

論文

[1155] 寒冷期に施工するマスコンクリートの温度履歴と強度発現に関する研究

正会員 桑原 隆司 (清水建設技術研究所)

正会員 ○ 西田 朗 (清水建設技術研究所)

1. はじめに

寒冷期に行うコンクリート工事は、初期凍害の防止、早期強度の確保、保温養生等の検討を要し、常温時の施工とは異なる点が多い。特に、低温時に所定の材令で強度を確保するために、土木学会¹⁾ではポルトランドセメントの使用を標準としており、また日本建築学会²⁾でも強度発現が遅れる低熱型セメント等を用いることは得策ではないとされている。

一方、マスコンクリートの施工においては、構造体が水和熱による温度履歴を受けるため強度発現が一般のコンクリート構造体の場合とは大きく異なる傾向を示し^{3, 4)}、さらに水和熱による温度ひびわれに関する検討を要する場合がある。温度ひびわれの防止策の一つとして高炉セメント等の低熱型セメントの使用が有効であり⁵⁾、一般には強度増進が遅いとされる低熱型セメントもマスコンクリートに使用した場合は比較的早期での強度発現が期待できるものと考えられる⁶⁾。

しかし、寒冷期に施工するマスコンクリートの温度履歴や強度発現に関しては不明な点が多く、特に低温環境下では強度発現が遅れるため一般の構造体には適さないとされる低熱型セメントを使用したマスコンクリートに関するデータはほとんど見られない。そこで、本研究では寒冷期に施工するマスコンクリートについて、普通ポルトランドセメントと低熱型の高炉セメントを使用した場合の温度特性と強度特性を把握し、これらのセメントを使用した場合の施工上の留意点を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

コンクリートに使用したセメント、骨材の諸性質を一覧にして表-1に示す。高炉セメントについては、B種およびC種が低熱系のセメントに属する⁵⁾とされているが、B種のスラグ混入率は30%を越え60%以下と幅が広く、製品により性能に差があるものと考えられる。そこで、今回の実験には高炉セメントの特性をより明確に捉えることを目的として、スラグ混入率65%の高炉セメントC種を使用した。

表-1 セメント,骨材の性質

材 料	種 類	諸 性 質
セメント	普通ポルトランド	比重3.16, 比表面積3130cm ² /g
	高炉セメントC種	比重2.99, 比表面積3770cm ² /g, スラグ混入率65%
骨 材	鬼怒川産川砂利	比重2.61, 最大寸法25mm, 吸水率1.61%
	鬼怒川産川砂	比重2.59, 粗粒率2.78, 吸水率2.03%

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの調合は、単位セメント量を 300kg/m³とし、水セメント比はいずれのコンクリートにおいても材令28日における標準水中養生を行った供試体の強度がほぼ同

表-2 コンクリートの調合

セメント	水セメント比 %	目 標 スランプ cm	目 標 空 気 量 %	細骨材率 %	単位水量 kg/m ³	重 量 (kg/m ³)			混和剤 kg/m ³
						セメント	砂	砂 利	
普 通	55.0	15.0	4.0	38.0	165	300	689	1132	0.054
高炉C種	51.0	15.0	4.0	41.0	153	300	750	1088	0.108

レベルになるように、普通ポルトランドセメントの場合で55%，高炉セメントC種の場合で51%とした。実際の調査は、これらの条件を踏まえてスランプ15cm，空気量4%を目標に試し練りを行い決定した。調査を表-2示す。

2.3 試験装置

マスコンクリートの温度履歴および強度発現を把握するために使用した装置の概要を図-1に示す⁷⁾。シミュレーション・システムは部材の最小部材厚方向の温度分布(T)および経時的な温度変化を捉えることができる装置で、本実験では、壁状のマスコンクリート部材を想定した。また、強度管理システムは部材の温度履歴を水槽内の供試体に与えることによりマスコンクリートの強度発現を捉えることができる装置である。

2.4 実験方法

常温環境下と低温環境下での施工の比較を目的として外気温を10℃に設定した恒温室に、上記の装置を設置し、部材厚(W)1,600mmおよび800mmの壁状マスコンクリートを想定した試験体について実験を行った。

