

論文 RC ディープビームのせん断強度に関する寸法効果

脇山知美*¹・幸左賢二*²・内田悟史*³・西岡勉*⁴

要旨:せん断スパン比(a/d)が 1.5 のディープビーム部材における寸法効果の影響を明らかにするため,有効高さ(300mm~1400mm)をパラメータとした実験を実施し,ダミー鉄筋ならびにアクリルバーを用いて供試体内部におけるひずみを詳細に測定した。その結果,相対的なストラット幅の減少により,供試体寸法が大きくなるほど相対的なせん断耐力が低下する寸法効果が確認された。

キ-ワ-ド:ディープビーム,寸法効果,ストラット幅,エネルギー

1. はじめに

せん断スパン比(以下,a/d)が 2.5 以上の通常の RC 梁部材では,部材寸法の増加に伴いせん断強度が低下する寸法効果が確認されており,これまでのせん断耐力算定式における寸法効果の影響は,通常の梁部材の載荷試験をもとに考慮されている。

一方,a/d が 2.5 以下のディープビーム部材における寸法効果については,Walraven ら¹⁾が a/d=1.0 を対象に,有効高さ d を 160~930mm と変化させた実験を実施している。その結果,大型供試体ほどひび割れの進展が早くなることが指摘されているが,ひずみ計測等を用いた内部応力の把握は行われておらず,また,実構造物で使用例が多く,損傷形態も異なる a/d が 1.5 付近の寸法効果の検討は現在まで極めて少ない。そこで本研究では,a/d=1.5 を対象に,d を 300mm から実大寸法である 1400mm に変化させた実験を実施し,供試体内部の鉄筋やコンクリートのひずみ等の測定結果を用いて寸法効果に関する評価を行った。

結果を示す。本実験では,a/d (0.5, 1.0, 1.5),せん断補強筋比 Pw (0.0, 0.4, 0.8%),有効高さ d (300~1400mm)をパラメータとした計 25 体の供試体実験を実施したが,ここでは実構造物で使用例が多い a/d=1.5 の 19 体に着目し考察する。

図-1 に配筋例および断面形状を示す。図中の左側に Pw=0.0%,右側に Pw=0.4, 0.8%の配筋状況を示している。なお,せん断補強鉄筋を配置しない Pw=0.0%では,鉛直方向のひずみ計測の

表-1 供試体諸元

供試体No.	せん断スパン比 a/d	有効高さ d (mm)	せん断補強鉄筋比 Pw(%)	主鉄筋比 Pt (%)	圧縮強度 f'c (N/mm ²)	破壊パターン		
B-10.1	1.5	300	0.0	2.02	37.0	パターン1		
B-10.1R				2.02	42.3	パターン2		
B-10				2.02	29.2	パターン1		
B-10R		400		2.02	23.0	パターン2		
B-10R2				2.02	37.0	パターン1		
B-10.2				2.02	37.0	パターン1		
B-10.2R		500		2.02	42.3	パターン2		
B-10.3				2.11	37.8	パターン2		
B-10.3R				2.11	31.2	パターン2		
B-10.3R2		600		2.11	37.0	パターン1		
B-13				2.07	31.6	パターン2		
B-13R				2.07	24.0	パターン2		
B-14		1000		1.99	31.0	パターン2		
B-15				1.99	27.0	パターン2		
B-16				2.05	27.3	パターン2		
B-11		400		800	0.4	2.02	23.0	パターン1
B-17						1.99	28.7	パターン2
B-18						2.05	23.5	パターン2
B-12		400		1400		0.8	2.02	31.3

