

論文

コンクリート床版における養生方法に関する実験及び解析的検討

倉田幸宏*, 師山 裕**, 高林和生**, 鈴木基行***

*工博, IHI インフラシステム, (〒108-0023 東京都港区芝浦 3 丁目 17 番 12 号)

** 工修, IHI インフラシステム, (〒108-0023 東京都港区芝浦 3 丁目 17 番 12 号)

***工博, 東北大学大学院, 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

床版コンクリートの養生の役割として保温・保湿機能があげられるが、若材齢時のひび割れ対策としてコンクリート打込み後、床版内部のコンクリート温度が最高温度に達した以降の温度勾配を緩やかにする役割が最も重要である。そのためには現場環境を考慮して風速の影響や輻射熱の影響に対して対策を施すことが重要であり、実験及び解析的な検討より有効な養生方法を提案した。

キーワード：コンクリート床版，養生，若材齢時，輻射熱，熱伝達率，温度応力解析，遮光シート

1. はじめに

既往の論文¹⁾によると、橋軸直角方向に発生するひび割れの起因となる、鋼桁の拘束を起因とする若材齢時床版に発生する引張応力は、コンクリート内部の温度下降勾配に左右されることが確認されている。またその温度下降勾配は熱伝達率が大きいとコンクリート床版のように部材厚が薄く外気に触れる面積が広い薄板構造においては、大きく影響する事も確認されている。コンクリート床版の水和反応による発熱のピークは材齢1日程度であるため、特に若材齢時における養生が重要となってくるということが再認識された。つまり、性状の良いコンクリートを供給した場合であっても養生を怠ると構造物は所定の耐久性を得られないということである。

一方、コンクリート床版施工時における養生の重要性については多くの文献²⁾で記述はあるものの、具体的な養生方法に関しては、これまで現場担当者の経験的判断に委ねられる事が多く、具体的にどのような材料および方法が良いのか、またその養生の効果そのものについても定量的に評価されていない。

本論文においては、非線形有限要素応力解析³⁾による「応力度」に対して各種環境要因が床版コンクリートに与える影響を実験的に把握して、それらの知見を解析における熱物性値などで考慮して定量的に評価した。環境要因については若材齢時のコンクリートに対して風速の与える影響及び日照による輻射熱の影響を起因とする内部拘束応力について着目した。輻射熱による床版断面の内部拘束応力によるひび割れ現象については文献⁴⁾を参照されたい。

2. 養生方法に関する基礎的な実験検討⁵⁾

コンクリート構造物の施工における養生の役割としては、所要の耐久性の確保、外部からの有害な作用に対する保護、ひび割れの抑制、安定した施工工程の確保といったことが求められる。

本節では、養生方法をパラメータに各種養生の効果について実験の評価を行う。評価項目としては以下の項目が挙げられる。

2.1 養生による効果

(1) 保温効果

コンクリートはセメントの水和反応中にも表面部の熱伝達境界をとおして外気の影響を受けるため、表面部と内部では発熱の状況が異なってくる。この断面内の温度差によって内部と表面部に歪み差が生じ、表面部には引張応力が発生する可能性がある（これを内部拘束応力という）。

また、水和反応によって発熱したコンクリートが冷え、さらに乾燥が進むことによって収縮を起し、その収縮が外部に拘束されることによっても引張応力が発生する（これを外部拘束応力という）。

こういった引張応力を低減するためにも、適度な保温養生を行いコンクリートの温度を緩やかに降下させ、かつ断面内の温度差を少なくする必要がある。

(2) 保湿効果

コンクリートは若材齢時に水分が不足すると十分な水和反応が行われず、所定の強度が発現しないことがある。また、(1)で述べた乾燥による外部拘束応力を低減

するためにも、養生によってコンクリート表面部を十分な湿潤状態に保つ必要がある。

2.2 養生の効果に関する室内実験の概要

本実験ではコンクリート床版における各種養生方法の効果を把握することを目的に、コンクリート床版を模擬した試験体（以下試験体）を表-1 に示した養生方法によって作成した（写真-1）。そして、コンクリート打込み時からの試験体内部の温度および養生材とコンクリート間の湿度を計測し、上述の評価項目に従い各養生方法を評価したものである。実験条件を表-2 に示す。

