

鋼2主桁橋 PC 床版の輻射熱による変形挙動について

The behavior of PC slabs of two main girders bridge attributable to the effects of radiant heat

倉田幸宏*, 河西龍彦*, 師山裕*, 雪田憲子**, 丸山久一***

Yukihiro KURATA, Tatuhiro KASAI, Yu MOROYAMA, Noriko YUKITA and Kyuichi MARUYAMA

*日本橋梁建設協会 床版研究委員会 (〒104-0061 東京都中央区銀座 2-2-18)

**日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

***Ph.d. 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-12)

Cracks were identified in the construction verification experiment of cast-in-place PC floor slab using movable forms performed and they were considered mainly caused by the effects of varying sunshine. In the time when cracks were found, a great temperature difference was existent in the cross sections due to the effects of solar radiation, and the difference between the temperatures at the top edge and those inside were approximately 10 to 15°C. In order to find out the causes of the above cracks, therefore, the authors performed analysis taking into consideration the effects of varying sunshine. As a result, excellent repeatability was confirmed, and it became evident that the sunshine was one of the significant causes of cracks.

Key Words: long span cast-in-place PC slabs, full-scale model, cracks, varying sunshine, radiation, behavioral measurements

キーワード：長支間場所打ち PC 床版，実物大試験体，ひび割れ，日照変化，日射による輻射熱，挙動確認計測

1. まえがき

現在，国内において移動型枠を用いた長支間場所打ち PC 床版を有する鋼2主桁橋の計画・建設が数多く行われている．これらの橋梁形式の場合，床版支間や張出し長が従来の多主桁と比較して大きく，2主桁であることから日照変化の影響により橋軸直角方向断面内において床版が変形しやすい構造となっている．ここで日照変化の影響とは，日射により床版表面が暖められ床版断面内に温度差が発生する現象を言い（以下，日射による輻射熱の影響），合成桁の設計で考慮されている温度差の影響とは異なった現象である．後者がコンクリート床版と鋼桁の温度差を原因とした橋軸方向における桁の全体挙動が主な変形であるのに対して，前者は床版断面内の温度差により床版自身が変形する現象である．

著者らは2001年7～8月の約1ヶ月間にわたって移動型枠を用いた場所打ち PC 床版の実物大試験体による施工検証実験を実施し¹⁾（以下，施工検証実験），床版施工時の発生応力を評価するための解析手法を提案し，上記の因子が床版に発生する応力に与える検討を行った²⁾（以下，H13解析検討）．上記実験の中で，試験体に数カ所0.1mm以下の微小なひび割れが発見された．当初その原因が解析による検討からは特定できないでいたが，その後の詳細な検討から，日照変化の影響，つまり日射による輻射熱が床版に与える影響が原因ではないかと推測された³⁾．

そこで著者らは，上述のひび割れ原因の解明とともに現状においてコンクリート床版の温度応力解析や設計で考慮されていない日射による輻射熱が PC 床版に与える影響を把握することを目的に以下の検討を行った．

1) 輻射熱の影響に対する応力評価に関する検討^{3),4),5)}

日射による輻射熱の影響を考慮に入れた解析手法を提案し，その妥当性を検証すると共に，上述のひび割れの原因を究明し日射による輻射熱の影響が鋼2主桁橋の PC 床版に与える影響を把握する．

2) 輻射熱による床版の変形挙動に関する検討^{5),6)}

約2週間にわたって先述の実物大試験体の変形挙動を連続計測した（以下，挙動確認計測）．このことにより，日射による輻射熱や昼夜の温度変化といった日照変化が鋼2主桁橋 PC 床版の一日毎の変形挙動に与える影響を把握する．

2. 実物大試験体による検証実験

図-1に実物大試験体の一般図を示す．また表-1に実物大供試体に用いたコンクリートの配合を示す．床版の施工は，基準ブロック（①ブロック）を先行してコンクリートを打設し，その2週間後に②ブロックと③ブロックを同日施工で打継ぐ方法で行った．図-2に実物大試験体の床版下面に発生した主なひび割れの状況を示す．また，表-2には代表的な作業項目とひび割れ発生時期を示す．ひび割れは意図的に床版に引張応力を発生するために実

