

二重鋼管杭の水平抵抗特性に関する実験と解析

LATERAL RESISTANCE OF A DOUBLE TUBE STEEL-PIPE-PILE

南部 俊彦*・斉藤 淳**・蓮田 常雄***・関口 宏二****

Toshihiko Nanbu, Atsushi Saito, Tsuneo Hasuda, and Koji Sekiguchi

*工修 NKK 研究員 基盤技術研究所 (〒210 川崎市川崎区南渡田町 1-1)

** 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 (〒151 東京都渋谷区代々木 2-2-6)

***工博 鉄道総合技術研究所 主任技師 構造物技術開発事業部 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

****工博 NKK 主任研究員 基盤技術研究所 (〒210 川崎市川崎区南渡田町 1-1)

We have been developing double tube steel-pipe-piles to be used as the foundations of buildings constructed over the railroads. From the field test conducted near the operating railroad, it was confirmed that the pile was able to reduce the vibration level transmitted through the ground. To study the lateral resistance characteristics of the pile, a full-scale field cyclic loading test was conducted. This paper describes the method and results of the test, as well as the results of numerical analyses. From the study it was confirmed that 1) the pile has good integrity against lateral loading; and that 2) the behavior of the pile can be simulated well numerically.

Key Words: double tube steel-pipe-pile, lateral loading test, elasto-plastic analysis

1. 緒言

我々は、軌道から地盤を介して線路上空利用建物へ伝播する列車振動を遮断する工法として、二重鋼管杭の開発を行った。線路上空またはその直近にオフィスやコンサートホール等の静穏な室内環境を必要とする施設を建設する場合、列車走行に起因する騒音・振動が問題となる。列車走行に伴う建物内での振動・騒音は、列車走行により直接発生する空力音や転動音などの空気伝搬音と、列車走行に起因する振動が建物構造体を伝搬しその振動により発生する固体音およびその振動を直接身体に感ずる体感振動に分けられる。その内、固体音と体感振動は同じく振動伝搬に起因しているが、問題となる振動は、固体音は 30Hz 以上で、体感振動は数十 Hz 以下とその振動数帯域が異なっている。なお、線路上空利用建物の振動予測手法については、蓮田らによる研究を参照されたい。

今回開発した工法は、列車通過時に問題となる振動数帯域の入力を建物基礎杭上部の二重鋼管構造により低減しようとするものである。本基礎杭の基本構造を Fig. 1 に示す。本基礎杭は、耐震場所打ち鋼管コンクリート杭(内杭)の上部に、鋼管(外管)を同心円上に設置し、内杭の外面または外管の内面にストッパーを配置してい

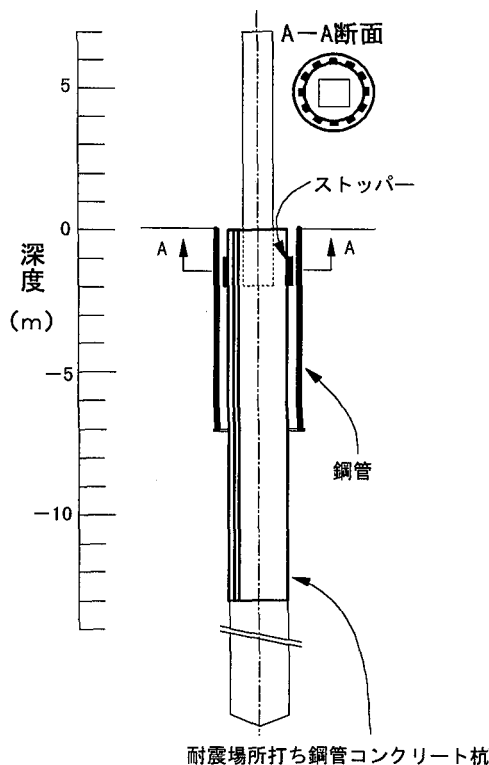


Fig.1 工法概要

る。常時は、ストッパーとその対向面との間に一定のクリアランスを設けることにより地盤と構造物間の振動の伝達を低減させ、また、地震時に建物が水平力を受けた場合には、内杭がストッパーを介して外管に接し地盤反力を確保するという構造形式である。なお、鉛直荷重は内杭のみで支持し外管には作用しない。二重鋼管杭による線路上空建物の構造コンセプトを Photo 1 に示す。図中、青色で示される部分が二重鋼管構造である。我々が対象としている線路上空建物は、地下部をもたない1柱1基礎の構造からなり、地下外壁に入る振動がないため本工法のコンセプトが成り立つ。

この二重鋼管杭の開発にあたっては、次に示す2つの技術課題を検証する必要がある。

①列車通過時の振動低減効果があること。

②地震時の水平抵抗特性を損なわないこと。

①については、営業線の線路脇に二重鋼管杭と通常の場所打ち鋼管コンクリート杭（無対策杭）を施工し、列車通過時の地盤および杭頭の振動計測を実施している²⁾³⁾。その結果、i)無対策杭の杭頭鉛直振動は地盤地表部に比べ約 20dB 小さいこと、ii)二重鋼管杭杭頭の鉛直振動は地盤地表部に比べ約 30dB 小さいこと、iii)二重鋼管杭は無対策杭に比べて約 10dB 鉛直振動低減効果が大きいこと、などを確認している。

②については、本基礎杭が、上部工を支持する内杭が杭頭から数mの深さに渡り地盤と接していない特殊な構造であるので、地震時の杭の安全性を確保するには、ストッパーと対向面のクリアランスをどの程度に設定するかが問題となった。この問題に対して参考文献 4)に示すようなバネ～梁系の非線形解析手法により検討を行った。その結果、適切なクリアランス幅を設定することにより現行の設計法である「線路上空利用建築物構造設計指針」⁵⁾（以下「設計指針」と称す）に示される許容値を十分満足することを確認した。これにより、二重鋼管の設計がほぼ実現可能と考えられたため、更に、繰り返し荷重に対する水平抵抗特性を把握することと設計に必要な基本データを収集することを目的として、振動計測実験で使用した二重鋼管杭および無対策杭（反力杭として）を用いて、交番水平載荷試験を実施した。本論文では、二重鋼管杭の交番水平試験の概要、繰り返し荷重に対する水平抵抗特性および解析手法の検証結果について述べる。なお、本論文は参考文献 6)～8)に一部公表したものをとりまとめて再構成したものである。

2. 正負交番水平載荷試験

2.1 地盤条件

試験地盤の概要を Fig.2 に示す。試験地盤は表層から GL.-0.5 m まで稲城砂で埋戻されており、GL.-0.5 m から GL.-10.1 m までN値のほぼ一様な関東ローム層が続く。GL.-10.1 m 以深がN値 50 以上の支持層（武蔵野礫層）である。

