

論文 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

小田切 隆幸*¹・藤田 学*²・新井 英雄*³・山崎 淳*⁴

要旨：PC 橋の主桁張出し施工の省力化を図るため、主筋に全数ループ継手を使用する鉄筋のプレハブ化の検討を行った。一般にループ継手は、引張継手として用いられており、引張力作用下の研究例は数多く存在する。今回、地震時を想定して高圧縮応力を受ける継手部の挙動、継手性能の評価を行い、従来の重ね継手との比較検討を行うことを目的とし、引張圧縮の繰り返し交番载荷による破壊試験を行った。その結果、D25の場合、継手長さが L=600mm あるいは、L=400mm で鉛直補強筋を配置すれば、従来の重ね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。

キーワード：省力化、全数ループ継手、鉄筋のプレハブ化、耐震性能

1. はじめに

PC 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、プレハブ鉄筋吊り上げ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。

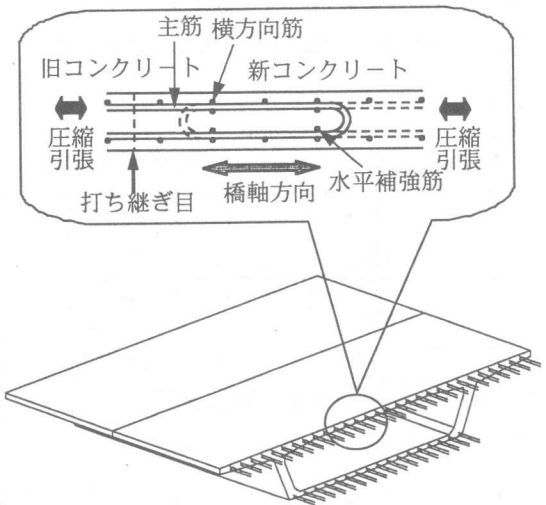


図-1 概念図

2. 供試体

試験は下スラブを対象とし、鉄筋の継手方法、

*1 住友建設(株) 技術研究所 工修(正会員)

*2 住友建設(株) 技術研究所 主任研究員 工修(正会員)

*3 住友建設(株) 大阪支店(正会員)

*4 日本大学教授 理工学部土木工学科 工博(正会員)

継手長、及び主筋の座屈防止を目的とした鉛直補強筋の有無をパラメーターとする4体の供試体で行った。試験水準の一覧を表-1に示す。

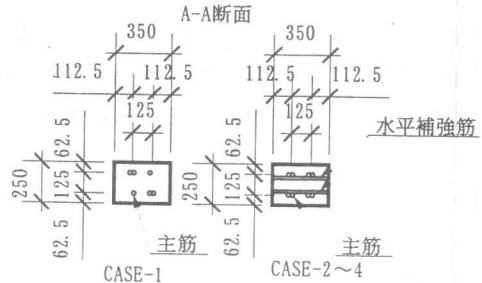
表-1 試験水準一覧

	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	鉛直補強有

供試体の断面図を図-2に、供試体の側面図を図-3に示す。供試体寸法は、試験区間1900mm、端部の荷重装置との取り付け部750mm、1000mmの全長3650mmとした。試験区間長は、基準供試体(CASE-1)の継手部全長(道路橋示方書・コンクリート橋編・4.4.5) ²⁾ を基準に決定した。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 $h=250\text{mm}$ 、幅 $b=350\text{mm}$ とした。端部は、荷重装置との取り付けの都合上、 $700\text{mm} \times 700\text{mm}$ の正方形断面とした。

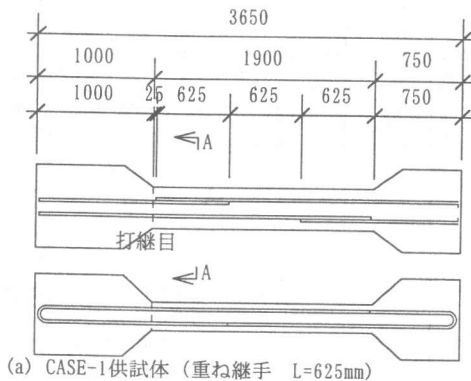
使用した鉄筋は主筋が D25 (SD345)、その外側の横方向筋が D16 (SD345) である。横方向筋

