

報告 高断熱性湿潤養生シートの適用効果に関する検討

川西 貴士*1・近松 竜一*2・水野 敬久*3・溝淵 麻子*4

要旨：部材の内部と表層部の温度差に起因した内部拘束による温度ひび割れを防止するための保温養生と、表層部からの水分の逸散を防止するための湿潤養生を効率的に行うために、断熱性に優れたアルミ箔シートおよび気泡緩衝材と、保湿性に優れた不織布とを一体化した養生シートを考案した。この養生シートによる保温効果と保湿効果を検証した結果、型枠の取外し後も急冷されることなく保温効果を持続することができ、表層部のひび割れを防止できること、保湿効果により型枠の取外し後も湿潤状態を保つことができ、コンクリートの表層部の硬化組織を緻密にできることを確認した。

キーワード：断熱性, 保湿性, アルミ箔シート, 気泡緩衝材, 不織布, ひび割れ, 緻密

1. はじめに

橋脚, ダムの堤体, PC タンクの底版など, マッシブな部材にコンクリートを打ち込む場合, 部材の内部と表層部との温度の差が大きくなり, 水和熱に起因した内部拘束による温度ひび割れが発生しやすくなる。この温度ひび割れを抑制するには, コンクリートの表面を断熱性の高い養生材で被覆し, 中心部と表面部の温度の差を低減する方法が効果的である。

一方, 材齢初期にコンクリートの表面を乾燥させると, 水和反応に必要な水分が失われ, 十分な圧縮強度を確保できなくなる。所要の性能を満足するコンクリート構造物を構築するには, コンクリートが十分硬化するまで外力の作用から保護し, 脱型後は保湿性の高い材料でコンクリートの表面を湿潤状態に保つ必要がある。

前者の断熱性を確保する方法として, 空気層が含まれている梱包用の緩衝材を用いて養生を行う方法が提案されている¹⁾。また, 後者の保湿性を確保する方法として, 型枠の取外し後に, コンクリートの表面の乾燥を防ぐ養生用保水テープが提案されている²⁾。マスコンクリートの養生では, 断熱性と保湿性の両方の性能が求められるが, 今までは, その両方の養生対策を別々に施していたため効率が悪かった。

そこで, 断熱性と保湿性の両方の性能を合理的に得る養生方法として, 断熱性を高めるために, 輻射熱を反射するアルミ箔シートと空気層を挟むことのできる梱包用の気泡緩衝材を使用し, 保湿性に優れた不織布と一体化させた養生シート(以下, 養生シートと呼称)を考案した。養生シートの概要を図-1に示す。本報告では, この養生シートを用いた場合の保温効果と保湿効果の検証結果と実構造物での適用結果について報告する。

2. 保温効果の検証

養生シートの保温効果を確認するため, マスブロック試験体を作製し, コンクリート内部の温度履歴を測定し, 温度解析により熱伝達率を算定した。さらに, 実橋脚を対象に温度応力解析を実施し, 養生シートによる温度ひび割れの低減効果の評価を行った³⁾。

2.1 保温効果の検証実験

実験は, 写真-1に示すように, コンクリートの表面を露出したケース(Case2-1)とコンクリートの表面に養生シートを貼り付けたケース(Case2-2)の2ケースについて行った。なお, 本実験には, 試作的に作製したアルミ箔シートと気泡緩衝材のみを貼り合わせたシート(以下, 断熱養生シートと呼称)を使用した。

実験には, 1m角立方体のマスブロックを使用し, 周囲を厚さ30cmの断熱材で被覆した。材齢4日後に側面1面のみ型枠を取り外し, Case2-2については, 断熱養生シートを貼り付けた。試験体には熱電対を設置し, コンクリートの温度履歴を測定した。試験体の概略および熱

