報告　低添加型膨張材の建築工事への適用と展開

佐竹　紳也[*1]・山田　信一[*2]・秋山　文生[*3]・中村　雅彦[*3]

要旨：膨張材の乾燥収縮によるひび割れ低減効果を確認するため、幅 14m，長さ 33m，厚さ 20cm の土間コンクリートに普通コンクリートと膨張コンクリートを打設し，コンクリートのひずみ，温度の計測とひび割れ調査を実施した。その結果，膨張材の使用により 6 ヶ月後の収縮は約 1／3 となり，引張応力は 1N/mm^2 低減できると推定され，8 ヶ月後においてもひび割れが発生していないことが確認された。膨張材を使用することにより、乾燥収縮によるひび割れ発生の抑制効果が明らかになった。

キーワード：膨張材，土間コンクリート，乾燥収縮，ひび割れ

1.　はじめに

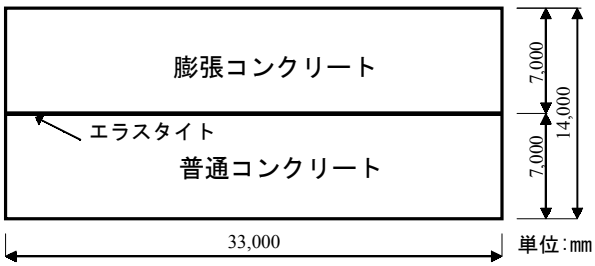
鉄筋コンクリート構造物に発生するひび割れは，構造物の耐力・耐久性・水密性などの諸性能の低下に大きく影響を及ぼす。近年，鉄筋コンクリートの高機能化・高性能化・高耐久化に伴い，ひび割れに関する関心が急速に高まり，その対応が強く望まれるようになってきている。特に乾燥収縮によるひび割れは，鉄筋コンクリート構造物に発生するひび割れのなかで最も一般的であると同時に最も避けがたいひび割れである。乾燥収縮が卓越する建築構造物に対して，膨張材の使用は，ひび割れ対策として有効であると報告されている[1)]。

本報告は，膨張材の乾燥収縮によるひび割れ発生に対する抑制効果を確認することを目的として，部材厚の薄いテント倉庫の土間コンクリートに普通コンクリートと膨張コンクリートを適用し，ひび割れ誘発用のカッター目地等を入れない状態でのひずみ，温度を計測し，さらにひび割れを長期にわたり調査した結果をまとめたものである。

2.　試験概要

2.1　計測対象の形状・寸法

計測した土間コンクリートは，太平洋マテリアル㈱小野田工場のテント倉庫である。**図－1** に示す長辺方向 33m，短辺方向 14m，厚さ 20cm 形状である。中央にエラスタイトを設置して二分割し、平成 15 年 4 月 26 日に膨張材を使用しない普通コンクリートを，平成 15 年 4 月 28 日に膨張コンクリートを打設し、平成 15 年 5 月 16 日より使用開始した。



図－1　テント倉庫平面図

2.2　施工方法

(1)　地業

・土間下は 100mm 砕石転圧し，砂で目潰しして表面を平坦にした。

・ポリエチレンシート(厚さ 0.15mm、重ね 150mm 以上)を敷設した。

(2)　土間

・厚さ 200mm，表面金ごてで 2 回押さえた。

・配筋は，厚さ方向中心に縦横とも D13 @250mm のシングル配筋とした。

*1 太平洋マテリアル(株)　開発研究所　工修　(正会員)
*2 清水建設(株)　設計本部　構造設計１部　工修(正会員)
*3 清水建設(株)　建築事業本部　建築構造技術部

