

論文 実大モデル実験による膨張材の温度ひび割れ抑制効果に関する考察

酒井 貴洋^{*1}・水谷 征治^{*2}・網野 貴彦^{*3}・清宮 理^{*4}

要旨：膨張コンクリートの膨張特性ならびに温度ひび割れに対する膨張材の効果を明確にする目的で、フーチングの上に壁を打ち込んだ実大モデルの試験体を作製し、温度・ひずみ・応力の計測を行った。この結果、外部拘束が卓越する部材のみならず、内部拘束が卓越する部材においても膨張材による若干のひび割れ抑制効果を期待できる可能性が得られた。また、膨張材の効果を膨張ひずみとして評価する解析によれば、壁部の有効応力の変動傾向は実測値から算出した有効応力の傾向と定性的な一致を示し、部材の実際の挙動を反映できることが確認できた。

キーワード：膨張材，膨張コンクリート，温度ひび割れ，内部拘束，外部拘束，実大モデル実験

1. はじめに

コンクリートの耐久性への社会的関心は依然として高く、これに大きな影響を及ぼす初期ひび割れを防止することが重要な課題となっている。このような背景のなか、収縮補償効果やケミカルプレストレスによる初期ひび割れ抑制効果を期待して膨張コンクリートの使用事例が増えている。大半はマスコンクリートの温度ひび割れ抑制対策としての適用であるが、膨張コンクリートの膨張特性に関する研究は小型試験体によるものがほとんどで、実大スケールにおける膨張材の効果に対する評価は不十分と言わざるを得ない。さらに膨張コンクリートは膨張材による膨張作用を既設コンクリートや鉄筋で拘束し、ケミカルプレストレスをもたらすことで RC 部材としての力学的性能が向上するとされているが、温度ひび割れのメカニズム（ここでは内部拘束・外部拘束を指す）に言及した膨張材の効果については、膨張特性と同様に実大スケールにおける研究報告は少ない。

本論文では、膨張コンクリートの膨張特性ならびに温度ひび割れのメカニズムに対する膨張材の効果を把握するため、フーチング（内部拘束型）の上に壁（外部拘束型）を打ち込んだ実大スケールの試験体を作製し、コ

ンクリート硬化中の温度・ひずみ・応力の計測結果から、内部拘束および外部拘束の卓越する部材における膨張材の効果について実験的および解析的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 配合および使用材料

コンクリートの使用材料を表 - 1 に、配合を表 - 2 に示す。なお名称の末尾に EX がついたものは、膨張材を添加したものを示す。配合は呼び強度を 30N/mm² とした。また、膨張材は石灰系低添加型膨張材（水和熱抑制タイプ）を使用し、単位膨張材量を 20kg/m³ とした。

表 - 1 使用材料

| 使用材料 | 物理的性質など |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|
| セメント(C) | 高炉セメント B 種(BB) / 密度:3.04g/cm ³ , 比表面積:3,860cm ² /g |
| 膨張材(EX) | 低添加型石灰系 / 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3,590cm ² /g |
| 細骨材(S) | 陸砂:茨城神栖産, 砕砂:佐野産(唐沢鉱山) |
| 粗骨材(G) | 茨城石岡産(石岡市染谷) |
| AE 減水剤(Ad) | ポゾリス No.70 |

表 - 2 コンクリートの配合とフレッシュ性状

| 名称 | 打設部位 | SL (cm) | W/B (%) | Air (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | フレッシュ性状 | | | |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|---------|---------|----------|----------|
| | | | | | | W | C | EXP | S | G | Ad | SL (cm) | Air (%) | C.T. () | 凝結時間 |
| BB | F | 12 | 48.5 | 4.5 | 43.3 | 159 | 328 | 0 | 784 | 1041 | 3.49 | 14.5 | 4.7 | 30.5 | 5.7-7.4h |
| | W | | | | | | | | | | | 12.0 | 4.7 | 28.5 | 6.1-7.7h |
| BB-EX | F | 12 | 48.5 | 4.5 | 43.4 | 159 | 308 | 20 | 786 | 1041 | 3.49 | 13.5 | 4.6 | 33.5 | 6.3-8.0h |
| | W | | | | | | | | | | | 13.5 | 4.5 | 29.5 | 7.3-9.4h |

