

平面歪場における剥離及び滑動を考慮した 杭とフーチングとの結合部の有限要素解析

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE CONNECTION BETWEEN PILE HEAD AND FOOTING

CONSIDERING THE DEBONDING OR SLIP IN PLANE STRAIN FIELD

*

**

小堀 為雄 近田 康夫 吉田 昭仁

By Tameo KOBORI, Yasuo CHIKATA and Akihito YOSHIDA

In this paper, the stress distribution of the connection between pile-head and footing was investigated with the finite element technique. Especially the effect of the debonding or slip in the interface between pile and footing on the stress flow was investigated. The connection between pile-head and footing was idealized in two dimensional (plane strain) field. In order to model the debonding or slip in the interface, the 'joint element' formulated by Goodman was adopted. The results of the finite element analyses show the effect of the debonding or slip in the interface on the stress flow successfully.

1. まえがき

構造物の杭基礎において、杭とフーチングとの結合部は、断面が急変し応力が集中するため、構造上の弱点となりやすく、その安全性には十分な配慮が必要であるにもかかわらず、現在のところその応力伝達機構に関してはなお不明な点が多い。つまり、現行の杭頭部の結合方法は、一般に剛結合として考えられ、Aタイプ、Bタイプの2方法によって施工されているが、¹⁾実際には杭頭結合部が完全に剛結であるとは考えられず、荷重の増加による応力過多や疲労などによって、杭頭結合部に、剥離現象や滑動現象が発生している可能性が高く、その実例も報告されている。²⁾

そこで、本研究では杭頭結合部の応力伝達機構の解析のために有限要素法を適用し、これにGoodmanのジョイント要素³⁾を導入することによって、杭頭結合部の部分的な剥離現象や滑動現象を表現するための解析手法を確立し、その手法を用いて、杭とフーチングが大きな荷重を受けた場合、剥離現象や滑動現

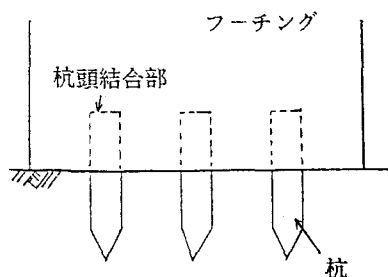


図-1 杭頭結合部

- * 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2丁目40-20)
 ** 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2丁目40-20)
 *** 金沢大学大学院工学研究科建設工学専攻 (〒920 金沢市小立野2丁目40-20)

象が発生するの否か、また発生するとすればどのような挙動を呈し、応答量は剥離、滑動現象が発生しないとしたものと、どの程度異なるのかといった点に着目して、杭頭結合部の応力伝達機構に対する検討を行った。

なお、杭頭結合部は平面歪場においてモデル化し、軸力と水平力が作用する場合について解析を行った。これは、2次元問題として解けば、解析方法が非常に簡略化できるという理由によるもので、厳密には、3次元的な取り扱いが必要であると思われる。しかし、将来的に3次元的な解析結果と比較、検討することにより、簡略解析法として2次元平面歪場での解析が可能かどうかを、検討する場合の資料となると考えられる。また、奥行き方向に、連続的に鋼管杭が並ぶケーソン基礎や、⁹⁾地中壁のうゑに構造物が建設されるような場合には、十分適用が可能であると思われる。

2. 解析モデル及び解析条件の設定

本研究では、剥離、滑動現象を表現するために、Goodman のジョイント要素を用いた。Goodman らは岩盤内のクラックを表現するために、ジョイント要素という仮想的な要素を考えることにより、不連続性を考慮した有限要素解析法を提案している。この、Goodman らの提案したジョイント要素は、杭とフーチングとの境界面を表現する場合にも、適用可能であると考えられる。よって、本研究では、Goodman のジョイント要素を杭頭結合部に適用し、杭頭結合部に発生する不連続性を表現することとする。Goodman のジョイント要素を図-2に示す。ジョイント要素は、I, J, K, L, の4節点から構成される要素で初期

