

コンクリート構造物施工時のひび割れ解析技術

Analytical Prevention of Concrete Cracks during Construction

塩 永 亮 介	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部
師 山 裕	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部
倉 田 幸 宏	物流・鉄構事業本部橋梁事業部建設部 課長 技術士（建設部門）
田 沢 雄二郎	技術開発本部 技師長 工学博士 技術士（建設部門）

コンクリート構造物の施工では、打込み後の内部発熱に伴う温度応力や養生終了後の乾燥収縮作用によってひび割れが発生し、問題となるケースが多い。このため事前にひび割れ発生位置や時期を予測し、十分な対策を講じることが必要とされてきた。そこで FEM 温度応力解析を用いた施工時の温度やひずみ挙動を精度良くシミュレーションする技術の開発を進め、ひび割れ抑制への配合検討や施工方法の提案などを行ってきた。本稿では本解析技術の概要を示すとともに幾つかの検討事例を紹介する。

Cracks cause problems in concrete structures for construction, resulting from thermal stress due to heat of hydration and dry shrinkage strain after wet curing. Prediction of the cracking spot and time is necessary for the adoption of countermeasures. The progress of development thermal stress analysis by FEM could simulate the behavior of concrete temperature and strain during construction, and indicate the best countermeasures for the mixture proportions or construction method to decrease concrete cracks. This paper explains this analytical technology for preventing cracks, and presents some examples that investigate various concrete structures.

1. 緒 言

コンクリートは材料、施工、環境、構造といった種々の要因によってひび割れが発生しやすい材料である。また構造物の供用前に発生したひび割れは、設計上の許容ひび割れ幅以内のものであっても、美観の低下や劣化促進の起点になりやすいという懸念から細かな原因究明や補修工事が必要となるケースが現状として少なくない。このようにして生まれる計画外の工費を削減するためにも、ひび割れ発生メカニズムを正確に捕らえ、事前に適切なひび割れ対策を提示することが求められていた。

施工時に発生するひび割れの要因の一つとして、コンクリート特有の性質である温度応力が挙げられる。これはコンクリートが硬化していく過程の内部発熱に起因する発生応力で、従来は比較的断面の大きく内部発熱量が過大となるダムコンクリートやフーチング基礎など（マスコンクリートと称す構造）の施工に限る問題とされていた。しかし近年、これ以外の構造物でも高強度化に伴うセメント量の増大で発熱量も増し、施工時の温度応力がひび割れ要因の一つとして無視できないものと考えられてきている。さらに床版や壁構造などの体積に対する表面積が大きな構造物

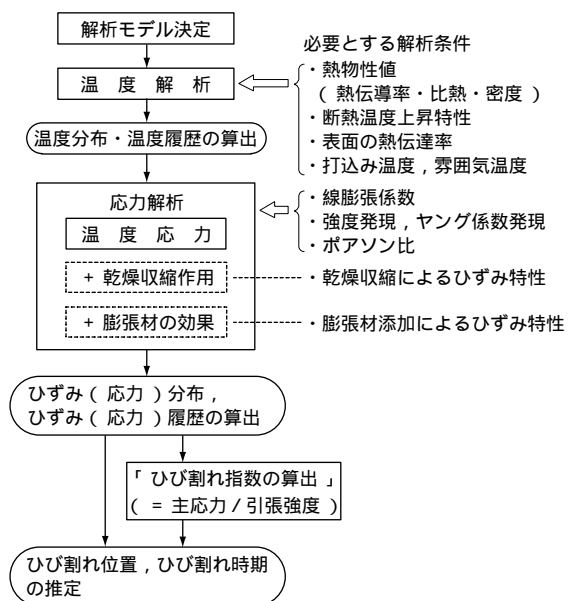
では、コンクリートの乾燥収縮ひずみが進行しやすく、早い時期にひび割れが発生してしまうケースも増えている。

そこで筆者らは、これらの現象を正確に把握するため、FEM 解析によるコンクリート構造物施工時の温度応力解析に着目し、ひび割れ発生位置や発生時期を定量的に予測する解析評価技術の開発を進めてきた。この結果、構造物内部の温度や応力挙動を精度良くシミュレートでき、事前のひび割れ対策に十分適用可能な技術を整備した。本稿では、このコンクリートの温度応力解析技術の概要を説明するとともに、社内コンクリート工事に対する既往のひび割れ検討事例を幾つか紹介する。

2. 解析の概要

2.1 解析手法と適用範囲

本解析は、セメントの水和発熱特性を考慮した熱伝導解析と強度発現性を考慮した非線形応力解析までの一貫した計算を行う。これによって、コンクリート打込み直後からの構造物内部の経時的な温度およびひずみ（応力）を算出できる。温度応力解析のフローを第 1 図に示す。解析ソフトは、コンクリート構造物専用の汎用温度応力解析ソフト ASTEA-MACS を用いている。基本的には従来のマスコン



