

## 論文 高強度コンクリートはり部材の寸法効果に関する実験的検討

藤田 学\*1 大館 武彦\*2 安田 有\*3 佐藤 良一\*4

**要旨**：高強度コンクリートはり部材のせん断破壊機構を明らかにするため、コンクリート圧縮強度  $f'c$  ( $35\text{N/mm}^2 \sim 100\text{N/mm}^2$ ) および有効高さ  $d$  ( $25\text{cm} \sim 100\text{cm}$ ) をパラメータとした、せん断補強鉄筋のないRC単純はり部材 ( $a/d=3$ ) のせん断破壊実験を行い、せん断強度の寸法効果について検討を行った。その結果、せん断強度の寸法効果の割合は、コンクリート圧縮強度に依存し、圧縮強度ごとに異なり高強度になるほどその低下率が大きくなることが確認された。

**キーワード**：高強度コンクリート、寸法効果、せん断強度、圧縮強度

## 1. はじめに

高強度コンクリート部材の特徴を活かした設計を行うには、その破壊形態、耐力を的確に把握する必要があるが、特に、せん断破壊耐力に関しては、寸法効果などそのメカニズムが明らかになっていない課題もある。

せん断補強鉄筋のないRCはり部材のせん断強度における寸法効果は、従来からも確認されており、土木学会コンクリート標準示方書にも既往の内外の実験データから導かれた寸法効果を考慮したせん断耐力算定式が導入されている。しかしながら、高強度コンクリートを用いた場合には、そのせん断耐力算定値をそのまま適用すると、せん断耐力を過大評価する危険性があるという報告もなされている。<sup>1)</sup>一方、解析的なアプローチにおいても幾つか破壊力学に基づく数値解析により、せん断強度の寸法効果を明らかにしようとする研究が進みつつあるものの、ひびわれを含むコンクリートの力学特性のモデル化など、まだ解析的にも統一された見解は示されていない。

これまでのせん断強度の研究では、せん断強

度と部材寸法の関係やせん断強度とコンクリート圧縮強度の関係など個別に扱ったものは見られるものの、両者の相互関係を対象とした研究はあまりなされていない。そこで本研究では、せん断強度と部材寸法との関係を圧縮強度の視点から、また、せん断強度と圧縮強度との関係を部材寸法の視点からとらえ、高強度コンクリートはり部材のせん断特性を明らかにするため、コンクリート圧縮強度（高強度コンクリートの領域まで網羅）および部材有効高さをパラメータとした、せん断補強鉄筋のないRC単純はり部材のせん断破壊実験を行い、寸法効果について検討を行った。

## 2. 実験概要

試験体形状寸法を表-1、図-1に示す。試験体番号のL, M, Uはコンクリート圧縮強度のパラメータを示す。試験体は、せん断スパン比 ( $a/d=3$ ) および引張鉄筋比 ( $Pt=1.5\%$ ) を一定とし、コンクリート圧縮強度  $f'c$  および有効高さ  $d$  をパラメータとした。なお、高強度コンクリートの製作には高性能AE減水剤、シリカフ

\*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

\*3 住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

\*4 宇都宮大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

ュームを使用した。引張鉄筋にはSD345を使用し、各諸元は、降伏強度 388N/mm<sup>2</sup>、引張強度 555N/mm<sup>2</sup>およびヤング係数 196KN/mm<sup>2</sup>である。各試験体とも鉄筋径の合計と部材断面幅との比をほぼ同値に設定しており、引張鉄筋端部には直角フックを付けている。また、せん断補強筋を配置せず、端部のみ引張鉄筋の拔出し防止のスターラップを配置した。載荷スパンは、有効高さdに等しくした。

### 3. 実験結果

表-2に、実験結果と土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式（以下、示方書式）およびその基礎となった二羽ら<sup>2)</sup>のせん断耐力算定式（以下、基本式）による計算値を示す。式中のf'c'には、実験時のコンクリートの

