

# 論文 三軸圧縮応力下にある超高強度コンクリートの破壊曲面

穴吹 拓也\*1・杉本 訓祥\*2・米澤 健次\*2・津田 和明\*2

**要旨:** 現在コンクリート系構造物を対象とした FEM 構造解析に用いられるコンクリート破壊基準は、一軸圧縮強度が 60N/mm<sup>2</sup> 程度までの実験データに基づき導かれたものであり、100N/mm<sup>2</sup> を超えるコンクリートに対して、その適用性を要素レベルで確認した例は極めて少ない。そこで、超高強度コンクリートを対象として3方向の主応力度を制御した圧縮載荷試験を実施し、三軸圧縮応力下における破壊曲面の形状を確認した。その結果、既往の破壊基準の中では大沼らの係数を適用した 5 パラメータモデル<sup>1)</sup>が実験結果と最も良好に対応することが分かった。

**キーワード:** 3 軸圧縮試験, UHSC, 破壊基準, 偏差平面

## 1. はじめに

現在コンクリート系構造物を対象とした FEM 構造解析に用いられるコンクリート破壊基準(破壊曲面)には、一軸圧縮強度が普通強度から 60N/mm<sup>2</sup> 程度までの範囲のコンクリートを用いた実験データより導出されたモデル<sup>2)</sup>が用いられる。一方、近年では超高層建築物等に圧縮強度が 100N/mm<sup>2</sup> を超える超高強度コンクリート(Ultra High Strength Concrete)を用いることが少なくないが、超高強度コンクリートに対する既往の破壊基準の適用性を要素レベルで検証した例は極めて少ない。

そこで、3 方向に直交するアクチュエータによって供試体に生じる主応力度を制御し、超高強度コンクリート製供試体を破壊させる三軸圧縮試験を実施した。本報では、試験方法の概要及び三軸圧縮応力下における既往の破壊基準の適用性を検証した結果について述べる。

## 2. 三軸圧縮応力下にあるコンクリートの特性に関する既往の研究

表-1 に三軸圧縮応力下にあるコンクリートの特性に関する既往の研究例を示す。前半 4 例<sup>1),3),4),5)</sup>は供試体の一軸圧縮強度が 60N/mm<sup>2</sup> 程度までの例であり、3 方向の荷重を任意に与える三軸圧縮試験を実施したものが含まれる。一方、後半 4 例<sup>6),7),8),9)</sup>は超高強度コンクリートの三軸圧縮応力下における破壊を検証した例であり、液圧や鋼円管による均一な側圧状態における圧縮試験が行われた。これらは図-1 のように主応力空間に描かれる破壊曲面の圧縮子午線 ( $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ ) 上のデータを得るに留まり、一般的な応力状態 ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ) における破壊を述べるには至らない。なお、ここでは引張応力度を正としている。

超高強度コンクリートを対象とした実験結果を既往のコンクリート破壊曲面の圧縮子午線と比較したとこ

ろ、実験結果は破壊曲面のやや内側にプロットされる傾向が確認された<sup>9)</sup>。これは超高強度コンクリートを用いた構造物を対象とした FEM 解析において、既往の破壊基準を用いた場合に、三軸圧縮応力下にあるコンクリート要素の破壊時応力度を過大評価する可能性を示しており、超高強度コンクリートに対する既往の破壊基準の適用性をより詳細に調査する必要がある。

表-1 コンクリート圧縮特性に関する既往の研究例

年	筆頭著者	側圧導入方法	強度範囲(MPa)
1969	Gardner <sup>3)</sup>	液圧	29.0
1970	Mills <sup>4)</sup>	三軸圧縮	23.0~36.1
1974	Palaniswamy <sup>5)</sup>	液圧	22.1~54.1
1981	大沼 <sup>1)</sup>	三軸圧縮	28.0~41.5
1998	Ansari <sup>6)</sup>	液圧	69.9~103.5
1999	孫 <sup>7)</sup>	鋼円管拘束	61.6~95.2
2000	Li <sup>8)</sup>	液圧	47.2~107.3
2008	Anabuki <sup>9)</sup>	鋼円管拘束	106.3~195.7

