

5. 暑中コンクリートのフレッシュ性状および強度特性に関する実験的研究

Experimental Study on Properties of Fresh Concrete and Strength of Hot Weather Concrete

山崎 順二*1

要 旨

荷卸し時の温度が 35℃を超えた場合の暑中期のコンクリートの性状を評価し、暑中期に施工するコンクリートの不具合発生を防止するための対策を提案することを目的として、練上り温度が 35℃を超えるコンクリートを室内試験練りにより作製しその性状を調査した。さらに、大阪広域協組加盟の 105 工場において 300 バッチを超える実機試験練りを行い、運搬によるフレッシュコンクリートの性状の変化、凝結性状および強度発現性状について調査した。

実験の結果、コンクリート温度が 35℃を超えることが予測される場合の対策として、高性能 AE 減水剤の遅延形を使用することや、コンシステンシーに配慮してスランブを 21cm とすることで、暑中期においても標準期と同程度の打重ね許容時間が確保でき、施工性の改善により高品質な構造体を構築することが可能となることが確認できた。

キーワード：暑中コンクリート／遅延形／化学混和剤／コンクリート温度／プロクター貫入抵抗値／圧縮強度

1. はじめに

暑中期に施工されるコンクリートは、気温が高いことや日射の影響による運搬中のワーカビリティの低下、凝結の促進によるコールドジョイントやひび割れの発生、長期強度の発現性の低下などが懸念される。昨今の地球温暖化の影響も相まって、暑中期には都心部ではコンクリート温度が 35℃を超える場合があり、この実情に合わせて、JASS 5-2009 においても暑中コンクリートの荷卸し時の温度が「原則 35℃以下」と改定された。

そこで、荷卸し時の温度が 35℃を超えた場合のコンクリートの性状を評価し、コールドジョイントなどの不具合の発生を防止するための対策を提案することを目的とし、室内実験および実機で製造したコンクリートの性状を調査した。実機試験練りについては、大阪広域生コンクリート協同組合加盟の 105 工場にて製造した合計 323 調合のコンクリートを対象とした。本報ではこれら一連の実験結果について述べる。

なお本実験は、日本建築学会近畿支部材料施工部会（幹事として参画）と大阪広域生コンクリート協同組合が「暑中コンクリート対策検討委員会」を結成して行ったものである。本報はこれらの実験結果^{1) 2)} から、室内試験練りおよび実機試験練りの結果をまとめたものである。

2. 室内試験練り

2.1 実験概要

室内実験における要因と水準を表-1に、使用材料を表

-2に、コンクリートの調合概要を表-3に示す。呼び強度は24、36、45の3水準、スランブは18cmと21cmの2水準とした。化学混和剤は、高性能AE減水剤の標準形（SPS）および遅延形（SPR）の2種類を用いた。

コンクリートの練上り温度は、標準期としての 20℃と、

表-1 室内実験の要因と水準

要因	水準
呼び強度	24, 36, 45
スランブ	18cm, 21cm
化学混和剤	高性能AE減水剤(標準形):SPS 高性能AE減水剤(遅延形):SPR
練上りコンクリート温度	20℃, 30~35℃:33℃, 35℃超:38℃

表-2 室内実験でのコンクリートの使用材料

材料名	セメント		細骨材		粗骨材			混和剤 Ad
	C	S1	S2	G1	G2	G3		
種類	N	砕砂	石灰砕砂	1505	2010	石灰石 2005		
表乾密度(g/cm ³)	3.16	2.58	2.69	2.62	2.62	2.70	・ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤	
吸水率(%)	—	2.01	0.71	1.26	1.24	0.33	・AE助剤	
粗粒率	—	2.89	2.44	6.41	7.00	6.69		

表-3 コンクリートの調合概要

呼び強度	W/C (%)	スランブ (cm)	s/a (%)	C W S1 S2 G1 G2 G3 (kg/m ³)								
				C	W	S1	S2	G1	G2	G3		
24	57.0	18	49.0	316	180	512	356	180	270	464		
		21	51.6	325	185	533	370	169	254	436		
36	44.0	18	45.5	409	180	455	316	184	277	475		
		21	48.0	420	185	474	329	173	260	447		
45	36.0	18	42.3	500	180	404	281	187	280	481		
		21	44.6	514	185	420	292	176	264	454		

*1 技術研究所環境・生産研究グループ

夏期としての 30~35℃および 35℃超の 3 水準とした。夏期の温度設定のコンクリートは、温水を用いて練上り温度を調整すると共に、温度を高めた恒温恒湿室内で練混ぜを行った。

実験に供したコンクリートは 6 調合全 48 バッチであり、それぞれの温度で練り混ぜられたコンクリートの凝結性状をブロッカー貫入試験により評価した。

硬化コンクリートの試験のうち、コンクリートの圧縮強度は、材齢 7 日および 28 日に試験を行った。供試体の養生方法は、3 水準の練上り温度のコンクリートに対して、脱型から試験材齢まで 20℃で標準水中養生したものと、材齢 28 日までの平均養生温度(水温)が 28℃および 18℃で現場水中養生したものの 3 種類とした。コンクリートの長さ変化率は、練上り温度が 38℃のコンクリートについて供試体を作製し、JIS A 1129 に準じて測定した。

2.2 室内試験練りにおける結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの試験結果

練上り時のコンクリート温度は、標準期の温度設定のコンクリートが 20~21℃ (以後 20℃と表記)、夏期の温度設定のコンクリートが 33~34℃ (33℃と表記) および 37~39℃ (38℃と表記) であった。練上り時のフレッシュコンクリートの品質は、設定スランブ 18cm に対して練上り時 18.5cm~21.5cm、設定スランブ 21cm に対して 21.0cm~24.0cm であったが、分離などの不具合は無く良好な性状であった。また空気量について、図-1 に高性能 AE 減水剤の添加量との関係を示す。凡例は、練上り温度 [20℃、33℃、38℃]・混和剤の種類 [SPS、SPR] を表す。練上り温度が高いほど空気連行性がやや低下する傾向が認められるが、いずれも 4.5±1.5% の範囲内であり、混和剤の添加量により空気量の調整が可能であった。

(2) コンクリートの凝結試験結果

練上り温度および混和剤種類の違いがコンクリートの凝結性状に及ぼす影響を調査した。凝結性状の評価基準として、JASS 5-2009 では、0.1N/mm² (打放しなど重要な部材)、0.5N/mm² (一般の場合) および 1.0N/mm² (内部振動その他適当な処置) の 3 水準の貫入抵抗値が示されている。

一方、夏期 (外気温が 25℃以上) のコンクリートにおける打重ね時間間隔の限度を 120 分、製造工場からの運搬時間の限度を 90 分とすると、注水からの経過時間が上記の 3 水準の貫入抵抗値に達するまでの時間が 210 分 (3 時間 30 分) 以上であれば、先に打ち込んだコンクリートの再振動可能時間内であり、コールドジョイントが防止できると考えられる。

