

論文 格子等価連続体モデルによる高強度RCはりのせん断破壊解析

Kongkeo PHAMAVANH^{*1}・中村 光^{*2}・国枝 稔^{*3}・李 相勲^{*4}

要旨：これまで開発を進めてきた格子等価連続体モデル (LECOM) に、より汎用性を持たすために、高強度コンクリートに適用を拡張する方法を提案した。高強度コンクリートの特性として、骨材の割裂により、ひび割れ面の形状が平滑化し、せん断伝達機構が低減すると考えられることから、本研究では、既存のせん断伝達モデルを基本にし、せん断伝達モデルのパラメータについて検討した。その結果、高強度コンクリートの特性を考慮したパラメータを用いることで高強度RCはりのせん断破壊性状を精度よく再現できることを示した。

キーワード：高強度コンクリート、格子等価連続体モデル、せん断伝達機構、せん断破壊解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は材料の進歩や施工技術の向上に伴い、長大化・高層化する傾向にあることから、構造物の自重の大幅な軽減、コスト縮小や施工合理化が期待できる高強度コンクリートの使用が有効な手法と考えられている¹⁾。

これまで、高強度コンクリートを用いたRC部材の性能を明らかにするための実験的研究が数多く行われ、普通強度コンクリートと比べ、構造寸法が大きくなるほどコンクリートが受け持つせん断力の低下が顕著になることが報告されている²⁾。しかしながら、これらの挙動を数値解析的に評価した例は少なく、高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達メカニズムは、十分に検討されていないのが現状である。高強度コンクリートの場合、コンクリート中の骨材自体が割裂し、普通強度コンクリートより平滑なひび割れ面を形成し、ひび割れ発生後、急激な応力開放が生じることから、従来の構成則ではひび割れ面に伝達されるせん断応力を過大に評価する危険性がある。

本研究では、これまで普通強度コンクリートにおいて、静的・繰返し単調載荷および動的荷重を受けるRC部材の挙動を適切に評価している格子等価連続体モデル^{3),4)}を高強度コンクリートのひび

割れ面におけるせん断伝達機構を評価可能な構成式に拡張する方法を提案した。まず、長谷川ら⁵⁾の切欠きを設けたコンクリートブロックのせん断実験結果を参考にし、高強度コンクリートのせん断伝達挙動を評価可能なパラメータの同定を行った。さらに、高強度コンクリートを用いたせん断破壊する鉄筋コンクリートはり実験を解析し、斜めひび割れ発生荷重およびせん断耐荷力を実験値と比較することにより、本研究で提案したモデルの妥当性について検討を行った。

2. 格子等価連続体モデルRC構成式の概要

格子等価連続体モデル^{3),4)}によるRC構成式は、**図-1**に示すコンクリートと補強筋による耐荷機構をモデル化したMain Lattice成分と、ひび割れ面におけるせん断伝達をモデル化したShear Lattice成分を、ひび割れ面座標系に想定することにより構築される。構成式の定式化の詳細は参考文献3)を参考されたい。なお、本構成式に用いた一軸応力-ひずみ関係は、引張軟化特性に破壊エネルギーの概念を導入していることから、高強度・普通強度コンクリート材料共に同一のものを用いているが、その詳細については、参考文献4)を参考されたい。以下では、高強度コンクリートのせん断

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 修(工) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教授 博(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助手 博(工) (正会員)

ひび割れ面におけるせん断伝達挙動を評価するために拡張を行ったせん断伝達モデルの概要を示す。

2.1 ひび割れ面におけるせん断伝達モデル

格子等価連続体モデルでは、ひび割れ面を図-2に示すようにモデル化し、せん断変位、およびひび割れ幅の変化に伴うひび割れ面の凹凸の接触という観点から、せん断伝達モデルを構築している。