第1図 温度応力解析のフロー
Fig. 1 Flow of thermal stress analysis

クリートの温度応力解析の流れと同様ではあるが、それに
加え乾燥収縮作用や膨張材の添加による導入ひずみの効果
も考慮できる評価手法を新たに導入している。

本解析技術の適用項目を第1表に示す。設計段階におい
ては温度ひび割れに対する補強鉄筋の検討、また施工計画
段階においてはひび割れ抑制のためのセメントの種類や単
位量の検討や最適養生方法の選定などに用いられる。施工
後の対応ではひび割れ発生後の原因究明やその後のひび割
れ進展予測などが主な検討項目である。

2.2 解析条件の設定

第1図で示したように、本解析では温度解析および応力
解析を進めるに当たり、コンクリートの熱物性値や力学的
物性値などの解析条件を設定する必要がある。これらの物
性値は、コンクリート標準示方書「施工編」⁽¹⁾（以下、コ
示「施工編」と呼ぶ）にその参考値や推定式が示されてい
るが、従来のマスコンクリートを対象としているため、
新たに床版・壁構造などの解析を行う場合、そのままの
参考値を用いては解析結果の精度が悪くなることも明
らかとされてきた⁽²⁾。このため別途モデル試験体によ

第1表 適用項目
Table 1 Applicable problem

作業区分	適用項目
設計段階	・ ひび割れ位置・時期の照査 ・ ひび割れ補強鉄筋量の検討
施工計画段階	・ 最適配合の検討（単位水量、セメントの種類など） ・ 養生方法、養生期間の検討 ・ 打設リフト高さ、打設間隔の検討
工事完了後（ひび割れ後）	・ ひび割れ発生原因の解析的究明 ・ ひび割れ進行の予測

る実験や解析的検証を行い、幾つかの解析条件の設定に関
してはコ示「施工編」の参考値や算定式とは異なる設定法
を採用した。

(1) 温度解析条件の検討

第2表に温度解析条件を示す。一般的なコンクリー
トの熱物性値（熱伝導率、比熱、密度）はコ示「施工
編」の参考値に基づくが、コンクリートの発熱特性を
決める断熱温度上昇特性や表面の熱収支を決める熱伝
達率については、対象構造や環境条件によって修正す
る必要がある。

断熱温度上昇曲線は、通常コ示「施工編」に基づき
以下に示す(1)式によって設定される。しかし、床版
や壁構造を対象とする場合、実際の断熱温度上昇履歴
にあった近似式である(2)式を用いるほうが解析結
果の精度が良いことが分かってきた⁽³⁾。

$$Q(t) = Q_{\infty} \times \{1 - \exp(-\alpha \cdot t)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q(t) = Q_{\infty} \times \{1 - \exp(-\gamma \cdot t^{\delta})\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

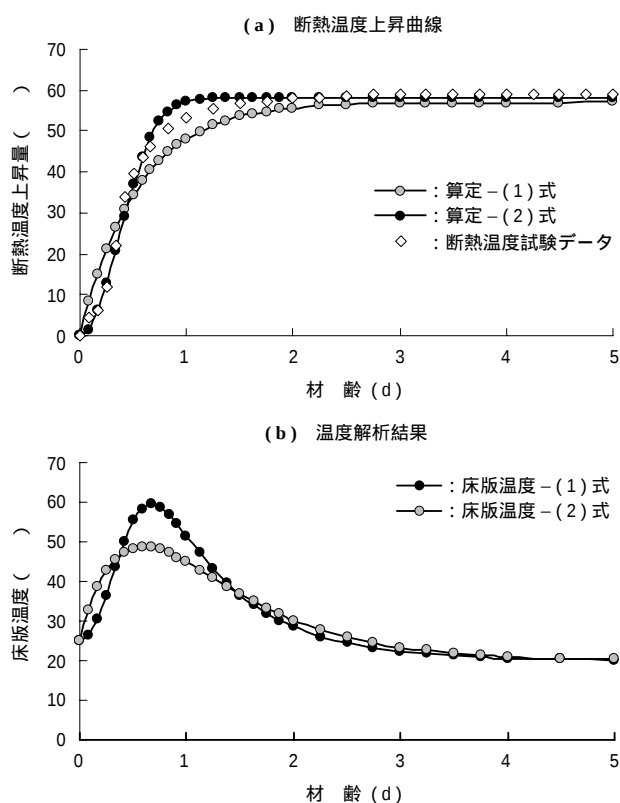
ここで、式中の Q_{∞} は終局断熱温度、 α および γ, δ
は発熱速度にかかわる係数でそれぞれセメント量や打
込み温度によって決定される^{(1),(4),(5)}。

