

寒中ホットコンクリートの初期性状と圧縮強度増進性状

PROPERTIES AT EARLY AGES AND STRENGTH DEVELOPMENT OF HOT CONCRETE FOR COLD WEATHER CONCRETING

浜 幸雄*1, 劉 宏 涛*2, 桂 修*3, 吉野 利幸*4
Yukio HAMA, Koto RYU, Osamu KATSURA
and Toshiyuki YOSHINO

The aim of this study is to investigate the applicability of hot concrete to cold weather concreting. We carried out some experiments about the mix design, the properties at early ages, i.e. slump-loss and setting time, and the strength development of hot concrete for applying cold weather concreting. The use of superplasticizer is necessary to reduce the unit water content of hot concrete. The strength development of the hot concrete using superplasticizer is much the same as that of ordinary concrete. It was clarified that the slump retention type or the retardation type superplasticizer are effective to decrease the slump-loss of hot concrete and the average temperature of concrete for 60 minutes after mixing must be made less than 30°C.

keywords : hot concrete, cold weather concreting, strength development, slump-loss, superplasticizer

ホットコンクリート、寒中コンクリート、強度増進、スランプロス、高性能AE減水剤

1. はじめに

わが国における寒中コンクリート工事では、養生上屋を設けて施工空間を採暖する加熱養生が主体となっている。しかし、1時間に2回以上も内部の空気が全量入れ替わるといった熱効率の非常に悪い空間を力まかせに暖めるという方法は、省資源・省エネルギーの観点から望ましいものとはいえず、気象条件や部材条件に応じて選択できる多様な寒中施工技術の開発、実用化が望まれている。このような背景から、近年、耐寒促進剤や断熱型枠の利用技術が確立され、1998年に改定された「寒中コンクリート施工指針・同解説」¹⁾に反映されている。

一方、北欧諸国、ロシア、中国などでは、寒冷期のコンクリート工事で打込み温度を高めたホットコンクリートを使用している例がみられる。スウェーデンではコンクリート温度を出荷時に最高30°C、打設時に25°Cとすることが推奨されている²⁾。また、フィンランドでは練上がり温度を40~60°Cとしたホットコンクリートが寒中施工に有効な方法として採用されている³⁾。コンクリートは熱容量が大きく、外気温が低い状態で暖かいコンクリートの冷却を防ぐための対策を立てることは比較的容易であるものの、冷えたコンクリートの温度を上昇させることは難しい。また、打込み温度を高くすると、コンクリート温度が低下する間に得られる積算温度が増加し、それに応じた強度増進が期待できることから、初期凍害の防止

に有効な方法となる。しかしながら、コンクリートの粘性の増大や所要のスランブを得るための単位水量の増加、打込み時の水分の蒸発、長期材齢での強度増進の停滞などの問題点が考えられる。

わが国では、1970年代にプレキャストコンクリート部材の製造における型枠回転率の向上、生産性向上、コストダウンのためにホットコンクリートの研究^{4) 5) 6)}などが行われていたが、寒中コンクリートへの適用を考慮したホットコンクリートに関する研究はほとんど行われておらず、またJASS 5における寒中コンクリートの荷卸し時のコンクリート温度が10~20°Cであることから⁷⁾、寒中施工にホットコンクリートを適用することができないのが現状である。

本研究では、寒中施工におけるホットコンクリート（以下、寒中ホットコンクリート）の適用を考慮して、初期性状および圧縮強度増進性状に関する実験を行い、寒中ホットコンクリートの調合上の問題と強度増進性状、高性能AE減水剤によるスランプロス抑制効果に関する検討を行った。

2. ホットコンクリートの調合と圧縮強度増進性状（実験1）

(1) 実験計画および方法

表1に実験計画を示す。使用したコンクリートは水セメント比が45%と55%の2水準、練上がり温度が20°C、30°C、40°Cの合計8種類とした。セメントは普通ポルトランドセメント（密度3.16 g /

*1 北海道大学大学院社会基盤工学専攻 助手・博士(工学)

