

論文 100N/mm² 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

長谷川 了一^{*1}・香取 慶一^{*2}・篠原 保二^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨：本論文では，100MPa を超える高強度コンクリートについて，切欠きを設けたコンクリート試験体による垂直方向引張試験および正負交番繰返し載荷実験を行った。その結果，垂直方向引張試験において，高強度コンクリートの場合，1) コンクリート中の骨材自体にひび割れが入り，平滑なひび割れ面を形成すること，2)，ひび割れ発生後，急激な応力開放が生じること，を確認した。また，繰返しせん断実験において，せん断伝達挙動が 1～4 割程度に低下することを確認し，その簡易型の構成則を提案した。

キーワード：せん断伝達挙動，高強度コンクリート，ひび割れ面

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の力学的挙動を，その構成材料レベルの力学的モデルに基づいて合理的に予測しようとする場合，個々の材料の構成則だけではなく，ひび割れ面におけるせん断伝達挙動の把握は重要であり，その構成則に関する種々の提案が行われている。しかしながら，100 MPa を超え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にひび割れが入り，平滑なひび割れ面を形成すること，ひび割れ発生後，急激な応力開放が生じることから，従来の構成則では鉄筋コンクリート要素の強度を過大に評価する危険性があるだけでなく，既往の構成則の強度定数を単に変更するだけでは対応できない。本研究では，切欠きを設けたコンクリートブロックによる繰返しせん断実験を行い，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解明することを目的とした。本論では，分散ひび割れモデルを前提とした鉄筋コンクリート要素に適用可能な構成則を提案する。

また，近年の材料の高強度化に伴い，数々の 100MPa を超える高強度コンクリート部材実験

が行われているが，その実験結果からは負の最大耐力が正の最大耐力より 10～20%程低下しているものが確認できる（図 - 1，図 - 2 参照）。本研究はこの原因究明に関連をなすものである。

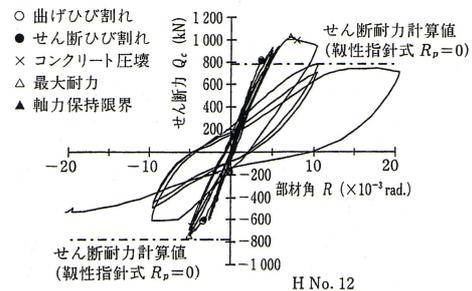


図 - 1 高強度材料を用いた短柱のせん断力 - 部材角関係¹⁾

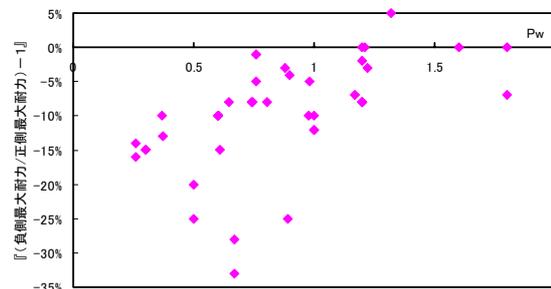


図 - 2 補強筋比と繰返し載荷に伴う耐力低下の関係^{1) - 12)}

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 (正会員)

*2 東京工業大学 建築物理研究センター 助手 工博 (正会員)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 助教授 工博 (正会員)

*4 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

試験体形状を図 - 3 に、コンクリート調合を表 - 1、コンクリートの圧縮試験結果を表 - 2 に示す。また、加力方法を図 - 4、図 - 5 に、変位計設置位置を図 - 6 に示す。試験パラメータを表 - 3 に示す。

加力を行うにあたり、本実験では、垂直荷重とせん断荷重をコンピュータ制御でそれぞれ独立して、載荷できる試験装置を用いた。

まず、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を行った。引張力の載荷は油圧式クローズドループサーボ制御システムを用いた。規定したひび割れ幅は毎秒 0.00005mm の変位制御により、生成した。ただし、載荷速度は、垂直変位が 0.050mm を超える

