

拡大根固め鋼管杭の FEM 解析による支持力特性の検討

Evaluation for bearing capacity of tip grouted steel pipe pile by use of FEM analysis

脇屋泰士*, 元木卓也*, 三村哲弘**, 福田一夫***, 森本宣弘****

Yasushi Wakiya, Takuya Motoki, Tetsuhiro Mimura, Kazuo Fukuda, Nobuhiro Morimoto

*工修 川崎製鉄(株), 建材センター技術部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2 丁目)

** (株)ジオトップ, 技術開発本部 (〒104-0033 東京都中央区新川 1 丁目)

** ノザキ建工(株), 技術部 (〒261-0002 千葉県美浜区新港 2 2 3)

** 川鉄テクノソリューション(株), 九州支店 (〒812-0041 福岡市博多区吉塚 1 丁目)

This paper describes about the bearing capacity of tip grouted steel pipe piles. The failure mechanism of the tip grouts and the influence of these shapes on the pile capacity are studied by use of FEM analysis in which the elasto-plastic properties of the tip grout and soil are considered. The results of the analysis with respect to the failure mechanism of tip grout show that the inner pile plugging is important to improve the strength of the pile tip grout. And also the results of the analysis with respect to the shape of tip grout indicate that the pile capacity is more influenced by the tip grout diameter than it's height.

Key Words: steel pipe pile, tip grout, FEM, bearing capacity, failure mechanism,

キーワード: 鋼管杭, 根固め, FEM, 支持力, 破壊メカニズム

1. はじめに

昭和 40 年代以降, 市街地での振動・騒音の規制が厳しくなり, 杭基礎工法も打撃工法から低振動・低騒音工法へ移行してきた。既製杭における代表的な低振動・低騒音工法は埋込工法であり, プレボーリング工法あるいは中掘工法により杭を沈設するものである。これらの工法の多くは杭先端部にセメントミルクを注入して根固め施工を行うことで支持力を発現させている。杭先端部に杭径よりも大きな拡大根固め施工を行う工法は, 建築基礎の分野を中心に開発が行われ, それらの多くは建設大臣の認定工法として利用されている。これらの工法においては, 工法ごとに根固め部の形状が異なるものの, 先端支持力の算定には根固め形状の影響は考慮されておらず, 同一の支持力算定式が採用¹⁾されている。

根固め部の形状特性が杭の支持力に与える影響を検討した既往の研究として, 直径 30mm の模型杭を用いた実験的研究²⁾³⁾⁴⁾がある。実験土槽において根固め形状(根固め径および高さ)を変えた杭の載荷試験を行い, 根固め形状に応じて破壊機構が異なることを示すとともに, 極限解析により根固め部の終局耐力の評価式を導いている。

また, 既製コンクリート杭を対象として, FEM 解析手法を用いて根固め部の形状特性に関する検討を行った研究⁵⁾もある。研究においては, 根固め部の破壊機構についての検討を行い, 根固め部と杭との付着力や根固め高さおよび底面形状が構造耐力に大きな影響を及ぼすことを指摘している。

一方, 鋼管杭の拡大根固め工法については, 根固め部の破壊機構や形状特性に着目した検討はこれまでに行われていない。一般的な使用状況において鋼管杭の肉厚はコンクリート杭の 1/10 程度であり, 杭先端部から根固め部への力の伝達機構は両者で異なると考えられる。既に実用化されている工法においても, コンクリート杭の場合には先端部に特別な加工は施していないのに対して, 鋼管杭の場合には杭先端部の管内にずれ止めリングを取り付け, その支圧力によって杭から根固め部へ力を伝達させている。

そこで本研究では, 鋼管杭の拡大根固め工法を対象として, 根固め部の構造耐力および杭としての支持力特性に関する検討を行うこととし, 根固め部および地盤の弾塑性特性を考慮した FEM 解析手法を用いて, 根固め部の材料強度や形状および地盤特性を変えたパラメトリック解析の結果について報告するものである。

2. 根固め部の FEM 解析手法の概要

2.1 杭および地盤モデル

杭および地盤のモデルを図-1に示す。杭先端部のモデル化は、杭径 $\phi 800\text{mm}$ ×板厚 $t20\text{mm}$ ×杭長 $L5.4\text{m}$ の鋼管杭を想定し、弾性係数 $E_s=2.1 \times 10^5\text{N/mm}^2$ の弾性要素を用いた。