測定項目は温度および圧縮強度で、温度測定は打込み温度を10℃に調整したコンクリートの打込み直後からの部材内部の経時変化について行った。圧縮強度は、標準水中養生を行った供試体および部材中心部，表面部（表面より70mm）の温度履歴を与えた供試体について所定の材令で試験を行った。同時に、シミュレーション・システムに打ち込んだ試験体よりコアを採取し、圧縮強度試験を行った。

また、常温時の施工を想定して、高炉セメントC種を使用したコンクリートについて外気温および打込み温度を20℃とした部材厚1,600mmのケースでの実験も行った。なお、20℃の条件における普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに関しては既報⁷⁾の結果を用いた。

実験条件と試験材令の対応を表-3に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 マスコンクリート部材の温度履歴

各コンクリートの温度履歴の測定結果を要約して表-4に示す。また、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの部材中心部および表面部（表面より10mm）の温度履歴を図-2に示す。同様に、高炉セメントC種を使用したコンクリートの温度履歴を図-3に示す。図-4には、各コンクリートの部材中心部で最高温度を記録した材令における部材内部の温度分布を示す。

普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは、部材厚が1,600mmの場合に10℃のケ

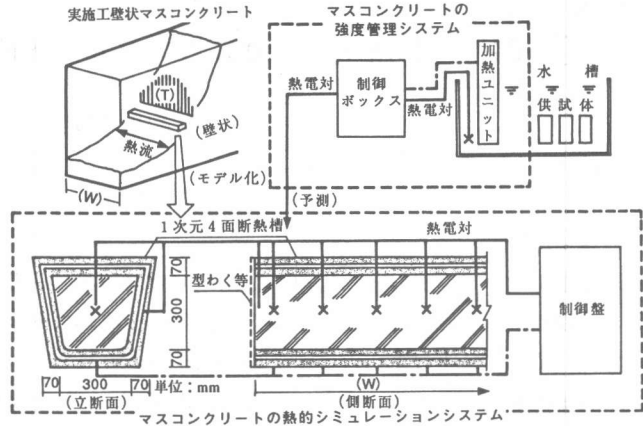


図-1 実験に使用したシステム概念図

表-3 実験条件と試験材令の対応

No.	セメント	温度 ℃	部材厚 mm	試験材令 (日)	コア試験材令 (日)
1	普通	20	1,600	1, 3, 7, 14, 28	14, 28
2		10	1,600	1, 3, 7, 14, 28	14, 28
3		10	800	56, 91	14
4		20	1,600	1, 3, 7, 14, 28, 56, 91	14, 28
5		10	1,600		14, 28
6		10	800		14

ースでは温度上昇速度が緩やかで最高温度に達する材令が20℃のケースに比べ1.6日遅くなっている。これに対して、部材厚800mmの場合は温度上昇量が小さく、最高温度に達する材令も早い。また、部材中心部と表面部の温度差も小さなものになっている。

つぎに、高炉セメントC種を使用したコンクリートでは、部材厚1,600mmの場合に20℃に比べて10℃のケースのほうが温度上昇量が6℃程度小さい。部材厚800mmの場合は、温度上昇量が10℃程度と小さく、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと同様に部材厚が小さくなると最高温度に達する材令が早く、中心部と表面部の温度差も小さくなる傾向を示した。

3.2 温度履歴に関する施工上の留意点

低温環境下において部材寸法の大きいマスコンクリートに普通ポルトランドセメントを使用する場合は、部材内部の温度勾配を極力小さくするために、部材の寸法を考慮した型わくの取り外しやその後の養生を行うことが望まれる。このため、中心部が最高温度を示す時期に型わくを取り外して表面部の温度を急速に低下させることなどがないようにしなければならない。

一方、低熱型の高炉セメントを使用する場合は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと異なる温度履歴の傾向を示し、極端な温度上昇、温度降下が見られないため、水和熱に起因する温度ひびわれの危険性は非常に低いものと思われる。しかし、部材表面部では若材令でも温度上昇がほとんど見られず外気温に近い温度のまま推移しているため、より寒冷な条件において低熱型セメントを使用してマスコンクリートを施工する場合は、初期凍害に対する防止策を十分検討することが必要となる。

