

破壊力学に基づくRC部材のせん断耐力の研究

渡辺忠朋¹・松岡 茂²・武田康司²

¹正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 鉄建建設(株) 技術研究所 (〒286-0825 千葉県成田市新泉 9-1)

鉄筋コンクリート部材のせん断破壊挙動を破壊力学の考え方に基づいて、有限要素法を用いて解析を行った。ひび割れ面での引張応力の軟化とひび割れの局所化およびひび割れ面で伝達されるせん断力を考慮した解析モデルを用いることにより、鉄筋コンクリート部材の斜めひび割れ発生・進展過程を追跡することができることが明らかとなった。ひび割れ面で伝達されるせん断力については、ひび割れ開口幅の増加に伴って減少するものとしたモデルを提案した。さらに、解析モデルの妥当性を確認する目的で、梁のせん断実験結果との比較を行った。

Key Words : RC beam, shear failure, fracture mechanics

1. はじめに

近年、建設技術の進歩と社会的な要請により構造物が大型化するのに伴って、鉄筋コンクリート部材も大型化している。特に、高張力鋼等の開発により長スパンの橋梁の施工が可能となり、このような橋梁を支持する基礎も大型化することにより基礎のフーチングには、橋脚から大きなせん断力が伝達される。鉄筋コンクリートのせん断耐力は、寸法効果の影響を受けることが平井ら¹⁾の研究により明らかとなっている。しかしながら、鉄筋コンクリート部材のせん断破壊のメカニズムについては完全には解明されていない。また、阪神・淡路大震災で多くの土木構造物にせん断破壊と推定される斜めひび割れが生じ、大きな被害が発生した。このような被害が生じた構造物の大部分は、部材のせん断耐力に対する規準が不明確な古い設計基準に基づいて設計・施工されたことが報告されている²⁾。したがって、コンクリート部材の斜めひび割れ発生・進展と破壊プロセスを考慮した合理的なせん断耐力算定方法の確立が望まれている。

破壊力学を用いてコンクリートのひび割れ挙動を研究した例がいくつか報告されている。これらの報告によると、プレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度の寸法効果については破壊力学の考え方は有効であることが報告されている。平井ら³⁾は、破壊力学に基づいてRC部材のせん断耐

力について解析を行っており、RC部材のせん断耐力を推定することができることを指摘している。しかしながら、平井らのモデルでは斜めひび割れ発生位置を限定する必要がある、ひび割れ発生・進展挙動を一連の解析で追跡することは困難である。そこで、本論文では、破壊力学に基づいた有限要素法を用いて、鉄筋コンクリート部材のひび割れの発生・進展挙動とせん断耐力について検討を行った。RC部材のせん断耐力の寸法効果を確認する目的で行われた実験結果を破壊力学に基づいた有限要素法により解析し、ひび割れ発生・進展およびひび割れ面での応力伝達を検討した。

2. FEM解析モデル

(1) 解析モデル

コンクリートにおける破壊力学の大きな特徴は、ひび割れ先端にフラクチャープロセスゾーンを考慮することである。このフラクチャープロセスゾーンは、非破壊状態と完全にひび割れが発生し開口している状態との中間状態にあり、複数の微細なひび割れが発生している状態と考えられている。また、フラクチャープロセスゾーンでは引張応力が伝達されているものと考えられている。フラクチャープロセスゾーンにおける引張応力の伝達を Hordijk⁴⁾は式(1)に示すような応力とひび割れ開口幅との関係で示している。

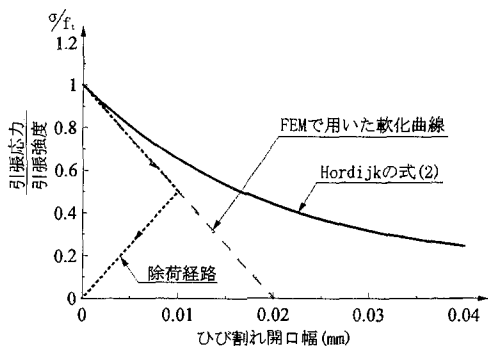


図-1 引張軟化曲線

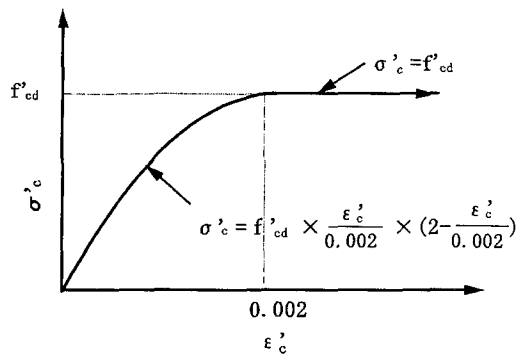


図-3 圧縮応力-ひずみ曲線

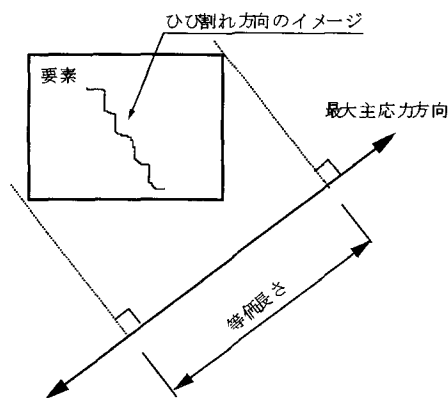


図-2 等価長さ

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left\{ 1 + \left[C_1 \frac{\omega}{\omega_c} \right]^3 \right\} \exp \left[-C_2 \frac{\omega}{\omega_c} \right] \quad (1)$$

$$- \frac{\omega}{\omega_c} \left[1 + C_1^3 \right] \exp(-C_2)$$

ここに、 $C_1=3$ 、 $C_2=6.93$ 、 ω ：ひび割れ開口幅、 ω_c ：限界開口幅（ $160 \mu\text{m}$ ）、 f_t ：コンクリートの引張強度、 σ_t ：引張応力である。Hordijk は、コンクリートの引張破壊特性である破壊エネルギーおよび引張軟化曲線を式(1)で近似することができることを報告している。FEM解析では、コンクリートの引張破壊特性として、図-1に示すような直線タイプの引張軟化曲線を用いた。引張軟化曲線の傾きは、Hordijk が提案している引張軟化曲線の軟化開始時の接線勾配とした。したがって、本解析に用いた引張軟化曲線勾配は、Hordijk が提案している破壊エネルギーの大きさに応じて変化する。このような直線モデルにより、無筋コンクリート部材の曲げ破壊荷重を安全側にかつ良い近似を与えることを堀井は報告している⁹⁾。また、筆者らの一人は、引張軟化曲線を本論文と同様に、直線で近似したモデルを用いて、

