

## 論文 柱と杭をコンクリート充填鋼管とした接合部の実験的研究

鷹野秀明\*1 石橋 忠良\*2 鎌田則夫\*3 木下雅敬\*4

要旨：径の異なるコンクリート充填鋼管柱の接合において、径の大きな鋼管内に小径の鋼管を所定長さ差し込みその隙間にコンクリートを充填する差込接合構造について、実験によりその耐荷機構・耐荷力について検討した。実験により接合部耐力は、差込長・外側鋼管の強度にほぼ比例して増加することなどが明らかになった。また、接合部の耐荷力の推定法を提案した。

キーワード：鋼管コンクリート、接合、耐荷力

## 1. はじめに

コンクリート充填鋼管は、高い耐震性を保有する構造として注目され、土木分野においても、柱や杭構造に用いることが近年増加している。一方、都市内において高架構造を構築するとき、狭隘で限られたスペースでの施工を余儀なくされることより、地中梁を省略し杭と柱構造を直接接続した1杭1柱構造の採用を検討することも多くある[1]。このような構造の柱及び杭構造にコンクリート充填鋼管を用いる場合、径の異なるコンクリート充填鋼管柱を接合することが必要になる。この時、径の大きな鋼管内に小径の鋼管を所定長さ差し込みその隙間にコンクリートを充填することにて荷重伝達を行なう差込接合方法が考えられる[2][3]。しかし、このような接合形式の耐荷機構・耐荷力や挙動については必ずしも明らかではないため、今回実験を行い検討することとした。

## 2. 実験概要

## 2. 1 試験体

図-1に示すような接合部を有する片持梁の柱頭に水平力を加力し接合部の耐荷力等を調査した。試験体のパラメータ及び諸元をまとめたものを表-1に示す。A-1からB-2試験体については、鋼管に通常の平鋼管を用いており、A-1からA-4試験体が差し込み長さを変化させたもの、B-1、B-2が杭の鋼管肉厚を実験パラメータとして変化した実験である。これらの実験では、柱部材に

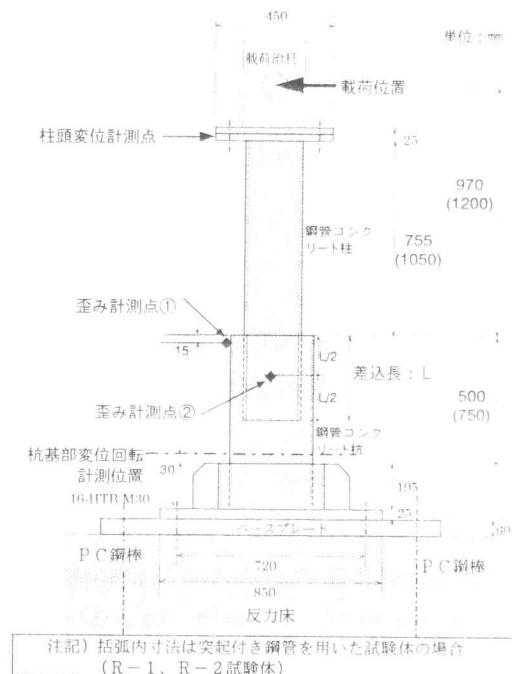


図-1 実験の概要

- \*1 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 工事管理室、(正会員)
- \*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター、工博(正会員)
- \*3 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター、(正会員)
- \*4 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター、Ph.D.(正会員)

は厚肉の鋼管を用いることにより柱の曲げ破壊が接合部の破壊に先行して発生することを避けるよう配慮している。R-1、R-2試験体では鋼管柱には外側に突起のついた鋼管を用い、鋼管杭には内側に突起のついた鋼管を用いた試験体で、鋼管とコンクリート間の摩擦力の伝達を向上させたものである。