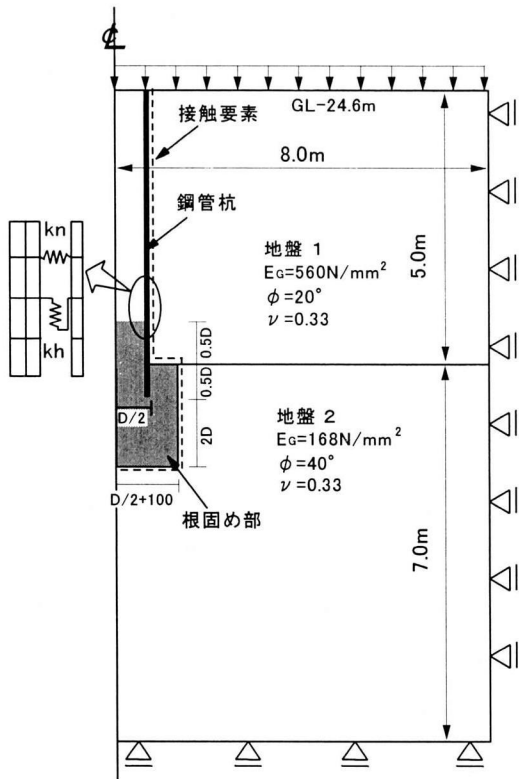


図-1 杭および地盤モデル

根固め部の形状としては、これまでに日本建築センターの評定を取得している工法¹⁾や模型実験^{2)~4)}、FEM解析⁵⁾、実大載荷試験^{6)~8)}等の結果を参考にして、直径が $D+200\text{mm}$ ($1.25D=1.0\text{m}$ D :杭径)、高さが $2.5D=2.0\text{m}$ で、根固め中に鋼管杭が $0.5D$ ほど挿入されている状態を標準とした。根固め部はコンクリートの力学特性で表現できるものとし、図-2に示す材料特性を与えた。圧縮領域においては圧縮強度 σ_c の72%で降伏し、100%で圧壊する加工硬化則を与えた。降伏条件としては加工硬化を有する単軸の弾塑性特性を考慮しやすいミーゼスの降伏条件を用いた。引張領域においては Smear cracking の手法を用い、引張応力が圧縮強度 σ_c の8%に達した時点でクラックが発生し、クラック発生後には最大引張応力が作用する方向の剛性が0となり、応力の解放が行われるとした。鋼管内部には根固め部と同様の強度の硬化剤が充填されているものとして、根固め部と鋼管内壁との付着力特性については、両者の間にジョイント要素を配し、その剛性を変えることで表現した。バネ定数として $10(\text{N/mm}^3)$ 程度を用いれば完全に滑り、 $1.0 \times 10^4 (\text{N/mm}^3)$ 程度で完全に剛結の特性が与えられる。地盤

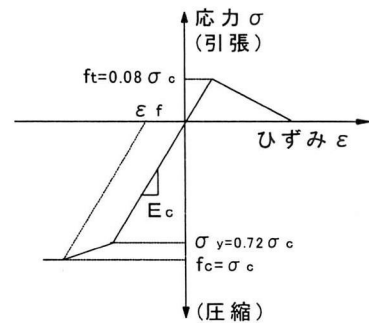


図-2 根固め部の材料特性

モデルについては水平方向に8m、鉛直方向に12mの領域を要素分割し、モール・クーロンモデルにより地盤の弾塑性特性を表現した。地盤の弾性係数 E_G はN値を用いて $E_G=2.8\text{N}(\text{N/mm}^2)$ として算定し、上層を $N=20$ 、下層を $N=60$ とした。また地盤と杭および地盤と根固め部の境界には接触要素を配し、地盤との滑りを考慮した。特に根固め部の上面については、杭が沈下した際に根固め部が地盤を引っ張ることがないように剥離を生じさせ、逆に底面においては根固め部が地盤に貫通しないように、地盤と根固め部は常に接触している条件とした。さらに地盤内応力については地盤の単位体積重量を 17kN/m^3 として、杭先端部が $G.L-30\text{m}$ の深度となるような応力を与えた。

解析要素は4節点の4変形軸対象要素を用い、境界条件として、側面は水平方向を固定、鉛直方向を自由とし、底面は水平方向を自由、鉛直方向を固定とした。解析は杭頭部を鉛直下方に変位させ、破壊挙動の検討を行った。変位増分値は地盤がないモデルで 0.2mm 程度、地盤がある場合には 0.5mm 程度を用い、各増分変位段階での最大繰返し回数は20回とし、収束性を確認しながら適正値を設定した。

2.2 解析モデルの検証とパラメトリック解析方法

解析の流れを図-3に示す。解析モデルの妥当性については、拡大根固め部の載荷試験結果および支圧強度式⁹⁾により検証した。また、根固め部の破壊耐力および杭としての支持力特性に影響を与える要因としては、①硬化剤と管内の付着特性、②根固め部の圧縮強度 σ_c 、③根固め部の高さ、④根固め部の径、⑤地盤内応力、⑥根固め部の周面摩擦力などが考えられる。しかし、上記6つの項目の全てについてパラメトリックに解析を行うことは煩雑となるので、本解析では、まず鋼管杭と根固め部から構成される部分のみに着目し、その部分だけのモデルを用いて①管内の一体化特性および②根固め部の強度特性に関する検討を行う。その結果から管内の一体化領域および圧縮強度に関して所定の性能を満足する標準的な諸元を設定する。その後、設定した条件を標準として地盤要素を考慮したモデルを用い、③~⑥までの各パラメータの影響を評価することとする。