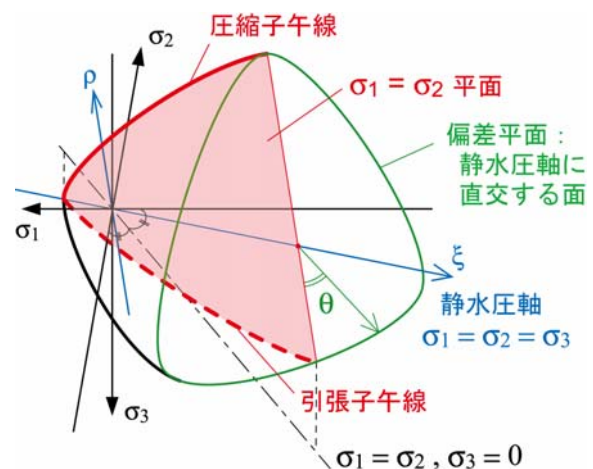


図-1 コンクリートの破壊曲面の概念

\*1 (株)大林組 技術研究所 主任 修士(工学) (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)

### 3. 三軸圧縮試験の概要

#### 3.1 供試体

供試体寸法は大沼ら<sup>1)</sup>、Hatanakaら<sup>10)</sup>が行った同様の実験を参考にし、かつ、試験装置の荷重能力を考慮して、1辺の長さが100mmの立方体形状とした。

コンクリートの目標強度は100N/mm<sup>2</sup>とし、表-2に示す調合とした。セメントは中庸熱ポルトランドセメントを用い、混和剤として高性能AE減水剤を用いた。

供試体はコンクリート打設の翌日に脱型し、試験直前まで水中養生を行った。試験開始時に計測した供試体の一軸圧縮強度( $\sigma_B$ )は125.8N/mm<sup>2</sup>であった。

#### 3.2 荷重装置

荷重装置は鉛直方向に10MN、水平直交2方向に5MNのアクチュエータを組み合わせた装置(写真-1)を用いた。この装置は本来700mmあるいは500mmの立方体

供試体を荷重する装置であるため、700mmの空間に納まる寸法で、100mmの立方体供試体を荷重するための治具(写真-2、図-2)を別途組み合わせた。

治具の供試体との接触部分には球座機構を設けた。接触面は研磨仕上げとし、供試体との間に摩擦低減材は挿入しなかった。また、圧縮荷重の際に3方向の荷重板が相互に接触することを避けるため、荷重板の形状は供試体寸法よりも一回り小さい95×95とした。

#### 3.3 荷重方法

荷重は3方向のアクチュエータの荷重、すなわち供試体に生じる主応力度を制御し、図-3に概念を示すように、2段階の手順を踏んだ。第1段階として、主応力度空間の静水圧軸( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ )に沿って所定の静水圧応力を供試体に加えた。第2段階として、その静水圧応力成分を保持した状態で、それぞれの主応力度を一定の割

表-2 コンクリートの調合

粗骨材 最大寸法 (mm)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			水 W	結合材 B		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
				C	SF			
20	17	40.8	150	750	132	574	846	0.64

