

論文 静水圧環境下における RC 梁の曲げ変形性状に関する研究

佐藤 聡平^{*1}・深沢 亮司^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：著者らは静水圧環境下におけるコンクリートの各種強度特性について実験的な評価を行い、静水圧載荷持続時間が長くなるとコンクリートの強度特性は静水圧の値によらず有効応力原理に従うことを明らかにした。本研究では、大深度海洋下における鉄筋コンクリートの曲げ強度特性を詳細に明らかにする目的で、作用静水圧値および静水圧載下持続時間をパラメータとして鉄筋コンクリートの曲げ強度試験を実施し、評価した。その結果、静水圧を長期間載荷することにより、若材齢コンクリートにおける鉄筋コンクリートの曲げ強度は、無筋コンクリートと同様、静水圧によらずほぼ同じ値となることが判明した。

キーワード：静水圧, RC 梁, 曲げ試験

1. はじめに

大深度海洋下および大深度地下コンクリート構造物の変形挙動において、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。そこで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た。

著者ら^{1),2),3)}は、コンクリート表面に MPa オーダ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が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・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 PC 梁の強度特性の評価を目的とし、単鉄筋コンクリート試験体の曲げ強度試験を実施することにより強度特性に及ぼす静水圧の影響を評価した。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に用いた試験体は 15×15×53cm の形状寸法をした角柱試験体であり、引張縁に SD295($\phi=10\text{mm}$)の異形鉄筋を用いた。鉄筋には図-1に示すように鉄筋中央部および中央から各 150mm の位置の表面にゲージ長 20mm のひずみゲージを鉄筋の設置方向上下に貼付し、防水のためにブチルゴム系のテープによりコーティングを施している。さらに同図に示すように試験体中央の上層部、中層部、下層部にモールドゲージを設置し、ひずみを測定した。モールドゲージの名称は鉄筋に近いものからモールド A, モールド B, モールド C とする。また、ひび割れ箇所を支点間中央に特定するために試験体

*1 中央大学大学院 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

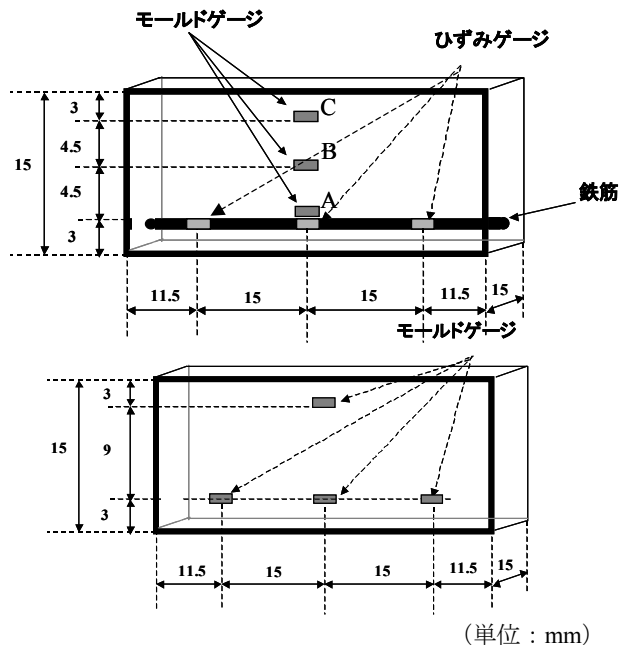
*3 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

表－１ 配合表

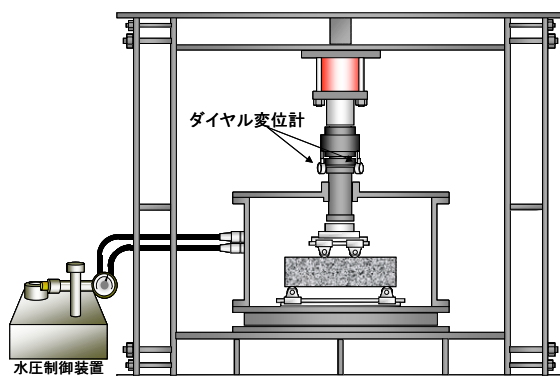
水セメント比 (%)	最大骨材寸法 (mm)	スランブ (cm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
35	20	7	33	136	389	603	1217	6.613