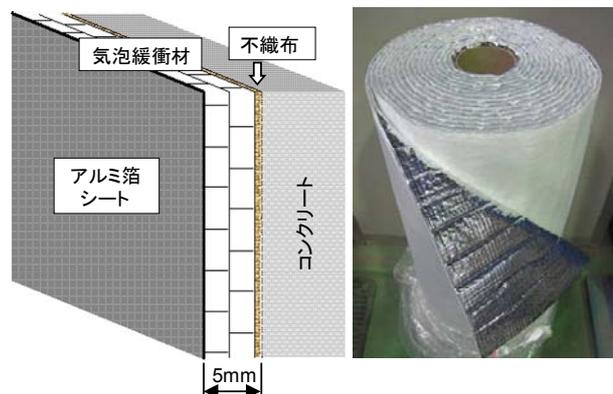


図-1 養生シートの概要

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部副課長 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部首席技師 工博 (正会員)

*3 (株)大林組 広島支店庄原ダムJV工事事務所所長 (非会員)

*4 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部主任 (正会員)



写真-1 養生シートの貼付け状況

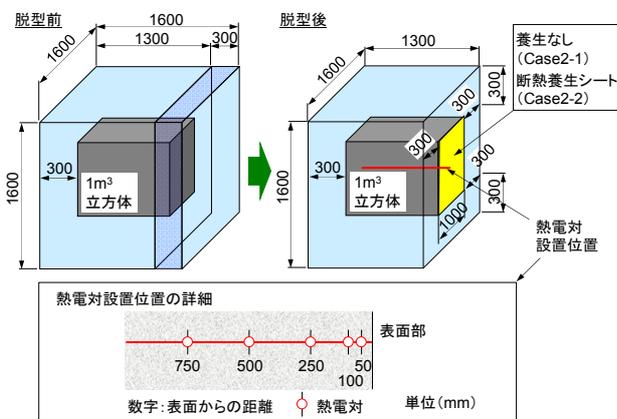


図-2 供試体の概略および熱電対の設置位置

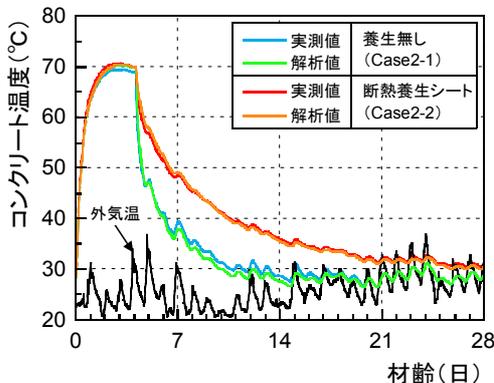


図-3 温度履歴

電対の設置位置を図-2に示す。実験には、レディーミクストコンクリートを使用した。呼び強度27でスランプ12cmとし、セメントの種類は、普通ポルトランドセメントとした。マスブロックの打込みに併せて試料を採取し、断熱温度上昇試験を実施した。単位セメント量は322kg/m³であった。

試験体の表面より50mm内部におけるコンクリートの温度履歴を図-3に示す。断熱養生シートを貼り付けた場合(Case2-2)は、養生を行わない場合(Case2-1)と比較して、温度が低下する勾配が低減され、最大で10℃程度の温度の差が認められた。

表-1 解析条件

| 項目 | 単位 | 条件 |
|----------------------------|------------------------|--|
| 熱伝導率 | W/m ² °C | 2.7 |
| 比熱 | kJ/kg°C | 1.15 |
| 単位容積質量 | kg/m ³ | 2283 |
| 断熱温度上昇量 Q(t) | °C | Q(t)=Q _∞ (1-e ^{-rt}) Q _∞ =46.0, r=1.104 |
| 圧縮強度 f _c (t) | N/mm ² | f _c (t)=t × d(28) × f _c (28)/(a+b) a=4.5, b=0.95, f _c (28)=29.1, d(28)=1.11 |
| 引張強度 f _t (t) | N/mm ² | f _t (t)=0.44 × f _c (t) ^{0.5} |
| 有効ヤング係数 E _e (t) | kN/mm ² | E _e (t)=(1/(1+Φ)) × (4.7 × 10 ³ × f _c (t) ^{0.5}) Φ: クリープ係数 (温度上昇時: 0.42, 温度下降時: 0.65) |
| ポアソン比 μ(t) | - | 0.20 |
| 熱膨張係数 | × 10 ⁻⁶ /°C | 10.0 |

