

[討議・回答]

ピマンマス アモン 共著
前川 宏一

“Influence of Pre-crack on RC Behavior in Shear” への討議・回答

(土木学会論文集, No. 669/V-50, pp. 277-291, 2001年2月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

市之瀬敏勝 (名古屋工業大学)

Toshikatsu ICHINOSE

非常に興味深く拝読させていただきましたが、実験結果の解釈について疑問点があり、ご教示いただければと願う次第です。

論文 p. 289 の右中ほどでは、先行ひび割れによる強度上昇の原因として、斜めひび割れ先端での応力集中が緩和されたことが指摘されています。また、p. 290 の左下では、斜めひび割れ伝播の局所性が緩和されるからであると述べられておられます。確かに、そうした影響も存在しそうに思われますが、より大きな要因として、ひび割れ面に生じる圧縮応力度もあり得るのではないのでしょうか？ 前川先生の「接触密度関数モデル」¹⁾でも表現されるように、ひび割れ面ではせん断応力 τ を伝達しようとする、直交方向（この場合は材軸方向）に圧縮応力 σ が生じるからです。

圧縮応力 σ とせん断応力 τ を受けるコンクリートが引張強度 σ_t でひび割れするとすると、図-1 のモール円より

$$\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma}{2} + \sigma_t\right)^2 \quad (1)$$

となります。仮に、 $\tau = \sigma$ とすると、ひび割れ発生時のせん断応力は

$$\tau = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \sigma_t = 1.62 \sigma_t \quad (2)$$

となります。また、ひび割れの角度は $\tan 2\theta = 2$ より $\theta = 32^\circ$ となります。一方、先行ひび割れのない試験体では $\sigma = 0$ と考えられますから、 $\tau = \sigma_t$ 、 $\theta = 45^\circ$ となります。強度比 1.62 という値は、実験結果 (1.49

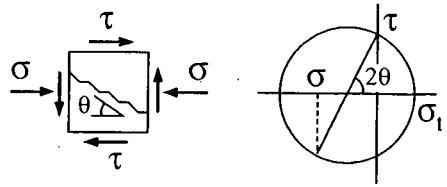


図-1 せん断ひび割れとモール円

倍) と近似しています。また、ひび割れ角度 θ も、実験で観測された値とおおむね一致すると思われる。さらに言えば、 θ が小さくなることによって、載荷板間のアーチ作用が安定化するという効果もありそうです。もっとも、 $\tau = \sigma$ という推定は、やや σ を過大評価しているかもしれません。

上記はすべて推測であります。関連論文²⁾の解析結果をご参照いただければ圧縮応力 σ の定量的議論が可能になると思いますので、ご検討いただければありがたく存じます。

参考文献

- 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, 技報堂出版, 1991.
- Pimanmas, A. and Maekawa, K.: Multi-directional fixed crack approach for highly anisotropic shear behavior in precracked RC members, 土木学会論文集, No. 669/V-50, pp. 293-307, 2001.

(2001.4.19 受付)

▶ 回答者 (Closure)

前川宏一 (東京大学)・ピマンマス アモン (東京大学)

Koichi MAEKAWA and Amorn PIMANMAS

先行ひび割れと斜めひび割れとの相互作用¹⁾に関して貴重なお考えを頂戴しましたことに、心より御礼申し上げます。現象に対する解釈について、討議者から

のご指摘の観点に立ち戻って機構の解釈に再考を加え、数値解析の面から先行ひび割れが、後から導入される斜めひび割れの進展を抑制する機構に関する検討

をもって、著者回答を致します。

先行ひび割れとせん断斜めひび割れとの交差点近傍での局所応力が、討議のポイントになります。そこで関連論文²⁾で用いた解析ケースで、先行ひび割れとせん断斜めひび割れ交差点近傍の有限要素に展開する応力に着目し、先行ひび割れが無い一般のはりのせん断破壊と比較することから討議を始めます。

