

論文 斜め方向入力を受ける RC 造 BOX 壁の終局強度

白石一郎*1、北山裕人*2、高木仁之*3、狩野芳一*4

要旨：原子炉建屋を想定した RC 造 BOX 壁に関する研究の大半は、ウェブ壁平行方向加力を対象にしたもので、斜め方向入力を受ける BOX 壁の研究は数少なく、そのような場合の BOX 壁の終局強度は十分には解明されていない。

本報は、極限解析の上界定理やシェル構造 FEM 解析により、斜め方向入力を受ける BOX 壁の終局強度について検討したものである。

キーワード：斜め方向入力、RC 造 BOX 壁、終局強度、極限解析、FEM 解析

1. はじめに

原子炉建屋を想定した RC 造 BOX 壁の終局強度に関する研究は、実験的あるいは解析的に数多く行われてきたが、そのほとんどはウェブ壁と平行方向に加力したものであり [1]、斜め方向入力を対象としたものは数少ない。しかし、原子炉建屋の耐震安全性をより詳細に検討するためには、斜め方向入力の影響を考慮することが不可欠である。

斜め方向入力を受ける BOX 壁の研究としては、宮内らの実験的研究 [2] や、その実験を対象に FEM 解析を行った谷口らの研究 [3] があるものの、斜め方向入力下の BOX 壁のせん断抵抗機構や終局強度の評価法は十分には明らかとなっていない。本報では、斜め方向入力を受ける RC 造 BOX 型耐震壁の終局強度を、極限解析や FEM 解析により評価しようとするものである。

2. 極限解析による終局強度評価法

筆者らは、文献 [4] でウェブ壁平行方向に水平力を受ける RC 造 BOX 壁に対して、極限解析の上界定理により終局強度を評価したが、本報では、これを斜め方向入力を受ける場合に拡張して、BOX 壁の終局強度を評価する。ここで、耐震壁の壁厚は、壁長や壁高に比べて十分に小さいものとし、ウェブ壁とフランジ壁が等配筋の正方形 BOX 壁を対象とする。また、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係は完全剛塑性であり、コンクリートは図 1 の降伏曲面を有するものとする。

2. 1 曲げ強度

曲げ破壊時には、図 2 のような壁脚部の応力状態で、曲げ圧縮機構が形成されるものとする。すなわち、変形方向は拘束されるものとし、変形方向の曲げモーメント M_s と、変形方向を拘束することで生じる変形直交方向の曲げモーメント M_T により評価すると、曲げ強度は、下式のように得られる。

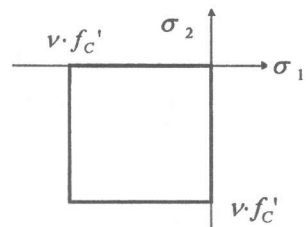


図 1 コンクリートの降伏曲面

- * 1 日本工業大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）
- * 2 日本工業大学大学院
- * 3 明治大学助手 理工学部建築学科、工修（正会員）
- * 4 明治大学教授 理工学部建築学科、工博（正会員）

1) $-\Phi \leq n < \frac{1+\tan\theta}{4} - \frac{\Phi(1-\tan\theta)}{2}$ のとき

$$M_s = (1+2\Phi) \frac{(1+2SC)x_{n1} - (S+C)x_{n1}^2}{2SC} \cdot 4D^2 t v f_c' \quad \text{--- (1)}$$

$$M_T = \frac{(1+2\Phi)(S-C)}{2S^2 C^2} \{-SC(C+S)x_{n1} + (1+SC)x_{n1}^2\} 4D^2 t v f_c' \quad \text{--- (2)}$$

$$x_{n1} = \frac{4(n+\Phi)}{1+2\Phi} \frac{SC}{S+C} \quad \text{--- (3)}$$

2) $\frac{1+\tan\theta}{4} - \frac{\Phi(1-\tan\theta)}{2} \leq n < \frac{3-\tan\theta}{4} + \frac{\Phi(1-\tan\theta)}{2}$ のとき

$$M_s = (1+2\Phi) \frac{C^2 - SC + 2(S+C)x_{n1} - 2x_{n1}^2}{2C} \cdot 4D^2 t v f_c' \quad \text{--- (4)}$$

$$M_T = (1+2\Phi) \frac{S\{SC + S^2 - 2(S+C)x_{n1} + 2x_{n1}^2\}}{2C^2} 4D^2 t v f_c' \quad \text{--- (5)}$$

$$x_{n1} = \frac{1}{2(1+2\Phi)} \{4nC - C + S + 2\Phi(S+C)\} \quad \text{--- (6)}$$