*2 北海道大学大学院社会基盤工学専攻 大学院生・修士(工学)

*3 北海道立寒地住宅都市研究所 科長・博士(工学)

*4 北海道立寒地住宅都市研究所 主任研究員・博士(工学)

Research Assoc., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Graduate Student, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., M. Eng.
Chief, Hokkaido Prefectural Cold Region Housing and Urban Research Institute,
Dr. Eng.
Senior Research Officer, Hokkaido Prefectural Cold Region Housing and Urban
Research Institute, Dr. Eng.

cm) を、細骨材は鶴川産陸砂 (絶乾密度 2.61 g/cm³, 吸水率 1.81%, 粗粒率 2.62)、粗骨材は常盤産砕石 (絶乾密度 2.58 g/cm³, 吸水率 2.33%, 実積率 51.8%) を用いた。また、化学混和剤として 20℃ のコンクリートでは AE 減水剤標準形を、30℃ のコンクリートには AE 減水剤標準形および高性能 AE 減水剤標準形を、40℃ のコンクリートには高性能 AE 減水剤標準形を使用した。なお、ここで用いた高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸系 (ポリカルボン酸エーテル系の複合体) のものである。コンクリートの調合は、すべての場合についてスランプ 18cm、空気量 4.0% を目標とした試し練りにより決定した。粗骨材の絶対容積は単位粗骨材かさ容積を JASS5 の

表 1 コンクリートの条件 (実験 1)

記号	W/C	混和剤	練上がり温度	スランプ	空気量	
45-20N	45%	AE減水剤標準形	20℃	18cm	4.0%	
45-30N			30℃			
45-30H			高性能AE減水剤標準形			40℃
45-40H						40℃
55-20N	55%	AE減水剤標準形	20℃			
55-30N			30℃			
55-30H			高性能AE減水剤標準形			40℃
55-40H						40℃

表 2 コンクリートの調合および練上がり性状 (実験 1)

記号	s/a (%)	W (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			練上がり性状		
			C	S	G	スランプ (cm)	空気量 (%)	練温 (℃)
45-20N	43.0	198	140	267	355	19.5	5.3	19.5
45-30N	40.0	216	152	237	355	18.5	5.7	31.0
45-30H	43.0	198	140	267	355	19.5	5.4	30.0
45-40H	43.0	198	140	267	355	21.5	4.6	37.0
55-20N	46.9	185	107	313	355	20.0	3.9	19.5
55-30N	44.5	203	117	285	355	20.0	4.3	32.0
55-30H	46.9	185	107	313	355	18.5	5.2	31.0
55-40H	46.9	185	107	313	355	20.5	5.8	38.0

表 3 圧縮強度試験材齢 (実験 1)

養生温度	圧縮強度試験材齢 (日)					
	1	3	7	14	28	91
20℃	1	3	7	14	28	91
10℃	2	7	14	28	56	91
5℃	3	7	14	28	56	91

解説表 5.6 に示されている標準値に基づいて定め、すべての調合で一定とした。高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートの単位水量は、AE 減水剤を使用した練上がり温度 20℃ のコンクリートの単位水量と同一とした。表 2 にコンクリートの調合と練上がり性状を示す。ホットコンクリートの作製は、あらかじめ加熱したセメント、骨材と高温水を混練して行ったが、その際にセメントと化学混和剤が高温水と接して偽凝結が起こるのを防ぐために、高温水と骨材を先に混合し、その後セメントと化学混和剤および常温の水を加えて混練した。コンクリートの練上がり後直ちにコンクリート温度、スランプ、空気量を、練上がり 15 分後と 30 分後にスランプの経時変化を測定した。また、圧縮強度試験は φ 10 × 20 cm の円柱供試体を用い、JIS A 1108 により行った。供試体の養生方法は養生温度を 20℃、10℃、5℃ の 3 水準とした封かん養生とし、表 3 に示す材齢で圧縮強度試験を行った。

