

論文

[2035] 塑性理論と破壊力学を考慮した RC 部材の付着割裂解析

村田憲治\*1・市之瀬敏勝\*2・水谷浩\*3

1. 序論

現在文献[1]で示されている付着割裂強度式は、付着破壊に対する作用因子が数多く、不明な点も多い。また一方、コンクリートのひび割れ挙動をより合理的に把握するために、破壊力学の研究が近年急速に進み、コンクリートの分野への適用が示唆されている。本研究は文献[2]における塑性理論による付着割裂強度解析に、破壊力学的要素を取り入れた新たな手法を提案するものである。

2. 解析対象

本研究では解析対象の試験体として、文献[3]で行われた付着割裂実験で対象となった試験体のうち4シリーズの試験体を取り上げた。これらの試験体の試験体特性を表1に示す。

表1 試験体特性

試験体名	圧縮強度 $f_c$	引張強度 $f_t$	主筋	横補強筋	横補強筋間隔	横補強筋比
H 4 L	77.6 (MPa)	3.7 (MPa)	4 - D23	2 - 6 $\phi$	70 (mm)	0.29 (%)
H 4 M				4 - 6 $\phi$		0.59 (%)
H 4 S				4 - 10 $\phi$	195 (mm)	0.47 (%)
H 4 H					70 (mm)	1.31 (%)

3. 解析仮定

本研究では主筋の断面を四角形にモデル化する。鉄筋モデルの詳細を図1に示す。また主筋は剛体とみなす。

まずこの主筋と主筋周囲において、主筋を引き抜く仕事増分と、それに抵抗する内部仕事増分との釣合を考える。付着長さLの範囲における主筋の節の数は $L/(a+u)$ である。そこで仕事の釣合の式は式(1)で表される。

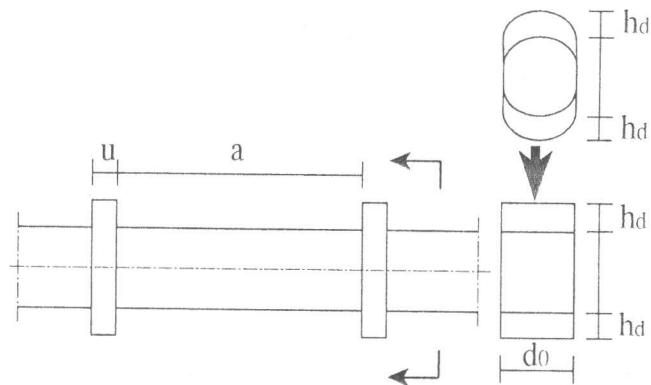


図1 鉄筋のモデル化

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)  
 \*2 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)  
 \*3 名古屋工業大学学生 工学部社会開発工学科

$$T \cdot \Delta V_s = \frac{L}{a+u} \cdot \Delta W_{ic} + \frac{\Delta W_{is}}{N} \quad (1)$$

T: 主筋1本を引き抜く力

$\Delta V_s$ : 主筋変位増分

L: 付着長さ

$\Delta W_{ic}$ : 節1個の前面での内部仕事増分

$\Delta W_{is}$ : 割裂ひび割れ面全体での内部仕事増分

N: 一組の主筋数 (N=4)

do: 主筋の実際の幅

a: 節間距離

u: 節長さ

hd: 節高さ

まず、式(1)における $\Delta W_{ic}$ を考える。コンクリート破壊曲面を図2のように仮定すると、破壊面における単位面積あたりのコンクリート内部仕事逸散 $\Delta W_o$ は式(2)で表される。

$$\Delta W_o = \frac{1}{2} \nu f_c (1 - \sin \alpha) \Delta V \quad (2)$$

$f_c$ : コンクリート圧縮強度

$\nu$ : 有効強度係数

$\Delta V$ : 変位増分

$\alpha$ : 破壊面とコンクリートの変位の方向との角度

ここで有効強度係数 $\nu$ は、コンクリートの破壊が節の前面で起こる局部破壊であるため、 $\nu = 1$ と仮定する。

主筋の節の前面における主筋の滑りによる破壊の状況を図3に示す。ここで破壊の型には2つの型が考えられる。つまり破壊面が次の節に達するものと達しないものである。本解析例では破壊はすべて図3(b)のような次の節に達しない型で起こるので、ここではこの型に関する式のみを示す。図3(a)より式(3)を導くことができる。

$$\Delta V = \frac{\Delta V_s}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (3)$$