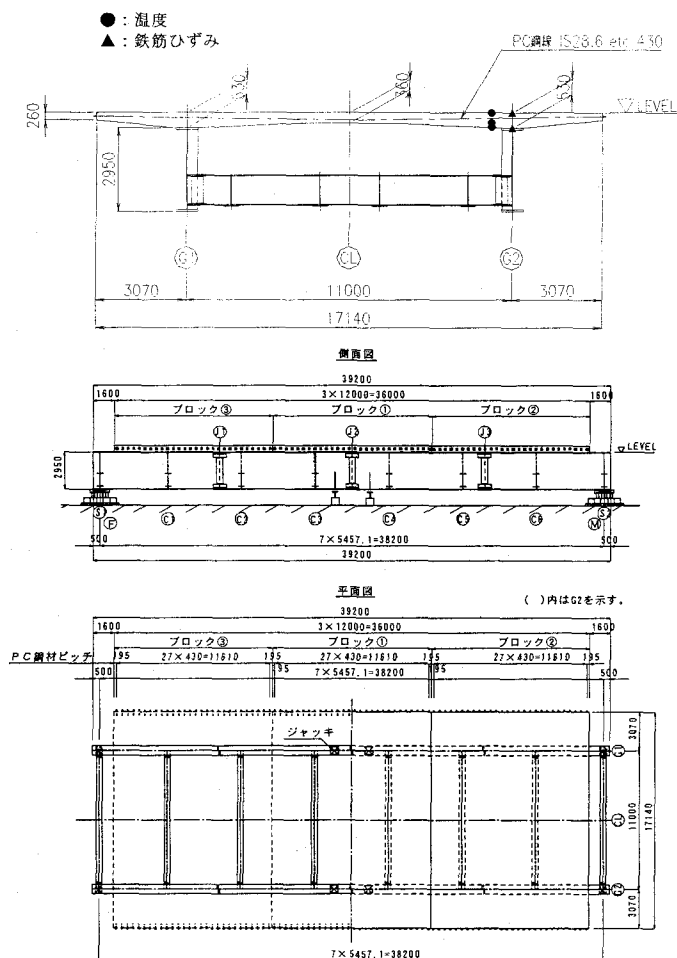


図-1 実物大試験体の一般図

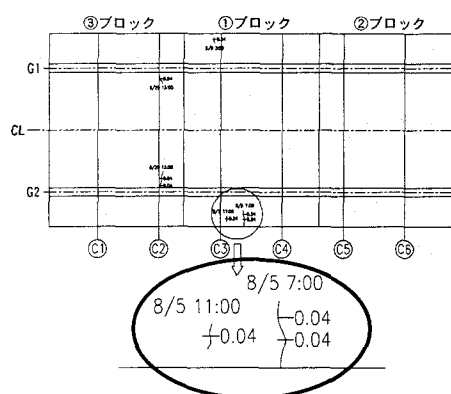


図-2 床版下面のひび割れマップ

表-1 コンクリートの配合表

	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m³)				
					W	C	S	G	膨張材
ブロック①、③ (早強+膨張材)	14	4.5	42.6	44.3	160	346(H)	783	986	30
ブロック② (普通+膨張材)	14	4.5	42.6	44.3	160	346(N)	783	986	30

施したジャッキアップ試験前の2001年8月5日に最初に発見された。ひび割れの発生した位置は、①ブロック G2 桁側の床版張出し部の床版下面においてであり、ひび割

れの方向は橋軸直角方向であった。H13 解析における検討によると、この位置での引張応力度はコンクリートの引張強度を下回っており、この検討からはひび割れの発生原因を説明することができなかった。ここでいうコンクリートの引張強度とは、実物大試験体と同材料・同配合の円柱供試体から得られた引張強度のことである。そこで、基準ブロック (①ブロック) 張出し床版下面にひび割れが発見された当時の状況を再確認したところ、特徴的な以下の事象があった。

- 1) 移動型枠施工を模擬するために設置していた屋根が②ブロックと③ブロック直上のみであり、基準ブロック (①ブロック) 直上には屋根がなかった。そのため基準ブロック (①ブロック) のみ直射日光を受けるような環境下にあった。
- 2) 2001 年 8 月 4 日は晴天で、外気温も高かった。
- 3) 計測結果を再確認した結果、8 月 4 日の基準ブロック (①ブロック) 床版表面 (上面) の温度は、床版内部や下面と比較して 10℃～15℃高くなっていた (図-3 参照、○印位置)。これは、日射による輻射熱の影響と考えられる。さらに同日の H13 解析検討と施工検証実験の結果を比較すると、解析値の床版表面 (上面) の温度が実測値よりも 10℃程度低い結果となっていた (図-3、4 参照、○印位置) ⁴⁾。これは、H13 解析検討では日射による輻射熱の影響が評価できていないことが原因と考えられた。
- 4) 実物大試験体は、日射による輻射熱や昼夜の温度変化といった日照変化の影響を受けて毎日変形を繰り返していることがわかったため、この変形挙動を正確に把握することを目的に、実物大試験体の挙動確認計測を行った。計測項目は床版と鋼桁の温度、変位および外気温とし、2002 年 9 月 12 日から 9 月 24 日までの 12 日にわたって連続計測を行った。変位に関しては変位計による自動計測と共に測量による計測も行った。

