

石灰系低添加型膨張材のひび割れ抑制効果の検討

Investigation of Crack Reduction by Low Addition of Expansion Additive of Lime System

伊 達 重 之 石川島建材工業株式会社技術研究所技術グループ 課長代理

佐久間 隆 司 太平洋マテリアル株式会社開発研究所混和材料グループ グループリーダー

コンクリートに発生するひび割れは多種・多様な原因が挙げられる。そのなかで乾燥収縮ひび割れは、コンクリート用膨張材を適切に使用すれば、効果的に抑制できることが知られている。しかし、経済的な理由から膨張コンクリートが普及しているとはいえない。ここでは、配合量が少なくても、従来の膨張材を使用した場合と同様な性能をもつ低添加型膨張材について、自走式立体駐車場デッキスラブのコンクリートへ用いた場合のひび割れ抑制効果を報告する。この結果、従来の膨張材と同等以上の性能を確認した。

Cracks in concrete develop due to different causes, among which drying contraction crack can be effectively controlled if addition of the expansion additive is adequate. Economical reasons, however, have hampered wide use of concrete using the conventional expansion additive. A low-addition expansion additive is now available to economically improve concrete quality. This additive demonstrates the same performance as the conventional one even if a lower volume of the additive is blended. Concrete deck slab using the additive for a self-propelled multistory parking unit was tested for crack prevention performance. As a result, the same performance as the conventional additive was confirmed.

1. 緒 言

コンクリートに発生するひび割れは、使用材料、調合、構造、施工、環境など多種・多様な原因が挙げられる。このなかで、マスコンクリートでは水和熱による温度応力、高強度コンクリートについては自己収縮応力、外気に接する面積が大きいコンクリートでは乾燥収縮応力が発生することによって、ひび割れが発生する。ひび割れがすぐに耐久性低下につながるとはいえないが、抑制することは耐久性を向上させる方策の一つである。これらのひび割れ発生やひび割れ幅を抑制する手段の一つとして膨張材の使用が挙げられる。混和材料として膨張材は、材料コストとひび割れ抑制効果もしくはケミカルプレストレス効果などのいわゆる費用対効果が定量的に把握されていない。このため、膨張コンクリートの出荷量は生コンクリート出荷量の1%に満たしておらず、普及しているとはいえない状況にある。しかし、最近では膨張材の評価が見直され、徐々にではあるが膨張材の効果の定量化が図られている⁽¹⁾。また、コストパフォーマンスに優れた低添加型膨張材も開発されているが、従来の膨張材とのひび割れ抑制効果について検証された例は多くない⁽²⁾。

本稿は、石灰系低添加型膨張材使用コンクリートを立体駐車場スラブへ用いた事例について、現場計測などでひび

割れ抑制効果の検証を行った結果を報告する。

2. 実 験 内 容

2.1 石灰系低添加型膨張材の特性

第1表に石灰系低添加型膨張材の化学分析結果と物理的性質を従来の石灰系膨張材と比較して示す。石灰系低添加型膨張材は、 SO_3 量や SiO_2 量が少ないが、石灰量は従来の膨張材に比べて多い。これは、従来の石灰系膨張材と比較して遊離石灰量が高いためであり、大きな膨張量が得られる。また、使用クリンカ粒度分布については、水和初期の反応消費を抑制し、かつ硬化後の異常膨張（ポップアウトや遅れ膨張破壊：DEF）の原因となり得る粒径の大きな成分を少なくするように調整している。以上のような製品設計から、従来、単位膨張材量が 30 kg/m^3 必要であったものが 20 kg/m^3 でも同様な膨張量が得られる膨張材である。

第1表 石灰系低添加型膨張材の化学組成と物理的性質
Table 1 Chemical components and physical properties of low-addition type expansion additive of lime system

石灰系膨張材	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	化学分析結果						
			Ig. loss (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)
低添加型	3.19	2900	0.9	6.2	1.7	1.0	86.6	0.5	3.6
従来	3.14	3500	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0