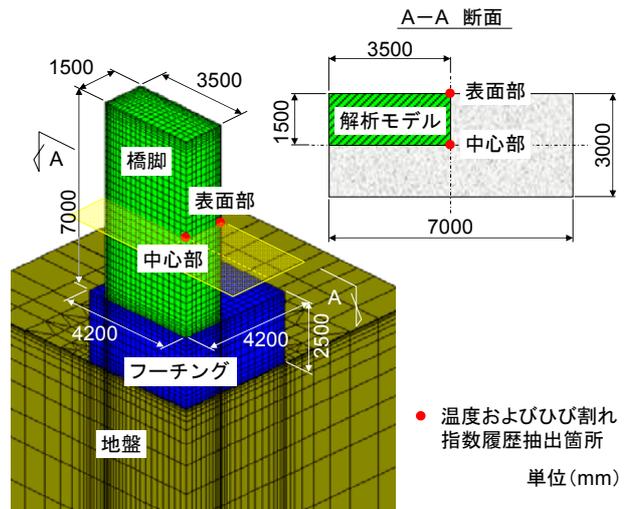


図-4 解析モデル

実験により計測した温度履歴を基に、熱伝達率を算出するために温度解析を行った。コンクリートの断熱温度上昇特性は、実験結果から式(1)のとおりとした。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp(-rt^s)) \quad (1)$$

Q(t) : 材齢 t 日における断熱温度上昇量 (°C)

Q_∞ : 終局断熱温度上昇量 (45.4°C)

r, s : 温度上昇速度に関する定数

$$(r=1.634, s=0.969)$$

解析結果を図-3に併記する。Case2-1は、熱伝達率を13W/m²°Cとし、Case2-2は4W/m²°Cとした場合、実測値と解析値が概ね一致した。断熱養生シートを用いることで、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕に記述されている養生マット(熱伝達率5W/m²°C)より高い断熱性を有することが確認された。また、密閉されているため風による影響は小さいと考えられる。

2.2 温度応力解析によるひび割れ低減効果の検証

前節で得られた熱伝達率をもとに、図-4に示すような橋脚を模擬した3次元モデルを用いて温度応力解析を実施し、Case2-1(養生無し)とCase2-2(断熱養生シート)で、温度ひび割れの発生に及ぼす影響を検討した。解析条件を表-1に示す。外気温は、20°C一定とした。

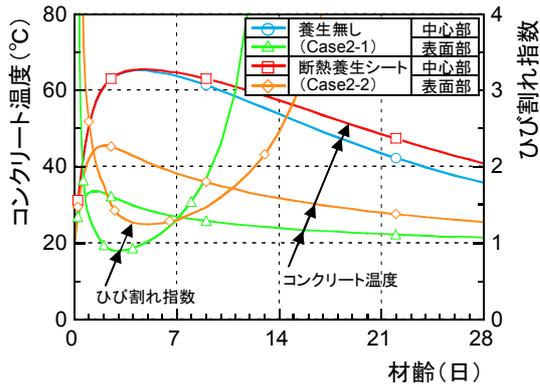


図-5 温度応力解析結果

橋脚の躯体の中心部と表面部におけるコンクリート温度の履歴と表面部のひび割れ指数の履歴を図-5に示す。中心部と表面部の最高温度の差を比較すると、Case2-1が30°C程度に対して、Case2-2は20°C程度と保温効果が高いことが確認された。また、断熱養生シートを用いることで、ひび割れ指数が増加し、水和熱に起因した内部拘束による温度ひび割れを抑制できると考えられる。

3. 保湿効果の検証

養生シートの保湿効果を確認するために、壁状試験体を作製し、表面を露出した場合と側面を養生シートで被覆した場合で比較実験を行い、コンクリートの表層部の品質の改善効果について検証した⁴⁾。

3.1 実験概要

実験には、幅600mm×高さ600mm×厚さ200mmの試験体を使用し、気温20°Cで湿度60%一定の室内に存置した。材齢2日で型枠を取り外し、コンクリートの表面を露出したケース (Case3-1) と養生シートを貼り付けたケース (Case3-2) の2ケースとした。Case3-2については、1日1回不織布に給水し、14日間養生を行った。給水は、養生シートを取り外し、水を垂れない程度に噴霧することで行い、給水後は再度養生シートを貼り付け、養生を続けた。その後は、養生シートを撤去し、表面を露出させた。コンクリートの水セメント比は55%とし、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。材齢28日 (標準養生) の圧縮強度は40.8N/mm²であった。