表-1 試験体の諸元 (太線枠は実験におけるパラメータ)

| 試験体 | 鋼管柱 (内鋼管)                |                           |                             | 鋼管杭 (外鋼管)                |                           |                             | 使用鋼管<br>種別 | 試験当日<br>コンクリート強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 差込長L(mm)<br>(L/D <sub>1</sub> ) | 変化パラメータ |
|-----|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------|------------------------------------------|---------------------------------|---------|
|     | 径 D <sub>1</sub><br>(mm) | 肉厚 t <sub>1</sub><br>(mm) | 降伏点<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 径 D <sub>2</sub><br>(mm) | 肉厚 t <sub>2</sub><br>(mm) | 降伏点<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |            |                                          |                                 |         |
| A-1 | 216                      | 14.5                      | 442                         | 318                      | 6.24                      | 372                         | 平鋼管        | 35.0                                     | 108(0.5)                        | 差込長     |
| A-2 | 216                      | 14.5                      | 442                         | 318                      | 6.24                      | 372                         | 平鋼管        | 32.6                                     | 216(1.0)                        | 差込長     |
| A-3 | 216                      | 14.5                      | 442                         | 318                      | 6.24                      | 372                         | 平鋼管        | 33.6                                     | 324(1.5)                        | 標準ケース   |
| A-4 | 216                      | 14.5                      | 442                         | 318                      | 6.24                      | 372                         | 平鋼管        | 35.1                                     | 432(2.0)                        | 差込長     |
| B-1 | 216                      | 14.5                      | 442                         | 318                      | 3.00                      | 283                         | 平鋼管        | 27.4                                     | 324(1.5)                        | 杭肉厚     |
| B-2 | 216                      | 14.5                      | 442                         | 318                      | 8.92                      | 315                         | 平鋼管        | 28.6                                     | 324(1.5)                        | 杭肉厚     |
| R-1 | 406                      | 9.28                      | 342                         | 604                      | 9.38                      | 333                         | 突起付鋼管      | 34.9                                     | 400(1.0)                        | 突起付・差込長 |
| R-2 | 406                      | 9.28                      | 342                         | 604                      | 9.38                      | 333                         | 突起付鋼管      | 34.9                                     | 600(1.5)                        | 突起付・差込長 |

## 2. 2 載荷方法

載荷方法は、原則として片押しの単調載荷としているが、以下に定義する降伏荷重に相当する荷重を載荷した時点で、一旦除荷し、残留変位を確認した後、再載荷し終局に至らしめることとした。このような接合形式に於いては、外側に位置する鋼管杭上端の周方向歪みの増加が著しいことから[3]、本接合構造における降伏荷重の定義は以下のようにした。

鋼管杭の天端より 15mm 下方の断面に図-2 のように歪みゲージを貼り付ける。図-2 における3つの歪みゲージの周方向歪みが全て降伏歪みを越えた時点を降伏荷重と定義することとした。

## 2. 3 使用材料

コンクリート材料は、設計基準強度=27N/mm<sup>2</sup>、粗骨材最大寸法=10mm を使用し、鋼管材料は、鋼管杭(外鋼管)SKK400、鋼管柱(内鋼管)STK490 相当品を使用した。

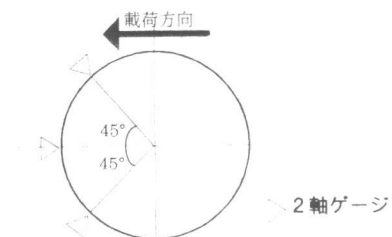


図-2 降伏荷重用歪みゲージの配置

## 3. 実験結果と考察

### 3. 1 破壊過程および性状

標準的な試験体である A-3 試験体についてその破壊過程を以下に記述する。図-3 に A-3 試験体の荷重と柱頭の変位の関係図を示す。荷重の増加とともに、鋼管杭上部圧縮側の周方向歪みが増加して降伏歪みに達した。

図-4 には、降伏荷重時の鋼管杭の表面の歪みの分布を主歪み図として表したものを示す。図より、鋼管杭上部圧縮側の周方向歪みが卓越するとともに、これら周方向応力が鋼管杭側面においてせん断応力（または斜め引張力）を介して接合部下

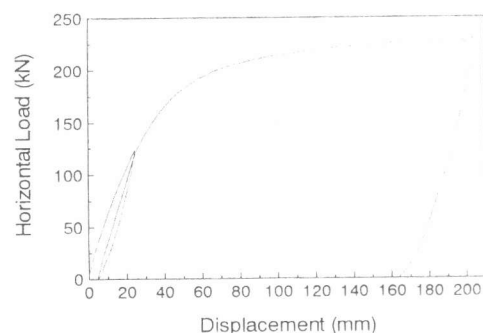


図-3 柱頭荷重～変位関係(A-3)

端において曲げモーメントに変換されるという、応力の流れが読み取れる。その時、鋼管柱と鋼管杭の間の円環状のコンクリート部には圧縮側に半径方向のひび割れが数本観察されている。

