

[107] みおつくしモデルによるコンクリートの直・剪断応力・歪特性

正会員 山田 稔 (神戸大学工学部)  
 正会員 ○河村 廣 (神戸大学工学部)

1. 序

鉄筋コンクリート骨組構造の主耐震要素たる柱、耐震壁は、一般に軸圧 $N$ 、曲げモーメント $M$ 、剪断力 $Q$ を受けるが、このような複合応力下における変形挙動の統一的な解析方法は未だ確立されていない。筆者らの研究室にても、 $Q^1$ 、 $N \cdot Q^{2-4}$ 、 $M \cdot Q^5$ 、 $N \cdot M \cdot Q^{6,7}$ 下でのマクロな単トラスモデル解析を試みて来た。本報は、 $M \cdot Q$ 解析<sup>5)</sup>で用いたトラスモデルに準じ、 $N \cdot Q$ 下コンクリートの弾塑性応力・歪特性に考察を加えるものである。

2. みおつくしモデル

図-1は一般的な微小要素の複合応力状態を示しているが、単一の耐震要素としてのコンクリートは図-2の如き応力状態にある場合が多く、力学モデルとしても同図の如きトラスモデル、既ちみおつくしモデルを想定する。B1, B2は斜材、Mは中柱である。Pb1, Pb2, Pmは各要素の応力である。上下水平材は剛体と仮定する。図-3は周囲を柱梁材で拘束されたコンクリート板で、側柱C1, C2を追加された拘束みおつくしモデルを設定することができる。両モデルは左右対称とする。N・Q及び逆対称Mという条件からモデル全体の曲げ変形は発生せず、図-4の如き軸歪 $\epsilon$ と剪断歪 $\gamma$ のみがモデルに生じることになる。要素柱材の直応力・歪関係は図-5の如く、完全弾塑性型と弾性脆性型の2ケースを考える。

3. 釣合い条件と適合条件

$$\begin{Bmatrix} N \\ Q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_m (+P_{c1} + P_{c2}) \\ P_{b1} \\ P_{b2} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_m (= \epsilon_{c1}, \epsilon_{c2}) \\ \epsilon_{b1} \\ \epsilon_{b2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2}(1 + \sin^2 \alpha) * & \sin \alpha \cos \alpha \\ \frac{1}{2}(1 + \sin^2 \alpha) * & -\sin \alpha \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式(1)(2)はみおつくしモデルの力の

釣合い条件と変形の適合条件式である。( )内は拘束みおつくしモデルの場合に追加される。式(2)係数マトリックス中\*印要素は、本来のトラスモデルの場合 $\sin^2 \alpha$ にするべき処を、 $\epsilon$ と $\epsilon_{b1}$ 、 $\epsilon_{b2}$ の対応関係を1としこ場合の1と $\sin^2 \alpha$ との平均値にとったものである。図-4 みおつくしモデルの変形

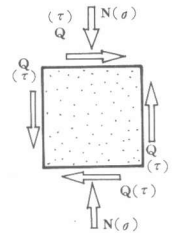
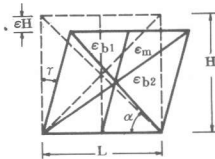


図-1 複合応力下のコンクリート

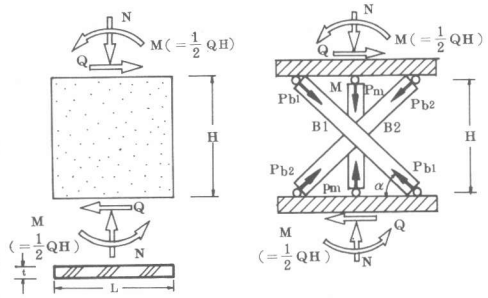


図-2 N・Q下コンクリート板とみおつくしモデル

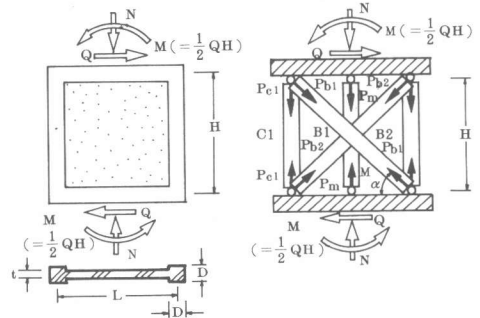
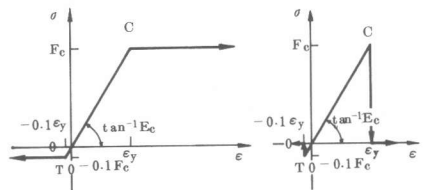