間隔は道路橋示方書 ²⁾ (以下道示) に従い、実構造物と同様に試験区間全体に両側面まで直線配置とした。ループ内の水平補強筋量は4-D16 (SD345) を、CASE-2供試体が400mm、CASE-3、4供試体が200mmの間隔で供試体側面まで直線配置した。CASE-4供試体の鉛直補強筋は、ループ外側にスパイラル状に加工した鉄筋を配置した。補強量は、有効鉄筋が5本である。

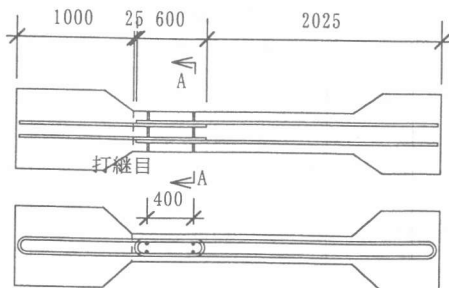


※全ての供試体で共通である
主筋外側の横方向筋は図示していない。

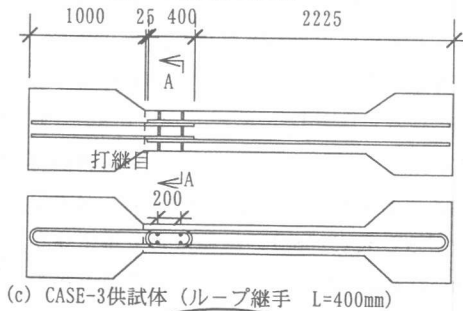
図-3 供試体断面図



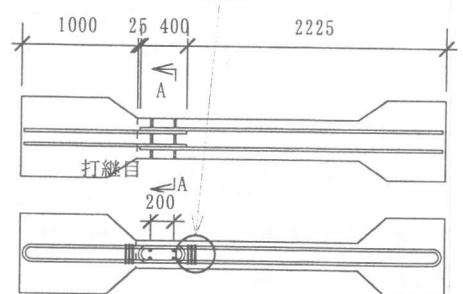
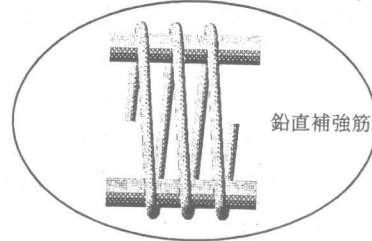
(a) CASE-1供試体 (重ね継手 L=625mm)



(b) CASE-2供試体 (ループ継手 L=600mm)



(c) CASE-3供試体 (ループ継手 L=400mm)



(d) CASE-4供試体 (ループ継手 L=400mm 鉛直補強有)

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。

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

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(Lu=400mm および Lu=600mm)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($F_{e, \text{quer}}$)は DIN1045の式(1)を用い算出した³⁾。その結果、D25のループ継手に対し D16が4本となる。

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

Z: 主筋の降伏荷重 ($A_s \times \sigma_{sy}$)

zul σ_e : 水平補強筋の許容引張応力 ($137\text{N}/\text{mm}^2$)

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。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を行った。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。載荷サイクルは、 $1 \sim 3\delta y$ までは各3回の繰り返し載荷を行い、その後は各1回の載荷を行った。

5. 試験結果

5.1 変形状状

各供試体の載荷荷重と変位量の関係を図-4~7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全面に発生し、 $2 \sim 3\delta y$ 時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。CASE-1供試体は、引張載荷の変位量 $\delta = 19.9\text{mm}$ ($6.3\delta y$)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力や変形性能の低下はない。その後 $6\delta y$ で引張耐力が減少し、 $7\delta y$ 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、 $3\delta y$ で引張耐力が減少し、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履歴曲線に変化はない。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。