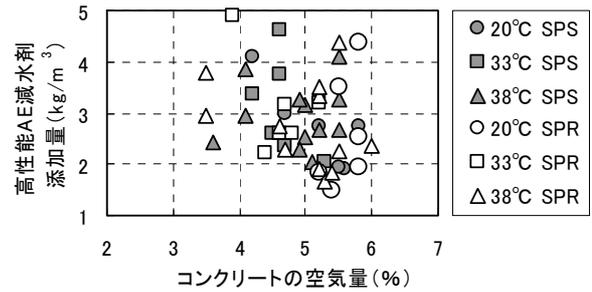


図-1 空気量と高性能 AE 減水剤の添加量との関係

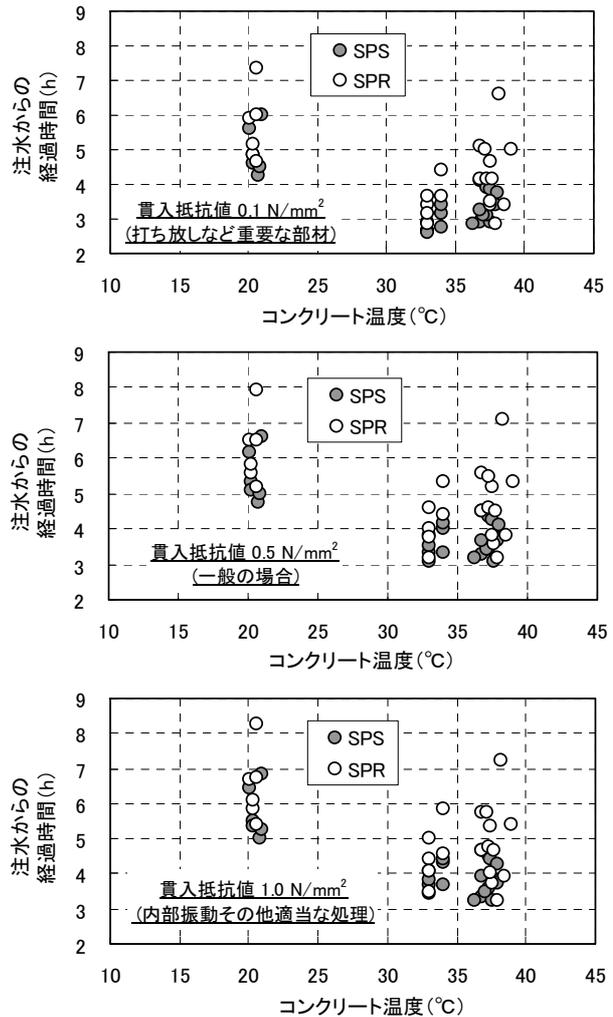


図-2 貫入抵抗値とコンクリート温度の関係

そこで、貫入抵抗値が 0.1N/mm²、0.5N/mm² および 1.0N/mm² に到達する時間と練上り時のコンクリート温度との関係を図-2 に示す。練上り時のコンクリート温度が高いほどそれぞれの貫入抵抗値に達する時間が 60~90 分程度早くなっているが、33℃と 38℃では大きな差異はなかった。また、SPS よりも SPR を用いた場合に、注水からの経過時間が長くなる傾向が認められた。

凝結試験の結果を、調合別に図-3 に示す。各図中の凡

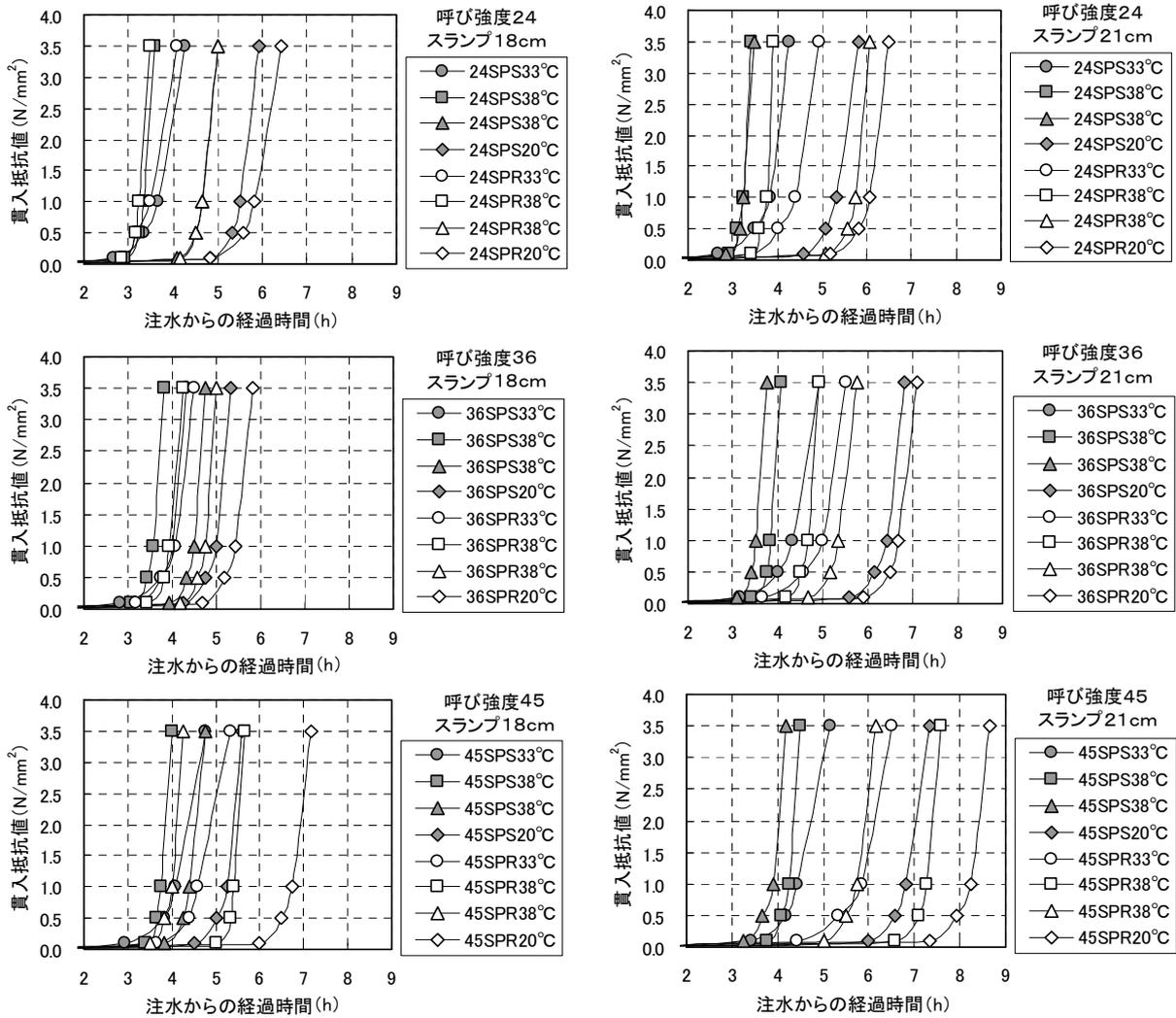


図-3 練上り温度および混和剤種類の違いによるコンクリートの凝結試験結果

例は、呼び強度[24、36、45]・混和剤の種類[SPS、SPR]・練上り温度[20℃、33℃、38℃]を表している。

これらの結果から、SPS を用いた練上り温度が高いコンクリートほど凝結時間が短くなるが、SPR を使用することによって凝結時間が遅延され、呼び強度 24-18cm 以外は貫入抵抗値 0.5N/mm²に達する時間が3時間30分以上となった。このSPRによる凝結遅延効果は、呼び強度が大きいほど、またスランブ21cmの方が顕著であった。