) SL: スランブ, Air: 空気量, Ad: AE 減水剤, C.T.: コンクリート温度, 凝結時間:(始発)-(終結)

打設部位: F(フーチング), W(壁)

*1 五洋建設(株) 技術研究所 主任 工修 (正会員)

*2 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 (正会員)

*3 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 主任研究員 修(工) (正会員)

*4 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博 (正会員)

2.2 大型モデル試験体

(1) 試験体の形状寸法

試験体は、マスコンクリートとして取り扱うべき広がりのあるスラブ状構造物（フーチング部）と下端が拘束された壁状構造物を想定し、図 - 1 に示す形状寸法とした。また、配筋については長辺方向には擁壁などの実構造物を想定し、D19@125mm で配置した。ただし、本実験でひずみ計測を実施する方向と直交するフーチング部の短辺方向および壁部の縦方向の配筋は長辺方向のひずみへの影響を小さくする目的で組立筋程度とした。

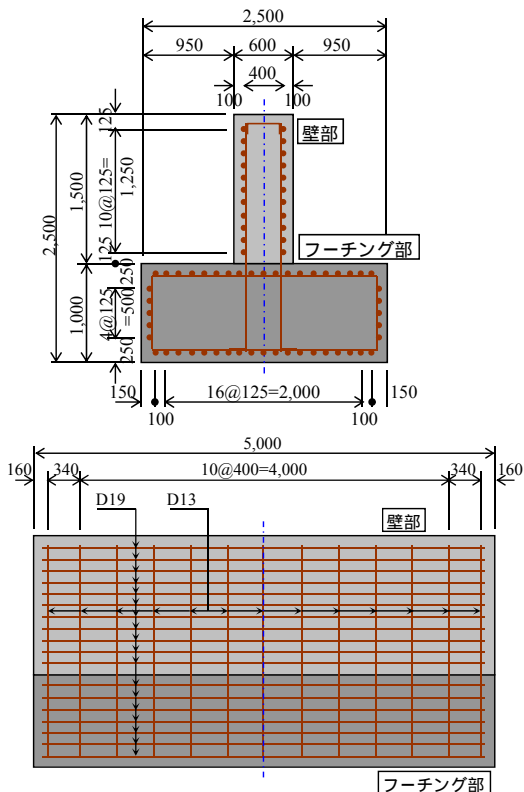


図 - 1 試験体の形状寸法

(2) 試験体の製作方法

試験体は、温度ひび割れの発生が最も懸念される夏場の屋外製作とし、フーチング部は下面からの拘束を極力抑えるため、均しコンクリートとの間にブルーシートを敷設した。また壁部の打設は打継面をチップング処理し、フーチング部打設から 28 日以上経過した後にいった。試験体の養生は、上面を湿布とビニールシートで 7 日間覆い、側面については同期間木製型枠を存置した。

(3) 計測方法

中央断面、端部と中央断面との中間点（2 箇所）において部材各部の温度と長辺方向の実ひずみ、自由ひずみおよび有効応力を 28 日間計測した。温度計測は測温機能付き埋込型ひずみ計および熱電対、実ひずみは測温機能付き埋込型ひずみ計およびひずみゲージ、自由ひずみは無応力容器内に設置した測温機能付き埋込型ひずみ

計、有効応力は有効応力計により計測した。各計測器の設置位置を図 - 2 に示す。大型試験体横の日陰となる箇所「JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法」を実施した。大型試験体のほうが高温履歴を受けるため、終結時刻は凝結時間試験によるものより早いと考えられるが、大型試験体ではこの時間の計測が困難であるので、後述のひずみおよび有効応力の零点は、JIS A 1147 による終結時とした。

