

論文 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

松下 博憲^{*1}・佐藤 聡平^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：著者らは大深度静水圧下におけるコンクリートの圧縮および引張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上述の強度特性は静水圧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曲げ強度試験を実施し評価した。その結果、静水圧の値および載荷持続時間が長くなると、曲げ強度が小さくなることが明らかとなった。

キーワード：静水圧下曲げ性状, $I_1 - \sqrt{I_2}$ 平面

1. はじめに

近年、大深度海洋構造物や大深度地下構造物などのコンクリート構造物の利用が注目されている。これらの構造物においては常時荷重として静水圧がコンクリート表面に直接作用している。また、建造後の保守および補修が非常に困難なこともあり、これらの構造物は補修なくして長期にわたる耐久性の確保が必要不可欠である。

従来、大深度海洋下或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てきた。しかしながら、水深数百メートルに施工されるコンクリート構造物には MPa オーダーの静水圧が作用し、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となる。著者らは、多孔質透水性材料であるコンクリートに水が直接作用すると水の透水現象が生じ、透水現象は時としてコンクリートの破壊を引き起こすことを報告している¹⁾。また、大深度静水圧下におけるコンクリートの圧縮および引張強度特性について実験的な評価を行い、圧縮および引張強度は、作用時間が長く、静水圧の値が大きくなるほど小さくなるこ

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、有効応力原理に従うことも指摘した²⁾。しかしながら、静水圧環境下における曲げ挙動に関する研究は実施されておらず、実際の構造物を考える上でも曲げ挙動に関する詳細な解明が必要である。

そこで本研究では、大深度海洋下或いは大深度地中下を模擬することのできる浸透劣化装置を用い、各種静水圧下におけるコンクリートの曲げ強度特性の評価を行うことを目的とし、静水圧が作用した状態下での曲げ強度試験を実施した。そして、各種静水圧がコンクリートの曲げ強度特性に及ぼす影響評価に関する検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は、 $15 \times 15 \times 53 \text{ cm}$ の形状寸法をした角柱供試体であり、**図-1**のように供試体内部にひずみゲージを設置した。また、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/cm^3 ）、骨材は市原市万田野産細骨材（密度： 2.59 g/cm^3 ）および荒川水系産粗骨材（密度： 2.63 g/cm^3 、最大寸法： 20 mm ）とした。なお、コンクリートの配合は、**表-1**に示す通りであ

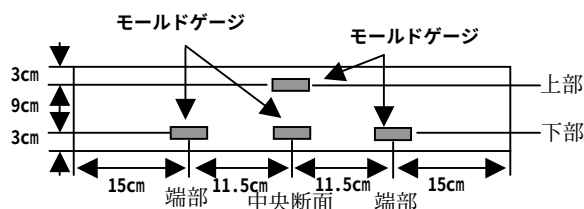
*1 中央大学 理工学部土木工学科 （正会員）

*2 中央大学 理工学部土木工学科 （仮会員）

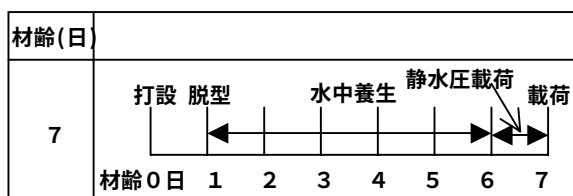
*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 （正会員）

表－１ コンクリートの配合表

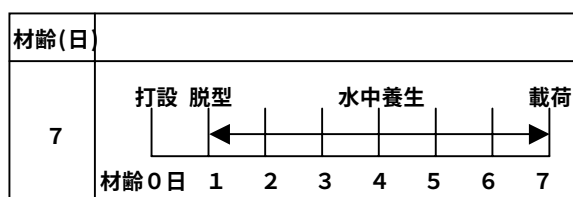
水セメント比 (%)	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単用量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
35	20	7	33	136	389	603	1217	6.613



