

論文 早期脱型による乾燥と水分の再供給がコンクリートの内部組織構造に与える影響

伊代田 岳史^{*1}, 魚本 健人^{*2}

要旨: コンクリートが所定の強度・耐久性を発揮するためには養生が重要となってくるが、現場においては工期短縮や型枠転用などの理由により早期脱型が行われることが多い。その結果、若材齢コンクリートが乾燥環境にさらされ、水和阻害を受けてしまうケースがよくある。そこで、本研究ではそのような早期脱型による乾燥の弊害が強度・耐久性に及ぼす影響を定量的に明らかにするとともに、そのような乾燥履歴を受けたコンクリートに水分を再供給したときの強度・耐久性の回復に関して評価した。また、回復のメカニズムを解明するために水和度の測定と等温吸脱着試験を用いた空隙分布の推定を行った。

キーワード: 乾燥履歴, 水分の再供給, 中性化抵抗性, 水和反応, 等温吸脱着試験

1. はじめに

コンクリート構造物が所定の強度・耐久性などの性能を十分に発揮するためには、施工段階における養生が非常に重要となってくる。しかし現在、型枠の転用や工期の短縮等の理由により多くの現場では早期脱型をしているのが現状である。このことにより構造物を極若材齢時から乾燥環境にさらすこととなり、強度等の物性に大きく影響するといわれている。このような若材齢時における乾燥は、コンクリート内部の自由水を逸散させてしまうことから、コンクリート内部は水分不足に陥り、水和が阻害される。このような初期材齢における乾燥と水和反応の阻害に関しては著者ら¹⁾が明らかとしている。

そこで本研究では養生により影響を受けるかぶりコンクリートに着目し、早期脱型などによる乾燥の強度・耐久性への弊害を定量的に明らかにするとともに、養生不良で乾燥履歴を受けたコンクリートに水分を再供給した時の強度・耐久性の回復を定量的に評価した。また、その回復のメカニズムを考察するために水和度の比較と等温吸脱着試験による空隙の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

W/C=70%のセメントの種類を変えた二種類のコンクリートを用いてφ10×20cmの円柱試験体を作成した。セメントの種類はOPC(普通ポルトランドセメント使用)とBSC(セメントを高炉スラグ微粉末で70w.t%置換した高炉セメントC種)の二種類である。なお、コンクリートのフレッシュ性状はスランプ20±2cm、空気量は2±0.5%であった。

2.2 実験の手順と環境

作成したコンクリートは図-1に示すような様々な方法で管理した。打設したコンクリートは前養生として直後からシートをかぶせ水分の逸散をできる限り防ぎ、1日間20℃一定の環境に放置した。前養生を終了した試験体においては脱型し、20℃水中養生とRH50±10%の環境で連続乾燥養生の二種類を行った。一方、早期脱型を防ぐためコンクリート標準示方書²⁾で定めている湿潤養生の最低必要期間を採用し、その期間まで型枠を存置したまま前養生を保つ試験体も作成した。脱型までの期間をOPCでは5日間、BSCでは7日間と定めた。この試験体は、脱型後RH50±10%の環境で放置した。

*1 東京大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所教授 工博 (正会員)

2.3 測定項目と方法

測定は圧縮強度と中性化深さとした。コンクリートの圧縮強度は材齢 7, 28, 56 日の 3 材齢で行い、3 本の平均値を圧縮強度とした。また、同時に静弾性係数も測定した。また、材齢 56 日を経過したそれぞれの環境下における試験体を温度 40℃、湿度 RH55%、炭酸ガス濃度 10% の促進中性化試験装置に 28 日間静置した。その後、端部から 5cm 程度のところで割裂して、割裂面に 1% フェノールフタレイン溶液を噴霧して、コンクリート表面から赤着色部までの 20 点の平均距離を中性化深さとして測定した。

3. 養生環境の異なったコンクリートの性質

3.1 連続養生環境

連続養生には図-1 の 3 パターンを採用した。

A：20℃連続水中養生(W)，

B：RH50±10%環境での連続乾燥養生(D)，

C：所定期間まで型枠を存置した湿潤養生(M)