・長辺中央の仕切りは，先行するコンクリートの打設時には合板で中央部を仕切り、翌日脱枠後、エラスタイト 12mm を設置した。

2.3　使用材料および配合

使用材料を**表－１**に，コンクリートの配合を**表－２**に示す。膨張材は，低添加型石灰系膨張材を使用し、単位膨張材量 20kg/m^3 とした。

2.4　コンクリートの打設方法

コンクリートは，片押しで打設し、棒状バイブレーターで密実に締め固めた。

2.5　養生方法

コンクリートの打ち込み後 5 日間は，散水による湿潤養生を行った。

2.6　試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を**表－３**に示す。材料試験でコンクリートの物性試験を確認し，現場計測試験ではコンクリートのひずみ，温度を測定した。また、ひび割れ調査を打設後 20 日，3 ヶ月，6 ヶ月，8 ヶ月に実施した。

2.7　計測箇所

計測箇所は，**図－２**に示すように短辺方向の中央部，長辺方向の中央部と 1/4 部，厚さ方向中央部のひずみと温度を測定した。自由ひずみは，断熱容器内に打設したコンクリートを用いて無応力容器と埋め込み型ひずみ計により測定した。なお，測定箇所の表記には図中の記号を用いる。

3.　試験結果

3.1　物性試験

物性試験結果を**表－４**に示す。膨張材の添加がフレッシュコンクリートと圧縮強度に及ぼす影響はみられなかった。拘束膨張試験より収縮補償コンクリートとして必要な膨張量 [2)]（材齢 7 日において 150～250×10^{-6}）が得られている。

3.2　計測試験

計測結果を処理するための初期値は，膨張コンクリート内の鉄筋に設置したひずみゲージよりひずみが発生したと判断された打設後 0.26 日（6 時間）とした。

(1)　温度

表－１　使用材料

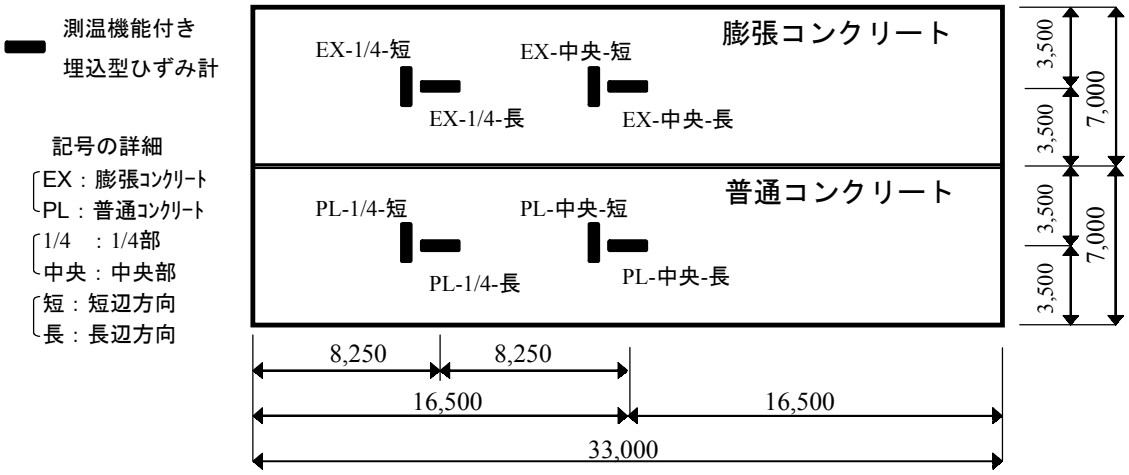
材 料	種　類	物　性
ｾﾒﾝﾄ	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	密度:3.16g/cm^3
細骨材	砕砂(山口県美祢産)	密度:2.66g/cm^3 FM:3.08
	海砂(山口県下関沖産)	密度:2.56g/cm^3 FM:2.28
粗骨材	砕石(山口県下関産)	密度:2.73g/cm^3 FM:6.70
膨張材	低添加型石灰系膨張材	密度:3.16g/cm^3
混和剤	AE 減水剤	ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸系
水	地下水	

