

宮崎大学工学部 正 員 中沢 隆雄
久原 中吾

1. まえがき

著者らはこれまで、力のつり合い条件と変形の適合条件を考慮した弾塑性はり理論を用いて、漸増二点集中荷重を受ける腹鉄筋のない単鉄筋の矩形断面コンクリート単独ばりの破壊性状を検討してきた。本論は、この研究の一貫として、有限要素法を用いて、ひびわれの発生とその伝播から破壊に至るまでの過程の解析を試みるものであり、実験結果および弾塑性はり理論による解析結果との比較・検討を行なうものである。なお、有限要素法による解析にあたっては、鉄筋とコンクリートの応力-ひずみ関係の非線型性および鉄筋とコンクリートとの間のすべりを考慮した、平面応力状態を想定した。

2. 実験概要

実験を行なうに際し、対称な二点集中荷重を受ける場合のせん断アーム比 a/d (a : せん断アーム長, d : はりの有効高さ) を種々に変化させたはりを作製した。これらのはりの諸元および示方配合を、それぞれ表-1および表-2に示す。また、鉄筋とコンクリートとの付着性状を

表-1

諸元	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
全長 l (cm)	101.2	128.2	155.2	182.2	209.2	236.2	263.2
桁高 h (cm)	30.0						
桁幅 b (cm)	15.0						
有効高さ d (cm)	27.0						
せん断アーム長 a (cm)	27.0	40.5	54.0	67.5	81.0	94.5	108.0
せん断アーム比 a/d	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
使用鉄筋見掛け率	SD30 3D10, 0.528						

検討するため、図-1に示すような両引き、引き抜き試験用供試体を、中島らの方法を参照して作製した。供試体断面は正方形であり、それぞれの諸元を表-3に示す。なお、埋め込み鉄筋に貼付したひずみゲージ間隔は5cmであり、コンクリートの配合は、はり供試体のものと同じものを使用した。これらのはり供試体および両

表-2

粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)		
				水 W	セメント C	細骨材 S
25	15	50	41.15	356	723	1045

引き、引き抜き試験用供試体に用いたコンクリートの一軸圧縮試験、割れ試験および鉄筋の一軸引張試験からえられる、応力-ひずみ曲線を、解析に便ならしめるため、図-2に示すように理想化した。なお、コンクリートの引張域における弾性係数は、圧縮域におけるそれと同じであると仮定する。

3. 解析手法

ここでは、有限要素法による解析の概略を述べる。

まず、コンクリートおよび鉄筋の降伏および延性破壊曲線を、次式で表わすものとする。

$$\text{コンクリート: } \epsilon = \alpha J_1 + J_2^{1/2} \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{鉄筋: } \epsilon^2 = \frac{3}{2(F+G+H)} \{ (F+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (F+H)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 \} \quad \text{--- (2)}$$

ここに、 $J_1 = \sigma_x + \sigma_y$, $J_2 = \frac{1}{6}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \tau_{xy}^2$, σ_x, σ_y : 直応力, τ_{xy} : せん断応力, α : 係数, F, G, H, N : 異方性パラメーター。

式(1), (2)の ϵ をそれぞれの塑性ポテンシャルとすれば、塑性ポテンシャル理論を用いて、各塑性ひずみ増分 $d\epsilon^p$ を次のように行列表示できる。

$$\{d\epsilon^p\} = \frac{1}{g} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} d\sigma \quad \text{----- (3)}$$

g : 比例係数

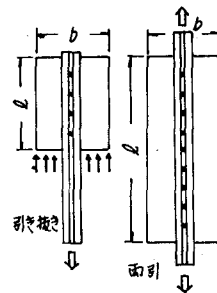


図-1

		l (cm)	b (cm)	使用鉄筋
引き抜き	No.1	25	10	SD30 1D16
	No.2	"	"	" 1D22
	No.3	"	20	" 1D16
	No.4	"	"	" 1D22
両引き	No.1	50	10	" 1D16
	No.2	"	"	" 1D22
	No.3	"	20	" 1D16
	No.4	"	"	" 1D22

表-3

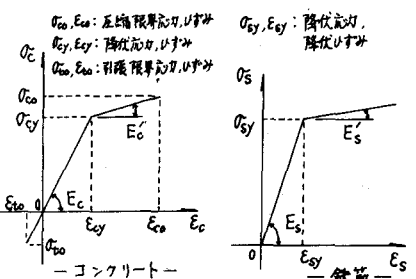


図-2

塑性域における構成方程式は、結局次式のように求められる。 $\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\}$ ----- (4)

ここに $[D] = [D^e] - \frac{[D^e]\{\sigma_0\}\{\sigma_0\}^T[D^e]}{g + \{\sigma_0\}^T[D^e]\{\sigma_0\}}$, $[D^e]$: 弾性応力-ひずみマトリックス,
 $d\sigma$: 応力増分, $d\varepsilon$: 全ひずみ増分。

