橋脚の温度ひび割れ対策としての膨張材の効果に関する検討

太平洋セメント㈱ 正会員 ○兵頭彦次 三谷裕二 谷村 充 栩木 隆 早野博幸
太平洋マテリアル㈱ 立川則久
福岡大学 正会員 添田政司

１．はじめに

コンクリート構造物の高耐久化に対する社会的要求が高まる中，マスコンクリートに発生する温度ひび割れを制御することは，これまでに増して重要となってきている．温度ひび割れに対する制御方法は多種多様であるが，材料的手法のひとつに膨張材の適用がある．その効果は，近年，各種データの蓄積や予測手法に関する検討を通して，一定の認識を得られるに至っている．しかしながら，外部拘束作用が卓越するものに比べ，橋脚のような内部拘束作用が比較的大きいと考えられる構造物については，これまで膨張材の適用事例が少なく十分に検討がなされていなかった．

本報告では，橋脚構造物に膨張材を適用した事例を報告するとともに，解析的にその効果の再現を試みた結果を示す．

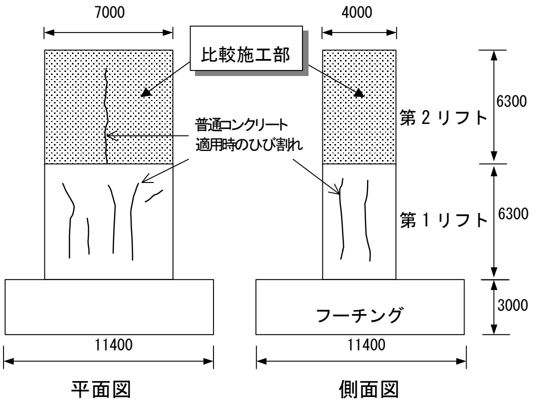

図-1 構造物概要およびひび割れ発生状況

２．橋脚構造物の概要およびひび割れ発生状況

図-1 に，対象とする橋脚構造物の概要および打込み後 7 日の脱型時に確認されたひび割れの発生状況を示す．第 1 リフトでは普通コンクリート(**表-1**)を用いたところ，幅が 0.1～0.25mm 程度の多数の表面ひび割れが発生した．そこで，ひび割れ抑制を目的に，第 2 リフトでは膨張コンクリート(**表-1**)の適用を試みた．さらに，ほぼ同形状の別の橋脚第 2 リフトに，同時期に普通コンクリートを打ち込み，両者の比較検討を行った．普通コンクリートの場合，図中，第 2 リフトに示す位置に鉛直ひび割れが発生した．一方，膨張コンクリートではひび割れが発生しておらずひび割れ抑制に対し一定の効果を示した．ひび割れは，幅が 0.15mm，深さが 170mm 程度であり，発生時期が早期であることと併せて勘案すると，本構造物に発生したひび割れは内部拘束作用の及ぼす影響が大きいと推察された．

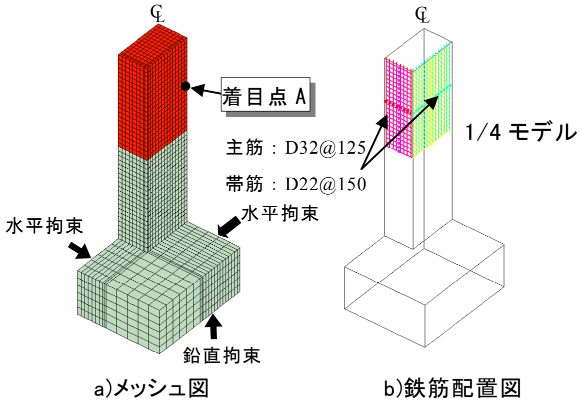

図-2 解析モデル

３．解析モデルおよび解析条件

同構造物の第 2 リフトについて，3 次元 FEM 解析によるひび割れ発生および抑制の挙動の再現を試みた．**図-2** に構造物の解析モデルを示す．構造物の対称性から 1/4 モデルとした．拘束条件は，モデル底面および構造解析対称面の法線方向を完全拘束とした．また本検討では鉄筋の拘束を考慮するために，トラス要素を用いて主筋および帯筋を配置した．解析ケースは普通および膨張コンクリートの 2 ケースとし，解析期間は 7 日間とした．

表-1 コンクリートの配合

コンクリートの種類	セメントの種類	呼び強度	W/B (%)	単位量(kg/m³) W	C	EX	S	G
普通コンクリート	高炉セメント B 種	24	51	161	316	－	827	1011
膨張コンクリート					296	20		