ひび割れ面の凹凸の接触により発生するせん断格子方向（図-2中の S1, S2 方向）の一軸応力増分は、せん断格子の応力—軸ひずみ関係を用いて計算される。せん断格子の剛性は図-3(b)のように過去経験した最大ひび割れ幅の関数として仮定している。せん断格子方向の応力増分は、応力変換マトリックス $[T_{\sigma,S1,S2}]^{-1}$ で、ひび割れ面での局所座標系 (ξ, η) の応力増分ベクトル $\Delta\{\sigma_i\}$ に変換される。加えて、ひび割れ面を介して伝達される応力増分は、 η 軸方向の直圧縮応力とせん断応力のみと仮定することから、せん断伝達による局所座標系の応力増分ベクトルは次式で求められる。

$$\Delta\{\sigma_i\} = \Delta\begin{Bmatrix} 0 \\ \sigma_\eta \\ \tau_{\xi\eta} \end{Bmatrix} = [\Omega][T_{\sigma,S1,S2}]^{-1} \Delta\begin{Bmatrix} \sigma_{S1} \\ \sigma_{S2} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $[\Omega]$ はせん断伝達制御マトリックス

最後に、式(1)の $\Delta\{\sigma_i\}$ は、局所座標系から全体座標系への応力変換マトリックス $[T_\sigma]^{-1}$ を用いて全体座標系に変換される。以上の流れを経て、ひび割れ面でのせん断伝達を表現する応力—ひずみマトリックスが次式で与えられる。

$$\begin{aligned} [D_{shear}]_{XY} &= [T_\sigma]^{-1} [D_{shear}]_{\xi\eta} [T_\sigma] \\ [D_{shear}]_{\xi\eta} &= [\Omega][T_{\sigma,S1,S2}]^{-1} [D_{shear,uni}] [T_{\sigma,S1,S2}] [\Omega] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $[T_\sigma]$ 、 $[T_{\sigma,S1,S2}]$ はそれぞれ全体座標系から局所座標系に変換するひずみ変換マトリックスおよび局所座標系からせん断格子方向に変換するマトリックスである。

なお、一つのひび割れ面に対して 2 本のせん断格子で構成式が構築されるが、ひび割れ面が n 方向に発生した場合も同様に定式化すると、各ひび割れ面で伝達される直圧縮応力、せん断応力を評価し、ひび割れ幅を指標に重み付けをしてせん断

