

(96) 繰り返し高圧縮応力を受ける全数ループ継手の性能評価

○住友建設(株) 技術研究所 正会員 小田切 隆 幸
 住友・川田・金下共同企業体 正会員 新井 英雄
 京都府 亀岡土木事務所 正会員 岸上 岩 樹
 日本大学 理工学部 正会員 山崎 淳

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋の主桁張出し(場所打ち)施工の省力化を図るため、従来の重ね継手とは異なるループ継手による鉄筋のプレハブ化を提案した。

モデルとしたラーメン橋では道路橋示方書(平成8年12月)により地震時に上下スラブにD25の主筋を配置することになるため、従来の重ね継手を用いると、その重ね合わせ長(625mm)、および位置のずらし長(625mm)の総和により継手長が1875mm(625+625×2)となり、プレハブ鉄筋設置後の接合作業が増大してプレハブ化のメリットが失われてしまう。そこで、現場における鉄筋接合作業を大幅に減じてプレハブ化率を向上する方法として主筋の全数ループ継手を提案し検討を行った。概念図を図-1に示す。主筋にループ継手を使用した場合、多くのプレキャスト床版の接合部では継手位置が一カ所に集中しており、重ね継手ではいわゆる全数継手に相当している。

今回の試験は、部材要素の一部の切り出しモデルを用いて、引張圧縮の繰り返し交番载荷による破壊試験を行い、ループ継手が従来方法の重ね継手と同等以上の耐力、および変形性能を持つことを確認することを目的とした。

2. 供試体

試験は下スラブを対象とし、鉄筋の継手方法、継手長、及び主筋の座屈防止を目的とした鉛直補強筋の本数をパラメーターとする5体の供試体で行った。試験水準の一覧を表-1に示す。試験供試体は、試験区間1900mm、端部の载荷装置との取り合い部750mm、1000mmの全長3650mmとした。供試体の側面図を

図-2に、供試体の断面図を図-3に示す。試験区間長は、道路橋示方書²⁾(以下道示)に従い求めた基準供試体(CASE-1)の継手部全長を基準に(625+625×2=1875mm)決定した。試験区間の断面寸法は、着目部の下スラブに合わせて、高さh=250mm、幅b=350mmとした。端部は、载荷装置との取り合いの都合上、700mm×700mmの正方形断面とした。使用した鉄筋は主筋がD25(SD345)、その外側の横方向筋がD16(SD345)である。横方向筋間隔は道示に従い、実構造物と同様に試験区間全体に供試体両側面まで直線配置とした。ループ内に配置した水平補強筋は4-D16(SD345)を、CASE-2供試体が400mm、CASE-3、4、5供試体が200mmの間隔で供試体両側面まで直線配置した。ループ外側に配置した鉛直補強筋(D10)は、スパイラル状に加工した鉄筋を使用した。補強量は、CASE-4供試体の有効鉄筋が5本、CASE-5供試体が3本である。

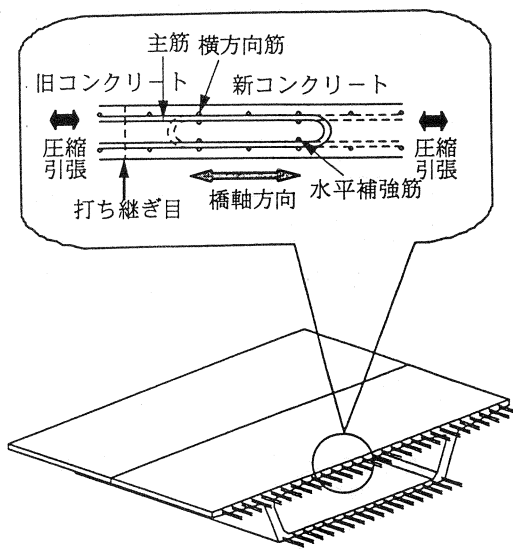


図-1 概念図

表-1 試験水準一覧

	継手方法	継手長 (mm)	備考
CASE-1	重ね継手	625	従来方法
CASE-2	ループ継手	600	
CASE-3	ループ継手	400	
CASE-4	ループ継手	400	鉛直補強筋5本
CASE-5	ループ継手	400	鉛直補強筋3本