※C：セメント，SF：特殊シリカ質微粉末

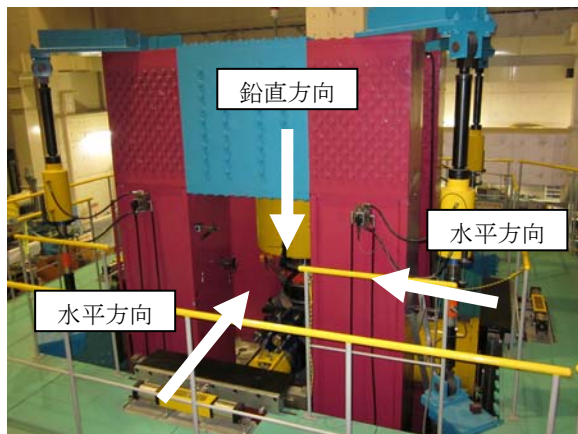


写真-1 3方向荷重装置

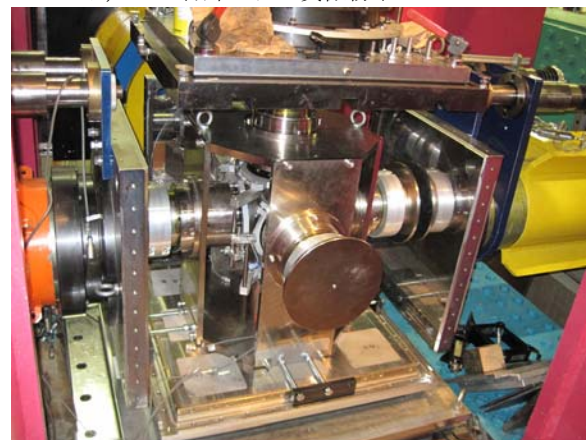


写真-2 100mm 供試体荷重用治具

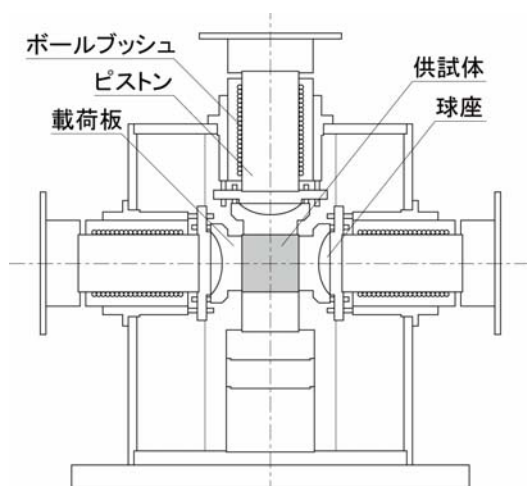


図-2 100mm 供試体荷重用治具の断面模式図

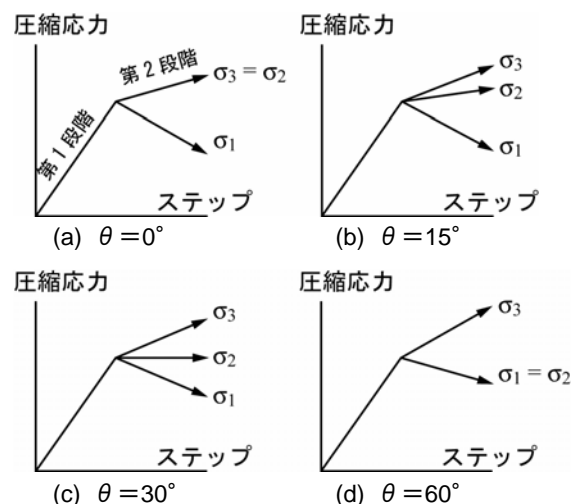


図-3 荷重経路の概念

合で変化させて供試体を破壊させた。

第1段階で導入する静水圧応力は、既往の実験データとの比較を行うため、 $\xi / \sigma_B = 2.0, 1.5$ の2ケースを実施することとした。ここで、 $\xi$ は供試体の応力度の静水圧成分を表す量で、応力度の一次不変量  $I_1$  を用いて式(1)及び式(2)で表される。

$$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2)$$

破壊曲面の偏差平面上の切断面は、静水圧軸周りの対称性から、6分円のデータを得れば全体を定義することができる。そこで、第2段階の荷重は偏差平面上の位置を表す偏角  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の5ケースを実施することとした。偏角  $\theta$ は偏差応力度の二次不変量  $J_2$  を用いて式(3)及び式(4)で表される。

$$\cos \theta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{2\sqrt{3}J_2} \quad (3)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} \quad (4)$$

要素レベルの試験では結果にばらつきが生じる可能性が懸念されるため、前述の試験パラメータの組み合わせ10ケースに対して2体ずつ試験を行うこととした。さらに、一部のパラメータに対しては予備の供試体を用いて追加実験を行った。

荷重速度はコンクリート材料試験における値を参考として、0.6MPa/secを超えないようにした。

供試体は6面とも荷重板と接するため、ひずみゲージは貼付せず、GAPセンサー（最小分解能：0.3 $\mu$ m、レンジ：2mm）により3方向の荷重板間変位を計測して、供試体の変形状況を観察した。

