

中庸熱ポルトランドセメントを用いた 膨張コンクリートの膨張収縮挙動に関する研究

唐沢 智之*1・本間 博行*1・鬼塚 雅嗣*2

概 要

近年、コンクリート構造物の早期劣化につながる、コンクリートのひび割れに関する話題が多く取り上げられている。今回、ひび割れの対策として、中庸熱ポルトランドセメントを用いた膨張コンクリートを実構造物に適用した。打設した膨張コンクリートの効果(ひび割れ抑制効果)を確認するために、耐震壁部分のひずみ挙動の実測を行い、さらに、実構造部材の一部を模擬した小型試験体のひずみ挙動を普通コンクリート(普通セメントおよび中庸熱セメント)と比較することにより、膨張コンクリートの膨張効果を確認した。その結果、今回採用した膨張コンクリートは、3ヶ月経過した時点で収縮ひずみ(引張応力)は発生しておらず、ひび割れも全く発生していなかった。また、小型試験体、実構造物とも、膨張コンクリートについては、乾燥収縮ひび割れの抑制に効果があることがわかった。

キーワード：膨張コンクリート、膨張剤、中庸熱セメント、ひび割れ

Study on expansion and shrinkage of expansive concrete using moderate heat portland cement

Tomoyuki KARASAWA*1 Hiroyuki HONMA*1 Masatsugu KIZUKA*2

Abstract

Concrete cracking, a frequently discussed issue, will lead to premature deterioration of concrete structures. To prevent cracks, expansive concrete prepared with moderate heat portland cement was used for building an actual structure. For the purpose of verifying the performance (crack prevention) of placed expansive concrete, the authors measured behavior in the earthquake resisting walls, and validated the expansion of this concrete by comparing the strain behavior of small specimens simulating a part of the actual structure with that of ordinary concrete (ordinary cement and moderate heat cement). The study results showed that, in the expansive concrete, neither shrinking strain nor crack had occurred after three months. Moreover, we verified that the expansion concrete was, in both small specimens and actual structures, effective for limiting cracking due to drying shrinkage.

Keywords: expansive concrete, expansion agent, moderate heat cement, cracking

*1 Material/Structure Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

*2 Manager, Planning Business Group, Architectural Engineering Department, Engineering Division

中庸熱ポルトランドセメントを用いた膨張コンクリートの膨張収縮挙動に関する研究

唐沢 智之*1・本間 博行*1・鬼塚 雅嗣*2

1. はじめに

膨張コンクリートは、コンクリートのひび割れ低減対策として注目され、使用実績が増加傾向にある。それに伴い、建築物の構造部材において膨張コンクリートの挙動を測定し、膨張コンクリートの効果を定量的に評価した報告¹⁾がされているが、いまだその報告例は少ないのが現状である。

本実験では、中庸熱ポルトランドセメントを用いた膨張コンクリートを実構造物の耐震壁に適用し、そのひび割れ抑制効果を確認するためにひずみ挙動の実測を行った。さらに、実構造物の一部を模擬した小型試験体のひずみ挙動を普通コンクリートと比較することにより、膨張コンクリートの膨張効果を確認することを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 実験の組み合わせ

表-1にコンクリート種類と試験体の組み合わせを示す。実構造物の耐震壁には中庸熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた膨張コンクリート(M+EX)を使用した。実構造物におけるコンクリートの膨張収縮は、既設スラブ等の影響(外部拘束)や内部鉄筋の影響(内部拘束)を受ける。そこで内部拘束のみの影響を評価するために小型試験体を用いた。小型試験体は