第2図に両者の断熱温度上昇曲線（-(a)）を用
いた場合の温度解析結果による床版内部の温度履歴
（-(b)）を示す。入力条件としてはわずかな差である
が、解析結果として最高温度では10℃近い差となる。
これは、床版や壁構造など厚さ50cm以下の構造体の
場合、初期の発熱速度が解析結果に大きく影響を及ぼ
すためである。

構造物表面の熱伝達率の設定に関しては、基本的
には温度解析条件として第2表に示すコ示「施工編」
の参考値を用いるが、構造物の形状や環境条件に合わ
せて修正する必要がある。特に風の影響は大きいため、

第2表 温度解析条件
Table 2 Condition for thermal analysis

項 目	単 位	参考値・算定式		備 考
熱伝導率	W/(m・)	2.6 ～ 2.8		コ示「施工編」の参考値を示す。
密 度	kg/m³	2 300 ～ 2 500		〃
比 熱	kJ/(kg・)	1.15 ～ 1.31		〃
断熱温度 上昇特性		(1)式または (2)式		床版・壁構造の場合は、(2)式を用い る方がよい。
表面の 熱伝達率	W/(m²・)	養生マット	5.0	・コ示「施工編」の参考値を示す。 ・風の影響を受けやすいスラブ上面、 壁側面では養生中でも 14.0以上の値 にする。 ・逆に風の影響を全く受けなく体内面 では、6.0程度の値とした方がよい。
		シート養生	6.0	
		合板型枠	8.0	
		鋼製型枠	14.0	
		養生なし	14.0	



第2図 断熱温度上昇曲線と温度解析結果
Fig. 2 Adiabatic temperature rise and temperature curve inside slabs

断面厚さの薄い床版や壁構造の場合、通常の養生法であっても風を受けやすい面では熱伝達率が $12 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{)}以上$ 、逆に風の影響を受けない面では $6.0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{)}以下$ になることが実験や逆解析によって示されてきた⁽³⁾。そのため、ある程度経験的に設定することが多く、現在この風と熱伝達率の関係についてはモデル実験による検証を行っている。

(2) 応力解析条件

応力解析における解析条件を第3表に示す。本解析

第3表 応力解析条件
Table 3 Condition for stress analysis

項目	単位	参考値・算定式	備考
線膨張係数	/	10.0×10^{-6}	自己収縮を合わせて考慮する場合は、初期材齢時の値を低減する。
圧縮強度	N/mm^2	$f'_c(t) = \{t/(a+bt)\} \cdot f'_c(28) \cdot d$ ($f'_c(28)$: 28日強度)	コ示「施工編」の算定式を用いる。 a, b, d はセメント種類ごとに変わる係数を示す。
引張強度	N/mm^2	$f_t(t) = 0.44 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$	コ示「施工編」の算定式を用いる。
ヤング係数	N/mm^2	$E_c(t) = \phi(t) \cdot 4700 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$	コ示「施工編」の算定式を用いる。 $\phi(t)$ は初期クリープを考慮した低減係数を示す。
ポアソン比	—	0.2	
乾燥収縮ひずみ	—	コ示式または道示式*1	床版・壁構造など、表面積の比較的大きな構造の場合に考慮する。
膨張材による導入ひずみ	—	モデル試験体データから抽出(第4図)	データがない場合は、最大ひずみを 80×10^{-6} 程度にした推定履歴を用いる。

(注) *1: コンクリート示方書式⁽⁶⁾
または道路橋示方書式⁽⁷⁾

では、コンクリートの強度物性値(圧縮強度, 引張強度, ヤング係数)は一定値ではなく、硬化過程を考慮した経時的な物性値を入力する必要がある。対象構造物の強度試験データがない場合は、基本的にコ示「施工編」の各推定式を用いている。

床版や壁構造を検討する場合に考慮することが多いコンクリートの乾燥収縮については、コンクリート要素の経時的なひずみ特性として、あらかじめ収縮ひずみ履歴を条件として与える。乾燥収縮は配合(単位水量)や環境(湿度), 鉄筋量によって変化するので、設計条件に合わせてコ示「構造性能照査編」⁽⁶⁾や道路橋示方書⁽⁷⁾などに基づいて設定する必要がある。

