

論文 鋼管補強した重ね継手部を有する部材の正負水平交番載荷試験

築嶋 大輔^{*1}・山内 俊幸^{*2}・野澤 伸一郎^{*3}

要旨：近年、都市部での RC ラーメン高架橋構築において、狭隘空間で制約の多い工事の施工性改善手段として地中梁を省略し、さらに柱と杭との接合部の構築においても掘削仮土留めを必要としない柱と杭との継手部を鋼管で補強した工法が採用されている。本論では、鋼管で補強された重ね継手部を模擬した試験体を用いた正負水平交番載荷試験結果を基に、継手性能に影響を与える要因の分析を行い、所要の耐力および変形性能を確保可能な接合部の仕様（コンクリート強度、重ね継手長さ、補強鋼管の径厚比）を示した。

キーワード：正負水平交番載荷試験, 重ね継手, 補強鋼管, 変形性能

1. はじめに

都市部での鉄道高架化工事は、工事が長期間に渡ることが多く、常に工期短縮が求められている。市街地での連続立体交差化事業で共通する最大の施工制約は、施工ヤードや工事用通路（資材運搬路、搬出入路等）の確保が困難なことである。この問題を軽減するため、地中梁の施工を省略することで、高架下の柱間を工事用通路に活用できるパイルベント形式の高架橋があるが、フーチング等の接合部を介して柱と杭を接合する構造では、接合部施工のための周辺掘削や仮土留めが必要となることが課題として残っていた。

そこで近年、柱と杭との接合部の補強に杭施工に用いた口元管を利用するなど、接合部の周辺掘削や仮土留を不要とする柱-杭接合構造が採用されている。

この構造は、従来の杭受け台のように接合部の断面を大きくすることで定着部分を確保する構造に対し、重ね継手形状となる柱の主鉄筋と杭の主鉄筋との継手部を鋼管で補強することで一体化するものである。

地中梁の無い高架橋の横断面図を図-1に、従来の杭受け台と補強鋼管による接合との比較イメージを図-2に、仮土留めを用いた従来工法および補強鋼管を用いた工法による実際の施工状況の違いを写真-1および写真-2に示す。

これまで、文献1)では鋼管で拘束された重ね継手の付着強度の算定手法を示し、文献2)では同種継手構造を有する部材のじん性率と重ね継手長さとの関係について、補強鋼管の厚さ（径厚比）毎に考察し、じん性率10程度が得られた条件（一定の径厚比、継手部コンクリート強度における必要な重ね継手長さ）を示している。本論では、文献2)の試験結果を基に、各種試験パラメーターが耐力やじん性能に与える影響を考

察した上で、鋼管補強された重ね継手部を有する部材が十分な耐力および変形性能を発揮できる重ね継手部の仕様を示す。

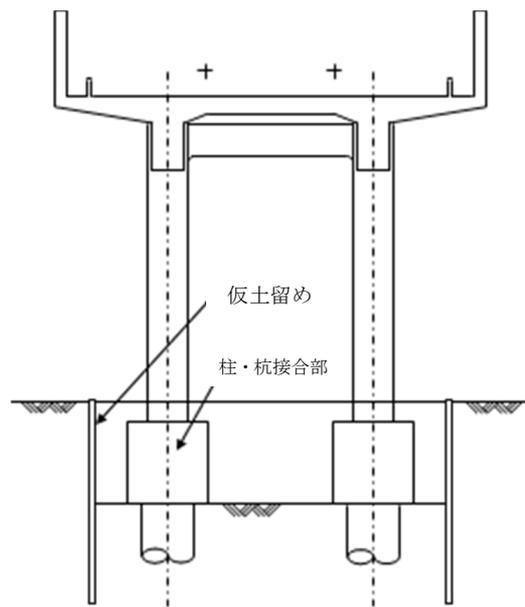


図-1 地中梁無し高架橋

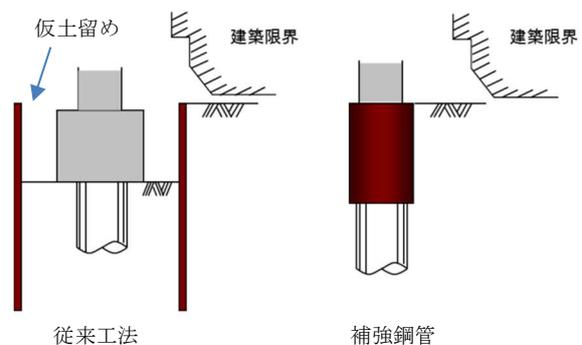


図-2 従来工法と補強鋼管による接合

*1 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター (正会員)

