

論文

[1058] 超微細な高炉スラグ粉末を用いたコンクリートの凝結硬化性状と環境温度の影響

正会員 ○ 三浦 律彦 (大林組技術研究所)
 正会員 十河 茂幸 (大林組技術研究所)
 芳賀 孝成 (大林組技術研究所)

1. ま え が き

産業副産物である高炉スラグは、古くからコンクリート用材料として広く使われてきたが、中でも水砕スラグは潜在水硬性が注目され、微粉碎されて高炉セメント等の混合材として大量に使われている。特に、近年では資源の有効利用やコンクリート構造物の耐久性向上の観点から、水砕スラグの微粉末（以下スラグ微粉末と呼ぶ）の使用量は高炉セメントの使用量の増加と相まって増加する傾向にある。

従来の高炉セメントには粉末度（ブレン値）が 3,000~4,000 cm²/g クラスのものが使用されているが、これを大量に用いた場合（B種、C種）、コンクリートに十分な強度を発現させるため幾分長めの湿潤養生が必要とされており、脱枠の時期についても少し長くするよう¹⁾定められていて、その使用範囲は土木構造物などで早期強度が重要でないようなものに限られていた。

しかし、粉碎・分級技術の著しい向上により、従来のものよりさらに微粉末化することが可能となり、近年では粉末度が 8,000~10,000 cm²/g クラス以上のもも生産されるようになってきた。これらの超微細なスラグ微粉末をコンクリート用混和材として使用した場合、材令初期の強度発現が従来の 3,000~4,000 cm²/g クラスのものを用いた場合に比べてかなり促進されることが報告されている^{2), 3)}。従って、この超微細なスラグ微粉末を用いれば早期強度も改善できることから、今後は土木・建築の一般構造物などにも広く適用されてゆくことが予想されるが、この場合、低温下や高温下での強度発現性状に関してはまだ不明の点も多い。

そこで、本研究ではこれらの超微細なスラグ微粉末を用いたコンクリートの凝結・強度発現性状に着目し、それらに影響を及ぼすと思われる凝結・硬化過程の温度条件（寒中、暑中、水和熱による高温履歴）を取り上げ、実験的に検討を加えた。

2. 実験概要

表-1 使用材料とその特性

2.1 使用材料

実験に使用した各種材料の種類と性状を表-1に示す。このうち、高炉スラグ微粉末は高炉セメントB種にブレンドされている粉末度4,000cm²/gクラスのもの、その他6,000、8,000cm²/gクラスの超微粉末を用いた。なお比較のために、高炉スラグ微粉末（8,000cm²/gクラス）とスラグ細骨材を含む早強系の特殊プレミックスモルタル（DM）やシリカフェーム（SF）も一部の配合で用いた。

種類	略号	名称	銘柄・産地	比重	特性・主成分など
セメント	NP	普通ポルトランド	C社製	3.16	比表面積（ブレン）3,240cm ² /g
	HP	早強ポルトランド	C社製	3.14	比表面積 4,180 cm ² /g
	BB	高炉セメントB種	NH社製	3.05	比表面積 3,780 cm ² /g Sg:45%
	DM	特殊プレミックスドライモルタル	NT社製	2.94	早強ポルトランド(30%) 8,000クラススラグ微粉末(30%) 1.2mm アンダースラグ細骨材(40%)
細骨材	S	山砂	木更津産	2.60	吸水率 1.68%, FM 2.68
粗骨材	G	砕石	青柳産	2.64	G _{max} 20mm, 吸水率 0.59%, FM 7.68
混和材	Sg(A)	高炉スラグ微粉末	DC社製	2.91	比表面積 6,200 cm ² /g, 塩基度 1.81
	Sg(B)	高炉スラグ微粉末	DC社製	2.91	比表面積 8,230 cm ² /g, 塩基度 1.79
	SF	シリカフェーム	NJ社製	2.25	平均粒子径0.36μm, SiO ₂ 88.6%
混和剤	AE減	標準型AE減水剤	PZ社製	1.25	リグニン系・ポリオール系
	SP	高性能減水剤	SF社製	1.15	リグニン系・ナフタレン系
	高AE-A	高性能AE減水剤A	PZ社製	1.05	ポリカルボン酸エーテル系
	高AE-B	高性能AE減水剤B	K社製	1.14	特殊アニオン系
	AE助	空気連行助剤	PZ社製	—	特殊アニオン系