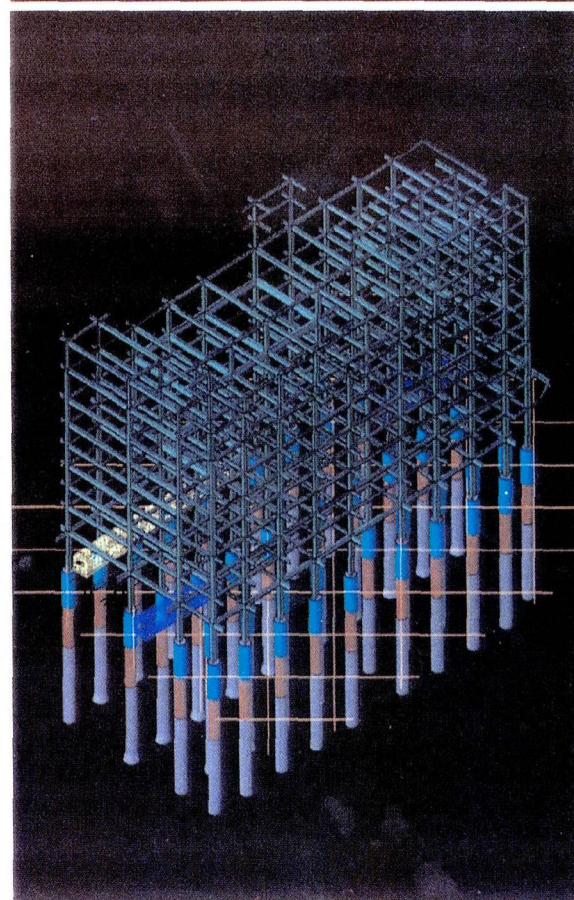
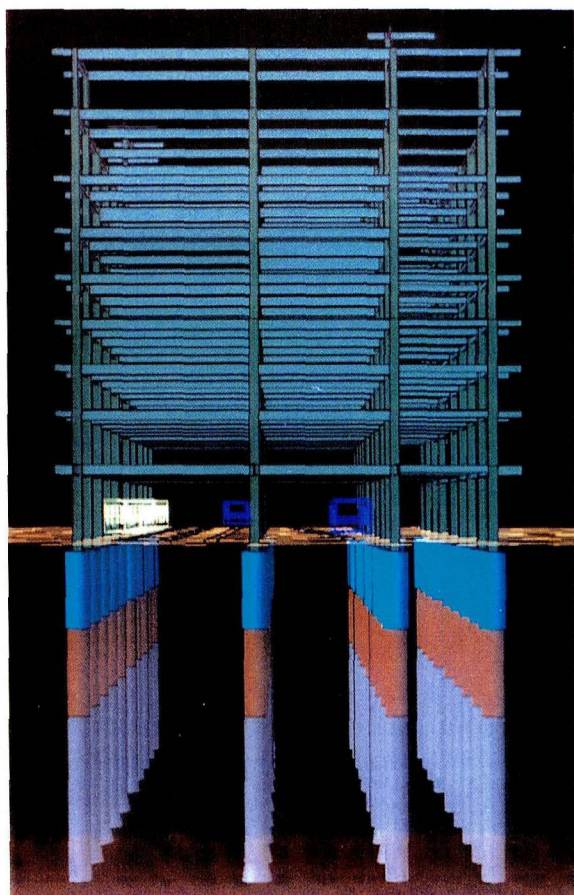


Photo 1 二重鋼管杭を用いた線路上空利用建物の構造コンセプト

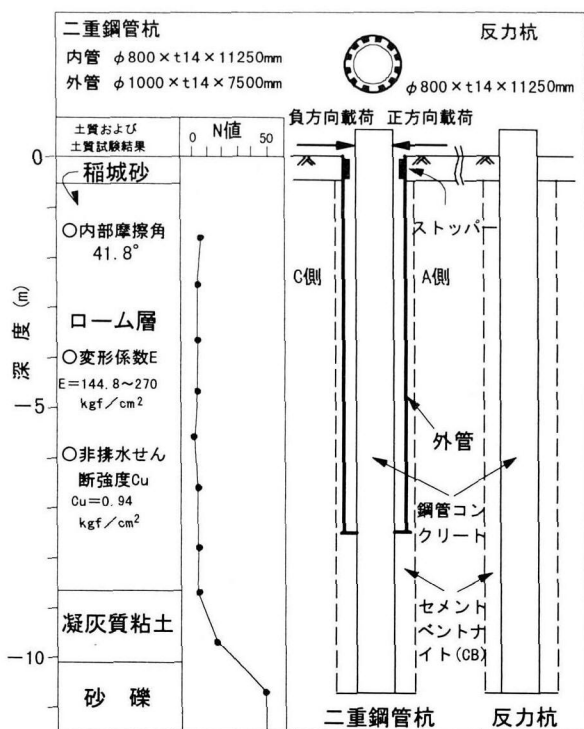


Fig.2 試験地盤および試験杭

2.2 試験杭

二重鋼管杭および反力杭の諸元を Fig.2 に示す。二重鋼管杭および反力杭の打設はオールケーシング工法（ケーシング径 $\phi 1200\text{mm}$ ）で行った。鋼管と関東ローム層以深の地盤との間には杭下端までセメントベントナイト（CB）を充填し、杭本体はコンクリートで中詰めを行い鋼管コンクリート構造とした。二重鋼管杭の地表附近には、内杭と外管の間に鋼製ストッパーを 12 体配置し、ストッパーとその対向面とのクリアランスを 10 mm に設定した(Photo 2)。また、ストッパー部の外管の板厚については、付録 A に示す簡易評価式等を参考に検討し、14mm とした。

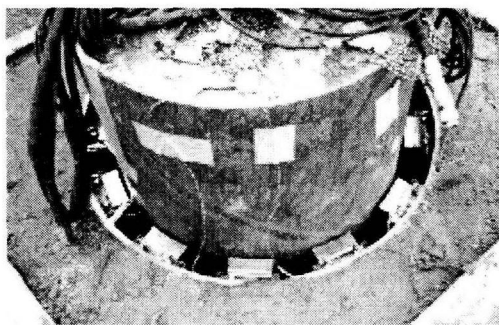


Photo 2 ストッパー部

2.3 試験内容および測定項目

載荷装置を Fig.3 に、計測器取り付け位置を Fig.4 および Fig.7(a) に示す。載荷方法は、互いに 8 m 離れた二重鋼管杭と反力杭を、二重鋼管杭の内杭頭部に設置した二台の油圧ジャッキにより押し引きする正負交番水平載

荷とした。載荷パターンは、載荷速度一定の多サイクル方式（変位制御、2 回繰り返し）とした。

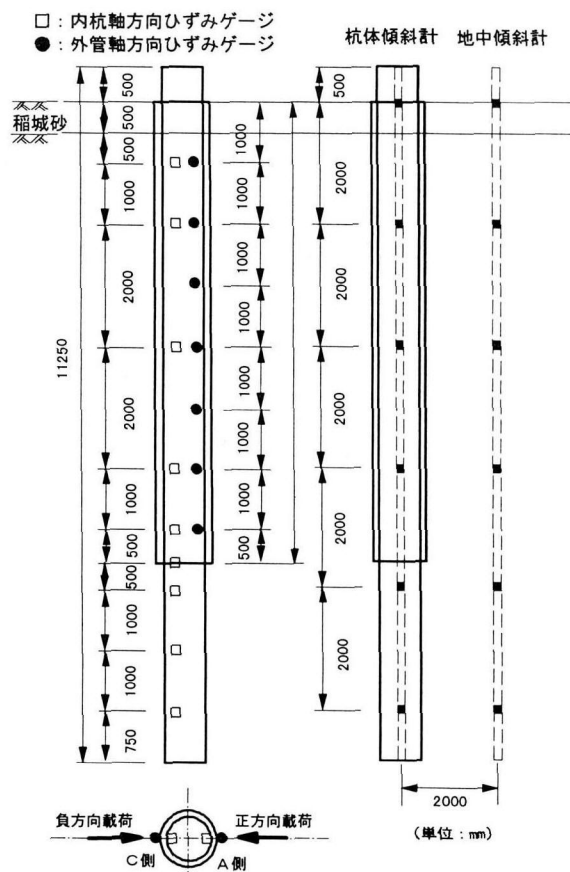


Fig.4 計測器取り付け位置

2.4 実験結果

(1) 荷重～変位関係

まず、反力杭の荷重～変位関係を Fig.11 に示す。反力杭は、通常の杭と同様に変位振幅の増大と共に、除荷（荷重ゼロ）時の残留変位が増大する傾向にある。また、繰り返し載荷による周辺地盤～杭系の剛性低下割合はあまり大きくない。

次に、二重管杭の荷重～載荷点変位関係を Fig.12 に示す。同図より、以下のことがわかる。

- 1) 内杭がストッパーに接触するまでは小さな荷重で変形が進むが、接触後は通常の杭と同様に周辺地盤の非線形性（変位の増大とともに地盤剛性が低下すること）を反映した荷重～変位関係となっている。
- 2) 本実験では、「設計指針」における許容値の 4 倍程度 ($62\text{mm}/16\text{mm} = 3.9$) の杭頭変位を与えたが、除荷時に有害な残留変位は生じていない。そのため、正・負の荷重～変位曲線は、ほぼ対称となっている。
- 3) 本地盤条件および構造形式では、繰り返し載荷による周辺地盤～杭系の剛性低下割合はあまり大きくない。ただし、処女載荷曲線に乗るまでの再載荷時には、以前の荷重反転ポイントを指向した荷重～変位経路をた

