

論文 RC柱の2方向せん断強度と立体破壊面

飯田まゆみ^{*1}・市之瀬敏勝^{*2}・坪井征司^{*3}

要旨：塑性解析の上界定理を用いて、荷重方向の違いが正方形断面を持つRC柱のせん断強度に及ぼす影響を実験により検討した。試験体は、補強筋量の違うものを2体ずつ2種類作成し、それぞれ0度、45度方向から荷重を行った。解析にはコンクリートの内部仕事をより小さくするような曲面型の立体破壊面の解析モデルを使用した。これにより正方形断面を持つRC柱は荷重方向に関わりなく立体的に破壊しており、せん断強度は荷重方向の影響をほとんど受けないことが確認された。

キーワード：立体破壊面、2方向せん断強度、内部仕事、上界定理

1. はじめに

文献 [1] より、RC梁のせん断破壊面は立体的に構成されることが確認されている。しかし荷重方向の違いによるせん断強度への影響は考慮されていない。そこで、本研究では補強筋量の違う正方形断面を持つRC柱（以下RC柱とする）を2体ずつ計4体作成し、荷重方向の違いによるせん断強度への影響を上界定理を用いて検討した。また荷重後試験体を切断し、ひび割れの様子からRC柱の内部の破壊状況を確認した。

2. 解析

2.1. 破壊次数と破壊面

文献 [1] と同様に、破壊面が横切るせん断補強筋の組数を破壊次数 n と定める。また破壊面は図1に示すように、補強筋を対角線で結ぶように形成されると仮定する。

2.2. 立体破壊面

従来の平面型の破壊面に比べて、コンクリートの内部仕事により小さくなるような破壊面を仮定し、そのモデルを使って解析を行う。ここでは0度荷重と45度荷重の2通りに分けて考える。まず0度には、図2のような曲面型の破壊モデルを使用する。ここで線分ABの中点を部材長手方向外側へ移動させた点をEとし、その移動量を g_0 とする（文献 [2]）。図3に45度の平面型の破壊モデルを示す。図3の△A'O'B'は図4の□AOBEに対応する。この点Eは線分A'B'の中点を部材長手方向外側へ g 、部材面に沿って部材幅方向へ e 移動させた点である。線分AEと線分OBを無数の直線で結んだものが図4の曲面型モデルとなる。

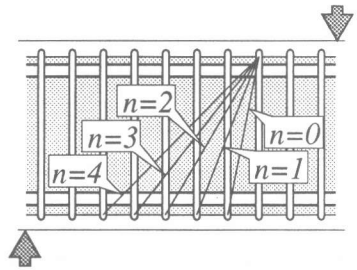


図1 破壊次数

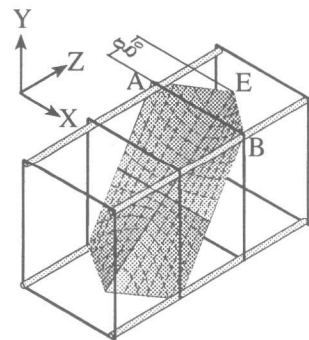


図2 0度-曲面型モデル

*1 名古屋工業大学大学院 工学部工学研究科社会開発工学専攻（正会員）

*2 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科，工博（正会員）

*3 名古屋工業大学 工学部社会開発工学科

2.3. 解析方法

解析方法は0度の場合は文献 [2] と同様であるが45度の場合は部材のなす仕事は以下ようになる。

図5にコンクリートの有効範囲を示す。図中の $j_e \times j_e$ の領域(せん断補強筋の内側)でのみコンクリートが有効であるとする。

まず部材のせん断強度は次式によって与えられる。

$$V = \frac{W_c + W_s}{|u|} \quad (1)$$

V : せん断強度, $|u|$: 破壊面の変位の絶対値

W_c : コンクリートの仕事, W_s : 補強筋の仕事
 W_s は次式によって与えられる。

$$W_s = n \cdot A_v \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_{we} \right) \cdot |u| \quad (2)$$

