

報告 鉄筋コンクリート部材の増厚補強における防水層による乾燥収縮抑制効果について

小島 文寛*1・前田 欣昌*1・中澤 康雄*2・紫桃 孝一郎*3

要旨：鉄筋コンクリート増厚補強を行う場合、補強コンクリートの乾燥収縮が既設部材に拘束され、乾燥収縮ひび割れの発生が懸念される。本工事では、ボックス頂版を増厚補強し、さらに防水工をする計画であり、本来外部からの水の浸入を防止する防水層が、補強コンクリートの乾燥収縮を抑制するものと考えられた。そこでまず、防水工後乾燥収縮が進行しないと仮定した事前解析を実施し、ひび割れが発生しないことを確認した。さらに、防水層によるコンクリートの乾燥収縮抑制効果を確認するために、要素レベルの供試体試験と、現場を再現した実大試験を行った。その結果、防水層が乾燥収縮の抑制に寄与することを確認した。

キーワード：増厚コンクリート、乾燥収縮、防水層、ひび割れ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の補強工法として、上面増厚工法が一般的に用いられている。上面増厚工法では既設部材の表面に薄いコンクリートを一体化させるが、増厚部には既設部材に拘束される事による乾燥収縮ひび割れの発生が懸念される。これに対して一般的には膨張材の添加やコンクリート打設後の養生を十分に行うなどの対策が行われている。

今回、高速道路本線のボックスカルバートの補強として、頂版の上面増厚を行い、更に外部からの水の浸入防止のため防水層を施工する補強・補修工事を実施することとした。この場合、防水層が増厚部の乾燥収縮を抑制すると考えられるため、その効果について解析および実験による確認を行った。

た曲げによるひび割れと想定され、ひび割れの発生原因を検討した結果、ブロック長に比べて断面幅が約 3.7 倍（ブロック長 15m：断面幅 55m）と横長の特殊な 4 連ボックスの構造特性による乾燥収縮の影響、側方土圧や上載荷重、地盤支持力等の相違等が複合的に組み合わせられて、設計で想定した以上の断面力が発生した事が原因と考えられた。

ひび割れ幅から推定した鉄筋応力度は許容値を超えていると推察されるため頂版上面の鉄筋コンクリート増厚により既設鉄筋の応力低減を図る事とした。また、ひび割れから漏水や遊離石灰が確認されたため、耐久性確保の観点からひび割れ注入を行った後、コンクリートを増厚し、さらに増厚コンクリート表面に防水層の施工を行うこととした。

2. 和光本線ボックス補修工事の概要と課題

2.1 工事概要

本工事を行う東京外環自動車道と和光本線ボックスは、図 - 1 に示すように、本線の外側に県道を併設する特殊な鉄筋コンクリート製の 4 連ボックスカルバートの構造で造られており、ボックスカルバートの頂版上面部は市道が横断している。

構造物点検によりボックスカルバートの頂版部にひび割れが発見され、その後の調査により図 - 2 に示すようにボックスカルバートの頂版全面にひび割れが発生していることが判明した。ひび割れの状況は、ひび割れ幅 0.2mm ~ 0.5mm を主体として、最大幅 0.6mm のひび割れが発生しており、一部のひび割れからは漏水や遊離石灰が確認された。