表－２ 曲げ強度試験パラメータ

試験体名	材齢 (日)	載荷時間 (時間)	静水圧 (MPa)
BP-7-0-0.0	7	0	0.0
BP-7-0-0.5			0.5
BP-7-0-1.0			1.0
BP-7-24-0.0		24	0.0
BP-7-24-0.5			0.5
BP-7-24-1.0			1.0
BP-28-24-0.0	28	24	0.0
BP-28-24-0.5			0.5
BP-28-24-1.0			1.0



図－１ 試験体概要図



図－２ 浸透劣化装置

下縁中央部分に幅 5mm の切り欠きを設定した。
なお、各種パラメータの比較のために引用した
無筋コンクリート角柱試験体の形状寸法も合わ

せて図－１に示す。

本実験で使用した材料は、普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³）、骨材は市原市万田野産細骨材（密度：2.59g/cm³）および荒川水系産粗骨材（密度：2.63g/cm³，最大寸法：20mm）とした。コンクリートの配合は、表－１に示す通りである。

2.2 実験装置

実験で使用した浸透劣化装置の概要は図－２に示す通りである。本装置は定吐出型水源により水圧槽内に最大 1MPa の水圧を持続的に作用させた状態において、圧縮・引張・曲げ強度試験などの各種強度試験の実施が可能である。本装置を 3 軸試験機内に設置して荷重を載荷させることにより、水圧槽内で鉄筋コンクリートの曲げ強度試験を行った。

2.3 実験パラメータ

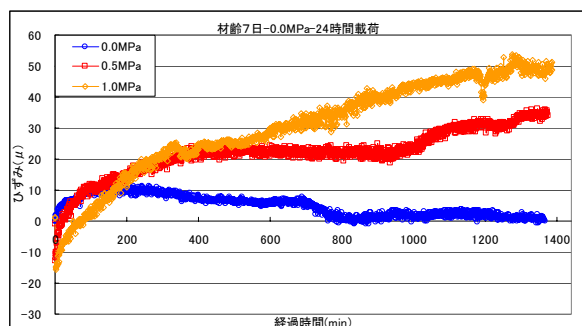
実験方法は、表－２に示すように試験体材齢、静水圧および静水圧を継続的に作用させる時間を実験パラメータとする。実験試験体には以下のような処理を施した後に強度試験を行った。

- 1) 静水圧を 0 時間載荷させた後、すなわち静水圧を載荷した直後に強度試験を行う。（以下、0 時間静置とする。）
- 2) 静水圧を持続的に 24 時間載荷させた後に静水圧を載荷させた状態で強度試験を行う。（以下、24 時間静置とする。）

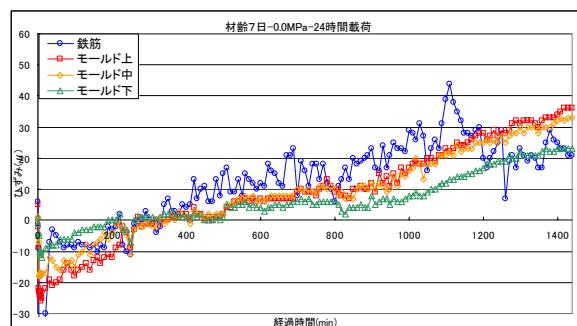
前者は、静水圧が拘束圧として鉄筋コンクリートに作用した際の力学的特性の評価であり、後者はコンクリート内部への水の浸透現象が生じる過程或いは完了した際に分離圧として間隙水圧が生じている状態における力学的特性の評価である。試験体材齢は 7 日および 28 日である。

2.4 曲げ強度試験

2.1 で述べた角柱試験体を用い、支間は 45cm，試験体の張り出し部分は 4cm として 3 等分点載



図－３ 静水圧 24 時間载荷時経時ひずみ変化
(無筋コンクリート³⁾)



図－４ 静水圧 24 時間载荷時経時ひずみ変化
(鉄筋コンクリート)

