

論文 熱可塑性樹脂シートによる長期間の水分逸散抑制養生の効果

温品 達也^{*1}・渡邊 賢三^{*2}・坂田 昇^{*3}・石田 哲也^{*4}

要旨：打込み前の型枠に予め熱可塑性樹脂シートを貼付し、脱型後もシートをコンクリートに残して長期間の水分逸散抑制養生を行う手法を考案し、本養生を施したコンクリートの基本物性を取得した。この養生により、コンクリートの美観が向上するとともに、長期間にわたり養生した場合には中性化抵抗性や塩分浸透抵抗性が向上することを実験的に確認した。さらに、乾燥によるコンクリートの水分逸散量も抑制できることが分かった。

キーワード：養生, 水分逸散抑制養生, 表層品質, 耐久性, 中性化, 塩害, 表面気泡

1. はじめに

持続可能な社会資本構築のために、コンクリート構造物の耐久性を向上させることが喫緊の課題となっている。構造物の耐久性は、かぶりコンクリートの品質、すなわち表層品質の良し悪しに大きく支配される。構造物の耐久性を損なう内部鋼材の腐食は、水、二酸化炭素、塩化物イオンによって引き起こされるが、それらの劣化因子はかぶり部を通過して構造物内部に浸透する(図-1)。したがって、かぶり部の品質を高めることにより、コンクリート構造物の耐久性は大きく向上する。

コンクリート構造物の表層品質を確保する手法の一つとして「養生」がある。土木学会コンクリート標準示方書【施工編】では、セメントの水和反応速度を考慮し、環境温度およびセメントの種類ごとに、湿潤養生期間を3日～12日の範囲で示している。これらは品質確保のための標準的な養生期間であるが、過酷環境に曝される場合、あるいは長寿命化が求められる重要構造物の場合には、材料・配合面での改善のみならず、養生期間を延長するなどの工夫を行って、コンクリートの表層品質を確保する取組みが必要となる。

2. 熱可塑性樹脂シートによる水分逸散抑制養生

コンクリートを養生する主な手段として、給水養生と水分逸散抑制養生がある。壁等の鉛直面、スラブやはり等の下面においては給水養生を行うことが困難な場合が多い。したがって、型枠を取り外した後に気泡緩衝材等の養生用シートを貼付することが一般的であるが、脱型してから養生用シートを貼付するまでに、ある程度の時間を要するため、その間にコンクリートが乾燥する。さらに、材齢初期のコンクリートは、水和反応に使われて

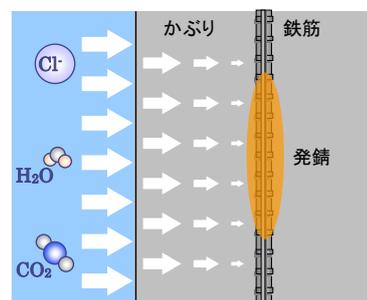


図-1 劣化因子の浸透概念図

いない水分が多く残っていること、また水和発熱により構造物の表面温度も高くなること等から、乾燥による水分逸散の程度が大きくなる。

これらの既往の養生技術の課題に着目し、筆者らは予め型枠内面に高撥水性の熱可塑性樹脂シート(写真-1, 以下、シートと称す)を貼付し、図-2 に示すようにコンクリートを打ち込み、脱型した後もシートをコンクリートに残置させて、できる限り長期間の養生を行う新しい技術(以下、シート養生と称す)を考案した。せき板を取り外した後においても、コンクリートの表面を1度も外気に曝すことなく、シートを用いて水分逸散抑制を実現するものである。

しかしながら、数か月から1年に及ぶような長期間にわたり水分逸散抑制養生を行ったコンクリートの物性はデータが比較的少ない。特に、耐久性に与える影響について、養生の効果は実証されたとは言い難い¹⁾。そこで、本論文では、シート養生による長期間の水分逸散抑制養生が中性化抵抗性や塩分浸透抵抗性、乾燥収縮ひずみに与える影響について実験的検討を行った。

*1 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 研究員 修士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 鹿島建設株式会社 土木管理本部 土木技術部長 博士(工学)・博士(農学) (正会員)