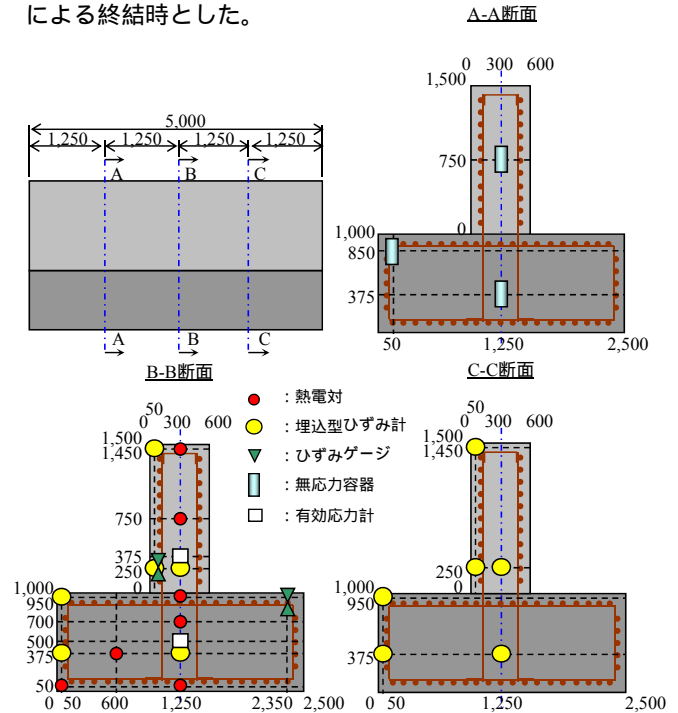


図 - 2 計測器位置図

3. 膨張・収縮ひずみの計測結果

3.1 温度計測結果

(1) フーチング部での計測結果

フーチング内部の温度推移を図 - 3 に示す。膨張材の有無によらず両者のコンクリート温度はほぼ同じ推移を示しており、水和熱抑制型の膨張材を添加した場合とそうでない場合では、同等の断熱温度上昇特性として評価できるものと考えられる。

(2) 壁部での計測結果

壁内部の温度推移を図 - 4 に示す。膨張コンクリートが普通コンクリートに比べ最高温度が若干高くなる傾

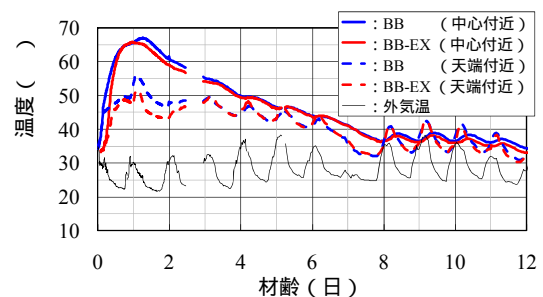


図 - 3 温度計測結果（フーチング部）

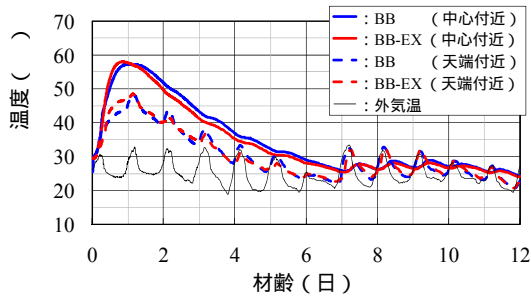


図 - 4 温度計測結果（壁部）

向が見られたが、フーチング部と同様に両者の断熱温度上昇特性はほぼ同等と推察される。

3.2 自由ひずみ計測結果

(1) フーチング部での計測結果

図 - 5 に躯体中心付近に設置した無応力計から得られた自由ひずみとコンクリート温度の関係を示す。その結果、膨張コンクリートの温度降下時の線膨張係数は $9.75 \mu/$ 、普通コンクリートでは $11.61 \mu/$ となり、膨張材の添加により線膨張係数が16%程度小さくなった。

次に、自由ひずみと硬化ひずみの経時変化を図 - 6 に示す。なお硬化ひずみとは、無応力計により測定された自由ひずみから先の温度降下時の線膨張係数と温度変化量の積（温度ひずみ）を差し引いたもので、主には温度上昇時における自己収縮やクリープひずみの影響を示す指標として定義したものである。今回のフーチング壁はマッシブな部材であり各部位における乾燥収縮の影響はさほど小さくなく、温度下降時の線膨張係数はほぼ直線であり、自己収縮やクリープ等の影響を含まない温度変化のみによる影響と考えた。

これによれば膨張材を添加したものは、打込み後初期では 100μ 程度膨張し長期的には 50μ 程度の膨張ひずみで安定したのに対し、無添加のものは打込み後初期から 100μ 程度の収縮ひずみが見られ、その後も $100 \sim 120 \mu$ の収縮ひずみで安定した。この両者の硬化ひずみの差を膨張材によるひずみ導入効果と考えた場合、無拘束状態における膨張材の導入ひずみとしては 150μ 程度と考えられる。