試験項目として、表層部の保湿性を確認するために高周波容量式の含水率計を用いて含水率を測定した。また、表層部の品質の向上効果を確認するために、材齢28日の段階でテストハンマー強度、透気係数を測定し、中性化深さ測定用のコアを採取した。テストハンマー強度は、JSCE-G 504に準拠して測定し、透気係数は、Torrent法にて測定した。また、中性化深さは、試験体から採取したφ100mmのコアを用いて促進試験を実施し、JIS A 1152に準拠して測定した。促進条件は、温度20±2°C、相対

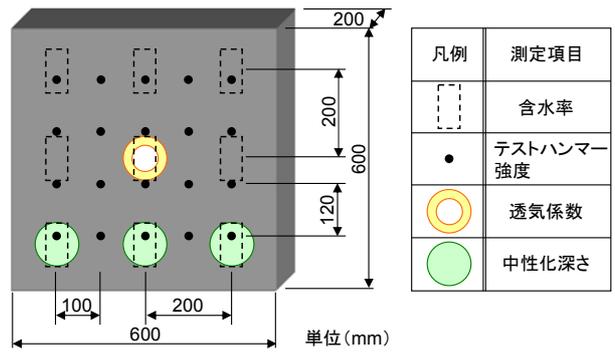


図-6 各種試験の測定位置

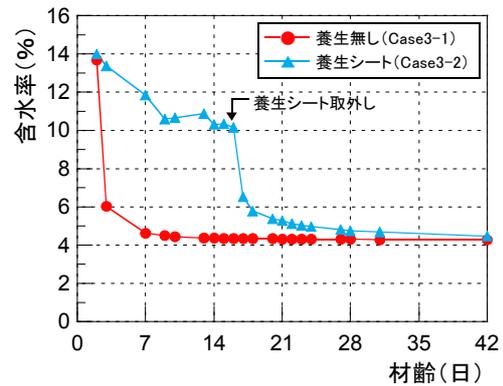


図-7 含水率の推移

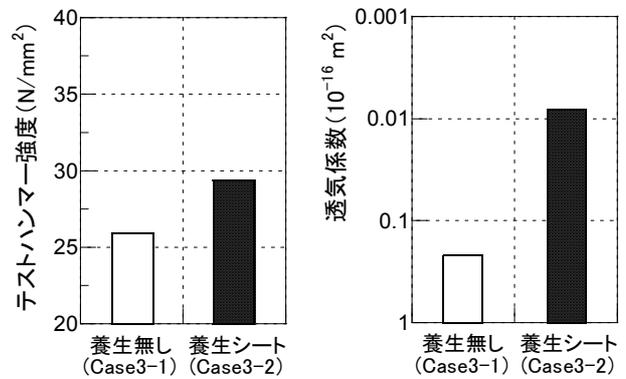


図-8 テストハンマー強度および透気係数の比較

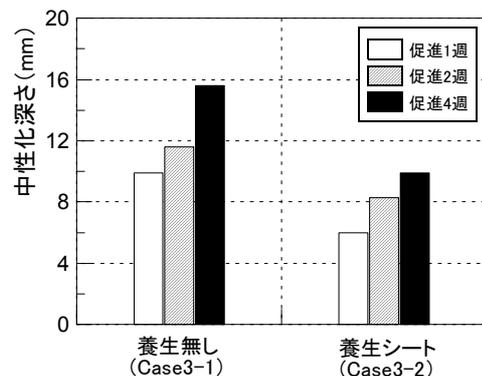


図-9 中性化深さの比較

湿度 50±5%および二酸化炭素濃度 5±0.2%とした。各種試験の測定位置を図-6に示す。

3.2 実験結果および考察

型枠を取り外した後のコンクリートの表層部の含水率の経時変化を図-7に示す。養生シートで被覆しない場合 (Case3-1) は、含水率が型枠を取り外した後に急激に低下し、数日で 4%程度に収束した。一方、養生シートで被覆した場合 (Case3-2) は、含水率が急激に低下することなく 10%以上で保持されていた。養生シートを取り外した後は、含水率が急激に低下し、10日後には Case3-1 (養生シート無し) と同程度の含水率まで低下した。