(2) 結果および考察

コンクリートの練上がり温度を高くした場合には、コンクリートの粘性が高くなり所要のスランプを得るための単位水量が増加するといわれており、一般には練上がり温度が 10℃ 高くなると単位水量は 2~5% 増加するとされているが、本実験においては AE 減水剤標準形を用い練上がり温度を 30℃ としたコンクリート (45-30N および 55-30N) では、練上がり温度 20℃ のコンクリートに比べて、同一スランプを得るための単位水量が約 10% 増加する結果となり、実用的な調合とはならなかった。一方、高性能 AE 減水剤を用いて

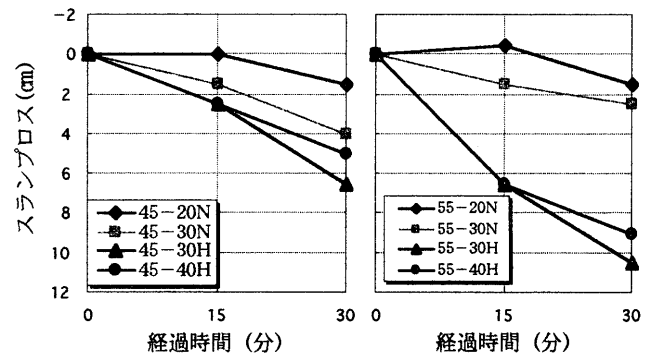


図 1 スランプの経時変化 (実験 1)

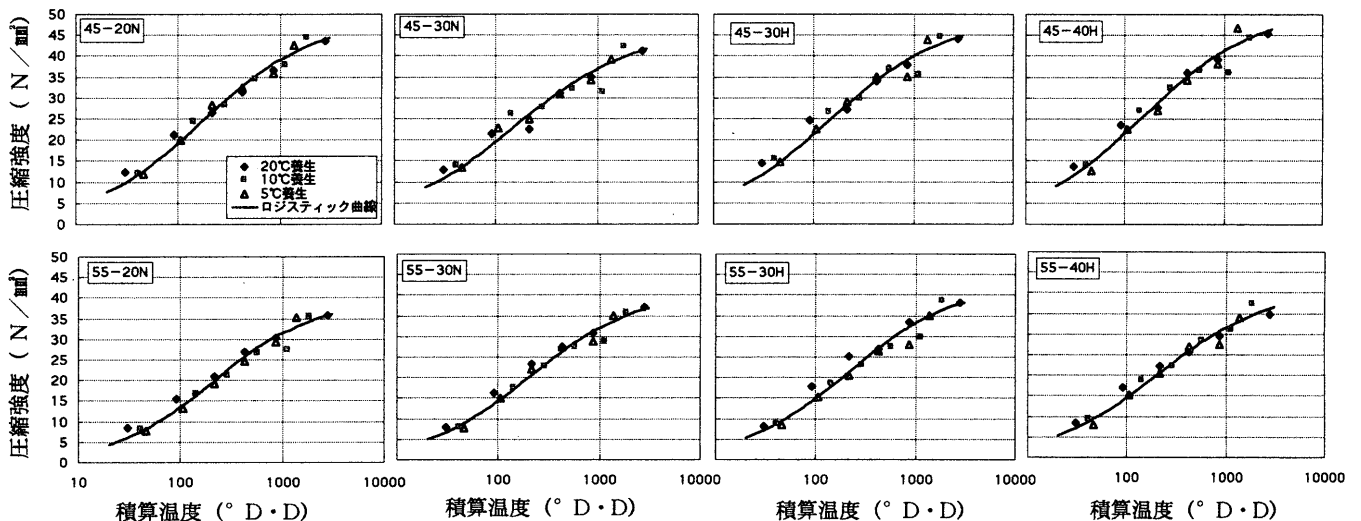


図 2 圧縮強度試験結果のロジスティック曲線による近似 (実験 1)

その使用量を調整することにより、練上がり温度を30℃または40℃としても、練上がり温度20℃のコンクリートと同じ単位水量で所要のスランブを得ることが可能であった。しかし、図1に示すように練上がり温度を高めたコンクリートでは、練上がり温度20℃のコンクリートよりもスランブの経時変化が大きくなる傾向がみられ、特に水セメント比が大きく、高性能AE減水剤を用いた場合に顕著であった。