*2 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 博士(工学) (正会員)



写真-1 仮土留めを用いた従来工法
(仮土留めによる列車近接の掘削作業は夜間作業となる)



写真-2 補強鋼管を用いた工法
(仮土留めによる掘削作業は不要)

2. 試験概要

2.1 試験体概要

(1) 試験体形状

試験体形状を図-3に、試験体の諸元をまとめたものを表-1に示す。

試験体は全14体で、実構造物の1/3程度を想定し、柱断面は400×400mmとし、主鉄筋量、継手長さ、補強鋼管厚さ、継手部のコンクリート強度をパラメーターとしている。なお、試験体には反力床に固定するためのフーチングを設けている。

主鉄筋には、D16を16本(5×5)配置したものと24本(7×7)配置した2パターンとし、フーチングからの鉄筋も同様の配置とした(図-3のa-a断面参照)。

なお、試験体D6については、実際の杭の主鉄筋配置と同様にフーチングからの鉄筋を円周上に配置している。

主鉄筋の重ね継手長さは200,300,400mmの3パターンとし、補強鋼管の長さを重ね継手上下に20または30mm伸ばした長さとした。また、補強鋼管径は566mmとし、厚さを1.6,3.2,4.5,6.0mmの4パターンとした。

継手部のコンクリート強度は杭頭処理が省略可能かを確認することを目的とした低強度のものを含めて $3.7\text{N/mm}^2 \sim 53.9\text{N/mm}^2$ とした。

なお、荷重点から柱基部までの長さは1350mmで、補強鋼管と基礎フーチングの間には、継手部が基礎と接触して柱基部の曲げ耐力が増加することを避けるため、30mmの隙間を設けている。