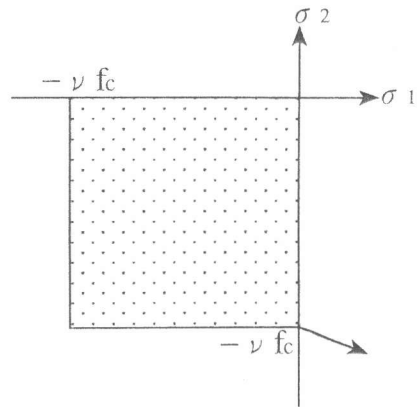
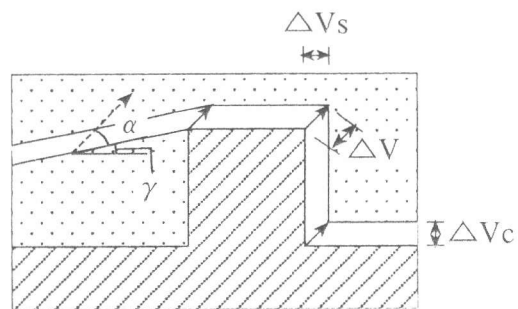
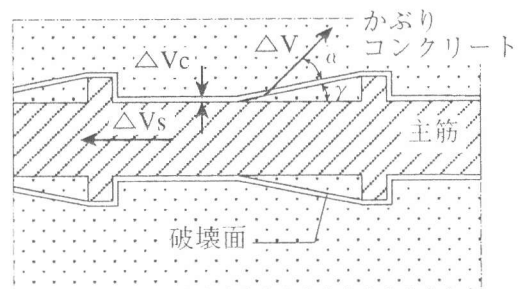


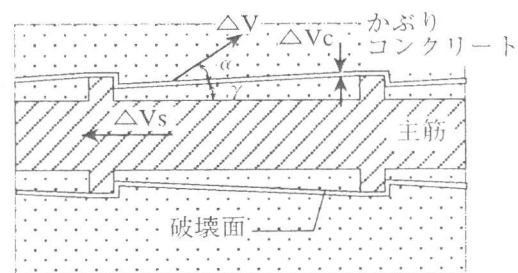
図2 コンクリート降伏曲面



(a) 詳細図



(b) 破壊面が次の節に達しない型



(c) 破壊面が次の節に達する型

図3 節の前面の滑りによる破壊

$\Delta V_s$  : 主筋変位増分

$\gamma$  : 主筋と破壊面の角度

ここでひび割れが進行すると、 $V_c$ をコンクリート鉛直方向変位としたとき、筋がコンクリートと接する高さが $hd$ から $(hd-V_c)$ へ減少する。従って筋1個分の破壊面の面積 $S$ は式(4)で表される。

$$S = \frac{hd - V_c}{\sin \gamma} 2d_o \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)より筋の前面での内部仕事増分 $\Delta W_{ic}$ は式(5)により導くことができる。

$$\Delta W_{ic} = S \Delta W_o = \frac{hd - V_c}{\sin \gamma} d_o \cdot \nu f_c (1 - \sin \alpha) \frac{\Delta V_s}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (5)$$

次に割裂ひび割れ面での内部仕事増分 $\Delta W_{is}$ を求める。ここで $\Delta W_{is}$ は、コンクリートによる仕事増分 $\Delta W_c$ と横補強筋による仕事増分 $\Delta W_w$ に分ける事ができる。割裂ひび割れ面での応力分布を図4に示す。

まず始めにコンクリートによる内部仕事増分 $\Delta W_c$ を考える。本研究では付着破壊はサイドスプリット型破壊であると仮定し、破壊の進行状況を図5のように仮定する。これはひび割れが一様に進行することを示している。ここでひび割れ幅は $W = 2V_c$ となる。

ここで、コンクリート引張応力 $\sigma_c$ を与えるために破壊力学の概念を用いる。文献[4]よりコンクリートの破壊曲線は図6に示すようになる。この破壊曲線の式を式(6)に示す。

$$\frac{\sigma_c}{f_t} = \left\{ 1 + \left( 3 \frac{W}{W_s} \right)^3 \right\} \exp(-6.93 \frac{W}{W_s}) - \frac{W}{W_s} 28 \exp(-6.93) \quad (6)$$