（注）DMは早強系の特殊プレミックスモルタル（DM）やシリカフェーム（SF）も一部の配合で用いた。

2.2 実験シリーズと比較検討項目

本研究は以下に示す4つの実験シリーズから成っている（比較検討要因は表-2を参照）。

(1) 標準養生したコンクリートの圧縮強度の発現性状に関する実験

超微細なスラグ微粉末を混入したコンクリートの強度発現性状を調べる目的で、水結合材比が30～60%の配合(スランブ12～21cm程度)で圧縮強度試験を実施した。微粉末の混入率はセメント重量の内割で50%を標準とし、一部のもので混入率の違いの影響を見るため30, 60%とした。

(2) 材令初期に低温作用を受けた場合の強度発現特性に関する実験(寒中コンクリート実験)

超微細なスラグ微粉末を混入したコンクリートが凝結・硬化時に低温作用を受けた場合、その後の強度発現性状にどのような影響を受けるかを調べる目的で、冬季に屋外で寒中コンクリート実験を実施した。コンクリートの練上り温度は7℃程度に調整し、材令7日まで屋外日陰(3日まで型枠内、その後は水中)に放置し、その後標準養生に切り替えて圧縮強度の発現性状を比較した。セメントは普通(NP)と早強(HP)の2種類とし、水結合材比は43.5%、微粉末の混入率はセメント重量の内割で40%と一定にした。

(3) 凝結時に高温作用を受けた場合の強度発現特性に関する実験(暑中コンクリート実験)

超微細なスラグ微粉末を混入したコンクリートが凝結時に高温作用を受けた場合、その後の強度発現性状にどのような影響を受けるかを調べる目的で、暑中コンクリート実験を実施した。コンクリートの練上り温度は30℃に調整し、材令1日まで30℃の室温で型枠内養生し、脱型後20℃の水中で標準養生して圧縮強度の発現性状を比較した。なお、コンクリートの配合は、練上り温度20℃で標準養生材令28日の圧縮強度がほぼ等しくなるよう水結合材比を変化させた(表-2)。

(4) 材令初期に高温履歴を受けた場合の強度発現特性に関する実験(高温履歴実験)

超微細なスラグ微粉末のマスコンクリート工事への適用性を調べる目的で、コンクリートの断熱温度上昇量と同じ温度履歴を追随槽(湿度95%以上)内の供試体に与えた場合、どのような強度発現性状を示すかを調べた。温度履歴は打設後から材令7日まで継続して与え、その後標準養生に切り替えて強度発現性状を比較した。配合は標準養生材令28日の圧縮強度がほぼ等しくなるよう調整した。試験項目は凝結性状、断熱温度上昇量のほか圧縮、引張強度を比較した。