(2) 壁部での計測結果

壁部中心付近に設置した無応力計から得られた自由ひずみとコンクリート温度との関係を図 - 7 に示す。膨張コンクリートの線膨張係数は $10.62 \mu/$ であるのに対して普通コンクリートでは $10.83 \mu/$ であり、両者に有意な差は認められなかった。さらに、自由ひずみと硬化ひずみの経時変化を図 - 8 に示す。膨張コンクリートは打込み後初期から 200μ 程度膨張し、長期的にこの膨張ひずみで安定したのに対し、普通コンクリートは打込み後初期から緩やかな収縮ひずみの増加傾向が 100μ 程度

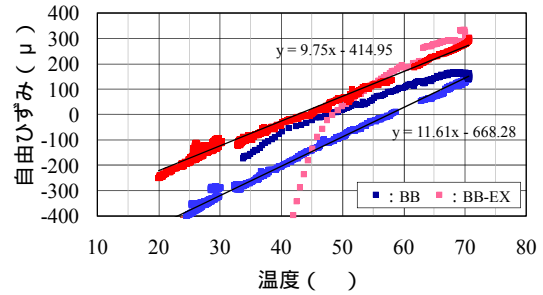


図 - 5 自由ひずみと温度の関係（フーチング部）

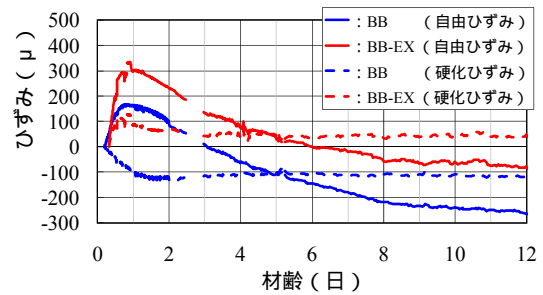


図 - 6 自由ひずみ・硬化ひずみ推移（フーチング部）

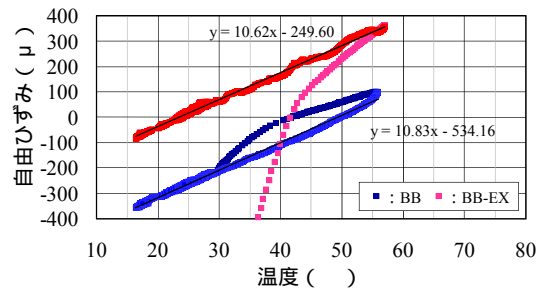


図 - 7 自由ひずみと温度の関係（壁部）

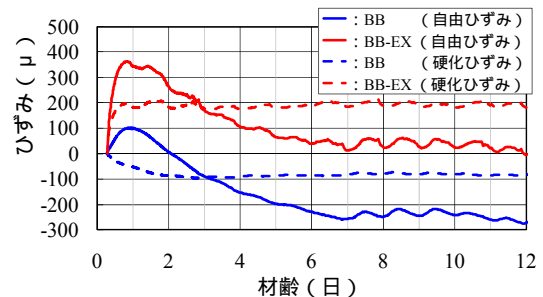


図 - 8 自由ひずみ・硬化ひずみ推移（壁部）

まで見られた。その後はこの収縮ひずみで安定する推移を示したが、これは自己収縮に起因するものと推察される。この両者の硬化ひずみの差を膨張材によるひずみ導入効果として考えた場合、無拘束状態における膨張材の導入ひずみは 300μ 程度と考えられる。

3.3 有効ひずみ計測結果

(1) フーチング部での計測結果

フーチング部の中心付近および天端角付近の有効ひずみの推移をそれぞれ図 - 9、10 に示す。なお有効ひずみは、各測点で計測した温度の変化量に図 - 5 に示し

た線膨張係数を乗じた温度ひずみと、図 - 6 に示した硬化ひずみの和を各計測点での自由ひずみとし、埋込み型ひずみ計により計測された実ひずみから自由ひずみを差し引いた値とした。図 - 9 を見ると、膨張材の有無によらず打込み初期ではほぼ同じ値を示しており、両者に明瞭な違いはなかった。一方、図 - 10 では打込み初期から両者の有効ひずみに違いが生じ、打込み初期では 100 μ 程度、長期的には 150 μ 程度の差が生じていた。