(2) 材料強度

継手部のコンクリート強度については、表-1に示した通り($4.0 \sim 53.9\text{N/mm}^2$)である。

主鉄筋にはSD345を用い、降伏強度は 377N/mm^2 (試験体D1~D6)および 387N/mm^2 (試験体D7~D14)である。

(3) 荷重方法

柱基部の主鉄筋が降伏する時点の荷重点変位を降伏変位とし、以降は降伏変位の整数倍の変位を変位制御で正負1回ずつ繰り返し繰り返し荷重した。

なお、柱にはラーメン高架橋の常時軸圧縮応力を想定した一定軸力 313.6kN を荷重している。

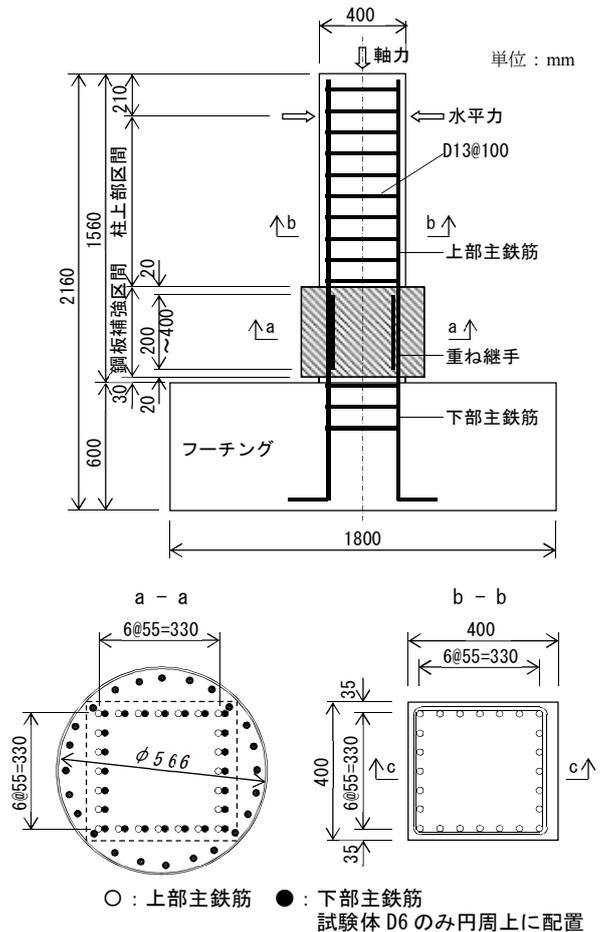


図-3 試験体形状

表-1 試験体の諸元および実験結果

| 試験体諸元 | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 試験体 No. | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 | D9 | D10 | D11 | D12 | D13 | D14 |
| 一般部の断面寸法 B×H(mm) | 400×400 | | | | | | | | | | | | | |
| 主鉄筋径 φ-本数 | D16 | | | | | | | | | | | | | |
| | 5×5 | | 7×7 | | 5×5 | | 7×7 | | | | | 5×5 | | |
| 鋼管厚さ t(mm) | 3.2 | 4.5 | 6.0 | 3.2 | | | | | | | 1.6 | 6.0 | 3.2 | |
| 鋼管長さ L(mm) | 340 | | | 240 | 340 | 440 | 260 | 360 | 460 | 360 | 460 | 360 | | |
| 重ね継手長さ l(mm) | 300 | | | 200 | 300 | 400 | 200 | 300 | 400 | 300 | 400 | 300 | | |
| l/φ | 18.8 | | | 12.5 | 18.8 | 25.0 | 12.5 | 18.8 | 25.0 | 18.8 | 25.0 | 18.8 | | |
| 重ね継手部コンクリートの 圧縮強度(N/mm ²) | 4.0 | 3.7 | 4.5 | 29.7 | 53.9 | 31.7 | 27.2 | 27.2 | 27.1 | 10.6 | 10.5 | 33.1 | 33.1 | 33.1 |
| 実験結果 | | | | | | | | | | | | | | |
| 最大荷重(kN) | 164 | 230 | 228 | 201 | 290 | 381 | 248 | 277 | 277 | 256 | 274 | 263 | 291 | 218 |
| 曲げ耐力[計算](kN・m) | 168 | 235 | 242 | 244 | 351 | 442 | 330 | 330 | 329 | 283 | 283 | 340 | 340 | 253 |
| 曲げ耐力[実験](kN・m) | 221 | 311 | 307 | 271 | 392 | 514 | 334 | 375 | 373 | 345 | 370 | 355 | 393 | 294 |
| 降伏変位 押し側 (mm) | 18.6 | 14.5 | 15.4 | 5.8 | 5.8 | 7.7 | 12.3 | 7.2 | 6.8 | 15.7 | 9.1 | 8.2 | 7.5 | 6.2 |
| 靱性率 押し側 | 1.0 | 2.0 | 2.3 | 6.0 | 15.1 | 11.6 | 2.5 | 10.4 | >14 | 2.6 | 10.0 | 6.2 | >14 | 17.4 |
| 降伏変位 引き側 (mm) | 29.7 | 21.4 | 19.9 | 4.9 | 6.2 | 6.0 | 16.0 | 9.2 | 7.2 | 16.6 | 8.7 | 10.5 | 7.9 | 6.5 |
| 靱性率 引き側 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 6.0 | 13.6 | 12.1 | 2.0 | 6.7 | >14 | 2.3 | 9.6 | 3.3 | >14 | 13.0 |
| 靱性率 平均 | 1.0 | 1.5 | 1.7 | 6.0 | 14.4 | 11.9 | 2.3 | 8.6 | >14 | 2.4 | 9.8 | 4.8 | >14 | 15.2 |

