

2 段鉄筋を有する RC 橋脚の配筋合理化に関する実験的研究

Experimental study on bar-arrangement simplification of reinforced concrete pier with two steps of steel bar

玉置一清¹, 永元直樹², 三加崇¹, 春日昭夫²

Kazukiyo Tamaki, Naoki Nagamoto, Takashi Sanga, Akio Kasuga

¹正会員 三井住友建設(株) 技術研究所土木研究開発部 (〒329-0432 栃木県河内郡南川内町仁良川 1726)

²正会員 同上 PC 設計部, (〒164-0011 東京都中野区中央 1-38-1)

Validity to the improvement in ductility of the intermediate bar is known fact already. But, in the pier with multi steps of the reinforcing bar, it becomes complicated a reinforcing bar arrangement, the rationalization of construction is desired. In order to clarify the mechanism of improvement in ductility, we develops the new tool which separated the function to stop buckling and the function to strengthening for shear, and performed a verification by experiment. Consequently, we confirmed that the new tool, which combines two steps of steel bars mutually, contributes on a improvement in ductility. And, when separating the improvement in ductility and sear streghth, it is necessary to fully consider the fall of Vc by which it is accompanied on ductility.

Key Words: The pier has two steps of reinforcing bar arrangement, Substitution of a intermediate bar, Rationalization of construction

キーワード: 2 段配筋された橋脚, 中間拘束筋の代替, 施工の合理化

1. はじめに

橋脚に対する要求性能とは、第一に落橋に対する安全性を確保することであり、これを具体的な要求レベルで表すと、せん断破壊を生じないことと、じん性に富んだねばり強い橋脚とすることとなる。平成 8 年に改訂された道路橋示方書・V 耐震設計編(以下、道示 V)では、これらの要求性能を満足するために、帯鉄筋および中間拘束筋を適切に配置し、その機能を実証するための定着構造および配置間隔などが構造細目として仕様規定されている。

しかし、軸方向鉄筋が多段配置されるような橋脚では、この中間拘束筋の配置作業が複雑になるとともに、コンクリートの充てん性にも十分な配慮が必要となるなど、施工性の面でその改良の必要性が指摘され始めている¹⁾²⁾。

一方、中間拘束筋がじん性向上に有効であることは数多くの模型実験等により検証されており、既に周知の事実であるが、そのメカニズムは、①軸方向鉄筋の座屈または、はらみ出し防止、②コアコンクリートのコンファインド効果、③せん断補強筋としての曲げせん断余裕度の向上の相互作用と考えられている。現在、国内で用いられている耐震規準においても、その扱いは統一されているとはいえず、また①に示した軸方向鉄筋の座屈防止を直接的に照査する設計技術はいまだ確立されていない。

中間拘束筋は、これらじん性向上に寄与すると考えられ

る機能①～③が同時に付与される合理的な構造部材であるが、本研究は、その構造の改良、簡略化を考える上で、これら①～③の機能を分離し、個別にその合理化を図る方策を試みたものである。

本報告は、その第一段階として、2 段鉄筋を有する矩形橋脚を対象とし、せん断耐力を必要最小限に確保した上で、鉄筋の座屈防止のみの向上を目的とした新しい拘束方法を考案し、その検証実験を行ったものである。

2. 2 段鉄筋橋脚のじん性を向上するための構造

図-1 に、本研究で提案した新しい座屈防止機能の概念を示す。現在標準となっている横方向の拘束により主鉄筋の座屈を抑えるのではなく、軸方向の 2 段鉄筋を相互に連結することにより主鉄筋自体に重ね梁的な機構を構築し、面外への軸方向鉄筋の座屈に対して曲げ剛性増加を期待したものである。また、内側 2 段目の軸方向鉄筋は、かぶりの剥落を考慮した断面計算においても、ほぼ中立軸近傍にあることから、従来の考え方同様、外側 1 段目の軸方向鉄筋のはらみ出しに対して固定点とした拘束にも期待している。拘束筋にせん断耐力向上の機能を期待しないのは、図-2 に示す中空橋脚に配置する中間帯鉄筋と同様である。

