

[173] コリンス理論に基づく立体 RC 耐震壁の弾塑性解析

正会員 井上 範夫 (鹿島建設 技術研究所)
 正会員 小 鹿 紀 英 (鹿島建設 小堀研究室)
 正会員○鈴 木 紀 雄 (鹿島建設 小堀研究室)
 正会員 速 水 由 紀 夫 (鹿島建設 建築設計本部)

1. はじめに

RC構造のFEM解析法は、これまでに数多く提案されている¹⁾。その大部分は、鉄筋やコンクリートの特性の他に、両者の間の付着や骨材のかみ合い、鉄筋のダボ作用など、数多くの基本的な要因を考慮した精密なものとなっている。このような「ミクロな」FEM解析法が、基礎的な研究の分野では、非常に重要なものであることはいうまでもない。これに対して、構造物の設計に際しては、ミクロな情報はあまり必要ではなく、構造物全体の復元力特性や、大きなゾーンで捉えた平均的な歪や応力などの「マクロな」情報の方が、重要かつ実用的である。この目的のためには、ミクロなFEM解析法は精密すぎ、むしろ、計算量が膨大なものとなること、データとして入力すべきパラメータの数が多くて、その値を決め難いことなど、実用には不都合な面も少なくない。逆に、少しの計算量と簡単なデータでマクロな情報が得られる解析法を開発することができれば、設計に大いに役立つと期待できる。

筆者らは、このような解析法を目指して、Collins らが提案したRCの構成則²⁾を利用したFEM解析法を開発してきた。この構成則は、RC平板の弾塑性性状を、あるゾーンの平均的な歪と応力の形で記述したものであり、一般の耐震壁や原子炉建屋のような、面材で構成される構造物のマクロな解析には、非常に適したものと考えられる。これまでに、2次元解析法と、RC耐震壁試験体への適用例を発表してきた^{3,4)}が、今回は、これらの適用例で問題点として残った点の再検討結果と、3次元解析法の概要、および、それを適用したRC立体耐震壁の解析結果について報告する。

2. 解析法

まず、基本となる2次元解析法の仮定について簡単に述べる。

- (1) 単調載荷を対象とする。
- (2) 鉄筋とコンクリートの平均的歪度は同一とする。
- (3) 鉄筋は、断面積が等価な面材に置換し、その復元力特性はバイリニア型とする。
- (4) コンクリートの圧縮-圧縮応力下と、ひびわれ発生前の圧縮-引張応力下の構成則は、Darwin らの等価一軸歪に基づく直交異方性モデル⁵⁾とし、ひびわれは、コンクリートの主引張応力度が f_{cr} になったときに、主引張応力度と直交する方向に発生するものとする。 f_{cr} の値は、Collins に従い次式で決める。

$$f_{cr} = 0.33\sqrt{F_c} \text{ (Mpa)} \quad \text{--- (1)}$$

- (5) ひびわれ発生後の圧縮-引張応力下のコンクリートの構成則はCollinsのモデルとする(図-1)。

- i) 主応力度と主歪度の方向は一致する。
- ii) 主圧縮応力度-歪度関係は、引張歪度と圧縮歪度の関数として、次式で表される。

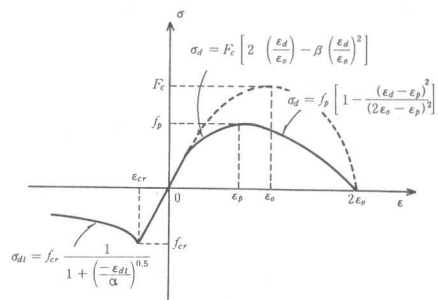


図-1 引張圧縮領域の応力-ひずみ関係

$$\sigma_d = F_c \times [2 \times (\epsilon_d / \epsilon_0) - \beta (\epsilon_d / \epsilon_0)^2] \quad \text{--- (2)}$$

$$\beta = 0.85 - 0.27 (\epsilon_{dt} / \epsilon_d) \quad \text{--- (3)}$$

iii) 主引張応力度-歪度関係は次式とする。

$$\sigma_{dt} = f_{cr} / (1 + (-\epsilon_{dt} / \alpha)^{0.5}) \quad \text{--- (4)}$$

ここで、 σ_d, ϵ_d : 主圧縮応力度と歪度、 $\sigma_{dt}, \epsilon_{dt}$: 主引張応力度と歪度、 F_c : 圧縮強度である。

3次元解析では、面外曲げに対する挙動を表現するために、板厚方向に数層に分割した積層要素を使用する(図-2)。断面の平面保持を仮定し、各層について、2次元解析で用いた構成則を適用する。鉄筋は、断面積が等価な層として表現する。