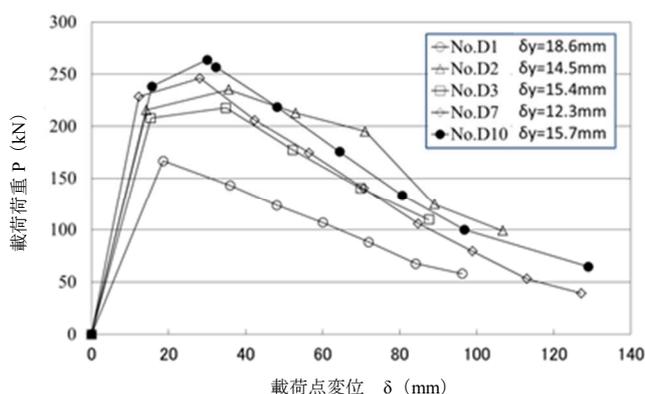


図-4 破壊パターンaの荷重変位包絡線

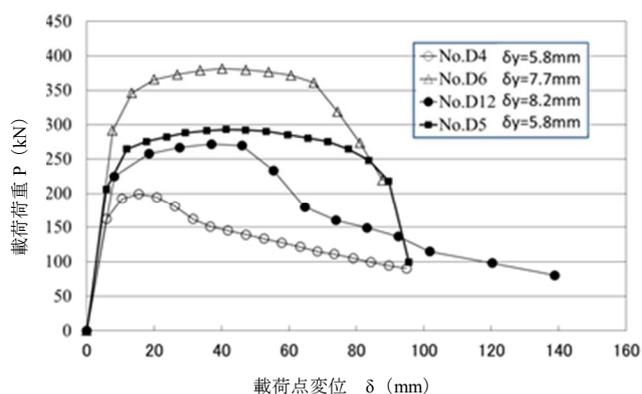


図-5 破壊パターンbの荷重変位包絡線

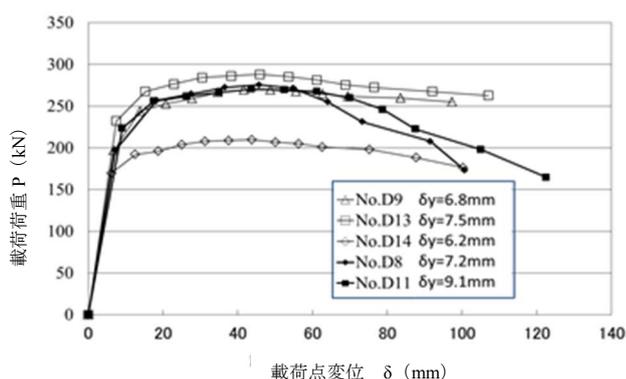


図-6 破壊パターンcの荷重変位包絡線

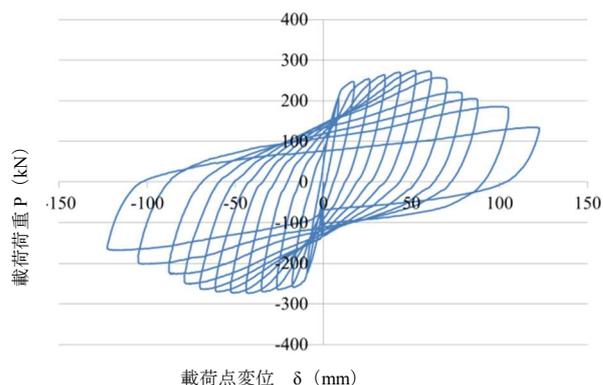


図-7 試験体D11の荷重変位曲線

3. 試験結果

3.1 破壊状況

破壊形態は耐力低下の過程から、以下の3つの破壊パターンに分類された。

- a 早期に耐力が低下し、破壊に至るもの。
- b 変位の増加に伴い、耐力低下するもの。
- c 変位が増加しても耐力低下がほとんどないもの。

上記の破壊パターン毎に荷重変位の包絡線をまとめたものを図-4、図-5、図-6に示す。

なお、包絡線は、押し側（負側） 載荷時のものである。

破壊パターン a の荷重変位の包絡線を示した図-4では、降伏変位が他の破壊パターンよりも大きくなっていることがわかる。主鉄筋が降伏する前に継手部の損傷が始まっているものと思われる。