この理由として、フーチング部中心付近では底面拘束や鉄筋拘束がないため、膨張材によるコンクリートひずみの増加分がそのまま自由な変形となっただけに対し、鉄筋が近くに配置された天端角付近では、膨張材により導入されたひずみが鉄筋拘束を受け、コンクリートの自由な変形が抑制されたことによるものと考えられる。このことから、内部拘束ひび割れの抑制においても、表面付近の適量の鉄筋配置により、膨張材の効果を期待できるものと考えられる。

(2) 壁部での計測結果

壁部の中心付近および天端角付近の有効ひずみの推移をそれぞれ図 - 11, 12 に示す。中心付近では、打込み初期から材齢 5 日程度まで膨張コンクリートと普通コンクリートで 200 μ 程度の差が生じていたが、材齢 5 日を過ぎた時点で急激にその差は拡大し、材齢 7 日頃からは 1000 μ 程度の差が継続推移を示した。この原因として、普通コンクリートは材齢 5 日に部材内部に温度ひび割れが発生し、さらに材齢 7 日で型枠脱型による急激な気温変化の影響により貫通に至ったことが推察される。

一方、天端付近では中心付近のような急激な有効ひずみの差の拡大は認められず、材齢初期から 200 μ 程度の差が継続した。材齢 5 日以前について着目すると、中心付近および天端付近において認められる有効ひずみの差は 200 μ 程度であり、両者はほぼ同様の値を示していた。壁のように外部拘束が大きいと考えられる部材については、膨張材によって部材全体にプレストレスが導入されることで、有効ひずみ(有効応力)が低減されたものと捉えることができる。このことから、壁部材のような外部拘束が卓越する部材については、膨張材による応力低減効果を期待できるものと考えられる。

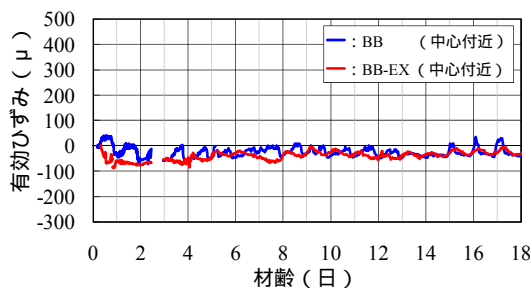


図 - 9 有効ひずみ推移 (フーチング中心付近)

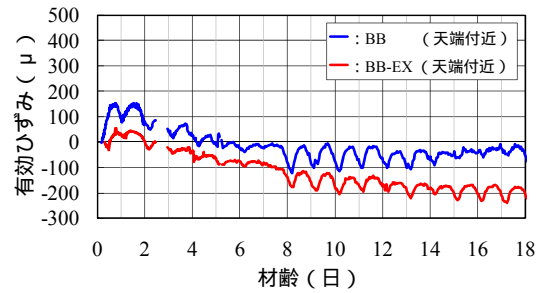


図 - 10 有効ひずみ推移 (フーチング天端付近)

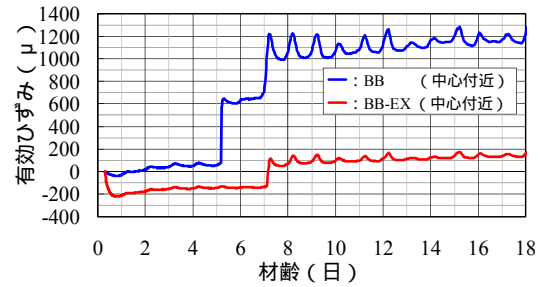


図 - 11 有効ひずみ推移 (壁中心付近)

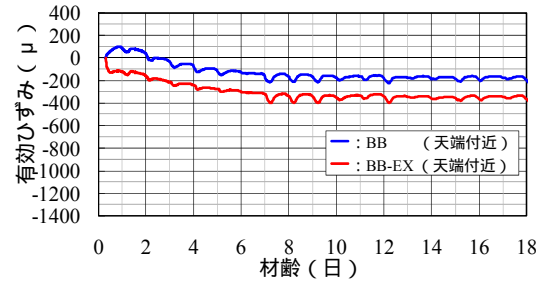


図 - 12 有効ひずみ推移 (壁天端付近)