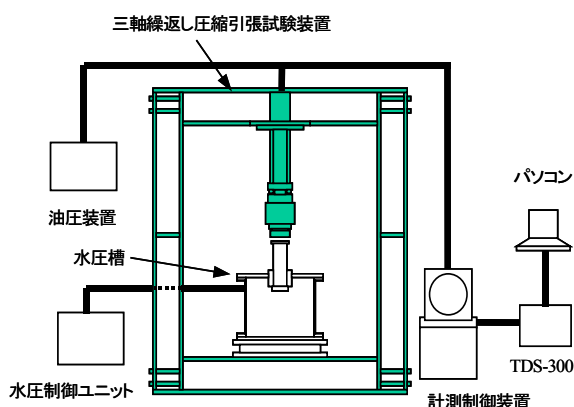
図－１ モールドゲージ配置図



図－２ 24 時間静置する場合の
供試体の処理方法



図－３ 0 時間静置する場合の
供試体の処理方法



図－４ 試験装置概要

り、打設から試験までの供試体の処理方法は、図－２および図－３に示す通りである。処理方法に関しては実験パラメータに関連付けて説明を行うこととする。

2.1 実験装置

浸透劣化装置の概要は、図－４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、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、水圧槽内の供試体に載荷することが可能となる。

2.2 実験パラメータ

実験方法は、表－２に示すように静水圧 (MPa) および静水圧を作用させる時間を実験パラメータとし、供試体の処理方法は、(1) コンクリート供試体を水槽内に設置して、所定の静水圧を作用させた直後、すなわち静水圧を 0 時間作用させた後に曲げ強度実験を実施したものと、(2)所定の静水圧を 24 時間に渡って持続的に作用させた後に曲げ強度実験を実施するものの 2 種類である。前者は、従来と同じ 3 軸試験による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る。なお、曲げ荷重の載荷は材齢 7 日であり、載荷速度は 0.5mm/min である。

2.4 曲げ強度試験

2.1 で述べた角柱供試体を用い、支間は 45cm、供試体の張り出し部分は 4cm として 3 等分点載荷により曲げ強度試験を行った³⁾。また、図－５のように 4 本の高感度変位計 (1/1000mm まで測定可能) を三軸試験機のピストンおよび水槽上部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供試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、各部分のひずみおよび水温 (熱電対

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

により計測)である。

2. 分離圧がコンクリート

の変形状に及ぼす影響評価

3.1 水分圧入による変形状

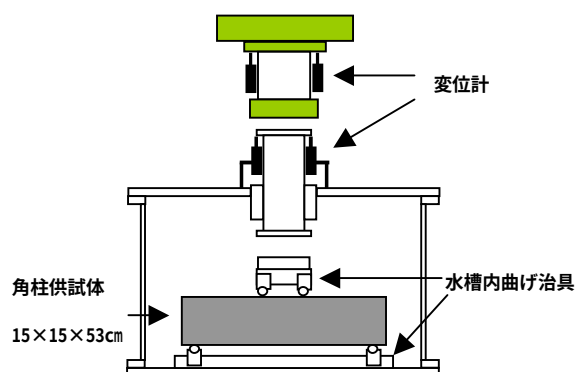
図－６および図－７は、24 時間各種静水圧を与え続けたときのひずみ変化を表しており、図の記号□、▲および○は 0.0MPa、0.5MPa および 1.0MPa の静水圧を作用させた場合を示している。図－６は著者らによる²⁾ W/C が 55% の場合を示し、図－７は今回行った W/C が 35% の場合を示している。なお、ひずみは各ゲージのひずみを平均したものである。

静水圧载荷直後、弾性変形により、その値は静水圧が大きいほど大きくなる。その後、供試体は徐々に膨張し、静水圧が大きいほど膨張量も大きくなる。このような時間の経過とともに供試体が膨張する現象は、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が分離圧として骨格に作用することによるもの、湿潤膨張によるものおよび分離圧によるクリープによるものと考えられる。

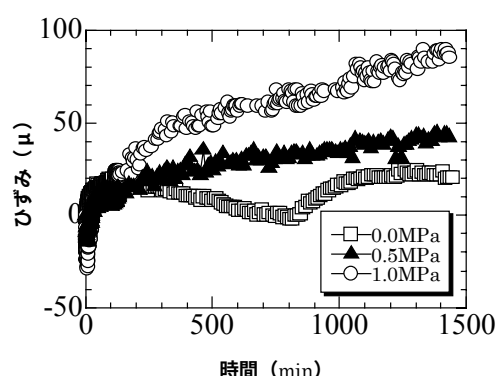
図－６、図－７を比較してみるとわかるように、W/C が低くなると供試体内部の組織が緻密となり、水の圧入現象が抑制されることにより、膨張も少なくなっていることがわかる。