と 5 倍 (0.00025mm/sec), 0.100mm を超えると 10 倍 (0.00050mm/sec), 0.200mm を超えると 20 倍 (0.00100mm/sec) とした。なお、規定したひび割れ幅に到達後はそのひび割れ幅を一定に保った。

ひび割れを生成後、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実験を行った。せん断力の載荷は高圧ジャッキ制御システムを用い、変位制御で行った。正面左側奥の水平ジャッキには毎秒 0.0005mm の変位速度で引張・圧縮力を載荷し、他方、正面左側手前の水平ジャッキには正面左側奥の水平ジャッキと同じ変位を出力するように引張・圧縮力を載荷した。また、反力側 (正面右側) の水平ジャッキは動かないように固定した。

表 - 1 コンクリートの調合

	F _c (MPa)	W/B (%)	G _{max} (mm)	flow (cm)	slump (cm)	air (%)	単位量(kg/m ³)					
							W	B	S	G	SP	MA
超高強度	130	17	20	55		1.0	155	912	455	956	B×1.2%	B×0.06%
高強度	80	31	20		18	1.6	155	500	819	956	B×0.9%	B×0.06%
普通	20	55	20		18	3.0	194	353	766	956		

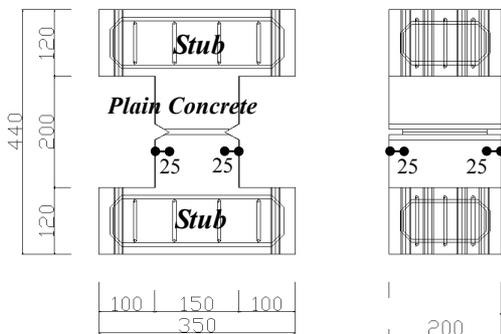


図 - 3 試験体形状 (Unit:mm)

B : 結合剤 S : 陸砂 G : 砕石 SP : 高性能減水剤 MA : 空気徐行剤

F_c : コンクリート強度 (設計時) G_{max} : 粗骨材最大寸法 W : 水

*) B : VKC100SF (普通セメント : スラグ石膏系結合材 : シリカフェューム = 7 : 2 : 1) ただし、普通強度の試験体のみ普通セメントを使用