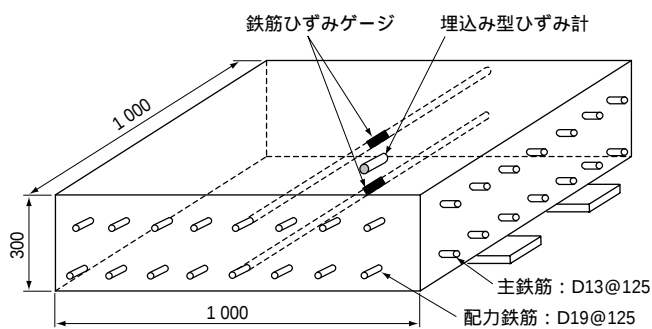
また近年、ひび割れ抑制を目的に膨張材(収縮補償範囲の $20 \sim 30 \text{ kg/m}^3$)を添加するケースが多く、これらを解析的に評価する取り組みも進めてきた^{(8),(9)}。膨張材による導入ひずみの設定法としては、第3図に示すような実構造物を切出したモデル試験体を用いて、膨張材添加および無添加の配合とした両試験体のひずみ差から膨張ひずみを抽出する手法の妥当性が図られてきた。第4図に実験から得られた膨張材による導入ひずみを示す。膨張材を添加することで、初期材齢時に $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ のひずみが導入される。解析上は、乾燥収縮と同様にコンクリート要素の経時的なひずみ特性として設定する。ただ経時的なひずみ履歴については、添加量, 使用セメント, 鉄筋量などによって大きなばらつきがあり定式化するまでに至っていない。実験データがない場合には、設計的に安全側の余裕度を考慮し、最大ひずみ 80×10^{-6} 程度として解析するケースが多い。

2.3 解析結果の精度

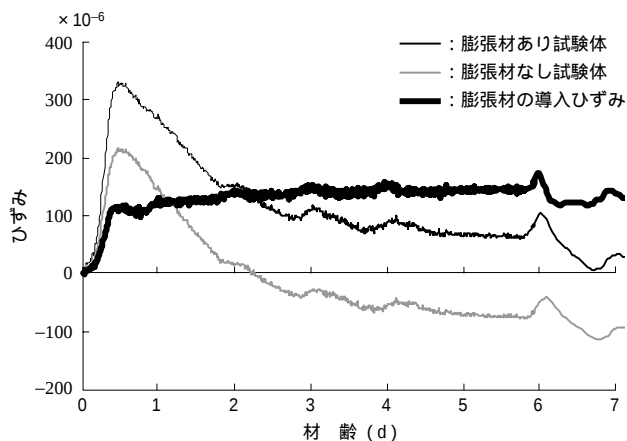
本解析結果(温度, ひずみ)の精度を検証するために実橋床版(「佐分利川橋」日本道路公団)で現地計測実験を実施した^{(9),(10)}。コンクリート床版内部に熱電対やひずみ計を埋込み、打設直後からの挙動を計測し、解析結果との比較を行った。

解析モデルは第5図に示すように合成桁橋の1/2径間を切出し、その径間中央に床版を打設したモデルである。解析条件は2.2節で解説した点に基づき、それぞれ設定されている。また床版には膨張コンクリートを採用しているため、モデル試験体から抽出した膨張ひずみデータ(第4図)を用いた。

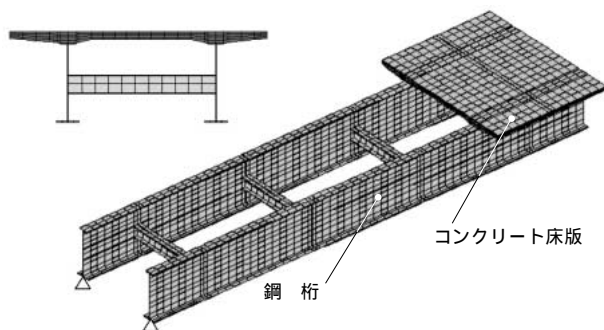
コンクリート床版の温度履歴に関して、実測値と



第3図 床版切出しモデル試験体 (単位: mm)
Fig. 3 Slab scale model for tests (unit: mm)

