

論文

[1036] 高炉セメントを用いたコンクリートの圧縮強度に及ぼす
初期乾燥の影響

正会員 月岡 存(三重大学生物資源学部)

1. まえがき

近年、資源の有効利用、セメントの水和熱の抑制およびアルカリ骨材反応対策等により、高炉セメントを使用したコンクリートの需要が多くなってきた。ところが、高炉セメントコンクリートは初期の湿潤養生が大切であるといわれており、土木学会や日本建築学会の設計施工指針^{1) 2)}では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べやや長い湿潤養生日数を定めている。これに関連して筆者は、湿潤養生期間が7日、養生温度が20℃程度であっても型枠取り外し(脱型)後の環境湿度が低い場合、高炉セメント(B種)コンクリートは標準養生のものや普通ポルトランドセメントコンクリートに比べ28日強度が相対的にかなり低いことなどを報告した³⁾。ところで、このように初期養生の不十分な高炉セメントコンクリートの強度増進については明らかにされていないように思われる。そこで、打設後初期に乾燥の影響を受け、その後湿潤養生された高炉セメントコンクリートの圧縮強度に及ぼす脱型時期と初期乾燥期間の影響について実験的に検討することを試みた。

2. 実験概要

(1) 使用材料

セメントは高炉セメントB種と普通ポルトランドセメントを使用した。それらの物理的性質の試験結果を表-1に示す。細骨材は三重県雲出川産の川砂で比重2.59、粗粒率3.15のもの、粗骨材は同じく川砂利で比重2.64、最大寸法20mm、粗粒率6.66のものをそれぞれ使用した。混和剤はA E減水剤(主成分リグニンスルホン酸塩、標準型)を用いた。

(2) コンクリートの種類と配合

コンクリートの種類と配合は表-2に示すように、水セメント比と単位水量等の異なる高炉セメントコンクリート(BS)3種類と、比較のためBS-2と配合のほぼ等しい普通ポルトランドセメントコンクリート(NP)の計4種類である。

(3) 供試体の作製と養生条件

コンクリートは可傾式ミキサを使用して各配合ごとに1バッチ100lを練混ぜ(練上り温度 $21 \pm 2^\circ\text{C}$)、JIS A 1132の強度試験用供試体の作り方により同一バッチから圧縮強度試験

表-1. セメントの物理的性質

種 類	比 重	比表面積 (cm^2/g)	凝 結 (時:分)			安 定 性	圧 縮 強 さ (kgf/cm^2)		
			水量(%)	始発	終結		3日	7日	28日
高炉B種	3.03	3740	30.0	3:05	4:45	良	126	206	429
普通ポルトランド	3.16	3310	27.5	2:25	3:27	良	156	252	417

表-2. コンクリートの種類と配合

コンクリートの種類	使用セメントの種類	スランブ測定値 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m^3)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
BS-1	高炉B種	4.5	3 ± 1	5.2	4.4	160	308	807	1047	0.770
BS-2	高炉B種	10.0	3 ± 1	6.0	4.5	170	283	824	1026	0.708
BS-3	高炉B種	17.5	3 ± 1	7.0	4.7	180	257	858	986	0.643
NP	普通ポルトランド	8.0	3 ± 1	6.0	4.6	170	283	846	1012	0.708

用供試体 ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) 51本を作製した。作製した供試体は上面をガラス板で覆い、型枠のまま恒温恒湿室 (温度 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度90~100%) で養生した。これらのうち標準養生供試体については、

表-3. 初期乾燥条件

乾燥期間		強度試験材令 28日				強度試験材令 91日			
		脱 型 日				脱 型 日			
記号	日数	1日	2日	4日	7日	1日	2日	4日	7日
1 D	1日	○	○						
3 D	3日	○	○	○					
10 D	10日	○	○	○	○	○	○	○	○

打ち込み後45~48時間で脱型したのち水中養生 (温度 $21 \pm 2^\circ\text{C}$) した。そのほかの供試体は脱型後、乾燥室 (温度 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 3\%$) で円柱の上面と下面をビニール板で覆い側面からの乾燥を開始した。ここで、打ち込み後の供試体の脱型時期と脱型後の乾燥期間 (24時間を1 Dで表す) および圧縮強度試験時の材令は表-3の○印で示す13種類の組み合わせとした。所定の期間乾燥させた後、供試体は標準養生供試体と同じ条件で材令28日または91日まで水中養生 (以下、再養生という) した。