図-3 N・Q下拘束コンクリート板と拘束みおつくしモデル



(a)完全弾塑性型 (b)弾性脆性型

図-5 コンクリート要素の $\sigma - \epsilon$ 特性

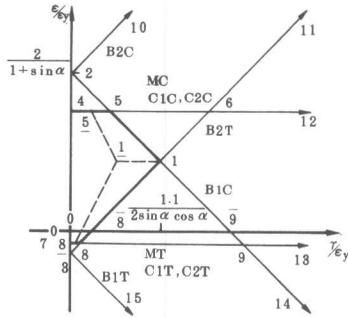


図-6 歪 ( $\epsilon - \gamma$ ) 平面特性 (歪境界線)

表-1 歪境界線式

| 歪境界線名        | 歪境界線 ( $\epsilon - \gamma$ ) 式  |
|--------------|---|
| B1C          | $\epsilon_y = 0.5\epsilon(1 + \sin^2\alpha) + \gamma \sin\alpha \cos\alpha$     |
| B1T          | $-0.1\epsilon_y = 0.5\epsilon(1 + \sin^2\alpha) + \gamma \sin\alpha \cos\alpha$ |
| B2C          | $\epsilon_y = 0.5\epsilon(1 + \sin^2\alpha) - \gamma \sin\alpha \cos\alpha$     |
| B2T          | $-0.1\epsilon_y = 0.5\epsilon(1 + \sin^2\alpha) - \gamma \sin\alpha \cos\alpha$ |
| MC, C1C, C2C | $\epsilon_y = \epsilon$   |
| MT, C1T, C2T | $\epsilon_y = \epsilon$   |

表-2 歪境界線交点座標

| № | $\epsilon/\epsilon_y$           | $\gamma/\epsilon_y$                                      | №  | $\epsilon/\epsilon_y$          | $\gamma/\epsilon_y$                 |
|---|---------------------------------|--|----|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | $\frac{0.9}{1 + \sin^2\alpha}$  | $\frac{1.1}{2 \sin\alpha \cos\alpha}$                    | 10 | $\infty$                       | $\infty$                            |
| 2 | $\frac{2}{1 + \sin^2\alpha}$    | 0  | 11 | $\infty$                       | $\infty$                            |
| 3 | $-\frac{0.2}{1 + \sin^2\alpha}$ | 0  | 12 | 1                              | $\infty$                            |
| 4 | 1                               | 0  | 13 | -0.1                           | $\infty$                            |
| 5 | 1                               | $\frac{0.5}{\tan\alpha}$                                 | 14 | $-\infty$                      | $\infty$                            |
| 6 | 1                               | $\frac{0.6 + 0.5 \sin^2\alpha}{\sin\alpha \cos\alpha}$   | 15 | $-\infty$                      | $\infty$                            |
| 7 | -0.1                            | 0  | 8  | 0                              | $\frac{0.1}{\sin\alpha \cos\alpha}$ |
| 8 | -0.1                            | $\frac{0.05}{\tan\alpha}$                                | 9  | 0                              | $\frac{1}{\sin\alpha \cos\alpha}$   |
| 9 | -0.1                            | $\frac{1.05 + 0.05 \sin^2\alpha}{\sin\alpha \cos\alpha}$ | 1  | $\frac{0.9}{1 + \sin^2\alpha}$ | 0.535                               |
|   |                                 |  | 1  | 1                              | $0.53 \sin^2\alpha$                 |
|   |                                 |  | 1  | -0.1                           | $0.053 \sin^2\alpha$                |