今回発生したひび割れは、発生状況から頂版に作用し

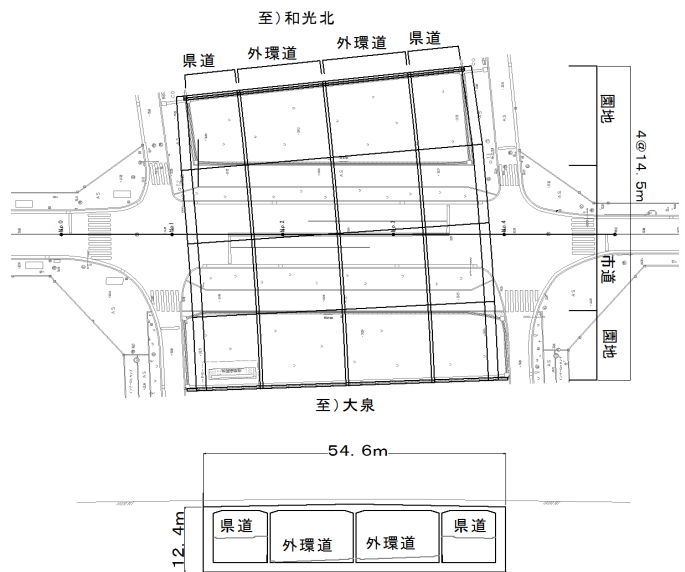
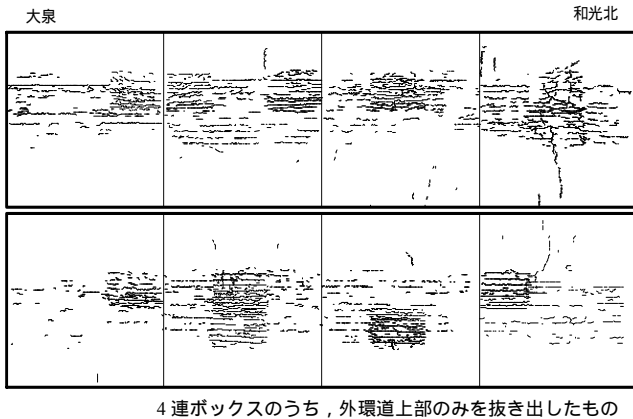


図 - 1 和光本線ボックス概要図

*1 東急建設（株） 土木総本部 土木技術部 土木構造・材料グループ 工修（正会員）

*2 東日本高速道路（株） 関東支社 三郷管理事務所

*3 東日本高速道路（株） 関東支社 三郷管理事務所（正会員）



4連ボックスのうち、外環道上部のみを抜き出したもの

図 - 2 ひび割れ発生状況

2.2 課題

本工事では、平均厚さが約 1050mm の既設ボックスカルバート頂版の上面に、厚さ 15cm の増厚コンクリートを打設し、頂版の補強を行う。本工事のように厚さ 15cm 程度の薄いコンクリートを増厚する場合、一般に新設コンクリートの乾燥収縮を既設部材が拘束し、新設コンクリートに収縮ひび割れが発生することが懸念されている¹⁾。このようなひび割れ対策として、収縮を補償する目的で膨張材を添加する方法があり、本工事においても、膨張材を添加する配合とした。このような膨張材を添加する対策は、道路橋脚をコンクリート巻立て補強する際などで採用されている¹⁾。

本工事では、特殊条件として頂版上面に将来的な漏水防止用の防水層を施工し、さらに補強工事に際して迂回させるボックスカルバート上の市道の早期復旧のために、早強ポルトランドセメントを使用し、早期の埋戻しを実施する計画であった。通常防水層は、外部からの水の浸入を防止するものであるが、本工事においてはコンクリートの乾燥収縮を抑制する効果があると考えられた。しかしながら、その抑制効果については現時点で定量的に明らかになっていない。

本報告では、防水層がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を把握することを目的とし、防水層の有無が増厚コンクリートのひび割れ発生状況に与える影響を事前解析により傾向を把握し、実験により検証した。