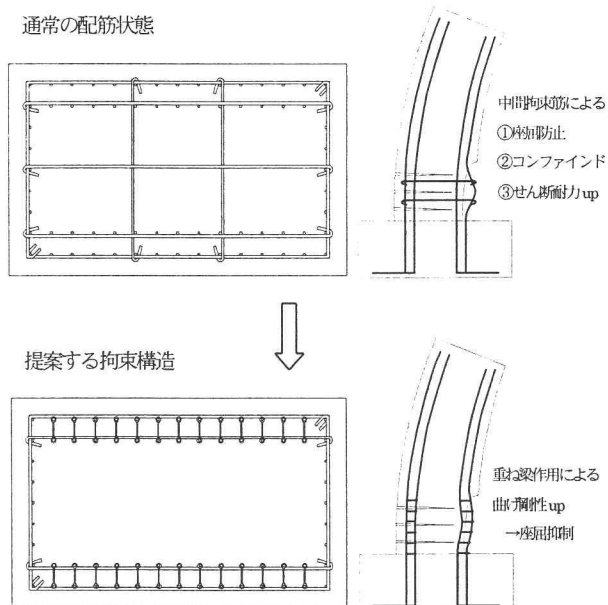


図-1 提案する新しい構造概念

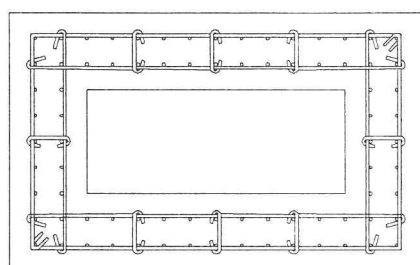
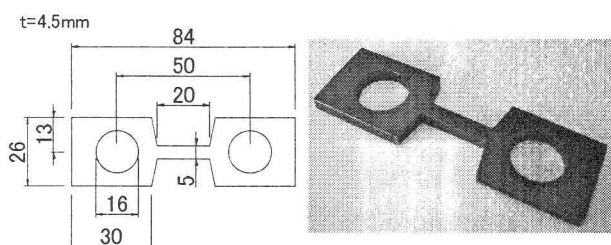


図-2 中空橋脚の中間帯鉄筋の配置例



引張試験 $P_y=7.1\text{kN}$ ($\sigma_y=315\text{N/mm}^2$)

図-3 拘束治具

鉄筋1本1本を連結することで作業は煩雑化するが、従来の中間拘束筋に作用する力を分散させることにより、拘束治具1箇所に必要な耐力を極めて小さくしていることから、作業性が良好となる簡易な構造を提案することができるというコンセプトである。図-3に、本実験で用いた拘束治具を示す。本実験では、まだ性能評価のための試作段階であり、作業性を容易にするための治具の工夫は今後の課題としている。