表-1 コンクリート種類と試験体の組み合わせ

実験対象	コンクリート種類		
	普通コンクリート		膨張コンクリート
	N	M	M+EX
実構造物(耐震壁)	—	—	○
小型試験体	○	○	○

M+EX の他に、普通コンクリートとして普通ポルトランドセメントを使用した試験体(N)、中庸熱ポルトランドセメントを使用した試験体(M)の計3体とした。

2. 2 試験体形状

図-1に実験対象である実構造物の部材形状および計測位置を、図-2に小型試験体形状および計測位置を、

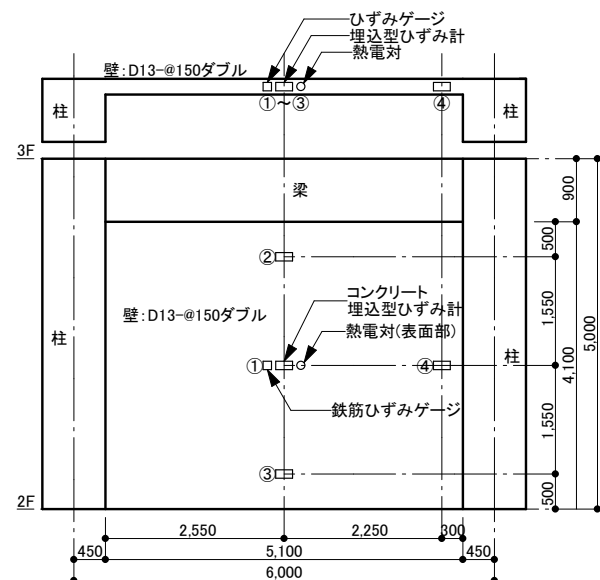


図-1 実構造物の部材形状および計測位置

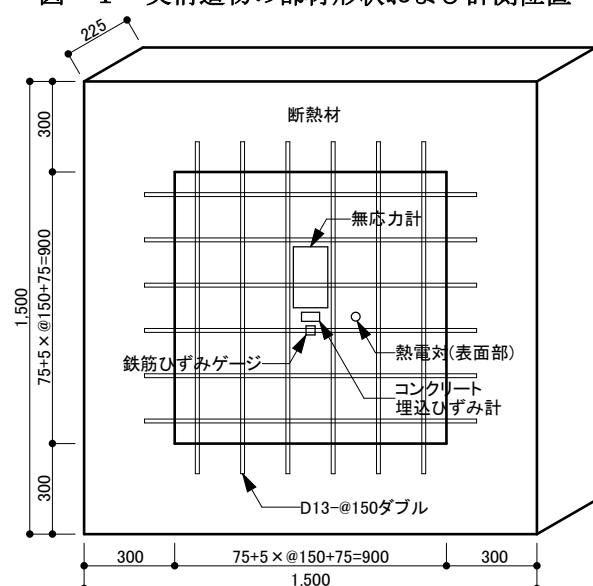


図-2 小型試験体の形状および計測位置

*1 エンジニアリング本部 技術センター 材料・構造グループ

*2 エンジニアリング本部 建築技術部 建築技術グループ課長

よび計測位置を示す。

対象部位の耐震壁は内法スパン 5.1m×高さ 4.1m, 厚さ 225mm, 配筋は D13-@150 ダブルである。

小型供試体は実構造物の一部を切り出したものを想定した。試験体形状は幅 900mm×高さ 900mm として, 試験体の周囲には厚さ 300mm の断熱材を設けて断熱境界とした。なお, 壁厚さおよび配筋は実構造物と同様とした。

2.3 計測項目および試験方法

実構造物の計測項目はコンクリート温度, コンクリートのひずみ, 鉄筋のひずみとした。

小型試験体の計測項目は, コンクリート温度, コンクリートのひずみ, 無応力計によるコンクリートの無拘束状態のひずみ, 鉄筋のひずみとした。

実構造物の計測位置はスパン中央部において上部, 中央, 下部の3箇所(図-1中①~③), 柱近傍の端部中央1箇所(図-1中④)とした。小型試験体の計測位置は試験体の中央部とした。

2.4 計測期間

計測はコンクリート打設から材齢91日まで連続して実施した。計測頻度について材齢3日までは1時間毎に, 材齢3日からは6時間毎のインターバルとした。

2.5 コンクリートの調合

表-2にコンクリートの使用材料を, 表-3にコンクリートの調合を示す。N は AE 減水剤を用いた一般的な調合で, M および M+EX は膨張材の効果を確認するため, 高性能 AE 減水剤を用いて単位水量および結合材量を同一としたコンクリートである。

2.6 物性試験

物性試験では圧縮強度試験(JIS A 1108), 静弾性係数試験(JIS A 1149), および割裂引張強度試験(JIS A 1113)を材齢 7, 28, 56, 91 日に行った。養生は現場封かん養生とした。また, 膨張収縮量確認のために長さ変化試験(JIS A 1129-3), 拘束膨張収縮試験(JIS A 6202 付属書 2(参考)拘束膨張収縮試験 B