(3) コンクリートの圧縮強度発現性

図-4に練上り温度が20℃、33℃および38℃における標準水中養生材齢28日強度とセメント水比の関係を示す。SPSおよびSPRともスランブ18cmと21cmのコンクリートの強度を合わせてプロットした。同じC/Wにおいてややバラツキがあるが、いずれの練上り温度においてもセメント水比と強度の間には寄与率R²=0.95~0.99と高い相関が認められた。材齢7日および28日での圧縮強度試験の結果を調合別に図-5に示す。各図のX軸の記号は、練上り

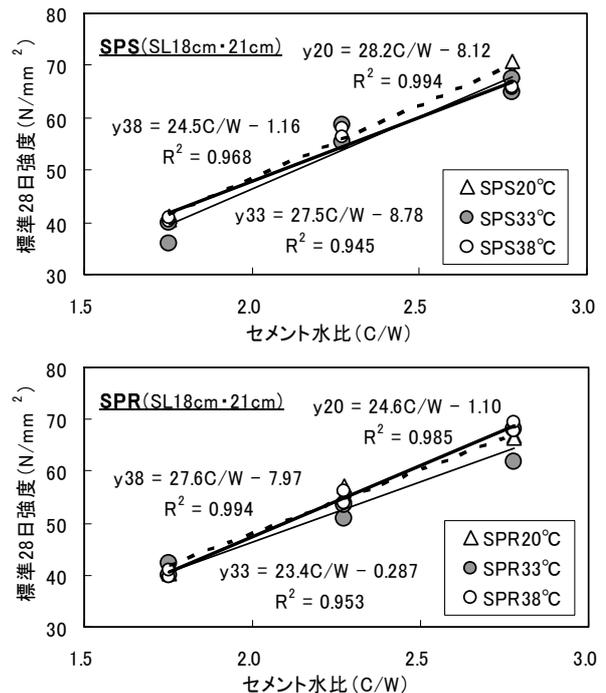


図-4 標準水中養生 28日強度とセメント水比

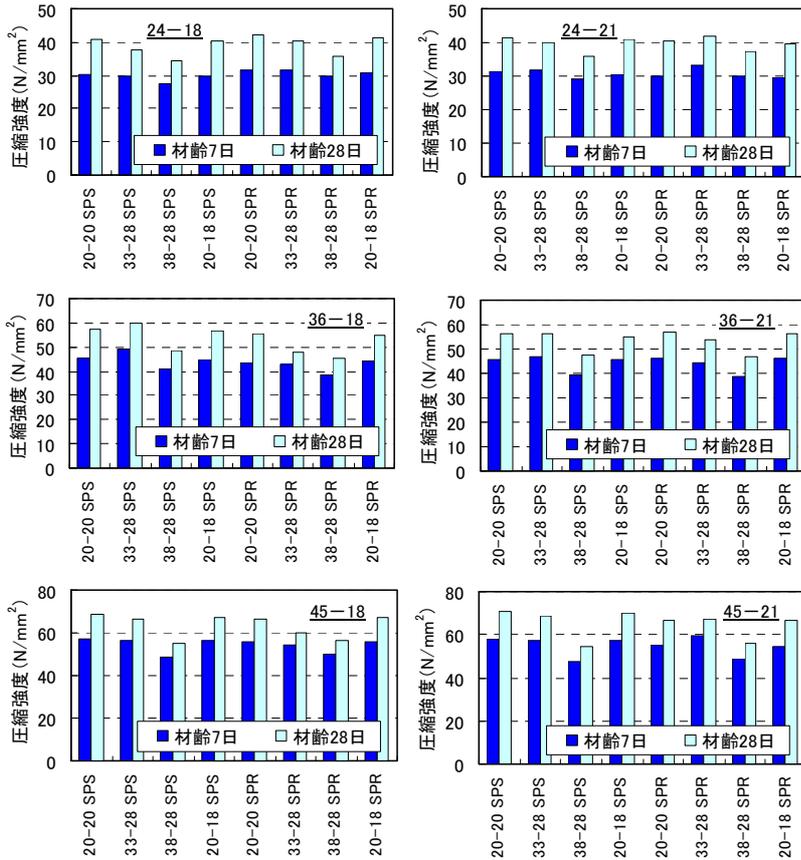


図-5 調合別の材齢7日および28日での圧縮強度試験の結果

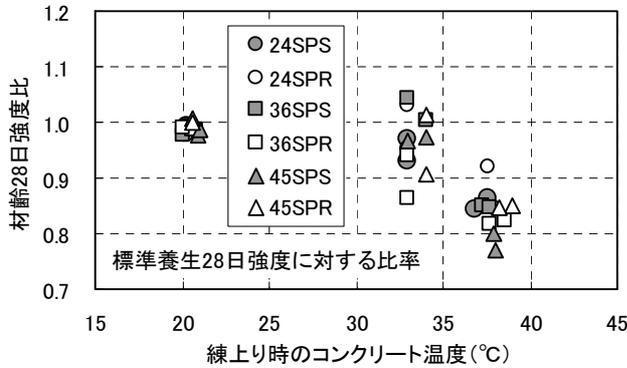


図-6 28日強度に対する現場水中28日強度の比率

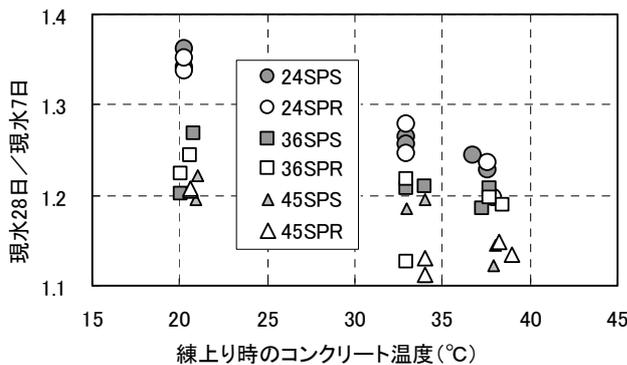


図-7 現場水中7日に対する強度増進比率

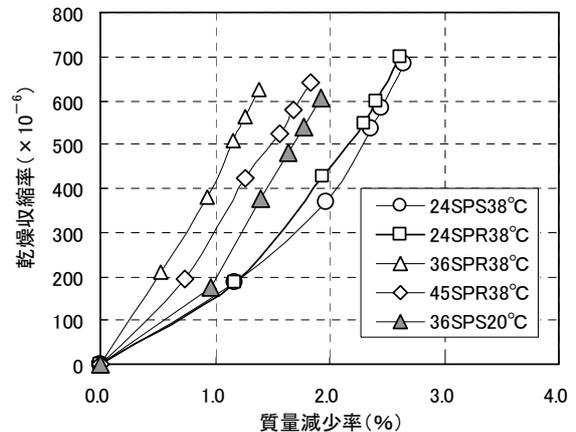


図-8 乾燥収縮率と質量減少率の関係

温度[20℃、33℃、38℃]—水中養生温度 [20℃、28℃、18℃]・混和剤種類[SPS、SPR]を表している。練上り温度が高く試験材齢までの水中養生温度が高いコンクリートほど、材齢28日強度が低くなっている。