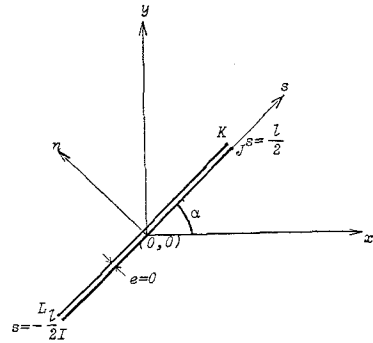


図-2 Goodman のジョイント要素

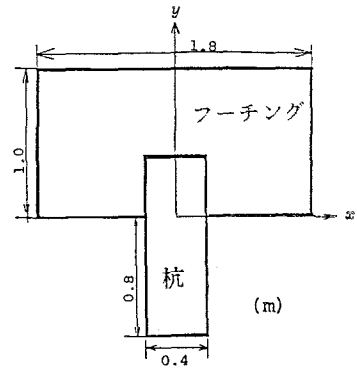


図-3 杭頭結合部の断面

表-1 モデルの寸法

モデル	ジョイント要素の有無	粘着力C (Mpa)	内部摩擦角 ϕ (°)	軸力 (MN/m/m)
A-11	有	0.0	0	0.0
A-12	有	0.0	0	0.6
A-21	有	0.2	30	0.0
A-22	有	0.2	30	0.6
A-31	有	1.0	30	0.0
A-32	有	1.0	30	0.6
B-21	無	—	—	0.0
B-22	無	—	—	0.6

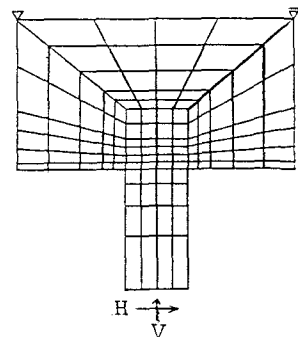


図-4 有限要素モデル

状態において、面 I-J と、面 K-L とは、密着しているものとする。接触面の状態は、面 I-J 及び、面 K-L の相対的位置関係で表される。杭頭結合部の断面を図-3に、有限要素モデルを図-4に示す。表-1はモデルの条件である。このモデルは、既存の杭頭結合部のモデル実験の、2次元平面歪場での再現を試みたもので、本来はフーチングを下にして杭が上向きに埋め込まれているが、ここでは、自重を考えないので、図-3のようにモデル化する。杭はコンクリート杭を想定し、杭径0.4m、杭のフーチングからの張り出し長さ0.8mとし、杭のフーチング内への埋め込み量は、杭径に等しく0.4mとした。これは、現行の設計の方法Aに相当する。フーチングは厚さ1.0m、幅1.8mとし無筋の場合を想定した。境界条件は、フーチングの左右の上辺を単純支持としている（図-4参照）。ジョイント要素は杭とフーチングとの接触面に配置する。この際、杭頂部のジョイント要素は、通常、アンカー鉄筋を張り出して補強されているので、この部分のジョイント要素は、線形挙動をするものとした。コンクリート杭及びフーチングコンクリートのヤング率をそれぞれ、40000Mpa、20000Mpa、ポアソン比を0.17とした。ジョイント要素の剛性は、要素の性質上できるだけ大きな値を用いる必要があるが、解の収束等の関係から以下のようにして決定した。すなわち、ジョイント要素の剛性 k_s 、 k_n はジョイント要素無しの場合と、ジョイント要素有りである場合の解とを比較し、両者の差が十分に小さくなるような値とした。その結果、 $k_s=110000\text{Mpa}/\text{m}$ 、 $k_n=600000\text{Mpa}/\text{m}$ を採用したこの場合ジョイント要素無しの場合の線形解との誤差は、最大で約6%である。ジョイント要素に与える構成関係は、文献5)にならい、引っ張り強度をもたないものとし、かつ滑動に関してはMohr-Coulombの降伏条件に従うものとした。内部摩擦角 ϕ は 30° 、粘着力 C は、0.0Mpa、0.2Mpa、1.0Mpaの3通りを考えた。荷重は杭の下辺に載荷し、軸力は、0.0MN/mのもの、0.6MN/mのもの、2通りを考え、それぞれについて水平方向の荷重を、右向きに0.36MN/m載荷した。

3. 解析結果とその考察

解析結果の一部を図-5～図-8に示す。

図-5にA-21モデル及びB-21モデルの杭頭結合部周辺の主応力図を示す。両者を比較すると、B-21モデルの応力の流れは連続的になっており、A-21モデルの応力の流れは不連続的になっていることが確認できる。すなわち、A-21モデルの主応力図では剥離現象の発生によって、杭の剥離面側に大きな引っ張り応力がほぼ杭軸と平行な方向に生じ、フーチングの剥離面側の主応力は、ほとんど無視できるほど小さなものとなり、剥離面において応力の流れが、断ち切られた状態になっていることがよみとられ、一方、同じ部分に関して、B-21モデルの主応力図をみると、杭内の引っ張り応力は生じているが、A-21モデルで発生している引っ張り応力ほど大きくはなく、応力の流れも、杭からフーチングへと連続的になっていることがよみとれる。また、A-21モデルでの杭上面のフーチングコンクリート内の応力が、B-21モデルに比べてかなり大きくなっており、B-21モデルの杭左側面下方で伝達されていた引っ張り応力が、杭の上面から伝達されるように、支持機構が変化したことがよみとれる。これは、施工において、杭上部に鉄筋補強することの妥当性が示唆されていると言えよう。

