

論文 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

木村 健^{*1}・劉 兆濤^{*2}・一ノ瀬 晴幸^{*3}・大下 英吉^{*4}

要旨：従来、コンクリートの圧縮強度等の力学的特性は含水状態によって全く異なることが報告されているが、微細空隙中の間隙水圧性状の影響に関しては殆ど議論されていない。この種の典型的事例が大深度海洋下或いは地中におけるコンクリート構造物であり、水圧性状を考慮した力学的挙動の詳細な評価が不可欠である。本研究では、微細空隙中の各種静水圧環境を模擬できる装置により、各種静水圧作用下に長期間（24hour）と短期間（0hour）静置した場合を比較することによるコンクリートの力学的特性に関する影響評価を実施した。

キーワード：間隙水圧性状、静水圧下圧縮引張性状、 I_1 – $\sqrt{J_2}$ 平面

1. はじめに

近年、大深度海洋構造物や地下構造物など新たなコンクリート構造物の利用が注目されてきている。これらの典型的事例が水中トンネルや地下タンク或いは放射性廃棄物処理施設であり、これらのコンクリート構造物においては常時荷重として水圧がコンクリート表面に直接作用している。また、これらの構造物は建造後の保守および補修が非常に困難であり、補修なくして長期にわたる耐久性が確保されなければならない重要構造物である。

従来、大深度海洋下或いは地中下におけるコンクリート構造物の変形挙動を考える際、大気中でのコンクリートの力学的特性を適用してきた。しかしながら、コンクリート構造物を水深数百メートルに施工すると構造物に作用する水圧は MPa オーダーとなり、水中環境下におけるコンクリート材料の変形特性の詳細な解明が必要となる。一般にコンクリートは多孔質透水性材料であり、水が直接作用すると内部に発生する間隙水圧勾配によって細孔内において水の浸透現象が生じる。また、コンクリート

骨格と内部空隙もしくはひび割れ内部の水が外力に抵抗することとなり、この浸透現象は時としてコンクリートの破壊を引き起こすという実験的な事例も報告されている¹⁾。すなわち、静水圧環境下に静置された状態において、静水圧による外部からコンクリート内部への水分の定常或いは非定常なコンクリート浸透現象を生じる過程および浸透が完了した後に、分離圧としての間隙水圧が骨格に作用した状態におけるコンクリートの基礎的物性である力学的特性を詳細に評価しなければならない。

本研究では、大深度海洋下或いは地中下を模擬することのできる装置（浸透劣化装置）の開発を行い、各種静水圧下におけるコンクリートの力学的特性を評価することを目的とし、静水圧が作用した状態下での圧縮および引張試験を実施した。さらに、各種静水圧がコンクリートの力学的特性に及ぼす影響評価も行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

本実験で使用した材料は、ポルトランドセメ

*1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

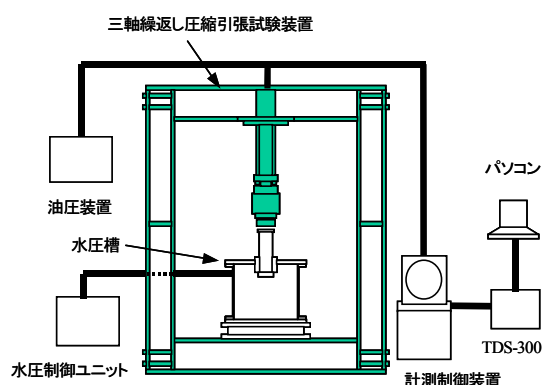
*2 中央大学 理工学部土木工学科コンクリート研究室 研究員 (正会員)

*3 中央大学 理工学部土木工学科 技術員 (正会員)

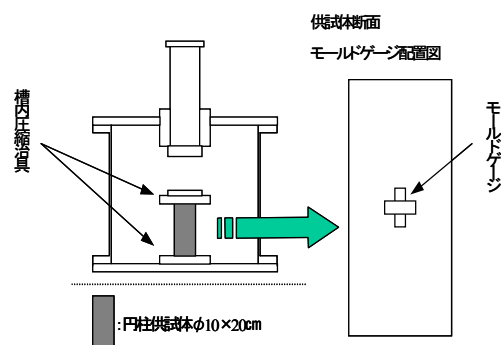
*4 中央大学 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表－１ コンクリートの配合表