図-1に先行ひび割れの無い場合の、せん断ひび割れ進展時の局所応力の解析結果を示します。せん断ひび割れが進展する線上のA～C点での主引張応力解析値と、部材断面で定義されるせん断応力解析値を、それぞれ図示しました。A、B点での主引張応力がひび割れ発生応力に至った後は、A、B点では軟化が生じ、引張応力は緩和されますが、一方でA、B点近傍のC点の応力は増加し始めます。そして、ひび割れ進展にあわせてC点の要素も、引張強度に至った後に軟化に至る様子が分かります。このとき、ひび割れの先端領域は軟化に至るまで応力は増加するため、ひび割れは留まることなく進展します。このとき、せん断応力も合わせて図示しました。ひび割れが入った要素では、せん断応力は小さく、ひび割れが入る前の要素Cで比較的、大きなせん断応力が発生していることが分かります。

しかし、最大で2.5 MPa程度であり、せん断軟化領域には至りません。見かけ上、せん断応力が低下しているのは、ひび割れ幅が増加することでせん断伝達剛性が低下する事などに因ります。コーベルや一面せん断破壊に見られる様なせん断軟化を解析モデルに取り入れてはいますが³⁾、本解析ケースに関しては、せん断軟化域までに至る損傷は数値計算上、発生していないので、討議からこの事項は除外します。

先行ひび割れを交番曲げによって導入した後に、せん断応力を作用させたケースのひび割れパターンと主引張ひずみを図-2に示します。せん断力導入後に発生したひび割れは、先行ひび割れの下端と上端近傍及びウェブ中央付近に発生するものの、先行ひび割れ位置ではほぼ停止しています。図-3は6点の伝達引張主応力と伝達せん断応力の推移を示しています。先行ひび割れ領域以外に斜めひび割れが発生し、ひび割れが進展しても、先行ひび割れを含む要素の主引張応力は、かなり低い水準に維持されます。そのため、先行ひび割れを跨いで非直交ひび割れが発生せず、進展が阻害されています。その結果、解析および実験共に、斜めひび割れ領域が、先行ひび割れ近傍の要素の上下に分散していきます。

ここでせん断応力の値に着目してみます。先行ひび割れ領域では、それ以外の領域のせん断応力よりも、かなり小さい値で推移しています。これは、先行ひび

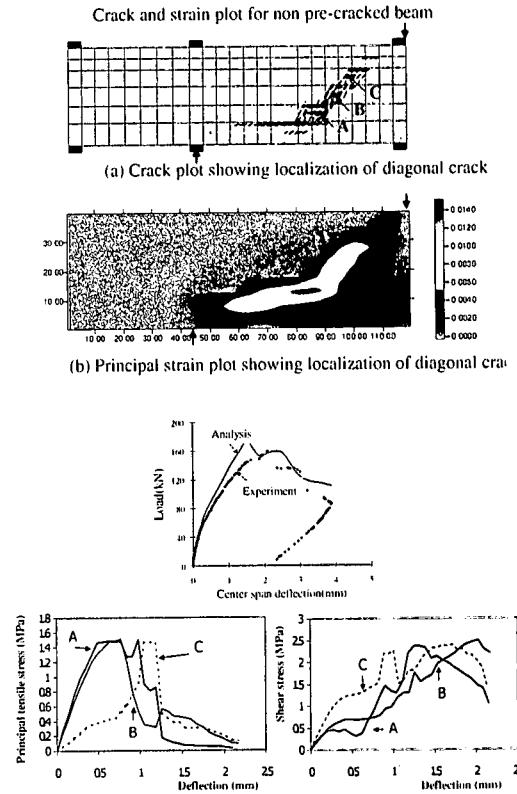


図-1 先行ひび割れの無い梁のせん断破壊と局所応力

割れの存在によって、伝達せん断剛性が低下し、変形が増加しても、せん断応力が発生し難い状況となっていると理解されます。当該論文で、「ひび割れ先端での応力が緩和される」と表現した事項は、先行ひび割れ近傍のせん断応力の緩和と、それによる主引張応力の低下を意味しております。

