

論文 膨張材を用いたマスコンクリートの収縮低減効果の解析手法の検討

東 邦和*¹・中村敏晴*²・増井 仁*³・梅原秀哲*⁴

要旨：膨張コンクリートの収縮低減効果の大きさを評価する解析手法を検討した。拘束試験装置を用いて温度履歴を与え、拘束に応じたひずみ量と応力を測定し、FEM 解析モデルを用いて、初期の有効ヤング係数補正係数の大きさを膨張材の有無と拘束度に応じて逆解析により求めた。膨張材により有効ヤング係数補正係数の大きさは膨張材なしの場合より大きくなり、膨張応力挙動を表現できる。さらに膨張材なしの場合の補正係数と膨張材添加による拘束膨張ひずみを用いて、解析モデルの拘束に応じた膨張量を与えることにより応力履歴を評価できる可能性を示した。壁体を模擬したモデルに適用して収縮低減効果を検討した。

キーワード：マスコンクリート、膨張コンクリート、膨張材、ひび割れ、温度応力解析

1. はじめに

膨張コンクリートをマッシブなコンクリート構造物にひび割れ防止対策として適用する場合には、効果の大きさを適切に評価することが必要である。膨張材は有効なひび割れ防止手法であり、今後も広く用いられていくことと考えられる¹⁾。本研究で対象としている膨張コンクリートは収縮補償の範囲であり、膨張効果について評価方法が研究されているが^{2,3,4,5,7)}、定量的な評価方法で大型の構造物に適用する場合に用いることのできる手法は確立されていないと考えられる。膨張コンクリートの収縮補償効果は、現場に打ち込まれたコンクリート構造物の膨張収縮に対する拘束および温度の条件によって膨張量が変化することを考慮して検討することが必要である。

本研究では FEM 解析モデルを用いて膨張コンクリートの応力履歴を解析し、収縮低減効果を検討することを目的としている。温度履歴を与えた拘束膨張試験を行い、測定値から初期の有効ヤング係数の補正係数と拘束に応じた膨張ひずみを求めて、拘束膨張試験の FEM 解析にヤング係数補正係数と膨張ひずみを与える方法を検討した⁶⁾。ここでは拘束実験条件の範囲を

広げ、解析モデルに上記の方法に加えて、要素に発生する拘束応力に応じて膨張量を低減する手法を検討した。さらにスラブ上の壁体を模擬した解析モデルに適用して、膨張材の収縮低減効果を検討した結果を示す。

2. 拘束膨張試験

2.1 試験方法

膨張コンクリートの膨張量は拘束度およびコンクリートの温度変化に影響されることから、拘束度と温度条件を設定した試験を行った。拘束試験装置は、JIS 原案「コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法(案)」に準拠した⁸⁾。温度条件は、実構造物を想定した温度履歴を FEM 解析により計算して与えた。拘束試験装置は、拘束鋼管内に一定温度の水を循環させ、拘束鋼管には温度変化に起因するひずみは発生せず、コンクリートの長さ変化の拘束から生じるひずみを測定できるものである。コンクリートの応力は拘束鋼管のひずみから算出し、クリープ等を考慮したコンクリートに実際に働く応力を測定することができる^{3, 5)}。コンクリートの使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、

*1 (株)奥村組 技術研究所 材料・LCE グループ (正会員)

*2 (株)奥村組 技術研究所 材料・LCE グループ

*3 (株)奥村組 技術研究所 環境グループ

*4 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

表-1 使用材料

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
細骨材	鬼怒川産川砂, 表乾密度:2.58 g/cm ³ , 吸水率:2.19%
粗骨材	笠間産碎石, Gmax20mm, 密度 2.66 g/cm ³ , 吸水率:0.59%
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物標準型
膨張材	主成分 カルシウムサルフォアルミネート 密度:2.71g/cm ³ , 水和熱抑制型

表-2 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 (kg/m ³)
			水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	
NP	55	43.8	166	302	—	790	1053	0.982
NE	55	43.8	166	272	30	790	1053	0.982

