

鋼管群杭を用いた線路上空建築物の設計手法

清水 克将* 山田 聖治* 西岡 英俊**
高田 啓一*** 和田 昌敏# 岸田 慎司##

Design Method for Over Track Buildings with Steel Pipe Pile Groups

Katsuyuki SHIMIZU Seiji YAMADA Hidetoshi NISHIOKA
Keiichi TAKADA Masatoshi WADA Shinji KISHIDA

The pile constructions of over-track buildings, which often result in large-diameter piles, have many restrictions, because it has cast-in-place concrete piles without footing beams. There is a way to replace a large-diameter pile with a pile group of small-diameter steel pipe. In this report, static axial couple load tests of the screwed steel piles and cyclic bending shear load tests on the reinforced concrete joints between a steel pipe pile group and the column are conducted to obtain the effect of the pile group on vertical resistance at the pile tip and the mechanical properties of the reinforced concrete joint. A structural design method of over-track buildings with steel pipe pile groups is proposed based on the experimental test results.

キーワード：線路上空建築物，鋼管群杭，群杭効果，杭頭接合部，構造設計法

1. はじめに

線路上空部分を利用する橋上駅等の建築物（以下、線路上空建築物）では、地中梁がなく線路階の階高が高い等の構造的特徴を考慮した「線路上空建築物（低層）構造設計標準 2009」¹⁾（以下、低層標準）が策定されており、駅舎の設計等に広く利用されている。線路上空建築物の基礎杭には、既存駅の橋上化工事等ではホーム上家や架線等の既存設備に支障のないように、施工高さの低い場所打ちコンクリート杭を採用することが多い。しかし、線路上空空間の高度利用により、杭が大口径化して施工スペースの確保が困難であったり、施工条件等によっては施工重機が入らなかったりする等の制約があった。

これらの施工上の制約を解決する方法として小口径の羽根付き鋼管群杭を線路上空建築物に適用することが考えられる（図1）。このような群杭基礎構造とする場合、杭相互の距離による地盤ばねや耐力の増減（以下、群杭効果）を考慮することが必要である。地中梁がない線路上空建築物では、柱脚の回転により群杭に引抜き力と押し込み力が同時に作用する（以下、偶力と呼ぶ。図1参照）ものの、偶力が作用した場合の群杭効果については十分に明らかにされておらず、その定量的な評価法は確立されていない。

* 構造物技術研究部 建築研究室
** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
*** 新日鐵住金株式会社
新日鐵住金エンジニアリング株式会社
芝浦工業大学

また、柱－杭接合部においても、偶力作用下での応力状態が明らかになっていないため、柱と杭の接合方法や、接合部の補強方法等の設計方法が確立されていない。

そこで本論文では、模型地盤及び実地盤における群杭の偶力載荷実験、柱－群杭 RC 接合部及び杭頭接合部の曲げせん断実験により各種力学挙動について検討を行い、低層標準において鋼管群杭を適用する場合の設計手法を提案する。

2. 1 柱－複数杭形式の 2 層橋上駅のフレーム解析

1 柱－1 杭形式を 1 柱－複数杭形式に置換した場合の水平荷重作用下において線路上空建築物に作用する偶力の挙動を確認する必要がある。そこで、3 次元フレームによる静的増分解析を行った。解析モデルは床面積 420m²、鉄骨造 2 階建て、構造高さ 10m の地中梁の無い