3.3 マスコンクリート部材の強度発現

図-5に各コンクリートの標準水中養生および部材内部の温度履歴を与えた供試体の圧縮強度試験結果を示す。

普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは、低温環境下では20℃のケースと異

表-4 温度履歴測定結果

No.	セメント	温度 ℃	部材厚 mm	打込み 温度 ℃	中心部		最高温度時 材令
					最高温度 ℃	上昇量	
1	普通	20	1,600	21.3	55.4	34.1	1.7
2		10	1,600	8.1	40.1	32.0	3.3
3		10	800	11.4	33.5	22.1	2.1
4	高炉C種	20	1,600	20.5	42.6	22.1	3.1
5		10	1,600	9.1	24.7	15.6	2.9
6		10	800	9.6	19.7	10.1	1.8

注) 最高温度, 上昇量: °C 材令: 日

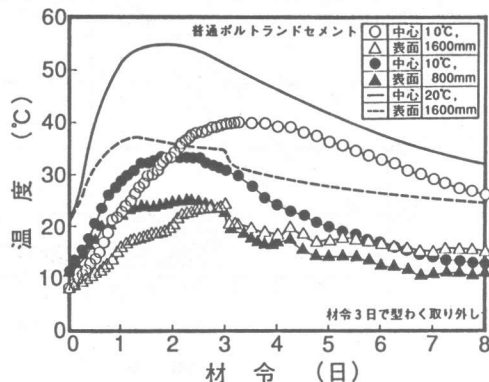


図-2 部材内部の温度履歴 (普通ポルト)

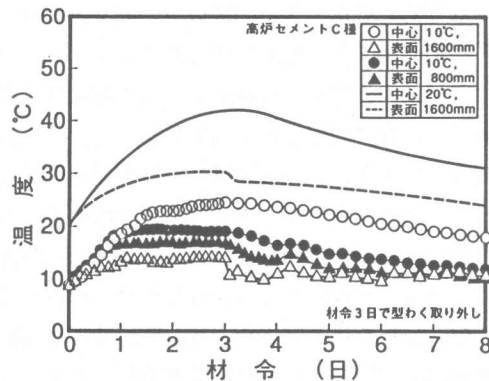


図-3 部材内部の温度履歴 (高炉C種)