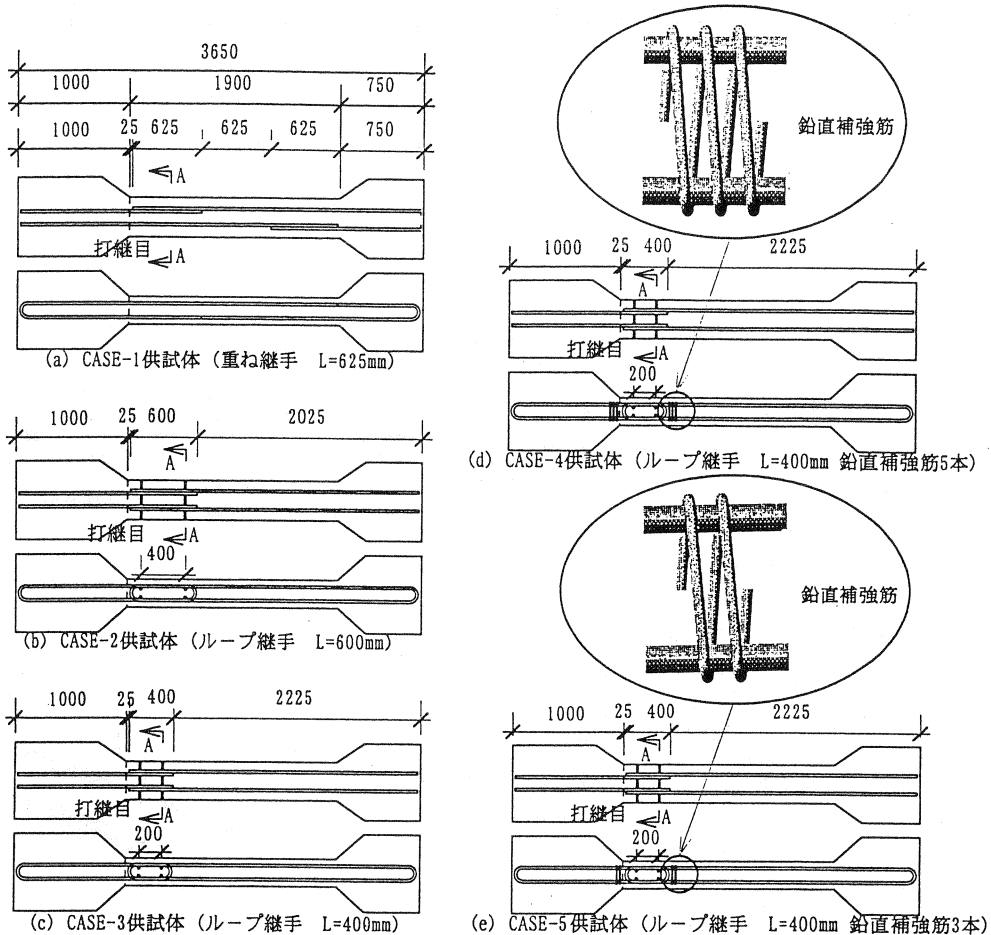
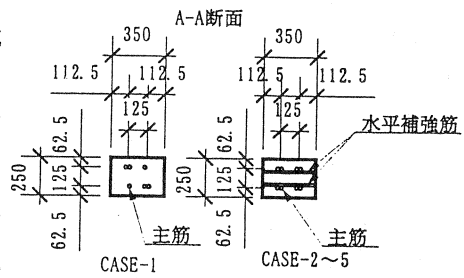


図-2 供試体側面図

3. ループ継手の性能

道示及び DIN1045におけるループ継手の規定と試験供試体の構造細目の比較を表-2に示す。

なお、道示にはループ継手の規定はないため、継手長さは重ね継手と半円形フック定着の継手長を、曲げ内直径はスターラップの曲げ内半径の規定を表記した。CASE-2、3、4供試体は、DIN1045のループ継手に対する曲げ内直径の規定を満足していない。また、CASE-3、4供試体は道示の継手長さの規定を満足していない。しかしながら今回の試験ではより省力化を目指して、ループの曲げ内直径については DIN1045におけるループ継手の曲げ内直径よりも小さい道示のスターラップの規定を用い、主鉄筋 D25に対して、 $2\phi \times 2=100\text{mm}$ (半径50mm)を採用した。ループ継手長は、比較のため2種類 ($L_u=400\text{mm}$ および $L_u=600\text{mm}$)とした。引張力作用時のループ面に対し直角方向の割裂に抵抗させるためのループ内に挿入する水平補強筋の断面積(F_e, q_{er})は DIN1045の式(1)を用



