

論文 スランプ保持型混和剤を用いた 35℃を超える暑中コンクリートの打重ね部の品質評価

森 陽香*1・細田 暁*2・柳井 修司*3・菅俣 匠*4

要旨：打込み時のコンクリート温度が 35℃を超える暑中コンクリートの品質確保を目的として、スランプ保持型混和剤を使用したコンクリートの打重ね施工実験を行い、打重ね部の品質評価を行った。スランプ保持性が高く適切な凝結遅延性を持つ混和剤を用いることで、表面吸水速度の小さいコンクリートが施工でき、打重ね部の吸水抵抗性も良好であることを確認した。また、凝結特性を現場で簡易に把握するために N 式貫入試験と T 式貫入試験を実施し、各試験の貫入量とプロクター貫入抵抗値に明確な関係性が存在し、適切な打重ねのための品質管理手法として活用できることを確認した。

キーワード：暑中コンクリート, 35℃, スランプ保持性, 打重ね, 品質評価, 表面吸水試験, 簡易貫入試験

1. はじめに

近年、特に都市部では、ヒートアイランド現象等により平均気温が上昇傾向にある¹⁾。土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕²⁾ (以下、示方書と称す)によれば、日平均気温が 25℃を超える場合は暑中コンクリートとしての施工を行うことを標準とし、高温によるコンクリートの品質の低下がないように、材料、配合、練混ぜ、運搬、打込みおよび養生等について適切な処置をとらなければならないとされている。さらに、打込み時にコンクリート温度が 35℃以下であることを満足することが難しい場合には、①フレッシュコンクリートの品質に及ぼす影響、②硬化コンクリートの強度に及ぼす影響、③コンクリートの施工に及ぼす影響、④温度ひび割れに対する照査、⑤高温履歴が圧縮強度に及ぼす影響の 5 つの事項を事前に検討し、コンクリートが所要の品質を確保できることを確認する必要があるとされる。しかしながら、個々の工事においてこれらを検討することは容易ではない。

一方で、昨今は化学混和剤技術の発展が目覚ましく、従来のものよりもスランプ保持性を大幅に高め、さらに適切な凝結遅延性を有する混和剤の技術開発が進められ、検討が進められている^{3) 4)}。

本研究では、上述した 5 つの事項のうち①、②、③、特に③のコンクリートの施工に及ぼす影響を検討の対象とし、打込み時のコンクリート温度が 35℃を超える暑中コンクリートの品質確保において、高いスランプ保持性と適切な凝結遅延性を持った混和剤の有効性を確認することを目的とする。示方書に定められる外気温が 25℃を超える暑中コンクリートの標準的な施工時間(練混ぜから打終わりまでの時間：1.5 時間以内、許容打重ね時間間隔：2 時間以

内)の上限に近い条件で、外気温 32~36℃の屋外にて、打重ねを有する試験体の施工実験を行う。その中で、適切に打重ねを行うためにコンクリートの凝結性状を施工現場で把握する簡易的な方法として、N 式貫入試験と T 式貫入試験を実施する。さらに、硬化コンクリートの打重ね部の品質を、表層透気試験と表面吸水試験を用いて評価する。

2. フレッシュコンクリートの試験

2.1 使用材料および配合

コンクリートの使用材料を表-1、配合を表-2 に示す。混和剤 AD1 として AE 減水剤遅延形の高機能タイプを、混和剤 AD2 として AE 減水剤遅延形のスランプ保持型を使用した。

表-3 に実験ケースおよび施工条件を示す。混和剤 AD1 を用いた Case1 は、現在の土木工事で広く用いられている夏期修正配合のコンクリートを想定している。混和剤 AD2 を用いた Case2 は、スランプ保持性を大幅に高め、凝結が適度に遅延するコンクリートである。施工条件は外気温 25℃を超える暑中コンクリートの標準的な施工時間の限度である 3.5 時間に設定した。

