

論文 静水圧環境下における膨張コンクリートの力学的特性に関する実験的研究

佐藤 聡平^{*1}・雪入 政希^{*2}・大下 英吉^{*3}・田澤 榮一^{*4}

要旨：著者らは大深度地下および大深度海洋下における膨張コンクリートの強度特性について，らせん鉄筋を配置した円筒供試体を用いて実験を行い，膨張コンクリートが十分な強度を得るための膨張材の添加量および鉄筋比の評価を行った。実験の結果，静水圧環境下における耐ひび割れセメントの有効性も明らかとなった。また，円筒供試体中央部における内外の周方向のひずみ，らせん鉄筋の換算断面積およびコンクリートの有効換算断面積から，供試体に導入されたケミカルプレストレスを算出する方法を提案した。

キーワード：膨張コンクリート，耐ひび割れセメント，静水圧

1. はじめに

大深度地下構造物および大深度海洋下構造物において，コンクリートの利用は必要不可欠である。しかしながら，これらの環境においてコンクリート構造物は保守および補修が非常に困難な状況にあり，長期的にメンテナンスをすることなく，なおかつ必要な耐久性が確保されることが極めて重要である。

大深度海洋下あるいは大深度地下コンクリート構造物の変形挙動においては，大気中でのコンクリートの力学的特性がそのまま適用されるのが一般的であるが，水深数百メートルに施工されるコンクリート構造物表面には常時 MPa オーダーの静水圧が作用しており，その影響は多孔質透水性材料であるコンクリートにとって無視できるものではない。すなわち静水圧環境下におけるコンクリート材料の変形および力学的特性の解明が必要であると考える。

著者ら¹⁾は，コンクリート表面に MPa オーダーの水圧が直接作用すると，コンクリート内部への水の圧入現象とそれに起因する透水現象はコンクリートの破壊を引き起こす可能性があることを報

告している。さらに，静水圧環境下におけるコンクリートの圧縮，引張および曲げ強度特性に関する実験的評価を行い，静水圧作用時間が長く，静水圧の値が大きいほど静水圧環境下におけるコンクリートの強度は小さくなることを指摘するとともに，この種の環境下に長期に渡って静置されたコンクリートは，その材料的な性質にもよるが，有効応力原理に従うことも指摘した^{2),3)}。

本研究では，大深度地下あるいは大深度海洋下を模擬することのできる浸透劣化装置を用いることにより，静水圧環境下における膨張コンクリートの強度特性およびひび割れ抵抗性の評価を目的とし，セメントの種類，鉄筋比および膨張材添加量を変化させた中空円筒供試体に対する割裂強度試験を実施し，強度特性およびひび割れ抵抗性に及ぼす各種パラメータの影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 実験供試体について

(1) 供試体作製方法

実験に用いた供試体は遠心成型により作製された中空円筒供試体であり，養生方法は水中養生で

*1 中央大学 理工学研究科土木工学専攻(正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科(仮会員)

*3 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博(正会員)

*4 中央大学 研究開発機構 工博(正会員)

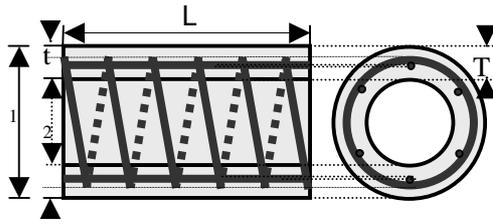


図 - 1 供試体形状寸法

ある。

(2) 供試体寸法

供試体寸法は図 - 1 に示すように外径 D_1 は 200mm, 内径 D_2 は 100mm, 肉厚 T は 50mm, 供試体の高さ L は 300mm であり, 内部にらせん鉄筋を配置している。らせん鉄筋は R5 の丸鋼であり, 主鉄筋には D6 の異型鉄筋を用いた。らせん鉄筋のかぶり t は 10mm である。

(3) 使用材料

実験供試体に用いた材料の主な性質は, 表 - 1 に示す通りである。なお, 耐ひび割れセメントはセメント中にアルカリ分をほとんど含まないひび割れ抵抗性の高いセメントである。

(4) 配合

本実験で使用したコンクリートは, W/C=35% であり, 普通セメントおよび耐ひび割れセメントを用いた供試体で膨張材無添加, 膨張材 H を 20kg/m^3 添加したものと, 膨張材 P を 20kg/m^3 および 30kg/m^3 添加したものととした。なお, コンクリートの配合は表 - 2 に示す通りである。