表-2 作業項目とひび割れ発生時期

作業項目 および特記事項	日時 (2001 年)	①ブロック 材齢 (日)	②③ブロック 材齢 (日)
①ブロック打設完了	7 月 17 日 (火)	0	-
①ブロック上屋根撤去	7 月 27 日 (金)	10	-
②③ブロック打設完了	7 月 31 日 (火)	14	0
ひび割れ発見	8 月 5 日 (日) 早 朝	19	5
ジャッキアップ試験	8 月 7 日 (火) ～8 日 (水)	21～22	7～8
②③ブロック上屋根撤去	8 月 9 日 (木)	23	9

3. 輻射熱の影響による床版応力の評価

3.1 解析手法の提案

屋外に設置されるコンクリート構造物の温度に与える気象因子としては、全天日射、天空放射、対流熱伝達、水分蒸発による気化熱があり、コンクリート表面におけ

る熱流入(出)量はこれらのエネルギーの和で表される。中でもコンクリート表面に与える影響は、晴天時の日中における全天日射が最も大きいと言われている。しかし、これまでのコンクリート床版の温度応力解析においては、大気とコンクリート表面の気象因子の影響による熱収支は外気温のみを対流熱伝達で扱っているのが現状である。

そこで本検討では、次式に示すように輻射によって伝達される熱量を等価な外気温に換算して熱伝達境界として扱うことにより、日射による輻射熱の影響を簡易的に考慮することとした⁷⁾。

$$T_{eq} = T_0 + \frac{q}{\mu} \sin 2\pi \left(\frac{t}{24} - \frac{t'}{24} \right) \quad \cdots \text{(式-1)}$$

ここで、 T_{eq} は仮想外気温(℃)、 T_0 は時刻 t における外気温(℃)、 q は一日の中での最大熱流入(出)量(W/m^2) (日照時には最大熱流入量、日没時は最大熱流出量を用いる)、 μ はコンクリート表面の熱伝達率($\text{W}/\text{m}^2\text{℃}$)、 t は時刻、 t' は外気温最大時から6時間前の時刻である。つまり、外気温 T_0 の最大時が14時であるとすると、 t' は8時となり、 T_{eq} は14時に最大、2時に最低となる。本解析で用いる養生終了後のコンクリート上面の熱伝達率は、既往の研究⁸⁾やコンクリート標準示方書[施工編](以下、コン示[施工編])⁹⁾を参考に $14\text{W}/\text{m}^2\text{℃}$ とした。また、施工検証実験では熱流入(出)量の計測を行っていないため、本解析では既往の研究^{10),11)}の熱流入(出)量を参考に仮想外気温を推定することとした。

3.2 解析条件

解析条件は、施工検証実験で得られた結果、H13解析検討で用いた解析条件およびコン示[施工編]に基づいて決定している(表-3)。図-5に解析モデルを示す。解析モデルは実物大試験体を再現した3次元モデルとし、鋼桁については板要素、床版についてはリットル要素としてそれぞれの厚さを忠実にモデル化した。なお、床版は鉄筋コンクリートとして扱い、鋼桁上フランジと床版下面は同一節点とした。

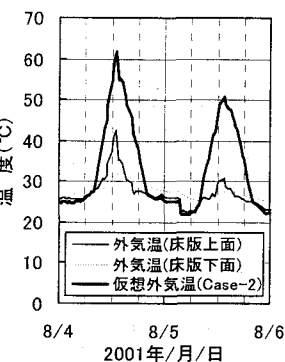


図-6 入力用外気温
(Case-1, Case-2)

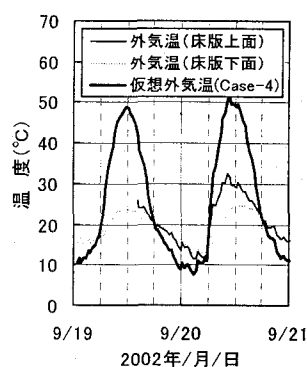


図-7 入力用外気温
(Case-3, Case-4)