*) G : 硬質砂岩砕石

表 - 2 圧縮試験結果

	f _c (MPa)
超高強度	132.3
高強度	79.0
普通強度	21.8

ここで、f_c : 一軸圧縮強度

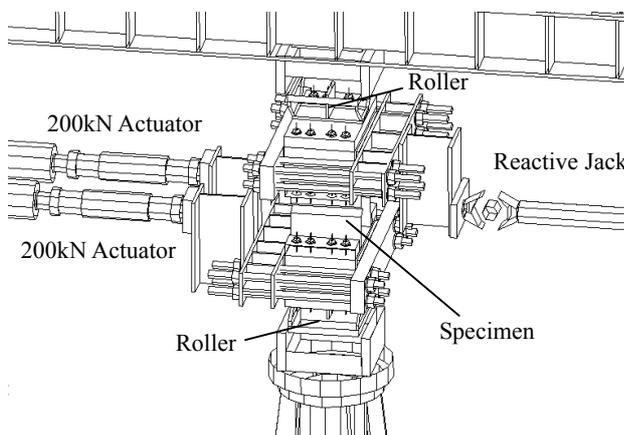


図 - 4 加力詳細図

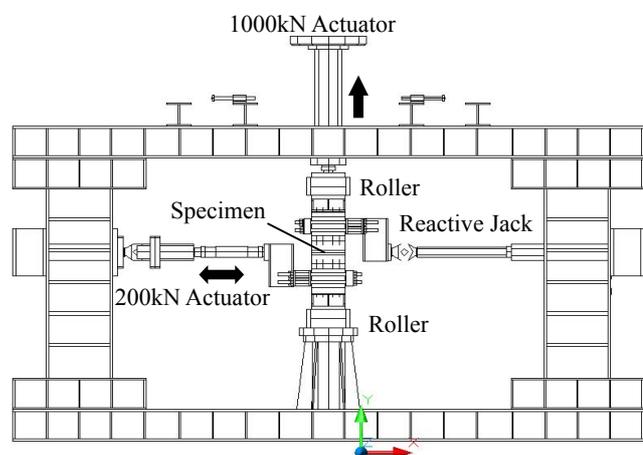


図 - 5 加力方法

3. 垂直方向引張載荷試験

3.1 実験結果

普通コンクリート及び高強度コンクリートのひび割れ面形状(加力後)を写真 - 1 に示す。高強度コンクリートの場合、コンクリート中の骨材

自体にひび割れが入り、平滑なひび割れ面を形成することが確認できる。

3.2 引張軟化曲線

本論文では Hauke ,前川ら¹³⁾¹⁴⁾と同様の方法で式(1)式(2)に従い、破壊エネルギー G_f および引張

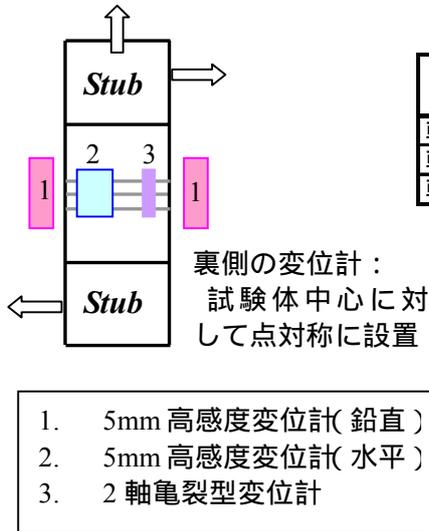


表 - 3 パラメータ

載荷方法	F _c (MPa)	初期ひび割れ幅(mm)			
		引張試験	0.6	0.8	1.0
軸変位一定 正負交番	130	○	○	○	○
軸変位一定 正負交番	80	○			
軸変位一定 正負交番	20	○		○	



図 - 6 変位計設置位置

写真 - 1 ひび割れ面形状 (左 : F_c=130MPa, 右 : F_c=20MPa)

tension model for plain concrete

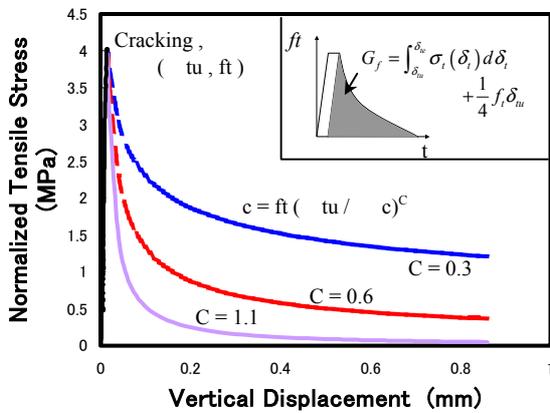


図 - 7 評価方法¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾

In the case of F_c=20MPa

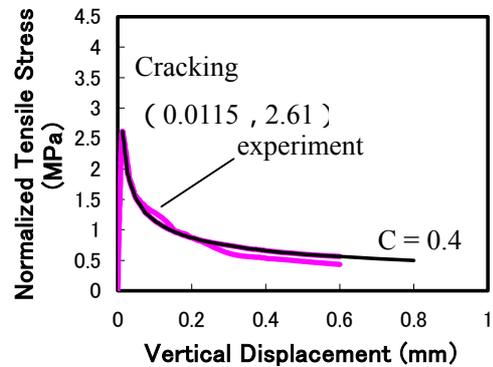


図 - 8 (1)