表-3 応力境界多角形頂点座標

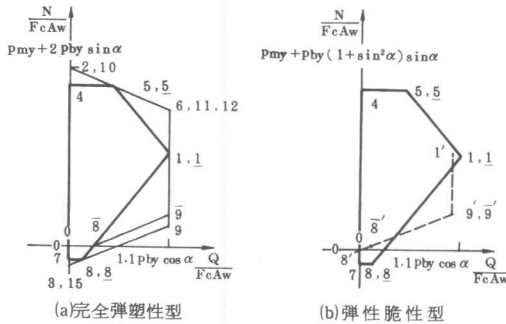


図-7 コンクリート板応力 ( $N \cdot Q$ ) 平面特性 (応力境界多角形)

| №         | $N/FcAw$  | $Q/FcAw$               |
|-----------|---|------------------------|
| 1, 1      | $\frac{0.9}{1 + \sin^2\alpha} pmy + 0.9 pby \sin\alpha$ | $1.1 pby \cos\alpha$   |
| 2, 10     | $pmy + 2 pby \sin\alpha$                                | 0                      |
| 3, 15     | $-0.1 pmy - 0.3 pby \sin\alpha$                         | 0                      |
| 4         | $pmy + pby(1 + \sin^2\alpha) \sin\alpha$                | 0                      |
| 5, 5      | $pmy + pby(1 + \sin^2\alpha) \sin\alpha$                | $pby \cos^2\alpha$     |
| 6, 11, 12 | $pmy + 0.9 pby \sin\alpha$                              | $1.1 pby \cos\alpha$   |
| 7         | $-0.1 pmy(1 + \sin^2\alpha) \sin\alpha - 0.1 pby$       | 0                      |
| 8, 8      | $-0.1 pmy(1 + \sin^2\alpha) \sin\alpha - 0.1 pby$       | $0.1 pby \cos^2\alpha$ |
| 9, 13, 14 | $-0.1 pmy + 0.9 pby \sin\alpha$                         | $1.1 pby \cos\alpha$   |

(注) 拘束みおつくしモデルの場合:  $pmy \rightarrow pmy + 2pcy$

表-4 引張ブレース破断後応力境界多角形頂点座標

(弾性脆性型)

| №  | $N/FcAw$   | $Q/FcAw$                           |
|----|--|------------------------------------|
| 1' | $\frac{0.9}{1 + \sin^2\alpha} (2pcy + pmy) + pby \sin\alpha$ | $pby \cos\alpha$                   |
| 8' | $-0.2pcy - 0.1 pby \sin^2\alpha$                             | $-0.1 pby \sin^2\alpha \cos\alpha$ |
| 9' | $-0.2pcy + pby \sin\alpha$                                   | $pby \cos\alpha$                   |
| 8' | $0.1 pby \sin\alpha$   | $0.1 pby \cos\alpha$               |
| 9' | $pby \sin\alpha$   | $pby \cos\alpha$                   |

(注) みおつくしモデルの場合:  $pcy = 0$

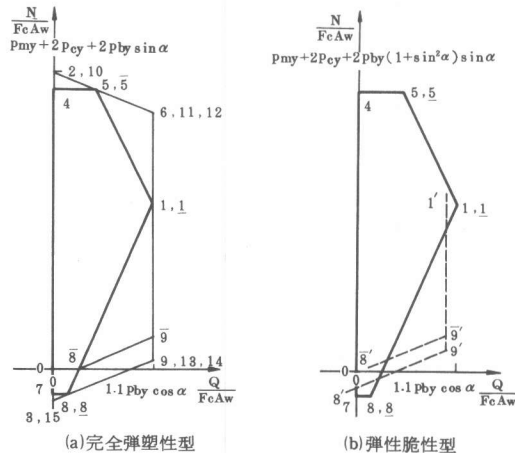


図-8 拘束コンクリート板応力 ( $N \cdot Q$ ) 平面特性 (応力境界多角形)