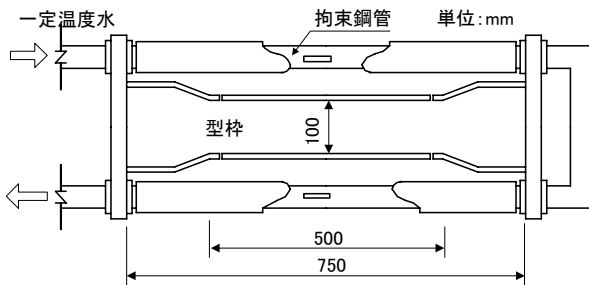


図-1 拘束試験装置

膨張材はカルシウムサルフォアルミネートを主成分とするものを使用した。拘束試験装置の拘束の大きさは3水準とした。拘束試験装置の諸元を表-3に示し、拘束試験装置を図-1に示す。拘束度を式(1)に示す。

$$\text{拘束度} = \frac{EsAs}{EsAs + Ec'Ac} \quad (1)$$

ここに、Es：鋼材のヤング係数

As：鋼材の断面積

Ec'：コンクリートの見かけのヤング係数

Ac：コンクリートの断面積

拘束度はヤング係数の発現に伴い変化する。鋼材とコンクリートのヤング係数比を 10 とした場合の拘束度は、拘束大で 0.70, 拘束中で 0.46, 拘束小で 0.29 である。試験ケースを表-4に示す。試験体のセメントおよび膨張材のロットの違いにより膨張量に多少の変動があるが、同一

表-3 拘束試験装置の諸元

拘束	拘束鋼管 (各 4 本)	コンクリート断面積
大*1	外径 42.7mm 内径 32.9mm 合計断面積 2328mm ²	10,000mm ²
中*2	外径 42.7mm 内径 39.4mm 合計断面積 851mm ²	
小*3	外径 21.7mm 内径 18.4mm 合計断面積 416mm ²	

*1 拘束度 0.70 (各々ヤング係数比 10 の場合)

*2 拘束度 0.46 JIS 原案準拠

*3 拘束度 0.29

表-4 試験ケース

試験ケース	温度履歴	拘束	配合名
1	高 55°C	大	NE
2		中	
3		小	
4		大	NP
5		中	
6		小	
7	低 35°C	大	NE
8		中	

シリーズの結果を示した。膨張材を添加しないコンクリートをNP, 添加したものをNEと呼ぶ。

2.2 拘束装置試験結果

温度可変室内に置いた試験体に与えた温度履歴のピーク値は 55°C および 35°C である。試験体中央部の大きさは 10cm 角であり、表面と中心

部の温度は本検討では均一とみなせる。各試験体の温度履歴は、試験体ケース間に差はなかった。試験体の温度履歴の測定値を図-2に示す。

試験ケース1~3のNEの場合に拘束鋼管に生じたひずみを図-3に示す。拘束大、中、小の最大膨張ひずみはそれぞれ 22.1×10^{-6} 、 44.4×10^{-6} 、 70.8×10^{-6} が得られた。ひずみに拘束鋼管の合計断面積とヤング係数を乗じ、コンクリート断面積で除して求めたコンクリート応力を図-4に示す。拘束大、中、小の圧縮応力ピークはそれぞれ -1.03 N/mm^2 、 -0.78 N/mm^2 、 -0.62 N/mm^2 が得られた。試験ケース4~6のNPの応力を図-5に示す。NEの場合は圧縮部の形状が大きく引張側への移行が遅いことが明確に認められる。NPのピーク値はNEの場合より少し小さく、ピーク後の圧縮応力の減少が急である。膨張コンクリートは収縮低減効果として圧縮部の応力を大きくする効果がある。また、ピーク後に引張側に移行する過程で引張応力を低減する効果があり、見かけの下り線膨張係数が小さくなることは、この効果によると考えられる⁶⁾。

試験ケース7,8のNEの応力を図-6に示す。ピーク温度が 35°C と低い場合にも、応力は温度履歴に比例した大きさとなり、拘束大と中の関係も温度高の場合と同様である。

3. 温度応力解析

3.1 解析方法

拘束試験装置のFEM解析モデルを用いて温度履歴を与え、有効ヤング係数の補正係数を設定して、ひずみと応力を解析する手法は実験の応力挙動を十分な精度を持って表わすことができる⁶⁾。拘束試験装置のコンクリートと拘束鋼管の解析モデルを図-7に示す。3水準の拘束度と2水準の温度履歴を用いて、拘束と温度履歴を解析モデルに与えて、測定応力履歴との間に逆解析を適用し初期の有効ヤング係数補正係数の大きさを同定解析した。解析ケースを表-5に示す。解析に用いた自社プログラムは、JCIマスコンクリート委員会の検定解析への適合を