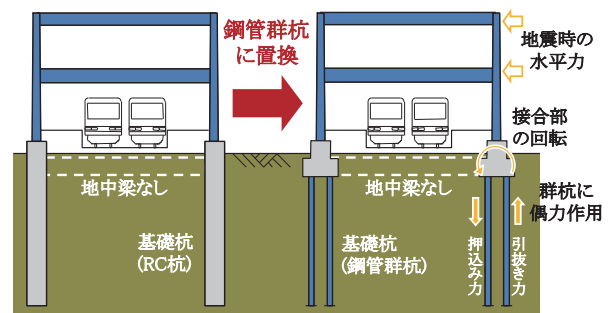


図1 線路上空建築物の鋼管群杭の利用

特集：構造物技術

線路上空建築物モデル（杭は杭径 1.2m の場所打ち RC 杭で設計地盤面 -11m で支持。詳細は文献 1）参照）とし、RC 杭を 2 本の羽根付き鋼管杭（杭径： $D_p=318.5\text{mm}$ ，杭厚： $t_p=10.3\text{mm}$ ，先端羽根外径： $D_w=637\text{mm}$ ，設計地盤面 -11m で支持）で置換した。羽根径比は $D_w/D_p=2.0$ ，群杭の杭間隔係数 $d_w=L/D_w=2.0$ （ L ：杭中心間隔）である。1 柱－複数杭接合部は先行して降伏しないように十分な剛性を持たせた。地盤ばねは「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物」²⁾（以下，基礎標準）や「建築基礎構造設計指針」³⁾（以下，基礎指針）に準拠し非線形特性を考慮して設定した。

静的増分解析結果として，保有水平耐力時（線路階の部材角 $R=1/75$ ）の内力分布を図 2 に示す。水平力による曲げモーメントの影響で，水平力に対して後方側の杭には長期軸力分が相殺され引抜き側に軸力が転じていることが分かる。

3. 偶力作用時の群杭効果の検証

ここでは，群杭に偶力が作用した場合の群杭効果を把握するため，杭間隔と载荷方向をパラメータとした模型地盤及び実地盤における载荷実験を実施した。

3.1 実験概要

模型地盤実験には平面寸法 $2\text{m} \times 2\text{m}$ ，深さ 3m のせん断土槽を用いた。模型杭は鋼管（外径 $D_p=50.8\text{mm}$ ，肉厚 $t_p=5\text{mm}$ ，長さ $L_p=1.6\text{m}$ ）の先端に羽根（直径 $D_w=100\text{mm}$ ，厚さ $t_w=10\text{mm}$ ）を取り付けて閉塞したもので，羽根径比は $D_w/D_p \approx 2.0$ である。実験パラメータは杭間隔係数 $d_w=L/D_w=1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ （ L ：杭中心間隔，杭径との比であれば $d_p=L/D_p=3 \sim 6$ に相当）であり，比較のための単杭の押し込み及び引抜き実験も行った。模型地盤には，乾燥珪砂 6 号（最大間隙比 $e_{max}=0.933$ ，最小間隙比 $e_{min}=0.627$ ）を用い，土槽下端から 1m までを支持層として相対密度 $D_r=90\%$ （単位体積重量 $\rho_d=15.9\text{kN/m}^3$ ），それ以浅の 1.5m を中間層として $D_r=60\%$ （ $\rho_d=15.1\text{kN/m}^3$ ）となるように撒き出しおよび転圧した。このとき，模型杭は支持層転圧後に所定位置に設置して仮固定した状態でそれ以浅の地盤作製を行った。

実地盤実験は，羽根付き鋼管杭（外径 $D_p=190.7\text{mm}$ ，肉厚 $t_p=8.2\text{mm}$ ）を支持層まで回転貫入施工し，杭中心間隔を先端羽根外径の 1.5 倍（杭径では 3.0 倍）の配置とした。模型地盤実験と同様に比較のための単杭実験も行った。

载荷試験概要および载荷パターンを図 3 に示す。载荷は地盤工学会「杭の鉛直载荷試験方法・同解説」⁴⁾ に準拠し段階载荷・多サイクル方式による载荷を行った。模型地盤では杭 2 本を同時に逆方向へ初期位置からの変位振幅が各杭で同一となるように変位制御により载荷を