法)を行った。養生および測定材齢は JIS に準拠した。

3. 物性試験結果

3.1 強度試験

表-4にコンクリートの強度試験結果一覧を, 図-3に圧縮強度試験結果を, 図-4に静弾性係数試験結果を示す。普通コンクリート(N, M)と比較して膨張コンクリート(M+EX)の圧縮

表-2 コンクリートの使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³ 中熟ポルトランドセメント 密度:3.21g/cm ³
混和材	低添加・水和熱抑制型膨張剤 密度:3.16g/cm ³
細骨材	千葉県君津産陸砂(混合率 60%) 表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:2.07%, 粗粒率:2.33 埼玉県秩父産砕砂(混合率 40%) 表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:1.56%, 粗粒率:3.19
粗骨材	東京都西多摩産砂岩碎石(最大骨材寸法 20mm) 表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:0.91%, 実積率:61.0%
混和剤	変性リグニンスルホン酸系 AE 減水剤 ポリカルボン酸系 高性能 AE 減水剤

表-3 コンクリートの調合

調合 記号	セメント 種類	膨張材	水結合 材比 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	混和剤
N	N	無	51.0	182	357	0	780	963	3.7 ^{※1}
M	M	無	49.0	172	351	0	830	934	4.2 ^{※2}
M+EX	M	有	49.0	172	331	20	830	934	4.2 ^{※2}

※1:AE 減水剤, ※2:高性能 AE 減水剤

表-4 強度試験結果一覧

試験項目	調合 記号	材齢			
		7日	28日	56日	91日
圧縮強度 (N/mm ²)	N	23.2	32.3	35.5	35.1
	M	24.4	34.6	34.3	38.8
	M+EX	28.6	38.1	41.7	41.6
割裂引張強度 (N/mm ²)	N	2.46	3.12	3.11	2.94
	M	2.40	2.81	2.87	3.03
	M+EX	2.66	3.25	3.30	3.75
静弾性係数 (kN/mm ²)	N	21.6	26.5	26.7	28.2
	M	22.2	27.0	27.0	27.8
	M+EX	23.3	27.8	29.1	30.2

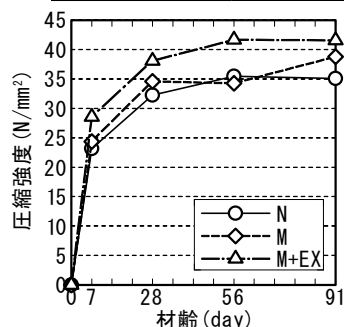


図-3 圧縮強度

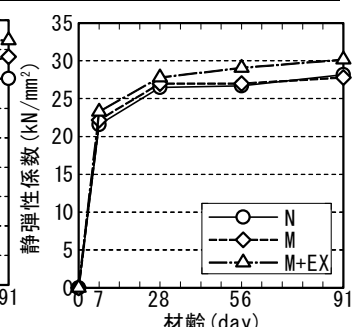


図-4 静弾性係数

強度、割裂引張強度、静弾性係数は、やや大きい傾向が見られた。

3. 2 膨張収縮量試験

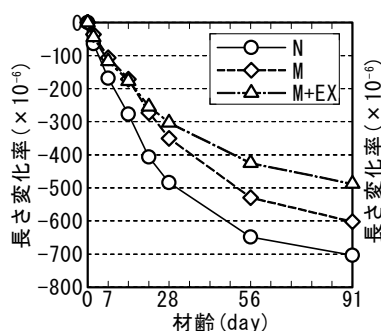
表－5 に膨張収縮量試験結果一覧を、図－5 に長さ変化試験結果を、図－6 に拘束膨張収縮試験(B 法)結果を示す。

N, M, M+EX の長さ変化を比較すると、M+EX が最も小さく、次いで M, N の順に大きくなり、材齢 91 日でそれぞれ 100μ 程度の差異が生じた。M+EX の収縮ひずみは膨張材を混入していない M と比較して小さな値を示し、材齢 91 日でも 500μ 程度に収まった。

