

論文 梁のせん断耐力と斜めひび割れの3次元分布に及ぼす側方筋の効果

土屋智史^{*1}・中浜俊介^{*2}・前川宏一^{*3}

要旨: 寸法の異なるRC柱配筋供試体をせん断破壊させ、載荷後に供試体切断による内部ひび割れの視覚的検証を行った。その結果、側方筋の存在によって、部材表面部コンクリートには斜めひび割れの分散効果が伺えるとともに、表面部と内部とでは、ひび割れ破壊面形状が大きく異なることを確認した。数値性能評価を行う場合には、局部的な鉄筋配置の影響を考慮する必要があり、3次元配筋を取り入れた解析を適用することで、精度向上を求めることが可能であることを検証した。

キーワード: 側方筋、斜めひび割れ立体分布、供試体切断、せん断耐力、非線形解析

1. はじめに

RC梁/柱部材のせん断挙動は、曲げ挙動とは異なり不明な点が多く、断面形状や配筋方法だけではなく、養生条件や使用材料、初期欠陥等によっても影響を受ける。構造物の大型化を勘案すると、小型供試体から得られる実験結果を基に、実構造物の安全性を判断する場合には、寸法効果を正しく考慮しなければならない。一方、過度にせん断補強筋を配置した場合には、経済性のみならず、施工の面からも厳しい条件となるため、安全率を見込んだ上で、適切に配筋詳細を決定する必要がある。繰り返し荷重作用下と曲げ降伏後を含む、RC梁/柱部材のせん断破壊と寸法効果は、未だ決着を見ていない課題の1つと言える。

コンクリートが受け持つ耐力評価に関して、土木分野では、引張縁に軸方向筋を配置したRC梁を対象として、せん断耐力評価式^①が二羽らによって提案されている(ディープビームは対象外)。土木学会コンクリート標準示方書では、二羽式を分布荷重にも適用できるように改めた設計耐力式が取り入れられており、寸法効果は有効高さの1/4乗に反比例するものとなっている。側方筋を有する柱部材の場合には、梁の設計式を拡大解釈する形式が採用されている。

土木構造物におけるRC柱部材では、軸方向筋が断面の外縁部に集中的に配置され、断面中心部はほぼ無筋状態とみなせる3次元的な配筋状態となる。従って、2次元的な配筋状態である側方筋を有しないRC梁とは、幾分外力抵抗機構が異なることが予想される。側方筋は、せん断力を直接に負担しないものの、変形の拘束効果と付着効果が期待されることから、コンクリートの負担するせん断力を高める効果があると考えられる^②など。これは、設計安全上大きく問題となることはないが、せん断と曲げ耐力が接近する既存構造物の耐震診断や補強を合理的に推進するためには、せん断耐力評価手法の精度を向上させる必要がある。

一方、破壊力学の知見を取り入れることによって、数値解析的にRC梁・柱のせん断破壊と寸法効果の機構解明へ向けた取り組みが、実用的な域に達しつつある。空間平均化された材料構成モデルを使うことを前提に、安らは鉄筋の付着作用が及ぶ領域と、そうでない領域に分割するゾーニング手法の提案を行っている^③。引張縁にのみ鉄筋を配置した大型RC梁のせん断破壊実験^④を、比較的粗い要素を用いた2次元有限要素解析によって精度良く追跡し、寸法効果を陽な形で評価した。ここで、安らの検討は2次元問題に留まっており、

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 工修（正会員）

*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻

*3 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

表-1 実験供試体の概要

name	Specimen b*h*l (mm*mm*mm)	loading plate b'*h' (mm*mm)	d (mm)	Re-bar	f _c (MPa)	f _y (MPa)	V _{c_exp} (kN)	V _{c_cal_1} (kN)	V _{c_cal_2} (kN)
N800	800*800*5000	200*30	740	D32	29.7	351	518.6	593.4	447.4
N400	400*400*2800	200*30	370	D16	29.7	353	153.3	176.4	133.0
N250	250*250*2000	100*30	231	D10	29.7	346	63.7	75.4	56.8
H250	250*250*2000	100*30	231	D10	58.7	346	86.6	---	---

領域選定に対する細部の検証は、今後の課題となっている。梁では、無筋領域であるウェブ部に斜めひび割れが離散的に進展し、破壊に至ることから、解析における領域選定が破壊に及ぼす影響は小さい。