3.2 圧縮強度の発現性

図-2 は養生環境の異なったコンクリートの圧縮強度の発現を表したものである。従来の研究結果³⁾と同様に、早期脱型した乾燥養生(D)のコンクリートはセメントの種類によらず、低強度で強度発現が停止してしまっていることが伺える。また、水中養生(W)や湿潤養生(M)では BSC の方がスラグの潜在水硬性により長期材齢で強度の増加がみられた。湿潤養生(M)を行うことで水中養生(W)の強度に対して材齢 56 日で OPC では約 85%、BSC では約 68%程度の強度発現が認められた。静弾性係数に関してもほぼ同様なことが確認できた。

3.3 中性化深さ

養生環境の異なったコンクリートの中性化深さを測定した。ここで、連続乾燥養生を行った試験体に関しては、養生中に中性化が進行している可能性がある。そこで、乾燥材齢 12 週における乾燥養生試験体の中性化深さを測定したところ、促進中性化試験による中性化深さの結果が卓越していたことから無視できると考

区分	養生方法		記号	
	Time			
A	前養生	水中	W	
B		乾燥		D
I			水中	DW
II			乾湿繰り返し	DWn
III			湿気養生	DS
C	(型枠)	乾燥	M	

図-1 本研究における養生方法

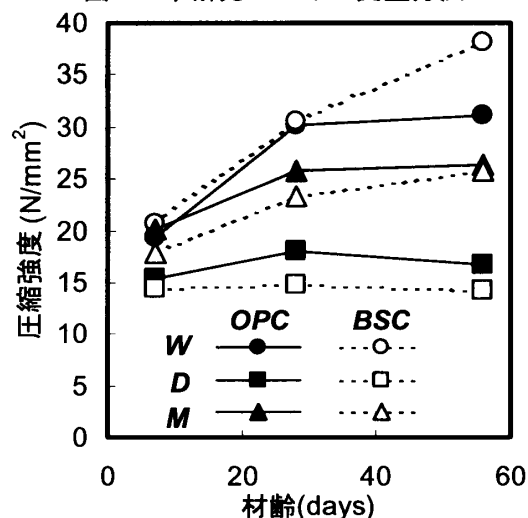


図-2 養生環境の違いによる圧縮強度の発現

えた。中性化深さの結果も、圧縮試験と同様に従来の研究結果⁴⁾と同じように OPC に比べ BSC の方が中性化に対する抵抗性が低い結果となった。また、乾燥養生により中性化の抵抗性が著しく低下することも確認できた。

4. 水分再供給によるコンクリートの性質変化

4.1 水分再供給の試験体

連続乾燥養生を行うことにより、強度・中性化抵抗性が著しく低下した。そこで、水分供給を行うため、連続乾燥養生を行ってきた試験体に材齢 7 日、21 日において図-1 の 3 パターンで水分を再供給した。

I：乾燥後、連続 20℃水中養生(DW)

II：乾燥後、1 日のうち 5 分間水を供給し、残りの期間を乾燥させた乾湿繰り返し養生(DWn)

III：乾燥後、塗れた布により表面だけ湿潤状態を保った湿気養生(DS)

4.2 圧縮強度の発現

図-3はOPC、図-4はBSCの水分再供給を行った試験体の圧縮強度比の結果を表している。どちらのグラフからも水分再供給を行うことで再び強度が増加していることがわかる。これはおそらく停滞していた水和反応が再び進行することによって起こる現象であると考えられる。しかし、水分の与え方の違いによって強度の増加率に大きな差が生じている。材齢7日に水を再供給したDW7はどちらのセメント種においても湿潤養生(M)と同程度の強度まで回復した。また、材齢21日から水の供給を行ったDWにおいても約80%程度まで強度回復している。しかし、湿気養生したDSにおいてはどちらのセメント種においても、あまり強度の回復がみられなかった。これはコンクリート全体が水和するのに必要な水量まで供給量が達しなかったためであると考えられる。この若干の強度回復の理由として、水蒸気として圧入された水分が未水和セメントと反応したためと考えられる。このことからできるだけ早期の水分再供給が強度回復には有効であること、水和反応に必要な水分量以上の水分供給が強度回復に有効であることが明らかとなった。