呼び強度24、36、45のコンクリートの材齢28日における20-20SPSの強度に対する現場水中養生強度の比率を図-6に示す。強度低下の比率は、練上り温度が33℃の場合は強度の比率が0.85~1.05程度、38℃の場合には0.90~0.80程度の範囲となり、45SPSでは0.80を下回った。しかし、45SPRでは45SPSと比べて強度低下率が改善されており、SPRを用いることによって高温時の強度低下率が改善される傾向が認められた。

次に、現場水中養生における材齢7日から28日までの強度増進の比率を各調合別に図-7に示す。材齢28日での調合間の比較と同様に、練上り温度が高いほど材齢7日から28日までの強度増進が小さくなる事が分かる。

一方、図-5から練上り温度に関わらず全ての調合において材齢28日の時点で調合強度以上が発現していることから、本実験における調合計画によれば強度発現性に問題が生じることはないと考えられる。

(4) コンクリートの長さ変化率

練上り温度38℃のコンクリートの乾燥収縮率と質量減少率の関係を図-8に示す。練上り温度20℃の測定結果も併せて示したが、練上り温度や混和剤の種類が長さ変化率に及ぼす影響はほぼ無いと考えられる。

3. 実機試験練り

3.1 実験概要

実機実験における要因と水準を表-4に示す。呼び強度は3水準、セメントは普通ポルトランドセメントとし、それぞれの工場が保有する6銘柄(As, Ub, Su, Ta, To, Mi)を使用した。化学混和剤についても6社の混和剤(Ka, Ta, Ni, Po, Fu, Ya)を概ね均等に割り振って使用した。

実験に供したコンクリートの調合概要は、呼び強度24、36、45の3水準に対してスランブ18cm、21cm(高性能AE減水剤)とした。なお、呼び強度24のみスランブ15cm(AE減水剤)の調合も加えた。表-5に調合概要を示す。化学混和剤は標準形(AES/SPS)と遅延形(AER/SPR)の2種類を用いた。出荷時および荷卸し時のコンクリート温度は30℃~40℃の範囲を目標とした。実験に供するコンクリートの練混ぜ量は、最大積載量10tのアジテータ車では2.0m³、それ未満の積載量では1.5m³を原則とした。運搬時間は30分から2時間程度の範囲であった。

3.2 コンクリートの凝結試験方法

レディーミクストコンクリート工場にて製造されたコンクリートは、アジテータ車により吹田市または神戸市の公的試験所まで運搬された後に荷卸し時の試験を行った。コンクリートの凝結試験は、荷卸し時の試験と併せて、JIS A 1147に準じたプロクター貫入試験により行った。ただし、実際の暑中期のコンクリート温度における凝結性状を評価することを目的とし、20℃の室内環境下での試験ではなく、屋外環境下にモルタル試料を静置してプロクター貫入抵抗値を測定した。

表-4 実機実験の要因と水準

要因	水準
呼び強度	24, 36, 45
スランブ	15cm(呼び強度24のみ), 18cm, 21cm
セメント	普通ポルトランドセメント
化学混和剤	AE減水剤(標準形)/同(遅延形) : AES/AER 高性能AE減水剤(標準形)/同(遅延形) : SPS/SPR

表-5 コンクリートの調合の概要

呼び強度	スランブ	混和剤種類	W/C (%)	W 単位量(kg/m ³)	C 単位量(kg/m ³)	s/aの範囲 (%)
24	15	AES/AER	57	312	178	44.0~51.0
	18	SPS/SPR	57	316	180	48.1~52.4
	21	SPS/SPR	57	325	185	50.2~52.5
36	18	SPS/SPR	44	409	180	43.8~49.2
	21	SPS/SPR	44	420	185	45.7~51.2
45	18	SPS/SPR	36	500	180	40.4~46.0
	21	SPS/SPR	36	514	185	41.2~48.0

3.3 プロクター貫入抵抗値による凝結性状の評価方法

貫入抵抗値が 0.1N/mm² (打放しなど重要な部位)、0.5N/mm² (一般の場合) および 1.0N/mm² (内部振動その他適当な処理) に達するまでの注水からの経過時間を評価した。この3水準の抵抗値に達するまでの経過時間が、先に打ち込んだコンクリートの再振動可能時間の範囲内であると考えられる。建築構造物の場合は締固めを行いながら打ち込むことが一般的であるが、以降の評価は貫入抵抗値が 0.5N/mm² に達するまでの経過時間によることとする。

また、圧縮強度試験用供試体は、材齢7日と28日において、標準水中養生(出荷時および荷卸し時)と現場水中養生(荷卸し時)の2種類を採取した。

3.4 実機実験における結果および考察

(1) 運搬によるコンクリート温度の変化

図-9に運搬時間がコンクリート温度に及ぼす影響を示す。運搬時間が0:00付近のプロットは出荷時の温度である。実験上、運搬時間が90分以上となるデータも含めて検討している。運搬時間が長くなることによってコンクリート温度が徐々に上昇する傾向にあるが、標準形と遅延形による差異や呼び強度の違いによる差異は認めら

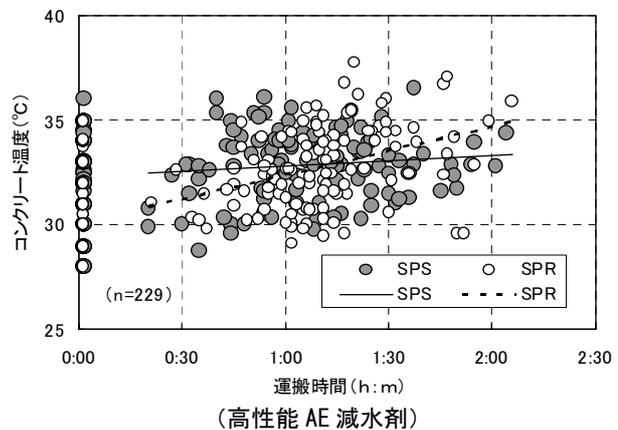
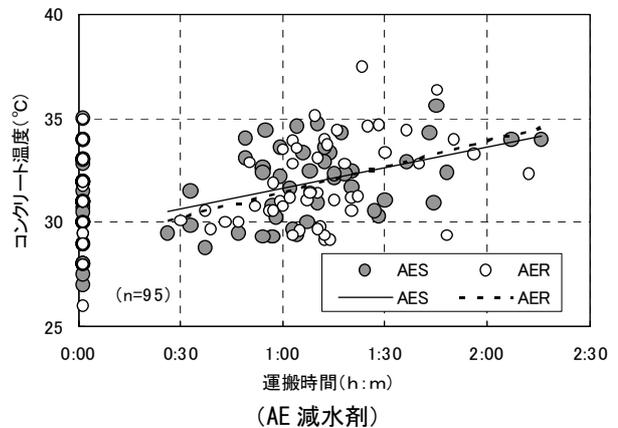