n : 破壊回数, A_v : 1組のせん断補強筋断面積
 σ_{we} : せん断補強筋に生じる応力度

次に W_c を求めるにあたっては図4のモデルを用いる。破壊面の $l/4$, つまり□AOBEについて考えると, 破壊面は次式で表される。

$$y = \frac{l \cdot e \cdot x - 2\sqrt{2}j_e(e - j_e)z - \sqrt{2}j_e^2 l}{2\sqrt{2}l \cdot g \cdot x - 2l(e - j_e)z - j_e l^2} z \quad (3)$$

l : 破壊面の幅

図6に破壊面の微小部分を示す。破壊面の法線ベクトルと変位のなす角 g 及び微小面積 dS は次のように与えられる。

$$\cos \gamma = \frac{n \cdot (0, 1, 0)}{|n|} \quad (4)$$

$$dS = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)^2} dx dz \quad (5)$$

n : 破壊面の法線ベクトル

コンクリートの内部仕事 W_c は次式によって得られる。

$$\frac{W_c}{4} = \sigma_c \iint_{AOBE} \frac{1 - \cos \gamma}{2} dS \quad (6)$$

σ_c : コンクリートの有効圧縮強度

ここで σ_c の定義は文献 [1] による。

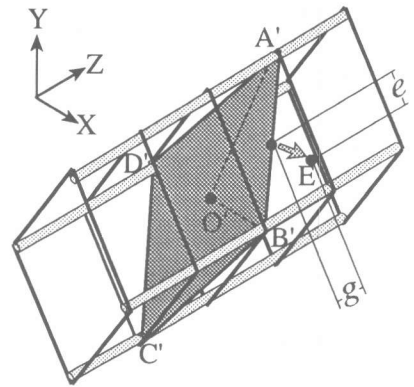


図3 45度-平面型モデル

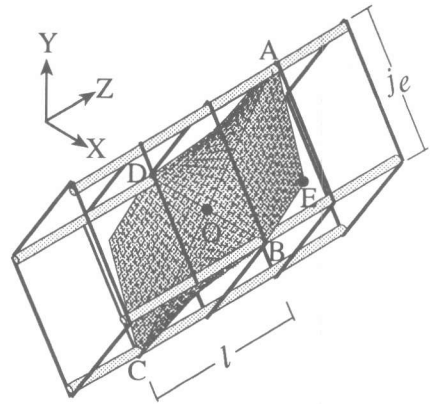


図4 45度-曲面型モデル

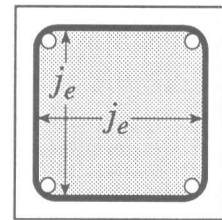


図5 コンクリートの有効範囲

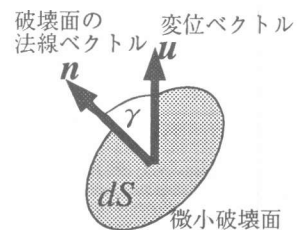


図6 微小部分

3. 実験

3.1. 使用材料の力学的性質

せん断補強筋は高強度の閉鎖型筋を使用した。補強筋径, 降伏強度を表1に示す。補強筋のヤング率は $2.09 \times 10^5 \text{MPa}$, 主筋の降伏強度はD22が 932MPa , D13が 1044MPa である。コンクリートの有効圧縮強度は 16.8MPa である。

3.2. 荷重方法

図7に荷重装置を示す。荷重方法は2台の油圧ジャッキと2つの反力点からなる逆対称曲げ方式とする。また, せん断変形を測定するために, 試験体に4本のアンカーボルトを埋め込み, そこへフレームを設置し2台の変位計を取り付けた。試験部分には, 打設の際にあらかじめ32本のピアノ線を 40mm 間隔で試験部分に通した。試験体を最大変形させたところでいったん荷重を中断し, エポキシ塗料をピアノ線によってあけられた直径 1mm の孔へ注入した。注入終了後20時間おいて試験体を除荷した。

