

[102] コリンス理論に基づく RC 弾塑性解析法

正会員 井上 範夫 (鹿島建設武藤記念研究室)
 正会員 ○ 小 鹿 紀 英 (鹿島建設武藤記念研究室)
 正会員 鈴木 紀 雄 (鹿島建設武藤記念研究室)
 正会員 速 水 由紀夫 (鹿島建設情報システム部)

1. はじめに

一般に鉄筋コンクリート構造物を解析する場合に用いるモデルとしては、トラス機構等で代表されるマクロモデルと、有限要素法等のミクロモデルに大きく分けられ、ミクロモデルはさらにRC構造の各構成要素までモデル化して部材レベルを解析対象とする場合と、RCの要素としての構成則を設定して構造物全体を解析する場合(準マクロモデル)に分類される。¹⁾

また、2軸応力下のコンクリートの構成則については、従来圧縮-圧縮領域が主に議論の対象となってきたが、せん断力を受ける耐震壁の弾塑性挙動を追跡する上で重要なのは、むしろ引張-圧縮領域の構成則であり、近年これを対象とする研究も精力的に行われるようになった。²⁾ 特にコリンスらは、純せん断あるいは複合応力下におけるRC平板の実験を行ってRC板としての引張-圧縮領域の構成則を導いた。そこでは、ひびわれが生じた後のコンクリートは圧縮側において、耐力、剛性ともひずみに応じて低下することが示されており、これらの影響を等価的に取り入れた解析も最近行われるようになってきた。⁴⁾

これらの状況を踏まえて、筆者らは構造物の弾塑性挙動の把握を窮極の目的として、引張-圧縮領域にコリンス理論を導入した準マクロモデルの解析プログラムを開発し、耐震壁の解析によりその適用性を検討した。

2. 有限要素モデル

本解析では、図-1に示すように鉄筋を等価な面材として扱い、コンクリートは(鉄筋コンクリート)-(鉄筋)と考えて特性を設定する。これらを平面応力状態と見なしてそれぞれに塑性条件を仮定し、全荷重及び割線剛性についての釣合方程式を解くことによって弾塑性解析を行っている。ここで割線剛性を用いるのは、コリンスの式が単調載荷を対象として決めたもので、応力とひずみが1対1に対応しているという仮定に基づいており、また耐力以後の負勾配もモデル化しているため、これらの基本的考え方に対応させるためである。

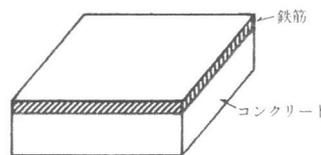


図-1 有限要素モデル

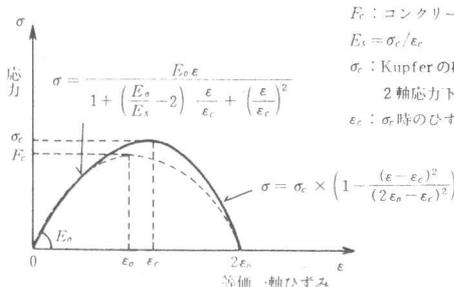
2.1 応力-ひずみ関係

1) コンクリート

コンクリートは、4節点アイソパラメトリック要素でモデル化し、2軸応力下の構成法則は領域毎に以下の様に設定している。

- a. 圧縮-圧縮領域、ひびわれ前の圧縮-引張領域、ひびわれ前の引張-引張領域

この領域では、等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルとし、破壊条件はKupferらの研究に基づいている(図-3)。また、最大圧縮強度に達するまでの応力-ひずみ曲線はSaenz式によるものとし、達した後のひずみ軟化域については、コリンスの研究を参考にして図-2のように設定した。ただし、ここではポアソン比 $\nu = 0.2$ とする。



E_c : コンクリートの一軸圧縮強度
 $E_c = \sigma_c / \epsilon_c$
 σ_c : Kupferの破壊条件より決まる2軸応力下の圧縮強度
 ϵ_c : σ_c 時のひずみ

図-2 応力-等価一軸ひずみ関係

主応力-主ひずみ関係としては、次式を仮定する。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\nu^2} \begin{Bmatrix} E_1 & \nu\sqrt{E_1 E_2} & 0 \\ & E_2 & 0 \\ \text{sym.} & & \frac{1}{4}(E_1+E_2-2\nu\sqrt{E_1 E_2}) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma \end{Bmatrix} \dots\dots(1)$$