2.2 使用材料と調合

使用材料を第2表に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用いて、設計基準強度 24 N/mm²、スラブ厚 15 cm、最大骨材粒径 25 mm のコンクリートの調合を用いた。コンクリートの調合を第3表に示す。石灰系低添加型膨張材を用いた調合を調合 No.1 として、膨張材を用いないものを調合 No.2 とした。

2.3 試験項目と試験方法

使用したコンクリートの試験項目と試験方法については第4表に示す。試験および試験体作製はすべて荷卸時点とした。作製した試験体は翌日搬送し、太平洋マテリアル株式会社開発研究所（千葉県佐倉市）で各強度試験を実施した。

2.4 現場計測方法

計測した場所は福井市内にある4層の自走式立体駐車場デッキスラブのコンクリートである。膨張材の効果を判断するために、1階・2階は石灰系低添加型膨張材を調合し（以下、膨張コンクリートと呼ぶ）、3階、ルーフ階は通常のコンクリート（以下、普通コンクリートと呼ぶ）を用いた。なお、1階は土間部分、ルーフ階は防水部分と仕様が異なることから、膨張材を使用した2階と使用しない3階の同様な場所を比較するように計測を行った（第1図）。

計測は測温機能付き埋込型ひずみ計を波型デッキプレートの軸方向と軸直角方向に第2図のように設置した。また、各々の階で最もひび割れが発生しやすいとされるスロープ部分にも軸方向に設置した。さらに、無応力容器に測温機能付き埋込型ひずみ計を設置し、発泡スチロール容器 300 × 200 × 150 mm にコンクリートを打設して自由ひずみも計測した。計測は、打設から2週間は20分ごとに、以降は3時間ごとに約1か月間連続的に計測を行い、その後は約1か月ごとに実施した。

第3表 コンクリート調合

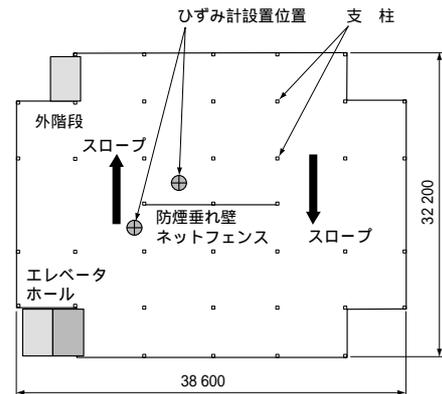
Table 3 Mixture design of concrete

調合 No.	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	調合量 (kg/m ³)						
					W	C	Ex	S1	S2	G	Ad
1	15 ± 2.5	4.5 ± 1.5	55	47.5	172	293	20	547	295	951	3.13
2						313					

第4表 試験項目と試験方法

Table 4 Test items and method

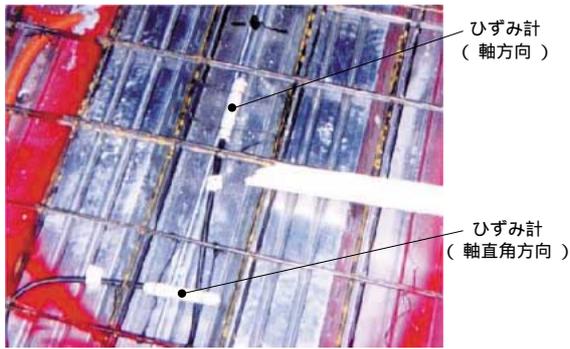
試験項目	試験方法
スラブ試験	JIS A 1101 コンクリートのスラブ試験方法に準じて、荷卸時点でのスラブを測定した。
空気量試験	JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験に準じて、荷卸時の空気量を測定した。
圧縮強度試験	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法に準じて、材齢 3, 7, 28, 56 日について実施した。
引張強度試験	JIS A 1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法に準じて、材齢 3, 7, 28, 56 日について実施した。
静弾性係数試験	JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法に準じて、材齢 3, 7, 28, 56 日について実施した。
一軸拘束膨張試験	JIS A 6202 コンクリート用膨張材拘束膨張 B 法に準じて、実施した。なお、蒸気養生をしないものと簡易蒸気養生を実施した水準について実施した。