*4 東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

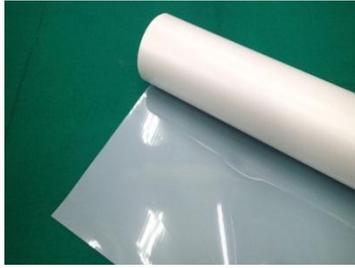


写真-1 熱可塑性樹脂シート

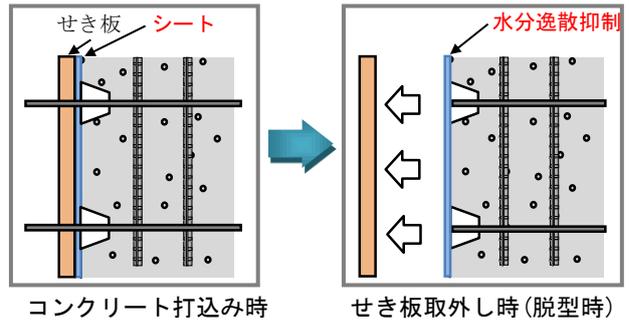


図-2 シート養生工法の実施概要

3. シート養生が外観に与える影響

3.1 実験概要

シート養生がコンクリートの外観に与える影響を確認するために、表-1 および表-2 に示す材料と配合のコンクリートを使用し、要素供試体と大型試験体を作製して検討した。フレッシュ性状の目標値は、スランブを $10.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、空気量を $4.5 \pm 1.0\%$ とし、実測値はスランブが 10.5cm 、空気量が 4.7% となった。要素供試体は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の合板型枠に打ち込んで作製し、シート養生のケースは、打込み前に枠内面の5面全てにシートを貼付した。その後、材齢7日に脱型して翌日に外観を写真撮影した²⁾。大型試験体は、BWHが $2.5 \times 5.2 \times 2.0\text{m}$ の合板型枠を使用し、 5.2m 長の1面にシートを貼付した。コンクリートの打込みは、 $\phi 40\text{mm}$ の内部振動機を用いて 50cm 間隔で1箇所につき10秒間締め固めを行いながら実施した。その後、屋外暴露しながら材齢7日にて型枠を取り外し、 5.2m 長の面におけるシート養生の有無それぞれの箇所で $15 \times 30\text{cm}$ の範囲を写真撮影し、撮影箇所の 1mm 以上の気泡を対象とし、画像処理によって表面気泡面積率を測定した。

3.2 実験結果

写真-2 にシート養生の有無におけるコンクリートの外観を示す。シート養生したケースは、 $W/C=55\%$ の一般的なコンクリートであるにもかかわらず、高強度コンクリートのような光沢のある外観となった。既往の研究³⁾によれば、水セメント比の低いコンクリートほど光沢度は大きくなる傾向にあると報告されている。このことから、シートによってコンクリート中のブリーディング水がせき板表面に移動することを抑制し、あたかも水セメント比が小さいコンクリートと同様の現象が生じたものと推察される⁴⁾。

また、大型試験体において表面気泡を測定した結果を写真-3 に示す。撮影箇所の表面気泡面積率は、合板部の 0.45% に対して、シート養生部では 0.06% となり、シート養生することによって表面気泡が顕

表-1 コンクリートの材料

材料	記号	種類	摘要
セメント	C	普通 ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm^3 比表面積: $3320\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	山砂 (千葉県君津産)	表乾密度: 2.61g/cm^3 吸水率: 2.11%
		砕砂 (東京都青梅産)	表乾密度: 2.65g/cm^3 吸水率: 0.96%
		山砂:砕砂=25:75 (粗粒率:2.69)	
粗骨材	G	碎石 (東京都青梅産)	粗骨材最大寸法: 20mm 表乾密度: 2.64g/cm^3 吸水率: 0.58% 粗粒率: 6.71
混和剤	AD	AE 減水剤 (高機能タイプ)	リグニンスルホン酸塩 ポリカルボン酸系化合物

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)				
		W	C	S	G	AD
55.0	46.0	164	298	843	993	2.98



写真-2 シート養生による美観の向上(要素供試体)