本研究では、せん断補強筋を有しない RC 柱配筋供試体を対象として、側方筋がせん断破壊と寸法効果、およびひび割れの多元的な導入に基づくせん断耐荷機構に及ぼす影響について検討を行う。

2. 載荷実験

2. 1 実験概要

曲げ降伏に比して、せん断破壊が先行する柱配筋 RC 供試体を、寸法を変化させて作成し、せん断破壊と寸法効果について検討を行った。本実験の特徴は、一連の寸法の異なる試験体を作成するにあたり、鉄筋比を揃えるだけでなく、使用する鉄筋の本数と配置方法をすべて統一し、幾何学的な相似を極力合わせたことにある。すなわち、断面に対する鉄筋径や間隔の比は一定であり、試験体の寸法が拡大/縮小するのに応じて、かぶり厚や鉄筋間隔が変化する。通常、試験体が小型であれば、断面に対するかぶり厚や鉄筋径の割合が相対的に大きくなる。これも寸法効果の一部を担う可能性があり、この因子を除くことを主眼に置いている。寸法のみを変化させた時に現れる純然たる寸法効果のみを抽出し、その定量評価を目指すためである。

実験供試体は、有効高さを 740, 370, 231mm と変化させた矩形断面とし、せん断補強筋は有していない。コンクリートの設計圧縮強度は、30.0MPa 程度を設定したが、有効高さが 231mm のについては、試験的に自己充填型高強度コンクリートの供試体も 1 体作成した(計 4 体)。有効

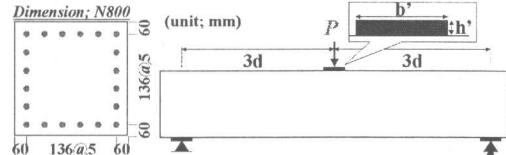


図-1 断面配筋と載荷概要

高さが 740mm の供試体は、山陽新幹線鉄道高架橋 RC 橋脚柱部材をモデルとして、軸方向筋を配置しており、以下これを基本として、断面寸法に対する鉄筋径および配置間隔の比を一定に保つことに留意しながら、1/2, 5/16 に縮小してある。この場合、供試体の寸法が小さくなればなる程、通常用いられる断面諸元から、かけ離れていくこととなる。試験体の名称と概要、使用材料特性を図-1 と表-1 に示す。

骨材最大寸法は、20mm 一定とした。骨材寸法を供試体寸法に応じて変化させることは困難であるとともに、(側方)鉄筋の影響に焦点を絞るためである。打設時には、鉄筋位置の保持や材料分離等の防止だけでなく、かぶりコンクリートの充填に細心の注意を払った。乾燥収縮等の初期欠陥を排除することに努め、十分に湿潤養生を行った。供試体は柱部材を対象としているが、簡易に実験を行うために、載荷方法として横梁の中央 1 点載荷形式を採用した(図-1)。軸力は加えておらず、せん断スパンを $a/d=3.0$ となるように設定した。

2. 2 実験結果

図-2-1～図-2-4 に、せん断応力(作用せん断力 V/bd)一回転角(梁中央部下端の変位 δ /せん断スパン a)関係を示した。供試体 H250 は、主鉄筋の降伏とほぼ同時に、他の供試体では降伏前に斜めひび割れが進展し、直ちにせん断破壊に至った。主鉄筋に沿う割裂ひび割れは、発生していなかった。ひび割れ状況を観察すると、すべての供試体で、斜めひび割れの分散効果が確認された。側方鉄筋