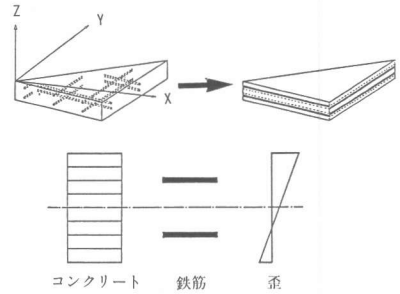


図-2 3次元要素

3. RC耐震壁の2次元解析

ここで示すのは、図-3に示すフレームつき耐震壁試験体の⁷⁾2次元解析例である。筆者らは、文献4においてこの耐震壁のFEM解析結果を報告したが、破壊経過や耐力は実験結果とほぼ一致したものの、図-4に一点鎖線で示すように、解析では変形がかなり小さくなってしまった。今回、コンクリートの材料特性を次のように変更して、解析を再び行った。前回と同じく、図-4に示す2通りのTension Stiffeningを仮定した。

- (1) 圧縮強度時の歪度(ϵ_0)を、2000 μ から2500 μ とした。文献7では、 ϵ_0 の値が明示されていないが、圧縮強度が、347 Kg/cm²と高いので、この程度の値が適当と思われる。
- (2) 引張強度 f_{cr} を、32.1 Kg/cm²(割裂強度)から、19.6 Kg/cm²(=0.33 $\sqrt{F_c}$ (Mpa))とした。これは、Collins理論(式(1))に従った変更である。

今回行った解析結果を、図-4に破線で示す。材料特性の仮定の変更により、実験との対応が良好となった。

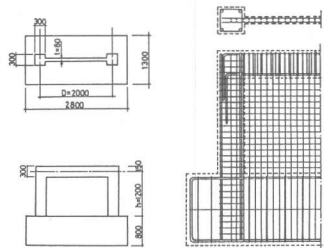


図-3 フレームつき耐震壁試験体(文献7)

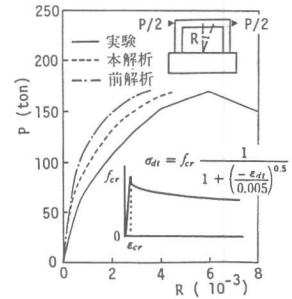
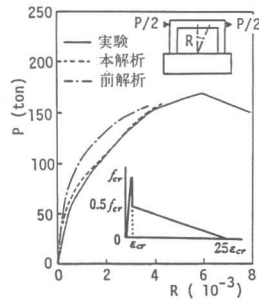


図-4 フレームつき耐震壁の荷重-変形関係

4. Box型耐震壁の解析

図-5に示すBox型耐震壁の解析結果について述べる。この壁は、原子力工学試験センターによって行われた一連の実験中の試験体の一つ(試験体名B1-4⁸⁾)である。またこの試験体は、1983年の「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」(JCI)において、マイクロ解析用選定試験体(#2)として選ばれ、数名の研究者によってFEM解析がなされている⁹⁾。試験体は、基礎が固定され、上部の加力ばりに、正負繰り返しの水平力が加えられている。また、軸力は加えられていない。

対称条件を用いて、試験体の1/2部分を、図-6のように要素分割した。壁、加力ばり、基礎は、厚さがそれぞれ8 cm, 40 cm, 100 cmの要素とし、壁部分は、厚さ方向に5層のコンクリートと4層の鉄筋に分割した。また、加力ばりは、鉛直面内の要素としてのみモデル化した(後出の円筒型耐震壁のモデルのように、水平面内の要素としてもモデル化しても、解析結果は、ほとんど変わらない)。材料特性は、実験を参考にして表-1のように仮定した。また、式(4)中の係数 α を0.0008と仮定した。Collinsは、この値を0.005としているので、Tension Stiffeningの効果を、Collinsよりも小さ目に評価していることになる。

図-7に、荷重-変形関係を実験結果、および、他の研究者によるFEM解析結果と比較して示す。初期剛性

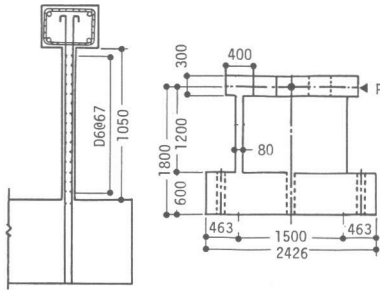


図-5 Box型耐震壁試験体(文献9)