表－２　コンクリートの配合

配合名	ｺﾝｸﾘｰﾄ種　類	目標ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	目標空気量 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg／m^3)					
						水	ｾﾒﾝﾄ	膨張材	細骨材	粗骨材	混和剤
PL	普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	61.0	61.0	185	303	0	862	935	0.76
EX	膨張ｺﾝｸﾘｰﾄ			61.0	61.0	185	283	20	862	935	0.76

表－３　試験項目および試験方法

試　験　項　目		試　験　方　法
材料試験	ﾌﾚｯｼｭｺﾝｸﾘｰﾄ	スランプは JIS A 1101，空気量は JIS A 1128 に準じ，練り温度は温度計で測定
	圧縮強度試験	JIS A 1108 に準じ、試験材齢は 7，28 日
	拘束膨張試験	JIS A 6202 コンクリート用膨張材　参考 1 膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法の B 法に準じ，試験材齢は 4，7，14，28 日
現場計測	内部温度，外気温	測温機能付き埋め込み型ひずみ計と熱電対で測定
	ｺﾝｸﾘｰﾄの実ひずみ	測温機能付き埋め込み型ひずみ計と熱電対で測定
	ｺﾝｸﾘｰﾄの自由ひずみ	幅 300×長さ 500×高さ 300 の断熱容器に設置した無応力計で測定
	鉄筋のひずみ	ひずみゲージにより膨張コンクリートの長辺方向の鉄筋のひずみを測定
ひび割れ調査		ひび割れ発生箇所，ひび割れ幅，長さを測定



図－２　計測箇所

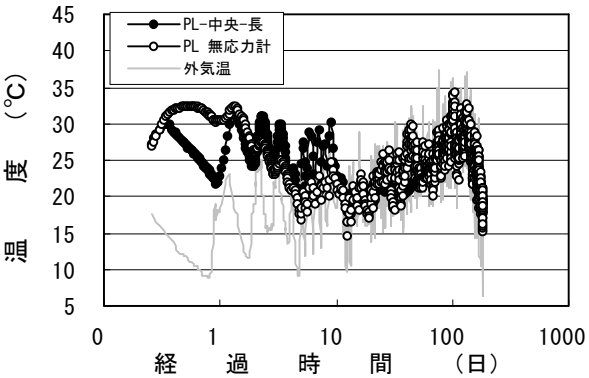
表－４　材料試験結果

ｺﾝｸﾘｰﾄ 種　類	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	ｺﾝｸﾘｰﾄ温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm^2)		拘束膨張量 (×10^{-6})				
				7 日	28 日	4 日	7 日	14 日	28 日	56 日
普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	19.0	4.4	20.0	18.7	25.5	37	26	-78	-198	-415
膨張ｺﾝｸﾘｰﾄ	18.0	5.0	18.0	18.0	25.1	137	171	65	-30	-203

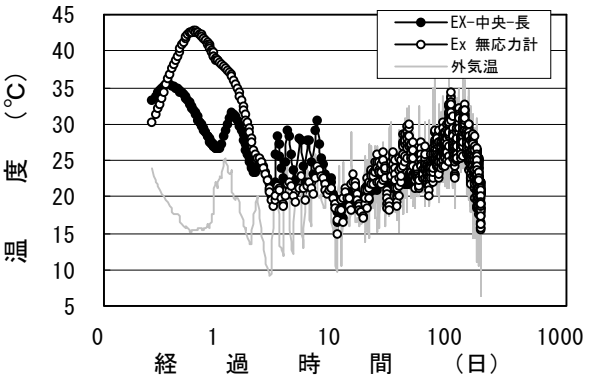
普通コンクリートの温度計測結果を**図－３**に，膨張コンクリートの温度計測結果を**図－４**に示す。ともにコンクリート内部温度は，測定箇所による差がないことから中央部長辺方向の温度を代表させて示した。厚さが 20cm であるためコンクリートの内部温度は，外気温・日照の影響を受けている。膨張コンクリートの温度が普通コンクリートより高いのは，打設時期の外気温が高かったためである。また，断熱容器内の無応力計で計測した温度も膨張コンクリートのほうが普通コンクリートに比べて約 10℃高くなった。

