

投稿論文 (和文)
PAPERS

早期脱枠を行ったハイパフォーマンス コンクリートの硬化後の品質

下村 匠¹・宇野洋志城²

¹正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科 (〒113東京都文京区本郷七丁目3-1)

²正会員 佐藤工業株式会社 中央技術研究所土木研究部 (〒243-02厚木市三田47-3)

ハイパフォーマンスコンクリートは、自己充填性能の要件から水粉体比が低く設定されている。そのため、養生を簡略化した場合であっても、一般の構造物に適用するには十分な品質が期待される。本研究では、ハイパフォーマンスコンクリートを早期に脱枠し養生を省略した場合の硬化後の品質、特に耐久性に関連する諸品質について系統的实验を行い、養生を簡略化する施工への適用可能性を考察する。

Key Words : high performance concrete, avoidance of curing, durability of concrete

1. はじめに

コンクリート構造物の信頼性の向上を目的として開発されたハイパフォーマンスコンクリートは、自己充填性能を有するゆえに締固めが不要であり、施工の良否の影響を受けない。さらに、セメントの水和発熱や乾燥収縮に起因した初期欠陥を生じにくく、酸素や水などのコンクリート中の鋼材の腐食因子の移動に対して十分な抵抗性を持ち耐久的である、という特徴を併せ持つ¹⁾。ハイパフォーマンスコンクリートは、その最も重要な性質である自己充填性能の要件から、水粉体比が小さく、粉体量の多いことが配合上の特色である。そのため、従来のコンクリートに比較して、発熱や収縮に関する性質は、より厳密に制御されなければならない¹⁾²⁾。しかし一般的な環境条件のもとに、従来通り規定されている養生を行う場合は、緻密なセメントペースト組織が実現されるため、強度、物質透過抵抗性などは、配合上特別な配慮を施さなくとも要求性能をかなり上回る高い性能を期待することができる。

一方、硬化後のコンクリートの品質は配合のみならず、養生条件の影響を強く受ける。打込み面以外は型枠により表面からの水分の逸散が防止されるので、実構造物では、型枠の取りはずし時期は養生条件を大きく左右する要因である。型枠の早期取りはずし（以下、早期脱枠という）を行った場合には、十分な養生を行った場合に期待されるコンクリートの諸性能を、ある範囲までしか引き出せないことに

なる。しかしながら、養生が不十分な場合であっても、発現する硬化後の品質が残存するのをもたまた事実である。たとえ潜在的な性能の一部しか発現しない場合であっても、要求される性能のレベルを満足するのであれば実用に供することは可能である。この際、潜在能力が高くなければならないのは言を待たない。

ハイパフォーマンスコンクリートは硬化後の品質に関して、高い潜在能力を備えている。ハイパフォーマンスコンクリートを用いて打込んだ構造物を早期に脱枠し、養生を簡略化することが可能となれば、コンクリート打込みから養生における一貫した省力化、工期の短縮など、さらなる施工の合理化が期待される。

養生を簡略化あるいは省略した施工を実現するためには、コンクリートの使用材料、配合、養生条件が与えられたときに、得られる硬化後のコンクリートの諸品質を定量的に評価し、必要な品質のレベルを満足するかどうかを事前に照査する技術を持つことが不可欠である¹⁾。養生の影響を強く受けるのは実質的には構造物の表層部であるため、耐久性に関わる諸品質についての検討が特に重要である。使用材料、配合、養生条件と、耐久性に関わるコンクリートの品質の関係の定量的把握に関しては、個別の項目については報告が散見されるものの³⁾、多岐にわたる品質を総合的に検討した研究は少ない。

本研究は、ハイパフォーマンスコンクリートを用いて打込んだ構造物を早期脱枠し、養生を簡略化す

Table 1 実験に使用したコンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

配合名	水セメント比 [%]	骨材最大寸法 [mm]	空気量 [%]	単位量[kg/m ³]								スランプ [cm]	フロー [cm]	相対ロート速度比 ¹⁾	凝結始発時間 [hr-m]	凝結終結時間 [hr-m]	
				W	C	MC	L18	S6	S	G	Ad.1						Ad.2
MS	35.5	20	3.5	172	—	513	28	—	828	827	8.12	0.03	—	56.5	1.58	9-11	11-09
S6	55.8	20	3.5	172	—	308	17	200	828	827	7.88	0.02	—	51.0	1.28	—	—
OP	55.0	20	4.5	165	200	—	—	—	927	924	0.75	0.0099	8.5	—	—	—	—

