

[172] 斜め方向入力を受けるボックス壁の力学性状に関する解析的研究

正会員○谷口 元 (竹中工務店技術研究所)

正会員 毛井 崇博 (竹中工務店技術研究所)

正会員 上田 真稔 (竹中工務店技術研究所)

1. まえがき

原子炉建屋のように安全性が重視される構造物の設計においては、材料の非線形性を考慮した弾塑性挙動の把握が望まれている。従来鉄筋コンクリート構造物の安全性の確認は模型実験によって行なわれることが多かったが、近年の実験的研究成果の蓄積に伴いコンクリートの力学性状は徐々に明らかになり、数値解析による実現象の説明も可能となりつつある。

本稿は鉄筋コンクリートシェル構造物を有限要素法によって解析し、その結果を実験値と比較したものである。加力角度 0° のボックス壁の有限要素解析については、すでに実験値と解析値が良く合うことを報告している¹⁾。また斜め加力を受けるボックス壁については、青山・細川他が角度 45° の場合についてFEM弾性解析を行なっている²⁾。本論文では、加力角度 45° について弾塑性解析を行ない、実験と本解析手法による解析結果の適合性を検討した後、同一モデルの加力角度 30° と 0° についても解析し斜め加力を受けるボックス壁の変形性状、耐力等の加力角度の違いについて調べた。解析対象とした試験体はせん断スパン比が小さいせん断卓越型の試験体である³⁾。

解析手法は、著者等が既に報告したものと同じである¹⁾。即ち、i) ひび割れ後の圧縮方向のコンクリートの剛性低下と耐力の低下、ii) せん断変形によるコンクリートの破壊の判定、iii) 鉄筋のダボ作用によるせん断伝達効果を考慮している。

2. 解析手法

主な解析手法を以下に述べる(詳細は文献¹⁾を参照) 鉄筋コンクリート板は、板曲げによる厚さ方向の材料の非線形化に対応できるように、層状のコンクリートと層状の異方性鉄筋のシェル要素を重ね合わせたモデルとする(図1)。

一軸の圧縮応力-ひずみ関係は図2に示すように直線近似とする。終局ひずみ ϵ_u 以後、 $2\epsilon_u$ までを負勾配としてそれ以後圧縮強度 F_c の0.2倍を保持する二軸応力下では圧縮-圧縮域での降伏曲面はvon Misesの条件に従い、第1、2次降伏曲面は相似とする。降伏後は塑性流れ則に従うものとする。主応力の最大値が引張強度 F_t 以上になるとひび割れが生じるものとし、ひび割れと直交方向の剛性は零とする。同方向の応力はテンションスチフニング効果を考慮して主応力方向のひずみ ϵ_1 の減少関数とする(図3)。

ひび割れが生じたコンクリートの構成方程式を、以下のように表わす。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E(\epsilon_2) & 0 \\ 0 & 0 & G(\epsilon_2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

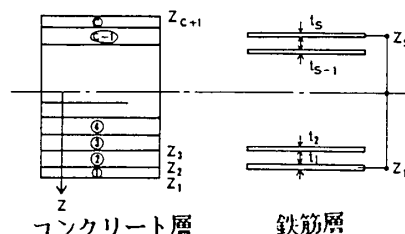
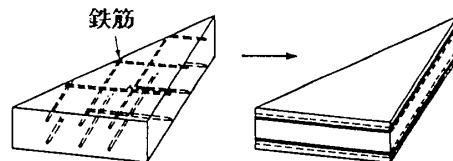


図1 鉄筋コンクリートシェル要素

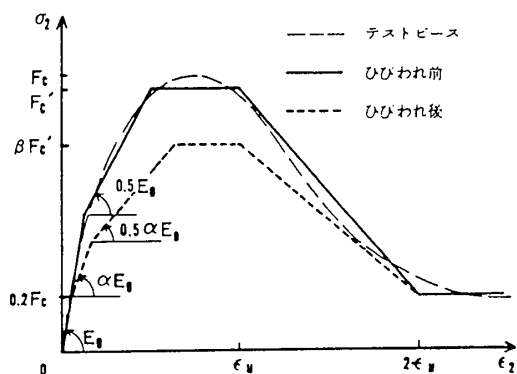


図2 コンクリートの応力-歪み関係(圧縮)