コンクリートの表層部のテストハンマー強度、透気係数および中性化深さの測定結果をそれぞれ図-8 および図-9に示す。含水率の影響を考慮して、測定は、含水率が収束した後に実施した。養生シートを設置することで表層の基準反発度は約 10%増大し、透気係数は約 1/30に低減された。中性化深さは促進期間 4 週において約 40%低減された。いずれも表層の水和反応が進行し緻密な硬化組織が形成されたことによるものと考えられる。養生シートの設置による湿潤養生効果が確認された。

4. 実構造物における性能検証実験

4.1 橋脚の養生対策事例

鉄道高架橋は、マッシュピな柱や梁で構成される場合が多く、躯体コンクリートの表層部の品質を向上するには、保温と保湿の両方の効果が得られる方法にて養生を行うことが重要となる。特に、温度ひび割れ抑制の観点から低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートを冬期に打ち込む場合、水和反応の速度が遅く、乾燥の影響を受けやすいことから、材齢初期の養生が重要となる。そこで、実際に鉄道高架橋の中で、低熱ポルトランドセメントを使用した部材厚さの大きい橋脚に養生シートを適用した場合の保温および保湿効果について確認した⁵⁾。

縦 2500mm×横 5000mm×高さ 5400mm の寸法の橋脚を対象に実験を行った。対象のコンクリートは、2 月下旬に打ち込んだ。コンクリートの打込み後は型枠の上から養生シートで被覆し、5N/mm²の圧縮強度が得られた材齢 3 日後に型枠を取り外し、その後は、コンクリートの表面を養生シートにて被覆した (Case4-3)。また、比較として、ビニールシートにより養生する (Case4-4) 部位を設け、養生シートの保温効果の比較を行った。養生シートには 1 日 1 回吸水させ、材齢 28 日まで養生を行った。養生シートの貼付け状況を写真-2に示す。コンクリートの配合は 30-12-20L とし、セメントには低熱ポルトランドセメントを使用した。