無筋コンクリートのトンネル覆工破壊プロセスを精度良く追跡することができることを確認している⁹⁾。

コンクリートの引張破壊特性である引張軟化曲線を考慮する解析モデルとしては、Hillerborg ら⁷⁾が提案した仮想ひび割れモデル (fictitious crack model) と Bazant ら⁸⁾が提案したひび割れ帯モデル (crack band model) が代表的なモデルである。本論文では、仮想ひび割れモデルの概念を分布ひび割れに適用した Dahlblom ら⁹⁾が提案したモデルを参考とした。ひび割れ発生要素では、式(2)に示すように要素の等価長さを考慮して、引張軟化曲線を引張応力-ひずみ曲線に変換している。この等価長さは、図-2に示すようにひび割れ発生方向と直交する最大主応力方向へ要素を投影した長さとした。

$$\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E} + \frac{\omega(\sigma_t)}{L} \quad (2)$$

ここに、 ε ：ひび割れ開口を含む最大主応力方向のひずみ、 L ：等価長さ、 σ_t ：最大主応力、 $\omega(\sigma_t)$ ：最大主応力 σ_t におけるひび割れ開口幅、 E ：コンクリートの弾性係数である。解析では、最大主応力（引張側が正）がコンクリートの引張強度に達した時点で最小主応力方向にひび割れが発生するものとし、ひび割れが発生した要素では、最大主応力方向の応力-ひずみ関係は式(2)に従い、最小主応力方向はひび割れ発生前の応力-ひずみ関係に従う直交異方性要素とした。解析に使用した要素は平面応力条件下の4節点の四辺形アイソパラメトリック要素である。

ひび割れの進展に伴うひび割れ周辺の引張応力の除荷を考慮することによりひび割れの局所化等の挙動を近似することができることが指摘されている¹⁰⁾。また、峯本ら⁹⁾は、引張応力の除荷経路を考慮することによりプレーンコンクリートの曲げ強度の寸法効果をFEMで近似することができることを報告している。本解析においても原点に指向する除荷経路を考慮するものとした。

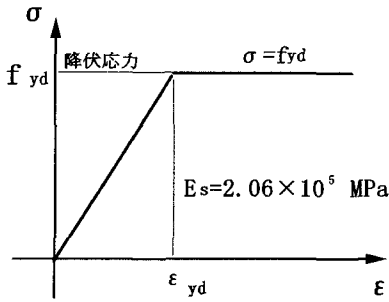


図-4 鉄筋の応力-ひずみ曲線

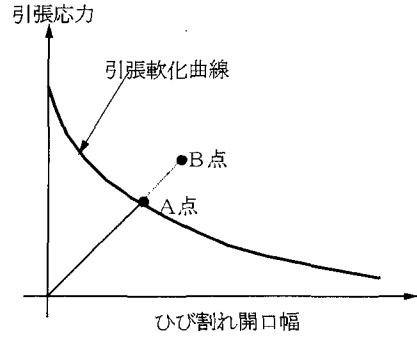


図-6 ひび割れの局所化

せん断剛性保持率 β

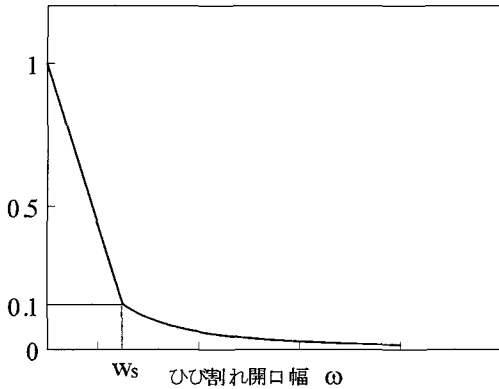


図-5 せん断保持率

れが発生した要素のせん断剛性は、ひび割れの影響を受けて、図-5に示すようにひび割れ開口幅が増加するのに伴って低下するものと仮定した。図中の縦軸は、ひび割れ発生前の健全な要素のせん断剛性により無次元化しており、この値をひび割れ面におけるせん断剛性保持率と定義し、ひび割れ発生要素のせん断剛性は式(4)のように計算される。せん断剛性保持率は、図-5に示すようにひび割れ開口幅が増大するのに伴ってひび割れ開口幅 W_s まで直線的に減少し、それ以降は指数関数的に減少するものとした。

$$G = \beta \cdot \frac{E_c}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ関係については、図-3に示すような2次曲線タイプの応力-ひずみ曲線を用いた。降伏曲面は Drucker-Prager タイプとし、コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線を単軸試験結果として考え、降伏曲面の定数を定めた。コンクリートは等方硬化則に従うものとして計算を行った。また、引張強度に達する前のひび割れが発生していないコンクリートの応力-ひずみ関係は、式(3)の弾性係数を用いた。式(3)に示す引張側の弾性係数は、図-3に示す2次曲線の原点における接線勾配である。

$$E_t = f'_{cd} / 0.001 \quad (3)$$

ここに E_t : 引張側の弾性係数, f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度である。

鉄筋の材料特性は、図-4に示すような完全弾塑性の応力-ひずみ曲線とした。鉄筋は、軸力のみしか負担できないトラス要素でモデル化し、節点はコンクリートをモデル化した四辺形要素と共通とした。

ひび割れ面では、骨材の噛み合わせによりせん断力が伝達されるものと推定される。Rotsら¹¹⁾は、ひび割れ開口幅に応じて、伝達されるせん断力の大きさが変わるモデルを提案している。本解析においてもひび割れ面で伝達されるせん断力は、Rotsらと同様にひび割れ開口幅に依存するものとした。ひび割

ここに、 G : せん断剛性, E_c : ひび割れ発生前のコンクリートの弾性係数, β : せん断剛性保持率, ν : コンクリートのポアソン比である。せん断剛性保持率については、除荷経路を考慮しておらず引張応力が除荷経路となった場合でも図-5の曲線上にあるものと仮定した。

収束計算はニュートン・ラプソン法を用い、変位制御により解析を行った。また、収束判定は残差力が最大反力の10%以下とした。

(2) ひび割れの局所化

ひび割れの局所化を追跡するためには、ひび割れが発生した要素の引張特性が図-1に示す引張軟化曲線上にあるのか、あるいは除荷経路にあるのかを判定する必要がある。このような引張軟化曲線から除荷経路に分岐する判定方法としては、井上ら¹²⁾が提案しているエネルギー保存則を利用したものがある。本解析モデルでは、ひび割れが発生した要素の大部分が除荷経路に分岐することに注目して、エネルギー保存則を用いないでひび割れの局所化判定を行った。あるひび割れ発生要素の最大主応力が図-6に示す引張軟化曲線上のA点であるとした場合、次のインクリメントの計算では、ひび割れ発生要素は全て除荷経路に分岐するものとして原点とA点を