次に、積算温度と圧縮強度の関係をロジスティック曲線で近似した結果を図2および表4に示す。ホットコンクリートについても、一般のコンクリートと同様に、強度増進の過程をロジスティック曲線で精度よく表すことができた。また、高温で混練、養生されたコンクリートは初期強度が大きく、長期強度が小さくなることが知られているが、本実験の結果では、図3に示すように、AE減水剤標準形を用いた水セメント比45%で練上がり温度30℃のコンクリートの場合に、練上がり20℃のコンクリートに比べて長期強度が停滞しているものの、その他のホットコンクリートでは長期強度の停滞は認められず、むしろ増大する傾向にある。

以上より、寒中ホットコンクリートでは高性能AE減水剤を用いることにより通常のコンクリートと同じ単位水量の実用的な調合とすることができ、また長期強度が停滞することなく練上がり温度20℃のコンクリートと同程度の強度が得られることが明らかとなった。

表4 ロジスティック曲線の諸係数および相関係数

ロジスティック曲線 $F=F_{\infty}/(1+\exp(-k \times \log M + m))$				
記号	F_{∞}	k	m	相関係数
45-20N	49.0	1.82	4.05	0.991
45-30N	46.6	1.67	3.64	0.980
45-30H	49.4	1.73	3.71	0.983
45-40H	51.5	1.74	3.79	0.988
55-20N	39.6	2.03	4.69	0.985
55-30N	40.9	1.93	4.69	0.984
55-30H	42.6	1.89	4.37	0.977
55-40H	41.3	1.81	4.21	0.986

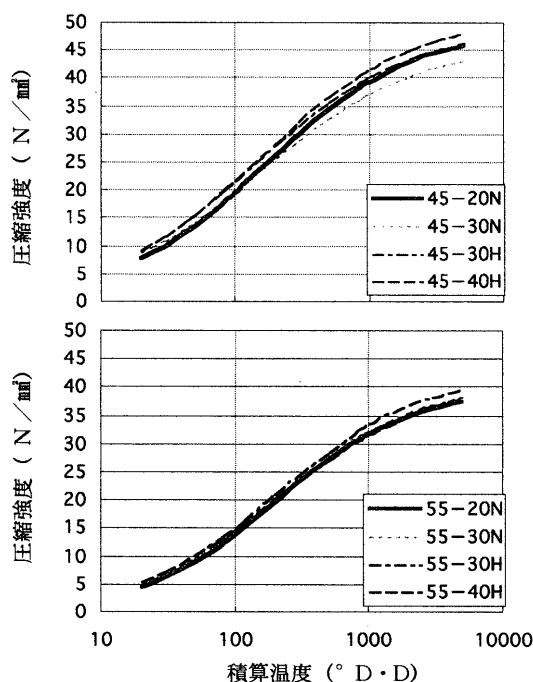


図3 練上がり温度による圧縮強度増進性状の比較 (実験1)

3. 高性能AE減水剤を用いた寒中ホットコンクリートのスランブロス、凝結および強度増進性状 (実験2、実験3)

(1) 実験計画および方法

実験1の結果から、ホットコンクリートを用いる際に実用的な調合とするためには、高性能AE減水剤を用いることが必須の条件と考えられるが、高性能AE減水剤を用いたホットコンクリートのスランブロスの増大が実施工に適用するための大きな問題であることが明らかとなった。そこで、高性能AE減水剤を用いた寒中ホットコンクリートにおけるスランブロス抑制のために、各種高性能AE減水剤のスランブ保持性能に関する実験(実験2)を行い、スランブロス抑制効果の認められた2種類の高性能AE減水剤について、凝結および強度増進性状に関する実験(実験3)を行った。