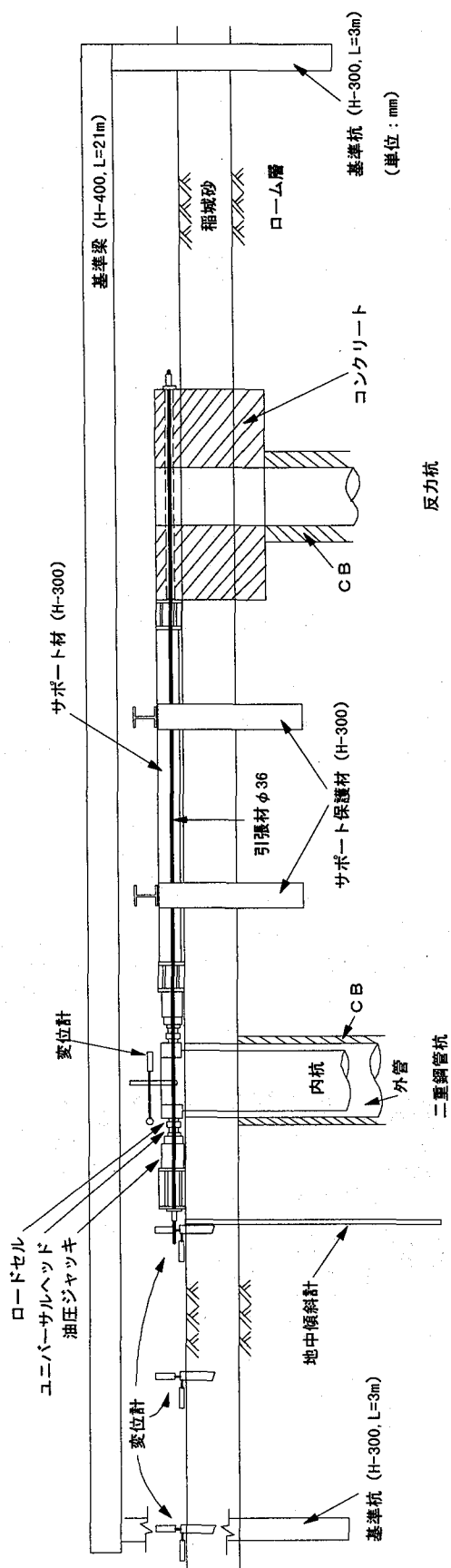
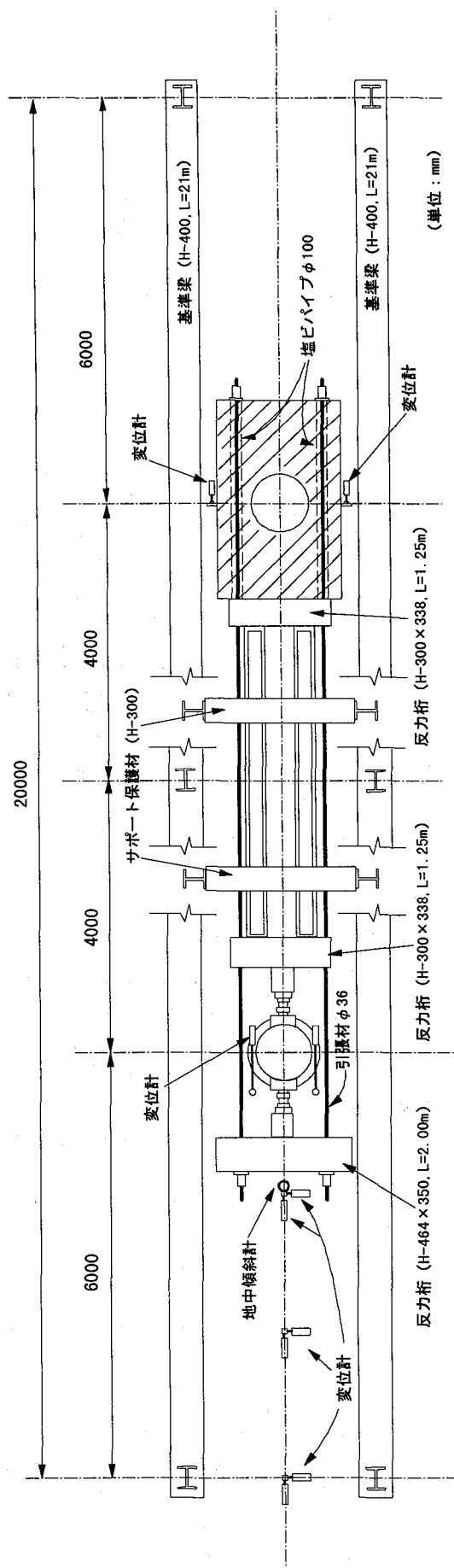


Fig.3 載荷装置

どっている。これは、外管の周辺の土の塑性化に伴い、外管と周辺地盤の間に肌離れした部分が成長しつつあることの表れであると推定される。

なお、反力杭 (Fig.11)と二重鋼管杭 (Fig.12)の荷重～変位関係を比べると、同一荷重に対して後者の方が約 10 mm 程度大きな変形量となっているが、これはストッパーとその対向面のクリアランス幅に対応している。

(2) 内杭

Fig.5(a)～(d)に、正方向荷重時の内杭の管軸方向のひずみ分布、曲げひずみ分布、曲げモーメント分布および反力分布を示す。曲げひずみから曲げモーメントを求める際には、鋼管および中詰めコンクリートの材料非線形性を考慮して数値計算⁹⁾により求めた、非線形の曲げモーメント～曲率関係を用いた。そのため、曲げひずみ分布図 (Fig.5(b)) と曲げモーメント分布図 (Fig.5(c)) は、荷重の大きい領域では必ずしも相似形となっていない。また、反力分布 (Fig.5(d)) は曲げモーメント分布を数値的に2回微分することにより求めた。この反力分布は地盤からの反力および外管から内杭に作用する力の両者を合せたものと解釈でき、外管下端 (GL.-7.5m) にても外管と内杭の間で荷重の伝達が生じていることを示唆している。なお、内杭ストッパー位置 (GL.-22.5±20.0cm) においても、内杭とストッパーが接触した状態では反力が生じているはずであるが、ひずみの測定位置の関係上、Fig.5(d) には表示されていない。Fig.5(e)に杭体傾斜計の測定値を積分して得られた変位分布を示す。

(3) 外管

Fig.6(a)～(d)に、正方向荷重時の内杭の管軸方向のひずみ分布、曲げひずみ分布、曲げモーメント分布および反力分布を示す。計算法は、2.4 (2) に述べた方法と同様であるが、外管が弾性範囲内にあるため、曲げひずみ分布と曲げモーメント分布は相似形となっている。なお、Fig.6(a)では、A側とC側 (Fig.4 参照) の軸ひずみ分布が対称となっていないが、これは外管がシェルとして変形しているためと推察される。ただし、管軸方向ひずみの最大値は 800μ であり、曲げひずみの最大値 700μ に比べて 100μ (14%) 大きい程度である。したがって、適切な安全率を考慮すれば、設計上は外管を梁として評価しても良いと考えられる。なお、外管の変位分布 (Fig.6(e)) はストッパー接触位置において、外管の変位は内杭の変位 (Fig.5(e)) よりも 10 mm (クリアランス幅) だけ小さいと仮定して算定した。

(4) ストッパー接触部の外管のひずみ特性

水平力を受けた内杭は、杭頭部でストッパーに接触し、ストッパーを介して荷重が外管に伝達される。Fig.7(a)にストッパー接触部における外管ひずみ測定位置を、Fig.7(b)に、正方向最大荷重時におけるストッパー接触