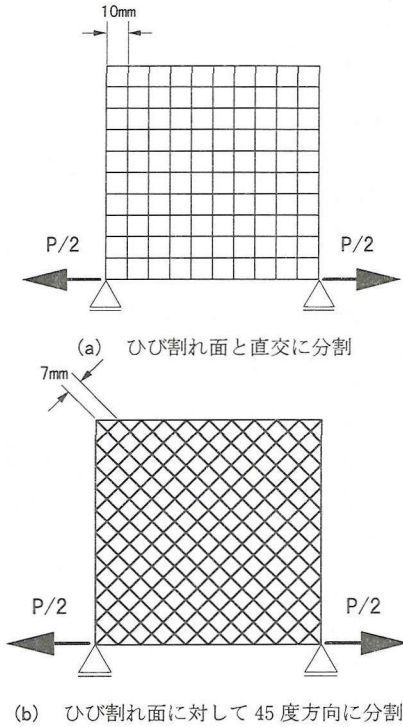
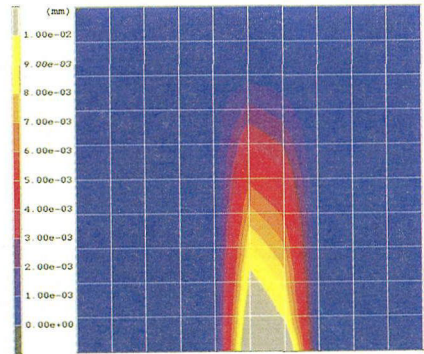


図-7 要素分割図

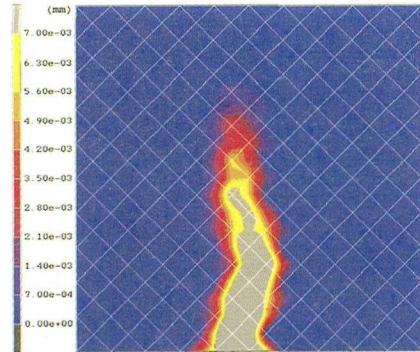
結ぶ剛性を与える。このインクリメント計算結果で、図-6に示すように最大主応力が引張軟化曲線外に位置するB点になったひび割れ発生要素は、引張軟化曲線上にあるものとし、それ以外のひび割れ発生要素は除荷経路に分岐したものと再度計算を行う。各インクリメントで前述のような繰り返し計算を行い、ひび割れ発生要素が除荷経路に分岐したかどうかの判定を行った。

(3) 要素分割の依存性

分布ひび割れモデルでは、要素分割の相違により、ひび割れ発生状況および最大荷重以降の変位挙動が影響を受けることが Rots ら¹¹⁾により指摘されている。一方、Cervenka¹³⁾は、ひび割れの局所化を考慮することにより要素分割等の影響が少ないと報告している。そこで、本研究の解析モデルに対する要素分割の影響を把握する目的で、図-7に示す要素分割および要素寸法を変化させて解析を行った。解析は、図に示すようにモデル下面に引張力を与え、引張ひび割れが下面から発生・進展するモデルである。図-7(a)は、ひび割れ面と直交して要素分割したものであり、(b)の要素分割はひび割れ面に対して45度の方向に分割したものである。また、両者の要素分割では、要素寸法を変えている。なお、両者の引張軟化曲線は同一のものを用いた。



(a) ひび割れ面と直交に分割



(b) ひび割れ面と 45 度方向に分割

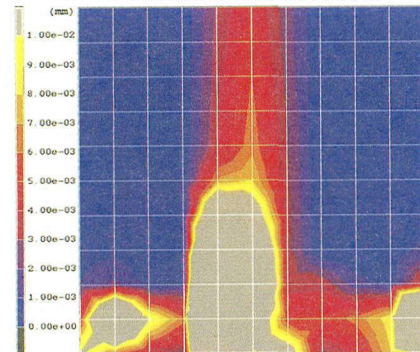


図-8 ひび割れ発生状況

解析では、引張軟化曲線の除荷経路を考慮しているために、ひび割れは図-8に示すよう(b)の分割では要素に沿ってひび割れはジグザグに発生しているが、巨視的には(a)の分割と同様にひび割れは局所化している。荷重とひび割れ開口幅との関係についても、図-9に示すように(a)と(b)の分割では最大荷重以降の挙動については多少の相違があるが、全体的な傾向はほぼ一致している。これらのことから、使用した解析モデルでは要素分割による影響は、小さいものと判断される。要素寸法が違う(a)、(b)の解析結果の最大荷重と荷重-変位曲線の全体的な傾向はほぼ一致していることから、本論文で用いている解析モデルの引張特性は要素寸法に対しても依存性

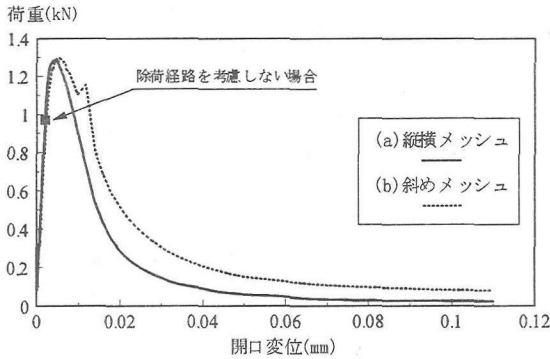


図-9 要素分割の違いによる荷重とひび割れ開口幅の関係

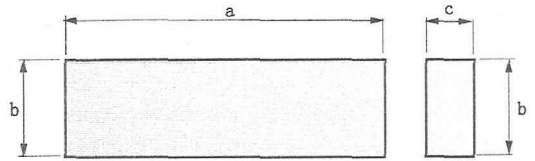


図-10 供試体形状

表-1 供試体寸法一覧

供試体 No.	a (mm)	b (mm)	c (mm)	せん断スパン比 %	引張鉄筋比 %
type 2-1	3000	1100	200	0.5	0.265
type 2-2	4000	1100	200	1.0	0.265
type 2-3	5000	2100	400	0.5	0.265
type 2-4	7000	2100	400	1.0	0.265
type 2-5	9000	2100	400	1.5	0.265

が少ないものと考えられる。なお、解析結果のひび割れ発生状況は、最大主ひずみから等価長さを考慮して開口幅に変換表示している。

ひび割れの局所化を判定するための、引張軟化曲線の除荷経路を考慮しない解析結果のひび割れ発生状況を図-8(c)に示す。この解析では、ひび割れ発生要素が除荷経路を選択することがないため、ひび割れが局所化せずに分散している。また、ひび割れが局所化しないために、除荷経路を考慮した解析結果の最大荷重に達する前に解が発散した。これに対して、引張軟化曲線の除荷経路を考慮した解析結果は、ひび割れが局所化しており、最大荷重到達以降の変位挙動を追跡することが可能であった。したがって、本解析で用いた引張軟化曲線の除荷経路への分岐判定により、ひび割れの局所化を追跡することができるものと考えられる。