#### 4. 直・剪断応力・歪特性

各構成柱要素が、図-5の応力・歪境界点C, Tに到達する場合に対応して、モデルの歪 $\epsilon \cdot \gamma$ 平面上に図-6の如くB1C, B1T, B2C, B2T, MC, C1C, C2C, MT, C1T, C2Tの歪境界線を描くことができる。各線の式は、式(2)より表-1の如く表わされる。歪境界線の交点も表-2の如き座標で示される。 $\epsilon$ ,  $\gamma$ を柱要素の降伏歪度 $\epsilon_y$ で除せば、歪特性はブレース角度 $\alpha$ のみの関数となる。

式(1)(2)と図-5を用いれば、モデルの応力N・Q平面上に応力境界多角形を図-7, 8の如く描くことができる。図-7はコンクリート板、図-8は拘束コンクリート板の場合に対応する。図-7, 8共、(a)は図-5(a)の完全弾塑性型の場合である。応力境界多角形の交点の座標は表-3で与えられる。N, Qはコンクリート圧縮強度F<sub>c</sub>及び壁板断面積A<sub>w</sub>(=t・L)の積で無次元化されており、従って、表-3中のpも構成要素の断面力PをF<sub>c</sub>A<sub>w</sub>で除したものである。p<sub>by</sub>, p<sub>my</sub>, p<sub>cy</sub>は各々斜材, 中柱, 側柱の圧縮降伏時に対応する。p<sub>my</sub>は、拘束みおつくしモデルの場合、p<sub>my</sub>+2p<sub>cy</sub>とおけばよい。

完全弾塑性型の場合叙上の如く問題はないが、図-5(b)の如くコンクリートの脆性を考慮し、かつ、みおつくし構成部分の中柱と斜材との破壊の相互関係を考慮したのが図-7(b), 図-8(b)である。図-9, 10に、コンクリート板と拘束コンクリート板の各歪領域において、各柱要素の1次破壊(破線)及び2次破壊(一点鎖線)する状態を示す。構造体としての意味を有する弾性域45187, 引張斜材破断域の189, 中柱・引張斜材破断域の8998をここでは考察の対象とする。

#### 5. モデルの定量化

図-7(b)のコンクリート板について弾性域の境界多角形45187が、コンクリートの複合応力破壊条件に類似していることから、次の応力境界条件A, Bを図-11の如く与えることができる。即ち、Aは圧縮強度、Bは最大剪断強度を与える。

〔応力境界条件〕A:  $p_{my} + p_{by}(1 + \sin^2 \alpha) \sin \alpha = 1$  (3), B:  $1.1 p_{by} \cos \alpha = 0.25$  (4)  
 拘束みおつくしモデルの場合は、側柱の柱形の断面積をA<sub>c</sub>とする時、 $p_{cy} = A_c / A_w$  (5)で与えられる。上式(3)(4)(5)より、 $\alpha$ が与えられるとp<sub>my</sub>, p<sub>cy</sub>, p<sub>by</sub>は全て決定できる。

ここで、弾性剛性の検討を行なうと、みおつくしモデルは、弾性歪、応力多角形の頂点1についての応力・歪比から $G_c' = 0.455 \sin \alpha \cos \alpha F_c / \epsilon_y$ を得、一方、コンクリートのG<sub>c</sub>は、 $\nu = 1/6$ として $G_c = 0.429 E_c$ となる。仮定より $E_c = F_c / \epsilon_y$ だから、結局、 $G_c' = 1.06 \sin \alpha \cos \alpha E_c$  (6)を得る。従って、本来のコンクリートのE<sub>c</sub>に一致させるためには、図-6, 9, 10の境界点1, 5, 8の $\gamma / \epsilon_y$ を1.06 sin α cos α倍すればよく、同図及び表-2にて1, 5, 8で与え、歪境界線は破線で描いてある。勿論、応力平面上にては、1, 5, 8と同一点となる。

\* (式(4)の0.25は、最大剪断強度がαと直応力とから独立の定数であるという仮説を前提としている。)