養生期間はコンクリート打込み時から試験体内部の温度が室温とほぼ同様となるまでの5日間とした。試験体はコンクリート床版を模擬するため、合板製の外枠の内側面を断熱材で囲った型枠によって作成し、計測中は型枠を取り付けたままとした（図-1、写真-2）。また、上面の養生はコンクリート打込み時から6時間後に開始した。コンクリートは、設計基準強度 $S_{ck} = 40\text{N/mm}^2$ 、粗骨材の最大寸法 $G_{max} = 20\text{mm}$ 、スランプ $10 \pm 2.5\text{ cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ の早強コンクリートとした。

養生の効果を評価するための計測項目は温度と湿度とし、温度は熱電対、湿度は湿度センサを用い計測を行った。計測位置を図-2 に示す。試験体内部の温度計測位置は、上面から 50 mm （以下、上段）、厚さ方向の中央（以下、中段）、下面から 50 mm （以下、下段）の位置とし、養生材とコンクリート間および室内では温度と湿度の両方を計測した。

表-1 養生方法

略 称	養 生 方 法
①養生	養生無し
②養生	養生マット
③養生	養生マット+ブルーシート
④養生	気泡シート+ブルーシート
⑤養生	養生マット+気泡シート+ブルーシート
⑥養生	湿潤シート+保温マット

表-2 実験条件

実 験 場 所		恒温室
環 境 温 度		15°C 一定
環 境 湿 度		65%一定
養生条件	養生開始時期	コンクリート打込みから6時間後
	散 水 時 期	コンクリート打込みから1日程度経過時点で、試験体表面全体に水が行き渡る程度の量（約0.25ℓ）を試験体表面に直接散布。
	養生 期 間	5日間

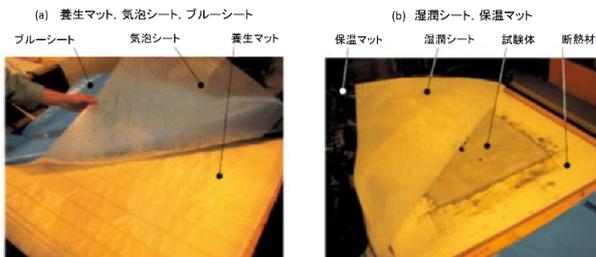


写真-1 養生材

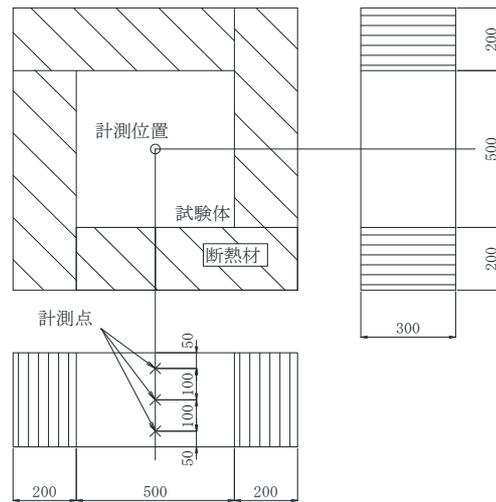


図-1 試験体形状（単位mm）



写真-2 試験体型枠

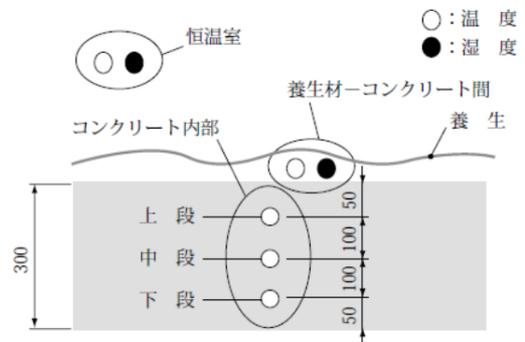


図-2 計測位置（単位：mm）

2.2 実験結果と考察

評価項目に従って、今回の実験における計測結果を考察する。

(1) 保温効果

1) 温度上昇勾配と最高温度

特に冬季施工の場合には、低温による強度発現の遅れを防止するためにも、適度な保温によって最高温度を上げることも必要である。図-3 に試験体上段におけるコンクリート温度の計測結果を示す。図-3 より、養生を開始してから温度上昇が緩やかになるまでの温度上昇勾配は $1.5 \sim 2.1^\circ\text{C/hr}$ であり、どの養生方法においてもほとんど差はみられなかった。最高温度は⑥養生が最も高く、次いで⑤養生となっている。②養生、③養生、④養生は

