

論文

[2194] 面内せん断力を受ける軽量コンクリート1種を用いた鉄筋コンクリート造壁板の力学的特性に関する研究

古谷 章\*4・小野 新\*1・安達 洋\*2・清水 泰\*3

1. はじめに

耐震要素の1つであるRC造壁板が、面内せん断力を受けた時の力学的特性を把握するために、以前から多くの実験的、解析的研究が行われてきた。しかしながら、軽量コンクリート1種を用いたRC造壁板に関する研究は、ほとんど見られないのが現状である。

本論文では、軽量コンクリート1種を用いたRC造壁板のひび割れ発生後に形成されるコンクリートストラットの平均圧縮応力-平均圧縮ひずみ関係及び強度低減係数等について、普通コンクリートを用いたRC造壁板と比較検討することによりそれらの特性を明瞭にした。

さらにコンクリートの強度低減は、鉄筋とコンクリート間の付着作用により生じるコンクリートの引張応力と平均主圧縮応力の最大値の組み合わせによる2軸効果で起こると仮定し圧縮劣化特性の解明を試みた。

2. 実験概要

2.1. 試験体

試験体は、岩下ら[1]及び白井ら[2]の研究を参考に製作した。図1に、試験体詳細を示す。試験壁板領域は、600×600×100mmの寸法で鉄筋は直交2方向の等量配筋である。また、試験壁板領域の外周4方向にスリット入りのスタブを有する。表1に試験体諸元を示す。変動因子は、①コンクリート種別(LPシリーズ: 軽量コンクリート、NPシリーズ: 普通コンクリート)、②配筋方法(斜め45°配筋シリーズ、縦横配筋シリーズ)、③鉄筋比シリーズ(Pt=0.2~1.33%)である。

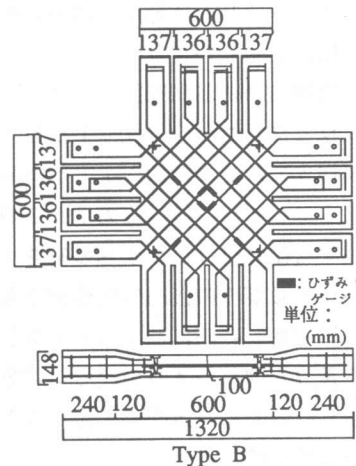


図1 試験体詳細

表2 鉄筋の材料特性

呼び名	D6(SD294)
降伏点強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	4417
降伏点時歪 (%)	0.43
最大応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	6115
ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	2.10×10 <sup>6</sup>

表3 コンクリートの材料特性

種別	軽量	普通
比重 (kg/cm <sup>3</sup> )	1.81×10 <sup>-3</sup>	2.22×10 <sup>-3</sup>
圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	359	357
ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.71×10 <sup>5</sup>	2.55×10 <sup>5</sup>
最大応力時歪 (%)	0.32	0.27
割裂引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	24.0	27.8
ポアソン比	0.25	0.16
材令 (日)	33~46	33~46
最大骨材寸法 (mm)	10.0	13.0

表1 試験体諸元

試験体名	軽量 fc=360					
	LP360-A	LP360-B	LP360-C	LP360-D	LP360-E	LP360-F
配筋角度	シングル 45°	シングル 45°	シングル 0°	ダブル 45°	ダブル 0°	ダブル 45°
鉄筋比 pw(%)	0.20	0.41	0.41	0.82	0.82	1.33
作用引張力 T(tf)	3.84	7.88	7.88	15.75	15.75	25.54
試験体名	普通 fc=360					
	NP360-A	NP360-B	NP360-C	NP360-D	NP360-E	NP360-F
配筋角度	シングル 45°	シングル 45°	シングル 0°	ダブル 45°	ダブル 0°	ダブル 45°
鉄筋比 pw(%)	0.20	0.41	0.41	0.82	0.82	1.33
作用引張力 T(tf)	3.84	7.88	7.88	15.75	15.75	25.54

\*1 日本大学講師 建築学科、(正会員)  
 \*2 日本大学教授 海洋建築工学科、工博(正会員)  
 \*3 東京工業大学附属高校、工博(正会員)  
 \*4 (株)大林組設計部、工修(正会員)