## 4. 試験結果

### 4.1 供試体の破壊状況

写真-3 に供試体の破壊状況の一例を示す。荷重板寸

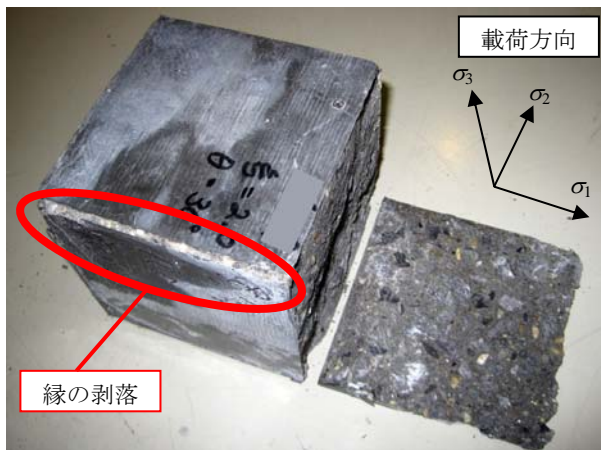


写真-3 供試体破壊状況

法が供試体一辺の寸法よりも小さいため、全ての試験体に共通して、荷重板が当たらない縁部分が剥落した。主たるひび割れは $\sigma_1$ の荷重面近傍に $\sigma_1$ に直交する方向に発生しており、一部の供試体では写真-3に示すように $\sigma_1$ の荷重面表面が分離した。

### 4.2 試験結果の整理方法

試験後の供試体には多数のひび割れを確認したが、本試験より得られた荷重履歴には制御荷重から極端に逸脱した点がなく、荷重履歴からは破壊点を特定することができなかった。そこで、変位履歴に着目し、以下に例示するように、3方向の供試体変位の傾向が大きく変化した点を破壊点と仮定した。

図-4 に試験より得た3方向の荷重及び変位の履歴の例を示す。横軸は荷重ステップ、縦軸は荷重及びGAPセンサーの値である。なお、GAPセンサーの値は荷重経路を考慮して初期値を調整したため、供試体の変形を直接示すものではない。図-4の例は149ステップから第2段階の荷重に移行した。230ステップ及び258ステップの2点でX方向（ $\sigma_1$ 方向）のGAPセンサー値の減少率が大きく変化した。Y方向（ $\sigma_2$ 方向）及びZ方向（ $\sigma_3$ 方向）のGAPセンサー値の変化を考慮して、258ステップを破壊点と判定した。

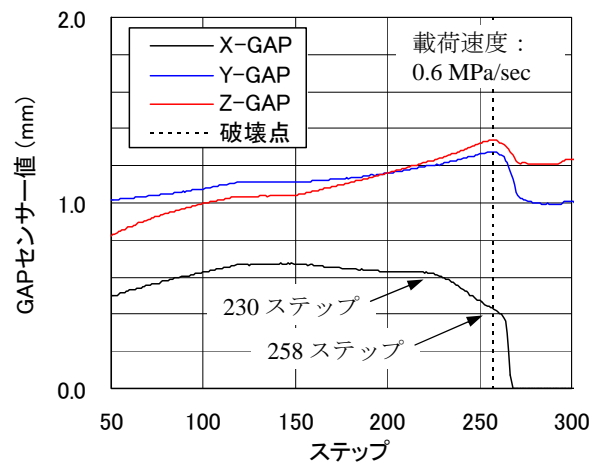
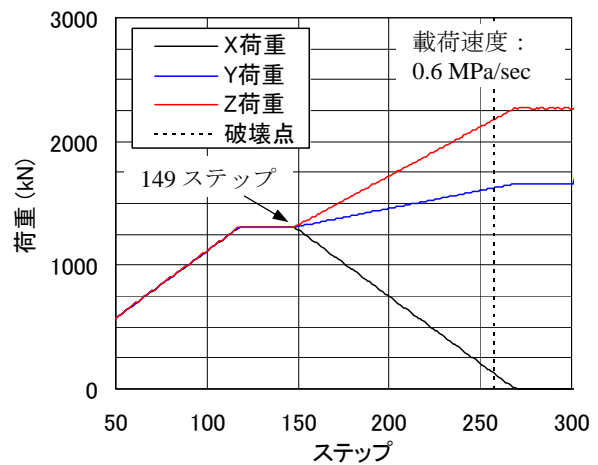