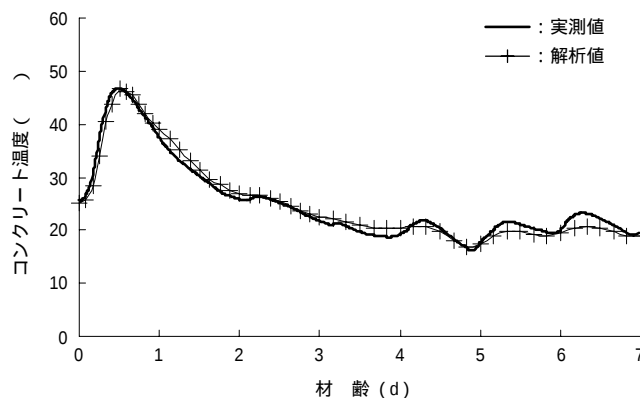


第4図 膨張材による導入ひずみ
Fig. 4 Expansive strain

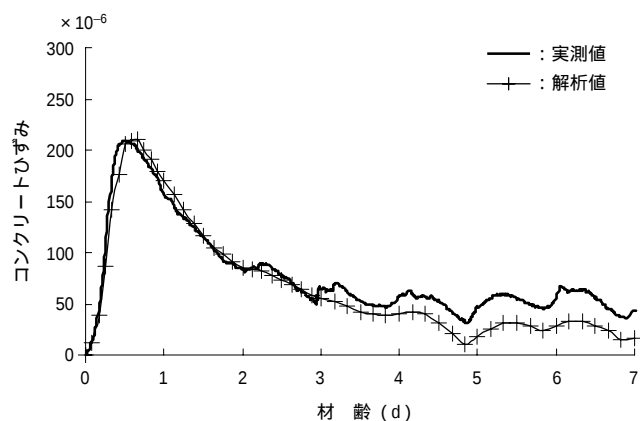


第5図 FEM 解析モデル
Fig. 5 FEM analysis model

解析値の比較を第6図に示す。また同位置の橋軸方向の床版ひずみ履歴についても実測値と解析値の比較を第7図に示す。温度およびひずみとも解析値は実測データと非常に良く合致している。これらは鋼桁上の計測点における比較であったが、ほかの計測点(支間中央部、張出し部)でも同様に解析値は実測データをシミュレートしていることから、本解析手法が十分な解析精度をもつことを確認した。ひずみ履歴の精度を確認したことから、解析では同時に応力値も算出する。解析モデル全体の引張主応力分布を示せることで、ひび割れ発生の箇所やその時期を推測することを可能とした。



第6図 床版温度履歴
Fig. 6 Temperature variation inside slab



第7図 床版ひずみ履歴
Fig. 7 Strain variation inside slab

また、ひび割れ発生の定量評価の手法としてひび割れ指数 (I_c) が用いられることも多い。これは解析で求められる引張主応力 (σ_c) とコンクリートの引張強度 (f_t) との比で表され、その値が小さいほどひび割れが発生する確率が高いと判断される指標である。今後、性能規定型の設計に移行するに当たり、ひび割れ指数の制限値が要求性能として設定されることも考えられる。このような場合に本解析技術を適用すれば、有効な配合条件や施工方法の提案などを短期間で検討することが可能である。

3. 解析事例

3.1 コンクリート床版の事例

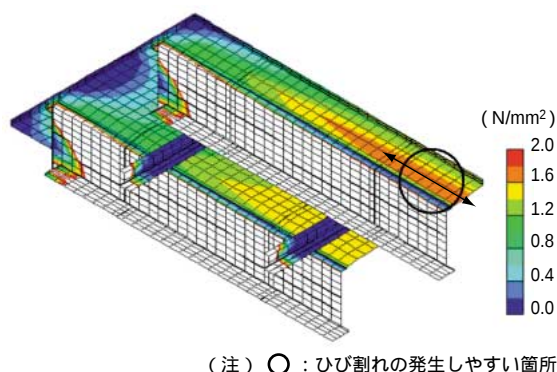
橋梁のなかでも合理化構造として採用が増えている少数主桁橋のコンクリート床版では、ここ数年、施工時のひび割れ損傷がクローズアップされた。このような鋼桁および箱桁上に現場打ちされるコンクリート床版では、断面厚さが従来よりも増したことによる温度応力の増加やコンクリートの乾燥収縮作用などが、ひび割れ原因として挙げられている。

そこで鋼桁および床版をモデル化し、温度応力解析を用いてひび割れ発生を検討するケースが増えている。ここでは、コンクリートの水和発熱以外にも乾燥収縮作用も考慮させる。第 8 図は床版下面の引張応力分布である。解析結果から床版の張出し部下面には橋軸方向に大きな引張応力が生じていることから、橋軸直角方向のひび割れ発生が予想される。これは実橋で確認された床版のひび割れパターンとほぼ合致しており、ひび割れ発生時期も解析によって予測された期間に生じたものであった。このように床版構造に関しては解析精度が確認されていることから、現在では材料や施工の条件を変えたパラメータ解析などで施工前の検討に対応するケースが多い。

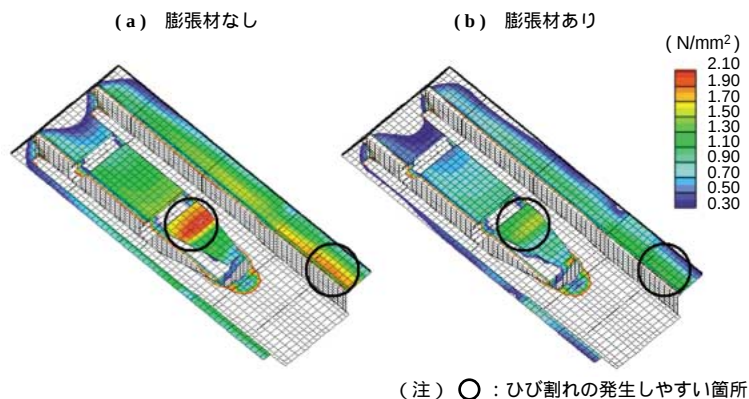
床版のひび割れ抑制対策としては、主に単位セメント量を減じて発熱量を下げる対策や、断熱性の高い養生材に変更し急激な温度降下を防ぐ対策などが挙げられる。また最近では、乾燥収縮によるひび割れの対策として、膨張材を添加（収縮補償範囲の 30 kg/m³ 程度）して初期に膨張ひずみを導入させる対策をとることが多い。