最高温度にはほとんど差はみられなかった。①養生はほかの養生に比べ大幅に温度は低い値となっている。

2) 温度下降勾配

最高温度からの温度下降勾配を緩やかにすることで、若材齢時に発生する引張応力を低減することができる。温度下降勾配が最もきつくなるコンクリート温度がピークを過ぎた材齢1日から1.5日での結果を示す(図-3)。温度下降勾配についても0.42~0.52°C/hrであり、どの養生方法においてもほとんど差はみられなかった。

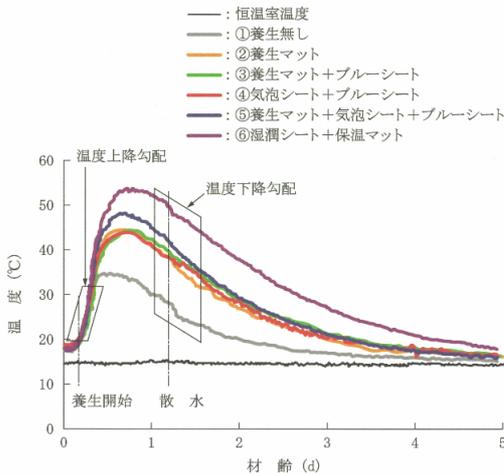


図-3 コンクリート温度計測結果

3) 床版断面内の温度勾配

床版断面内の温度勾配を小さくすることで内部拘束応力が低減され、発生する引張応力も低減されることになる。図-4に各養生方法の最高温度時の断面内温度勾配を示す。中段と上段の温度差が最も小さいものは⑤養生の0.3°C、中段と下段の温度差が最も小さいものは①養生の0.2°Cであった。しかし、⑤養生は中段と下段の温度差が2.9°C、①養生は中段と上段の温度差が4.7°Cと大きくっており、全断面としてみると温度差は大きい。

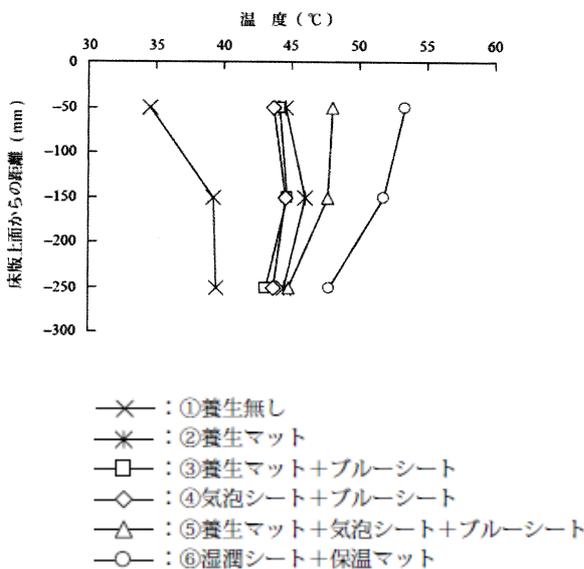


図-4 断面内温度勾配 (最高温度時)

また⑥養生も、中段と上段の温度差が1.5°C、中段と下段の温度差が4.0°Cと温度差は大きい。その点④養生は中段と上段の温度差、中段と下段の温度差ともに最大温度時で0.7°Cと小さな値となっており、試験体全断面での温度勾配が最も小さい。これは④養生の気泡シートが熱伝導率の小さい空気層から成り立っているため適度な保温効果となっていると考えられる。

以上のことから、養生を行わなかった場合には、コンクリート表面に対する外気温の影響は大きく、また水分の気化熱によっても急速に熱が失われることが確認された。このことから、養生の保温効果を高めるためには、外気の影響を遮断するとともに、気化熱による熱の損失を低減することが重要となってくる。

(2) 保湿効果

図-4に各養生方法での養生材とコンクリート間の湿度計測結果を示す。養生材とコンクリート間の湿度が低下する時期は養生方法によって異なっているが、湿度低下の原因はコンクリート表面からの水分の蒸発もしくは養生材が水分を吸収、発散することによる。上面に防水性のシート(今回の実験ではブルーシートもしくは保温マット)を敷いている場合は、いったん養生マットや湿潤シートに吸水された水分が、時間が経つにつれてコンクリート面に戻っていくことによって、再び湿度が高くなる。それに比べて、上面に防水性のシートを敷いていない場合(養生マットのみもしくは無養生)は、コンクリートの水和発熱に伴って水分が気化することによって、養生材とコンクリート間の湿度が急速に低下し、その後外気の湿度に漸近するようになる。