第1図 2階・3階平面図 (単位: mm)
Fig. 1 Plane draft (second and third floors) (unit: mm)

第2表 使用材料
Table 2 Materials used

材料名	記号	種類	物性値		備考
			密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	
セメント	C	普通ポルトランドセメント (三菱マテリアル株式会社製)	3.16		
混和材	Ex	石灰系低添加型膨張材 (太平洋マテリアル株式会社製)	3.16		
細骨材 (1)	S1	福井県九頭竜川水系川砂	2.59	2.29	表乾密度
細骨材 (2)	S2	福井県坂井郡三国町産陸砂	2.59	1.92	表乾密度
粗骨材	G	福井県九頭竜川水系川砂利	2.65	1.69	表乾密度
AE 減水剤	Ad	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤			標準型 1 種
水	W	福井市内地下水・上澄水			



第2図 埋込みひずみ計設置状況
Fig. 2 Set up of embedded strain gauge

3. 試験結果

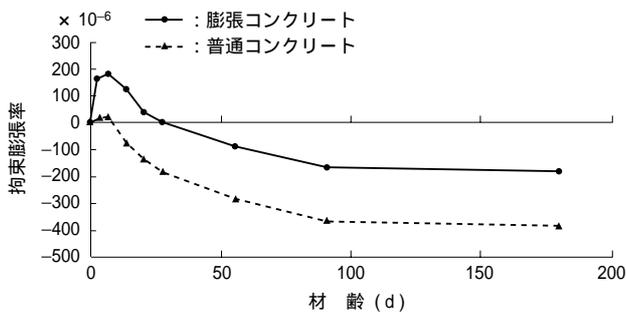
3.1 使用コンクリートの試験結果

コンクリートのフレッシュ性状を第5表に示す。膨張コンクリートおよび普通コンクリートについて、拘束膨張試験結果を第3図、圧縮強度試験結果を第4図、第5図、引張強度試験結果を第6図、第7図、ヤング係数試験結果を第8図、第9図に示す。

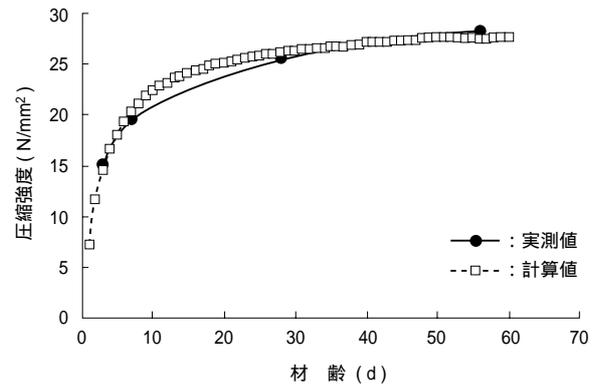
拘束膨張試験結果では従来の膨張材と同様な拘束膨張量が得られている。また、圧縮強度試験結果では普通コンクリートと膨張コンクリートの差はないが、コンクリート標準示方書にある算定式に当てはめると若干膨張コンクリートが大きくなっている。一方、引張強度算定式と実測値では膨張コンクリートはやや大きく、普通コンクリートはやや小さく推移しており、ひび割れ発生の観点からは膨張コンクリートが安全側の結果となった。ヤング係数試験結果についても圧縮強度からの算定式と実測値では、普通コン