この膨張材添加によるひび割れ抑制効果に関しては、現象として把握されていても実構造物において定量的に示された例は少なく、そのため本解析による評価を実施した。第 9 図は、桁部および箱桁部をもつ現場打ちコンクリート床版の引張応力分布の比較である。膨張材が無添加の場合、2.0 N/mm² 以上の引張応力が発生していた部位でも、膨張材の添加によって 1.5 N/mm² 程度に抑えられることが示された。第 10 図は床版内部の応力履歴を示しているが膨張材を添加した場合は、圧縮側へ応力履歴をシフトさせる効果があり、引張強度に対してより余裕がでることから、ひび割れ発生確率は大幅に低減される。

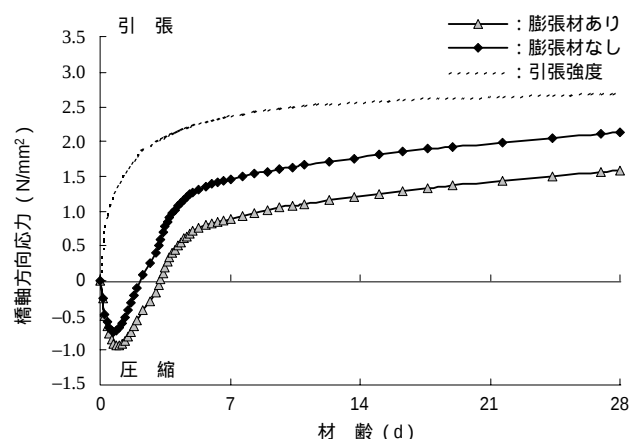
また床版の付帯構造物である地覆・壁高欄の施工の影響



第 8 図 床版下面の引張応力分布
Fig. 8 Distribution of tensile stress under slab

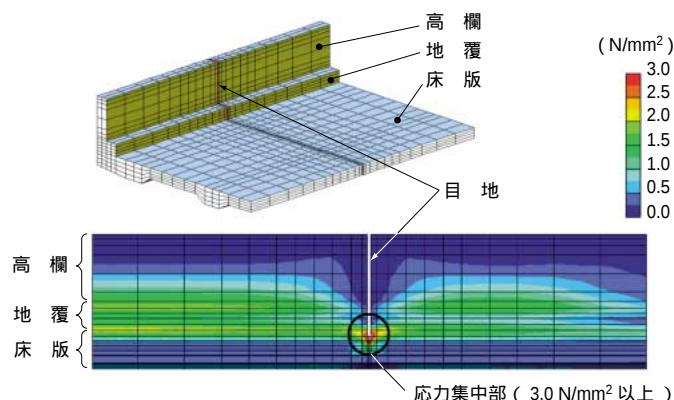


第 9 図 床版引張応力分布の比較
Fig. 9 Distribution of tensile stress comparison



第 10 図 応力履歴の比較
Fig. 10 Stress variation comparison

によって、床版にひび割れが発生する事例も少なくない。地覆や壁高欄に設けた誘発目地（V カット目地）や完全目地によって、その目地下端部の床版にひび割れを発生させてしまう。第 11 図は、床版上に設置した地覆・壁高欄目地の応力解析結果である。壁高欄が橋軸方向に乾燥収縮することによって、目地下端部の床版には局所的に大きな引張応力が発生する。この事例や解析結果を踏まえて、現在