図-4 破壊点の判定方法

### 4.3 既往の実験結果との比較

これまでに述べた载荷装置、载荷方法、破壊点の判定方法の妥当性を確認するため、本試験より得た破壊点と超高強度コンクリートを対象とした既往実験の破壊点の主応力度空間における分布傾向を比較した。

超高強度コンクリートを対象とした既往の実験は、前述の通り、均一な側圧を受けるものであり、本試験のパラメータで表すと $\theta = 60^\circ$ に相当する。また、既往の実験は鋼管の拘束による受動的な側圧や、液圧により常時一定の側圧を与えているため、本試験とは载荷経路が異なる。

図-5に既往の実験結果と本試験結果( $\theta = 60^\circ$ )を既往の破壊曲面上で比較して示す。横軸は静水圧応力成分を表す量( $\xi / \sigma_B$ )、縦軸は偏差応力成分を表す量( $\rho / \sigma_B$ )である。ここで $\rho$ は偏差応力度の二次不変量 $J_2$ を用いて式(5)で表される。

$$\rho = \sqrt{2J_2} \quad (5)$$

既往の実験結果は破壊曲面に対して偏差応力成分がやや小さいところで破壊に至る傾向があり、静水圧応力成分が大きいほどその傾向が顕著であった。本試験結果は $\xi / \sigma_B = 1.5$ の場合に例外が見られるものの、既往の実験結果と概ね同様の傾向が見られた。このことから、本研究の試験方法及び試験データの整理方法の妥当性を確認した。

### 4.4 既往の破壊曲面との比較

図-6に $\xi / \sigma_B = 2.0$ 及び $1.5$ の偏差平面上における既往の破壊曲面と試験結果との比較を示す。図の視線は主応

力空間における静水圧軸と一致しており、 $\theta$ の回転中心が静水圧軸である。黒実線は主応力空間の圧縮側の軸、黒破線は引張側の軸をそれぞれ偏差平面上に投影したものであり、 $\theta$ は引張側の軸を基準に定義される。

前述のように、 $\theta = 60^\circ$ におけるデータのみを比較した場合は既往のコンクリート破壊基準による破壊時応力の過大評価が懸念されたが、破壊曲面全体としては本試験結果と概ね一致していることがわかった。

表-3に偏差応力成分を表す量( $\rho / \sigma_B$ )に関する試験結果と既往のモデルによる計算値の比較を示す。なお、 $\rho / \sigma_B$ は図-6において静水圧軸からの距離を表し、偏角 $\theta$ とともに偏差平面上における位置を示す値である。いずれのモデルも実験結果との差は5%程度であり、変動係数も5~7%程度と小さい。すなわち、超高強度コンクリートに対しても、既往の破壊基準を適用することが可能であり、その中でも大沼らの係数を用いた5パラメータモデル<sup>1)</sup>が試験結果と最も良好に対応した。

ただし、微視的には図-6において偏角 $\theta$ が $60^\circ$ に近づくほど試験結果のばらつきが大きくなる傾向が見られ、既往のモデルによる破壊時応力の過大評価の懸念も残されているため、破壊曲面の圧縮子午線近傍のパラメータを中心に、今後もデータを蓄積することが重要である。

