

論文 実環境における高炉セメントを用いた場所打ちコンクリート床版の膨張収縮挙動に関する検討

小泉 敬太^{*1}・佐竹 紳也^{*2}・田中 喜一郎^{*3}・岩城 一郎^{*4}

要旨：高炉セメントを用いたコンクリートを場所打ちコンクリート床版に適用する場合を想定し、実床版を模擬した供試体による冬季・夏季施工の現場曝露試験を実施し、実環境が膨張収縮挙動に与える影響について検討を行った。試験は、コンクリートの基本性状確認のための膨張収縮試験と、実際の場所打ちコンクリート床版の施工を模擬した実床版模擬試験の2シリーズを実施した。検討の結果、高炉セメントにおける膨張材添加の有効性を確認し、普通ポルトランドセメントとの比較による膨張収縮挙動の相違を把握した。

キーワード：高炉セメント, 場所打ちコンクリート床版, PC床版, 膨張材

1. はじめに

近年、グリーン購入法が施行されたことにより、公共工事において高炉セメントが特定調達品目となり、その積極的な使用が求められてきている。これまで高炉セメントを用いたコンクリートは、その特性から、海洋構造物またはマスコン構造物に多く適用されていたが、初期強度が小さくまた中性化速度が大きいなどといった特性も持つことから、早期強度が必要であり、断面が薄くかぶりが小さなコンクリート床版のような構造には適用される事例は少なかったと言える。場所打ちコンクリート床版は、打継ぎ施工を行う場合が多く、コンクリートに膨張収縮の体積変化が起こる際、先に施工された床版の拘束作用により打継ぎ付近に引張応力が発生する。また、桁による拘束作用や、連続桁における打込みに伴う変位の影響などにより比較的引張応力が発生しやすく、さらに、断面が薄く体積表面積比が小さいため、乾燥収縮を受けやすい構造であるとも言える。比較的自己収縮が大きく、ひび割れ抵抗性が小さいことが報告さ

れている高炉セメント^{1),2)}を、このような構造物へ適用するに当たっては、ひび割れ抵抗性の改善が求められる。既往の研究より、場所打ちコンクリート床版構造において、ひび割れ抵抗性の改善に膨張材の添加が有効であることが報告されている³⁾。また、膨張材の効果における温度依存性についても研究がなされている⁴⁾。しかし、膨張材を高炉セメントに適用した場合についての研究報告は少なく、環境温度の影響や構造断面の影響など、その有効性や膨張収縮挙動について確認されているとは言い難い。そこで本試験では、膨張材を添加した高炉セメントを場所打ちコンクリート床版に適用する場合を想定し、膨張収縮試験供試体および実床版模擬供試体による冬季・夏季試験を実施し、その膨張収縮挙動について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの配合

表-1に本試験における配合を示す。配合は場所打ちコンクリート床版の施工を想定し、設計

*1 横河工事（株） 技術開発室 技術開発グループ（正会員）

*2 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 混和材料グループ リーダー（正会員）

*3 横河工事（株） 東京建設本部 コンクリート構造施工室長

*4 日本大学 工学部 土木工学科 助教授 博士（工学）（正会員）

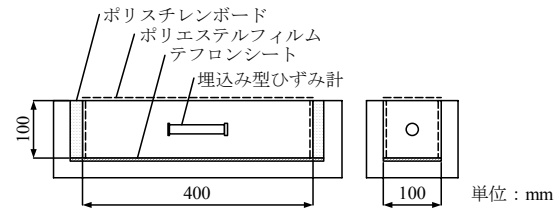
表－1 コンクリートの配合

記 号	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
			水 W	セメント C	膨張材	細骨材 S 山砂 砕砂	粗骨材 G 2005	AE 減水剤	
BB	39.5	41.2	175	443	-	475 204	1011	4.873	
BB(Ex)	39.5	41.3	175	423	20	477 204	1011	4.873	
N(Ex)	39.5	42.5	170	410	20	503 215	1011	4.730	