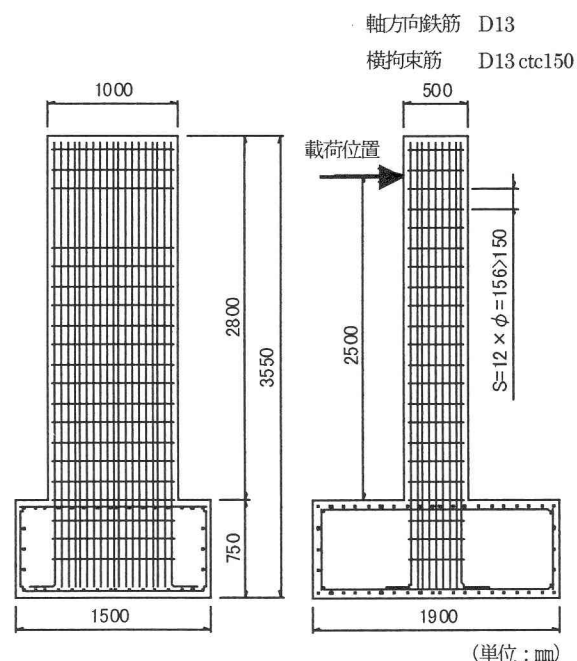


図-4 実験供試体の正面図および側面図

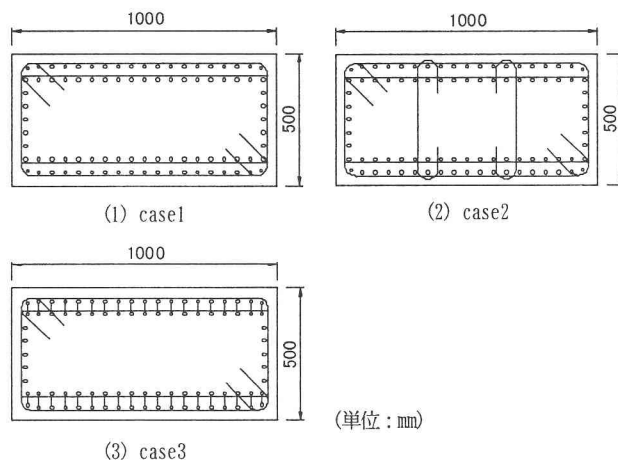


図-5 実験供試体の断面図

表-1 実験供試体の諸元

	主鉄筋	主鉄筋比	帯鉄筋	中間拘束筋	拘束治具
case1	D13-86本	1.93%	D13-150mm	—	—
case2	"	"	"	D13-2本	—
case3	"	"	"	—	有

表-2 各供試体の曲げ耐力及びせん断耐力計算値

	曲げ耐力 M_u ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	せん断力 $P=M_u/h$ (kN)	せん断耐力				せん断耐力 /せん断力 V_d/P
			コンクリート が負担する V_c (kN)	正負交番載荷 による補正係数 α (kN)	鉄筋が 負担する V_s (kN)	$V_d=\alpha\cdot V_c+V_s$ (kN)	
case1					215.4	349.3	1.07
case2	818.9	327.5	223.2	0.6	430.8	564.7	1.72
case3					215.4	349.3	1.07

3. 実験供試体の設計

1) 実験供試体

図-4、図-5 および表-1 に、実験供試体の寸法および配筋を示す。軸方向鉄筋は D13 とし、主鉄筋比を 1.93% としている。基本供試体となる case1 の帯鉄筋の高さ方向間隔は、土木学会コンクリート標準示方書・耐震性能照査編(2002 年) 5.3.2³⁾より、軸方向鉄筋径の 12 倍以下となる、 $12 \times \phi 13 = 156\text{mm}$ から 150mm 間隔とした。帯鉄筋径は、道示 V によるせん断耐力(正負交番载荷の影響に関する補正係数をタイプ 1 の $C_c=0.6$) が、曲げ耐力とほぼ等しくなるよう D13 とした。表-2 に、各供試体の曲げ耐力計算値とせん断耐力計算値の比を示す。ただし、せん断耐力算出時には材料強度に規格値を用いているが、曲げ耐力の産油津には実強度を用いて余裕度を算出している。

case1 は、せん断破壊をすることなく、現行基準の構造細目を満足するなかで最もじん性が乏しいと考えられる基準供試体である。

case2 は、この case1 に中間拘束筋を 2 本追加した、標準施工型のじん性に富んだ供試体である。

新提案の拘束治具を配置した case3 は、この case2 の中間拘束筋 D13 $\times$ 2 本とほぼ同等の耐力を有するよう、拘束治具 1 個当たりの断面積を設定している。つまり、この拘束治具がすべて貫通して配置されていると仮定すれば、case2 と case3 のせん断耐力は等しいことになるが、貫通していないのでせん断耐力は case1 同様に必要最低限となる。拘束治具の配置については、施工簡略化の観点から、基部から 500mm(1.0D)までの 5 段ついでのみとしている。

表-3 計算方法によるじん性率の比較

計算方法	実験ケース	降伏変位 (mm)	終局変位 (mm)	じん性率	終局曲率 (1/m)	塑性ヒンジ長 (mm)
道示 V	case1	14.1	41.8	3.0	0.054	0.5D = 250
	case2	14.3	83.1	5.8	0.128	0.5D = 250
鉄道構造物等設計標準 (平成11年版)	case1	15.9	81.7	5.1	0.062	1.0D = 500
	case2	15.9	89.7	5.6	0.069	1.0D = 500

※じん性算出時の材料強度は規格値を用いている

表-3 に、コンファインドコンクリートの材料モデルに基づいた道示 V によるじん性計算値と、主にせん断補強筋量をパラメータとした実験回帰⁴⁾に基づいた鉄道構造物等設計標準・平成 11 年版(以下、JR 標準)によるじん性計算値(拔出しを含む)を示す⁵⁾。case2 の終局変位は、両者ともほぼ一致しているように見えるが、基部の終局曲率計算値は倍半分異なっており、塑性ヒンジ長の設定が、道示 V では 0.5D に対し、JR 標準では 1.0D であるために、結果的に一致したものである。一方、case1 の終局変位の計算値は大きく異なる結果となった。こちらは逆に、基部の終局曲率計算値はほぼ一致するが、先に述べた塑性ヒンジ長の設定が倍半分異なるために、終局変位がほぼ倍半分に異なるものである。