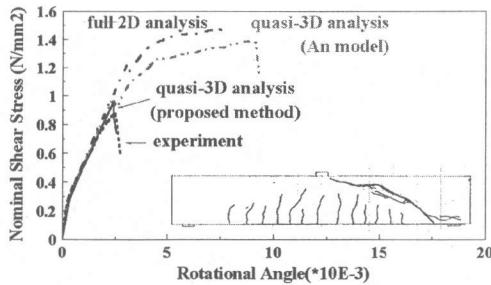


図-2-1 N800 せん断応力-回転角関係

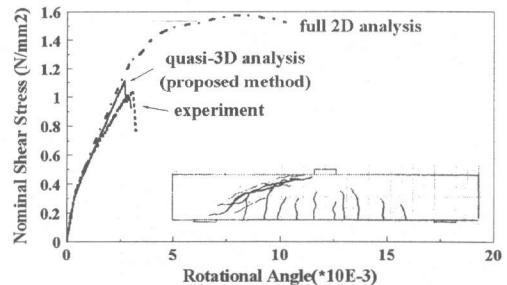


図-2-2 N400 せん断応力-回転角関係

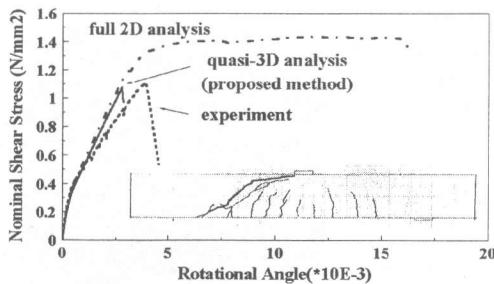


図-2-3 N250 せん断応力-回転角関係

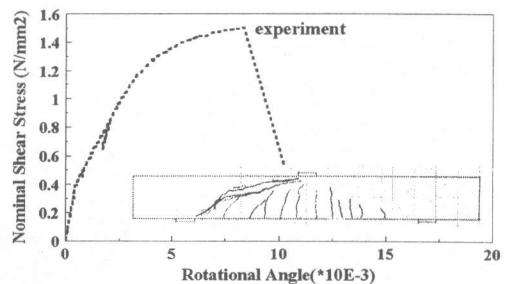


図-2-4 H250 せん断応力-回転角関係

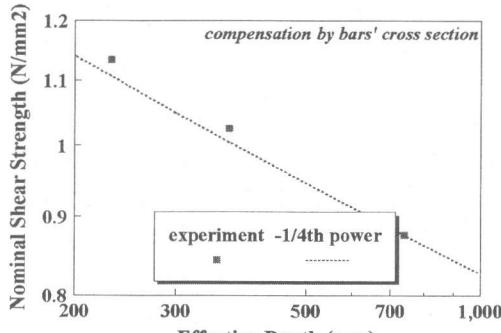


図-3 せん断強度-有効高さ関係

の付着によるものと考えられる。実験終了後のひび割れ損傷を図-2-1～図-2-4に標記し、実験結果の概要を表-1に追加した。

表-1には、二羽式¹⁾に基づく斜めひび割れ発生荷重予測値も併記してある。引張主鉄筋比を算出する際に、中立軸位置を勘案して断面内14本分の鉄筋断面積から求めた予測値(V_{c,cal_1})と、引張縁6本分のみから求めた予測値(V_{c,cal_2})を示した。ただし、高強度コンクリートを用いた供試体H250は検討対象外とし、詳細は別稿に譲る。普通强度コンクリートを用いた3つの供試体では、実験結果($V_{c,exp}$)は V_{c,cal_2} よりも高く、二羽式を前提として評価すれば、側方筋による耐力上昇が伺える。しかし、現行の評価手法に相当する V_{c,cal_1}

と比較すると85～88%程度の値であった(表-1)。耐力式評価では、引張主鉄筋比を求める際の側方筋の取り扱いに留意する必要がある。

せん断強度と構造寸法を代表する有効高さとの関係を、対数グラフによって図-3に示した。せん断耐力は引張主鉄筋比の1/3乗に比例するものと仮定し、すべての梁の鉄筋比を供試体N800と同一になるように、主鉄筋の断面積に応じた強度補正を行っている。断面に対する鉄筋径の比を統一したものの、各径の公称断面積比は微妙に異なるためである。断面寸法比を統一することにより抽出される純然たる寸法効果は、今回検討した範囲では、柱の平均せん断強度低減割合はおおよそ一定であり、有効高さの1/4乗に反比例するところがみなすことができる。さらに断面が大きくなった場合の寸法効果については、使用材料の制限等から実験的に検討することは困難であり、数値解析的に検討を行う必要がある。今後の課題としたい。

3. 供試体切断による内部ひび割れの観察

破壊時の表面部のひび割れ観察によって、斜めひび割れの分散効果が確認されたが、断面内部まで、十分な曲げとせん断ひび割れが及んでいるか不明である。外周部は側方筋の付着作用領域、中