表-1 試験体寸法

試験体番号	全長 L cm	支間長 L1 cm	L2 cm	高さ H cm	幅 b cm	せん断スパン a cm	有効高さ d cm	引張鉄筋比 Pt %
L-25-3	275	175	50	30	15	75	25	1.53
L-50-3	450	350	50	60	15	150	50	1.53
L-100-3	900	700	100	113	35	300	100	1.36
M-25-3	275	175	50	30	15	75	25	1.53
M-50-3	450	350	50	60	15	150	50	1.53
M-100-3	900	700	100	113	35	300	100	1.36
U-25-3	275	175	50	30	15	75	25	1.53
U-50-3	450	350	50	60	15	150	50	1.53
U-100-3	900	700	100	113	35	300	100	1.36

圧縮強度を用いた。なお、本実験ではコンクリート圧縮強度および有効高さの相違にかかわらず、破壊形態は、全試験体ともタイドアーチを形成することなく斜め引張破壊であった。また、せん断破壊時における各試験体の引張鉄筋は、降伏ひずみ（1980μ）には達していなかった。

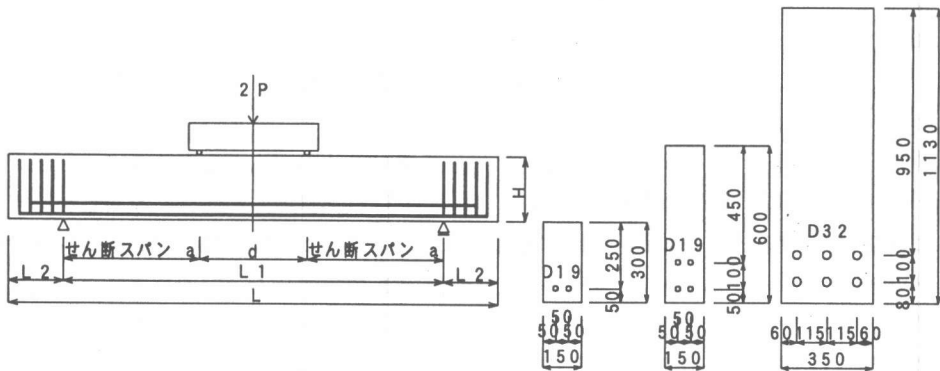


図-1 試験体形状

表-2 実験結果

試験体番号	実験時コンクリート強度		実験結果			示方書式(1)		基本式(2)	
	圧縮強度 f <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	引張強度 f <sub>t</sub> N/mm <sup>2</sup>	せん断力 V <sub>c</sub> KN	τ <sub>u</sub> V <sub>c</sub> /bd N/mm <sup>2</sup>	変位 δ mm	せん断力 V <sub>c</sub> KN	τ <sub>u</sub> V <sub>c</sub> /bd N/mm <sup>2</sup>	せん断力 V <sub>c</sub> KN	τ <sub>u</sub> V <sub>c</sub> /bd N/mm <sup>2</sup>
L-25-3	36.1	2.87	43.2	1.15	4.13	40.4	1.08	49.1	1.31
L-50-3	36.1	2.87	79.1	1.05	6.53	67.9	0.91	82.6	1.10
L-100-3	34.3	2.65	307.5	0.88	10.27	252.1	0.72	306.7	0.88
M-25-3	67.1	3.78	51.5	1.37	4.80	49.6	1.32	60.4	1.61
M-50-3	67.1	3.78	86.9	1.16	6.84	83.5	1.11	101.6	1.35
M-100-3	56.9	3.89	304.1	0.87	9.39	298.3	0.85	363.0	1.04
U-25-3	97.5	4.35	55.9	1.49	3.61	56.2	1.50	68.4	1.82
U-50-3	97.5	4.35	86.4	1.15	6.76	94.6	1.26	115.0	1.53
U-100-3	99.1	4.57	270.2	0.77	9.45	359.0	1.03	436.8	1.25

$$\text{示方書式: } V_c = 0.2 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot \sqrt{100p} \cdot \sqrt{(100/d)} \quad (1)$$

$$\text{基本式: } V_c = 0.2 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot \sqrt{100p} \cdot \sqrt{(100/d)} \cdot (0.75 + 1.4/(a/d)) \quad (2)$$