## 2.2. 使用材料

表2に鉄筋の材料特性を示す。表3にはコンクリートの材料特性を示す。

図2にシリンダーの応力-ひずみ関係（実験は簡易高剛性装置を使用[2]）を示す。ここでは、シリンダー実験の結果に基づいてStevensモデル[3]の修正（表4参照）を行い、壁板の実験結果との比較に用いた。

## 2.3. 加力方法及び測定方法

図3に加力装置を示す。加力方法は図4に示すような引張・圧縮の2軸載荷である。まず、引張力と圧縮力を鉄筋の降伏点強度の80%まで同時に漸増載荷（純せん断状態）し、その後、引張力を保持した状態で圧縮力のみを作用させて破壊に至らしめる。

圧縮スタブと加圧板の間に、テフロンシート2枚とクロロピレンゴム1枚をサンドイッチ状に挿入した。また、引張力が均等に配分されるように、すべての引張り用P C鋼棒にひずみゲージを貼り付け、ひずみの値をチェックし、さらにP C鋼棒の接続には球面座金を使用した。

測定は、鉄筋にひずみゲージを貼付した（図1参照）他、パネルの変形状態を評価するため縦・横・斜めの4方向に、図5のような測定装置を両面に取付た。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1. 破壊状況及び実験結果

破壊の進行状況は全試験体ともほぼ類似しており、まず引張スタブと試験体領域の境界付近でひび割れが発生した。続いて上下のスリットにひび割れが発生した。それが徐々に拡大しひび割れが進展し、最終的にはコンクリートの圧壊により破壊に至った。

LP及びNPシリーズの斜め45°配筋では、鉄筋比が大きいタイプほどひび割れ本数が多くなったが、LP及びNPシリーズの縦横配筋では鉄筋比が変動したタイプ同士を比較しても、ひび割れの本数に顕著な差異はなかった。また、同鉄筋比の斜め45°配筋の試験体の方が縦横配

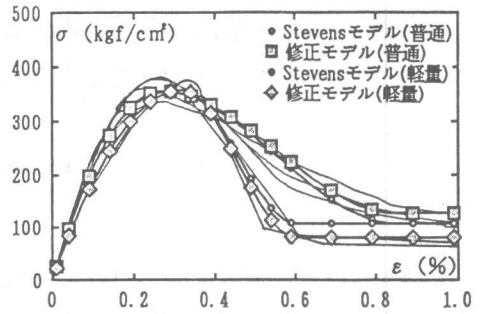


図2 シリンダーの応力-ひずみ関係

表4 Stevensモデルの修正

○ Stevensのモデル	
上昇域:	$f_{c2} = \frac{K \cdot f_c}{\beta} \left\{ 2 \times \left( \frac{\epsilon_{c2}}{K \cdot \epsilon_{c0}} \right) - \left( \frac{\epsilon_{c2}}{K \cdot \epsilon_{c0}} \right)^2 \right\}$
下降域:	$f_{c2} = \frac{K \cdot f_c}{\beta} \times (0.175 X^2 - 0.525 X^2 + 1.0)$
収斂点:	$f_{c2} = 0.3 \times K \times f_c / \beta$
◆ 修正モデル (軽量)	
下降域:	$f_{c2} = \frac{K \cdot f_c}{\beta} \times (0.194 X^2 - 0.582 X^2 + 1.0)$
収斂点:	$f_{c2} = 80.4$
■ 修正モデル (普通)	
下降域:	$f_{c2} = \frac{K \cdot f_c}{\beta} \times (0.161 X^2 - 0.483 X^2 + 1.0)$
収斂点:	$f_{c2} = 127$
注)	$X = 2 (\epsilon_{c2} / K \cdot \epsilon_{c0} - 1.0) / 2.5 \times \epsilon_{c0} - 1.0$
	$K = \text{拘束係数} \quad \beta = \text{強度低減係数}$