2.2 コンクリートの試験概要および試験結果

2 種類のコンクリートに対して、表-4 の試験を実施した。試験中の外気温は 32~36℃であった。2.2(1)、(2)、(3)、(4)の試験は屋外のテント下で実施した。2.2(5)の圧縮強度試験用供試体については、出荷時にプラント、90 分後に現場で試料を採取して日陰に存置し、2 日後に脱型を行い、その後 20℃で水中養生を行った。試験体は 2 層で打ち重ねるため、Case ごとにトラックアジテータを 2 台ずつ用意し、それぞれについて試験を行った。本実験における

*1 横浜国立大学 都市科学部 都市基盤学科 (学生会員)

*2 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 教授 博士(工学) (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 担当部長 博士(工学) (正会員)

*4 ポゾリス ソリューションズ(株) 技術開発センター長 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料

材料	記号	種類および物理的性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³)
細骨材	S1	砕砂 (表乾密度:2.63 g/cm ³ , 粗粒率:2.95, 吸水率:0.99%)
	S2	山砂 (表乾密度:2.60 g/cm ³ , 粗粒率:1.60, 吸水率:2.21%)
	S3	石灰砕砂 (表乾密度:2.69 g/cm ³ , 粗粒率:2.90, 吸水率:0.84%)
粗骨材	G	砕石 (表乾密度:2.71 g/cm ³ , 実積率:59.5%)
水	W	地下水, 45°C*
混和剤	AD1	AE減水剤 遅延形/高性能タイプ リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	AD2	AE減水剤 遅延形/スランプ保持型 (プラント添加型) リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体

* : 練上がり温度を35°C程度とするため温水を使用

表-2 コンクリートの配合 (27-12-20N)

Case	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤 (C×%)	
			W	C	S1	S2	S3	G	AD1	AD2	
1	53.0	46.0	170	321	415	166	248	1000	AD1	1.15	
AD2									1.15		

表-3 実験ケースおよび施工条件

Case	配合	練混ぜから打込み終了		打重ね時間間隔	練混ぜから打重ね
		1層目	2層目		
1	一般配合	1.5時間	1.5時間	2.0時間	3.5時間
2	スランプ保持配合	1.5時間	1.5時間	2.0時間	3.5時間

表-4 試験項目

試験項目	試験方法	備考
コンクリート温度	JIS A 1156	テント下で30分ごと
スランプ	JIS A 1101	テント下で30分ごと
空気量	JIS A 1128	テント下で30分ごと
ブリーディング	JCI-S-015-2018 容器直径:150mm	テント下 (蓋あり), 90分後に採取
		テント下 (蓋なし), 90分後に採取
プロクター貫入抵抗	JIS A 1147	テント下, 90分後に採取 凝結確認用試験体内, 90分後に採取
圧縮強度 (7, 28日)	JIS A 1108	出荷時・90分後に採取して日陰に存置, 2日後に脱型し20°C水中養生

経過時間はトラックアジテータ1車あたり2バッチの積込みにおいて1バッチ目と2バッチ目の出荷伝票に記載される注水時刻の中間を練混ぜ開始 (0分) として表した。

(1) スランプ

30分ごとにスランプを測定した。測定結果を図-1に示す。コンクリート温度が35°Cを超える環境においては、一般的な夏期修正配合であるCase1はスランプの低下が徐々に大きくなり、90分で管理幅下限付近まで低下し、120分経過で管理幅を下回った。一方Case2ではスランプの低下が大幅に軽減され、出荷から150分以上管理幅内のスラン

表-5 ブリーディング量および圧縮強度

Case	小型容器ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)		圧縮強度 (N/mm ²)			
			出荷時		90分後	
	蓋あり	蓋なし	7日	28日	7日	28日
1-1	0.04	0.00	28.5	36.1	27.3	34.8
1-2	-	-	30.3	38.8	27.9	36.0
2-1	0.03	0.00	30.6	38.8	26.5	33.6
2-2	-	-	31.5	40.2	33.3	42.6