4.3 中性化残りと健全度

写真-1は中性化促進試験の結果のうちW、Dと材齢21日で水分再供給を行ったDWの結果を示したものである。これよりOPCに比べBSCが全体的に中性化抵抗性が低いことがわかる。また、OPCでの湿気養生(DS)は中性化抵抗性がDに比べかなり向上しているのに対し、BSCのDSは全面が中性化しておりDと比べてほとんど向上していないといえる。図-5は中性化残りを有いた水中養生(W)に対する健全度で評価したものを環境別に示したものである。DWnにおいてはBSCがOPCに比べ少し向上しているが、DW、Mは同程度の健全度であった。つまり中性化に対する抵抗性は液体としての水を圧入することによって、セメントの種類によらず同程度回復できると考えること

ができる。これは圧縮強度と同様に水和反応によるものと考えられる。

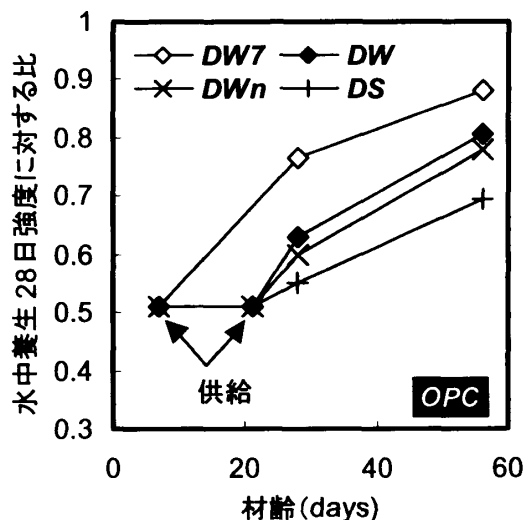


図-3 養生環境の違いによる圧縮強度比(OPC)

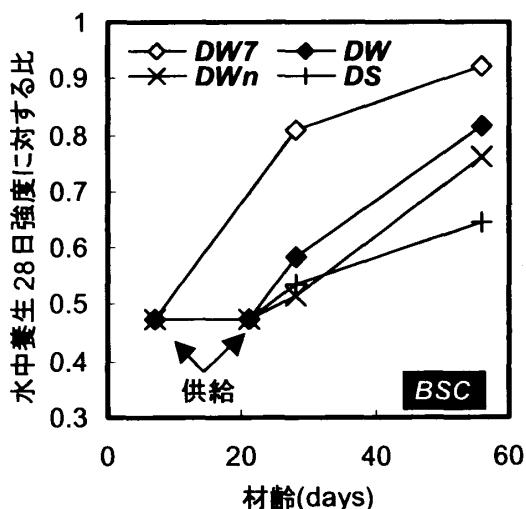


図-4 養生環境の違いによる圧縮強度比(BSC)

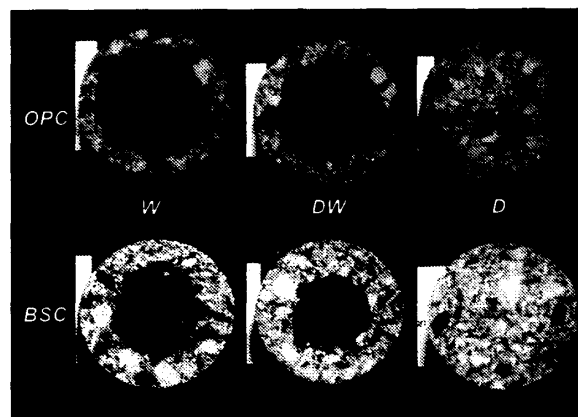


写真-1 促進中性化の結果

5. 水和反応による回復

5.1 セメントペーストによる実験

前章までで水分再供給によりコンクリートの強度、中性化抵抗性は水中養生(W)したものに対して約 80% 程度まで向上することが確認できた。このように向上する原因は水和反応の回復によるものと考えられることから、水和反応がどの程度まで回復しているかを実験的に検証し、水和反応が強度・耐久性の回復機動力になっているかを検討した。また、水和反応に付随して決定される空隙特性とその連続性を調査することで物質移動のしやすさを評価した。そこで、コンクリートと同一水セメント比である 70% の OPC(OPC70)と水セメント比 35% の OPC(OPC35)と BSC(BSC35)のセメントペーストを用いて水和率の測定と等温吸脱着試験を行った。試験体は $2 \times 2 \times 8\text{cm}$ とし、乾燥や水分の供給が均一に行えるようなサイズとした。養生環境はコンクリートと同様の方法による環境で、連続乾燥養生(D)、連続水中養生(W)、乾燥後湿気養生(DS)、乾燥後水中養生(DW)の 4 種類とした。ただし、OPC70 における DS は行わなかった。