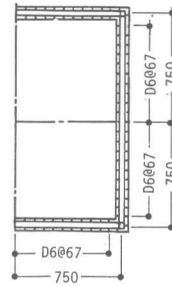


図-6 Box型耐震壁解析モデル

表-1 Box型耐震壁の材料定数

コンクリート	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
	F_c (kg/cm ²)	f_{cr} (kg/cm ²)	E_c ($\times 10^4$ kg/cm ²)
	305.0	18.35	2.29

鉄筋	降伏強度	ヤング係数
	f_s (kg/cm ²)	E_s ($\times 10^4$ kg/cm ²)
	3840.0	1.87

表-2 Box型耐震壁の破壊経過

	実験値 (ton)	解析値 (ton)		実験値 (ton)	解析値 (ton)
曲げひびわれ	25.1	20	ウェブ縦筋降伏	110.3	120
せん断ひびわれ	25.1	30	コンクリート圧壊	せん断 132.4 曲げ 138.3	せん断 150
フランジ縦筋降伏	101.3	110	最大荷重	138.3	150
ウェブ横筋降伏	126.2	—	破壊型式	フランジ曲げ/ウェブせん断/コンクリート圧壊	ウェブ脚部圧壊

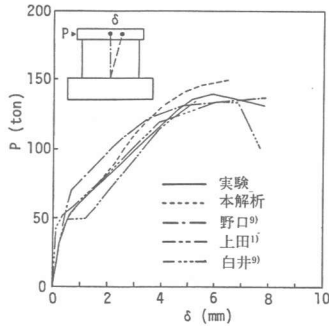


図-7 Box型耐震壁の荷重-変形関係

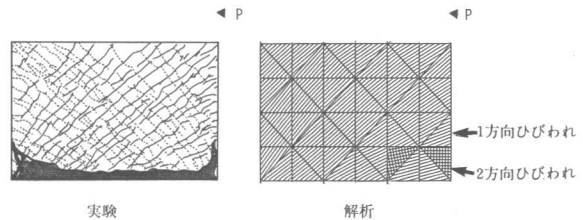


図-8 Box型耐震壁のひびわれ

を含めて、荷重が70 ton 付近までは、解析結果と実験結果は良く対応している。また、それ以降も、解析の方の変形がやや小さ目であるが、近い値となっている。表-2には、破壊の進行状況を示す。実験で観察されたウェブ横筋の降伏が解析では生じなかったことを除くと、ひびわれや鉄筋降伏の発生荷重は、実験と解析で対応している。実験では、フランジの曲げ圧壊とウェブのせん断圧壊によるすべりで破壊したのに対し、解析では、ウェブのせん断圧壊(図-1において、コンクリートの主圧縮歪度が $2\epsilon_0$ を超え、応力を負担しなくなる状態)によって最大耐力が決まった。図-8に、実験終了後の試験体のひびわれ状況と、解析による最大耐力時のひびわれを示す。解析では、ハッチの方向が、コンクリートの主圧縮応力度の方向を表している。解析では、右下部分に2方向ひびわれが発生している点を除くと、ひびわれ方向はほぼ対応している。

5. 円筒型耐震壁の解析

次に、図-9に示す円筒型耐震壁の解析結果について述べる。この試験体は、前述のBox型耐震壁と同じく、原子力工学試験センターによって実験されたものである(試験体名B2-2¹⁰⁾)。軸力ゼロで、加力ばりに、正負繰り返しの水平力が加えられている。

解析モデルを図-10に示す。加力ばりを通じた壁への力の伝達を再現するために、加力ばりを水平面内の要素としてもモデル化した。ただし、二重評価を避けるために、加力ばり部分の水平な要素と鉛直の要素の厚さを、それぞれ実際の1/2とした。壁部分は、コンクリートを厚さ方向に5層、鉄筋を4層に分割した。また、Box型耐震壁の解析より、基礎のモデル化は不要と判断されたので、壁脚部を固定とした。解析に使用した材料特性を表-3に示す。

図-11に、荷重-変形関係を示す。初期剛性を含めて、60 ton付近までは、実験結果と解析結果は良く対応している。それ以降は、解析の変形の方が小さ目の値となった。破壊の進展状況を、表-4に実験と比較して示す。解析では、Box型試験体の場合と同じく、ウェブ横筋の降伏は生じなかった。その他の現象が起こる耐力の対応は、Box型試験体の場合と比べると、若干悪くなっている。図-12には、ひびわれの展開図を示す。解析ではいくつかの要素で2方向にひびわれが発生しているが、全体としては、ひびわれの方向は一致している。

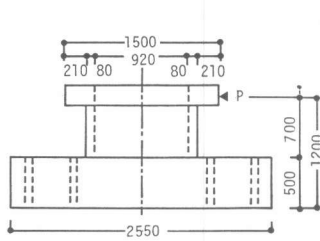


図-9 円筒型耐震壁試験体(文献8)