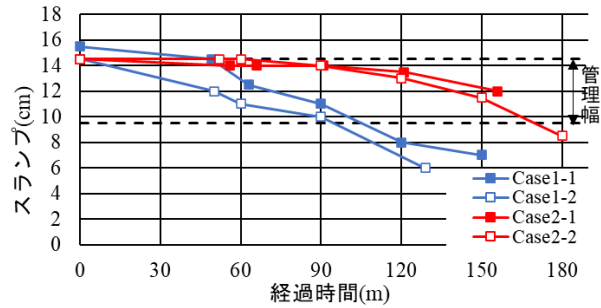


図-1 スランプの経時変化

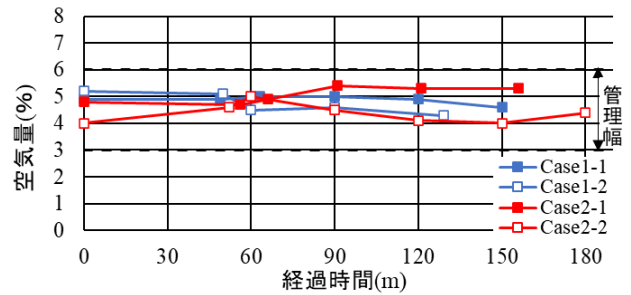


図-2 空気量の経時変化

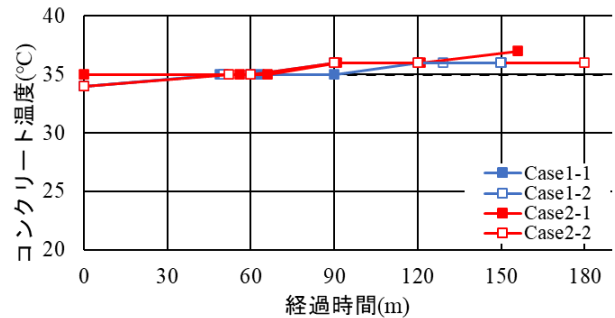


図-3 コンクリート温度の経時変化

プを保持した。

(2) 空気量

30分ごとに空気量を測定した。測定結果を図-2に示す。Case1, 2のコンクリートはともに120分以上管理幅内の空気量を保った。

(3) コンクリート温度

30分ごとにコンクリート温度を測定した。測定結果を図-3に示す。Case1-1 (1台目) は120分以降, Case1-2 (2台目), Case2-1, 2-2は90分以降で35°Cを超える結果となった。本実験ではCase1-1を除いて, コンクリート温度が

35°Cを超える条件で打込み・締め固めを行ったことになる。

(4) プリーディング量

テント内外および容器の蓋の有無を水準として測定した小型容器プリーディング量の測定結果を表-5に示す。

Case1, 2に大きな差は見られなかった。

(5) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を表-5に示す。Case1に対しCase2は同等以上の強度を示した。

3. 凝結特性に関する試験

3.1 プロクター貫入抵抗値

2.で示したコンクリートを対象に表-4に示す内容で凝結特性に関する試験を実施した。直射日光を避けたテント下と、図-4に示す直射日光や風の影響を受ける凝結確認用試験体（約470mmの高さの1層のみを打込み）の上面のそれぞれにウエットスクリーニングしたモルタルを詰めた鋼製容器のほか、容器の材質による温度の影響を調査するために木製容器を設置した。鋼製容器はφ150mm×150mmの円筒であり、木製容器は合板で、150mm角の立方体である。

測定結果を図-5および6に示す。全てのケースにおいて、片対数グラフにおいて直線に近い関係が見られた。テント下に設置した凝結試験容器で測定した場合、Case1に比べCase2の方が同じ経過時間においては小さいプロクター貫入抵抗値を示した。