なお、防水層の本来の目的である防水機能を十分に発揮させるために、コンクリート表面の乾燥状態を十分に管理し、防水性能を確保することが前提である。

3. 防水層と早期埋戻しによる乾燥収縮抑制効果の確認

3.1 解析

(1) 解析方法

本工事の特殊条件である防水層が、増厚コンクリートのひび割れ発生状況にどのような影響を及ぼすのかを事前に検討するために、3次元有限要素解析によりひび

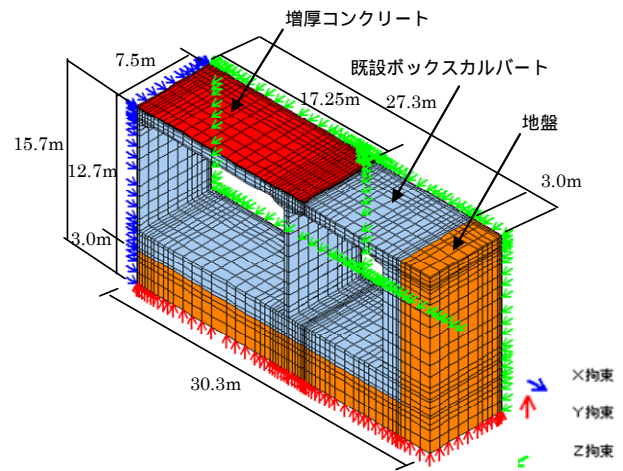


図 - 3 解析モデル

割れ指数の算定を行った。解析モデルは、図 - 3 に示すように、ボックスカルバート 1 ブロックの 1/4 モデルとした。解析では、増厚コンクリートに膨張材による膨張ひずみと乾燥収縮による収縮ひずみを与え、さらにセメントの水和反応に伴う体積変化を考慮して、ひび割れ指数を算定した。

(2) 検討ケース

本解析では、検討ケースを表 - 1 に示すように 2 ケースとした。ケース 1 は収縮が通常通り進行する場合であり、ケース 2 は、使用する早強コンクリートが設計基準強度に達する 7 日目に防水工を行うため、防水層が水分の蒸発を完全に遮断するものとし、7 日目以降収縮が進行しないと仮定した場合である。

表 - 1 解析検討ケース

ケース 1	収縮が通常通り進行
ケース 2	防水により収縮が 7 日目以降進行しない

(3) 解析条件

コンクリートの収縮は、一般にセメント水和反応の過程で水分が消費されることにより小さくなる自己収縮とコンクリートの養生終了後に水分が蒸発することにより小さくなる乾燥収縮の合計値で表わされ、式(1)が用いられている²⁾。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \epsilon'_{sh} \quad (1)$$

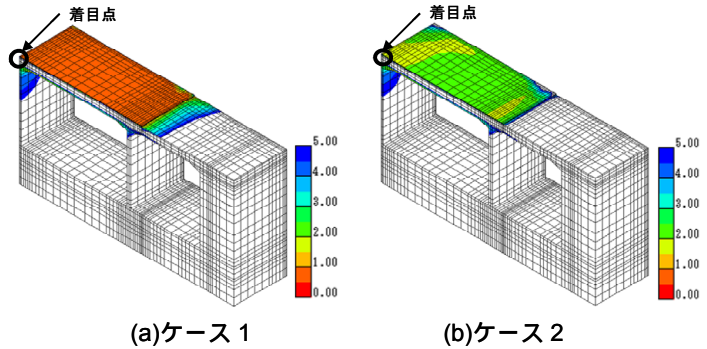
ここに

$$\begin{aligned} \epsilon'_{cs}(t, t_0) &: \text{材齢 } t_0 \text{ から } t \text{ までの収縮ひずみ (} \times 10^{-6} \text{)} \\ t_0 &: \text{乾燥開始材齢} \\ \epsilon'_{sh} &: \text{収縮ひずみの最終値 (} \times 10^{-6} \text{)} \end{aligned}$$

実施工では養生期間を 5 日で計画したが、コンクリートの乾燥収縮が屋外での養生期間中に全く進行しないと現実的に考えにくいいため、解析上の乾燥開始材齢は、安全側となるように 2 日目とした。また、収縮ひずみの