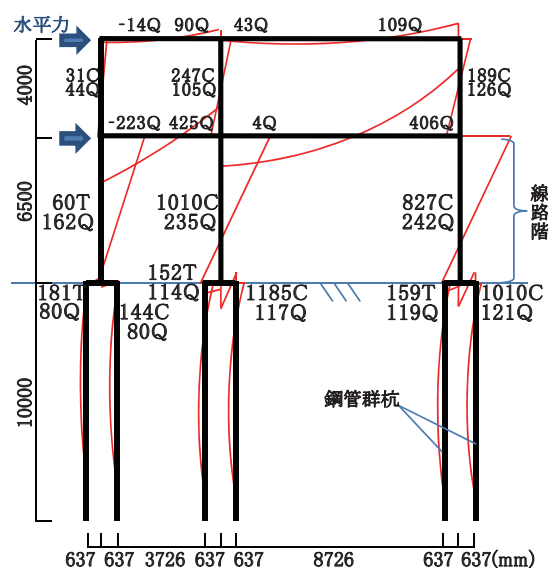


図 2 保有水平耐力時のモーメント分布図（赤線）とせん断力及び軸力の分布図（添え字 Q：せん断力，T：引張軸力，C：圧縮軸力，単位 kN）

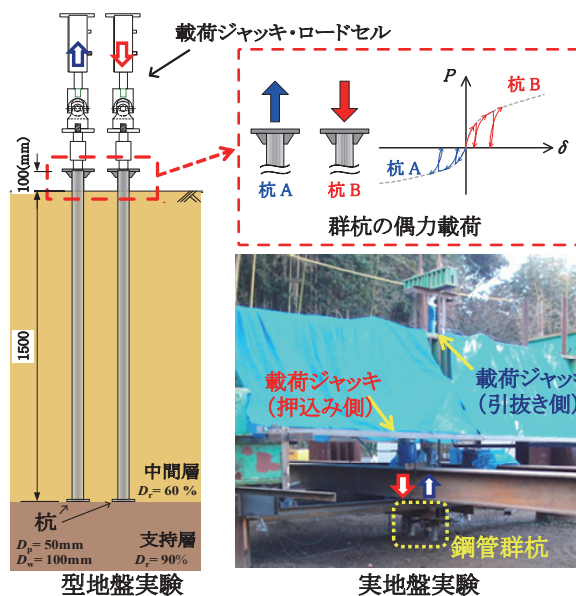


図 3 偶力载荷試験概要及び载荷パターン

行った。実地盤実験では，载荷荷重を先行して実施した単杭での押し込み試験と引抜き試験の結果から，4 サイクル目にて単杭の第二限界抵抗力を超える荷重となるように設定し，荷重制御により载荷を行った。クリープによる影響を極力少なくするために，各载荷段階において荷重が一定値に落ち着くまで十分な時間を確保した。

3.2 実験結果

単杭の基準支持力で基準化した模型地盤実験における杭先端軸力－杭先端変位関係を図 4 に示す。ここで，基準支持力とは，杭先端変位が $10\%D_w=10\text{mm}$ のときの支持力である。基準支持力に着目すると，押し込み側では

単杭と群杭の基準支持力がほぼ同程度の値となった。引抜き側では基準支持力が $dw=2.0, 2.5$ で単杭よりも大きな値となった。実地盤実験での杭先端軸力—杭先端変位関係を図5に示す。押込み側は群杭と単杭に差は認められず、偶力による群杭効果は認められない。一方、引抜き側は変位が小さい範囲ではほぼ同等の挙動を示したが、10%Dw 時の基準支持力で比較すると偶力の方が単杭に比べ小さい結果となった。

杭先端の基準支持力比—杭間隔係数関係を図6に示す。ここで、基準支持力比とは、群杭の基準支持力を単杭の値で除して正規化したものであり、群杭効果に相当する。

模型地盤実験での押込み側の支持力比は $0.90 \sim 1.03$ となり、1.0に近い値となった。引抜き側につ

いては、支持力比が $dw = 2.5$ の場合で最大の 1.62 となり、 $dw = 2.0, 2.5$ で 1.0 より大きな値を示した。これは、押込み側の杭の沈下に伴って引抜き側の杭が下方に引き込まれる効果によるものと考えられる。実地盤実験では押込み側の支持力比はほぼ 1.0 で模型実験と同様の傾向であったが、引抜き側の支持力比は 0.6 程度と模型実験よりも大きく低下した。これは実施工において、支持層に埋め込む際に正転逆転を繰り返して打設したことで、引抜き側の抵抗に寄与する杭先端羽根上側の地盤特性に及ぼす影響が大きいと考えられる。

3.3 考察

基準支持力の支持力比については、模型地盤による試験では押込み側及び引抜き側共に概ね 1.0 以上の結果となったが、実地盤による試験では押込み側は概ね 1.0 、引抜き側では 0.6 程度まで低下した。実地盤試験の施工時の杭先端軸力の計測結果から初期の杭先端軸力にばらつきがあることが確認できており、特に単杭の引抜き側の基準支持力が押込み側よりも大きいことは羽根の抵抗面積の違いを考えると不自然な結果であり、施工による初期状態の違いも無視できないと考えられた。そこで、引抜き側の群杭効果について既往の鋼管杭の支持力算定式を小口径鋼管杭に準用した場合との比較を行い、設計上の低減係数について検討する。実験により得られた基準支持力と基礎標準に示される回転杭の基準先端引抜き抵抗力の推定値（ただし、支持層上面～羽根上面間の平均N値から ϕ を求め、根入れ長さHについても設計上の上限は設けない）との比較を