※EX：低添加型膨張材

表-2 解析条件

項目	フーチング・第 1 リフト	第 2 リフト	
	普通コンクリート	普通コンクリート	膨張コンクリート
初期温度(℃)	14℃		
熱伝達率(W/m²℃)	天端：5(養生マット)，2 リフト側面：8(型枠)，1 リフト・フーチング：13(対流)		
ヤング係数(kN/mm²)	23.0	有効ヤング係数	式(1)参照
膨張ひずみ	－	－	式(2)参照

解析条件は**表-2** に示す通りである．記載のない項目については，土木学会コンクリート標準示方書(以下，示方書とする)に準じた．フーチングおよび第 1 リフトは，打込み後 1 ヶ月以上経過していることから，水和発熱を無視し，力学特性は呼び強度およびそれにともなう物性値を用いた．なお本報告では，第 2 リフトのひび割れ発生位置である長手水平方向中心で鉛直方向中心の表層部である点 A に着目し検討を行った．

４．膨張ひずみおよびヤング係数モデル

三谷ら[1)]は，式(1), (2)を基本式とする見掛けの膨張ひずみとヤング係数モデルを提示し，温度依存性を考慮した膨張応力算定法としての有効性を示している．ここでは，同手法を膨張コンクリートを用いたケースに適用することとした．なお，この材料モデルは普通ポルトランドセメントを中心とした検討によって導かれたものであり，高炉セメントへの適用には課題が残るが，

キーワード マスコンクリート，橋脚，温度ひび割れ，膨張材，温度応力解析，内部拘束作用
連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株) TEL043-498-3909

常温下における両者の整合性から，検討結果に大幅な影響は与えないと判断した．

$$\varepsilon_{cfa}(T,t_e)=\varepsilon_{cfa\infty}(T)\cdot(1-\exp(-\alpha(T)\cdot(t_e-t_{e0})^{\beta(T)}))$$ 式(1)

$$t_e\le 2: E_{ca}(t_e)=3.23(1-\exp(-3.64(t_e-t_{e0})^{0.7})), t_e>2: E_{ca}(t_e)=\frac{t_e-2}{(0.091+0.04(t_e-2))}+3.216$$ 式(2)

ε_{cfa}，$\varepsilon_{cfa\infty}$：有効材齢，温度に依存した膨張ひずみおよび膨張ひずみの終局値($\times10^{-6}$)，α，β：温度に依存した実験定数，t_e：有効材齢(日)，t_{e0}：凝結始発時の有効材齢(日)，T：温度(℃)，E_{ca}：有効材齢，温度に依存したヤング係数(kN/mm^2)

５．解析結果および考察

応力解析結果から，点Aにおける引張主応力と材齢の関係をケース別に**図-3** 示す．最大引張主応力は普通コンクリートのケースの場合 1.72N/mm^2 であるのに対し，膨張コンクリートのケースの場合 1.30N/mm^2 となり，約 0.4N/mm^2 の引張主応力の低減効果が認められた．最小ひび割れ指数は，膨張コンクリートを用いることで 0.89 から 1.19 に向上し，実際の構造物における現象を反映する結果となった．指数の差を示方書に示されるひび割れ発生確率に換算した場合，30%程度のひび割れ発生確率低減に相当する．

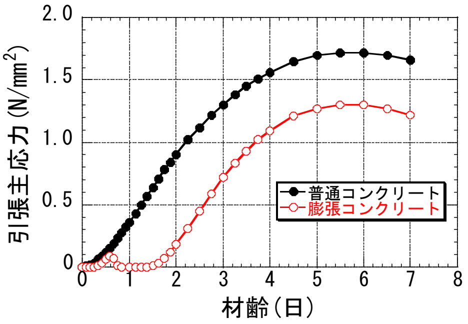

図-3 引張主応力と材齢の関係

次に，膨張コンクリートの解析結果から膨張材単体で生じる応力を抽出し，表面からの距離に応じた膨張応力の発生状況を材齢別に**図-4** に示す．なお，ひび割れ発生方向を考慮し，点 A から断面中心までの直線上に発生する水平方向の膨張応力を対象としている．膨張材によって導入される圧縮応力は，材齢 1 日以内では表層よりも断面内部が大きくなり，材齢 1 日以降では断面内外でほぼ均一となった．また表層では，ごく若材齢時に一時的に引張応力が発生する挙動を示した．これは，本膨張ひずみモデルが温度依存性を考慮しているため，早期に温度が上昇する断面内部では膨張ひずみの発現が早いのに対し表層部ではそれほどでもなく，断面内外での相対的な膨張ひずみ差が生じたことにより発生したものと考えられる．ただし，発生した引張応力は同材齢における引張強度よりも大幅に小さいため，ひび割れを発生させるレベルには至らなかったものと考えられる．