備考) 混和剤Ad.1は高性能AE減水剤 (配合OPではAE減水剤), 混和剤Ad.2は空気量調整剤を示す。

Table 2 使用材料

記号	名称	比重	物性ほか
MC	中庸熟ポルトランドセメント	3.17	比表面積約3200[cm ² /g]
C	普通ポルトランドセメント	3.15	比表面積約3300[cm ² /g]
L18	石灰粉	2.68	比表面積約18000[cm ² /g]
S6	高炉スラグ微粉末	2.91	比表面積約6000[cm ² /g]
S	細骨材	2.62	富士川産川砂, 吸水率1.54[%], 実積率70[%], FM3.01
G	粗骨材	2.71	青梅産硬質砂岩砕石, 吸水率0.6[%], 実積率61[%], FM6.85

Table 3 実験項目と養生方法

実験項目	配合脱枠	MS 16hr	MS 2day	MS 7day	S6 2day	S6 7day	OP
圧縮強度	○	○	—	○	—	—	◎
乾燥収縮	○	○	○	○	○	○	△
乾燥収縮ひび割れ	○	○	○	○	○	○	△
中性化	○	○	○	○	○	○	△
塩分浸透	○	○	○	○	○	○	△
耐凍害性	—	○	—	○	—	—	▽

備考) OPの◎は水中養生, △は7日脱枠, ▽は2日脱枠を示す。

る施工の可能性について、主として耐久性の観点から、総合的な検討を加えるものである。本論文では、硬化後のコンクリートの品質として、強度、乾燥収縮、乾燥収縮ひび割れ特性、中性化、塩分浸透性、耐凍害性をとりあげ、早期脱枠を行った場合に得られるこれらの品質レベルについて、系統的实验を行った結果を考察する。

2. 実験概要

(1) 実験に使用したコンクリート

実験には、2種類のハイパフォーマンスコンクリートと水セメント比55%の普通コンクリートを用いた。ハイパフォーマンスコンクリートは、中庸熟ポルトランドセメントを粉体の主成分としたMSと、その粉体容積の60%を高炉スラグ微粉末に置換したS6である。これらのコンクリートはいずれも、自己充填性能を有するように設計されているが、本研究では特に、諸品質に対する粉体と養生条件の影響を検討するために、水粉体体積比、単位水量、単位細骨材量、単位粗骨材量を同一とした。普通コンクリートOPは硬化後の諸品質の相対比較を行うため用いた。実験に使用したコンクリートの配合、およびフレッシュコンクリートの試験結果を **Table 1** に、使用材料の物性値を **Table 2** に示す。

(2) 養生条件

コンクリートの養生条件は、供試体の型枠を取りはずす材齢により変化させた。型枠に打設したコンクリートは、打込み面をポリエチレンシートで覆い、脱枠を行うまで水分の出入りが生じない状態に保った。脱枠を行う材齢は基本的に、中庸熟セメントベースの配合MSでは16時間、2日、7日とし、高炉スラグ微粉末を用いた配合S6では2日、7日とした。脱枠後の供試体は温度約20℃相対湿度約60%の室内に静置した。これは、日本の平均的な環境を考慮して設定したものである。比較のために用いた普通コンクリートOPは、基本的に材齢7日で脱枠した。実験項目と養生方法の組み合わせを **Table 3** に示す。

(3) 実験項目と方法

a) 圧縮強度

供試体はφ10×20cmとした。圧縮強度は硬化コンクリートの代表的な力学特性値であるだけでなく、型枠を取りはずしてよい時期に関する指標となる。養生方法の影響を調べる試験とは別に、型枠内に保たれた場合の強度発現性状を調べる試験も行った⁴⁾。

b) 乾燥収縮

供試体は10×10×40cmとした。所定の材齢で脱枠後、恒温室内(温度約20℃, 相対湿度約60%)で乾燥を開始し、供試体重量とひずみの経時変化を測定した。ひずみはコンタクトゲージにより測定した。