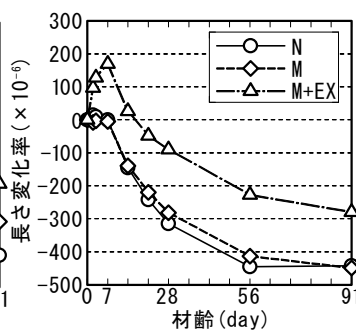
N, M, M+EX の拘束膨張収縮試験(B 法)結果を比較すると、膨張コンクリート(M+EX)の膨張ひずみは材齢 7 日で最大の 170μ に達しており、日本建築学会「膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案」²⁾に規定されている 150μ 以上を満足した。最大膨張ひずみ到達後は N, M と同様に収縮ひずみが増大したが収縮ひずみの絶対量は小さく、材齢 91 日で 280μ 程度であった。M と比較すると収縮ひずみが 4 割程度低減されており、膨張材混入の効果が顕著に認められた。

表－5 膨張収縮量試験結果一覧

試験項目	調査記号	材 齢							
		2 日	3 日	7 日	14 日	21 日	28 日	56 日	91 日
長さ変化 ($\times 10^{-6}$)	N	-64		-168	-277	-406	-484	-648	-703
	M	-36		-106	-171	-273	-350	-529	-602
	M+EX	-44		-117	-177	-254	-303	-425	-487
拘束 膨張収縮 ($\times 10^{-6}$)	N	15	10	0	-145	-242	-314	-445	-442
	M	-7	-3	-5	-139	-219	-281	-413	-449
	M+EX	97	128	170	26	-48	-90	-227	-279



図－5 長さ変化



図－6 拘束膨張収縮

4. 膨張・収縮挙動計測結果

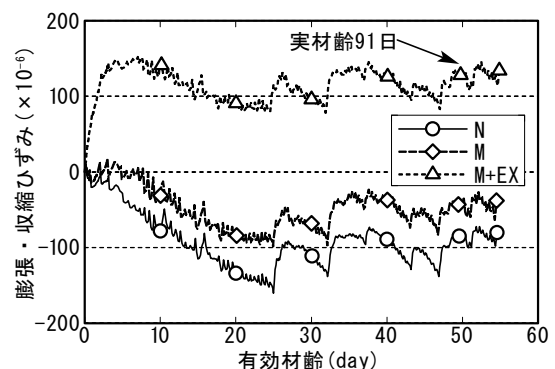
4. 1 小型試験体の膨張収縮ひずみ挙動

小型試験体における埋込ひずみ計による計測ひずみを、コンクリートの線膨張係数を $10.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として処理したコンクリートの膨張収縮ひずみを図－7 に、鉄筋の膨張収縮ひずみを図－8 に示す。なお、温度履歴の異なるコンクリートを統一的に比較するために有効材齢を下式(1)により算出した³⁾。

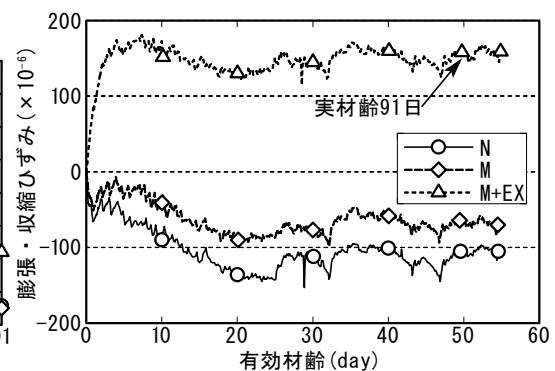
$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (1)$$

ここに、 t : 乾燥期間中の有効材齢(日), Δt_i : 温度が $T(^{\circ}\text{C})$ である期間の日数(日), T_0 : $1(^{\circ}\text{C})$

埋込ひずみ計による膨張コンクリート(M+EX)の膨張収縮ひずみは、材齢初期にコンクリートの膨張により増大し、最大膨張ひずみ到達後は減少する傾向が見られる。その後、降雨の湿潤によると考えられる膨張が見られるが、計測期間中、収縮ひずみは発生しなかった。また、膨張コンクリートの最大膨張ひずみ 150μ



図－7 埋込ひずみ計によるコンクリートの膨張収縮ひずみ(小型試験体)



図－8 鉄筋の膨張収縮ひずみ(小型試験体)

であり、拘束膨張試験の材齢 7 日の膨張率とほぼ一致した。埋込ひずみ計による普通コンクリートの膨張収縮ひずみは、中庸熱セメント(M)の方が普通セメント(N)より小さな値となっており、拘束膨張試験、長さ変化試験の結果と一致した。鉄筋の膨張収縮ひずみは、コンクリートの膨張収縮ひずみと概ね同様な値を示した。