※全ての供試体で共通である
主筋外側の横方向筋は図示していない。

図-3 供試体断面図

表-2 試験供試体と各規定の構造細目

	試験 供試体	道路橋 示方書	DIN 1045
曲げ内直径 (mm)	100	100	175
継手長さ (mm)	400 600	567	263

い算出した³⁾。その結果、D25のループ継手に対しD16が4本となる。

$$F_e, \text{quer} = 1.5 \times (2L/5) \times (1/zul \cdot \sigma_e) \quad (1)$$

L : 主筋の降伏荷重 ($A_s \times \sigma_{sy}$)

$zul \cdot \sigma_e$: 水平補強筋の許容引張応力 (137N/mm^2)

4. 載荷方法

載荷は、軸方向に引張力と圧縮力を交互に与える正負交番繰り返し載荷を引張載荷から行った。載荷装置を図-4に示す。引張側の載荷は、主筋が材料試験より得られた降伏応力相当に達したときの試験区間長 (1900mm) の変位を基準変位 $1\delta y$ とし、その整数倍の変位に対して変位制御で行った。圧縮側の載荷は、想定したモデル橋に兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の地震入力波 (道路橋示方書のType2) を用いて行った非線形動的解析結果の最大応答値を基準にして一定の制御荷重 (-1533kN) で行った。

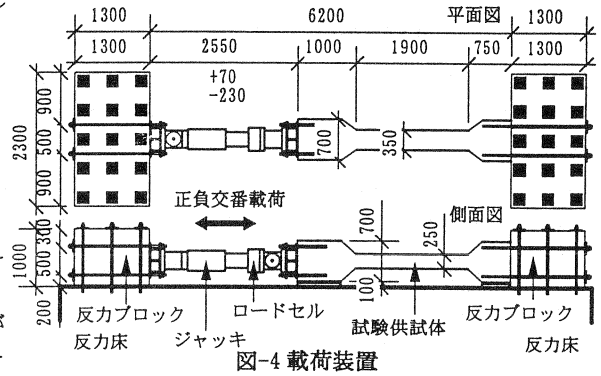


図-4 載荷装置

し、その整数倍の変位に対して変位制御で行った。圧縮側の載荷は、想定したモデル橋に兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の地震入力波 (道路橋示方書のType2) を用いて行った非線形動的解析結果の最大応答値を基準にして一定の制御荷重 (-1533kN) で行った。

5. 試験結果

5.1 変形状

各供試体の載荷荷重と変位量の関係を図-5~9に示す。全ての供試体において、 $1\delta y$ の引張載荷時に載荷鉛直方向のひび割れが試験区間全面に発生し、重ね合わせ長が400mmの供試体は $2\delta y$ 、その他の供試体は $3\delta y$ の引張載荷時に継手部において主筋方向の付着割裂と思われるひび割れが発生した。その後、CASE-1供試体は引張載荷の変位量 $\delta = 19.9\text{mm}$ ($5.7\delta y$) で主筋方向のひび割れが急激に進展し引張耐力が60%に低下した。しかし、その後も圧縮力は維持した。CASE-2供試体は、 $3\delta y$ の圧縮載荷時に主筋方向のひび割れが進展するが、 $5\delta y = 20.0\text{mm}$ まで引張側、及び圧縮側ともに耐荷力や変形性能の

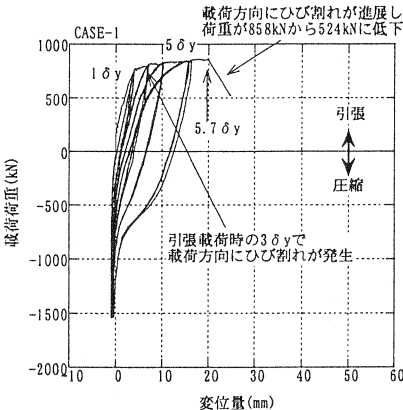


図-5 CASE-1 供試体 重ね継手 (L=625mm)