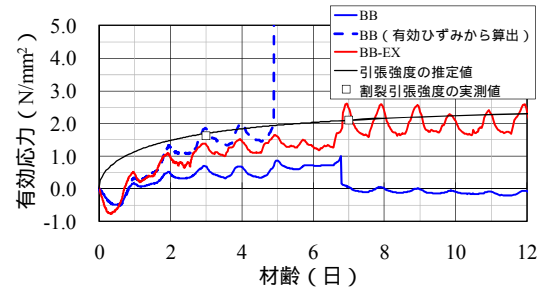


図 - 13 有効応力の推移 (壁中央断面)

3.4 膨張材添加による壁部材の応力低減効果の評価

図 - 13 に壁部スパン中央断面に設置した有効応力の計測結果を示す。なお、図中には材齢 3, 7, 28 日における現場封緘養生供試体による圧縮強度から式(1)にて推定した引張強度¹⁾と割裂引張強度の実測値を示した。

$$f_{tk}(t) = 0.44\sqrt{f'_c(t)} \quad (1)$$

ここに、 $f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度 (N/mm^2)、 $f'_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2) である。

これによれば、両コンクリートとも打込み初期に圧縮応力が発生し、材齢 1 日以降から引張応力が発生する傾向は同じであったが、計測された引張応力は普通コンクリートより膨張コンクリートのほうが大きく、普通コン

クリートの有効応力は材齢7日以降からほぼ零に、膨張コンクリートでは引張応力がやや大きめにシフトする推移を示した。

次に、有効応力と有効ひずみの関係を図-14に示す。なお同図では、普通コンクリートに関しては、図-11における有効ひずみが急変した材齢5日までのデータを、膨張コンクリートに関しては、図-11、13における材齢7日までのデータを使用した。また両コンクリートとも圧縮の有効応力が計測された材齢までは実測データをそのまま使用し、引張の有効応力が計測された材齢以降は外気温による小刻みな変動の影響をなくすため、図-11に示した有効ひずみ、図-13に示した有効応力の推移を前後12時間の移動平均として計算した値を使用した。この結果によると、普通コンクリートでは有効ひずみが0~-40 μ の間は膨張・収縮過程とも有効応力と有効ひずみの勾配がほぼ同じであったが、収縮過程の有効ひずみが0 μ 以上になった段階から両者の勾配が小さくなった。一方、膨張コンクリートでは膨張過程における勾配は緩やかであったが、収縮過程に入ってから勾配が急になり、ほぼ直線的に有効応力が増加した。

上記の有効応力と有効ひずみの勾配から有効ヤング係数を推定した結果を図-15に示す。なお、同図には材齢3, 7, 28日における現場封緘養生供試体による圧縮強度から式(2)により推定したヤング係数と、ヤング係数の実測値を示した。なお式(2)は、文献1)を参考にして、温度上昇時のクリープの影響が大きいことによる補正係数を考慮しないヤング係数を示している。

$$E_c(t) = 4700\sqrt{f'_c(t)} \quad (2)$$

ここに、 $E_c(t)$ ：材齢t日におけるコンクリートの引張強度(N/mm²)、 $f'_c(t)$ ：材齢t日におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm²)である。図-15によると、両コンクリートの有効ヤング係数は、材齢0.3~0.5日付近において不連続となっているが、これは図-14に示したように有効応力と有効ひずみの勾配が膨張過程から収縮過程に変化した影響と考えられる。また、膨張過程における普通コンクリートの有効ヤング係数は膨張コンクリートに比べて大きい、収縮過程になると膨張コンクリートの有効ヤング係数が大きくなり、特に材齢2日以降の膨張コンクリートの有効ヤング係数は式(2)にて推定したヤング係数とほぼ同等に推移した。それに対し普通コンクリートの有効ヤング係数は式(2)の推定値の半分程度と小さくなった。今回の計測結果からは、この現象に対する明確な理由は不明であるが、図-11に示した有効ひずみでは膨張材の有無の違いにより応力低減に寄与するひずみの導入が確認できたのに対し、図-13の有効応力計の計測値では膨張材添加による応力低減

