

論文 遷移材齢時におけるコンクリートの局所的熱変形性状に及ぼす岩盤節理の影響に関する研究

村上 祐貴^{*1}・内堀 学^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：マスコンクリートに関する温度応力等の初期応力性状の精度良い解明には，岩盤とコンクリートの境界面特性を明確にし，その特性を解析モデルに導入する必要がある。そこで本研究では，境界面特性をコンクリートの要素内に初期不整として導入可能な要素モデルを提案し，パラメータスタディを行うことで，その要素の妥当性を検討した。

キーワード：局所化領域，非局所化領域，特性要素長

1. はじめに

コンクリート構造物の初期欠陥の原因には自己収縮や水和熱による温度収縮などの体積変化による初期応力が挙げられるが，特にマスコンクリートのような大断面を有する場合においては，水和熱およびそれによる温度応力が初期欠陥に及ぼす主要因となる。

現在，数値計算技術の向上によりマスコンクリートの温度予測に関しては精度良く評価が可能であるが，温度応力解析に関しては，定性的にもまた定量的にも詳細な予測が可能であるとは言い難い。その要因は，セメントと水和反応過程における線膨張係数や弾性係数，打継面におけるはく離現象，岩盤節理との付着性状等が挙げられる。著者らはこれら要因の中で特に未解明である岩盤節理との付着性状に着目し，昨年度，温度応力模擬実験を実施した結果，岩盤節理の影響が被拘束コンクリート内部の局所的な変形性状および応力性状に大きな影響を与えることが確認された。¹⁾

この模擬実験結果からも温度応力解析の精度向上には境界面特性を解析モデルに導入する必要があることは明らかではあるが，一般的な要素モデルでは，解析対象となる節理パターンに合わせ，要素分割する必要があるが，非常に非効

率的な上，解析結果への信頼性も乏しい。

現在までにコンクリートの局所化解析は数多く行われているが^{2),4)}，一般的にそれら手法は，一種の分布ひび割れモデルであり，ひび割れ進展解析を対象としたものが多い。そのため，通常1要素内に設定される局所化領域は一つである。しかしながらコンクリート要素に及ぼす岩盤の付着性状を考慮する為にはコンクリート1要素内に無数の局所化領域を配置する必要がある。

そこで本研究では境界面特性をコンクリートの要素内に初期不整として1要素内に局所化領域を任意数導入可能な要素モデルを提案し，パラメータスタディを行い，その要素の妥当性を検討した。

2. 任意局所化要素モデル

2.1 要素モデル概念

図-1(a),(b)に示すように岩盤とコンクリートの付着性状は岩盤節理の分布状況により局所的に異なり，付着性状が著しく異なる領域境界面上ではひずみが不連続になると考えられる。

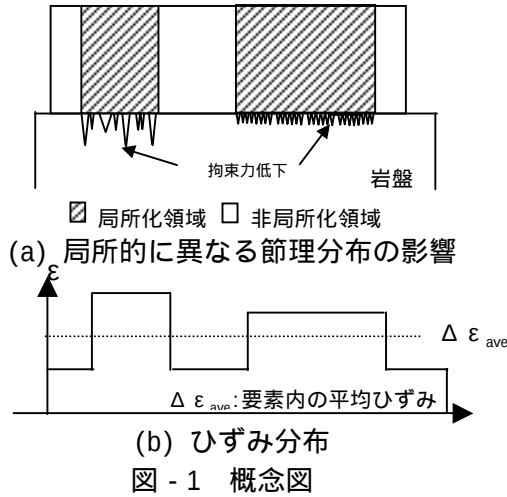
そこで本研究では外部拘束が低減することによりひずみが大きくなる領域を局所化領域，その他の領域を非局所化領域と定義し，要素内の

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*3 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

ひずみは，局所化領域と非局所化領域の重ねあわせから局所化領域間の相互影響を差し引いたものであるとし，特性要素長 l_e なる概念を導入することで，要素モデルを構築する。



2.2 要素モデル

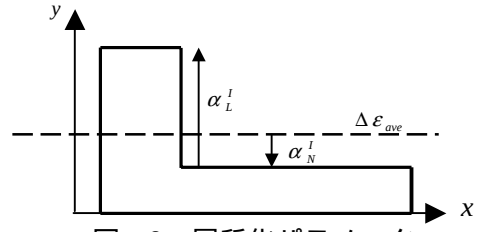
図 - 1 に示すように，岩盤拘束が弱い領域に局所化領域を挿入することにより，局所化領域においては，ひずみが増加し，またそれに伴い非局所化領域においては，ひずみが相対的に減少させることで，各局所化領域と非局所化領域の境界面上では，ひずみの Jump が生じることとなる。