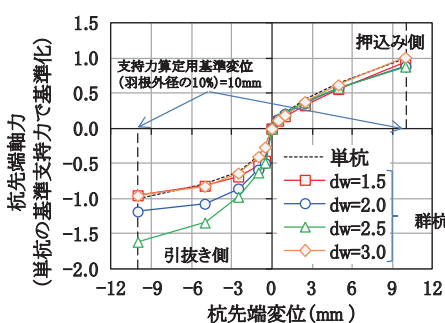


図4 杭先端軸力—杭先端変位関係 (模型地盤)

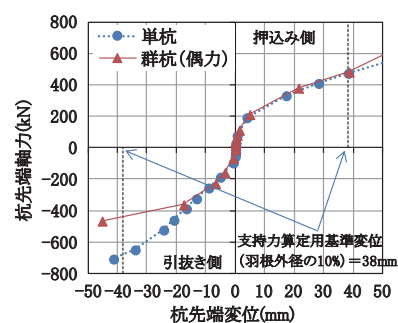


図5 杭先端軸力—杭先端変位関係 (実地盤)

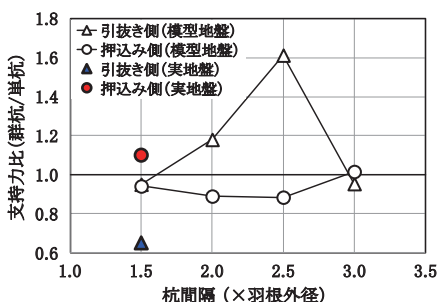


図6 単杭に対する支持力の比

表1 基準先端支持力（引抜き）の実験値と既往の推定値との比較

	単杭	群杭
実験値 (kN)	680	438
推定値* (kN)	544	
実験値 / 推定値	1.25	0.80

*支持層上面～羽根上面間の平均N値から ϕ を求め、根入れ長さHは設計上の上限は設けない場合の基礎標準の引抜き側の基準支持力

表1に示す。この推定値は杭施工や地盤評価等によるばらつきを考慮して安全側に設定された基準先端引抜き抵抗力である。単杭の基準支持力の実験値は推定値に対して 1.25 、群杭の場合には 0.80 であった。よって群杭効果による低減係数としては、基礎標準の算定式との比較から 0.8 倍程度に低減しておけば十分に安全側であると考えられる。

ただし、現段階では実杭における群杭効果の実証試験が1事例しかない状態であり、実構造物に適用する際には現地での荷重試験により群杭効果の確認を行うのが望ましい。特に本実験と異なる工法を採用する場合には、羽根形状の違いや施工管理方法の違いの影響が大きくなるため、施工試験を兼ねて現地での同様の荷重試験によって群杭効果を確認する必要がある。

一方、押込み側の群杭効果については、模型地盤の結果も考慮して低減率を 0.9 とすれば安全側になると考えられる。

4. 1 柱—複数杭接合部の力学性状の検証

4.1 1 柱—2 杭 RC 接合部実験

1 柱—2 杭形式の RC 接合部（柱脚接合部+杭頭接合部）の正負交番繰り返し水平荷重実験を行い、群杭に押込みと引抜きが同時に作用する場合の杭頭接合部の力学的挙動について検討した。