$W_s$  : 限界ひび割れ幅

限界ひび割れ幅 $W_s$ は式(7)で与えられる。

$$W_s = 5.14 G_f / f_t \quad (7)$$

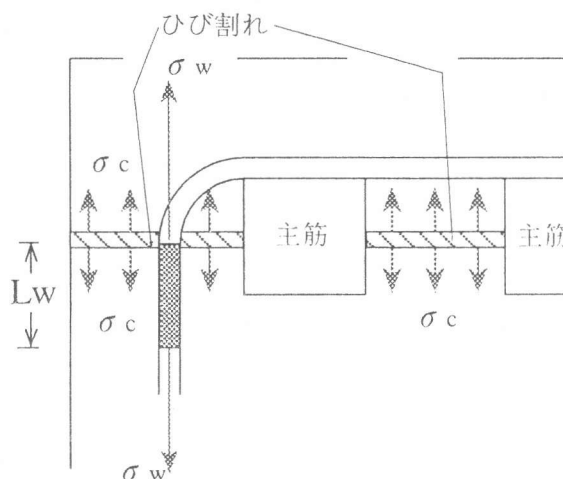


図4 割裂ひび割れ面での応力状態

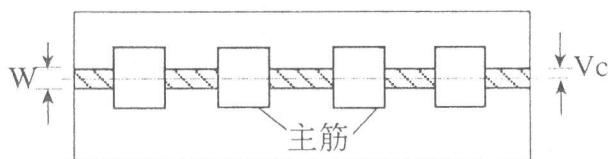


図5 割裂ひび割れの仮定

ここで $G_f$ は破壊エネルギーで文献[5]より90 [N/m]とする。これらより $\Delta W_c$ は式(8)で与えられる。

$$\Delta W_c = \sigma_c \cdot A_c \cdot 2 \Delta V_c \quad (8)$$

ただし、 $A_c$ はひび割れ面積で式(9)で与えられる。

$$A_c = L \cdot (b - N d_o) \quad (9)$$

次に横補強筋による仕事増分 $\Delta W_w$ を考える。付着長さ $L$ の範囲における横補強筋の全断面積は $b \cdot L \cdot P_w$ となる。よって $\Delta W_w$ は式(10)で与えられる。

$$\Delta W_w = \sigma_w \cdot 2 \Delta V_c \cdot b \cdot L \cdot P_w \quad (10)$$

$\sigma_w$ ：横補強筋応力

$P_w$ ：横補強筋比

横補強筋の応力 $\sigma_w$ を与えるために、横補強筋が歪む部分の長さを仮定する必要がある。本研究ではこの横補強筋が歪む部分の長さを歪み長さとし、 $L_w$ で表す。図4においてこの歪み長さ $L_w$ を示す。

以上から $\tau$ を付着応力とすると、式(11)を導く事ができる。ただし主筋の公称径を $d$ とする。

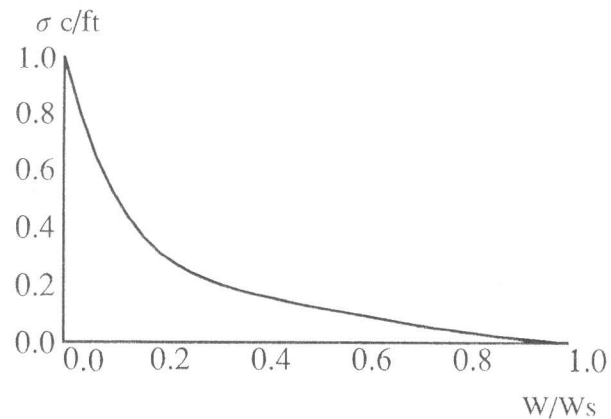


図6 コンクリート破壊曲線

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{T}{\pi \cdot d \cdot L \cdot f_c} = D \cdot \frac{\nu (1 - \sin \alpha)}{\sin \gamma \cos(\alpha + \gamma)} + C \cdot \tan(\alpha + \gamma) \quad (11)$$

ここで、

$$D = \frac{(h d - V_c) \cdot d_o}{\pi \cdot d \cdot (a + u)} \quad (12)$$

$$C = \frac{2 \sigma_c \cdot A_c + 2 \sigma_w \cdot b \cdot L \cdot P_w}{\pi \cdot d_o \cdot L \cdot f_c \cdot N} \quad (13)$$

式(11)より付着応力 $\tau$ を求めるわけだが、ここで $\alpha$ と $\gamma$ の値を定めなければならない。そこで上界定理により、 $\alpha$ を $0 \sim 60^\circ$ 、 $\gamma$ を $0 \sim 45^\circ$ の範囲で約 $7^\circ$ 刻みで変化させ、付着応力 $\tau$ が最小となるときの $\alpha$ と $\gamma$ を用いるものとする。