このひずみの Jump 量 $\|\varepsilon\|$ は以下に示す式になる。

$$\|\varepsilon\| = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ 2\varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad T = \begin{Bmatrix} m_x n_x \\ m_y n_y \\ m_x n_y + m_y n_x \end{Bmatrix}$$

$$\|\varepsilon_{ij}\| = \frac{1}{2} \alpha (m_i n_j + m_j n_i) \quad \text{or} \quad \|\varepsilon\| = \frac{1}{2} \alpha T \quad (1)$$

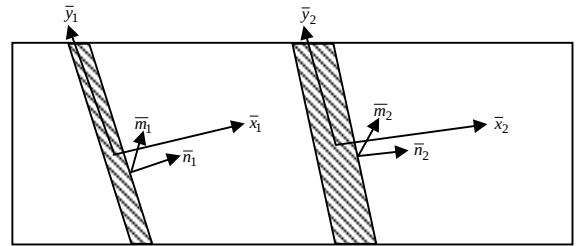
ここで m および n はそれぞれ，Jump 方向単位ベクトルおよび不連続境界面の法線ベクトルである。また，図 - 2 に示すように α は，要素内の平均ひずみを基準とし，その基準から局所化領域および非局所化領域におけるひずみの増減率を表すスカラー量である。以降この α を局所化パラメータと称し，局所化領域における α を α_L ，非局所化領域における α を α_N と定義する。



また，図 - 3 に示すように式(1)を全体座標系から不連続境界面に直行する局所座標系へ変換すると，以下に示す式なる。

$$\|\bar{\varepsilon}\| = \begin{Bmatrix} \bar{\varepsilon}_x \\ \bar{\varepsilon}_y \\ 2\bar{\varepsilon}_{xy} \end{Bmatrix} \quad \bar{T} = \begin{Bmatrix} \bar{m}_x \\ 0 \\ \bar{m}_y \end{Bmatrix} \quad |\bar{T}| = 1 \quad (2)$$

ここで上付きのバーは局所座標系におけるベクトル量であることを意味する。



また，各局所化領域および非局所化領域のひずみ増分は以下に示す式になる。

$$\delta \bar{\varepsilon}_N^I = (\delta \bar{\varepsilon}_{ave} - \sum \alpha_N^I \bar{T}^I)$$

$$\delta \bar{\varepsilon}_L^I = (\delta \bar{\varepsilon}_{ave} - \sum \alpha_N^I \bar{T}^I + \alpha_L^I \bar{T}^I) \quad I: \text{局所化領域番号} \quad (3)$$

ここで，岩盤節理の付着性状を考慮した応力 - ひずみ関係を仮に D'_L と定義し，完全拘束状態の場合を D_N と定義すれば，各不連続境界面における力の釣合関係は，式(3)を用いると以下に示す式になる。

$$D'_L (\delta \bar{\varepsilon}_{avg} - \alpha_N^I \bar{T}^I + \alpha_L^I \bar{T}^I) - D_N (\delta \bar{\varepsilon}_{avg} - \alpha_N^I \bar{T}^I) = \delta [\bar{\sigma}]^I \quad (4)$$

ここで，式(4)の右辺 $\delta [\bar{\sigma}]^I$ は，各不連続境界面における局所座標系を用いることにより，不連続面直行方向応力増分およびせん断応力増分

は 0 になる。また局所化領域係数 α_{I_N} および α_{I_L} の関係は以下に示す式になる。

$$\alpha_L^I = \frac{l_e^I}{b^I} \alpha_N^I - \sum \left(\frac{E_N}{E_L^I} - 1 \right) \alpha_N^{I*} \quad (5)$$

b^I : 対象局所化領域幅 l_e^I : 特性要素長

上式中の添え字 * は、対象局所化領域以外の局所化領域を示す。なお要素特性長 l_e および式(5)に関しては、セクション 2.3 離散化において詳細を述べる。

そして、式(4)に式(2)および式(5)を代入し、各局所座標系で、直応力成分およびせん断応力成分の釣合い関係より、各局所化領域における局所化パラメータ α_{I_N} および α_{I_L} を導くことが可能となる。