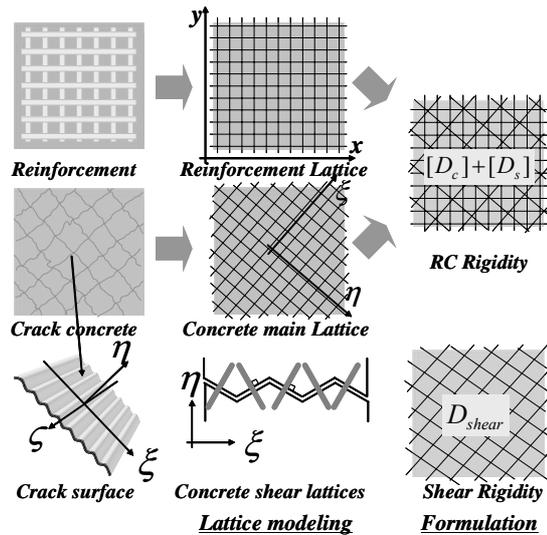


図-1 格子等価連続体モデルの概要

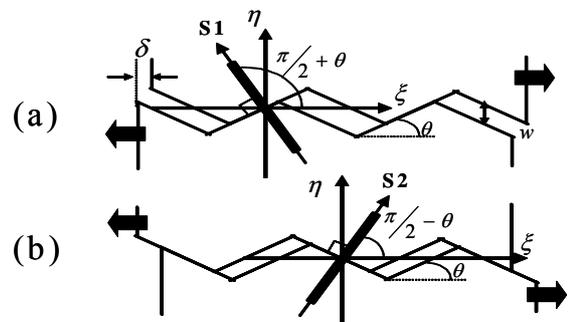


図-2 ひび割れ面のモデル化

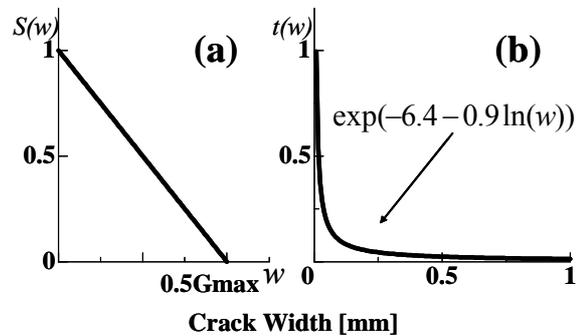


図-3 接触領域の仮定

剛性を以下のように評価する。

$$[D_{shear}]_{XY} = \sum \frac{g(w_j)}{g(w_1) + g(w_2) + \dots + g(w_n)} [D_{shear}]_{XY,j} \quad (3)$$

ここで、添え字 j は、要素内に発生した異なる方向のひび割れ面数で、 g 、 w は、それぞれ各ひび割れ面のせん断伝達剛性の重みとひび割れ幅を意味する。

2.2 ひび割れ面および接触面の仮定

せん断伝達挙動は、ひび割れ幅が図-2に示したひび割れ面の凹凸の高さよりも大きい場合は、せ

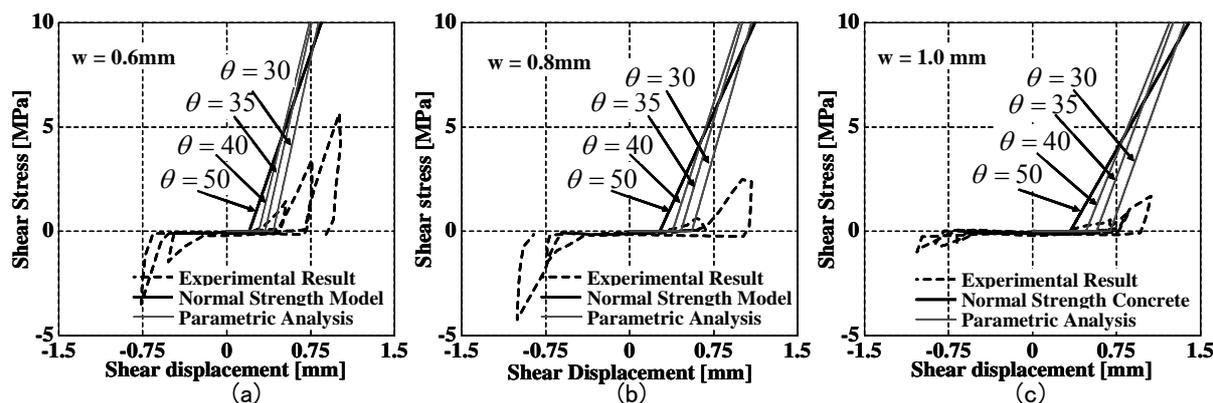


図-4 一定のひび割れ幅でひび割れ面の傾斜角を変化させた場合

せん断変形が生じたとしても、せん断伝達しないものとする。また、普通強度コンクリートにおいて、ひび割れが骨材まわりを沿うように進展することから、ひび割れ面の凹凸の高さを骨材寸法半径とする。なお、本せん断モデルは、ひび割れ幅の開閉により、接触面領域が変化する現象を図-3(a)に示すように、ひび割れ幅を変数に線形的に変化させることでモデル化している。

ひび割れ面におけるひび割れ傾斜角(図-2中、 θ)は既往³⁾の検討解析により普通強度コンクリートにおいて、約 50° が妥当であることが確認されている。

3. 高強度コンクリート解析モデルへの拡張

高強度コンクリートからなるRC部材・構造物の破壊プロセスを数値解析的に評価する場合、前節に述べた普通強度コンクリートを対象とした材料構成則を適用すると、高強度コンクリートの特性を十分に評価することができない。高強度コンクリートでは、骨材自身が割裂することにより、普通強度コンクリートのひび割れ面よりも平滑なひび割れ形状が形成することから、ひび割れ面に沿った応力伝達性能が低下する。そこで、本研究では、(1)骨材自身の割裂、(2)ひび割れ面の平滑化、という高強度コンクリートの特性を直接的に既往のせん断伝達モデルに反映し、せん断伝達モデルのパラメータである(1)ひび割れ面傾斜角(θ)と(2)ひび割れ面の凹凸の高さ(骨材寸法)、を変化させることにより、高強度コンクリートのひび割れ面