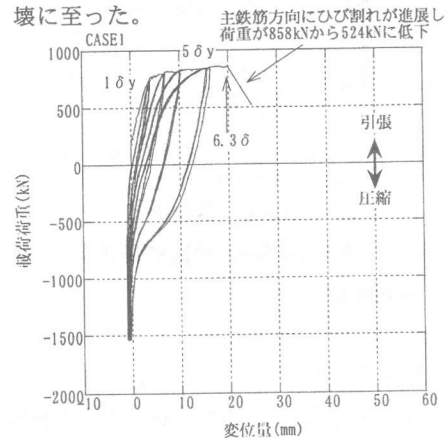


図-4 CASE-1供試体(重ね継手 L=625mm)

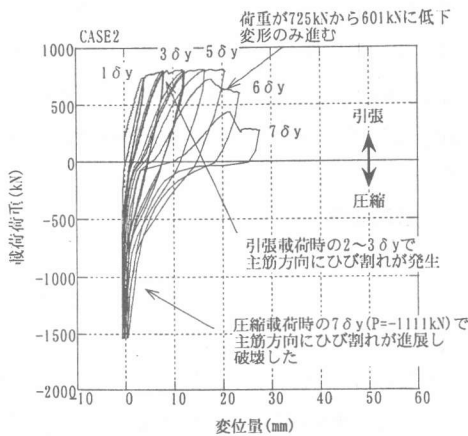


図-5 CASE-2供試体(ループ継手 L=600mm)

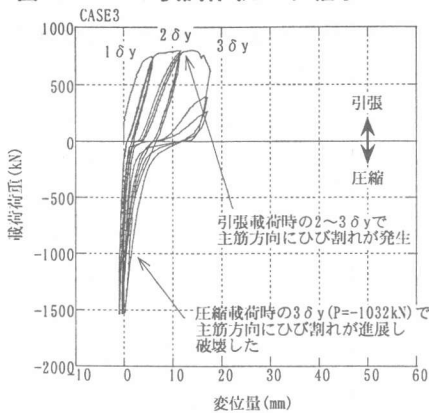


図-6 CASE-3供試体(ループ継手 L=400mm)

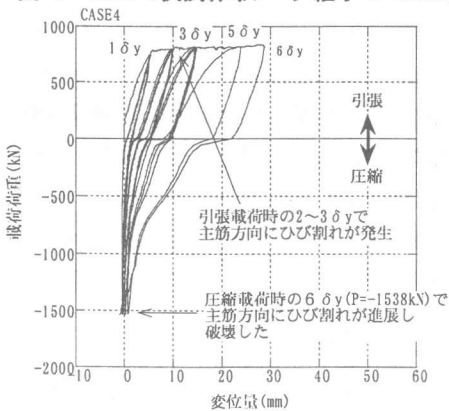


図-7 CASE-4供試体

(ループ継手 L=400mm 鉛直補強筋有)

5.2 破壊性状

重ね継手供試体の破壊時のひび割れ状況を図-8に、ループ継手供試体 (CASE-4) の破壊に至るひび割れの進展状況、及び破壊形態の概念図を図-9~10に示す。重ね継手の場合は、引張載

荷時に荷重鉛直方向ひび割れの発生後、主筋に沿ってひび割れが進展する引張型の付着割裂破壊であった。それに対してループ継手の場合は、引張荷重時に荷重鉛直方向ひび割れの発生後、ループ継手部において主筋方向のひび割れ (2~3δy) が発生し、その後、圧縮荷重時ににおいて、ループ継手先端部から荷重方向に側面のひび割れが伸び、破壊は主筋に沿ってひび割れが進展する圧縮型の割裂破壊であった。すなわち、継手部においてループ継手先端部において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たと考えられる。CASE-4供試体の破壊性状を写真-1に示す。