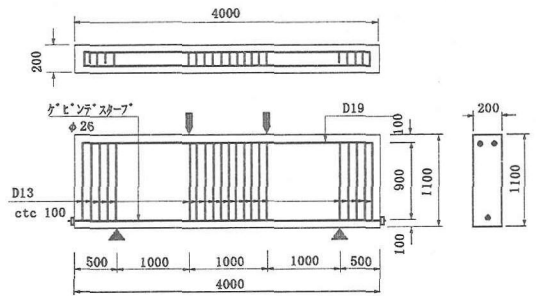


図-11 供試体配筋図 (type 2-2) (単位 mm)

3. RC部材解析結果

(1) 実験概要

築嶋ら¹⁴⁾が行った曲げせん断実験を解析対象とした。この実験は、RC部材のせん断耐力に関する寸法効果を把握することを目的に、せん断スパン比・有効高さをパラメータとして行われている。図-10に曲げ実験に用いられた供試体形状を、表-1に実験に使用した供試体の一覧を示す。供試体の配筋は、図-11に示すように、せん断スパンにはせん断補強鉄筋が配置されておらず、曲げスパンおよび荷重点付近のみに補強鉄筋が配置されている。なお、引張補強材としては、引張強度の高いゲビンデスタープを用いており、引張力を確実に伝達する目的で引張補強材の端部には鋼板を取り付けている。曲げ実験時におけるコンクリート強度は約25MPa程度である。

荷重は、荷重制御の油圧ジャッキにより行っている。また、荷重は鉛直方向の静的単調荷重法により行っている。せん断スパン比1.0以下のtype 2-1~2-4

の曲げ試験では、支承点付近から発生した斜めひび割れが荷重端部に到達した時点で、荷重が急激に低下したため実験を終了しており、せん断破壊により供試体の耐力が決定されているものと考えられる。

図-12にせん断により耐力が決定されたtype 2-3の荷重-変位曲線を示す。実験結果では、図に示しているように、荷重450kN付近で曲げスパン内に、部材軸と直角方向にひび割れが供試体下面より発生した。さらに、荷重を継続すると複数のひび割れの発生が確認され、荷重が約4300kNに到達した時点で、図-13に示すように支承点から生じた斜めひび割れが荷重点付近まで到達し、荷重を保持することができなかった。

せん断スパン比1.5のtype 2-5では、斜めひび割れが発生したのちも荷重が保持され、変位が変位計の測定限界(50mm)を越えたため荷重を終了している。荷重終了時点では、引張鋼材に設置したひずみゲージの測定値は降伏ひずみを越えており、引張鋼材は降伏しているものと判断される。図-14に荷重-変

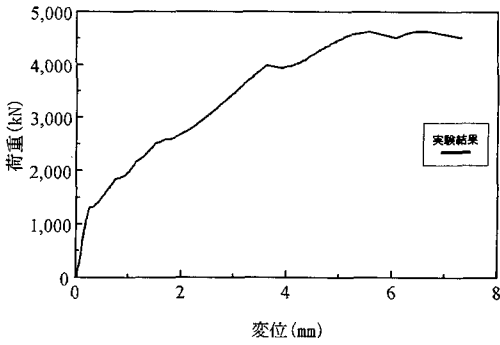


図-12 type 2-3 の荷重-変位曲線 (実験結果)

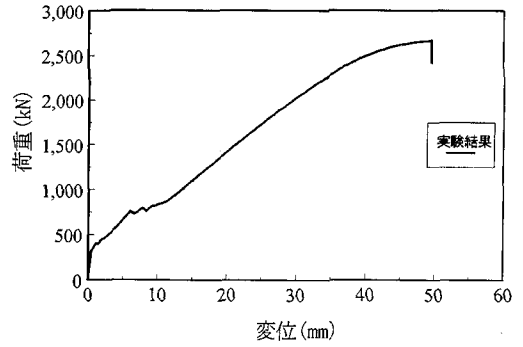


図-14 type 2-5 の荷重-変位曲線 (実験結果)

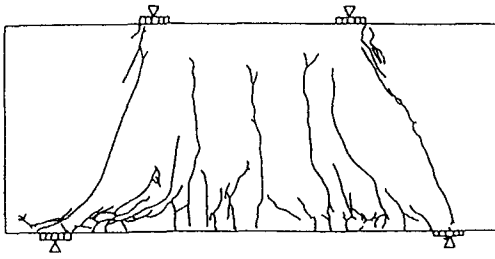


図-13 ひび割れ状況 (type 2-3 実験結果)

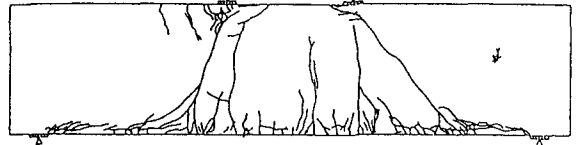


図-15 ひび割れ状況 (type 2-5 実験結果)

位曲線を、図-15 にひび割れ発生状況を示す。載荷荷重が約 370kN 付近で曲げスパン内にひび割れが発生し、さらに実験を継続すると約 770kN 付近で斜めひび割れが発生した。しかしながら、せん断スパン比 1.0 以下の供試体のように、斜めひび割れが載荷点付近まで到達しても荷重が低下することは無く、さらに実験を継続した。実験終了時点では、載荷板直下付近に複数のひび割れが発生していることが確認された。

(2) せん断剛性保持率

せん断剛性保持率を考慮せず、ひび割れ発生した要素では、ひび割れが完全に閉口するまでせん断力の伝達が無いモデル、つまりせん断剛性保持率が零としたモデルにより、type 2-2 を解析した。なお、コンクリートの引張強度は、寸法効果の影響を受けている可能性があるが、割裂引張試験結果に基づいて 2.5MPa として解析を行った。引張鉄筋の応力-ひずみ曲線は、図-4 に示すように完全弾塑性モデルとした。図-16 に示すようにひび割れ面でのせん断応力の伝達を考慮しないモデル、つまりせん断剛性がない計算結果は、曲げスパンにひび割れが発生する第一ピークまでは実験結果とほぼ一致しているが、その後の挙動は実験結果より小さくなっており、実験結果と一致していない。また、解析結果のひび割れ発生状況は図-17 に示すように、せん断剛性保持率を考慮しない解析結果では、引張鉄筋の伸びに伴っ

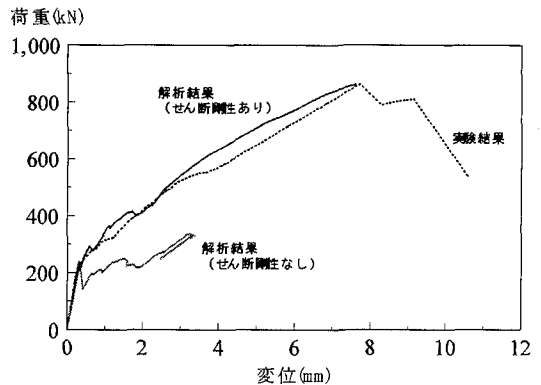


図-16 荷重-変位曲線 (type 2-2)