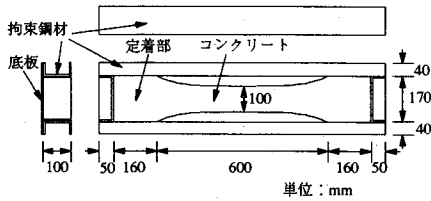


Fig.1 JIS原案乾燥収縮ひび割れ試験装置

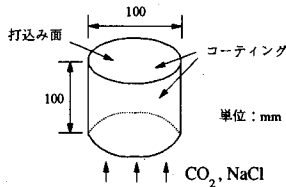


Fig.2 中性化、塩分浸透性試験用供試体

c)乾燥収縮ひび割れ特性

JIS原案として提案されている、コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験装置 (Fig.1) を用いた^{5),6),7)}。所定の材齢で脱枠 (底板の取りはずし) を行った後、恒温室内で乾燥を開始し、ひび割れが発生するまで拘束板のひずみの経時変化を測定した。

d)中性化

供試体はφ10×10cmとした (Fig.2)。所定の材齢で脱枠した供試体は、底面以外の面をゴム系接着剤によりコーティングした後、材齢28日までは温度約20℃相対湿度約60%の恒温室内に、材齢28日から42日までは温度40℃相対湿度40%の恒温恒湿槽内に静置した。材齢42日より28日間、槽内の環境を、温度40℃、相対湿度40%、二酸化炭素濃度10%に設定し、その中に供試体を静置した。その後供試体を槽内より取り出し、コンクリートカッターを用いて上下方向 (打込み方向) に切断した。切断面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤色に変色しない部分の深さを測定した⁹⁾。

e)塩分浸透性

供試体の形状、寸法、コーティングの方法、材齢42日までの環境は中性化試験の場合と同じである (Fig.2)。材齢42日より70日間、供試体に、温度35℃塩分濃度5%の塩水噴霧と、温度40℃相対湿度40%の環境を7日ごとに繰り返し作用させた。その後供試体を上下方向 (打込み方向) に切断し、切断面にフルオレッセインナトリウム溶液と硝酸銀溶液

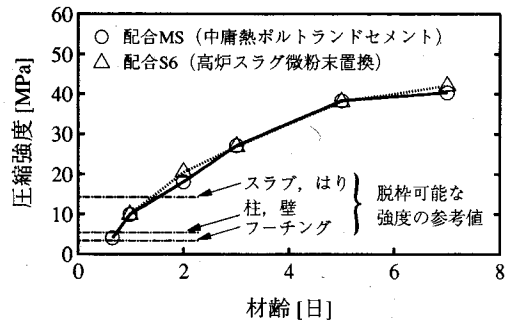


Fig.3 型枠内における強度発現

を噴霧し、白色に変色する深さを測定した。

f)耐凍害性

供試体は10×10×40cmとし、試験方法はJIS法に基づいた。耐凍害性の試験については、実験水準の設定が他項目とは異なっている⁹⁾。コンクリートMS、S6は、混和剤により連行される空気量を増減させた配合を用いた。脱枠はすべて材齢2日に行い、養生方法は材齢28日まで気中養生 (温度約20℃相対湿度約60%) と水中養生の2種類とした。測定したフレッシュコンクリートの空気量は、MSが2.8%と5.2%、S6が2.9%、OPが4.5%であった。

3. 強度の発現に関する検討

(1)脱枠時の強度

型枠を取りはずすためには、少なくとも、自重および施工に加わる荷重を受けるのに十分なコンクリート強度が得られていなければならない¹⁰⁾。そこでまず、実験に使用するコンクリートの材齢初期の強度発現について検討することにする。

Fig.3は配合MSおよびS6のコンクリートを型枠をつけた状態に保った場合の、材齢7日までの圧縮強度の発現を示したものである⁹⁾。2種類のコンクリートの材齢初期の強度の発現傾向は、ほぼ等しい。コンクリート標準示方書 [施工編]¹⁰⁾を参考に、自重および施工に加わる荷重を受けるのに必要な強度、という面から型枠を取りはずしてよい時期を考えた場合、フーチングの側面などでは材齢16時間 (配合MSのみ) で、柱、壁などでは材齢1日で、スラブなどでは材齢2日で、脱枠を行うことが可能ということになる。