ここで応力 σ とひずみ ϵ の添字1、2は各々ひび割れと直交方向及び平行方向を表わす。

(1) 式中の $E(\epsilon_2)$ は圧縮の応力-ひずみ関係を表わす。コリンズ等⁴⁾のRC板せん断実験の結果をもとにひび割れコンクリートにおけるひび割れ直交方向の圧縮剛性と耐力の低減を図2の破線で示すように低減率 α と β で表わす。さらにひび割れ面のせん断ひずみがある限界値に達したとき、その要素は剛性を失ってそれ以上の応力を負担しないとした。この判定条件は以下の式によって表わされる。

$$\gamma_{\max} = \epsilon_1 - \epsilon_2 > C \epsilon_{cr} \quad (4)$$

C の値はコリンズ等の実験によれば、 $\gamma_{\max}/\epsilon_2$ が2～10では0.5～2である。本解析では $c=2$ とした。

また(1)式中の $G(\epsilon_2)$ はひび割れ面でのせん断剛性の低下を表わし、ここでは青柳の実験式を採用した。

$$G(\epsilon_2) = \frac{a}{\epsilon_2} \quad (5)$$

ここで a は定数である。本解析では $a=36$ とした。

3. 解析対象試験体

解析の対象とした試験体は、電力共研「原子炉建屋耐震余裕の評価法の研究」の一環として行なわれた実験の内³⁾ウェブ壁は加力方向に対して 45° 傾いているB-45試験体で形状を図-4に示す。試験体は下端が固定され、上端の加力スラブに2点で水平力を作用させている。試験体の諸元及び、材料の機械的性質を表-1に示す³⁾。試験体はせん断スパン比0.425で多数回の水平繰返し载荷を行っており、せん断すべり破壊をして終局にいたっている。

4. 実験と解析の比較

実験及び解析で得られた荷重変形曲線を図-5に示す。変形は加力スラブ中央の水平変位をボックス壁の内法高さ75cmでわった部材角で示している。全般的に、解析は実験と良い対応を示している。

表-2に、FEM解析・はり理論式および既応の算定式より得られた弾性剛性と諸強度を示す(B-45)。また実験より得られた結果を()内数値に示す。ひび割れ発生荷重については、解析値の方が実験値よりも低い、ひび割れ発生順序、圧縮側フランジ脚部の圧壊荷重、鉄筋降伏荷重及び耐力等は良い一致を示している。

図-6に実験で得られた最終破壊状況、図7と図8に解析で得られた、荷重100tと180tでのひび割れ状況を示す。解析、実験とも引張側脚部で曲げひび割れが一部発生するが、壁面全体にせん断ひび割れが発生し、フランジ壁とウェブ壁の区別は明確ではない。また実験では、せん断圧壊後のせん断すべりで最終破壊に至っているのに対し、解析も圧縮側脚部で圧壊し、せん断すべり破壊している。

5. 加力角度による考察

加力角度 45° の場合について、本解析手法と実験結果と良い対応を得ることがわかったので、加力角度が 0° 及び 30°

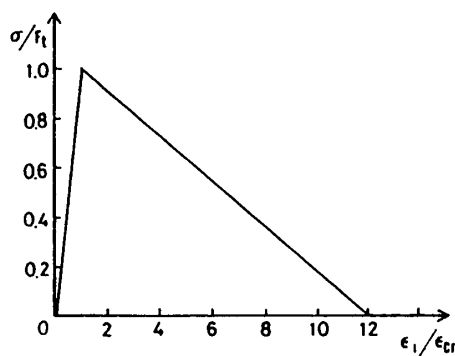


図3 テンションスチフニング特性

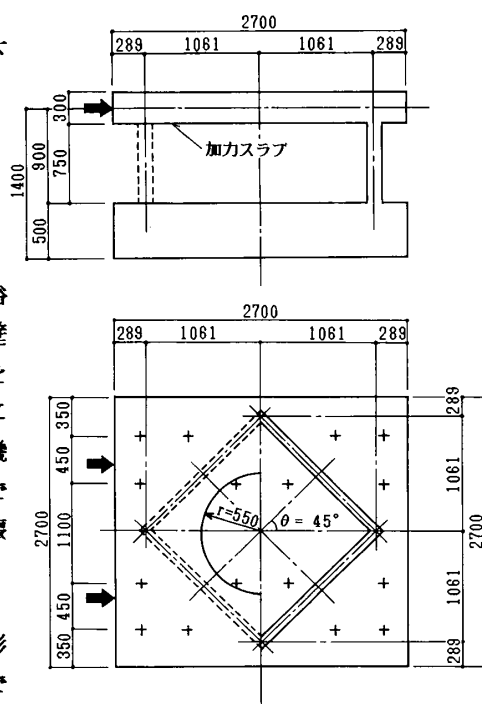


図4 試験体形状図(B-45)