表5および表6に実験計画を示す。実験2では、コンクリートの練上がり温度を35℃および45℃、水セメント比を55%、練上がり時の目標スランブを18cm、目標空気量を4.0%とした。セメントは普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)、細骨材は勇払産陸砂(絶乾密度2.68g/cm³、吸水率1.31%、粗粒率2.54)、粗骨材は常盤産砕石(絶乾密度2.63g/cm³、吸水率2.63%、実積率57.5%)を用いた。高性能AE減水剤は表7に示すポリカルボン酸系4種類、ナフタリン系2種類を用いた。コンクリートの調合は、練上がり温度、高性能AE減水剤の種類によらず一定とし、目標スランブおよび空気量が得られるよう試練りにより高性能AE減水剤、AE助剤の使用量を調整した。表8にコンクリートの調合を、表9に高性能AE減水剤の使用量を示す。ホットコンクリートの作製は、実験1と同様とした。コンクリートの練上がり後直ちにコンクリート温度、スランブ、空気量を測定するとともに、60程度の試料をプラスチック製容器に詰め、所定の条件で静置した後に練返しを行い、コンクリート温度とスランブの経時変化を測定した。

実験3では、表7に示す高性能AE減水剤のうち、実験2でスラ

表5 実験計画表 (実験2)

コンクリートの条件			静置条件				スランブの経時変化の測定
W/C	スランブ	空気量	練温	温度	湿度	水分蒸発	
55%	18cm	4.0%	35℃	30℃	60%RH	あり(開放容器)	練り上がり直後 20分後 40分後 60分後
			35℃	10℃		なし(密封容器)	
			45℃	10℃			

表6 実験計画表 (実験3)

コンクリートの条件						試験項目
記号	W/C	練上がり温度	混和剤	スランブ	空気量	
N20	55%	20℃	AE減水剤標準形	18cm	4.0%	凝結試験 圧縮強度試験
PHS35		35℃	高性能AE減水剤標準形 (PHS)			
PHR35			高性能AE減水剤遅延形 (PHR)			

表7 高性能AE減水剤の種類

記号	分類	主成分	形
PN	ポリカルボン酸系	ポリカルボン酸エーテル系の複合体	標準形
PS		標準形	
PHS*		ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体	標準形
PHR		遅延形	
NN	ナフタリン系	変性リグニン、アルキルアシルスルホン酸および活性持続ポリマーの複合体	標準形
NHS*			標準形

* PSおよびNNと同一成分であるが、スランブ保持性能を高めたタイプの混和剤

ンプロス抑制効果の認められたPHSおよびPHRの2種類の混和剤を用いて練上がり温度を35℃としたコンクリートとAE減水剤標準形を用いて練上がり温度を20℃としたコンクリートを作製し、養生温度を10℃および20℃とした凝結試験と表10に示す材齢での圧縮強度試験を行った。なお、使用材料およびコンクリートの調合は実験2と同じとした。

(2) 結果および考察

図4に高性能AE減水剤の種類ごとのスランプの経時変化を示す。また、JIS A 6204の高性能AE減水剤のスランプの経時変化に対する規格値である60分後のスランプ低下量6.0cm以下を基準として、各高性能AE減水剤のスランプ保持性能を評価した結果を表11に示す。ほとんどの条件で時間の経過とともに大幅にスランプが低下しているものの、ポリカルボン酸系で架橋ポリマーが多量に配合されたPHSおよび遅延形のPHRを用いたコンクリートの練上がり温度35℃、静置温度10℃の条件で、スランプロスが抑制されていることがわかる。しかし、これらの混和剤においても他の条件では大幅なスランプロスが生じており、スランプ保持性能に対する温度の影響が大きいことがわかる。これは、PHSおよびPHRの成分中に含まれているスランプ保持成分としての架橋ポリマーの徐放作用がセメントの水和反応により生じるOH⁻イオンとの加水分解反応であり、温度の影響を受けやすいためと思われる。一方、スランプ保持機構の異なるナフタレン系の高性能AE減水剤(NNおよびNHS)では、十分なスランプ保持性能が認められなかった。

図5に静置時の水分蒸発の有無によるスランプロスの比較を示す。一般にスランプロスの要因として、セメントの水和反応、セメント粒子の物理的凝集、水分の蒸発などがあげられているが、本実験の範囲では、スランプロスに対する水分蒸発の有無の影響はそれほど