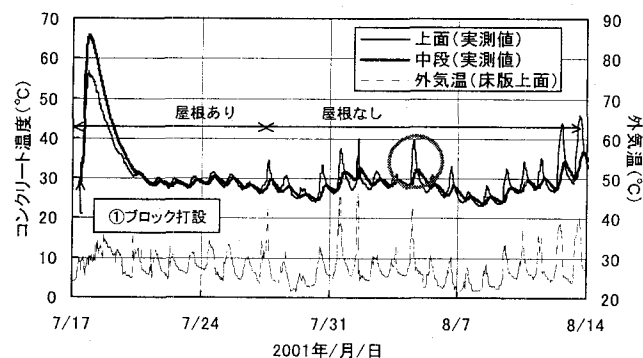


図-3 計測結果 (①ブロック中央床版温度)

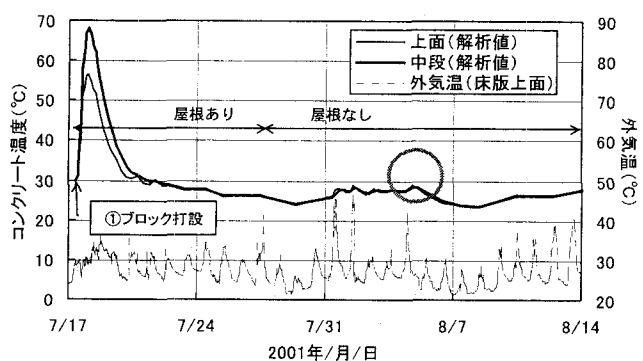


図-4 解析結果 (①ブロック中央床版温度)

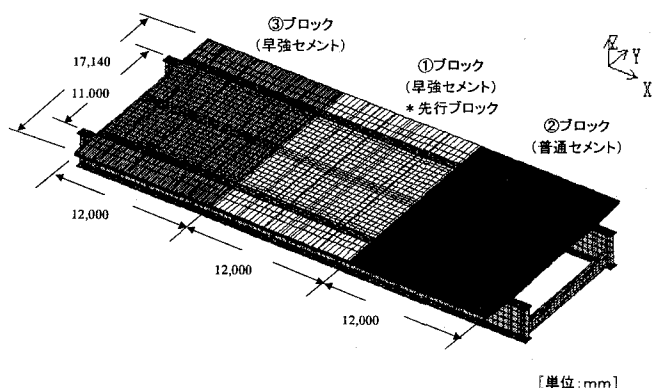


図-5 解析モデル

表-3 解析条件

項目	記号	単位	数値
熱伝達率	λ_c	$\text{W}/\text{m}^2\text{℃}$	2.70
密度	ρ_c	kg/m^3	2300
比熱	C_c	$\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$	1.15
線膨張係数	α_c	$\mu / ^{\circ}\text{C}$	10
設計基準強度	f'_{ck}	N/mm^2	40
圧縮・引張強度	$f'_c(t), f_{tk}(t)$	N/mm^2	コ示方書式 ⁹⁾
弾性係数	$E_c(t)$	N/mm^2	コ示方書式 ⁹⁾
ポアソン比	ν_c	—	0.167

3.3 解析ケース及び入力外気温

施工検証実験中の2001年8月5日に発見された基準ブロック(①ブロック)張出し床版下面の橋軸直角方向ひび割れの原因を究明するために、以下に示す2つのケースについて解析を実施し比較検討を行った。

Case-1) 日射による輻射熱の影響を考慮しない場合

(全長にわたって屋根有りに相当)

Case-2) 日射による輻射熱の影響を考慮する場合

(①ブロックのみ途中から屋根無しに相当)

また、日射による輻射熱が鋼2主桁橋PC床版の変形挙動に与える影響を検討するため、気温の日変動が大きくかつ晴天であった2002年9月19日～21日に着目した解析を以下に示す2つのケースにおいて実施した。

Case-3) 日射による輻射熱の影響を考慮しない場合

(全長にわたって日射を遮断した場合に相当)

Case-4) 日射による輻射熱の影響を考慮する場合

(全長にわたって日射を受けた場合に相当)

解析における入力用外気温を図-6, 7に示す。外気温(床版下面)と外気温(床版上面)は実測値であり、仮想外気温(Case-2, Case-4)は3.1節に従って算定した日射による輻射熱を考慮するための仮想外気温である。今回の仮想外気温は全日晴天と仮定して算定を行った。

Case-1, Case-3の床版上面と床版下面にはそれぞれ外気温(床版上面)と外気温(床版下面)を与えた。Case-2の①ブロック床版上面には仮想外気温(Case-2)を、②③ブロック床版上面には外気温(床版上面)を与え、床版下面には外気温(床版下面)を与えた。Case-4も同様の手法にて、床版上面には仮想外気温(Case-4)を、床版下面には外気温(床版下面)を与えた。