3.3. 試験体

試験体は表1に示すように4体作成した。4体とも補強筋間隔は 40mm とし, 補強筋量及び荷重方向を変えた。せん断補強筋比 p_{we} は, 図6に示した有効範囲内($j_c \times j_c = 210 \times 210$)の補強筋比を示す。試験体の試験部分の断面図を図8に, 配筋図を図9に示す。補強筋はLシリーズにS6を, HシリーズにS8を用いた。45度シリーズはは0度シリーズを 45° 回転させただけのものである。

3.4. 切断の位置

荷重終了後, 試験体を長手方向に2カ所(45° は1カ所)幅方向に3カ所切断した。切断位置を図8, 図9に示す。切断により6つに分かれた試験部分のひび割れから, 試験体の内部の破壊状況を確認する。

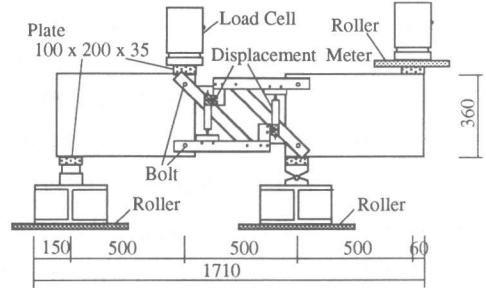


図7 荷重装置 (単位 mm)

表1 試験体一覧

試験体名	L-0	L-45	H-0	H-45
荷重角度	0°	45°	0°	45°
補強筋降伏強度	896 MPa (S6)		995 MPa (S8)	
補強筋の実際の径	6.35 mm (S6)		7.94 mm (S6)	
せん断補強筋比	$p_{we} = 0.75\%$		$p_{we} = 1.18\%$	
材齢 (日)	40	47	43	50

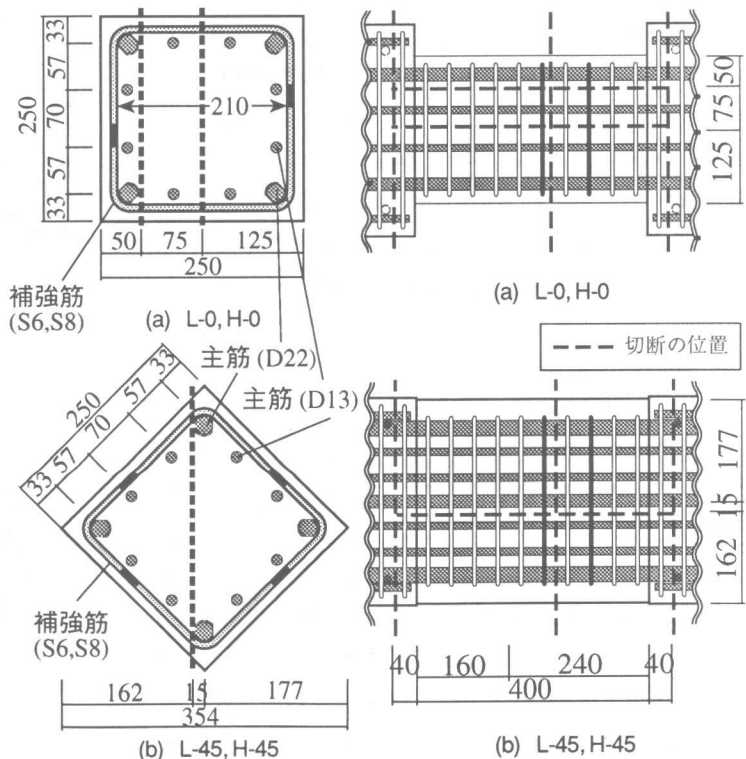


図8 断面図 (単位 mm)

図9 配筋図 (単位 mm)