3) $\frac{3-\tan\theta}{4} + \frac{\Phi(1-\tan\theta)}{2} \leq n \leq 1+\Phi$ のとき

$$M_s = (1+2\Phi) \frac{(1+2SC)x_{n1} - (S+C)x_{n1}^2}{2SC} \cdot 4D^2 t v f_c' \quad \text{--- (7)}$$

$$M_T = \frac{(1+2\Phi)(S-C)}{2S^2 C^2} \{(1+2SC) - (S+C)(2+SC)x_{n1} + (1+SC)x_{n1}^2\} 4D^2 t v f_c' \quad \text{--- (8)}$$

$$x_{n1} = \frac{1}{(1+2\Phi)(S+C)} (4nSC - 2SC + 1 + 2\Phi) \quad \text{--- (9)}$$

ここで、 $S = \sin\theta$ 、 $C = \cos\theta$ であり、他の記号の説明は末尾に示す。

曲げ破壊時の変形方向と変形直交方向の無次元化強度 ${}_s q_f$ 、 ${}_T q_f$ は式(10)、(11)となる。また、加力方向の無次元化強度 q_f は、式(12)から得られる

$${}_s q_f = M_s / (4DtH \cdot v f_c') \quad , \quad {}_T q_f = M_T / (4DtH \cdot v f_c') \quad \text{--- (10), (11)}$$

$$q_f = \sqrt{{}_s q_f^2 + {}_T q_f^2} \quad \text{--- (12)}$$

ただし、式(1)~(9)は、変形方向とx軸とのなす角が 0° に近く、かつ、中立軸がフランジ壁内にある場合には不適切で、そのような場合には、文献[4]の評価式を用いる必要がある。しかし、本報では、終局強度への斜め入力の影響に着目しているため、便宜的に、 $\theta = 0^\circ$ の場合には $\theta = 0.01^\circ$ 程度の値を用い、また、 $x_n < D \sin\theta / 2$ の場合には、 $M_T = 0$ として、式(1)~(9)により計算した。このように計算しても、壁厚を考慮して詳細に曲げ強度を計算した結果と大きな差異はみられなかった。

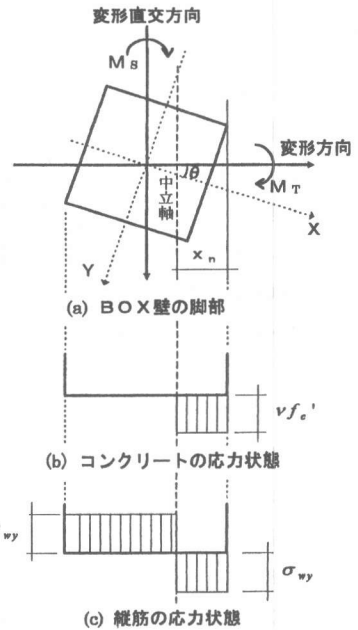


図2 曲げ破壊時の応力状態

2.2 せん断強度

せん断破壊時には、図3に示すような破壊機構が形成されているものとする。変形方向の変位速度を \dot{u} とし、加力方向と変形方向の角度差を ϕ とすると、変形方向における外力の仕事速度 \dot{w} は次式となる。なお記号の説明は末尾に示す。

$$\dot{W}e = Q_s \cdot \dot{u} \sin(\alpha + \beta) \cos \phi + N \cdot \dot{u} \cos(\alpha + \beta) \quad \text{---(13)}$$