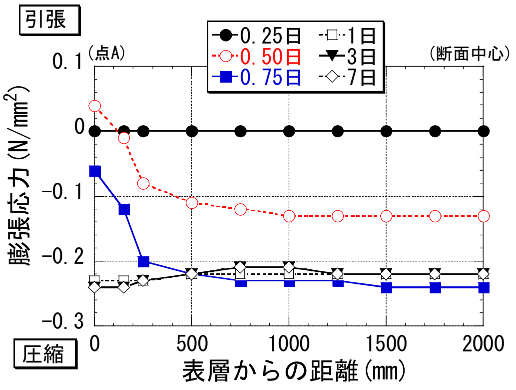

図-4 断面内の応力分布状況

さらに，膨張コンクリートのケースについて，鉄筋の有無をパラメータとした解析を行い，鉄筋の考慮が解析結果に及ぼす影響について検討を加える．**図-5** に，鉄筋を考慮した場合と無視した場合の引張主応力の比較を示す．対象位置は，第 2 リフト鉛直中心(点 A)とその鉛直方向延長上の第 2 リフト上端，下端の 3 点とした．鉄筋を無視した場合の引張主応力は鉄筋を考慮した場合と比べ大きくなる傾向であった．また，その傾向は対象位置が鉛直上方向へ向かうほど強くなり，引張主応力のピーク時で両者を比較すると，差の割合は下端，中心(点 A)，上端でそれぞれ 10%，20%，30%程度となった．これは，鉄筋を考慮していない場合，第 1 リフトおよびフーチングのみが拘束体となるため，鉛直上方向に向かうほどその拘束の影響が小さくなり，膨張材によって導入される圧縮応力が漸減したことが主な理由である．このことから，橋脚のように内部拘束作用が卓越する構造物に対して適切に膨張材の効果を評価するためには，鉄筋の拘束を考慮する必要があるといえる．

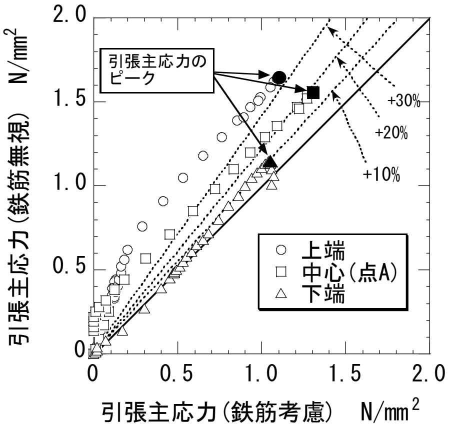

図-5 鉄筋が解析結果に与える影響

６．まとめ

本検討の範囲内で得られた知見を以下に示す．

(1)実際の橋脚構造物に膨張コンクリートを適用した場合，材齢 7 日の時点で普通コンクリートではひび割れが発生したのに対し，ひび割れが認められずひび割れ抑制に一定の効果を示した．(2)鉄筋を考慮した 3 次元 FEM 解析により膨張コンクリートを適用した場合の挙動の再現を試みたところ，実際の現象を反映する結果を得るとともに，普通コンクリートと比べてひび割れ発生確率を 30%程度低減する効果が認められた．(3)膨張コンクリートを適用した場合，ごく初期にひび割れ発生に影響しない程度の引張応力が表層に発生するが，材齢 1 日程度で断面内の圧縮応力が均一に分布することが解析的に示された．(4)内部拘束作用が卓越する構造物において，適切に膨張材の効果を評価するためには，鉄筋の拘束を考慮する必要がある．

今後，高炉セメントに膨張材を適用した場合の材料モデル構築を目指すとともに，実際の橋脚構造物内に発生する応力やその挙動等を把握し，解析結果との検証を行う予定である．

【参考文献】1)三谷，谷村，佐久間，佐竹：マスコンクリート様の温度履歴を受けた膨張コンクリートの応力評価法，マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム論文集，pp.49-56，2005.8