第 11 図 目地部の応力解析結果
Fig. 11 Tensile stress at joint section

は地覆部に誘発目地を設けず、補強鉄筋を追加する対策を挙げている。

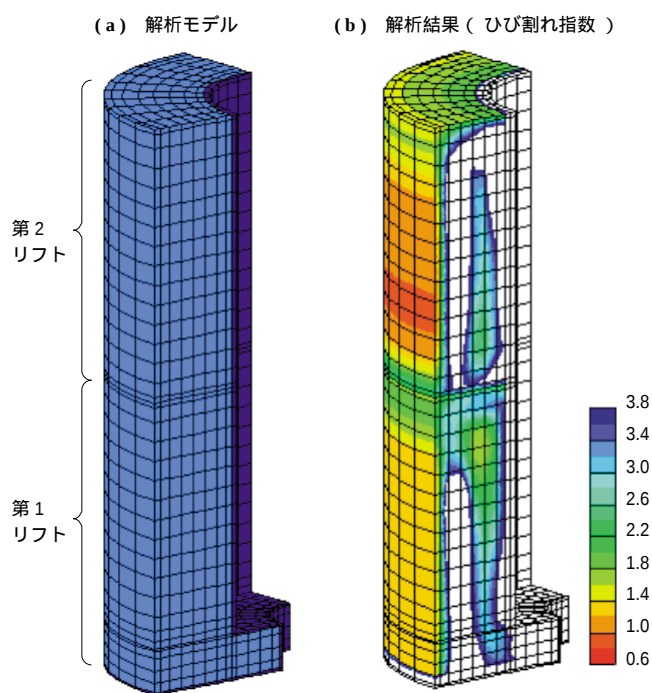
3.2 ポンツーンの事例

海洋浮体構造物であるポンツーンや栈橋などでは、橋梁床版と同様に版厚が 150 ～ 300 mm と薄く、内部の鉄骨や鋼殻の拘束も受けやすいことから施工初期段階でもひび割れが発生しやすい。また沿岸や海洋は鋼材にとっては腐食環境であるため、ひび割れ幅の規制も通常の構造物に比べて厳しくなる。

第 12 図は浮消波堤（PC ポンツーン）を切出した解析モデル（-（a））における温度応力解析結果（-（b））である。先行して打設した底版コンクリートの拘束を受け、側壁コンクリートに軸方向の引張応力が発生する。結果として側壁に鉛直方向のひび割れが入りやすい。ひび割れ原因として乾燥収縮が主になることから、対策として初期乾燥を防ぐ湿潤養生の徹底や、底版と側壁の収縮ひずみ差をつけないように打設間隔の短縮などが挙げられる。

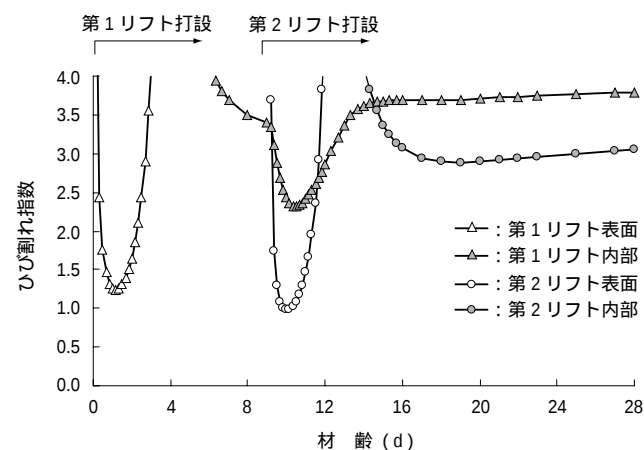
3.3 容器構造物の事例

LNG タンク防液堤や使用済燃料貯蔵容器（コンクリートカスク）など、その仕様性能において施工時のひび割れに十分に注意する必要がある。第 13 図にコンクリートカスクの 1/4 解析モデル（-（a））と温度応力解析結