におけるせん断伝達機構を評価することを試みた。

本研究では、長谷川らのコンクリートブロックによる繰り返しせん断実験⁵⁾を検証解析の対象とした。実験では、切欠き部分に初期ひび割れを導入するため、垂直方向引張載荷試験が行われ、規定したひび割れ幅(0.6mm, 0.8mm, 1.0mm)に到達後は、そのひび割れ幅を一定に制御した条件下で単調および正負交番繰返し載荷(水平方向)が行われた。

3.1 高強度コンクリートのひび割れ面傾斜角の検証

高強度コンクリートでは、骨材の割裂により、ひび割れ面傾斜角が平滑になることから、せん断伝達モデルで用いる普通強度コンクリートひび割れ面傾斜角より緩やかと考えられる。そこで、本研究では、普通強度コンクリートモデルを基本にし、ひび割れ面傾斜角を普通コンクリートの場合より低下させて、構成則レベルにおける検討を行った。図-4(a), (b), (c)にそれぞれ初期ひび割れ幅が0.6mm, 0.8mmおよび1.0mmの時のせん断応力-せん断変位の関係の実験値と解析値の比較を示す。解析値はひび割れ面傾斜角を 50° (普通強度コンクリートの数値)、 40° , 35° , 30° に変化させたパラメトリック解析結果を示している。図中の点線は実験値で、太線は普通強度コンクリートモデルである。ひび割れ面傾斜角を小さくすることにより、せん断すべり量が増加することが確認できた。これは、ひび割れ面傾斜角を小さくすることによって、仮定したひび割れ面の凹凸が噛合うまでの距離が長くなることを意味する。なお、ひび割れ

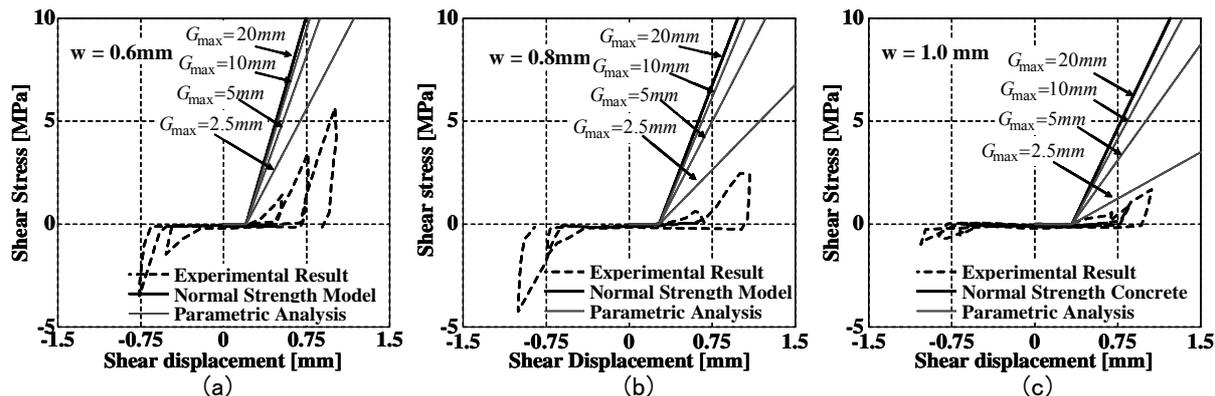


図-5 一定のひび割れ幅で、見かけ上の骨材寸法を変化させた場合

面傾斜角が 35° の時、いずれのひびれ幅に対しても実験値のすべり量を概ね評価できることが確認できたことから、本研究では、高強度コンクリートのひび割れ面傾斜角はおおよそ 35° であるとした。