図-5に歪み計測点①(図-1参照)の荷重と周方向歪みの関係図を示すが、その後の荷重の増加とともに杭上端の周方向歪みの増加が急激になるとともに、円環状のコンクリート部分のひび割れも増加している。それに伴い荷重～変位関係も劣化傾向が顕著になっている(図-3参照)。また、それに対応して、接合部の鋼管杭側面のせん断歪みの増加が著しくなっている。図-6に歪み計測点②(図-1参照)における荷重とせん断歪みの関係を示す。このように、接合の損傷状況は、接合部の杭鋼管の降伏の進展によるものが支配的であるようである。本文ではこのような破壊形式を便宜的に接合部降伏破壊と呼ぶことにする。一方、接合部引張側では、柱の抜け出しが観察されるとともに、円環状のコンクリートが柱の抜け出しに伴って、若干抜け出しているのが観察されている。荷重～変位関係(図-3)は、変位が大きく進んだ状態でも荷重は増加傾向を示し、ジャッキストロークの限界である柱頭変位200mmの時点でも荷重の低下傾向は見られなかった。

A-2、B-1、B-2試験体でも、各部の損傷の程度に差はあるものの、破壊状況は上記の接合部降伏破壊であった。しかし、差込長さの長いA-4試験体は杭下端の曲げ破壊が先行しており鋼管の歪み状況などから明らかに杭の曲げ破壊により終局に至っている。また、A-1試験体では、柱の抜け出しが主な破壊要因であり、それにより荷重が低下している(柱抜け出し破壊と呼ぶ)。一方、突起付き鋼管を用いたR-2試験体では、平鋼管を用いた試験体のように柱部を特に強化していないため、杭鋼管天端位置の柱が曲げ降伏することにより終局に至っている。また、差込長さの短いR-1試験体でも接合部の鋼管杭の降伏破壊と柱の曲げ破壊が同時に進行しており、どちらの破壊が先行したかは明確には判断し難い状況であり、柱耐力と接合部耐力が近接していたものと考えられる。

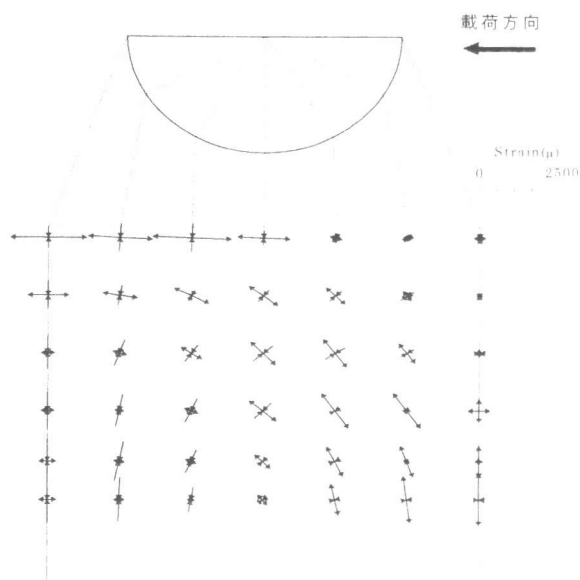


図-4 鋼管杭の主歪み分布図(A-3 試験体)

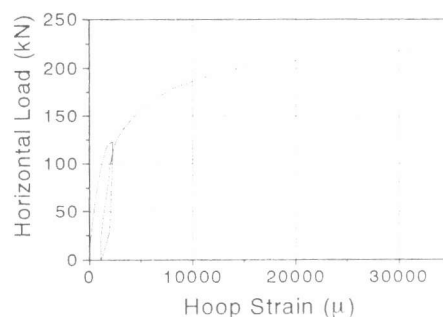


図-5 計測点①の荷重～周方向歪み関係

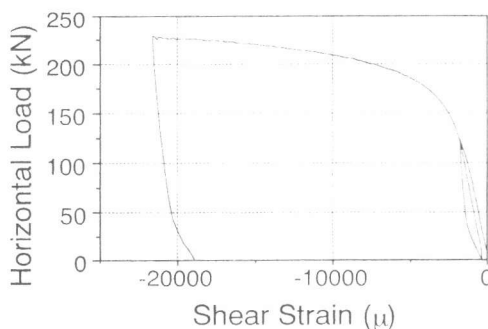


図-6 計測点②の荷重～せん断歪み関係

### 3.2 荷重～変形関係と終局強度及び降伏荷重

各試験体の荷重と柱頭の変位の関係を、図－7には差込長さを変化させた試験について比較したもの、図－8は鋼管肉厚を変化させたもの、図－9には突起付き鋼管を用いた試験について、それぞれ比較している。尚、ここで、図を見やすくするため、除荷～再載荷過程はグラフより除去している。