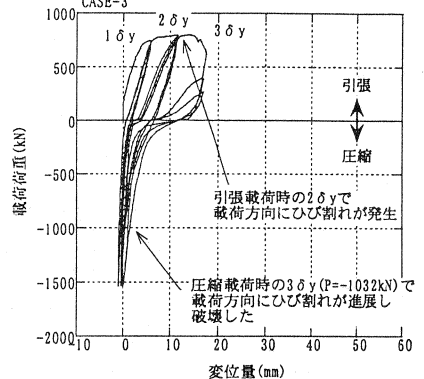


図-7 CASE-3 供試体 ループ継手 (L=400mm) 鉛直補強筋無

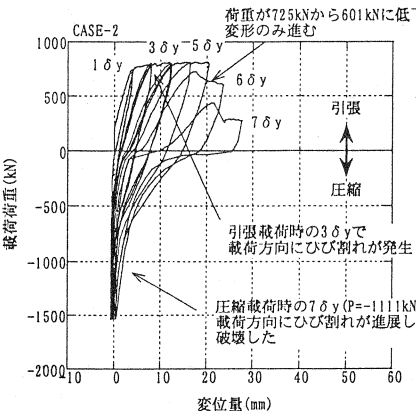


図-6 CASE-2 供試体 ループ継手 (L=600mm) 鉛直補強筋無

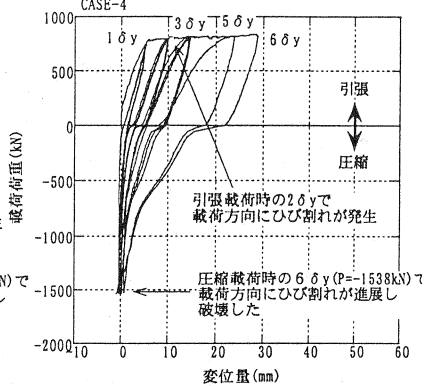


図-8 CASE-4 供試体 ループ継手 (L=400mm) 鉛直補強筋5本

低下はない。その後、 $6\delta y$ で引張剛性が低下し、 $7\delta y$ の圧縮載荷 $P=-1111\text{kN}$ で供試体側面の主筋方向のひび割れが進展し破壊に至った。CASE-3供試体は、 $3\delta y$ で引張剛性が低下し、圧縮載荷 $P=-1032\text{kN}$ で供試体側面の主筋方向のひび割れが進展し破壊に至った。CASE-4供試体は、 $3\delta y$ の圧縮載荷時に主筋方向のひび割れが進展するが、 $6\delta y=28.8\text{mm}$ まで引張側、及び圧縮側ともに耐力や変形性能に変化はない。その後、 $6\delta y$ の圧縮載荷 $P=-1538\text{kN}$ で供試体側面の主筋方向のひび割れが進展し破壊に至った。CASE-5供試体は、 $3\delta y$ の圧縮載荷時に主筋方向のひび割れが進展するが、 $5\delta y=20.0\text{mm}$ まで引張側、及び圧縮側ともに耐力や変形性能に変化はない。その後、 $6\delta y$ で引張剛性が低下し、圧縮載荷 $P=-909\text{kN}$ で供試体側面の主筋方向のひび割れが進展し破壊に至った。

5.2 破壊性状

各供試体のひび割れ進展状況を図-10~14 に、ループ継手供試体の破壊形態の概念図を図-15 に示す。全ての供試体において $1\delta y$ の引張載荷時に載荷鉛直方向のひび割れが供試体全面に発生した。その後、重ね継手を用いた CASE-1 供試体は、引張載荷時にそのひび割れ幅が増加するが、圧縮載荷時に於いて新たなひび割れの発生は確認できない。破壊は引張載荷時に於いて、主筋重ね合わせ部で主筋に沿ったひび割れが急激に進展する引張型の付着割裂破壊であった。

重ね合わせ長が 600mm のループ継手供試体(CASE-2 供試体)の場合、 $3\delta y$ の引張載荷時に載荷方向のひび割れがループ継手部において発生した。その後、 $3\delta y$ の圧縮載荷時に載荷方向のひび割れが進展し、 $6\delta y$