なお、凝結確認用試験体の上面に設置した試験容器で測定した場合、Case1ではテント下と同様の挙動を示したが、Case2では0.1N/mm²に達する時間が30分程度早まった。これは、直射日光や風があたる時間の長さが影響したものと考えられる。なお、試験容器の材質（鋼製/木製）による顕著な差異は認められなかった。

3.2 簡易貫入試験による凝結特性の把握

不適切な打重ねによるコールドジョイントの発生を防ぐためには、現場でコンクリートの凝結特性を把握し、品質管理を行う必要が生じる。本実験では、凝結特性を現場で簡易に把握するため、N式貫入試験とT式貫入試験を実施した。

試験に用いたコンクリートは2.で述べたものと同一である。測定は、図-4に示す凝結確認用試験体の簡易貫入試験実施箇所に加え、内寸660×385×280mmの衣装ケースにコンクリートを約260mmの高さまで打ち込み、凝結確認用試験体と同様に直射日光や風の影響を受ける試験体（以下、衣装ケース）を対象とした。なお、経時を待つ間、コンクリートの乾燥を防ぐ対策は実施しなかった。

(1) N式貫入試験の実施方法⁵⁾

JISA 1101（コンクリートのスランプ試験方法）に用いられる突き棒を高さ750mmから試験体に落下させて貫入量

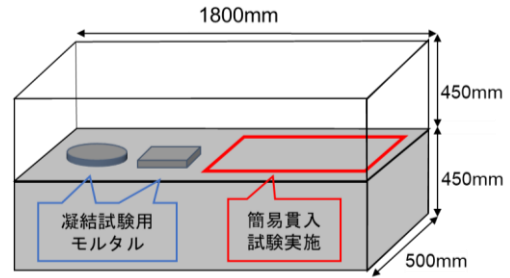


図-4 凝結確認用試験体

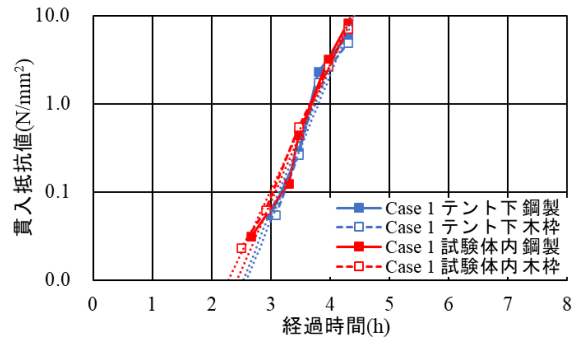


図-5 プロクター貫入抵抗値の経時変化 (Case1)

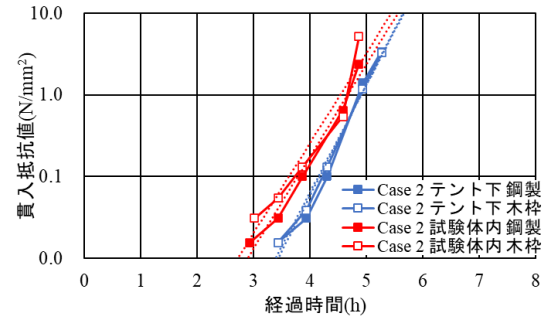


図-6 プロクター貫入抵抗値の経時変化 (Case2)

の経時変化を測定した。突き棒はφ16mm×L550mm、質量860gである。

(2) T式貫入試験の実施方法⁵⁾

N式貫入試験に用いた突き棒と同一の突き棒を人力で試験体へ貫入し、貫入量の経時変化を測定した。試験者は試験体の長辺に対して平行に立ち、各自の判断で垂直に力いっぱい貫入した。