今回新しく提案した case3 は、せん断耐力(帯鉄筋比)は case1 と同様であり、また、コアコンクリートのコンファインド効果も期待できないため、先のいずれの設計規

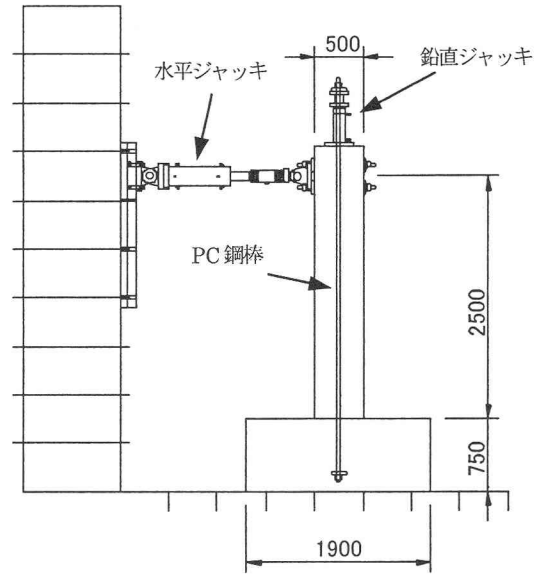


図-6 载荷装置

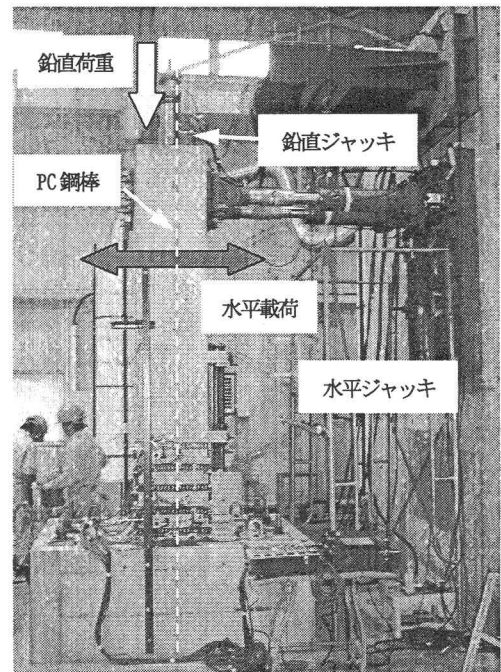


写真-1 試験状況

を適用した場合においても、case1 に対してじん性の向上は見込めないということになる。

2) 载荷方法

载荷試験方法を図-6 に示す。橋脚断面の軸応力度は 1.0N/mm^2 ($N=500\text{kN}$) と設定した。軸力载荷には、アンボンド PC 鋼棒を橋脚の軸方向に 2 本配置し、水平変位に伴う張力増加に対して常に一定荷重となるように制御することにより行った。本実験では、 $1\delta y$ を最外縁の鉄筋降伏と定義し、その整数倍の変位に対して各 3 回の正負交番载荷を行った。最大荷重後、軸方向鉄筋の破断もしくは顕著な耐力低下が認められた地点で試験を終了した。試験状況を写真-1 に示す。

4. 実験結果

1) 材料物性

表4, 表5に鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を示す。

表－4 鉄筋物性値

鉄筋径	材質	降伏荷重 (kN)	降伏応力度 (N/mm ²)	破断強度 (kN)	引張応力度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	伸び (%)
D13	SD345	47.1	371.7	67.2	530.1	1.89×10^5	19.6

表－5 コンクリート物性値

実験ケース	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
case1	27.1	2.27×10^4	0.184	2.38
case2	26.3	2.27×10^4	0.178	2.48
case3	25.1	2.15×10^4	0.172	2.11

2) 荷重-変位曲線

図7～9にcase1～3の荷重-変位曲線を、図10に正負の荷重を平均した骨格曲線の比較を示す。

写真2～4に、各ケースの5 δy の1回目終了時での破壊状況を示す。基準供試体であるcase1は、4 δy において、かぶりの剥落、鉄筋の座屈により耐荷力を失ったのに対し、中間拘束筋を配置したcase2および新提案の拘束治具を用いたcase3は、5 δy の1サイクル終了時までではかぶりの剥落、耐荷力の低下もなく健全であった。