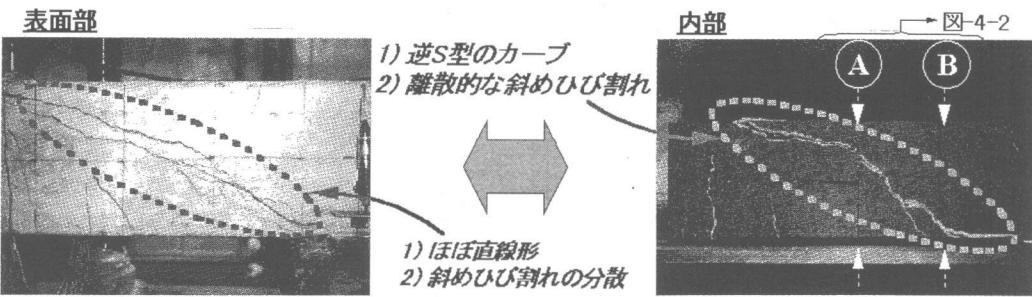


図-4-1 表面部と内部のひび割れ分布比較

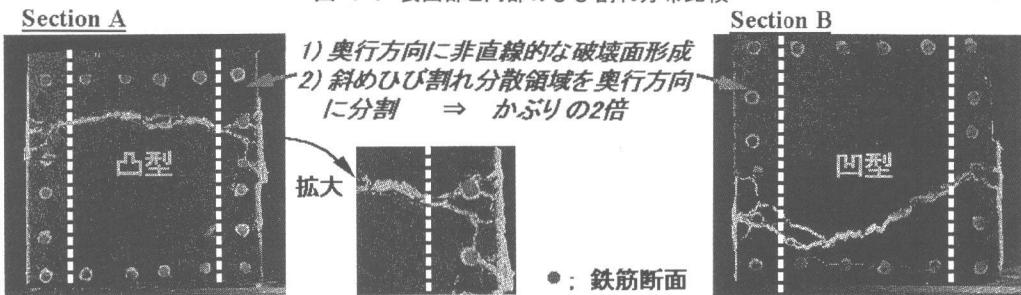


図-4-2 断面内部のひび割れ分布

心部は無筋領域であるとすれば、内部と表面でせん断ひび割れの形態や方向が3次元的に、有為な差として異なっていることが十分に予想される。そこで、供試体H250とN800を対象として、せん断破壊後に、ひび割れ部に色素を混入した樹脂を注入して固定した上で、試験体を賽の目状に切断し、内部のひび割れ状況の観察を行った。

ひび割れ角度に着目すると、側方筋が配置されている外縁部とコンクリートのみの内部では、斜めひび割れの角度が異なっていた。表面部のひび割れと、軸方向に沿って鉛直に切断した内部ひび割れを図-4-1に示す(供試体H250)。内部の方が、より斜めの角度が急激であることが分かる(逆S字)。軸方向と垂直な切断面でのひび割れ状況を見ると、斜めひび割れが奥行き方向に直線で伸びておらず、切断場所に応じて凸凹型となっている(図-4-2)。側方鉄筋が存在する領域と存在しない領域では、外力抵抗機構が異なるためであろう。

次に斜めひび割れの分散状況について見てみると、図-4-2に示したように、外観からは複数の分散した斜めひび割れが目視観察されたが、内部では、それらが1本のひび割れへと収束して繋がる傾向が確認された。内部のひび割れの方が、1本あたりのひび割れ幅は大きくなる。ひび割れ分

散性状は、1つの面を境界として変化すると捉えることができるようである。H250試験体では、外縁からおよそ3.7cmの位置を境に、一番大型のN800の試験体については、外縁からおよそ12.0cmの位置を境に、ひび割れ分布性状が異なっていた。かぶり厚のちょうど2倍に相当する。これらの結果は、寸法と強度の異なる2つ試験体に対して、全く同様の結果であった。試験体の選定にあたり、断面寸法に対する鉄筋径および配置間隔の比を一定に保つことから、ひび割れ分散性状が変化する領域もほぼ同一の比となったものと考えられる。

以上の結果は、側方筋の配筋詳細が、ひび割れ分散に強い影響を与えていること、及びRC柱部材のひび割れは、立体的に進展することを明白に示している。側方鉄筋の存在により、曲げひび割れと同様に、せん断ひび割れの分散状況が変化することが確認された訳である。従って、せん断破壊を考える場合には、直接3次元的に扱うか、2次元的に扱う場合には、何らかの等価置換によって検討を行う必要がある。