(2)脱枠後の強度

配合MSとS6のコンクリートを早期に脱枠した場合に得られた、材齢7日および材齢28日における圧縮

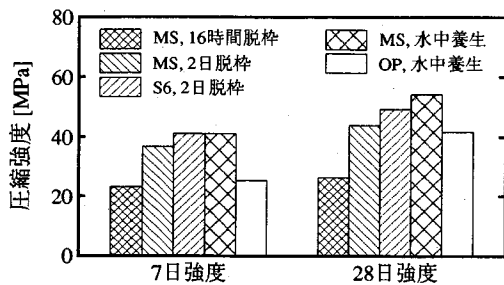


Fig.4 早期脱枠を行った場合の強度

強度をFig.4に示す。比較のため、配合MSのコンクリートおよび普通コンクリートOPを水中養生した場合に得られた強度も示してある。

ハイパフォーマンスコンクリートは、自己充填性能を確保するという目的から、水粉体比が小さく設計されている。そのため、水中養生を行い、十分なセメントの水和反応が期待できる場合、中庸熱セメントベースの配合MSで、54.1MPaの28日圧縮強度が得られている。

材齢2日で脱枠を行った場合には、材齢28日の強度は、配合MSで43.8MPa、配合S6で49.1MPaとなった。早期に脱枠を行った場合には、水中養生の場合に比べて、硬化後に得られる強度は相対的に低くなるが、一般の構造物に実用することは可能といえる。また、配合MSを材齢16時間に脱枠した場合には、26.3MPaの28日強度が得られたが、対象構造物によっては実用可能な強度である。

ただし、これらの強度はいずれもφ10×20cmの供試体を用いて得られたものである。実際の構造物中では、表層部に比べて内部は水分の逸散が緩慢であるため、早期に脱枠を行った場合であっても、水分の逸散の影響を大きく受けることなくセメントの水和反応が進行し、内部の強度は、本実験結果よりも高い値が得られると考えてよいと思われる。したがって、構造的に必要なコンクリート強度という面からでは、本コンクリートを早期脱枠して用いる上で大きな問題はなく、むしろ重要であるのは、早期脱枠を行った際に表層部のコンクリートの水和の阻害が直接問題となる、耐久性に関わる諸項目であると考えられる。これらについて次章において検討する。

4. 耐久性に関連する諸品質に関する検討

(1) 乾燥収縮

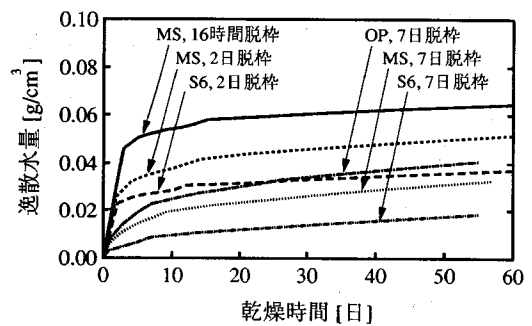


Fig.5 乾燥収縮試験結果（乾燥時間と逸散水量の関係）

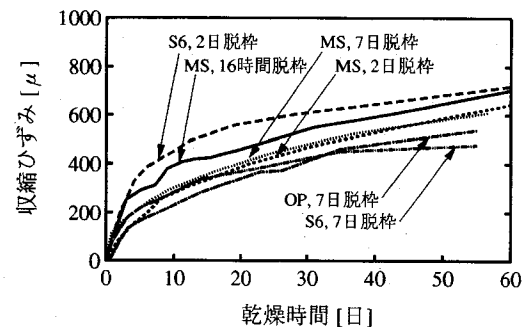


Fig.6 乾燥収縮試験結果（乾燥時間とひずみの関係）

構造物の耐久性という観点からコンクリートの品質の優劣を、供試体で得られる試験の値により論じるには、試験値と、そのコンクリートを用いて施工した構造物の耐久性能との関係が明らかでなければならぬ。換言すれば、構造物の形状、大きさ、境界条件、環境条件に関して一般化された耐久性評価手法を持つことが、材料試験値を有効に利用するための条件である¹¹⁾。しかしながら、ひび割れの発生や有害物質の侵入など種々の現象を考慮した汎用的な定量評価システムは、現段階では確立されていない。そこで本研究では、各項目に関して得られた試験値を、標準的な養生を行った水セメント比55%の普通コンクリートの試験値との間で比較することにより、品質の相対評価を行った。

Fig.5は乾燥時間と逸散水量の関係を、Fig.6は乾燥時間と収縮ひずみの関係をそれぞれ示している。乾燥時間、逸散水量、収縮ひずみともに、乾燥開始時、すなわち脱枠時の値を0として表示してある。