4. 2 小型試験体における膨張コンクリートの効果

小型試験体の中庸熱セメントを使用した普通コンクリート(M)に対する膨張コンクリートの効果を図-9に、普通セメントを使用した普通コンクリート(N)に対する効果を図-10に示す。計測されたひずみには、温度による線膨張(自由)ひずみ、膨張材による膨張ひずみ、乾燥収縮ひずみ、弾性ひずみ、クリープひずみが含まれている。しかし、コンクリート凝結前の温度による体積変化が正確に計測されていないので、計測されたひずみには、全てのひずみが

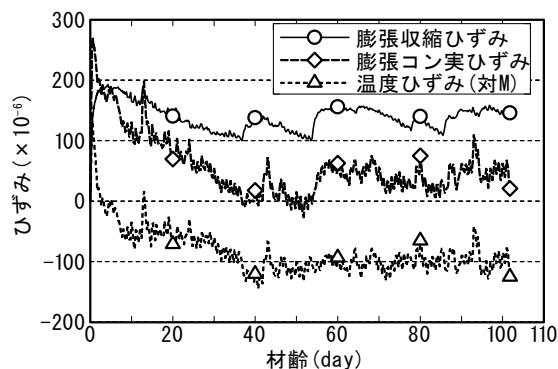


図-9 小型試験体による
膨張コンクリートの効果(対 M)

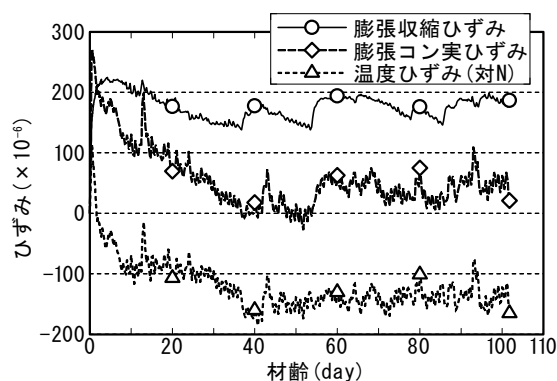


図-10 小型試験体による
膨張コンクリートの効果(対 N)

含まれていない。コンクリート凝結前の温度による体積変化については、膨張材を混入していない小型試験体の温度上昇時の見かけの線膨張係数 α_1 を算出し、打込みから凝結終了までの温度変化分に線膨張係数 α_1 を掛け合わせて算出した。ここでは、鉄筋に設置したひずみゲージが作動し始めた時点を凝結とした。算出したコンクリート凝結前の温度による体積変化に、計測されたひずみを加えたものを膨張コンクリートの実ひずみとした。温度ひずみについては、温度上昇時の線膨張係数 α_1 、温度下降時の線膨張係数 α_2 と膨張コンクリートの温度変化分を乗じて算出した。また、膨張収縮ひずみは、実ひずみから温度ひずみを差し引いた膨張材の効果を示す膨張ひずみとして評価した⁴⁾。

小型試験体の膨張コンクリート(M+EX)は、普通コンクリート(M)と比較すると、最大 190 μ 程度の膨張ひずみ分の効果が、また、普通コンクリート(N)と比較すると、最大 220 μ 程度の膨張ひずみ分の効果が認められた。この膨張ひずみ分は、乾燥収縮を受けた場合の応力低減に効果を発揮し、ひび割れを低減できると考えられる。

4. 3 実構造物の膨張収縮ひずみ挙動

実構造物における埋込ひずみ計による計測ひずみを小型試験体と同様に線膨張係数、有効材齢により処理したコンクリートの膨張収縮ひずみを図-11に、鉄筋の膨張収縮ひずみを図-12に示す。

埋込ひずみ計による膨張収縮ひずみは、既設

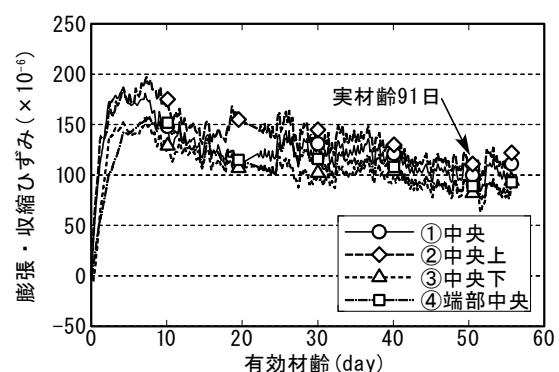


図-11 埋込ひずみ計によるコンクリートの
膨張収縮ひずみ(実構造物)