4.1.1 実験概要

試験体の概略を図7に示す。試験体の接合部形式については、施工性が高く RC 接合部のサイズが極力小さく

特集：構造物技術

なるよう、柱脚接合部は根巻き形式、杭頭接合部は埋め込み形式とした。根巻柱脚の仕様は、「鋼構造接合部設計指針」⁵⁾(以下、接合部指針)をもとに決定した。杭頭部については、引抜き力が作用することを考慮して、埋め込み長さを基礎指針で杭頭固定と見なせる1.0Dp(Dp: 杭径)よりも長い1.5Dpとしたうえでアンカー鉄筋を配置した。本実験ではパイルキャップの力学挙動の把握を主目的としているため、パイルキャップが先行して曲げ降伏するように、試験体 No.1 のパイルキャップの主筋及びせん断補強筋量は「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁶⁾(以下、RC 基準)に準じて配した。アンカー鉄筋は杭頭に溶接接合し、必要本数や定着長はRC 基準に準じた。試験体 No.2 は、パイルキャップの有効せいを高くしたモデルで、パイルキャップの主筋量は試験体 No.3 と同量とした。試験体 No.3 は、試験体 No.1 におけるパイルキャップ主筋量を2/3に減じたモデルである。柱及び杭には局部座屈等により早期に破壊することを防止するためコンクリートを充填した。試験体の寸法は、実物モデルの0.625倍とした。

加力方法を図8に示す。杭脚部はピン支持とし、柱頭部を鉛直ジャッキにより2層橋上駅の柱の長期軸力相当分の軸力391kNを維持した状態で、柱頭部を正負交番

に水平荷重を行った。

4.1.2 実験結果

試験終了後のひび割れ状況を図9に示す。全試験体ともに層間変形角 R=1/200 で鋼管柱による根巻柱脚の支圧ひび割れ、根巻柱脚とパイルキャップの境界で曲げひび割れが生じ、下面では荷重方向に対して後方側の杭周りに支圧によるひび割れが法線方向に生じた。

荷重-変形角関係(包絡線)を図10に示す。全試験体ともに、R=1/150 付近において杭頭に配したアンカー筋が引張降伏を迎え、R=1/100 で最大耐力を迎えた。その後はいずれの試験体も大きく耐力低下が生じている。

本実験では杭頭のアンカー鉄筋が最も早期に降伏したが、その際のせん断力ほどの試験体でもおおよそ250kNであり、実大スケールに換算すると $250 \div 0.625^2 = 640\text{kN}$ 程度である。これは実大モデルの保有水平耐力時に線路階柱に作用する最大のせん断力242kN(図2参照)に対して十分に大きい。しかしながら、柱の全塑性曲げモーメント時のせん断力2000kN以下であり、最大耐力は引抜き剛性の早期低下が引き金となったことから、杭頭接合部には適切に補強筋を配す必要があるものと考えられる。一方、既往の設計指針に依って設計した根巻柱脚については健全であることを確認した。