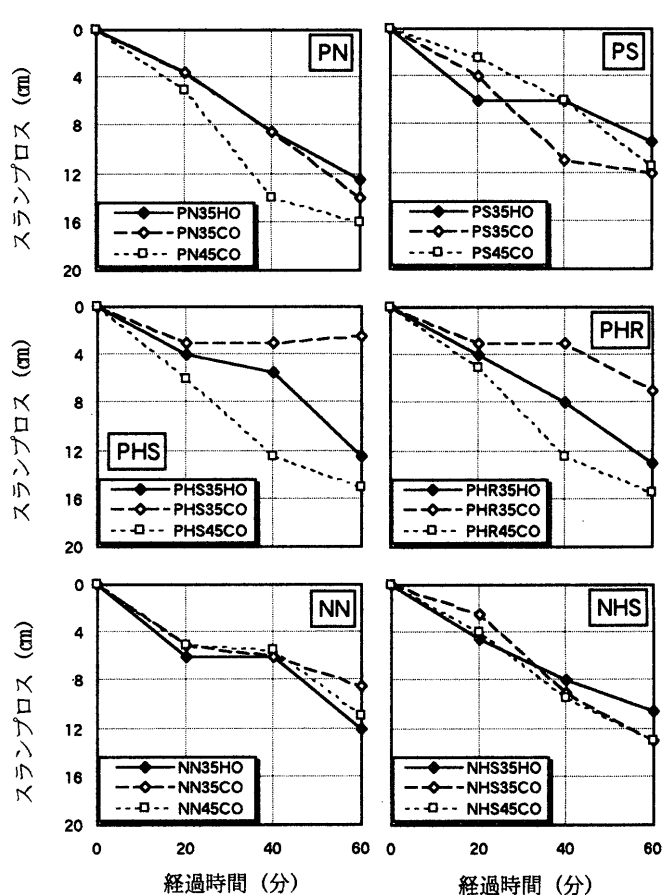


図4 スランプの経時変化(水分蒸発あり)(実験2)

表8 コンクリートの調合(実験2および実験3)

W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)		
			セメント	細骨材	粗骨材
55.0	47.3	185	107	313	355

表9 高性能AE減水剤の使用量

練上がり温度	高性能AE減水剤 (C×%)					
	PN	PS	PHS	PHR	NN	NHS
35℃	0.6	0.7	0.7	0.5	0.7	0.5
45℃	0.5	0.6	0.6	0.5	0.9	0.8

表10 圧縮強度試験条件(実験3)

養生温度	圧縮強度試験材齢(日)						
20℃	0.5	1	3	7	14	28	91
10℃	1	3	7	14	28	56	91

表11 高性能AE減水剤のスランプ保持性能の評価

記号	条件			高性能AE減水剤						
	練温	静置温度	水分蒸発	PN	PS	PHS	PHR	NN	NHS	
35HO	35℃	30℃	あり	×(12.5)	△(9.5)	×(12.5)	×(13.0)	×(12.0)	×(10.5)	
35CO	35℃	10℃		×(14.0)	×(12.0)	◎(2.5)	△(7.0)	△(8.5)	×(13.0)	
45CO	45℃	10℃		×(16.0)	×(11.5)	×(15.0)	×(15.5)	×(11.0)	×(13.0)	
35HC	35℃	30℃	なし	×(12.5)	△(9.5)	×(13.0)	△(9.5)	×(10.0)	×(11.0)	
35CC	35℃	10℃		×(11.0)	×(13.5)	◎(2.5)	○(5.5)	△(8.5)	×(12.0)	
45CC	45℃	10℃		×(17.0)	×(12.0)	×(16.5)	×(17.0)	×(10.5)	×(12.0)	