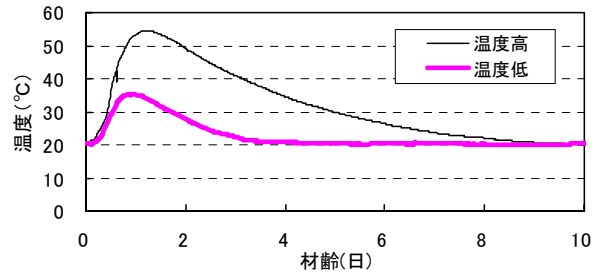


図-2 温度履歴測定値

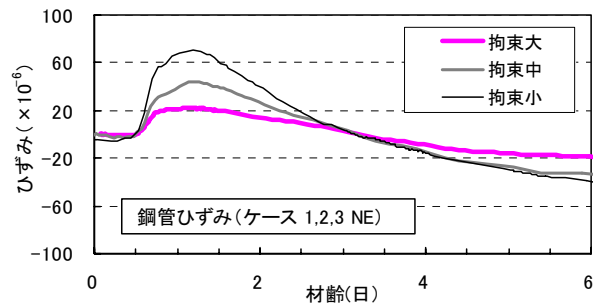


図-3 ひずみ測定結果 (NE) 温度高

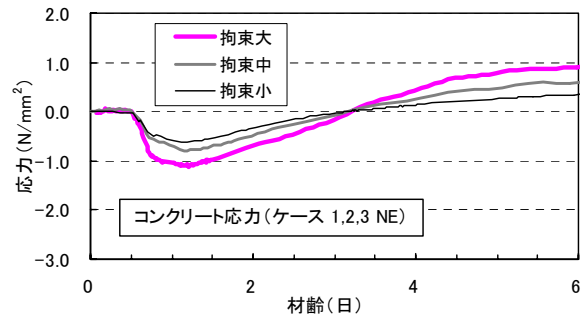


図-4 応力測定結果 (NE) 温度高

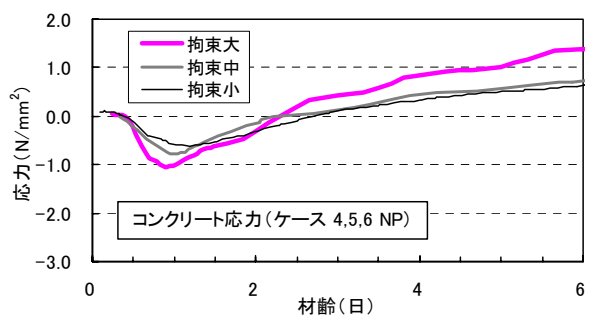


図-5 応力測定結果 (NP) 温度高

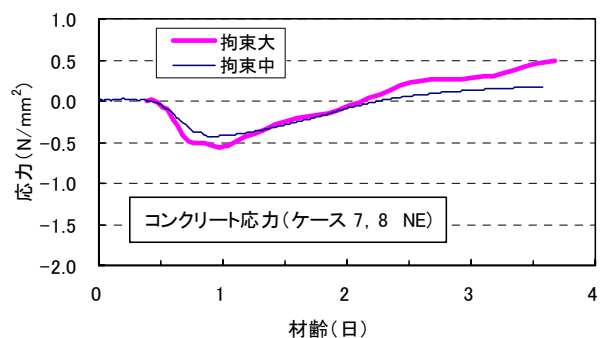


図-6 応力測定結果 (NE) 温度低

確認している。解析におけるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係は、土木学会コンクリート標準示方書 式 (2)⁹⁾を用いた。定数 a, b, d と $f'_{ck}(28)$ の値を表-6に示す。有効ヤング係数 E_e は、式(3)を基本として用いた。本解析では、すべてのケースで鋼管およびコンクリートの線膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ としている。

$$f'_c(t) = \{t/(a+bt)\} \times d \times f'_{ck}(28) \quad (2)$$

ここに $f'_{ck}(t)$: 設計基準強度 (N/mm²)

t : 材齢(日) a, b, d : 定数

$$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (3)$$

ここに $\phi(t)$: 有効ヤング係数補正係数

材齢 3 日まで 0.73, 材齢 5 日以降 1.0

$f'_c(t)$: 材齢 t 日の圧縮強度(N/mm²)