RC柱の中子筋の存在が、せん断強度に及ぼす影響という観点から裁断を行った既報⁵⁾のひび割れ図を、付着とひび割れ分散性状という観点から再検証してみると、①鉄筋近傍ではひび割れが

複数分散されるのに対し、無筋領域ではひび割れが離散的に発生している、②ひび割れ面が多方向に広がっている、という 2 点で共通している。

4. 数値解析手法の適用

本稿で用いる 2 次元非線形解析手法は、任意の載荷経路依存性を考慮した材料構成モデルを採用し、アクティブクラック法に基づく多方向固定分散ひび割れモデル⁶⁾によりひび割れを表現するものである。比較的粗い要素分割に対しても解析精度を確保するために、直交 2 方向に対して、構造部材を鉄筋が密に配置されている領域(RC 領域)と、鉄筋の付着作用が及ばない領域(無筋領域)に分割する「ゾーニング手法³⁾」を採用している。付着領域に応じて要素分割を行い、RC 要素では Tension Stiffening を考慮し、無筋要素では引張破壊エネルギーと要素寸法から、破壊力学上の用件を満たすように応力解放率を決定する。

側方筋をゾーニング手法の枠組みに組み込む場合には、奥行方向に対する付着領域の設定と解析要素の取り扱いが重要となる。安らは、限界鉄筋比に基づき領域設定を行っているが、予備検討の結果、耐力を幾分過剰に評価することが分かった。また、3 次元配筋を 2 次元解析要素に取り込むために、奥行方向に対して領域分割を行った後、エネルギーの釣り合いから、要素の応力解放率を代表している³⁾。しかし、この手法を厳密に実行するには、積分方程式を解く必要があり、いさか不便である。

本検討では、視覚的検証結果に基づいて領域分割を行った後、奥行方向に節点を共有させた 2 つの overlap 要素(RC と無筋要素)を定義することで、準 3 次元解析を実施する(図-5)。基本コンセプトは既存手法と同一であるが、2 つの overlap 要素を用いることによって、エネルギーの釣り合い式を解く必要がなくなるとともに、各要素ごとに発生するひび割れや応力状態を判定できる利点がある。なお、完全 3 次元解析では、一切の等価置換を必要とせず、高い一般性を有しているが、自由度が増大し、現在の計算機環境では効率が悪い。対象実験は単調静的載荷であり、変形場を 2 次元

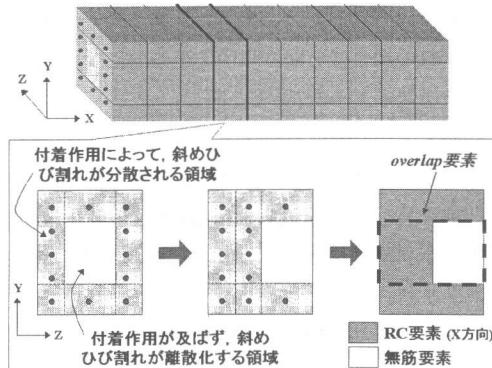


図-5 overlap 要素の概念

平面とみなすことができるため、準 3 次元解析を適用する工学的価値は高い。完全 3 次元解析に比べて、計算時間を大幅に減ずることが可能である。

図-2-1～図-2-3 の実験結果に合わせて、解析結果を示した。解析対象は、普通強度コンクリートを使用した、供試体 N800, N400, N250 である。高強度コンクリートを使用した H250 については、ここでは対象外とした。N800 を例に取ると(以下の数値は、N400 で 1/2, N250 では 5/16 倍となる)、梁下縁から 120.0mm の範囲を、引張主鉄筋付着作用の及ぶ RC 領域と算定した。側方筋の効果を考慮するために、ウェブの部分に overlap 要素を定義し、供試体切断による内部ひび割れの観察結果に基づいて、奥行方向に 240.0mm の範囲を RC 要素、560.0mm を無筋要素とした。限界鉄筋比に基づいて算出すれば、RC 要素は 517.2mm、無筋要素は 282.8mm となり、付着効果を過大に見積っていることが伺える。提案する準 3 次元解析と、奥行方向一様に RC 要素とする 2 次元解析を行うとともに、更に N800 では、安の提案する限界鉄筋比に基づく領域分割と視覚的検証に基づく領域分割の影響を検討する。