(4) 測定および試験

脱型直後、乾燥終了後および水中養生終了直後の供試体重量を上皿電子天秤で測定した。また、コンクリートの圧縮強度試験はJIS A 1108により実施した。供試体の個数は同一条件につき3個 (標準養生のものは4個) であり、試験値はその平均とした。

3. 実験結果および考察

(1) コンクリートの重量変化

図-1は、初期乾燥の影響をうけたコンクリート供試体の脱型時の重量を基準とした重量変化率を示したものである。

乾燥による重量変化 (減少) は、当然のことながら乾燥期間の長いほど大きく、例えば脱型時材令1日のもので比較すると10 D (乾燥日数10日) のものは1 Dのものの1.5~1.7倍の重量減少率を示した。脱型時材令別では、脱型時期の早いものほど重量減少が大きく、10 D のもので比較すると、脱型時材令1日のものは同7日のものの1.5~1.9倍の重量減少率であった。また、コンクリートの種類別では、普通ポルトランドセメントを使用したNPは、ほぼ同

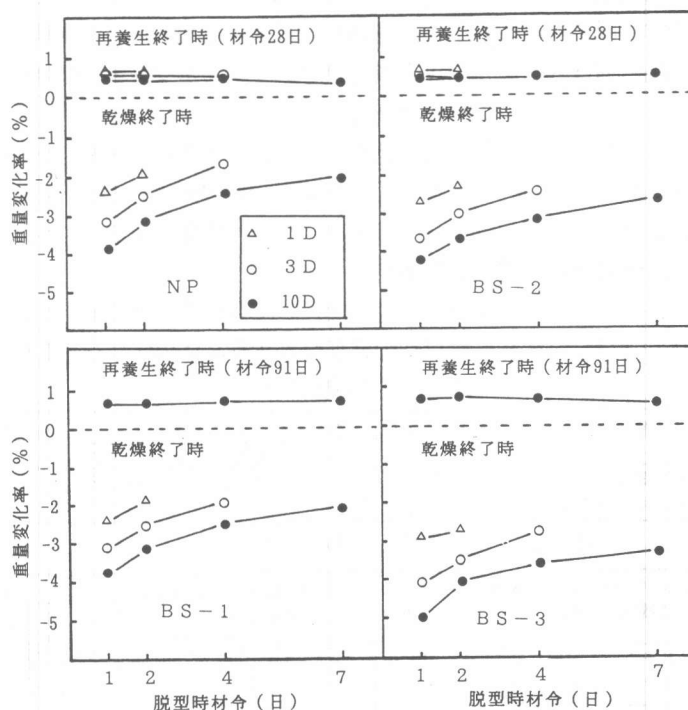


図-1. 初期乾燥の影響をうけたコンクリートの重量変化

配合の高炉セメントコンクリートBS-2より重量減少率が小さく、BSの中では単位水量の大きい配合のコンクリートほど重量減少率が大きい。

以上のような重量の減少は、コンクリート中のセメントと未水和の水分の蒸発によるものと考えられ、これらが水和の速度とも関係して後述のようにコンクリートの圧縮強度に影響しているものと思われる。

次に、乾燥後水中養生した供試体の再養生終了時（材令28日と91日）における重量変化（増加）は、乾燥日数にわずかに影響される傾向が認められるが、コンクリートの種類や脱型時材令にほとんど関係なく0.4～0.7%程度の重量増加率である。これらの増加率は標準養生供試体の同材令時の重量増加率0.7～1.0%に比べてやや少ない。

（2）圧縮強度

材令2日と7日の型枠内養生供試体および材令28日と91日の標準養生供試体の圧縮強度試験結果を表-4に示した。

図-2は、材令28日における標準養生供試体の圧縮強度に対する脱型時材令と乾燥期間の異なる再養生供試体の圧縮強度の比（以下、圧縮強度比という）を示したものである。図から、乾燥期間と脱型時材令および両者の組み合わせが圧縮強度比に影響していることがわかる。乾燥期間は長い方が圧縮強度比が小さく、とくに10Dのものは3Dと1Dのものに比べ圧縮強度比が相当小さい。また、脱型時材令は乾燥期間3Dと1Dの場合は圧縮強度比にあまり影響しないが10Dの場合は影響が大きい。そこで、乾燥期間10Dの場合についてみると、脱型時材令の若いものほど圧縮強度比が小さく同材令1日では71～79%、同7日でもBSの場合は82～89%である。このように、乾燥期間が長く脱型時材令の若いコンクリートの再養生後の圧縮強度比が小さいは、養生途中の水分不足による水和の阻害のためであると考えられる。