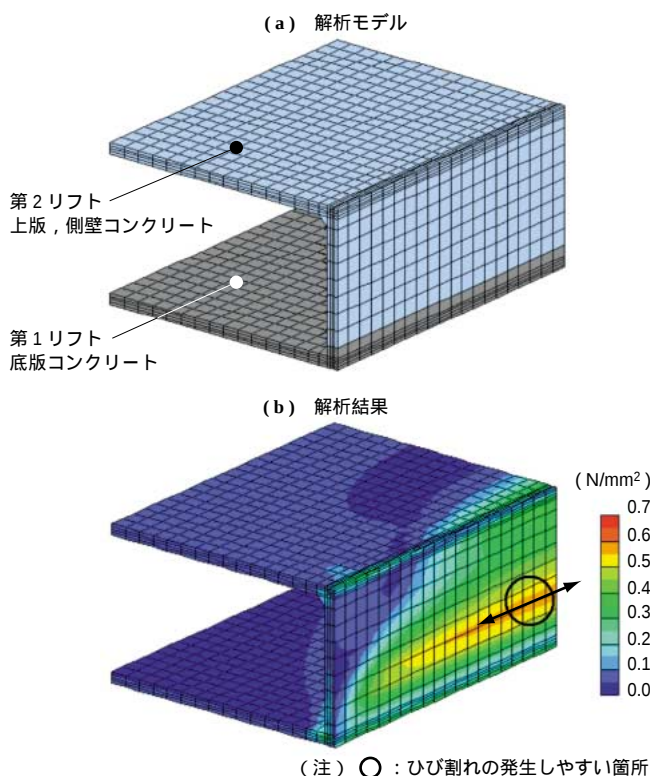


第 13 図 コンクリート製容器の温度応力解析例
Fig. 13 Thermal stress analysis of concrete cask

果（-（b））を示す。断面厚さ 80 cm 以上になるため水と熱に伴う温度ひび割れが懸念された。解析条件は現場の施工計画に基づき、コンクリート配合や施工方法、施工時の環境条件などを考慮している。また本解析結果は、ひび割れ指数の最小値の分布を示している。容器表面では比較的ひび割れ指数が小さく、ひび割れの可能性が高い。特に第 2 リフトの表面では、第 1 リフトとの打継ぎ面の外部拘束も作用し、ひび割れ指数が 1.0（＝ひび割れ確率 50％）程度となる箇所が見られた。第 14 図に各位置のひび割れ指数の履歴を示す。表面位置のひび割れは打設後 1.5 ～ 2.0 日と初期材齢時で厳しくなることが分かる。ひび割れ抑制対



第 14 図 ひび割れ指数の履歴
Fig. 14 Distribution of crack index



第 12 図 PC ポンツーンの温度応力解析例
Fig. 12 Thermal stress analysis of PC pontoon

策としては内外の温度差をつけないよう発熱量を抑える配合の選定や、初期に表面温度が下がらないような養生を施すなどの対策が挙げられる。

4. 結 言

コンクリート構造物の施工において、セメントの水和発熱や乾燥収縮に起因するひび割れに関して、FEM 温度応力解析を適用することによって、ひび割れ位置、ひび割れ時期など定量的なひび割れ発生の評価を可能にした。特に床版や壁構造を対象とする場合には、従来のマスコンクリートを対象とした解析条件とは異なる設定が必要であることを示し、この精度についても実構造物における計測実験で確認した。

現在、施工前に本解析を用いたパラメータ検討を進め、材料面や施工手法での対策提案を行い、現場施工におけるひび割れ損傷事例の減少を図っている。また、ひび割れ抑制を目的に用いられてきた膨張材の適用に関して、これまで定性的な効果把握であった応力低減効果を、本解析によって定量的に示したことで、膨張コンクリートが標準仕様となる工事も増加してきた。

しかし、技術的課題はまだ残されており、特にひび割れ幅の算定や内部鉄筋のモデル化などの解析技術、応力算定にかかわる初期ヤング係数やクリープ特性の把握など、設計や現場のニーズに合った課題解決に向け、現在さらなる研究開発を進めている。

参 考 文 献

- (1) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」 2002 年制定版 pp.41 - 54
- (2) 寺田典生，本間淳史，益子博志，玉置一清：場所打ち PC 床版の温度応力解析に関する一考察 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 CS4-20 2002 年 9 月 pp.149 - 150
- (3) 倉田幸宏，江頭慶三，和内博樹：膨張材の効果を

考慮した場所打ち PC 床版の施工時 FEM 解析 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 CS4-12 2002 年 9 月 pp.133 - 134

- (4) 社団法人土木学会：最新のマスコンクリート技術 1996 年 10 月 pp.2 - 4
- (5) 小田部裕一，鈴木康範，高瀬和男，橘 吉宏：膨張材を用いた早強コンクリートの発熱特性 第 57 回セメント技術大会講演要旨 2003 年 5 月 pp.96 - 97
- (6) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書「構造性能照査編」 2002 年制定版
- (7) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I. 共通編） 2002 年 3 月 pp.37 - 44
- (8) 倉田幸宏，河西龍彦，高瀬和男，小林 潔，橘吉宏，丸山久一：膨張材の効果を考慮した場所打ち PC 床版の施工時 FEM 解析 第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集 2003 年 6 月 pp.127 - 132
- (9) 塩永亮介，内田大介，中本啓介，栖原健太郎，玉置一清：膨張コンクリートを用いた道路橋 PC 床版の温度応力解析 膨張コンクリートによる構造物の高機能化 / 高耐久化に関するシンポジウム 2003 年 9 月 pp.143 - 148
- (10) 師山 裕，塩永亮介，倉田幸宏，河野 豊：コンクリート床版における膨張材の効果と鉄筋量に関する解析的検討 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 CS4-019 2002 年 9 月 pp.147 - 148
- (11) 塩永亮介，薮野真史，戸田 均，安川義行，稲葉尚文：場所打ち PC 床版 2 主桁橋の床版コンクリート初期ひずみ特性 - 佐分利川橋 - 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 CS4-017 2002 年 9 月 pp.143 - 144
- (12) 塩永亮介，薮野真史，戸田 均，西 東十郎，久保田善明：場所打ち PC 床版のひび割れ抑制 - 「佐分利川橋」 - 石川島播磨技報 第 43 巻第 4 号 2003 年 7 月 pp.122 - 128