

論文

[1058] 種々の環境温度下におけるRCDコンクリートの諸特性に関する研究

正会員 ○田邊 大次郎 (熊谷組土木技術部)

正会員 阪田 憲 次 (岡山大学土木工学科)

ロスリ, イドリス (岡山大学大学院)

1. はじめに

コンクリートダムの合理化施工法として開発されたRCD工法は、超硬練りのコンクリートを振動ローラを用いて締固めを行うことに特徴があり、施工性および経済性に優れた工法である。この工法に用いられるコンクリートは、セメントの水和熱の低減および少ないセメント量で骨材間の空隙を充填するために、セメントよりも比重の小さい混和材を用いるのが有利とされている。現在、一般的にはフライアッシュが使用されているが、筆者らは、RCDコンクリートの混和材として高炉スラグ微粉末の適用を検討しており、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入したRCDコンクリートの寒中環境下(環境温度10℃シリーズ)における諸特性について報告した[1]。しかしながら、これらの混和材を混入した結合材の水和反応は、打込み温度および養生温度の影響を受けやすい性質(温度依存性)を有することが明らかにされている。そこで、本研究では、種々の環境温度下(環境温度10℃、20℃および30℃シリーズ)において、混和材としてフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたRCDコンクリートの圧縮強度特性および温度上昇特性を実験的に検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリート配合

(1) セメントおよび混和材料

セメントは中庸熟ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントを用いた。また、混和材は表-1に示す、同一工場より製造された3種類の粉末度の異なる高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを使用した。

(2) 骨 材

細骨材は川砂(表乾比重(平均値)2.63、粗粒率(平均値)2.67)を、粗骨材は最大寸法80mmの碎石(表乾比重2.73~2.77、粗粒率6.62~8.96)を使用した。粗骨材の混合割合は、単位容積重量が最大となる80~40mm:40~20mm:20~5mm=35%:30%:35%とした。

表-1 混和材料の化学成分および物理試験結果

混和材の種類	化 学 成 分 (%)					ブレン値 (cm ³ /g)	比重
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
高炉スラグ(1)	34.3	13.8	1.8	40.5	7.4	2,550	2.91
高炉スラグ(2)	34.6	14.3	0.3	41.3	6.9	3,270	2.91
高炉スラグ(3)	34.8	14.0	0.6	40.9	7.4	4,090	2.91
フライアッシュ	63.8	21.5	3.6	4.3	0.8	4,100	2.25

(3) コンクリート配合

コンクリートの配合は、単位結合材量 $120\text{kg}/\text{m}^3$ 、空気量 1.5%の条件のもとに、RCD工法技術指針（案）[2]に従い、表-2に示すように定めた。ここで、細骨材の比重は2.63、粗骨材の比重は2.75とした。また、配合選定試験を実施した時のコンクリート打込み温度は、 $13\sim 19^\circ\text{C}$ である。

表-2 コンクリート配合

配合名	セメントの種類	混和材の種類	細骨材率 (%)	置換率 (%)	単 位 量 (kg/m^3)				
					水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材
A-1	普通	高炉スラグ	30	50	100	60	60	667	1,627
A-2	"	"	"	70	95	36	84	670	1,636
A-3	"	フライアッシュ	"	30	100	84	36	665	1,621
B-1	中庸熱	高炉スラグ	"	50	95	60	60	671	1,637
B-2	"	"	"	70	95	36	84	670	1,636
B-3	"	フライアッシュ	"	30	95	84	36	668	1,631

2. 2 コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは、可傾式ミキサ（容量 60ℓ 、回転数 $1,700\text{rpm}$ ）を使用し、粗骨材、細骨材、セメント、混和材の順に投入後、空練り1分、本練りを3分間行った。

2. 3 試験項目および試験方法

本研究で実施した試験項目は、圧縮強度試験および温度上昇試験である。各試験には、 40mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートを用いた。また、環境温度は 10°C 、 20°C および 30°C 程度の3シリーズとした。

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、表-2に示した全てのコンクリート配合について行った。供試体は、RCD工法技術指針（案）[2]に示されている方法により作成し、材令1日で型枠をとりはずした後、所定材令まで水中養生を行った。圧縮試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強さ試験方法」に準じて行い、試験材令は7、28、56および91日とした。

(2) 温度上昇試験

コンクリートの温度上昇に関して行った試験は、擬似断熱温度上昇試験および断熱温度上昇試験である。各試験に用いた供試体は、金属容器（ $24\times 24\times 30\text{cm}$ ）に3層に分けてコンクリートを詰め、各層とも突棒で突き固めた後、セメントペーストが浮き上がるまで振動ランマで締め固めたものである。試験体の大きさは $24\times 24\times 24\text{cm}$ 、各配合に対する試験体の個数は1体とした。