図-9 運搬時間とコンクリート温度の関係

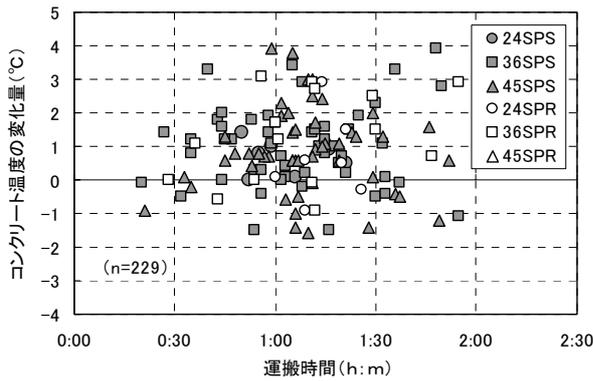


図-10 運搬によるコンクリート温度の変化量

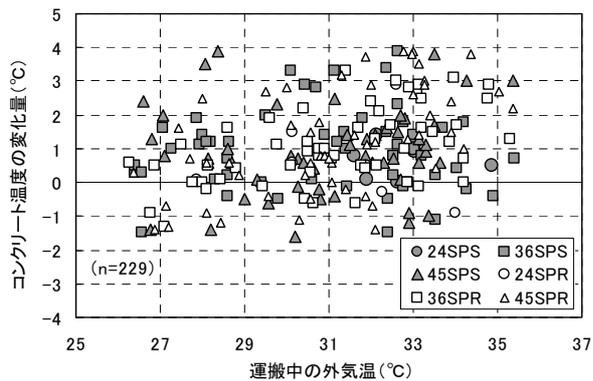


図-11 コンクリート温度の変化量と運搬中の外気温

れなかった。コンクリート温度の変化量について、図-10には運搬時間、図-11には運搬中の外気温との関係を示す。運搬時間が1時間以上となる場合や運搬中の外気温が30℃以上となる場合には、運搬中にコンクリート温度が最大4℃程度上昇する傾向が認められた

(2) 運搬によるスランプの変化

図-12および図-13にスランプの変化量と運搬時間との関係を示す。呼び強度が大きいほどスランプの変化量が小さくなる傾向にあり、かつSPRを用いることによってスランプの変化(ロス)を低減することが可能となった。

(3) 運搬による空気量の変化

図-14に荷卸し時のコンクリート温度と空気量の変化を示す。コンクリート温度が高くなると空気量がやや減少する傾向にあるがその傾向はあまり明確ではなかった。また、運搬時間や呼び強度、混和剤種類が空気量の変化に及ぼす影響もほぼなかった。

(4) コンクリート温度と貫入抵抗値0.5N/mm²到達時間

プロクター貫入抵抗値が0.5N/mm²に達するまでの注水からの経過時間をスランプ別および調合別に図-15に示す。荷卸し時のコンクリート温度が高くなるのに伴い、プロクター貫入抵抗値が0.5N/mm²に到達する時間がやや早くなる傾向にあるが、コンクリート温度が35℃を超え

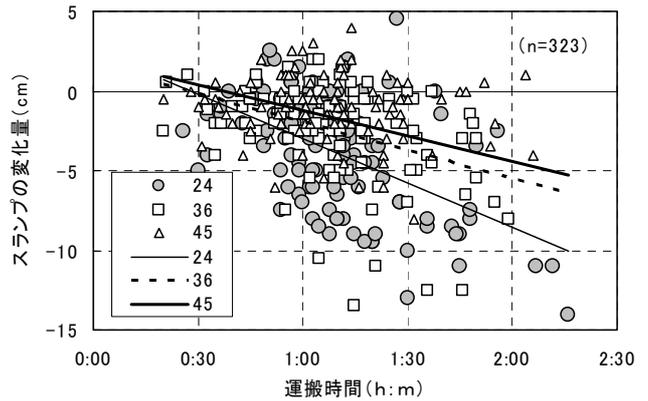


図-12 呼び強度によるスランプ変化量と運搬時間

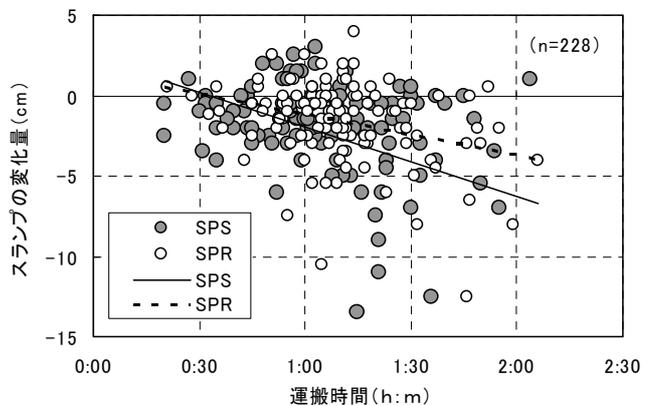


図-13 混和剤種類によるスランプ変化量と運搬時間

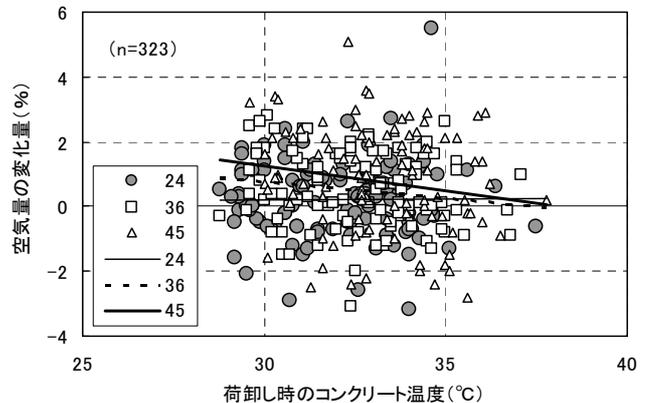


図-14 荷卸し時のコンクリート温度と空気量の変化

た場合でも到達時間が極端に短くなる傾向は見られなかった。スランプや呼び強度の違いによる0.5N/mm²到達時間の差異はあまり顕著ではないが、遅延形(AERおよびSPR)を使用した場合に凝結時間の改善効果が大きく、荷卸し時のコンクリート温度が35℃を超えた場合でも0.5N/mm²に達するまでの時間を3時間以上確保できることが認められた。