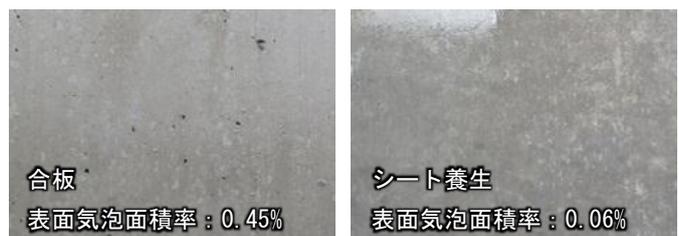


写真-3 シート養生による表面気泡抑制(大型試験体)

No.	材齢(日)	1	2~6	7	7~14	14~28	29~35	36~91	92~98	99~182	183~189	190~365	365~372	養生完了後 各材齢にて 28日間 促進中性化 試験 20℃ 60%RH 5%CO ₂	
1	合板(7日存置)	型枠存置 (20℃ 60%RH)	脱型	*1	----->										
2	合板(7日存置→21日気中)			20℃ 60%RH曝露	*1	----->									
3	合板(7日存置→84日気中)			20℃ 60%RH曝露		*1	----->								
4	合板(7日存置→175日気中)			20℃ 60%RH曝露		*1	----->								
5	シート(7日残置)			*1	----->										
6	シート(28日残置)			*2	*1	----->									
7	シート(91日残置)					*1	----->								
8	シート(182日残置)					*2	*1	----->							
9	シート(365日残置)					*2	----->								
10	合板(7日水中)	脱型	水中(20℃)	*1	----->										
11	合板(28日水中)		水中(20℃)	*1	----->										
12	合板(91日水中)		水中(20℃)	*1	----->										

*1:前養生(20℃ 60%RH), *2:シート残置(20℃ 60%RH)

図-3 養生条件

著に減少していることが分かる。この原因については今後の検討課題としたい。

4. シート養生が中性化抵抗性に与える影響

4.1 実験条件

本実験には表-1 および表-3 に示す材料と配合のコンクリートを用いた。水セメント比は45・50・55・60・70%の5水準とし、全ての配合において単位水量を164kg/m³に固定した。練混ぜは容量100ℓの強制二軸練りミキサーを用い、フレッシュ性状の目標値を、スランブ10.0±1.5cm、空気量を4.5±1.0%とし、AE減水剤およびAE剤の添加量で調整した。練混ぜ後直ちに、100×100×200mmの合板型枠に打ち込み、図-3に示す条件にて養生を行った。なお、打込んだコンクリートの水セメント比は、図中のNo.1~4にW/C=45・50・55%, No.5~9にW/C=55・60・70, No.10~12にW/C=55%を採用した。図のNo.1~4およびNo.10~12のシート養生しないケースについては、合板に油性剥離剤を塗布して打ち込んだ。No.5~9のシート養生するケースについては、合板型枠内面の5面全てにシートを貼付し、打込み面は仕上げ後にシートを貼付して、供試体の6面全てがシートに接するようにした。No.1~4のケースは、20℃、60%RHの室内にて静置し、型枠を7日間存置した後、脱型後に所定の材齢まで気中養生および前養生を行って促進中性化試験を開始した。No.5~9はシート養生を行ったケースであり、材齢7日で脱型し、角部をテープでシールして所定の材齢までコンクリートにシートを残置した。シートを残置する期間は、7・28・91・182・365日とし、20℃、60%RHの室内に静置した。シート除去後7日間は20℃、60%RHの同室内に静置して前養生した後、促進中性化試験を開始した。No.10~12のケースは材齢1日で脱型し、材齢7・28・91日までそれぞれ水中養生した。水中養生完了後、シート養生したケースと同様に7日間の前養生を実施し、

表-3 コンクリートの配合

配合	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					実測値	
			W	C	S	G	AD	スランブ (cm)	空気量 (%)
1	45.0	42.0	164	364	746	1035	3.64	9.5	4.8
2	50.0	45.0	164	328	813	998	3.28	9.5	4.5
3	55.0	46.0	164	298	843	993	2.98	8.5	4.8
4	60.0	47.0	164	273	871	986	2.73	8.5	4.5
5	70.0	48.0	164	234	905	984	2.34	8.5	4.1