2.3 離散化

図 - 1 に示すように、非局所化領域と局所化領域の境界面上ではひずみの Jump が生じるため、ひずみの適合条件は成立しない。そこで、変位 u 、応力 σ およびひずみ ε を独立変数としてポテンシャルエネルギー Π を導くと Hu-Washizu³⁾ の変分原理より以下に示す式になる。

$$\begin{aligned} \Pi &= \int_{\Omega^e} \Sigma(\varepsilon_{ij}) - \sigma_{ij} \left[\varepsilon_{ij} - \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \right] d\Omega - f^{ext} \\ f^{ext} &= \int_{\Omega^e} F_i u_i d\Omega + \int_{s^u} \bar{T}_i u_i ds - \int_{s^u} p_i (u_i - \bar{u}_i) ds \end{aligned} \quad (6)$$

上式よりエネルギー増分 $\delta \Pi$ は

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= \int_{\Omega^e} \delta \varepsilon_{ij} \frac{\partial \Sigma(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{ij}} d\Omega \\ &\quad - \delta \int_{\Omega^e} \sigma_{ij} \left[\varepsilon_{ij} - \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \right] d\Omega - \delta f^{ext} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)を離散化すると以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= \delta[d]^t \int_{\Omega^e} [\bar{B}]^t \left[\frac{\partial \Sigma(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{ij}} \right] d\Omega \\ &\quad - \delta \int_{\Omega^e} [s]^t [S]^t (\bar{B} - B) d\Omega [d] - \delta[d]^t f^{ext} \\ [u] &= [N][d], [u_{i,j}] = [B][d], [\varepsilon] = [\bar{B}][d], [\sigma] = [\bar{S}][s] \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)の停留条件は

$$\begin{aligned} \frac{\delta \Pi}{\delta [d]} &= \int_{\Omega^e} [\bar{B}]^t \Sigma d\Omega - \delta \int_{\Omega^e} [s]^t [S]^t (\bar{B} - B) d\Omega - f^{ext} = 0 \\ \frac{\delta \Pi}{\delta [s]} &= \int_{\Omega^e} [S]^t (\bar{B} - B) d\Omega [d] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)より適合条件および内力は以下に示す式になる。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega^e} [S]^t (\bar{B} - B) d\Omega &= 0 \\ f^{int} &= \int_{\Omega^e} [\bar{B}]^t \Sigma d\Omega - \delta \int_{\Omega^e} [s]^t [S]^t (\bar{B} - B) d\Omega \\ &= \int_{\Omega^e} [\bar{B}]^t \Sigma d\Omega \end{aligned} \quad (10)$$

各局所化領域において、式(10)の適合条件式に代入すると、以下の式が得られる

$$\begin{aligned} [Q]^t &= \left[\frac{b^I}{l_e^I} S^t ([B_L]^t - [B]) + \left(1 - \frac{b^I}{l_e^I} \right) S^t ([B_N]^t - [B]) \right] J(\xi) w_i \\ &= S^t \left[\frac{b^I}{l_e^I} (\alpha_L^I - \alpha_N^I) + \left(1 - \frac{b^I}{l_e^I} \right) (1 - \alpha_N^I) \right] [T^I]^t [T^I] J(\xi) w_i \\ &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$l_e^I = h + \sum \left(\frac{E_N}{E_L^{I*}} - 1 \right) b^{I*}$$

l_e^I : 特性要素長 b^{I*} : 対象局所化領域以外の局所化領域幅

ここで、特性要素長とは、図 - 4 に示すように、各局所化領域は、互いにその局所化の影響を受けるとし、各局所化領域における局所化パラメータを求める際、対象としている局所化領域以外の局所化領域を一時的に非局所化領域として扱う際の仮想的な要素長である。この特性要素長を用い、各局所化領域において、式(11)を解き、互いの局所化領域の影響を考慮することにより、局所化パラメータ関係式、式(5)が導出される。