:土木研究所における実験

2. 実験概要

2.1 供試体形状

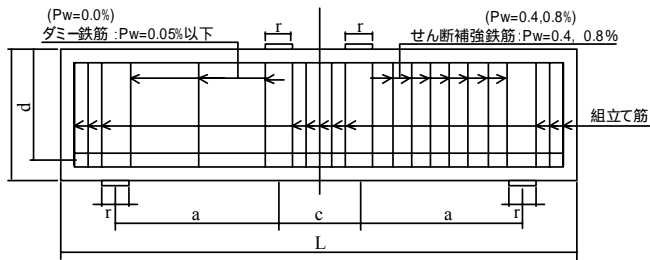
表-1 に実験供試体諸元および圧縮強度試験

*1 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (正会員)

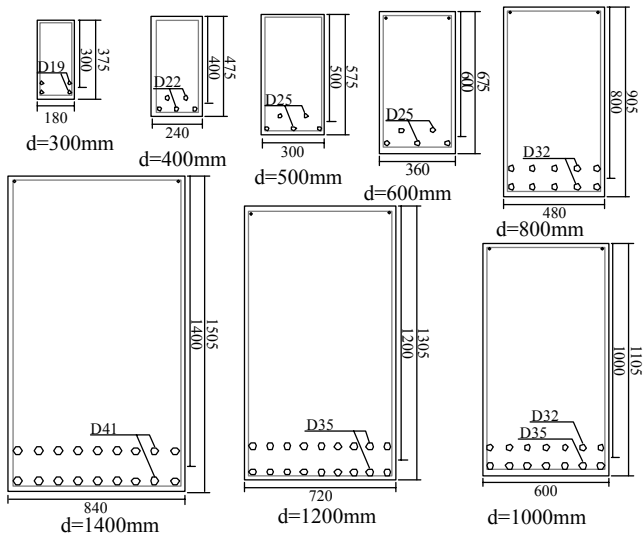
*2 九州工業大学 工学部 建設社会工学科教授 Ph.D. (正会員)

*3 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 (非会員)

*4 阪神高速道路株式会社 湾岸管理部 (正会員)



(a) 配筋例



(b) 断面形状

図 - 1 供試体形状

ため、せん断スパン内にダミー鉄筋($P_w=0.05\%$ 以下)を配置している。図 - 1(b)に示すように、本実験では断面形状を全て相似としている。主鉄筋比(約 2.0%)と最大骨材寸法 $D_{max}(20\text{mm})$ は一定としている。また、載荷板幅および支承板幅 r の影響がないように、 r/d は 0.25 と一定とした。

2.2 載荷方法および計測項目

載荷は土木研究所の 30000kN 載荷試験機および、九州工大の 2000kN 載荷試験機を用いて、2 点対称載荷による静的な単調載荷とした。主な測定項目は、供試体変位(下面鉛直方向、水平、載荷板位置)、鉄筋ひずみ(主鉄筋、せん断補強鉄筋、ダミー鉄筋)、アクリルひずみ、せん断変位、画像解析によるひび割れ幅測定の 5 項目である。

図 - 2 にひずみゲージおよび変位計の設置例を示す。主鉄筋のひずみは曲げ変形による水平方向の引張ひずみの測定を、せん断補強鉄筋とダミー鉄筋のひずみゲージは、ストラット部を中心に鉛直方向の引張ひずみの測定を目的とし測定を行った。なお、配筋に用いた鋼材は全て SD295 である。また、せん断変形測定のために供試体表面に 2 つの変位計をせん断スパン内に