水分の逸散は、脱枠が早いほど顕著であるという傾向が認められる。収縮ひずみは、配合MSで材齢16時間に脱枠を行った場合、配合S6で材齢2日脱枠の場合には、初期の収縮が大きい。そのほかのケースでは、普通コンクリートOPを含めて、乾燥時間と収

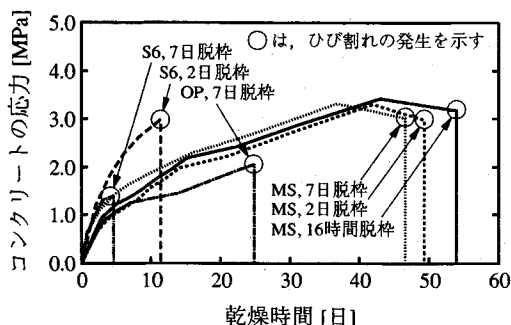


Fig.7 乾燥収縮ひび割れ試験結果

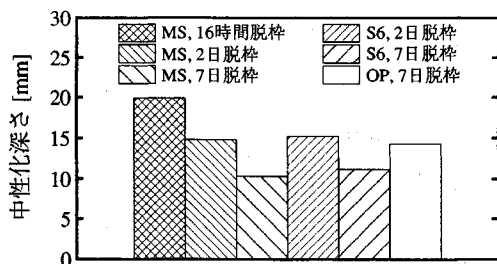


Fig.8 中性化試験結果

縮ひずみの関係は同程度となっている。高炉スラグ微粉末を用いた配合S6の場合、脱枠する材齢によって観察される収縮ひずみが大きく異なることについては、乾燥によらない体積変化成分である硬化収縮の影響と考察している^{2),12)}。本実験では、脱枠時のひずみを0としているため、乾燥が直接の原因でない経時的な体積変化成分が存在した場合、その影響は脱枠を行う材齢が早いほど、観察されるひずみに多く含まれることになる。高炉スラグ微粉末を用いた配合S6の硬化収縮が大きいとの仮説を立てれば、本実験結果の傾向を説明することができる。

(2)乾燥収縮ひび割れ特性

Fig.7は乾燥時間と、拘束板により収縮を拘束されることによりコンクリートに導入される断面平均応力との関係を示したものである。図中で応力が開放されている時点はひび割れが発生したことを示している。本試験によると、多くの場合、概ね数日から数十日の乾燥期間でひび割れが発生する⁶⁾。ひび割れが発生するまでの日数は、拘束条件下での乾燥収縮ひび割れ特性を評価するひとつの指標である。

実験結果を概観すると、脱枠を行う材齢の違いよりも、使用材料の違いの方が、ひび割れ発生日数に

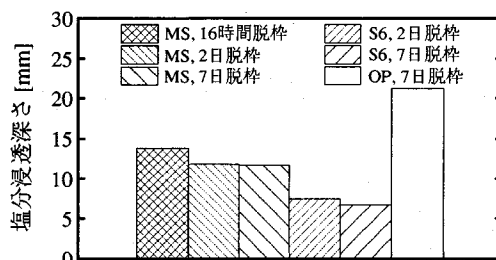


Fig.9 塩分浸透試験結果

与える影響が大きい。中庸熱セメントベースの配合MSは、いずれの材齢において脱枠を行った場合にも50日程度の日数でひび割れが発生し、高炉スラグ微粉末を使用した配合S6は、10日程度の乾燥期間でひび割れが発生した。なお、本実験条件下では、比較のために行った普通コンクリートOPのひび割れ発生日数は27日であり配合MSとS6の中間となった。

高炉スラグ微粉末を用いた配合S6のひび割れ発生日数が短い理由については、乾燥開始以前の硬化収縮が大きいこと^{2),12)}、高炉スラグ微粉末によりもたらされる結晶の性質に起因して、持続引張応力を受けたときに脆性的な性質を示すことを、可能性として検討中である。

(3)中性化

Fig.8は中性化深さを示している。配合MSと配合S6の中性化に対する抵抗性は同程度であり、いずれも脱枠を行う材齢が早い場合ほど抵抗性が小さい。これらのコンクリートを材齢2日に脱枠した場合の中性化深さが、水セメント比55%の普通コンクリートOPを材齢7日に脱枠した場合にほぼ匹敵している。