3.4 解析結果

図-8, 9に床版の表面と中段面について解析結果と実測値の温度履歴の比較を示す。実測値では床版上面の最高温度は約40℃あり、床版中段の最高温度に比べ7℃程度高い温度となっている。輻射熱の影響を考慮しないCase-1, 3では実測値と比べ床版上面の最高温度が10℃程度低く、上面と中段の温度差もほとんどない。一方輻射熱を考慮したCase-2, 4では最高・最低温度、温度履歴共に実測値とよく一致しており、日射による輻射熱の影響が精度良く再現できている。

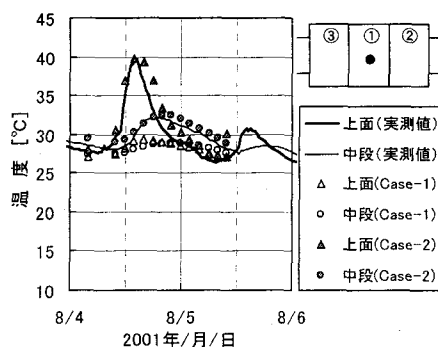


図-8 温度履歴 Case-1, 2 (①ブロック中央・支間中央)

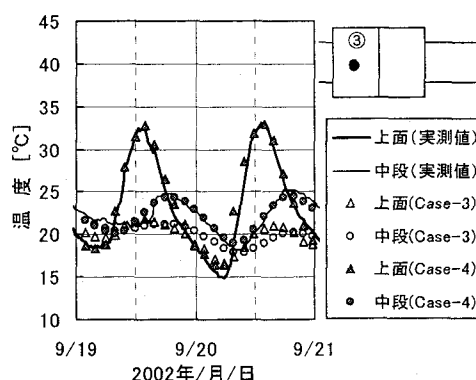


図-9 温度履歴 Case-3, 4 (①ブロック中央・支間中央)

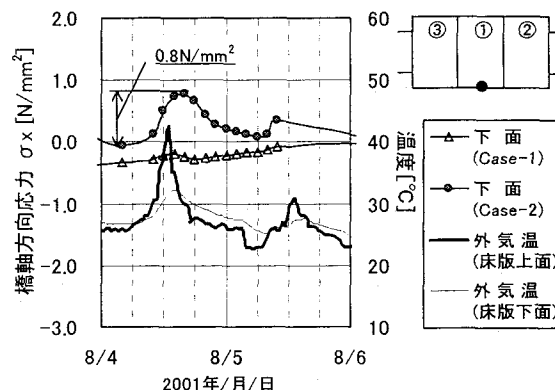


図-10 橋軸方向応力履歴

図-10にひび割れ発生位置である①ブロック張出先端部での橋軸方向応力履歴を示す。Case-1では応力の変動はほとんど見られないが、Case-2では 0.8N/mm^2 の応力振幅がみられた。このことから、日射による輻射熱の影響分の引張応力増分が 0.8N/mm^2 であるといえる。またH13解析検討によると、温度応力やPC緊張等の各種施工ステップを考慮した場合のひび割れ発生箇所の応力は 1.3N/mm^2 であった。よって、発生する引張応力の合計は 2.1N/mm^2 となり、呼び強度 40N/mm^2 のコンクリートを使用した本実験においても、ひび割れ強度は $2.1\sim 2.5\text{N/mm}^2$ 程度と予測され、ひび割れ発生の可能性が高くなることがわかる。

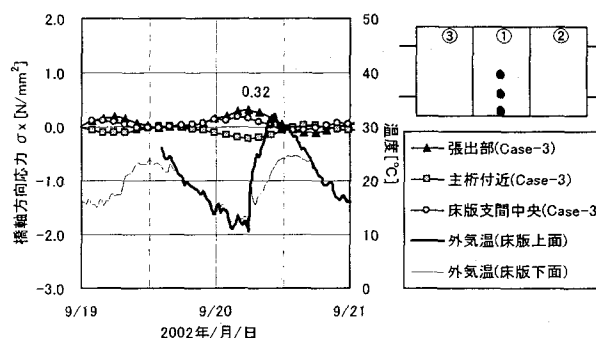


図-11 橋軸方向応力履歴 (床版下面)

図-11, 12 に Case-3 と Case-4 における①ブロック床版下面の張出部, 主桁近傍, 床版支間中央の各部位における橋軸方向応力の履歴を示す。Case-3 では, 床版下面では外気温最低時に張出部にて最大引張応力度が 0.3N/mm^2 となる。Case-4 では, 下面は外気温最高時に床版支間中央にて最大引張応力度が 0.9N/mm^2 となる。つまり, 輻射熱の影響により 0.6N/mm^2 の応力増分があることがわかる。