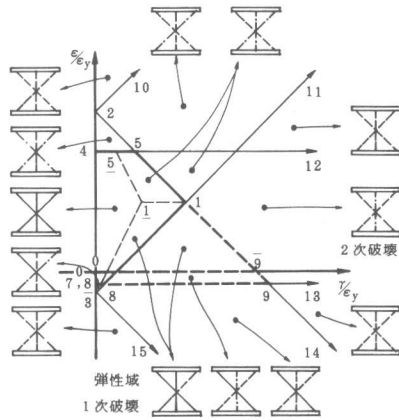


図-9 コンクリート板歪平面における構成柱材の破壊性状

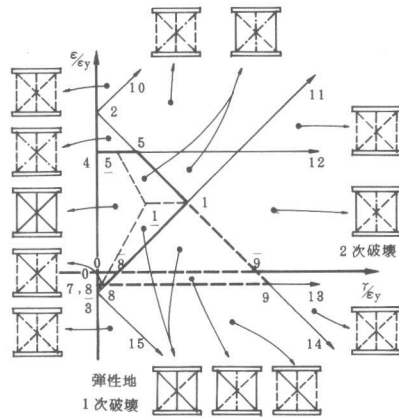


図-10 拘束コンクリート板歪平面における構成柱材の破壊性状

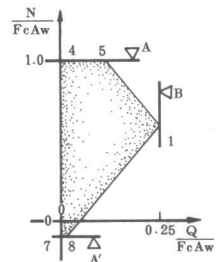


図-11 応力境界条件

6. 実験結果との比較及び考察

図-12, 13はコンクリート板の弾性域の歪と応力の境界多角形と当研究室のねじり実験<sup>8)</sup>による結果(●印)とを併記したものである。但し、図-12で実験値の $\epsilon/\epsilon_y$ は図-13の $N/FcAw$ と等置し、又、 $\gamma$ は同文献<sup>8)</sup> $\theta_{max} \times 7.5$  cmより求めた。

図-14, 15は拘束コンクリート板の歪と応力の境界多角形と当研究室の耐震壁実験<sup>9)</sup>の結果(●印剪断亀裂発生, ○印最大耐力点)を併記したものである。実験時の側柱への作用軸力は無視し、 $\epsilon/\epsilon_y$ は $N/Fc(Aw+2Ac)$ と等置した。供試体は1体、柱軸圧は無視した。

図-13は、コンクリート板の場合のみおつくしモデルで強度的に充分解析可能なことを、図-12は、本モデルが剛性の過小評価を与えるので行なった補正が妥当であることを示している。図-14, 15は、周辺拘束コンクリート板の場合は拘束みおつくしモデル(トラスモデル)が、特に低軸圧レベルにおいて適用可能なことを示している。中高軸圧領域で、解析通り張力場が形成されるか否かについては、今後の実験的検証にまつ外はない。これは、剪断補強筋を

有する場合に、無拘束コンクリート板をも含めて今後の課題となろう。変形の適合条件、最大剪断強度、剛性等の点で問題は残るが、簡明性、演算と空間の線形化等の長所を、本モデルは有している。

7. 結

直応力と剪断応力を受けるコンクリートの応力・歪特性をみおつくしモデルにより解析し、歪平面、応力平面上に各々境界多角形を得た。これらは、当研究室で得られた実験結果を良く説明することができた。今後の実証的作業にまつべき問題点も残されているが、筆者らがかって質点モデルで行なった軸圧・曲げ・剪断の複合応力を受ける鉄筋コンクリート部材の歪空間、応力空間特性の解析法<sup>10)</sup>への応用に際しても、本モデルの簡明性は大きい武器となろう。最後に、本研究は、日本建築総合試験所の益尾 潔君から有益な御討議を得たことを付記し、感謝の意を表します。

