

論文 水セメント比と乾湿がコンクリートの曲げ強度に及ぼす影響

来海 豊^{*1}

要旨：本研究では、水セメント比が 25, 30, 35, 40, 45, 50 および 55% で、強度的にも広範囲なコンクリートを対象とし、乾湿が曲げ強度に及ぼす影響について検討した。その結果、1) 気中乾燥 150 日程度の曲げ強度は水中養生終了直後の値と比べて、水セメント比がおおむね 40% 程度より低い場合は低く、これよりも高い場合には高くなることがわかった。2) 気中乾燥 28 日後に吸水させると曲げ強度は上昇し、水セメント比にかかわらず、水中養生終了直後の強度以上の値となったが、この吸水による強度上昇は、主に内部応力の作用によるものと考えられた。

キーワード：曲げ強度、水セメント比、乾湿、コンクリート

1. はじめに

コンクリートは、乾燥により収縮し、吸水により湿潤膨張する。そのため、コンクリート部材が乾湿作用を受けると、一般に断面内において内部拘束による応力分布を形成し、いわゆる内部応力が発生する。さらに、高強度コンクリート部材では、自己収縮が無視できなくなるため、自己収縮に起因する応力も重ね合わされて乾湿に伴う内部応力となる。このような内部応力は、コンクリート構造物にひび割れの発生や応力状態の変化等をもたらす危険性がある。

乾湿に伴う内部応力は、当然、コンクリートの強度にも影響を及ぼす。曲げ強度に関しては、乾燥による強度低下に着目し、内部応力分布を検討した報告¹⁾²⁾³⁾等がみられる。その中には、乾燥により一度低下した曲げ強度が乾燥期間 28 日で乾燥前の強度まで回復したという報告³⁾もある。また、コンクリートの強度自体が脱水により上昇し、水分の吸着により低下することの説明を試みた報告⁴⁾もある。しかし、曲げ強度は乾燥により上昇するのか、低下するのか、乾燥後に再吸水したら曲げ強度はどのように変化するのか等に関して、いまだ不明な点が多いのが現状である。したがって、今後の構造物の

信頼性を確保していくためには、少なくとも、コンクリート組織の粗密さ、乾燥期間や吸水期間等の影響を考慮した検討を行い、曲げ強度性状を解明していく必要があると考えられる。

そこで、本研究では、水セメント比が 25, 30, 35, 40, 45, 50 および 55% で、強度的にも広範囲なコンクリートを対象とし、乾湿がコンクリートの曲げ強度に及ぼす影響について検討した。その検討に当たっては、「水中養生中の強度性状」、「乾燥による強度性状の変化」および「乾燥後の再吸水による強度性状の変化」の 3 項目について実験を行っている。

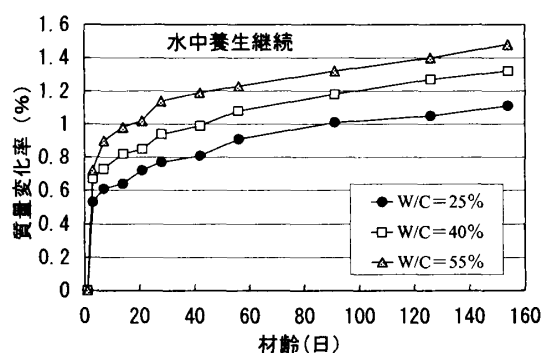
2. 実験の概要

使用したセメントは、普通ポルトランドセメントである。粗骨材には表乾密度が 2.63g/cm^3 で最大寸法 15mm の硬質砂岩碎石を用い、細骨材には表乾密度が 2.61g/cm^3 の砕砂を用いた。そして、コンクリートの配合については、水セメント比 (W/C) が 25, 30, 35, 40, 45, 50 および 55% の表 1 に示すものとした。混和剤は、実験の単純化の観点から、すべての配合でポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。その添加量は、W/C が 25, 30, 35 および 40% の

^{*1} 明星大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

表一 コンクリートの配合と圧縮強度

水セメント比(%)	単位量(kg/m ³)				圧縮強度(N/mm ²)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	
25	170	680	745	813	98.9
30	170	567	777	849	85.2
35	170	486	803	877	78.7
40	170	425	821	896	69.2
45	170	377	840	917	59.7
50	170	340	847	926	53.4
55	170	309	861	940	45.4

