

論文 支圧板幅と圧縮ストラット形状に着目した RC ディープビームのせん断耐力に関する検討

梁田 真広^{*1}・渡辺 健^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}

要旨: せん断スパン有効高さ比が 1.0 の鉄筋コンクリート(RC)ディープビームに対して、載荷点と支点で異なる支圧板幅を用いて静的載荷試験を行った。その結果、実験で得られたせん断耐力は、既往のせん断耐力の算定式に載荷点の支圧板幅を用いた計算値に近い値を示した。また、載荷試験中に供試体側面をデジタルカメラで撮影して画像解析を試み、載荷点と支点間に形成される圧縮ストラットを可視化した。同時に、画像解析で得られたひずみから、圧縮ストラットの形状変化によるせん断耐力の変化を確認した。さらに、圧縮ストラット部の主圧縮ひずみは、斜めひび割れ発生後に、荷重の増加に伴い単調な増加を示した。

キーワード: ディープビーム, 圧縮ストラット, 支圧板幅, 画像解析, 圧縮ひずみ

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下 RC)はりのせん断問題の中で、せん断スパンと有効高さの比が 1.0 以下と比較的小さい、RC ディープビームに関する研究はこれまでも盛んに行われてきた^{1),2),3)}。安全なコンクリート構造物の設計を実現する上で必要な、せん断耐力の算定式も提案されている¹⁾。RC ディープビームのせん断耐荷機構に関する一連の研究の特徴として、圧縮ひずみが卓越して発生する圧縮ストラットに着目し、耐力と関連づけることが挙げられる。ここで、圧縮ストラットの幅は、支圧板と載荷板の幅に関連して形成されると考えられており、既往のせん断耐力算定式ではそれらの値を入力する項が存在する。そのため、支圧板幅も RC ディープビームのせん断破壊を考える上で重要な要素である。しかし、現在報告されている算定式の基礎は、いずれの幅も等しいとした実験結果である。支圧板幅が異なる条件では、それらが等しい条件と比較して圧縮ストラットの形状が変化すると考えられ、その結果、せん断耐力が変化する可能性がある。

ここで、圧縮ストラットのひずみは、アクリルバーを用いた手法^{2),4)}などにより計測されてきたが、供試体内部に加工が必要なことや、アクリルバーの配置位置に依存した計測結果となることが欠点として挙げられる。

ところで、この欠点を補える計測手法として最近、画像解析^{5),6)}が注目を集めている。画像解析を用いることで、広範囲に発生しているひずみの計測が可能になり、その分布を描くことで圧縮ストラットの形状を視覚化できる。そこで、本研究では、載荷点と支点で支圧板の幅が異なる RC ディープビームの実験を行い、既往のせん断耐力式¹⁾の妥当性の評価を行った。同時に、画像解

析を用いて圧縮ストラットの幅、および荷重の増加に伴う圧縮ストラット位置のひずみの増加を評価することで、耐荷機構の形成時期について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 に、作成した供試体の示方配合を示す。セメントには、早強ポルトランドセメントを用いた。供試体は、せん断スパン a と有効高さ d が等しい RC ディープビームである。図-1 に、供試体概要図を示す。軸方向鉄筋には、降伏強度が 1207N/mm^2 である総ネジ式 PC 鋼棒 D25 を用い、載荷中の軸方向鉄筋の降伏防止に努めた。軸方向鉄筋の定着は、端部にアンカープレートをナット締めすることにより確保した。さらに、せん断補強鉄筋(異形鉄筋 D6, SD295A)を、片側のせん断スパン内のみにせん断補強鉄筋比 $r_w=0.42\%$ となるように配置した。以上のように供試体を作製することにより、特定の片側せん断スパンでせん断圧縮破壊が起こるように設定した。また、支点部にはローラー支承を用いた。さらに、テフロンシート 2 枚にグリースを挟んだ減摩パッドを挿入することで、供試体と支点部の支圧板間に生じる拘束を取り除いた。同様の供試体を 2 体作製し、載荷試験を行った。