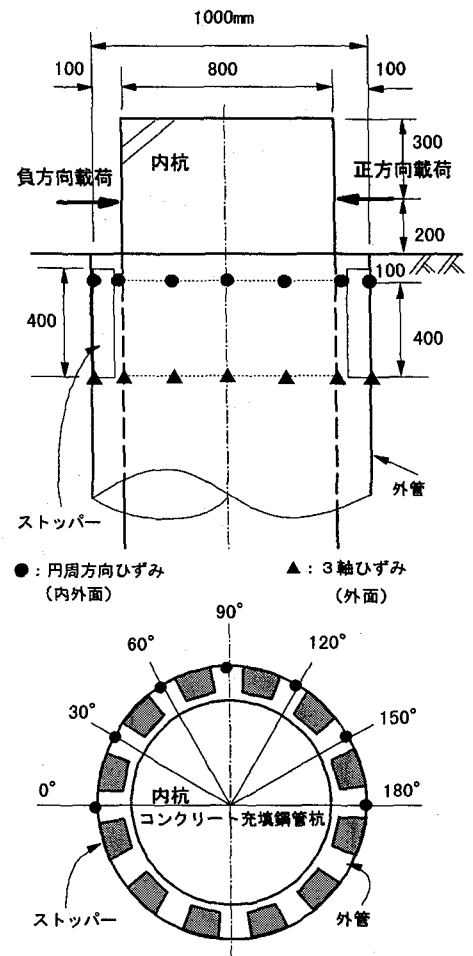


Fig.7(a) ストッパー接触部における外管ひずみ測定位置

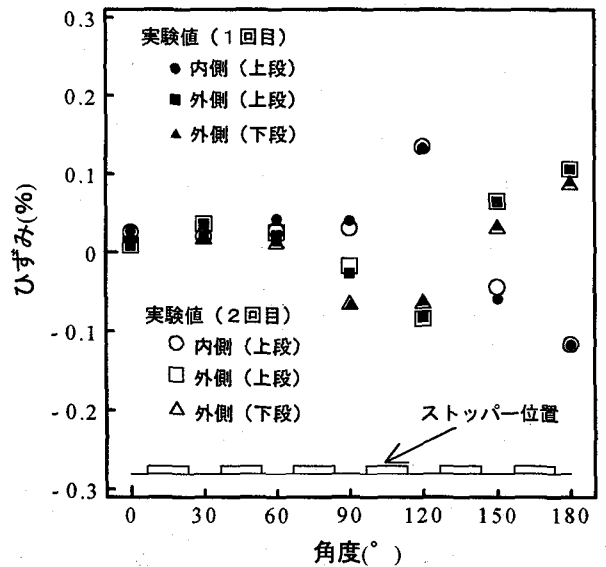


Fig.7(b) 外管の周方向ひずみの測定値

部の外管の周方向ひずみ分布図を 180 度の区間に展開して示す。0～60 度の位置 (外管とストッパーが最初に接触する附近) では引張ひずみが卓越しており、120 度および 180 度の位置で曲げひずみが卓越していることが

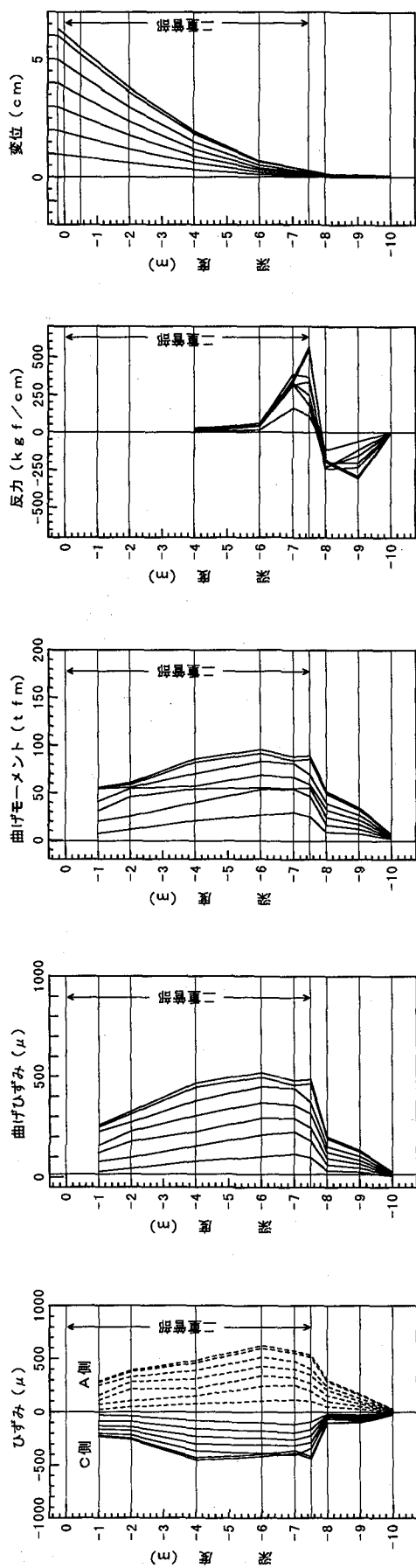


Fig.5 内杭の試験結果 (図は処女載荷時に載荷点変位が 10,20,30,40,50,60,63mm に達した時の結果)

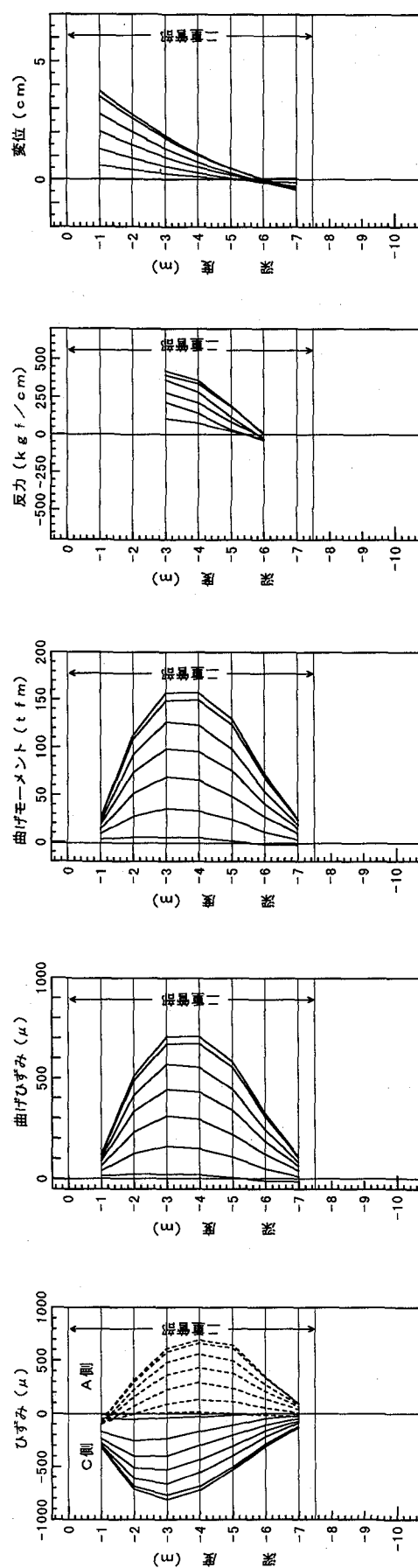


Fig.6 外管の試験結果 (図は処女載荷時に載荷点変位が 10,20,30,40,50,60,63mm に達した時の結果)

わかる。また、ストッパーの上端部および下端部における周方向ひずみは大きさ、分布形状とも余り変わらず、比較的一様な変形をしていることがわかる。なお、ストッパー接触部では周方向ひずみが卓越しており、軸方向ひずみは $250\ \mu$ 以下であった。

3. 実験と解析との比較

3.1 杭の水平抵抗解析

2.4 で述べた二重鋼管杭および通常杭（場所打鋼管コンクリート杭）の水平抵抗挙動が、参考文献 4) で用いてきた解析モデルにてどの程度シミュレートできるかを検証するために、非線形構造解析プログラム RESP-2T/A¹⁰⁾ を用いて解析的検討を実施した。同プログラムでは、非線形解析手法として荷重増分法を採用しており、各荷重増分段階において繰り返し収束計算をしている。なお、厳密解の得られるウィンクラーバネ～梁モデルの問題を解析することにより、極めて良好な精度で解が得られることを確認している¹¹⁾。