表-2 各種の実験シリーズにおける比較検討要因

実験シリーズ	セメント、混和材の種類	その他の配合要因	養生条件	試験項目
1 (標準養生)	①NP ②BB ③DM ④NP+Sg(A) ⑤NP+Sg(B) ⑥HP+Sg(B) ⑦HP+SF	・W/C=30～60% ・スラグ粉末混入率(30,60,)50% ・シリカフューム15%	標準養生	・圧縮強度
2 (寒中コン)	①NP ②HP ③NP+Sg(B) ④HP+Sg(B)	・W/C=43.5% ・スラグ粉末混入率40%	①標準養生 ②屋外寒中養生(7日間)以後標準養生	・圧縮強度(最低気温-5℃ 練上7℃)
3 (暑中コン)	①NP ②DM ③NP+Sg(A)50% ④NP+Sg(B)50%	・W/C(%) ①45 ②60 ③50 ④50	材令1日まで高温30℃以後標準養生	・圧縮強度 ・凝結性状(練上30℃)
4 (高温履歴)	①NP ②BB ③DM ④NP+Sg(A) ⑤NP+Sg(B)	・W/C(%) ③のみ60 ③以外43.5	①標準養生 ②材令7日まで高温断熱、以後標準養生	・圧縮、引張 ・断熱温度上昇 ・凝結性状

3. 実験結果と考察

3.1 スラグ微粉末の混入率や粉末度の違いがコンクリートの強度発現に及ぼす影響

スラグ微粉末の混入率や粉末度の違いが標準養生したコンクリートの圧縮強度の発現性状に及ぼす影響を調べた結果の一例を図-1～図-3に示す。このうち、図-1は8,000cm²/gクラスの微粉末を使用し混入率の違いの影響を比較したもの(水結合材比が60%の普通強度配合)で、図-2は粉末度の違いの影響を比較したもの(水結合材比が43.5%の高強度配合)である。また、図-3は水結合材比が30%の超高強度配合の場合の一例で、高性能減水剤を併用したものである。

これらの結果より、以下のことが明らかである。

①粉末度8,000cm²/gクラスの微粉末を混入した配合の圧縮強度は(図-1)、材令7日程度まではNPより幾分低い、材令14日程度でNPに追いつき、28日以降ではNPより高くなる。また、その増加の程度は混入率の高いものほど著しい。

②微粉末の混入率が30%と少ないものは、材令7日から28日までの強度発現が大きい以外はNPに近い強度発現性状を示す。

③微粉末の混入率が50~60%と多いものは、材令7日から91日までの強度発現がかなり大きく最終強度はNPより100kgf/cm²程度(普通、高強度配合の場合)から200kgf/cm²程度(超高強度配合の場合)も高くなる。

④粉末度6,000~8,000cm²/gクラスの微粉末を混入した高強度配合の圧縮強度は、材令7日程度までは、粉末度4,000cm²/gクラスの微粉末を混入した高炉B種(BB)と無混入のNPの中間的な値を示すが、それ以降の材令ではBBより大きな強度発現を示す。

⑤粉末度6,000cm²/gクラスの微粉末を混入したコンクリートの強度発現は、8,000cm²/gクラスのものに比べて若干遅れるものの、長期材令(約半年)ではほぼ同様な強度が得られる。

⑥粉末度8,000cm²/gクラスの微粉末を50%混入した超高強度配合の圧縮強度は、材令91日でシリカフェームを15%混入したものに近い超高強度(約1,000kgf/cm²)が得られる。

3.2 超微細なスラグ微粉末を混入した寒中コンクリートの凝結、強度発現性状

寒中コンクリート実験(温度条件は図-4を参照)における凝結試験の結果を図-5に示す。これは7℃程度の低温で練上げたコンクリートの凝結性状を20℃の室温で試験した場合の結果である。これより、練上り温度が7℃程度の低温であっても、スラグ微粉末を混入したものの凝結時間は無混入に比べて30分(HP)~1時間程度(NP)遅れるだけで従来の高炉セメント(BB)ほど著しい凝結遅延は認められないことが判る。

次に、強度試験の結果を図-6, 7に示す。このうち、図-6は低温で練り上げた後に標準養生した場合の強度発現性状を、また図-7は材令7日まで寒中養生した場合の強度発現性状を標準養生28日強度に対する比率で示したもので、これらの結果より以下のことが明らかである。

①練上り温度が7℃程度の低温であっても、微粉末を混入したコンクリートの標準養生材令7日の圧縮強度は無混入とほぼ同等で、練上りが低温であることの悪影響は比較的受けにくい。