2.2 載荷方法および実験ケース

油圧式 2000kN 耐圧載荷試験機により、載荷点と支点で支圧板幅を変化させた 2 体の供試体に対し、4 点曲げ載荷試験を行った。表-2 に、供試体の実験ケースを示す。パラメータは支圧板の幅である。供試体 L65 は、静的単調載荷とした。ただし、ピーク以降の破壊の進行を適切に捉えるため、供試体 L150 では、荷重の最大値(ピ

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 Ph.D. (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 示方配合

粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単体量(kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
13	50	49	190	380	853	898

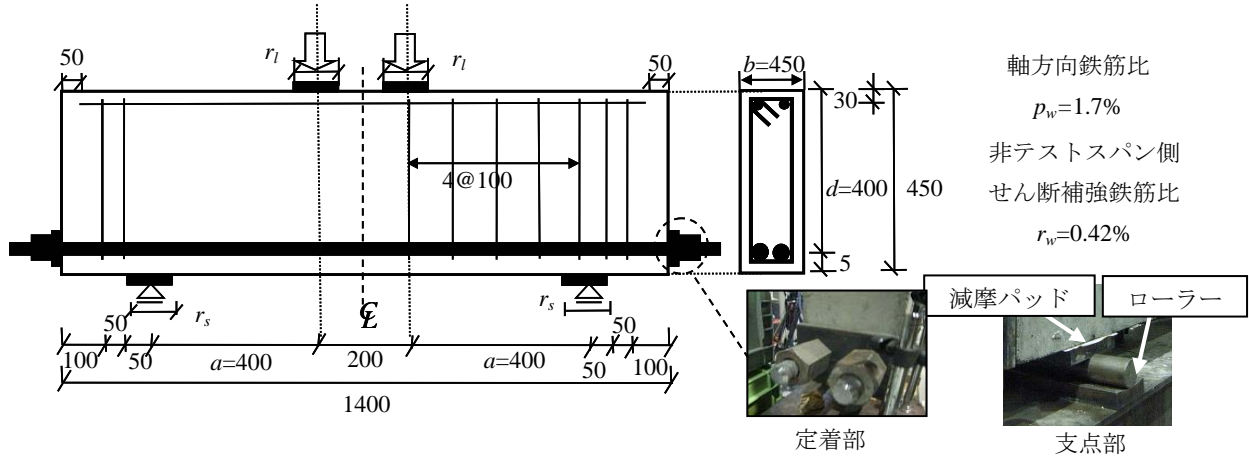


図-1 供試体概要図(単位: mm)

表-2 実験ケース

供試体名	荷重板幅 r_l (mm)	支圧板幅 r_s (mm)	荷重方法
L65	65	150	静的単調荷重
L150	150	65	静的繰返し荷重

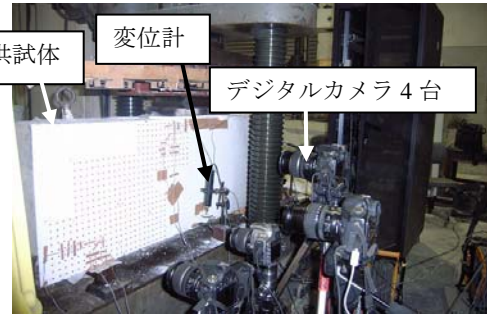


図-2 計測機器設置状況

ーク荷重)に達すると同時に 0kN まで除荷して再びピーク荷重に達するまで荷重する, 静的繰返し荷重を行った。

2.3 画像解析概要

図-2 に, 供試体および計測機器設置の様子を示す。また, 図-3 に, デジタルカメラの撮影範囲を示す。デジタルカメラは4台使用した。主に, 圧縮ストラットが形成されると予想される²⁾, 荷重点と支点の支圧板を結ぶ直線を参考に, その外側を撮影した。また, カメラ1台につき, 1pixel が 0.06mm に相当するように設定した。ターゲットとして, 赤い円形のシール(直径 5mm)を格子状に, 供試体の上縁と下縁からそれぞれ 15mm の位置から貼付した。ターゲット間隔は 20mm とした。画像解析の手順は東ら⁵⁾の手法に従い, ターゲットの重心座標および移動量を算出する。そして, 構築した有限要素モデルから, ターゲットの移動量に基づいて, 主圧縮ひずみ分布を算出した。