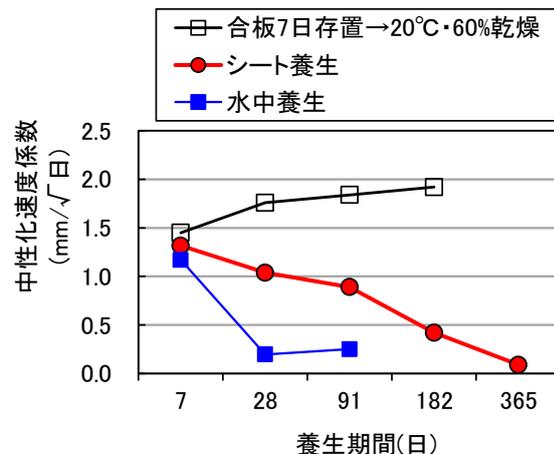


図-4 養生方法と中性化速度係数 (W/C=55%)

促進中性化試験を開始した。促進中性化の条件は、20℃、60%RH、5%CO₂濃度とし、養生完了後から乾燥曝露や前養生中に進化した中性化深さを含めた7・14・28日間の中性化深さを測定して中性化速度係数を算出した。

4.2 実験結果

(1) 養生期間と中性化速度係数

W/C=55%における、各養生期間と中性化速度係数の関係を図-4に示す。各ケースのプロットは横軸の養生期間までそれぞれの条件下で養生した後、促進中性化試験を実施して得られた中性化速度係数を示している。合板を7日存置し、その後は20℃・60%RHの室内にて気中養生した場合、材齢とともに中性化速度が増大していることが分かる。これについて郭らは、材齢7日まで封緘養生した

コンクリートを20℃、60%RHの室内にて乾燥させたところ、経時的に細孔構造が粗大化することを明らかにし、この原因が乾燥によってマイクロクラックが増大するためであることを拘束収縮試験の結果から示している⁵⁾。本試験結果も、湿潤養生後の乾燥によってコンクリート表層部の組織が脆弱化したことや、含水量が減少したことによって中性化抵抗性が漸減したものと考えられる。以上より、コンクリートの中性化速度は湿潤養生期間の影響を大きく受け、湿潤養生期間が短い場合は乾燥の影響を受けて増大することから、実施工においても養生方法とその終了時期が重要であると考えられる。また、水中養生した場合、7日間の養生では他の養生方法と大きな差異はなかったものの、水中養生期間が28、91日となると中性化速度係数が著しく小さくなった。これは、セメントの水和反応が良好に進行したためであり、既往の研究⁵⁾では水中養生期間の経過に伴い、コンクリートの空隙量が減少するためであると報告されている。シート養生を実施した場合の中性化速度に着目すると、養生期間が7日から91日の間では合板7日存置と水中養生の間に位置する傾向となり、シートの残置期間が長いほど、中性化速度が低減した。シート養生を182・365日間行ったケースは、28・91日水中養生したケースと同等の中性化抵抗性を示した。以上より、コンクリートの中性化速度には、打込み後の湿潤養生期間が大きく影響し、水分逸散抑制養生を長期間実施するほど、中性化抵抗性が高まる可能性が示唆された。また、水中養生を7日以上実施することは、実施工において現実的ではない場合が多いが、シート養生を半年程度実施することは現実的であり、これによって28日間の水中養生と同等の養生効果が得られると考えられる。

(2) W/C と中性化速度係数

各養生条件における W/C と中性化速度係数の関係を図-5 に示す。いずれの養生方法、材齢においても、W/C の増大に従い、中性化速度も増加する傾向となった。ここで、W/C=55~70%において、シート養生期間が長いほど中性化速度は低下する傾向にあった。例えば、シートを182日以上残置した W/C=55%のケースは、合板7日存置した W/C=45%のケースよりも小さい中性化速度になることが分かった。

5. シート養生が塩分浸透抵抗性に与える影響

5.1 実験条件

本実験には表-1 および表-3 に示す材料と配合 (W/C=55%)のコンクリートを 100×100×100mm の合板型枠内に打ち込み、中性化試験と同様に図-3 に示す、合板7日存置、水中養生、シート養生(No.9 除く)の条件にて養生を行った。養生完了後7日間は20℃、60%RHの