図中において記された○印は2.2において定義された降伏荷重を、また▽印は以下に定義する終局耐力を表している。図から分かるように、荷重～変位関係は明確な荷重ピークを示さず変位がかなり進んだ状態においても荷重が低下傾向を示さないものも多く、また荷重ピークが観察されるものも変位がかなり進んだ状態であることから、これを終局耐力とすることは設計上適当で無いように思われる。そこで、今回終局耐力を荷重～変形関係の接線勾配がその初期剛性の5%にまで低下する点を便宜的に実験により得られた終局耐力と定義することにした。このようにして定義した終局状態の位置は、ほぼ荷重～変位関係が大きく曲がりきり、その後の荷重の増加割合がかなり少なくなった点になっており、終局耐力として採用するに妥当な点であるように思われる。

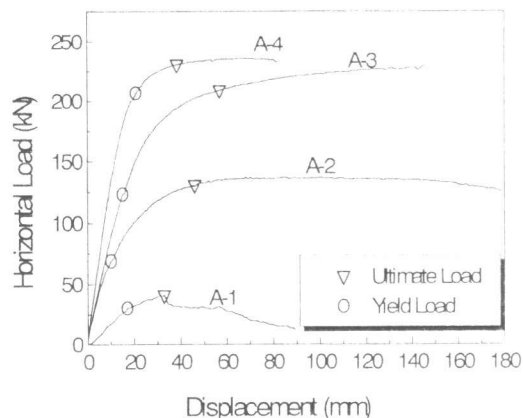
図－7～8より明かなように、差込長さが大きいほど、また鋼管杭の肉厚が厚いほど、降伏荷重及び終局強度が増加することがわかる。また、接合部の剛性も差込長及び鋼管肉厚に比例して増加すると言える。但し、A-4試験体及びR-2試験体は明かに杭又は柱の曲げ破壊により終局に達しているため、接合部の耐力を表すものではない。

### 4. 終局強度の推定モデルの検討

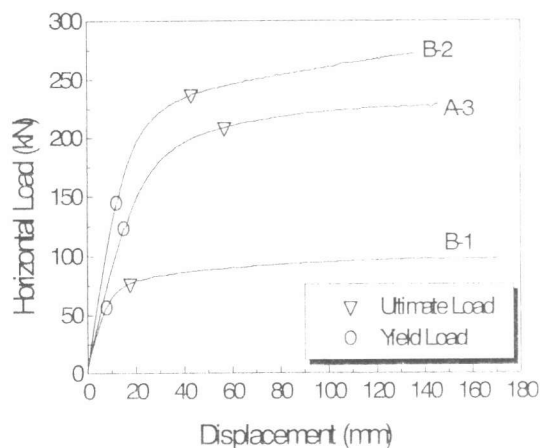
2.2にて検討した接合部の破壊状況より、接合部の耐荷機構は、支圧力の偶力と摩擦力の偶力により柱に作用する曲げ・せん断力に抵抗しているものと考えられる。そこで、図－10に示すような耐荷モデルを仮定して力の釣合により接合部の耐力を推定することを試みる。

#### 1) モーメントの釣合式

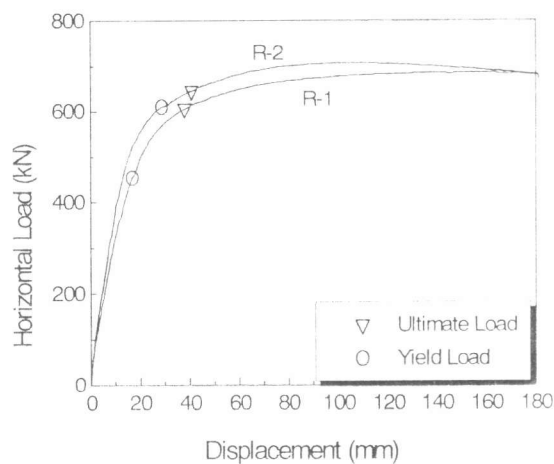
図－10に示されたモデルよりモーメントの釣り合いを取ると、



図－7 荷重～変位関係(差込長の影響)



図－8 荷重～変位関係(杭肉厚の影響)