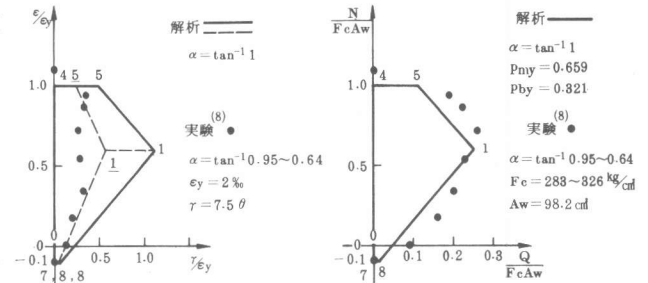


図-12 コンクリート素材の $\epsilon \cdot \gamma$ 平面特性実験と解析の比較

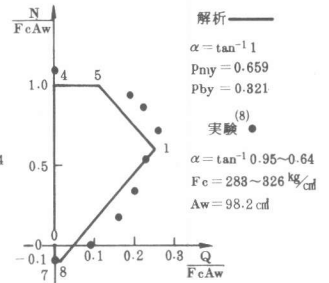


図-13 コンクリート素材の $N \cdot Q$ 平面特性実験と解析の比較

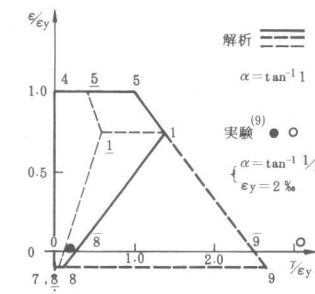


図-14 R/C耐震壁の $\epsilon \cdot \gamma$ 平面特性実験と解析の比較

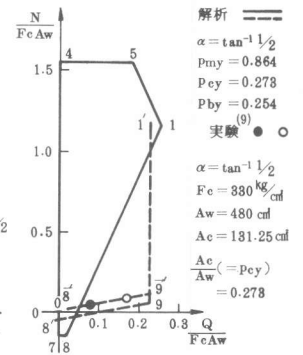


図-15 R/C耐震壁の $N \cdot Q$ 平面特性実験と解析の比較

文 献

(1) 山田稔, 河村廣, 植原健一: 鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究(Ⅱ), 日本建築学会学術講演集, 昭46.11, pp.831~832.  
 (2) 山田稔, 八木貞木: 軸圧を受ける鉄筋コンクリート部材の交番繰返し剪断性状に関する研究(Ⅱ), 日本建築学会近畿支部研報, 昭48.6, pp.57~60.  
 (3) 山田稔, 河村廣, 中川佳秀: 軸圧を受ける鉄筋コンクリート部材の交番繰返し剪断変形性状に関する研究(Ⅰ), 日本建築学会近畿支部研報, 昭51.6, pp.69~72.  
 (4) 山田稔, 河村廣, 益尾潔: 軸力とせん断力を受ける鉄筋コンクリート単体耐震壁の弾塑性荷重・変形特性(Ⅰ), 日本建築学会近畿支部研報, 昭55.6, pp.57~60.  
 (5) 山田稔, 河村廣, 梅垣裕行: 複合応力(N,M,Q)下における鉄筋コンクリート単体耐震壁の弾塑性変形と崩壊性状に関する研究(Ⅰ), 日本建築学会近畿支部研報, 昭55.6, pp.53~56.  
 (6) 山田稔, 河村廣, 益尾潔: 複合力を受ける鉄筋コンクリート単体耐震壁の弾塑性荷重・変形特性, 日本建築学会近畿支部研報, 昭54.6, pp.93~96.  
 (7) Yamada, M., Kawamura, H., Masuo, K.: Yield Polyhedron of R.C. Shear Walls Under Combined Forces, Final Report, IABSE Copenhagen, 1979, pp.51~58.  
 (8) 山田稔, 多田耕作: コンクリートの複合応力状態に於ける破壊条件に関する研究, 日本建築学会近畿支部研報, 昭43.5, pp.33~36.  
 (9) Yamada, M., Kawamura, H., Katagihara, K.: Reinforced Concrete Shear Walls Without Openings, Test and Analysis, ACI, Publication SP-42, Vol. 2, 1974, pp.539~558.  
 (10) 山田稔, 河村廣: 複合(軸圧・曲げ・剪断)応力下における鉄筋コンクリート断面の弾塑性応力・歪特性(Ⅰ), 日本建築学会近畿支部研報, 昭49.6, pp.41~44, (Ⅱ), 日本建築学会大会梗概集, 昭51.10, pp.1429~1480.