

論文 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ひび割れ抑制効果に関する研究

柴垣昌範^{*1}・佐竹紳也^{*1}・岸利治^{*2}・唐沢智之^{*3}

要旨：建築構造部材において実構造物での膨張コンクリートの挙動を測定し、膨張コンクリートの特性を把握して、定量的に評価した例は少ない。本文では、現場の実構造物に打設されるコンクリートの計測及び小型試験体のコンクリートの計測を行った。中庸熱ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートと膨張コンクリートで比較することより膨張材の効果を抽出するとともに定量的に評価し、ひび割れ抑制の効果について報告する。その結果、膨張コンクリートは膨張ひずみが導入され、ひび割れ抑制に効果があることを確認できた。

キーワード：膨張材、膨張コンクリート、乾燥収縮、ひび割れ

1. はじめに

近年、美観のみならず耐久性を損なうという観点から、建築物に発生するひび割れへの抑制対応が余儀なくされつつあり、コンクリート構造に発生するひび割れ低減対策として、膨張コンクリートの使用実績が増加しつつある。

従来通りの一般的な施工でも、環境や構造に応じた適切な材料・調合を選択し施工を入念に行えば、コンクリートの仕上がりを良好なものとすることは十分に可能である。しかし、現実には、入手可能な骨材事情の悪化、耐震性の要請から来る鉄筋の過密配置、工期短縮と経済性向上の要請など背景として、瑕疵の程度が容易には検証されにくい耐久性よりも、ポンプ圧送性などの施工性を重視せざるを得ない状況は続いている。その結果、完成後のコンクリートに収縮に起因したひび割れが多い構造物は後を立たない。コンクリート構造物に発生したひび割れが、どの程度耐久性を低下させるかを定量的に評価することは難しいが、ひび割れを抑制することが耐久性を確保する有力な方策の一つであることに疑いはないと思われる。

膨張コンクリートを使用した建築物の挙動については、いくつか報告されている¹⁾が、中庸

熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートでの報告例は少ない。本論文では、中庸熱ポルトランドセメントに膨張材を使用して、ひずみを測定し、その効果について定量的に確認することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 実験水準

計測した実構造物は目黒区にある東京大学総合研究実験棟（生産技術研究所）である。小型試験体は同大学敷地内に実構造物と隣接して設置した。実構造物及び小型試験体のコンクリートは平成16年11月21日に打設した。試験体作成は全て荷卸し時点に行い、翌日に千葉県佐倉市に搬送し各種物性試験を実施した。

表-1にコンクリート種類と試験体の組合せを示す。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M+EXの他に、普通ポルトランドセメントを使用した試験体

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 助教授 博士(工学) (正会員)

*3 鉄建建設(株) エンジニアリング本部技術センター(正会員)

(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 試験体の形状及び計測位置

計測する実構造物の部材形状及び計測位置を図－1 に示す。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。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)), 柱近傍の中央端部 1 箇所(図－1 中(4))とした。図－2 に小型試験体の形状及び計測位置を示す。試験体形状は幅 900mm×高さ 900mm とした。小型試験体は実構造物の壁の一部を切り出したものを設定し, そのためにせき板面を除き, 厚さ 300mm の断熱材を周囲に設けて断熱境界とした。壁厚さ及び配筋は実構造物と同様とした。計測位置は試験体の中央部とした。また, 試験体は計測する実構造物と同様な環境条件(日射, 温湿度)となる場所に設置した。

2.3 使用材料と調合

コンクリートの使用材料を表－2 に, コンクリートの調合を表－3 に示す。N は AE 減水剤を用いた一般的な調合で, M 及び 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。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, 単位膨張量を 20kg/m³とした。

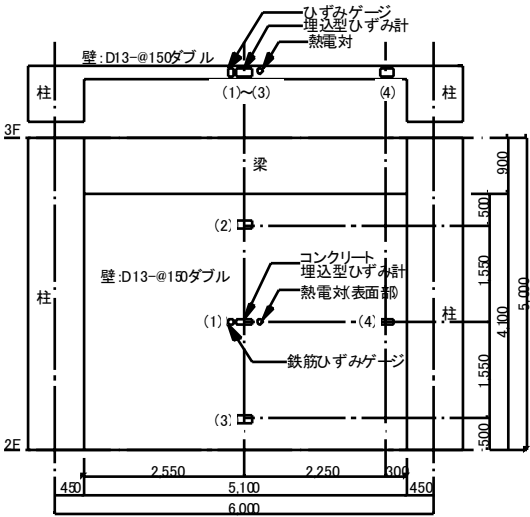
2.4 試験項目と試験方法

試験項目および試験方法を表－4 に示す。コンクリートの物性試験では, 圧縮強度及び静弾性係数, 割裂引張強度を測定した。養生は現場封緘養生とした。また, 膨張収縮量確認のため長さ変化率を測定した。養生および測定材齢は JIS に準拠した。