3.5. ひずみゲージ

図9の配筋図で黒塗りで示した2本のせん断補強筋にひずみゲージを貼り付けた。ゲージを貼った位置を図8の黒塗り部分に示す。

3.6. 実験結果

図10にせん断力と変形の関係を示す。図でグラフが途中で切れているのは、エポキシ注入の時、荷重した状態にしておいた為、多少荷重が下がってしまったことによる。実線と破線の比較より、荷重方向の違いによるせん断強度への影響は見られない。図11に補強筋の歪みと変形の関係を示す。0度は補強筋の鉛直成分の歪みの平均、45度はすべての歪みの平均が示してある。表2に最大荷重時と、最大荷重の95%の荷重時における補強筋の応力度を示す。この応力度は図11から得られたものである。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1. せん断強度の比較

先に述べた解析方法により45度荷重におけるコンクリートの内部仕事の計算を行ったところ、どの破壊回数においても割れ込み長さ e, g が各々 $e=j/2, g=l/4$ となった。このことから図4に示した点Eの位置が図12のように補強筋の角と重なる。つまり破壊面の形は破壊回数にかかわらず、図12のようになることが確認できる。図13にせん断力と補強筋量の関係を示す。ここで、式(2)において、せん断補強筋の内部仕事 W_s を求める際に、 σ_{we} にせん断補強筋の降伏強度 σ_{wy} を使用したものを理論値とする。また、表2に示した各試験体に最大荷重の95%の大きさの荷重が与えられた場合の補強筋の応力度を σ_{we} として計算したものを準理論値とする(文献[1])。 n は破壊回数であり、図中の太実線は解析結果である。また、Test100とは理論解法による $p_{we}\sigma_{we}/\sigma_e$ とせん断強度の実験値との関係をプロットしたものである。また、Test95とは準理論解法による $p_{we}\sigma_{we}/\sigma_e$ とせん断強度の実験値95%の値との関係をプロットしたものである。0度荷重の場合は準理論解法による解析値と実験値がかなりよく対応している。しかし、45度荷重の場合は解析値が実験値を下回っており、特にH-45は、かなり実験値が高い値を示している。これは p_{we} はH-45のほうが大き

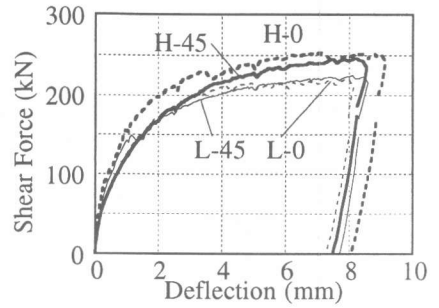


図10 せん断力-変形曲線

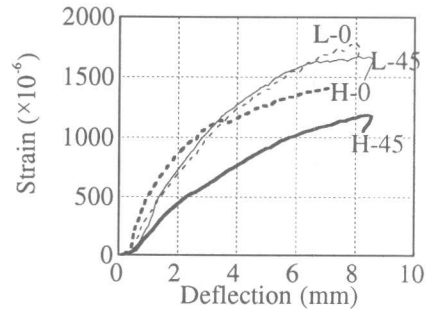


図11 補強筋の歪み-変形曲線

表2 補強筋の応力度

試験体名	補強筋の応力度 (MPa)	
	最大荷重時	95%荷重時
L-0	373	256
H-0	295	266
L-45	350	313
H-45	246	202

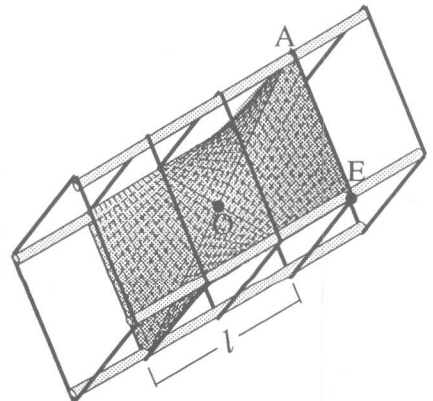


図12 45度-曲面型モデル(解析)