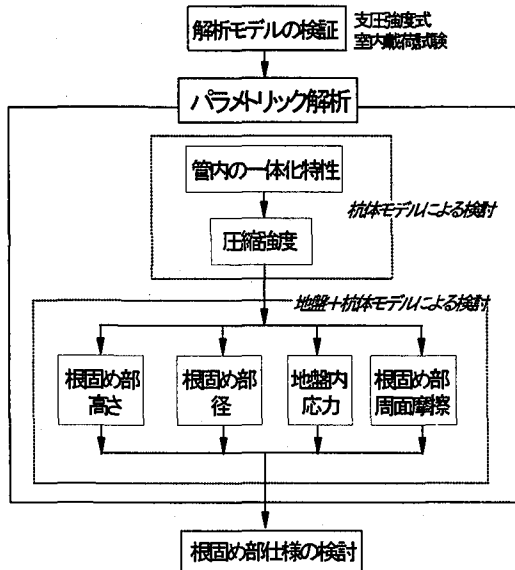


図-3 解析の流れ

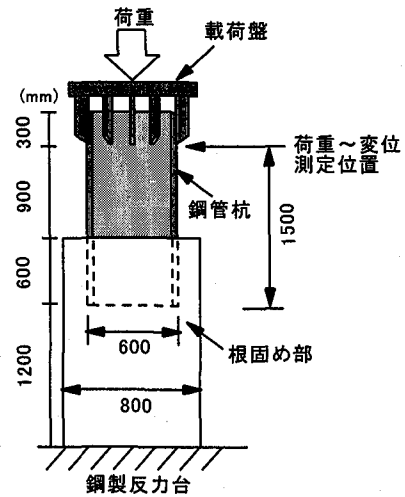


図-5 載荷試験時の状況

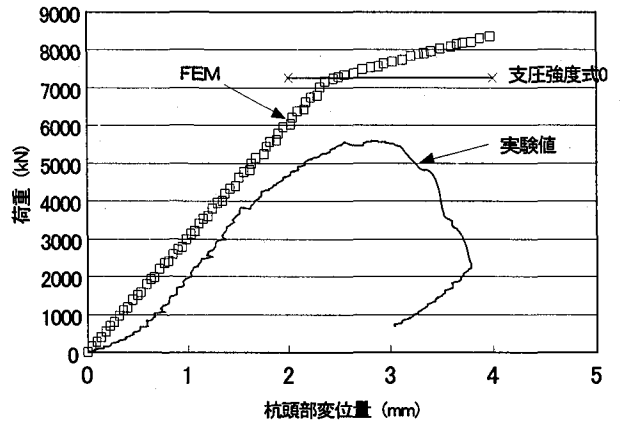


図-6 杭頭部の荷重～変位関係

3.解析結果

3.1 解析モデルの検証

解析モデルの妥当性を検証するため、拡大根固め部の載荷試験結果との比較を行った。載荷試験における試験体は図-4に示す地盤において、実用されている施工機械を用いて根固め施工を行い、養生後に掘り出したものである。載荷試験は図-5に示すように杭頭部を補強して載荷を行った。

図-6に載荷試験の試験体における杭頭補強部の直下(杭先端から1500mmの位置)における、解析および実験による荷重～変位関係を示す。FEM解析結果では荷重が約7000kNで降伏し、破壊荷重は8363kNとなった。圧縮強度 σ_c に杭閉鎖断面積を乗じた荷重は5652kNで、根固め部の面積で評価した場合には10048kNとなり、FEMの破壊荷重は両者の間の値となっている。

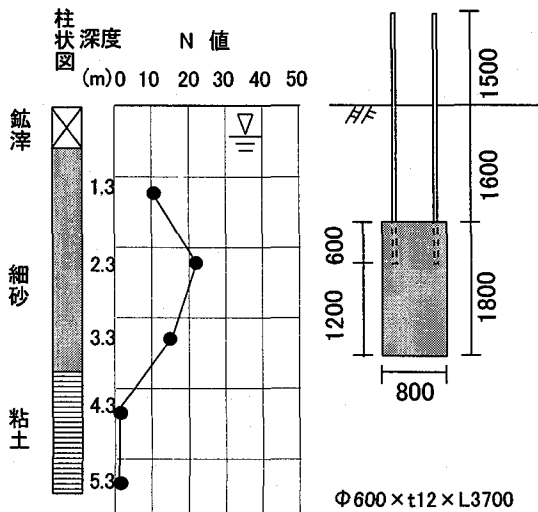


図-4 根固め部の諸元と施工地盤

また、図-7のように軸部と拡大部で断面が変化しているような場合、その破壊荷重は両者の断面積比に応じて変化すると考えられ、その時の圧縮強度は支圧強度 F_B と呼ばれ、式(1)により定義される。

$$F_B = P / A_1 \quad (1)$$

ここで P : 破壊荷重,

A_1 : 支圧断面積

また、支圧強度 F_B を求める方法として六車・岡本らの実験式⁹⁾がある。図-7支圧強度 F_B を求め、式(2)により与えられている。

$$F_B = \sigma_c^{2.28} \sqrt{A_B / A_1} \quad (2)$$

ここで σ_c : 15×30cmの円柱供試体の圧縮強度
杭径が600mm、根固め径が800mmの場合、支圧支持力は7274kNとなり、FEMによる破壊荷重は妥当な結果を与えていると考えられる。

載荷試験結果では載荷初期においては荷重の馴染みによる変位の増加が生じているが、その後はFEM解析とほぼ同様の傾きで荷重は増加している。試験における最大荷重は5591kNであり、FEM解析に比べて

約33%小さい値となった。試験後の供試体から5本のコアサンプリングを行い、1軸圧縮強度を確認した結果を表-1に示す。

表-1 試験体の1軸圧縮強度

(N/mm ²)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
1軸圧縮強度 σ_c	17.5	21.5	31.2	23.6	22.7

実地盤で施工を行ったため、圧縮強度は17.5N/mm²~31.2N/mm²にばらつく結果となったが、平均値で評価するとFEM解析で与えた強度 $\sigma_c=20\text{N/mm}^2$ よりも大きな値となる。したがって、試験結果が解析値よりも小さくなったのは、根固め部の強度以外に別の要因があると考えられ、例えば載荷状態の違いも1つの原因であると考えられる。つまり、解析においては理想的な載荷状態が表現できるのに対して、試験で用いた供試体は実地盤で築造したものであり、杭と根固め部の軸ずれによる偏芯載荷などの影響が含まれると推定される。

図-8にFEM解析における各荷重段階での塑性ひずみの進展状況を示す。5000kN程度から杭先端部に徐々に塑性ひずみが広がり始め、7000kN付近で根固め外周および中心部に向かい塑性領域が急激に増大している。最終的には鋼管先端より下部が全て塑性化し、破壊に至っている。