(4)塩分浸透性

Fig.9は塩分浸透深さを示している。中性化試験結果と同様に、脱枠を行う材齢が早い場合ほど、塩分浸透深さが大きい傾向が認められるが、その変化の大きさは中性化の場合に比べて小さい。

配合MS、配合S6ともに、普通コンクリートOPに比べると、塩分浸透抵抗性は高く、配合MSを材齢16時間で脱枠した場合でも、普通コンクリートOPを材齢7日で脱枠した場合よりも、抵抗性が高い結果となっている。

塩分浸透抵抗性に関しては、配合MSに比べて、高炉スラグ微粉末を使用した配合S6の方がわずかに優れていることが認められる。

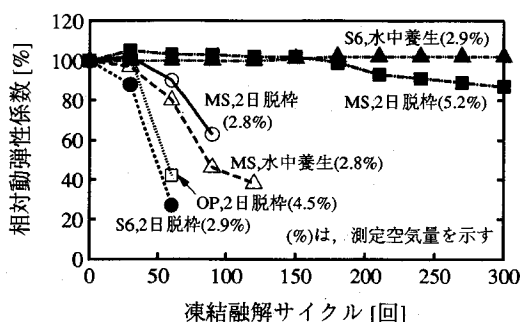


Fig.10 耐凍害性試験結果

(5)耐凍害性

Fig.10は凍結融解回数と相対動弾性係数の関係を示している⁹⁾。材齢2日に脱枠し気中養生を行った場合には、空気量を少なくした配合MS（測定空気量2.8%）とS6（測定空気量2.9%）、普通コンクリートOP（測定空気量4.5%）は、いずれも100サイクル以下の凍結融解回数で劣化する結果となった。

空気量を少なくした配合MSとS6は、比較のため水中養生を行った場合についても試験した。配合MSは養生方法による耐凍害性の改善は見られず、気中養生と同程度の結果となった。一方、高炉スラグ微粉末を使用した配合S6は、空気量が2.9%であるにもかかわらず、高い耐凍害性を示した。この理由については、細孔構造、気泡組織の観察、コンクリート強度の面から別報⁹⁾において検討したが、現段階では明らかではない。しかし本結果は、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、良好な養生環境を与えることによって性能が著しく向上する側面を有していることを示すものであるといえる。

また、配合MSでは測定空気量が5.2%で、気中養生を行った場合についても試験した。空気量を適量混入した場合、材齢2日に脱枠し、その後気中養生を行った場合であっても耐凍害性が確保されることを確認した。なお、空気量を5.2%とした場合の28日圧縮強度は49.4MPa（2日脱枠、気中養生）であり、耐凍害性の試験以外の試験で用いた配合MS（測定空気量4.2%）の試験結果と大差ないことから、この範囲で空気量を変化させても、諸品質を大きく低下させるものではないと考えている。

5. ハイパフォーマンスコンクリートを用いた早期脱枠施工に関する考察

(1)硬化後の品質に関する総合的検討

Fig.11は、配合MS、配合S6のハイパフォーマンス

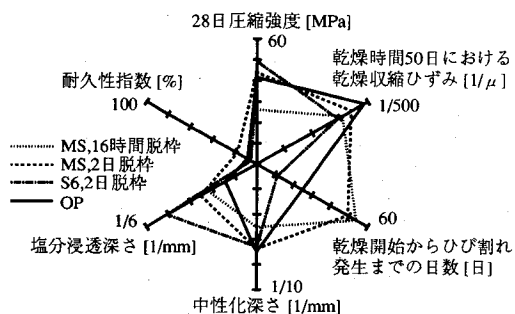


Fig.11 早期脱枠を行ったコンクリートの硬化後の品質

コンクリートを早期に脱枠した場合に得られた硬化後の諸品質と、普通コンクリートOPに良好な養生（ただし耐凍害性はOPも2日脱枠）を行った場合の結果とを比較したものである。すべての項目について、原点からの距離が大きいほど、その品質の優れていることを意味するように、乾燥収縮ひずみ、中性化深さ、塩分浸透深さについては、試験値の逆数により表示している。