断熱性を確認するために、橋脚の中心部と表層部に熱電対を取り付け、温度履歴を測定した。熱電対の設置位

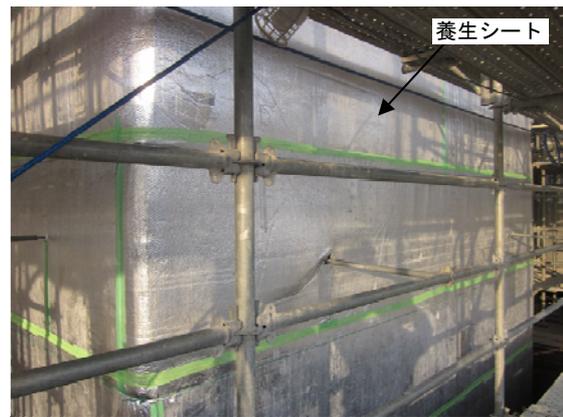


写真-2 橋脚への養生シートの貼付け状況

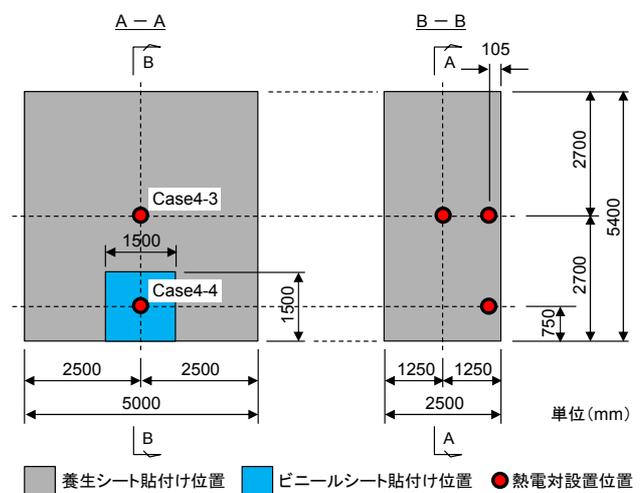


図-10 熱電対の設置位置および養生方法

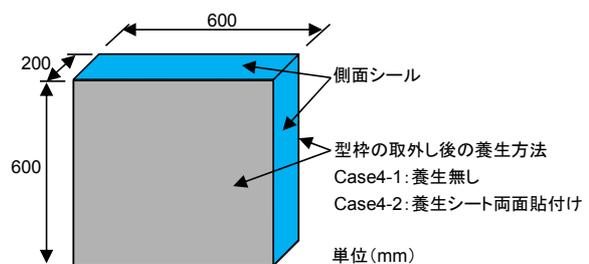


図-11 保湿効果確認用供試体の概要

置および養生方法を図-10に示す。外気温の履歴も併せて測定した。

保湿性を確認するために、橋脚の躯体と同じコンクリートを用いて、幅 600mm×高さ 600mm×厚さ 200mm の供試体を併せて作製した。供試体は、躯体と同様の環境下に静置した。躯体と同様に材齢 3 日で型枠を取り外し、コンクリートの表面を露出した場合 (Case4-1) と養生シートで被覆した場合 (Case4-2) で比較を行った。供試体の概要を図-11に示す。躯体と同様に材齢 28 日で養生シートを撤去した。型枠を取り外した後、表層部の含水率の履歴を測定した。また、3 章と同様に、含水率が収

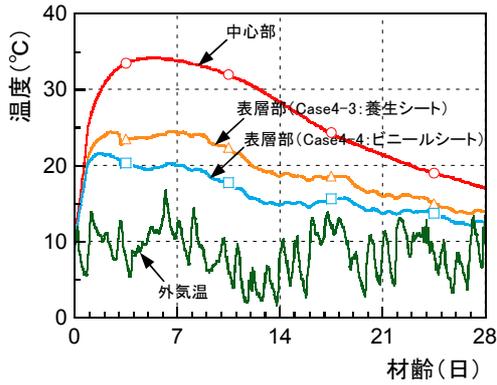


図-12 コンクリートの温度計測結果

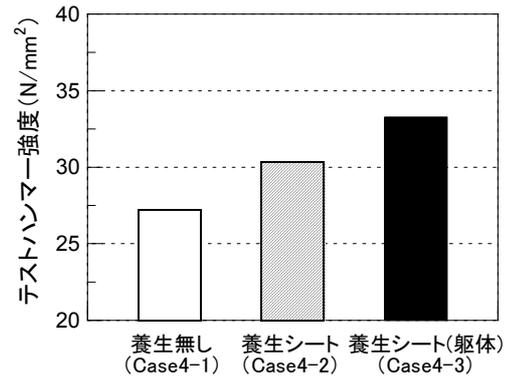


図-14 テストハンマー強度の比較

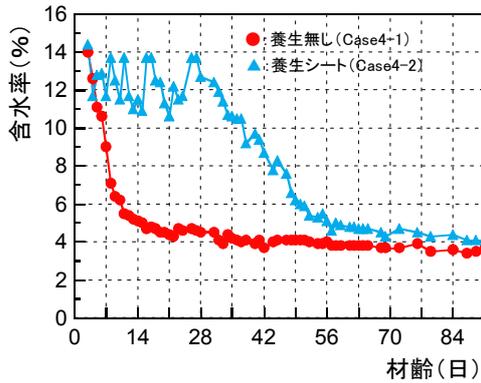


図-13 含水率の推移

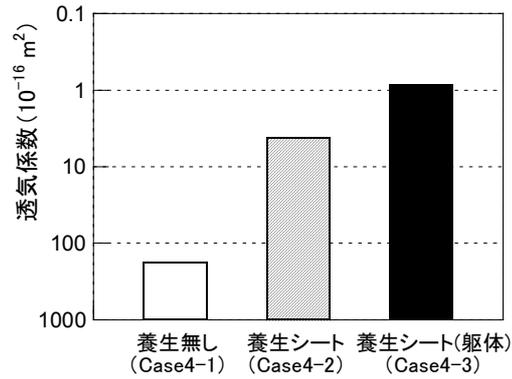


図-15 透気係数の比較

束した材齢 91 日の段階で、テストハンマー強度と透気係数を測定した。実際の橋脚の品質を確認するために、材齢 91 日に同様に躯体 (Case4-3) のテストハンマー強度および透気係数を測定した。