②養生では50%、③養生では85%、⑤養生では90%までいったん低下する。これは、養生マットが直接コンクリート表面に接していることで、水分を養生マットが吸収することによる。低下する湿度の違いは、養生マットの上に敷いている養生材の違いによる。

⑥養生では湿潤シートが急速に水分を吸収することで湿度の低下はすぐに起こるが、湿潤シートの保水効果が高いため、湿度は95%までしか低下しない。

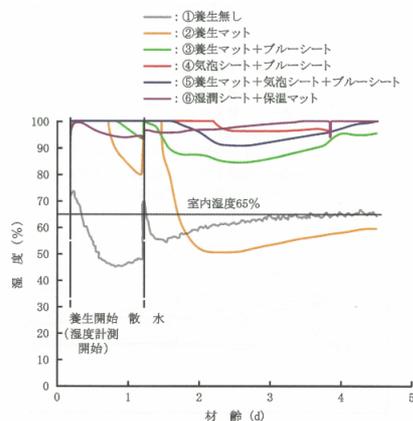


図-5 湿度計測結果

また④養生は常に 100%近い湿度を保っている。これは、気泡シートが水分を吸収することなく、また水分の蒸発するすき間もほとんどないためである。

3. 風速が各種養生方法の熱伝達率に与える影響に関する検討

3.1 各種養生方法の熱伝達率算定実験の概要

コンクリートの非線形温度応力解析において境界条件の設定が解析結果に大きな影響をもたらす、特に大気との間に熱の出入りがある熱伝達境界を評価した熱伝達率の設定が重要である。コンクリート標準示方書⁶⁾(以下コン示と表記する)においてコンクリート露出面における風速の影響は風速 2~3m/sec の場合、熱伝達率は 12~14W/m²°Cとして風速の増加に伴う熱伝達率の増加は風速 1m/sec 当たり 2.3~4.6W/m²°C程度の増加を見込むことが記述されている。

しかしながらこれらについての熱物性値はマスコンクリートを対象に定められたものであるため、床版のように部材厚が薄く外気に触れる面積が広い薄板構造においては当てはまらない可能性もあり基礎的な実験を実施した。床版の各種養生方法の定量評価として、各種養生方法の熱伝達率算定試験を行った。

試験体は寸法が 500×500×120mm のコンクリートとし、内部に埋め込んだ熱電対により温度を計測した。熱伝導を試験体下面から上面への 1次元で制御するために、試験体側面は断熱材で覆い、試験体下面を温水により一定温度に加熱した(図-6)。試験体上面には各種養生材を敷設し、断面内を定常状態とすることにより、養生方法ごとの見掛けの熱伝達率を算定した。また、風が効率良く通過するように試験体上に簡易風洞を設け、送風機で風を吹かせることにより、各種養生方法と風速の関係を定量的に評価した。

なお、本実験は温湿度一定(温度 20°C、湿度 60%)の恒温室内で行った。養生方法については表-3の各養生方法について計測結果を比較した。

表-3 養生方法

No.	養生方法
1	無養生
2	ブルーシート
3	養生マット
4	養生マット+ブルーシート
5	養生マット(湿潤)+ブルーシート
6	気泡シート
7	気泡シート+ブルーシート
8	気泡シート(湿潤)+ブルーシート
9	気泡シート+養生マット+ブルーシート
10	気泡シート(湿潤)+養生マット+ブルーシート