中庸熟ポルトランドセメントを主として使用したハイパフォーマンスコンクリートMSを材齢2日に脱枠し、その後特別な養生を行わない場合には、水セメント比55%の普通コンクリートOPに良好な養生を行った場合に比べて同等またはそれ以上の品質が、圧縮強度、乾燥収縮、乾燥収縮ひび割れ、中性化、塩分浸透性の項目に関して得られていることがわかる。また本図には示していないが、十分な量の空気を混入することによって、2日脱枠を行った場合であっても、耐凍害性を確保し得ることを確認した。本コンクリートを材齢16時間に脱枠した場合には、強度と中性化に対する抵抗性が普通コンクリートよりも劣ることとなる。

高炉スラグ微粉末を使用したハイパフォーマンスコンクリートS6は、脱枠を行う材齢に関わらず、乾燥収縮ひび割れが発生しやすい傾向にある。圧縮強度、乾燥収縮、中性化、塩分浸透性に関しては、配合MSのコンクリートと同様、材齢2日に脱枠を行った場合であっても、普通コンクリートに養生を施した場合と同程度となる。

(2)実構造物への適用の可能性に関する考察

ハイパフォーマンスコンクリートは締固めをしないことで、従来一般のコンクリートを十分に締固めた場合と同レベルの性能を発揮するコンクリートである。むしろ締固め作業を行えば、分離してしまうことすらある。つまりハイパフォーマンスコンクリートの場合、締固めをしないことがコンクリート

の持つ性能を最大限に引き出す積極的手段である。

しかし養生については、十分に行うほどコンクリートの性能を引き出すことができ、養生レベルを落とすことにより性能が低下することは事実である。したがって、十分な養生のもとでいかに高い性能を発揮し得ることが明らかで、かつ養生を省くことで施工にメリットがもたらされる場合であっても、性能の定量把握なしに養生レベルを落とすことは許されない。

本研究は養生レベルを変化させたときのハイパフォーマンスコンクリートの性能の定量把握に関して、端緒となる研究として位置づけられるべきものと認識している。

行った実験はいずれも室内実験であり、実験項目、実験水準も限られている。実構造物への適用に関して一般性の高い結論を論理的に導くには、さらに広範囲で詳細な検討が必要である。しかし、得られた実験結果は以下の可能性を示唆するものである。

水セメント比55%の普通コンクリートを用いて施工し、標準的な養生を施した場合に十分な耐久性が確保できると考えられる構造物、すなわち、一般的な土木構造物は、ハイパフォーマンスコンクリートMSを用いて施工し、材齢2日で脱枠を行い、その後の養生を省略した場合であっても、強度、乾燥収縮、乾燥収縮ひび割れ、中性化、塩分浸透性、耐凍害性の上で問題はないと考えることができる。また、本コンクリートを材齢16時間に脱枠した場合には、硬化後の諸品質は普通コンクリートに比べてやや劣ることとなるが、その程度はわずかであるので、要求される耐久性が厳しくない構造物に適用することは可能であると考えられる。

高炉スラグ微粉末を使用したハイパフォーマンスコンクリートS6は、ひび割れの発生が特に問題とならない場合であれば、早期脱枠を行い、その後の養生を省略することが可能であると思われる。しかしながら、高炉スラグ微粉末を使用することの利点のひとつは、十分な養生を行ったときに、耐凍害性を著しく向上できることであるので、本コンクリートは、早期脱枠よりはむしろ、十分な養生を期待できる場合に用いた方が、使用材料の長所を生かすことになろう。

なお本研究では、早期に脱枠し、その後の養生を完全に省略するという条件のもとで実験を行った。養生を完全に省略するのではなく、たとえば散水を行う期間を短縮するなど、養生の簡略化を行うことも、現実的には採り得る手段である。その場合には、養生を完全に省略した場合よりも高い品質が得られることは本実験結果からも明らかであり、適用可能な範囲は広まるといえる。

今後の課題として、養生レベルを変化させたときに得られるコンクリートの品質の把握に関して、さらに広範囲で詳細な検討が必要である。また同時に、コンクリートの品質、実際の環境条件、構造条件をもとに実構造物の耐久性能を定量評価する技術の確立が、一方では不可欠である。

6. まとめ

本研究では、2種類のハイパフォーマンスコンクリートを用いて、早期に脱枠を行い、養生を省略したときに得られる硬化後の品質について系統の実験を行った。実験結果をもとに、早期脱枠と養生の省略、簡略化を組み合わせた施工の可能性について考察した。本研究において得られた知見をまとめる。