て、鉄筋周辺のコンクリートにひび割れが発生し、ひび割れ要素ではせん断力が伝達されないために、引張鉄筋周辺にひび割れ領域が分布している。このようにひび割れ発生領域が鉄筋周辺と曲げスパンに限定されるために、実験で観察されたような載荷点と支承点を結ぶ斜めひび割れの発生は見られない。以上のようにせん断剛性保持率を考慮しないモデルでは、ひび割れの発生状況および荷重-変位曲線が実験結果と異なっている。なお、解析は載荷条件の対称性を考慮して、供試体の 1/2 をモデル化して計算している。

せん断剛性保持率を定めるために、せん断剛性保持率とひび割れ開口幅との関係をパラメータとして計算を行った。つまり、図-5 に示すひび割れ開口

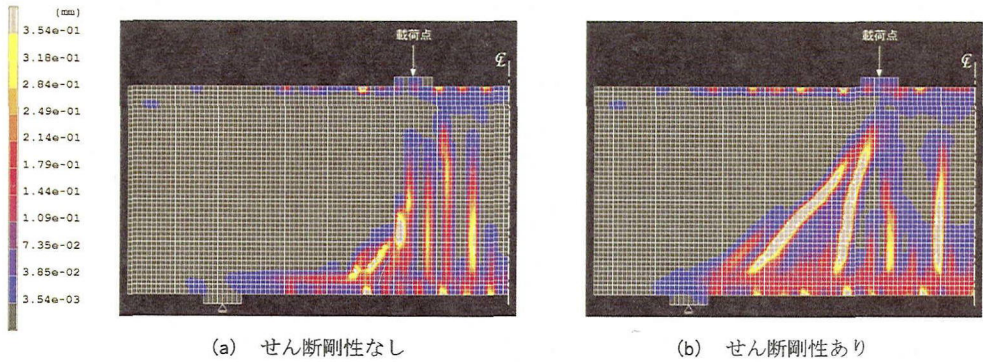


図-17 ひび割れ発生状況 (解析結果)

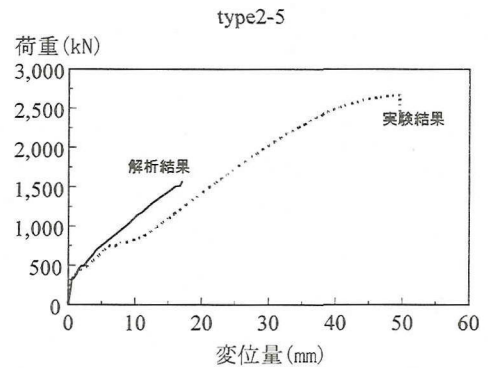
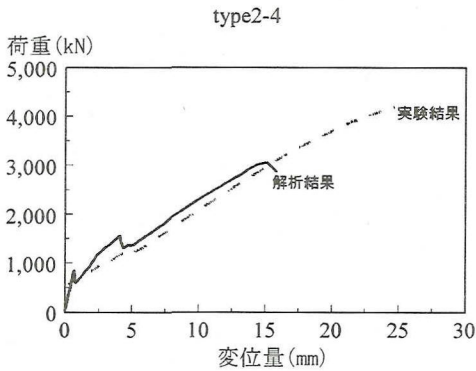
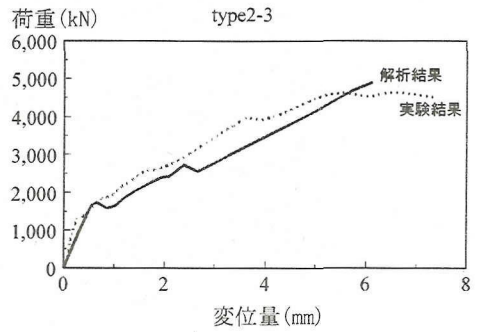
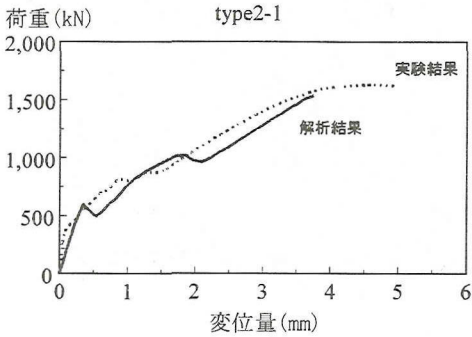


図-18 荷重-変位曲線 (解析結果)

幅 W_s をパラメータとした計算を行った。その結果、式(5)に示すようなせん断剛性保持率とひび割れ開口幅 ω との関係を用いた計算結果が、type2-2の実験結果と良い対応を示した。

$$\begin{aligned}
 0 &\leq \omega \leq 0.15\text{mm} \\
 \beta &= 1 - 6\omega \\
 0.15\text{mm} &\leq \omega \\
 \beta &= 0.015 / \omega
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

ここに、 ω : ひび割れ開口幅である。ひび割れが発生した要素では、ひび割れの方向性に関係なく、せん断剛性は一樣に式(4)に従うものとした。式(5)に示

すせん断剛性保持率を考慮したモデルの計算結果は、図-16に示すように、荷重-変位曲線が実験結果とほぼ一致している。また、ひび割れ発生状況についても、図-17に示すように実験結果とほぼ一致している。実験では、荷重が200kN付近で曲げによるひび割れが発生し荷重が一時的に低下する。その後、載荷を継続すると複数のひび割れが発生し、実験と同様に荷重が約500kNになった時点で斜めひび割れが支承点から発生した。最終的には、荷重が約880kNに達した時点で、支承点付近から生じた斜めひび割れが載荷点付近まで達して荷重が低下した。解析結果も実験と同様に最初に曲げによるひび割れが発生