ところで、図 - 5 に示すように、ひずみの要素内の平均ひずみベクトルの Jump 方向成分ベクトルは以下に示す式になる。

$$\Delta \varepsilon_{ave,T} = ([B] \Delta d \cdot T) T \quad (12)$$

式(12)を用い、式(3)を離散化すると以下に示す式になる。

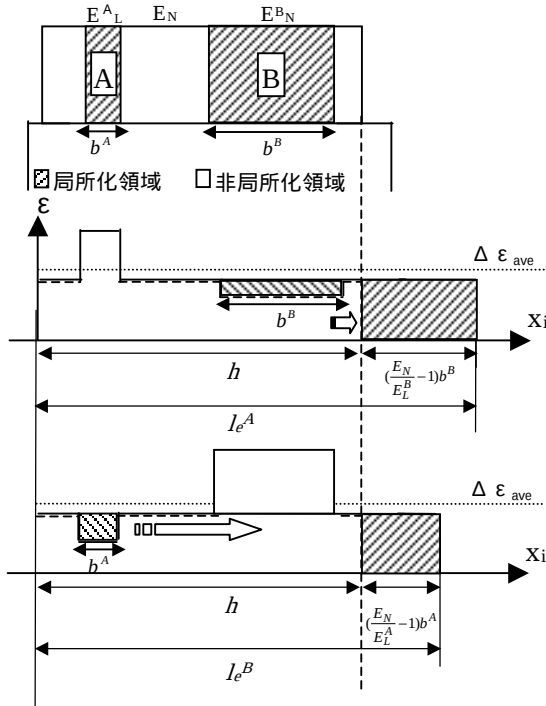


図 - 4 特性要素長概念

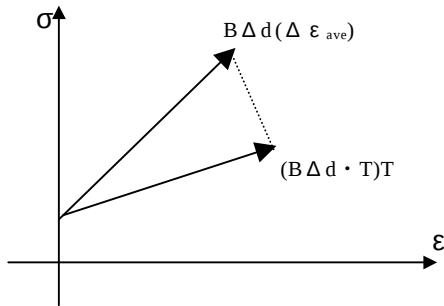


図 - 5 ひずみ空間

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_L^I &= [B]\Delta[d] - \sum \alpha_N^I [T]^I + \alpha_L^I [T]^I \\ &= (I - \alpha_N^I + \sum \alpha_L^I) [T]^I ([T]^I)^t [B]\Delta[d] \\ \Delta \varepsilon_N^I &= [B]\Delta[d] - \sum \alpha_N^I [T]^I \\ &= (I - \sum \alpha_N^I) [T]^I ([T]^I)^t [B]\Delta[d] \\ \alpha_N^I &= \alpha_N^I{}' ([T]^I)^t [B]\Delta[d] \quad \alpha_L^I = \alpha_L^I{}' ([T]^I)^t [B]\Delta[d] \quad (13)\end{aligned}$$

すなわち、局所化領域および非局所化領域の $[B]$ マトリクスは以下の式になる。

$$\begin{aligned}[B_N]^I &= [I - \sum \alpha_N^I{}' [T]^I ([T]^I)^t] [B] \\ [B_L]^I &= (I - \sum \alpha_N^I{}' + \sum \alpha_L^I{}') [T]^I ([T]^I)^t [B] \quad (14)\end{aligned}$$

最終的に剛性マトリクスは以下の式になる

$$\begin{aligned}[K] &= \sum \frac{b^I}{h} [B_L]^I [D_L]^I [B_L]^I \\ &\quad - (1 - \sum \frac{b^I}{h}) [B_N]^I [D_N]^I [B_N]^I \quad (15)\end{aligned}$$

3. 解析手法

3.1 解析モデル

本解析では温度応力解析モデル構築の第一段階として構築した要素モデルの整合性を評価するため、岩盤節理によって生じる局所的に異なる岩盤付着性状がコンクリートに及ぼす影響を節理直上のコンクリート領域の剛性を変化させることにより表現した。すなわち剛性の大きい領域は外部拘束効果が高い領域、剛性の小さい領域は外部拘束効果が低い領域と仮定している。なお、表 - 1 に解析パラメータを示す。

実現象においては、著者らが実施した模擬実験¹⁾からもそうであるように、節理の影響によって生じる局所化現象は、節理直上のみならず面方向および高さ方向に広がりを持つ。またこの局所化の度合いは節理深さ、形状、節理同士の間隔等の節理パラメータにより異なると考えられる。この節理パラメータにより異なる局所化度合いを定量化し、その情報を構築された要素モデルにフィードバックすることにより、局所化現象が定量化可能になると考えられ、現在、節理パラメータを様々変化させ、模擬実験を実施している。