表-4. 圧縮強度試験結果

コンクリートの種類	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
	2 日	7 日	28 日	91 日
BS-1	71	165	322	426
BS-2	56	129	265	334
BS-3	37	97	214	277
NP	64	185	268	307

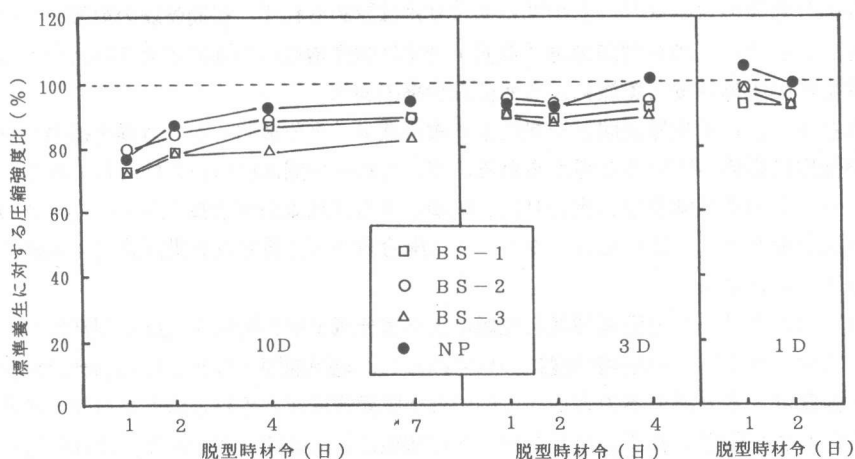


図-2. 標準養生に対する再養生供試体の圧縮強度比（材令28日）

高炉セメントコンクリート（BS）では、圧縮強度比が90%を越えるものは10Dでは1つもなく3Dで半分程度である。BSの中では、圧縮強度比の大きい順にBS-2、BS-1、BS-3となり、乾燥期間10DのBS-3は圧縮強度比が最大でも82%であった。ここで、BS-2の圧縮強度比がBS-1とBS-3より大きくなったのは、コンクリートのスランプの測定値からわかるように、両者に比べBS-2は適度なコンシステンシーを有しているためではないかと考えられる。

図-3は、同様に材令91日における10日間初期乾燥された供試体の圧縮強度比を示したものであるが、ここでは、

標準養生供試体の材令28日と91日の両方の圧縮強度に対して求めた圧縮強度比を表した。まず91日強度に対しての結果をみると、NPはBSの3種類のコンクリートに比べて圧縮強度比が大きく、その値も94%以上で、とくに脱型時材令4日と7日のものは乾燥の影響を受けていないといえる。これに対してBSは、BS-2の脱型時材令7日のもの以外はすべて圧縮強度比が90%以下で、図-3の材令28日の場合の結果と圧縮強度比としてはあまり変わっていない。この理由としては、NPとBSのコンクリートの材令28日から材令91日までの圧縮強度の増加割合が関係しているものと考えられる。すなわち、初期に乾燥の影響をうけ、その後水中養生された高炉セメントコンクリートの圧縮強度は増加するが、標準養生された同コンクリートの強度も再養生されたものと同じような割合で増加し、しかもその増加割合が表-4でわかるように普通ポルトランドセメントコンクリートより大きいためであると考えられる。

次に、28日強度に対しての圧縮強度比をみると、圧縮強度比はすべて100%以上で、しかもNPとBSの3種類のコンクリートの間にあまり差は認められず、初期乾燥の影響をうけた高炉セメントコンクリートの長期間の再（湿潤）養生は強度増進への効果が大きいといえる。

（3）再養生後の圧縮強度と乾燥による水分減少率の関係

上記の考察から、初期乾燥期間と乾燥による重量減少（水分蒸発）が、再養生後のコンクリートの圧縮強度に影響していると考えられるので、これらの関係について検討してみる。そこで、コンクリートの重量減少率の代わりに、乾燥による供試体の重量減少をすべて水分の蒸発による水分減少量と考え、これをコンクリートの配合表から計算される供試体中の水量で割った値を水分減少率とする。