2.2 実験パラメータ

実験パラメータはセメントの種類, 膨張材の種類および添加量, らせん鉄筋比, 静水圧の有無の 4 種類であり, セメントは普通ポルトランドセメントおよび耐ひび割れセメントの 2 種類, 膨張材については無添加, P は単位膨張材量 20kg/m^3

表 - 1 材料の主な性質

材料	詳細	
水	水道水	
セメント	普通	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm^3
	耐ひび割れ	耐ひび割れセメント, 密度 3.16g/cm^3
細骨材	小笠産, 陸砂, 表乾密度 2.60g/cm^3	
粗骨材	岩瀬産, 硬質砂岩砕石 1305, 表乾密度 2.64g/cm^3	
膨張材	P	密度 3.05g/cm^3
	H	密度 3.16g/cm^3
高性能減水剤	コアフローCP-300, 末期スルホン酸基を有するポリカルボン酸含有ポリマー	

および 30kg/m^3 H は単位膨張材量 20kg/m^3 である。らせん鉄筋比は 1.01%, 1.48%, 2.02% の 3 種類とした。また, 試験環境については通常環境下で行ったものと 1MPa の静水圧環境下に 72 時間静置した後に割裂強度試験を行ったものの 2 種類である。なお, 全てのパラメータを組み合わせると供試体本数が膨大になるため, 各パラメータの影響を評価するために必要と考えられるパラメータの組み合わせを選定し, 供試体名称と併せて表 - 3 に示す。なおパラメータの決定基準を以下に示す。

1) セメント

セメントの種類が導入プレストレス, 強度, ひび割れ発生荷重, ひび割れ発生時のひずみ, および靱性に及ぼす影響評価を行うために, 設定したものである。鉄筋比, 膨張材添加量が同一でセメントの種類が異なる供試体を作製した。一例を挙げると No.1A, No.2A はいずれも鉄筋比, 膨張材添加量が同一であり, No.1A は普通ポルトランドセメントを用いた供試体, No.3A は耐ひび割れセメントを用いた供試体となっている。

2) 膨張材

膨張材の種類-および膨張材添加が導入プレストレス, 強度, ひび割れ発生荷重, ひび割れ発生時のひずみおよび靱性に及ぼす影響評価を行うために設定したものであり, 膨張効果を最大限に発揮し得る膨張材添加量とらせん鉄筋比の最適な組み合わせの評価も併せて行うものとする。

表 - 2 コンクリートの配合

供試体番号	セメントの種類	膨張剤の種類	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)					高性能減水剤 (kg/m^3)	スランブ (cm)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	膨張剤		
N	普通 N	無添加	35.0	40.0	165	471	692	1054	0	3.30	7.0
N-P-20		P	35.0	39.4	165	471	675	1054	20	3.30	8.5
N-P-30		P	35.0	39.1	165	471	667	1054	30	3.30	8.5
N-H-20		H	35.0	39.4	165	471	676	1054	20	3.30	9.0
NC	耐ひび割れ NC	無添加	35.0	41.4	175	500	691	995	0	2.25	8
NC-P-20		P	35.0	40.8	175	500	674	995	20	2.25	7.5
NC-P-30		P	35.0	40.5	175	500	666	995	30	2.25	7.5
NC-H-20		H	35.0	40.8	175	500	675	995	20	2.25	7.5