3.3 簡易貫入試験結果

凝結確認用試験体で実施した簡易貫入試験の結果を図-7に示す。簡易貫入試験において、コンクリートが軟らかく凝結が遅れているほど貫入量は大きくなる。T式貫入試験はN式貫入試験と比較して凝結初期の貫入量が大きく、ある経過時間から貫入量が急激に減少する傾向が確認された。貫入試験に用いた凝結確認用試験体の深さは約470mmであり、Case2の凝結初期におけるT式貫入試験は、骨材が噛んでいた可能性があるものの底部に接触していると思われる。どちらの試験も同時刻の貫入量はCase2（遅延配合）の方が大きな値を示しており、両試験は混和剤の違いによる凝結特性の違いを検出することができた

といえる。

凝結確認用試験体と衣装ケースの貫入量の経時変化を図-8および9に示す。Case1, Case2ともにN式貫入試験は試験体の種類にかかわらずほぼ同等の貫入量を示した。T式貫入試験は凝結初期において、凝結確認用試験体の方がはるかに大きな貫入量を示しているが、これは衣装ケースとのコンクリートの高さの違い(470mmと260mm)が支配要因である。凝結が進行すると、Case2のT式貫入試験で差が見られる領域があるものの、試験体の種類にかかわらずほぼ同等の貫入量となった。このことから、実部材よりも小さい衣装ケース程度の容器でも凝結特性を十分に把握することが可能であるといえる。

また、凝結確認用試験体の上面に設置した鋼製の凝結容器で測定したプロクター貫入抵抗値と各貫入試験の貫入量の関係を図-10に示す。どちらの試験もプロクター貫入抵抗値が0.1N/mm²を超えると、貫入量が50mm程度に低下している。コールドジョイントを発生させるプロクター貫入抵抗値は0.07~1.05N/mm²の間に存在する⁹⁾とされ、また、示方書によれば、貫入抵抗値0.1N/mm²を超えると、締固めが困難となりコールドジョイントが生じる危険性が高い⁷⁾とされている。このことから、本研究で使用したコンクリートについては、簡易貫入試験において50mmより大きな適切な値の貫入量を管理値に設定し、管理値に達する前に打ち重ねるという管理を行うことで打重ね部の品質確保が可能と思われる。

簡易貫入試験を品質管理に用いる場合、N式貫入試験は人為的な要素が少ないという長所があり、T式貫入試験は極めて簡易であることに加え、使用する突き棒と同程度の深さがあるような場合にはプロクター貫入抵抗値で0.1N/mm²程度のコンクリートの凝結特性を鋭敏に捉える長所を見出すことができた。

4. 打重ね部の品質評価実験

4.1 試験体の作製方法

外気温が32~36℃の暑中環境下で打重ねを有する試験体を2種類のコンクリートを用いて作製し、混和剤の種類が打重ね部の品質に及ぼす影響を調べた。試験に用いたコンクリートは2.に示したものと同一である。

作製した試験体の寸法を図-11に示す。練混ぜはプラントで行い、打重ねを有することから、各ケースに2台ずつトラックアジテータを用意した。コンクリートの練混ぜ完了から90分を目安に下層を打ち込んだ。コンクリートはトラックアジテータのシュートから直接試験体の中央1ヶ所もしくは2ヶ所に打ち込み、適宜スコップやバイブレータにて打込み高さを長さ方向におよそ均一にした。締固めはφ40mmのマルチインナーバイブレータを用いて行い、図-11に示す通り、A部は試験体の長さ方向を4等分にし