さて、ひびわれは、主応力がコンクリートの一軸引張強度に達したとき発生し、その方向は、主応力方向に垂直であるものとする。ひびわれの発生したコンクリートは、等価直交異方性弾性体であるとして、平面応力場における構成方程式は、次のように表わされる（図-3参照）。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\tau_{12} \\ \Delta\varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1/(1-\nu_{12}\nu_{21}) & \nu_{12}E_2/(1-\nu_{12}\nu_{21}) & 0 \\ \nu_{21}E_1/(1-\nu_{12}\nu_{21}) & E_2/(1-\nu_{12}\nu_{21}) & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \\ -\nu_{13} & -\nu_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{--- (5)}$$

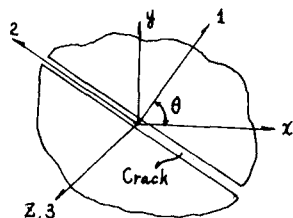


図-3

ここに、Betti-Maxwell の相反定理より $\nu_{12}E_2 = \nu_{21}E_1$

$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\tau_{12}$: 異方性の対称軸 1, 2 に関する応力増分,

$\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2, \Delta\varepsilon_3, \Delta\gamma_{12}$: 1, 2, 3 軸に関するひずみ増分, E, ν, G : 弾性定数 (添字は軸を示す)。

式(5)に含まれる未定弾性定数は、次のように決定される。すなわち、ひびわれに垂直方向には直応力は伝達できないとし、1 軸方向のひずみは 2 軸方向のひずみに影響を及ぼさないとする。さらに、ひびわれの発生したコンクリートは、せん断応力も伝達できないものとするれば、結局 $E_1 = \nu_{12} = \nu_{21} = \nu_{13} = G_{12} = 0$ となる。残る E_2, ν_{23} に関しては、2 軸方向の直応力 σ_2 による一軸応力状態を想定するが、その数値は、ひびわれ発生以前の値を使用するものとする。以上の仮定を考慮し、式(5)を x, y, z 座標に変換すれば、次式がえられる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_2 \sin^4\theta & E_2 \sin^2\theta \cos^2\theta & -E_2 \sin^3\theta \cos\theta \\ E_2 \sin^2\theta \cos^4\theta & E_2 \cos^4\theta & -E_2 \sin\theta \cos^3\theta \\ -E_2 \sin^3\theta \cos\theta & -E_2 \sin\theta \cos^3\theta & E_2 \sin^2\theta \cos^2\theta \\ -\nu_{23} \sin^2\theta & -\nu_{23} \cos^2\theta & \nu_{23} \sin\theta \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{--- (6)}$$

ここに、 θ : 1 軸と x 軸のなす角。

次に、鉄筋とコンクリートとの付着については、Bond Link^{4), 5)}なる仮想要素を用いて取り扱う。この Bond Link は、鉄筋に平行および直角方向の大きき零のバネから成り立っているものとする。付着の問題はこの Bond Link のバネ剛性、すなわち付着応力-相対すべり関係を求めることによって解析できるが、本論では簡略化して、その関係は線型として、次式をうる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_h \\ \Delta\sigma_v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_h & 0 \\ 0 & K_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_h \\ \Delta\varepsilon_v \end{Bmatrix} \quad \text{--- (7)}$$

ここに、 $\Delta\sigma_h, \Delta\sigma_v$: 鉄筋に平行、垂直方向の付着応力増分, K_h, K_v : 鉄筋に平行、垂直方向のバネ剛性,

$\Delta\varepsilon_h, \Delta\varepsilon_v$: 鉄筋に平行、垂直方向の相対変位増分。

ここで問題となるのは、バネ剛性 K_h, K_v の値である。 K_h については、付着試験のデータからえられるが、 K_v を実験的に求めるのは困難であるため、破壊時近傍を除いて、鉄筋とコンクリートとの垂直方向の相対的なずれは、ごく微小であることを考慮して、 K_h に比較して大きな数値を仮定して用いるものとする。

なお、解析結果および実験結果についての報告は、講演時にゆずる。

参考文献 1) 中島亨・山本康弘: 鉄筋コンクリートの付着応力度の履歴とひびわれの復元性に関する研究,

土木学会論文報告集, 第219号, 1973年11月, p95~105.

2) H. Kupfer, H.K. Hilsdorf, H. Rusch: Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses, ACI/August, 1969, p656~666.

3) 黒正清治・滝口克己: 有限要素法による鉄筋コンクリート部材の二次元解析 (その1. 仮定および解析方法)

日本建築学会論文報告集, 第189号, 昭和46年11月, p51~57.

4) D. Ngo, A.C. Scordelis: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, ACI/March, 1967, p152~163.

5) A.H. Nilson: Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method, ACI/September, 1968, p757~766.