図-2に、斜め引張破壊時におけるコンクリートせん断強度 $\tau_u (=V_u/b \cdot d)$ と有効高さ $d$ に関する実験結果を示す。なお図中には、せん断スパン比および引張鉄筋比が本実験とほぼ等しい建設省土木研究所の実験結果<sup>3)</sup>( $a/d=3$ ,  $P_t:1.20 \sim 1.35\%$ ,  $f'_c: 20.6 \sim 27.3\text{N/mm}^2$ ,  $d: 30 \sim 200\text{cm}$ )も合わせて示している。いずれの強度の試験体についても部材有効高さ $d$ が増加するにつれて、せん断強度 $\tau_u$ が低下しており、明らかに寸法効果の存在が確認された。

図-3に、圧縮強度別に、有効高さ $d=25\text{cm}$ の試験体のせん断強度 $\tau_u$ に対する各試験体のせん断強度 $\tau_u$ の比率 $R_d$ と有効高さ $d$ との関係を示す。図中には、実験結果と基本式(あるいは示方書式)による計算結果を示している。なお基準とした有効高さ $d=25\text{cm}$ の試験体の $\tau_u$ は、(1)式の計算値に対しては99~107%, (2)式の計算値に対しては82~87%の範囲にありバラツキの範囲内と思われる。実験結果はコンクリートの圧縮強度 $f'_c$ が高くなる(Uシリーズ)にしたがい $R_d$ はより低下し、寸法効果が大きくなる傾向を示している。特に試験体Uでは有効高さ100cmで約50%の減少となっている。

図-4は、有効高さ別に、圧縮強度 $f'_c$ が約 $35\text{N/mm}^2$ レベルである試験体Lのせん断強度 $\tau_u$ に対する各試験体のせん断強度 $\tau_u$ の比率 $R_f$ と圧縮強度 $f'_c$ との関係を示す。なお基準とした試験体Lの $\tau_u$ は、(1)式の計算値に対しては107~122%, (2)式の計算値に対しては88~100%の範囲にありバラツキの範囲内と思われる。 $R_f$ は有効高さが大きくなるほど低下し、かつ高強度になるほどその差は大きくなる傾向が確認された。有効高さ25cmの試験体の実験結果は、圧縮強度が増加するにつれて $R_f$ は増加しているが、その増加率は次第に低下しており、基本式に対しては、有効高さ15~30cmの試験体による松井らの実験、報告<sup>1)</sup>と同様に、圧縮強度 $f'_c$ が $70\text{N/mm}^2$ 付近まではほぼ対応しているものの $100\text{N/mm}^2$ 付近では下回る結果となった。これに対して、100cmの試験体では、逆に圧縮強度が