3.2 解析結果

解析モデルに拘束膨張試験の応力測定結果を用いて逆解析手法を適用した。NE および NP の拘束試験における温度履歴のピーク材齢 1.2 日までの初期の有効ヤング係数補正係数 (ϕ) を各拘束度について算定した結果を図-8に示す。示方書の ϕ は温度上昇時におけるクリープの影響を考慮するための補正係数である⁹⁾。ここでは NE の応力履歴における温度上昇時の圧縮応力の発現は NP よりも大きく、膨張材の効果を ϕ の大きさに評価するものである。解析で NE に NP より大きい ϕ を与えることにより、NE の圧縮応力が大きくなり収縮低減効果を表すことができる。また、拘束度が小さくなると圧縮応力が小さくなることから補正係数 ϕ も小さくなり、温度履歴が低の場合は高よりも補正係数 ϕ が小さい結果が得られた。解析ケース 4 および 8 は拘束度大および中の平均的な補正係数の値であり、NE (ケース 4) では $\phi=0.49$, NP (ケース 8) は $\phi=0.34$ の値が得られた。

3.3 構造物の解析方法

前項では膨張材の効果を補正係数 ϕ で評価したが、ここではもう一つの方法として NP の ϕ

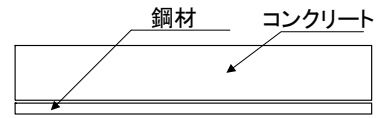


図-7 拘束試験解析モデル

表-5 解析ケース

解析ケース	温度履歴	逆解析に用いた拘束応力	配合名
1~3	高	大~小	NE
4		大中の両方を使用*1	
5~7		大~小	NP
8		大中の両方を使用*1	
9,10	低	大, 中	NE

逆解析初期値 $\phi=0.73$ *1 大中の応力履歴を同時に用いて逆解析した

表-6 解析に用いた定数

a	b	d	$f'_{ck}(28)$ (N/mm ²)
4.5	0.95	1.11	24

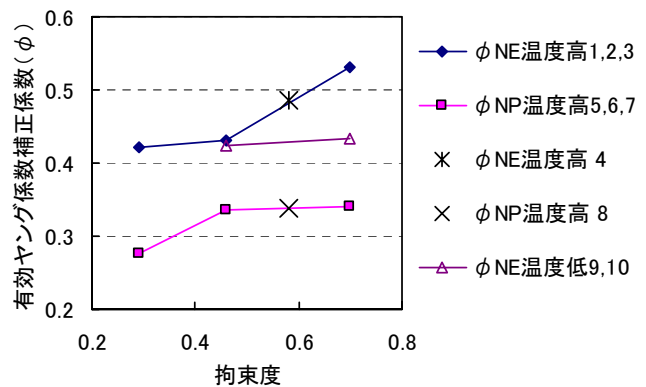


図-8 拘束度と有効ヤング係数補正係数

を基準として一定値で与え、膨張ひずみを拘束圧で低減して付加する方法を検討する。本コンクリートの JIS 拘束膨張試験⁹⁾による膨張ひずみは 184×10^{-6} の値を示した。拘束試験解析モデルに温度履歴を与え、線膨張係数、測定応力履歴と NP の補正係数 $\phi=0.34$ を用いて、NE の場合に与える膨張ひずみを逆解析により算定し、応力履歴を適正に表すことのできるひずみ量として 70×10^{-6} を得ている。この値は JIS 拘束膨張試験結果と比較して約 40% の値である⁶⁾。

構造物解析モデルに与える初期膨張ひずみ ϵ_c の大きさは要素圧縮応力に依存するとして、

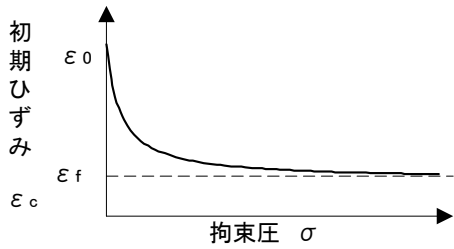


図-9 初期ひずみの拘束圧依存性

双曲線式を用いた数値モデルにより、JIS 拘束膨張試験による膨張ひずみの増分を拘束圧に従って低減して計算する。初期ひずみの拘束圧依存性を図-9に、双曲線式を式(4)に示す。