載荷実験における破壊形状を図-9に示すが、解析結果と同様に杭先端より外周と中心部に向って亀裂が

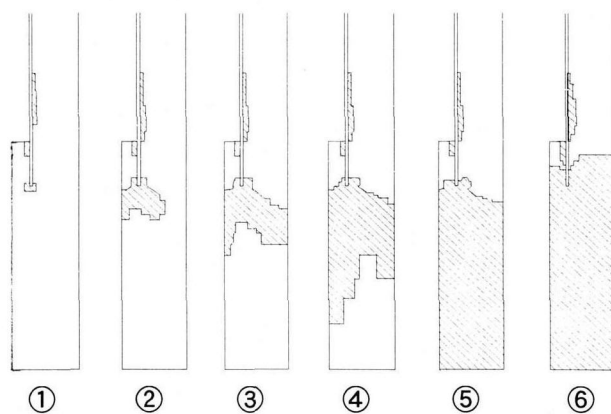
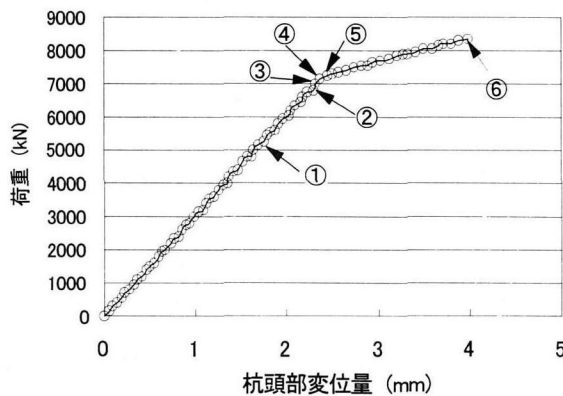


図-8 塑性ひずみの進展状況

入り、杭先端部にはくさび状の破壊面が生じていた。最終的には杭先端下部が圧縮状態になり破壊していた。

このように破壊状況において両者は一致しており、破壊荷重値については差があったものの、本解析によって根固め部の破壊挙動は評価できると考えられる。

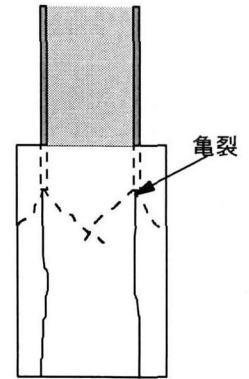


図-9 破壊形状

3.2 管内の一体化特性の影響

パラメトリック解析においては杭径 $D=800\text{mm}$ 、根固め径 $D+200\text{mm}$ を標準モデルとして検討を行った。鋼管杭の場合にはズレ止めリングにより鋼管と管内の固化体との一体化を図っている。ここではその一体化特性をジョイント要素のパネ剛性により表現し、鋼管杭の場合に必要な一体化領域すなわちズレ止めリングを取り付けるべき領域を明らかにする。根固め部の圧縮強度は $\sigma_c=20\text{kN/mm}^2$ を用い、完全剛結の領域 L_c を $L_c=0, 0.1D, 0.2D, 0.5D, 1.0D, 2.0D$ に変化させ解析を行った。解析結果として管内の付着長と破壊荷重の関係を図-10に示す。

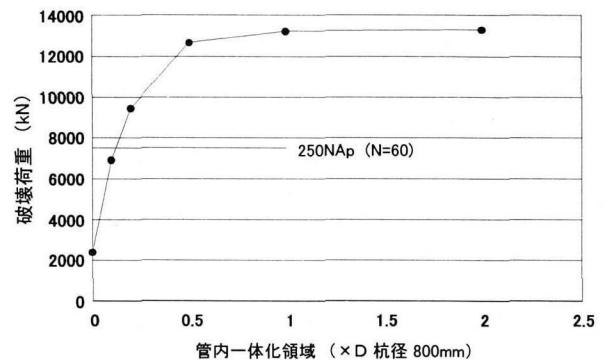


図-10 管内の一体化領域と破壊荷重

図中には $R_p=250N_{Ap}$ ($N=60, A_p$:杭の閉塞断面積) として計算した先端支持力 ($R_p=7530\text{kN}$) も合わせて示している。破壊荷重は一体化領域が $0\sim 0.5D$ の間で急激に増加し、 $1D$ 以上の一体化領域を取った場合には、破壊荷重は約 13300kN でほぼ一定となっている。また図-11に杭頭部での荷重~変位関係を示す。一体化領域が長くなるにしたがい管内のコンクリートの剛性が加わるため、わずかながら傾きが大きくなっている。変位が約 6.5mm 、荷重が 11000kN 付近で降伏点が見られるが、一体化領域 $L_c=0\sim 0.2D$ のケースでは、降伏荷重以下の直線領域で破壊する結果となっている。一体化領域による破壊挙動の違いについて検討を行うため、一体化領域が $L_c=0$ の場合と $L_c=2.0D$ のケースについて最終破壊荷重時のミーゼスの相当応力、相当塑性ひずみ、相当クラックひずみを図-12および図-13に示す。 $L_c=0$ の場合には、管内の閉塞性が確保されず、鋼管杭の先端に応力が集中し、

$L_c=2.0D$ のケースの約 1/5 の荷重でクラックひずみが縦方向に延びている。また $L_c=2.0D$ のケースでは管内のコンクリートに荷重が伝達し、応力が分散して根固め部に伝わるため、クラックひずみの進展が緩和され、根固め

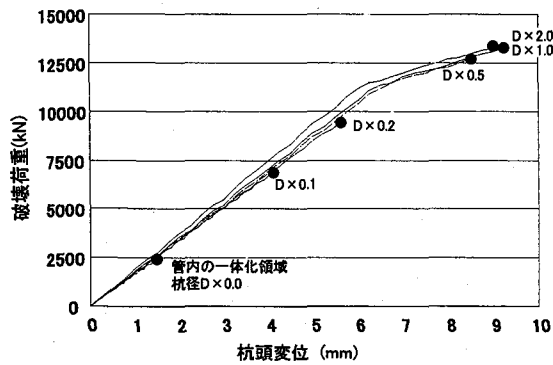


図-11 杭頭部荷重～変位関係 (一体化領域変化)