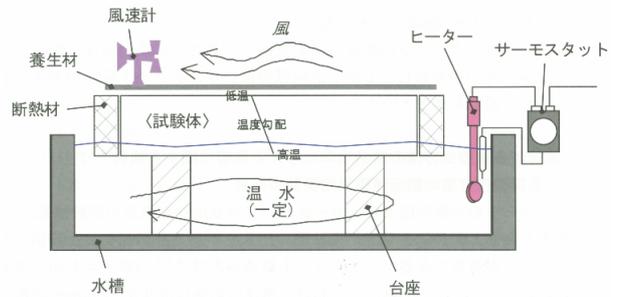


図-6 熱伝達率算定試験

3.2 実験結果の整理

(1) 評価方法

熱伝導率が λ 、内部温度が T_1 、表面の温度が T_s の試験体に、熱伝導率が物体と等しく厚さが δ である物体を付加した時に、物体表面の温度が外界温度 T_a に等しくなったとする。物体表面から外界へ単位面積、単位時間当たりに流れる熱量 q_1 と、試験体表面に物体を付加しない場合の熱量 q が $q_1=q$ であれば物体表面上に平板があっても物体内の熱流は変わらない。そこで、物体を含めた試験体表面の見掛けの熱伝達率 α は式-1となる。

$$K = \lambda / L \quad \dots \text{式-1}$$

ここで、 L は、 $L = \delta + (T_s - T_a) / (T_1 - T_s)$

であり、熱伝導率 λ は 2.7W/m°Cとした。

コンクリート表面の温度計測は精度の良い結果を得ることは難しい。そこで本実験での表面温度 T_s は、定常状態での試験体内部の温度勾配から最小 2 乗法により表面の温度を推定した。

(2) 風速と各種養生方法の熱伝達率の関係

図-7には各種養生方法の熱伝達率と風速の関係を示す。どの養生方法においても、基本的に風速が大きくなるにつれて熱伝達率も大きくなり、熱伝達率が小さい養生ほど風の影響を受けない傾向にあった。コン示⁶⁾での熱伝達率の値は、養生方法の違いによって 5~8W/m²°C程度の範囲にある(無風時のみ規定)のに比べて、実験結果では無風時は同程度であったが、風速 4m/sec 時では 3~16W/m²°C程度であった。

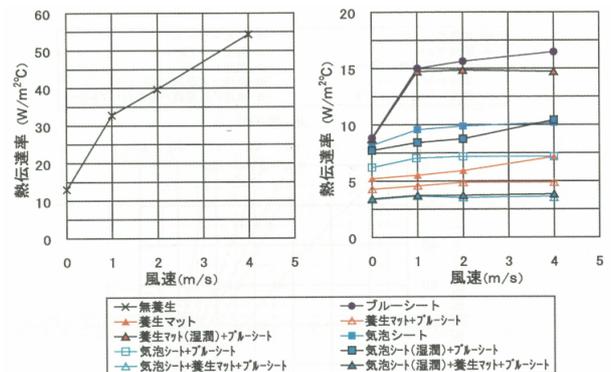


図-7 熱伝達率と風速の関係

また、同じ養生方法でも養生材が湿潤である場合の方が熱伝達率は大きくなる傾向にあり、養生材が水分をまた風速 4m/sec 時でのコンクリート露出面の熱伝達率は、コンシ⁶⁾では 20W/m²C 前後であるのに比べて、実験結果では 54W/m²C となった。吸収しやすい材質ほどその傾向が大きくなることも明らかとなった。このことから、養生材が水分を含んだ場合は風の影響をより受けやすくなることがわかった。

3.3 解析による検証と考察

既往の論文¹⁾の検討結果から、熱伝達率が大きくなると温度下降勾配に大きな影響を与え、温度応力に悪い影響が出ることが確認されている。本節においては、上記論文¹⁾において提案した解析モデル(図-8)と物性値を使って温度応力解析実施して解析結果を考察する。

実験結果から風速 4m/sec の環境条件を想定して養生種類別に温度応力解析を実施する。養生種類別の熱伝達率については表-4 を解析入力値とした。熱伝達率の大きな「無養生」、「養生マット+ブルーシート」、「気泡シート+ブルーシート」、「養生マット+気泡シート+ブルーシート」の順に最高温度は低くなっている(図-9)。また床版下面の引張応力については熱伝達率の大きな無養生が最も大きな値を示しており、養生マット+気泡シート+ブルーシートと比較すると 0.7N/mm² もの差異が生じている(図-10)。

表-4 熱伝達率

ケース	養生方法	熱伝達率 (W/m ² C)
ケース1	気泡シート(湿潤)+養生マット+ブルーシート	4
ケース2	気泡シート(湿潤)+ブルーシート	10
ケース3	養生マット(湿潤)+ブルーシート	15
ケース4	無養生	54