擬似断熱温度上昇試験は、断熱材（厚さ $20\sim 30\text{cm}$ の発泡スチロール）で被覆した試験体の中心部の温度を測定した。すなわち、ここで言う擬似断熱温度とは完全な断熱状態の温度ではなく、ある程度の外気温の影響を受けるマスコンクリートと等価な温度を期待するものである。断熱温度上昇試験は、上述の試験体を断熱材（厚さ 10cm の発泡スチロール）で被覆し、水循環式の試験装置を用いて行った。各環境温度におけるコンクリートの打込みは同一日に実施した。また、温度測定には熱電対（JIS O.75級、銅コンスタンタン）を用い、測定期間はコンクリート打込み完了直後から材令14日までとした。

3. 試験結果および考察

3. 1 圧縮強度特性

環境温度が10℃、20℃および30℃シリーズにおける、各コンクリートの打込み温度は、それぞれ12±2℃、20±2℃および28±2℃であった。

各環境温度シリーズにおける圧縮強度のばらつきを変動係数でみると、環境温度が10℃、20℃、30℃における平均値はそれぞれ5.3%、4.1%および4.0%である。環境温度が10℃から30℃に変化すると、圧縮強度のばらつきはわずかに少なくなる傾向が認められる。また、コンクリート配合表から求められる理論密度に対する各試験材令時における供試体の密度比について検討した結果、各環境温度における同一コンクリート配合の密度比はほぼ同じ値を示し、供試体の密度比に及ぼす環境温度の影響は認められない。本研究では、圧縮強度に影響を及ぼす要因として、環境温度の他に、(1)混和材の種類、(2)高炉スラグ微粉末の置換率および粉末度を取りあげ、これらの要因について考察を行う。

(1) 混和材の種類による影響

図-1および図-2は、中庸熱ポルトランドセメントを使用し、それぞれフライアッシュおよび粉末度4,090cm³/gの高炉スラグ微粉末(置換率70%)を使用したコンクリートの各環境温度における圧縮強度試験結果を示したものである。これらの図より、圧縮強度に及ぼす環境温度の影響は、混和材の種類により多少異なる傾向を示すことがわかる。

フライアッシュを使用した場合は、いずれの材令においても、環境温度が10℃から30℃に増大するにつれて、圧縮強度も大きくなる。特に、30℃における強度増進は、他のシリーズよりも良好であることがわかる。また、環境温度が10℃および20℃のシリーズでは、材令7日以降の強度増進はほぼ直線的であるが、環境温度30℃においては、材令7日から28日の強度増進が最も大きく、その後材令が経過するにつれて、強度増進の割合は小さくなる傾向が認められる。

高炉スラグ微粉末(粉末度4,090cm³/g、置換率70%)を使用した場合、材令56日までは、環境温度が大きくなるにつれて、圧縮強度も大きくなる傾向を示す。しかし、材令91日においては、環境温度10℃と20℃シリーズの圧縮強度はほぼ同じ値を示す。このことより、環境温度が10~20℃の範囲では、環境温度は高炉スラグ微粉末を混入したRCDコンクリ