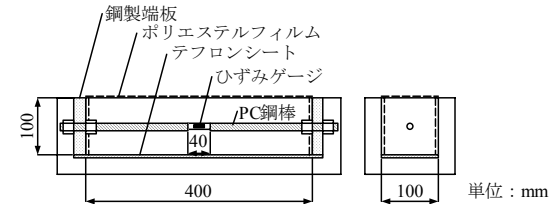
基準強度は $f_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ，粗骨材の最大寸法 $G_{max}=20\text{mm}$ ，スランプ $12\pm 2.5\text{cm}$ ，空気量 $4.5\pm 1.5\%$ とし，高炉セメント B 種，高炉セメント B 種＋膨張材，普通ポルトランドセメント＋膨張材の 3 配合とした。以下，それぞれの配合を BB，BB(Ex)，N(Ex)と記す。なお，各配合の標準養生 28 日圧縮強度は，冬季試験で BB:41.5 N/mm²，BB(Ex):43.1 N/mm²，N(Ex):45.9N/mm²，夏季試験で BB:36.6 N/mm²，BB(Ex):38.5 N/mm²，N(Ex):42.9N/mm²であり，設計基準強度を満足している。細骨材は宮城県大和産山砂（表乾密度 2.56g/cm³，吸水率 1.99%，粗粒率 2.60）と宮城県登米産砕砂（表乾密度 2.68g/cm³，吸水率 1.13%，粗粒率 3.00）の質量比 7:3 の混合砂，粗骨材は宮城県登米産砕石 2005（表乾密度 2.71g/cm³，吸水率 0.74%，実積率 58.0%）を使用した。なお膨張材を添加したコンクリートは，低添加型石灰系膨張材を 20kg/m³ 内割置換した収縮補償用コンクリートとした。

2.2 膨張収縮試験

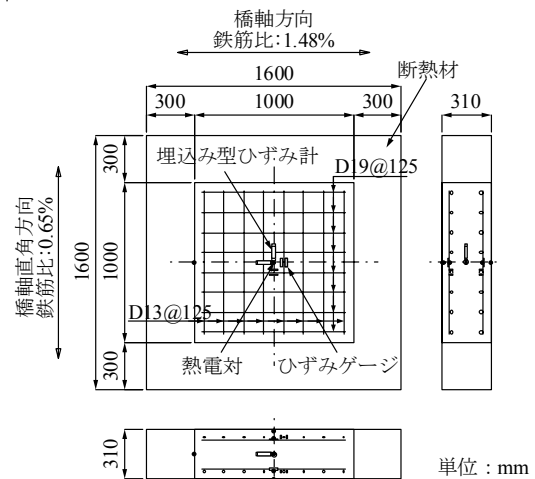
実環境におけるコンクリートの基本性状を確認するため，無拘束供試体および拘束供試体を用いて冬季および夏季の現場曝露による膨張収縮試験（無拘束試験および拘束試験）を行った。図－1 に無拘束供試体の形状および寸法を示す。型枠には，コンクリートの自由変形が拘束されるのを防ぐ処置を施した。ひずみは，低弾性型（見かけの弾性係数：40N/mm²）の測温機能付埋込み型ひずみ計を用いて測定した。図－2 に拘束供試体の形状および寸法を示す。拘束鋼材比 1.0%とした鋼材ひずみを，鋼材中央部に対称貼付した 2 枚の測温機能付ひずみゲージにより計測を行った。養生は，打込みから 7 日間は，型枠に存置し上面からの乾燥を防ぐようポリエス



図－1 無拘束供試体



図－2 拘束供試体



図－3 実床版模擬供試体

テルフィルムを被せた。その後は，脱型し気中乾燥状態とした。

2.3 実床版模擬試験

場所打ちコンクリート床版を模擬した供試体を作製し，冬季および夏季の現場曝露試験を行うことにより，実際の施工環境下におかれた場合の，膨張収縮挙動の検討を行った。図－3 に実床版模擬供試体の形状および寸法を示す。供試体は，鉄筋の付着を考慮し 1m×1m，厚さを 310mm とし，打込み時および養生時の断面内部の状態を再現するため，周囲に 300mm 幅の断熱材（ポリスチレンフォーム）を用いて簡易断熱を行った。また，下面の状態も実環境に合わせ放熱状態とするため直接地面には置かず，支保工を設置してかさ上げを行った。鉄筋比は PC 床

版構造を想定し、橋軸方向 1.48% (D19@125)、橋軸直角方向 0.65% (D13@125) とした。養生は、冬季試験では給熱養生および湿潤養生を 7 日間行い、夏季試験では湿潤養生を 7 日間行った。計測は、コンクリート温度を供試体中央付近で熱電対により断面高さで 5 点、ひずみを上下段の鉄筋に対称貼付した 2 枚のひずみゲージおよび埋込型ひずみ計により行った。