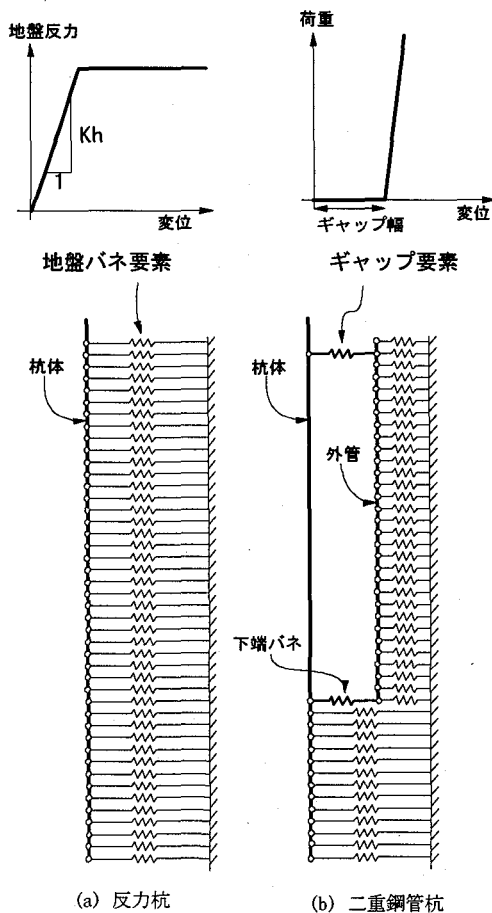


Fig.8 解析モデル

(1) 解析モデル

反力杭と二重鋼管杭の解析モデルの概要を Fig.8 に示す。杭体は非線形梁要素で地盤反力特性は非線形バネ要素でモデル化した。二重鋼管杭のモデルは、杭体と地盤

の間に外管を表す非線形梁要素を配置し、ストッパー部には、内杭と外管の接触・非接触を表すギャップ要素を配置した。外管下端部については、外管と内杭の荷重伝達の影響（施工時に外管と内杭の間に侵入固化したセメントベントナイトによるものと考えられる）を考慮するために、弾性バネ要素を配置した。

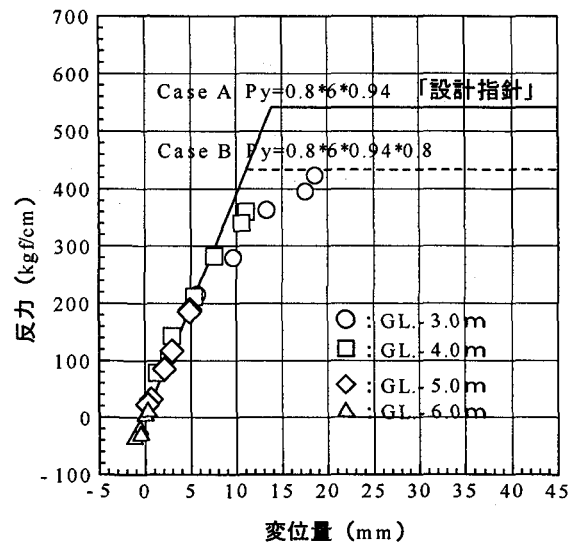


Fig.9 実験より得られた地盤反力～変位関係

(2) 解析条件

今回の解析では、地盤反力の非線形性は「設計指針」に基づき、バイリニアモデルで近似した。なお、外管と接する部分の地盤反力（杭幅で除した場合、地盤反力係数）については、曲げひずみを積分・微分して得た杭体変位～地盤反力（例えば、Fig.6 (d),(e)）の関係より Fig.9 のように求めた。同図に示すように、本試験による地盤反力は「設計指針」による値と比較的よく一致しているのが確認された。また、試験終了後に杭周辺の C B の状況を調査したところ、際立った損傷はみられず、C B 径（120 cm）を杭の地盤反力係数算定上の有効径とみなすことが妥当と思われたため、そのように仮定した。なお、関東ロームの変形係数 E_{50} は土質試験結果の下限値 144.8 kgf/cm^2 とし、極限地盤反力 P_y は「設計指針」に従い、 $P_y = 0.8 \times 6 \times C_u$ として求めた。ここに、 C_u は非排水せん断強度であり、ブロックサンプルを用いた 3 軸 UU 試験の結果から平均的なピーク強度として $C_u = 0.94 \text{ kgf/cm}^2$ を得たが、強度の空間的なバラツキ、ひずみ軟化、供試体の寸法効果などを考慮して、その 8 割の強度の場合も検討した。すなわち、解析ケースを次のようにした。

Case A : $C_u = 0.94 \text{ kgf/cm}^2$

Case B : $C_u = 0.8 \times 0.94 = 0.752 \text{ kgf/cm}^2$

杭体（鋼管コンクリート部分、外管部分）の非線形性

については、参考文献 9) に提案された手法 (コンクリートの引張り裂進行にともなう中立軸の位置を求め、その中立軸に対する断面 2 次モーメント(I)と抵抗モーメント(M)の関係を算出する手法) を用いて、Fig.10(a),(b) に示すように、 $M \sim \phi$ (曲げモーメント～曲率) 関係を求め、解析に考慮した。

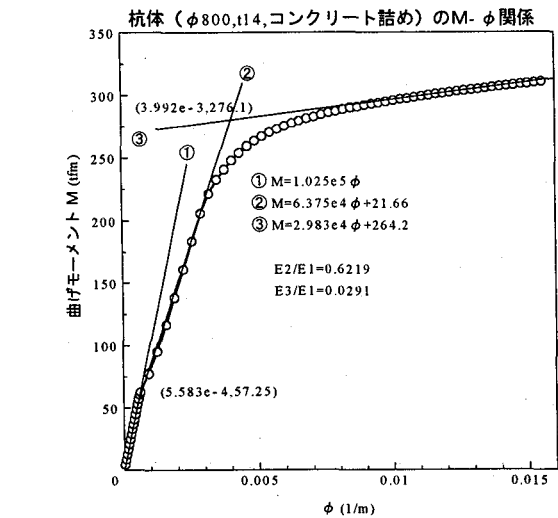


Fig.10(a) 解析に用いた杭体のM～φ関係

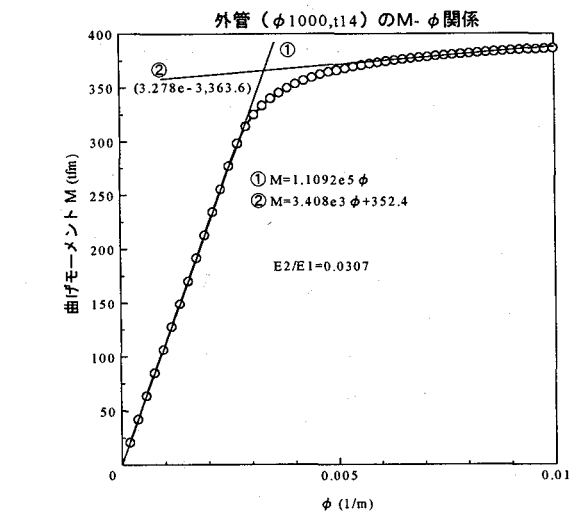


Fig.10(b) 解析に用いた鋼管のM～φ関係

(3) 解析結果

Fig.11(a),(b) に反力杭の杭頭荷重～変位関係を実験値と共に示す。両図より、正方向載荷時には Case A が、また負方向載荷時には Case B が実験値と解析値で良く一致していることがわかる。解析では荷重履歴の影響を考慮していないため、正・負方向で荷重～変位関係の相違は無いが、実験では負方向載荷の方が荷重～変位関係がやや寝てきており、荷重履歴の影響がみられる。

次に、Fig.12(a),(b) に二重鋼管杭の杭頭荷重～変位関係を実験値と共に示す。二重鋼管杭の解析では、外管下端部における外管と内杭の荷重伝達の影響を評価するために、下端バネのバネ定数 Bs を 0～100 tf/cm の範囲でパラメータとした。Fig.12 (a) より Case A では Bs

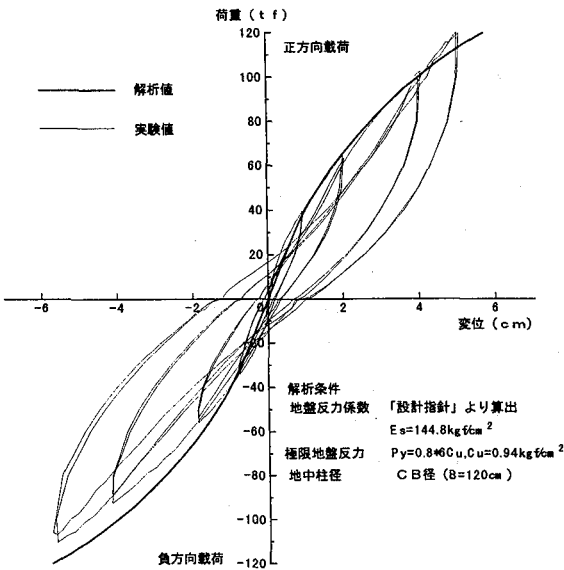


Fig.11(a) 反力杭の杭頭荷重～変位関係 (Case A)