表 - 3 パラメータおよび割裂強度試験結果

供試体名称 No.	セメント	鉄筋比 (%)	膨張材量 (kg/m ³)	静水圧	外周ひずみ (μ)	内周ひずみ (μ)	ひび割れ荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	σ _{c,p} (N/mm ²)	σ _{c,p-U} (N/mm ²)
1A	普通	1.01	0	無	93	-366	47.3	90.8	0.00	0.00
1B	普通	1.01	0	有	151	-268	63.6	95.4	0.00	0.00
2A	耐ひびわれ	1.01	0	無	146	-342	45.9	93.3	0.00	0.00
2B	耐ひびわれ	1.01	0	有	53	-103	38.6	96.5	0.00	0.00
3A	普通	1.01	P20	無	218	-383	63.2	91.2	0.40	0.24
3B	普通	1.01	P20	有	260	-312	76.1	98.1	0.38	0.23
4A	耐ひびわれ	1.01	P20	無	241	-366	53.3	96.1	0.32	0.20
4B	耐ひびわれ	1.01	P20	有	133	-238	58.1	105.2	0.38	0.21
5	普通	1.48	H20	無	293	-458	55.6	127.7	1.04	0.63
6	耐ひびわれ	1.48	H20	無	315	-461	55.9	141.6	0.94	0.69
7	普通	1.48	P20	無	227	-404	68.4	125.0	0.66	0.28
8	耐ひびわれ	1.48	P20	無	202	-525	61.0	132.2	0.53	0.24
9	普通	1.48	P30	無	267	-356	75.9	124.0	0.77	0.54
10	耐ひびわれ	1.48	P30	無	334	-366	60.6	132.1	0.88	0.62
11A	普通	2.02	0	有	194	-399	74.1	195.3	0.00	0.00
11B	耐ひびわれ	2.02	0	有	79	-220	57.0	184.1	0.00	0.00
12A	普通	2.02	P20	無	181	-584	75.3	183.0	0.98	0.33
12B	普通	2.02	P20	有	492	-613	89.9	185.0	1.40	0.60
13A	耐ひびわれ	2.02	P20	無	316	-410	60.4	191.1	1.19	0.28
13B	耐ひびわれ	2.02	P20	有	351	-669	83.4	197.9	1.50	0.86
14A	普通	2.02	P30	無	250	-473	74.6	190.9	1.18	1.16
14B	耐ひびわれ	2.02	P30	無	340	-409	72.7	190.9	1.33	1.16

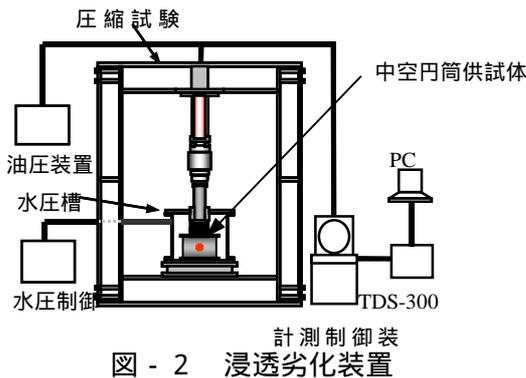


図 - 2 浸透劣化装置

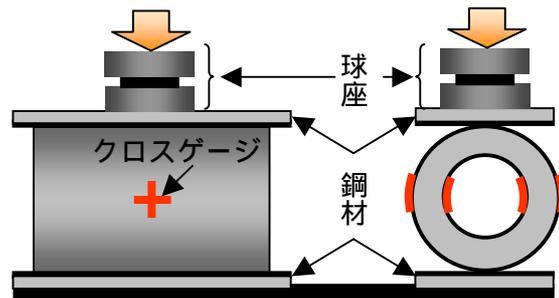


図 - 3 供試体載荷状況

3) らせん鉄筋比

らせん鉄筋比が導入プレストレス，強度，ひび割れ発生荷重，ひび割れ発生時のひずみに及ぼす影響評価を行うために設定したものであり，前項の膨張材と同じく，最適膨張効果の決定にも必要である。

2.3 実験装置

静水圧環境下を模擬するために用いた浸透劣化装置²⁾の概要については図 - 2 に示す通りである。本装置は定吐出型水源により水槽内に 1MPa の水圧を持続的に作用させた状態において，各種の強度試験の実施が可能である。本装置を圧縮試験機内に設置してピストンに荷重を載荷することにより水槽内の供試体に荷重を載荷することが可能となる。

2.4 強度試験

(1) 測定項目

強度試験は図 - 3 のように供試体の上下を厚さ 38mm の鋼材で挟むように設置し，鋼材と中空円筒供試体の間には厚さ 1mm のゴム板を設置している。さらに供試体上部に載せた鋼材に球座を配し載荷試験を行った。なお，通常環境下では上部鋼材に変位計を設置し，静水圧環境下における実験では水槽内外をつないでいるピストン上部に変位計（1/100mm まで測定可能）を設置することにより載荷時の変位を測定した。また図 - 3 に示した供試体中央断面の外径，内径部分のひずみをクロスゲージにより測定した。静水圧環境下で用いたひずみゲージは，ゲージを供試体に貼り付けた後，ホットメルト型コーティング剤を塗布し，その上

から2種類のブチルゴム型のコーティング剤を用いて防水処理を行った。

(2) 載荷材齢と静水圧載荷時間について

載荷材齢は、いずれも56日である。静水圧環境下での載荷試験では、所定の載荷材齢の3日前(72時間前)から一定静水圧の持続的載荷を行い、材齢56日の時点で載荷試験を行った。

