# せん断補強鉄筋が RC はりのせん断耐力の寸法効果に及ぼす影響評価

遅 舜元\*1・中村 光\*2・山本 佳士\*3・三浦 泰人\*4

要旨:3次元剛体バネモデルを用いた数値解析により,せん断補強鉄筋がRCはりのせん断耐力の寸法効果 に及ぼす影響を,ビーム機構とアーチ機構のせん断抵抗機構やひび割れ幅,断面内の応力分布から評価した。 その結果,寸法効果はせん断補強鉄筋の有無によらず,主にアーチ機構により負担されるせん断力により生 じることを示し,せん断補強鉄筋がない場合は,アーチ機構の影響が直接あらわれるため,顕著な寸法効果 が生じることを示した。一方,せん断補強鉄筋を有する場合は,ビーム機構により負担されるせん断力が増 加してアーチ機構の低下分を補うため,寸法効果が生じなくなる傾向があることを解析的に示した。 キーワード:せん断耐力,寸法効果,せん断補強鉄筋,ビーム機構,アーチ機構,剛体バネモデル

## 1. はじめに

コンクリート構造物は、部材寸法が大きくなってもせん断強度が比例して大きくならないという寸法効果が存在することが知られている<sup>1)</sup>。土木構造物はLNGタンクの底版などのような断面高さが数メートルとなる大型構造物は多数ある。そのため、せん断耐力の算定において、寸法効果は重要なパラメータとして土木学会のコンクリート標準示方書をはじめとして、ACI、fibなどの海外の設計基準でも規定されている<sup>2)3)</sup>。

既往の研究では、せん断補強鉄筋を有さないはりを対 象に寸法効果の影響が主に検討され<sup>4)</sup>,設計式はその実 験結果に基づいて経験式として定められている。RC構 造物は必ずせん断補強鉄筋が配置されるため、寸法効果 はせん断補強鉄筋の影響も考慮されるべきであり、せん 断補強鉄筋が配置された場合、明確な寸法効果は生じな い場合があることも報告されている<sup>5)</sup>。このように、せ ん断補強鉄筋が寸法効果に及ぼす影響は、まだ十分な知 見がないのが現状であり、その影響を明確にすることが 望まれる。また、せん断補強鉄筋の影響を検討する際に は、RCはり部材には、ビーム機構、アーチ機構などのせ ん断抵抗機構が存在することが知られており、各せん断 抵抗機構に基づいて定量的に評価するのが望ましいと 考えられる。

そこで、本研究では3次元剛体バネモデル RBSM を用 いた数値解析により、せん断補強鉄筋が RC はりのせん 断耐力の寸法効果に及ぼす影響を、ビーム機構とアーチ 機構のせん断抵抗機構やひび割れ幅、断面内の応力分布 から評価した。

#### 2. 解析概要

### 2.1 解析手法

本研究では、ボロノイ分割を用いたランダムな要素形 状を有す 3 次元 RBSM によりコンクリートをモデル化 した。3 次元 RBSM は様々な部材で適用性が示されてお り、ひび割れの進展状態やひび割れ幅の分布 の、局所位 置での応力状態などコンクリートの不連続面の発生か ら破壊に至るまで精度よく評価できることが確認され ている。構成則などの詳細は参考文献を参照して頂きた いの。

### 2.2 3 次元 RBSM による大型 RC はりのせん断解析

3 次元 RBSM による大型 RC はりのせん断挙動の再現 性を確認するために、トロント大学で行われた、断面高 さが 1m の大型 RC はりを対象としてせん断補強鉄筋の 有無の影響を検討した載荷実験の解析を行った<sup>8)</sup>。供試 体概要を図-1 に示す。せん断スパン長 2700mm, 有効高



*1	名古屋大学大学院	工学研究科土木工学専攻 (学生会員)
*2	名古屋大学大学院	工学研究科土木工学専攻教授 博(工) (正会員)
*3	名古屋大学大学院	工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)
*4	名古屋大学大学院	工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)



図-2 解析モデル

さ*d*=925mm, せん断スパン比 2.92, 引張鉄筋比は 1.01% である。せん断補強鉄筋ありの供試体はせん断補強鉄筋 なしの供試体に, せん断補強鉄筋比  $\rho_w$ =0.08% (2D10, 600mm ピッチ)のスターラップが配置されたものである。 コンクリートの圧縮強度は 21Mpa である。鉄筋は引張鉄 筋の断面積が 700mm<sup>2</sup>, 降伏強度が 550MPa であり, せん 断補強鉄筋は断面積 71mm<sup>2</sup>, 降伏強度が 508MPa である。 載荷方法はスパン中央部への単調載荷であり, 幅 152mm の支圧板が配置された。