一方、壁横筋、壁縦筋およびコンクリートによる、内部エネルギー散逸速度 $\dot{W}i$ は、

$$\dot{W}i = \left[\frac{P_{wh} \cdot \sigma_{wy} \cdot \sin(\alpha + \beta) \cos \phi}{2 \tan \beta} \mp P_{wy} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cos(\alpha + \beta) + \frac{v_f' \{1 + \sin \beta \cos(\alpha + \beta) - \cos \beta \sin(\alpha + \beta) \cos \phi\}}{2 \sin \beta} \right] \cdot 4Dt \cdot \dot{u} \quad \text{---(14)}$$

ただし、右辺第2項は、縦筋が引張降伏する場合は負で、圧縮降伏する場合は正とする。仮想仕事速度の原理により、無次元化せん断強度 q_s は、次式となる。

$$q_s = \frac{Q_s}{4Dt \cdot v_f'} = \frac{\Psi - 1}{2 \tan \beta} + \frac{1 - \sin \alpha}{2 \sin \beta \sin(\alpha + \beta) \cos \phi} + \frac{(1 - 2n \mp 2\Phi)}{2 \tan(\alpha + \beta) \cos \phi} \quad \text{---(15)}$$

ここで、 $\psi = P_{wh} \cdot \sigma_{wy} / v_f'$ 、 $\Phi = p_{wy} \cdot \sigma_{wy} / v_f'$ 、 $n = N / 4Dt \cdot v_f'$ で、右辺第3項は、縦筋が引張降伏する場合は $-\Phi$ で、圧縮降伏する場合は $+\Phi$ をとるものとする。式(15)中の α 、 β 、 ϕ を変数として最小値を求めると、無次元化せん断強度 q_s は次式となる。

1) $(1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi) > 1$ の場合

a) $-\Phi \leq n < \frac{1}{2} - \Phi$ のとき

$$q_s = \sqrt{\Psi(2 - \Psi)(n + \Phi)(1 - n - \Phi)} \quad \text{---(16)}$$

b) $\frac{1}{2} - \Phi \leq n < \frac{1}{2} + \Phi$ のとき

$$q_s = 0.5\sqrt{\Psi(2 - \Psi)} \quad \text{---(17)}$$

c) $\frac{1}{2} + \Phi \leq n \leq 1 + \Phi$ のとき

$$q_s = \sqrt{\Psi(2 - \Psi)(n - \Phi)(1 - n + \Phi)} \quad \text{---(18)}$$

2) $(1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi) \leq 1$ の場合

a) $-\Phi \leq n < \frac{1}{2} - \Phi - \frac{\sqrt{1 - (1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi)}}{2(1 - \Psi)}$ のとき

$$q_s = \sqrt{\Psi(2 - \Psi)(n + \Phi)(1 - n - \Phi)} \quad \text{---(19)}$$

b) $\frac{1}{2} - \Phi - \frac{\sqrt{1 - (1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi)}}{2(1 - \Psi)} \leq n < \frac{1}{2} - \Phi$ のとき

$$q_s = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4(n + \Phi)(1 - n - \Phi) + \lambda'^2} + (\Psi - 1)\lambda' \right) \quad \text{---(20)}$$

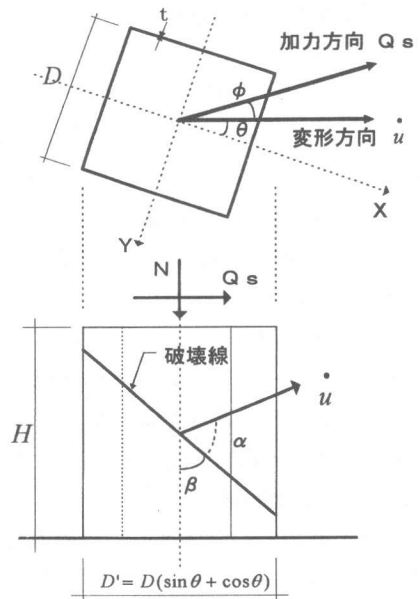


図3 せん断破壊時の許容速度場

$$c) \frac{1}{2} - \Phi \leq n < \frac{1}{2} + \Phi \quad \text{のとき}$$

$$q_s = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + \lambda'^2} + (\Psi - 1)\lambda') \quad \text{---(21)}$$