ご指摘にある通り、ひび割れ面での応力伝達機構に対しては接触面密度関数モデルを適用しています。このとき、先行ひび割れ面上での $\tau = \sigma$ の仮定は、大凡で妥当な推定と言えます^{4),5)}。ただし、本解析で第二ひび割れの発生を判断する場合には、ひび割れに沿った方向の直応力もすべて考慮して、ひび割れに挟まれているコンクリートに発生する主応力を厳密に算定します。はりの場合、トラス機構あるいはアーチ機構によってウェブ領域に斜め圧縮ストラットが大かれ少なかれ発生します。これが、先行ひび割れに沿った方向の直応力成分を生成します。この成分を考慮した第二ひび割れ発生基準は、式(1)、式(2)のケースと幾分は異なります。先行ひび割れがない試験体ですと、ウェブ領域での応力状態は、斜め圧縮ストラットによって直応力成分 σ が厳密にゼロとなりません。また、ひび割れ発生基準に多軸応力効果を考慮しているの

で、主応力が1軸引張強度に至る前にひび割れが発生します。

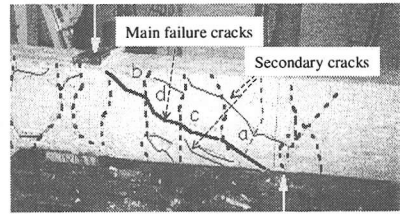
これら解析上の仮定を考慮すると、ご指摘の強度比1.62が、必ずしも当解析のウェブ領域の応力状態に相当しているといえない事、1.62の値がはりの耐力差1.49倍と近いことに、力学的な必然性があるとするのは、難しいように思われます。むしろ、ご意見にもある通り、先行ひび割れによってアーチ作用が安定化する、といった効果の方が強いのかもかもしれません。

討議者も回答者も、先行ひび割れ面でのせん断伝達が相互作用の機構説明のポイントである、という視点で一致しております。そこで、ひび割れ面でのせん断伝達機構が、交差ひび割れの相互作用に及ぼす影響を更に検討して、もう少し議論の深化を試みます。

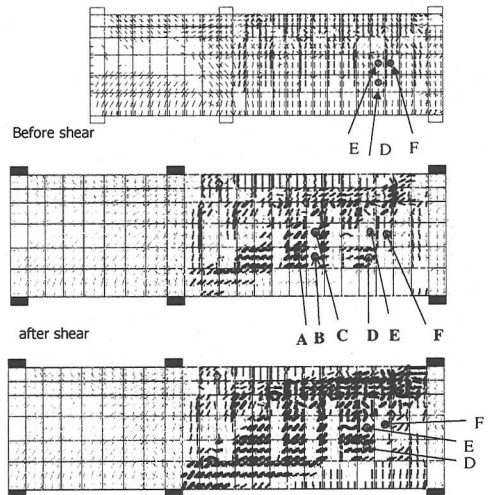
ここで、せん断伝達剛性を極端に大きくして(接触面密度関数モデル^{4),5})で評価される伝達せん断応力と剛性を10倍に設定)、非線形解析を行いました。ただし、伝達せん断応力とダイレイタンスーによって励起される圧縮応力の関係は保持されます。実際のコンクリートを使用して、人工的にひび割れ面上での応力伝達機構を制御、変化させることは事実上、不可能ですが、数値解析によれば、任意の力学特性を有する材料を仮想空間上に製造建設することは容易です。このときの局所応力の変化に注目したのが図-4です。このケースでは、先行ひび割れを突ききって斜めひび割れが進展し、はりの耐力比は1.1倍程度に低下しました。そのときの局所応力と図-3とを比較すると、先行ひび割れ近傍での伝達せん断応力レベルが約2倍に上昇するとともに、変位の進展に伴い、とうとう増加に転じているのが分かります。そして、遂に第二ひび割れが発生し、先行ひび割れが dormant crack³⁾ に転じ、交差斜めひび割れが active crack^{3),4)} となって、部材を突き抜けて破壊に至る様子が表されています。斜めひび割れ進展域の応力緩和機構が薄れ、その結果、斜めひび割れの交差を許す迄、応力が上昇した結果、有害なせん断ひび割れの進展を止めることができなくなったと解釈できます。