3. ケミカルプレストレス

3.1 曲げ理論に基づく算出方法

ケミカルプレストレスを算出するために必要ならせん鉄筋のひずみは、図-3に示すような中空円筒供試体の外径周方向(引張縁)部分および内径周方向(圧縮縁)部分のコンクリート表面のひずみを測定し、図-4に示すような断面内におけるひずみの直線分布を仮定することによって拘束鋼材のひずみを推測した。ここで、 ϵ_c は外径周(引張縁)ひずみ、 ϵ_c' は内径周(圧縮縁)ひずみとする。膨張材無添加供試体の鉄筋ひずみ ϵ_s および添加供試体の鉄筋ひずみ ϵ_{SE} は、それぞれ中空円筒供試体内外のコンクリート表面のひずみにより次式のように表すことができる。

$$\epsilon_{SE} = \frac{d}{w} (\epsilon_{CE}' + \epsilon_{CE}) - \epsilon_{CE}' \quad (1)$$

$$\epsilon_s = \frac{d}{w} (\epsilon_C' + \epsilon_C) - \epsilon_C' \quad (2)$$

膨張材を添加した供試体の鉄筋ひずみ ϵ_{SE} と膨張材無添加供試体の鉄筋ひずみ ϵ_s の差が導入ケミカルプレストレスによる鉄筋ひずみとなる。そこで、膨張材添加、無添加の供試体のらせん鉄筋ひずみの差に拘束鋼材であるらせん鉄筋の弾性係数 E_s により、拘束鋼材に働く引張応力 $\sigma_{C.P.}$ は次式となる。

$$\sigma = E_s \left[\frac{d}{w} \left\{ (\epsilon_{CE}' - \epsilon_C') + (\epsilon_{CE} - \epsilon_C) \right\} + \epsilon_C' - \epsilon_{CE}' \right] \quad (3)$$

コンクリートに導入されたケミカルプレストレスは以上の式(3)から次式のように表現することができる。

$$\sigma_{C.P.} = \frac{P}{A_e} = \frac{\sigma \times A_{spe}}{A_e} \quad (4)$$

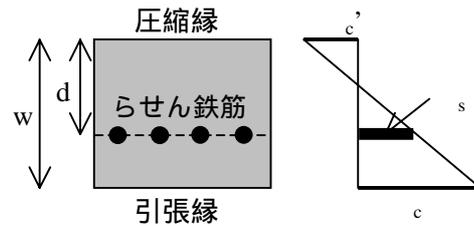


図-4 ひずみ分布図

ここで、 $\sigma_{C.P.}$:導入ケミカルプレストレス、 A_e :コンクリートの有効断面積、 A_{spe} :らせん鉄筋の換算断面積、 ϵ_c :膨張材未混入の供試体ひずみ、 ϵ_{CE} :膨張材混入の供試体ひずみである。実験により求められた中空円筒供試体の内外のひずみを用いて、式(4)から算出した各供試体の導入ケミカルプレストレスを表-3に示す。

3.2 仕事量を用いる方法

膨張コンクリートがらせん鉄筋に対してなす仕事量からケミカルプレストレスを算出する方法⁴⁾は、以下の式で与えられる。

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{cp} \epsilon_s = \frac{1}{2} p E_s \epsilon_s^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{cpa} = \sqrt{2 p_a E_s} \cdot \sqrt{U} \quad (6)$$

ここで、 U は膨張コンクリートがらせん鉄筋に対してなす仕事量、 p はらせん鉄筋比であり、 a の添え字は任意のらせん鉄筋比を用いた場合を示している。式(6)から算出した各供試体の導入ケミカルプレストレスを $\sigma_{C.P.-U}$ として表-3に示す。なお、 ϵ_s は膨張材入り供試体と膨張材未混入供試体のひずみ差とする。

3.3 $\sigma_{C.P.}$ と $\sigma_{C.P.-U}$ の比較

仕事量を用いた結果は曲げ理論に基づく結果に比べて小さな値を示しており、らせん鉄筋比が大きいほど差異は大きくなっている。本実験では膨張材の効果を顕著に生じさせるため、供試体の形状は中空円筒形状とし、らせん鉄筋を用いたが、いずれの算出方法が実現象を詳細に評価しているかに関しては今後詳細に検討しなければならない。しかしながら、いずれの算出方法に基づいたプレストレスも膨張材混入量、らせん鉄筋比とともに大きくなるという傾向を示している。また、いずれの手法もひび割れ発生荷重時におけるらせん鉄