#### 4. 解析結果

以上の解析仮定から得られた各試験体の付着応力 $\tau$ と主筋滑り量 $V_s$ の関係を図7に示す。ここでは歪み長さ $L_w$ を文献[6]より、横補強筋径 $d_w$ の5倍、即ち $5d_w$ とした。またその比較として $L_w$ を10倍とした場合の解析結果もこの図に合わせて示す。図より、横補強筋の歪み長さ $L_w$ が $5d_w$ と $10d_w$ の場合では、解析結果にほとんど差は見られない。また図より、実験値と解析値を比較すると両者がよく対応していることがわかる。ただしここで $V_s$ が0付近の時に解析結果が実験を大きく上回るのは、図5においてひび割れが一様に進行すると仮定したためであると思われる。よってこれらは、ひび割れの進行のモデルをより現実的なものとしていけば差が縮まるものと考えられる。またそうすることにより、より低い解が求められると思われる。

次に横補強筋応力 $\sigma_w$ と主筋滑り量 $V_s$ との関係を図8に示す。ここでは解析対称の4試験体中、 $p_w$ が最小である

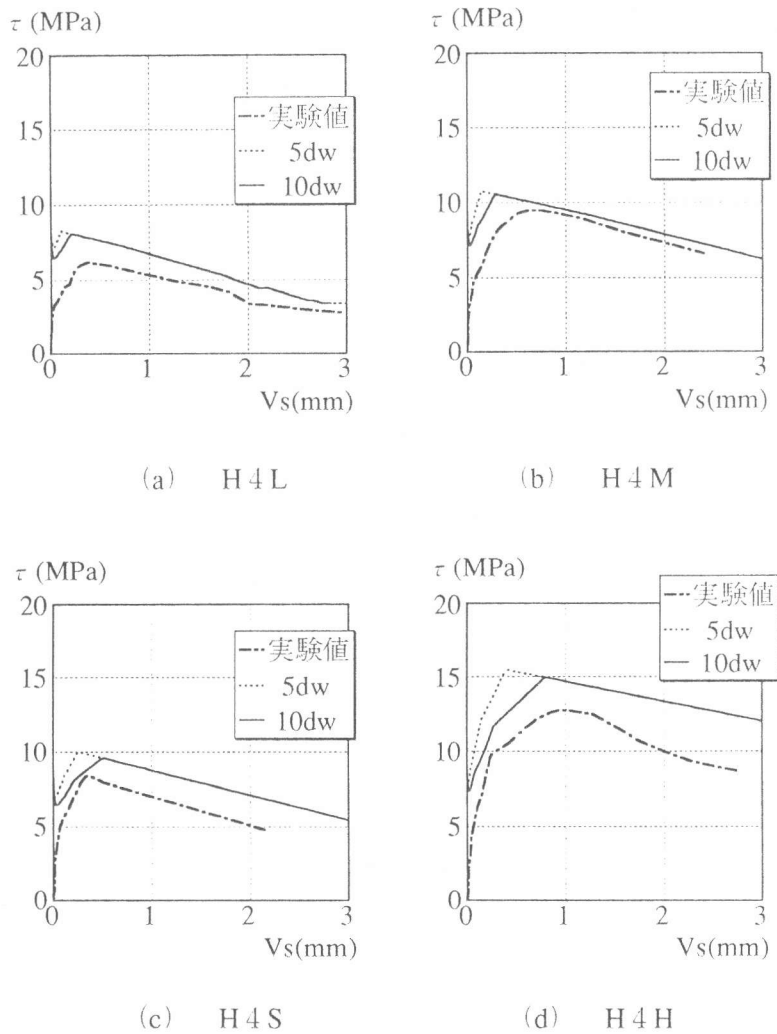


図7 付着応力 $\tau$ と主筋滑り量 $V_s$ の関係

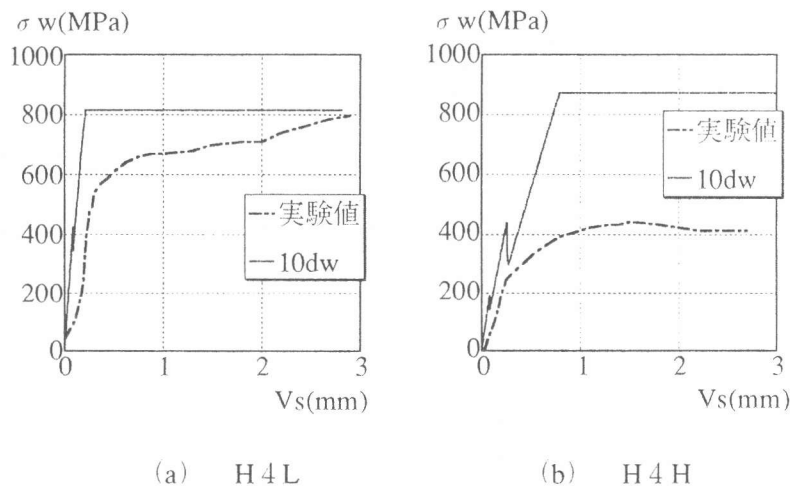


図8 横補強筋応力 $\sigma_w$ と主筋滑り量 $V_s$ の関係

H4Lと最大であるH4Hの2つの試験体の解析結果を、また付着応力 $\tau$ と主筋滑り量 $V_s$ の関係の結果より、歪み長さ $L_w$ が $10d_w$ の場合の方が実験結果に近い $L_w$ が $10d_w$ の場合の解析結果のみを示す。図より、横補強筋はわずかの滑り量で降伏してしまう。図8における結果が実験結果と開きがあることは今後の研究課題としたい。

次に破壊面とコンクリートの変位方向との角度 $\alpha$ と主筋滑り量 $V_s$ の関係と、破壊面と主筋との角度 $\gamma$ と主筋滑り量 $V_s$ の関係を図9に示す。図8と同様に試験体H4L、H4Hの場合の結果と、歪み長さ $L_w$ が $10d_w$ の場合の結果のみを示す。図より、破壊面とコンクリートの変位方向との角度 $\alpha$ の値はほとんど0であるた