②材令7日まで屋外で寒中養生した場合、微粉末を混入したものの圧縮強度は材令14日程度までは無混入のものに比べて少し低い、28日以降では同等以上となる。

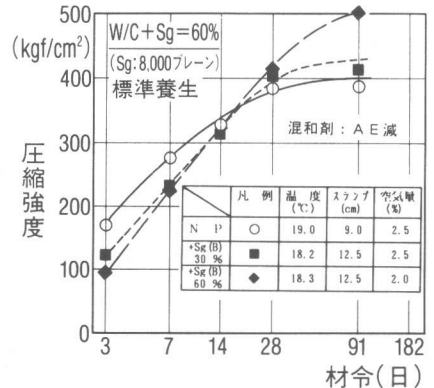


図-1 スラグ微粉末の混入率の影響

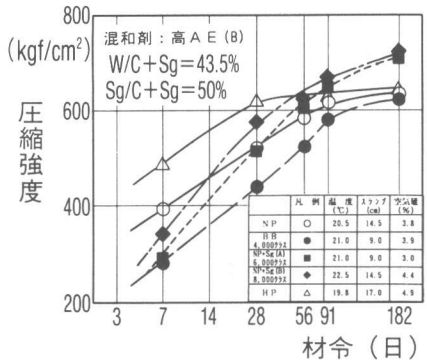


図-2 スラグ微粉末の粉末度の影響

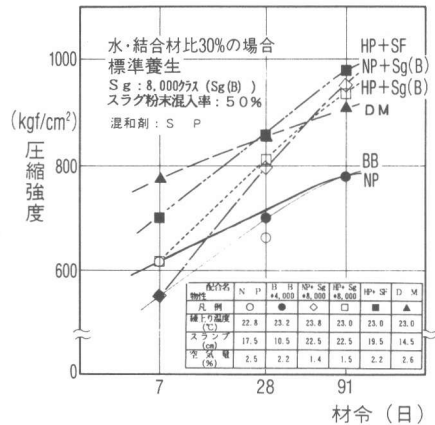


図-3 超高強度配合の圧縮強度性状

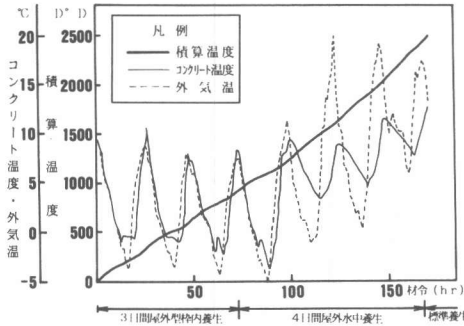


図-4 寒中コンクリート実験の温度条件

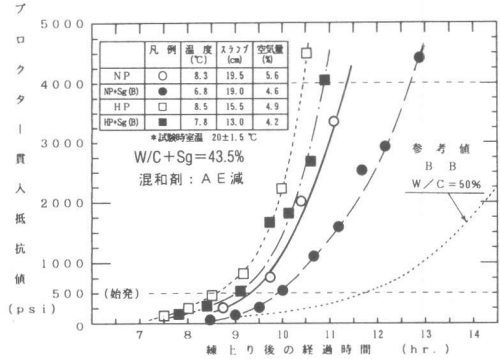


図-5 低温で練上げた場合の凝結性状

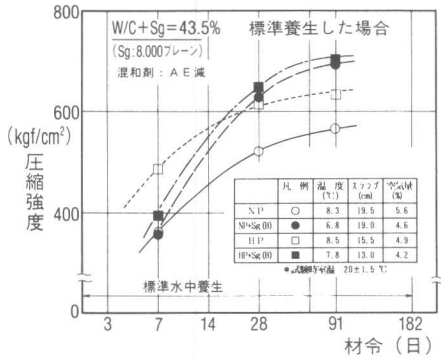


図-6 低温で練上げた場合の強度発現性状

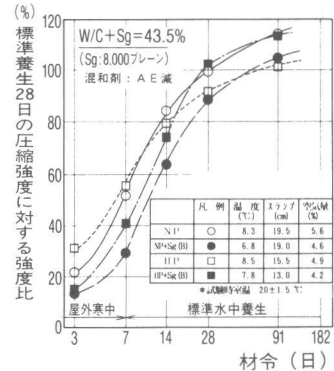


図-7 寒中コンクリートの強度発現性状

③寒中では、早強セメント（HP）に微粉末を混入したものの強度発現が比較的良好で、材令初期の強度発現はNPに近い性状を示し、28日以降ではHPより高い強度が得られる。

以上のことより、超微細な高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは従来の高炉セメントの低温下での凝結や強度発現の遅れを改善でき、長期材令ではかなりの強度増進も期待できることから、寒中コンクリート工事へも十分適用できるものと判断される。

3.3 超微細なスラグ微粉末を混入した暑中コンクリートの凝結、強度発現性状

スラグ微粉末を混入した各種配合のコンクリートを30℃で練上げ、30℃の室温下で凝結試験を行なった場合の結果を他の温度条件の結果とともに表-3に示す。この結果より、30℃では全般に始発が4時間15分～5時間、終結が5時間30分～6時間30分程度で、20℃に比べてDM以外では全般に2時間～2時間30分程度促進されており、配合間の違いの影響がほとんど認められないことが判る。なお、早強型のDMだけは5～6時間も促進されていて、他の配合に比べて特異な性状が認められる。以上のことから、高温下ではNPと同様に、コールドジョイント等を防止するために凝結遅延性の混和剤の併用が必要となると判断される。