2.4 計測ひずみ

埋込み型ひずみ計については、計測された全ひずみから線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした温度ひずみを差引き、温度変化に伴う体積変形を除いたひずみで整理した。鋼材に貼り付けたひずみゲージは、自己温度補償型のものを使用したため、計測されたひずみで整理した。本稿では、これらのひずみを膨張収縮ひずみと定義する。一般に自己収縮ひずみの起点は凝結始発としている⁵⁾が、本試験では、鋼材に貼り付けたひずみゲージが安定してひずみを計測し始めた時点を、セメント硬化体の骨格が形成されたとみなし、ひずみの起点とした。

2.5 試験水準

無拘束試験および拘束試験の試験水準は、配合別で 3 水準とし、測定値を平均化するため 1 水準 3 体とした。また、実床版模擬試験の試験水準は、配合別で 3 水準とし、1 水準 1 体とした。以下、グラフにおいて無拘束試験の供試体名に F を、拘束試験の供試体名に R を、実床版模擬試験の供試体名に CS を記して表現する。

2.6 試験現場条件

実環境における施工を再現し、環境条件の影響を検討するため、宮城県登米市豊里町において、冬季・夏季の現場曝露試験を行った。打込みは、冬季試験：平成 17 年 12 月 15 日、夏季試験：平成 18 年 8 月 28 日に行い、試験期間は、若材齢時の膨張収縮挙動に着目し、冬季試験は材齢 28 日まで、夏季試験は材齢 14 日までとした。なお、冬季試験において実床版模擬供試体の計測は、現場の都合上、材齢 25 日までで終了した。図-4 に冬季・夏季試験期間の外気温を示

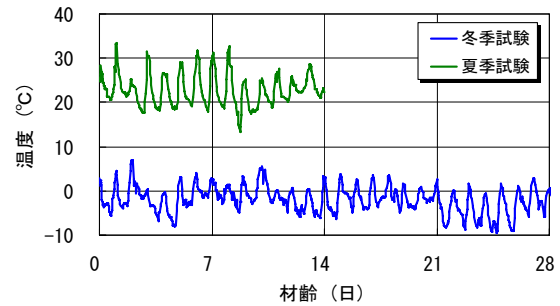
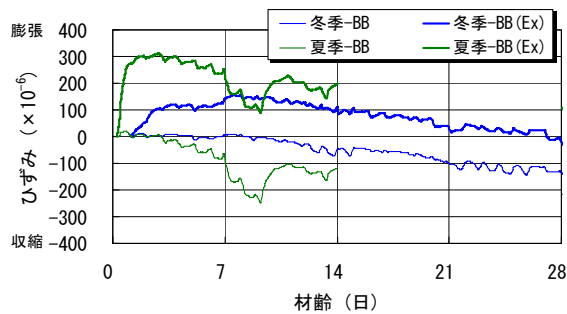


図-4 試験期間の外気温

す。それぞれ試験期間の平均気温は、冬季試験で -1.8°C 、夏期試験で 23.0°C であり、冬期の気温が低い東北の内陸型気候であると言える。

3. 膨張収縮試験結果

図-5 に、無拘束試験における BB(Ex)と BB の膨張収縮ひずみ履歴を示す。まず、冬季試験の結果より、乾燥開始前の材齢 7 日までは、BB(Ex)は緩やかに膨張ひずみが増加しているのに対し、BB は膨張収縮をほとんど示さず、乾燥開始後は何れも乾燥収縮の影響を受けて収縮傾向に転じている。材齢 28 日でのひずみは、BB(Ex) はほぼ 0、BB は -120×10^{-6} 程度で、この差が概略膨張材による作用と言える。次に、夏季試験の結果より、BB(Ex)は材齢 3 日まで急激に膨張ひずみが増加し、その後収縮傾向に転じているのに対し、BB は材齢初期から収縮傾向を示している。何れも乾燥開始後はさらに収縮ひずみが増大している。材齢 10 日程度で一旦膨張しているのは、降雨の影響であると考えられる。材齢 14 日での膨張収縮ひずみは、BB(Ex)は 190×10^{-6} 、BB は -130×10^{-6} 程度であり、その差は冬季よりも明らかに大きい。乾燥開始前の収縮は自己収縮によるものであり、夏季においては外気温が高く水和反応が活性化したため、自己収縮ひずみが増大したものと考えられる⁵⁾。一方、膨張材による膨張作用も反応の温度依存性に従い、夏季においては、早期にしかも非常に大きな膨張ひずみが発生し、このことが膨張材の有無による膨張収縮挙動に顕著な差をもたらしたと考えられる。