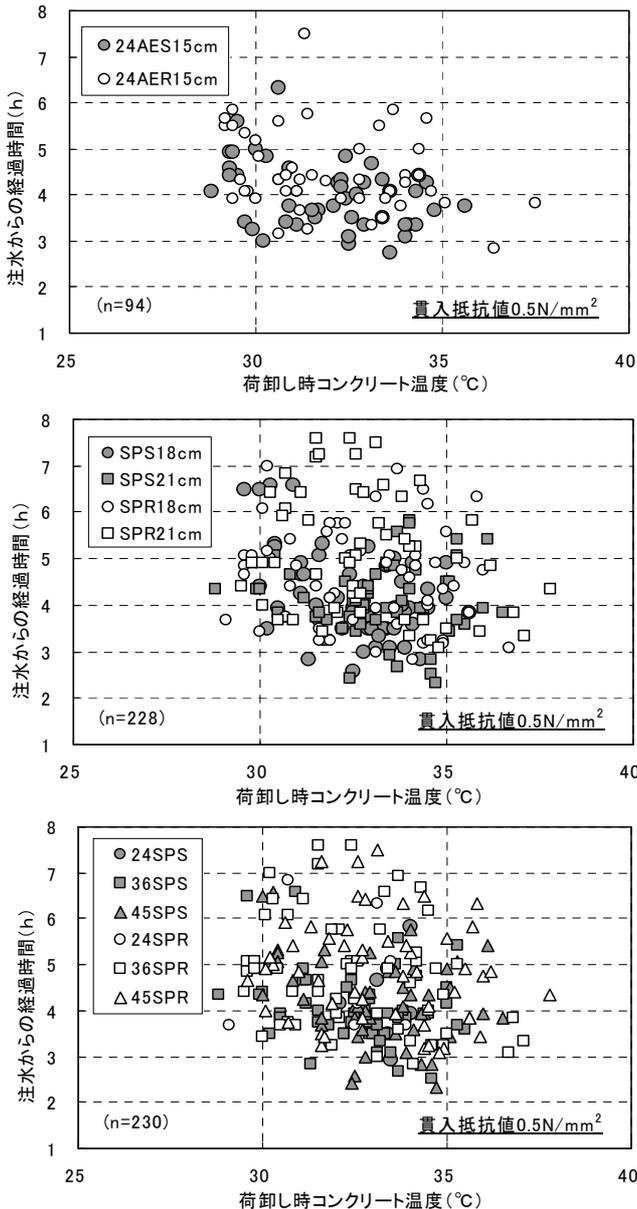


図-15 0.5N/mm²到達時間とコンクリート温度

(5) 荷卸し時のスランプと貫入抵抗値 0.5N/mm²到達時間
SPS および SPR における 0.5N/mm²到達時間について、
図-16 に荷卸し時のスランプとの関係を、図-17 に運搬
によるスランプ変化量との関係を示す。

スランプの許容範囲外のデータも含めて評価している
が、荷卸し時のスランプが小さく、また運搬によるスラ
ンプの変化量が大きいコンクリートは、凝結時間が短く
なる傾向にあった。

(6) 打重ね許容時間と荷卸し時のコンクリート温度

図-18 および図-19 にスランプ 18cm および 21cm の
SPR を用いたコンクリートの打重ね許容時間と荷卸し時
のコンクリート温度の関係を、図-20 にスランプ 21cm
の SPS での関係を示す。コンクリート温度が 35℃を超え

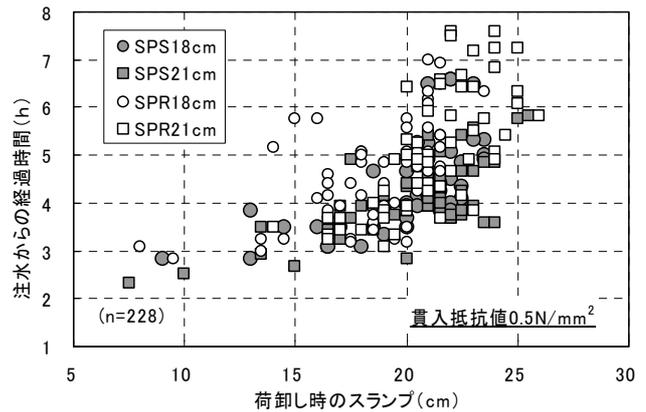


図-16 0.5N/mm²到達時間と荷卸し時のスランプ

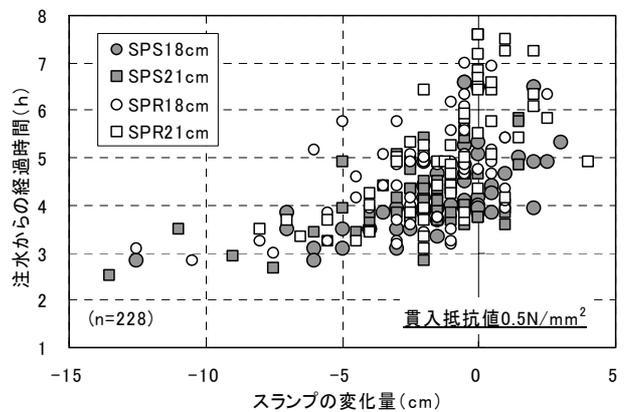


図-17 0.5N/mm²到達時間とスランプの変化量

た場合に、急激に打重ね許容時間が短くなる傾向は認め
られなかった。また、図には 0.5N/mm²到達時間の回帰線
を示した。この回帰線により評価すると、スランプ 18cm
では SPR を、スランプ 21cm では SPS および SPR を使用
することにより、暑中期においても打重ね許容時間を 4
時間程度確保することが可能となる。このことから、暑
中期のコンクリート温度が 25℃を超える場合の練混ぜか
ら打込み終了までの限度については、スランプ 18cm また
は 21cm として SPR を使用することにより、120 分にまで
延長できることが示唆される。

(7) 現場水中養生の標準水中養生に対する強度発現性

荷卸し時の材齢 7 日における標準水中養生強度に対す
る現場水中養生の強度の比率（現場水中／標準水中）に
ついて、荷卸し時のコンクリート温度との関係を図-21
に、材齢 28 日における比率とコンクリート温度の関係を
図-22 に示す。

標準養生に対する現場水中養生の強度の比率は、材齢 7
日において 0.9～1.1 程度、材齢 28 日においては 0.85～1.0
程度であり、材齢 28 日においてその比率が低くなった。
これは、暑中期は現場水中養生時の水温が高く、材齢 7

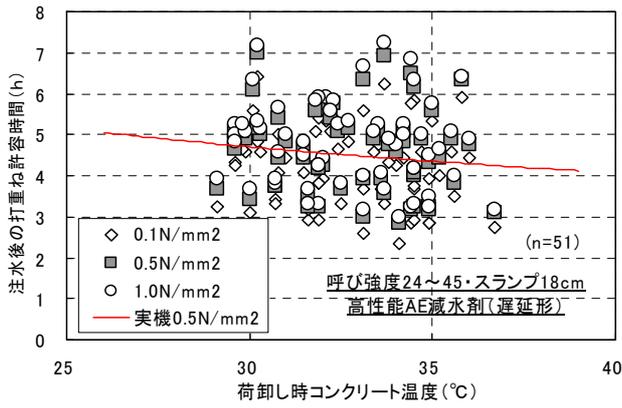


図-18 打重ね許容時間とコンクリート温度 (SPR18cm)

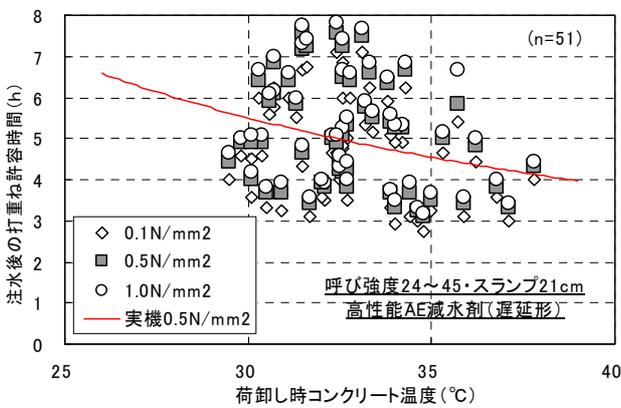


図-19 打重ね許容時間とコンクリート温度 (SPR21cm)