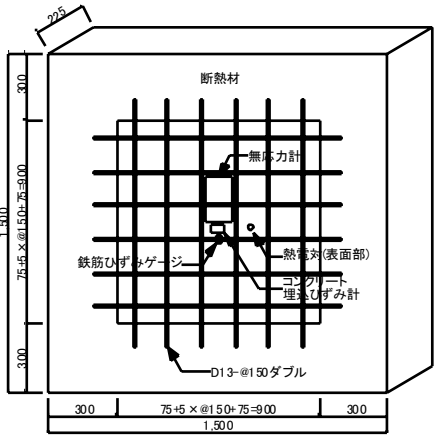
現場計測では, 実構造物の計測項目はコンクリートの温度及びコンクリートのひずみ, 鉄筋のひずみとした。小型試験体の計測項目は実構造物の計測項目に加え, 無応力計によるコンクリートの無拘束状態のひずみを計測した。計測

表－1 コンクリート種類と試験体の組合せ

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



図－1 実構造物の部材形状及び計測位置



図－2 小型試験体の形状及び計測位置

表－2 使用材料

材料	種類	物性
セメント	普通セメント	密度：3.21g/cm ³
	中庸熱セメント	
混和材	低添加型膨張材(水和熱抑制型)	密度：3.16g/cm ³
細骨材	千葉県君津産陸砂	密度：2.58g/cm ³ 吸水率：2.07%
	埼玉県秩父産砕砂	密度：2.63g/cm ³ 吸水率：1.56%
粗骨材	東京都西多摩産砂岩碎石	密度：2.63g/cm ³ 吸水率：0.91%
混和剤	AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩系
	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系

は、コンクリート打設から 90 日目までは連続計測とし、それ以降は半年に 1 回、小型計測器を用いて測定した。

表－3 コンクリートの調合

種類	セメント種類	膨張材	W/C+E (%)	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	3.8 ^{*1}
M	M	無	49.0	172	351	0	830	934	4.2 ^{*2}
M+EX	M	有			331	20			

^{*1}: A E減水剤標準形^{*2}: 高性能A E減水剤標準形

表－4 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
物性試験	圧縮強度試験	JISA 1108 に準じ、試験材齢は 7, 28, 56, 91 日
	静弾性係数試験	JISA 1149 に準じ、試験材齢は 7, 28, 56, 91 日
	割裂引張強度試験	JISA 1113 に準じ、試験材齢は 7, 28, 56, 91 日
	長さ変化試験	JISA 1129-3 に準じ、試験材齢は 7, 28, 56, 91 日
	拘束膨張試験	JISA 6202 付属書 2(参考)拘束膨張試験 B 法に準拠
現場計測	内部温度、外部温度	測温機能付き埋込みひずみ計と熱電対で測定
	コンクリートのひずみ	測温機能付き埋込みひずみ計と熱電対で測定
	コンクリートの自由ひずみ	無応力計（無応力容器+埋込み型ひずみ計）により測定
	鉄筋のひずみ	ひずみゲージによる測定

3. 試験結果

3.1 物性試験結果

表－5にコンクリートの物性試験結果を示す。普通コンクリート(N, M)と比較し、膨張コンクリート(M+EX)は圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数がやや大きい傾向があった。表－6に長さ変化および拘束膨張収縮試験結果(B法)を示す。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 100×10^{-6} 程度の差異が表れた。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た。拘束膨張収縮試験(B法)結果より、M+EXの膨張ひずみは収縮補償コンクリートとして必要な膨張量²⁾(材齢7日においてで $150 \sim 250 \times 10^{-6}$)を満足した。最大膨張ひずみ到達後には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 280×10^{-6} 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、膨張材混入の効果が顕著に表れた。

表－5 コンクリートの物性試験結果

種類	試験項目 〔単位〕	材齢			
		7 日	28 日	56 日	91 日
N	圧縮強度 (N/mm ²)	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
N	割裂引張強度 (N/mm ²)	2.5	3.1	3.1	2.9
M		2.4	2.8	2.9	3.0
M+EX		2.7	3.3	3.3	3.8
N	静弾性係数 (kN/mm ²)	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