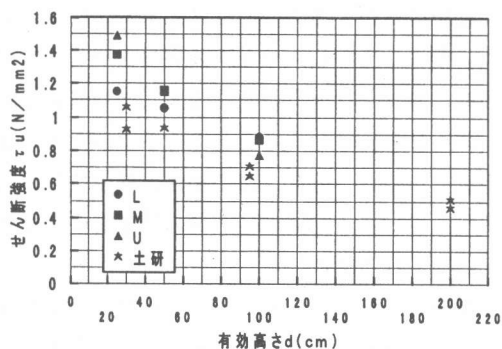


図-2 せん断強度と有効高さの関係

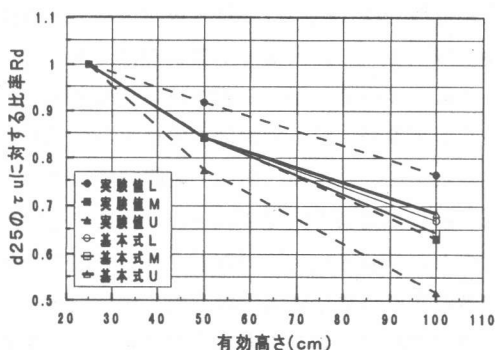


図-3 せん断強度比率 $R_d \sim$ 有効高さ

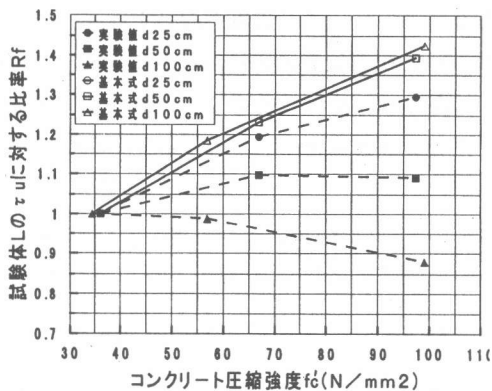


図-4 せん断強度比率 $R_f \sim$ 圧縮強度

増加するにつれて $R_f$ は減少する結果が得られた。また、有効高さが50cm以上の試験体では、圧縮強度 $f'_c$ が $70\text{N/mm}^2$ ですでに基本式をかなり下回る結果となった。

本実験の限られたデータの範囲内においては図-3および図-4から、高強度になるほど、ま

た有効高さが大きくなるほど、基本式に対してズレを生じており、せん断強度の寸法効果の割合は、コンクリートの圧縮強度ごとに異なり、しかも高強度になるほどその低下率が大きくなることが確認された。この特性の普遍性については、さらに広範囲なデータの蓄積を行い検討を進めていきたい。

図-5に破壊時におけるひびわれ発生状況を示す。有効高さが大きい試験体では、高強度になるほど、引張鉄筋位置でのひび割れ分散性はよいが、次第にひび割れがの局所化が生じ、中立軸位置では逆にひび割れ本数が少なくなる傾向が観察された。破壊に至る状況は、発生していた斜めひび割れが、引張鉄筋と交差する位置から引張鉄筋に沿って端部方向に水平に進展するとともに、交差部において鉛直方向に開口し、かつ部材が鉛直方向にずれると同時に、それが起点となり載荷点付近のコンクリートまで一気に貫通する急激な破壊となった。破壊直後の斜めひび割れは、鉛直方向に大きくずれ、水平方向のずれはほとんど確認されなかった。これらは、強度、寸法に関わらず全試験体に共通した現象であった。この鉛直方向のずれは、斜めひび割れと引張鉄筋の交差部の鉛直方向のずれとほぼ等しく、引張鉄筋のリブによるコンクリートの割裂作用とダウエル力によるかぶりコンクリート

リートを直接裂く作用によって生じたものと推察される。

全試験体の破壊ひび割れの全断面の図心位置における角度は水平面に対して20~45度の範囲で、高強度になるにしたがい大きくなっている。また、ひび割れが水平に進展する起点は、有効高さが大きくなるほど、載荷点側に寄る傾向が観察された。

#### 4. 解析結果

試験体U50-3について、市販の汎用プログラム<sup>4)</sup>を用いて分布ひびわれモデルによる非線形FEM解析を行った。

1要素の大きさは、有効高さ25cmの試験体U-25-3については2.5cm×2.5cm、有効高さ50cmの試験体U-50-3については5.0cm×5.0cm、有効高さ100cmの試験体U-100-3については10.0cm×10.0cmとした。ひび割れ発生後は固定ひびわれモデルとした。破壊エネルギーGFには、本実験とほぼ同等の強度の試験例<sup>4)</sup>を参考として2N/cmを用いた。また、せん断低減係数は0.1で一定とした。なお、引張鉄筋とコンクリートの界面には、コンクリート-鉄筋の応力伝達として、4節点アイソパラメトリック板ボンド要素を用いた。ボンド要素のせん断応力~せん断歪関係は、滑りの発生とともに応力解放が成され、以後は歪みのみ増加し続けるモデルとした。ボン