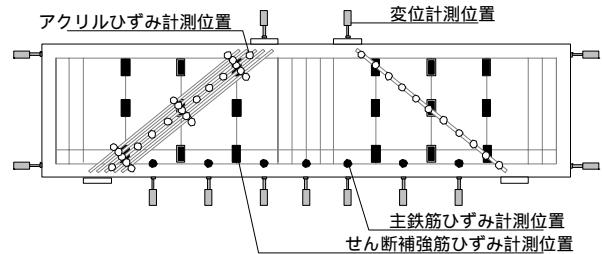


図 - 2 ひずみゲージ・変位計の配置例

対角に設置した。

2.3 斜めひび割れの測定方法

次に、画像解析によるひび割れ幅の測定方法を述べる。ひび割れ幅の計測にあたってはデジタルカメラ(600 万画素)を用いて、せん断スパン内の斜めひび割れを対象に、載荷板、ストラット中央、支承板の 3 箇所で計測を行った。カメラ一台の計測範囲は $200\text{mm}\times 300\text{mm}$ としている。デジタルカメラの画像は、画像解析ソフトを用いて、予め供試体に貼付した $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ の正方形を基準として、この長さを基にひび割れ幅を求めた。各供試体のひび割れ幅はひび割れ形状からひび割れが噛み合う 2 点を 1 組として、10mm 間隔で計 5 箇所計測を行い、平均値をとった。

3. 実験結果

3.1 $a/d=1.5$ の破壊

$a/d=1.5$ での破壊性状を分析したところ、図 - 3 に示すように、載荷板直下が圧壊する供試体(パターン 1)と、載荷板下から新たな割裂ひび割れが進展し圧壊が生じる供試体(パターン 2)がみられ、破壊が 2 つのパターンに分類できることが分かった。全供試体の破壊パターンの分類結果を表 - 1 に示す。また、以下に詳細な破壊性状を述べる。

(1) パターン 1(B-10R2 供試体)

図 - 3(a)にパターン 1 の破壊の代表例として B-10R2 供試体のひび割れ進展図を示す。B-10R2 供試体では、325kN でせん断ひび割れが発生し、図中に示すせん断ひび割れ停止位置までせん断ひび割れが進展する。その後、ひび割れ幅の拡大がみられ、775kN で図中に示す位置でダミー鉄筋が降伏し、781kN で載荷板直下の局所的な圧縮破壊に至った。また、破壊時にはひび割れ幅が 1.70mm と大きく開いていた。

(2)パターン 2(B-10.3 供試体)

図 - 3(b)にパターン 2 の破壊の代表例として B-10.3 供試体のひび割れ進展図を示す。B-10.3 供試体では、650kN でせん断ひび割れが発生し、破壊パターン 1 と同様に、図中に示すせん断ひび割れ停止位置までせん断ひび割れが進展する。その後、ひび割れ幅の拡大がみられ、図中に示す位置でダミー鉄筋が降伏し、1960kN で荷重板直下から割裂ひび割れが圧縮ストラット内に生じ破壊に至った。また、破壊時にはひびわれ幅が 2.50mm と大きく開いていた。

3.2 ひび割れの進展比較

寸法による破壊形態の相違を検討するために、 $d=1400\text{mm}$ の大型の供試体(B-16 供試体)と $d=400\text{mm}$ の小型の供試体(B-10R2 供試体)の比較を行った。図 - 4 にひび割れ進展の比較について示す。ここでは、荷重を bd で除し、同一平均せん断応力時で評価を行なった。ひび割れ測定は、図中にグレーで示すせん断スパン内の領域を対象として、ひび割れ本数、ひび割れ長さ、ひび割れ幅を計測した。ひび割れ本数は、下面から生じているひび割れを算出し、ひび割れ長さ、幅については部材寸法の影響を消去するため d で除し、長さの比で表している。

例えば、B-16 供試体の最大せん断応力時である $P/bd=5.1\text{N/mm}^2$ において、B-16 と B-10R2 の比較を行うと、ひび割れ長さ/ d は 12.17, 5.90, ひび割れ本数は 22, 7 本と B-16 のひび割れ進展が早いことが分かる。その後、B-10R2 供試体は $P/bd=8.1\text{N/mm}^2$ で破壊し、総ひび割れ長さ/ d が 11.75 と大型供試体である B-16 の最大荷重時と同程度まで進展した。以上より、相対的なひび割れ長さが同程度になるため、最終的な破壊性状は近似するものの、大型の供試体の方がひび割れの進展が早いといえる。

3.3 アクリルひずみの進展比較

前述のように、 $a/d=1.5$ では最終的には荷重板直下が破壊している。そこで、最終的に破壊する荷重板直下のひずみ分布を同一平均せん断応力時で比較した。比較した平均せん断応力は