図－5 無拘束試験における膨張収縮ひずみ
膨張材添加の影響

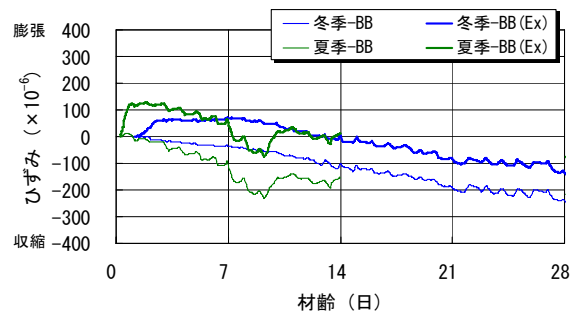
冬季試験では材齢 8 日、夏季試験では材齢 3 日の最大膨張ひずみ到達以降に着目すると、冬季・夏季試験ともに、BB(Ex)と BB のひずみ挙動はほぼ平行に推移しており、膨張材の添加による乾燥収縮および自己収縮に対する有意差はないと言える。以上のことから、膨張材の効果は、概略、温度条件に応じた膨張作用による最大膨張ひずみとその時点での膨張材を用いない場合の自己収縮ひずみとの差によってもたらされると考えられる。

図－6 に、拘束試験における BB(Ex)と BB の膨張収縮ひずみ履歴を示す。全体的な膨張収縮挙動は、無拘束試験とほぼ同様であるが、膨張材による膨張ひずみは鋼材による拘束を受け、明らかに抑制される傾向を示している。

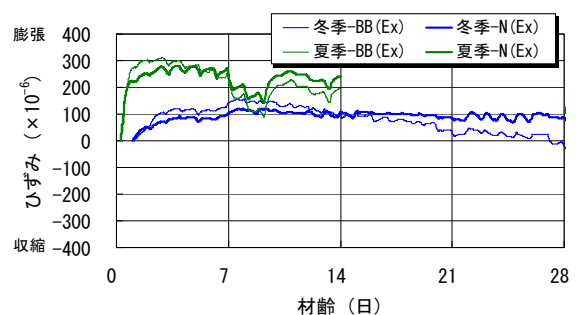
図－7 に、セメントの種類の比較として、無拘束試験における BB(Ex)と N(Ex)の膨張収縮ひずみ履歴を示す。図より、冬季・夏季試験何れも最大膨張ひずみは、N(Ex)に比べ BB(Ex)の方が 50μ 程度大きい傾向にあり、膨張材添加の有効性は高炉セメントの方が高いと言える。しかし、BB(Ex)では、その後の収縮ひずみが大きく、冬季試験では乾燥開始後に、夏季試験では乾燥開始前に、N(Ex)とひずみが逆転する結果となった。このことは、普通ポルトランドセメントに比べ、高炉セメント B 種では、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ共に大きいことが原因と考えられる。

4. 実床版模擬試験結果

図－8 に冬季の、図－9 に夏季の実床版模擬試



図－6 拘束試験における膨張収縮ひずみ
膨張材添加の影響



図－7 無拘束試験における膨張収縮ひずみ
セメントの種類の比較

験における、BB(Ex)と BB の膨張収縮ひずみ履歴と、BB(Ex)のコンクリートの温度履歴を示す。BB(Ex)の内部最高温度は、冬季で 17.6°C (材齢 2.1 日) 夏季で 49.9°C (材齢 1.1 日) であった。BB(Ex)の膨張収縮ひずみは、冬季試験では、材齢 10 日まで緩やかに膨張ひずみが増加し、その後収縮に転じているが、夏季試験では、材齢 1 日程度まで急激に膨張ひずみが増加し、その後収縮に転じている。BB の膨張収縮ひずみは、材齢初期の乾燥開始前から収縮傾向を示し、特に夏季試験、または材齢初期で大きな収縮挙動を示している。このような傾向は、コンクリート床版の水和熱に起因する温度履歴が与えられたことにより、自己収縮ひずみが増大したためと考えられる⁵⁾。材齢 7 日以降の乾燥環境においても明確な乾燥収縮挙動は見られなかったが、この理由として、実床版模擬供試体では、膨張収縮試験供試体に比べ、断面が大きく、体積表面積比が大きいことから、断面の中心にまで顕著な乾燥収縮の影響が及ぼさなかったためと考え