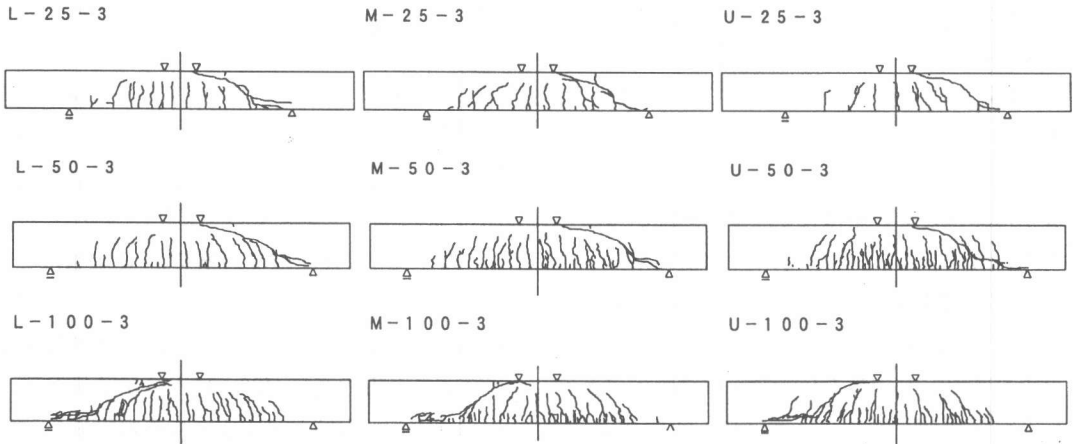


図-5 破壊時におけるひび割れ

ド要素の厚みは0.1cmとし、最大付着応力度および初期の付着剛性には高強度コンクリートの研究例<sup>5)</sup>を参考として、それぞれ7N/mm<sup>2</sup>、900N/mm<sup>2</sup>/mmを用いた。解析上仮定した各材料物性のモデルを図-6に示す。荷重の載荷は強制変位で与え、収束計算にはNewton-Raphson法を用い、収束判定は外力と内力について各々得られるNorm Vectorの比が1/1000以下とした。

解析結果を図-7に示す。図-7は実験結果および解析結果とも実験開始直前を原点としている。図中、解析2では試験体の自己収縮を含む乾燥収縮を考慮するため、実験開始時までには発生している鉄筋の拘束ひずみと等しくなるよう、便宜上コンクリートに温度荷重を先行荷重として与えているが、解析1では考慮していない。なお、本解析ではクリープ等は考慮していない。また、解析3は、実験で観察された引張鉄筋の急激な付着割裂を表現するため、便宜上、引張鉄筋端部に付着劣化区間を想定した。すなわち実験結果より、支点から支間中央寄りに有効高さd離れた位置から支点までの区間を付着劣化区間と仮定し、解析2のコンクリートと鉄筋の付着要素の最大付着応力度7N/mm<sup>2</sup>を、その

区間のみ0.5N/mm<sup>2</sup>に低下させ、さらに滑りの発生とともに0.05N/mm<sup>2</sup>まで応力を解放させた。

荷重～変位曲線については、自己収縮および乾燥収縮を考慮する(解析2, 3)と、実験結果により整合することが確認された。ただし付着割裂を想定した解析3においても、斜め引張破壊による急激な荷重低下の再現は不可能であった。なお、ひび割れ図は、実験の破壊荷重(約173KN)とほぼ等しい荷重時のものであり、比較的实验結果に整合している。

図-8には試験体U-25およびU-100について解析3の結果と実験結果を示す。

本解析3では、引張鉄筋の付着割裂が急激な斜め引張破壊の主たる要因の一つと考え、実験で観察された引張鉄筋の急激な付着割裂を表現するため、引張鉄筋端部に付着劣化区間を想定したが、急激な荷重低下の再現は不可能であった。引張鉄筋端部の付着要素の最大せん断力や低下区間の設定など定量的な評価が不十分であったが、今後さらに、他の要因も含めて、せん断強度の寸法効果をとらえていくことが重要と思われる。