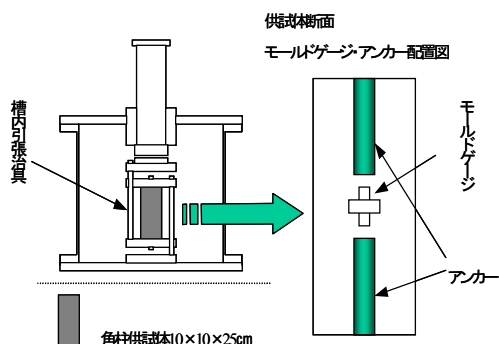
水セメント比 (%)	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
55	20	7	45	179	325	827	1027



図－１ 試験装置概要



図－２ 圧縮試験水圧槽内



図－３ 引張試験水圧槽

ント（比重：3.16g/cm³），骨材においては富士川産細骨材（比重：2.61g/cm³ および富士川産粗骨材（比重：2.66g/cm³，最大寸法：20mm）とした。圧縮試験に使用した供試体は、φ10×20cmの形状寸法をした円柱供試体を用い、引張試験においては10×10×25cmの角柱供試体を用いることとした。なお、コンクリートの配合は、表－1に示す。

2.2 実験装置

本研究において開発した浸透劣化装置の概要は、図－1に示す通りである。この装置は、定吐出型水源により水圧槽内に最大1MPaの水圧を持続的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。また、この装置を3軸試験機内に設置することにより、水圧槽内の供試体に載荷可能となるわけである。

2.3 実験方法

供試体の処理方法と実験方法は、表－2に示すように、①各種材齢のコンクリートを水槽内に静置して、所定の静水圧を24（hr）に渡って持続的に作用させた後に圧縮および引張強度実験を実施するものと、②所定の静水圧を作用させた直後、つまり静水圧を0（hr）作用させた後に圧縮および引張強度実験を実施するものの2種類である。前者は、コンクリート内部への水の浸透現象が生じる過程或いは完了した後に分離圧として間隙水圧が生じている状態における力学的特性の評価であり、後者は従来と同じ3軸試験による力学的特性の評価である。なお、軸方向応力の載荷速度は0.5mm/minである。

(1) 圧縮強度試験

2.1で述べた円柱供試体を用い、図－2のよ

表－２ 実験パラメータ

供試体名称	材齢(日)	静水圧(MPa)	作用時間(hr)
7-0.0-0	7	0.0	0
7-0.5-0	7	0.5	0
7-1.0-0	7	1.0	0
7-0.0-24	7	0.0	24
7-0.5-24	7	0.5	24
7-1.0-24	7	1.0	24
28-0.0-24	28	0.0	24
28-0.5-24	28	0.5	24
28-1.0-24	28	1.0	24

うに供試体内部にひずみゲージを埋め込むことにより、縦ひずみおよび横ひずみを計測した。

(2) 引張強度試験

図－３に示すように、角柱供試体にアンカーを埋設し、ボルトで固定した引張用治具による直接引張試験を実施し、内部のひずみ変化測定を実施した。

2.4 実験パラメータ

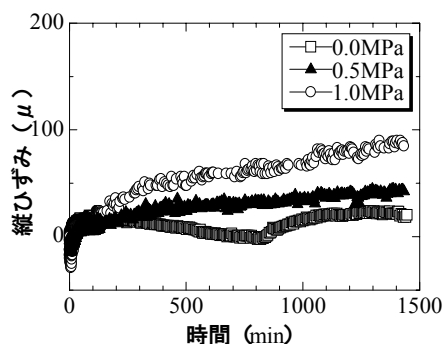
本研究における実験パラメータは、表－２に示すように材齢（日）、静水圧（MPa）および静水圧を作用させる時間（hr）とし、供試体名称は同表に示す通りである。