型枠を取り外した後の水分の逸散が圧縮強度に与える影響を確認するために、材齢 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56 および 91 日に圧縮強度試験を実施した。供試体の養生方法は、現場での水中養生、封緘養生および気中養生の 3 種類とし、圧縮強度の比較を行った。気中養生の供試体については、躯体と同様に材齢 3 日で型枠を取り外し、気中にさらした。

コンクリートの温度計測結果を図-12 に示す。中心部の温度は、最高で 34°C 程度まで上昇した。養生シートを貼り付けた場合、表層部の温度は最高で 25°C 程度であった。養生シートの保温効果により、中心部と表層部の温度差は、概ね 10°C 程度で推移した。ビニールシートで養生した場合、養生シートと比べて、5°C 程度低い温度で推移した。養生シートの撤去後、コンクリートの表面には特にひび割れは認められず、良好な出来ばえであった。

小型の試験体において、コンクリートの表面を露出した場合 (Case4-1) と、養生シートで被覆した場合 (Case4-2) の含水率の履歴を図-13 に示す。養生シートで被覆することで、2 章の結果と同様に、急激に含水率が低下することなく、湿潤状態を保つことができた。

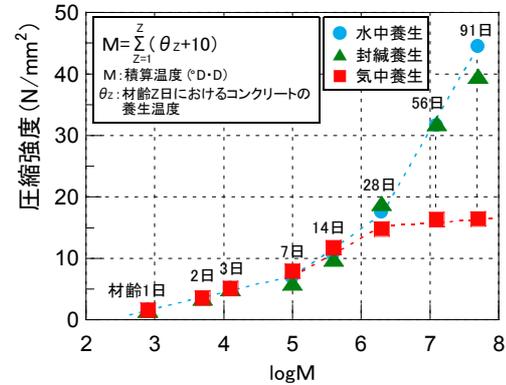


図-16 積算温度と圧縮強度の関係

また、実際の躯体のコンクリート (Case4-3) の表層部における養生シート撤去後の含水率は 13.0% であり、小型の試験体と同等の保湿効果が得られることを確認した。

テストハンマー強度の測定結果を図-14 に示す。また、透気係数の測定結果を図-15 に示す。コンクリートの表面を露出させた場合 (Case4-1) に比べて養生シートで被覆した場合 (Case4-2) の方がテストハンマー強度は大きく、透気係数は小さい値を示した。養生シートの保湿効果により表層部のコンクリートが緻密化されていることが確認された。

