論文　貼付型保水・保温養生シートを用いた長期間養生によるコンクリートの耐久性向上に関する研究

齊藤　亮介[*1]・田中　博一[*2]・皆川　浩[*3]・久田　真[*4]

要旨：貼付型保水・保温養生シートを用いた長期間養生がコンクリートの耐久性に与える影響を定量的に把握するため，養生方法および養生期間を試験要因として検討した。その結果，貼付型保水・保温養生シートを用いて長期間養生を行うことによって，セメントの水和反応が進行して緻密性が向上し，表面透気性や表面吸水性が低下すること，中性化，塩化物イオン浸透およびスケーリングに対する抵抗性が向上することを明らかにした。

キーワード：貼付型保水・保温養生シート，長期間養生，細孔径，中性化，塩化物イオン，スケーリング

1. はじめに

コンクリートの表層品質は養生の影響を受けやすいこと[1)]が明らかとなり，コンクリートの耐久性を向上させる技術として，近年，養生に関する様々な研究開発が行われている。新たな養生方法の例として，給水養生[2), 3)]や水分の逸散を抑制する養生[4)]などの工法が開発されている。ここで，給水養生は，セメントの水和反応に欠かせない水分を外部から十分供給できる理想的な養生であるが，多大な設備や労力が必要となるため比較的高価であり，長期間養生が困難であるなどの課題が挙げられる。一方，セメントが完全に水和するのに必要な水量はセメント量の約40%である[5)]。そのため，水セメント比50%～60%程度の場合，水和反応に必要な水量よりも多くの余剰水を含んでおり，外部から給水しなくても水分の逸散を抑制することで，セメントの水和反応が十分進行することが期待できる。そこで，筆者らは，ポリエチレン製の気泡緩衝材にアクリル系の接着剤を用いてシール加工した貼付型保水・保温養生シートを新たに開発し，その効果を検証してきた[6)]。貼付型保水・保温養生シートを用いた養生は，脱型後にコンクリート表面に貼り付けるのみであり，比較的安価で施工が容易且つ長期間の養生が可能であるなどの利点がある。貼付型保水・保温養生シートにより，脱型後の水分逸散を抑制できるだけでなく，気泡緩衝材により型枠と同等以上の保温効果[7)]も期待できる。しかし，貼付型保水・保温養生シートを用いて長期間養生した場合のコンクリートの耐久性向上に関する検討は十分でないのが現状である。

本研究では，養生方法，養生期間を試験要因として，貼付型保水・保温養生シートによる養生がコンクリートの耐久性向上に与える影響を検討した。

2.　試験概要

2.1 試験ケース

試験ケースを**表-1**に示す。試験要因は，養生方法および養生期間とした。養生方法は，型枠存置，湿布養生および貼付型保水・保温養生シートによる封かん養生の3種類とした。養生期間については，高炉セメントB種を用いたことから，土木学会コンクリート標準示方書に準拠し，型枠存置で7日間養生するケースを基準とした。湿布養生は，材齢2日で脱型後，十分に吸水させた市販の保水マットをコンクリート表面に押し当て，材齢7日まで養生した。貼付型保水・保温養生シート（以下，養生シート）による封かん養生は，材齢2日で脱型後，養生シートを貼り付け，材齢28日および56日まで長期間養生した。養生シートは，**写真-1**に示すポリエチレン製の気泡緩衝材にアクリル系の接着剤を用いてシール加工したものであり，脱型後のコンクリート表面に直接貼り付けて使用する。密着して貼り付けることでコンクリート内部の水分逸散を抑制することが期待できる。また，養生シートを用いる場合，脱型から貼り付けまでの乾燥期間の影響を検討するため，脱型後，温度20℃，相対湿度60%の室内で1日間および2日間乾燥後に貼り付ける