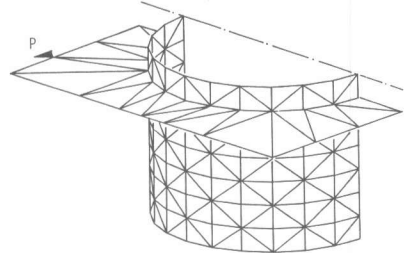
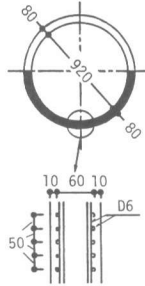


図-10 円筒型耐震壁解析モデル

表-3 円筒型耐震壁の材料定数

コンクリート	圧縮強度 F _c (kg/cm ²)	引張強度 f _{cr} (kg/cm ²)	ヤング係数 E _c (×10 ⁴ kg/cm ²)	
		277.0	17.53	2.48
鉄筋	降伏強度 f _y (kg/cm ²)	ヤング係数 E _s (×10 ⁴ kg/cm ²)		
	3840.0	1.87		

表-4 円筒型耐震壁の破壊経過

	実験値 (ton)	解析値 (ton)	破壊型式	
	曲げひびわれ	27.0	20	ウェブ縦筋降伏
せん断ひびわれ	23.6	20	コンクリート圧壊	せん断
フランジ縦筋降伏	66.4	80	最大荷重	せん断
ウェブ横筋降伏	77.9	—	破壊型式	せん断

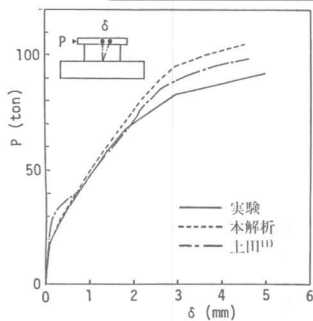


図-11 円筒型耐震壁の荷重-変形関係

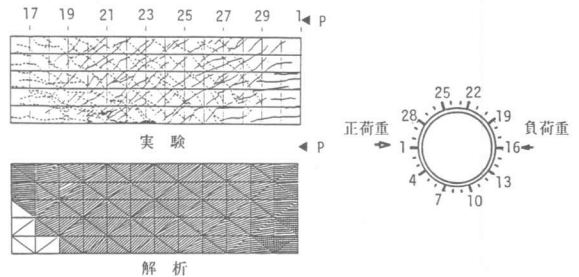


図-12 円筒型耐震壁のひびわれ

6. まとめ

Collins 理論に基づいた、RC構造の3次元FEMの解析例について報告した。Box型と円筒型の耐震壁試験体の解析を行ったところ、荷重-変形関係や破壊の進行状況など、かなり良好に追跡できることが分った。

<謝辞>

研究にあたり、貴重な御助言を頂いた鹿島建設小堀研究室の菅野 忠 博士とプログラム作成の御指導を頂いた鹿島建設情報システム部の森川博司氏に感謝いたします。

<参考文献>

- (1) 井上範夫, 野口博「最近の有限要素解析モデルの概観」RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集 pp1-10, 1984.12
- (2) Collins, M. P., Vecchio, F., "The Response of RC to In-plane Shear and Normal Stress", ISBN Pub. No.82-83 Univ. of Toronto, 1984
- (3) 井上範夫, 小堀紀英他「コリズ理論に基づくRC弾塑性解析法」第7回コンクリート工学年次講演会論文集 pp 405-408, 1985
- (4) 菅野 忠, 鈴木紀雄他「鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性パラメータ解析」第7回コンクリート工学年次講演会論文集 pp 409-412, 1985
- (5) Darwin, D., Pecknold, D. A., "Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete" ASCE, Vol. 103, EM2, pp 229-241. Apr. 1977
- (6) Clough, R. W., Fellippa, C. A., "A Refind Qurdilateral Element for Analysis of Plate Bending" APTDL-TR-68-150, pp 399-440
- (7) 千葉 隆他「建屋の復元力特性に関する研究 その8」58年日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 1509-1510
- (8) 稲田泰夫, 秋野金次他「原子炉建屋の復元力特性試験(小型および部分機型) その4」57年日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 963-964
- (9) 菅野俊介「耐震壁選定試験体」選定理由および実験データの概要」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, 解析モデル検証用試験体の実験データ集 pp 43-53 1983
- (10) 菅野俊介, 秋野金次他「原子炉建屋の復元力特性試験(小型および部分機型) その5」57年日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 965-966
- (11) 上田真穂, 瀬谷 均他「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論文集 pp 163-170.1983