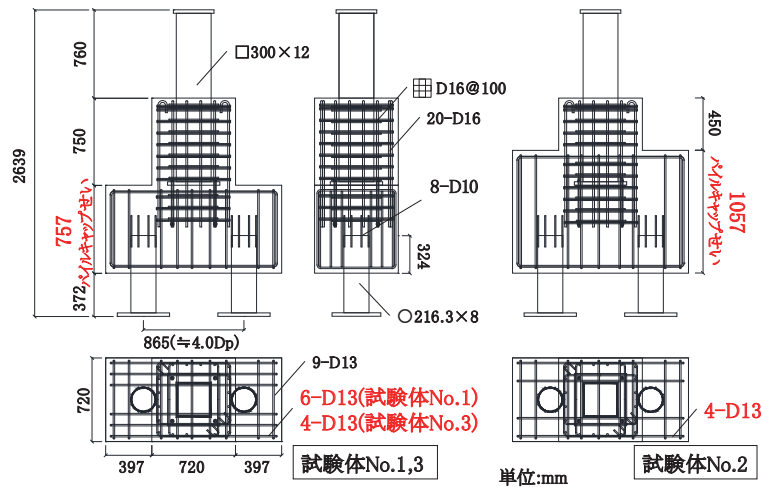


図7 試験体概要

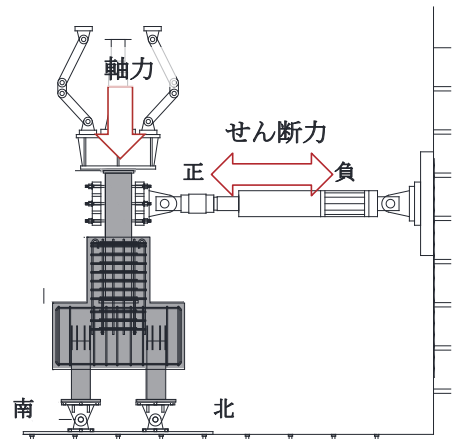


図8 加力方法

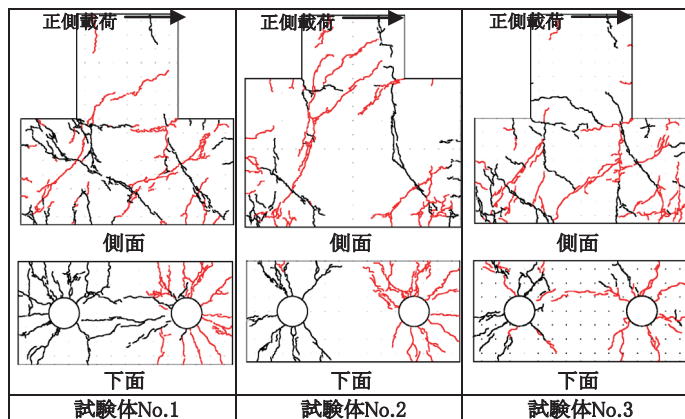


図9 荷重後のひび割れ状況(黒線：正側，赤線：負側)

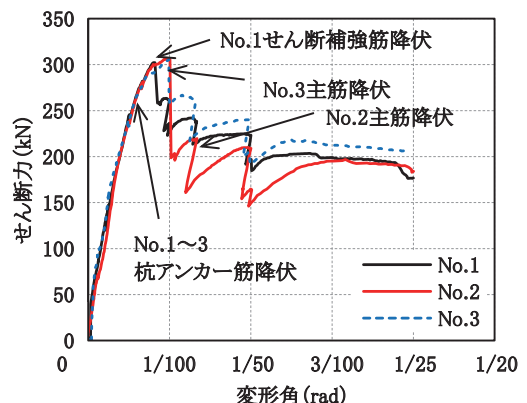


図10 せん断力-変形角関係(包絡線)

4.2 補強した杭頭接合部の性能確認実験

前節の1柱-2杭接合部の曲げせん断実験において、杭頭部の引抜きにより最大耐力に至った。そこで、杭頭部を補強する方法として、上部構造の接合部についての指針である接合部指針における側柱の埋込柱脚の補強方法であるU字型補強筋を用いることとする。これは、U字型補強筋は杭頭部を囲うように配置されるため、図9中にみられるような杭法線方向に広がるひび割れに対して有効に働くことが期待できるためである。本節では、U字補強筋を配した場合の杭頭接合部の曲げせん断性状を確認する。

4.2.1 実験概要

図11に試験体概要を示す。試験体JP-1はU字型補強筋を配した杭の曲げ降伏先行型、試験体JP-2は試験体JP-1に対してU字型補強筋量を1/2に減じた試験体、試験体JP-3は試験体JP-1と補強筋量は同等であるが、U字型補強筋を高さ方向に集中配置した試験体である。U字型補強筋以外の仕様材料や寸法等は共通である。杭頭には鉄道構造物等設計標準⁷⁾に準じ、杭内面にずれ止め2段、杭内部には内挿鉄筋を配置した。試験体の縮小率は0.84倍である。杭が杭頭接合部に対して先行して降伏又は座屈等による剛性低下しないように鋼管内にコンクリートを充填させて、更に板厚を厚く設定した。

加力方法は杭が上面になるよう上下反転させた状態で軸力を正側（外向き） 載荷時には引抜き軸力150kN、負側（内向き） 載荷時には押し込み軸力1000kNで一定として水平に正負交番載荷を行った。接合部の固定条件は1柱-2杭形式接合部を想定した柱フェイス位置（杭中心から535mmの位置）で固定し、パイルキャップの梁としての挙動を極力拘束しないようにした。

4.2.2 実験結果

ひび割れ状況を図12に示す。全て試験体で、初期に杭周面の付着切れが生じ、その後正側の載荷では、水

平加力の直交方向の±90°方向にひび割れが生じ、最終的には45°方向のひび割れ幅の拡大により最大荷重に至った。負側の載荷では、最大荷重サイクル時に載荷方向の杭の支圧によるコンクリートの圧壊が生じて最大耐力に至った。この時、接合部正面の杭先端高さ位置においてコンクリートのはらみだしが確認された。また杭頭接合部の鋼管杭がはらみだしており、鋼管が塑性化していたことが伺える。