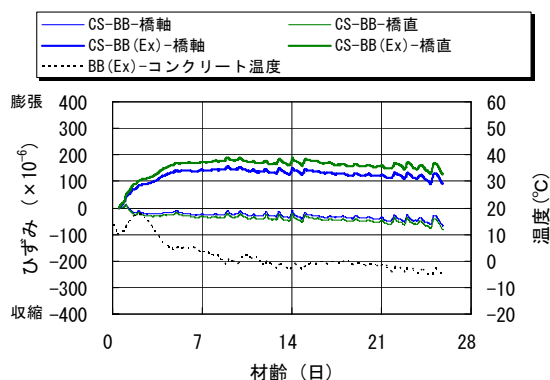


図-8 冬季 実床版模擬試験
膨張材添加の影響

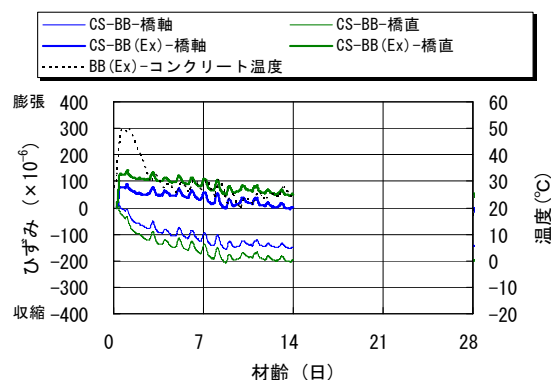


図-9 夏季 実床版模擬試験
膨張材添加の影響

られる。BB(Ex)と BB の膨張収縮ひずみの差は、測定終了時の材齢 25 日で冬季試験では橋軸方向 160×10^{-6} 程度、橋軸直角方向 210×10^{-6} 程度、夏季試験では橋軸方向 160×10^{-6} 程度、橋軸直角方向 250×10^{-6} 程度であり、膨張材添加による収縮ひずみの低減効果が確認できた。橋軸方向と橋軸直角方向における、収縮ひずみの低減効果の差は、それぞれの鉄筋比が 1.48%と 0.65%であったことによるものである。鋼材比 1.0%の拘束試験と比べ、橋軸方向は鉄筋比が大きいにも関わらず、両方向ともに収縮ひずみの低減効果が大きいことが分かる。これは膨張材の反応が水和反応に起因するものであり、コンクリート床版の温度履歴が与えられたことにより、その効果が増大したためと考えられる。この収縮ひずみの低減効果について、いくつかの仮定を用いて膨張材の有無によるコンクリートの応力をそれぞれ算出し、その差より膨張材により導入されるコンクリートの圧縮応力を評価した。すなわち、鉄筋およびコンクリートを一軸部材と仮定し、両者の力の釣り合い式を式(1)より求め、また、ひずみの適合条件を式(2)とし、式(1)と式(2)を用いて応力を式(3)により推定した。

$$\sigma_c A_c + \varepsilon_s E_s A_s = 0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \quad (2)$$

$$\sigma_c = -\frac{A_s}{A_c} E_s \varepsilon_c \quad (3)$$

ここに、 σ_c : コンクリートの応力、 A_c : コン

クリートの断面積、 ε_c : コンクリートのひずみ、 A_s : 鉄筋の断面積、 E_s : 鉄筋の弾性係数($2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)、 ε_s : 鉄筋のひずみ

結果、導入される圧縮応力は、冬季試験で橋軸方向 0.48 N/mm^2 、橋軸直角方向 0.28 N/mm^2 、夏季試験で橋軸方向 0.40 N/mm^2 、橋軸直角方向 0.32 N/mm^2 となる。すなわち、場所打ちコンクリート床版に、高炉セメントを用いたコンクリートを適用する場合、膨張材を添加することにより $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2$ 程度の圧縮応力の導入が推定された。以上のことから、場所打ちコンクリート床版のように引張応力が発生しやすい構造物に、ひび割れ抵抗性の低下が懸念される高炉セメントを用いる場合、膨張材の添加が有効であると言える。