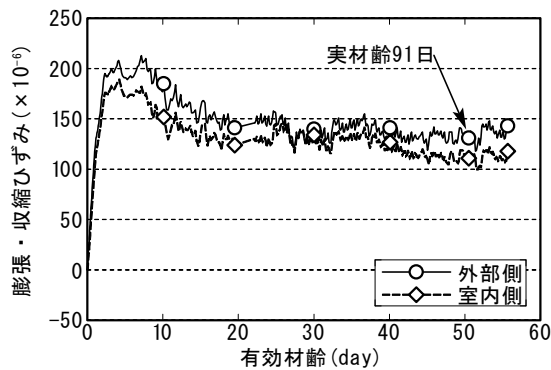


図-1 2 鉄筋の膨張収縮ひずみ(実構造物)

コンクリートの拘束の影響を受ける中央下(③)と、柱近傍の端部中央(④)の最大膨張ひずみが 150μ であり、中央(①)、中央上(②)の最大膨張ひずみ 200μ よりも 50μ 程度小さかった。また、全体的に見ると、中央下のひずみが最も小さく、次いで端部中央、中央上、中央の順でひずみが大きくなっており、拘束度の違いによるひずみの差が認められた。鉄筋の膨張収縮ひずみは、コンクリートの膨張収縮ひずみと概ね同様な値を示した。

4. 4 実構造物の膨張収縮ひずみ挙動

ひずみ挙動への拘束の影響を比較するために、小型試験体(M+EX)の無応力ひずみ計による膨張収縮ひずみ(無拘束)と埋込ひずみ計による膨張収縮ひずみ(内部拘束)、および実構造物の埋込ひずみ計による膨張収縮ひずみ(内部拘束+外部拘束)の比較を図-1 3に示す。

無拘束のひずみよりも、内部拘束あるいは内部拘束+外部拘束のひずみの方が小さくなっており、拘束の影響が認められる。内部拘束と内部拘束+外部拘束のひずみを比較すると大きな差がないことから、外部拘束の影響は小さいことがわかる。ただし、材齢が進むにつれ、内部拘束と内部拘束+外部拘束のひずみの差が大きくなり、外部拘束の影響が徐々に大きくなっていくことがわかる。

5. まとめ

① 小型試験体、実構造物とも、膨張コンクリートについては、膨張ひずみが導入され、

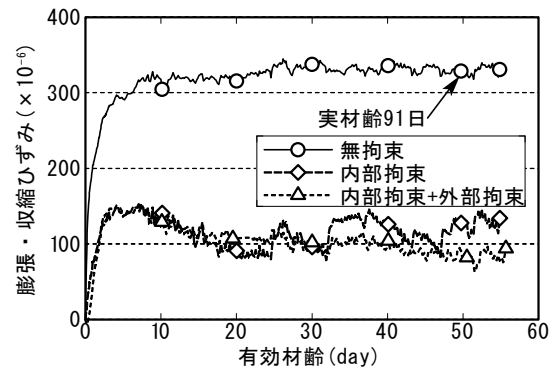


図-1 3 拘束の違いによるひずみの比較

乾燥収縮ひび割れの抑制に効果があることが分かった。

- ② 小型試験体では、見かけの線膨張係数を設定することで、膨張材の効果を見出すことができた。普通セメントを使用した普通コンクリートと比較するとより効果が顕著になることが確認できた。
- ③ 実構造物では、壁内の位置の違いにより拘束度が異なることが確認できた。また、本構造物では、外部拘束によりも、内部拘束の方が卓越していることが分かった。
- ④ 今回採用した膨張コンクリートは、3ヶ月経過した時点で収縮ひずみ(引張応力)は発生しておらず、目視観察の結果もひび割れは全く発生していなかった。

[謝辞]

本研究を行うに当たり、ご協力頂いた太平洋マテリアル㈱の関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 関田徹志他：ひび割れ低減コンクリートの開発 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.109~110, 2003.9
- 2) 日本建築学会：膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案, 1982.2
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造的能照査編], 第3章, pp.30-31, 2002
- 4) 高瀬和男他：場所打ち PC 床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する考察, コンクリート工学年次論文, pp.549-554, vol.24, No.1, 2002.6