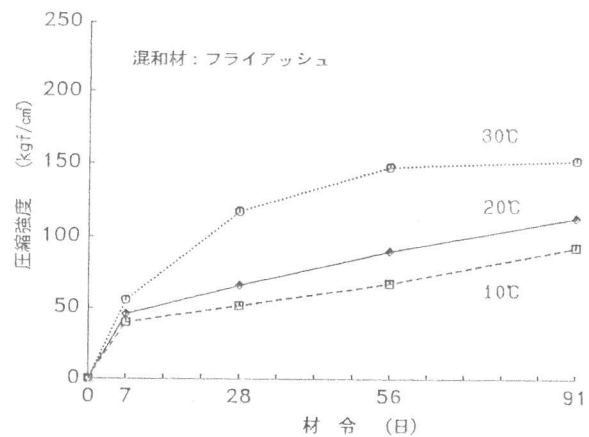


図-1 圧縮強度試験結果

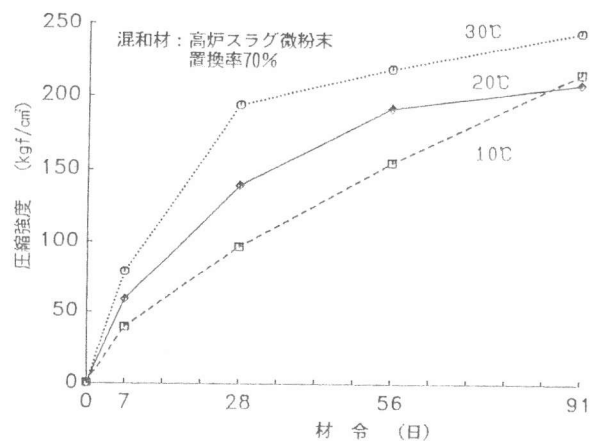


図-2 圧縮強度試験結果

ートの長期強度に影響しないことがわかる。この傾向は、置換率および粉末度に関係なく、高炉スラグ微粉末を使用した全ケースにおいて認められる。

(2) 高炉スラグ微粉末の置換率および粉末度による影響

図-3は、中庸熱ポルトランドセメントを使用し、粉末度 4,090 cm^3/g の高炉スラグ微粉末を50%置換したコンクリートの各環境温度における圧縮強度試験結果を示したものである。高炉スラグ微粉末の置換率が50%のコンクリート強度は、置換率70%の場合とほぼ同じ傾向を示すが、環境温度が20 $^{\circ}\text{C}$ と30 $^{\circ}\text{C}$ における強度差は置換率70%よりも大きい。このことは、環境温度が20 $^{\circ}\text{C}$ ~30 $^{\circ}\text{C}$ の範囲においては、置換率50%のほうが70%よりも環境温度による影響が大きいことを示している。

図-4は、環境温度20 $^{\circ}\text{C}$ シリーズにおいて、中庸熱ポルトランドセメントを使用し、高炉スラグ微粉末を70%置換したコンクリートの圧縮強度と粉末度との関係を示したものである。粉末度が 2,550 cm^3/g から 4,090 cm^3/g に変化するに従い、圧縮強度はほぼ直線的に増大することがわかる。また、材令が経過するにつれて、粉末度による圧縮強度の差は大きくなる傾向を示す。このような傾向は、環境温度に関係なく認められる。

3. 2 擬似断熱温度上昇特性

環境温度が10 $^{\circ}\text{C}$ 、20 $^{\circ}\text{C}$ および30 $^{\circ}\text{C}$ シリーズにおける、各コンクリートの打込み温度は、それぞれ 8.5 \pm 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 、22.0 \pm 0.5 $^{\circ}\text{C}$ および 29.5 \pm 0.5 $^{\circ}\text{C}$ であった。擬似断熱温度上昇特性については、圧縮強度特性と同様の要因ごとに考察する。

(1) 混和材の種類による影響

図-5は、環境温度10 $^{\circ}\text{C}$ シリーズにおいて、普通ポルトランドセメントにフライアッシュおよび粉末度の異なる2種類の高炉スラグ微粉末(置換率50%)を使用したコンクリートの擬似断熱温度上昇試験結果を示したもので