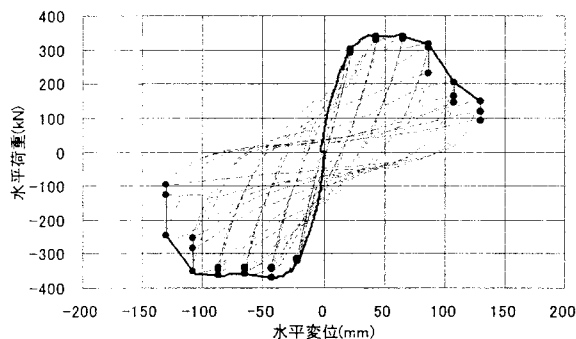
図11に、各塑性率毎の履歴エネルギー(3サイクル分)を示す。基準供試体case1に対して、新提案の拘束治具を用いることにより、中間拘束筋(case2)同様に主鉄筋の座屈防止効果が認められ、じん性能および履歴エネルギー吸収能の向上を確認することができた。

3) 破壊形態

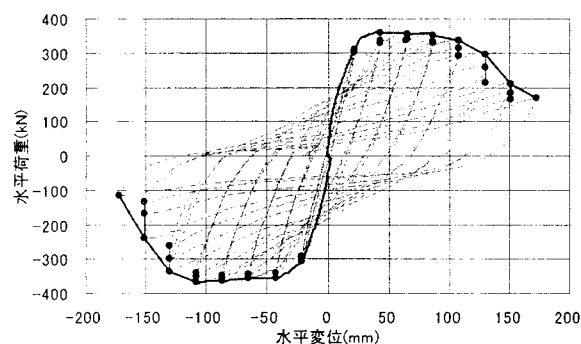
図10より、case2が6 δy の1回目まで耐荷力を保持し、緩やかに耐荷力を失うという良好な性状を示したのに対し、case3は5 δy の3回目において急激に耐荷力を失うという挙動を示した。

写真5,6に5 δy -3回目におけるcase3の破壊性状を示す。case1およびcase2では、かぶりの剥離、主鉄筋の座屈増大に伴うかぶりの剥落を経過した後、耐荷力を失う

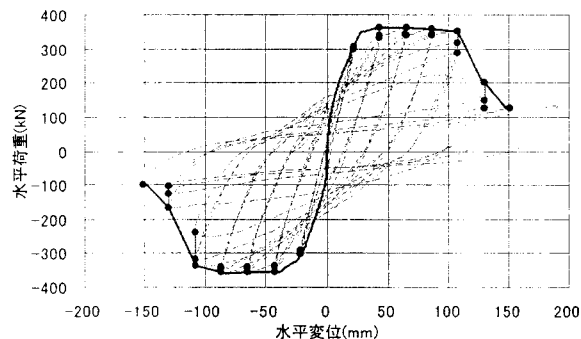
典型的な曲げ破壊型であったのに対し、case3のみは、5 δy の2回目において若干のかぶりの剥離現象は確認されたものの、主鉄筋の顕著な座屈に伴うかぶりの剥落が生じないまま、急激に耐荷力が減少した。このとき、側面の斜めひび割れ、つまりせん断ひび割れの開口が著しく、急激な耐荷力の低下は、帯鉄筋降伏に伴うせん断破壊であった



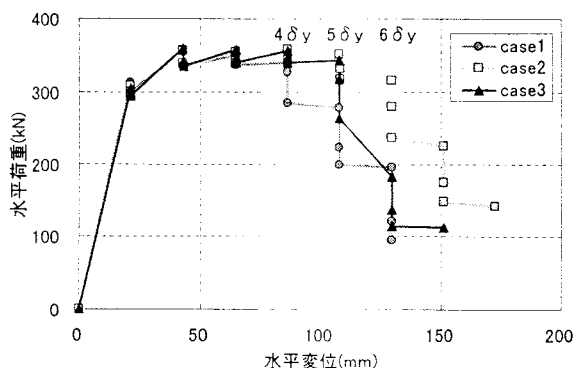
図－7 荷重変位曲線(case1)