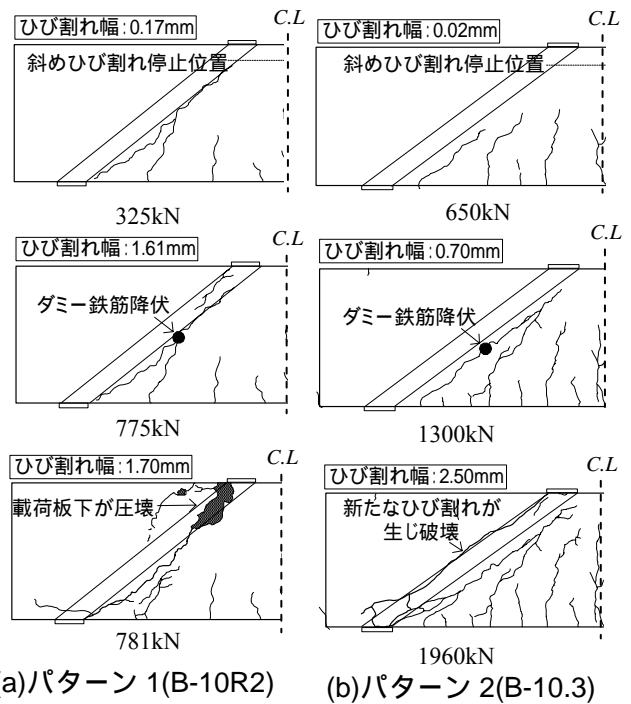


図 - 3 ひび割れ進展図

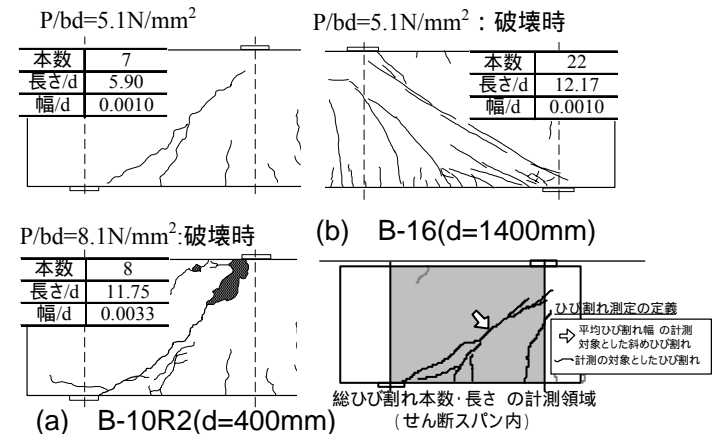


図 - 4 ひび割れ進展の比較

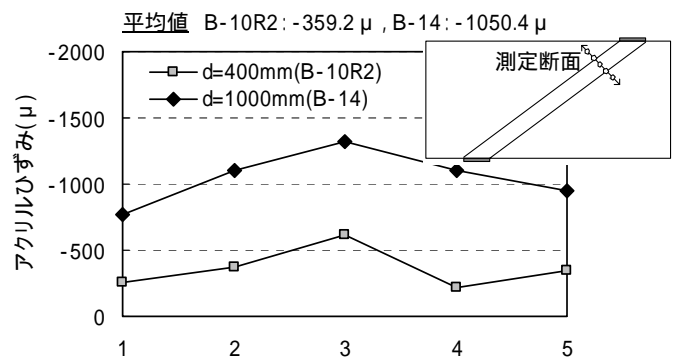


図 - 5 ひずみの進展比較

B-14 供試体の破壊時の $P/bd=6.2\text{N/mm}^2$ である。図 - 5 に荷重板下のひずみの分布を示す。図より、大型の供試体ではアクリルひずみの平均が -1050.4μ であったことに対し、小型の供試体では平均が -359.2μ と小さいことがわかる。以上より、アクリルひずみの進展もひび割れの進展と同様に、大型供試体の方が早いことが確認された。