E_1, E_2 : 各主応力方向の割線剛性

b. 引張-圧縮領域ひびわれ後

この領域に今回コリンズ理論を導入した。

コリンズは、平板実験の結果を整理して、以下に示すような主応力-主ひずみ関係を求めた。(ただし、圧縮を正として表現)

$$\sigma_d = \begin{cases} F_c \times \left[2 \times \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_o} \right) - \beta \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_o} \right)^2 \right] & \varepsilon_d \leq \varepsilon_p \\ f_p \times \left[1 - \frac{(\varepsilon_d - \varepsilon_p)^2}{(2\varepsilon_o - \varepsilon_p)^2} \right] & \varepsilon_p < \varepsilon_d \leq 2\varepsilon_o \end{cases} \dots\dots(2)$$

$$f_p \times \left[1 - \frac{(\varepsilon_d - \varepsilon_p)^2}{(2\varepsilon_o - \varepsilon_p)^2} \right] \quad \varepsilon_p < \varepsilon_d \leq 2\varepsilon_o \dots\dots(3)$$

$$\text{ただし } \beta = 0.85 - 0.27 \varepsilon_{dt}/\varepsilon_d \dots\dots(4)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_o / \beta, f_p = F_c / \beta$$

$$\sigma_{dt} = f_{cr} \frac{1}{1 + \left(\frac{-\varepsilon_{dt}}{0.005} \right)^{0.5}} \quad \varepsilon_{dt} < \varepsilon_{cr} \dots\dots(5)$$

ここに σ_d, σ_{dt} : 圧縮及び引張主応力
 $\varepsilon_d, \varepsilon_{dt}$: 圧縮及び引張主ひずみ
 F_c, f_{cr} : コンクリートの一軸圧縮強度及び引張強度
 $\varepsilon_o, \varepsilon_{cr}$: F_c 時及び f_{cr} 時のコンクリートのひずみ

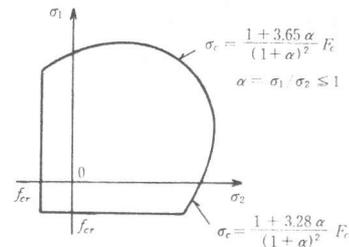


図-3 2軸応力下の破壊条件

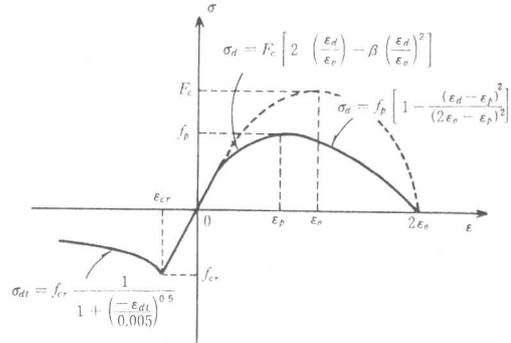


図-4 引張圧縮領域の応力-ひずみ関係

これを図-4に示すが、この中で(2)式は引張主ひずみと圧縮主ひずみの比が大きくなるにつれて圧縮強度及び最大ピーク時のひずみが小さくなっていくことを、また(5)式は引張側のテンションスティフニング効果を表している。本解析では、この原式を忠実に取り込むこととするが、適用にあたって次のような点を変更している。*すなわち、圧縮強度及びピークひずみの低下率である(4)式の β は、図-5の破線のような形をしているが、引張-圧縮ひびわれ前領域との連続性を保つため $1/\beta$ の上限値を設定し、一方圧縮強度が引張主ひずみに応じて無限に小さくならないように下限値を設定している。これらを図-5に実線で示す。

この応力-ひずみ関係を基に、ひびわれのあるコンクリートに対する剛性マトリックス〔DC〕は、主応力方向において(6)式のように定めることができる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_d \\ \sigma_{dt} \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_d & 0 & 0 \\ & E_{dt} & 0 \\ \text{sym.} & & G \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_{dt} \\ \gamma \end{Bmatrix} \dots\dots(6)$$

E_d : (2)(3)式より求まる割線剛性

E_{dt} : (5)式より 求まる割線剛性

G : せん断剛性

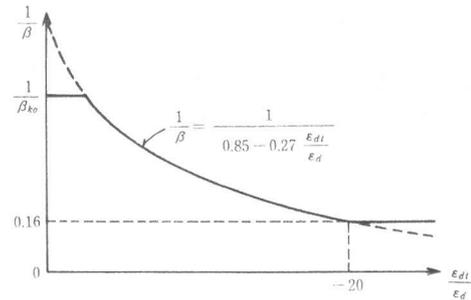


図-5 低下率 $1/\beta$ と主ひずみ比の関係

c. 引張-引張領域ひびわれ後

各主応力方向独立とし、それぞれの方向に(5)式の応力-ひずみ関係を仮定する。従って剛性マトリックスは次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{t1} \\ \sigma_{t2} \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{t1} & 0 & 0 \\ & E_{t2} & 0 \\ \text{sym.} & & G_t \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{t1} \\ \varepsilon_{t2} \\ \gamma \end{Bmatrix} \dots\dots(7)$$