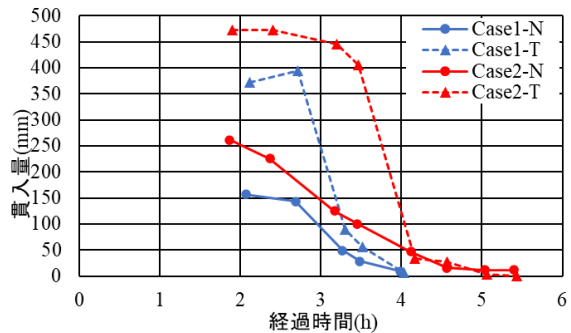


図-7 貫入量の経時変化

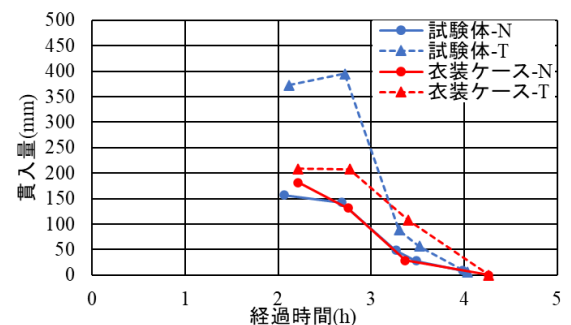


図-8 凝結確認用試験体と衣装ケースの貫入量の経時変化(Case1)

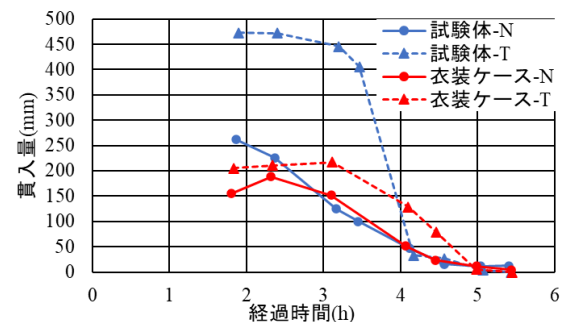


図-9 凝結確認用試験体と衣装ケースの貫入量の経時変化(Case2)

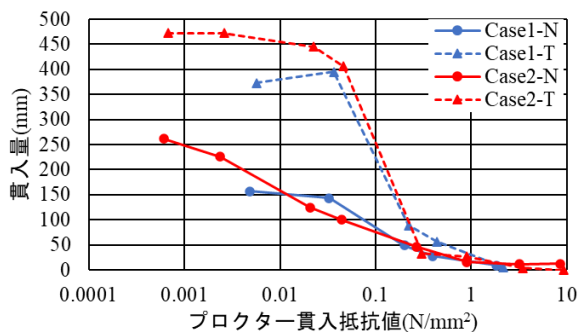


図-10 貫入量とプロクター貫入抵抗値の関係

た中央1ヶ所を締め固め、B部は中央1ヶ所に加えてかぶりを含めた計5ヶ所を締め固めた。なお、締め固め時間は、図中の青丸で15秒、赤丸で10秒とした。型枠外側からバイブレータをかけることはしなかった。下層の締め固めが終

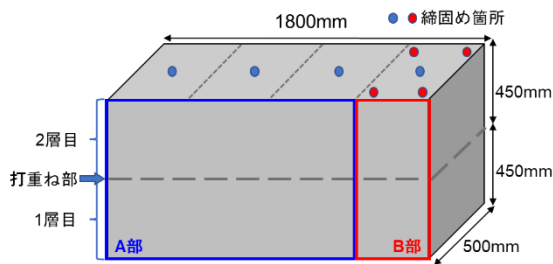


図-11 打重ね試験体

了した時間から 120 分以内に上層の打込みを開始し、上層も下層と同様の締固めを行い、バイブレータの先端が下層に 10cm 程度挿入するように行った。また、2 層目の上面は木ごてで均した後、散水して養生シートを設置し、その上からブルーシートを被せ、材齢 5 日が経過後に脱型した。その後は屋外で暴露した。

実際の施工時間は、Case1 が 1 層目の打込み完了 92 分、2 層目の打重ね時間間隔 116 分、Case2 が 1 層目の打込み完了 89 分、2 層目の打重ね時間間隔 117 分となり、おおむね計画通りであった。ここで、打重ね時間間隔は 1 層目の打込み完了から 2 層目の打込み開始までの時間をいう。