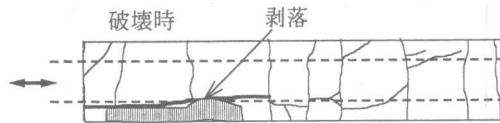


図-8 ひび割れ図 (重ね継手供試体)

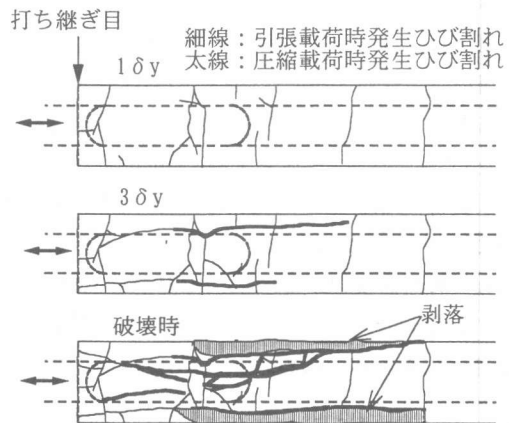


図-9 ひび割れ図 (ループ継手供試体)

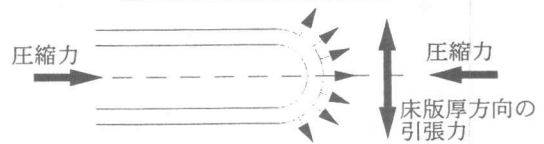


図-10ループ継手供試体の破壊形態の仮説概念

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-4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=748kN に達したときの引張歪は、1700 μ 程度であった。その後2 δy 載荷時に降伏歪(2005 μ)に至っている。

ループ先端部の歪性状を、図-11に示す。局所的な歪履歴ではあるが、2 δy 以降の圧縮載荷時に歪が増加している。これは、引張載荷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。

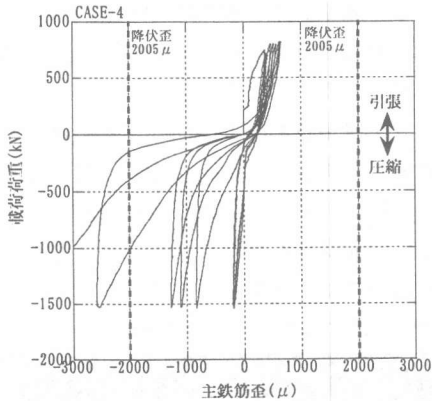


図-11 主筋の歪性状 (ループ先端部)

5. 3. 2 ループ内の水平補強筋の歪性状

載荷荷重と水平補強筋歪の関係の一例を図-12に示す。水平補強筋は、圧縮力載荷時に比べ引張載荷時の方が大きな歪値を示している。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1000 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-13に示す。補強筋の歪は、破壊した6 δy の圧縮力載荷前は300 μ 程度である。その後、圧縮力載荷時に急激に増加している。すなわち、破壊したサイクル以前では、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供試体は CASE-3供試体に比べ、明らかに3 δy 以降の変形性状の改善が確認できる。

(図-6, 7参照)