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_0 - \varepsilon_f) / (1 + a\sigma) + \varepsilon_f \quad (4)$$

ここに、

ε_0 : JIS 拘束膨張試験の膨張ひずみ

ε_f : 拘束無限大の膨張ひずみ

a : 拘束圧依存パラメータ

σ : 拘束圧 (N/mm²)

ここでは拘束試験解析モデルから得られた膨張ひずみを近似して双曲線パラメータを $\varepsilon_f / \varepsilon_0 = 0.05$, $a = 5$ とした。また、拘束のないと考えられる引張応力側に移行した時のひずみ増分は低減していない。

3.4 壁状構造物の解析結果

適用した対象構造物を図-10に示す。マッシュブな RC スラブの上に打設された壁体を模擬している。壁の厚さはケース 1, 2, 3 でそれぞれ 500mm, 1000mm, 2000mm である。構造物解析ケースとモデルの寸法を表-7に示す。解析条件を表-8に示す。温度ピーク材齢に合わせて補正係数の低減期間を設定した。

解析結果は断面中央で底版から 500mm の高さの位置で評価した。温度ピークはケース 1~3 でそれぞれ 47°C, 56°C, 62°C である。ケース 1~3 の応力解析結果を図-11に示す。発生最大応力はケース 1-1 NE の場合に、圧縮で -0.46N/mm², 引張最終値 1.59N/mm² となった。ケース 2-1 NE では、圧縮で -0.75N/mm², 引張で 3.20N/mm², ケース 3-1 の NE では、圧縮で

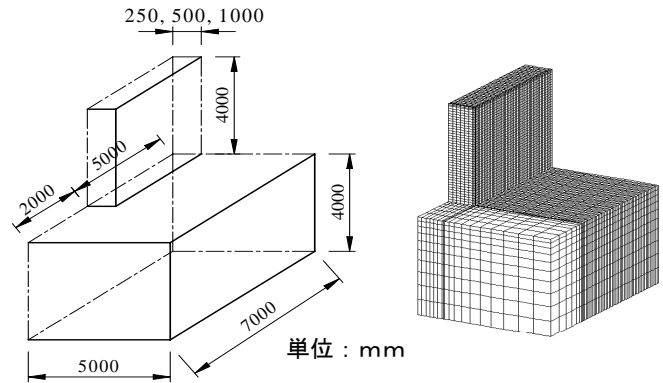


図-10 壁状構造物解析モデル (1/4 モデル)

表-7 構造物解析ケース

ケース	構造寸法	配合	解析条件
1-1	0.5m×	NE	φ 0.34(材齢 1.26 日まで)
1-2	10.0m×4.0m	NP	
2-1	1.0m×	NE	φ 0.34(材齢 1.54 日まで)
2-2	10.0m×4.0m	NP	
3-1	2.0m×	NE	φ 0.34(材齢 1.85 日まで)
3-2	10.0m×4.0m	NP	

*材齢 5 日 φ 1.0 間は直線補完

表-8 解析条件

項目	入力値
初期温度 (°C)	20
比熱 (kJ/kg°C)	1.15
熱伝導率 (W/m°C)	2.70
密度 (kg/m ³)	2300
熱伝達率 (W/m ² °C)	14 (型枠面)
断熱温度上昇式	$Q_{\infty}46.0, \gamma 1.425$

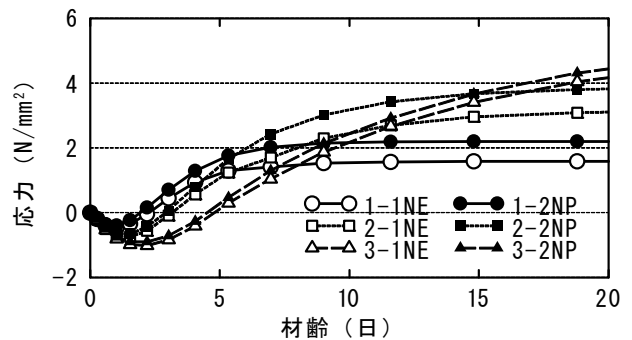


図-11 応力解析結果 (ケース 1, 2, 3)