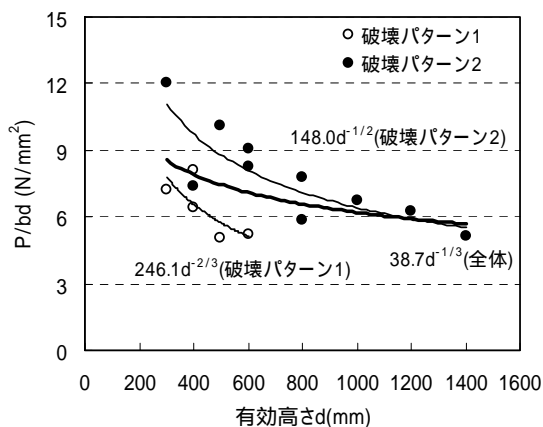


図 - 6 せん断強度比較

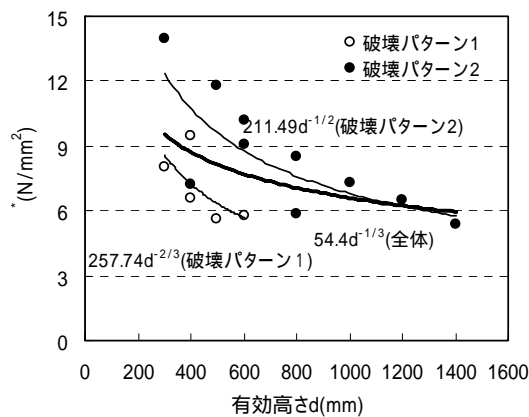


図 - 7 コンクリートの影響を補正したせん断強度

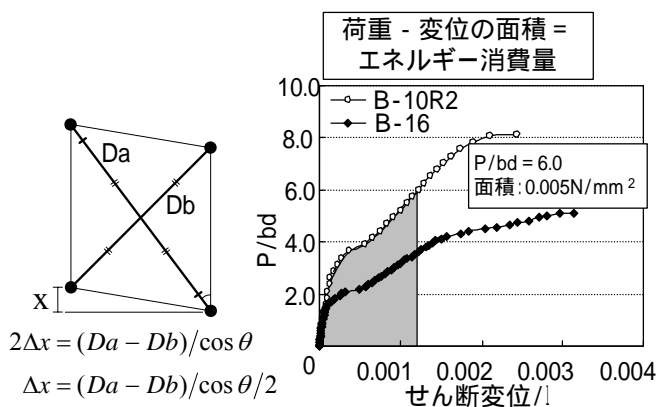


図 - 8 せん断変位算出法 図 - 9 エネルギーの算出法

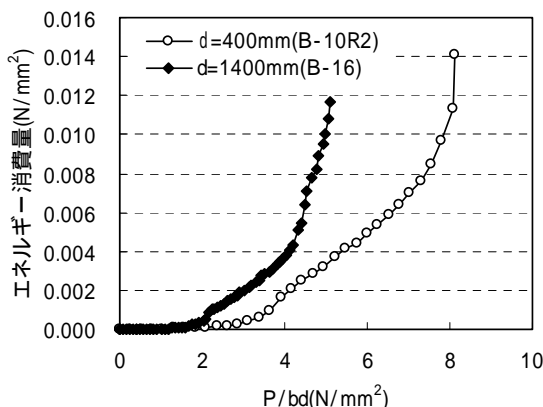


図 - 10 エネルギー消費量の進展

3.4 平均せん断応力

$a/d=1.5$ における寸法効果の有無の確認のため、平均せん断応力を算出した。まず、実験結果の代表例として、図 - 6 に最大荷重を部材断面 bd で除し、平均せん断応力度 $\bar{\tau}$ として相対的な比較結果を示す。