荷により曲げ強度試験を行った。また、図－２に示すように 2 本のダイヤル変位計 (1/100mm まで測定可能) を圧縮試験機のピストンに設置し、たわみ量を測定した。その計測値の平均をコンクリート試験体の中央部分のたわみ量とした。計測項目は、荷重、たわみ量、図－１に示した各部分のひずみである。なお、载荷速度は 0.5mm/min とした。

3. 分離圧がコンクリートの

変形性状に及ぼす影響

3.1 水分圧入による変形性状

図－３および図－４は無筋コンクリート³⁾および鉄筋コンクリートに各種静水圧を 24 時間载荷した際のひずみの変化量を示したものである。無筋コンクリートのひずみ量は試験体内部のモールドゲージの値を平均したものであり、鉄筋コンクリートの値については図－１に示した各モールドゲージの値および鉄筋に貼付したひずみゲージの値を示している。

無筋コンクリートの 24 時間のひずみ変化を見ると、静水圧载荷直後は静水圧が側圧として作用することにより圧縮ひずみが発生し、その後時間が経過するにつれてコンクリート中に水分が圧入することにより膨張方向のひずみ増分が発生していることがわかる。この傾向は静水圧の値が大きくなるほど膨張量が増大している。

鉄筋コンクリート試験体に静水圧を 24 時間载荷した際のコンクリートおよび鉄筋のひずみの変化も静水圧载荷直後は無筋コンクリートと同

様に圧縮方向に変移するものの、引張縁に設置された鉄筋によりコンクリートの変形が拘束されることで鉄筋に近い部分、つまりモールド A のひずみの圧縮量はモールドゲージ C に比べ小さくなっていることがわかる。また、時間の経過とともにコンクリートは膨張方向に転ずるが、24 時間経過した時点ではモールド A の値よりもモールド B、モールド C と鉄筋から離れた部分ほどひずみが増大している。これは、圧縮の際と同様に鉄筋の拘束の影響によって鉄筋近傍の変形が拘束され、コンクリートの膨張が抑制されたものと考えられる。鉄筋から離れた位置に設置したモールド C のひずみ量は無筋コンクリート³⁾のひずみとほぼ同じ値を示しており、試験体上部においては鉄筋の拘束力の影響はほとんどないものと考えられる。なお、鉄筋のひずみについては水圧によりひずみゲージが正確な値を測定できない部分があったために一部データが欠損している。

3.2 曲げ試験結果

(1) 荷重～たわみ関係による比較

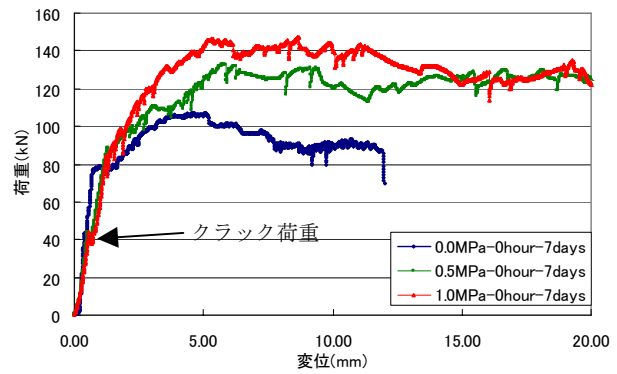
図－５～図－７は静水圧を载荷した状態において曲げ载荷試験を行った鉄筋コンクリート梁部材の荷重～たわみ関係をグラフに示したものである。図－５は静水圧を载荷した直後に曲げ载荷試験を行ったものである。図－６および図－７は静水圧を 24 時間载荷した後に曲げ载荷試験を行ったものであり、前者は材齢 7 日、後者は材齢 28 日である。これらの荷重～たわみ関係のうちひび割れ発生荷重および最大荷重に着目