せん断補強鉄筋ありの供試体の解析モデルを図-2 に 示す。コンクリート要素はボロノイ分割により,平均要 素寸法は30mmとした。鉄筋は,はり要素でモデル化し、 鉄筋が通るコンクリート要素の2つの面の中点に付着-すべり関係を表現できるリンク要素が配置される。解析 は載荷板要素の変位を制御し、載荷板および支点の境界 条件は実験供試体に準じる。ただし,計算時間を短縮す るため,断面幅は実験供試体の半分、軸方向鉄筋も1/2の 量としてモデル化した。

図-3,図-4に2つの供試体の実験,解析で得られた荷 重変位関係および最大荷重を若干超えた時点のひび割 れ図を示す。荷重変位関係は,せん断補強鉄筋の有無に かかわらず,実験値を精度よく再現していることが分か る。また,ひび割れ図からは,ひび割れ間隔やひび割れ 分散性ならびに破壊に関係する斜めひび割れなど,解析 が実験結果を適切に再現していることが分かる。以上の 結果から,本解析結果は大型 RC はりに対しても,実験 の耐力やひび割れ性状などの局所挙動を妥当に再現で きていることが確認された。

# せん断抵抗機構に基づくせん断補強鉄筋が寸法効 果に与える影響に対する考察

### 3.1 解析概要

寸法およびせん断補強鉄筋の影響を評価するため,前 節で解析の適用性が確認されたトロント大学の供試体 を基準に,有効高さとせん断補強鉄筋比を変化させたモ デルを作成して解析を行った。図-5 に供試体概要を示す。 有効高さ 925mm の供試体の断面はトロント大学の実験 と同じであり,斜めひび割れの影響がよりあらわれるよ うにせん断スパン比は 3.51 に変化させた。解析パターン としては,有効高さ *d*=925mm の供試体を基準とし,せ ん断スパン比 3.51,引張鉄筋比 1.01%,かぶり 75mm を



ー定として、有効高さとせん断補強鉄筋比をパラメータ とし、有効高さは d=325mm、625mm、925mmの3通り、 せん断補強鉄筋比は  $\rho_w=0.0\%$ 、0.16%、0.30%の3通りに 変化させた計9パターンとした。なお、本研究では、ボ ロノイ分割のコンクリートの平均要素寸法は供試体寸 法によらず、トロント大学の実験供試体に対する解析に より妥当性が検証された 30mm とした。せん断補強鉄筋 なしの供試体に関しては、**図**-5 に示すように、せん断補 強鉄筋を片側のスパンのみ配置し、せん断補強鉄筋がな いスパンを破壊部位として検討した。せん断補強鉄筋を 有する供試体では、せん断補強鉄筋の配置間隔を一定と



して全スパンに対して配置し,一方のせん断スパン内の スターラップの断面積が他方のせん断スパン内の断面 積の3倍とした。せん断補強鉄筋比はせん断補強鉄筋の 断面積を変えることで変更した。せん断補強鉄筋の配置 間隔は概ね有効高さの1/3であり,寸法に比例して増加 させた。コンクリートの要素寸法は30mmとした。コン クリートの圧縮強度は40MPa,引張強度が2.69MPa,破 壊エネルギーは92.8N/mとした。また,せん断破壊が発 生するように,引張鉄筋の降伏強度は1000MPaとし,せ ん断補強鉄筋の降伏強度は295MPaとした。

### 3.2 寸法効果の評価

図-6 にせん断補強鉄筋比 pw=0.0%と pw=0.30%の供試 体のせん断応力変位関係を示す。図中●は斜めひび割れ 発生時のせん断応力を表す。せん断補強鉄筋がない場合, 斜めひび割れ発生後, d=325mmの供試体のせん断応力は 増加したが、d=625mm とd=925mmの供試体は斜めひび 割れ発生後のせん断応力は明確に増加していない。最大 せん断応力は寸法の増加とともに低下することを示し ている。一方, せん断補強鉄筋比が 0.3% 配置された場合, 最大せん断応力はほぼ等しくなっている。図-7に各せん 断補強鉄筋比に対する,斜めひび割れ発生時せん断応力 および最大せん断応力-有効高さ関係を示す。斜めひび 割れ発生時せん断応力の寸法効果は二羽式 4により計算 された値と概ね一致している。図-7により、せん断補強 鉄筋がない場合、最大せん断応力は有効高さの増加につ れて低下し,顕著な寸法効果を示すことが分かる。一方, せん断補強鉄筋が配置された pw=0.16%の場合, 寸法が大 きいほど最大せん断応力の低下が緩やかになり、寸法効 果が緩和されることが示された。さらに、pw=0.30%の場 合,最大せん断応力はほとんど低下せず,寸法効果が生 じていない。このことから、せん断補強鉄筋量が寸法効 果に影響を与えることが解析的に示された。