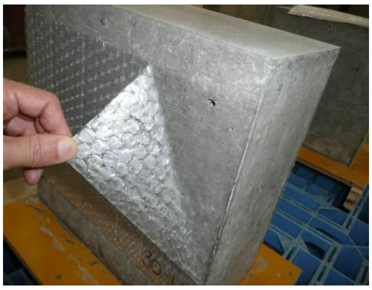

写真-1　貼付型保水・保温養生シート

*1 清水建設（株）技術研究所　建設基盤技術センター　研究員　(正会員)
*2 清水建設（株）技術研究所　社会システム技術センター　グループ長　博(工)　(正会員)
*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻　准教授　博(工)　(正会員)
*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻　教授　博(工)　(正会員)

ケースを設定した。なお，型枠には，日本農林規格適合の表面加工されたコンクリート型枠用合板を用い，剥離剤は用いていない。

2.2 使用材料および配合

示方配合を**表-2** に示す。セメントに高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm^3），細骨材に山砂（表乾密度 2.62g/cm^3，吸水率 1.73%），粗骨材に砕石（表乾密度 2.65g/cm^3，吸水率 0.56%，最大寸法 20mm），混和剤に AE 減水剤を用いた。目標スランプは 8cm とした。

2.3 試験体の作製および養生方法

試験体は，**図-1** に示す幅 400×高さ 500×奥行き 200mm とし，試験体製作および養生は，温度 20℃，相対湿度 60%一定の室内で実施した。コンクリートはパン型ミキサ（容量 50L）で製造した。試験ケース No.1 および No.2 を除き，試験体は材齢 2 日で脱型し，温度 20℃，相対湿度 60%一定の室内で所定の養生方法および養生期間で養生し，その後も同室内に静置して各種試験を実施した。なお，試験面以外はアルミ粘着テープを用いてシールした。

2.4 試験項目

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度の試験体はφ100×高さ 200mm とし，温度 20℃，相対湿度 60%一定の室内で所定の養生方法および養生期間で養生した。養生面は試験体側面とし，打設上面および底面はアルミ粘着テープを用いてシールした。養生終了後は，室内に静置し，材齢 91 日において JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を実施した。試験体数は 1 ケースにつき 3 本とし平均値を試験結果とした。

(2) 表面透気試験

ダブルチャンバーを用いた Torrent 法[8]による表面透気試験を所定の養生方法および養生期間で養生した後，乾燥期間 7 日，28 日および 56 日において実施した。1 ケースあたり 3 か所測定した平均値を試験結果とした。

(3) 表面吸水試験

細田らが開発した手法[9] で 10 分間の表面吸水量を材齢約 4 か月において測定した。1 ケースあたり 2 か所測定した平均値を試験結果とした。

(4) 細孔径分布

材齢約 7 か月において，**図-1** に示す位置でφ100mm の試験体を乾式のコアボーリングにより採取し，表面から 0～10mm，10～20mm，20～30mm の位置で，水銀圧入式ポロシメーターを用いて細孔径分布を測定した。試験は，**表-1** に示す試験ケース No.1，2，3，4 および 7 で実施した。

(5) 含水率

材齢約 7 か月において，**図-1** に示す位置でφ100mm の試験体を乾式のコアボーリングにより採取し，表面か

表-1 試験ケース

No.	養生方法	養生期間	備考
1	型枠存置	1 日	材齢 1 日で脱型
2		7 日*	材齢 7 日で脱型
3	湿布養生	7 日*	材齢 2 日で脱型後、湿布養生
4	貼付型保水・保温養生シートを用いた封かん養生	28 日	材齢 2 日で脱型後、養生シート貼り付け
5			材齢 2 日で脱型後、1 日間乾燥後に養生シート貼り付け
6			材齢 2 日で脱型後、2 日間乾燥後に養生シート貼り付け
7		56 日	材齢 2 日で脱型後、養生シート貼り付け

*：土木学会コンクリート標準示方書の湿潤養生の標準期間

表-2 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m^3)			
			W	C	S	G
52.8	47.0	4.5	146	275	886	1010