In the case of F_c=130MPa

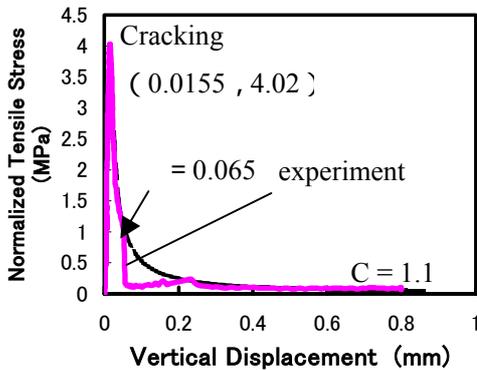


図 - 8 (2)

In the case of F_c=80MPa

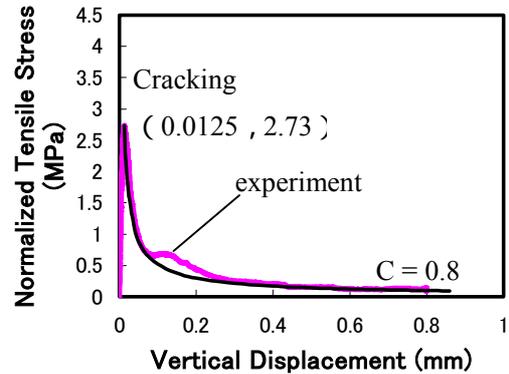


図 - 8 (3)

図 - 8 引張軟化曲線

応力解放率 C を検討した。破壊エネルギーおよび引張応力解放率の評価方法を図 - 7 に示す。また、もっとも適応のよい値を表 - 4 , 図 - 8 に示す。

$$G_f = \int_{\varepsilon_{tu}}^{\varepsilon_{te}} \sigma_t(\delta_t) d\delta_t + \frac{1}{4} f_t \delta_{tu} \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_t \left(\frac{\delta_{tu}}{\delta_t} \right)^C ; \text{ after cracking} \quad (2)$$

G_f : 破壊エネルギー [N/mm²] δ_{tu} : ひび割れ発生変位 [mm]

δ_{te} : 終局引張変位 [mm] δ_t : 鉛直変位 [mm]

l : 要素寸法 [mm] f_t : 引張強度 [N/mm²]

高強度コンクリートの場合、ひび割れ発生後に著しい応力解放が見られる。

図 - 8 (2) において、鉛直変位が 0.065mm あたりで急激に引張応力が低下しているのは、ひび割れが開いていく過程で、ひび割れ区間における目開きが不均一になったことが要因と考えられる。

表 - 4 破壊エネルギーと引張応力解放率

Fc	Gf(N/mm)	C
130	0.14537	1.1
80	0.27529	0.8
20	0.43849	0.4

*) ただし、本検討では $\varepsilon_{te} = \varepsilon_{tu} + 0.4$ とする

4. 正負交番繰返し載荷実験

4.1 せん断伝達低減係数

李・前川らはひび割れ面の面形状を表現する接触面密度関数 (式(3)参照) を設定することにより、式(5)に示す接触点での剛性のみを強度の関数とした接触面密度モデルを提案している (図 - 9 参照) ¹⁶⁾。

$$\Omega(\theta) = 0.5 \cos \theta \quad (3)$$

$$Z' = \sigma'_{con} K A_t \Omega(\theta) = 7.66 f_c^{1/3} \cos \theta \quad (4)$$

$$\tau = \int_{\theta_0}^{\pi/2} Z' \sin \theta d\theta = \frac{m \beta^2}{1 + \beta^2} \quad (5)$$

ここで、

$\Omega(\theta)$: 接触面密度関数 K : 接触有効面積 (= 1)

Z' : 接触単位で伝達される圧縮力

A_t : ひび割れ面あたりのひび割れ全表面積 (= $4l$)

σ'_{con} : 接触圧縮応力 (= $12.0 f_c^{1/3}$)

f_c' : 一軸圧縮応力

τ : ひび割れ面で伝達されるせん断応力

σ : ひび割れ面で伝達される圧縮応力

m : 終局せん断伝達強度 (= $3.83 f_c^{1/3}$)