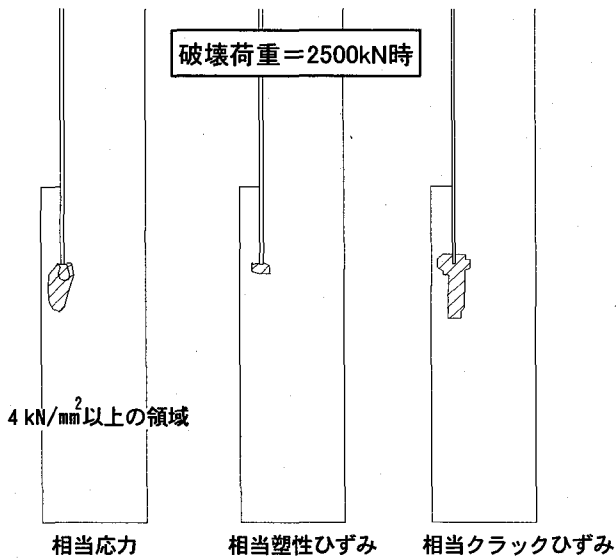


図-12 $L_c=0$ の破壊状況

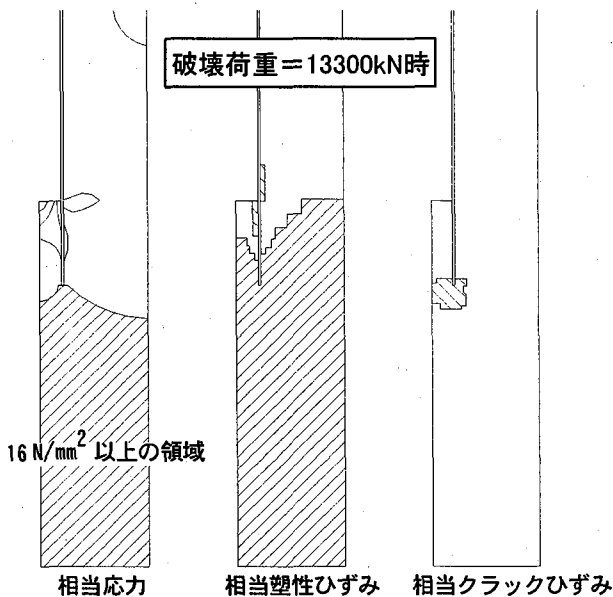


図-13 $L_c=2.0D$ の破壊状況

部の応力が圧縮強度に近い 16N/mm^2 以上になるまで荷重が保持できている。

以上より、管内の一体化特性は根固め杭の支持力に大きな影響を持ち、一体化領域が無い場合には杭先端部に応力が集中して破壊するのに対し、 $1D$ 以上の領域で一体化が確保できれば、管内の閉塞性が確保され、根固め部の強度は最大に発揮され、根固め部の圧縮破壊により終局状態に至ると推定される。以下の解析では一体化領域 $L_c=1.0D$ として検討を行う。

3.3 圧縮強度特性の影響

ここでは根固め部の圧縮強度 σ_c を $10, 15, 20, 25\text{N/mm}^2$ の4段階に変化させ、破壊耐力におよぼす影響を検討する。杭頭の荷重～変位関係を図-14に示す。

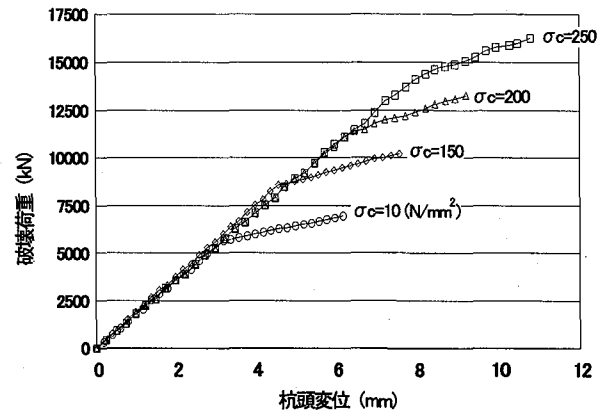


図-14 杭頭の荷重～変位関係(圧縮強度変化)

いずれのケースとも圧縮力の増加に伴い、同一の勾配で荷重が増加し、破壊に至っている。圧縮強度と破壊荷重の関係を図-15に示す。管内の閉塞性が確保された状態であれば、根固め部の圧縮破壊で耐力が決まるため、破壊荷重は直線上に並び、圧縮強度に比例して破壊荷重が決まると考えられる。

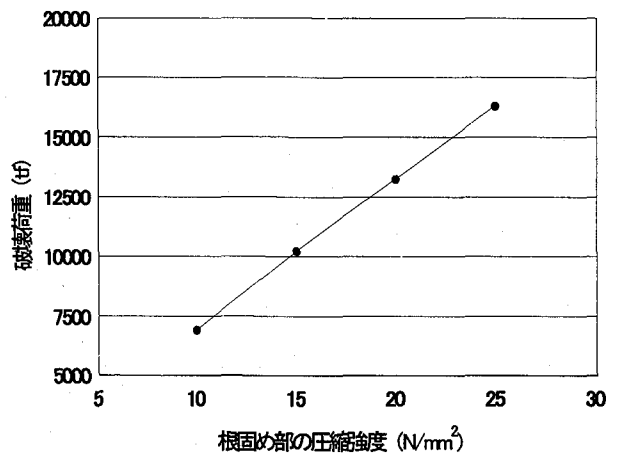


図-15 圧縮強度と破壊荷重の関係

3.4 根固め高さの影響

既往の模型実験^{2)~4)}やFEM解析⁵⁾の結果によれば、地盤を考慮した場合には、根固め部の下端から引張亀裂が発生し、破壊することが指摘されている。これは実際