筋ひずみに基づいた算出方法である。したがって、静水圧環境下においては静水圧による拘束効果によりひび割れ発生時の鉄筋ひずみは通常環境下に比べて大きくなるため、ケミカルプレストレスも大きくなっている。本来、ケミカルプレストレスは部材物性として捕らえられる値であるため、静水圧環境下のケミカルプレストレスと通常環境下のケミカルプレストレスの差がひび割れ発生時における静水圧による拘束応力と考えることができる。

4. 強度試験結果

4.1 セメント

通常環境下である供試体 No.1A と No.3A の割裂強度試験結果の比較から、耐ひび割れセメントを用いた供試体の破壊荷重は普通セメントよりも大きな値となっているが、ひび割れ荷重については普通セメントを用いた供試体がより大きな値を示している。ひび割れ発生時の引張縁コンクリートひずみは、耐ひび割れセメントを用いた供試体の方が大きな値となっており、ひび割れ抵抗性が大きいことがわかる。

また、静水圧の影響については、図 - 5 に示す供試体 No.2A および No.2B の比較により検討を行う。ここで、No.2A は通常環境下、No.2B は静水圧環境下における結果である。静水圧環境下における供試体 No.2B は載荷による供試体の変形を水圧が拘束することにより供試体 No.2A に比べて耐力が大きくなっており、コンクリートの緻密性により内部への水分圧入が抑制されているものと考えられる。

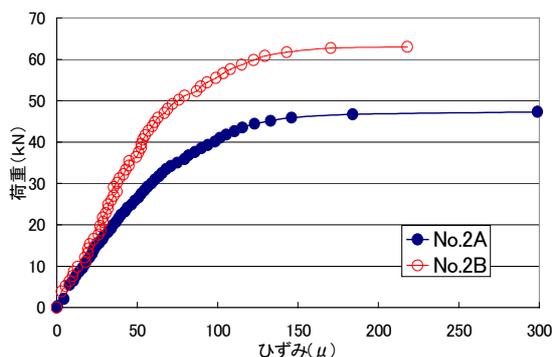


図 - 5 荷重～ひずみ曲線(静水圧の有無)

4.2 膨張材添加量および膨張材の種類

表 - 3 によれば、膨張材無添加の供試体 No.1A と膨張材を添加した供試体 No.3A を比較すると、膨張材を添加した No.3A のひび割れ荷重および破壊荷重が No.1A よりも大きな値となっている。ここで、供試体 No.1A および No.3A の外径周ひずみと荷重の関係を図 - 6 に示す。ひび割れ荷重時のひずみが無添加の No.1A に比べ、膨張材を添加した No.3A の引張縁コンクリートひずみが大きくなっていることから、膨張材を添加したコンクリートはひび割れ抵抗性に優れていると考えられる。

また、膨張材の種類のみが異なる供試体 No.5 と No.7 を比較すると、破壊荷重にはそれほど差異はないが、膨張材 P を用いた No.7 のひび割れ荷重が増加しているのに対し、ひび割れ発生時の引張縁コンクリートひずみは膨張材 H を用いた供試体の方が大きな値となっており、靱性という観点からの膨張材の種類の影響を評価する必要がある。

4.3 静水圧環境下における力学的特性

図 - 7 は供試体 No.1A, No.1B, 供試体 No.3A, No.3B の破壊荷重から算出した引張応力に対する有効応力状態を $I_1 - J_2$ 平面で描いたものである。図中の (No.1B) および (No.3B) が普通セメントを用いた供試体を静水圧環境下に 72 時間静置した後に強度試験を行ったものであり、(No.1A) および (No.3A) は通常環境下で強度試験を行ったものである。ここで膨張材を 20kg/m^3 を添加した供試体 が、膨張材無添加の供試体 よりも静水圧の影響を顕著に受けていることから、膨張材を添加した供試体の強度特性が静水圧により大きく依存しているといえる。これは、膨張材無添加の