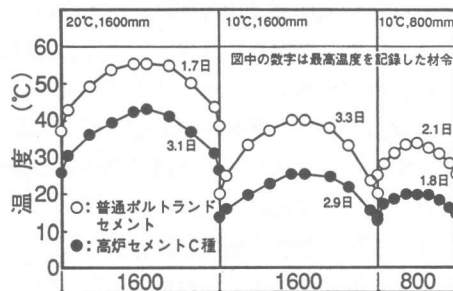


図-4 部材内部の温度分布

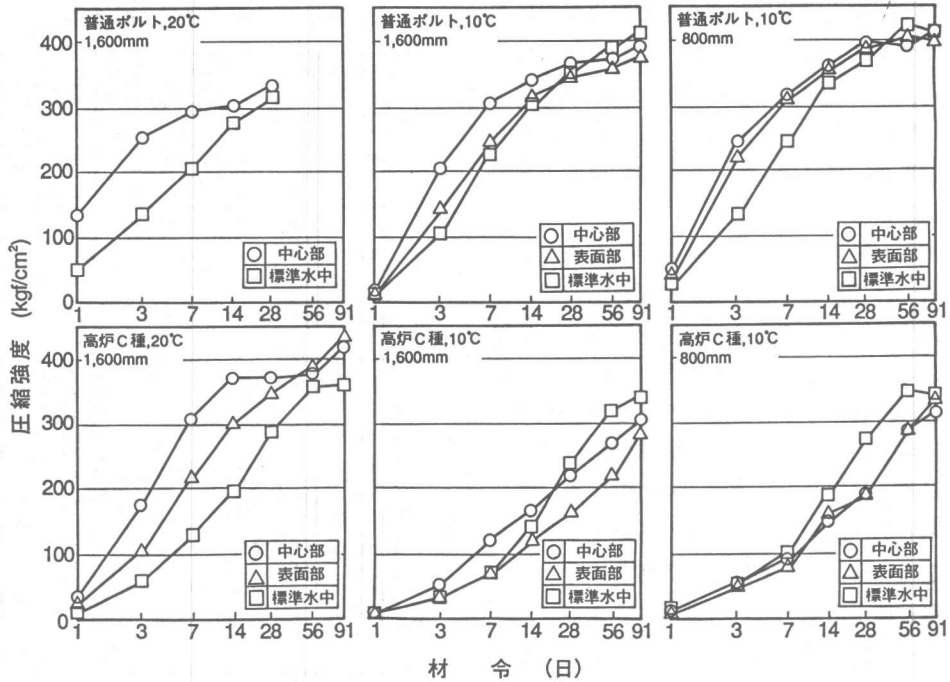


図-5 マスコンクリートの強度発現

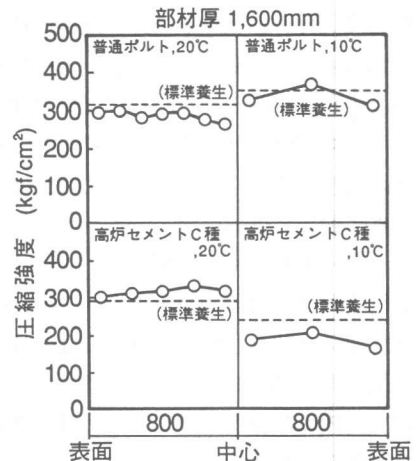
なり材令1日の段階で強度発現が遅れるが、その後は7~14日程度まで大きな増進を見せ、材令28日で20°Cのケースと同等以上の強度となり、長期の材令でもある程度の強度発現が見られる。

高炉セメントC種を使用したコンクリートでは、低温環境下において部材内部の温度履歴を受けた供試体は材令7日程度まで大きな強度発現を示すことはなく、標準水中養生を行ったものを若干上回るか同程度となっている。また、7日以降の材令では標準水中養生を行った供試体の強度発現が大きく、28日以降は部材の温度履歴を受けた供試体の強度を上回る値となった。20°Cのケースとの比較では、材令91日まではいずれの材令でも低温時のほうが低い強度となった。

図-6に、シミュレーション・システムで温度測定を行ったコンクリートより採取したコアの材令28日における強度分布を示す。これより、常温時には部材内部で大きな温度勾配を生じる温度履歴を受けても、強度分布はほぼ一様と見なすことができる。これに対して、低温環境下では部材表面部で中心部に比べ若干低い強度となっている。また、標準水中養生を行った供試体強度と比較すると、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは同等か若干低めの値となるが、高炉セメントC種を使用したコンクリートでは、全体的に標準水中養生より若干低い強度となった。

3.4 強度発現に関する施工上の留意点

図-7に低温環境下で部材内部の温度履歴を与えた供試体の強度によりマスコンクリート部材の強度発現を評



価した結果を示す。これによると、セメントの種類による強度発現の傾向の違いは明瞭で、普通ポルトランドセメントを使用した場合は材令28日程度で部材の強度が標準水中養生と同程度になるが、高炉セメントC種を使用した場合は強度発現が遅れ、部材の強度発現率が100%に達するのは中心部で材令28日以降となり、表面部では56日程度を要する。しかし、長期材令における強度発現は普通ポルトランドセメントに比べ高炉セメントC種のほうが大きくなっている。このため、寒冷期において低熱型の高炉セメントをマスコンクリート施工へ適用する場合は、長期における強度の増進がかなり期待できることを考えあわせて所要の強度を得るための十分な工期を見込んでおくことが必要である。