また、破壊パターン b の荷重変位の包絡線を示した図-5からは、継手長さが 200mm（鉄筋径の 12.5 倍）と短い試験体 D4、および補強鋼管が 1.6mm（径厚比 354）と薄い試験体 D12 では、変位の増加に伴いある時点でやや急激に耐力が低下していることがわかる。

これは、継手長さが不十分であることや、鋼管が薄いために継手の拘束が十分ではなく、継手部に損傷を生じたためと思われる。

破壊パターン c の荷重変位の包絡線を示した図-6からは、変位が増加しても耐力がほとんど低下しないか、低下しても緩やかな低下となっていることがわかる。

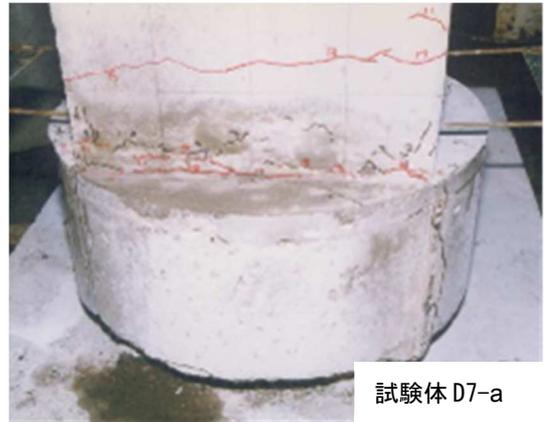
試験体 D11 の荷重変位曲線を図-7に示す。図-6および図-7から、試験体 D11 のように、継手部のコンクリート強度が 10.5N/mm^2 と小さくても十分な継手長さ（400mm、鉄筋径の 25 倍）と鋼管による拘束効果があれば付着の劣化が生じた場合でも、その進展は緩やかとなることがわかる。

次に、それぞれの破壊パターンを代表して、試験体 D7、試験体 D12、試験体 D13 について、試験終了後に補強鋼管を剥がした内部の状況を写真-3、荷重変位曲線を図-8、9、10に示す。

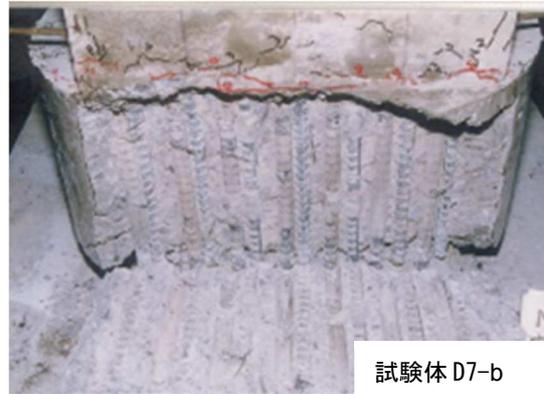
早期に耐力低下が生じる破壊パターン a で重ね継手長さが 200mm（鉄筋径の 12.5 倍）と短い試験体 D7 では、柱躯体角付近から部材軸方向に伸びる付着割裂によると思われるひび割れが確認された（試験体 D7-a 写真）。

このひび割れは、鉄筋配置面に沿って面状につながっており、試験体 D7-b 写真に示す通り簡単に剥がすことができた。図-8からは、他の破壊パターンに比べ降伏変位が大きく、 2δ 以降早期に荷重を維持することが出来ない状態になっていることがわかる。

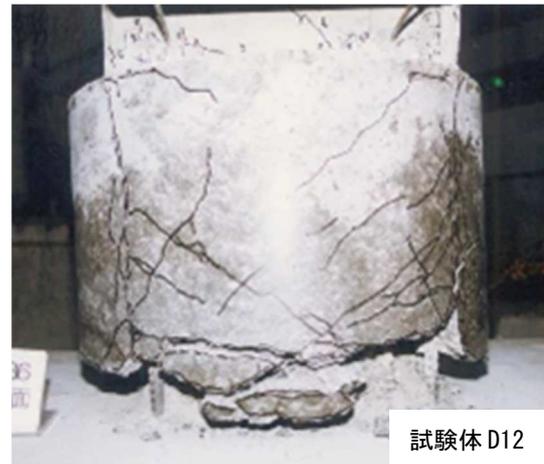
次に、変位増加に伴い継手部の損傷が進み耐力が低下する破壊パターン b で補強鋼管厚が 1.6mm（径厚比 354）