損傷が集中する要素のせん断ひずみが急激に増大し、耐力軟化に至った場合にはせん断破壊と判定し、曲げ降伏以降安定的な挙動を示した後、軟化に至った場合には曲げ破壊(曲げせん断破壊)と判定して計算を終了した。各供試体のコンクリート 1 軸引張強度は、実験の曲げひび割れ発生荷重から逆推定し、1.72MPa を使用している。

視覚的検証に基づいて領域分割を行い、ウェブ

部分の局所鉄筋配置を考慮した準3次元解析では、いずれの場合にも曲げ降伏に至る前にせん断破壊する結果となった(現実と同じ)。ただし、ひび割れ発生以降の剛性と終局耐力を幾分高めに評価している。**図-6**に示したN250の耐力軟化後のひび割れ図を見ても、部材表面部を代表するRC要素のひび割れパターンと、部材中心部(無筋領域)のひび割れ性状には明確な差(角度と密度)が生じており、外力抵抗機構が3次元的であることが分かる。表面部と内部のひび割れ角度は、切断による視覚的検証結果と同一の傾向を示している。これは、奥行方向にoverlap要素を適用した本解析手法の有効性を実証するものである。

ウェブ奥行方向に軸方向筋が一様に分布するとしたN800の解析では、曲げ降伏した後に終局を迎えた。実験結果と比較して、部材の耐力と変形を大きめに評価していることとなる。これに対し、限界鉄筋比に基づく領域分割を行った解析結果は、斜めひび割れが発生し、せん断変形成分が卓越してくる様子が伺えるものの、耐力軟化には至らず、曲げ降伏を示した。ちょうど、奥行方向一様にRC領域を想定する2次元解析と、視覚的検証に基づく領域分割を行った解析結果の中間に位置する結果となっている(**図-2-1**)。

5.まとめ

側方筋の効果によって、部材表面部コンクリートには斜めひび割れといえども、ひび割れの分散効果が伺えるとともに、部材表面部と内部とでは、ひび割れ破壊面の進展が大きく異なることを確認した。数値解析を行う場合には、局部的な鉄筋配置の影響を考慮する必要がある。本研究では、供試体切断による視覚的検証とゾーニング手法に基づいて、擬似的に3次元的配筋効果を考慮した有限要素解析を適用し、実験挙動をおおむね評価できることを示した。さらなる精度向上には、RC/無筋要素の領域選定法の確立が必要となる。

当面、自由度を縮退した線材要素を用いた数値性能評価は、梁/柱部材の耐震設計/照査のメインフレームとしての役割が期待される。その場合、曲げ降伏以降の非線形領域も含め、せん断挙動を

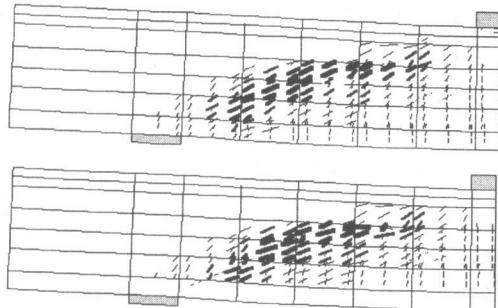


図-6 N250 ひび割れ図(上;RC要素、下;無筋要素)

正しく把握し、安全性を確保しておくことが前提となり、今後もせん断破壊と寸法効果に関する評価手法の確立に向け、研究に取り組む必要がある。

参考文献

- 1) 二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 2) Selby, R. G., Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to Shear and Axial Compression, *ACI structural journal*, Vol. 93, No. 3, May-June 1996
- 3) An, X. et al.: Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams, Proc. of JSCE, No.564/V-35, pp. 297-316, May 1997
- 4) Iguro, M. et al. : Experimental Studies on Shear Strength of Large Reinforced Concrete Beams under Uniformly Distributed Load, *Concrete Library of JSCE*, No.5, 1985.
- 5) 半谷公司ほか：RC梁のせん断破壊実験による立体破壊面の検討、コンクリート工学年次講演報告集、Vol.16, No.2, pp.545-550, 1994
- 6) 福浦尚之, 前川宏一：非直交する独立4方向ひび割れ群を有する平面RC要素の空間平均化構成モデル、土木学会論文集、No.634/V-45, pp.177-196, 1999.11

謝辞：本研究を行うにあたり、御指導頂いた高知工科大学岡村甫博士、上野勝助手に感謝致します。また、ひびわれ樹脂注入、切断の際に御協力頂いた、ショーボンド研究所およびミラノ製作所の皆様に御礼申し上げます。