3.2 高強度コンクリートにおける見かけ上の骨材寸法

高強度コンクリートでは、骨材自身が割裂することから、せん断伝達モデルで用いるひび割れ面の凹凸の高さは普通強度コンクリートの際に用いる骨材寸法半径よりも小さいと考えられる。そこで、本研究では前節と同様に、普通強度コンクリートのせん断伝達モデルを基本にし、見かけ上の骨材寸法を低下させ、構成則レベルの検証を行った。図-5(a), (b), (c)にそれぞれ初期ひび割れ幅が 0.6mm , 0.8mm , 1.0mm の時の見かけ上の骨材寸法を 20mm , 10mm , 5mm , 2.5mm に変化させたパラメトリック解析結果と実験結果のせん断応力-せん断変位関係を示す。図中の点線は実験値で、太線は普通強度コンクリートモデルである。見かけ上の骨材寸法が減少するにつれ、伝達される応力も低減することが確認できた。見かけ上の骨材寸法の減少は、接触面領域を小さくするため、応力伝達性能も低減される。なお、高強度コンクリートの見かけ上の骨材寸法が 2.5mm の時、いずれのひび割れ幅に対しても、伝達されるせん断格子の勾配が実験値と同等な挙動を示している。見かけ上の骨材寸法が 2.5mm であることは、「高強度材料のひび割れ面での粗骨材の割裂は、骨材最大径が 5mm 以下となることと、力学的には等価であるといつて良いであろう」⁶⁾という土屋らの見解にも一

致している。以上のことから本研究では、高強度コンクリートのひび割れ面の凹凸の高さ、すなわち見かけ上の骨材寸法を 2.5mm と仮定した。

3.3 提案したせん断伝達モデルと既往のモデルとの比較

本研究で提案した高強度コンクリートのせん断伝達モデル（ひび割れ面傾斜角 $\theta = 35^\circ$ ，見かけ上の骨材寸法 $G_{\max} = 2.5\text{mm}$ ）の妥当性を検討するため、既往の接触ひび割れ面におけるせん断伝達構成則である長谷川らの提案式⁵⁾（式(4)）との比較を行った。

$$\tau = \alpha \frac{3}{4} m \left(\frac{\beta^2}{1 + \beta^2} \right)^2 \quad \text{where, } m = 3.83 f'_c{}^{1/3}, \beta = \delta/w \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2}{5w}; (f'_c = 130\text{MPa})$$

ここで、 δ, w それぞれせん断変位とひび割れ幅である。

本研究で提案したモデルと長谷川らが提案したモデルでは、いずれも実験結果を適切に評価している。ここで重視すべき特性としては、初期のひび割れ幅の増加につれ、ひび割れ面におけるせん断伝達性能が低減する点にある。長谷川らのモデルでは、前川らのモデルを拡張し、その低減をひび割れ幅の関数 α として実験結果と一致するように設定しているが、その力学的根拠は不明確である。一方、提案モデルでは、高強度コンクリートの特徴である、ひび割れ面の平滑化と見かけの骨材寸法の低下という実現象を直接的に反映し、明解な形式で実験値を適切に評価可能としているこ