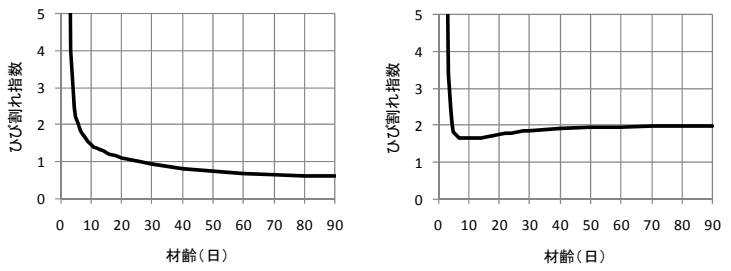
表 - 2 解析条件

項目	条件値
セメントの種類	早強セメント
膨張剤	あり(20kg/m ³)
単位セメント量(kg/m ³)	300
打設温度 ()	18.9
外気温度 ()	15.9
断熱温度上昇式	$Qt=Q(1-e^{-\gamma t})$ $Q = 50.34, \gamma = 1.323$
熱伝達係数 η (W/m ²)	養生マット : 5 (3日後撤去)
熱伝導率 (W/m)	2.7
比熱 (kJ/kg)	1.15
密度 (kg/m ³)	2400
線膨張係数($\times 10^{-6}$)	10
コンクリート	
圧縮強度 (N/mm ²)	$f'_c(t) = \frac{1.07 \cdot t}{2.9 + 0.97t} f'_{ck}$ $f'_{ck} = 24.0$
引張強度 (N/mm ²)	$0.44 \sqrt{f'_c(t)}$
ヤング係数(N/mm ²)	増厚部 4700 $\times \sqrt{f'_c(t)}$ 既設部 25000
クリープによるヤング係数の補正係数 ϕ	増厚部 材齢3日まで : 0.73 材齢5日以降 : 1.00 材齢3~5日は線形補完 既設部 1.00
ポアソン比	0.2 (増厚部既設部共)
地盤	
熱伝導率 (W/m)	2.0
比熱 (kJ/kg)	0.8
密度 (kg/m ³)	1900
線膨張係数($\times 10^{-6}$)	-
ヤング係数(N/mm ²)	14
ポアソン比	0.3



(a)ケース1 (b)ケース2

図 - 5 最小ひび割れ指数分布図



(a)ケース1 (b)ケース2

図 - 6 ひび割れ指数履歴図

表 - 3 解析結果

	ケース1	ケース2
最小ひび割れ指数	0.60	1.66

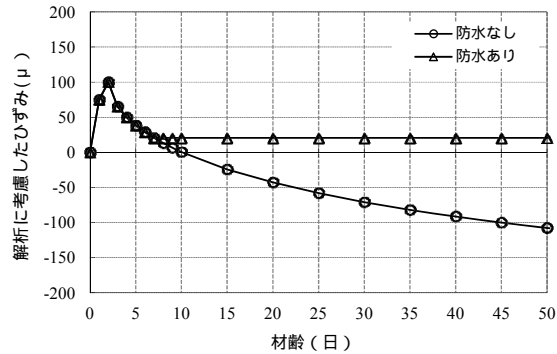


図 - 4 収縮ひずみの設定

最終値は、部材の形状寸法、環境条件、鉄筋比の影響を受け、適切な評価が難しい。特に任意の鉄筋比に応じた収縮ひずみの最終値は整理されていないのが現状である。実構造物の鉄筋比は 0.33% ~ 0.67% であるが、この鉄筋比に対する収縮ひずみの最終値を正確に設定するのが困難なため、文献²⁾に記載されている鉄筋比 1% の場合の 340×10^{-6} に仮定した。

また、膨張材の効果として、既往の論文³⁾より、膨張ひずみを 100×10^{-6} に設定した。これは、土木学会が定めている収縮補償用コンクリートの膨張率 $150 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ (文献 4) を下回るが、土木学会の膨張率は 7 日間の水中養生であるのに対し、現場の養生は水中養生と比べ養生条件が悪いため、膨張率が低くなるものと考えたためである。なお、膨張ひずみは解析上の乾燥開始材齢である 2 日目で最大 (100×10^{-6}) になるように設定した。

各ケースで設定した解析に考慮したひずみ（自己収縮、乾燥収縮と膨張材の効果とを合算したひずみ）を図 - 4 に示す。縦軸のプラスが膨張を、マイナスが収縮を示している。解析に用いたその他の条件は、表 - 2 に示すとおりである。

(4) 解析結果

各ケースの最小ひび割れ指数の分布図を図 - 5 に、ひび割れ指数の履歴図を図 - 6 に示す。また、各ケースの最小ひび割れ指数を表 - 3 に示した。

通常通り乾燥収縮が進行するケース 1 では、ひび割れ指数が徐々に下がり 材齢 90 日で最小の 0.60 となった。一方、7 日目以降乾燥収縮しないケース 2 では、7 日目以降ひび割れ指数の低下が緩やかとなり、材齢 8 日で最小の 1.66 となり、その後はひび割れ指数が若干上昇している。材齢 8 日でひび割れ指数が上昇に転じたのは、水和による発熱が外気温度近くまで低下し、その材齢以降収縮する要因が無い中、コンクリートの強度が増加しているためと考えられる。