3. 分離圧がコンクリートの

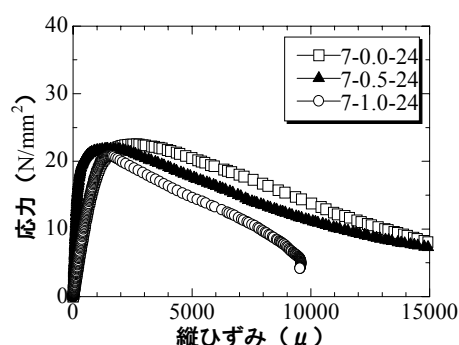
変形性状に及ぼす影響評価

3.1 水分圧入性状

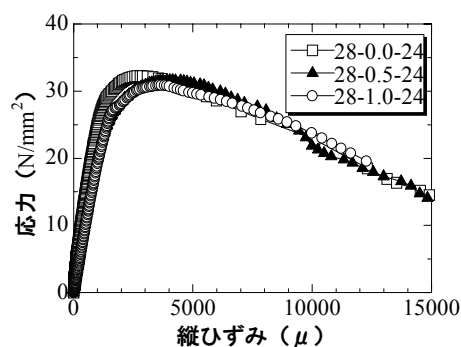
図－４は、24（hr）各種静水圧を与え続けた時のひずみの変化を表しており、図中の記号□、▲および○は0.0MPa,0.5MPa および1.0MPaの静水圧を作用させた場合を示している。静水圧を掛け始めた直後、静水圧の作用により内部で収縮が起こる。その後、0.5MPa、1.0MPaともにひずみは徐々に膨張方向に変位していることが確認された。これは外部からコンクリート内部への水の浸透現象により生じる間隙水圧の作用により、供試体内部で膨張方向に変位が起こるものと考えられる。



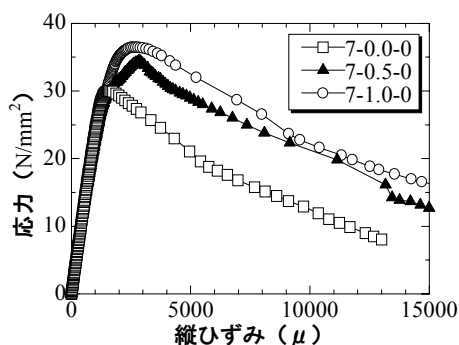
図－４ 静水圧下に24時間静置した時のひずみの変化



図－５ 圧縮応力～ひずみ曲線
(材齢7日、24時間静置)



図－６ 圧縮応力～ひずみ曲線
(材齢28日、24時間静置)



図－７ 圧縮応力～ひずみ曲線
(材齢7日、0時間静置)

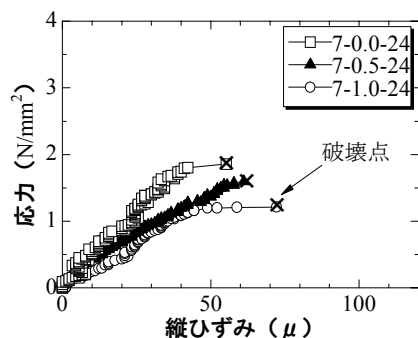


図-8 引張応力～ひずみ曲線
(材齢 7 日, 24 時間静置)

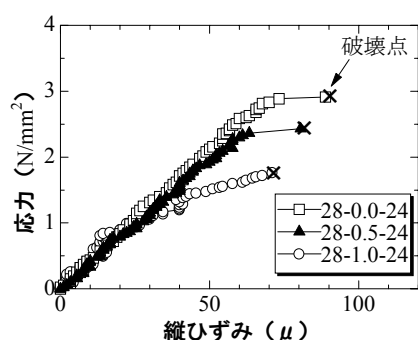


図-9 引張応力～ひずみ曲線
(材齢 28 日, 24 時間静置)

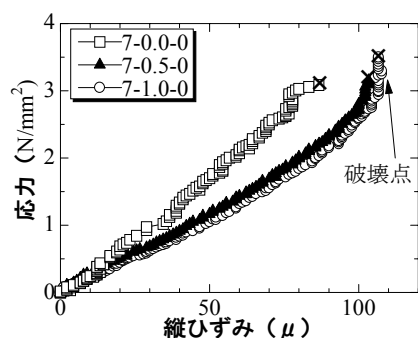


図-10 引張応力～ひずみ曲線
(材齢 7 日, 0 時間静置)

3.2 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験により得られた応力～ひずみ関係を図-5および図-6に示す。

各図は、それぞれ材齢 7 日および 28 日において 24 (hr) 静水圧環境下に静置した場合の実験結果であり、図中に示す記号□、▲および○は、0.0MPa、0.5MPa および 1.0MPa の静水圧下

における結果を示している。図-5および図-6に示すように、材齢 7 日、28 日ともに静水圧の作用が大きくなるに従い、圧縮強度が小さくなる傾向を示している。これに対し、図-7には、短期間静水圧下に静置した場合（打設から 7 日目に水中養生から取り出し、各種水圧を 0 (hr) 掛けて強度試験開始）で実施した実験結果を示す。同図において、静水圧環境下に短期間静置したコンクリートの圧縮強度は、静水圧の増加とともに大きくなる傾向を示している。また、表-3において、静水圧下への静置時間による圧縮強度特性を示した。