各種条件下で養生した供試体の圧縮強度を積算温度の対数で整理した結果を図-16 に示す。現場にて水中養生および封緘養生を行い、水分の逸散を防止した場合は、

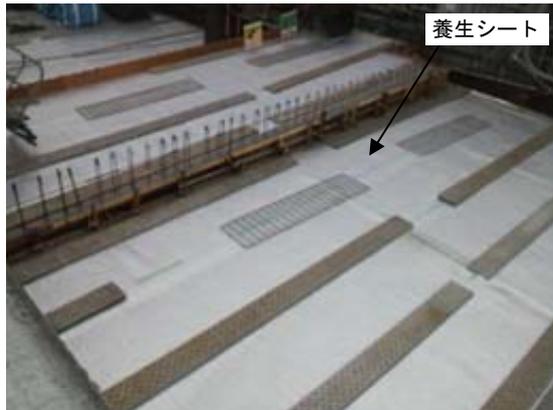


写真-3 床スラブへの養生シートの敷設状況

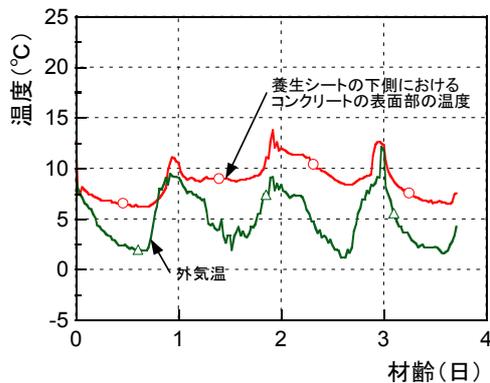


図-17 外気温およびコンクリート温度の履歴

材齢 91 日の段階でも圧縮強度の増加が認められるが、型枠を取り外した後に気中養生を行った試験体は、材齢初期に水和に必要な水分が逸散するため、材齢 28 日以降の圧縮強度の増進がほとんどなく、設計基準強度（ $30\text{N}/\text{mm}^2$ ）を大幅に下回る結果であった。型枠を取り外した後も十分な圧縮強度が得られるまで表層部の水分の逸散を防止することが重要であることを示唆する結果であった。

4.2 床スラブの寒中時の施工事例

コンクリート構造物の冬期施工においては、初期凍害や強度発現の遅れが懸念される。特に、建屋の床スラブは、厚さが薄い場合が多く、外気温の影響を受けやすいため、打込み後の初期に凍結しないように十分に保護し、特に風を防がなければならない。また、初期凍害を防止できる強度が得られるまで、コンクリート温度を 5°C 以上に保つ必要がある⁶⁾。そこで、実際に、床スラブの冬期の養生対策として、養生シートを適用した場合の保温効果について検証を行った。

検証を行った床スラブに用いたコンクリートの呼び強度は $27\text{N}/\text{mm}^2$ 、スラブは 21cm であった。コンクリートが硬化した後に養生シートを敷設した。養生シートの敷設状況を写真-3 に示す。保温効果を確認するために、養生シートの下側のコンクリートの表面部の温度と、併

せて外気温を測定した。

外気温およびコンクリートの表面部の温度履歴を図-17 に示す。外気温は一番寒い時で 1°C 位まで低下したが、養生シートで被覆することにより、養生シートの下側におけるコンクリートの表面部の温度は 6°C 以上で推移しており、十分な保温効果が得られるとともに、材齢 28 日の段階で呼び強度を満足することができた。養生シートを取り外した後、コンクリートの表面には特にひび割れは確認されず、良好な出来ばえであった。冬期施工においても、養生シートで被覆することで、十分な保温養生が可能となることが確認できた。

5. まとめ

マスコンクリートの表層部の品質を合理的に向上させるために考案した保温と保湿の両者の性能を兼ね備えた高断熱性湿潤養生シート（養生シート）の各種性能を検証し、実構造物に適用した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 養生シートの熱伝達率は、 $4\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ であり、断熱性が高い。強度発現の遅いコンクリートを用いた場合や冬期の施工に対して、有効な保温対策となる。
- (2) 養生シートを設置することにより、型枠の取外し後も急冷されることなく、保温効果を持続することができ、表層部の温度ひび割れを防止できる。
- (3) 養生シートを設置している間は、コンクリートの表層部の含水率を 10% 以上に保つことができる。
- (4) 養生シートの保湿効果により、コンクリートの表層部の品質が向上し、緻密な硬化組織を形成できる。

参考文献

- 1) 伊藤健一，他：LNG 地下式貯槽の底版コンクリートにおける梱包用緩衝材の養生材としての適用，土木学会年次学術講演会講演概要集，vol.63，No.2，pp.275-276，2008.8
- 2) 近松竜一，他：コンクリートの表面貼付型養生テープの開発，日本コンクリート工学協会，vol.24，No.1，pp.1035-1040，2002.6
- 3) 川西貴士，他：断熱性に優れた養生シートの温度ひび割れ低減効果に関する検証，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，V-408，pp.815-816，2010.8
- 4) 阿部諭史，他：高断熱性湿潤養生シートによるコンクリート表層の品質改善効果，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-363，pp.725-726，2011.8
- 5) 森川秀人，他：鉄道高架橋におけるコンクリートの表層部の品質向上対策，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012.8
- 6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2012.3