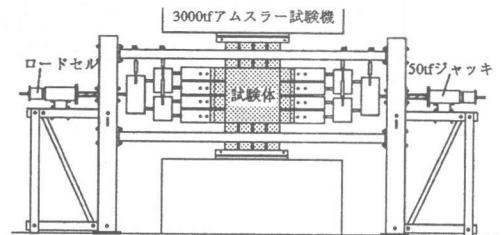


図3 加力装置

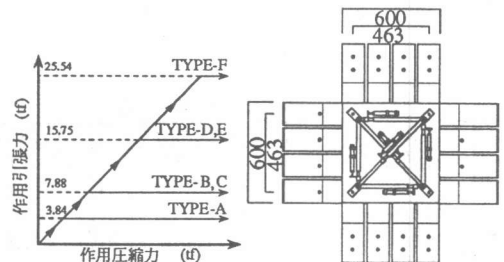


図4 加力方法

図5 測定装置

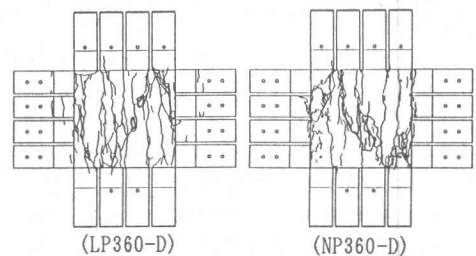


図6 最終破壊状況

筋試験体よりひび割れが多く発生していた。

図6にLP360-DとNP360-D(②配筋方法(斜め45°)③鉄筋比( $P_t=0.82\%$ ))の最終破壊状況を示す。ひび割れ本数に、大差は見られないものの、LPシリーズの破壊面では骨材の破壊が見られた。また破壊の過程では所定の作用引張力を導入するまでにLPシリーズでは、多くのひび割れが発生した。

実験結果の一覧を表5に示す。ここで、強度低減係数は、ひび割れたコンクリートの最大主圧縮応力を円柱供試体の圧縮強度で割った値と定義する。LPシリーズの強度低減係数は、0.50~0.94で、NPシリーズの強度低減係数は、0.66~0.91の範囲となった。LP及びNPシリーズの $\lambda$  A, B, D, F(②配筋方法(斜め45°)③鉄筋比( $P_t=0.2\sim 1.33\%$ ))を比較すると、鉄筋比が大きい試験体ほど平均主引張ひずみが大きくなり、強度低減の度合いも大きくなる傾向がある。

次に、軽量と普通コンクリートの斜め45°シリーズの同 $\lambda$ 同士をそれぞれ比較すると、鉄筋比の大小に関わらずLPシリーズが強度低減係数比(軽量/普通)で、0.8前後と極めて小さい値となる。LP及びNPシリーズの $\lambda$  C, E(②配筋方法(縦横)③鉄筋比( $P_t=0.41, 0.82\%$ ))を比較すると、鉄筋比の大小に関わらず、強度低減係数は0.9前後の大きい値を示す。また、軽量と普通コンクリートの縦横配筋シリーズの同 $\lambda$ 同士をそれぞれ比較すると強度低減係数比は、ほぼ同じ値を示す。

さらに縦横配筋シリーズは斜め45°配筋シリーズと比較すると平均主引張ひずみの値が小さい。強度低減係数-平均主引張ひずみ関係を図7に示す。両シリーズともCollinsの提案式[4]と同様に平均主引張ひずみが増大すると強度低減が大きくなる傾向がある。

### 3.2. Collinsの圧縮場理論による検討

応力とひずみの評価をCollinsの圧縮場理論[4]により行った。ここで用いた仮定は、1)応力の釣合条件、2)ひずみの適合条件、3)領域内は一様応力場・一様ひずみ場とする。4)主ひずみ面と主応力面の傾きが等しいとするものである。

図8に、LP及びNPシリーズのコンクリートの平均主圧縮応力( $\sigma_d$ )-平均主圧縮ひずみ( $\varepsilon_d$ )関係を示す。ひび割れたコンクリートの上昇域の剛性は、LPシリーズは、シリンダーの一軸圧縮試験の上昇域の剛性と類似の傾向を示すが、NPシリーズはシリンダー