以上の解析により、7 日目以降、防水層により乾燥収縮を抑止できれば、仮に乾燥収縮が 2 日目から始まったとしても、ひび割れの発生を防止できるものと判断できる。

3.2 実験

(1) 試験概要

防水層の乾燥収縮ひび割れ発生に対する抑制効果を確認するために、以下の実験を平成 21 年 5 月～7 月に神奈川県相模原市の東急建設(株)技術研究所内にて行った。

a) 供試体試験

解析において設定した収縮ひずみの確認のため、10×10×40cm の供試体にて自由ひずみを計測した。供試体の作製および試験方法は、「(仮)高流動コンクリートの自己収縮試験方法⁵⁾」に準じた。さらに、初期養生における膨張材の効果を確認するために、防水工を行う前の養生方法として、材齢 1 日で脱型後、上記試験方法⁵⁾に準じてフィルムおよびビニール袋にて密封した供試体と、標準水中養生した供試体の 2 条件を設定した。養生期間は材齢 6 日までとした。表 - 4 に供試体試験の試験水準および本数を示す。防水工の施工の際は、シート膨れ抑制のため、コンクリート表面が乾燥していることが条件となる。そのため、防水工前日に養生を終了し、1 日間乾燥させた。供試体は、20±3℃、相対湿度 60% の恒温恒湿室内で製作および保管を行った。

表 - 4 供試体試験の試験水準および本数

供試体記号	条件		本数
	養生方法	防水層	
封緘-防水あり	封緘養生	あり	2
水中-防水あり	水中養生		1
封緘-防水なし	封緘養生	なし	2
水中-防水なし	水中養生		1

b) 実大試験

2.2 に示した本工事の特殊条件において、防水工および早期の埋戻しがコンクリートの乾燥収縮に与える影響を確認するために、現場の状況を再現した実大モデルの試験体を作製した。試験体は、既設コンクリートを模擬

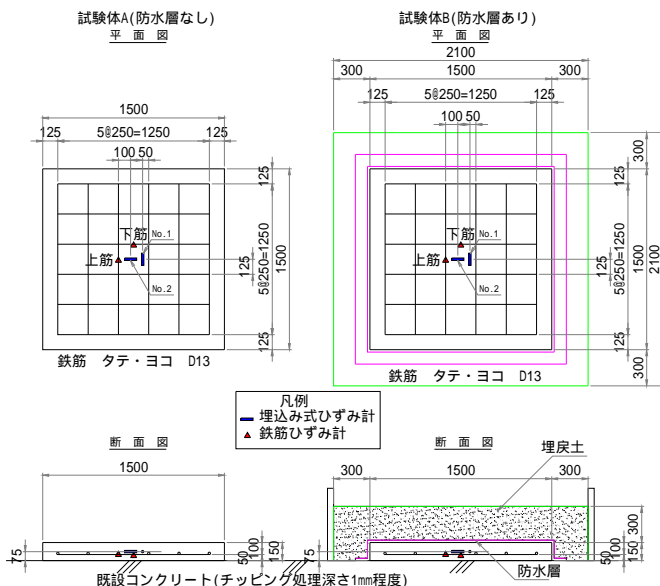


図 - 7 実大試験体概要

したスラブにチッピングによる深さ 1mm 程度の表面処理を行った後、D13 鉄筋をピッチ 250mm で井形に配置し、1500×1500×150mm のコンクリートを打設した。打設後、材齢 5 日まで散水湿潤養生とした。養生終了後、試験体 A はそのまま気中暴露とし、試験体 B は表面乾燥確認後、材齢 7 日でアスファルト防水工を行い、ただちに土盛り 300mm の埋戻しを行った。実大試験体の概要を図 - 7 に、試験体 B の防水工状況を写真 - 1 に、実大試験状況を写真 - 2 に示す。