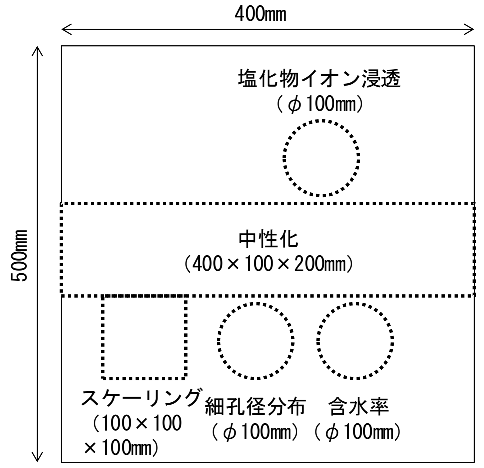

図-1 試験体の概要

ら 0～10mm，10～20mm，20～30mm，30～40mm，40～50mm の位置でスライスした試料の質量を測定した。その後，105℃下で質量がほぼ一定となるまで乾燥させた試料の質量を絶乾質量とし，絶乾質量に対する含水量を JIS A 1476 に準拠して質量基準質量含水率（以下、含水率とする）として算出した。試験は，**表-1** に示す試験ケース No.1，2，3，4 および 7 で実施した。

(6) 中性化に対する抵抗性試験

材齢約 7 か月において，**図-1** に示す位置で 400×100×200mm の試験体をコンクリートカッターにより採取し，温度 20℃，相対湿度 60%一定の室内で 1 週間乾燥させた後，温度 20℃，相対湿度 60%，二酸化炭素濃度 5%の環境下で促進中性化させた。促進中性化期間 56 日後，JIS A 1152 に準じて試験体を割裂し，フェノールフタレ

イン法によりノギスを用いて中性化深さを 0.1mm 単位まで測定した。測定結果は粗骨材の影響を受けていない 5 か所の平均値とした。試験面（養生面）以外はアルミ粘着テープを用いてシールした。

(7) 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

材齢約 7 か月において，**図-1** に示す位置でφ100mm の試験体をコアボーリングにより採取し，水中に 7 日間浸漬させ，試験面（養生面）以外をエポキシ樹脂によりシールした後，10%NaCl 水溶液に 91 日間浸漬させた。浸漬後，試験体を割裂し，割裂面に 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧した。試験面から白色化した箇所の深さを塩化物イオン浸透深さとし，ノギスを用いて 0.1mm 単位まで測定した。試験結果は粗骨材の影響を受けていない 5 か所の平均値とした。

(8) スケーリングに対する抵抗性試験

材齢約 7 か月において，**図-1** に示す位置で 100×100×100mm の試験体をコンクリートカッターにより採取し，JSCE-K 572 に準じてスケーリングに対する抵抗性試験を実施した。試験体は 3%の NaCl 水溶液に浸漬し，20℃から－20℃までの凍結融解工程を 1 サイクル 12 時間として 60 サイクルまで繰り返した。凍結融解 6 サイクルごとに剥離したスケーリング片の質量を測定した。試験は，**表-1** に示す試験ケース No.1，2，3，4 および 7 で実施した。