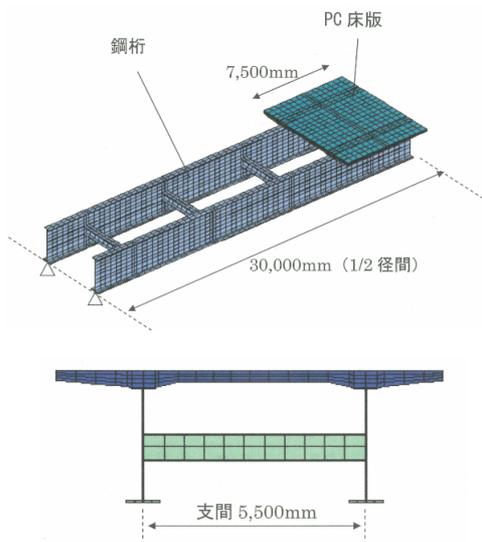


図-8 解析モデル図

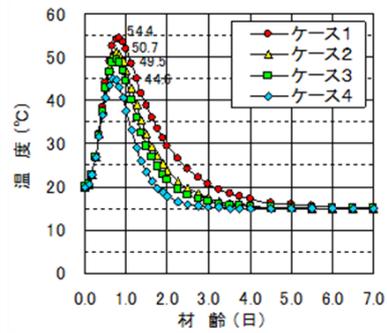


図-9 コンクリート中央温度履歴図—解析結果—

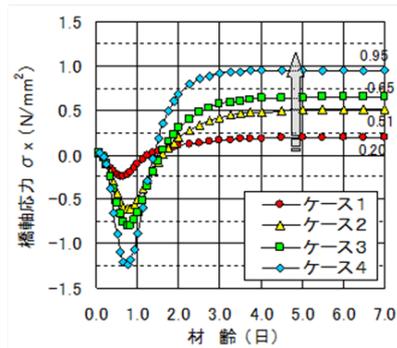


図-10 床版下面応力履歴図—解析結果—

4. 輻射熱に着目した計測と解析

4.1 計測概要

静岡県内で施工された実橋床版において床版内部の温度を計測し、外部環境と養生方法およびコンクリート温度の関係について検討を実施した。計測位置は床版内部の詳細な温度計測を行い、経時的な変化を把握する目的にコンクリート打込み時の床版内部温度の計測を行った。

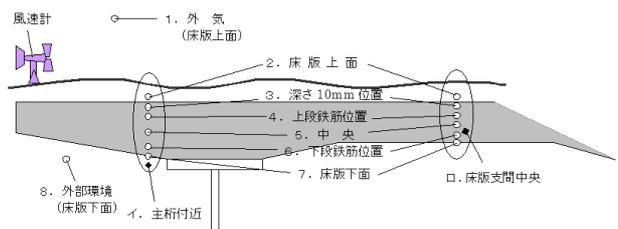


図-11 計測位置図

4.2 実橋計測結果

日照時間の差異による床版表面と断面内の温度差について養生材撤去後の計測結果を図-12 に示す。日照時間 11.6 時間と 0 時間を比較した場合、最高気温がほぼ同じケースであっても断面内の温度差については大きな差異が生じている。また図-13 に養生条件の差異(遮光シートの有無)による最高気温、日照時間がほぼ同じケースであっても断面内の温度差については大きな差異が生じている。この計測結果より輻射熱の影響に対しての養生の重要性、養生材料の重要性が確認できる。