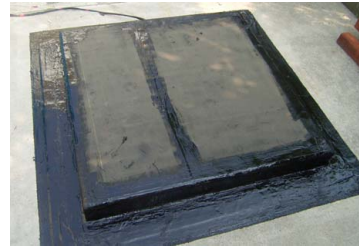


写真 - 1 試験体 B 防水工状況



写真 - 2 実大試験状況

(2) 使用材料

コンクリートは、供試体試験および実大試験で共通とし、プラント出荷のレディーミクストコンクリートを用いた。単位膨張材量は 20kg/m³ とし、プラントの練り混ぜ時に添加した。コンクリートの使用材料を表 - 5 に、配合を表 - 6 に示す。配合は、実施工のコンクリートの配合条件(単位水量、水セメント比、細骨材率等)と一致させ、実施工のコンクリートと同等になるようにした。

表 - 5 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類	物性
水	W	地下水	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度: 3.14g/cm ³
細骨材	S1	砕砂(神奈川県相模原産)	密度: 2.63g/cm ³
	S2	陸砂(千葉県君津産)	密度: 2.56g/cm ³
粗骨材	G	砕石(神奈川県相模原産)	密度: 2.66g/cm ³
膨張材	EX	低添加型石灰系膨張材	密度: 3.16g/cm ³
混和剤	Ad	AE減水剤	リグニンスルホン酸系

表 - 6 コンクリートの配合

目標スラブ(cm)	目標空気量(%)	水結合材比(%)	単位量(kg/m ³)						
			W	C	EX	S1	S2	G	Ad
8±2.5	4.5±1.5	58.8	161	254	20	640	213	1031	1.88

防水工は、実施工と同じアスファルト防水工とし、供試体試験および実大試験共に、道路橋床板防水便覧⁶⁾で分類されている「シート系床板防水層(流し張り型)」の仕様とし、表面の乾燥および含水率が使用材料の規定以内であることを確認して実施した。

実大試験体に設置した鉄筋は、本工事施工で使用する鉄筋(主筋:SD345 D19, D16, D13)のうち最も拘束力が小さくなると考えられるD13を使用した。

(3) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-7に示す。コンクリートの熱膨張係数を 10×10^{-6} とし、全ひずみから温度ひずみを差し引いて、温度補正ひずみとした。計測結果の初期値は、各試験とも計測値よりひずみが発生したと判断された打設後0.12日(約3時間)とした。

表-7 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
材料試験	フレッシュ性状	スランプ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)、温度
	圧縮強度試験	JIS A 1108に準じて、材齢3,7,28日で実施
供試体試験	コンクリートの自由ひずみ	測温機能付き埋込型ひずみ計と熱電対で測定(1箇所/体)
実大試験	コンクリートの実ひずみ	測温機能付き埋込型ひずみ計と熱電対により測定(2箇所/体)
	鉄筋ひずみ	ひずみゲージにより鉄筋のひずみを測定(2箇所/体)
	内部温度、外気温	測温機能付き埋込型ひずみ計と熱電対により測定

(4) コンクリート物性試験結果

コンクリートの物性試験結果を表-8に示す。

表-8 コンクリートの物性試験結果

スランプ ^{a)} (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	圧縮強度(N/mm ²)		
			3日	7日	28日
6.0	3.5	27.0	32.6	39.5	43.0

(5) 供試体試験結果

供試体試験における初期膨張効果および防水層の有無による温度補正ひずみ変化の傾向を図-8に示す。なお、試験はコンクリートの型枠が脱型できるまでの初期硬化材齢における封緘養生開始の時期が遅く、乾燥収縮が進行して本来の膨張ひずみが得られなかった。そのため、初期膨張を計測するための追加の試験を行い、封緘養生は打設後、直ちに行った。その結果、1回目の試験より乾燥開始もしくは防水層施工時を初期値0とした際の防水層の有無の違いを、2回目の試験より初期膨張の効果を示す計測値が得られた。グラフは、材齢7日までの初期養生-防水工前の乾燥までは2回目の試験データを、材齢7日以降は、2回目の試験の初期膨張分を初期値として1回目の試験データを組み合わせ、全体の傾向