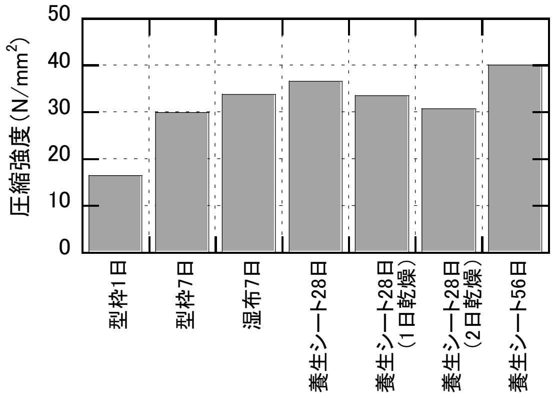

図-2　圧縮強度（試験材齢 91 日）

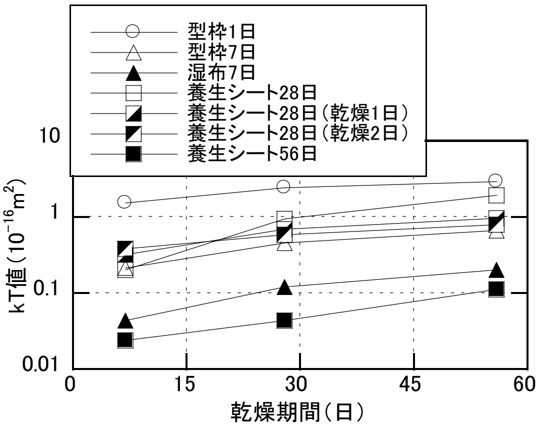

図-3　乾燥期間と表面透気係数との関係

3 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

圧縮強度試験結果を**図-2** に示す。養生期間が圧縮強度に与える影響は大きく，型枠存置 7 日と比較して，型枠存置 1 日の圧縮強度は約 45%低下した。これは，養生期間が短いことや，養生終了後に乾燥したことによりセメントの水和反応が阻害されたためと考えられる。また，湿布養生 7 日の圧縮強度は，型枠存置 7 日と比較して約 13%増加した。これは，養生期間が同じであっても，外部から水分が供給されることでセメントの水和が促進されたためと考えられる。

一方，養生シートによる封かん養生を行った場合の圧縮強度は，型枠存置 7 日と比較して養生期間 28 日で約 20%，養生期間 56 日で約 34%増加し，湿布養生 7 日よりも圧縮強度が増加した。これは，養生シートで長期間養生することで，コンクリート内部の水分の逸散が抑制された結果，セメントの水和が進行したためと考えられる。なお，脱型後 1 日あるいは 2 日間乾燥させた後に養生シートを貼り付けた場合，脱型後すぐに貼り付ける場合と比較して，乾燥の影響により圧縮強度は低下するものの，脱型後 2 日間乾燥させた場合でも，型枠存置 7 日とほぼ同等の圧縮強度となることが確認された。

3.2 表面透気係数

乾燥期間と表面透気係数（kT 値）との関係を**図-3** に示す。乾燥期間が長くなるほど，表面透気係数は大きくなる傾向が認められた。乾燥期間 56 日における表面透気係数は，型枠存置 1 日，型枠存置 7 日，養生シート 28 日で概ね同等であり，これらと比較して湿布養生 7 日と養生シート 56 日では小さくなった。湿布養生 7 日では外部から水分が供給されたため，養生シート 56 日では長期間養生を行うことで，コンクリート表層部のセメントの水和反応が進行し，緻密性が向上したためであると考えられる。なお，試験時に高周波容量式水分計にて表面水分率を測定した結果，いずれの試験体においても水分率は 3.5%程度であり，表層コンクリートの残存水分による表面透気係数への影響は小さいと考えられる。

脱型後 1 日あるいは 2 日間乾燥させた後に養生シートを材齢 28 日まで貼り付けた場合でも，表面透気係数は，型枠直後に貼り付けた場合とほぼ同等となることが確認された。水分逸散の影響を考慮すると，脱型から養生シート貼り付けまでの期間は最小とすることが望ましいが，上述のコンクリートに含まれる余剰水のため，2 日間の乾燥であれば材齢 28 日まで養生シートを貼り