第5表 コンクリートのフレッシュ性状
Table 5 Fresh properties of concrete

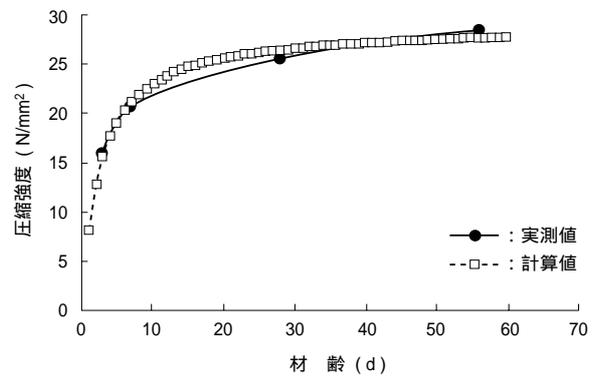
調合 No.	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	16.0	4.9	19.0
2	15.0	5.3	20.0



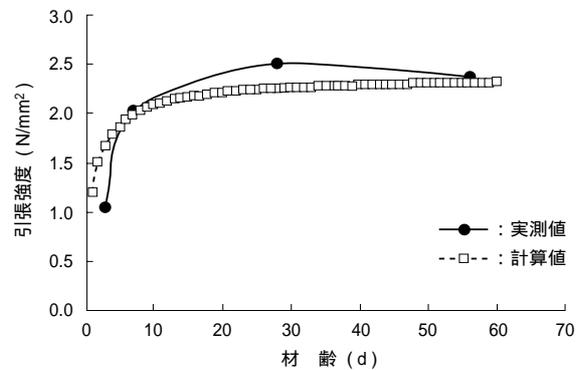
第3図 拘束膨張試験結果
Fig. 3 Results of restrained expansion tests



第4図 圧縮強度試験結果 (膨張コンクリート)
Fig. 4 Compression strength test results (expansive concrete)



第5図 圧縮強度試験結果 (普通コンクリート)
Fig. 5 Compression strength test results (ordinary concrete)

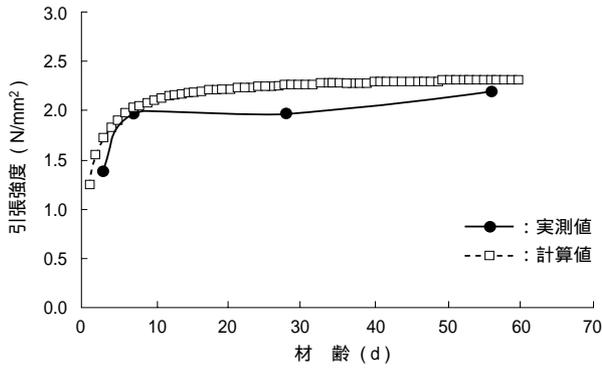


第6図 引張強度試験結果 (膨張コンクリート)
Fig. 6 Tensile strength test results (expansive concrete)