図-6には図-7、図-8における応力照査断面を、図-7にはジョイント要素の剥離・滑動の状況を、図-8にはジョイント面近傍のフーチング内応力を示す。

図-7の剥離・滑動の状況からは、軸力によってある程度、剥離現象の発生を抑えることができることが確認できる。また、A-11、A-12、A-21、A-22モデルについては、軸力によって剥離現象の発生は抑えられているが、滑動現象の発生は抑えられてはいない。すなわち、軸力は剥離現象の発生を抑えるのには効果的であるが、その作用方向から考えても、滑動現象の発生を抑える効果は期待できないと解釈される。

次に、図-8のジョイント面近傍のフーチング内応力について考察する。

軸力0の場合、剥離現象の発生によって、 $a'-a'$ 断面での σ_x は、上部に大きな引っ張り応力が発生し、

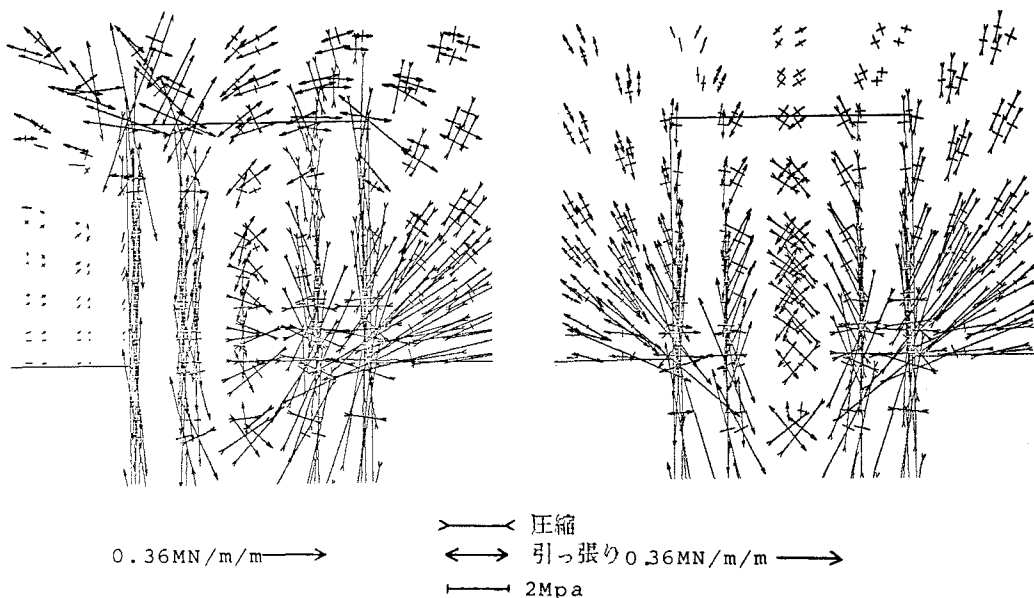


図-5-a A-21モデル (ジョイント要素有り)

図-5-b B-21モデル (ジョイント要素無し)

図-5 主応力図

他の部分ではほとんど0に近い値となっており、a - a 断面の σ_x は、やや大きな値となっていることが、3モデルを通して確認できる。また、b - b 断面の σ_y についても、剝離現象の発生によって、杭左上面に大きな引張り応力が発生していることが、3モデルを通して確認できる。せん断力 τ_{xy} は、a' - a' 断面においては、剝離現象の発生によって、3モデルとも、ほとんど0に近い値となっている。a - a 断面の τ_{xy} は、A-11モデルでは、滑りに全く抵抗しないので、小さな値となっている。

一方、A-31モデルでは、線形解のようにフーチング下面近傍での、急激な増加はみられず、なだらかな分布となっている。これは下部で杭のフーチングへの巻き込み現象が発生していることに起因すると考えられる。この巻き込み現象の効果はA-31モデルの、a - a 断面の σ_x についても発生すると思われるが、今回解析したモデルでは杭の張り出し長が小さく、曲げの影響が少ないため、巻き込みの効果が顕著に現れなかったと考えられる。これらのことから、剝離・滑動現象の発生によって、支持機構が、杭左上部と杭右側面に移るとことが考えられる。