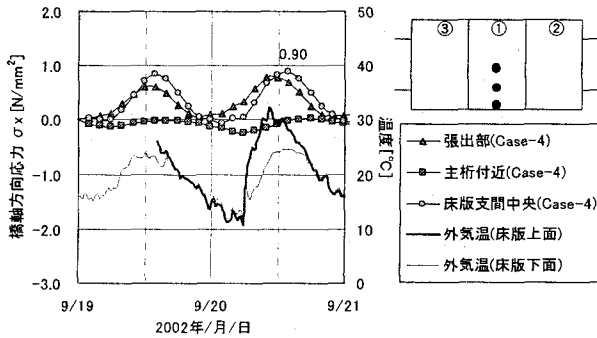


図-12 橋軸方向応力履歴 (床版下面)

4. 輻射熱による床版の変形挙動

図-13 に 2002 年 9 月 20 日 11:51 時の挙動確認計測による①ブロック支間中央位置の変位図を, 図-14 に Case-4 の解析結果をそれぞれ示す。計測値と解析値では, 変形量はそれぞれ 8.0mm と 13.8mm と若干差はあるが, 共に上に凸の変形である。このことから今回行った日射による輻射熱を考慮した解析により, 挙動確認計測結果をおおむね再現することができているといえる。

一方, 輻射熱を考慮しない Case-3 では, 外気温最高時の結果と計測値の変位がまったく合わない事が確認できる (図-15)。このことから, 日射による輻射熱が実物大試験体の変形挙動に与える影響は大きいことがわかる。

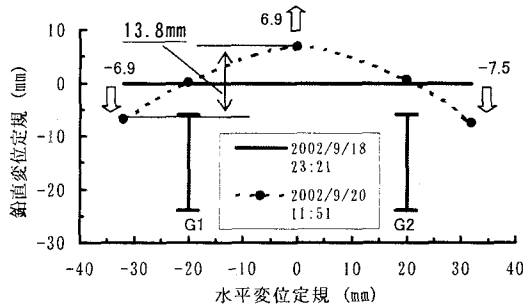


図-13 最高温度時の変位 (計測値)

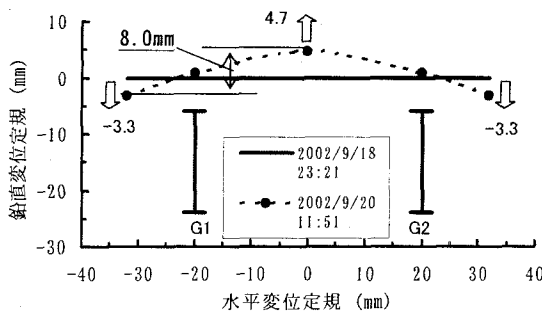


図-14 最高温度時の変位 (解析値 Case-4)

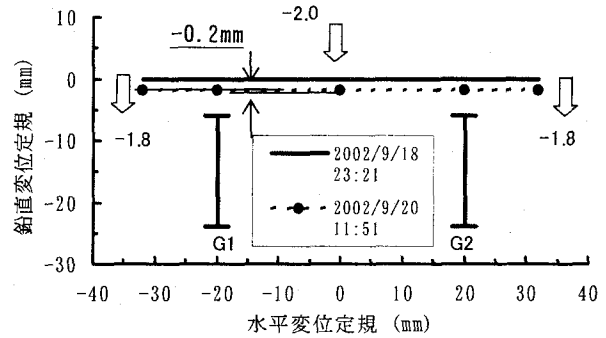


図-15 最高温度時の変位 (解析値 Case-3)

解析結果からの全体挙動を図-16, 17 に示す。輻射熱を考慮した Case-4 では, 輻射熱によって床版上面が膨張するために床版支間中央がせり上がり張出部が垂れ下がる変形挙動となった (図-16)。輻射熱の影響がなければ図-17 のように橋軸方向にたわむ挙動となるところを, 実際には輻射熱による床版上面の膨張によって主桁までも上ぞりさせるような変形挙動となっている。このため主桁による拘束が大きくなり, 床版下面には全体的に橋軸方向に引張応力が発生すると考えられる。

輻射熱の影響を顕著に示す計測結果として雨天時の変位と晴天時の変位を図-18, 19 に示す。これらは同じ時期に計測されたものであり, 計測日の外気温はいずれも 24°C 程度であった。相違する点は, 計測日の天候が輻射の影響を大きく受ける晴天かほとんど受けない雨天かという点である。計測結果は解析結果と同様に輻射の影響を受ける晴天時はより大きく床版が変形していることが確認できる。