図-4は、コンクリートの圧縮強度と乾燥による水分減少率の関係を乾燥期間別に示したものである。まず、材令28日の圧縮強度についてみると、乾燥期間1Dと3Dの場合のコンクリートの圧縮強度は、水分減少率の大きいものの方が圧縮強度が大きいものもあるなど水分減少率の大きさにあまり影響されず、コンクリートの種類ごとにはほぼ一定である。これに対して10Dの場合は、どのコンクリートも水分減少率の大きいものほど圧縮強度が小さい傾向がある。

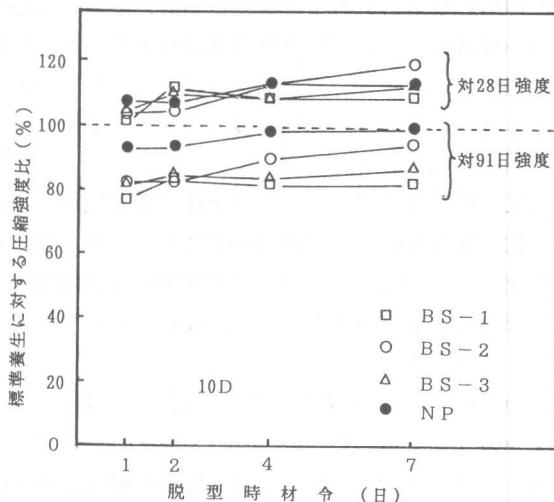
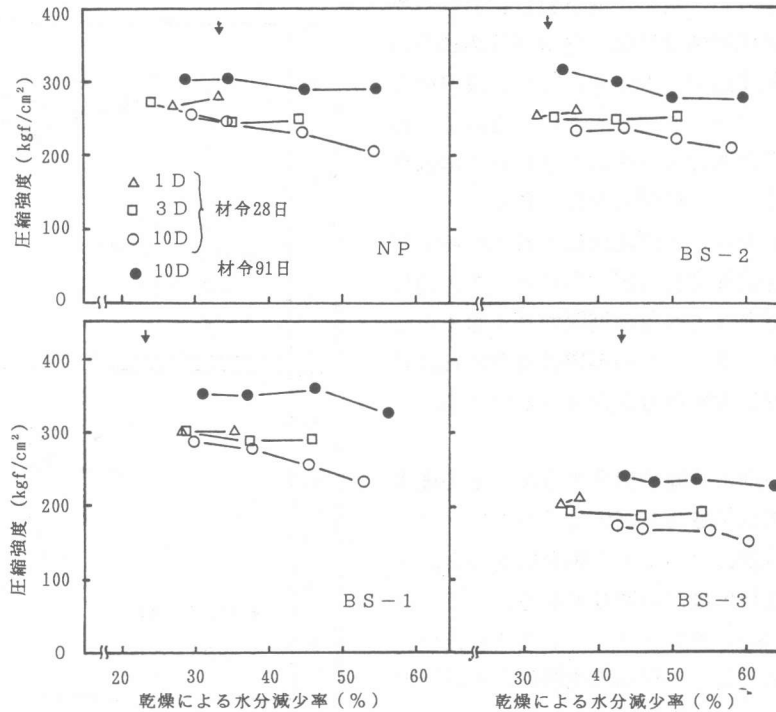


図-3. 標準養生に対する再養生供試体の圧縮強度比（材令91日）



図－4．再養生後の圧縮強度と乾燥による水分減少率の関係

次に、乾燥期間が10Dの場合の91日圧縮強度でも、乾燥期間10Dの材令28日圧縮強度の場合ほどではないが、全体的に水分減少率の大きいものほど圧縮強度が小さい傾向がみられる。

ここで、コンクリートの水分減少率とセメントの水和に必要な水分量について考えてみる。一般に、普通ポルトランドセメントが完全に水和するのに必要な水分量（結合水とゲル水）はセメント量の40%程度であるといわれており⁴⁾、NPのコンクリートでは単位セメント量 283 kgであるから約 113kgの水量となる。したがって、単位水量 170kgと 113kgの差は 57kgとなり、 $57/170=0.335$ すなわち、水分減少率が 33.5 %を越えると完全水和に必要な水分が不足することになる。高炉セメントコンクリートの場合は、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末が混入（本実験の高炉セメントでは重量で約44%）されているので、完全水和に必要な水分量はここのように単純には計算できないと思われるが、NPの場合と同様に高炉セメント量の40%の水量として計算した水分減少率の結果を図－4の中に矢印（↓）で示した。同図より、今回の実験において、乾燥による水分減少率は大きく、完全水和に必要な水分量が大幅に不足するものが多いことがわかる。このように、乾燥期間中に水和に必要な水分量が一時不足したと考えられるにもかかわらず材令28日および91日の圧縮強度が標準養生のものに比べそれほど低下しなかったのは、乾燥後水中養生（再養生）した効果であるといえる。