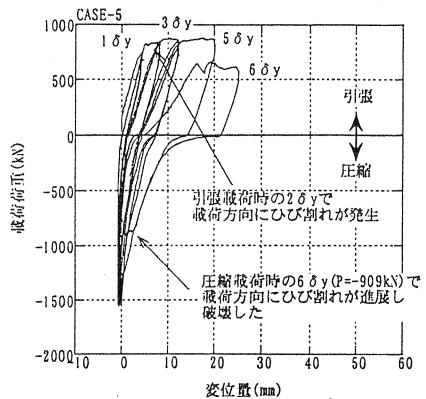


図-9 CASE-5 供試体 ループ継手
($L=400\text{mm}$) 鉛直補強筋3本

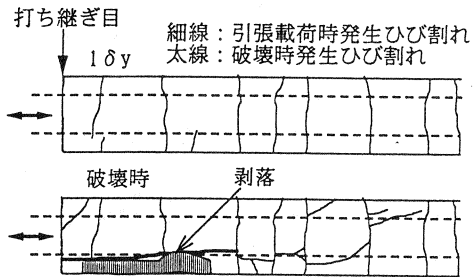


図-10 ひび割れ図 (CASE-1 供試体)

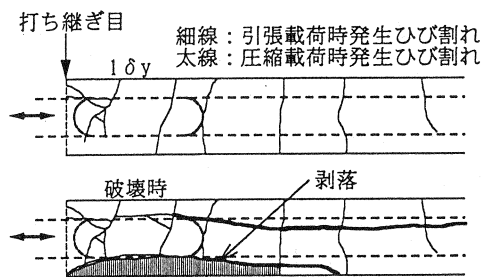


図-12 ひび割れ図 (CASE-3 供試体)

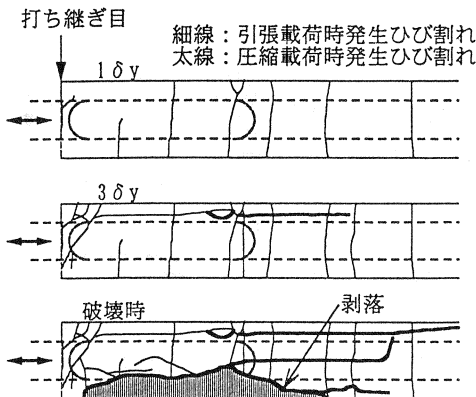


図-11 ひび割れ図 (CASE-2 供試体)

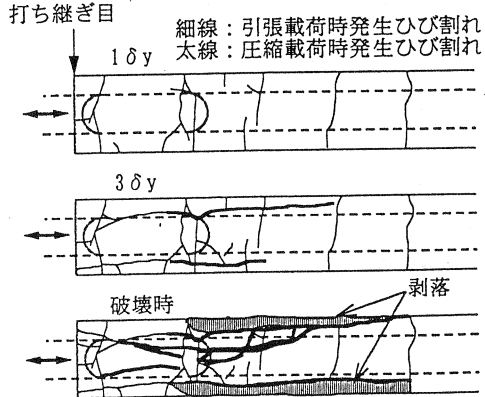


図-13 ひび割れ図 (CASE-4 供試体)

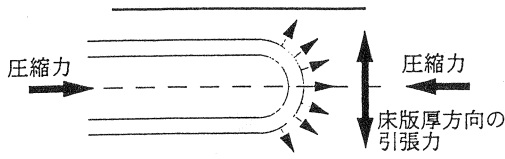


図-15 ループ継手供試体の破壊形態の仮説

の圧縮荷重時にループ継手先端部から主筋に沿って側面のひび割れが進展する圧縮型の割裂破壊であった。

重ね合わせ長が400mmのループ継手供試体 (CASE-3、4、5 供試体) の場合、 $2\delta y$ の引張荷重時に荷重方向のひび割れがループ継手において発生した。その後、 $3\delta y$ の圧縮荷重時に荷重方向のひび割れが進展し、CASE-3 供試体は $3\delta y$ の3cycle、CASE-4、5 供試体は $6\delta y$ の圧縮荷重時にループ継手先端部から主筋に沿って側面のひび割れが進展する圧縮型の割裂破壊であった。