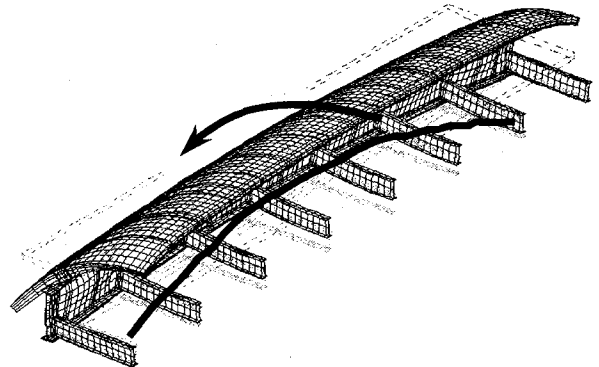


図-16 最高温度時の全体挙動 (解析値 Case-4)

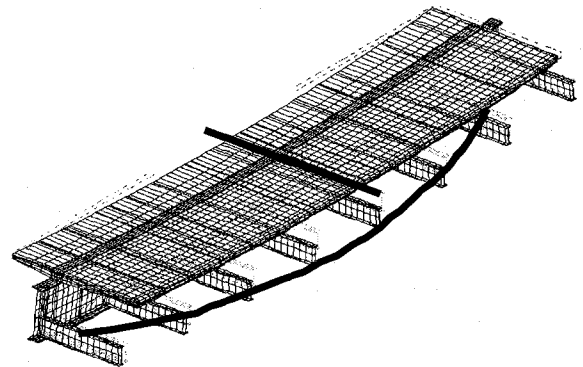


図-17 最高温度時の全体挙動 (解析値 Case-3)

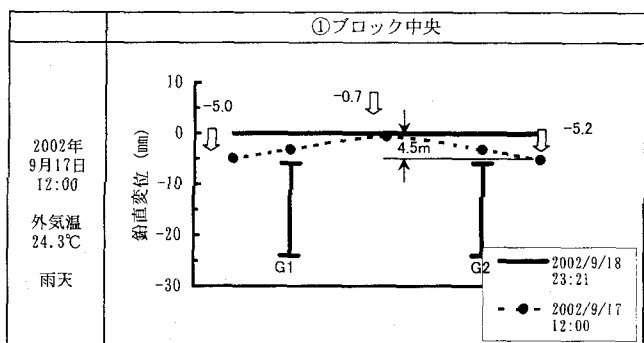


図-18 雨天時の変位(計測値)

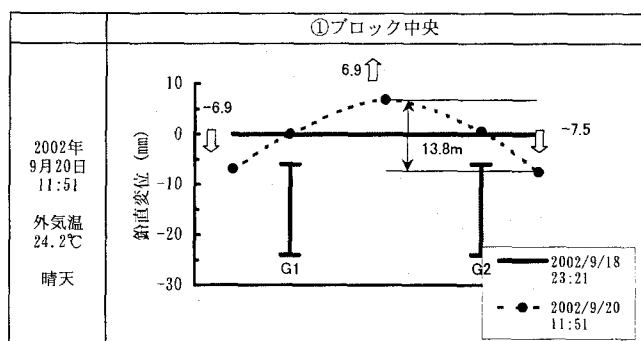


図-19 晴天時の変位(計測値)

5. 考 察

(1) 今回提案した「日射による輻射熱の影響」を考慮した解析の妥当性について

今回提案した「日射による輻射熱の影響」を考慮した解析は、輻射によって伝達される熱量に対して等価な仮想外気温を床版上面に与えることにより有限要素法による温度応力解析を実施したが、床版上面および断面内の温度履歴が計測データと精度良く一致したことより解析の妥当性が検証されたと考える。

(2) 2001年8月5日に発生したひび割れの原因について

H13 解析検討によると、温度応力や PC 緊張等の各種施工ステップを考慮した場合のひび割れ発生箇所の引張応力度は 1.3N/mm^2 であり、ひび割れ原因が特定できなかった。今回の検討結果から、日射による輻射熱の影響分の引張応力増分は 0.8N/mm^2 であったので、合計引張応力度は 2.1N/mm^2 となり、呼び強度 40N/mm^2 のコンクリートを使用した本実験においても、ひび割れの発生する可能性は高かったことが示された。