水平荷重-水平変形関係を図13に示す。正側の載荷についてはいずれの試験体においてもスリップ型の履歴形状であるものの試験体JP-2がその影響が顕著であった、また、最大耐力については杭頭補強筋を分散配置した試験体JP-1が最も高く、JP-1 > JP-3 > JP-2であった。いずれの試験体も設計用荷重（図2中における杭頭の最大せん断力を1.2倍して試験体縮小率を乗じたもので100kN）に対して十分な耐力を有しており、また杭の全塑性耐力（中詰コンクリートは除く）以上の結果となった。表2に杭頭接合部の接合部指針による耐力計算値（計算値1と表記）と実験による最大耐力の比較を示す。いずれも実験値が計算値を大きく上回っていることが分かる。そこで、パイルキャップの主筋も杭頭補強筋として加えたものも併記した（計算値2と表記）。その結果、計算値と実験値がほぼ同程度となることから、パ

表2 最大耐力の比較

試験体名	JP-1		JP-2		JP-3	
	正側	負側	正側	負側	正側	負側
実験値 (kN)	377	450*	319	451*	362	441*
計算値1** (kN)	236	241	133	160	302	266
実験値/計算値1	1.60	1.87	2.40	2.82	1.20	1.67
計算値2*** (kN)	338	計算値1	249	計算値1	391	計算値1
実験値/計算値2	1.12	と同じ	1.28	と同じ	0.926	と同じ

*：鋼管の局部座屈により最大耐力に至ったため、接合部の耐力としては実験値以上を有す。**：接合部指針⁵⁾より算出。***：パイルキャップの主筋を杭頭補強筋として接合部指針式に累加して算出。

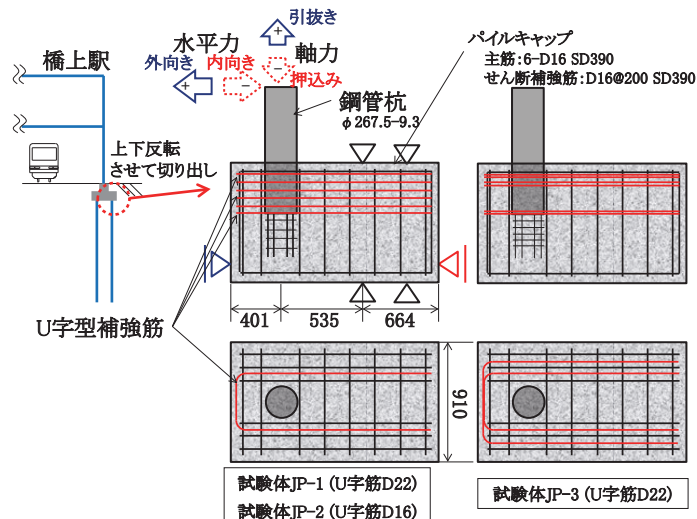


図11 加力方法と試験体配筋図（単位：mm）

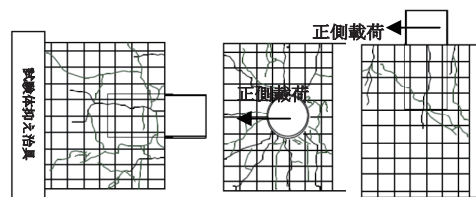


図12 ひび割れ状況（試験体JP-1）

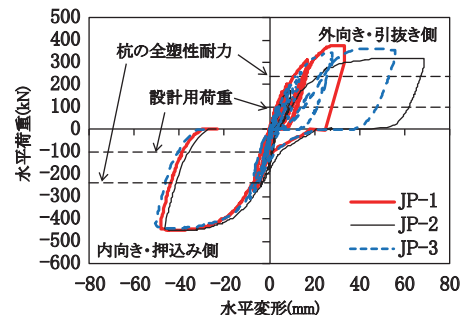


図13 水平荷重-水平変形関係

特集：構造物技術

イルキャップ主筋も杭頭補強に寄与していると考えられる。ただし、パイルキャップ主筋はフーチングを構成する要素の一つであり、その主な役割が異なる。したがって、杭頭補強としてパイルキャップ主筋を累加しない方が安全側の設計になると考えられる。