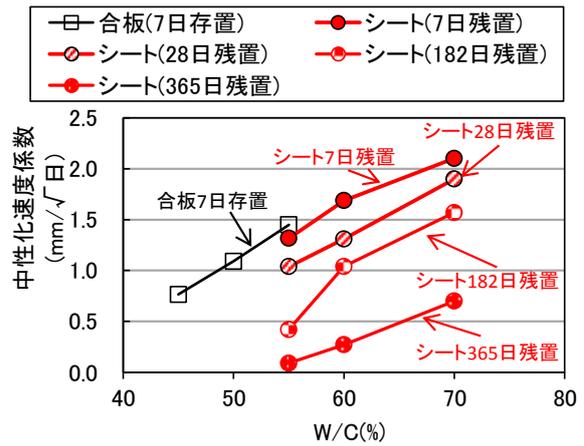


図-5 W/C と中性化速度係数

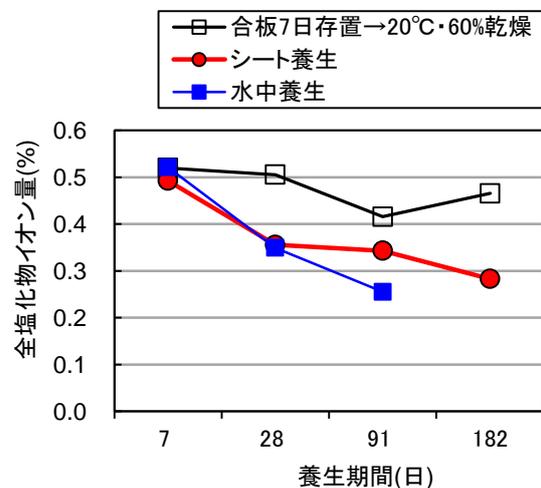


図-6 各種養生における全塩化物イオン量 (表面から8mm深度まで)

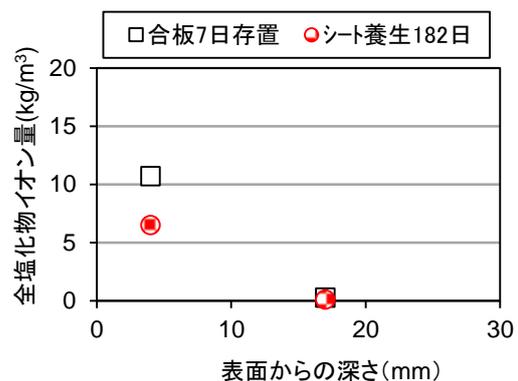


図-7 深さ方向における全塩化物イオン量

室内で乾燥させながら、供試体の側面2面以外をエポキシ樹脂によりシールした。その後、1日1回、塩化物イオン濃度2%の人工海水を1面につき5ml噴霧してこれを1サイクルとし、130サイクルまで乾湿繰り返し海水噴霧を実施した。噴霧完了後、JSCE-G572に準拠して、

0～8mm および 13～21mm 深度の全塩化物イオン量を定量した。

5.2 実験結果

表面から 8mm までの深度における全塩化物イオンに着目して、各養生期間が塩分浸透抵抗性に与える影響を図-6 に示す。各ケースのプロットは横軸に示す養生期間までそれぞれの養生条件下に静置し、前養生して乾燥させた後に、海水噴霧試験を実施して得られた全塩化物イオン量を示している。これより、合板 7 日存置に対し、水中養生のケースは養生期間が長いほど全塩化物イオン量が低減される傾向にあった。また、合板 7 日存置に対し、シート養生のケースはシート養生期間が長いほど全塩化物イオン量は低減され、養生期間 182 日における合板 7 日存置のケースに対して、シート 182 日は 60% の塩化物イオン量となった。

合板 7 日存置(No.4)およびシート養生 182 日のケースにおける深さ方向の全塩化物イオン量を図-7 に示す。これより、シート養生の有無における全塩化物イオン量は、13～21mm 深度においては同定であるものの、0～8mm 深度における全塩化物イオン量は、シート 182 日養生のケースが合板 7 日存置のケースよりも小さくなった。したがって、シート養生を長期間行うことによって塩化物イオンの拡散係数も低減されるものと考えられる。

以上より、シート養生による水分逸散抑制養生によって遮塩性が向上していることが分かる。これは、シート養生を行うことにより、その養生期間に応じて表層部の水和反応が進行し、表層部の組織が緻密化したためと考えられる。