3.2 曲げ強度試験結果

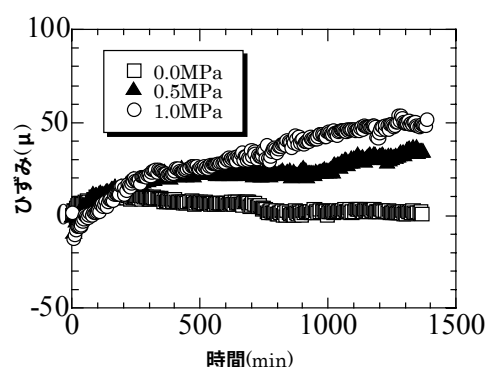
曲げ試験により得られた荷重～たわみの関係を図－８、図－１２に、図－１に示す下部中心断面部における応力～ひずみの関係を図－９～図－１１、図－１３～図－１５に示す。なお、図中に示す記号□、▲および○は、0.0MPa、



図－５ 曲げ試験水槽内



図－６ 静水圧下に24時間静置した時のひずみの変化(W/C=55%)



図－７ 静水圧下に24時間静置した時のひずみの変化(W/C=35%)

0.5MPa および 1.0MPa の静水圧下における結果を示し、図－８～図－１５に示す縦軸は表－３および表－４に示すようにコンクリート強度のばらつきを考慮して曲げ強度および曲げ荷重をそれぞれコンクリートの一軸圧縮強度およびその時点の荷重（以下、圧縮荷重と称す）で無次元化した値である。また、表－３は曲げ供試体

の中央および端のひずみゲージを設置した位置での曲げ強度を示している。

表－３ 各供試体の曲げ強度
および圧縮強度

供試体名	曲げ強度	圧縮強度	(曲げ強度)
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	/(圧縮強度)
7-0.0-0	2.95	4.38	0.0674
7-0.5-0	3.03	43.8	0.0691
7-1.0-0	3.19	43.8	0.0729
7-0.0-24	2.95	43.8	0.0674
7-0.5-24	3.42	54.6	0.0626
7-1.0-24	3.3	53.2	0.0621

表－４ 各供試体の曲げ荷重
および圧縮荷重

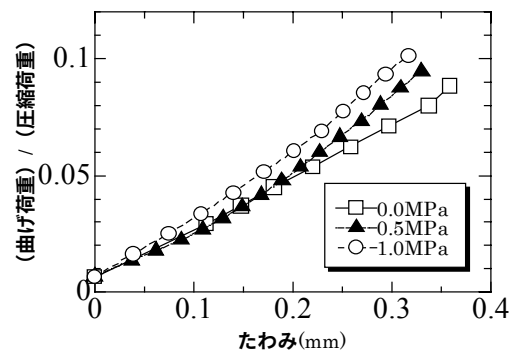
供試体名	曲げ荷重	圧縮荷重	(曲げ荷重)
	(kN)	(kN)	(圧縮荷重)
7-0.0-0	3 6.9	3 4 3.7	0.1 0 7
7-0.5-0	3 7.8	3 4 3.7	0.1 1 0
7-1.0-0	3 9.9	3 4 3.7	0.1 1 6
7-0.0-2 4	3 6.9	3 4 3.7	0.1 0 7
7-0.5-2 4	4 2.7	4 2 8.5	0.1 0 0
7-1.0-2 4	4 1.3	4 1 7.5	0.0 9 9

(1) 0 時間静置した場合

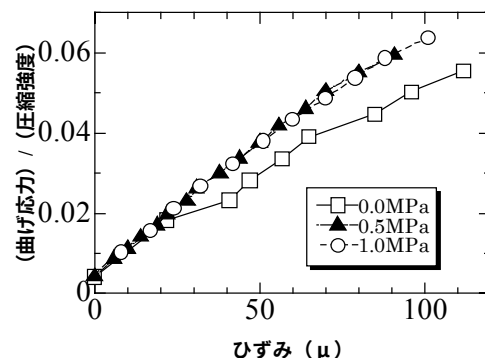
図－８～図－１１に、短期間静水圧下に静置した後に試験を行った場合（打設から７日目に水中養生から取り出し、各種静水圧を０時間掛けて曲げ強度試験開始）で実施した実験結果を示す。各図に示すように、静水圧環境下に短期間静置したコンクリートの曲げ強度は、静水圧の増加とともに大きくなり、たわみおよび供試体下中央部の引張方向のひずみは小さくなる傾向を示している。