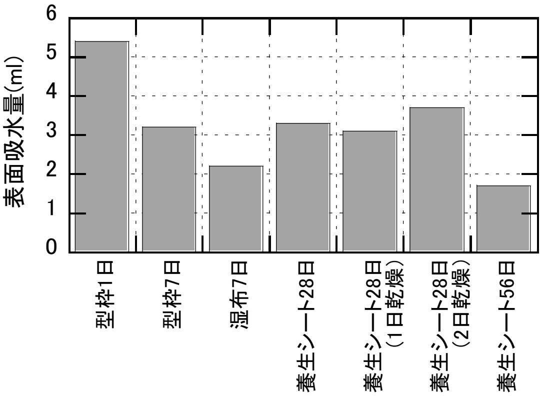

図-4　表面吸水量

付けた場合，透気性が著しく変化することはないと考えられる。

3.3 表面吸水量

表面吸水試験による 10 分間の表面吸水量を図-4 に示す。型枠存置 7 日の表面吸水量と比較して，型枠 1 日では増加し，養生シート 28 日では同等であり，湿布養生 7 日と養生シート 56 日では減少した。型枠存置 7 日の表面吸水量と比較して，湿布養生 7 日で約 30%，養生シート 56 日で約 45%少なくなり，養生シートによる長期間養生の効果が確認された。表面透気係数と同様に，長期間養生によってコンクリート表層部の緻密性が向上したことで吸水量が低下したと考えられる。

表面透気試験の結果と合わせて養生シート 28 日の結果を考察すると，高炉セメント B 種を用いた場合，初期の養生が表層部のセメントの水和反応に与える影響が大きいため，養生期間 28 日では養生シートによる長期間養生の効果が十分に得られない可能性が考えられる。

3.4 細孔径分布

細孔径分布の測定結果を図-5 に示す。型枠存置 1 日では，0.7μm 付近にピークが認められ，他のケースと比較して 0.1～1μm 付近の細孔量が多くなっている。これは、養生期間が短く、その後の乾燥により水和反応が十分に進行していないためと考えられる。型枠存置 7 日では，2μm 付近にピークがあり，ピーク付近では，表面から 0～10mm の細孔量が 10～20mm および 20～30mm の細孔量と比較して多くなっている。これに対し，養生シート 56 日では，湿布養生 7 日と同様な細孔径分布を示し，型枠存置 7 日と比較して，いずれの位置に置いても細孔径分布が同等であり，特に，2μm 付近の細孔量が著しく減少している。水酸化カルシウムと高炉スラグが反応し，C-S-H などの比表面積が大きい水和生成物が生成されているものと推察される。一方，養生シート 28 日の細孔径分布は，型枠存置 7 日とほぼ同等であり，長期間養生の効果が明確には認められなかった。したがって，湿布