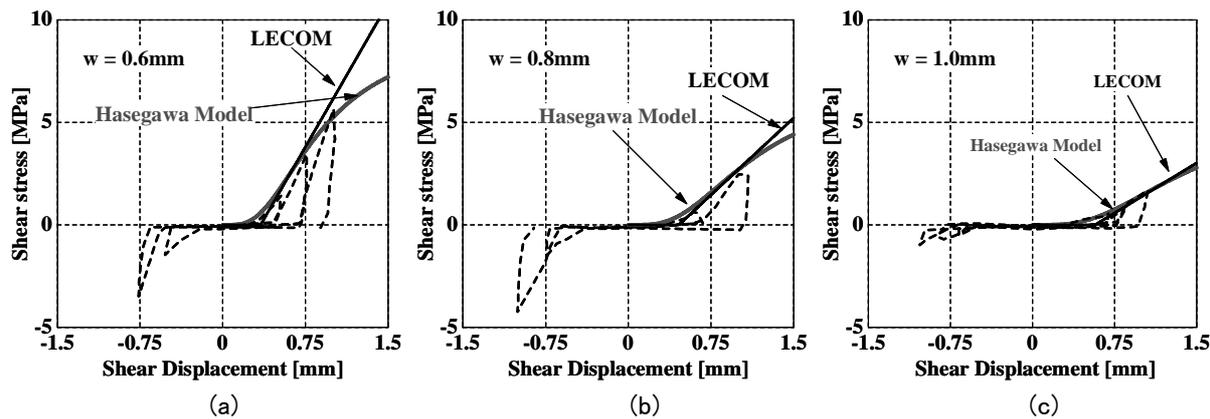


図-6 提案されたせん断伝達モデルと既往モデルとの比較

とが特徴である。

4. 解析手法の適用

前節で提案した高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達モデルは構成則レベルにおいて、実験値と良い一致を示す。そこで、高強度コンクリートからなる RC 部材に対する適用性を検証する。

4.1 解析対象実験

解析対象とした実験は土屋らによって行われた帯鉄筋を有していない、せん断破壊先行型 RC はり試験体である⁶⁾。実験は主鉄筋の配筋方法の違い(1段配筋と2段配筋)、コンクリートと鉄筋について普通強度と高強度を組み合わせた計9体が行われたが、本研究ではその中の主鉄筋配筋の違い計2体を解析対象とした。表-1に試験体の物性値を示す。図-7、図-8に実験概要と解析モデルを示す。

4.2 実験および解析結果

図-9、図-10にそれぞれNo1, No5はりの荷重-変位関係を示す。図中の破線は実験結果で、太線は高強度コンクリートモデル、細線は普通強度コンクリートモデルを用いた解析結果である。実験では、1段配筋のNo1試験体は、斜めひび割れ発生後、直ちに破壊に至った。一方、2段配筋のNo5では、斜めひび割れ発生後に、せん断耐力が一旦低下した後、せん断耐力が81.5kNまで回復する挙動を示した。傾きの小さい第2の斜めひび割れを誘発して最終破壊に至ったと報告され、主鉄筋2段配筋が、高耐荷力の原因と思われる。これらの挙動に対し、提案したモデルを用いて解析を行っ

表-1 試験体の物性値

	f'_c [MPa]	f_y [MPa]	Rein. Bar	V_{c_exp} [kN]
No1	69.5	711	D19,2	47.8
No5	69.5	1050	D10,8	47.1

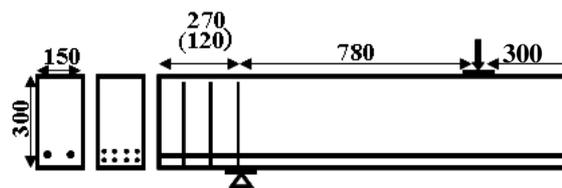


図-7 試験体の配筋と載荷概要

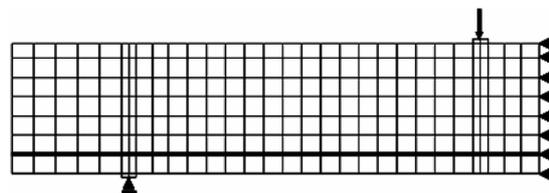


図-8 解析モデル

た結果、No1試験体では、せん断耐荷力が47.0kNの時、斜めひび割れが発生直後に耐力が急激に低下し、斜めひび割れ発生荷重、破壊挙動ともに、実挙動を精度よく再現できた。No5試験体では、予測の斜めひび割れ発生荷重が実験値よりやや大きいものの、斜めひび割れ発生後の耐力回復挙動とともにせん断耐荷力は実験値と良い一致を示している。また、ページ数制限の関係上、ひび割れの発生形状を示すことができなかったが、1段配筋のNo1のひび割れ形状は離散的に導入されたのに対し、2段配筋のNo5では、ひび割れが分散する性状を示し、両者とも実験結果と同様なひび割れ形状を示していることが確認できた。

一方、既往の普通強度コンクリートの構成式を用いて、解析を行った場合には、両者とも実験値を過大評価する結果となった。これは、微細な斜めひび割れが発生しても、高強度コンクリート用モデルと比べせん断抵抗が大きいため、斜めひび割れが進展しづらくなったのが主な要因だと考えられる。従って、既往の普通強度コンクリートに対して導かれた構成則の強度定数を単に変更するだけでは高強度コンクリートのひび割れ面に伝達されるせん断応力を過大に評価し、適切でないことが本解析結果からも確認できた。