## 3.3 せん断抵抗機構に基づくせん断補強鉄筋比が寸法 効果に及ぼす影響の考察

#### (a) ビーム機構・アーチ機構の分離方法

RC 部材のせん断抵機構としては、ビーム機構とアー チ機構が存在する。ビーム・アーチ機構は、実験ではコ ンクリートの応力の測定が困難であり、明確に分離する ことができないが、RBSM を用いて局所応力を適切に算 定すれば、ビーム・アーチ機構の分離が可能であること が既往の研究で示されている %。ビーム・アーチ機構は 以下の式(1)~(4)により分離される。

$$M = (T_s + C_s) \cdot \frac{j}{2} + C_c \cdot j_{Cc} + T_c \cdot j_{Tc}$$
(1)

$$V = \frac{dM}{dx} = V_b + V_a \tag{2}$$

$$V_b = \left(\frac{dT_s}{dx} + \frac{dC_s}{dx}\right) \cdot \frac{j}{2} + \frac{dC_c}{dx} \cdot j_{Cc} + \frac{dT_c}{dx} \cdot j_{Tc} \qquad (3)$$

$$V_a = C_c \cdot \frac{dj_{C_c}}{dx} + T_c \cdot \frac{dj_{T_c}}{dx}$$
(4)

ここで,*T<sub>s</sub>*:鉄筋張力,*C<sub>s</sub>*:鉄筋圧縮力,*C<sub>c</sub>*:コンクリー ト圧縮力,*T<sub>c</sub>*:コンクリート引張力,*j*:圧縮鉄筋と引張 鉄筋との距離,*j<sub>cc</sub>*:コンクリート日藤応力重心と材軸と の距離,*j<sub>rc</sub>*:コンクリート引張応力重心と材軸との距離 である。式(3)がビーム機構,式(4)がアーチ機構により負 担されるせん断力である。また,せん断補強鉄筋を配置 する場合は,ビーム機構の一部はトラス機構により負担 され,ビーム機構により負担されるせん断力は,コンク リート負担分とトラス機構による負担分の和となる。ト ラス機構により負担されるせん断力は,斜めひび割れ角 度を 45°と仮定し,解析で得られる各せん断補強鉄筋の 最大応力を用い,トラス理論に基づいて算出した。

既往の研究では、各抵抗機構の負担するせん断応力は 抵抗機構の部材軸方向で変化することが示されている <sup>9</sup>。 せん断耐力には斜めひび割れ位置でのメカニズムが支 配的であることから、本研究では、斜めひび割れ発生領 域である 2.5d の範囲でビーム・アーチ機構の分離を行い、 その領域での平均値を各抵抗メカニズムが負担するせ ん断応力とした。なお、圧縮力が大きい載荷板付近では 応力集中が発生するため、平均化の際には載荷板から 0.2d 以内の値を含めないこととした。図-8 に一例として、 d=925mm、 p<sub>w</sub>=0.30%のはりに対し、最大せん断応力時に おけるビーム・アーチ機構の材軸方向分布を示し、図中 黒の斜線で囲われた領域が、ビーム・アーチ機構の分離



図-9 各機構により負担されるせん断応力

を行った領域を示す。

(b) せん断抵抗機構に基づくせん断補強鉄筋比が寸法 効果に及ぼす影響

図-9 にビーム・アーチ・トラス機構を分離し,最大せん断応力時の各機構が負担するせん断応力を示す。ビーム機構については、トラス機構によるせん断応力をせん断補強鉄筋の負担分とし、全体のビーム機構からトラス 機構分を減じたせん断応力を、コンクリート負担分とした。なお、ビーム機構のコンクリート負担分は負となる 箇所が現れる。これは、斜めひび割れ角度を45°と仮定した場合のトラス機構分を減じるためである。

せん断補強鉄筋を配置しない場合,せん断応力は,ア ーチ機構が支配的に負担するとともに,寸法の増加とと もにせん断応力が低下し,顕著な寸法効果を示した。ビ ーム機構については,有効高さ *d*=325mm の場合はある 程度の負担をしているが,寸法が大きくなると負担は小 さくなった。