図より、同一の有効高さにおいても破壊パターンが異なる例が確認される。これは、載荷板の不陸やコンクリート強度の局部的差異により局部的に力が作用した場合には局部圧壊が生じパターン 1 となるためであり、パターン 1 はパターン 2 と比較して耐力が低くなることが分かっている²⁾。耐力に差異が確認されているため、破壊パターンごとに着目するとパターン 1 では $d^{-2/3}$ 、パターン 2 では $d^{-1/2}$ と破壊パターンごとに寸法効果が生じていることが分かる。また、全体に着目しても $d^{-1/3}$ で寸法効果が存在すると考えられる。ついで、ここで検討を行った P/bd におけるせん断強度の比較は部材寸法の影響は考慮はしているが、各供試体ごとにコンクリートの圧縮強度に差異が存在する。そこで、コンクリート強度の影響を設計基

準強度 f'_{cd} と圧縮強度 f'_{ck} の比(式(1))により補正した。

$$* = P/bd \left(\frac{f'_{ck}}{f'_{cd}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで、 $*$ ：圧縮強度の影響を補正した平均せん断応力

図 - 7 にコンクリート標準示方書の強度補正法に従い補正したせん断強度 $*$ のプロットを示す。図より、 $*$ も $\bar{\tau}$ と同様に、差異はあるものの、有効高さの増加に伴いせん断強度が $d^{-1/3}$ で低下している。よって $a/d=1.5$ では相対的にせん断強度が低下する寸法効果が存在すると考えられる。

4. 考察

3章より、 $a/d=1.5$ では、斜めひび割れが進展し最終的には載荷板下が圧壊することと、部材の寸法が大きくなるほどひび割れとひずみの進展が早いことが分かった。そこで本章では、1)ひび割れの進展速度に関する考察と 2)最終的に生じる

載荷板下の圧壊についての考察を行った。

4.1 ひび割れの進展速度に関する考察

ひび割れが進展する際の消費エネルギーを算出し、考察を行った。ここでは、せん断ひび割れの進展はせん断による変形に大きく依存すると考えられることから、せん断変位により、消費エネルギーを算出した。エネルギーの算出法としては、図-8の図中に示す方法でせん断変位を算出し、平均せん断応力度(P/bd) - せん断変位/1関係より算出した。具体的な算出例を図-9に示す。例えば、B-10R2 供試体の $P/bd=6.0\text{N/mm}^2$ のポテンシャルエネルギーは図中のグレーで示す部分の面積となり、面積を算出すると 0.005N/mm^2 となる。このようにして、各せん断応力作用時でエネルギーを算出した。なお、ここでは、弾性的なエネルギーの回復は無視し、消費エネルギーと定義した。

図-10にB-10R2 供試体とB-16 供試体のエネルギー吸収の進展を示す。図より、大型であるB-16 供試体の方が同一平均せん断応力作用時においてエネルギー消費量が常に大きいことがわかる。そのため、大型供試体の方がひび割れの進展速度が早くなると考えられる。

4.2 載荷板下の圧壊に関する考察

$a/d=1.5$ では図-11に示すように、著者らはストラットに作用する圧縮力の鉛直方向成分 P' と載荷荷重 P は同程度となることを明らかにしている²⁾。 P' は、図中に示す圧縮応力度分布面積 A に影響され、 A は圧縮応力度とストラット幅 W_p によって決定することになる。

このことから、作用応力度と W_p に着目した検討を以下に行った。なお、 V_c の算出の際に必要なストラット幅は、破壊の終局近傍である $0.95P_{max}$ 時のアクリルバーの圧縮ひずみの形状より求めている³⁾。

破壊時の作用応力度を比較のため、大型の供試体と小型の供試体の作用せん断応力度 τ を算出した。算出法としては、図-11に示すように、応力度分布面積 A を W_p で除し、応力度分布を平均化した。図-12(a)にB-10.1R 供試体($d=300\text{mm}$)