表1 試験体諸元及び材料定数

項目	B-45
壁筋比 (%)	1.2
壁厚 (cm)	8.0
壁長 (cm)	150.0
加力点高さ (cm)	90.0
せん断スパン比 M/QD	0.425
圧縮強度 (kg/cm ²)	293 (305)
割裂強度 (kg/cm ²)	18.4 (20.0)
ヤング係数 (kg/cm ²)	2.67×10^5
鉄筋降伏強度 (kg/cm ²)	4540
鉄筋ヤング係数 (kg/cm ²)	1.95×10^6

注) B-00: M/QD=0.600, B-30: M/QD=0.439
() 内数値は解析に用いた値で、B-00 (入力角度 0°)、B-30 (入力角度 30°) の場合との平均値である。

についても、B-45と同一材料定数を用いて解析し、加力角度の違いによる変形状や諸強度等の相違について検討した。

解析による荷重-変形曲線を図-9に示す。いずれも加力角度の違いによる荷重-変形曲線に顕著な差は見られないが、終局耐力は加力角度が大きくなるにつれ、実験結果と同様に増大している。またB-00とB-30の終局時のひび割れ状況について、図10～図13に実験・解析両方で得られた結果を示す。B-00とB-30のひび割れ状況に相違が見られるのに対し、B-30と前掲B-45のひび割れ状況には大きな相違は見られない。

表-2に本解析により得られた諸強度とはり理論式や既往の強度算定式により得られた剛性や耐力等の算定値を示す(B-00, B-30)。

表-2の実験結果を見ると、実験では乾燥収縮やコンクリート強度のバラツキのためか、ひび割れ発生荷重は加力角度に関係なくほぼ等しい。本FEM解析では、曲げひび割れ発生荷重は実験と同様にほぼ等しいのに対し、せん断ひび割れ発生荷重は、加力角度が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。この傾向は

表2 初期剛性・諸強度の比較

手 法	項 目	B-45	B-00	B-30	
FEM 解析 (実験)	初期剛性(t/cm)	2640 (2860)	2720 (3280)	2610 (4800)	
	曲げひびわれ(t)	25.6 (35.8)	26.8 (35.7)	23.6 (34.5)	
	せん断ひびわれ(t)	45.0 (47.9)	29.0 (51.8)	38.4 (48.4)	
	フランジ縦筋降伏(t)	132.5 (136.8)	130.0 (138.9)	140.0 (146.5)	
	ウェブ横筋降伏(t)	185.0 (182.7)	177.5 (173.7)	157.5 (175.8)	
	コンクリート圧壊(t)	170.0 (165.0)	175.0 (178.1)	157.5 (161.2)	
	最大耐力(t)	200.0 (193.5)	185.0 (178.1)	190.0 (199.8)	
はり 理論式	初期剛性(t/cm) ^{*1}	2700	2700	2700	
	曲げひびわれ(t) ^{*2}	37.8	53.5	39.1	
	応力集中係数 ^{*3}	1.497	2.246	1.797	
既往の 算定式	せん断ひびわれ(t) ^{*4}	41.6	41.6	41.6	
	せん断 耐力(t)	全補強式	131.3	131.3	131.3
		広沢式	158.8	144.2	157.0
		吉崎式	158.8	155.1	157.9
	曲げ耐力(t) ^{*5}	267.0	227.7	256.1	

$$\#1 \quad 1/k = 1/k_s + 1/k_b$$

$$\#2 \quad M_{cr} = (1.2\sqrt{f_c}) \cdot Z_e$$

$$\#3 \quad \kappa = \tau_{max} / \tau \quad \tau = Q/A \quad A: \text{全断面積}$$

$$\#4 \quad Q_{cr} = \sqrt{f_c} \cdot A_w \quad A_w = A/2$$

$$\#5 \quad x_n = \frac{s+c}{s+c} \frac{4(D-t)P_s \sigma}{2P_s \sigma + f_c} + \frac{1+2c \cdot s}{2(s+c)} \cdot t$$