4.2 打重ね試験体の表層品質の評価

(1) 外観目視

材齢 59 日にて、作製した試験体の表面を目視によって観察した。

(2) 含水率

材齢 117, 118 日にて、作製した試験体の上層、打重ね部近傍、下層の各部分で含水率の計測を行った。計測には非破壊の電気インピーダンス式のコンクリート水分計(含水率の計測範囲:0~6.9%)を用いた。計測は各部分において 3 回ずつ実施し、その平均を測定値とした。

(3) 水分計のカウント値

材齢 117, 118 日にて、作製した試験体の上層、打重ね部近傍、下層の各部分でカウント値の計測を行った。計測には道路橋床版用の電気抵抗式の水分計(水分計のカウント値の計測範囲:40~990)を用いた。計測は各部分において 3 回ずつ実施し、その平均を測定値とした。

(4) 表層透気係数

材齢 117, 118 日にて、作製した試験体の A 部 B 部それぞれの上層、打重ね部近傍、下層の各部分で Torrent 法⁸⁾による表層透気試験を行い、表層透気係数 (kT) の計測を行った。計測は各部分において最低 5 点で実施し、その相乗平均を測定値とした。

(5) 表面吸水速度

材齢 117, 118 日にて、作製した試験体の上層、打重ね部近傍、下層の各部分で SWAT⁹⁾による表面吸水試験を行い、10 分時点の表面吸水速度 (p_{600}) の計測を行った。計測は各部分において最低 3 点で実施し、その相加平均を測定値とした。

表-6 含水率の計測結果

含水率 (%)	Case1		Case2	
	A	B	A	B
上層	5.5	4.8	5.4	5.4
打重ね部	5.3	5.0	5.5	5.3
下層	5.2	5.1	5.2	5.3

表-7 水分計のカウント値の計測結果

カウント値 (電気抵抗換算値)	Case1		Case2	
	A	B	A	B
上層	171	162	163	178
打重ね部	176	153	166	171
下層	174	147	171	168

表-8 表層透気係数の計測結果

kT ($\times 10^{-16}m$)	Case1		Case2	
	A	B	A	B
上層	0.169	0.133	0.193	0.151
打重ね部	0.299	0.214	0.392	0.111
下層	0.124	0.095	0.090	0.084

表-9 表面吸水速度の計測結果

p_{600} ($ml/m^2/s$)	Case1		Case2	
	A	B	A	B
上層	0.142	0.365	0.216	0.193
打重ね部	0.245	0.289	0.129	0.209
下層	0.209	0.339	0.176	0.220

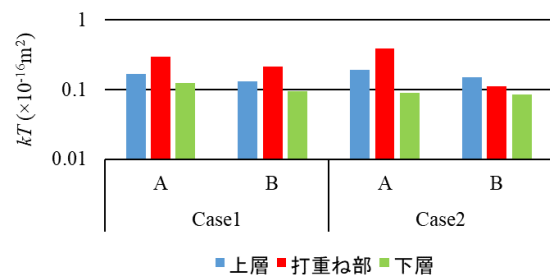


図-12 表層透気係数の計測結果

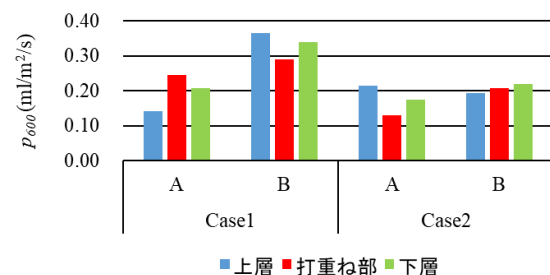


図-13 表面吸水速度の計測結果

4.3 評価結果および考察

(1) 外観目視

2 つの供試体どちらにも打重ね線が目視できたが、打重ね部がひび割れには進展していなかった。

(2) 含水率

含水率の計測結果を表-6に示す。スイス規格 SIA262/1:2013に基づき、全ての計測箇所では表層透気試験を適切に実施できる含水率 5.5%以下であることを確認した。