6. シート養生が水分逸散抑制に与える効果

6.1 実験概要

本実験には表-1 および表-3 に示す材料と配合(W/C=55%)のコンクリートを 100×100×400mm の合板型枠内に打ち込み、中性化試験および塩分試験と同様に図-3 に示す、合板 7 日存置(No.2・3・4 除く)、水中養生(No.11・12 除く)、シート養生の条件にて養生を行った。測定は、20℃、60%RH の室内にてコンクリートの長さ変化および重量変化率試験を、JIS A 1129-1 に準拠して行った。また、100×100×400mm の合板型枠の中心に埋込み型ひずみ計を設置し、同コンクリートを打ち込み、材齢 1 日で脱型して全面を密封することによって(JCI-SAS-2-1996 準拠)、自己収縮ひずみも測定した。

6.2 実験結果

図-8 に各養生条件における収縮ひずみと自己収縮ひずみ(図中破線)の経時変化を示す。合板 7 日存置に対し、7 日間水中養生を実施した場合でも、収縮ひずみの経時変化は同等の結果となった。次に、シート養生したケー

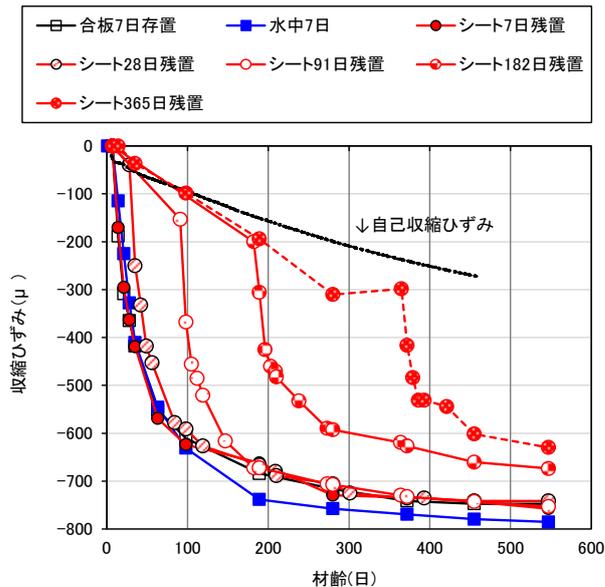


図-8 収縮ひずみの経時変化

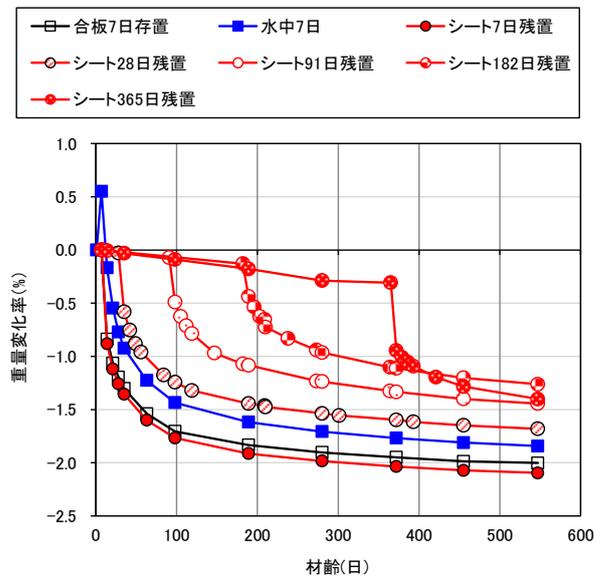


図-9 供試体重量の経時変化

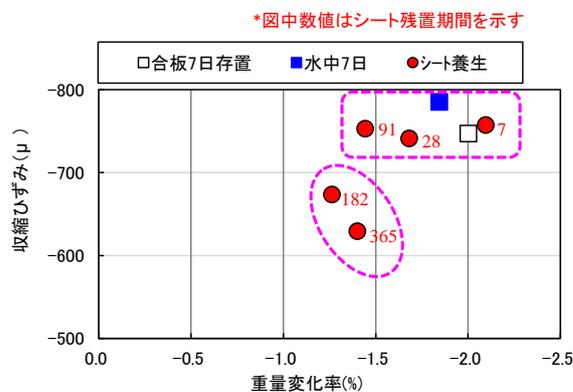


図-10 重量変化率と収縮ひずみの関係(材齢 550 日)