め、コンクリートの変位の角度は $\gamma$ に依存することが分かる。また横補強筋比が小さいほど $\gamma$ が大きく、横補強筋比が大きいほど $\gamma$ は小さい。これは横補強筋の拘束効果によるためであると思われる。

## 5. 結論

- (1) 付着応力と主筋滑り量との関係については実験結果をうまく追跡できた。
- (2) 横補強筋比が大きいほど主筋と破壊面との角度は小さくなる。
- (3) 解析において横補強筋応力を過大評価する傾向があることは今後検討の余地がある。

## 6. 参考文献

- [1]日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990. 11
- [2]Nielsen, M.P : Limit Analysis and Concrete Plasticity, pp. 389- 397, 1984, Prentice Hall
- [3]市之瀬敏勝, 横尾慎一：高強度コンクリートを用いたRC部材の付着割裂実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 2, pp. 75- 80, 1992. 6
- [4]三橋博三：コンクリート構造への破壊力学の応用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, pp. 1- 9, 1993. 6
- [5]三橋博三ら：コンクリートの破壊力学特性と寸法効果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. 4, No. 2, pp. 57- 67, 1993. 7
- [6]Qureshi, J., Maekawa, K. : Stress Transfer Across Cracks in Action, Proceedings of The Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction Vol. 1, pp. 75- 720, Sep. 1993

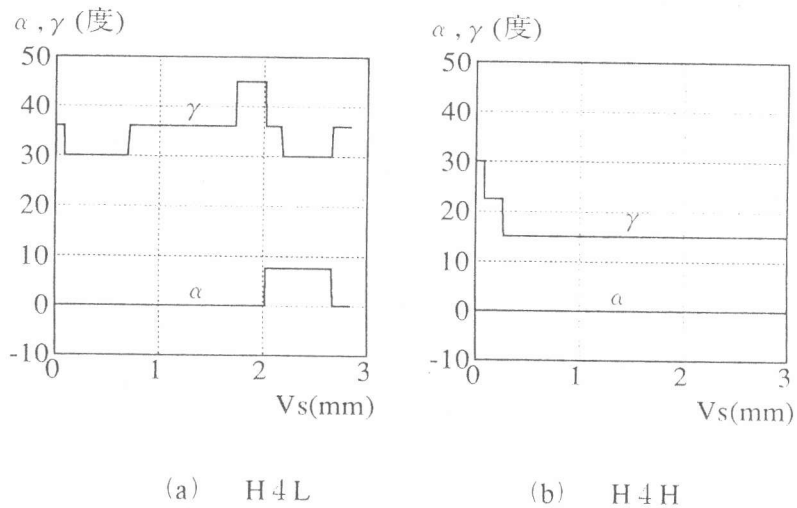


図9 角度 $\alpha, \gamma$ と主筋滑り量 $V_s$ の関係