(1) 水和率の測定

水和率の測定には強熱減量法を用い、その試料は所定材齢でアセトンに浸した後、粉碎ミルにより粉碎し作成した。作成した試料は、 40°C で 24 時間乾燥させ自由水を逸散させデシケータ内で試料をさました後、試料を 1.0g 程度るつぽに量りとり、 600°C で結合水を脱水させた。試料が恒量になるまで強熱し、その質量を量り結合水率を求めた。

(2) 等温吸脱着試験による内部組織構造推定

試料は同一材齢での試験体をオイルカッターで 5mm 角に切断したものを用い、乾燥・湿潤過程における各試料の等温線の空隙飽和度の履歴挙動を測定した（以後、これを等温吸脱着曲線と呼ぶ）。その試験方法を以下に示す。

i) 湿潤過程：真空脱気した RH0% で自由水を脱水させ、質量を測定する。その後、温度は

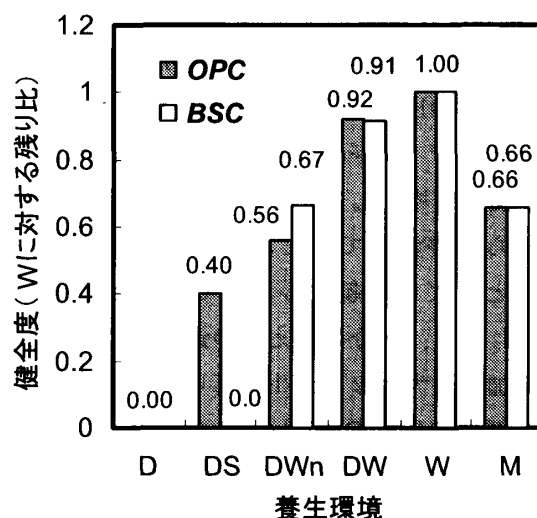


図-5 中性化残りによる健全度

一定の 20°C に保持したまま、湿度を RH30, 50, 80, 95, 100% と変化させた恒温恒湿槽に試料を投入し質量を測定した。なお、RH100% とは試料内部が水で満たされた状態であり、水を入れた容器に試料を入れ真空脱気により試料内部に水を圧入することとした。このとき試料の体積も同時に測定した。

ii) 乾燥過程：湿潤過程と同様に湿度を RH100, 80, 50, 30, 0% と順次低下させ質量を測定した

なお、試料の質量変化が平衡に達するまでの期間は湿潤・乾燥過程とも 2 日として測定した。

5.2 水和回復度

図-6 は材齢 56 日におけるそれぞれの養生環境下での水和回復度を配合別に示したものである。ここで、水和回復度とは材齢 56 日での連続水中養生(W)に対する水和進行割合である。これより、DW においてはどの配合においても 90% 以上水和回復していることがわかる。つまり水和反応は乾燥履歴を受けた後でも、水分を液体で圧入することで水和回復が望めることが確認できた。一方、DS のように気体で圧入した場合は、回復の兆しはみられても液体で圧入する場合ほどは回復できないと考えられる。