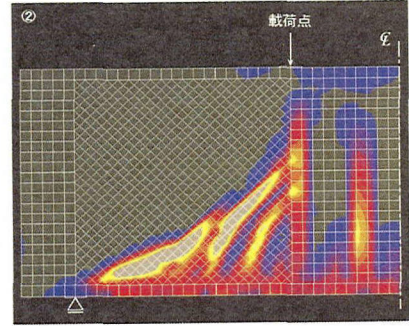
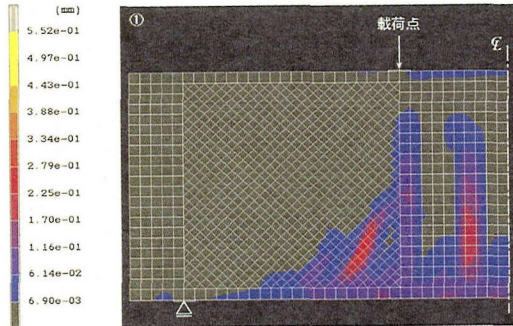
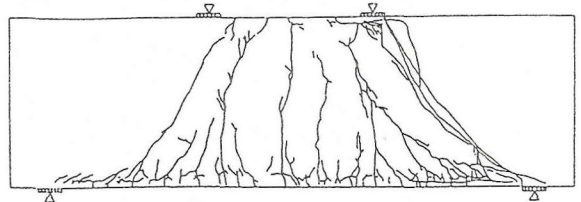
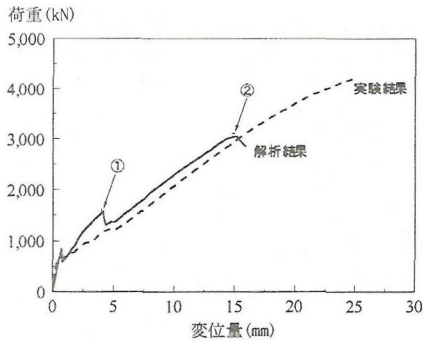


図-19 ひび割れ発生状況 (type 2-4)

し、その後複数のひび割れが発生した。最終的には、支承と荷重点を結ぶ斜めひび割れの開口幅が増加し、ひび割れ面でのせん断力が伝達されなくなり、計算を打ち切った。計算を打ち切った時点では、斜めひび割れの開口幅が大きいため、せん断剛性がほとんど無くなり、計算を継続することが不可能であった。以上のように、せん断剛性保持率を考慮したFEM解析により、解析対象としたせん断スパン比が小さい(1.0)RC部材のせん断破壊特性を近似することができた。解析の対象とした type2-2 のようなRC梁では、せん断が非常に卓越していることから、コンクリートの引張破壊特性のみでなく、ひび割れ面にせん断力が作用するような破壊モードである mode II により、破壊が決定されるものと推定される。ひび割れ面でのせん断力の伝達を考慮することで、mode II により破壊が決定されると思われる実験の破壊荷重等を計算することができたことから、せん断が卓越するRC部材の破壊特性を解析するためには、ひび割れ面で伝達されるせん断力等を考慮する必要があるものと考えられる。

式(5)のせん断剛性保持率を、他の供試体に適用して解析を行った。なお、解析に用いた引張軟化曲線および鉄筋のモデル化等は type 2-2 と同一である。解析結果の荷重-変位曲線は、図-18 に示すようにせん断が卓越すると考えられる type 2-1~2-3 の実験結果とほぼ一致し、さらに、ひび割れパターンについてもほぼ一致している。しかしながら、最終荷重については type 2-4・2-5 の実験結果と較べて小さくな

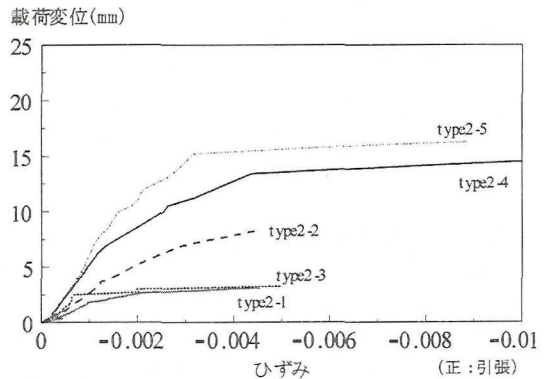
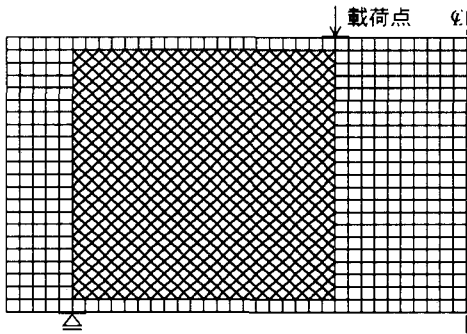


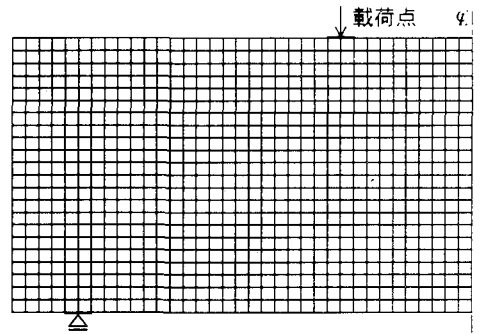
図-20 荷重点直下の要素の最小主ひずみと供試体中央の変位量の関係

っている。

type 2-1 は、type 2-2 と断面寸法が同一でせん断スパン比のみが異なるものである。type 2-2 の解析結果は、実験と同様に最初に荷重点間の曲げスパン内に引張りひび割れが発生し、その後、支承点と荷重点間のせん断スパンに、斜めひび割れが供試体の支承点付近から発生した。この斜めひび割れがコンクリートの圧縮縁である荷重点付近まで達した時点で解が収束しなくなり、計算を打ち切った。解析結果の荷重-変位曲線およびひび割れ発生パターンは、実験結果とほぼ一致している。また、断面寸法が異なる type 2-3 (type 2-1 とせん断スパン比は同一である) の解析結果についても、type 2-1 と同様に実験結果と



(a) 斜め分割



(b) 平行分割

図-21 要素分割図

type 2-4

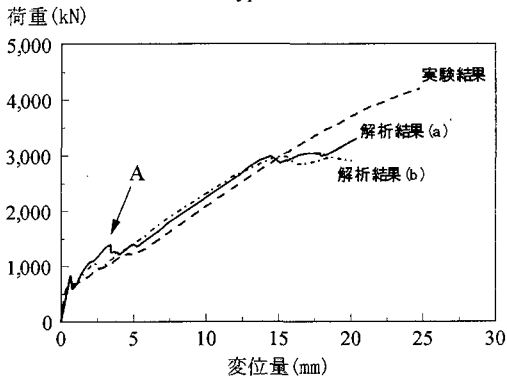


図-22 要素分割の違いによる荷重-変位曲線

ほぼ一致している。

type 2-4 の実験結果によると、最初に曲げスパンに引張によるひび割れが発生し、その後、支承点と荷重点間に斜めひび割れが発生した。さらに、荷重を継続すると突然に斜めひび割れが荷板端部まで進展して荷重を保持することができなくなった。実験結果によると、荷重が約 4700kN に達した時点で荷重点の荷板端部より斜めひび割れが発生して荷重低下した。最終的なひび割れ発生状況を、図-19 に示す。解析結果では、斜めひび割れが荷板端部に達していないが、図-19 に示すようにひび割れの発生順序および位置については実験とほぼ一致している。また、解析結果の荷重-変位曲線は実験結果の最大荷重値は異なっているが、荷重 3000kN 付近まで実験結果とほぼ一致している。図-20 に、荷重点直下の要素の最小主ひずみと供試体中央の変位量との関係を示す。解析結果によると、type 2-4 では荷重点直下のコンクリートの最小主ひずみは、変位量が 12mm を越える付近から急激に増加する傾向を示している。この変位量は、解析において解が収束しなくなる値とほぼ一致している。また、圧縮ひずみである最小主ひずみが急激に増加する変位量 (12mm) 以下では、解析結果の荷重-変位曲線は

