すると，杭頭ピンの外管杭長さ（LO）の増加に伴うα_{BM}の低下率は，杭頭荷重P＝5および10Nの場合とも，杭頭固定のそれに比してさらに大きい．例えば，LO＝5cmの場合においても，本杭の最大曲げモーメントは，ストレート杭の値の約3割以下に低減されている．

以上の如く，杭頭がピンの場合の耐震杭・本杭に発生する最大曲げモーメントには，杭頭固定の場合に比較して，外管杭の設置効果がより大きく現れることが判る．



図−8　杭頭変形の低下率（耐震杭/SP杭）



図−9　本杭の最大BMの低下率（耐震杭/SP杭）

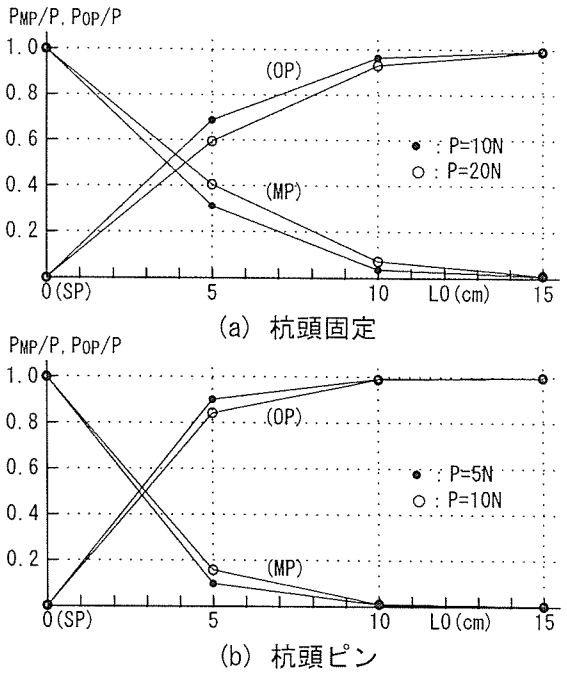
7−3　耐震杭の本杭と外管杭の荷重分担率

図−10（a）に，杭頭が固定の耐震杭の，杭頭水平荷重（P）に対する本杭（MP）と外管杭（OP）の荷重分担率（P_{MP}/P，P_{OP}/P）と外管杭長さ（LO）の関係を，杭頭水平荷重（P）をパラメータとして示した．また，図−10(b)には，杭頭がピンの場合を同様にして示した．

杭頭が固定の場合，外管杭は，LO＝5cmと最も短い場合においても，杭頭水平荷重の約6割を，またLO≧10cmでは9割以上を分担し，本杭に作用する水平荷重はLOが長くなるほど，大きく減少する．

一方，杭頭がピンの場合，外管杭は，LO＝5cmで杭頭水平荷重の8割以上を，LO≧10cmでは10割近くを分担し，本杭の荷重分担率は大きく低下している．また，外管杭のLOの増大に伴う荷重分担率の増加割合は，杭頭水平荷重P＝5および10Nの場合とも，先に示した杭頭固定の場合に比較してさらに大きい．

また，上記の外管杭の，荷重分担率のLOに伴う増加は，これまで述べてきた杭頭変形および耐震杭・本杭の曲げモーメントの減少に大きく寄与していると言える．



図−10　本杭（MP）と外管杭（OP）の荷重分担率

§8．おわりに

本研究では，通常のストレート杭（本杭）の外周に長さの短い外管杭を設置した耐震杭を提示し，杭頭に水平力が作用した場合の耐震杭の理論解析方法およびその基本的水平挙動等を，模型耐震杭の水平載荷実験，同解析を通して検討してきた．これらの検討結果より以下のことが言える．

本研究で示した，地盤反力の非線形性状をも考慮した理論解析方法は，模型耐震杭の変形および曲げモーメント等の実測水平挙動を良く説明できる．

耐震杭の杭頭最大変形は，本杭の杭頭条件が固定およびピンの場合とも，ストレート杭に比較して大きく低下する．

上部構造からの鉛直荷重を支持する本杭の曲げモーメントは，杭頭固定の場合，杭頭および地中部最大の値とも外管杭が長いほど大きく減少する．また，この傾向は，杭頭ピンの地中部最大曲げモーメントの場合，さらに顕著となる．

耐震杭の設計における外管杭の設置長さは，ストレート杭（杭頭固定）の曲げモーメント分布における第1零点から地中部最大値深さを目安に設定すれば最も合理的であると判断される．

最後に本研究における耐震杭の提案および同杭の研究開発全般に関して多大なる御指導・御鞭撻を賜りました，早稲田大学理工学総合研究センター教授・風間了先生に心より御礼申し上げます．また，本研究に御協力を戴きました早稲田大学理工学総合研究センター内藤多仲博士記念耐震構造研究館の皆様に謝意を表します．

参考文献

1）風間了，竹内章博：地震時における耐震杭の水平挙動（その1解析的検討），日本建築学会大会学術講演梗概集B-1，pp.533-534，1997.9
2）古藤田喜久雄，風間了：クイ材の塑性を考慮した解析方法，土と基礎(土質工学会)，vol.25，No.8，pp.15-20，1977.8
3）日本建築学会：基礎構造設計指針，pp.246-255，1988