表5 実験結果一覧

試験体名	作用最大 圧縮応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	コンクリートの最大耐力			コンクリート強度 低減係数	係数比 軽量 普通
		主圧縮応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	主圧縮歪 $\varepsilon_a$ (%)	主引張歪 $\varepsilon_{a1}$ (%)		
LP360-A	278	279	0.263	0.461	0.78	0.86
LP360-B	202	218	0.471	0.835	0.61	0.74
LP360-C	326	308	0.304	0.190	0.86	0.97
LP360-D	228	253	0.318	0.602	0.70	0.92
LP360-E	373	336	0.262	0.285	0.94	1.03
LP360-F	124	180	0.211	0.788	0.50	0.76
NP360-A	335	333	0.142	0.046	0.91	----
NP360-B	290	299	0.165	0.370	0.82	----
NP360-C	340	324	0.190	0.093	0.89	----
NP360-D	245	270	0.152	0.440	0.76	----
NP360-E	369	333	0.207	0.185	0.91	----
NP360-F	192	239	0.161	0.735	0.66	----

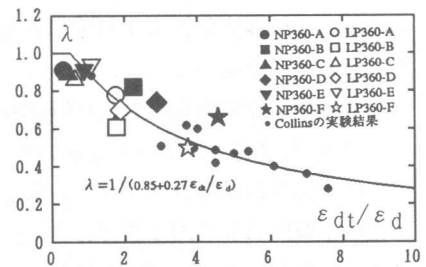


図7 強度低減係数-平均主引張ひずみ関係

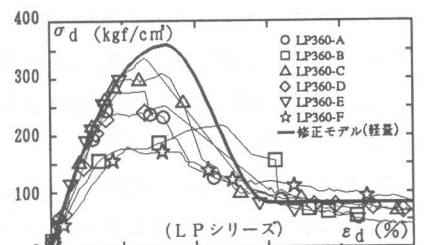


図8-A コンクリートの $\sigma_d$ - $\varepsilon_d$ 関係

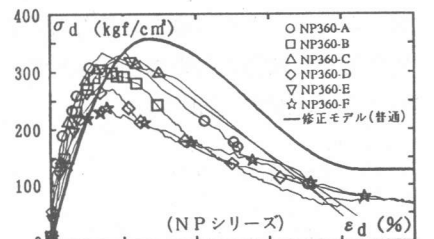


図8-B コンクリートの $\sigma_d$ - $\varepsilon_d$ 関係

の一軸圧縮試験の上昇域の剛性より多少大きくなる傾向が見られた。また、LPシリーズのひずみ軟化収斂点は、シリンダーのひずみ軟化収斂点の応力より若干低い値に収斂する。NPシリーズの場合は、シリンダーの一軸圧縮強度の応力より低い値を示し、ほぼ一定の値に全タイプとも収束する。しかし、ひずみ軟化の挙動に関しては、両シリーズとも試験体のタイプによるバラツキが大きい。

図9に、LP及びNPシリーズのコンクリートの平均主引張応力( $\sigma_{dt}$ )—平均主引張ひずみ( $\epsilon_{dt}$ )関係を示す。全体的な挙動は、LP及びNPシリーズとも同様で、斜め45°配筋シリーズは、ほぼ同様の緩やかな傾斜を示し、鉄筋比が大きい方がひび割れ発生強度が大きい。しかし、縦横配筋シリーズの挙動は斜め45°配筋試験体より急勾配の傾向を示す。

以上、( $\sigma_d$ )—( $\epsilon_d$ )関係および( $\sigma_{dt}$ )—( $\epsilon_{dt}$ )関係の結果から、強度低減は主引張応力と親密な関係があることが明らかとなった。

### 3.3. 圧縮劣化特性の検討(付着理論の適用)

既発表論文[5]では、Kupfer等のコンクリートの降伏曲面に、最大主圧縮応力と最大主引張応力の値の組み合わせをプロットし示したが、Collinsの圧縮場理論より求まる主引張応力は、試験壁領域内の平均的な値であり、さらにひび割れ間隔、ひび割れ幅等の影響によりかなりバラツキが大きい。そこで本論文では、ひび割れたコンクリートは、ひび割れ発生後もひび割れ間のコンクリートとそれを貫通する鉄筋間の付着作用によって、コンクリートに引張応力が生じることに着目し、コンクリートの引張応力と平均主圧縮応力のそれぞれの最大値の組み合わせによる2軸効果により強度低減が起こると仮定し、圧縮劣化特性のメカニズムの解明を試みる。