5. まとめ

本研究では、格子等価連続体モデルの普通強度コンクリート構成式を基本とし、高強度コンクリート構成式への拡張を行い、以下の結論を得た。

- (1) 格子等価連続体モデルのひび割れ面におけるせん断伝達モデルの傾斜角および見かけ上の骨材寸法を適切に設定することで、高強度コンクリートモデルに拡張することが可能である。
- (2) ひび割れ面傾斜角 θ を 35° 、見かけ上の骨材寸法を 2.5mm に設定することで、高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達挙動を妥当に評価できる。
- (3) 本研究で拡張を行った高強度コンクリートせん断伝達モデルは高強度コンクリートからなる RC はりのせん断破壊挙動を適切に評価可能である。

参考文献

- 1) 増川淳二, 天野玲子, 須田久美子, 大塚一雄: 高強度鉄筋コンクリートを用いた RC 橋脚部材の開発, コンクリート工学論文集, Vol.9, No.1, pp.123-132, 1998.01
- 2) 阿部祐規, 伊藤堅生, 松原一美, 鈴木基行: 超高強度材料を用いたせん断補強筋のない RC はり部材のせん断力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.181-186, 1999.07
- 3) 伊藤睦, Kongkeo PHAMAVANH, 中村光, 田辺忠

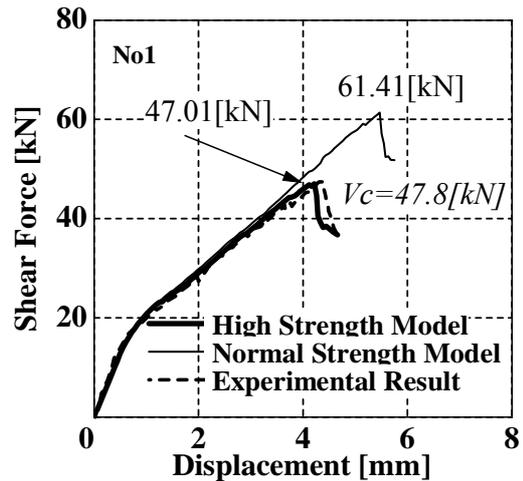


図-9 No1 はり中央下端の荷重-変位曲線

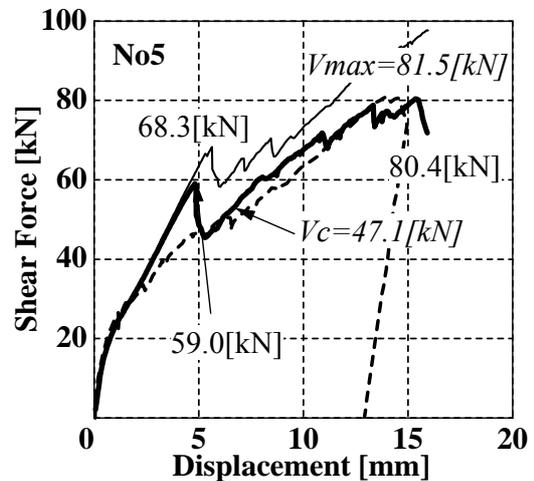


図-10 No5 はり中央下端の荷重-変位曲線

頭: 格子等価連続体化法による鉄筋コンクリート部材の有限要素解析, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.115-129, 2004.08

- 4) Kongkeo PHAMAVANH, 伊藤睦, 中村光, 田辺忠頭: RC 構造の繰り返し及び動的解析における格子等価連続体化法の適応性, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.161-176, 2004.08
- 5) 長谷川了一, 香取慶一, 篠原保二, 林静雄: 100N/mm^2 を超える高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.91-96, 2004.06
- 6) 土屋智史, 三島徹也, 前川宏一: 高強度構成材料を用いた RC はり部材のせん断破壊と数値性能評価, 土木学会論文集, No.697, pp.65-84, 2002.04