図－5は、全コンクリートについて乾燥期間1D、3Dと10Dの2つに分け、縦軸に標準養生に対する再養生供試体の圧縮強度比、横軸に乾燥による水分減少率をとったものである。まず材令28日における圧縮強度比は、乾燥期間1D、3Dの場合、水分減少率の大きさにはほとんど関係なくBSのコンクリートで87～98%、NPで93～105%の範囲である。一方、10Dの場合は、全体に1D、3Dの場合より圧縮強度比が小さく、しかも水分減少率の大きいほど圧

縮強度比が小さい。次に、材令91日における乾燥期間10Dの圧縮強度比は、材令28日の10Dの場合の圧縮強度比より大きく、また、NPの方がBSのコンクリートより大きい。さらに、わずかではあるが水分減少率の大きいもののほうが圧縮強度比が小さい傾向がみられる。

以上のことから、初期乾燥による水分減少が再養生後の圧縮強度に及ぼす影響として、同じ水分減少率であっても乾燥期間が長くなると圧縮強度が小さくなり、この影響は材令91日より材令28日強度に対する方が大きいといえる。

4. まとめ

打込み後初期に乾燥の影響をうけ、その後水中養生（再養生）された高炉セメントコンクリートの圧縮強度についての実験を行なった。得られたおもな結果は次の通りである。

（1）普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して、初期の乾燥による高炉セメントコンクリートの重量減少率は大きく、標準養生に対する再養生供試体の圧縮強度比は小さい。また、両者の大きさは脱型時期と乾燥期間に影響される。

（2）材令が若いうちに10日間乾燥された高炉セメントコンクリートの再養生後の圧縮強度は標準養生のものに比べ相当の強度低下を示したが、1～3日間初期乾燥された場合の圧縮強度の低下は少なかった。

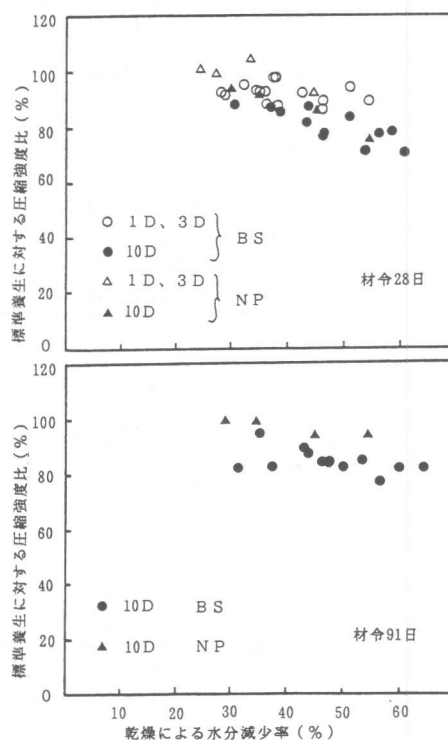
（3）打込み後初期に乾燥され、その後水中養生された高炉セメントコンクリートの91日強度は、標準養生された同じコンクリートの91日強度より小さいが28日強度よりは大きかった。

（4）初期乾燥によるコンクリートの水分減少率が再養生後の圧縮強度に及ぼす影響は、乾燥期間により異なる。また、その影響は91日強度より28日強度に対する方が大きかった。

最後に、本研究のまとめとして、初期養生が十分行なわれなかった高炉セメントコンクリートは、その後湿潤養生を長期間実施することにより、圧縮強度の点からはほぼ満足できる（再養生の91日強度が標準養生の28日強度を越える）ものが得られるということができる。

<参考文献>

- 1) 土木学会：高炉スラグ微粉末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-63、1988、pp. 23～24
- 2) 日本建築学会：高炉セメントを使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説、1989、pp. 44～45
- 3) 月岡 存：高炉セメントコンクリートの強度等に及ぼす脱型時期の影響、農業土木学会大会講演要旨集、1989、pp. 456～457
- 4) たとえば、西村 昭、藤井 学、湊 俊：最新土木材料、森北出版、1988、P61



図－5．再養生供試体の圧縮強度比と乾燥による水分減少率の関係