ここでは、白井等の付着理論による解析式[6]を適用し、ひび割れ間のコンクリートの最大引張応力の定量的把握を行った。

図12に示すように、任意の方向に鉄筋補強したコンクリート壁板のひび割れが発生した引張材に付着理論を適用するため、ひび割れ間の鉄筋コンクリートを鉄筋方向の鉄筋コンクリート引張材からなる集合体とする。その1要素について考えると図13に示すような応力分布であると仮定できる。ひび割れ点に作用する鉄筋の引張力を $P^{s_{x0}}$ とするとコンクリートの引張応力 $\sigma_x^c$ は、次式[6]より与えられる。

$$\begin{aligned} & \cdot 0 \leq X \leq Ld \text{ の時} & \cdot Ld < X \text{ の時} \\ \sigma_x^c &= \frac{P_x^c}{A^c} = \frac{p \cdot E^s \cdot \gamma}{1+n \cdot p} \cdot X & \sigma_x^c &= \frac{P_{x0}^s}{(1+n \cdot p)A^c} \end{aligned} \quad (1.a) \quad (1.b)$$

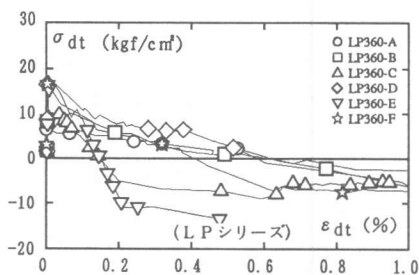


図9-A コンクリートの $\sigma_{dt}$ — $\epsilon_{dt}$ 関係

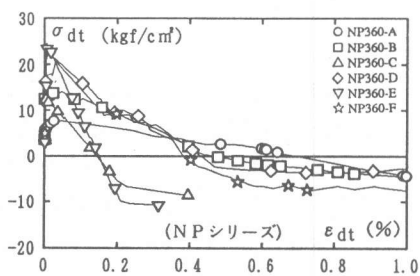


図9-B コンクリートの $\sigma_{dt}$ — $\epsilon_{dt}$ 関係

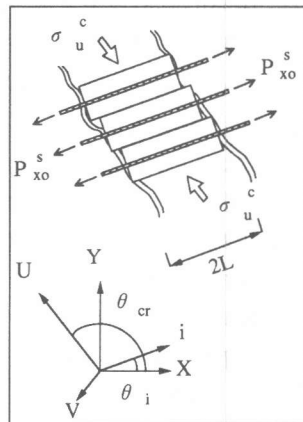


図10 ひび割れのモデル化[6]

ただし  $\gamma = (1+n \cdot p) \cdot \phi \cdot \tau_y / E^s \cdot A^s$ ,  $\tau_y = (e/2(e-1)) \cdot \tau_{max}$

$Ld = P_{x_0}^s / E^s \cdot A^s \cdot \gamma$ ,  $x = e_{av} / 2$ ,  $n = E^s / E^c$ ,  $p = A^s / A^c$

$$P_{x_0}^s = E^s A^s \sqrt{\frac{2(1+np)\gamma \varepsilon_{av}^s \lambda}{1+2np}}$$

ここで、 $A^s$  及び  $A^c$  は鉄筋及びコンクリートの断面積、 $E^s$  及び  $E^c$  は鉄筋及びコンクリートのヤング係数、 $\phi$  は鉄筋の周長、 $P_{x_0}^s$  はひび割れ点の鉄筋に作用する引張力、 $Ld$  は定着長さ、 $\tau_y$  は剛塑性と仮定した場合の降伏付着応力度を表す。 $\tau_{max}$  については、以下に示す算定方法[6]に従った。コンクリートの平均側圧応力度  $\sigma_N^c = 0$  時の最大付着応力度  $\tau_{max}$  に側圧を考慮した最大付着応力度  $\tau_{max}^b$  および側圧を考慮した割裂ひび割れ発生時の割裂付着応力度  $\tau_{max}^s$  の算定を行い、両者のうち小さい値を  $\tau_{max}$  とした。