5.3 等温吸脱着試験による内部組織構造推定

等温吸脱着曲線から次の二つが考察できる。まず、湿潤過程においては、小さな径の空隙か

ら徐々に満水になっていくことを利用してコンクリートの内部の空隙分布を定性的に推定することが可能である。一方、乾燥過程においてはインクボトル作用を含んだ脱水機構が起るため、空隙の径だけでは依存せず空隙の連続性から物質移動のしやすさを表現することが可能である。そこで、図-7 に水中養生を施した OPC35, BSC35, OPC70 の3種類の配合別の等温吸脱着曲線の結果を示した。これより、OPC の両者は湿潤過程における RH0% から RH80% までの履歴はほとんど変わらない。つまり気液平衡が成り立つと仮定した Kelvin 式から計算した RH80% で平衡に達する半径 4.9nm の径までの空隙の相対的な分布は同程度であるといえる。しかし、RH95% では大きな差が生まれていることから 4.9nm 以上の粗大空隙の相対量に差が生じているといえる。また、BSC は OPC とは異なった曲線を描き、粗大空隙が多く存在するという特徴があるといえる。一方、乾燥過程においては OPC に比べ BSC の方が物質の移動に対する抵抗性が高いことが伺える。また、OPC70 においては RH80% で極端に飽和度が減少していることから移動に対する抵抗性が低い、つまり物質を移動させやすい空隙構造といえる。図-8 は一例として BSC35 の D, DW, W の比較を示した。養生の環境の異なった乾燥養生(D)においては乾燥過程の RH80% で急激な飽和度の低下を示すことがわかった。これは RH100% 時における水分圧入により未水和セメントが反応し、空隙を埋めたためと考えられる。また、水中養生(W)と乾燥後水中養生(DW)では、水和反応において 90% 以上回復していたことから、湿潤過程において RH80% までには大きな差はみられなかった。これより等温吸脱着曲線によりセメントペースト内部の空隙構造を大まかに分析し推定することができるといえる。