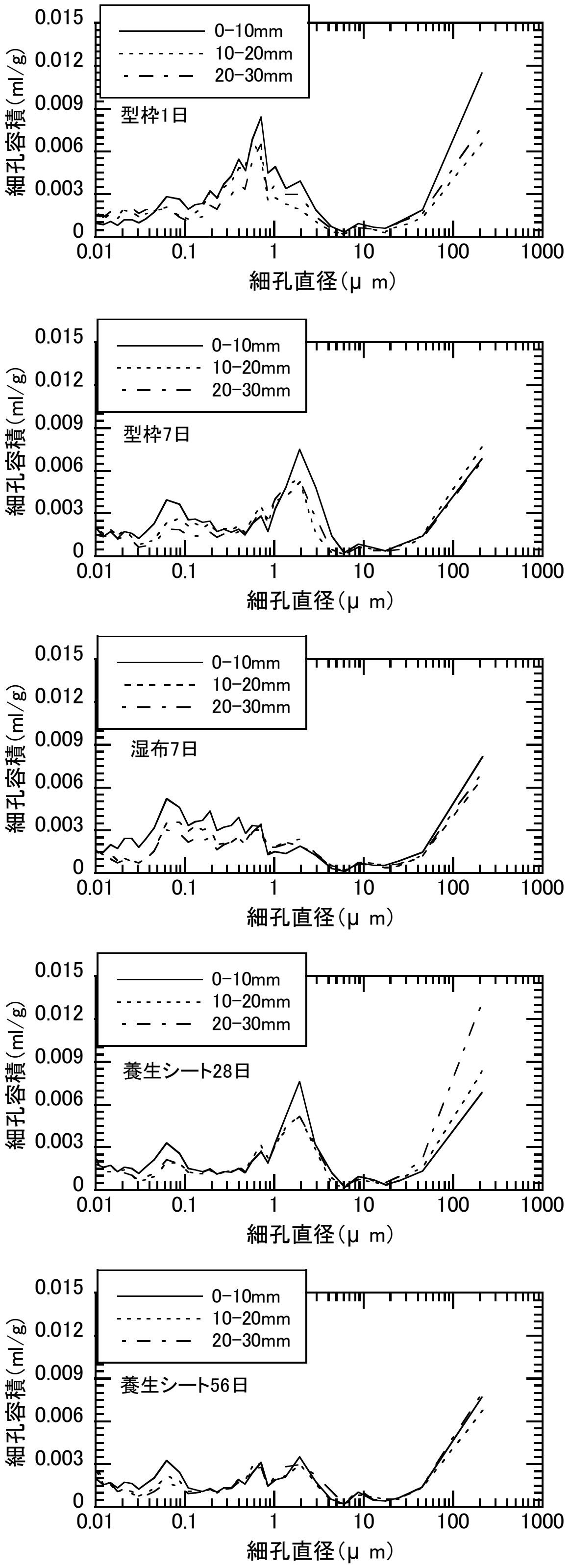

図-5　細孔径分布

養生のように給水養生の場合，水和反応が比較的早期に進行するため，養生期間が 7 日間であっても水和が十分に進行することを期待できる。一方，養生シートのような水分の逸散を抑制することで水和反応に寄与する水を確保するような養生の場合，給水養生と比較すると水

和反応の進行は緩やかになるが，脱型後に養生を実施しない場合と比較すると水和反応が長期的に継続することが明らかとなった。本研究の範囲では，養生期間 56 日において養生シートによる効果が明確に現れた。なお，養生シート 28 日では，細孔径分布が型枠存置 7 日と同等であるため，表面透気性および表面吸水性も型枠存置 7 日と同等となったものと考えられる。

3.5 含水率

含水率の測定結果を図-6 に示す。いずれのケースにおいても，表面から深くなるほど含水率は高くなる傾向が認められた。また，深さ 40～50mm の含水率は，いずれも 4%前後であり，養生方法や養生期間による差は比較的小さかった。一方，深さ 0～10mm および 10～20mm の含水率は，高周波容量式水分率計によって測定した表面水分率と異なり，養生方法や養生期間の影響が大きく，養生シート 56 日の含水率が最大であった。これは，細孔径分布の測定結果からも明らかなように，養生シート 56 日では，養生シートによる水分逸散抑制効果によって表層部の組織が緻密化するために，コンクリート内部の水分の逸散が抑制されて乾燥速度が低下したためと考えられる。細孔径分布および含水率の結果を踏まえると，表面透気係数，吸水量結果は養生による硬化体組織の緻密化と内部の残存水分の双方が影響を与えた結果であると考えられる。

3.6 中性化に対する抵抗性

促進中性化試験の結果を図-7 に示す。型枠存置 7 日の中性化深さと比較して，型枠存置 1 日では約 30%中性化深さが大きいが，養生シート 28 日では約 25%，養生シート 56 日では約 40%小さくなり，養生シートを用いた長期間養生により中性化に対する抵抗性が向上することが確認された。細孔径分布の測定結果では，型枠存置 7 日と養生シート 28 日の細孔構造は同等であったが，含水率の測定結果から，養生シート 28 日の含水率が型枠存置 7 日と比較して高いため，中性化の進行が抑制されたものと考えられる。また，脱型後 1 日あるいは 2 日乾燥後に養生シートで材齢 28 日まで養生を行った場合の中性化深さは，養生シート 28 日の場合とほぼ同等となり，脱型後 2 日間程度であれば，養生シートを貼り付ける期間が中性化の進行に与える影響は小さいものと考えられる。

3.7 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

塩化物イオン浸透試験の結果を図-8 に示す。型枠存置 7 日の塩化物イオン浸透深さと比較して，型枠存置 1 日では約 10%大きくなったが，養生シート 28 日および 56 日では 22%～25%程度小さくなり，養生シートによる長期間養生によって，塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上することが確認された。養生シート 28 日および 56