(2) 24 時間静置した場合

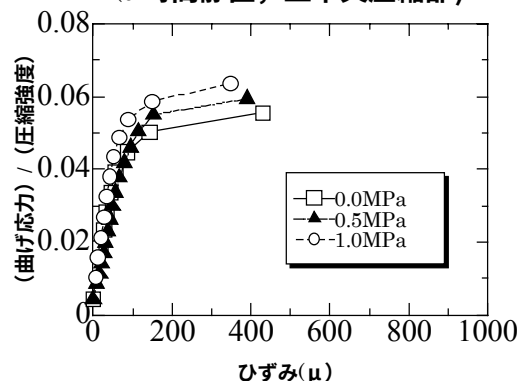
図－１２～図－１５に、それぞれ 24 時間静水圧環境下に静置した後に試験を行った場合（打設から 6 日目に水中養生から取り出し各種静水圧を 24 時間掛けてから曲げ強度試験開始）で実施した実験結果を示す。各図に示すように静水



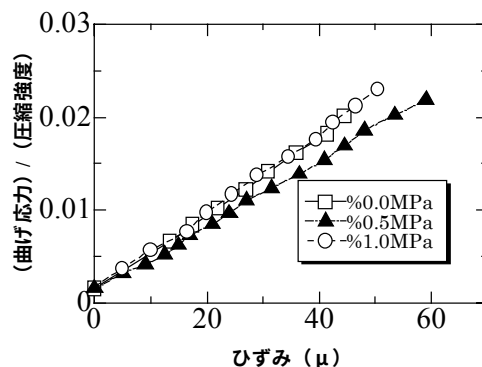
図－８ 荷重～たわみ曲線
(0 時間静置)



図－９ 応力～ひずみ曲線
(0 時間静置，上中央圧縮部)



図－１０ 応力～ひずみ曲線
(0 時間静置，下中央引張部)



図－１１ 応力～ひずみ曲線
(0 時間静置，下端引張部)

表－５ 各種パラメータにおける
曲げ強度特性

静水圧 (MPa)	(曲げ強度)/(圧縮強度)	
	0時間静置	24時間静置
0.0	0.0674	0.0674
0.5	0.0691	0.0626
1.0	0.0729	0.0621

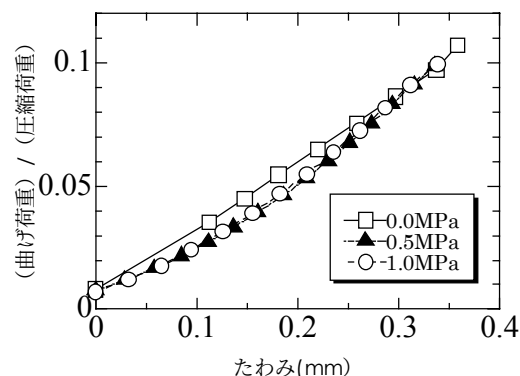
圧の作用が大きくなるに従い、曲げ強度が小さくなり、供試体下部の引張方向のひずみが大きくなる傾向を示している。このことから、0時間静置の場合とは逆の傾向を示していると言える。また、表－５において、各種パラメータにおける曲げ強度特性（下縁中央部の曲げ強度を圧縮強度で無次元化したもの）を示した。

3.3 強度特性メカニズム

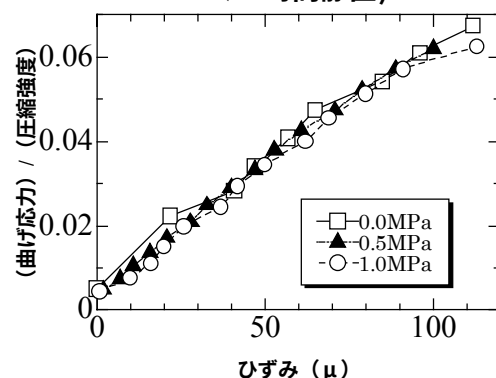
上述の曲げ試験結果から考えられるメカニズムについて以下に示す。0時間静置した場合、供試体内部の微細空隙までの水の浸透が殆ど起こらないため、内部の間隙水圧と外部水圧に差が生じ、この水圧の差が載荷時の供試体の変形を拘束することによって作用する静水圧が大きくなるほど強度が大きくなるものと考えられる。また、たわみ量に関しても同様な要因で、供試体が破壊するまで変形が拘束されているため、静水圧の作用が大きいほどたわみ量が小さく、供試体下部の引張方向のひずみも小さくなっていると考えられる。一方、24時間静置された供試体の場合、外部からコンクリート内部への水の浸透現象により供試体内部では分離圧としての間隙水圧が発生する。この間隙水圧は、作用静水圧の大きさにより、コンクリート内部において分離圧として作用する。これらの領域内部においては、コンクリート骨格に微細なひび割れを生じさせるとともに、表面エネルギーの観点から延性的となる。