$$d) \frac{1}{2} + \Phi \leq n < -\frac{1}{2} + \Phi + \frac{\sqrt{1 - (1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi)}}{2(1 - \Psi)} \quad \text{のとき}$$

$$q_s = \frac{1}{2}(\sqrt{4(n - \Phi)(1 - n + \Phi) + \lambda'^2} + (\Psi - 1)\lambda') \quad \text{---(22)}$$

$$e) \frac{1}{2} + \Phi + \frac{\sqrt{1 - (1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi)}}{2(1 - \Psi)} \leq n \leq 1 + \Phi \quad \text{のとき}$$

$$q_s = \sqrt{\Psi(2 - \Psi)(n - \Phi)(1 - n + \Phi)} \quad \text{---(23)}$$

ここで、 $\lambda' = H/D'$ であり、図3の変形方向と直交する側面からみた形状比である。ところで、変形方向と加力方向のなす角度 ϕ は、 $\phi = 0$ のとき式(15)が最小となり、ウェブ壁とフランジ壁が等配筋のBOX壁のせん断破壊時には、加力と変形方向が一致するという結果となった。この結果は、極限解析によりRC柱の二軸強度を論じた津村らの結果[5]とも一致するものである。

2. 3 終局強度

BOX壁の終局強度は、上界定理によりせん断強度と曲げ強度の小さい値を採り下式となる。

$$q = \min(q_s, q_f) \quad \text{---(24)}$$

3. 終局強度に関する考察

3. 1 曲げ強度

文献[2]のBOX壁試験体を対象として、図4に軸力と曲げ強度(式(1)~(9))の相関関係を示し、図5、6に曲げ強度への斜め入力の影響を示す。図4、図5より、変形方向とx軸とのなす角 θ が、 0° と 45° の場合には、変形直交方向にせん断力は生じないが、 $0^\circ < \theta < 45^\circ$ の場合では、変形直交方向にせん断力が生じていることがわかる。このことは、曲げ破壊の場合には、加力方向と変形方向が異なることを意味している。しかし、変形直交方向のせん断力は、本計算例では最大でも変形方向の20%程度であり、図6の加力方向の強度(式(12))は、図5の変形方向の強度(式(10))とほとんど差がない。

また、斜め入力の影響についてみると、図6より、軸力の大きさにより異なり、式(4)~(5)の軸力範囲(図6(b))では、ウェブ壁平行加力に比べて斜め入力時の強度が減少し、それ以外の軸力範囲(図6(a), (c))では、逆に斜め入力時強度の方が増加している。

3. 2 せん断強度

BOX壁のせん断強度への斜め入力の影響は、形状比 $\lambda' (= H/D)$ と壁横筋補強量 Ψ による $(1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi)$ の値により異なる。すなわち、 λ' や Ψ の値が大きくと、 $(1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi) > 1.0$ となるような場合には、式(16)~(18)のように、せん断強度への斜め入力の影響はなく、加力方向が変化しても、加力方向のせん断強度は変化せず一定値となることになる。一方、 λ' や Ψ の値が小さくと、 $(1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi) \leq 1.0$ となるような場合には、式(20)~(22)のように、式中に形状比 λ' の項があり、せん断強度が加力方向により変化することになる。