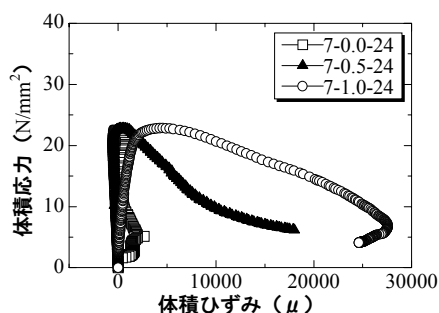
3.3 引張強度試験結果

引張強度試験により得られた実験結果を図-8～図-10に示す。各図は、それぞれ材齢 7 日および 28 日の応力～ひずみ関係であり、図中の記号□、▲および○は、0.0MPa、0.5MPa および 1.0MPa の静水圧下における結果を示している。

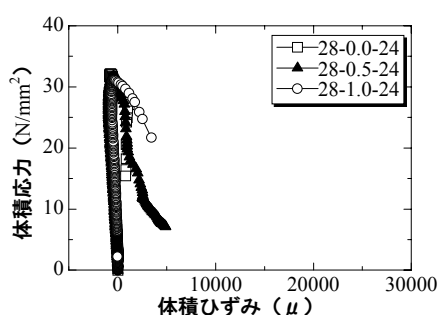
図-8および図-9において、3.2 で述べた圧縮強度試験結果と同様に、材齢 7 日、28 日ともに静水圧の作用が大きくなるに従って引張強度が小さくなる傾向を示している。図-10において、短期間静水圧環境下に静置したコンクリート供試体の引張強度は、静水圧の増加とともに大きくなる傾向を示している。また、表-4においては、静水圧下への静置時間による引張強度特性を示した。

3.4 強度特性メカニズム

短期静置した場合、供試体内部の微細空隙まで水の浸透が殆ど起こらないため、内部の間隙水圧と外部水圧に差が生じ、この水圧の差が載荷時の体積膨張を拘束することによって強度が大きくなるものと考えられる。一方、長期静置された供試体の場合、外部からコンクリート内部への水の浸透現象により供試体内部では分離圧としての間隙水圧が発生する。この間隙水圧は、コンクリート骨格に微細ひび割れを生じさせるとともに静水圧とほぼ等しくなる。したがって、有効応力原理に基づく、静水圧に



図－１１ 体積応力～体積ひずみ曲線
(材齢 7 日, 24 時間静置)



図－１２ 体積応力～体積ひずみ曲線
(材齢 28 日, 24 時間静置)

無関係にコンクリート骨格の強度のみに依存することになる。なお、静水圧が 0.0MPa における長期静置および短期静置されたコンクリートの強度特性の差異は静水圧に無関係であり、表面エネルギーの差異により生じるものと考えられる。

3.5 載荷時の体積変化

図－１１および図－１２は、それぞれ材齢 7 日および 28 日の圧縮試験における体積応力と体積ひずみの関係を示しており、図中の記号□、▲および○は、0.0MPa、0.5MPa および 1.0MPa の静水圧下における実験結果である。

図－１１において、圧縮応力が最大となった時点で体積膨張が顕著に表れており、ポストピーク領域においては、静水圧が大きい程、体積膨張が大きくなっている。これは、ポストピーク領域においてひび割れの進展により供試体内部の微細空隙に存在している間隙水圧がコンクリート骨格を押し広げようとすることに

表－３ 静水圧下への静置時間による
圧縮強度特性

材齢 (日)	静水圧 (MPa)	圧縮強度 (N/mm ²)	
		長期静置した場合	短期静置した場合
7	0.0	22.52	30.87
	0.5	21.81	33.18
	1.0	20.81	35.97
28	0.0	32.23	
	0.5	31.61	
	1.0	30.88	

表－４ 静水圧下への静置時間による
引張強度特性

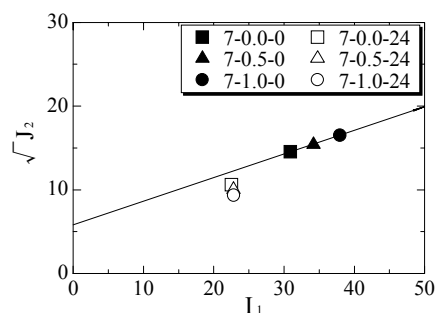
材齢 (日)	静水圧 (MPa)	引張強度 (N/mm ²)	
		長期静置した場合	短期静置した場合
7	0.0	1.91	2.98
	0.5	1.67	3.06
	1.0	1.23	3.43
28	0.0	2.91	
	0.5	2.43	
	1.0	1.78	