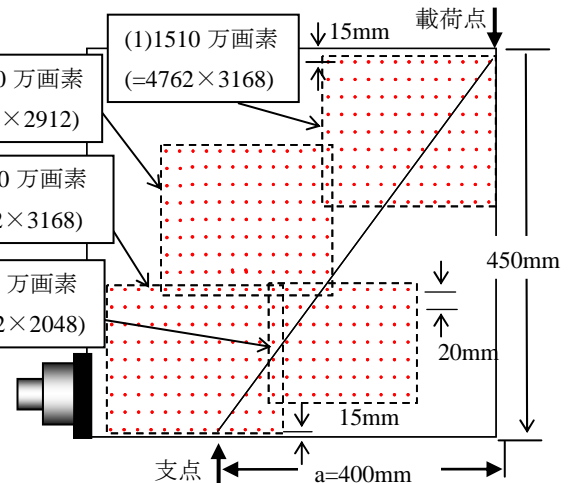


図-3 テストスパン側の撮影領域

3. 荷重試験結果

3.1 荷重-たわみ関係およびひび割れ性状

表-3 に, 各実験ケースにおけるコンクリート強度, および荷重試験時に計測されたピーク荷重を示す。また, 図-4 に各供試体の荷重-たわみ関係を示す。たわみは, 支点部の変位に対する供試体スパン中央の変位として算出した。なお, L150 では, 3 サイクルの繰返し荷重に

よる曲線群の包絡線を描いている。2 体の供試体で, プレピーク域ではほぼ同程度の剛性であったが, ピーク荷重は L150 の方が高い値を示した。荷重試験終了時のたわみは, 2 体の供試体でほぼ同じ値であった。

また, 図-5 に, 荷重試験終了時における各供試体のひび割れ性状を示す。供試体 L65 と L150 とともに, 荷重点と支点の支圧板のうち幅が狭い一方の付近で, コンク

表-3 コンクリート強度およびピーク荷重

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ピーク荷重 (kN)
L65	37.5	3.1	663
L150	41.6	3.3	781

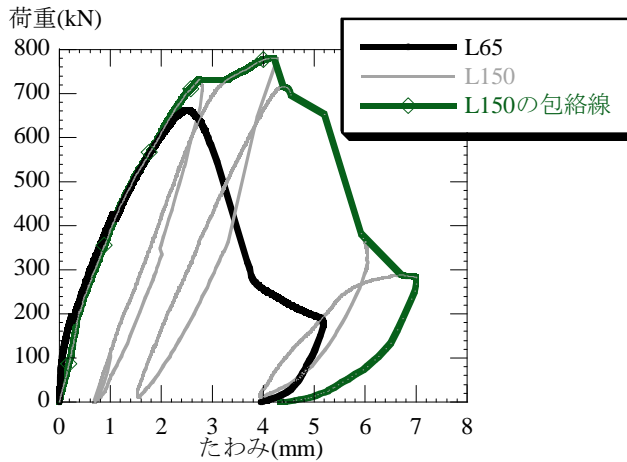


図-4 荷重-たわみ曲線

リートの圧壊が進行していた。

3.2 各供試体破壊状況

(1) 供試体 L65

荷重が 186kN で、斜めひび割れの発生を目視により確認した。その後、395kN 付近で載荷点までひび割れが進展し、タイドアーチ機構の形成により荷重のさらなる増加に抵抗した。663kN でピーク荷重を迎えた後、緩やかに荷重が低下した。そして、546kN(ピーク荷重の 82%) まで低下したところで、せん断補強鉄筋を配置していないせん断スパン(テストスパン)側の載荷点直下において、コンクリートの圧壊が進行した。それにより荷重が急激に低下したため、除荷し、載荷試験を終了した。破壊の形態として、RC ディープビームでは一般的なせん断圧縮破壊を呈したと判断した。