## 5. まとめ

超高強度コンクリートを対象とした三軸圧縮試験を行い、超高強度コンクリートに対する既往のコンクリート破壊基準の適用性を確認した。

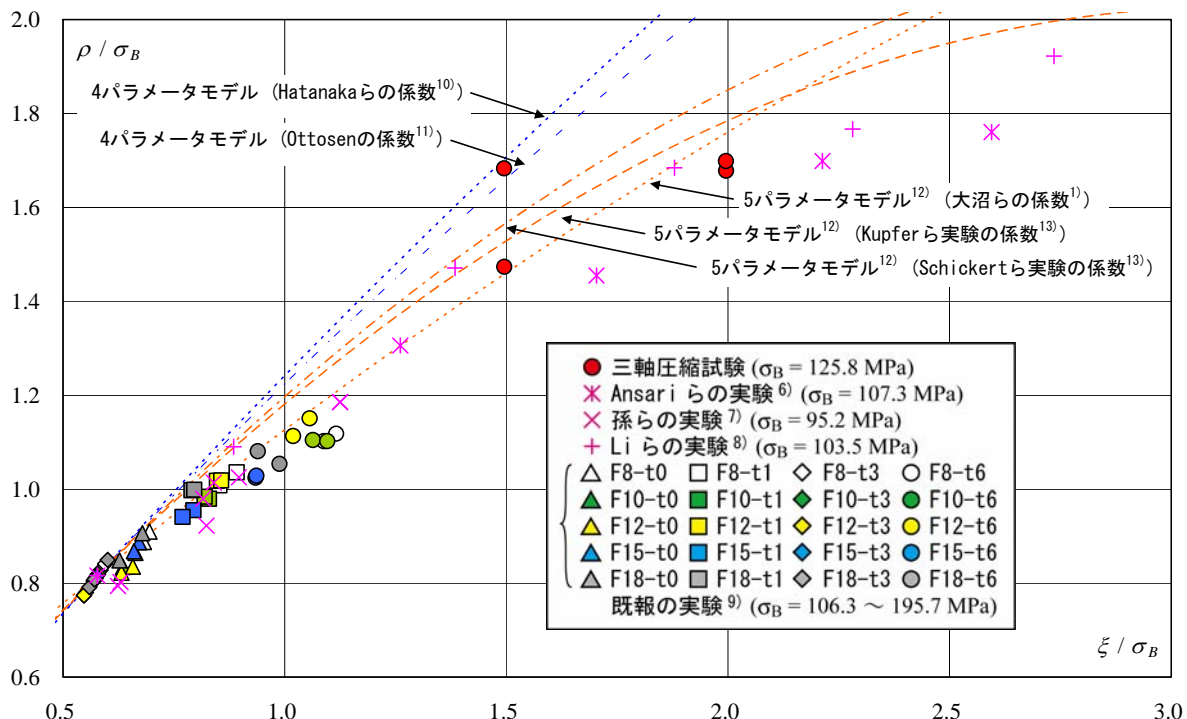


図-5 既往の超高強度コンクリート圧縮実験結果との比較

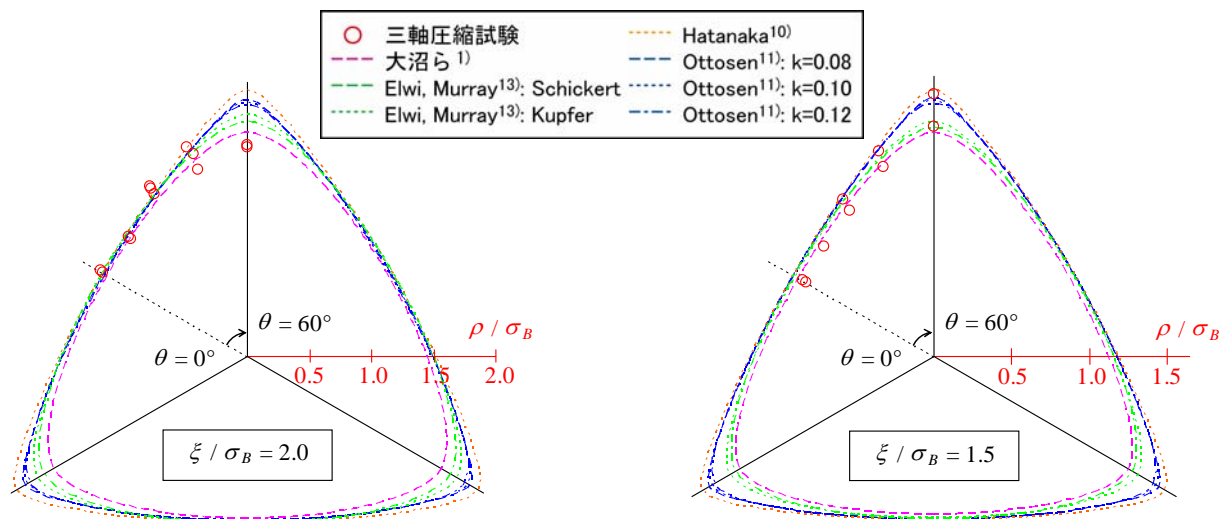


図-6 偏差平面上の比較

表-3 偏差応力成分を表す量( $\rho/\sigma_B$ )に関する三軸圧縮試験結果と既往のモデルの比較

試験変数		試験結果	試験結果の既往モデルによる計算値に対する比				
$\xi/\sigma_B$	$\theta(^{\circ})$	$\rho/\sigma_B$	Hatanaka <sup>10)</sup>	Ottosen <sup>11)</sup>	大沼 <sup>1)</sup>	Kupfer <sup>13)</sup>	Schickert <sup>13)</sup>
2.0	60	1.689	0.789	0.819	0.940	0.869	0.897
	45	1.661	0.939	0.965	1.023	0.971	0.983
	30	1.543	1.022	1.037	1.072	1.034	1.034
	15	1.342	0.973	0.983	1.006	0.978	0.973
	0	1.353	1.010	1.019	1.041	1.013	1.007
1.5	60	1.578	0.925	0.950	1.099	1.048	1.077
	45	1.311	0.940	0.958	1.028	0.992	1.001
	30	1.123	0.950	0.958	1.003	0.976	0.974
	15	0.9998	0.929	0.932	0.968	0.945	0.938
	0	0.9627	0.922	0.924	0.958	0.935	0.928
平均値			0.954	0.940	1.014	0.954	0.981
変動係数			0.062	0.068	0.049	0.062	0.054

本試験結果は均一な側方拘束を受ける超高強度コンクリートに関する既往の実験結果<sup>6)~9)</sup>と同様の傾向を示しており、試験方法及び試験データの整理方法は妥当であったと言える。

また、本試験結果は既往の破壊基準と概ね一致しており、超高強度コンクリートに対しては大沼らの係数を用いた5パラメータモデル<sup>1)</sup>が最も良好に対応した。

#### 参考文献

1) 大沼博志, 青柳征夫: 三軸圧縮応力下におけるコンクリートの強度特性, 電力中央研究所報告, No.381021, 1981.12  
 2) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8

3) Gardner, N., J.: Triaxial Behavior of Concrete, ACI Journal, Vol.66, No.2, pp.136-146, Feb.1969.  
 4) Mills, L., L. and Zimmerman, R., M.: Compressive Strength of Plane Concrete under Multiaxial Loading Conditions, ACI Journal, Vol.67, No.10, pp.802-807, Oct.1970.  
 5) Palaniswamy, R. and Shah, S., P.: Fracture and Stress-Strain Relationship of Concrete under Triaxial Compression, Journal of The Structural Division, ASCE, Vol.100, No.ST5, pp.901-916, May1974.  