(3) 水分計のカウント値

カウント値の計測結果を表-7に示す。すべての計測箇所では表面吸水試験を適切に実施できる乾燥状態を示す 210を下回るカウント値¹⁰⁾であることを確認した。

(4) 表層透気係数

材齢 117 日時点の表層透気試験の計測結果を表-8および図-12に示す。上層・打重ね部・下層それぞれで比較した場合、2種類のコンクリートに大きな差は見られなかった。打重ね部で表層透気係数がやや大きな値を示す傾向が認められるが、著しく大きいとは言えない。どちらの配合においても、かぶりを締め固めた B 部において打重ね部の表層透気係数がやや小さくなる傾向が見られた。

(5) 表面吸水速度

表面吸水試験の計測結果を表-9および図-13に示す。配合ごとに比べた場合、Case2はCase1よりも表面吸水速度が小さい傾向にある。酷暑期にスランブ保持型混和剤を用いることで、凝結が適切に遅延してパイブレータの締固めの効果が高まり、表面吸水速度が相対的に小さいコンクリート表面となった。また、Case2では打重ね部は上層下層と比べても遜色ない吸水抵抗性を示した。

3. で示した凝結確認用試験体に、2層目を打ち重ねたタイミングでパイブレータを作用させたところ、Case1ではパイブレータの影響範囲が60mm程度と非常に狭かったことから、場所ごとの品質にばらつきがみられ、B部が大きな表面吸水速度を示したと考えられる。

5. まとめ

打込み時のコンクリート温度が 35°Cを超える暑中コンクリートの施工性の改善を目的として、スランブ保持型混和剤を用いたコンクリートの打重ね施工実験を行い、品質評価を行った。本検討により得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) コンクリート温度が 35°Cを超える条件において、スランブ保持性が高く適切な凝結遅延性を持つ混和剤を用いることで、表面吸水速度の小さい吸水抵抗性の高いコンクリートが施工でき、打重ね部の吸水抵抗性も良好であった。
- 2) N式貫入試験とT式貫入試験を実施した結果、両試験はプロクター貫入抵抗値が 0.1N/mm²に至る前に打ち重ねるための品質管理に活用できる可能性があることが分かった。

今後、打重ね部の非破壊試験を継続し、破壊試験による品質評価を実施する予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、鹿島建設(株)、ポゾリスソリューションズ(株)、国際企業(株)の皆様にご協力いただきました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本の年平均気温：https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/tcmp/an_jpn.html (閲覧日：2022年12月20日)
- 2) 土木学会コンクリート委員会、コンクリート標準示方書改訂小委員会：2017年制定コンクリート標準示方書 [施工編]、土木学会、pp.169-173、2018
- 3) 小泉信一、作榮二郎：流動性を長時間保持する AE 減水剤・超保持型高機能タイプ、コンクリート工学、Vol.57, No.1, pp.12-15, 2019.1
- 4) 中元奏希、細田暁、藤岡彩永佳、小泉信一：スランブ保持性を高めたコンクリートの暑中環境下における打重ね部の品質評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.44, No.1, pp.316-321, 2022
- 5) 土木学会コンクリート委員会、コンクリートのコールドジョイント問題小委員会：コンクリートライブラリー103号 コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策、土木学会、pp.53-64, 2000
- 6) 土木学会コンクリート委員会、コンクリートのコールドジョイント問題小委員会：コンクリートライブラリー103号 コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策、土木学会、pp.8, 2000
- 7) 土木学会コンクリート委員会、コンクリート標準示方書改訂小委員会：2017年制定コンクリート標準示方書 [施工編]、土木学会、pp.120, 2018
- 8) R.J.Torrent : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete on site, *Material and Structures*, Vol.25, pp.358-365, 1992
- 9) 林和彦、細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究、土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013
- 10) Raphael N.UWAZURUONYE and Akira HOSODA: Investigation on Correlation Between Surface Water Absorption Test and JSCE Sorptivity Test, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1726-1731, 2020.7