$$c = \cos \theta, s = \sin \theta$$

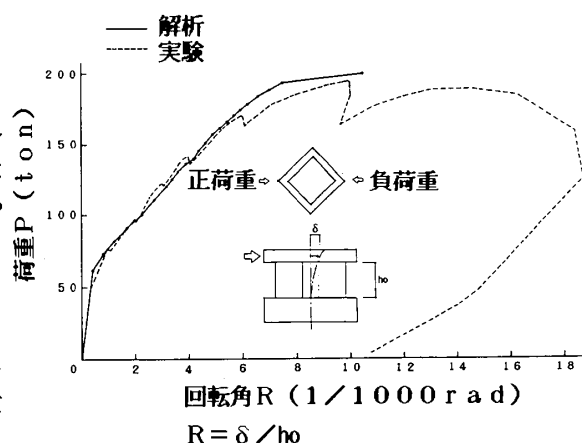


図5 荷重変形曲線の比較 (B-45)

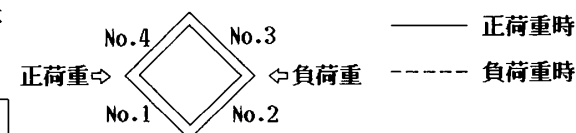
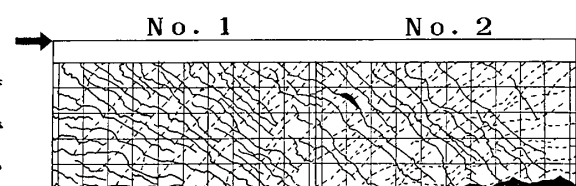


図6 B-45最終破壊状況 (実験)

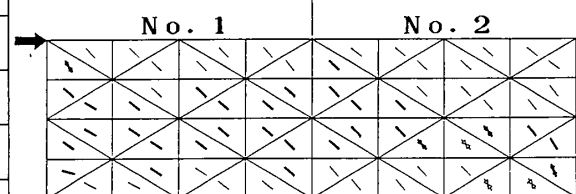


図7 B-45ひび割れ状況 (FEM解析) P=100 t

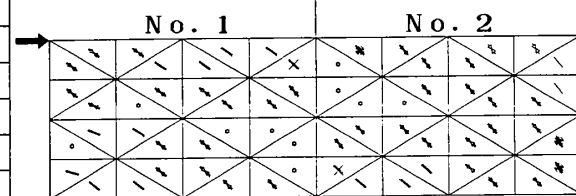


図8 B-45ひび割れ状況 (FEM解析) P=180 t

表3. 破壊状態を表す記号

記号	非線型状態	記号	非線型状態
	ひびわれ、コンクリート応力残留		圧縮一次降伏
	ひびわれ、コンクリート応力開放		圧縮完全降伏
	ひびわれ方向の圧縮一次降伏		圧壊
	ひびわれ方向の圧縮完全降伏		せん断破壊

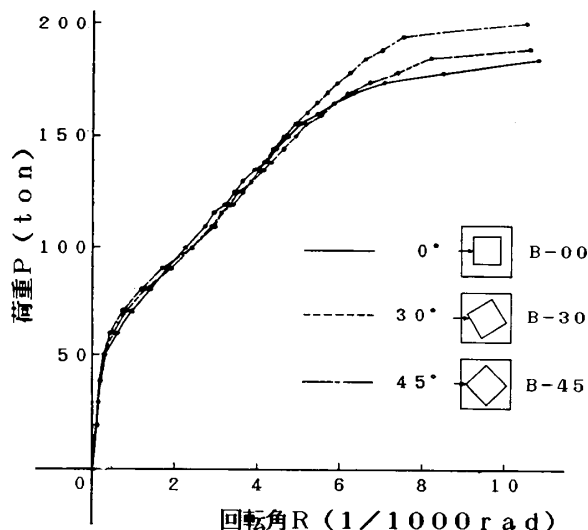


図9 FEM解析による荷重変形曲線の比較

はり理論式による推定とほぼ同じである。即ち、応力集中係数が大きいほど早くひび割れが発生する。

またせん断耐力も同様に、加力角度が大きくなるにつれて大きくなり、実験³⁾でもこの傾向があらわれている。既往の算定式によるせん断耐力推定値はいずれの式も過小評価の傾向があるのに対し、本解析結果は実験結果と良い一致を示している。これは既往の算定式に用いられているせん断有効断面積が安全側の評価となっているためと考えられる。