注1) 表中()内の数値は60分後のスランプ低下量(cm)を示す

注2) スランプ保持性能の評価基準

◎: スランプ低下量3.0cm未満 ○: スランプ低下量3.0以上~6.0未満

△: スランプ低下量6.0以上~10.0未満 ×: スランプ低下量10.0cm以上

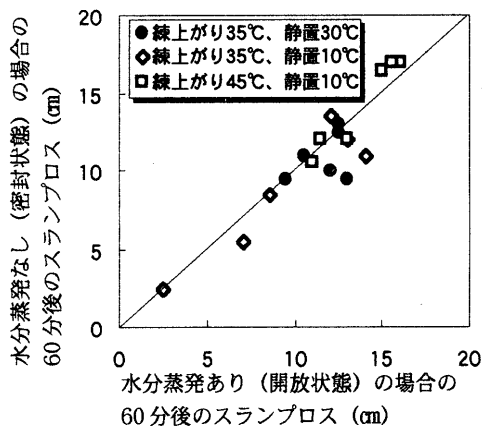


図5 水分蒸発の有無によるスランプロスの比較

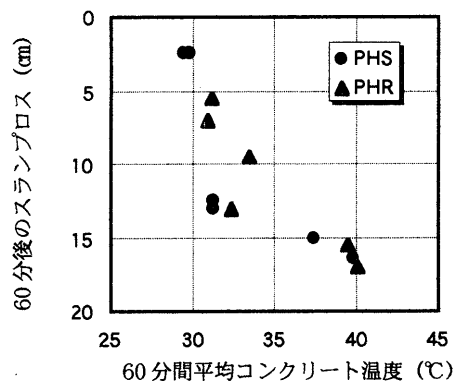


図6 60分間の平均コンクリート温度とスランプロスの関係

大きくなく、高温による水和反応の促進の影響が大きいものと考えられる。図6にPHSおよびPHRを用いたホットコンクリートの60分間の平均コンクリート温度と60分後のスランブ低下量の間係を示す。平均コンクリート温度が高くなるほどスランブロスが増大している。しかし、60分間の平均コンクリート温度が30℃以下であれば、スランブロスは3cm以下に抑制されており、実用上支障のないものと思われる。

次に、スランブロス抑制効果の認められたPHSおよびPHRの2種類の高性能AE減水剤を用いた練上がり温度35℃のホットコンクリートとAE減水剤標準形を用いた練上がり温度20℃の通常のコンクリートの凝結時間を図7に、圧縮強度増進性状を図8に示す。凝結時間は20℃養生ではPHS35 < PHR35 < N20、10℃養生ではPHS35 < N20 < PHR35の順になっており、遅延形の高性能AE減水剤であるPHRを用いたホットコンクリートでやや凝結が遅れる傾向にある。また、2.の実験結果と同様に、高性能AE減水剤を用いた場合にはホットコンクリートでも長期強度の停滞は認められず、むしろ20℃のコンクリートよりも強度が高くなっており、比較的短時間でコンクリート温度が低下するような寒中施工の条件では、練上がり温度を高めることによる長期強度への悪影響は少ないといえる。

4.まとめ

本研究では、寒中ホットコンクリートの初期性状と圧縮強度増進性状に関する実験を行い、以下に示す結論を得た。

- 1) 練上がり温度を高めることにより同一スランブを得る単位水量が大幅に増加する。このため、単位水量を低減し実用的な調合とするために、高性能AE減水剤の使用が必須の条件となる。
- 2) 寒中ホットコンクリートにおけるスランブロスを抑制するためには、混練後60分間のコンクリートの平均温度が30℃以下となる条件で、ポリカルボン酸系で架橋ポリマーが多量に配合されたタイプの高性能AE減水剤(PHS)または遅延形の高性能AE減水剤(PHR)を用いるのが有効である。
- 3) ホットコンクリートの積算温度と圧縮強度増進の関係も、一般のコンクリートと同様に、ロジスティック曲線を用いて精度よく表わすことができる。また、高性能AE減水剤を用いた場合には、比較的短時間でコンクリート温度が低下するような寒中施工の条件では、練上がり温度を高めることによる長期強度への悪影響は少ないといえる。