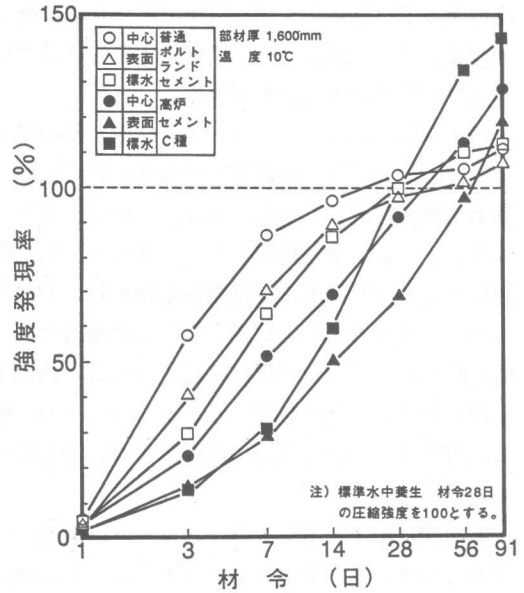


図-7 セメントの種類による強度発現の比較

図-8に各コンクリートの部材内部の温度履歴を与えた供試体と標準水中養生を行った供試体の強度差を示す。これより、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは、部材内部の強度が材令28日程度まで標準水中養生の強度を上回っており、低温環境下ではそれ以降の材令で同等か若干低めの強度となっている。このため、標準水中養生強度を基に構造体強度の判定を行う場合は、材令28日程度まではかなり安全側の推定となり、それ以降においては若干危険側の推定となる可能性がある。これに対して、高炉セメントC種を使用した場合は常温時には部材強度が標準水中養生強度を大きく上回るが、低

温度環境下ではそれ以降の材令で同等か若干低めの強度となっている。このため、標準水中養生強度を基に構造体強度の判定を行う場合は、材令28日程度まではかなり安全側の推定となり、それ以降においては若干危険側の推定となる可能性がある。これに対して、高炉セメントC種を使用した場合は常温時には部材強度が標準水中養生強度を大きく上回るが、低

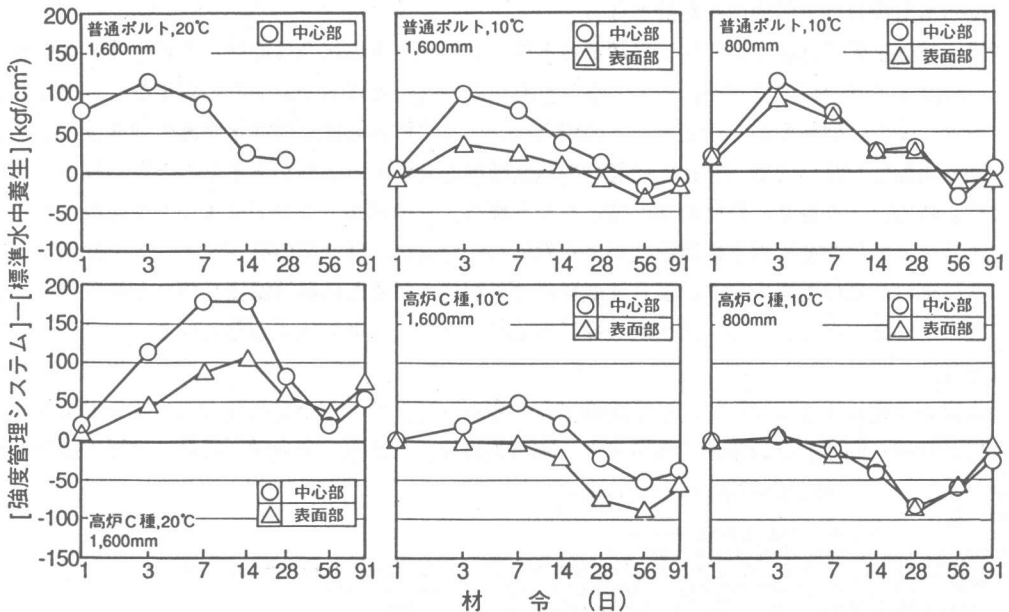


図-8 部材内部と標準水中養生の強度差

温環境下では材令7～14日以降で部材強度が標準水中養生強度を大きく下回るため、標準水中養生供試体による構造体強度の判定には注意を要する。

図-9は、各コンクリートの部材中心部の温度履歴を与えた供試体の標準水中養生28日強度に対する強度発現率を積算温度で整理したものである。これによると、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは温度履歴が異なっても積算温度と強度発現は良い対応を示している。しかし、高炉セメントC種を使用した場合は部材が受けた温度履歴により強度発現に差が見られるため、強度発現の背景となる温度履歴が異なるコンクリートの強度推定を積算温度を使って行う場合には補正等が必要と思われる。