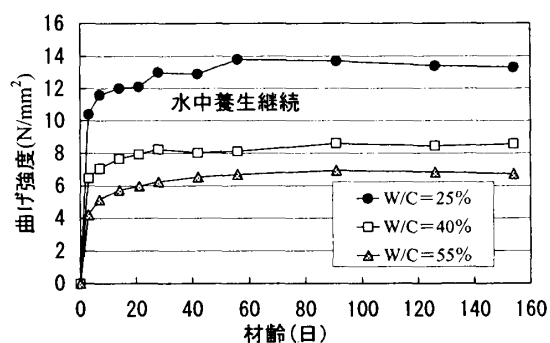


図一 2 質量変化率と材齢との関係

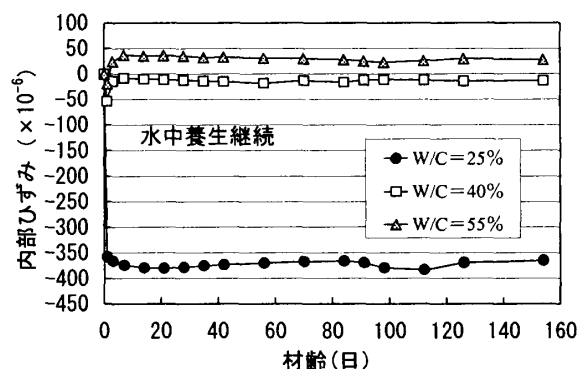
場合に目標スランプフローがそれぞれ 75, 65, 55, 45cm となるように, W/C が 45, 50 および 55% の場合に目標スランプが 13cm となるように定めた。なお, 表一 1 には, 配合とともに, 標準水中養生供試体 (D100×200mm 円柱) によるコンクリートの材齢 28 日圧縮強度を示す。

実験は, 前記の 3 検討項目に対応して実験 A, 実験 B および実験 C に分かれる。実験 A では, 水中養生を材齢 154 日まで継続した場合の曲げ強度性状を調べた。実験 B では, 材齢 28 日まで水中養生を行った後に供試体を 20℃で相対湿度 60%の恒温・恒湿室内の気中乾燥環境に置き, 水中養生終了直後, 乾燥期間が 1 日, 3 日, 7 日, 14 日, 21 日, 28 日, 42 日, 56 日, 91 日, 126 日, 154 日の曲げ強度を測定した。実験 C では, 材齢 28 日まで水中養生を行い, その後前記の気中乾燥環境に 28 日間置いた供試体を再度水中に浸せきし, 浸せき直前, 浸せき期間が 1 日, 3 日, 7 日, 14 日, 21 日, 28 日, 42 日, 56 日, 91 日の曲げ強度を測定した。

なお, いずれの実験においても, 曲げ強度の



図一 1 曲げ強度と材齢との関係



図一 3 内部ひずみと材齢との関係

他, 供試体の質量と内部ひずみの経時変化を測定した。供試体はすべて 100×100×400mm の角柱とし, 脱型は材齢 1 日で行った。内部ひずみ測定用供試体は中央断面の中心にゲージ長 100mm の埋込みゲージを配置したものであり, 型枠には内側全面にテフロンシートを 2 枚重ねて配置したものをを用いた。そして, ひずみは, 供試体成形直後を原点として測定した。

3. 実験結果および考察

以下に示す実験データについては, 曲げ強度と質量変化率は供試体 3 体の平均値であり, 内部ひずみは供試体 2 体の平均値である。

3.1 水中養生中の強度性状

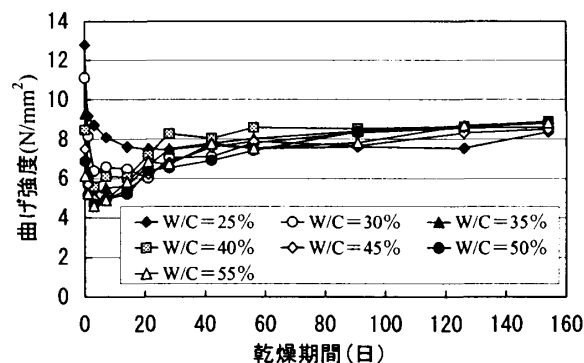
図一 1 は, 実験 A における W/C が 25, 40 および 55% の場合について, 水中養生を材齢 154 日まで継続した場合の曲げ強度と材齢との関係を示したものである。いずれの場合の曲げ強度も, 材齢 28 日程度までは強度増進が認められる