スは、コンクリートの自己収縮ひずみに対しシート残置中の乾燥に伴う収縮ひずみは僅かであり、ほぼ湿潤状態であるものと推察される。また、シートの除去後に着目すると、シートの残置期間が7・28・91日のケースの材齢550日時点の収縮ひずみは、乾燥開始材齢によらず合板7日存置のケースとほぼ同等となった。一方、シートを182・365日間とさらに長期に残置したケースは、材齢550日時点の収縮ひずみが合板7日存置や水中7日養生、シート7・28・91日養生のケースよりも小さくなった。以上より、一般にコンクリート標準示方書では乾燥開始材齢に関わらず、収縮ひずみの最終値は等しくなると示されているが、養生期間が半年や1年などと非常に長い場合には異なる傾向を示す可能性があると考えられる。

図-9に各養生条件における重量変化率を示す。図に示すように概ね、シートの残置期間が長いほど重量の減少程度が小さくなる傾向にある。この理由としては、養生期間が長いほど水和反応が進行し、逸散する水分が減少したことが考えられる。ここでシート7・28・91日養生のケースについて、図-8の収縮ひずみの経時変化と図-9の重量変化率を比較した場合、材齢550日の収縮ひずみが同等にも関わらず、同材齢の重量変化率が異なることが分かる。この理由としては、シート7日養生の場合、養生期間が短いと逸散する水分量が多い反面、硬化体組織がさほど緻密化していないため、水分逸散に対する収縮量が大きくないことが考えられる。一方、シート91日養生の場合、十分に養生され逸散する水分量が少なくなるが、硬化体組織が緻密化されており、少ない水分逸散量でも毛細管張力が大きくなる⁹⁾ために収縮ひずみが増大することが考えられる。このように、水分逸散による影響と組織の緻密化による影響が相殺され、シート養生期間が7～91日では、図-8に示したように収縮ひずみがほぼ同じになったものと推察される。これに対して、シート182・365日養生のように非常に長く養生した場合には、さらに逸散する水分量が減少し、前述のバランスが崩れ、材齢550日の収縮ひずみが小さくなったものと考えられる。この関係を示したものを図-10に示す。

7. まとめ

本検討をまとめると以下ようになる。

- (1) 高撥水性の熱可塑性樹脂シートを予め型枠に貼付し、コンクリートを打ち込んで脱型すると、その外観は

高強度コンクリートのような光沢のある見栄えのよい外観となる。

- (2) 28日以上シート養生した場合は、中性化抵抗性が向上し、養生期間が182日以上の場合には28日水中養生したコンクリートと同等の中性化速度係数を示した。
- (3) 28日以上シート養生した場合は、塩分浸透抵抗性が向上し、シート養生を182日以上実施することにより、表面から8mmまでの塩化物イオン浸透量は合板7日存置の浸透量に対し60%程度に低減された。
- (4) 28日以上シート養生した場合は、7日間水中養生した場合よりも水分逸散量が少なく、シート養生期間が長いほどその効果は顕著となる傾向にあった。さらに、182日以上シート養生した場合は、材齢500日程度における乾燥収縮ひずみが低減される傾向にあった。

謝辞：本研究の実施にあたり、積水成型工業(株)矢野英伸氏をはじめとする、多くの皆様に多大な御協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会 335 委員会：構造物表のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会 第二期成果報告書，2012.
- 2) 石田哲也，坂田昇，渡邊賢三，温品達也，矢野英伸：熱可塑性樹脂シートによるコンクリートの表面改質，土木学会第 69 回年次学術講演集，pp.117-118，2014.
- 3) 大塚秀三ほか：高強度コンクリートの表面仕上り状態に関する実験的検討：日本建築学会大会学術講演概要集 A-1，pp.359-360，2005.
- 4) 木村彩永佳，温品達也，渡邊賢三，石田哲也，鈴木秀明：熱可塑性樹脂シートによるブリーディング抑制効果，土木学会第 69 回年次学術講演集，pp. 123-124，2014.
- 5) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：乾燥によるコンクリート組織の不均質化，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.711-716，2002.
- 6) 郭度連ほか：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす水セメント比および養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.743-748，2003.