E_{t1}, E_{t2} : 引張側各主応力方向の割線剛性

G_t : せん断剛性

2) 鉄筋

鉄筋は、軸方向剛性のみを有する等価な断面積を持つ異方性面材でモデル化し、
図-6に示すようなbi-linear型の復元力特性を仮定する。

その変位は、節点位置でコンクリートと同一と仮定する。

2.2 解析法

解析は割線剛性についてたてた釣合方程式を解き、同一荷重内で各節点変位が
前回の5%以内に収束するまでくり返し計算を行った。

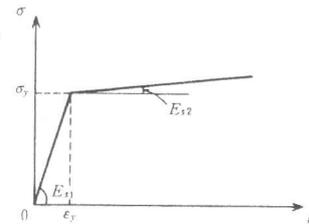


図-6 面鉄筋の復元力特性

3. 耐震壁の解析

3.1 解析の対象とする実験

解析の対象は、JCI選定試験体の耐震壁 #1⁸⁾で、青山、加藤らによって実験された1層I型の、No P 2012試験体である。この試験体は $a/d = 0.44$ 、壁筋比0.853%で、加力は、鉛直力24tonを柱頭に加えたあと、押し引きで水平力を与えている。載荷はくり返し載荷で部材角 $1/500$ を1回、 $1/150$ を2回、大変形を4サイクルとしている。その結果を見ると、壁板上部の圧壊とそこから伸びるせん断亀裂が 45° 方向に走り同時に右下の壁板脚部のスリップ状破壊が生じて耐力に至っており耐力は141tonであった。

3.2 解析モデルと解析条件

図-7に有限要素分割と、境界条件および加力条件を示す。
また解析で使用した鉄筋比、要素厚さおよびコンクリートと鉄筋の材料特性を表1~3に示す。

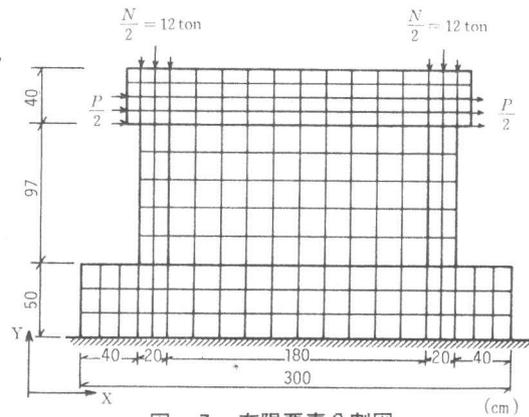


図-7 有限要素分割図

表-1 鉄筋比および要素厚さ

	Px (%)	Py (%)	厚さ (cm)
壁	0.853 (D6)	0.853 (D6)	1.0
柱	0.64 (D6)	3.81 (D13)	2.0
上梁	4.18	0.473 (D10)	3.0
下梁	4.18	0.473 (D10)	3.0

表-2 鉄筋の材料定数

	降状応力 σ_y (t/cm ²)	第1剛性 E_{s1} (t/cm ²)	第2剛性 E_{s2} (t/cm ²)
D6	3.99	2100	2.1
D10	3.53	2100	2.1
D13	3.68	2100	2.1

表-3 コンクリートの材料定数

圧縮強度 Fc (kg/cm ²)	割裂強度 f_{cr} (kg/cm ²)	ヤング係数 E_0 (t/cm ²)	ピークひずみ ϵ_0	ポアソン比 ν
297	23.6	234	0.00223	0.167

荷重は第1ステップで鉛直力のみを加え、第2ステップ以降に3ton刻みで水平力を加えた。

3.3 解析結果

(1) 破壊経過と諸現象発生荷重

解析により得られた試験体のひびわれパターンを実験結果とともに図-8に比較して示す。またひびわれ、鉄筋の降状、コンクリートの圧壊などの諸現象発生時の荷重を実験結果とともに表-4に示す。これらを見ると以下のような傾向が見られる。

- 1) せん断ひびわれの発生状況は比較的良く対応しているが、壁板上隅角部でやや相違が見られる。
- 2) 壁板・柱の脚部の圧壊領域は、実験と比較的良好な対応を示している。
- 3) 表-4の諸現象発生荷重については、初期ひびわれ荷重に差が見られるが、コンクリート圧壊荷重及び最大荷