4 コンクリートの有効応力状態

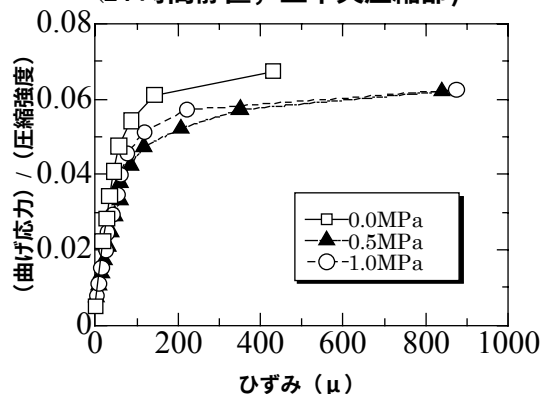
図－１６は、表－５に示すコンクリート下縁の曲げ引張応力の最大値に対する有効応力状態



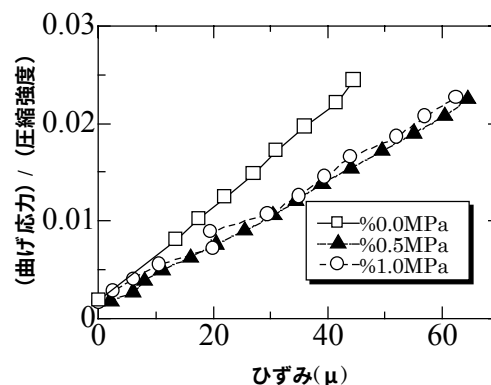
図－１２ 荷重～たわみ曲線
(24時間静置)



図－１３ 応力～ひずみ曲線
(24時間静置，上中央圧縮部)



図－１４ 応力～ひずみ曲線
(24時間静置，下中央引張部)



図－１５ 応力～ひずみ曲線
(24時間静置，下端引張部)

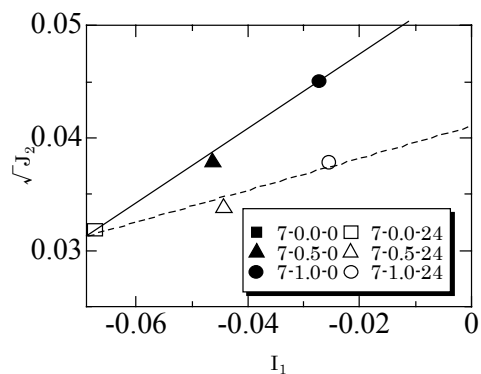


図-16 $I_1 - \sqrt{J_2}$ 平面における有効応力状態(下中央引張部)

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 時間静置してから試験を行っ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 時間静置してから試験を行った場合の実験結果を示している。図-16において, 0 時間静置した場合は, 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大きく依存していることが言える。一方, 24 時間静置した場合も偏差成分は作用静水圧と体積成分により変化しているが, 0 時間静置した場合と比べ変化が小さくなっており, 静水圧による影響が小さいということが言える。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, せん断変形の影響に大きく依存するわけである。実験結果では, 24 時間静水圧下に静置した場合も静水圧の影響を多少受けているが, これは W/C を 35% と低く設定しているためおよび静水圧下への静置時間が 24 時間と短かったため, コンクリート内部への水の浸透が完全に完了していなかったことが原因と考えられる。したがって, コンクリート内部への浸透現象が完全に完了すると長期間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と考えることができる。

5 まとめ

本研究では, 静水圧環境下における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 (0.0MPa, 0.5MPa, 1.0MPa) に長期間静置 (24 時間静置) 後に試験を行った場合と短期間静置 (0 時間静置) 後に試験を行っ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。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を受ける。
- 2) 長期間に渡り静水圧環境下に静置されたコンクリートは, 外部からの水の圧入浸透現象により時間とともに体積膨張を生じる。また, 体積膨張はコンクリートの W/C に大きく影響を受ける。
- 3) 水圧载荷持続時間が長くなるとコンクリートの曲げ強度は, 圧縮および引張強度特性と同様に作用する静水圧の値が大きく, 作用時間が長くなるほど小さくなり, 有効応力原理に従う。

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
- 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) 土木学会 コンクリート委員会, コンクリート標準示方書改訂小委員会: 2002 年制定 コンクリート標準示方書 [規準編], 社団法人 土木学会, pp291-294, 2002