図-10 に実床版模擬試験におけるセメントの種類の比較として、BB(Ex)と N(Ex)の橋軸方向の膨張収縮ひずみを示す。最大膨張ひずみに大きな差はないが、膨張後ほとんど収縮していない N(Ex)に比べ、BB(Ex)は収縮に転じ、その傾向は特に夏季試験で顕著である。測定終了時の橋軸方向のひずみを比較すると、N(Ex)は冬季試験、夏季試験ともに 100μ 程度であるのに対し、BB(Ex)は冬季試験で約 100μ 、夏季試験ではほぼ 0 となり、冬季試験ではセメントの種類による大きな差はないが、夏季試験では BB(Ex)の方が、明らかに膨張効果が薄れるという結果となった。なお、本研究では、高炉セメントを用いたコン

クリートの膨張収縮挙動に着目し検討を行ったが、加えて高炉セメントは、強度発現性が低く、この傾向は特に低温下で顕著に表れるため⁶⁾、ひび割れ抵抗性を評価する際にはその影響も考える必要がある。

以上のことから、高炉セメントを用いたコンクリートは普通コンクリートと比べ、ひび割れ抵抗性が小さくなるため、実コンクリート床版施工へ適用する場合は、膨張材の使用を前提に収縮抑制対策を講じる必要があると考えられる。本研究の範囲より、夏季は水和熱に伴うコンクリート温度の上昇に伴い、短期間に膨張し、その後急激に収縮する挙動が確認されたため、この種の床版の設計施工に当たっては、この影響を考慮したひび割れ対策を講じる必要があると思われる。

なお、本試験の結果は、養生を十分に行った場合の結果であり、養生が品質の良否に与える影響が大きい高炉セメントでは、養生の重要性を認識し施工する必要がある。

5. まとめ

本試験より得られた知見を、以下に示す。

- (1)冬季および夏季における実環境下での高炉セメントを用いたコンクリートの膨張収縮挙動を測定した結果、膨張材添加の有効性を確認した。
- (2)コンクリート床版温度履歴下において、PC床版構造を想定した鉄筋比では、膨張材による顕著な収縮ひずみ低減効果が得られ、 $0.3 \sim 0.5\text{N/mm}^2$ 程度の圧縮応力の導入が推定された。
- (3)普通ポルトランドセメントに比べ高炉セメントの方が、収縮ひずみが大きく特に環境温度が高くコンクリート温度が高くなる場合に、大きな収縮挙動を示した。
- (4)高炉セメントを用いたコンクリートは普通コンクリートに比べ、ひび割れ抵抗性が小さくなるため、場所打ちコンクリート床版に適用する場合、膨張材の使用や施工方法等、収縮ひび割れ抑制に対する検討を行う必要がある。

今後は、膨張材を添加した高炉セメントを用

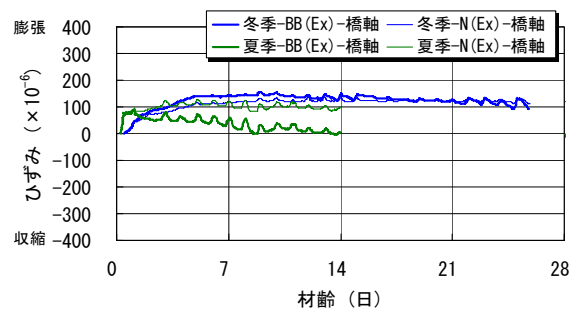


図-10 実床版模擬試験
セメントの種類の比較（橋軸方向）

いたコンクリートの水和熱に起因した膨張収縮挙動の究明をさらに進め、これらの挙動を解析により予測できる手法を構築することが課題であると思われる。

謝辞：本試験にご協力頂いた丸宮コンクリート工業（株）の各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 小田部裕一，小林隆芳，百瀬晴基，閑田徹志：各種セメントを用いた膨張コンクリートのひび割れ抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.419-424，2003
- 2) 久保証則，青木茂，新村亮，原田暁：高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.763-768，1997
- 3) 高瀬和男，高嶋豊，河西龍彦，橘吉宏：膨張コンクリートを用いたPC床版試験体の長期計測結果，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.685-690，2004
- 4) 三谷裕二，谷村充，佐久間隆司，佐竹紳也：膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.155-160，2003
- 5) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.133-150，1996
- 6) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー-86，pp.6，pp.44