図－9 突起付き鋼管を用いた試験体の荷重～変位関係

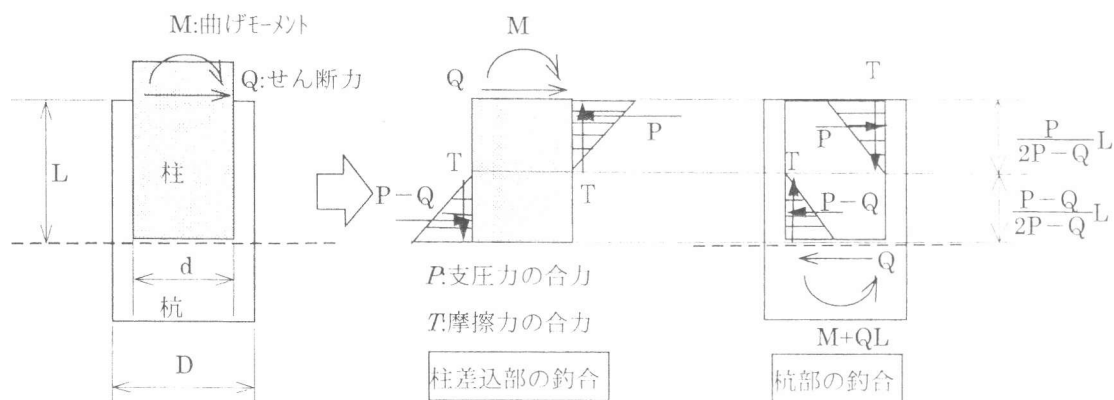


図-10 耐荷モデル

$$M - T \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right) d = - \frac{LP^2}{3(2P-Q)} + (P-Q) \frac{L(5P-2Q)}{3(2P-Q)} \quad (1)$$

但し、 $M = Q \cdot a$  ( $a$ : せん断スパン)

このとき、摩擦力は柱の引張側及び圧縮側に各々全周の  $1/4$  に均等に作用していると仮定している。

## 2) 終局時の摩擦力の合力 $T$

柱とコンクリートの間の摩擦応力  $\tau$  は、次式のクーロン摩擦に従うものとする。すなわち、

$$\tau_{\max} = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2)$$

ここで、 $c$  は粘着力、 $\sigma_n$  は界面に作用する直応力、 $\phi$  は摩擦角

とすると、摩擦力の合力  $T$  は次式で表される。

$$T = c \frac{\pi}{4} d L \frac{P-Q}{2P-Q} + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} (P-Q) \tan \phi \quad (3)$$

## 3) 支圧力の合力 $P$

柱に作用する支圧力は、鋼管の差込長さ  $L$  の区間のせん断パネル（外鋼管（鋼管杭）及び柱鋼管と杭鋼管の間に充填された円環状のコンクリートにより構成される）のせん断耐力により決定される。従って、

$$P = V_s + V_c \quad (4)$$

ここで、 $V_s$  は杭鋼管の負担するせん断力

$V_c$  はコンクリート部が負担するせん断力

まず、支圧偶力が作用する時の接合部の鋼管杭のパネルの終局耐力は、図-11に示す様に支圧力の偶力によりパネル部に  $2/3 L$  の幅の引張力のバンドが、支圧力の合力の作用点を結ぶ方向に形成され、この引張バンドが全降伏するとしてモデル化し水平方向の釣り合いを考えると、

$$V_s = f_y \cdot 2t \cdot \frac{D}{\sqrt{\left(\frac{2}{3}L\right)^2 + D^2}} \left(\frac{2}{3}L\right)^2 \quad \text{ここで、} D = \frac{\pi}{4} D \quad (5)$$

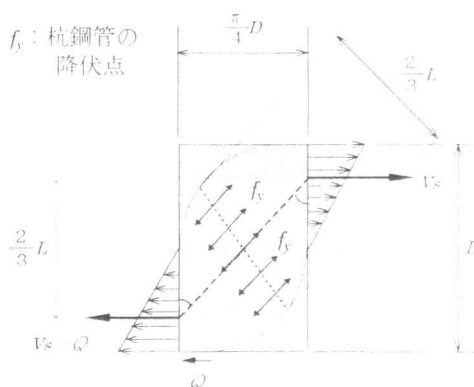


図-11 鋼管のせん断パネルの終局状態のモデル

一方、コンクリート部が負担するせん断耐力は、実験等よりコンクリートが鋼管から抜け出すことが観察されていることから、コンクリートと鋼管からの引き抜け抵抗により決定されるとし