より体積膨張が大きくなるものと考えられる。

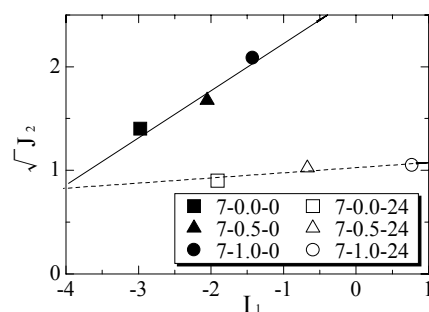
一方、図－１２における材齢 28 日の場合、各材料間の構成が緻密になるため、材齢 7 日の結果と比較すると、ポストピーク領域において生じる体積膨張は、非常に小さなものとなっている。すなわち、コンクリート骨格自体の強度が材齢 7 日に比べて大きいことにより、分離圧である間隙水圧の影響が殆ど生じないことによるものである。

4. コンクリートの有効応力状態

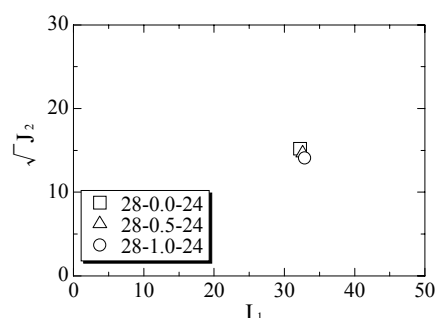
図－１３～図－１６は、図－５～図－１０に示した最大となる応力に対する有効応力状態を $I_1-\sqrt{J_2}$ 平面で描いたものである。図中の■、▲および●は、0.0MPa、0.5MPa および 1.0MPa の静水圧下において 0 (hr) 静置した場合の実験結果を示しており、□、△および○は、0.0MPa、0.5MPa および 1.0MPa の静水圧下において 24 (hr) 静置した場合の実験結果を示している。



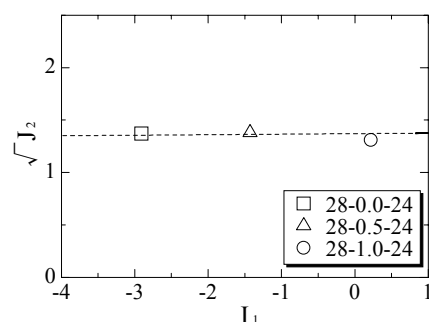
図－１３ I_1 - $\sqrt{J_2}$ 平面における
有効応力状態（材齢 7 日，圧縮）



図－１５ I_1 - $\sqrt{J_2}$ 平面における
有効応力状態（材齢 7 日，引張）



図－１４ I_1 - $\sqrt{J_2}$ 平面における
有効応力状態（材齢 28 日，圧縮）



図－１６ I_1 - $\sqrt{J_2}$ 平面における
有効応力状態（材齢 28 日，引張）

圧縮強度に関しては、図－１３および図－１４において、長期静置した場合は、作用静水圧の大きさに依らず 1 点の降伏曲面上に存在しており、強度が静水圧に依存しないと言える。また、短期静置した場合は、偏差成分は作用静水圧の大きさと体積成分により変化しており、強度特性が静水圧に依存していると言える。

引張強度に関しては、図－１５および図－１６において、長期静置した場合は、体積成分に依らず偏差成分は一定となる傾向を示しており、強度が静水圧に依存しないと言える。また、短期静置した場合は、圧縮の場合と同様に、偏差成分は静水圧の作用と体積成分により変化しており、強度が静水圧に依存していると言える。すなわち、長期に渡ってある静水圧環境下に静置されたコンクリートの力学的特性はせん断変形のみ依存するわけである。

5. 総括

本研究では、静水圧環境下におけるコンクリートの力学的性状の影響評価を行うために、各種静水圧環境下に長期間静置した場合と短期間静置した場合を比較することで静水圧の強度特性に対する評価を行った。以下に本研究により得られた結果を示す。

- 1) 静水圧環境下に静置されたコンクリートの力学的特性は、静水圧の大きさと作用時間に大きく依存する。
- 2) 長期に渡って静水圧下に静置されたコンクリートは、外部からの水の圧入現象により体積膨張を生じる。

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，pp.793-798，1999