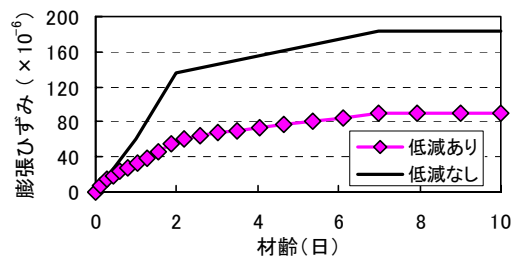


図-12 膨張ひずみの低減 (ケース 1-1NE)

-1.02N/mm², 引張で 5.43N/mm² となった。図に示すようにケース 1, 2 では, NP と比較して NE の応力低減が大きい, ケース 3 では小さい。ケース 3 では温度ピーク値が大きいことと, 膨張ひずみに対してピーク材齢が遅いことによると考えられる。解析に用いた初期値膨張ひずみ 184×10^{-6} とケース 1 の低減されたひずみを図-12 に示す。要素応力度により低減したひずみの最終値は, ケース 1~3 で, それぞれ 89.7×10^{-6} , 84.7×10^{-6} , 60.5×10^{-6} となった。ケース 1 の NE と NP の壁厚中心でのひび割れ指数を図-13 に示す。図中 NP の壁端部側のひび割れ指数の小さい部分は面外方向主応力によるものである。NE の場合はひび割れ指数の小さい領域が縮小しており, 収縮低減効果が示されている。

4. まとめ

本研究の範囲内で次の結果が得られた。

- (1) 膨張材を用いたときの応力履歴の大きさは, 膨張材なしと比べて初期の有効ヤング係数補正係数 ϕ が大きくなることにより評価できる。
- (2) 有効ヤング係数補正係数 ϕ の値は, 拘束度が小さくなるに従い小さくなる。
- (3) 膨張材なしの有効ヤング係数補正係数を基準にして, 拘束に応じた膨張ひずみを与えることにより膨張材を添加した場合の応力履歴を解析できる。
- (4) 解析プログラムで膨張ひずみを拘束に応じて低減させ, 構造物の応力履歴を計算し, 膨張材の効果を検討できる可能性がある。

マッシュな構造物への適用性について今後さらに検討を行っていききたい。

参考文献

- 1) 岸利治, 細田暁: 耐久性向上と膨張コンクリートの可能性, セメント・コンクリート, No. 661, pp. 1-8, 2002. 3
- 2) 辻幸和ほか: 膨張材を使用したマスコンクリートの温度応力とケミカルプレストレス, セメント技術年報, 36, pp. 159-162, 1982

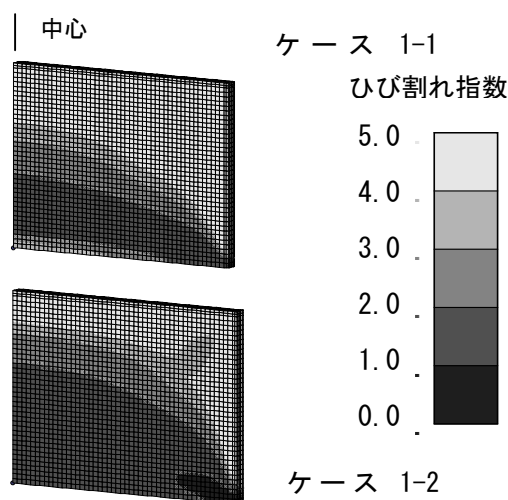


図-13 ひび割れ指数解析結果 (1/4 モデル)

- 3) 竹田宣典, 松永篤, 近松竜一, 十河茂幸: 低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20, No. 2, pp. 997-1002, 1998
- 4) 溝渕利明, 横関康祐, 信田佳延: 一軸拘束試験装置を用いた膨張材の温度応力抑制効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 1051-1056, 1998
- 5) 保利彰宏, 玉木俊之, 萩原宏俊: 膨張材を添加したコンクリートの物理的性状に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 571-576, 1999
- 6) 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, pp. 1037-1042, 2003
- 7) 高瀬和男ほか: 膨張コンクリートの初期材齢における有効ヤング係数に関する一考察, JCI 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論文集, pp. 161-166, 2003
- 8) 仕入豊和ほか: コンクリートのひび割れ試験方法(案), コンクリート工学, Vol. 23, No. 3, pp. 40-49, 1985. 3
- 9) 土木学会コンクリート標準示方書 施工編, 基準編, 2002