なお、寒中ホットコンクリートの打設後の温度履歴と初期凍害の防止効果、急激な温度変化にともなうひび割れ発生の可能性に関する検討が今後の課題である。

謝辞

本研究は、北海道大学と北海道立寒地住宅都市研究所の共同研究「寒冷地におけるコンクリート工事の新技術の開発」(平成8~10年)の一部として行ったものであり、故 鎌田英治先生(前北海道大学教授)より全面的なご指導を受けました。先生の御冥福をお祈りするとともに慎んで謝意を表します。また、実験の遂行にあたり徐向陽氏(当時大学院生)、池田和成氏(当時大学院生、現五洋建設(株))の協力を得たことを記して謝意を表します。

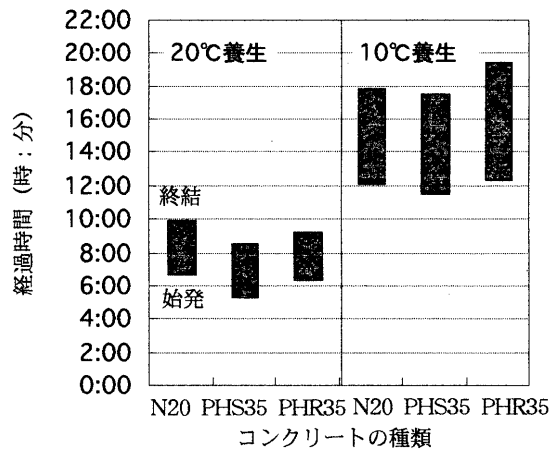


図7 凝結時間の比較(実験3)

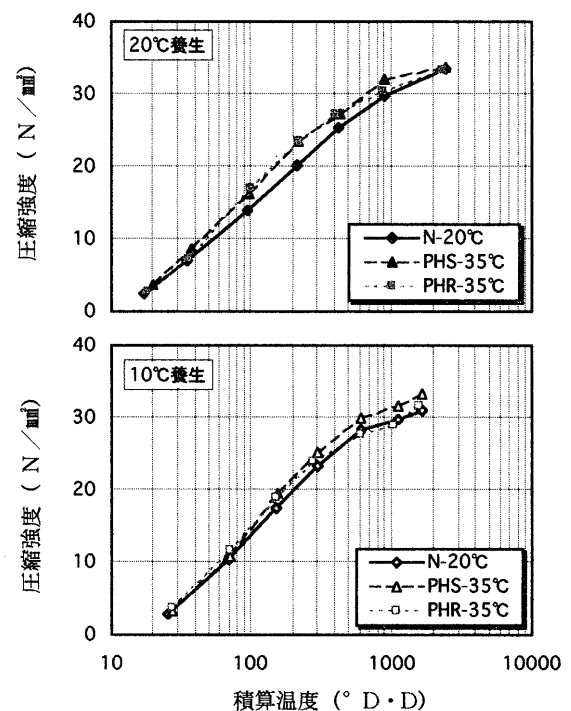


図8 強度増進性状(実験3)

参考文献

- 1) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説(第4版)、1998.2
- 2) スウェーデン建設業協会建設研究会：寒中コンクリートの手引き、北見土木技術協会技術調査小委員会、1992
- 3) Heikki Kukko: Use of Heated Fresh Concrete, Third International RILEM Symposium on Winter Concreting, 1985
- 4) 仕入豊和、鈴木昇、野崎貞澄、地濃茂雄：PCパネル用ホットコンクリートに関する実験的研究、セメント技術年報25、pp.440-446、1971
- 5) 仕入豊和、地濃茂雄、栗原吉道：PCパネル用ホットミクストコンクリートの強度におよぼす初期養生条件について、セメント技術年報26、pp.552-556、1972
- 6) 齊藤鶴義、原田理一、尾林清一、深井英一：コンクリート製品へのホットコンクリートの利用に関する研究、セメント技術年報27、pp.367-373、1973
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・鉄筋コンクリート工事(JASS5)、1997.2

(2000年10月2日原稿受理、2000年11月30日採用決定)