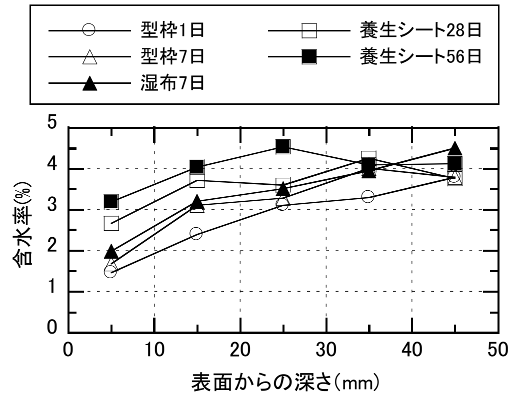

図-6　含水率

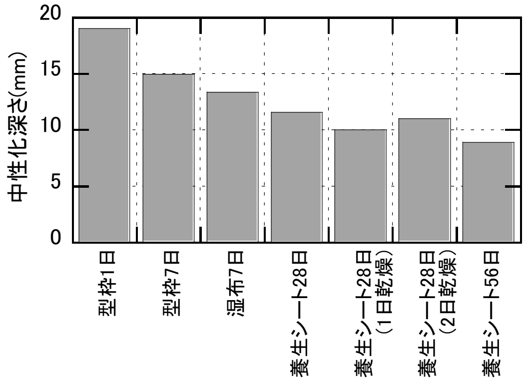

図-7　促進中性化試験結果（促進期間 56 日）

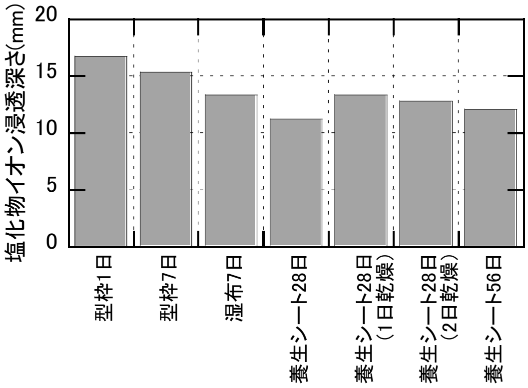

図-8　塩化物イオン浸透深さ

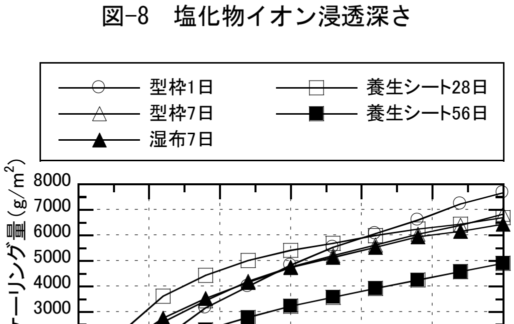

図-9　累積スケーリング量の経時変化

日の塩化物イオン浸透深さが同等となったのは，高炉セメントは塩化物イオンの固定化能力が高い[10]ため，細孔径分布が塩化物イオン浸透に対する抵抗性に与える影響が相対的に小さくなった結果であると考えられる。また，脱型後 1 日乾燥あるいは 2 日乾燥後に養生シートで材齢 28 日まで養生した場合の塩化物イオン浸透深さは，養生シート 28 日の場合と比較して大きかったものの，湿布養生 7 日と同等であった。

3.8 スケーリングに対する抵抗性

累積スケーリング量の経時変化を図-9 に示す。養生シート 56 日については，他と比較して初期の進行速度や累積スケーリング量が小さく，スケーリングに対する抵抗性が高いことが確認された。これは，養生シートを用いた長期間養生により表層部が緻密化したために，吸水量が小さくなったためと考えられる。一方，型枠存置 1 日については，6 サイクルでは，スケーリング量が最少であったものの，その後，急激に増加し，48 サイクル以降は最大となった。これは，型枠存置 1 日の場合，養生期間が短いために表層部の細孔構造が粗大であり，凍結する際の凍結圧の作用を受けにくいために初期のスケーリング量が小さかったものの，水和が十分進行していないために組織が脆弱なため，凍結融解が繰り返されるにつれてスケーリング量が急激に増加したものと考えられる。