て、近似的に下式で計算できるものとした。

このとき、既に2)で柱の引き抜け摩擦抵抗力として寄与しているものは差し引くこととしている。

$$V_c = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{D}{L} \left\{ \frac{\pi}{4} D \cdot [L - (D - d)/2] \cdot c - \frac{\pi}{4} d \frac{L}{2} c \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

釣合式(1)に(3)及び(4)を代入して、釣合式を解くことにより、接合部の終局耐力を求めることが出来る。

この様にして求めた計算耐力と、実験により求めた終局強度を比較したものを図-12から図-14に示す。耐力力の計算において、平鋼管の場合の摩擦力は既往の検討[3]より  $c = 0.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\phi = 20^\circ$  としている。また、突起付き鋼管を用いた場合の摩擦力は文献[4]の実験より  $c = 8.0 \text{ N/mm}^2$ ,  $\phi = 0$  として計算している。

図より、計算耐力は実験により得られた終局強度を、全般的にやや安全側ではあるが、ほぼ良い予測値を与えているといえる。

## 5. まとめ

今回の実験研究により得られた結果をまとめる。

(1) 接合部の破壊は、差込長さが極端に短い場合は、柱の抜け出しによるが、柱径程度以上差し込んだ場合は、接合部の鋼管杭の降伏の進展による。

(2) 接合部の耐力及び降伏荷重は、差込長さ及び鋼管杭の肉厚にほぼ比例して増加する。

(3) 支圧力の偶力と摩擦力の偶力による耐力機構を仮定した、接合部の耐力計算法を提案した。提案法は接合部耐力の良い予測値を与える。

## 参考文献

- [1] 小原・鎌田・森山：地中梁を無くした場合の高架橋の設計について、コンクリート工学年次論文報告集、pp.1219-1222、Vol.17, No.2, 1995
- [2] 飯田・青木・佐藤：コンクリート充填異径鋼管差し込み継ぎ手の耐力実験について、土木学会第49回年次学術講演会、I-365、pp.728-729、1994.9
- [3] 木下・沖本：異径コンクリート充填鋼管差し込み継ぎ手の実験及び解析について、土木学会第50回年次学術講演会、I-123、pp.246-245、1995.9
- [4] 岡野・大内・田中：リブ付き鋼管による重ね継ぎ手の応力伝達性能、第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp.185-190、1995.11

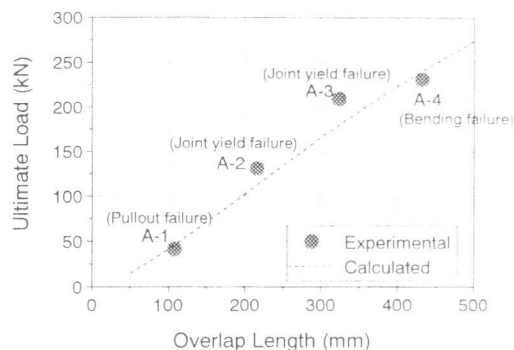


図-12 終局荷重の実験値及び計算耐力の比較(差込長の影響)

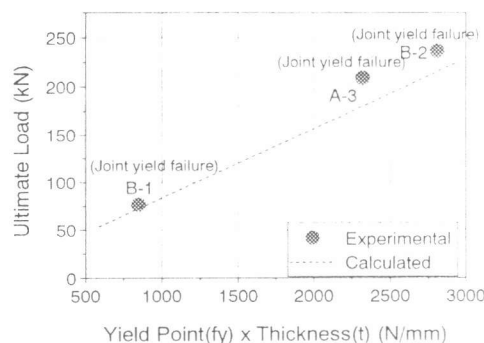


図-13 終局荷重の実験値及び計算耐力の比較((杭肉厚の影響))

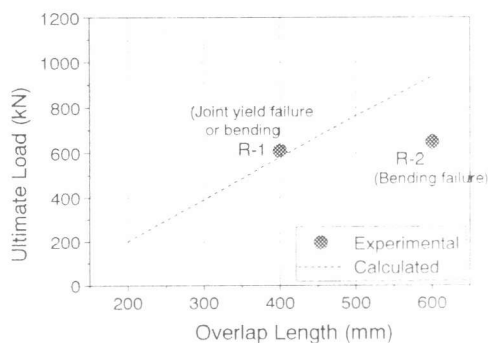


図-14 終局荷重の実験値及び計算耐力