4. まとめ

寒冷期に施工するマスコンクリートの温度、強度管理を目的として、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントC種を使用して実験を行った。本研究の範囲で得られた結果から寒冷期に施工するマスコンクリートの施工上の留意点をまとめると以下の通りである。

(1)普通ポルトランドセメントを使用する場合は、部材寸法

により最高温度に達する材令が異なるため、部材内部の温度勾配を極力小さくするよう型わく取り外し時期の決定やその後の保温養生に注意が必要である。

(2)低熱型の高炉セメントを使用する場合は、部材表面部では温度上昇がほとんど見られないため初期養生を入念に行うことが必要となるが、長期材令まで強度発現が期待できるため工期に余裕のある場合はその適用が有効となる。

(3)構造体強度の管理については、普通ポルトランドセメントの場合は標準水中養生強度は材令28日程度まで安全側の推定を行っており、それ以降の材令では若干危険側の推定を行う可能性がある。一方、低熱型の高炉セメントの場合は、部材内部の強度が標準水中養生強度を大きく下回る可能性が高いので、判定には部材の温度履歴も考慮する必要があると思われる。

(4)常温時のデータを基に部材の強度推定を行う場合、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは強度発現と積算温度がよく対応しているが、低熱型の高炉セメントを使用する場合は部材が受けた温度履歴により強度発現に差が見られるため積算温度を用いた強度推定には補正が必要となる。なお、具体的な補正方法については今後の研究課題となる。

〈謝辞〉

本研究を遂行するに際して、日本建築学会 寒中コンクリート小委員会主査の関東学院大学 洪悅郎教授と同委員会幹事の北海道大学 鎌田英治教授、北見工業大学 長島弘教授の御教示を戴いた。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 施工編、土木学会、昭61
- 2) 寒中コンクリート施工指針・同解説、日本建築学会、1989
- 3) 地嶋茂雄、住入豊和：コンクリートの強度発現におよぼす温度履歴条件（20℃～90℃）の影響、日本建築学会論文報告集、337号、1984、3
- 4) 栗原隆司：マスコンクリートの温度ひびわれ発生危険性評価方法に関する研究、学位論文、1984、7
- 5) 高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説、日本建築学会、1989
- 6) 沼田晋一：高炉スラグ微粉末の利用、コンクリート工学、vol.25、No.9、1987、pp.28～39
- 7) 栗原隆司、安斎俊哉、森永 繁：マスコンクリートの強度管理方法及管理装置の研究、第9回 コンクリート工学年次論文報告集、1987、pp.79～84

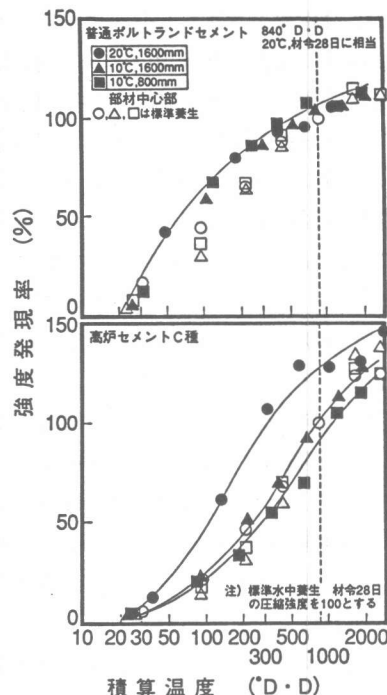


図-9 強度発現と積算温度の対応