を表すグラフとして示した。

脱型後水中養生をした供試体では、材齢とともに膨張が進み乾燥開始直前の膨張ひずみは、210 μ 程度となった。しかしながら、脱型後封緘養生をした供試体は、材齢2日程度で150 μ 付近をピークに膨張の進行が見られず、その差は、約60 μ 程度となった。使用した膨張材の膨張機構としては、一般的に言われているように⁷⁾、水和反応によって水酸化カルシウムを生成し、膨張性能を付与するため、水中養生をすると膨張材に直接水分供給ができ、膨張性能が発揮できるものと考えられる。

防水層の施工にあたって、各種養生終了後に約1日間の空中乾燥を行ったところ、全供試体とも収縮が開始した。防水工を行っていない供試体は乾燥収縮が進行し、7日目以降200 μ 程度収縮方向にひずみ量が変化した。

一方、防水工を行った供試体は、防水層の施工後乾燥収縮が収束する傾向となり、ひずみは安定した。したがって、防水工により、乾燥収縮の進行を抑制できることが確認できた。

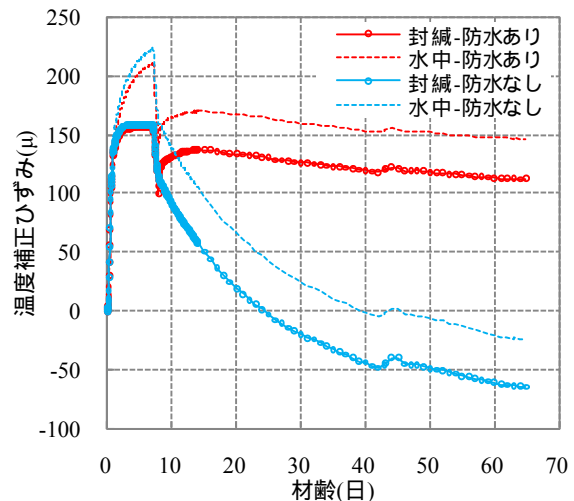


図-8 供試体試験における初期膨張効果および防水層の有無による温度補正ひずみ変化の傾向

(6) 実大試験結果

実大試験の材齢と温度補正ひずみの関係を図-9に示す。なお図-9中には、気象庁ホームページより神奈川県相模原中央の1時間ごとの降水量を併記した。

実大試験では、初期材齢で散水により湿潤養生をしたため、膨張材の効果を確認することができた。計測したコンクリートの膨張ひずみは 130×10^{-6} 程度のひずみであるが、下面を既設のコンクリートにより拘束されているため、拘束の影響を受けた膨張ひずみ量となっているものと考えられる。乾燥開始後は、両試験体とも乾燥収縮が進行したが、降雨の影響により防水工施工までの間に再び膨張している。防水工の施工後は、乾燥収縮および降雨による湿潤膨張等はなく、また埋戻土により躯体の