試験体 D7-a



試験体 D7-b



試験体 D12



試験体 D13

写真-3 補強鋼管内の損傷状況

と薄い試験体 D12 では、補強鋼管内の継手部コンクリートに斜めひび割れや主鉄筋の座屈による剥落など付着劣化以外の損傷も生じており、補強鋼管による拘束が十分ではなかったことがわかる。また、荷重途中で補強鋼管下端部のはらみ出しも生じていた。

図-9を見ると、押し側(負側) 5δ 以降荷重が急激に低下している。このタイミングで主鉄筋のはらみ出しにより補強鋼管下端がはらむように変形し、継手部のコンクリートが補強鋼管下端から崩れ出していた。

最後に、破壊パターン c で補強鋼管厚が 6.0mm (径厚比 94) と最も厚い試験体 D13 では、柱躯体角からの伸びる割裂ひび割れも上下に貫通しておらず、補強鋼管による拘束により継手部の損傷が小さく抑えられていたことがわかる。図-10を見ても、荷重低下はほとんどなく、荷重終了まで大きな方錐状の履歴曲線を描いており補強鋼管の拘束が十分に機能していたことがわかる。

3.2 曲げ耐力および変形性能

各試験体の曲げ耐力の計算値と実験値、およびじん性を表-1に示す。

曲げ耐力については、破壊パターン a の試験体を含め全ての試験体で実験値が計算値を上回る結果となった。なお、曲げ耐力は、下部主鉄筋が配置されているのみで、鋼管による補強の無い柱付け根部の RC 断面について算出している。

じん性率については、正負(押し側、引き側)のそれぞれの値および平均した値を示す。また、じん性率の数値の前に「>」を付けている試験体は、荷重装置の限界により以降の測定ができなかったことを意味している。

なお、じん性率とは、降伏以降の裁荷荷重が降伏荷重まで低下する時点の変位の降伏変位に対する比率である。

3.3 各パラメーターの違いによる影響

(1) 重ね継手長さ

継手長さのみを変化させた試験体 D7, D8, D9 の荷重変位の包絡線を図-11に示す。

継手長さが 200mm と短い試験体 D7 については、耐力がやや低い結果となった。これは他の試験体に比べ継手部の損傷が早期に発生したためと思われる。また、変形性能については、継手長さの増加に伴い向上していることがわかる。

(2) 補強鋼管厚さ

補強鋼管厚さのみを変化させた試験体 D12, D8, D13 の荷重変位の包絡線を図-12に示す。

鋼管厚の増加に伴い耐力および変形性能が向上することがわかる。これは、写真-3における試験体 13 のひび割れ状況からもわかる通り、鋼板の拘束効果により付着割裂ひび割れの開口が抑えられているためと思われる。