既往のBOX壁試験体18体についてみると、1体を除いてすべて $(1 + \lambda'^2)\Psi(2 - \Psi) \leq 1.0$ で

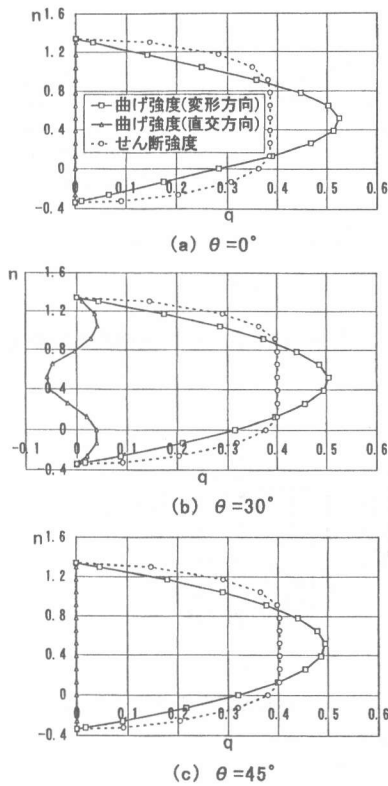


図4 軸力と終局強度の関係

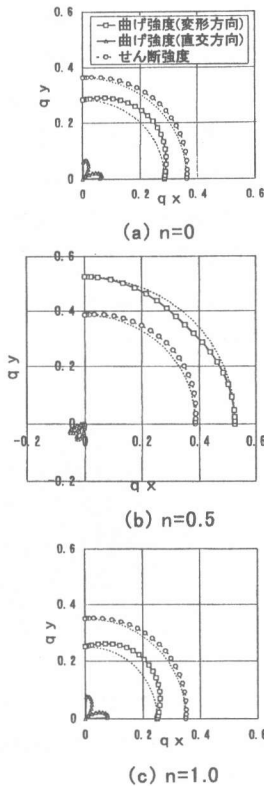


図5 斜め入力の影響 (変形方向)

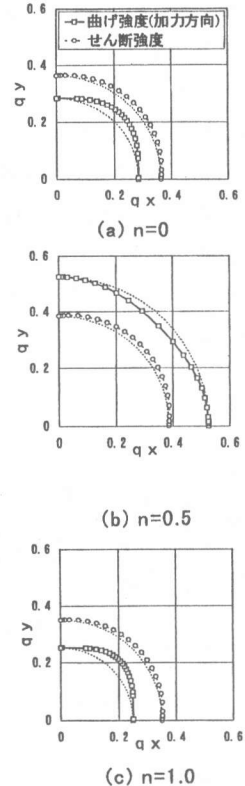


図6 斜め入力の影響 (加力方向)

あり[1]、原子炉建屋を想定したBOX壁では、加力方向によりせん断強度が異なることになる。図4、5、6には、せん断強度も示されているが、図5、6より、せん断強度は θ の増大とともにわずかに増加し、 45° 方向加力が最も大きな値となっている。

4. シェル構造FEM解析との比較

ここでは、FEM解析プログラム[6]を用いて、文献[2]のBOX壁試験体(図7)を解析し、3章の計算値との比較を行う。加力方向の異なる3体の試験体(試験体名の数値はウェブ壁と加力方向のなす角度 θ)の荷重-変位関係の比較を図8に示すが、両者はよく対応している。また、図9には終局強度への斜め入力の影響について、実験結果、FEM解析結果および極限解析の計算結果が示されている。図より、極限荷重(曲げ強度)は実験およびFEM解析の結果より高め

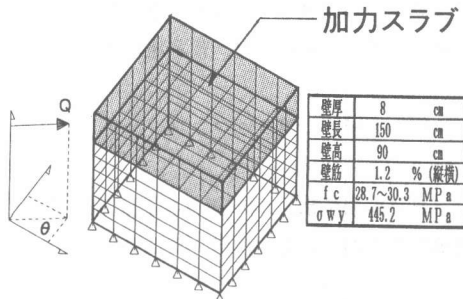


図7 解析モデル

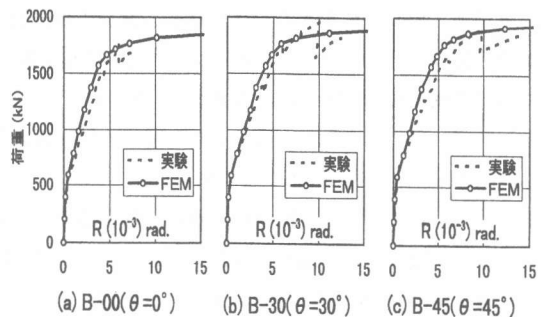


図8 解析結果

の値となっているが、同様の傾向になっている。これらの FEM 解析結果では、終局時に引張側縦筋が引張降伏しており、このことは極限解析で、曲げ強度がせん断強度より小さく、曲げ破壊型と判定されることとも対応している。図 10 には、極限解析の曲げ破壊時における加力方向と変形方向の関係と、30° 加力の場合の FEM 解析結果が示されている。図より極限解析では 30° の場合、破壊時の変形方向が加力方向よりも x 軸方向に近くなるが、FEM 解析においても同様の傾向になっている。