(1) 本研究において用いた2種類のハイパフォーマンスコンクリートはいずれも、材齢2日で脱枠し、その後特別な養生を行わない場合であっても、得られる強度は一般の構造物に用いるには十分である。

(2) 中庸熟ポルトランドセメントを粉体の主成分として用いたハイパフォーマンスコンクリートを、材齢2日で脱枠した場合に得られる硬化後のコンクリートの品質は、圧縮強度、乾燥収縮、乾燥収縮ひび割れ、中性化、塩分浸透性に関し、水セメント比55%の普通コンクリートに良好な養生を施した場合と、同等またはそれ以上である。また十分な空気量を混入することにより、材齢2日で脱枠する場合にも耐凍害性を確保できる。

(3) 高炉スラグ微粉末を粉体の一部に用いたハイパフォーマンスコンクリートは、養生条件に関わらず、乾燥収縮ひび割れが発生しやすい傾向にある。早期脱枠を行った場合の、圧縮強度、乾燥収縮、中性化、塩分浸透性は、中庸熟ポルトランドセメントを用いたハイパフォーマンスコンクリートと同程度である。ただし、十分な養生を行った場合には、耐凍害性が著しく向上する。

謝辞：本研究を行うにあたり、東京大学岡村 甫教授、前川宏一助教授、小澤一雅助教授の御指導と御示唆を得た。実験は、山宮浩信氏（エヌエムビー）、石田良平氏（熊谷組）、西田徳行氏（西松建設）、福留和人氏（間組）の諸氏と共同で行ったものである。実験に使用したセメントおよび石灰粉は、セメント協会に提供して頂いた。御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.
- 2) Tazawa, E. and Miyazawa, S.: Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete engineering, *Proc. of the fifth international RILEM symposium on creep and shrinkage of concrete*, pp.159-168, 1993.
- 3) 佐藤文則: コンクリートの耐久性に及ぼす養生の影響, *コンクリート工学*, Vol.30, No.9, pp.48-52, 1992.
- 4) 宇野洋志城, 西田徳行, 下村 匠: ハイパフォーマンスコンクリートの強度発現特性, 第47回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, pp.628-629, 1992.
- 5) 仕入豊和, 青柳征夫, 川瀬清孝: コンクリートのひび割れ試験法(案), *コンクリート工学*, Vol.23, No.3, pp.40-44, 1985.
- 6) ひび割れ研究会: コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験法の標準化とその適用性に関する研究(その4・完), *セメント・コンクリート*, No.536, pp.62-71, 1991.
- 7) 西田徳行, 福留和人, 下村 匠: コンクリートの単位水量と乾燥収縮ひびわれ抵抗性, 第47回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, pp.946-947, 1992.
- 8) 石田良平, 山宮浩信, 下村 匠: ハイパフォーマンスコンクリートの中性化深さとその評価法, 第47回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, pp.338-339, 1992.
- 9) 山宮浩信, 石田良平, 下村 匠: 各種粉体を用いたコンクリートの細孔構造と凍結融解抵抗性, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.16, pp.573-578, 1994.
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 1991.
- 11) 下村 匠, 福留和人, 小澤一雅: 細孔構造モデルによるコンクリートの乾燥収縮特性の評価, *超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集*, 日本コンクリート工学協会, pp.167-174, 1993.
- 12) 宮澤伸吾: 自己収縮および乾燥収縮によるコンクリートの自己応力に関する研究, 広島大学学位論文, 1992.

(1994. 1. 21 受付)

STUDY ON PROPERTIES OF HARDENED HIGH PERFORMANCE CONCRETE STRIPPED AT EARLY AGES

Takumi SHIMOMURA and Yoshiki UNO

High Performance Concrete, which was developed by the group in the University of Tokyo, is originally designed with low water-cement ratio for the purpose of self-compactability. Therefore, this concrete has sufficient performance in hardened state for ordinary concrete structures even when it is not well cured. In this study, systematic experiments are carried out in order to evaluate the durability of hardened High Performance Concrete when it is stripped at early ages. Two types of High Performance Concrete are used. Some properties related to the durability, such as compressive strength, drying shrinkage, cracking resistance, carbonation, salt penetration and freezing-thawing, are examined. The applicability of High Performance Concrete for early form-removal is discussed based on the experimental results.