いが、 σ_{we} はL-45のほうが大きいために、最終的に補強筋量 $p_{we}\sigma_{we}$ がLとHで差がなくなってしまうことによる。45度载荷については補強筋の仕事の求め方に再考の余地があると思われる。

4.2. 破壊面の比較

図14にL-0の解析による破壊面を、図15に実際に実験から得られたひび割れ図を示す。図14で実線は準理論解法によって得られた破壊面、破線は理論解法によって得られた破壊面である。実線の方は95%荷重時におけるものであり、破線の方は100%荷重時におけるひびわれである。つまり試験体のひび割れの傾きは実線から破線へと移行していくはずである。幅方向のひび割れ図から、曲面型の破壊面の特徴であるU字のひび割れが確認できる。また、中央部と最外主筋部は必ずしも解析結果と一致しているとはいえないが、互いにひび割れの状況が違うことから、破壊面が立体的に、しかも曲面的に構成されていることが確認できる。同様に図16にH-45の解析による破壊面を、図17に実験から得られたひび割れ図を示す。図16の破壊面と図17のひび割れ図の比較より、幅方向断面を見ると、中心から上下へふくらむようにひび割れが生じている。また、中央部に関しては実線と同様の傾きのひび割れはみられるものの、破線と同様の傾きのひび割れはみることができない。ただひび割れの傾きが変わってきている傾向は捕えることができる。これらのことから仮定した45度-曲面型の破壊面を形成していることが確認される。

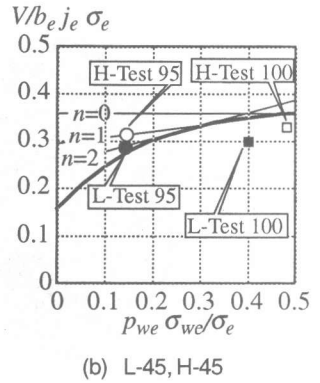
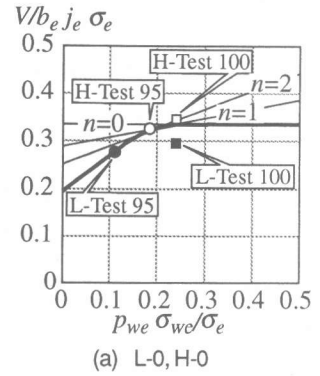


図13 各破壊次数におけるせん断力と補強筋量

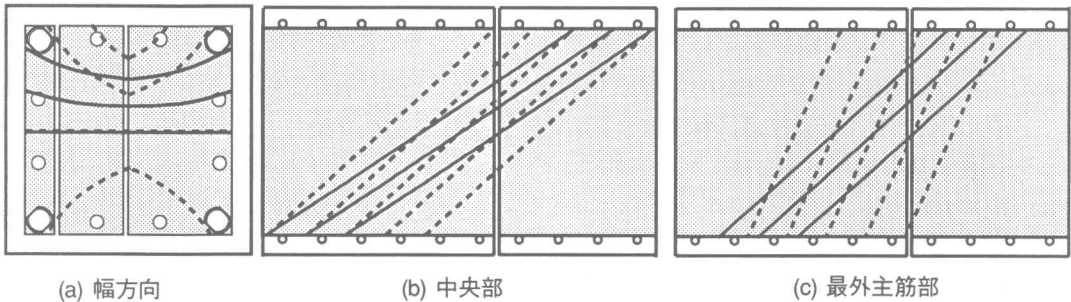


図14 解析による破壊面 (L-0)