本文は、当該論文¹⁾で「斜めひび割れの局所性の緩和」および「斜めひび割れ先端での応力集中の緩和」と表した概念を定量的に述べたものです。少なくとも部材の強度比が、せん断伝達機構や伝達剛性の関数となっていることは確かです。この場合、式(2)の条件が成立しているとしても、耐力比は1.1倍程度となりましたので、比較的、細長いはりのせん断に対しては、耐力比と式(2)の1.62とは機構的な必然性があるものではないと言えます。

ただし、討議者をご指摘されました状況は、純せん断状態に近い地中RCタンクのウェブ部や薄肉シェル



Experimental crack pattern



Note: Diag. Cracks in D do not propagate into F but rather propagates upwards to E

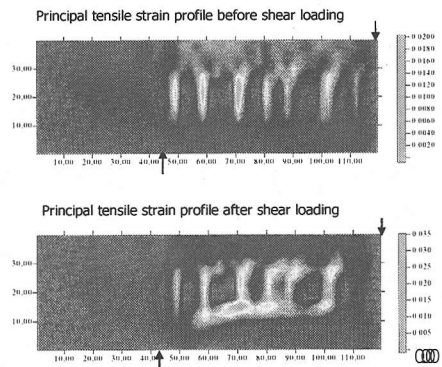


図-2 先行ひび割れを有するはりの主引張主歪みとひび割れ進展(せん断作用前と後)

構造では、十分に仮定できそうです。また、等分布荷重を受ける、せん断スパン比がかなり小さいはりになれば、寧ろ討議者が提起されました機構が、全体を支配することも考えられます。このような構造システムに対してまで、著者らは検討を加えるに至っておりません。多方向のひび割れの相互作用³⁾と構造システムの挙動の観点から、今後、はり部材の範疇を越えて検討を進めてみます。研究に対する別の切り口を頂いた