表－6 長さ変化および拘束膨張収縮試験結果

種類	試験項目 〔単位〕	材齢					
		2 日	7 日	14 日	28 日	56 日	91 日
N	長さ変化率 (10 ⁻⁶)	-64	-168	-277	-484	-648	-703
M		-36	-106	-171	-350	-529	-602
M+EX		-44	-117	-177	-303	-425	-487
N	膨張収縮率 (10 ⁻⁶)	15	0	-145	-314	-445	-703
M		-7	-5	-139	-281	-413	-449
M+EX		97	170	26	-90	-227	-279

3.2 現場計測結果

(1) 温度測定結果

実構造物の温度測定結果を図-3に、小型試験体の温度測定結果を図-4に示す。実構造物のコンクリート内部温度の測定部位による差異は殆ど認められなかった。また、膨張コンクリート(M+EX)の内部温度は普通コンクリート(N, M)と比較し、最高温度が2~3℃上昇したが、概ね同様な温度変化を示した。

(2) 実構造物のひずみ計測結果

計測ひずみ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よりひずみが発生したと判断された時点とし、計測されたひずみに線膨張係数 $10.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ として温度補正したものを膨張収縮ひずみとした。図-5にコンクリートの膨張収縮ひずみ計測結果を、図-6に鉄筋の膨張収縮ひずみ計測結果を示す。

膨張収縮ひずみは、既設コンクリートの拘束の影響を受ける中央下部(③)と、中央端部(④)の最大膨張ひずみが 150×10^{-6} であり、中央部(①)、中央上部(②)の最大膨張ひずみ 200×10^{-6} よりも 50×10^{-6} 程度小さかった。また、全体的に、中央下部のひずみが最も小さく、次いで中央端部、中央上部、中央部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。

(3) 小型試験体のひずみ計測結果

実構造物と同様に計測初期値を処理し、温度補正を行った小型試験体のコンクリートの膨張収縮ひずみ計測結果を図-7に、鉄筋の膨張収縮ひずみ計測結果を図-8に示す。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た。また、膨張コンクリートの最大膨張ひずみは 150×10^{-6} 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)