実験とほぼ一致している。これに対して、type 2-2 では最小主ひずみの大きさは type 2-4 に較べて小さく、最小主ひずみの最大値は 5000 μ 付近であった。この傾向は、type 2-5 についても同様であり、荷重点直下の最小主ひずみが急激に増加するまでは、解析結果の荷重-変位曲線の傾向は実験とほぼ一致するが、それ以降は解析と実験結果の変形挙動は異なっている。以上のことから、せん断スパン比の小さい RC 部材のせん断破壊では、コンクリートの引張破壊特性のみでなく、圧縮側の破壊特性が重要なパラメータとなるものと推定される。せん断が卓越するせん断スパン比の小さな RC 部材では、式(5)に示すせん断剛性保持率を考慮することにより、RC 部材のせん断破壊性状を解析することができることが判明した。せん断剛性保持率は、コンクリートの骨材径等の影響を受ける可能性があると思われるが、ひび割れ面でのせん断力の伝達は、本論文で提案したせん断剛性保持率の考え方により評価することができるものと推定される。

(3) 要素分割の影響

分布ひび割れモデルでは、ストレスロッキングと呼ばれる現象により、ひび割れ発生以降の変形挙動を正確に追跡することができない場合がある。そこで、要素分割による影響およびストレスロッキングの影響を把握する目的で、type 2-4 の支承点と荷重点間のせん断スパンを図-21 に示すように 2 種類に分割した。(a) の分割は、せん断スパン内に発生する斜めひび割れを想定して斜めに要素分割したものであり、(b) は一般的な要素分割である X・Y 軸に平行に分割したものである。同一条件で、(a)・(b) の要素分割により解析を行った結果の荷重-変位曲線を図-22 に、ひび割れ発生状況を図-23 に示す。荷重-変位曲線では、斜めひび割れが発生する図中の A 点付近で要素分割による相違が生じているが、全体的な荷重-変位曲線の挙動は要素分割による違いはほとんど見られず、実験結果とほぼ一致している。ひび

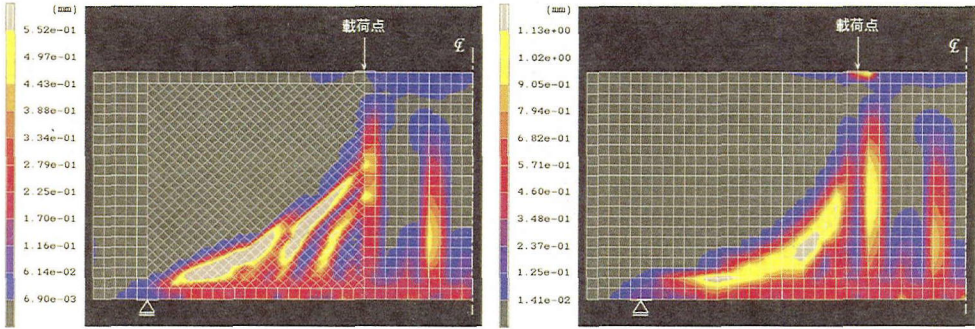


図-23 要素分割の違いによるひび割れ発生状況

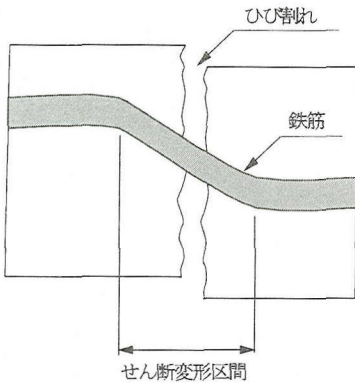


図-24 鉄筋のせん断変形区間

割れ発生状況は、要素分割により斜めひび割れの位置に多少の違いがあるが、全体的なひび割れパターンおよび位置はほぼ一致しており、要素分割による影響は少ないものと考えられる。ひび割れ面でのせん断力伝達を考慮した本研究の解析モデルでは、ストレスロッキングの影響は少ないものと判断される。しかしながら、せん断スパン比が大きくなり斜め引張破壊が顕著になるような RC 梁に対しても、本研究で用いている解析モデルによりストレスロッキングの影響を回避することができるかについては、検討する必要がある。また、要素の大きさが異なっているにも拘わらず、荷重-変位曲線がほぼ一致していることから、式(2)に示すように「等価長さ」を用いて引張軟化曲線を応力-ひずみ曲線に変換することは妥当であったと考えられる。

(4) 鉄筋の影響

ひび割れ面に配置された鉄筋はせん断変位により、曲げ変形が生じる。この鉄筋の曲げ変形による影響を構造解析では無視することができないことを前川ら¹⁰⁾が指摘している。そこで、主鉄筋の曲げ剛性を考慮した解析を行った。前川らは、ひび割れ面で生

type2-4

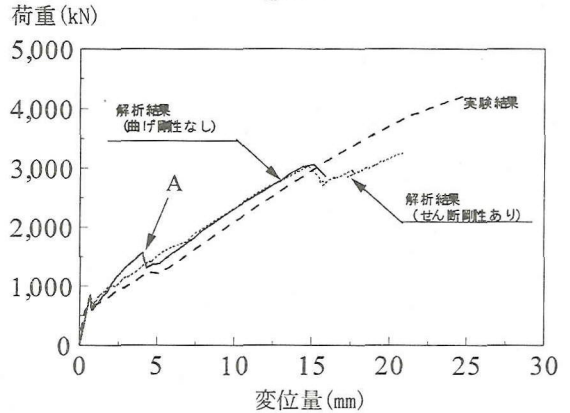


図-25 荷重-変位曲線

じる鉄筋の曲げ変形を、弾性支承上の梁としてモデル化できることを報告している。このモデルにより図-24に示すように、ひび割れ面付近で生じる鉄筋のせん断変形区間を算定した。ひび割れ面付近では、鉄筋とコンクリートとの付着切れ等が生じて図に示すようなせん断変形区間が形成され、この区間で鉄筋の曲げ変形が生じる。そこで、鉄筋のせん断変形による曲率変化の影響を考慮するために、鉄筋を梁要素によりモデル化した。しかしながら、解析モデルでは梁要素をコンクリートに相当する四辺形要素の節点に結合しているために、任意のせん断変形区間を与えることができない。つまり、本解析では鉄筋の曲げ評価は四辺形要素の大きさに依存することになる。このような要素寸法の依存性を考慮して、鉄筋をモデル化した梁要素の曲げ剛性は、式(6)に示すように、ひび割れ面付近のせん断変形区間で発生する鉄筋の変形と等価になるように定めた。

$$I_e = I \cdot \left(\frac{L_e}{L} \right)^2 \quad (6)$$

ここに、 L : せん断変形区間、 L_e : 梁要素の長さ、 I : 鉄筋の断面 2 次モーメント、 I_e : 鉄筋の等価断面 2 次モーメントである。せん断変形区間は、式(7)のよう