が、それ以降はほとんど変化していない。そして、W/C が低いほど高くなっており、W/C が 25% の場合の曲げ強度は W/C が 55% の場合の 2 倍程度の値を示している。また、W/C が 40% の場合の曲げ強度は、W/C が 25% の場合と 55% の場合の中間値というよりは W/C が 55% の場合に近い値となっている。

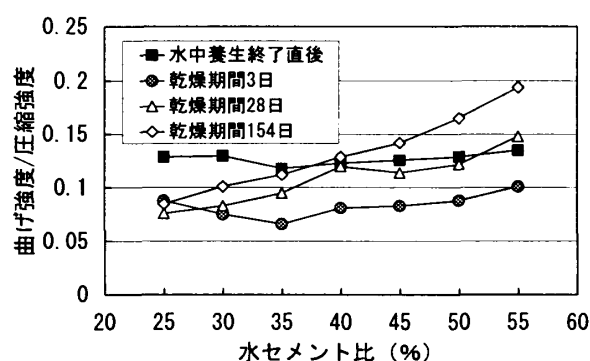
図一 2 には、実験 A に用いた供試体について、(各時点の質量－脱型時質量) を質量変化量とし、この質量変化量の脱型時質量に対する百分率として定義した質量変化率と材齢との関係を示す。いずれの場合の供試体質量も、水中養生中に材齢の経過とともに増加しており、組織が緻密な W/C が 25% の場合にも供試体表面から水が浸透していると考えられる。なお、W/C が低い場合には、水中養生中でも供試体内部は自己乾燥状態となり、表面部の吸水による湿潤膨張が内部に拘束されるために表面部に圧縮応力が生じり、この圧縮応力が曲げ強度に影響を及ぼすことが考えられる。

図一 3 には、実験 A における W/C が 25, 40 および 55% の場合について、供試体成形直後を原点とした中心部の内部ひずみと材齢との関係を示す。W/C が 25% の場合には、脱型時に自己収縮に起因する大きな収縮ひずみを生じ、その後水中養生を材齢 154 日まで継続しても収縮ひずみにほとんど変化が認められない。したがって、材齢 154 日までの水中養生中に表面から水が浸透しても、内部の自己乾燥も継続するために、内部拘束状態が保持されているものと推察される。

W/C が 40 および 55% の場合も、脱型時に若干の収縮ひずみを生じた後に水中養生を開始すると膨張方向に向かい、W/C が 40% の場合はわずかな収縮ひずみ、W/C が 55% の場合にはわずかな膨張ひずみを生じ、材齢 154 日までほぼ一定の値となっている。この両者の性状を比較する時、脱型時のひずみに差が多少みられるのは、W/C が 40% の場合には自己収縮の影響が若干含まれているためではないかと思われる。



図一 4 曲げ強度と乾燥期間との関係



図一 5 曲げ強度の圧縮強度に対する比

3.2 乾燥による強度性状の変化

図一 4 には、実験 B における W/C が 25, 30, 35, 40, 45, 50 および 55% の場合について、水中養生終了直後からの曲げ強度と乾燥期間との関係を示す。いずれの場合も、水中養生後に乾燥させると強度低下を生じ、28 日程度までの乾燥期間内に最低強度に至っている。強度低下を生じた後の曲げ強度には乾燥期間の経過に伴って上昇する傾向がみられ、最低強度からの上昇割合は W/C が高い方が大きくなっている。