の杭の根固め部が根固め球根よりも剛性の低い地盤によって支持され、根固め部底面の受ける反力状態が室内試験のそれとは異なることが原因であると考えられる。したがって根固め径や高さの影響については、地盤を考慮した解析モデルを用いて実体に近い状態での検討が必要となる。根固め高さ $H=2.0D$ の時の変形図を図-16に示す。杭と根固め部が一体となって変形し、根固め部の底面の地盤が圧縮され変形している。

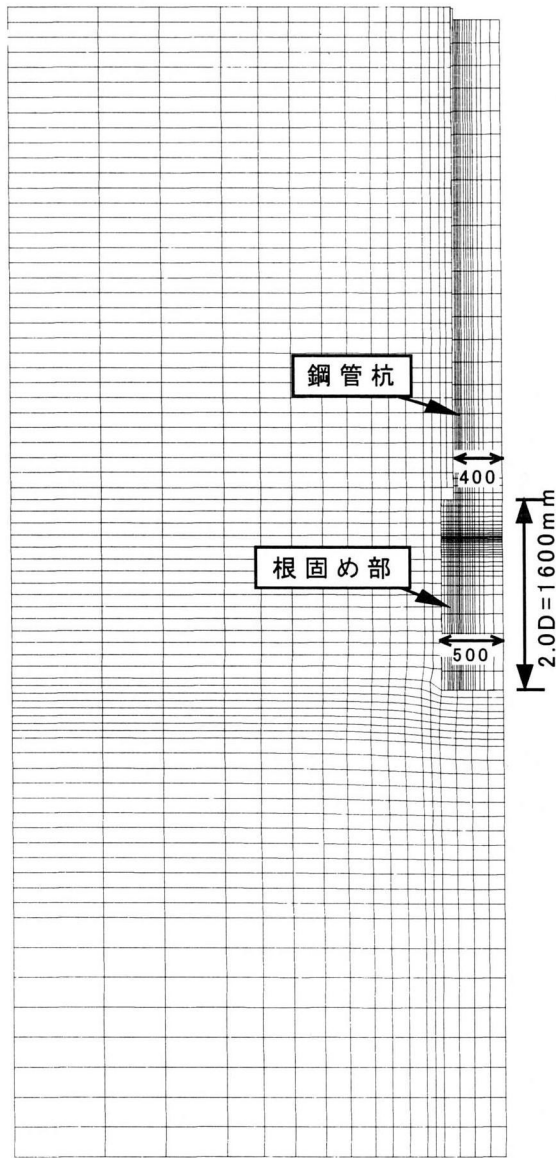


図-16 地盤を考慮したモデルの変形図
(根固め高さ $H=2.0D$)

根固め高さについては $H=0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D$ の4ケースについて解析を行った。この解析においては根固め高さの影響をより単純化して評価するため、地盤内応力や根固め部の周面摩擦力は考慮せず、この2つのパラメータについては別途検討することとした。したがって地盤と根固め部周面は完全に滑る条件となっており、また根固め部上面と地盤とは剥離が生じるようにしてあり、杭が沈下した際に地盤に引っ張られることのないようになっている。解析結果を図-17に示す。

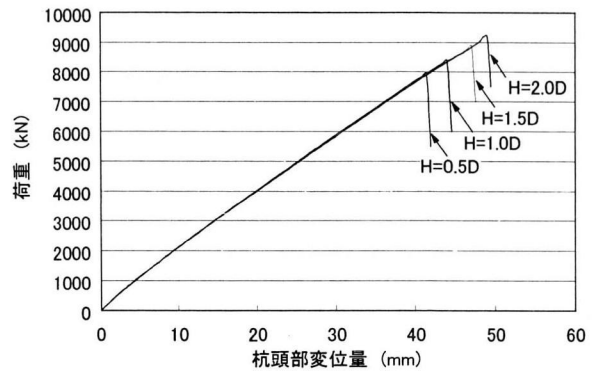


図-17 杭頭部荷重～変位関係
(根固め高さの影響)

$H=2.0D$ の場合、変位量が 49mm で破壊荷重は 9220kN となり、底面を剛とした場合の破壊荷重 13330kN と比較すると、約 69% の荷重値となっている。破壊挙動を検討するため図-18に塑性ひずみの伸展状況を示す。根固め部底面の地盤内には底面外周部より塑性域が広がり、破壊時の 9220kN においては根固め部の底面外周部と杭先端部直下に塑性域が発生している。

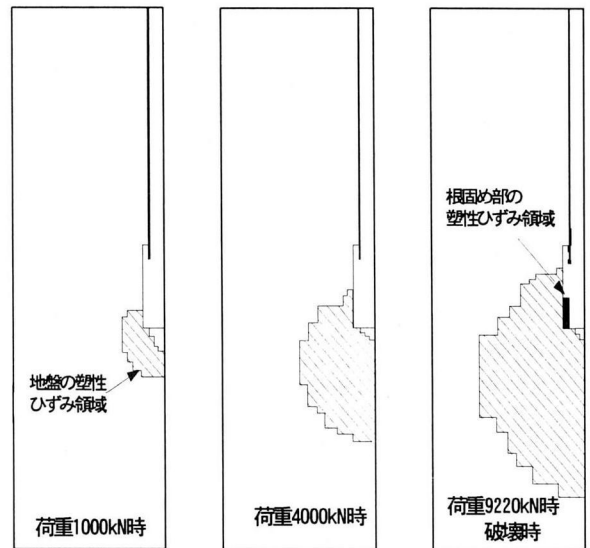


図-18 塑性ひずみの伸展状況

これは根固め部が根固め部より剛性の低い地盤に支持されるため、図-19の模式図に示すように根固め部の周辺部に地盤反力が集中し、根固め部を押し広げるような力が働くことが原因であると考えられ、室内载荷のケースとは破壊メカニズムが異なる。したがって支持面の剛性が破壊耐力に影響を及ぼし、地盤を考慮した場合には、底面を剛とした場合に比べ、破壊荷重が小さくなると考えられる。