(2) 供試体 L150

荷重が 202kN で斜めひび割れの発生を目視により確認した。その後、タイドアーチ機構を形成することで、荷重のさらなる増加に抵抗した。なお、供試体 L150 では繰返し載荷を行っているが、2 サイクル目でピーク荷重 781kN に達しており、このときのピーク荷重を供試体 L150 のせん断耐力算定に用いている。供試体は、3 サイクル目において、ピーク荷重に達して緩やかに荷重が低下した後、テストスパンにおける支点の支圧板上部で圧壊が進行することで荷重が急激に低下し、破壊に至った。供試体 L65 と同様に、せん断圧縮破壊を呈したと判断した。

4. 既往のせん断耐力式を用いた実験値との比較

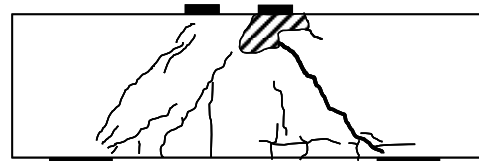
実験から得られたせん断耐力を評価するに当たり、RC

表-4 せん断耐力の計算値と実験値の比較

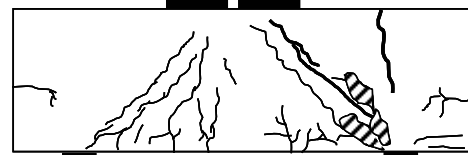
供試体 L65 ($r_l=65\text{mm}$, $r_s=150\text{mm}$)	V_{exp} (kN)	331
	V_{exp}/V_{c-150}	0.78
	V_{exp}/V_{c-65}	1.14
供試体 L150 ($r_l=150\text{mm}$, $r_s=65\text{mm}$)	V_{exp} (kN)	390
	V_{exp}/V_{c-150}	0.86
	V_{exp}/V_{c-65}	1.25

表-5 r の逆算値 r_{inv} の算定および r_l , r_s との比較

	r_{inv} (mm)	r_{inv}/r_l	r_{inv}/r_s
供試体 L65	90.9	1.4	0.61
供試体 L150	111.5	0.74	1.7



(1) 供試体 L65



(2) 供試体 L150

図-5 載荷試験終了後のひび割れ性状
(斜線部はコンクリートの圧壊部を表す)

ディープビームのせん断耐力の計算値として、以下の式(1)を用いる¹⁾。ただし、式(1)中で、 r は同一の支圧板幅となっている。

$$V_{c-r} = 0.244 f_c^{.2/3} \frac{(1 + \sqrt{100 p_w})(1 + 3.33 r/d)}{1 + (a/d)^2} bd \quad (1)$$

はじめに、実験で用いた載荷点と支点の支圧板幅(r_l , $r_s=65\text{mm}$, 150mm)を式(1)の r として得た V_{c-r} と、式(1)と比較するため、せん断耐力(V_{exp} =ピーク荷重の 1/2)を求めた。そして、それらの比を求めることで、実験値と計算値の比較を行った。表-4 に、比較結果を示す。この表から、せん断耐力の実験値は、載荷点の支圧板幅を用いた計算値に近い値を示すことがわかる。

次に、実験によって得られたせん断耐力に相当する同一の支圧板幅を求めるため、式(1)に実験値を代入して計算を行った。その同一の支圧板幅を r_{inv} とし、 r_l および r_s との比較も行った。表-5 に、それらの結果をまとめる。供試体 L65 では r_{inv}/r_l と r_{inv}/r_s の誤差の絶対値はほぼ同程度である。一方、供試体 L150 では、 r_{inv} の値は支点における支圧板幅の値よりも、載荷点における支圧板幅の値により近くなっている。このことから、載荷点における支圧板幅が、支点における支圧板幅よりも、RC デ