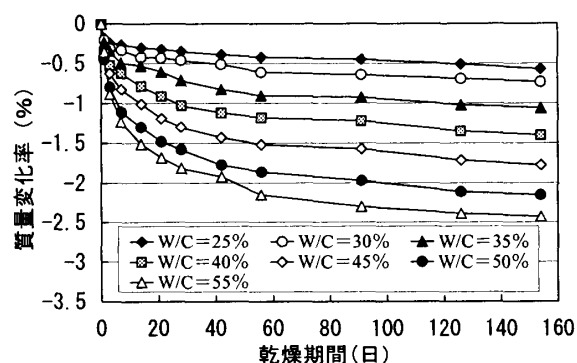
図一 5 には、図一 4 に示したデータについて、各時点における曲げ強度の材齢 28 日標準水中養生圧縮強度に対する比と水セメント比(W/C)との関係を示す。水中養生終了直後の曲げ強度は、W/Cにかかわらず、圧縮強度の 1/8 程度となっている。しかし、この強度比は圧縮強度の増大につれて小さくなることから従来から知られており⁵⁾、W/Cが低い場合には、前記の水中養生

中に供試体表面部に生じる圧縮応力が曲げ強度を高くしている可能性も考えられる。

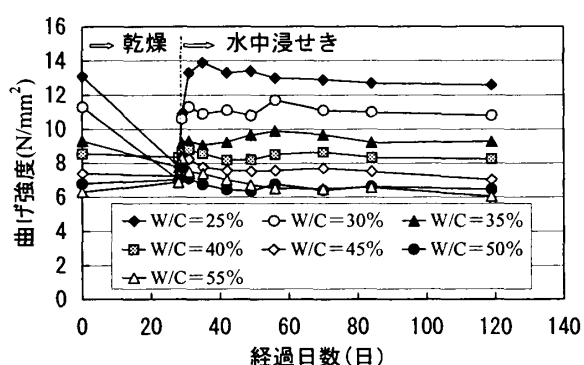
一方、乾燥期間 3 日では、いずれの W/C の場合の曲げ強度も水中養生終了直後の値より低くなっているが、乾燥期間 28 日では W/C が 40% 以上の場合の曲げ強度は水中養生終了直後の強度とほぼ同等の値を示しており、その中には若干高い値もみられる。そして、乾燥期間 154 日の曲げ強度は、水中養生終了直後の値に対して、W/C がおおむね 40% 程度より低い場合には低く、これより高い場合には高くなっている。

図一 6 には、実験 B に用いた供試体について、(各時点の質量－水中養生終了時質量)を質量変化量とし、この質量変化量の水中養生終了時質量に対する百分率として定義した質量変化率と水中養生終了直後からの経過日数(乾燥期間)との関係を示す。いずれの場合の質量も乾燥期間の経過に伴って減少し、その減少は W/C が高いほど大きくなる傾向にある。W/C が 25% の場合には、乾燥期間が 154 日においても質量減少率は 0.57% であり、脱水量は材齢 28 日までの水中養生中の吸水量と比べても若干少ない。したがって、この場合は、組織が緻密で内部が自己乾燥状態となることから、主に表面部付近が脱水されることによって質量減少を生じていると考えられる。換言すると、水中養生中に供試体表面部に生じていた圧縮応力が乾燥により減少していくことが大幅な強度低下の主な原因になっていると推測される。また、最低強度に達してからは、乾燥期間の経過に伴って脱水による強度自体の上昇⁴⁾も生じていると思われる。

これに対し、W/C が 55% の場合には、乾燥期間が 154 日で 2.43% の質量減少を生じ、材齢 28 日までの水中養生中に吸収した水量の 2 倍程度の脱水量となっており、供試体全体が乾燥していると考えられる。この場合の乾燥初期の強度低下は、供試体表面部から乾燥していくために内部は湿った状態であり、内部拘束による引張応力が表面部に作用することが主な原因になっていると考えられる。その後、内部まで乾燥が



図一 6 質量変化率と乾燥期間との関係



図一 7 曲げ強度と経過日数の関係

進行すると表面部の引張応力が消失していくとともに、脱水による強度自体の上昇⁴⁾を生じ、曲げ強度は、水中養生終了直後の値よりも高くなっていると推察される。

すなわち、気中乾燥 150 日程度の曲げ強度は、内部応力の発生に自己乾燥の影響が関与するコンクリートの場合には水中養生終了直後の値よりも低く、自己乾燥が問題とならないようなもの場合には逆に高くなるようである。なお、W/C が 25% の場合の最低強度および 154 日乾燥強度はそれぞれ水中養生終了直後の強度の 58.4% および 65.4% となっており、W/C が低い場合の強度変化には、供試体表面部に生じる圧縮応力のような内部応力の変化の影響が大きく、脱水による強度自体の上昇の影響は小さいと考えられる。これに対し、W/C が 55% の場合の最低強度および 154 日乾燥強度はそれぞれ水中養生終了直後の強度の 75.1% および 144% となっ