次に、軸力0.6MN /mを載荷した場合について考察する。

軸力の載荷によって軸力0の場合に発生していた、a' - a' 断面の上部における σ_x と、b - b 断面左部における σ_y の、大きな引張り応力が、かなり小さなものとなっているのが確認できる。このことは、軸力の作用によって、杭

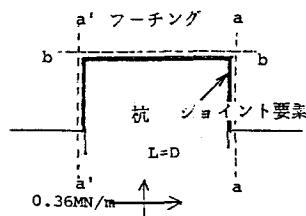


図-6 応力照査断面

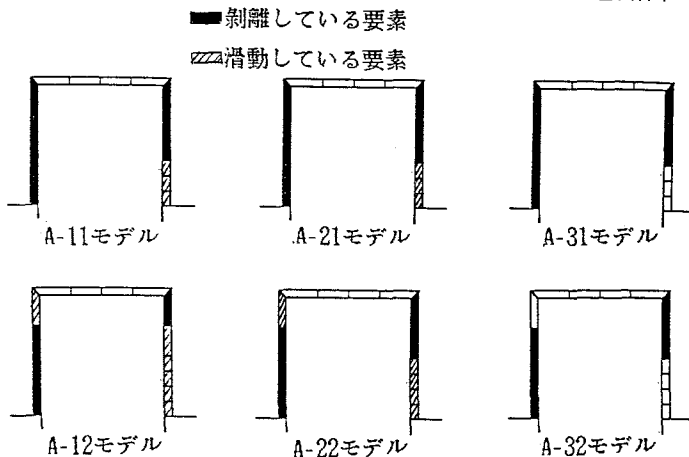


図-7 剝離・滑動の状況

----- ジョイント要素無し
 ———— ジョイント要素有り

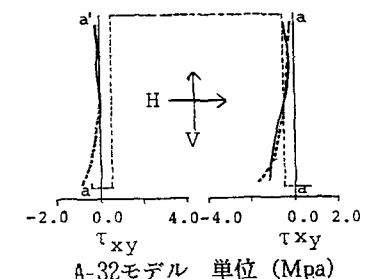
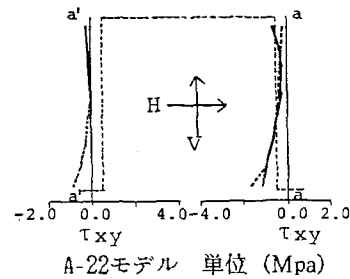
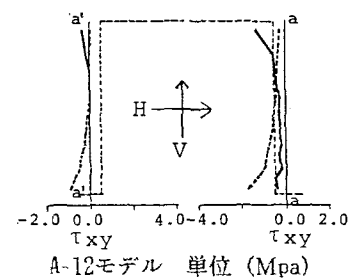
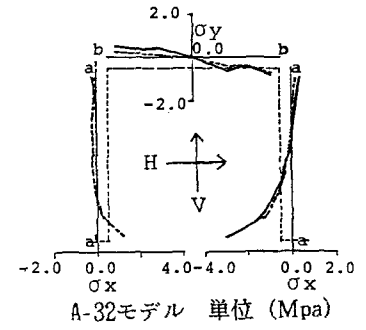
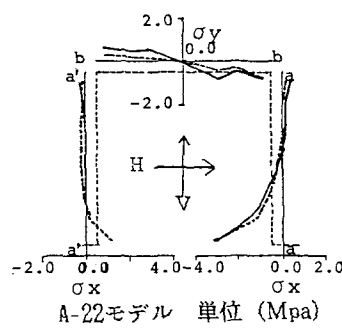
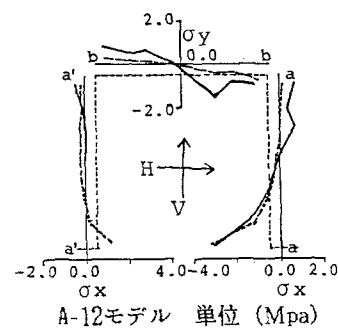
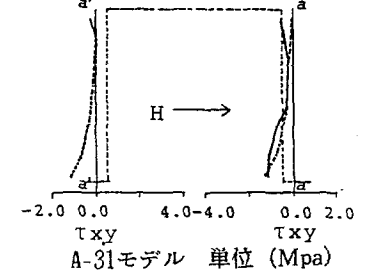
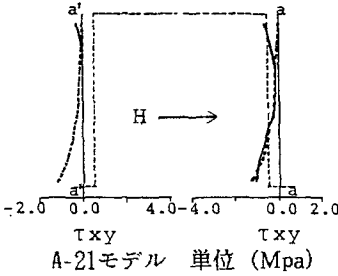
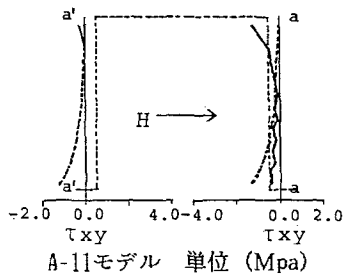
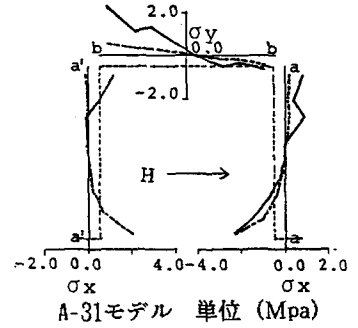
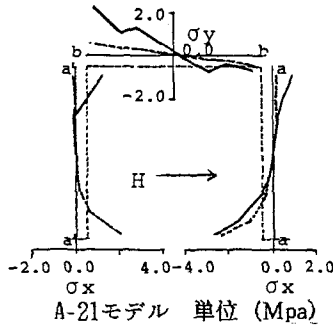
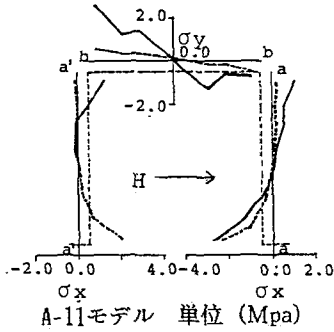