超微細なスラグ微粉末を混入した各種配合のコンクリートを材令1日まで30℃の高温下においた後の強度発現性状の一例を図-8に、またこの場合の強度の伸びを20℃の場合と比較したものを表-4に示す。

表-3 凝結性状と温度条件

種類 (水結合材比%)	試験温度	凝結試験結果(時間:分)		
		練上試験 7~8℃	20℃	30℃
NP (43.5~45)	始発	9.20	6.40	4.45
	終結	11.20	8.45	6.10
NP + Sg(A) (43.5~50)	始発	—	5.25	4.20
	終結	—	8.00	6.15
NP + Sg(B) (43.5~50)	始発	9.50	5.20	4.15
	終結	12.20	7.55	5.20
B B (43.5~50)	始発	(11.35)*	6.35	—
	終結	(15.10)*	8.40	—
D M (60)	始発	10.20	10.25	5.00
	終結	13.15	12.55	6.35

(注) () *印は温度条件がやや異なるもの

これらの結果より、以下のことが明らかである。

①凝結時期に30℃の高温にさらされた場合、材令28日までの圧縮強度は20℃のものに比べて少し大きくなるが、それ以降の強度増進はスラグ微粉末を混入したコンクリートでも比較的小さくなり、その傾向は早強性は早強性のある（DMや高粉末度の微粉末を混入した）ものほど著しくなる。

②材令初期に30℃の高温にさらされた場合、スラグ微粉末を混入したコンクリートの長期材令における圧縮強度は、20℃の場合と異なりNPと同程度で、大きな強度増進は得られない。

以上の結果から判るように、高温下で凝結・硬化した場合、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの強度発現は材令28日程度までは促進されるがそれ以降の強度の強度増進は小さく、無混入のNPと同程度にしかならないので配合設計上注意を要する。

3. 4 高温履歴を受けた場合の強度特性

スラグ微粉末を混入したコンクリートが材令初期にセメントの水和熱による高温履歴（練上り温度20±1℃、温度上昇カーブは図-9を参照）を受けた場合の強度発現性状の一例を図-10～13に示す。このうち、図-10、12は標準養生した場合、図-11、13は高温履歴を受けた場合のそれぞれ圧縮強度、引張強度の結果を示している。