(2)　実ひずみ

埋め込み型ひずみ計によって計測される実ひずみは，拘束状態における温度変化による温度ひずみ，乾燥収縮による収縮ひずみ，膨張材による膨張ひずみおよびクリープひずみを含んでいる。普通コンクリートのひずみ計測結果を**図－５**に，膨張コンクリートのひずみ計測結果を**図－６**に示す。普通コンクリートの実ひずみは，材齢約 1 日で約 70×10^{-6} の膨張がみられるが，材齢 4 日以降は収縮域に移行し，材齢 180 日においては 250～300×10^{-6} の収縮が生じた。これ



図－３　普通ｺﾝｸﾘｰﾄの温度計測結果



図－４　膨張ｺﾝｸﾘｰﾄの温度計測結果

に対して膨張コンクリートでは材齢 7 日で約 190×10^{-6} の膨張が生じ，材齢 180 日おいても 50～100×10^{-6} の収縮であり，膨張材の乾燥収縮に対する収縮低減効果が確認された。

また，短辺方向の実ひずみが長辺方向の実ひずみに比べて，普通コンクリートでは収縮が大きく，膨張コンクリートでは膨張が大きい。これは，長辺方向に比べて短辺方向の拘束が小さいことを示している。

(3)　温度と自由ひずみの勾配

無応力計に設置した埋め込み型ひずみ計により計測したひずみは，拘束の影響を遮断したひずみ(以下，自由ひずみ)である。拘束がない状態における自由ひずみと温度の関係を**図－７**に示す。普通コンクリート，膨張コンクリートとも材齢 0.63～0.65 日（約 15 時間）まで内部温度が上昇しており，この期間を温度上昇時とし，それ以降を温度下降とした。普通コンクリートの温度と自由ひずみの勾配（＝線膨張係数）は，温度上昇時と下降時はほぼ同等の値を示し，全体で 10.44×10^{-6}/℃であった。これに対して膨張コンクリートの温度と自由ひずみの勾配は、温度上昇時は 30.33×10^{-6}/℃と普通コンクリートの 3 倍の値を示し，温度下降時は 4.63×10^{-6}/℃と普通コンクリートより 55%小さい値を示した。これは，温度上昇時には大きく膨張材の膨張効果が発揮され，その後も膨張効果が持続していることを示している。

4.　発生応力の推定

4.1　拘束度

計測したひずみ，温度をもとに拘束度を検討した。拘束度は，次式(1)[3]で定義される。

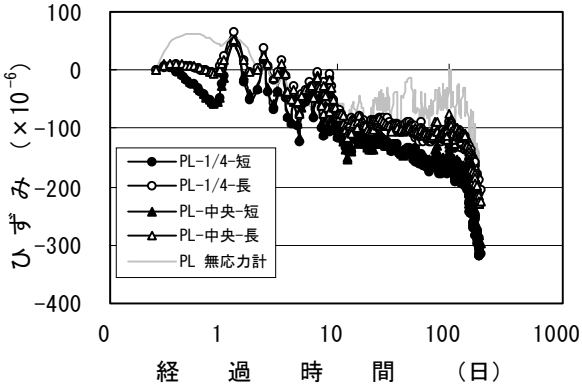
$$K=(\alpha-\beta)/\alpha \qquad (1)$$

K＝拘束度

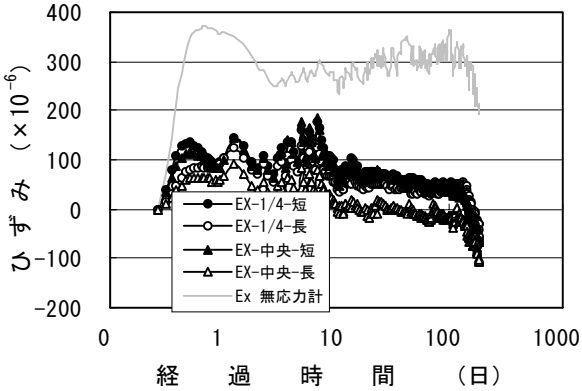
α：拘束を受けない状態での温度とひずみの勾配（$\times10^{-6}$/℃）