して整理したものを表－3に示す。なお、荷重段階で荷重が一端急激に低下した時点をクラック荷重と定義する。

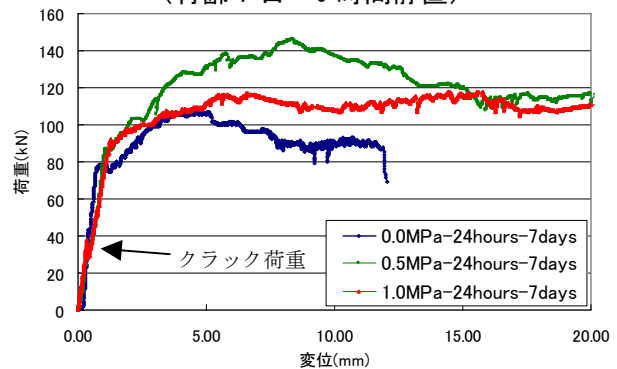
表－3に示すように静水圧環境下に0時間静置した鉄筋コンクリート梁部材のクラック荷重および最大荷重は静水圧の増加とともに大きくなり、最大荷重となる変位量は、逆に小さくなっている。一方、24時間静置した試験体に関しては荷重材齢7日の場合、クラック荷重に大きな差異は無いことに対して、最大荷重は静水圧が0.5MPaである試験体BP-7-24-0.5が最も大きな値となっている。荷重材齢28日の場合、クラック荷重においては荷重材齢7日に同じく静水圧による差異はほとんど無いが、最大荷重は静水圧の増加とともに大きくなっている。このような荷重材齢28日の静水圧による最大荷重の増加現象は、コンクリートの細孔組織が緻密になり外部からの水分圧入を抑制するために生じるものである。細孔組織構造が材齢28日に比べ緻密ではない荷重材齢7日においては、試験体内部への水分圧入現象が有効応力原理を成立させるように、作用するため、表－3に示す試験体BP-7-24-0.0とBP-7-24-1.0のように最大荷重に差異は生じないものと考えられるが、試験体BP-7-24-0.5においては非常に大きな最大荷重を示しており、この原因に関しては強度特性も含めて今後十分に検討したい。

(2) 応力－ひずみ関係による比較

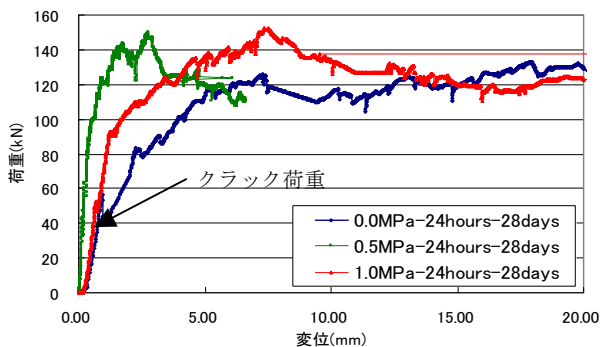
図－8は静水圧環境下に0時間静置した場合、図－9は静水圧環境下に24時間静置した場合の



図－5 荷重－たわみ
(材齢7日・0時間静置)



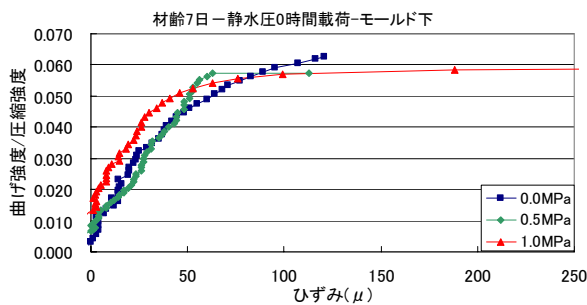
図－6 荷重－たわみ
(材齢7日・24時間静置)



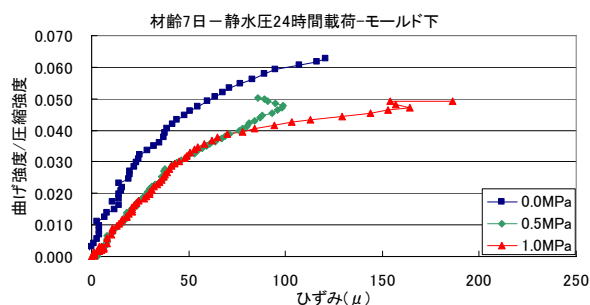
図－7 荷重－たわみ
(材齢28日・24時間静置)