重は良い対応を示している。また、破壊形式についても良い対応を示している。

(2) 荷重-変位関係

解析で得られた荷重-変位関係を実験結果と比較して図-9に示す。

これを見ると以下のような傾向がある。

- 1) 耐力は実験結果を良くフォローしている。
- 2) 耐力に至るまでの変形が実験と比較してかなり小さい。

表-4 諸現象発生荷重

	実験 (t)	解析 (t)
曲げひびわれ荷重	20	36
せん断ひびわれ荷重	50	39*)
柱主筋降伏	130	111
コンクリート圧壊	128	138
最大荷重	141	141
破壊形式	壁板上部の圧壊とそこから伸びるせん断亀裂+右下の壁板脚部のスリップ状破壊	壁板のせん断亀裂+右下の壁板脚部の圧壊

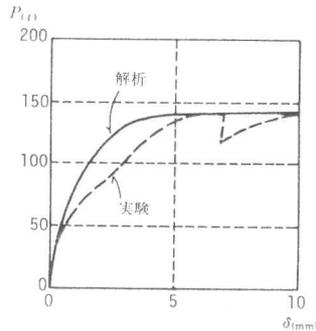
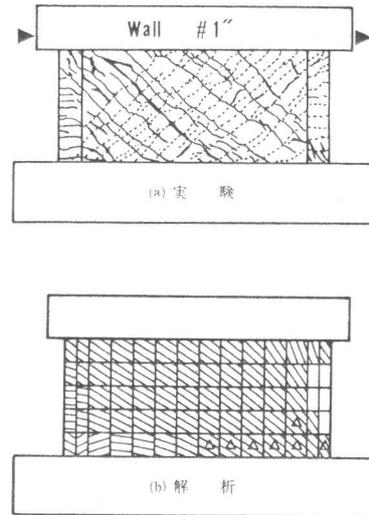


図-9 荷重-変位曲線

*) 壁板に45°方向のひびわれが最初に入った荷重



▨ ひびわれ要素
△ コンクリートの圧縮側ピーク後(圧壊)

図-8 ひびわれの発生状況(最終状態)

4. 考察

コリンズ理論を引張-圧縮領域に導入したプログラムによって、JCI選定試験体を解析した結果、破壊の進行状況、破壊の形式ならびに最大荷重は比較的良く表現することができることが分った。

しかし、変形が実験を大きく下回る結果となっており、その原因としては次のようなことが考えられる。

- 1) 引張側鉄筋のスタブよりの抜出しを評価していない。
- 2) コリンズの提案しているテンションスティフニングの式(5)が溶接金網を用いた平板の実験結果より求められたものであり、その適用範囲が不明なこと。ちなみに、他の研究者との比較を図-10に示すが、その間に大きな相違がある。

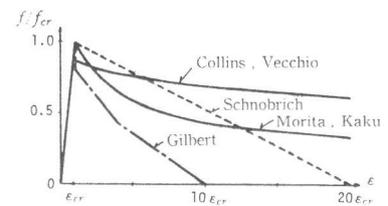


図-10 テンションスティフニングのモデル

この中で特に2)は、全体の弾塑性特性にかなり影響を及ぼす要因であると考えられ、コリンズ式の適用範囲の把握が必要であると同時にテンションスティフニング効果の鉄筋比による変化や異形鉄筋と溶接金網による相違等の究明が望まれる。

謝辞 鹿島建設武藤記念研究室の菅野忠博士、情報システム部の宮下丘氏、森川博司氏には終始御指導頂きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 狩野芳一, 南宏一, 滝口克己, 「鉄筋コンクリート部材のマクロ的なモデル化とマイクロモデルによる解析」, RC構造の有限要素解析に関するコロキウム, PP119~122, 1984. 12
- (2) 前川宏一, 「弾塑性破壊理論に基づくコンクリートの構成則」, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, PP1~8, 1983. 10
- (3) Collins, M.P., Vecchio, F., "The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses," ISBN Pub. No. 82-03, Univ. of Toronto, 1982. 4
- (4) 上田真稔, 瀬谷均, 毛井崇博, 「RC円筒およびボックス壁がせん断力を受けるときの非線形解析」, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, PP163~172, 1983. 10
- (5) Darwin, D. and Pecknold, D.A., "Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete," ASCE, Vol. 103, No. EM2, PP229-241, April 1977
- (6) Kupfer H.R. and Gerstle, K.H., "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses," ASCE, Vol. 99, No. EN4, PP852-866, August 1973
- (7) 山田一実, 青柳征夫, 「ひびわれ面におけるせん断伝達」, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, PP19~26, 1983. 10
- (8) 青山博之, 加藤大介, 橋本英雄, 「増設RC耐震壁の耐力と変形能の評価に関する実験的研究(その1)(その2)」, 建築学会大会梗概集, PP1407~1410, 1982. 10