これらの結果より以下のことが明らかである。

- ①材令初期に高温履歴を受けたコンクリートの強度はどの配合も、標準養生したものに比べて（材令7日以降で）かなり低く、標準養生に切り替えた後の強度増進もほとんど認められない。
- ②圧縮強度で比較した場合、粉末度の高い（6,000～8,000cm²/gクラスの）スラグ微粉末を混入したコンクリートが高温履歴を受けた場合の材令91日以降の長期強度は、標準養生に比べて200～250kgf/cm²も低く、NPやBBの140～150kgf/cm²の低下に比べてかなり大きくなる。

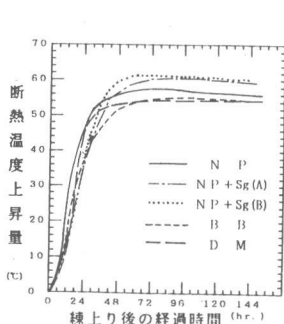


図-9 断熱温度上昇量

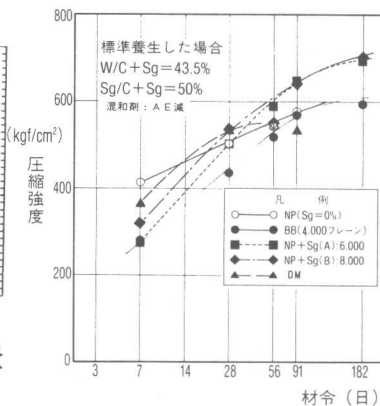


図-10 標準養生下の圧縮強度

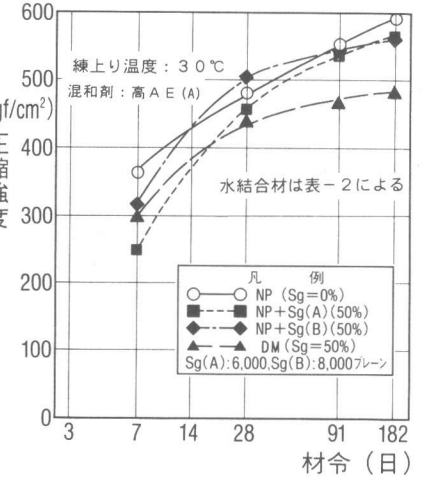


図-8 高温下における強度発現性状 (暑中コンクリート実験: 30℃)

表-4 温度条件が強度発現に及ぼす影響

種類	水結合材比 (%)	温度 (°C)	圧縮強度		
			7日から28日までの強度の伸び率	28日強度 (kgf/cm ²)	28日から6ヶ月までの強度の伸び率
NP	43.5	20	1.22	504	1.20
	45.0	30	1.32	481	1.23
NP+Sg(A)	43.5	20	1.84	503	1.38
	50.0	30	1.83	457	1.23
NP+Sg(B)	43.5	20	1.68	537	1.32
	50.0	30	1.61	506	1.11
DM	60.0	20	1.46	533	1.11
	60.0	30	1.47	437	1.05