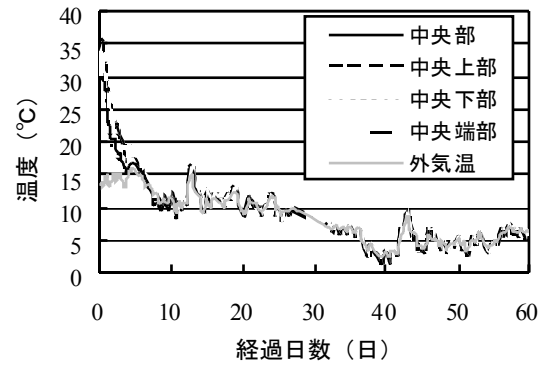


図-3 温度測定結果（実構造物）

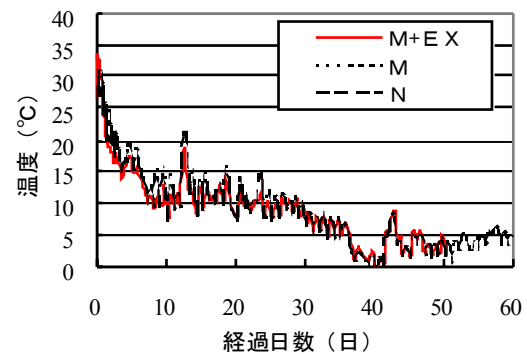


図-4 温度測定結果（小型試験体）

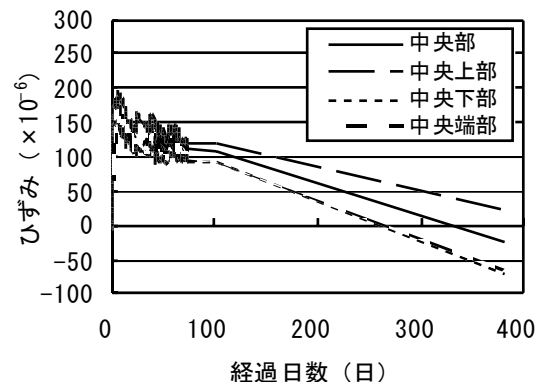


図-5 コンクリートの膨張収縮ひずみ（実構造物）

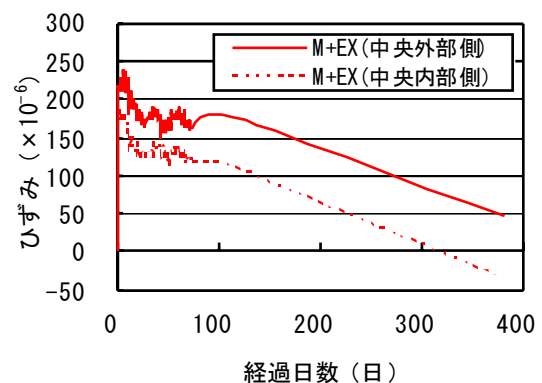


図-6 鉄筋の膨張収縮ひずみ（実構造物）

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 応力推定での効果の検証

4.1 小型試験体の応力推定

コンクリートのひび割れに影響を及ぼす応力を、計測した小型試験体のひずみより推定した。鉄筋およびコンクリートの両者の力の釣り合い式は式(1)となる。また、コンクリートと鉄筋のひずみがほぼ等しいことから、ひずみの適合条件は式(2)となる。式(1)、式(2)を用いて発生応力を式(3)より算出した。

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

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

$$\sigma_c = -\varepsilon_c' E_s A_s / A_c \quad (3)$$

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' : 温度ひずみを除去したコンクリートのひずみ A_s : 鉄筋の断面積 ε_s : 鉄筋のひずみ E_s : 鉄筋のヤング係数 ($2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)

なお、小型試験体の鉄筋比は、実構造物と同様で 0.75% である。普通コンクリート(N, M)および膨張コンクリート(M+EX)の発生応力を図-9 に示す。

普通コンクリート(N, M)と比較し、膨張コンクリート(M+EX)は初期に圧縮応力が導入され、引張応力が発生する時期が遅く、引張強度に対する応力発生が小さいなど、膨張材の引張応力の低減効果が認められた。

4.2 実構造物の応力推定

実構造物の応力を以下の手順で推定した。

- 1) 拘束度を 0.3 と仮定³⁾
- 2) 拘束度と膨張収縮ひずみから式(4)により自由ひずみを算出した。

$$\text{拘束度} = (\text{膨張収縮ひずみ} - \text{自由ひずみ}) / \text{自由ひずみ} \quad (4)$$

- 3) (膨張収縮ひずみ - 自由ひずみ) を拘束ひずみとし、拘束ひずみと有効ヤング係数を用いて

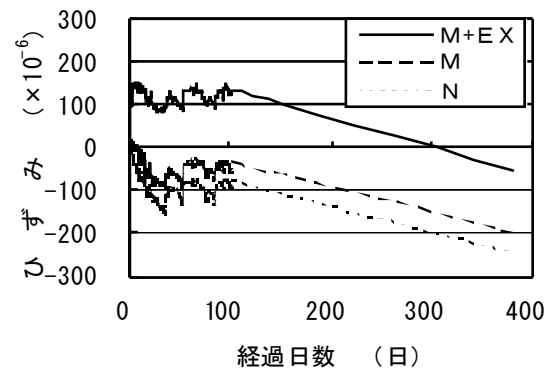


図-7 コンクリートの膨張収縮ひずみ (小型試験体)

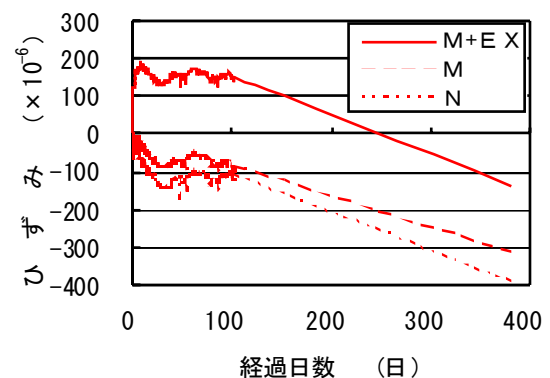


図-8 鉄筋の膨張収縮ひずみ (小型試験体)