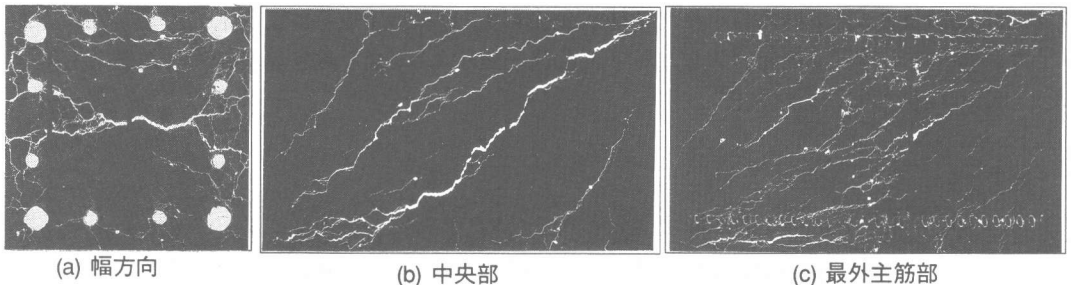
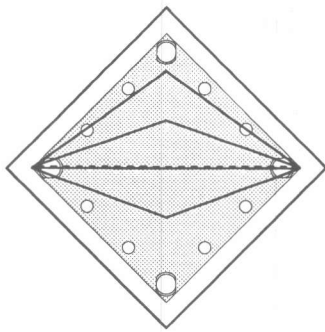
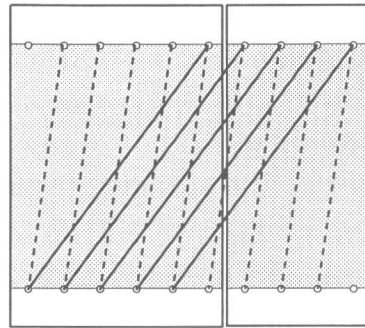


図15 実験によるひび割れ図 (L-0)

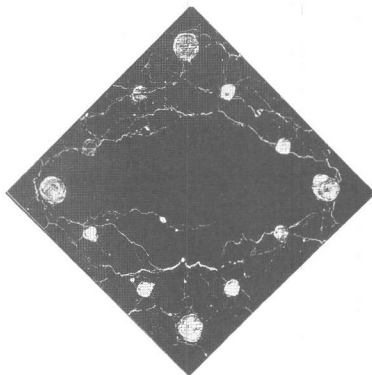


(a) 幅方向

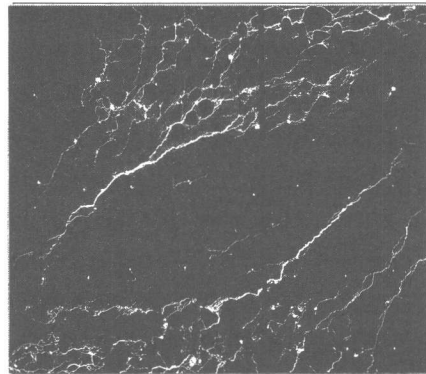


(b) 中央部

図16 解析による破壊面 (H-45)



(a) 幅方向



(b) 中央部

図17 実験によるひび割れ図 (H-45)

5. 結論

軸力の無い正方形断面をもつRC柱について以下のような結論が得られた。

- (1) 荷重方向の違いによるせん断強度への影響はほとんど見られなかった。
- (2) 0度荷重のせん断強度は、解析値と実験値がよく対応している。
- (3) 45度荷重の解析方法には、補強筋の仕様の求め方に関して多少再考の余地がある。
- (4) 荷重方向の違いに関わらず、RC柱のせん断破壊面は立体的に構成される。

謝辞

本研究の一部は、昨年に引き続き文部省科学研究費総合研究A(代表者:野口博・千葉大教授)の補助を受けました。主筋は高周波熱錬株式会社より、せん断補強筋は住友電気工業株式会社より、コンクリートは東海菱光コンクリート工業株式会社より、また試験体型枠は矢作建設工業株式会社より提供していただきました。

[参考文献]

- [1] 半谷公司, 市之瀬敏勝: 立体破壊面を考慮したRC梁のせん断強度, コンクリート工学年次論文報告集, pp. 455-461, Vol.15, No.2, 1993 [2] 森田宗男, 市之瀬敏勝: 立体破壊面を考慮したRC梁のせん断強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集C, pp. 894-895, 1994