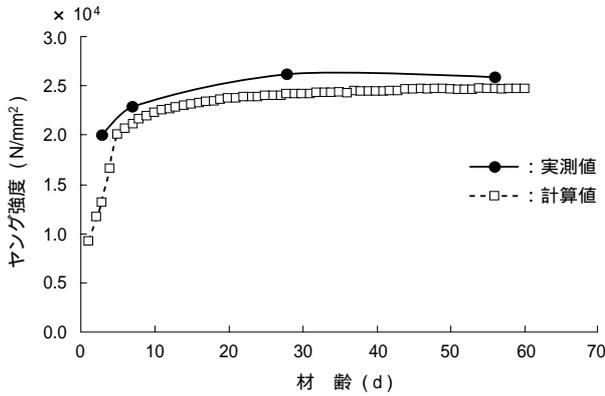
クリートはほぼ同様になり、膨張コンクリートはやや大きくなる傾向にあった。

3.2 現場ひずみ計測結果

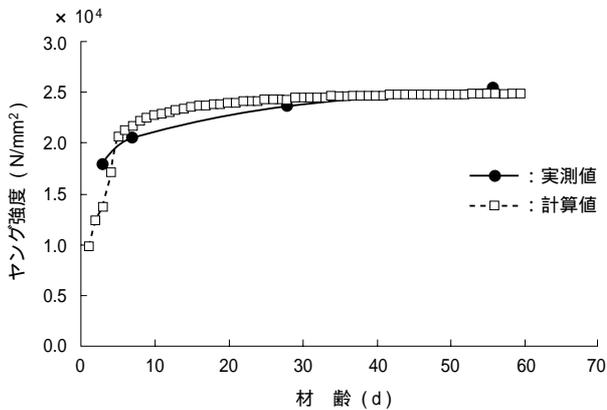
計測されたひずみから実ひずみを算出して、温度ひずみを 10.5×10^{-6} / °C として温度補正の処理を行った。膨張コンクリートひずみ変化の計測結果を第10図に、普通コンクリートひずみ変化の計測結果を第11図に示す。なお、無応力計については材齢28日までの計測となっている。膨張コ



第7図 引張強度試験結果(普通コンクリート)
Fig. 7 Tensile strength test results (ordinary concrete)

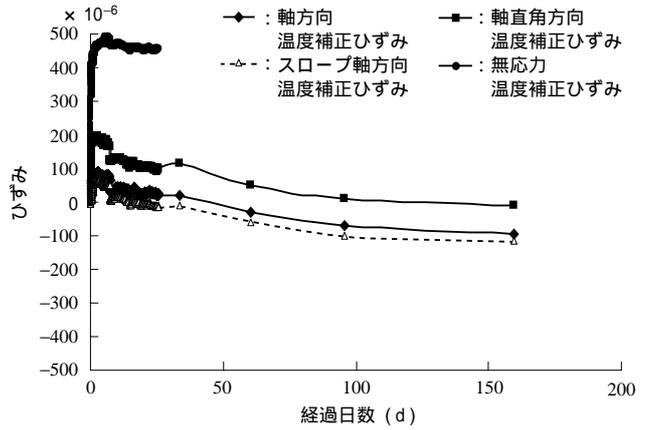


第8図 ヤング係数試験結果(膨張コンクリート)
Fig. 8 Young modulus test results (expansive concrete)

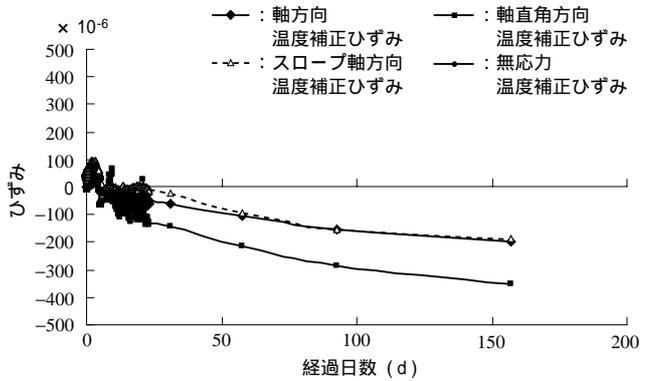


第9図 ヤング係数試験結果(普通コンクリート)
Fig. 9 Young modulus test results (ordinary concrete)

ンクリートについては波型デッキプレートの軸方向とスロープでの軸方向の膨張量が 100×10^{-6} 程度と小さくなった。軸直角方向については、拘束膨張試験と同様な 200×10^{-6} 程度の膨張ひずみを得られた。一方、普通コンクリートについては、軸方向の収縮が大きくなり、軸直角方向の収縮ひずみが大きくなった。これについては、拘束鉄筋比が同様なことから、外部拘束が大きくなったためと考える。