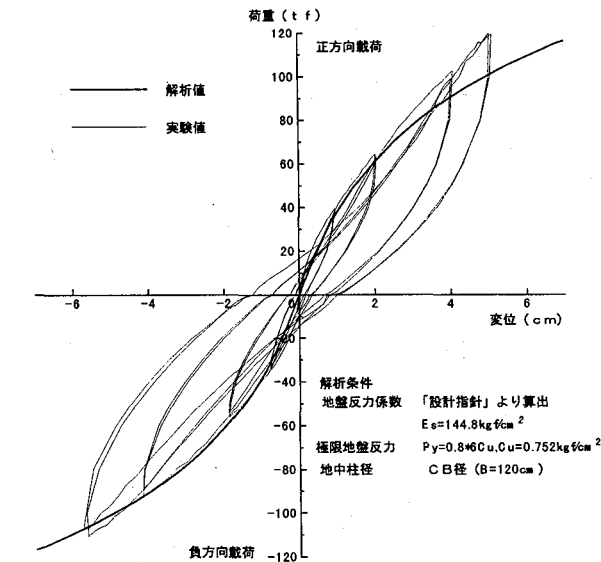


Fig.11(b) 反力杭の杭頭荷重～変位関係 (Case B)

= 0 ～ 10 tf/cm の場合に実験値と解析値が比較的良く一致していることがわかる。また、Fig.12 (b)より Case B では Bs = 50～100 tf/cm の場合に実験値と解析値が比較的良く一致することがわかる。

二重鋼管杭の試験結果について、以上述べた杭頭荷重～変位関係に加え、内杭および外管の変位、曲げモーメント、せん断力分布についても実測値と解析値を比較したところ、Case B (Bs = 50 tf/cm) のケースが最も良好な一致がみられた(Fig.13, Fig.14)。

3.2 ストッパー接触部の外管の変形解析

現場実験により、ストッパー接触部の外管には 0～60 度

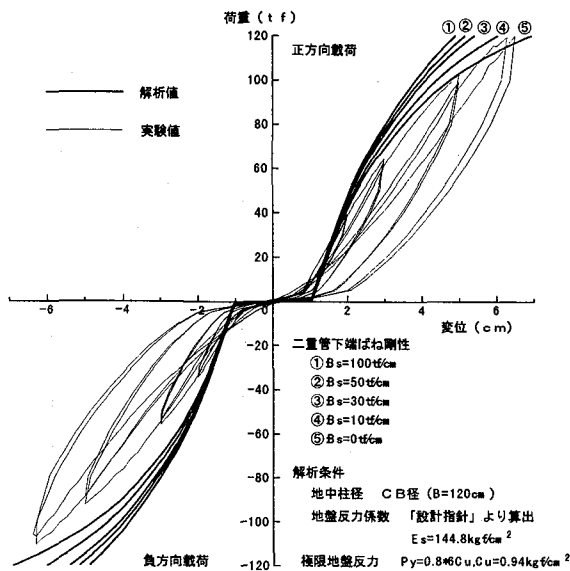


Fig.12(a) 二重鋼管杭の杭頭荷重～変位関係 (Case A)

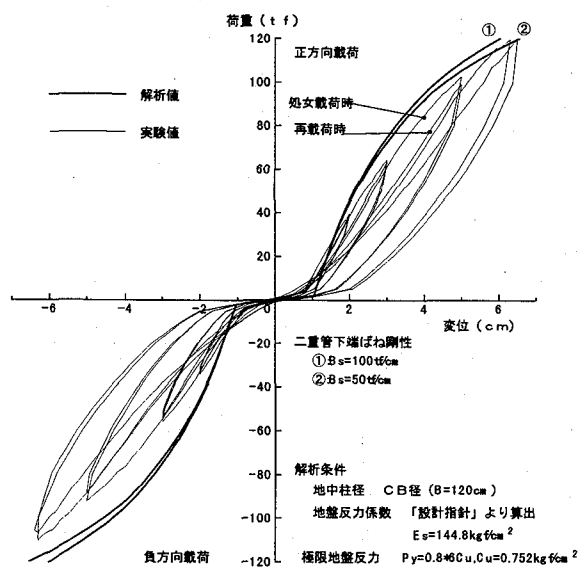


Fig.12(b) 二重鋼管杭の杭頭荷重～変位関係 (Case B)

の位置 (外管とストッパーが最初に接触する附近) で引張ひずみが卓越し、120 度および 180 度の位置で曲げひずみが卓越することがわかった (2.4(4)参照)。こうした外管の変形特性を定量的に評価するため、汎用構造解析プログラム ADINA¹²⁾ にて接触解析を行った。本節では、解析モデルおよび解析結果について述べる。

(1) 解析条件

Fig.7(b)に示すように、外管のストッパー接触部では、外側における上段および下段の管周方向ひずみはほぼ同様な分布性状を示す。したがって、付録 A で仮定したように、2次元モデルで解析しても良いと考えられる。そ

こで、Fig.15 に示すような有限要素解析モデルを設定した。本モデルでは、構造および荷重の対称性より 1/2 モデルとし、ストッパーの内周側を固定するものとしている。また、外管およびストッパーは、ヤング係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 0.3 の弾性体とし、平面ひずみ要素を用いている。解析手法は、ADINA に組み込まれている接触解析アルゴリズムを用い、大変形解析理論によった。

荷重は、Fig.A1 に示すように外管接線方向に分布するものと考え、その大きさは、せん断流理論によって算出した。また、3.1 の解析より、ストッパー部に作用する水平荷重は杭頭載荷荷重よりも数パーセント小さい程度なので、外管接線方向に分布する荷重の計算には杭頭載荷荷重を用いた。

なお、本解析に先立ち、①ストッパーと外管の摩擦係数、②外管のメッシュ分割個数、③解析理論 (微小変形理論/大変形理論) など、の影響を感度分析したが、大きな影響は見られなかった。

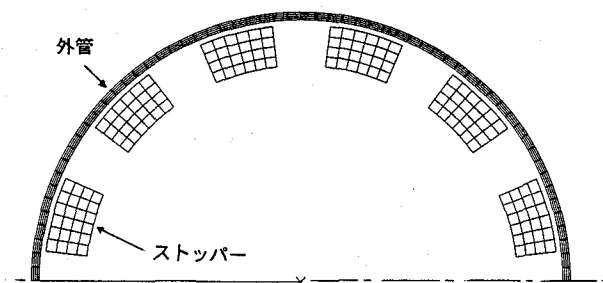


Fig.15 接触解析のための有限要素メッシュ図

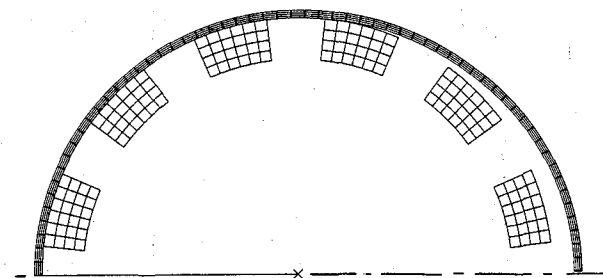


Fig.16 接触解析による変形図 (荷重 P=119.47tf)

(2) 解析結果

Fig.16 に正方向最大荷重時 ($P=119.47 \text{ tf}$) における変形図を示す。また、Fig.17 に各荷重段階におけるストッパーの接触圧力分布を示す。同図より、荷重の増加に伴い接触側の 6 個 (表示されているのは半分の 3 個) のストッパーによって外管の断面変形が拘束され、ストッパーの接触圧力が漸増している様子がわかる。Fig.18 に正方向最大荷重時における外管の円周方向ひずみを、実測値と比較して示す。同図より、2次元接触解析によって