表－3 曲げ強度一覧

試験体名	パラメータ			荷重		圧縮 強度試験 (N/mm ²)
	材齢 (日)	荷重時間 (時間)	静水圧 (MPa)	クラック (kN)	最大荷重 (kN)	
BP-7-0-0.0	7	0	0.0	43.3	107.1	58.8
BP-7-0-0.5			0.5	44.4	140.7	59.7
BP-7-0-1.0			1.0	44.8	148.5	58.8
BP-7-24-0.0		24	0.0	43.3	107.1	58.8
BP-7-24-0.5			0.5	46.5	141.8	57.1
BP-7-24-1.0			1.0	37.5	117.7	61.0
BP-28-24-0.0	28	24	0.0	56.5	133.2	68.6
BP-28-24-0.5			0.5	46.2	152.0	75.8
BP-28-24-1.0			1.0	55.2	155.2	68.7



図－８ 応力－ひずみ曲線（0 時間静置）



図－９ 応力－ひずみ曲線（24 時間静置）

表－４ 試験体中央下部引張り強度試験結果

試験体名	材齢 (日)	荷重時間 (時間)	静水圧 (MPa)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度/圧縮強度
BP-7-0-0.0	7	0	0.0	3.5	58.8	0.059
BP-7-0-0.5			0.5	3.6	59.7	0.060
BP-7-0-1.0			1.0	3.6	58.8	0.061
BP-7-24-0.0		24	0.0	3.5	58.8	0.059
BP-7-24-0.5			0.5	2.8	57.1	0.048
BP-7-24-1.0			1.0	3.0	61.0	0.049
BP-28-24-0.0	28	24	0.0	4.5	68.6	0.066
BP-28-24-0.5			0.5	3.7	75.8	0.049
BP-28-24-1.0			1.0	4.4	68.7	0.064

クラック荷重までの応力－ひずみ曲線をグラフに表したものである。各図の縦軸は試験体強度のばらつきを考慮し、表－４に示すように試験体下部中央の引張強度をコンクリートの一軸圧縮強度で無次元化した値とした。0 時間静置した場合は作用静水圧の値が大きくなるにつれてひずみの値が小さくなっているのに対し、24 時間静置を行った後に強度試験を行った場合は静水圧の値が大きくなるにつれてひずみの値が大きくなっている。

（３） ひずみ分布図

引張鉄筋の中央部および両端に設置したひずみの分布を図－10 に示す。同図(a)～(f)はそれぞれ試験体 BP-7-0-1.0, BP-7-0-0.0, BP-7-24-1.0, BP-28-24-0.0, BP-28-24-0.5, BP-28-24-1.0, である。まず、荷重材齢 7 日に関して、同図(a)および(b)に示した静水圧環境下に 0 時間静置した場合、静水圧が拘束圧として作用しているために変形が拘束され、ひずみが減少しているものと考えられる。一方、同図(c)に示した静水圧環境下に 24 時間静置した場合、水の圧入現象により拘束圧としての静水圧の効果が弱まったために同図(a)に示した 0.0MPa の静水圧環境下のもの

よりも若干ひずみが大きくなっている。また、静水圧環境下における試験体はいずれも 0.0MPa の場合に比べ、中央部と端部とのひずみの差が小さくなっている。

次に、荷重材齢 28 日に関して、同図(d)および同図(e)に示した 0.0MPa と 0.5MPa の静水圧環境下においては、ひずみの差異はほとんど見られないものの、同図(f)に示した 1.0MPa の静水圧環境下においてはクラック荷重時のひずみが他の静水圧の試験体に比べて大きくなっている。また同図(a)～(c)に示した材齢 7 日の場合に比べると、クラック荷重時のひずみが減少していることがわかる。これは、材齢が 28 日のコンクリートは材齢 7 日よりもコンクリート自体の強度が大きく、内部の細孔組織も緻密化していることから水分圧入が抑制されることにより、静水圧がわずかながら拘束圧として作用し、ひずみが減少したのと考えられる。