本節では接合部指針に準拠し提案したU字型補強筋を用いて杭頭を補強した場合の配筋量やその配置の違いによる影響を確認した。U字型補強筋により杭頭接合部が早期に引抜かれることなく最大耐力まで安定した挙動を示すことが分かった。

5. 線路上空建築物における鋼管群杭の適用手法(案)の提案

これまでの実験的検討を踏まえて、線路上空建築物における鋼管群杭を適用する場合の設計手法を線路上空建築物の既往の設計法である低層標準を基に提案する。既往の設計フローを図14(※印が追加検討箇所)に示す。鋼管群杭を適用するには一次設計及び二次設計において追加検討を要する。以下に、追加検討を要する具体的な項目についての設計手法(案)を示す。

(1) 構造種別(低層標準 第2章)

杭基礎は鋼管杭とする。また柱脚接合部は接合部指針に定める根巻形式とし、杭頭接合部は埋込形式を基本とする。杭頭接合部は、はしあき長さを1.0Dp、埋込長さを1.5Dpとし杭頭には支圧に抵抗するための補強筋の他に、引抜き力及び押込み力に抵抗するための内挿鉄筋及びずれ止めを設けることとする。

(2) 設計手法(第1, 4章)

小口径羽根付き鋼管杭の先端地盤ばね剛性の算定にあたっては文献3)によることとする。基準支持力については偶力作用下における群杭効果として引抜き側を基礎標準の算定式に対して0.8倍、押込み側については0.9倍に低減させることとする。

(3) 一次設計(第5章)

杭頭接合部については接合部指針の埋込柱脚の側柱の降伏耐方式により検証する。

(4) 二次設計(第6章)

柱-杭接合部は、線路階の層降伏時においても十分な強度を保持する構造とする。

6. まとめ

線路上空建築物に適用できる1柱-複数杭構造の構造設計手法を提案するため、模型地盤及び実地盤における小口径羽根付き鋼管杭の偶力載荷実験を行い、偶力作用下での群杭効果を確認した。また、1柱-2杭形式接合部の正負交番実験及び杭頭接合部の変動軸力下での正負交

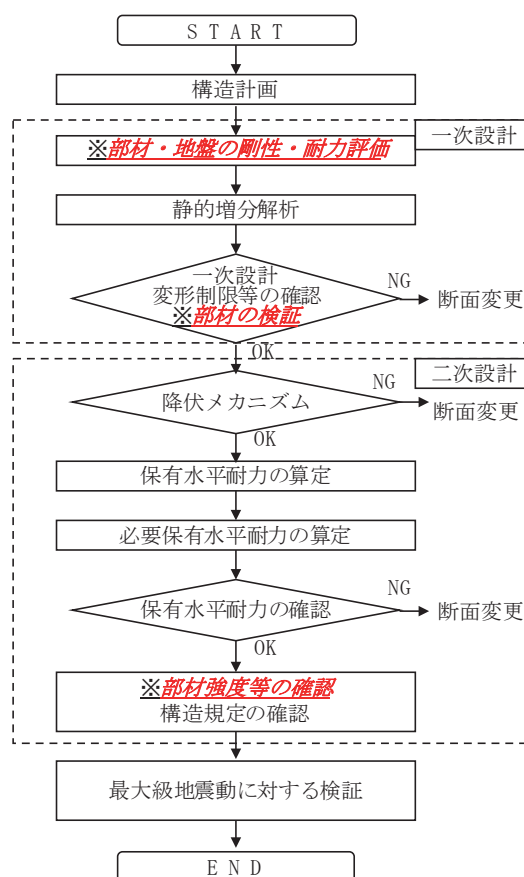


図14 既往の設計フロー(※が追加箇所)

番実験を行い、1柱-複数杭構造の力学挙動を確認した。以上を基に既往の線路上空建築物の構造設計指針の中で鋼管群杭を適用する場合の設計手法(案)を提案した。

謝辞

本研究にあたっては、東京建築研究所 蓮田博士の協力を得た。ここに謝意を表す。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：線路上空建築物(低層)構造設計標準 2009, (社)鉄道建築協会, 2009
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物), 2012
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 2001
- 4) 地盤工学会編：地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」-第1回改訂版-, 地盤工学会, 2002
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, 2012
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説-基礎構造物・抗土圧構造物, 2000