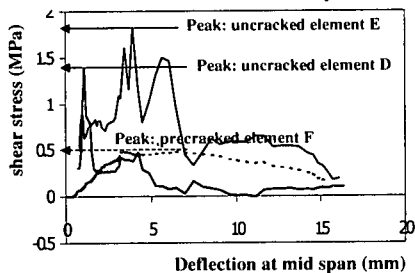
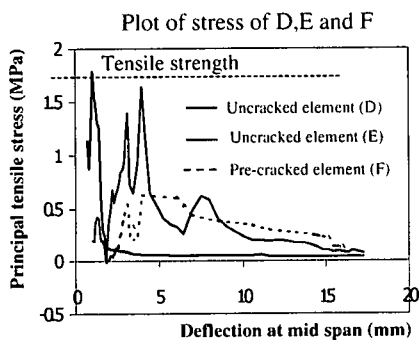
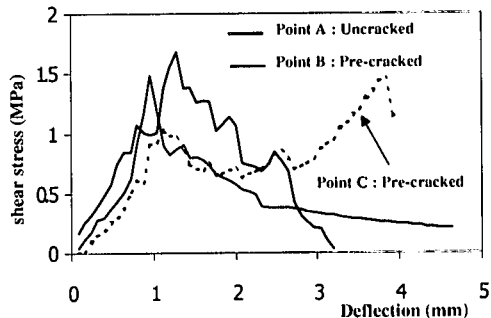
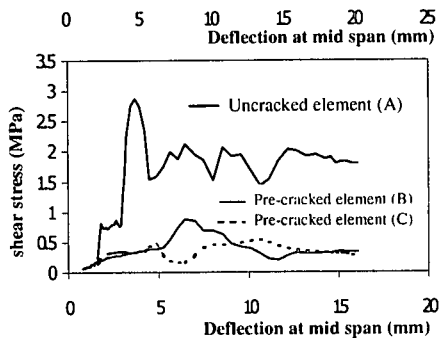
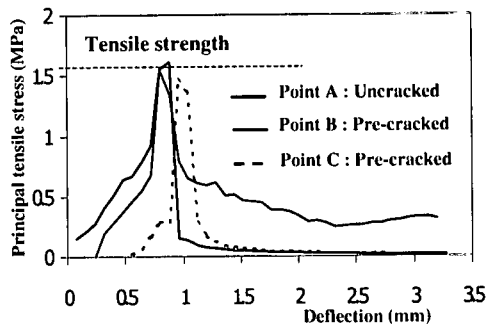
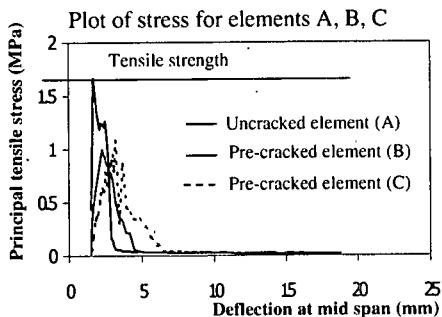
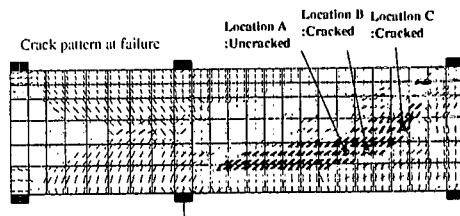
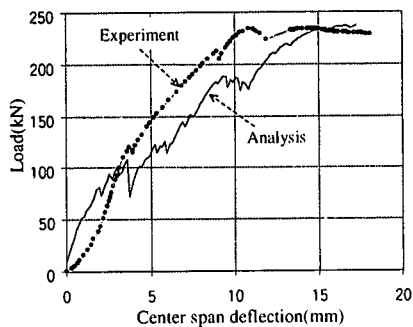


図-3 ひび割れ近傍での局所応力

図-4 せん断変位挙動を大幅に高めた時の梁のせん断挙動と局所応力

ことに改めて御礼申し上げますとともに、今後とも継続的な議論をお願い申し上げます。

先行ひび割れもせん断斜めひび割れも、比較的大きな要素寸法を採用した分散ひび割れモデルで、解析を行いました。離散ひび割れモデルを用いて小数本の先行ひび割れの位置を正確に与えれば、解析精度は更に向上しますが、相互作用の機構と大略的な剛性と耐力の検討には、本解析で使用した少数の分散ひび割れ型有限要素でも、十分、捉えることができました。換言すれば、この程度の粗さの分散ひび割れ有限要素モデルで破壊挙動を大まかにでも追跡できなければ、多方向入力経路を前提とする3次元動的非線形解析は、工学的に意味をなさないとも考えられます。本研究の発端は、この議論から出発したことを申し添えます。

参考文献

- 1) Pimanmas, A. and Maekawa, K.: Influence of pre-crack on RC behavior in shear, *J. Materials, Conc. Struct.*,

- Pavements, JSCE*, No. 669/V-50, pp. 277-291, 2001.
- 2) Pimanmas, A. and Maekawa, K. : Multi-directional fixed crack approach for highly anisotropic shear behavior in pre-cracked RC members, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE*, No. 669/V-50, pp. 293-307, 2001.
 - 3) Fukuura, N. and Maekawa, K. : Spatially averaged constitutive law for RC in-plane elements with non-orthogonal cracking as far as 4-way directions, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE*, Vol. 45, pp. 177-195, 1999. (in Japanese)
 - 4) Okamura, H. and Maekawa, K. : *Nonlinear analysis and constitutive models of reinforced concrete*, Gihodo-Shuppan Co. Tokyo, 1991.
 - 5) Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H. : Contact density model for stress transfer across cracks in concrete, *J. Faculty of Eng. Univ. of Tokyo (B)*, Vol. 40, pp. 9-52, 1989.

(2001.7.24 受付)