せん断補強鉄筋を配置した場合,アーチ機構により負 担されるせん断応力の絶対値は大きくなった。また,有 効高さの増加につれてせん断応力は低下し,その低下割 合はせん断補強鉄筋を配置しない場合より若干緩やか になった。一方,ビーム機構のコンクリート負担分は有 効高さが大きくなるにつれて増加する傾向を示した。ト ラス機構については,寸法が大きくなると,負担するせ ん断応力が大きくなる傾向を示した。このことから,最 大せん断応力の寸法効果は,アーチ機構とビーム機構と もに関係し,寸法の増加とともにせん断応力が低下する 寸法効果は,アーチ機構が主であり,その程度はせん断 補強鉄筋が増えると若干低減することが示された。一方, ビーム機構が負担するせん断応力はせん断補強鉄筋が ある場合,寸法が大きくなるにつれて増加する傾向を示 し,寸法効果を緩和する方向に働くことが示された。

以上のことから、①寸法効果の原因はアーチ機構によ り負担されるせん断応力は寸法の増加とともに低下す ることであること、②せん断補強鉄筋を配置すると、ビ ーム機構により負担されるせん断応力が寸法の増加と ともに増加すること、③両者の効果が相殺ことで寸法効 果が明瞭に現れないこと、が解析結果から確認できる。

## 局所位置情報による寸法効果のメカニズムに関す る考察

ここまでの検討により、せん断補強鉄筋の有無に応じ て各せん断抵抗機構が負担するせん断応力の寸法効果 が変化していくことが確認された。ここでは応力やひび 割れ分布、ひび割れ幅などの局所位置情報に着目し、各 機構と寸法効果の関係について検討する。

### 4.1 せん断補強鉄筋を有さない供試体

図-10 に最大せん断応力時での pw=0.0%, d=325mm, 925mmの供試体のひび割れ図および主応力分布図,断面 の軸応力分布を示す。軸応力分布は、載荷点からの距離 とスパン長の比率 x/a が 0.15, 0.3, 0.45 の位置の断面の 分布を示し、縦軸は断面高さで正規化している。せん断 補強鉄筋を配置しない場合、単一の斜めひび割れの進展 と拡大が支配的であり、ひび割れの角度や応力分布は有 効高さにかかわらずほぼ同じである。ただし、斜めひび 割れに沿う主応力や断面内の軸圧縮応力の値は有効高 さが大きいほど小さくなることが示されている。アーチ 機構により負担されるせん断応力は、式(4)により、コン クリートの引張応力は小さいことから、断面に作用する 圧縮合力 Cc とその作用重心 djcc/dx の変化率の積が主で あり,アーチ部の圧縮応力の大きさとアーチの形状の変 化率に関係する。ここで、*pw*=0.0%、0.3%の供試体の断面 の圧縮合力 Cc の断面平均である断面平均圧縮応力の材 軸分布を図-11 に示す。せん断補強鉄筋がない場合、全 スパンにわたって, 有効高さが増加するにつれて, 断面 平均圧縮応力が低下していることが確認される。また, 図-10のひび割れ図と主応力分布図により、ひび割れの 角度は有効高さにかかわらず、ほぼ同じであることから、 圧縮応力の作用重心の変化率は、有効高さによらずほぼ 同一と考えられる。これらの事実は、アーチ機構の寸法



効果は、有効高さの増加につれて、圧縮合力が低下する ことにより生じることを示している。圧縮合力が低下す る原因としては、ひび割れ幅の影響があると考えられる。 図-12 に p<sub>n</sub>=0.0%、0.3%の供試体の最大せん断応力時で の断面の最大ひび割れ幅の材軸分布を示す。図-12(a)に より、せん断補強鉄筋がない場合、寸法が大きくなると、 全スパンにわたって斜めひび割れ幅も大きくなること が確認される。したがって、ひび割れ幅が寸法に応じて 拡大することにより、圧縮応力やせん断伝達などの力の 抵抗力が低下した結果が寸法効果の原因となることが 解析結果から示唆された。なお、最大ひび割れ幅により 圧縮強度やせん断伝達応力が低下することは既往の研 究で確認されている<sup>10</sup>。