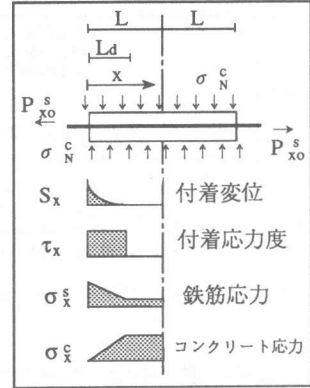


図1 両引張材の応力分布[6]

$$\tau_{max}^b = \tau_{max} \{1 + 2(\sigma_{ra}^c / f_c)^2\} + 0.05 \cdot \sigma_{ra}^c \quad (2.a)$$

$$\tau_{max}^s = 2.89 \cdot f_t + \frac{\lambda \cdot f_t}{\tan \theta'} (R-1) \left[ 1 + \left\{ \frac{A}{2R} - \frac{B(R^2+R+1)}{2R^2} \right\} \frac{\sigma_N^c}{\lambda \cdot f_t} \right] \quad (2.b)$$

$$\text{ただし } A = \frac{(1-2\nu_s) \cdot G_c - (1-2\nu_c) \cdot G_s}{(1-2\nu_s) \cdot G_c + G_s} \quad B = \frac{G_c - G_s}{G_c + (3-4\nu_c) \cdot G_s}$$

$$\sigma_{ra}^c = (A-1) \cdot \sigma_N^c / 2 \quad \lambda = 0.528 \cdot \tan \theta' \quad (\theta' = 20^\circ) \quad R = b/a$$

ここで、鉄筋軸に垂直な方向に作用する圧縮応力  $\sigma_N^c$  は、ひび割れ方向のコンクリートの圧縮応力  $\sigma_u^c$  を変換することにより得られ、 $R$  はかぶり厚さ比、 $\nu_s$  及び  $\nu_c$  は鉄筋及びコンクリートのポアソン比、 $G^s$  及び  $G^c$  は鉄筋及びコンクリートのせん断弾性係数である。

また、算定に必要な主な入力事項は、各材料特性(表2, 3参照)、実験より得られた平均ひび割れ間隔  $e_{av}$  (表6参照)及び平均側圧応力度  $\sigma_N^c = 0$  時の最大付着応力度  $\tau_{max}$  である。ここでN Pシリーズは  $\tau_{max} = 55.7 \text{ kgf/cm}^2$  (学会基準[7]の長期許容付着応力度の3倍)、またLPシリーズは  $\tau_{max} = 50.2 \text{ kgf/cm}^2$  (同基準の長期許容付着応力度の2.7倍)とした。

図1 2-A, Bは、上記の算定方法より得られたひび割れ間のコンクリートの最大主引張応力と平均主圧縮応力の最大値をKupfer等のコンクリートの2軸の破壊曲面[8]にプロットしたものである。

LP及びNPシリーズの各試験体に関して、Kupfer等の破壊曲面と概ね同様の傾向が見られた。変動因子別に比較すると、同タイプの試験体ではLPシリーズの方がNPシリーズより最大主引張応力が小さい値を示す。また、LP及びNPシリーズの斜め45°配筋試験体では、鉄筋比が大きくなるに従い、ひび割れ間の最大主引張応力が大きくなり、

表6 平均ひび割れ間隔

試験体名	平均ひびわれ間隔 $e_{ave}$ (cm)	標準偏差
LP360-A	11.42	4.20
LP360-B	10.33	4.28
LP360-C	13.76	5.31
LP360-D	7.83	2.00
LP360-E	9.23	1.66
LP360-F	6.91	1.42
NP360-A	13.17	5.79
NP360-B	11.32	3.91
NP360-C	13.25	4.32
NP360-D	8.12	1.36
NP360-E	9.13	1.42
NP360-F	7.65	2.55