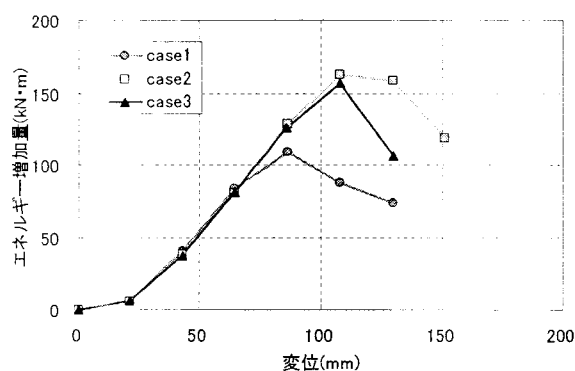
図－8 荷重変位曲線(case2)



図－9 荷重変位曲線(case3)



図－10 骨格曲線



図－11 各塑性率毎の履歴エネルギー(3サイクル分)

と推定される。繰返し载荷により、コンクリートが負担するせん断耐力 V_c が低下することは指摘されており、現行規準で規定されている、この低減率 0.6 を考慮して曲げ破壊型になるよう供試体設計を行った。しかし、case3 では、この設計時の設定を上回り、 $5\delta y$ の 3 回目では V_c の低減率は 0.3、 $6\delta y$ の 1 回目では、ほぼゼロという結果になった。コアコンクリートのコンファインド効果を高めることにより V_c の低下が緩まるとの報告もあり、本拘束治具にはコンファインド効果が期待できず、そのためにせん断耐力の低下傾向が顕著になったとも考えられる。

せん断補強と座屈防止機能を分離する提案を行う場合、じん性の増加に伴うせん断耐力のコンクリート負担分の低下挙動の解明は重要な課題になるものと考えられる。

本実験の範囲では、本拘束治具によりじん性向上を図る場合、帯鉄筋が負担する V_s のみで、曲げ耐力を上回っておく必要があったものと推察される。

図-12 に、case2 の中間拘束筋に生じた最大ひずみを示す。基部断面から 2 段目(0.3D)に配置した中間拘束筋を見ると $3\delta y$ から大きなひずみが発生しはじめ、 $4\delta y$ で降伏に至っている。この 2 段目が降伏した以降からは、基部か

ら 3 段目(0.6D)の中間拘束筋のひずみも増大し、 $5\delta y$ で降伏に至っていることが分かる。この 2 段の中間拘束筋だけが、せん断補強としての機能のほかに、主鉄筋の座屈防止機能を担っているものと考えられる。写真-7 に、case2 の試験終了後に、残存するかぶりコンクリートを取り除いた状況を示す。帯鉄筋が大きくはらみだし、中間拘束筋の座屈防止機能が、主筋全体に均等に作用していないことが分かる。また、中間拘束筋間で帯筋のみで座屈に抵抗して

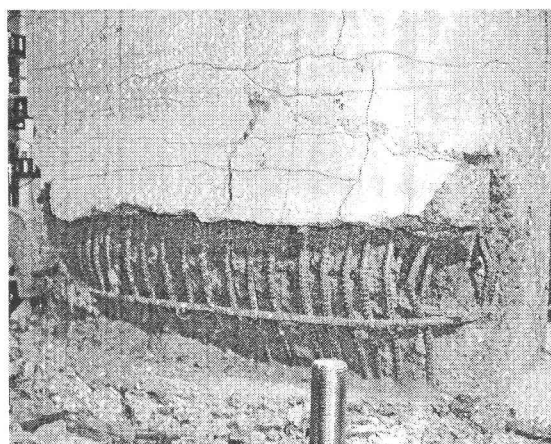


写真-2 破壊形態 (case1 $5\delta y$ -1回目)

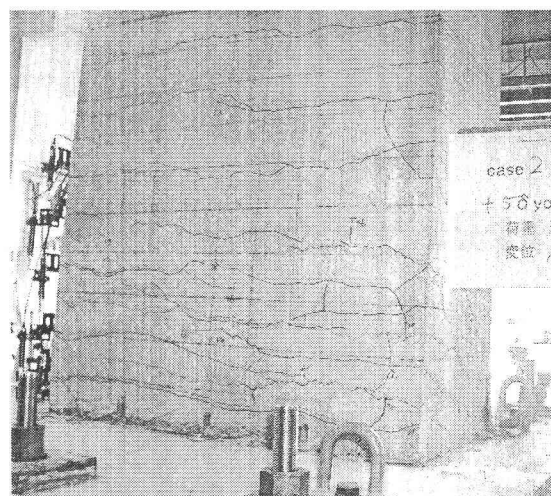


写真-3 破壊形態 (case2 $5\delta y$ -1回目)