表中に既往の曲げ耐力算定式を示したが、加力角度が大きくなるにつれ曲げ耐力が顕著に高くなっている。FEM解析でも同様な傾向があるか今後解析的に検討してみたい。

6. まとめ

以上、FEM解析を通じて以下の知見を得た。

1) 本解析手法によって、斜め加力のボックス壁の弾塑性挙動及び耐力をシミュレーションすることができる。

2) せん断破壊型のボックス壁では加力角度の違いにより荷重変形曲線に顕著な差は見られないが、最大耐力は角度が大きくなるにつれ増大する傾向にある。なお曲げ耐力は、実験や既往の算定式によれば、加力角度が大きくなるにつれ大きくなるが、今後さらに本解析法でも確かめたい。

参考文献

- 1) 上田、瀬谷、毛井 R/C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R/C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, 1983.10
- 2) 梅村、青山、細川、密川 鉄筋コンクリート耐震壁の耐力と復元力特性に関する実験的研究(その3) 建築学会関東支部研, 1977
- 3) 宮内、他4名 二方向入力によるボックス壁の力学的性状に関する実験的研究 建築学会大会, 1985.10
- 4) M.P.Collins "Stress-Strain Characteristics of Reinforced Concrete in Pure Shear" IABSE, Delft, 1981

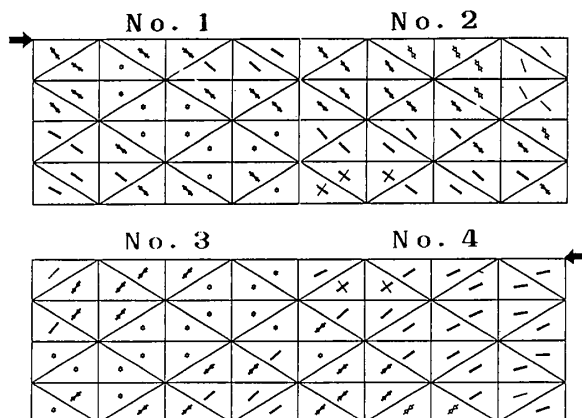


図10 B-30ひび割れ状況 (FEM解析) P=170t

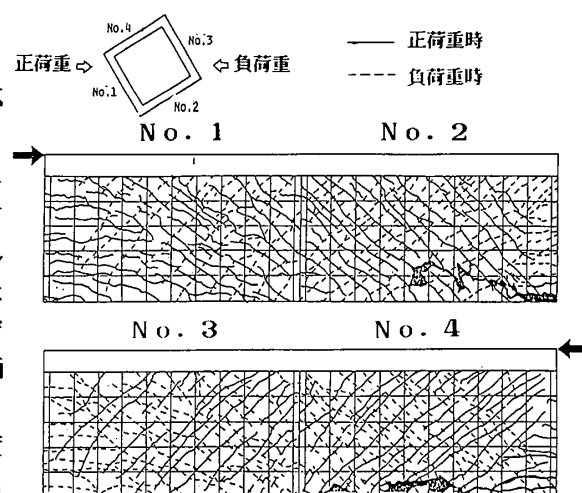


図11 B-30最終破壊状況 (実験)

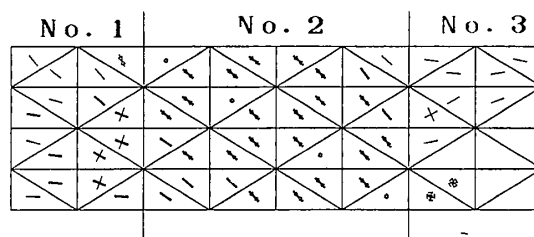


図12 B-00ひび割れ状況 (FEM解析) P=150t

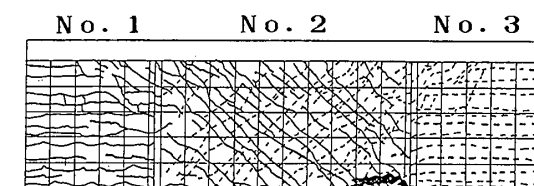
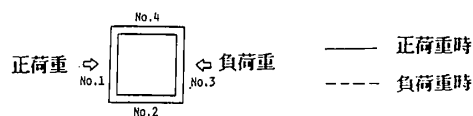


図13 B-00最終破壊状況 (実験)