3.3 強度特性メカニズム

曲げ試験結果から考えられる静水圧環境下におけるコンクリートの力学特性メカニズムについて以下に示す。

静水圧環境下に 0 時間静置した場合すなわち

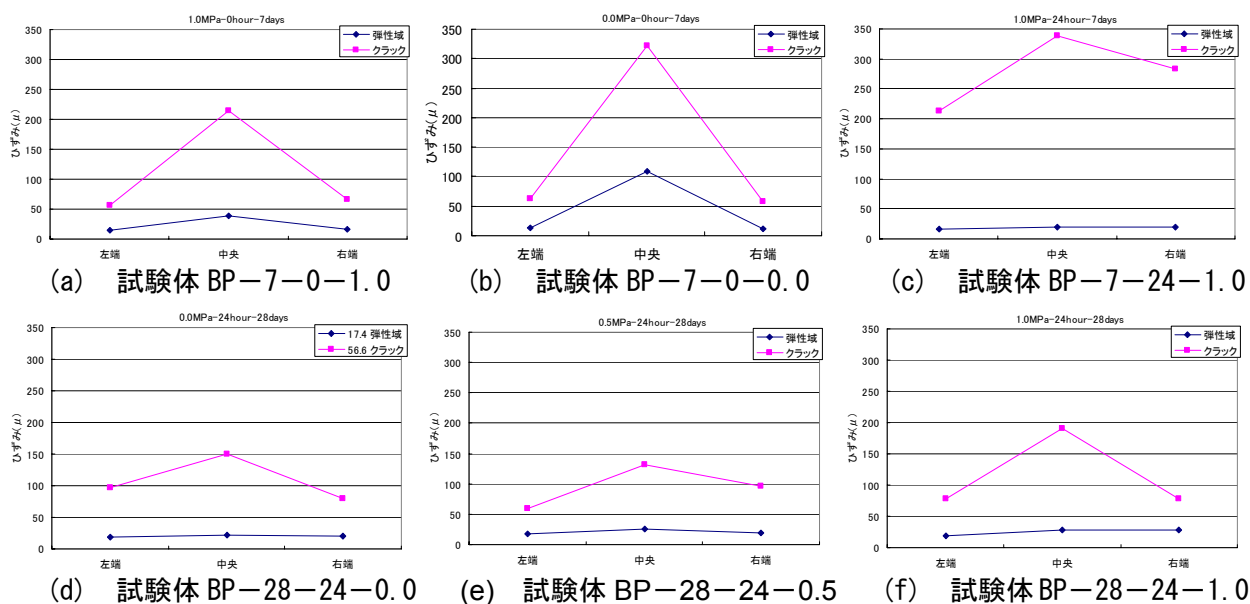


図-10 ひずみ分布

0 時間静置した際には試験体内部の微細空隙までの水の浸透が殆ど起こらないためにコンクリート内部の間隙水圧と外部静水圧に大きな差異が生じる。この水圧の差が、載荷時の試験体の変形を拘束することによって作用する静水圧が大きくなるほど強度が大きくなるものと考えられる。また、たわみ量に関しても同様な要因により試験体の変形が拘束されているため、静水圧の作用が大きいほどたわみ量が小さく、試験体下部の引張方向のひずみも小さくなっていると考えられる。

24 時間静置された試験体の場合、静水圧の効果により外部からコンクリート内部への水の浸透現象が生じ、骨格全体が濡れの状態にあるため表面エネルギーの観点から延性的挙動を示すものと思われる。このような性状は、岩盤の分野でも一般的に指摘されていることである。

4. まとめ

本研究では静水圧環境下における鉄筋コンクリートの曲げ強度特性の影響評価を行うことを目的に各種静水圧環境下で強度試験を実施し、0 時間静置を行った後に載荷試験を行った場合と 24 時間静置した後に載荷試験を行った場合を比較することで静水圧がコンクリートの力学的特性に与える影響について評価した。本実験結果

から明らかになったことを以下にまとめる。

- 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作用静水圧の大きさと作用時間に大きく影響する。
- 2) 静水圧を長期間載荷することにより、若材齢コンクリートにおける鉄筋コンクリートの曲げ強度は、無筋コンクリートと同様、静水圧によらずほぼ同じ値となることが判明した。

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報告集, 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報告集, vol.25, 第1号, pp.371-376, 2003