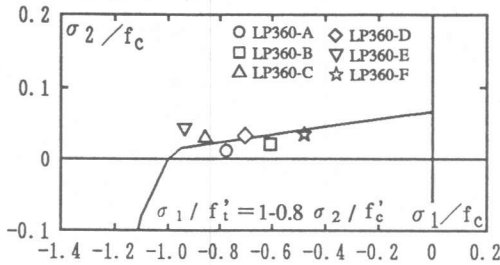


図1 2-A コンクリートの破壊曲面（軽量）

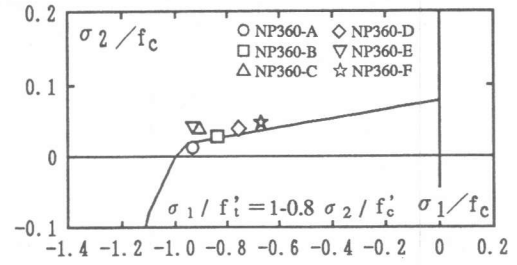


図1 2-B コンクリートの破壊曲面（普通）

Kupfer等の破壊曲面と類似の傾向が見られた。一方、縦横配筋試験体に関しては、実験値の主圧縮応力に対し、最大主引張応力はやや高めの値を示した。

#### 4. まとめ

コンクリート種別（軽量と普通）、配筋方法（斜め45°と縦横）、鉄筋比（ $P_t=0.2\sim 1.33\%$ ）を変動因子としてRC壁板の面内せん断実験を行った結果、以下の事が指摘できる。

① 斜め45°配筋試験体ではLP及びNPシリーズとも鉄筋比が大きくなるに従って、強度低減が大きくなる。また、斜め45°配筋の同タイプ<sup>7)</sup>の試験体を比較するとLPシリーズのほうがNPシリーズより2割前後、強度低減が大きい。

② 同鉄筋比の斜め配筋と縦横配筋を比較するとLP及びNPシリーズとも、縦横配筋の方が強度低減がかなり小さい。また、縦横配筋の同タイプ<sup>7)</sup>の試験体を比較するとLPシリーズはNPシリーズとはほぼ同等の強度低減を示す。

③ ひび割れ間のコンクリートとそれを貫通する鉄筋の付着作用によって評価したコンクリートの引張応力とCollinsの圧縮場理論より求まる平均主圧縮応力のそれぞれの最大値の組み合わせの応力状態とKupfer等のコンクリートの破壊曲面との適合性から圧縮劣化特性を2軸効果で説明可能と思われる。

#### 【謝辞】

本研究の実施にあたり日本大学理工学部 建築学科 白井伸明 助教授、同学海洋建築学科 中西三和 専任 講師並びに試験体の製作においてALA協会、湊建材㈱に大変お世話になりここに感謝の意を示す。

#### 【参考文献】

- [1] 岩下、上田ほか：面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート板の構成則に関する研究(その1)、日本建築学会大会学術講演会梗概集、構造Ⅱ、pp. 361-362、1987年10月
- [2] 岩淵、白井ほか：高強度コンクリートの力学特性に関する基礎的研究(その1)、(その3)、日本建築学会大会学術講演会梗概集、構造Ⅱ pp. 465-466、pp. 469-470、1991年9月
- [3] 岩淵、白井ほか：普通強度及び高強度RC要素の構成則に関する研究(その1)、日本建築学会大会学術講演会梗概集、構造Ⅱ、pp. 1051-1052、1992年8月
- [4] Vecchio, F. and Collins, M. P.: The Response of Reinforced Concrete to Inplane Shear and Normal Stress, ISBN Pub. No. 82-03, University of Toronto, April, 1982
- [5] 古谷、小野ほか：軽量コンクリート1種を用いた鉄筋コンクリート造壁板のひび割れ発生後の非線形挙動に関する研究、日本建築学会 関東支部研究報告集、pp93-96、1992年3月
- [6] 白井、佐藤：鉄筋コンクリートの付着-ひび割れモデル、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. 9-16、1983. 10
- [7] 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、日本建築学会、pp. 43-57、1991年4月5日
- [8] 色部ほか：コンクリート構造物の塑性解析、丸善、pp. 236-239、1985年7月20日