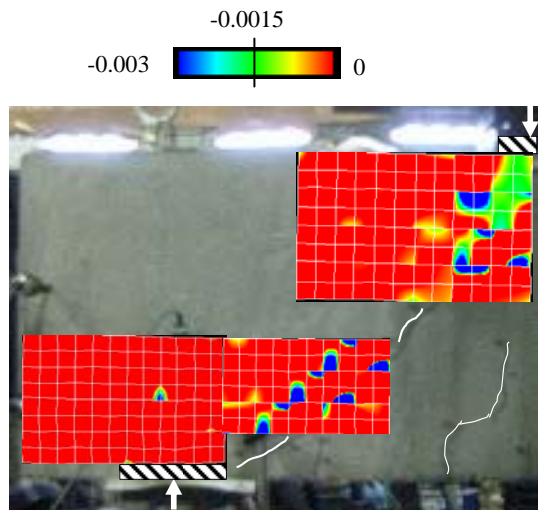


図-6 供試体 L65 の鉛直方向ひずみ分布
(ピーク荷重の約 90%時)

ープビームのせん断耐力に影響することが予想される。

5. 画像解析結果

5.1 画像解析による評価項目

RC ディープビームのせん断圧縮破壊では、圧縮ストラットが載荷点と支点の支圧板を結ぶように形成されることが、既往の研究により報告されている^{1),2),3)}。そのため、2.3 節で述べたように、画像解析によってコンクリートの鉛直方向のひずみを算出した。

5.2 鉛直方向のひずみ分布

図-6 および図-7 に、それぞれ供試体 L65 と供試体 L150 に対する、ピーク荷重の 90% の段階における画像解析の結果を示す。背景の供試体は、その荷重段階に対応しており、観察されたひび割れが白線で描かれている。また、図-6 および図-7 における、図-3 (2) の撮影範囲は、ひずみの測定精度が不十分であると判断したため、結果の表示を除外した。図中において、格子点はターゲットの位置を表している。また、各デジタルカメラの撮影範囲の鉛直方向ひずみ分布図は、圧縮側を負の値として表示している。

図-6 で、供試体 L65 の載荷点付近に着目すると、ひび割れに沿って圧縮ひずみが卓越して発生し、分布している様子が明らかである。また、局所的に-0.003 以下のひずみが測定されている。支点部内側(図-3 (4) の撮影範囲)でも同様であった。支点部(図-3 (3) の撮影範囲)では、撮影範囲の中央部で圧縮側のひずみが発生していることを確認できる。しかし、支圧部直上で圧縮側のひずみが計測されていないため、画像解析精度に関する検討を含めた議論が今後必要になると考えられる。

次に、図-7 で、供試体 L150 の載荷板付近に着目する。

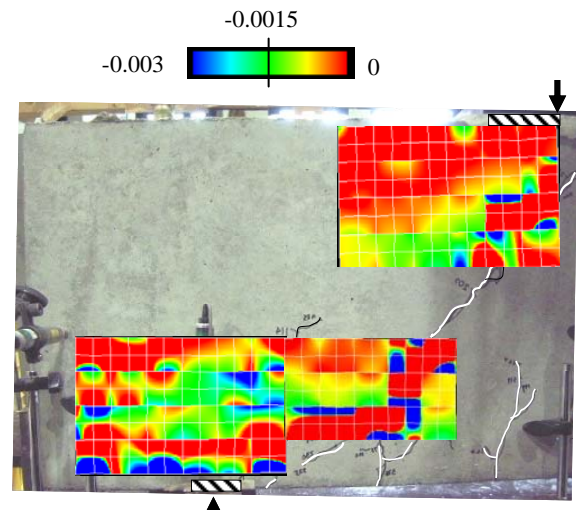


図-7 供試体 L150 の鉛直方向ひずみ分布
(ピーク荷重の約 90%時)

ピーク荷重の約 90% の段階において、鉛直方向のひずみが発生し、帯状に分布する様子が確認することができた。供試体 L65 と比較しても、水平方向に拡がって分布している。特に、支点付近に着目すると、支点直上では、-0.003 以下を示す圧縮ひずみが発生していることが確認できる。

以上のことから、供試体 L150 では、支点付近と載荷点付近の撮影範囲における、支圧部と載荷部を結ぶ直線方向へ圧縮ひずみの分布を定性的に観察できた。

5.3 載荷板幅の変化によるストラット幅の変化

画像解析により、主圧縮ひずみの値も得られる。それらを用いて、供試体 L65 と L150 がそれぞれ有する圧縮ストラット幅の比較を行った。今回の研究では、4 章の結果から、載荷点における支圧幅とせん断耐力の相関を予想した。また、支点部では特に L65 で画像解析精度に問題が残っていると考えたため、載荷点付近の圧縮ストラットについて検討する。