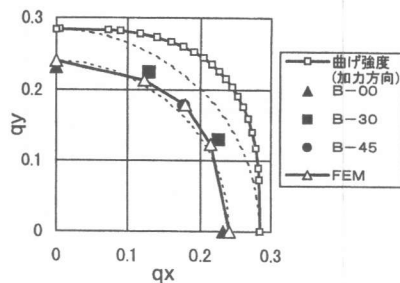


図 9 斜め入力の影響

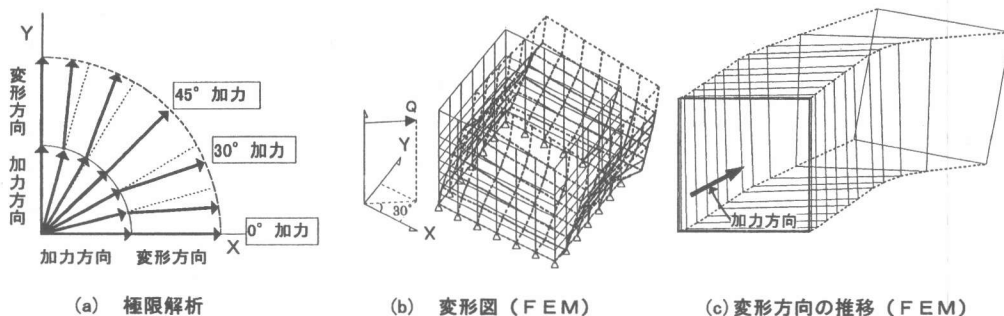


図 10 加力方向と変形方向の関係

5. まとめ

本報では、斜め方向入力を受ける RC 造 BOX 壁の終局強度を、極限解析の上界定理により評価したが、その計算結果は実験結果や FEM 解析結果よりやや高めの値になったが、同様の傾向であった。

記号の説明

D : 壁長、 D' : $D(\sin\theta + \cos\theta)$ 、 t : 壁厚、 H : 壁高、 N : 軸力、 λ : H/D 、 λ' : H/D'

p_{wh} : 横筋比、 p_{wy} : 縦筋比、 σ_{wy} : 壁筋の降伏応力度、 f_c' : コンクリートの圧縮強度

q_s : せん断破壊時の無次元化強度 ($q_s = Q_s / (4Dt \cdot v f_c')$)

q_f : 曲げ破壊時の無次元化強度 ($q_f = M / (4DtH \cdot v f_c')$)

α : 破壊線と変形方向のなす角度、 β : 破壊線と鉛直軸のなす角度、 θ : 変形方向と x 軸のなす角度、

ϕ : 変形方向と加力方向のなす角度、 v : コンクリートの有効係数 ($v = 3.68(f_c')^{-0.333}$ とした。)

$\psi = p_{wh} \cdot \sigma_{wy} / v f_c'$ 、 $\Phi = p_{wy} \cdot \sigma_{wy} / v f_c'$ 、 $n = N / 4Dt \cdot v f_c'$

参考文献

- [1] 稲田他：原子炉建屋箱型立体耐震壁の復元力特性に関する研究、清水建設研究報告、第 40, 41 号
- [2] 宮内他：二方向入力によるボックス壁の力学性状に関する実験的研究（その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和 60 年 10 月、pp. 829-930
- [3] 谷口他：斜め方向入力を受ける BOX 壁の力学性状に関する解析的研究、第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集 1986、pp. 685-688
- [4] 白石他：RC 立体耐震壁の終局強度、日本建築学会大会学術講演梗概集、1996 年 9 月、pp. 533-534
- [5] 津村他：軸力と 2 方向水平力を受ける RC 柱のせん断破壊局面に関する極限解析、日本建築学会構造系論文集 第 488 号、1996 年 10 月、pp. 127-136
- [6] 町田他：鉄筋コンクリートシェル構造物の非線形有限要素解析、熊谷技報第 34 号、pp. 115-123、1984. 2