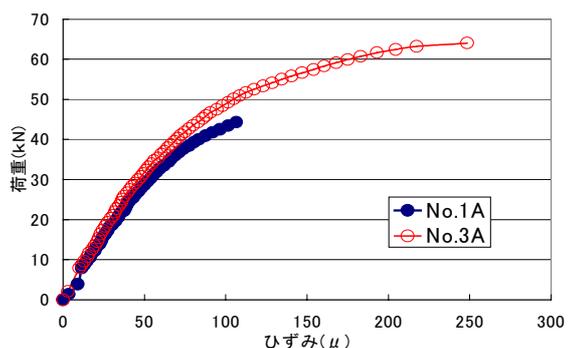


図 - 6 荷重～ひずみ曲線(膨張材添加量)

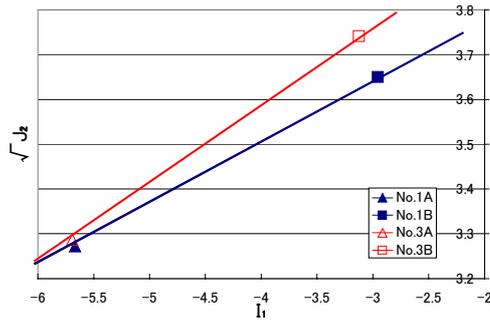


図 - 7 $I_1 - J_2$ 平面における有効応力状態
(膨張材添加量の違い)

供試体が長時間静水圧を受けることによってコンクリートの内部空隙に水が圧入することにより，内外の水圧差が緩和されるために静水圧の拘束効果が低減されたものと考えられる。一方，膨張材を添加した供試体は，コンクリート内部の細孔組織が緻密になっているため，内部空隙への水分圧入現象が妨げられコンクリート内部間隙水圧と外部静水圧の間に差異が生じることにより静水圧が供試体の変形を拘束する程度が大きいことによるものと考えられる。

図 - 8 は，耐ひび割れセメントを用いた静水圧環境下にある供試体 (No.13B) および通常環境下にある供試体 (No.13A) の結果である。一方，普通セメントを用いた静水圧環境下にある供試体

(No.12B) および通常環境下にある供試体 (No.12A) の結果である。上述した膨張材の有無の比較に同じく，耐ひび割れセメントを用いた供試体が，静水圧の影響をより顕著に受けている。表 - 3 に示すように No.1A と No.2A および No.3A と No.4A の比較から破壊荷重は耐ひび割れの方が大きくなっている。このことから，耐ひび割れセメントを用いた供試体の内部細孔組織の方が緻密になっていると考えられる。したがって，耐ひび割れセメントも静水圧の水分圧入現象を抑制することにより，静水圧が拘束効果として働く程度が大きいと考えられる。

なお，本研究では一条件では一体の実験を実施しているが，本来であれば複数本用意し，各種パラメータの評価する必要がある。しかしながら，上述までに示したように，膨張材混入量，種類などのパラメータの強度への影響が定性的に得られ

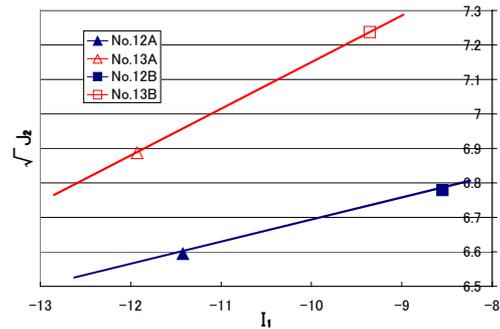


図 - 8 $I_1 - J_2$ 平面における有効応力状態
(セメントの違い)

ている。

5. まとめ

本実験結果から明らかになったことを以下に示す。

- 1) 膨張材によって導入されたケミカルプレストレスは静水圧環境下においても通常環境下と同様の効果が得られることが判明した。
- 2) 膨張材および耐ひび割れセメントを用いたコンクリートは，コンクリート細孔組織が緻密になり，水分の圧入現象が抑制されるために静水圧環境下におけるコンクリートの耐力の向上が期待できる。

参考文献

- 1) 井之上尚史，梨木義春，大下英吉：水圧作用下におけるコンクリートのクリープ挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，vol.17，No. 2，pp793-798，1999
- 2) 木村健，劉兆涛，一ノ瀬晴幸，大下英吉：コンクリートの力学的特性に及ぼす微細空隙内部の水圧性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp291-296，2002
- 3) 松下博憲，佐藤聡平，大下英吉：静水圧環境下におけるコンクリートの曲げ挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，第25巻，第1号，pp.371-376，2003
- 4) 膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム，日本コンクリート工学協会，p.69