θ_0 : ひび割れ面におけるせん断変位 とひび割れ幅 (開口変位) の比 (= δ_{tu} / δ_t)

θ : ひび割れ面の角度 (図 - 9 参照)

$$\theta_0 = \cot^{-1} \left(\frac{\delta_{tu}}{\delta_t} \right)$$

この接触面密度モデルはモルタル強度が粗骨材強度より小さい場合を対象とするものである。4.2 章では、この構成則にせん断伝達低減係数 A を乗ずることにより、高強度コンクリートを用いた場合のせん断伝達の低減率の評価を行う ¹⁵⁾。

$$\tau = A \frac{m \beta^2}{1 + \beta^2} \quad (6)$$

4.2 実験結果

実験結果を図 - 11 に示す。130MPa の高強度コンクリートの場合、せん断伝達挙動は 1~4 割に低下した。

また、ひび割れ幅、ずれ変位によりそのせん断伝達低下率が異なる。よって、高強度コンクリートのせん断伝達挙動を式(6)において評価することは難しく、今後、骨材自体にひび割れが入る高強度コンクリートに対応したせん断伝達構成則の提案が必要である。

4.3 構成則

普通コンクリートと高強度コンクリートのひび割れ面形状および面密度の違いは Bujadham らによって図 - 9 のように報告されている ¹⁷⁾。著者らは骨材自体にひび割れのはいる高強度コンクリートのその接触面密度関数を図 - 9 の接触面密度分布を基に式(7)と仮定した。この式(7)を用い、李・前川らと同様に近似・計算を行うことにより、式(8)に示すせん断伝達構成則を提案した。従って、本提案構成則は接触点での剛性

を一律であると仮定している。係数 α は高強度コンクリートに対応できないと思われる A_t および σ'_{CON} の影響を補うために設定したものであり、また、ひび割れ面形状が変化した場合のひび割れ幅の変化に伴うせん断応力の低下を補正する係数である。なお、図 - 11 に示す実験結果から最も良い適合を示す α を求め、式(9)を導いた。

$$\Omega(\theta) = 0.75 \cos^3 \theta \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tau &= \alpha \int_{\theta_0}^{\pi/2} Z' \sin \theta \, d\theta \\ &= \alpha \times \frac{3}{4} m \left(\frac{\beta^2}{1 + \beta^2} \right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{2}{5\omega} \quad ; \quad (F_c = 130 \text{MPa}) \quad (9)$$

本提案せん断伝達構成則と実験結果の比較を図 - 11 に示す。本提案式において、適切に α を設定することにより、従来より簡易にして精度よく、高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達挙動を評価できることを示した。特に、130MPa の高強度コンクリートに関しては、式(9)により α を求めることができる。なお、本研究においてはコンクリート強度による影響は確認できなかった。今後の研究課題としたい。

5. まとめ

本論文では、100N/mm² を超える高強度コンクリートについて、切欠きを設けたコンクリートブロックによる垂直方向引張試験および正負交番繰返し載荷実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 高強度コンクリートの場合、a) コンクリート中の骨材自体にひび割れが入り、平滑なひび割れ面を形成すること、b) ひび割れ発生後、急激な応力開放が生じること、を確認した。
- (2) 高強度コンクリートはひび割れ幅、ずれ変位により異なるものの、せん断伝達挙動は 1~4 割に低下していることを確認した。
- (3) 既往の研究に基づき、接触面密度関数を設定することにより、ひび割れ面におけるせん断伝達構成則を提案した。

なお、(1)、(2)に示す知見が高強度コンクリートの部材実験における第 1 章第 2 パラグラフにおける現象の理由の 1 つであると思われる。

謝辞：本研究は東京工業大学建築物理研究センター共同研究の一貫として行われたものであります。本研究を行うにあたり、貴重な御助言と多大な御協力を賜った大成建設(株)技術センター、(株)ポゾリス物産、第一セメント(株)に深謝致します。