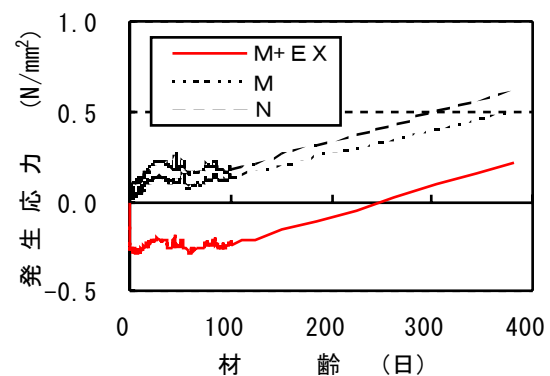


図-9 小型試験体の発生応力

式(5)⁴⁾より発生応力を算出した。尚、有効ヤング係数の評価方法は、コンクリート標準示方書の方法を用いて評価した。

$$\sigma(t) = \sum (E_e(t) \times \Delta \varepsilon(t)) \quad (5)$$

$\sigma(t)$: 材齢 t におけるコンクリートの応力

$E_e(t)$: 材齢 t における有効ヤング係数

$$E\epsilon(t)=\Phi(t)\times 4.7\times 10^3\times \sqrt{f_c'(t)}$$

$\Delta\epsilon(t)$ ：材齢 t におけるひずみ増分

$\Phi(t)$ ：ヤング係数の低減係数

実構造物での推定発生応力を図-10 に示す。

図-10 の結果に見られるように、実構造物に発生していると推察される引張応力は、材齢 1 年後においても約 2N/mm^2 であった。一方、引張強度の推定値は 3N/mm^2 程度であり、推察された引張応力はこの引張強度を下回っている。また、今回の引張応力の推定では引張応力発生時のクリープを考慮しておらず、引張強度の推定値にも実測値より小さいものを採用しているため、概ね安全側の評価になっていると考えられる。したがって、材齢 1 年経過時点では、未だひび割れの発生確率は低いレベルにあると考えられる。事実、当該構造物の外観からは、今のところ収縮に起因すると断定されるひび割れの発生は確認されていない。

コンクリートの乾燥収縮は打設後数年程度継続的に進行し、ひずみの季節変動も少なくないことから、実構造物のひび割れの発現状況は未だ定常には至っていないと思われる。今回の検討で中庸熱ポルトランドセメントに膨張材を使用したコンクリートのひび割れ抑制効果が一定程度確認された。今後、実構造物の外観観察およびひずみの計測を数年程度継続し定常状態でのひび割れ発生状況を一般的な構造物と相对比较することで、より確実な効果の検証が行われるものと期待している。

なお、膨張コンクリートの引張クリープは測定が非常に難しい面があるが、今後の課題としたい。

5. 結 論

中庸熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートに石灰系低添加・水和熱抑制型膨張材を混和した結果、次のようなことが言える。

- (1) 膨張コンクリートには膨張ひずみが導入され、ひび割れ抑制に効果があることを確認できた。

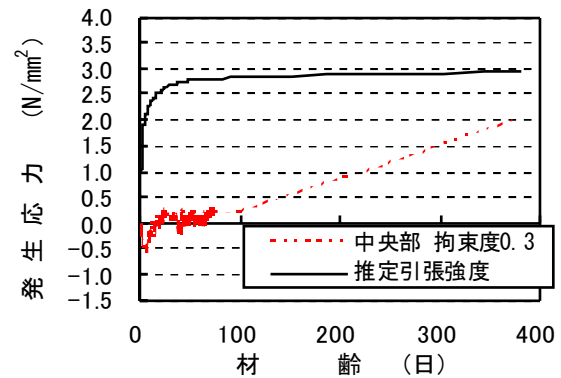


図-10 実構造物の推定発生応力と引張強度

- (2) 小型試験体で、力の釣合いに基づいて鉄筋に発生しているひずみからコンクリートの引張応力を評価した結果、使用セメントの種類により発生応力に差が認められ、また、膨張材による引張応力低減の効果が認められた。
- (3) 実構造物における膨張材効果の評価手法として、対象部材の拘束度を仮定し、推定される拘束ひずみからコンクリートに発生する引張応力を算出して引張強度と比較することを試み、膨張材による引張応力低減効果を確認した。この方法は、引張クリープを考慮していないことから安全側の評価と考えられる。
- (4) 実構造物においても、現在のところ収縮に起因したひび割れは発生しておらず、その傾向は今回の評価と整合している。

参考文献

- 1) 佐竹紳也, 山田信一, 秋山文生, 中村雅彦：低添加膨張材の建築工事への適用と展開，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, 2004
- 2) 土木学会，コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp289-290, 2002
- 3) 日本建築学会，鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，pp47-48, 2006
- 4) 土木学会，コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp52-53, 2002