に表せられる。

$$L = \frac{3\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4E_s \cdot I}{k \cdot D}} \quad (7)$$
$$k = \frac{150 f_{cd}'}{D}$$

ここに、 E_s ：鉄筋の弾性係数、 D ：鉄筋径である。図-25に示す type 2-4 の解析結果では、曲げ剛性を考慮したものと無視したものは途中までほぼ一致しているが、最終的な変位量が異なっている。曲げ剛性を無視した解析結果は、荷重 3000kN 付近でひび割れの開口幅が大きくなり、せん断剛性が低下したため計算を打ち切っているのに対して、曲げ剛性を考慮したものは、荷重 3000kN 以降も計算を継続することができた。type 2-4 の解析結果が示すように、RC部材のせん断耐力を精度良く算定するためには、鉄筋の曲げの影響を考慮する必要があるものと考えられる。しかしながら、鉄筋の曲げ変形を考慮しても、最大荷重は一致しておらず、コンクリートの圧縮特性および降伏規準の影響を検討する必要があるものと考えられる。実験数は少ないが、コンクリートの引張破壊特性とひび割れ面でのせん断力の伝達を考慮した解析モデルにより、せん断が卓越するようなRC部材の破壊モードおよびひび割れ発生パターンを推定することが可能である。

4. まとめ

せん断補強の無いRC部材のせん断破壊特性を把握する目的で、破壊力学に基づいたFEM解析を行った。その結果とまとめると以下のようになる。

(1) 引張軟化曲線の除荷経路を考慮することにより、ひび割れの局所化等のひび割れ挙動を追跡することが可能である。

(2) ひび割れ面での骨材の噛み合わせによるせん断力の伝達をせん断剛性保持率により表現することで、RC部材のひび割れ発生・進展を追跡することができる。

(3) ひび割れ面で伝達されるせん断力が、ひび割れ開口幅の増加に伴って減少するモデルを用いることにより、せん断が卓越するせん断スパン比の小さなRC部材の破壊モードを近似することができる。

(4) RC部材の破壊挙動には、ひび割れ面に配置された鉄筋の曲げ変形が影響するものと推定される。

(5) 載荷点直下では、コンクリートに大きな圧縮応力が発生する場合があります、このようなケースでは最終的なせん断耐力はコンクリートの圧縮特性が関係するものと推定される。

以上のことから、RC部材のせん断強度の寸法効果には、コンクリートの引張軟化曲線とひび割れ面

での骨材の噛み合わせで伝達されるせん断応力も関係するものと考えられる。本論文で提案した解析モデルにより、せん断が卓越するせん断スパン比の小さいRC部材の破壊モードに推定することができるものと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、堀井秀之東京大学教授から終始有益な御指導を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 井畔瑞人, 塩屋俊幸, 野尻陽一, 秋山暉: 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, 土木学会論文報告集, No.348, pp.175-184, 1984.
- 2) 鉄道総研報告: 兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書, 財団法人 鉄道総合技術研究所, 特別第4号, 1996.4.
- 3) 平井友紀, 二羽淳一郎: 各種横荷重と軸方向引張力を同時に受けるコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.629-634, 1996.
- 4) Hordijk, P. A.: *Local Approach to Fatigue of Concrete*, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 5) 堀井秀之: フラクチャープロセスゾーン問題とコンクリート・岩石・セラミックスに対する破壊力学の体系化, 構造工学論文集, Vol.35A, 1989.
- 6) 峯本 守, 鬼頭 誠, 梶原雄三, 松岡 茂: トンネル覆工の限界状態設計に関する研究, 土木学会論文集, No.523/III-32, pp. 141-149, 1995.
- 7) Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P. E.: Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, *Cement and Concrete Research*, Vol.6, pp.773-782, 1976.
- 8) Bazant, Z. P. and Oh, B. H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Materials and Structures*, Vol.16, No.13, pp.155-177, 1983.
- 9) Dahlblom, O. and Ottosen, N. S.: Smeared Crack Analysis Using Generalized Fictitious Crack Model, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.116, No.1, pp.55-76, 1990.
- 10) 破壊力学の応用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1993.10.
- 11) Rots, J. G., Nauta, P., Kusters, G. M. A. and Blaauwendraad, J.: Smeared Crack Approach and Fracture Localization in Concrete, *HERON*, Vol.30, No.1, 1985.
- 12) 井上純哉, 堀井秀之: ひび割れ局所化の解析, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.1150-1151, 1996.
- 13) Cervenka, V., Pukl, R., Ozbolt, J. and Eligehausen, R.: Mesh Sensitivity Effects in Smeared Finite Element

Analysis of Concrete Fracture, Fracture Mechanics of Concrete Structures, *Proceedings FRAMCOS-2*, edited by Folker H. Wittmann, AEDIFICATIO Publishers, D-79104 Freiburg, pp.1387-1406, 1995.

- 14) 築嶋大輔, 渡辺忠朋, 青木一二三, 佐藤 勉: せん断スパン比の小さい低鉄筋比・大型梁のせん断耐力に関する実験的研究: 土木学会第 50 回年次学術講演会概要集, V-479, pp.958-959, 1995.

- 15) Maekawa, K. and Qureshi, J. : Computational Model for Reinforcing Bar Embedded in Concrete under Combined axial Pullout and Transverse Displacement, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements.*, JSCE, No.538/V-31, pp.227-239, 1996.

(1996. 12. 26 受付)

A STUDY ON SHEAR CAPACITY OF RC BEAM BASED ON FRACTURE MECHANICS

Tadatomo WATANABE, Shigeru MATUOKA and Yasushi TAKEDA

The shear failure behavior of reinforced concrete was analyzed by using the finite element method with concept of fracture mechanics. The analysis model developed for this purpose considers tensile stress attenuation at cracks, localization of cracks, shear force transmitted through cracks in order to ensure traceability of shear failure behaviors for reinforced concrete components. With regard to the shear force transmitted through crack, this model considers it as a force decreasing along with crack opening. In addition, for verifying its analytical appropriateness, the load-displacement relationship calculated is compared with that by the experiment.