圧縮ストラット幅の算出に当たっては、圧縮ストラットが十分に形成されていると考えられる荷重段階を評価の対象とすることを考えた。しかし、ピーク荷重時ではコンクリートのはく離が進んでいることが考えられるため、ピーク荷重の約 90% で形成されていたストラットの幅を評価した。図-8 に、載荷点付近の撮影画像(図-3 中の(1)の撮影範囲)および着目した主圧縮ひずみの算出位置を示す。算出位置は、載荷部直下で応力が集中していることを考え、載荷部から供試体高さ方向に十分離れたところを設定することにした。そこで、供試体の上縁から 140mm の高さを評価対象とした。また、水平右向きを正として、載荷点における支圧板の中心を基準に-5mm から-235mm の位置で、主圧縮ひずみの値をプロットした。

(1) 供試体 L65

はじめに、本研究で言及する圧縮ストラット幅の定義について述べる。供試体のある高さにおいて、画像解析で形成された各要素の主圧縮ひずみの値を、供試体水平方向にプロットする。そこで、連続して圧縮側にひずみが分布している幅を求め、その幅をストラット幅とする。

図-9 に、主圧縮ひずみをプロットした図を示す。なお、図-8(a)に示すように、荷重点から水平方向に-45mm から-75mm の区間(図中の丸印)に斜めひび割れが進展しており、解析ではこの区間で圧縮側に顕著なひずみが計算された。そのため、その区間の主圧縮ひずみのプロット点は図-9 中に示していない。荷重点の支圧板中心から-5mm の位置(プロット点の端点)で -160×10^{-6} のひずみが計算されたため、図中の楕円部内で示すように、荷重点の支圧板中心から-10mm のプロット点と、-5mm のプロット点を結ぶ直線を延長し、横軸との交点を圧縮ストラットの端点とした。この結果、ストラット幅は約 215mm となった。

(2) 供試体 L150

図-10 に、供試体 L150 についての主圧縮ひずみ分布を示す。図-8(b)に示すとおり、(1)と同様の理由により荷重点から水平方向に-45mm から-75mm の区間の主圧縮ひずみのプロット点は図中で示していない。撮影範囲の水平方向全域で主圧縮ひずみが計測されたため、この区間全域が圧縮ストラット内にあると考えられる。そのため、240mm 以上のストラット幅が認められる。すなわち、供試体 L65 と比較すると、荷重点における支圧板幅が広がることにより、荷重点付近の圧縮ストラットの幅が広がっており、圧縮ストラットの形状の変化が認められる。すなわち、供試体 L65 と L150 でせん断耐力が変化していたが、これはこのストラット形状の変化に起因した現象であることが予想される。

5.4 荷重に伴う圧縮ストラットの主圧縮ひずみの増加

次に、荷重試験中の荷重の増加に伴う、圧縮ストラット内の主圧縮ひずみの変化を算出することを試みた。斜めひび割れが通過している箇所では、画像解析で得た圧縮側ひずみの値が顕著になる。そのため、算出に当たっては斜めひび割れから水平方向に離れた要素を考える。そこで、図-9 と図-10 に示すように、荷重点における支圧板中心から-85mm と-215mm の区間に着目し、荷重に伴う主圧縮ひずみの平均値の変化に着目した。供試体上縁からの位置は、5.3 節と同様に 140mm である。図-11 に、供試体 L65 と供試体 L150 の結果を示す。

目視により観察した斜めひび割れ発生荷重は、供試体 L65 と L150 で、それぞれ 186kN と 202kN であった。供試体 L65 では、186kN を超えた後、ほぼ線形に荷重が増加していることがわかる。約 340kN 付近(ピーク荷重荷