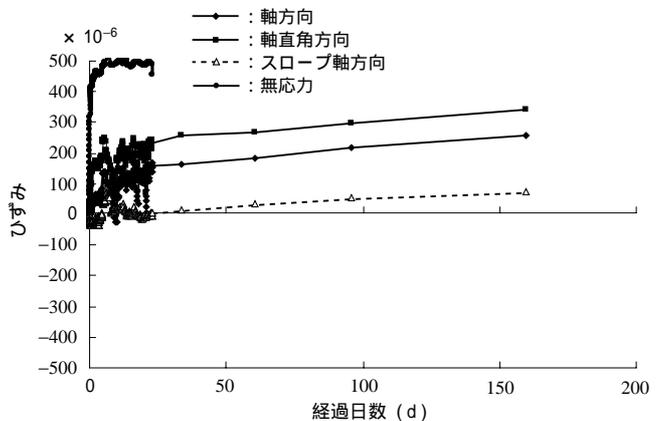


第10図 膨張コンクリートひずみ変化
Fig. 10 Changes in strain in expansion concrete



第11図 普通コンクリートひずみ変化
Fig. 11 Changes in strain in ordinary concrete

温度補正処理を実施したため、膨張コンクリート、普通コンクリートに含まれるひずみは拘束ひずみ、クリープひずみ、膨張ひずみ、乾燥収縮ひずみになる。膨張材による膨張ひずみ以外は同等で、ほぼ温度履歴が同一であることから、ひずみの差を膨張材の効果として求めたものが第12図である。これによるとスロープ部分が最小で 80×10^{-6} 、そのほかは $250 \sim 350 \times 10^{-6}$ になった。過去の研究によ



第12図 膨張コンクリートの効果
Fig. 12 Effect of expansion concrete

ると橋梁の PC 場所打ちコンクリート床版では $80 \sim 100 \times 10^{-6}$ である⁽³⁾ ことから、かなり大きな膨張量になった。この要因としては強度が小さいためにマトリックスの拘束が小さくなったことや自己収縮がないことが挙げられる。

4. 応力推定での効果の検証

既往の研究では膨張材の効果をどのように事前の検討で評価するかについては、マスコンクリートの場合、線膨張係数・初期有効ヤング係数⁽⁴⁾ を変えることや直接膨張ひずみを入力する低減係数で評価することが行われてきた。一方、乾燥収縮ひずみについてはコンクリート標準示方書に係数を乗じる⁽⁵⁾ などがあるが、応力で評価・推定するには、引張クリープや乾燥クリープをどのようにするかが問題であり、膨張コンクリートをどのように評価していくかについての研究は多くはない。ここでは、まずコンクリート標準示方書にある乾燥収縮ひずみ推定式である(1)式を用いてひずみを推定した。

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

ここで

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78 [1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5 [\log_e \{(V/S)/10\}]^2 \quad \dots\dots (2)$$

ε'_{sh} は収縮ひずみ最終値 ($\times 10^{-5}$) の推定値、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ は材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)、 RH は相対湿度 65 (%)、 W は単位水量 (172 kg/m^3)、 V は体積 (mm^3)、 S は外気に接する表面積 (mm^2)、 V/S は体積表面積比 (150 mm) を表す。

(1) 式で算出された無拘束ひずみを用いて一家が提案する引張応力式⁽⁶⁾ で評価した。

・普通コンクリートの乾燥材齢 t における引張応力度算出式

$$\sigma_{p-t} = \varepsilon_{p-\infty} / \psi_{\infty} \cdot E_c (1 - e^{-\alpha \cdot \psi_t}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