の効果が見られなかったこと、図-14、15の結果では収縮過程における有効ヤング係数の値が小さかったことから、普通コンクリートの有効応力計による測定値が相対的に小さい値を示した可能性が考えられる。

そこで、図-14に示した膨張コンクリートにおける収縮過程の勾配と、図-11に示した普通コンクリートの有効ひずみを用いて、普通コンクリートの有効応力の推移を試算した結果を図-13に併記した。その結果、試算した普通コンクリートの有効応力は材齢3日からほぼ引張強度と同じ応力で推移し、材齢5日でひび割れ発生と思われる挙動が見られた。なお、ひび割れ発生前の試算による普通コンクリートと膨張コンクリートの応力の比較から、膨張材添加により概ね0.5N/mm²の応力低減が発揮されていたものと思われる。

3.5 壁部材のひび割れ発生状況

材齢7日経過後に型枠を取り外し、ひび割れの発生状況を確認したところ、普通コンクリートではスパン中央断面の壁部下端から鉛直方向に1本貫通ひび割れが発生していた。一方、膨張コンクリートでは有効応力計よりも上方で不規則な方向のひび割れが確認された。

この理由としては、膨張コンクリートの壁部下端では強い拘束によりプレストレスが有効に発揮されひび割れ発生を抑制できたが、拘束のやや弱まる中央ではプレストレスがひび割れ発生に対して不足していたと考えられる。ひび割れ発生状況から見ると、膨張コンクリートの場合、同一断面内の高さ方向に対して拘束度合いが異なるため、高さ方向の各部位で異なるプレストレスが導入され、普通コンクリートとは異なる応力分布となっていた可能性がある。

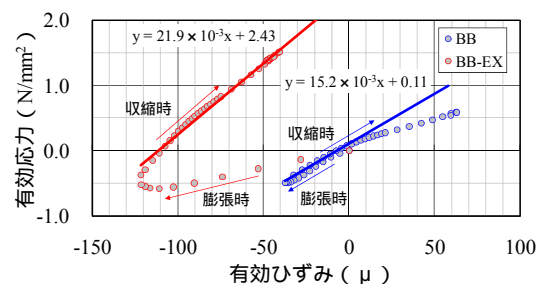


図-14 有効応力と有効ひずみの関係(壁中央断面)

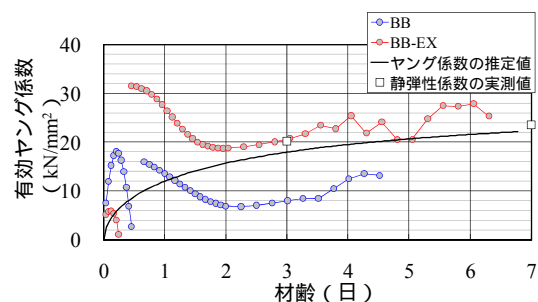


図-15 有効ヤング係数の推移(壁中央断面)

4. 解析手法の検討

4.1 事前の温度応力解析

実験に先立ち、三次元有限要素法による温度応力解析を実施した。解析において膨張材の効果を表現する方法については、過去に筆者らが提案した方法（膨張材の効果を膨張ひずみで直接入力する方法）²⁾を用いた。解析モデルはフーチング・壁試験体の1/4を対象とし、鉄筋のモデル化は行わなかった。なお解析に用いた諸元は、同研究で用いた同配合の各値を用いたが、膨張コンクリートの線膨張係数は一般的に普通コンクリートと同等とされることが多いことから、普通コンクリートと同じ値とした。解析に用いた諸元を表-3に示す。

表-3 温度応力解析における諸元

| 項目 | | BB | BB-EX |
|----------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| コンクリートの熱特性 | 熱伝導率 | 2.5[W/m] | |
| | 密度 | 2400[kg/m ³] | |
| | 比熱 | 1.3[kJ/kg] | |
| 表面の熱伝達係数 | | 示方書に準拠 | |
| 断熱温度上昇特性 | Q | 37.0[] | 39.5[] |
| | | 1.5 | 1.5 |
| 線膨張係数 | | 10.7[μ/] | |
| 圧縮強度推定式 | f _c (91) | 30.7[N/mm ²] | 31.7[N/mm ²] |
| | a | 4.44 | 3.72 |
| | b | 0.97 | 1.00 |
| ヤング係数の補正係数 | φ(0~3日) | 0.73 | |
| | φ(5日~) | 1.00 | |
| 体積ひずみ {1-exp(-t)} | | -124 | 115 |
| | | -0.9 | -1.61 |
| | | 0.93 | 0.32 |