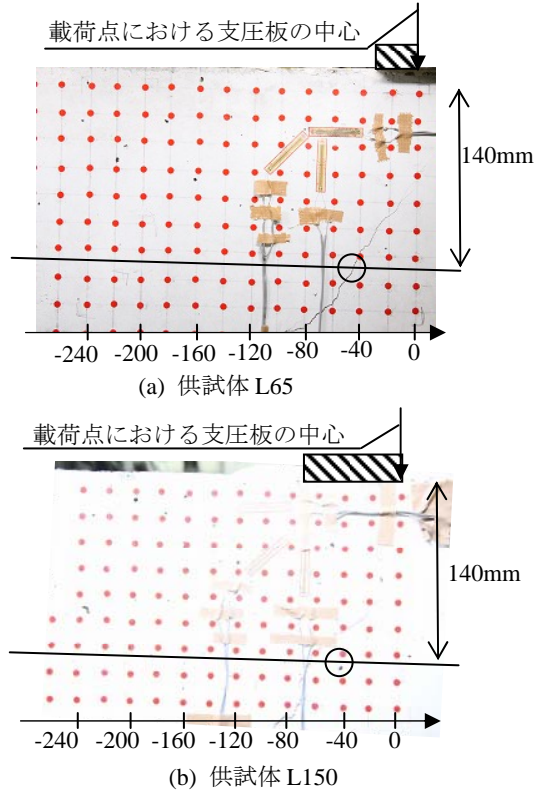


図-8 主圧縮ひずみ算出高さ(ピーク荷重 90%時)