・膨張コンクリートの乾燥材齢 t における引張応力度算出式

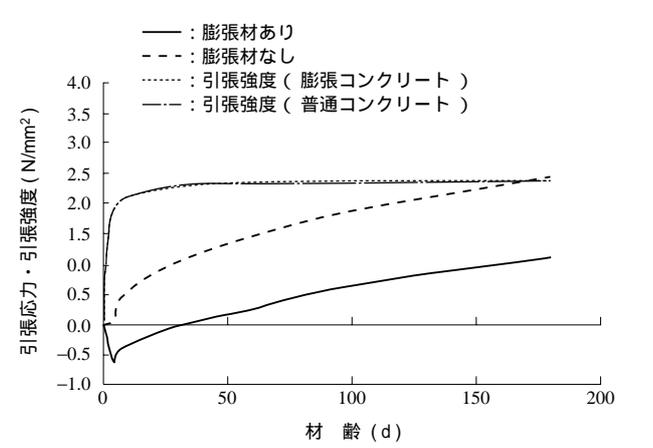
$$\sigma_{ex-\infty} = -\varepsilon'_e \cdot E_s \cdot p \cdot e^{-\alpha \cdot \psi_t} + \varepsilon_{ex-\infty} / \psi_{\infty} \cdot E_c (1 - e^{-\alpha \cdot \psi_t}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに ε'_e は拘束状態下の膨張コンクリート(鉄筋)の最大膨張率、 $\varepsilon_{p-\infty}$ は普通コンクリートの最終収縮率、 $\varepsilon_{ex-\infty}$ は膨張コンクリートの最終収縮率、 E_s は鉄筋のヤング係数 $= 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、 E_c はコンクリートのヤング係数、 p は拘束率に相当する鉄筋比、 α は $n \cdot p / (1 + n \cdot p)$ で表される拘束率 ($n = E_s / E_c$)、 ψ_{∞} はコンクリートの最終クリー

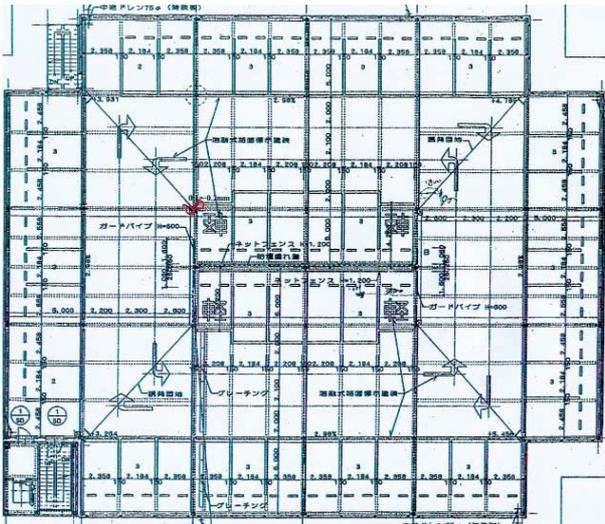
プ係数、 ψ_t は材齢 t におけるコンクリートのクリープ係数である。今回の施工現場については拘束率不明であるが、軸方向、軸直角方向の計測ひずみ無応力の計測ひずみから $\alpha = 0.4$ とした。拘束率を 0.4 とした場合の鉄筋比 7.94% に換算して、膨張コンクリートがなす仕事量一定則⁽⁷⁾ から拘束下の最大膨張率 63×10^{-6} を算出した。また、最終収縮率は(2)式を用いて算出して 375×10^{-6} を得た。膨張コンクリートは無拘束状態では 90% の収縮率の低減を見込んで 338×10^{-6} とした。コンクリートのヤング係数は第 5 図、第 6 図の算定式を用い、材齢 3 日までは 0.73 とした 5 日で 1.00 とした有効ヤング係数を用いた。クリープ係数は既往の研究⁽⁸⁾ から求められたものを用い、最終クリープを普通コンクリート 1.0、膨張コンクリート 1.5 とした。

普通コンクリート、膨張コンクリートの引張応力と引張強度を第 13 図に示す。膨張コンクリートは初期に圧縮応力が入り、引張応力が発生する時期も遅く、速度も小さいことが分かる。一般に引張強度の 70% の引張応力になるとひび割れが発生するという既往の研究から本現場では、およそ 3 か月経過と推察された。

外観観察では推定に近い 3 か月経過時点で普通コンクリート部分の 3 階に 14 本のひび割れが認められた。5.5 か月後のひび割れ観察の結果、普通コンクリートは拘束が大きい柱回りを中心に 0.05 ~ 0.5 mm 幅のひび割れが、合計 30 本発生したのに対して、膨張コンクリートはひび割れ幅が 0.1 mm で合計 2 本にとどまった。第 14 図、第 15 図にひび割れの発生箇所、第 16 図、第 17 図にひび割れ発生状況を示す。外観観察では石灰系低添加型膨張材の従来の膨張材と同等以上のひび割れ抑制効果を検証できた。