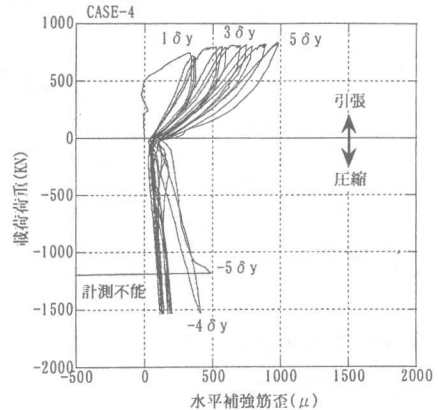


図-12 ループ内の水平補強筋の歪性状

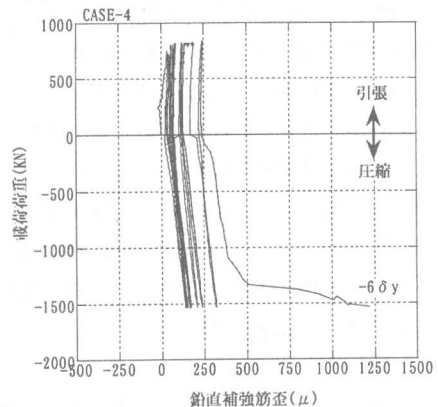


図-13 鉛直補強筋の歪性状

5. 4 エネルギー吸収能の比較

各供試体の累積吸収エネルギーの比較を図-14に示す。全ての供試体において、3 δy までの累積吸収エネルギーは同レベルである。CASE-3供試体と比較して CASE-4供試体においては、3 δy 以降が鉛直補強鉄筋の効果と考えられる。CASE-1及び CASE-2供試体の場合は、耐力が低下した変位までの、累積吸収エネルギーは約73kN \cdot mとなっており、本試験においては、破壊時までのエネルギー吸収性能が同等であるといえる。また、エネルギー吸収性能は、部材の終局状態を対象としており、設計の実用範囲内(1 δy 以前)においては大きな差はなく、問題になるレベルではないと思われる。

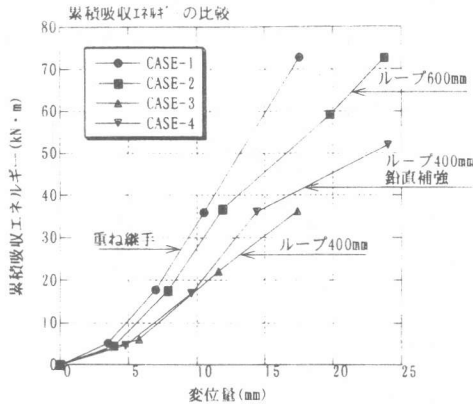


図-14 累積吸収エネルギーの比較

5.5 変形性能の比較

各荷重階の1サイクル目の荷重における荷重と引張変位量の関係の比較を図-15に示す。事前解析により求めた降伏荷重時 ($1\delta_y$) 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。

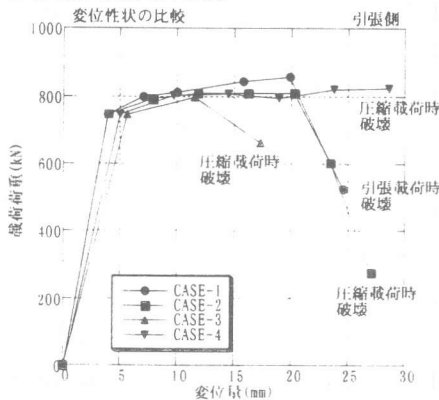


図-15 変位量の比較

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荷重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 $L=600\text{mm}$ の場合、破壊時までの累積吸収エネルギーが従来継手とほぼ同等である。
5. ループの継手長さが $L=600\text{mm}$ あるいは鉛直補強筋を有する $L=400\text{mm}$ 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。

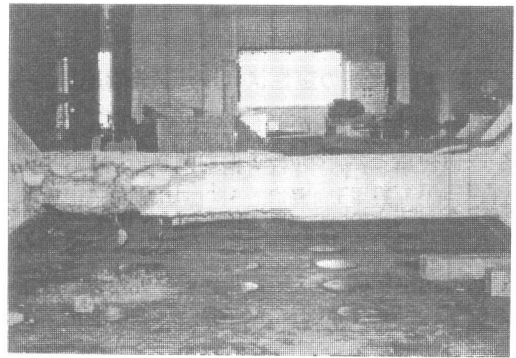


写真-1破壊性状(CASE-4 $L=400\text{mm}$ 鉛直補強有)

【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) P・Leonhardt, E・Monnig：鉄筋コンクリートの配筋、鹿島出版会