6. 強度・耐久性回復力の低下原因の推定

セメントペーストにおける水和、内部空隙構

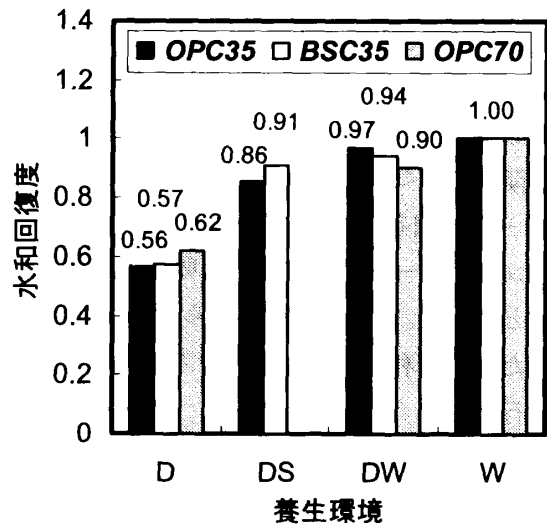


図-6 CPにおける水和回復

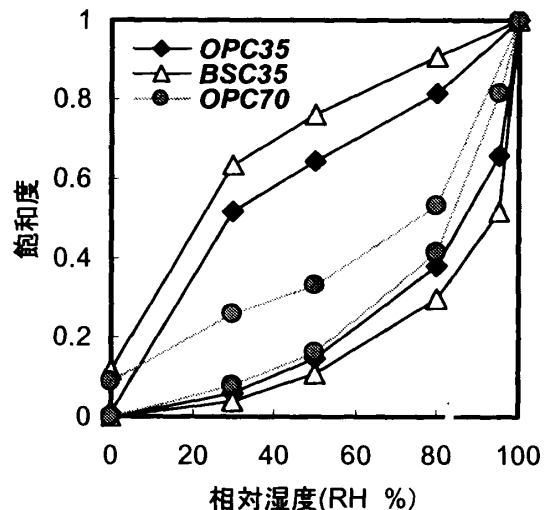


図-7 水中養生における等温吸脱着試験結果

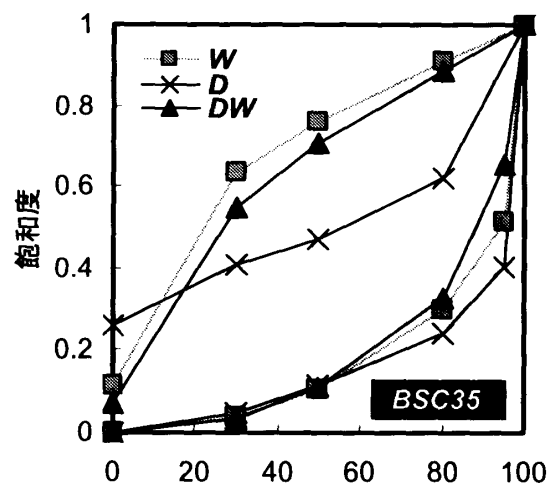


図-8 環境の異なる等温吸脱着試験結果

造に関しては水分の再供給により 90%以上回復することが示された。しかし、コンクリートにおける圧縮強度、中性化深さは 80%程度であったことからセメントペーストの結果ほど良好に回復していないといえる。そこで、このコンクリートの回復力低下の原因を考察するために、コンクリート試験体の等温吸脱着試験を行うこととした。試料は試験体から 1cm 角に切り出したものを利用した。試験の方法は前章と同様に行った。

図-9 に OPC の測定結果を示す。湿潤過程の RH95%~RH100%の区間で比較すると、W と比べ他の養生方法を施したものは大きな空隙が多く存在しているといえる。また、D と DS はほとんど同程度であることもわかる。また、乾燥過程において RH100%~RH80%の区間で W と比べて他の養生方法では物質移動のしやすい構造となっていると推定できる。RH50%~RH0%の間では W と DW に違いはない。

これらのことを総合的に分析すると、水和反応によって比較的小さな空隙の領域は水分の再供給によって回復するが、大きな空隙の領域においては水和反応では回復できない領域が存在すると考えられる。この回復できない領域はおそらく骨材の拘束による Micro Crack が発生していると考えられる。この Micro Crack は水分の再供給によって回復することのできない領域として存在しており、強度・中性化抵抗性を完全に回復できない欠陥として残存してしまうといえる。

7. まとめ

本研究によって得られた結果を示す。

- (1) 早期脱型等による養生不足のコンクリートの強度・中性化抵抗性は著しく低下する。これは水和反応が阻害されるために粗大な空隙を残存してしまうことによるものであると考えられる。
- (2) 乾燥履歴を受けたコンクリートに水分を再供給すると強度・中性化抵抗性は向上す

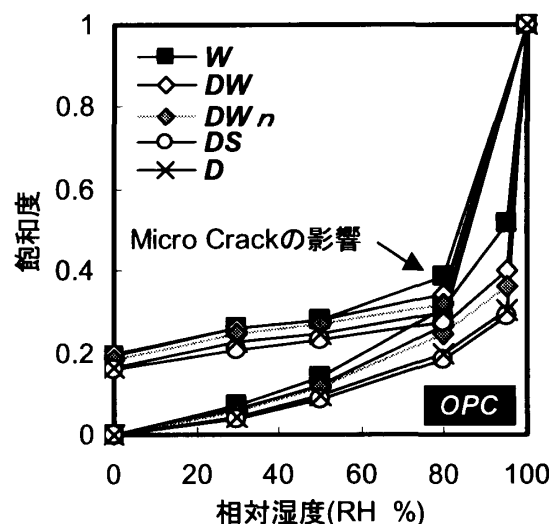


図-9 コンクリートの等温吸脱着試験結果

る。しかし、水和反応によって回復できない Micro Crack などの存在が水中養生したコンクリートの特性にまでは完全に回復できない要因となっていることが示唆できた。

- (3) 等温吸脱着試験を用いることでコンクリートの内部組織構造と粗大な空隙や欠陥を相対的に推定・判別することができることを示唆した。

謝辞

本研究の実験に関して芝浦工業大学卒論生の長谷川博紀氏にお手伝いいただきました。ここに記し、感謝を示します。

参考文献

- 1) 伊代田岳史, 高羅信彦, 魚本健人: 初期養生時に乾燥を受けるセメント系硬化体の水和反応と水分逸散特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.703-708, 2000
- 2) 土木学会: 平成 11 年版コンクリート標準示方書〔施工編〕—耐久性照査型—, 1999
- 3) 小林一輔著: 最新コンクリート工学, 森北出版, 1997
- 4) 和泉意登志ら: コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調合および養生条件の影響について, コンクリート工学年次論文集, Vol.7, pp.117-120, 1985