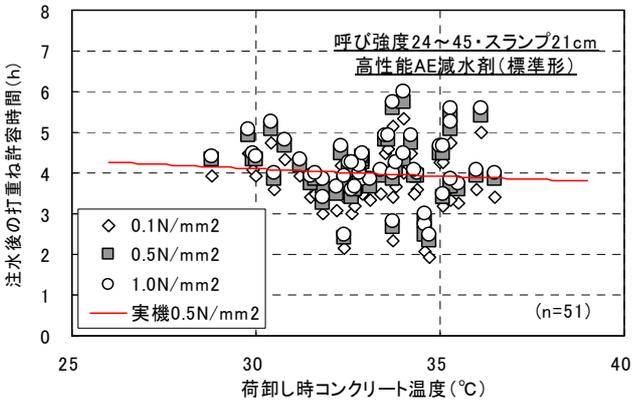


図-20 打重ね許容時間とコンクリート温度 (SPS21cm)

日の時点では現場水中養生の方が標準水中養生の場合よりも強度発現性が高くなるためである。逆に材齢28日では、材齢初期に高温養生された場合に強度増進が小さくなるために、標準水中養生の場合と同等以下の強度となったと考えられる。

また、荷卸し時のコンクリート温度が高くなるほど、標準水中養生に対する現場水中養生の比率が低くなる傾向にあるが、コンクリート温度が35°Cを超えることによ

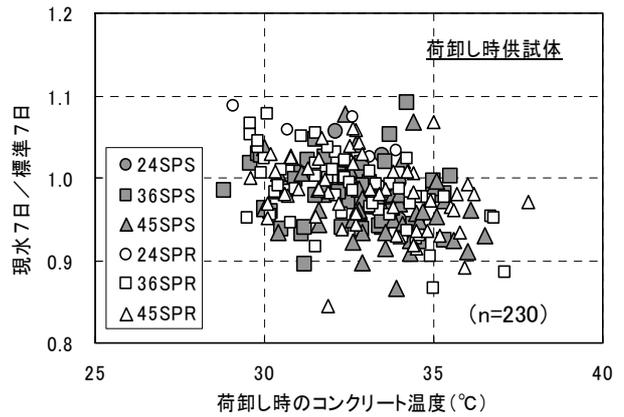
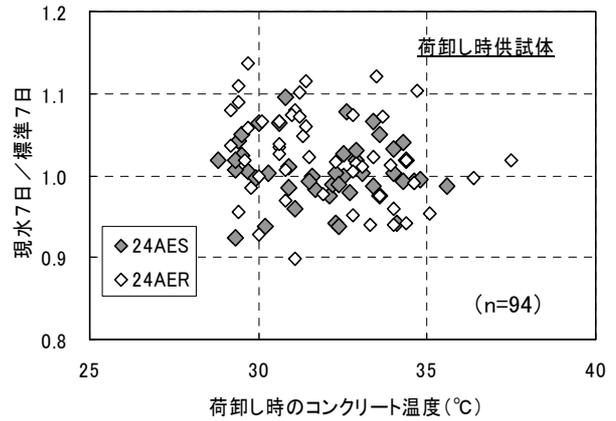


図-21 現場水中7日/標準水中7日

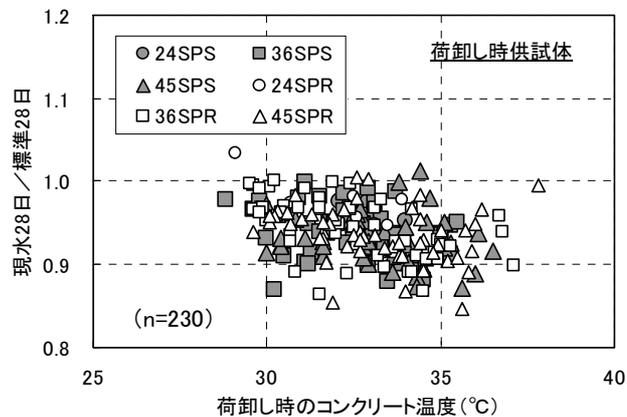
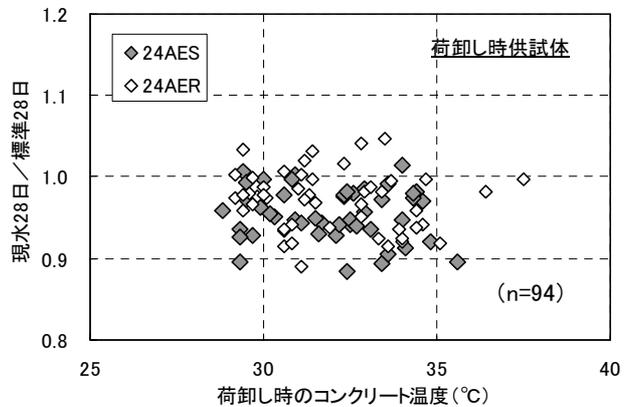


図-22 現場水中28日/標準水中28日

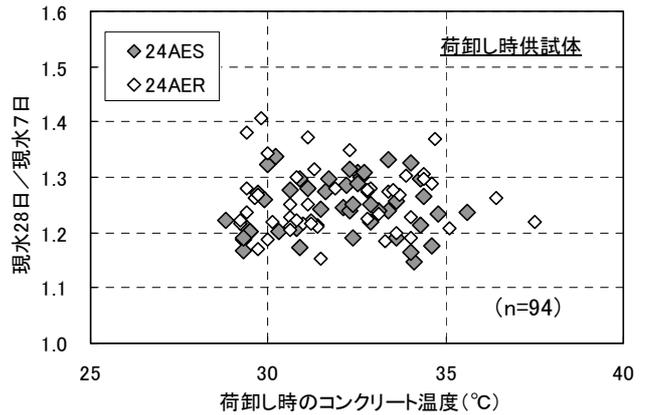
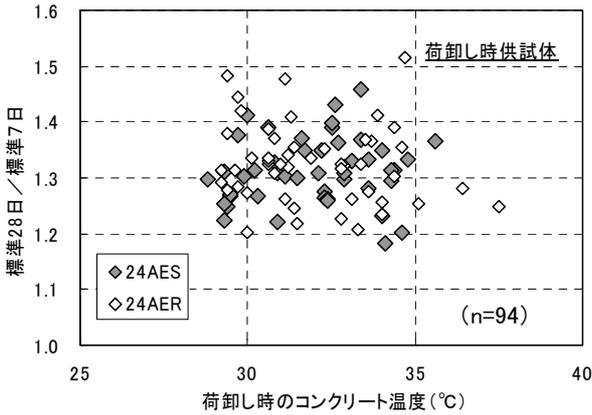