4.2 実測値との対比結果

事前解析結果と実測した各ひずみ計の値などから算出した埋込型ひずみ計設置位置（実ひずみ計測位置）における有効応力を比較した結果を図-16に示す。なお、実測値から求めた有効応力は式(3)により、有効弾性係数は文献1)に示される式により算出した。

$$\sigma_e(t) = \sum_{i=1}^t [E_e(i) \times \{\varepsilon_e(i) - \varepsilon_e(i-1)\}] \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_e(t)$: 材齢 t 日の有効応力(N/mm²)、 $E_e(i)$: 材齢 i 日の有効弾性係数(N/mm²)、 $\varepsilon_e(i)$: 材齢 i 日の有効ひずみである。壁部における各計測位置から算出した有効応力は、断面中央部および側面下側は圧縮から引張へ、側面上側は引張から圧縮となる傾向を示した。また、有効応力の大きさは、断面中央部および側面下側に発生した引張応力が普通コンクリートに比べ、膨張コンクリートは小さな値を示した。側面上側については、膨張材の有無で大きな差は見られなかった。事前に行った解析結果と比較すると、各計測位置での有効応力の変動傾向は実測値から算出した有効応力の傾向と同様であったが、何れのコンクリートでも、材齢2日以降、解析値が実測値

から算出した値よりも+側（引張側）の値を示した。側面上側の結果は、実際に作用した拘束の程度が解析よりも小さかったことやコンクリートの変形特性が解析と実測で異なったこと、断面中央および側面下側の結果は、初期の膨張特性が異なっていたことによる差であったと考えられる。

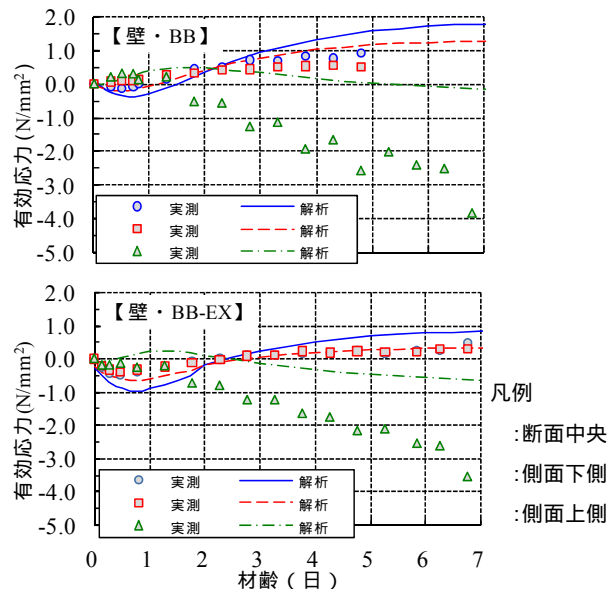


図-16 解析値と実測値との対比（有効応力）

5. まとめ

本実験で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 内部拘束の卓越する部材においても、鉄筋が適量配置されている箇所については、膨張材によるひび割れ抑制効果を期待できる可能性が認められた。
- (2) 壁構造のような外部拘束によるひび割れが問題となる部材については、膨張材の応力低減効果を期待してよいものと考えられる。
- (3) 膨張材の効果を膨張ひずみとして評価する温度応力解析によれば、壁部の有効応力の変動傾向は実測値から算出した有効応力の傾向と定性的な一致を示しており、乾燥収縮の影響や体積ひずみの値に配慮することで部材の実際の挙動を反映できそうである。

なお本実験は、早稲田大学清宮研究室、あおみ建設、五洋建設、東亜建設工業、東洋建設、若築建設の共同研究として実施したものである。

参考文献

- 1) (社)土木学会:2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編, pp.340-341, pp.87-95, 2008.3
- 2) 壹岐直之, 清宮理, 何海明, 植田智幸: 膨張材を混入したコンクリート梁の挙動とひび割れ抑制効果の解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.157-162, 2008.6