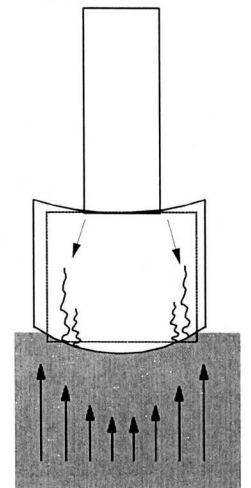


図-19 破壊状況

実際の支持層を想定した場合、特に砂礫層などの場合、地盤剛性は本解析で設定した値よりも大きいことが考えられる。その場合には根固め部の破壊は図-8に示すように、根固め部下端が剛床条件とした場合の破壊に近くなる。

根固め高さの影響としては、根固め高さが小さくなるのにしたがって破壊荷重も低下しているが、これは根固め底面と鋼管直下に発生する塑性域が干渉して、より早く連続することが原因であると考えられる。しかしながら $H=0.5D$ と $H=2.0D$ のケースを比較した場合、その差は約 13.6%であり、破壊荷重に対する根固め高さの影響は比較的小さい。

3.5 根固め径の影響

根固め径の影響については、根固め径が 900mm, 1000mm, 1100mm の 3 ケースの検討を行った。図-20 に解析結果を示す。

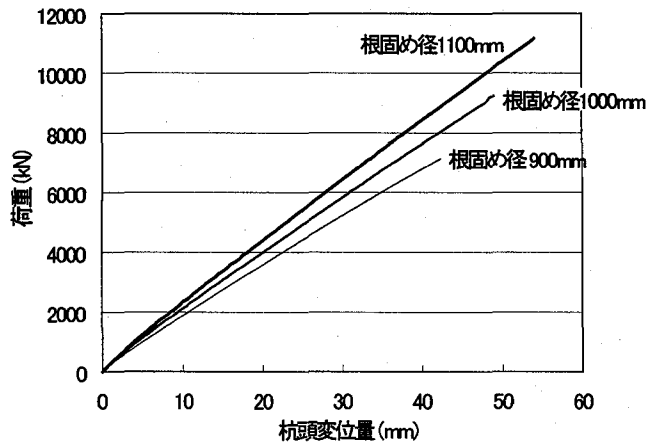


図-20 杭頭部荷重～変位関係
(根固め径の影響)

根固め径が大きくなれば、同じ変位量に対する荷重値および破壊荷重も大きくなっている。表-2に根固め径が 900mm の場合を基準にした根固め部の断面積比や変位量 40mm における荷重比および破壊時の荷重比をまとめて示す。地盤の非線形性の影響があるため、各荷重比の増加は断面積比と一致しないが、根固め径が大きくなれば荷重値もそれぞれ増加している。同じ変位量(40mm)で比較すれば、荷重の増分比は面積の増分比よりも小さいが、破壊荷重の増分比は面積比より大きくなっている。

また、根固め径比(根固め径 D_o /杭径 D)と破壊荷重の関係を図-21に示すが、根固め径比が 1.15 以上となれば、破壊荷重は設計支持力 7530kN(250NAp;N=60)を上回ることとなる。

表-2 断面積比および荷重比

根固め径 (mm)	面積 比	変位40mm時		破壊時	
		荷重 (kN)	荷重比	荷重 (kN)	荷重比
900	1.00	6800	1.00	7140	1.00
1000	1.23	7630	1.12	9220	1.29
1100	1.49	8430	1.24	11150	1.56

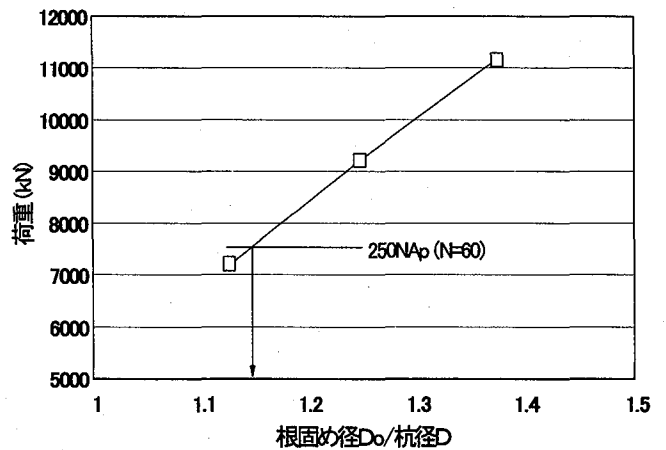


図-21 根固め径比と破壊荷重の関係

3.6 地盤内応力および根固め部周面摩擦力の影響

これまでの検討においては、地盤による支持状態を単純化して評価するため、地盤内応力や根固め部の周面摩擦力については考慮していなかった。しかし、解析結果をより定量的な評価に結びつけるためには、これらを考慮した解析を行う必要がある。

地盤内応力としては杭先端を GL-30m の深度と想定し、地盤の単位体積重量を 17N/m^3 とした応力を与えた。その時の深度方向の応力分布を図-22に示す。根固め部の周面摩擦力としては水平応力に比例する摩擦力を考え、摩擦係数としては 0.5 を用いた。