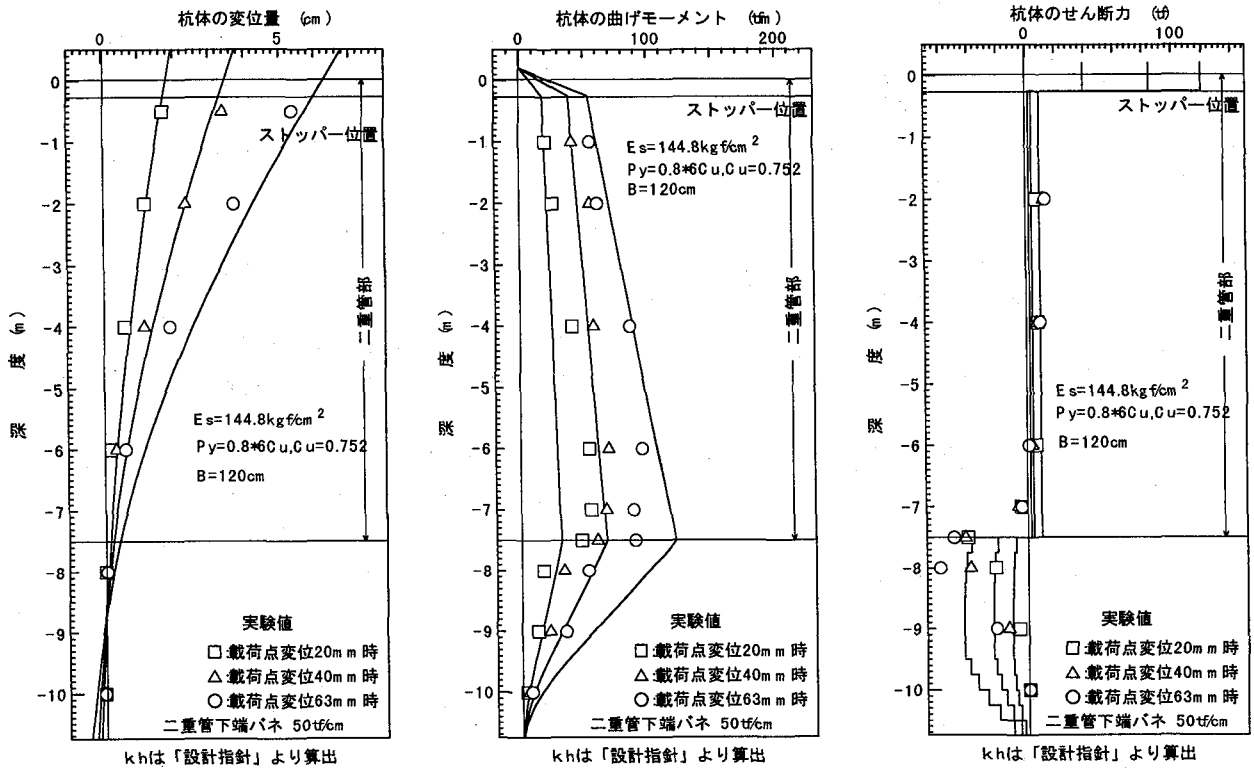


Fig.13 二重鋼管杭の内杭の解析結果 (Case B)

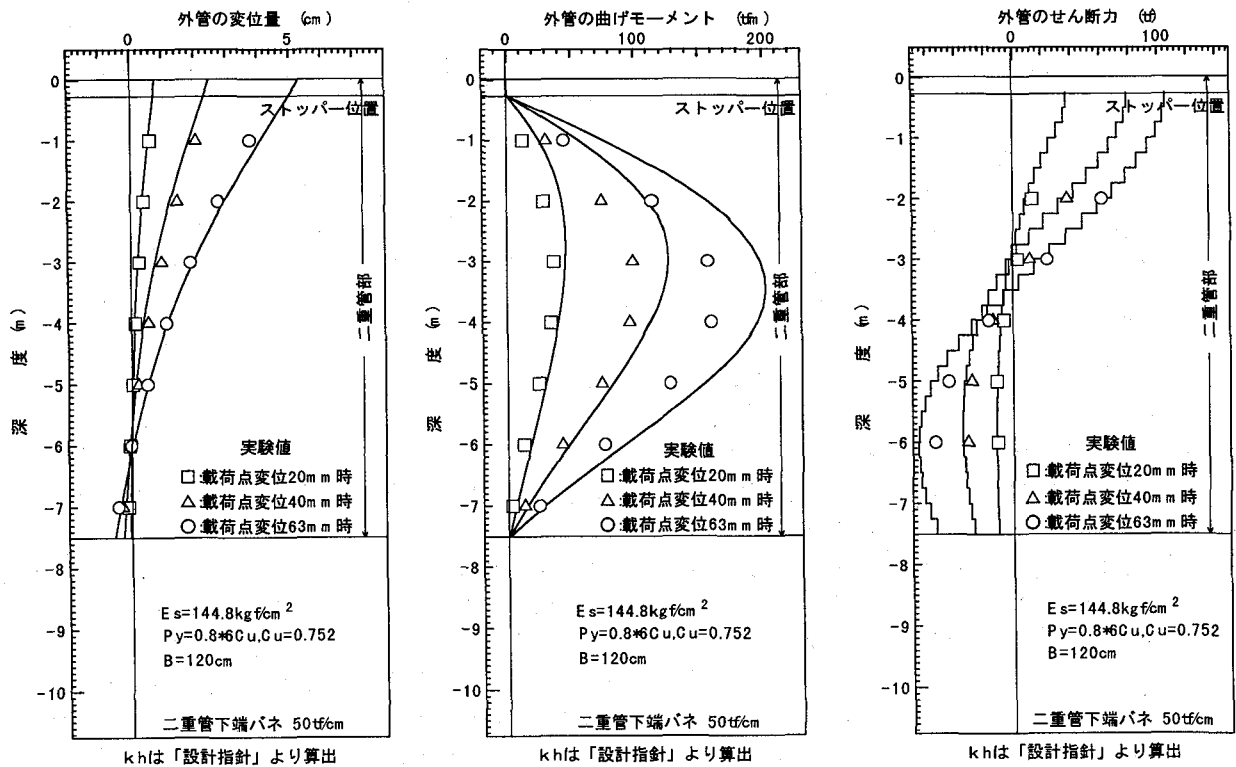


Fig.14 二重鋼管杭の外管の解析結果 (Case B)

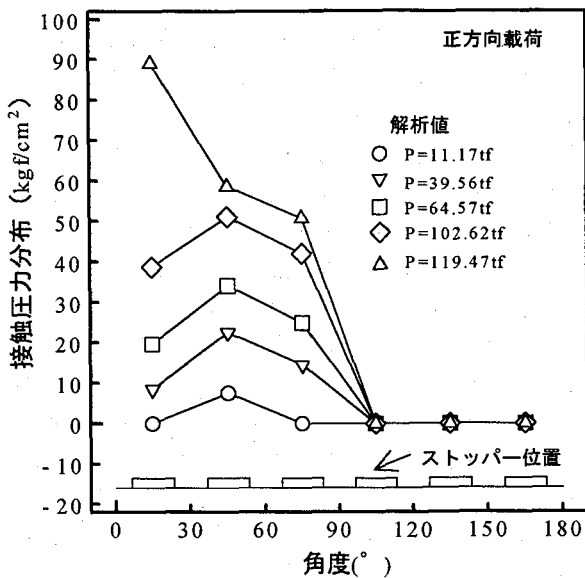


Fig.17 接触解析によるストッパー接触厚分布

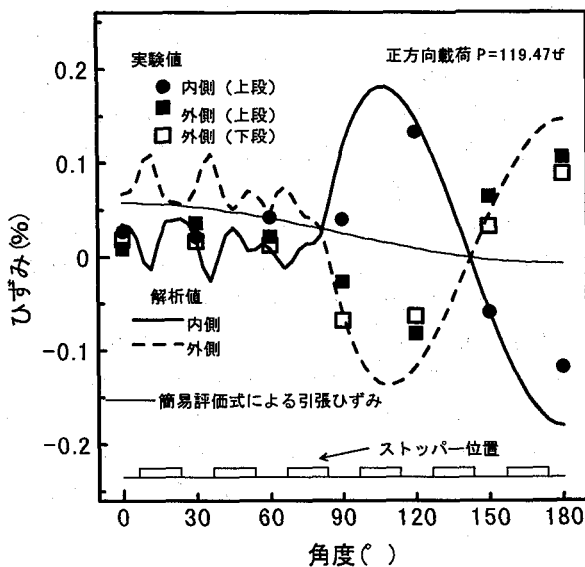


Fig.18 外管の円周方向ひずみの実測値と解析値

外管に発生する曲げひずみ特性を比較的良くシミュレートできることがわかる。なお、同図には、付録Aに示した簡易評価式(式(A1), $\mu=0$)による管周方向引張ひずみ分布も細線で示した。簡易評価式によるひずみはADINAによる内側・外側ひずみの平均値(引張成分)に近い値となっており、整合性のある結果となっている。