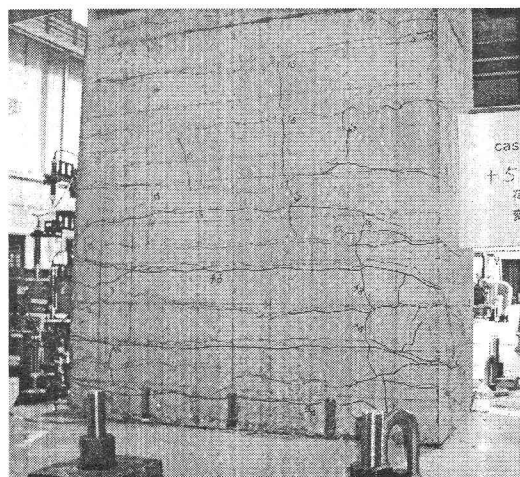


写真-4 破壊形態 (case3 $5\delta y$ -1回目)

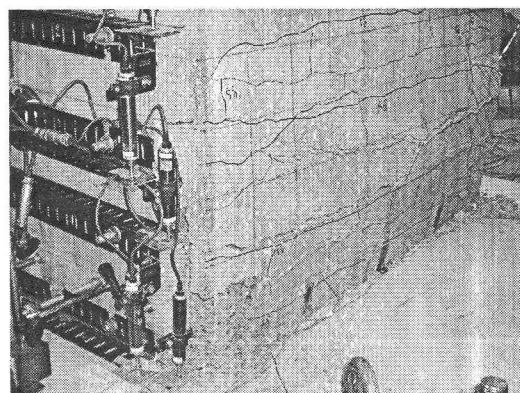


写真-5 破壊形態 (case3 $5\delta y$ -3回目)

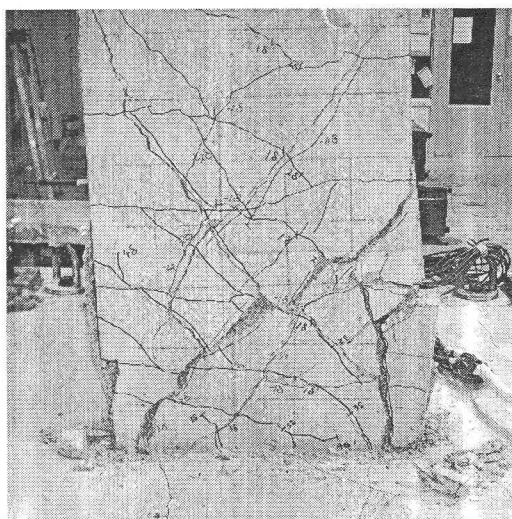


写真-6 破壊形態 (case3 $5\delta y$ -3回目)

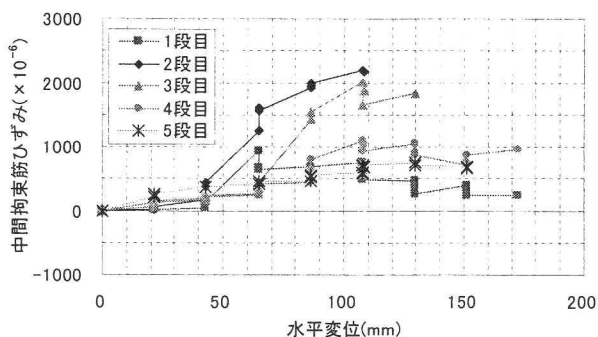


図-1 2 中間拘束筋最大ひずみ

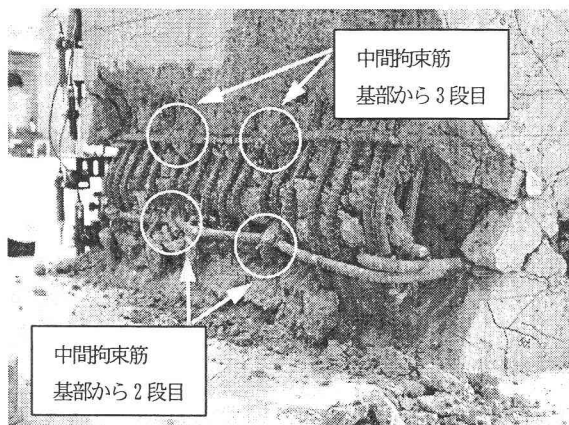


写真-7 破壊形態 (case2 8 δy -1 回目)