 6) Ansari, F. and Li, Q.: High-Strength Concrete Subjected to Triaxial Compression, ACI Materials Journal, V.95, No.6, pp.747-755, Nov.-Dec.1998.  
 7) 孫玉平, 池之野陽一, 崎野健治: 円形鋼管横拘束高強度コンクリートの応力~ひずみ関係, コンクリー

- ト工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.601-606, 1999.
- 8) Li, Q. and Ansari, F.: High-Strength Concrete in Triaxial Compression by Different Sizes of Specimens, *ACI Materials Journal*, V.97, No.6, pp.684-689, Nov.-Dec.2000.
  - 9) Anabuki, T., Yonezawa, K., Tsuda and K., Naganuma, K.: Failure Criteria and Poisson's Effect of Ultra High Strength Concrete Confined by Steel Tube, *Proceedings of 8th International Symposium of Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*, Vol.2, pp.988-993, Oct.2008.
  - 10) Hatanaka, S., Kosaka, Y. and Tanigawa, Y.: Plastic Deformational Behavior of Axially Loaded Concrete under Low Lateral Pressure - An Evaluation Method for compressive Toughness of Laterally Confined Concretes (Part 1) -, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, No.377, pp.27-40, Jul.1987.
  - 11) Ottosen, N., S.: A Failure Criterion for Concrete, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, EM4, pp.527-535, Aug.1977.
  - 12) Willam, K., J., and Warnke, E., P.: Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete, *International Association for Bridge and Structural Engineering Proceedings*, Vol.19, pp.1-30, 1975.
  - 13) Elwi, A., A. and Murray, D., W.: A 3D Hypoelastic Concrete Constitutive Relationship, *Journal of the Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.105, No.EM4, pp.623-641, Aug.1979.