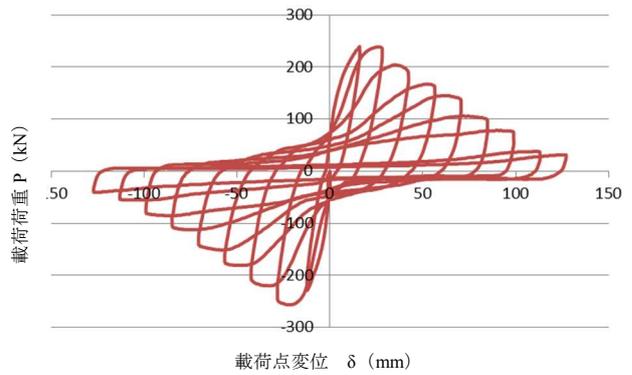


図-8 試験体 D 7 の荷重変位曲線

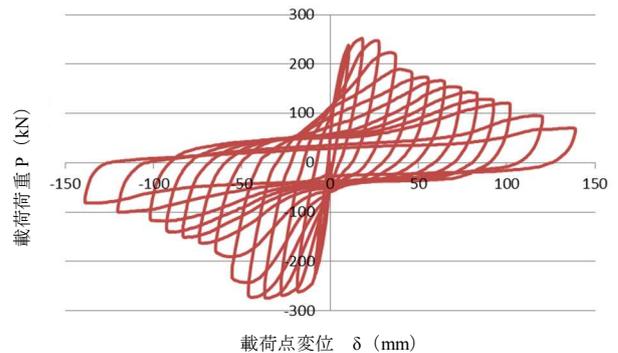


図-9 試験体 D 1 2 の荷重変位曲線

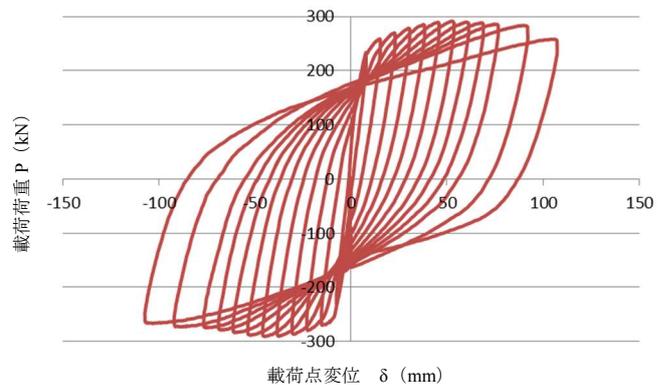


図-10 試験体 D 1 3 の荷重変位曲線

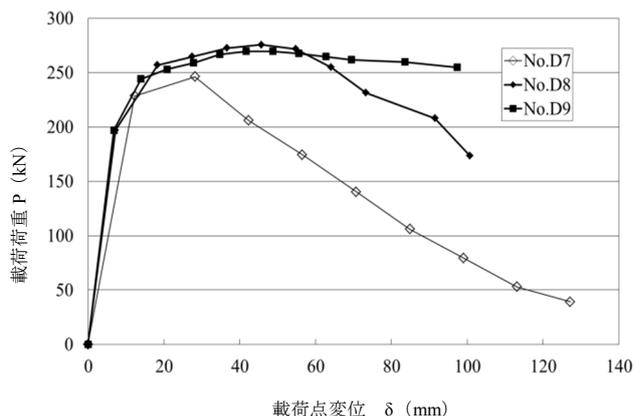


図-11 重ね継手長さの違い

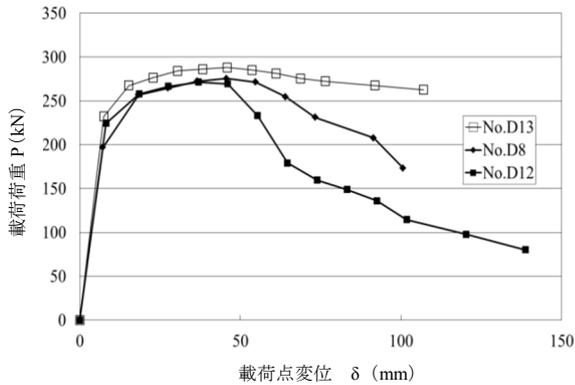


図-1 2 補強鋼管厚の違い

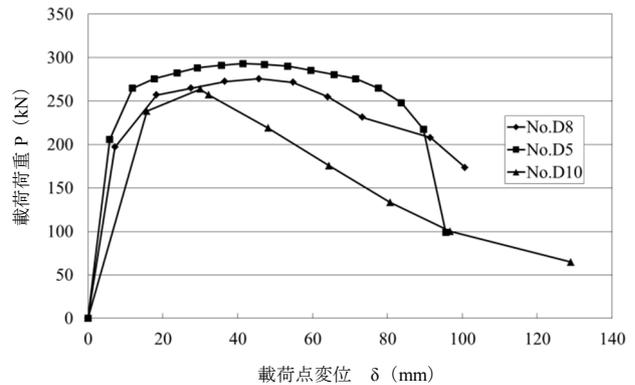


図-1 3 継手部コンクリート強度の違い

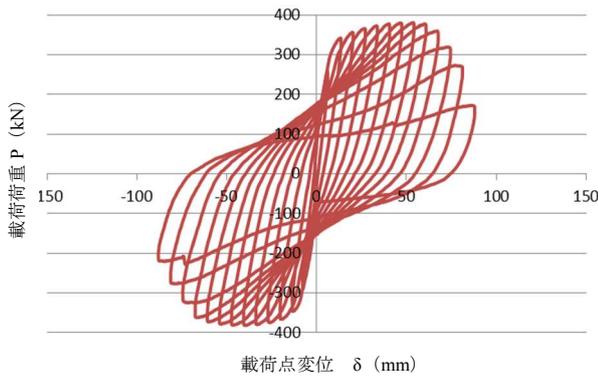


図-1 4 試験体D6の荷重変位曲線

(3) 継手部コンクリート強度

継手部のコンクリート強度のみを変化させた試験体 D5, D8, D10 の荷重変位の包絡線を図-1 3 に示す。

継手部コンクリート強度の増加に伴い、若干ではあるが最大荷重が増加した。変形性能についても、継手部コンクリート強度の増加に伴い、増加する傾向となった。

継手部コンクリート強度が 10.6N/mm^2 と小さい試験体 D10 については、降伏変位が大きく耐力低下も早期に発生していることから、早期に継手部の損傷が生じているものと思われる。同様に継手部コンクリート強度が小さいが 10 程度のじん性率が確保できた試験体 D11 に比べ、重ね継手長さが短いことが原因していると思われる。

(4) 下部主鉄筋の配置方法の違い

下部主鉄筋を杭主鉄筋と同様に円周上に配置した試験体 D9 の荷重変位曲線を図-1 2 に示す。下部主鉄筋の配置方法以外は試験体 D9 とほぼ同じ仕様である。じん性率は 11.9 となり、十分な変形性能が得られた。

3.4 鋼管で補強された重ね継手仕様

鋼管で補強された重ね継手において、本実験から得られた結果の範囲内において、計算上の耐力および十分な変形性能が確保できた継手仕様を表-2 に示す。