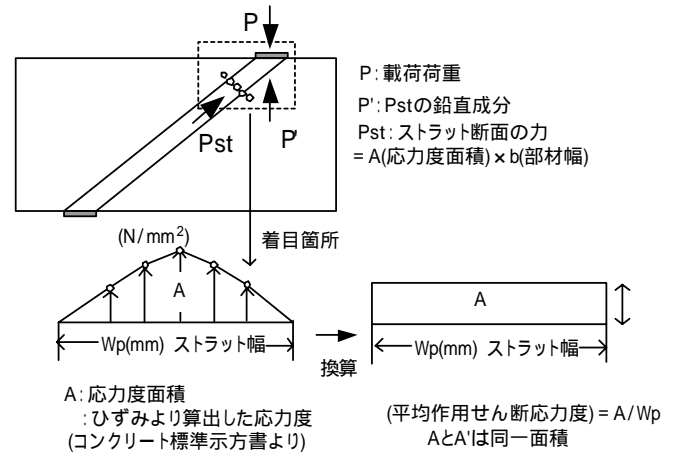
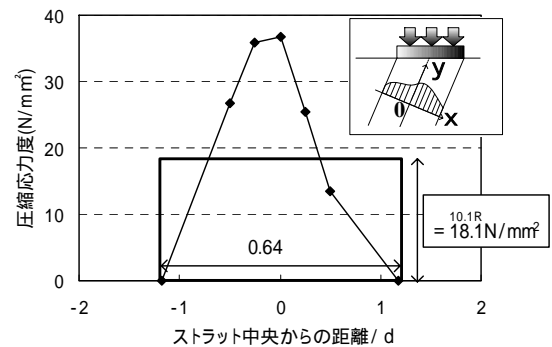
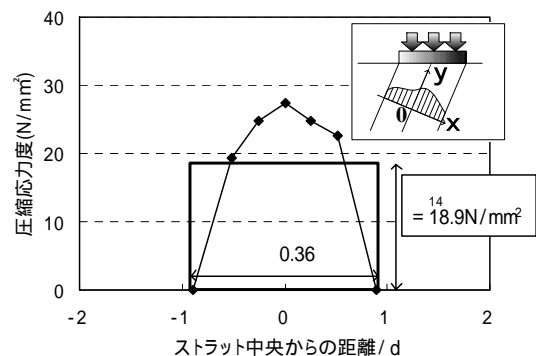


図-11 P' の算出法



(a) B-10.1R 供試体($d=300\text{mm}$)



(b) B-14 供試体($d=1000\text{mm}$)

図-12 圧縮応力度分布図

と図-12(b)にB-14 供試体($d=1000\text{mm}$)の応力分布を示す。なお、ここでの検討では無次元化を行うため、 W_p を有効高さ d で除し、無次元の長さの比として図中に示している。図より、B-10.1R 供試体の最大作用せん断力 $\tau_{10.1R}$ が 18.1N/mm^2 であることに對し、B-14 供試体の最大作用せん断応力度 τ_{14} は 18.9N/mm^2 となっている。このように破壊時には、同程度の作用応力度であり、寸法効果には W_p が大きく影響しているといえる。図-13には W_p を無次元化し、相対的に比較した結果を示す。図より、有効高さが大きくなるにつれ、破壊パターン1では $d^{-1/2}$ 、破壊パターン2では $d^{-2/3}$ 、全体では $d^{-1/3}$ でみかけのストラット幅が減少しており、

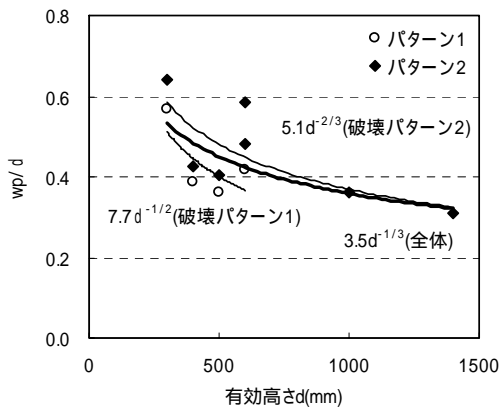
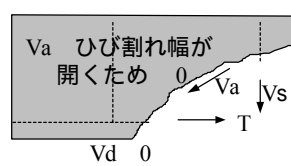