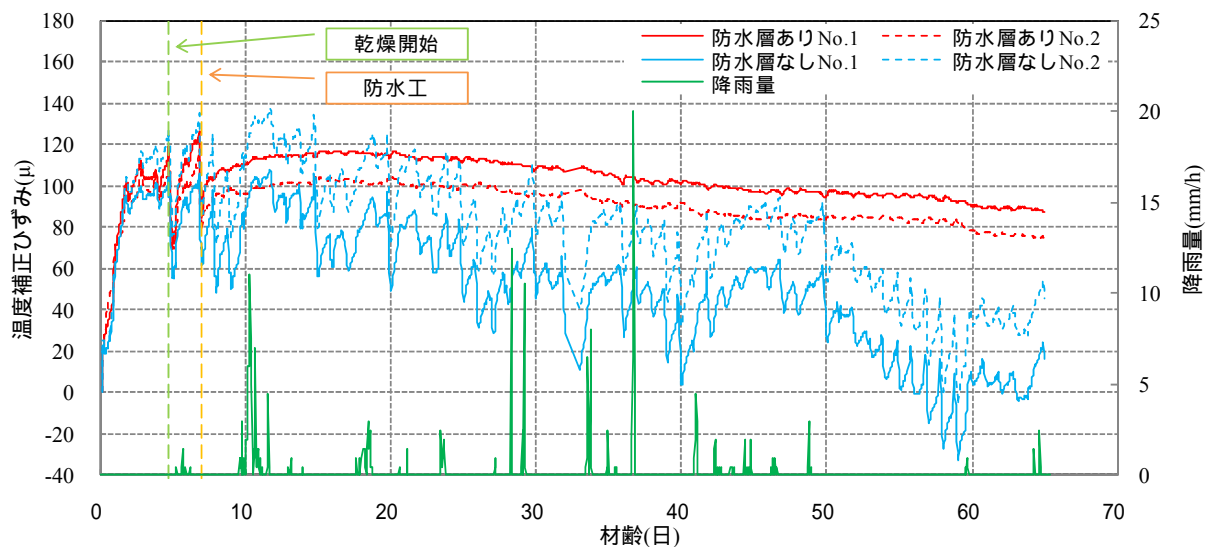


図 - 9 実大試験 材齢と温度補正ひずみの関係

温度変化が少ないことから、温度影響による変化もあまりない。そのため、ひずみはほぼ一定の値で推移している。防水工によって、乾燥収縮が進行せず、さらに埋戻土の影響によって温度変化による温度ひずみの発生も少ないことが確認できた。

一方で、気中暴露した防水層なしの試験体では、温度変化の影響・降雨による湿潤膨張を受けているため、ひずみ変動している。防水工施工後の変化をみると、天候の影響で乾燥収縮の進行と降雨による湿潤膨張を繰り返しているものの、収縮傾向にある。なお、実大試験で得られるひずみは、下面を拘束された状態のひずみであり、供試体試験のように自由ひずみを表しているわけではない。防水層なしの試験体であっても、試験期間中の最終ひずみは $20\mu \sim 50\mu$ とプラス側になっているものと考えられる。

また、ひび割れの発生については、いずれの試験体にも確認されなかった。

4. まとめ

本実験ならびに解析で得られた知見は以下のとおりである。

- ・ 本来外部からの水の浸入を防止する防水層が、内部のコンクリートの乾燥収縮を抑制する効果がある。
- ・ 膨張コンクリートの初期養生については、乾燥を防止し湿潤状態にすることで、膨張ひずみ量は大きくなり、膨張性能が期待できる。一方、水分供給がない場合は、膨張効果は発揮されにくい。
- ・ 解析では、実施工の養生期間(5日間)よりも早く乾燥が開始する可能性を考慮して乾燥開始材齢を2日目とし、防水工を行う7日目以降の乾燥収縮が進行しないと仮定したところ、ひび割れが発生しない結果となった。
- ・ 防水層と埋戻土を施すことで、コンクリートの乾燥

収縮を抑え、温度ひずみや降雨によるコンクリートの膨張・収縮を抑制し、ひずみが安定する。

- ・ 実施工においても膨張材の収縮補償効果に加え、防水工施工後の乾燥収縮抑制効果で、収縮ひび割れの発生を抑えることができると考えられる。

5. おわりに

養生後、防水性能を確保するための下地の乾燥を行い、乾燥確認後、直ちに防水工と埋戻しを施工すれば、長期的な乾燥収縮を抑えることができ、ひび割れの発生を防止できることを確認した。実施工では、上記の検討結果を踏まえた施工管理を行い、その結果、防水前の段階でひび割れは発見されていない。今後、本報告が同様の増厚補修・補強工事に参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領, pp.3-53, 2007.8
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）, pp.45-49, 2007.
- 3) 高瀬和男ほか：場所打ち PC 床版における膨張材の有効性に関する研究, コンクリート工学, Vol.43, No.7, pp.26-33, 2005.7
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）, pp.230-239, 2007.
- 5) 日本コンクリート工学協会：(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法, 超流動コンクリート研究委員会報告書(), pp.209-210, 1994.5
- 6) 日本道路協会：道路橋床板防水便覧, p57, 2007.3
- 7) 吉岡国和ほか：若材齢期における膨張コンクリートの膨張ひずみと乾燥収縮ひずみ, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.826-831, 2006.12