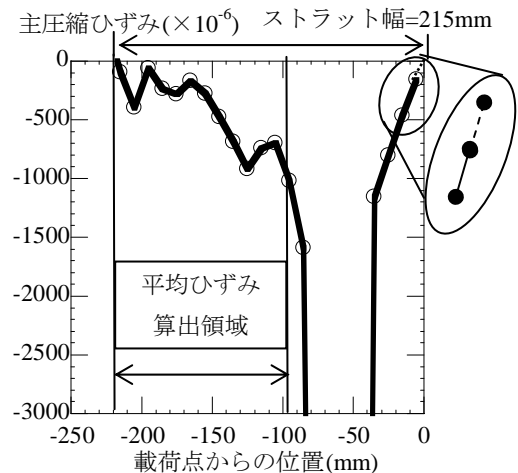


図-9 供試体 L65 の主圧縮ひずみ分布

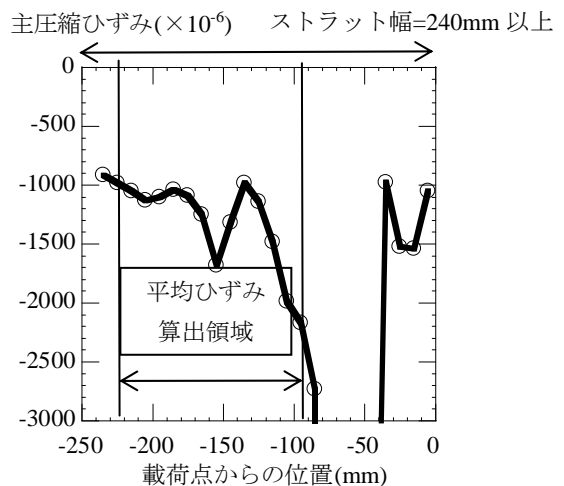


図-10 供試体 L150 の主圧縮ひずみ分布

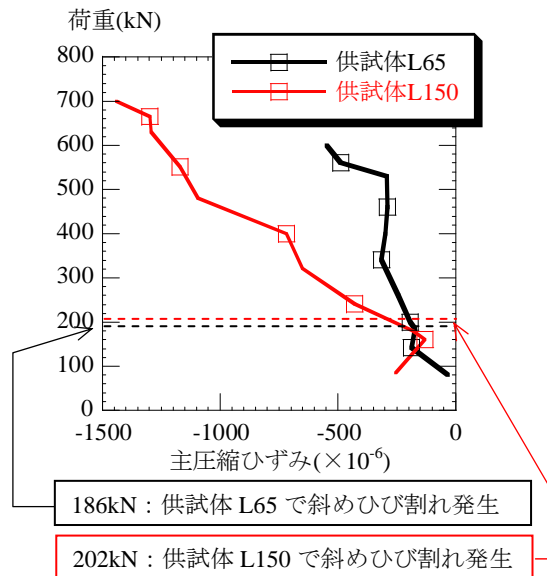


図-11 各荷重段階における平均主圧縮ひずみの変化

重の約 50%)から 530kN 付近(ピーク荷重の約 80%)まで、主圧縮ひずみの平均値の変化は 20×10^{-6} 程度であり、顕著な増加は認められなかった。すなわち、ピーク荷重の 50%から 80%までの段階では、平均主圧縮ひずみがほぼ一定であったと言える。ピーク荷重の 80%を超えた段階では、再び平均主圧縮ひずみが増加した。供試体 L150 に関しては、斜めひび割れ発生荷重に達する以前からひずみが増加していることが確認できる。その後はピーク荷重の 90%の段階までほぼ一定の割合でひずみが増加し続けた。

以上の結果から、主圧縮ひずみの平均値を算出した領域では、主圧縮ひずみは斜めひび割れが発生する時点で顕著になり、その後は荷重の増加に伴い単調に増加する。圧縮ストラット内には主圧縮ひずみが集中することを踏まえると、圧縮ストラットは斜めひび割れ発生後に顕著に形成されていると言ったことがわかる。

6. 結論

本研究では、載荷点と支点で支圧板幅が異なる RC ディープビームに対して静的載荷試験を行った。以下、今回の研究により得られた知見をまとめる。

- 1) 載荷実験を行った結果、既往のせん断耐力式で本研究における供試体 L65 と L150 のせん断耐力を評価したところ、載荷点における支圧板幅を用いて計算した値と実験値が近い値を示した。このことから、載荷点における支圧板幅とせん断耐力との相関の可能性が認められた。
- 2) 画像解析によって得られた鉛直方向のひずみを二

次的に示した。この図を用いて、供試体 L150 では、圧縮ひずみが支点と載荷点を結ぶ直線上に卓越して発生している様子が確認できた。

- 3) 載荷点における支圧板付近の主圧縮ひずみに着目し、供試体上縁から 140mm の高さで圧縮ストラット幅の評価を試みた。その結果、供試体 L65 では 215mm、供試体 L150 では 240mm 以上の圧縮ストラット幅を有していた。すなわち、載荷板幅が異なることで、ストラットの形状が変化し、せん断耐力も変化していることが認められた。
- 4) 画像解析により得られた要素のひずみを用いて、特定のある区間で平均した主圧縮ひずみを、荷重段階で評価した。その結果、斜めひび割れ発生荷重付近から圧縮ストラット内のひずみの増加が顕著になっており、その後は単調に増加することが確認された。

謝辞: 本研究の一部は、平成 21 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)課題番号 9206050)によって実施しました。また、高周波熱錬(株)には、軸方向鉄筋を提供して頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 二羽淳一郎: FEM 解析を用いたディープビームのせん断耐力算定式, 第 2 回 RC 構造のせん断問題に関するコロキウム論文集, pp.119-128, 1983.10
- 2) 幸左賢二, 脇山知美, 西岡 勉, 小林 寛: せん断スパン比に着目したディープビームの破壊形態に関する実験的検討, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.798-814, 2006
- 3) 例えば渡邊真史, 田中泰司, 下村 匠: ディープビームのせん断強度に関する寸法効果と耐力評価法の提案, 土木学会論文集, Vol.64, No.4, pp.683-697, 2008.12
- 4) 平野貴規, 中村 光, 斉藤成彦, 檜貝 勇: 一軸圧縮応力を受ける拘束コンクリートの破壊性状の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.145-150, 2002
- 5) 東 広憲, 渡辺 健, 三木朋広, 二羽淳一郎: 画像解析を用いた鉄筋コンクリートはりの破壊性状の予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.793-798, 2008
- 6) 酒井理哉ほか: 画像計測を利用した鉄筋コンクリートひずみ計測の試み, 土木学会第 56 回年次学術講演会, CS3-002, pp.164-165, 2001