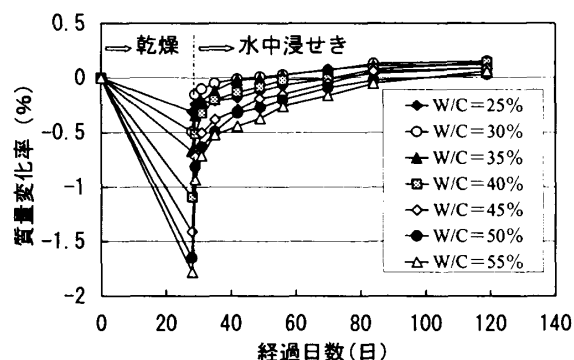
ていることから、W/C が比較的高い場合には、内部応力の変化に加えて、脱水による強度自体の上昇の影響が顕著に現れていると思われる。

3.3 乾燥後の再吸水による強度性状の変化

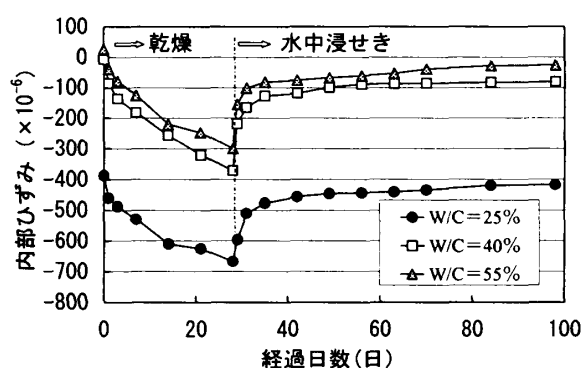
図一 7 には、実験 C における W/C が 25, 30, 35, 40, 45, 50 および 55% の場合について、材齢 28 日までの水中養生終了直後からの曲げ強度と経過日数との関係を示す。W/C が 25, 30 および 35% の場合の曲げ強度は、乾燥後に水中に浸せきすると急激に上昇して 1～2 日で水中養生終了直後とほぼ同等の値まで回復し、その後大きな変化はみられない。

一方、W/C が 55% の場合の曲げ強度は、水中に浸せきすると乾燥により若干上昇した値からさらに上昇するが、浸せき期間の経過に伴ってほぼ水中養生終了直後の値まで低下している。W/C が 40, 45 および 50% の場合には、28 日乾燥後の曲げ強度は水中養生終了直後と大差ない値となっているが、W/C が 55% の場合と同様に水中浸せきにより強度は上昇し、浸せき期間とともに低下する傾向がみられる。この内の W/C が 40% の場合には、水中養生終了直後の強度と 28 日間乾燥後の強度との差も非常に小さく、乾燥後の強度と水中浸せきにより上昇した最大強度との差も W/C が 25～55% の範囲で最も小さくなっている。そこで、最大強度の水中養生終了直後の強度に対する強度比を求めてみると、W/C が 25%～40% の場合には 1.03～1.06 とほぼ一定となっているが、W/C が 45% の場合には 1.13, W/C が 50% の場合には 1.16, W/C が 55% の場合には 1.31 となっており、W/C が高い場合に強度比が大きくなる傾向がみられる。

図一 8 には、実験 C に用いた供試体について、材齢 28 日までの水中養生終了直後からの質量変化率と経過日数との関係を示す。なお、この質量変化率も、図一 6 に示した実験 B の場合と同一定義のものである。W/C が高いほど乾燥による質量減少率も大きい、その後の水中浸せきによる吸水量も多くなる傾向にある。そして、供試体の質量は水中浸せき後 1 日程度まで急激



図一 8 質量変化率と経過日数との関係



図一 9 内部ひずみと経過日数との関係

に増加するが、その後の増加は緩やかである。W/C が 25% と低い場合の質量も曲げ強度のように急激に水中養生終了直後の値まで回復しておらず、W/C が 55% と最も高い場合の質量についても浸せき 7 日後で乾燥による質量減少の 70% 程度を吸水しているに過ぎない。