参考文献

- 1) 寺岡 勝ほか：鉄筋コンクリート構造の耐震設計と部材性能評価についてのいくつかの疑問，コンクリート工学，Vol.41，No.4，pp.37-46，2003.4
- 2) 濱田 真ほか：高強度材料を使用した RC 柱に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.175-180，1996
- 3) 木村 秀樹ほか：高強度コンクリートを用いた RC 壁柱の自身時挙動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.20，No.3，pp.175-180，1998
- 4) 菊田 繁美ほか：超高強度材料を用いた RC 柱部材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.19，No.3，pp.175-180，1997
- 5) 石川 裕次ほか：高強度コンクリート・高強度鉄筋を用いた柱の高軸力下における力学性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.175-180，2000
- 6) 小室 努ほか：150MPa 超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐震性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.175-180，2002
- 7) 丸田 誠ほか：高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の曲げせん断実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.175-180，2002
- 8) 熊谷 仁志ほか：超高強度プレキャスト鉄筋コンクリート柱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.24，No.2，pp.175-180，2002
- 9) 木村 暁子ほか：高強度鉄筋コンクリート柱の高軸力下におけるせん断性状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.24，No.2，pp.175-180，2002

- 10) 菊田 繁美ほか：超高強度材料を用いた鋼板巻き RC 柱部材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.23，No.3，pp.175-180，2001
- 11) 黒瀬 行信ほか：超高強度鉄筋コンクリート構造 ($F_c=120\text{N/mm}^2$) の開発 その1～その3，日本建築学会学術講演梗概集，C-，pp.607-612,2000.
- 12) 堀 伸輔ほか：超高強度鉄筋コンクリート構造の柱部材実験，日本建築学会学術講演梗概集，C-，pp.415-418,2002
- 13) Hauke, B. and Maekawa, K：Three-Dimensional Modelling of Reinforced Concrete with Multi-Directional Cracking, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No.634/V-45, pp.349-368,November 1999.
- 14) An, X. Maekawa, K and Okamura, H.: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No.564/V-35, pp.297-316,May 1997.
- 15) 土屋 智史，三島 徹也，前川 宏一：高強度構成材料を用いた RC 梁部材のせん断破壊と数値性能評価，土木学会論文集，No.697/V-54, pp.65-84,May 2002.
- 16) 李 宝禄，前川 宏一：接触面密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式，コンクリート工学論文，No88-1,Vol.26No.1,pp123-137,1988.1
- 17) Bujadham, B. Mishima, T. and Maekawa,: Verification of the Universal Stress Transfer Model, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No.451/V-17, pp.289-300, August 1992.