60 サイクル後の累積スケーリング量の比較を図-10 に示す。型枠存置 7 日と比較して，型枠存置 1 日の累積スケーリング量は約 13%増加したが，養生シート 56 日の場合は約 28%低下しており，養生シートを用いた長期間養生によりスケーリングに対する抵抗性が向上することが明らかとなった。一方，養生シート 28 日の累積スケーリング量は型枠存置 7 日とほぼ同等であり，スケーリングに対する抵抗性の向上は認められなかった。また，湿布養生 7 日の累積スケーリング量は，型枠存置 7 日と比較して約 5%低下しており，スケーリングに対する抵抗性は向上するものの，その効果は比較的小さい結果となった。

4. まとめ

貼付型保水・保温養生シートを用いた長期間養生がコンクリートの耐久性向上に与える影響について，養生方法，養生期間を試験要因として検討した。その結果，得られた知見を以下に示す。

(1) 貼付型保水・保温養生シートを用いて材齢 56 日までの長期間養生すると，セメントの水和が十分に進行することで，コンクリートの組織が緻密化することが明らかになった。

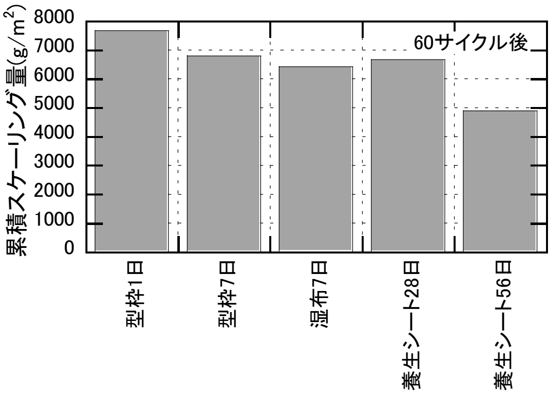

図-10　60 サイクル後の累積スケーリング量の比較

(2) 貼付型保水・保温養生シートを用いて材齢 56 日までの長期間養生を行うことで，表面透気性，表面吸水性が低下し，中性化，塩化物イオン浸透およびスケーリングに対する抵抗性が向上する。

(3) 貼付型保水・保温養生シートにより材齢 28 日まで養生する場合，脱型後から貼り付けまでの乾燥期間が耐久性に与える影響は，2 日間以下であれば小さい。

参考文献

1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，p.121，2013.3
2) 古川幸則，福留和人，庄野昭：コンクリートの浸水養生システムー型枠取りはずし後の給水養生工法の実用化と効果ー，コンクリート工学，Vo.l.49，No.3，pp.21-28，2011.3
3) 宮原茂禎，丸屋剛，岸利治：排水･水中養生したコンクリートの耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vo.l.33，No.1，pp.767-772，2011
4) 近松竜一，近藤紀人，中嶋智史：コンクリートの表面貼付型養生テープの開発，コンクリート工学年次論文集，Vo.l.24，No.1，pp.1035-1040，2002
5) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点‘12，p.9，2012.9
6) 田中博一，Quoc PHAN，皆川浩，久田真：貼付型保水･保温養生シートを用いた長期間養生がコンクリートの耐久性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vo.l.36，No.1，pp.790-795，2014
7) Quoc PHAN，田中博一，杉野拓之，江渡正満，名倉健二：貼付型養生材の保温効果に関する実験的検討，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.69，V-043，2014
8) R.J. Torrent, “A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site”, Materials and Structures, Vol.25, No.6, pp.358-368, 1992
9) 林和彦，細田暁，Usman AKMAL，藤原麻希子：コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vo.l.34，No.1，pp.1804-1809，2012
10) 松崎晋一郎，豊村恵理，伊代田岳史：高炉セメントの塩化物イオン固定化特性に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vo.l.33，No.1，pp.797-802，2011