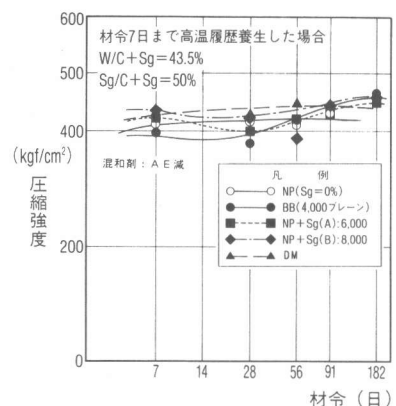


図-11 高温履歴下の圧縮強度

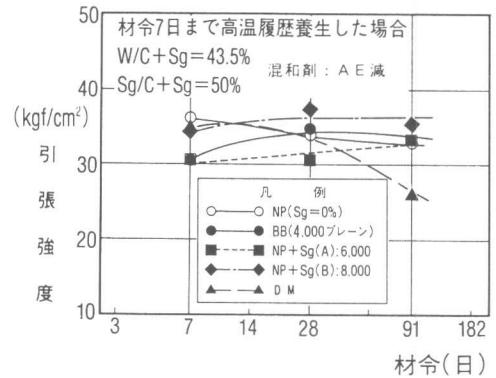
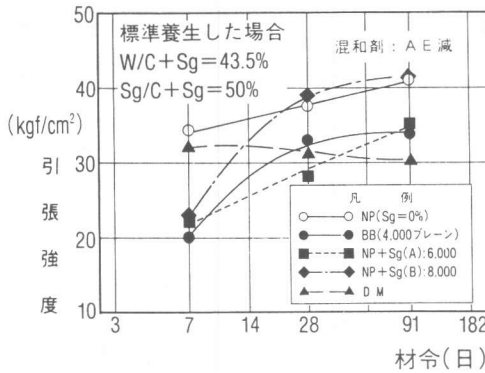


図-12 標準養生したコンクリートの引張強度

図-13 高温履歴を受けた場合の引張強度

これは、高温作用下においてポルトランドセメントとスラグ粉末の化学反応が何らかの変化を受け、長期間にわたって起こるスラグ粉末の潜在水硬性の形態が変わったためと推察される。

③引張強度で比較した場合、高温履歴を受けたコンクリートの長期強度の標準養生に対する低下の割合は 5 kgf/cm^2 程度以下であり、圧縮強度に比べるとかなり少ない。また、スラグ微粉末の粉末度の違いや混入の有無の影響はほとんど認められない。

以上の結果より、スラグ微粉末の混入の有無によらず、材令初期に高温履歴を受けた場合のコンクリートは材令に伴う強度増進がほとんど認められず、圧縮強度は標準養生材令28日の値より少し低くなり、引張強度はほぼ同程度となることが判明した。

なお、圧縮強度に限定すれば、標準養生したものとの強度差は長期材令になるほど大きくなり、その程度は粉末度の高い ($6,000 \sim 8,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ クラスの) スラグ微粉末を混入したものほど大きくなるので、この種の材料をマスコンクリートへ適用する場合には強度管理を行なう材令をあまり長期にとらず、温度上昇を抑制する対策を講じることが重要と思われる。

4. ま と め

以上に示した実験結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 粉末度の高いスラグ微粉末を混入したコンクリートの強度特性は従来の高炉セメントを用いたものとはかなり異なり、材初期令での強度発現がかなり大きく (NP に近く) なるとともに、材令28日以降の強度増進も比較的大きく、最終強度はBBやNPよりかなり高くなる。
- (2) 粉末度の高いスラグ微粉末を混入したコンクリートは強度発現が良好であることから高強度コンクリートへの適用性が高い。
- (3) 粉末度の高いスラグ微粉末を混入したコンクリートは初期の強度発現が比較的大きいため低温作用の悪影響を受けにくくなり、NPを用いる場合とほぼ同様に養生管理することができる。以上のことから、寒中コンクリート工事への適用性も従来BBに比べてかなり高い。
- (4) 粉末度の高いスラグ微粉末を混入したコンクリートの暑中における強度発現はNPの場合とほぼ同様で、長期材令での強度増進はあまり期待できなくなる。
- (5) 粉末度の高いスラグ微粉末を混入したコンクリートが水和熱による高温履歴を受けた後の強度発現性状はNPやBBとほぼ同様で、長期の強度増進は全く期待できず、注意を要する。

[参 考 文 献]

- 1) 建築工事標準仕様書・同解説 (JASS 5) 「11.9 型わくの存置期間」 (日本建築学会'86.9)
- 2) 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集 (土木学会'87.3)
- 3) 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) (土木学会'88.1)