図 - 13 Wp の無次元化

Vc : 圧縮コンクリート負担分
Vs : せん断補強筋負担分
Va : 骨材のかみ合わせによる抵抗力



(a) a/d=1.5 のせん断抵抗要素

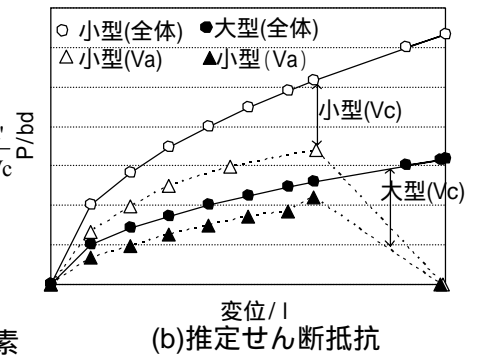


図 - 14 a/d=1.5 のせん断抵抗模式図

大型供試体になるほど破壊が相対的に局所化するといえる。

4.3 せん断抵抗に与える影響

前述のように、a/d=1.5 では、大型供試体になるほどひび割れの進展が早く、また破壊が局所化することが確認された。このような現象が、せん断耐力にどのように影響を与えるかについて考察を行った。

著者らは、図 - 14 に示すように、a/d=1.5 におけるせん断抵抗モデルを提案している²⁾。本モデルによれば、ひび割れ進展中では、せん断抵抗力は主として Va と Vc の累加により支配される。一方、終局状態においては、ひび割れ幅が大きく開くことにより、Va は小さくなり、せん断抵抗力は Vc によって支配される。

この考え方を適用すると、図 - 14(b)の模式図に示すように、大型供試体はひび割れの進展が早いことから、相対的に Va の抵抗力が小さい。同様に、終局状態では局部的に破壊するために Vc の抵抗力も小さい。以上 2 つのせん断抵抗を減少させる現象の累加によって、a/d=1.5 の供試体では寸法が大きくなるに従い、相対的にせん断耐力が低下すると推定される。

5. まとめ

a/d=1.5 に着目し寸法効果の検討を行った結果以下の結論が得られた。

- (1) 大型と小型の供試体の破壊性状を同一平均せん断応力時で比較したところ、例えば、 $P/bd=5.1N/mm^2$ において B-16 供試体(d=1400mm)

と B-10R2 供試体(d=400mm)比較すると、ひび割れ長さ/d は 12.17, 5.90 となっており、大型の供試体の方がひび割れの進展が早いことが分かった。

- (2) 寸法効果に関する分析を実施した結果、破壊パターンが 2 つ認められたが、全体としては $d^{-1/3}$ でせん断強度が低下する寸法効果が確認された。
- (3) d が 300 ~ 1400mm の供試体を対象にストラット幅に関する検討を実施した結果、部材寸法の増加に伴いみかけのストラット幅が $d^{-1/3}$ で減少し、破壊が局部的に生じるため、相対的なせん断耐力が低下することが分かった。

参考文献

- 1) J.Walraven ら, Size Effects in Short Beams Loaded in Shear, ACI Structural Journal, pp.585-593, Sept.-Oct. 1994
- 2) 脇山知美, 幸左賢二, 西岡勉, 小林寛: ディービー梁が破壊性状に及ぼす影響評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp. 1015-1020, 2005.6
- 3) 幸左賢二, 梅本洋平, 西岡勉, 小林寛: ディービー梁の損傷形態に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1283-1290, 2005.4
- 4) 野口博, 落合正雄: 鉄筋コンクリートばりのせん断抵抗機構に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.1, pp.441-444, 1980.6