β：拘束を受けた状態での温度変化とひずみの勾配（$\times10^{-6}$/℃）

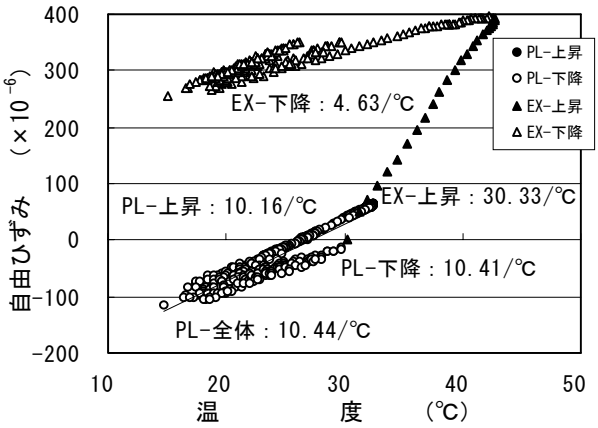
膨張コンクリートの α は，**図－７**に示したように温度上昇時と下降時では大きく異なり，その値を明確にすることは困難である。よって，普通コンクリートの計測結果をもとに拘束度を



図－５　普通ｺﾝｸﾘｰﾄのひずみ計測結果



図－６　膨張ｺﾝｸﾘｰﾄのひずみ計測結果



図－７　温度と自由ひずみの関係

検討した。α は，**図－７**に示した平均の値の 10.44×10^{-6}/℃とした。**図－５**より普通コンクリートの内部温度は，外気温の影響を受けてるため実ひずみも変動している。また，材齢 5 日までは，散水養生したため乾燥収縮は生じないと判断し，材齢 5 日までの温度上昇している期間（材齢 1 日前後，2 日前後，3 日前後）の温度と実ひずみの勾配の平均を β とした。**図－８**に材齢 1 日前後の温度と実ひずみの関係を示し，

表－５には各測定箇所の材齢 1，2，3 日前後の勾配と β および拘束度 K を示す。これより，長辺方向の拘束度は，約 0.35，短辺方向は 0 に近い値が得られ，これは長辺方向の拘束が大きいことを示している。膨張コンクリートの拘束度は，普通コンクリートと同一とし，また，長辺方向は中央部，短辺方向は 1/4 部について以下検討を行った。

4.2　拘束ひずみ

拘束度と実ひずみを用いて計測したコンクリートの自由ひずみを算出した。これは，計測したコンクリートと同一温度とした場合の拘束の影響を遮断したひずみである。自由ひずみは、次式(2)より算出した。

$$\text{拘束度} = \frac{\text{自由ひずみ} - \text{実ひずみ}}{\text{自由ひずみ}} \qquad (2)$$

また，拘束ひずみは，実ひずみと自由ひずみの差，（実ひずみ－自由ひずみ）より算出した。**図－９**に普通コンクリート，膨張コンクリートの中央部の拘束ひずみを示す。短辺方向は，拘束度が小さいことから拘束ひずみも小さい値である。長辺方向の拘束ひずみは，時間の経過に伴い増加する。