以上の結果より、重ね合わせ長さの相違により引張荷重時における荷重方向のひび割れ発生時期が異なり、また、重ね継手を使用した供試体とループ継手を使用した供試体の破壊形態が異なることが確認された。鉛直補強筋の効果は、CASE-3 供試体が $3\delta y$ の圧縮荷重時で破壊に至っているのに対し、CASE-4、5 供試体は、その後も耐力の低下は観察されないことから $3\delta y$ 以降の領域が、鉛直補強筋による補強効果であると思われる。

また、ループ継手を用いた供試体の破壊メカニズムは、ループ継手から伝達された圧縮力が床版厚方向の引張力となり主筋外側のコンクリートを剥落させ、主筋が座屈して耐力を失ったと考えられる。

5.3 鉄筋の歪性状

全ての供試体において、ほぼ同様の歪性状であるため、代表として CASE-5 供試体の歪履歴を取り上げる。

5.3.1 主筋の歪性状

計算上の主筋降伏 ($\sigma_s=369\text{N/mm}^2$) 荷重 $P=748\text{kN}$ に達したときの引張歪は、 1700μ 程度であった。その後 $2\delta y$ 荷重時に降伏歪 (2005μ) に至っている。

ループ先端部の歪性状を、図-16に示す。局所的な歪履歴ではあるが、 $2\delta y$ 以降の圧縮荷重時に歪が増加している。これは、引張荷重時の主筋方向のひび割れ発生後、主筋とコンクリートの付着が劣化し、主筋の圧縮力負担が増加したのが原因であると思われる。その後、ひび割れの進行に伴い、さらに主筋の圧縮力負担が増加し降伏歪に至っている。すなわち、ループ継手を用いた場合、ひび割れの進展による主筋の付着劣化により主筋の圧縮力負担が増加し、座屈に伴い圧縮耐力が低下したと考えられる。

5.3.2 ループ内の水平補強筋の歪性状

荷重荷重と水平補強筋歪の関係の一例を図-17に示す。水平補強筋は、圧縮力荷重時に比べ引張荷重時の方が大きな歪

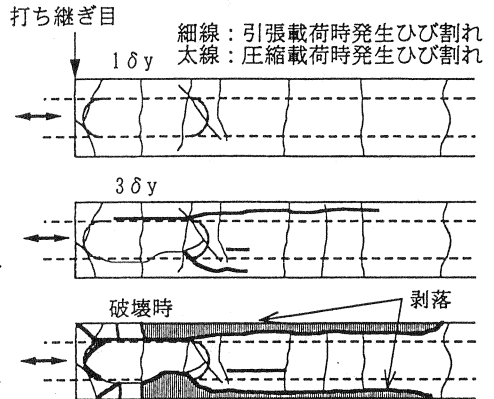


図-14 ひび割れ図 (CASE-5 供試体)

細線：引張荷重時発生ひび割れ
太線：圧縮荷重時発生ひび割れ

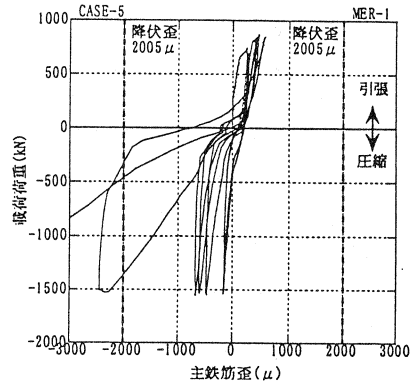


図-16 主筋の歪性状 (ループ先端部)

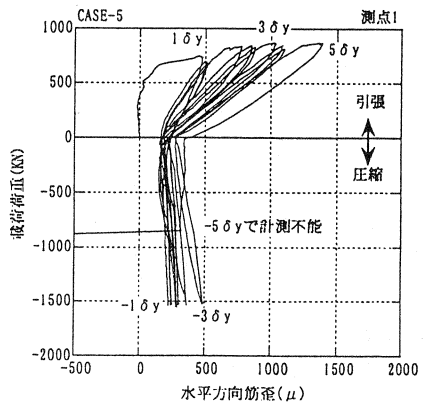


図-17 水平補強筋の歪性状

値を示している。これは、水平補強筋が主にループ継手の引張継手の補強筋としての機能の仕方を示唆していると思われる。また、計測された最大歪は1400 μ 程度であり降伏には至っていない。