図-8 ジョイント面近傍のフーチング内応力

周面での剝離現象が抑制されたことが原因と考えられる。せん断力 τ_{xy} の分布傾向は、軸力0の場合と比較してほとんど変化がみられない。このことから、軸力の載荷がせん断力 τ_{xy} の分布に与える効果は、ほとんど無いと考えられる。

これらの解析結果は、杭頭結合部における応力照査が、作用している軸力、水平力の複合的效果を考慮したものである必要性を示唆していると考えられる。現行の道路橋示方書に規定されている応力照査式は、軸力の効果と、水平力及びモーメントの効果を個別に考えており、今回の解析結果を考慮すれば、より合理的な応力照査への改善の余地があると言えそうである。しかしながら、杭周面の摩擦係数等の物性値データが不足しており、これらの正確な把握が今後の重要な課題の一つとなろう。

4. まとめ

本研究では、杭頭結合部における杭、フーチング間の剝離、滑動現象を表現するために、Goodman のジョイント要素の導入を試みた。解析結果は、剝離、滑動現象の発生による応力の流れの変化や荷重—変位応答の傾向をうまく表現していると考えられる。厳密な意味では、杭頭結合部は3次元的な解析を行う必要があるが、本報告における2次元歪場での解析は、地中壁構造や鋼管矢板における上部工との結合部に対しては十分適用可能であろう。今後はさらに実際のものに近づけるために、鉄筋による補強、3次元解析との比較などを通じて検討していく必要があると思われる。現在、3次元解析及び、Fourier 級数を用いた3次元解析⁹⁾を並行して進めており、これらと合わせて応力伝達機構に及ぼす、杭—フーチング間の摩擦の効果を検討中である。

最後に、本報告で示した数値計算例は、金沢大学計算機センター設置のFACOM M-170Fで行ったこと、および、本報告の一部は文部省科学研究費（昭和60年度、奨励研究（A））の補助によることを付記する。また解析に使用したプログラムは既存の文献 7) , 8) にあるものを改良したものである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：「道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編）・同解説」，丸善，1984
- 2) 榎並 昭他：「鋼管杭頭部の支圧及び付着に関する研究（その5）」，日本建築学会大会学術講演梗概集，2756, pp.2021～2022, 1978
- 3) R.E.Goodman 原著，赤井浩一他訳：「不連続性岩盤の地質工学」，森北出版，1984
- 4) 日本道路協会：「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」，丸善，1984
- 5) 土岐憲三他：「強震時における地盤と構造物の間の剝離と滑動」，土木学会論文報告集，第302号，1980他
- 6) 近田康夫，小堀為雄：「剝離・滑動を考慮した杭頭結合部の有限要素解析」，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集Ⅰ-18，pp.35～36，1985
- 7) E.Hinton, D.R.J.Owen：「FINITE ELEMENTS IN PLASTICITY THEORY AND PRACTICE」，pp.157-269，PINERIGE PRESS，1980
- 8) 小堀為雄，吉田博：「有限要素法による構造解析プログラム」，pp.218～220，251～257，丸善，1980

(1985年10月18日受付)