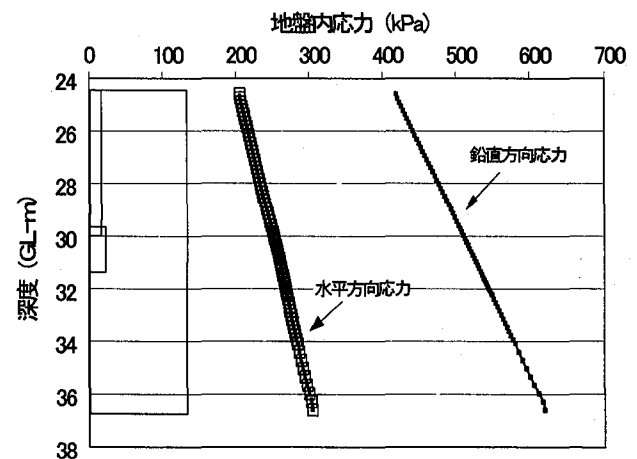


図-22 地盤内応力の深度分布

図-23に地盤内応力および根固め部の周面摩擦力を無視した場合、地盤内応力のみを考慮した場合および両者を考慮した場合の解析結果を示す。

地盤要素として強度が静水圧依存するモール・クーロンモデルを用いているため、地盤内応力を与えることで地盤の強度も増加し、地盤内応力のみを考慮した場合は、破壊荷重は 10670kN となり、地盤内応力を考慮しなかった場合(9220kN)に比べ 16%ほど荷重が増加している。また、摩擦応力を考慮した場合には、摩擦力の影響で載荷初期より変位曲線の傾きが大きくなっており、破壊荷重は 11600kN となった。

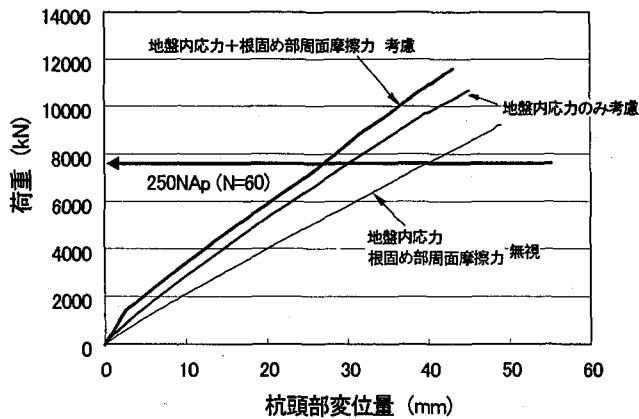


図-23 杭頭部荷重～変位関係
(地盤内応力の影響)

4. おわりに

コンクリートや地盤の弾塑性特性を考慮したFEM解析を用い、拡大根固め杭の破壊機構と構造耐力について検討した。今後は実大レベルでの試験結果との比較により解析結果を検証していく必要がある。以下にこれまでの検討結果をまとめて示す。

- (1)管内の付着特性は根固め部の破壊挙動に大きな影響を及ぼす。根固め部の強度を最大に発現させるためには、付着長を $1D(D$:杭径)以上確保することが必要となる。
- (2)地盤を考慮した解析を行うことで、根固め部の支持条件の違いにより破壊挙動が異なることが明らかとなった。地盤を考慮した場合には根固め部の底面外周部より塑性域が発生し、剛な支持条件に比べ31%程度小さな荷重で破壊する。
- (3)根固め高さが小さくなれば根固め底面からと杭先端からの塑性域が早く重なるため破壊荷重も低下するが、その影響は比較的小さく、根固め高さを $2.0D$ から $0.5D$ に変化させた場合の耐力の低下は13.6%程度である。
- (4)根固め径が大きくなれば支持力も増加する。増加率は地盤の非線形特性に依存するが、破壊荷重は根固め断面積比以上の増加率となった。
- (5)地盤内応力および根固め部の周面摩擦力を考慮することで破壊耐力は増加する。 $GL-30m$ を想定した場合、地盤内応力のみを考慮することで16%の耐力増加となり、それに加えて根固め部の周面摩擦力を考慮した場合には、さらに9%の耐力増加となった。

参考文献

- 1) 青木功：日本建築センター埋め込み杭工法評定における最近の傾向,基礎工,Vol.23,No.5,pp.6~11,1995.
- 2) 倉知禎直, 日下部治, 上野勝利, 加倉井正昭, 横山幸満：根固め杭の先端支持力に及ぼす形状の影響, 第27回土質工学研究発表会, pp1559~1562,1992

- 3) 大井明, 倉知禎直, 上野勝利, 横山幸満：大型土槽を用いた根固め杭の載荷試験, 第28回土質工学研究発表会, pp1727~1730,1993.
- 4) 倉知禎直, 上野勝利, 大井明, 横山幸満：根固め杭の根固め先端部の破壊に及ぼす形状の影響, 第28回土質工学研究発表会, pp1731~1734,1993.
- 5) 山崎雅弘, 竹脇出, 長岡弘明, 中村恒善：既製コンクリート杭根固め部構造耐力の施工形状依存性, 構造工学論文集, Vol.41B,pp.467~476, 1995.
- 6) 芳賀孝成：埋め込み杭工法における載荷試験, 基礎工, Vol.24, No.5, pp.84~90, 1996.
- 7) 浅山金吾, 清水喬次, 平尾幸太郎, 大杉富美一：拡大TAP工法の実験工事, 基礎工, Vol.23, No.5, pp.60~65, 1979.
- 8) 三浦邦夫, 川上圭二, 山下久男, 吉野学, 日比野信一：TN杭(鋼管杭)先端根固め部の荷重伝達機構, 第20回土質工学研究発表会, pp1035~1036, 1985.
- 9) コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.381~383, 1981.
- 10) 建築工事共通仕様書, 社団法人公共建築協, pp23, 1997.
- 11) 和田克哉, 森川久, 高野晴夫, 松井謙二：施工法の違いによる中掘り工法大口径PC杭の支持力, 土と基礎, Vol.28, No.11, pp.27~34, 1980

(2000年9月14日受付)