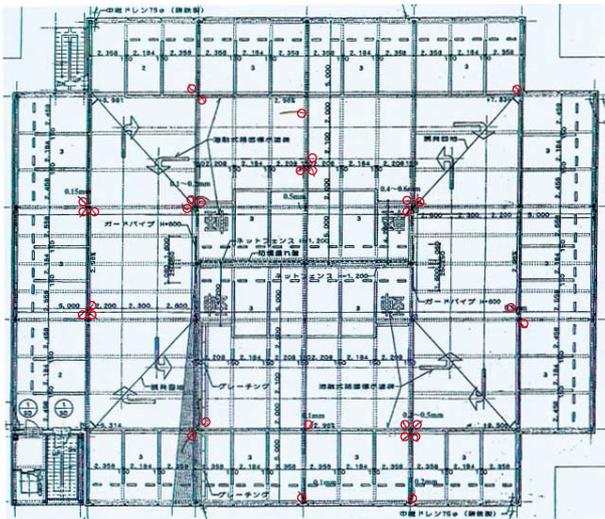


第 13 図 引張応力と引張強度の関係
Fig. 13 Relationship between tension stress and tension strength



(注) ○ : ひび割れの発生箇所

第 14 図 2F ひび割れ発生図
Fig. 14 Crack map (second floor)



(注) ○ : ひび割れの発生箇所

第 15 図 3F ひび割れ発生図
Fig. 15 Crack map (third floor)



第 16 図 ひび割れ発生状況 1
Fig. 16 Development of cracks - 1



第 17 図 ひび割れ発生状況 2
Fig. 17 Development of cracks - 2

5. 結 言

石灰系低添加型膨張材を実現場で使用した結果、次のようなことがいえる。

- (1) 従来の膨張材と同様な拘束膨張量が得られ、圧縮強度低下を招かないので通常どおり、セメントと置換えて使用できる。
- (2) 現場におけるひずみ計測の結果、膨張ひずみが大きく、膨張材の効果が大きい。これは既往の研究結果より大きい。自己収縮がなく強度レベルの違いによることが考えられた。
- (3) 過去に提案された応力算定式を基本として新たにヤング率やクリープ係数を既往の研究から入力値とした計算結果で膨張材の効果を照査できた。
- (4) 現場の観察結果からは、明らかに石灰系低添加型膨張材を調合したコンクリートのひび割れが減少した。

参 考 文 献

- (1) 三谷裕二, 谷村 充, 佐久間隆司, 佐竹信也: 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 2003年7月 pp.155 - 160
- (2) 保利章宏, 五味秀明, 鳥越 隆, 辻 幸和: 低添加型膨張材を用いたモデル壁における耐久性評価試験 コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1 2003年7月 pp.659 - 664
- (3) 高瀬和男, 寺田典生, 福永靖雄, 石川敏之: 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一考察 コンクリート工学年次論文集

- Vol.24 No.1 2002年6月 pp.549 - 554
- (4) 東 邦和, 中村敏晴, 増井 仁, 梅原秀哲: 膨張材を用いたマスコンクリートの収縮低減効果の研究 コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1 2003年7月 pp.1037 - 1042
- (5) 浦野知子, 石原昌行, 青木 茂, 新村 亮: 膨張材と収縮低減剤を使用した収縮応力抑制効果に関する研究 コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1 2003年7月 pp.1055 - 1060
- (6) 一家惟俊: 膨張材によるひび割れ防止 建築の技術施工 1975年8月
- (7) 辻 幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎的研究 土木学会論文報告集 Vol.47A 1975年3月 pp.111 - 124
- (8) 佐竹紳也, 佐久間隆司, 細見雅生, 中本啓介: 高膨張コンクリートの配合設計・基礎物性について コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1 2000年7月 pp.125 - 130