いる箇所では、内側 2 段目の鉄筋の裏側まで、かぶりの剥落が及んでいる。

図-13 に、case3 の拘束治具に生じた最大ひずみを示す。case2 では座屈が開始し始めた 3 δy ~4 δy 付近から大きなひずみが発生し降伏に至っているのに対し、座屈を抑制した 5 δy においても、拘束治具のひずみ増加はほとんど見られず、試験終了まで弾性範囲であった。降伏荷重の 1/2 程度まで耐荷力を失った 6 δy 载荷時に交番载荷を繰り返した結果、かぶりコンクリートの一部で剥落が生じ、最外縁鉄筋に帯鉄筋間隔 150mm を座屈長とする座屈が見られた。写真-8 に、試験終了後に、かぶりコンクリートを取り除いた状況を示す。主鉄筋の座屈抑制が、すべての鉄筋に均等に作用している本工法では、内側 2 段目の主鉄筋の裏側までのかぶりの剥落は及ばず、2 段目鉄筋は、全てコアコンクリート内に埋まっていることが確認された。このことにより、2 段鉄筋を相互に緊結する新しい拘束治具は、内側 2 段目鉄筋を固定点として外側 1 段目鉄筋の座屈を抑制したものと考えられる。さらに、2 段鉄筋の重ね梁作用またはトラス作用を付加するによって主鉄筋自体の座屈変形に対する曲げ剛性を高め、じん性を向上する工法を現在、検討中である。

5. まとめ

1) 2 段鉄筋を相互に緊結する新しい拘束治具は、内側 2 段目鉄筋を固定点として外側 1 段目鉄筋の座屈を抑制することが確認された。

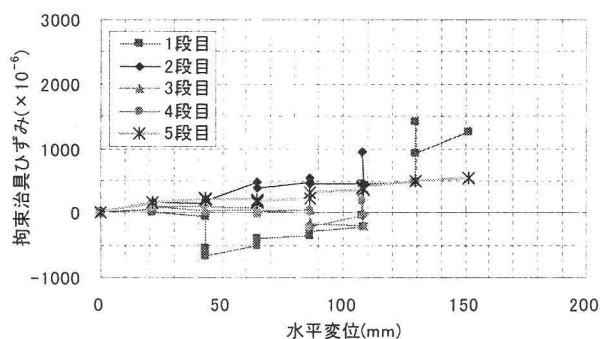


図-1 3 拘束治具最大ひずみ

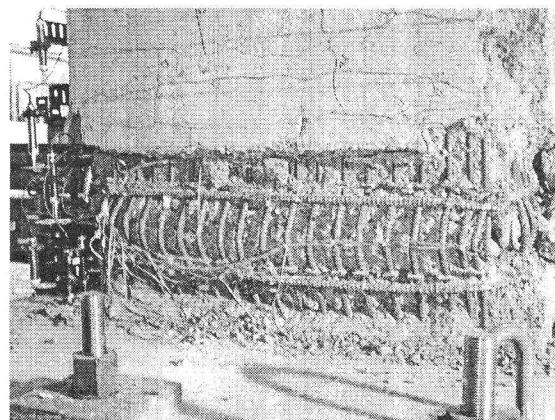


写真-8 破壊形態 (case 3 6 δy -3 回目)

2) 本工法のじん性向上を照査する設計手法は現在存在せず、座屈防止機能によるじん性向上を直接照査する設計手法の構築が必要である。

3) 中間拘束筋に代わり、せん断補強と座屈防止機能を分離する新しいじん性向上工法の提案を行う場合、じん性の増加に伴うせん断耐力のコンクリート負担分の低下挙動を十分に検討しておく必要がある。

参考文献

- 1) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏、塩島亮彦：軸方向鉄筋の配置方法に基づく RC 橋脚の耐震性能の向上に関する実験的研究、土木学会論文集 No.745, 2003.10
- 2) 土木研究所ほか：高じん性鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究報告書、2002.9
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V. 耐震設計編、丸善、2002.3
- 4) 渡邊忠朋、谷村幸裕、瀧口将志、佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性の算定手法、土木学会論文集 N.683、2001.8
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説一耐震設計編、丸善、1999.10

(2004 年 9 月 17 日受付)