図一 9 には、実験 C における W/C が 25, 40 および 55% の場合について、供試体成形直後を原点とした内部ひずみと水中養生終了直後からの経過日数との関係を示す。W/C が 25% の場合は、自己収縮に起因する大きな収縮ひずみが水中養生終了時に生じているが、乾燥過程では自己収縮に乾燥収縮が加わり、収縮ひずみはさらに大きくなっている。その後水中に浸せきすると、中心部のひずみは収縮から膨張方向に転じる。しかし、収縮の回復は比較的緩やかであり、曲げ強度のように急激に乾燥前の値まで回復していない。また、W/C が 55% の場合も、乾燥後

に水中に浸せきすると、中心部のひずみは収縮から膨張方向に転じ、図一 8 における吸水による質量増加に類似した傾向を示して増大している。これとほぼ同様の傾向は W/C が 40% の場合の内部ひずみにもみられるが、自己収縮の影響が若干あるためなのか、W/C が 55% の場合に比べて多少収縮側の値となっている。

ここで、乾燥後の水中浸せきによる強度変化について整理してみると、次のようになる。十分に乾燥した供試体を水中に浸せきした直後には、W/C にかかわらず、内部が乾燥状態で表面部付近のみが湿潤状態となる。このため、内部拘束により表面部に圧縮応力が作用し、曲げ強度が上昇することになると考えられる。そして、水中浸せきによる強度の上昇量は、W/C が低くて乾燥開始時から内部が自己乾燥状態となる場合の方が、W/C が比較的高くて表面からの乾燥の進行によって内部が乾燥状態となった場合よりも大きくなるようである。

すなわち、乾燥後の再吸水による強度上昇は急激に生じており、セメントの水和の進行によるものとは考え難く、主に供試体に発生する内部応力の作用によるものと推察される。さらに、乾燥後の再吸水過程の性状には、水分の吸着による強度自体の低下⁴⁾も複雑に影響を及ぼすと考えられる。W/C が高い場合の最大強度以降の性状については、内部まで水が浸透すると考えられ、これに伴う内部応力分布の消失と、乾燥による強度自体の上昇分が再度の水分の吸着によって減少していくことがほぼ水中養生終了直後の値まで強度を低下させているものと思われる。また、W/C が低い場合には、水の浸透速度が遅く、内部の自己乾燥状態も継続するために内部応力分布が保たれ、最大強度に達した後も高い曲げ強度を持続していると考えられる。

以上より、乾燥させた時および乾燥後に吸水させた時の曲げ強度性状は、W/C の影響を大きく受けることがわかった。したがって、コンクリートの曲げ強度を評価する際には、W/C や強度試験までに供試体が置かれた乾湿の条件に留

意する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果は、以下のようになる。

- (1) 水中養生したコンクリートを気中で乾燥させると曲げ強度は低下し、その後乾燥期間の経過に伴って上昇する傾向がみられた。そして、乾燥 150 日程度の曲げ強度は、水中養生終了直後の強度と比較して、水セメント比がおおむね 40% 程度より低い場合には低く、これよりも高い場合には高くなった。
- (2) 乾燥 28 日後に吸水させると曲げ強度は上昇し、水セメント比にかかわらず、水中養生終了直後の強度以上の値になった。この吸水による強度上昇は、主に内部応力の作用によるものと考えられた。

謝辞：実験に当たり、卒研究生であった佐藤奉敬君、増山貴之君、小倉宏一君にご尽力をいただいた。ここに記して、謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 宮沢伸吾，田澤栄一：セメント系材料の曲げ強度に及ぼす不均一な乾燥収縮応力の影響，土木学会論文集，No.426/V-14，pp.121-129，1991.2
- 2) 日高重徳，二羽淳一郎，田辺忠顕：乾燥に伴うコンクリートはりの初期応力分布と曲げ強度，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.501-506，1995.6
- 3) 永松静也，佐藤嘉昭，竹田吉紹：乾燥に伴うコンクリートの各種強度変化について，セメント技術年報，36，pp.271-274，1982.2
- 4) 岡島達雄：コンクリートの力学的性質と水分，セメント・コンクリート，No.464，pp.18-26，1985.10
- 5) たとえば，土木学会：シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー80，1995.10