なお、ここで十分な変形性能とは部材じん性率で 10 程度を有することとする。

表-2 本試験で所要の部材性能が確保できた継手仕様

| コンクリートの 圧縮強度 (N/mm^2) | 所要重ね継手長さ | 所要径厚比 D/t D: 鋼管内径, t: 鋼管厚さ |
|--|----------------|------------------------------------|
| 10.5 以上 | 主鉄筋径の 25 倍以上 | 179 以下 |
| 33.1 未満 | | |
| 33.1 以上 | 主鉄筋径の 18.8 倍以上 | 179 以下 |

4. まとめ

鋼管補強した重ね継手を有する RC 部材に関して、本試験の範囲内において得られた知見を以下に示す。

- (1) 重ね継手長さ ($12.5\phi \sim 25\phi$) が長くなるに伴い、変形性能は向上する。
- (2) 補強鋼管厚 ($1.6 \sim 6.0\text{mm}$) の増加に伴い、耐力および変形性能が向上し、補強鋼管厚が不足している場合は、変位増加の過程で鋼管の拘束効果が低下し耐力を保持することはできない。
- (3) 継手部コンクリート強度 ($3.7 \sim 53.9\text{N/mm}^2$) が高くなるに伴い、耐力および変形性能が向上する。
- (4) 継手部コンクリート強度が小さい場合においても表-2 の仕様を満足することにより所要の耐力および変形性能を確保することができる。
- (5) 表-2 の仕様を満足し、下部主鉄筋を杭と同様に円周上に配置した試験体も十分な変形性能を得ることができた。

参考文献

- 1) 大屋戸理明, 山内俊幸, 野澤伸一郎: 重ね継手部分を円形断面の鋼管で補強した部材の交番載荷試験, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集, V-498, pp.996-997, 1998
- 2) 渡部太郎, 吉田忠司, 山内俊幸, 野澤伸一郎: 重ね継手部分を円形鋼管で補強した部材の交番載荷試験, 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集, V-256, pp.512-513, 1999