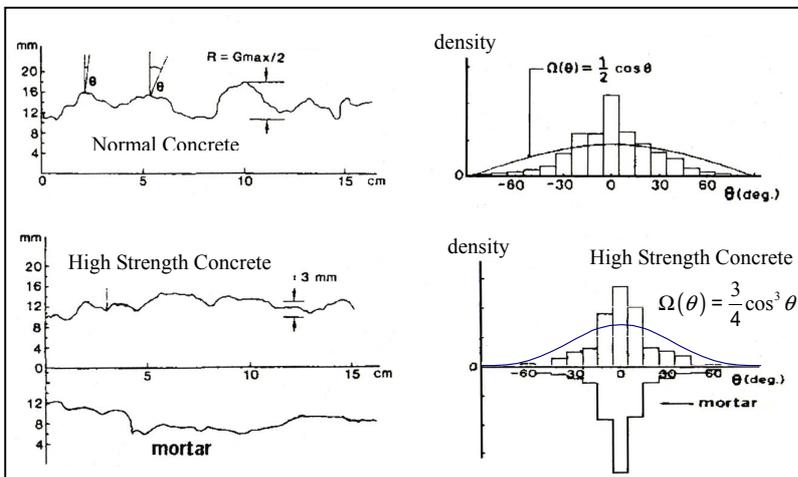


図 - 9 ひび割れ面の粗さ分布と面密度関数¹⁷⁾

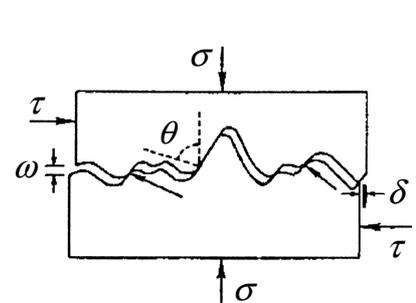


図 - 10 ひび割れ面の状態とひび割れ角度の定義¹⁷⁾

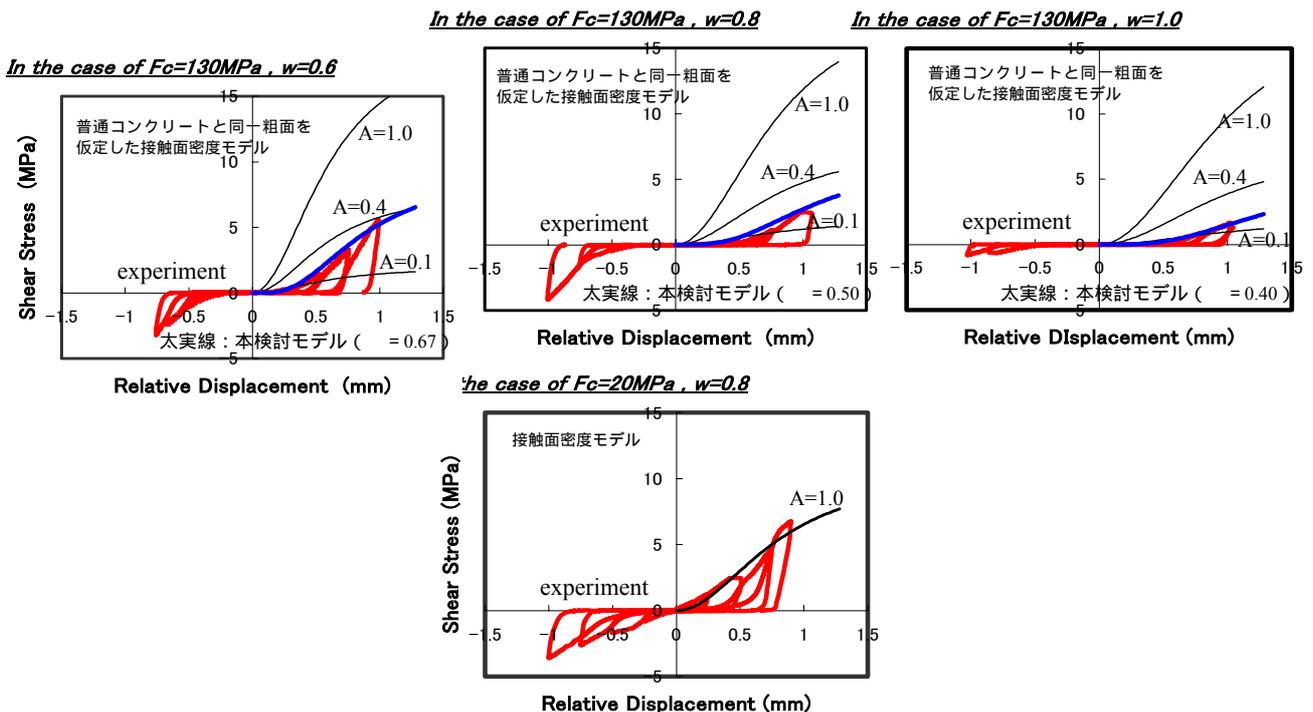


図 - 11 せん断伝達モデル