4.3　発生応力

4.2 で得られた拘束ひずみをもとに有効ヤング係数を用いて次式(3)[4]より発生応力を算出した。

$$\sigma(t) = \sum(Ee(t) \times \Delta\varepsilon(t)) \qquad (3)$$

$\sigma(t)$：材齢 t におけるコンクリートの応力

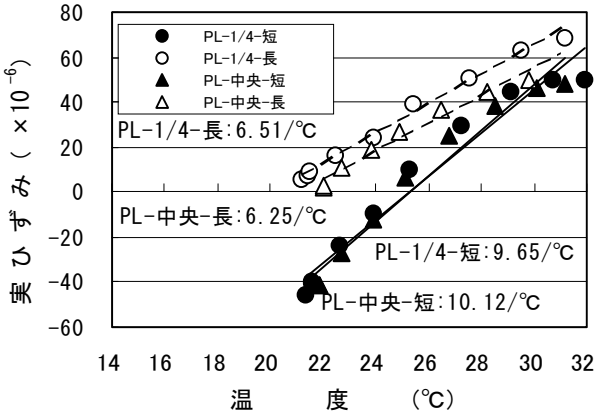
$\Delta\varepsilon(t)$：材齢 t におけるひずみ増分

$Ee(t)$：材齢 t における有効ヤング係数

$$Ee(t) = \Phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{fc'(t)}$$

$\Phi(t)$：材齢３日まで $\Phi = 0.73$、
材齢５日以降 $\Phi = 1.0$

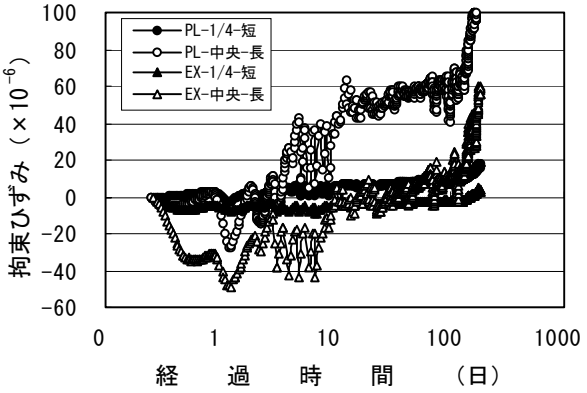
$fc'(t)$：材齢 t 日の圧縮強度
普通コンクリートは
$fc'(t) = \{t/(4.5 + 0.95t)\} \times 1.11 \times 25.5$
膨張コンクリートは



図－８　温度とひずみの関係

表－５　拘束度

計測箇所	勾配（×１０$^{-6}$）			β (×10^{-6})	α (×10^{-6})	K
	１日	２日	３日			
1/4 短辺	9.65	9.98	10.14	9.92	10.44	0.05
1/4 長辺	6.51	6.74	6.88	6.71		0.36
中央短辺	10.12	10.26	10.93	10.44		0.00
中央長辺	6.25	7.01	6.97	6.74		0.35



図－９　経過時間と拘束ひずみの関係

$fc'(t) = \{t/(4.5 + 0.95t)\} \times 1.11 \times 25.1$

図－10 に算出した発生応力を示す。図中には，圧縮強度より推定した普通コンクリートの引張強度 [4]もあわせて示した。短辺方向は，拘束度が小さいことから発生応力も小さい。拘束度の大きい長辺方向の場合，普通コンクリートは，材齢初期に圧縮応力が導入されるが，その後，急激に引張応力が生じ、材齢 180 日では 3.0N/mm^2 の引張応力が発生している。推定した引張強度 2.4N/mm^2 を上回った。これに対して膨張コンクリートは，材齢７日までに普通コンクリートに比べて大きな圧縮応力が導入される。材齢 180 日における引張応力は 2.0N/mm^2 であり、普通コンクリートより約 1N/mm^2 小さ

い値を示した。このことから膨張材の引張応力の低減効果が確認された。

5. ひび割れ調査

図－11 に材齢約 20 日と約 8 ヶ月後のひび割れ発生状況を示す。倉庫は，コンクリート打設後，約 20 日で使用開始し，現在はフォークリフトが頻繁に行き来する状況にある。普通コンクリートでは使用開始時に入口付近にひび割れが発生した。8 ヶ月経過後の普通コンクリートでは全面に亀甲状の微細なひび割れが発生しており，さらに 0.5mm 以上のひび割れが 5 箇所で確認された。これに対して 8 ヶ月経過後の膨張コンクリートには微細な亀甲状のひび割れも発生しておらず，膨張材によるひび割れ発生低減効果が確認された。