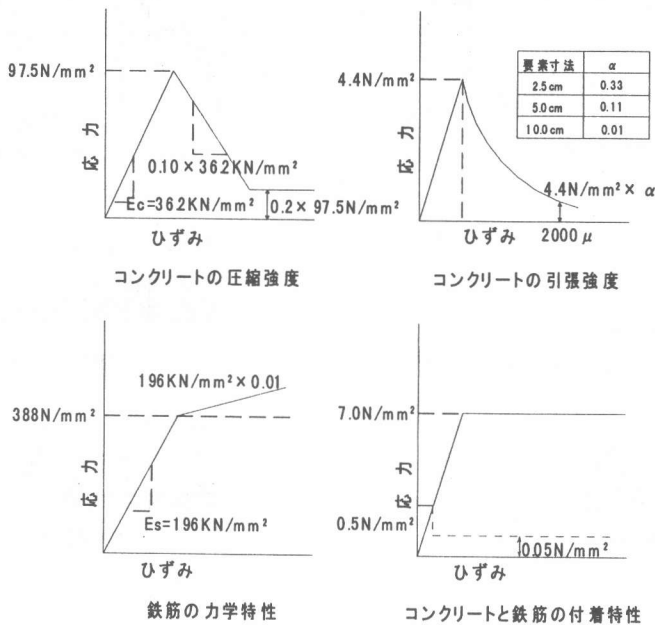


図-6 材料物性モデル

5. まとめ

(1)せん断強度の寸法効果の割合は、コンクリートの圧縮強度に依存し、圧縮強度ごとに異なり高強度になるほどその低下率が大きくなる。

(2)斜め引張り破壊は、斜めひび割れが引張鉄筋との交差部から端部に向かって水平に進展するのが起点となって生じる。

(3)引張鉄筋の付着割裂が、急激な斜め引張破壊の主たる要因の一つと考えられ、その定量的な評価法の確立が今後の課題と考えられる。

参考文献

1)松井祐一ほか：超高強度コンクリートいたR Cはり部材のせん断耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No. 2,

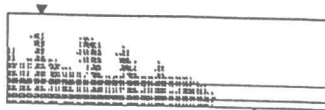
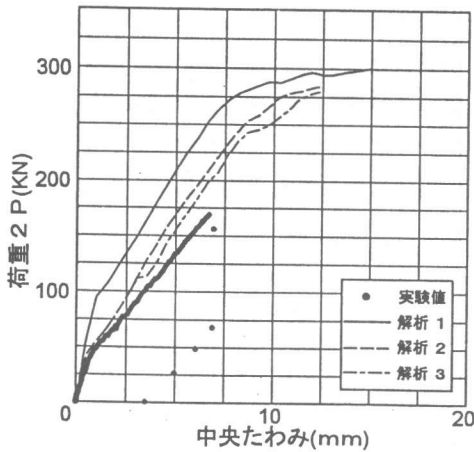
PP. 655-660, 1995

2)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，土木学会論文集第372号，V-5, PP. 167-176, 1986

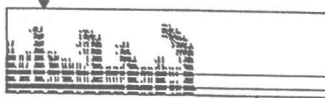
3)河野広隆ほか：鉄筋コンクリート橋脚のせん断力照査におけるコンクリート負担分に関する検討，土木技術資料39-2, PP. 38-43, 1997

4)例えば鳥取清一ほか：連続繊維補強材を用いたコンクリートはりのせん断抵抗挙動，コンクリート工学年次論文報告集vol117, No2, PP. 959-964, 1995

5)橋高義典ほか：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析，日本建築学会構造論系論文集第453号，PP. 15-25, 1993. 11

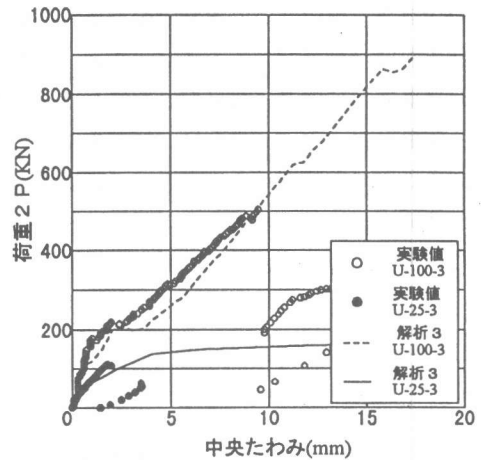


解析2 載荷荷重 2 P 171.5KN

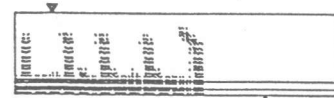


解析3 載荷荷重 2 P 170.6KN

図-7 解析結果(U-50-3)



載荷荷重 2 P 113.8KN



載荷荷重 2 P 503.1KN

図-8 解析結果(U-25-3, U-100-3)