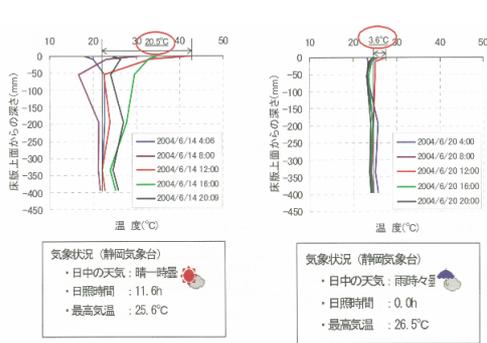


図-12 日照の差異による床版表面と断面内の温度差

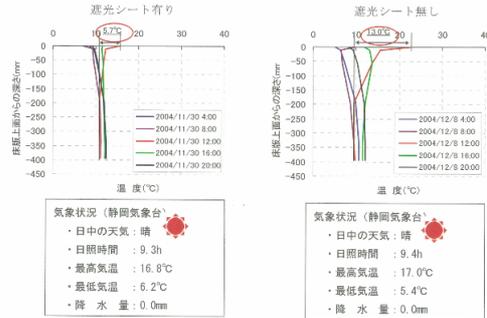


図-13 養生の差異による床版表面と断面内の温度差

4.3 輻射熱に着目した計測結果の解析的検証

コンクリート打込み直後における温度計測結果を分析すると、図-14 計測値の“a”点及び“b”点において床版上面の温度が輻射熱の影響によって上昇して断面よりも大きくなっていることが確認できる (a 点は上下面温度差 5°C, b 点は上下面温度差 8°C)。ここで上面とは上段鉄筋位置におけるコンクリート温度であり、下面とは下段鉄筋位置におけるコンクリート温度であるため、床版表面と断面内の温度差はさらに大きい可能性が高い。輻射熱の影響に対する解析は、既往の論文⁴⁾より仮想外気温を温度応力解析における環境条件として入力することにより応力を評価することが提案しており、この解析手法により上記の断面内温度差を応力評価すると図-15 のように輻射熱の影響がない場合と比較して 0.4N/mm² 程度の引張応力が発生することが確認できる。

5. まとめ

- 温度上昇勾配や温度下降勾配については無養生を除き養生方法によって大きな差異はでない。
- 断面内の温度勾配は、気泡シート+ブルーシートの組み合わせが最も小さくなった。
- コンクリート表面の保湿性能についても、気泡シート+ブルーシートの組み合わせが最も優れていた。
- 風の影響を最も受けない養生方法は、気泡シート+養生マット+ブルーシートの組み合わせであり、風速 4m/sec を作用させた場合、応力換算すると無養生と比較して 0.8N/mm² の引張応力低減の効果が数値

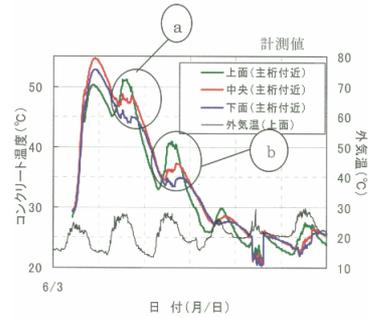


図-14 床版コンクリート温度履歴

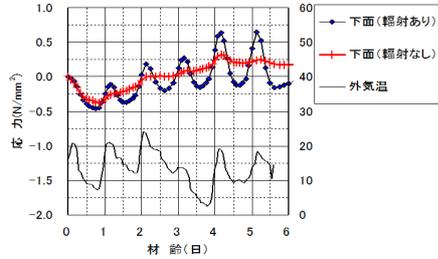


図-15 床版下面応力履歴 解析結果

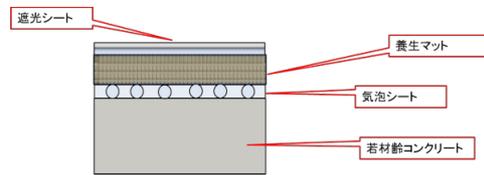


図-16 推奨する養生方法

解析より確認できた。

- 輻射熱の影響を除去するためには、反射率の高い遮光シートを採用する事が効果的であった。
- 以上の事から、コンクリート床版の養生方法については、気泡シート+養生マット+遮光シート (図-16) の組み合わせを推奨する。

参考文献

- 塩永亮介, 師山 裕, 中村隆志, 津田久嗣: 場所打ち PC 床版の温度計測と応力評価 に関する検討(下), 橋梁と基礎, 2004 年 9 月
- 村上祐治, 杉山 律, 小林貞之, 三浦信隆: コンクリートの養生材の効果に関する基礎実験, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集 V-362
- 倉田幸宏, 河西龍彦, 高瀬和男, 丸山久一: 有限要素法解析による長支間場所打ち PC 床版の施工時における応力評価に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 49A, pp. 825-832, 2003 年
- 倉田幸宏, 河西龍彦, 師山裕, 雪田憲子, 丸山久一: 鋼 2 主桁橋 PC 床版の輻射熱による変形挙動について, 構造工学論文集 Vol. 50A, pp. 1183-1189, 2004 年
- 師山裕, 塩永亮介, 倉田幸宏: コンクリート床版における養生方法に関する実験的検討, 石川島播磨技報 44 巻 2 号, pp137-144, 2004
- 土木学会: コンクリート標準示方書施工編