### 4.2 せん断補強鉄筋を有する供試体

図-13 に pw=0.30%, d=325mm, 925mm の供試体の最大 応力時のひび割れ図、主圧縮応力分布図、断面の軸応力 分布図を示す。 せん断補強鉄筋が配置された場合, 斜め ひび割れは、寸法が大きいほど分散性が増加するととも に,角度が緩やかになり,寸法とせん断補強鉄筋両者か ら影響されることが示されている。そのため、主応力分 布も寸法により異なり, d=925mm の場合, 圧縮弦材の水 平領域の拡大と圧縮斜材の形成が確認され、トラス機構 により負担される応力分布が明確に現れていることが 分かる。また, d=325mm の場合も d=925mm の場合ほど 明確ではないが、類似の傾向を示していることが分かる。 断面の軸応力分布では、有効高さにかかわらず、最大応 力の大きさはほぼ同じである。このことは、図-11(b)に 示す断面平均圧縮応力の値が、寸法によらずほぼ同じで あることからも理解される。また、圧縮応力の値が同じ となることは、図-12(b)に示す最大ひび割れ幅がせん断 補強鉄筋を配置することで、寸法によらずほぼ等しくな ることで説明できると考えられる。平均圧縮応力が変わ



らないにもかかわらず,アーチ機構が明確な寸法効果を 示したのは,寸法が大きいほど斜めひび割れ角度は小さ くなっているので,アーチ機構のもう1つの要因である 圧縮応力の作用重心の変化率 *djc/dx* が小さくなったた めと考えられる。また,作用重心の変化率の変化は,明 確なトラス機構の形成で示されるようにビーム機構に より負担されるせん断応力の増加に伴って生じるもの と考えられる。したがって,図-9のせん断補強鉄筋が配 置された場合では,寸法の増加とともにビーム機構のせ ん断応力負担分が増加したのは,このような挙動の結果 と考えられる。このことから,せん断補強鉄筋を配置し た場合,寸法の増加とともに、ビーム機構が負担するせ ん断応力が増えることにより,相対的にアーチ機構が負 担するせん断応力が低下し,両者が相反することで,寸 法効果が現れなくなる可能性が示唆された。なお,寸法



図−13 ρ"=0.30%の供試体の局所位置情報

が大きいほど,ひび割れの分散性がより明確になる原因 としては,今後の課題として更なる検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、3 次元 RBSM を用いて有効高さ、せん断 補強鉄筋比をパラメータとした RC はりの数値解析を行 い、ビーム・アーチ機構に基づいてせん断補強鉄筋が RC はりのせん断耐力の寸法効果に及ぼす影響の評価を行 った。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 今回対象とした諸元の RC はり供試体では、せん断 補強鉄筋を有さない場合には、顕著な寸法効果が存 在し、せん断補強鉄筋を配置することにより、寸法 効果が生じなくなる傾向になることが示された。
- (2) せん断補強鉄筋を有さない供試体の寸法効果の原因は、アーチ機構により負担されるせん断応力が寸法の増加とともに低下することが主であり、このせん断応力の低下は、寸法に比例してひび割れ幅も大きくなることで、アーチ部の圧縮抵抗応力、せん断抵抗応力が小さくなるためと考えられる。
- (3) せん断補強鉄筋を配置した場合,アーチ機構の寸法 効果は大きく変化しないが,ひび割れの分散性など により,明確なトラス機構が形成され,ビーム機構 が負担するせん断応力が増加することで,結果とし て,アーチ機構とビーム機構が負担するせん断応力 は相反し,寸法効果が生じない傾向になることが, 解析結果から示唆された。

### 参考文献

 井畔瑞人,塩屋俊幸,野尻陽一,秋山輝:等分布 荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせ ん断強度に関する実験的研究,土木学会論文集, 第 348 号, V-1, pp.175-184, 1984.8

- 2) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編], pp.180, 2012
- Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI318-02) And Commentary, pp.147, 2002
- 二羽淳一郎,山田一宇,横沢和夫,岡村甫:せん 断補強鉄筋を用いない 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, 1986.8
- Zdenek P.Bazant, Hsu-Huei Sun : Size Effect in Diagonal Shear Failure : Influence of Aggregate Size and Stirrups, ACI Material Journal, No.84-M27, 1987
- 6) Yoshihito Yamamoto, Hikaru Nakamura, Ichiro Kuroda & Nobuaki Furuya : Crack propagation analysis of reinforced concrete wall under cyclic loading using RBSM, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.18, 2014
- 7) 山本佳士、中村光、黒田一郎、古屋信明:3 次元 剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧 縮破壊解析、土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.612-630
- Dino Angelakos, Evan.C.Bentz, Michael P.Collins : Effect of concrete strength and minimum stirrups on shear strength of large members, ACI Structural Journal, V.98, NO.3, May-June, 2001
- 9) 岩本拓也,中村光,山本佳士,三浦泰人:RCはりのせん断抵抗メカニズムの検討方法に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.37,No.2, pp.553-558, 2015
- 10) 岡村甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解 析と構成則,技術堂出版,1991.5