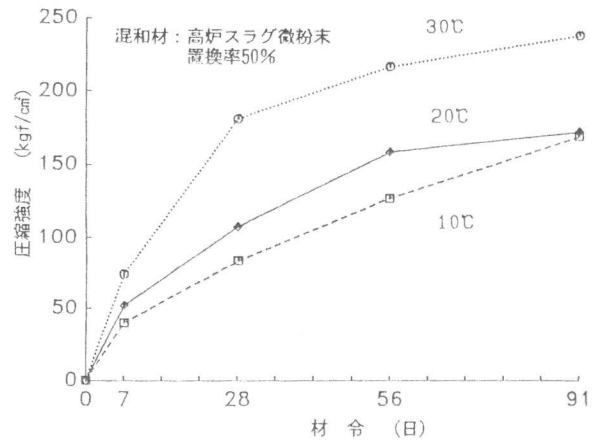


図-3 圧縮強度試験結果

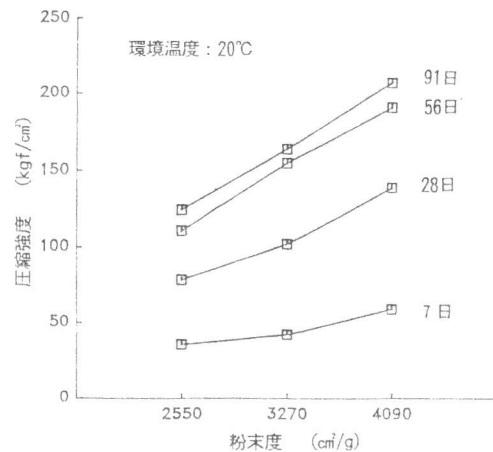


図-4 粉末度と圧縮強度の関係

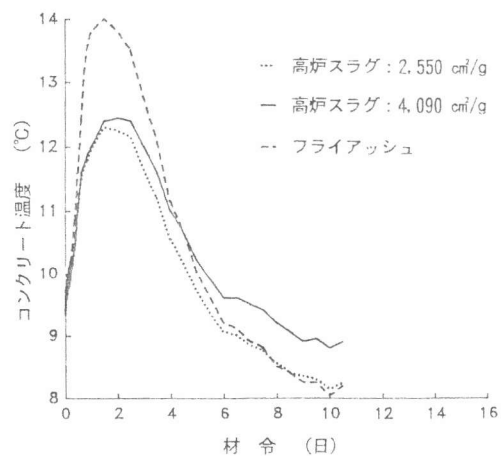


図-5 擬似断熱温度上昇試験結果
(環境温度: 10 $^{\circ}\text{C}$)

ある。同様に、図-6および図-7は、それぞれ環境温度20°Cおよび30°Cシリーズにおける結果を示している。

まず、各環境温度について、混和材の種類が最高温度に及ぼす影響を比較する。環境温度10°Cシリーズでは、フライアッシュを混和材に使用したコンクリートは、高炉スラグ微粉末の場合よりも1.5°C程度高い値を示す。環境温度20°Cについては、フライアッシュを使用したコンクリートは高炉スラグ微粉末の場合よりも2~4°C程度低い値を示すが、環境温度30°Cでは、2°C程度高い値を示している。このように、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの最高温度は、各環境温度によって異なる傾向を示す。これは、混和材の種類の違いにより、温度上昇に及ぼす環境温度の範囲が異なるためと考えられる。そこで、温度上昇量について着目し、それぞれの混和材に及ぼす環境温度の影響について考察する。

フライアッシュを使用したコンクリートの場合は、環境温度10°Cおよび20°Cシリーズにおける温度上昇量は5.5°Cで同じ値を示すが、環境温度30°Cにおいては9.5°Cである。同様に、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートについてみると、粉末度の違いにより多少異なるが、環境温度20°Cおよび30°Cにおける最高温度上昇量は7~8°C程度でほぼ等しく、環境温度10°Cでは4°C程度の値を示す。以上のことから、混和材にフライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの温度上昇量に及ぼす環境温度の範囲が異なることがわかる。すなわち、フライアッシュの場合は、環境温度が10°C~20°Cの範囲における温度上昇量はほぼ等しいが、環境温度が20°Cから30°Cに変化すると、温度上昇量は大きくなる。高炉スラグ微粉末の場合は、環境温度が20°C~30°Cの範囲における温度上昇量はほぼ等しいが、環境温度が20°Cから10°Cに変化すると、温度上昇量は小さくなる。

(2) 高炉スラグ微粉末の置換率および粉末による影響

高炉スラグ微粉末の置換率が50%と70%における擬似断熱温度上昇量を比較した結果、置換率が70%の場合が50%よりも約1°C程度低い値を示す傾向が認められる。また、図-5~図-7より、高炉スラグ微粉末の粉末度が温度上昇量に及ぼす影響についてみると、環境温度10°Cにおける粉末度2,550 cm³/gと4,090 cm³/gの温度上昇量はほぼ等しいが、環境温度20°Cおよび30°Cシリーズにおいては、粉末度が2,550 cm³/gの場合は4,090 cm³/gよりも約2°C程度低くなる。

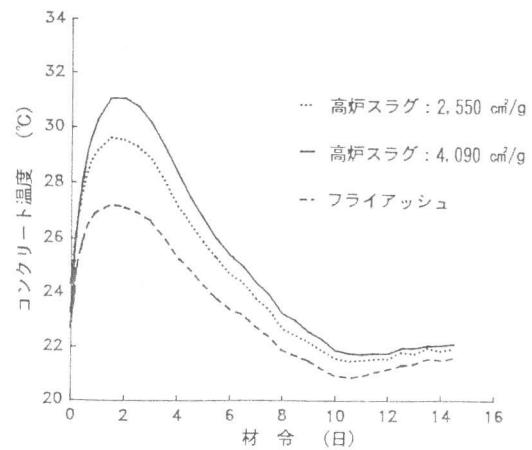


図-6 擬似断熱温度上昇試験結果
(環境温度：20°C)