6. まとめ

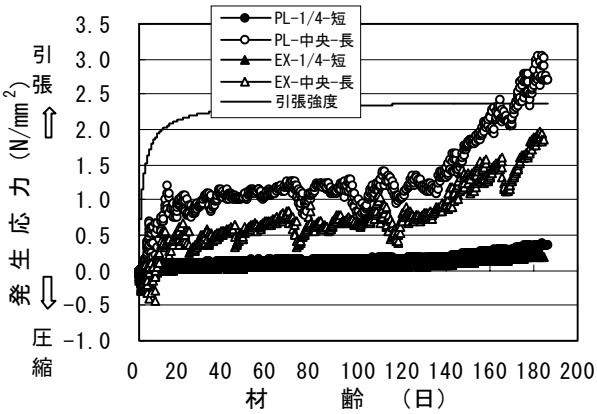
土間コンクリートにおいて膨張材のひび割れ低減効果を確認するためほぼ同一時期に打設した普通コンクリートと膨張コンクリートについて現場計測し，ひび割れ調査した結果を以下に示す。

①材齢 180 日の実ひずみは，普通コンクリートの 250～300×10^{-6} の収縮に対して，膨張コンクリートでは 50～100×10^{-6} の収縮であり，膨張材の乾燥収縮に対する収縮低減効果が確認された。

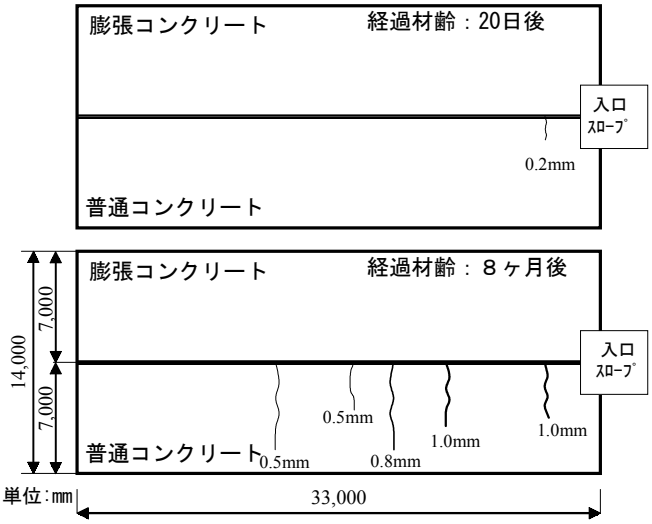
②現場計測から得られた実ひずみと温度より拘束度を算出すると短辺方向ではほとんど拘束がなく，長辺方向では拘束度 0.35 と推定された。

③現場計測結果と拘束度より発生応力を推定すると材齢 180 日の引張応力は，普通コンクリートの 3.0N/mm^2 に対して，膨張コンクリートは 2.0N/mm^2 であり，引張応力で 1N/mm^2 の低減効果が確認された。

④8 ヶ月経過後のひび割れ発生状況は，普通コンクリートでは 0.5mm 以上のひび割れが 5 箇所で発生しているのに対して，膨張コンクリートにはひび割れ発生は確認されなかった。



図－10 発生応力



図－11 ひび割れ発生状況

なお、今後も継続して計測およびひび割れ調査を行い、長期性状を確認する予定である。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会，膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム，pp184-196, 2003
2) 土木学会，コンクリート標準示方書，施工編，pp289-290，2002
3) 玉野富雄・福井聡・青景平昌・広野三夫：膨張コンクリートを用いたマスコンクリートの施工，日本コンクリート工学論文報告集，Vol.13-1，pp93，1991
4) 土木学会，コンクリート標準示方書，施工編，pp52-53，2002