図-23 標準水中 28 日 / 標準水中 7 日

図-24 現場水中 28 日 / 現場水中 7 日

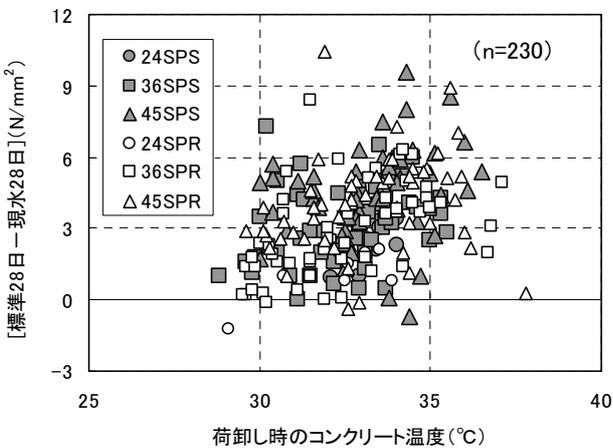
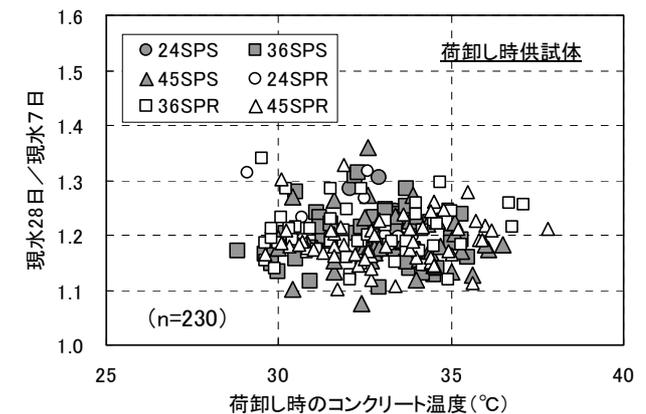
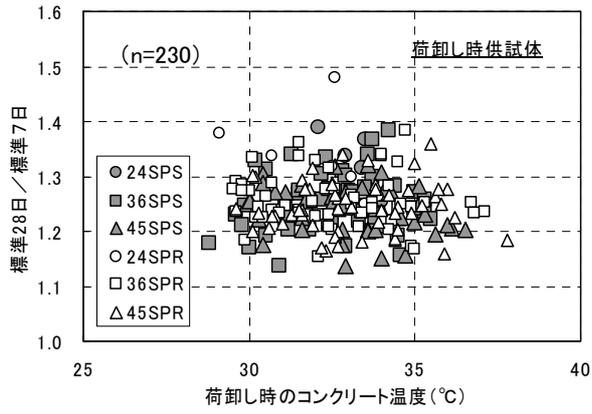


図-25 標準水中養生と現場水中養生の強度差と温度

る顕著な低下は認められなかった。

(8) 材齢 7 日から材齢 28 日までの強度増進率

荷卸し時のコンクリートの材齢 7 日から材齢 28 日までの強度増進率について、標準水中養生におけるコンクリート温度との関係を図-23 に、現場水中養生における関係を図-24 に示す。材齢 7 日から 28 日までの強度増進率は、標準水中養生では 1.15~1.4 程度、現場水中養生では 1.1~1.3 程度の範囲であり、現場水中養生強度の方がやや低くなった。これは、現場水中養生では材齢初期から 30°C

程度の水温で養生されていることによると考えられる。しかし、荷卸し時のコンクリート温度が 35°C を超えることによる強度増進率の低下は認められず、30°C~35°C の場合の比率と同等であった。

(9) 標準水中養生と現場水中養生の強度の関係

材齢 28 日における標準水中養生と現場水中養生の強度差と荷卸し時のコンクリート温度の関係を図-25 に示す。高強度コンクリートの領域とみなせる呼び強度 45 のコンクリート (45SPS・45SPR) において、標準水中養生強度と現場水中養生強度の差が最大 9N/mm² 程度となっているが、それ以外では練上り温度が 35°C を超えた場合でも 6N/mm² 以下であり、数値的意味は若干異なるが JASS5-2009 に示される S 値と同等以下となった。

4. まとめ

暑中期のコンクリートについて、コンクリート温度や混和剤の種類 (標準形および遅延形) が、フレッシュコンクリートの性状、経時変化性状および凝結性状、また強度発現性や長さ変化率に及ぼす影響について、室内実験および実機実験の結果をもとに検討した。

まず、室内試験結果から得られた知見を以下に示す。

(1) コンクリート温度が 35°C を超える場合でも、遅延形

の高性能 AE 減水剤を使用することによる凝結遅延効果が確認できた。

次に、実機実験結果から得られた知見を以下に示す。

- (2) 運搬時間に伴いコンクリート温度の上昇やスランプロスが生じるが、35℃を超えた場合でも急激にフレッシュ性状が変化する傾向は認められなかった。
- (3) 呼び強度が大きい調合や遅延形の高性能 AE 減水剤を用いることによって、スランプロスが小さくなり、コンクリートのスランプ保持性が高くなることが確認できた。
- (4) フレッシュコンクリートの空気量は、荷卸し時のコンクリート温度、外気温、運搬時間、混和剤種類による影響をほとんど受けなかった。
- (5) コンクリート温度が 35℃を超えた場合でも、貫入抵抗値 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ への到達時間が極端に短くなる傾向は認められなかった。
- (6) 打重ね許容時間は、スランプ 21cm とするか、もしくはスランプ 18cm では SPR を使用することによって練混ぜから 4 時間程度まで確保でき、暑中期の練混ぜから打込み終了までの限度を 120 分にまで延長できる可能性がある。
- (7) 暑中期におけるコンクリートの強度発現性について、コンクリート温度が 35℃を超えた場合の強度低下は、顕著には認められなかった。

以上の一連の実験結果から、暑中期にコンクリート温度が 35℃を超えることが予測される場合の対策として、高性能 AE 減水剤の遅延形を使用することや、スランプロスを 21cm とすることによって、十分な打重ね許容時間が確保でき、高品質な構造体を構築することが可能となることが確認できた。

今後も各種の実験を継続することによって、暑中期のコンクリートの強度発現性について模擬柱試験体による構造体コンクリート強度の発現性を確認するとともに、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性などの耐久性に関する性能評価およびコンクリート温度が耐久性に及ぼす影響の有無について検討を加え、暑中期のコンクリート工事における施工性の改善手法および構造体品質確保のために有用となる情報を提示したい。

[謝 辞]

本実験は、日本建築学会近畿支部材料施工部会と大阪広域生コンクリート協同組合が「暑中コンクリート対策検討委員会」を結成して行ったものである。また、本実

験の一部は、大阪広域生コンクリート協同組合傘下の105工場およびコンクリート用化学混和剤協会近畿ブロック会の協力を得て行われたものである。

ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 前田朗・栗延正成・岩清水隆・山崎順二：暑中コンクリートの品質確保に関する実験的研究(その1～2)、日本建築学会学術講演梗概集(北陸)、A-1、pp.849-852、2010.9.
- 2) 前田朗・栗延正成・西村文夫・岩清水隆・山崎順二・木村芳幹：暑中コンクリートの品質確保に関する実験的研究(その3～5)、日本建築学会学術講演梗概集(関東)、A-1、pp.809-814、2011.8.