4. 結論

二重鋼管杭と通常の場所打鋼管コンクリート杭を互いに押し・引きすることにより、交番水平載荷試験を実施した。実験結果より、次のことが確認された。

1) 内杭がストッパーに接触するまでは小さな荷重で変形が進むが、接触後は通常の杭と同様に周辺地盤の材料非線形性を反映した荷重～変位関係となる。

- 2) 「線路上空利用建築物構造設計指針」における許容値の4倍程度の杭頭変位を与えたが、除荷後に有害な残留変位が生じない。
- 3) ストッパー接触部では、外管には0～60度の位置(外管とストッパーが最初に接触する付近)で引張ひずみが卓越し、120度および180度の位置で曲げひずみが卓越する。

また、実験結果を解析的に検討したところ、次の結論が得られた。

- 1) 二重鋼管杭の水平抵抗挙動は、内杭と外管をそれぞれ2本の梁で、またストッパー部分をギャップ要素でモデル化し、線路上空利用建築物設計指針に基づく非線形地盤反力特性を採用することにより、実用上十分な精度でシミュレートできる。
- 2) ストッパー接触部における外管の曲げひずみ特性は、2次元接触解析を行うことにより比較的精度良くシミュレートできる。

5. 謝辞

本研究における現場実験に多大な御協力をいただいた鉄建建設(株)ならびに基礎地盤コンサルタンツ(株)の関係者の方々に深く感謝いたします。

付録A：ストッパー接触部の外管の周方向張力評価式

本構造形式では、内杭に荷重が作用し、内杭からストッパーを介して外管に荷重が伝達されると、直ちに外管は変形し、外管とストッパーはある区間で密着するようになると思われる(Fig.A1参照)。

外管の周方向張力を簡易評価するために、以下の仮定を設けた。

- 1) ストッパーの数は有限個であるが、連続した(あるいは無限個の)ストッパーが存在すると考える。
- 2) 内杭からストッパーを介して外管に伝達される荷重のうち、直方向成分は、荷重載荷方向を中心に180度の区間に均一に分布すると考える。
- 3) 内杭からストッパーを介して外管に伝達される荷重のうち、接線方向成分は、直方向成分荷重に摩擦係数 μ を乗じたものとする。
- 4) 外管ストッパー取り付け部に伝わる水平方向荷重は、取り付け部より下部の外管から伝達されるせん断力と釣り合うと考える。すなわち、外管ストッパー取り付け部において地盤から作用する地盤反力は無視する。
- 5) 外管の断面内せん断力は、せん断流理論に従い、断面の接線方向に分布するものとする。

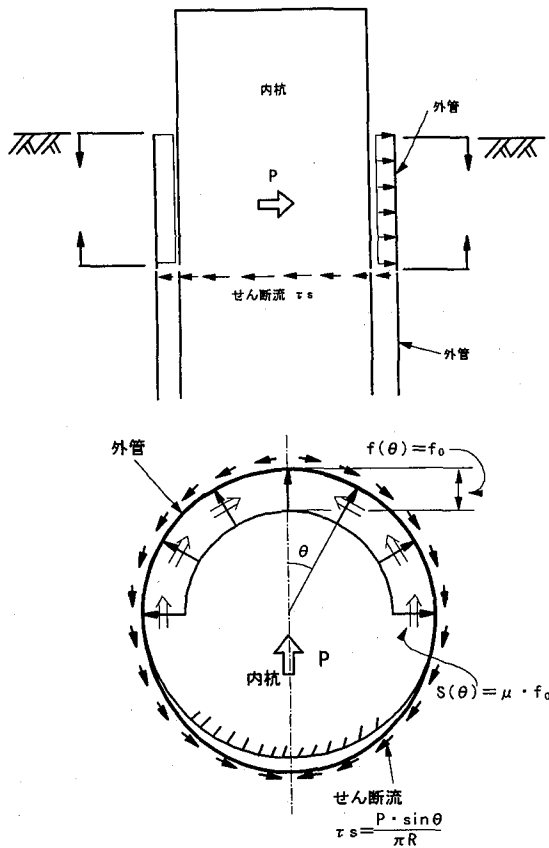


Fig.A1 ストッパー接触部の外管に作用する荷重の仮定

荷重載荷方向の力の釣合いより、直方向分布荷重 f_0 は、

$$f_0 = \frac{P}{2R} \cdot \frac{1}{(1+\mu)} \quad (1/m)$$

仮定 3) より、せん断方向分布荷重 s_0 は、

$$s_0 = \mu f_0$$

周方向に張力を積分すると

$$\left. \begin{aligned} T(\theta) &= P \left\{ \frac{1}{4} + \frac{\cos \theta}{\pi} + \frac{\mu}{(1+\mu)} \cdot \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right\} \quad (0 \leq \theta \leq \pi/2) \\ T(\theta) &= P \left(\frac{1}{4} + \frac{\cos \theta}{\pi} \right) \quad (\pi/2 < \theta \leq \pi) \end{aligned} \right\} \text{式(A1)}$$

参考文献

- 1) 蓮田常雄・大戸広道・藤井光治郎・武居 泰：線路上空利用建物の騒音振動予測、鉄道総研報告、Vol.7, No.10, pp.39-46, 1993.
- 2) 加藤誠・蓮田常雄・関口宏二・南部俊彦：二重鋼管杭を用いた構造物の振動遮断工法（その2 現場実験の概要）、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、第6部門, pp.284-285, 1994.
- 3) Kato, M., Hasuda, T., Sekiguchi, K. and Nanbu, T.: "Double tube steel-pipe-pile with vibration reduction capability," Proceedings of Inter-Noise 95, Newport Beach, CA, USA, (Edited by Bernhard, R.J.

& Bolton, J.S.), Vol.1, pp.695-698, 1995.

- 4) 海野隆哉・南部俊彦・関口宏二・篠原敏雄：二重鋼管杭を用いた構造物の振動遮断工法（その1 工法概要・水平抵抗特性の検討）、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、第6部門, pp.282-283, 1994.
- 5) 線路上空利用建築物設計法検討委員会：線路上空利用建築物構造設計指針, 1990.
- 6) 齊藤 淳・蓮田常雄・南部俊彦・関口宏二：二重鋼管杭の水平抵抗特性（その1 交番水平載荷試験の概要）、第31回地盤工学研究発表会, pp.1727-1728, 1996.7.
- 7) 南部俊彦・齊藤 淳・蓮田常雄・関口宏二：二重鋼管杭の水平抵抗特性（その2 水平載荷試験の解析）、第31回地盤工学研究発表会, pp.1729-1730, 1996.7.
- 8) 関口宏二・齊藤 淳・南部俊彦・蓮田常雄：二重鋼管杭の水平抵抗特性（その3 ストッパーと外管との接触解析）、第31回地盤工学研究発表会, pp.1731-1732, 1996.7.
- 9) 古藤田・風間：杭の塑性性状を加味した解析方法（その1～その6）、第12回～19回土質工学研究発表会, 1977～1984.
- 10) 構造計画研究所：2次元構造モデルの静的・動的弾塑性解析プログラム RESP-2T/A 利用者マニュアル, (1995年3月現在) .
- 11) 南部俊彦・関口宏二：弾塑性バネ～梁系解析手法の精度評価、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第3-B部門, pp.22-23, 1996.
- 12) ADINA R & D, Inc.: ADINA-IN for ADINA Users Manual, A Program for Pre-Processing and Display of ADINA, ADINA-T and ADINA-F Input Data, Report ARD 90-4, Sept. 1990, (Update Feb. 1992).
(1997年9月26日受付)