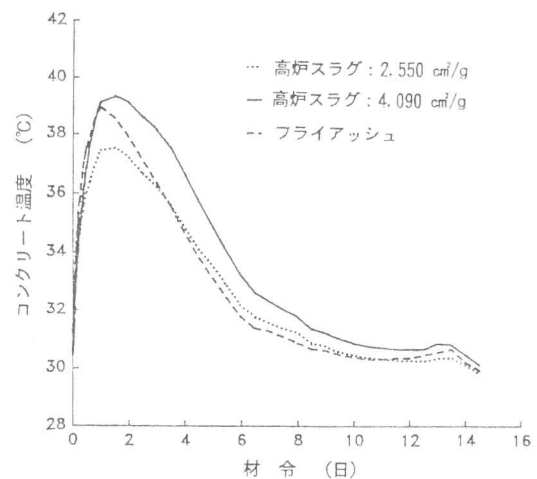


図-7 擬似断熱温度上昇試験結果
(環境温度：30°C)

3. 3 断熱温度上昇特性

表-3は、普通ポルトランドセメントを使用し、高炉スラグ微粉末（粉末度 4,090 cm^2/g ）を70%置換したコンクリートの各環境温度シリーズにおける断熱温度上昇試験結果を示したものである。環境温度が10 $^{\circ}\text{C}$ から30 $^{\circ}\text{C}$ に変化すると、最高温度は高くなり、また、最高温度に到達する時間も早くなる傾向が認められる。しかし、温度上昇量についてみると、環境温度20 $^{\circ}\text{C}$ シリーズにおける温度上昇量は18 $^{\circ}\text{C}$ であり、環境温度30 $^{\circ}\text{C}$ シリーズの 13.65 $^{\circ}\text{C}$ よりも大きい値を示す。これは、環境温度が20 $^{\circ}\text{C}$ から30 $^{\circ}\text{C}$ に変化しても、混和材に高炉スラグ微粉末（粉末度 4,090 cm^2/g 、置換率70%）を使用したコンクリートの最高温度は2 $^{\circ}\text{C}$ 程度しか変わらず、温度上昇量は、逆に、環境温度20 $^{\circ}\text{C}$ のほうが大きくなるためである。この結果は、擬似断熱温度上昇と多少傾向が異なっており、また、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水和熱は環境温度が高くなるにつれて大きくなるという一般的見地と矛盾している。このような結果が得られた原因には、試験機の温度制御装置の問題等も考えられ、この点に関しては今後の検討課題である。

表-3 断熱温度上昇試験結果

環境温度	打込み温度 Tini. ($^{\circ}\text{C}$)	最高温度 Tmax. ($^{\circ}\text{C}$)	温度上昇量 T ($^{\circ}\text{C}$)	最高温度 到達時間 t (日)
10 $^{\circ}\text{C}$ シリーズ	8.70	22.35	13.65	8.0
20 $^{\circ}\text{C}$ シリーズ	22.40	40.40	18.00	5.0
30 $^{\circ}\text{C}$ シリーズ	29.00	42.15	13.15	4.0

4. まとめ

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

(1) フライアッシュを混和材に使用したコンクリートの圧縮強度は、材令に関係なく、環境温度が10 $^{\circ}\text{C}$ から30 $^{\circ}\text{C}$ に増大するにつれて大きい値を示す。

(2) 高炉スラグ微粉末を混和材に使用したコンクリートの圧縮強度は、上記のフライアッシュとほぼ同様の傾向を示すが、環境温度が10~20 $^{\circ}\text{C}$ の場合は、環境温度は長期強度には影響を及ぼさない。

(3) フライアッシュを混和材に使用した場合、環境温度が10 $^{\circ}\text{C}$ ~20 $^{\circ}\text{C}$ の範囲における温度上昇量はほぼ等しいが、環境温度が20 $^{\circ}\text{C}$ から30 $^{\circ}\text{C}$ に変化すると、温度上昇量は大きくなる。

(4) 高炉スラグ微粉末を混和材に使用した場合、環境温度が20 $^{\circ}\text{C}$ ~30 $^{\circ}\text{C}$ の範囲における温度上昇量はほぼ等しいが、環境温度が20 $^{\circ}\text{C}$ から10 $^{\circ}\text{C}$ に変化すると、温度上昇量は小さくなる。

(5) 高炉スラグ微粉末の粉末度は圧縮強度および温度上昇量に影響を及ぼし、粉末度が 2,550 cm^2/g から 4,090 cm^2/g に増大するにつれて、圧縮強度および温度上昇量も大きい値を示す。

【参考文献】

- 1) 田邊大次郎、阪田憲次、広村治：高炉スラグを用いたRCDコンクリートの諸特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12-1、pp.87~92、1990
- 2) (財)国土開発技術研究センター：RCD工法技術指針(案)、1989. 8