5.3.3 鉛直補強筋の歪性状

載荷荷重と鉛直補強筋歪の関係の一例を図-18に示す。補強筋の歪は、破壊した $5\delta y$ の圧縮力荷重前は400 μ 程度である。その後、圧縮力荷重時に急激に増加し、計測不能となっている。すなわち、引張剛性が低下する以前では、補強筋の効果は計測した歪値には顕著に表れていない。しかし CASE-4、および CASE-5供試体は CASE-3供試体に比べ、明らかに $3\delta y$ 以降の変形状の改善が確認できる。(図-7、8、9参照)

5.4 変形性能の比較

各荷重階の1サイクル目の載荷における載荷荷重と引張変位量の関係の比較を図-19に示す。事前解析により求めた降伏荷重時(1 δy)における実測変位量は、ひび割れ性状等の違いにより3.9mm~5.6mmの間でばらつきがある。しかし、主筋の降伏荷重を下回った時点の変位量を終局変位量と定義するならば、従来継手の CASE-1供試体に比べ、CASE-4供試体は同等以上、CASE-2、および CASE-5供試体は、ほぼ同等の変形性能を有していた。CASE-3供試体は、 $3\delta y$ での耐力低下が著しく、従来継手よりも劣る結果となった。よって、実構造物の鉄筋(D25)継手にループ継手を用いた場合、600mmの継手長、もしくは鉛直補強筋(D10)3本以上を配置した400mmの継手長を適用すれば、従来の重ね継手と同等の変形性能を有することが確認された。

6. まとめ

部材要素の切り出しモデルを用いて、引張力と圧縮力を交互に与える正負交番繰返し載荷による破壊試験の範囲内で、以下の知見を得た。

1. 重ね継手の破壊は、引張荷重時において主筋の付着劣化が顕著になる引張型の付着割裂破壊であった。
2. ループ継手の破壊は、圧縮荷重時において主筋の付着劣化により圧縮力の負担が増加し、主筋の座屈に伴いかぶりコンクリートを押し出す圧縮型の割裂破壊であった。
3. 本試験の範囲内においてループ内の水平補強筋がループ継手の引張補強材として有効に機能していることが確認された。
4. ループの継手長さが $L=600\text{mm}$ あるいは鉛直補強筋を3本以上有し継手長さが $L=400\text{mm}$ の場合、従来継手と同等以上の耐力、および変形性能を有することが確認された。プレハブ鉄筋の実用化においては、どちらの方法とも、現場作業の省力化に資すると考えられる。

【参考文献】

- 1) 土木学会：鉄筋継手指針、コンクリートライブラリー第49号、昭和57年2月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、コンクリート橋編、平成8年12月
- 3) F・Leonhardt、E・Monnig：鉄筋コンクリートの配筋、鹿島出版会

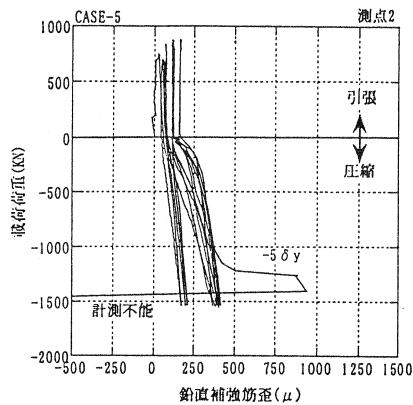


図-18 鉛直補強筋の歪性状

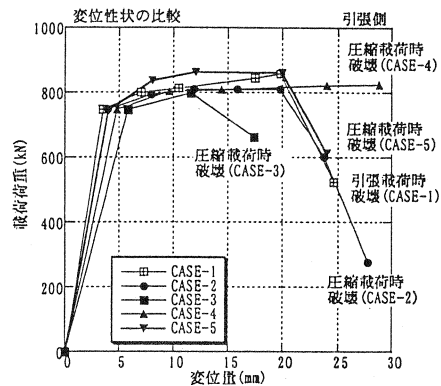


図-19 変形性能の比較