このひび割れは①ブロック上のみ屋根がない状態での日射による輻射熱の影響に因るところが大きいと考えられる。

(3) 輻射熱による床版の変形挙動について

日最高気温時の橋軸直角方向の変形については、日射による輻射熱を考慮した解析結果と挙動確認計測結果は、どちらも床版支間が跳ね上がり張出部は垂れ下がるとい

う上に凸形状を示していた。このことから、今回行った日射による輻射熱を考慮した解析により、日照変化によるコンクリート床版の実挙動をおおむね再現することができているといえる。

外気温が上昇し日照が始まると、床版上面では日射による輻射熱の影響で温度が上昇しコンクリートが膨張変形する。床版上面が特に膨張することにより、床版断面内で上に凸の変形をしようとする（日射による輻射熱の影響で強制変形が生じる）。一方鋼桁は温度の上昇に応じて伸びることによりたわむように変形しようとする。ここで、床版と鋼桁の逆方向への変形が釣合うことにより、床版下面に橋軸方向の引張応力が発生する。

日射による輻射熱の影響が大きくなるに従って、この変形は大きくなる事から発生する引張応力は全体的に大きくなる傾向が解析結果から確認できる。

(4) 施工時における留意点

1) 外気温の日変動の影響について

外気温の日変動の傾向は季節によって異なる。年最高温度が予想される夏季や年最低温度が予想される冬季よりも、一日のうちの温度差が特に大きい春季、秋季における外気温の日変動の影響には注意が必要であり、適切な養生マットの選定や風対策としての側面養生などの採用が必要と考えられる。

2) 日射による輻射熱の影響の低減について

今回の検討から、床版断面における上に凸の変形挙動は、外気温の影響よりも日射による輻射熱の影響の方が大きいことが確認された。輻射熱の影響で発生する引張応力は、床版上面のみの急激な温度上昇を防ぐことにより低減できる。そのためには、床版上面に遮蔽率の高いマットを敷くなどして日射を遮ることが有効であると考えられる。また、移動型枠を使用している場合であれば、移動型枠の屋根が有効に働く。

また輻射熱により発生する引張応力の増分値は本解析によると 0.8N/mm^2 であったことを考慮すると、施工時において引張応力が発生するステップ（例えば隣接径間床版打設時や PC 緊張時）の時に日射の影響を遮るように着目床版に養生マットを設置するなどの配慮があればひび割れの可能性は低くなると考えられる。

3) 供用時について

供用時については、床版上には舗装と防水層が設置されるため、輻射熱の影響については直接的に床版には作用しないため、問題はないと考えられる。

謝辞：本研究は「場所打ち PC 床版技術検討特別委員会」（日本橋梁建設協会）、「場所打床版施工対策委員会」（プレストレスト・コンクリート建設業協会）が協力して実施した実物大試験体による施工検証実験等の諸検討の一部として行ったものであることを付記し、関係者には深く感謝の意を表します。

また本件に関しましては、大阪大学の松井教授をはじめ、「第二東名高速道路 長支間場所打ち PC 床版の設計施工に関する技術検討委員会」（（財）高速道路技術センター：日本道路公団静岡建設局委託）他、多数の関係の方々のご指導・ご協力のもとに実施できましたことを、ここに附記させていただきます。

参考文献

- 1) 八部順一，小林潔，竹中裕文：移動型枠を用いた場所打ち PC 床版の施工検証実験，土木学会年次講演会，CS4-010，2002.9
- 2) 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
- 3) 雪田憲子，庄中憲，河西龍彦：長支間場所打ち PC 床版の温度履歴について，CS4-015，2002.9
- 4) 師山裕，倉田幸宏，雪田憲子：長支間場所打ち PC 床版実物大試験体のひび割れに対する日照変化の影響に関する解析的検討，CS6-022，2003.9
- 5) 吉川信二郎：講座「耐震設計・温度解析」，プレスレストコンクリート，Vol.44，No.5，2002（社）
- 6) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，1985.11
- 7) 倉田幸宏，師山裕，雪田憲子：日照変化の影響による長支間場所打ち PC 床版の挙動に関する解析的検討，CS6-023，2003.9
- 8) 雪田憲子，倉田幸宏，河西龍彦：長支間場所打ち PC 床版の日照の影響による変形挙動，CS6-021，2003.9
- 9) （社）土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002.3
- 10) 松井邦人，T.F.Smith，西田徳行，椎名貴快：輻射熱の影響を考慮したマスコンクリートの温度解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，1996
- 11) 西田徳行，椎名貴快，松井邦人，T.F.Smith：気象現象の計測とコンクリート躯体温度への影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，1999

(2003 年 9 月 12 日受付)