図 - 6 に対象とした解析モデルを示す。図中に示す E_L および E_N はそれぞれ各局所化領域の弾性係数および非局所化領域の弾性係数であり、前述した様に、本解析において、各領域における剛性はそのコンクリート領域直下の節理群により生じるひずみの局所化度合いを表している。

また、各解析 Case における局所化領域数、配置位置、および局所化領域幅を表 - 2 に示す。同表中における座標値は、要素 1 左端から局所化領域中心位置までの距離である。

コンクリートの応力 - ひずみ関係は図 - 7 に示す引張軟化曲線を採用し、最大主応力が引張強度に達した際は、図 - 8 に示すように指定領域中の幅 10mm の領域のみ軟化させた。各解析 Case における軟化指定領域を表 - 2 に示す。

なお、ひずみはこの引張軟化モデルで与えられるひび割れ幅を軟化指定局所化領域幅で除し

たものとした。また，軟化過程中，ポアソン効果は消失するものとし，せん断弾性係数は弾性時の 1/1000，強制変位は 1step 当り 0.001mm とした。

表 - 1 解析条件

要素長(mm) : L	100
ひび割れ要素幅(mm) : b	10
ポアソン比 : ν	0.16
引張強度 : f_t	2.0
破壊エネルギー (N/mm) : G_f	0.2

表 - 2 局所化配置位置

CASE	局所化数	局所化幅(mm)－配置位置(mm)				軟化指定領域
1	1	50-40				①
2	2	25-29.5	25-70.5			①
3	2	25-29.5	25-70.5			②
4	2	25-20.5	50-67			②
5	4	20-15	20-100	20-165	20-202.5	③

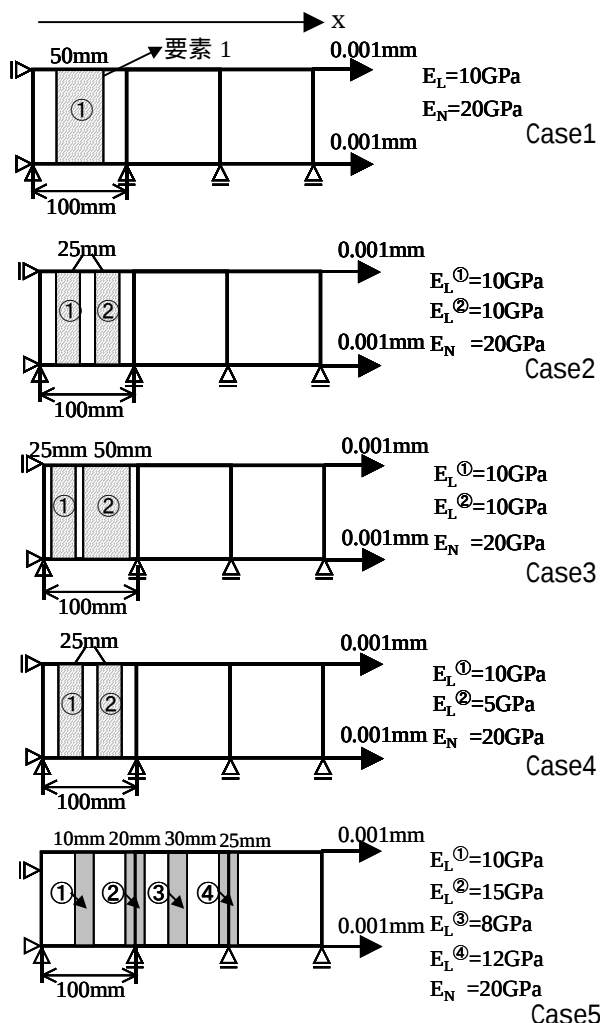


図 - 6 解析ケース

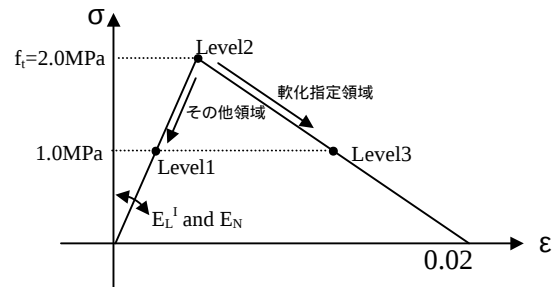


図 - 7 引張軟化曲線

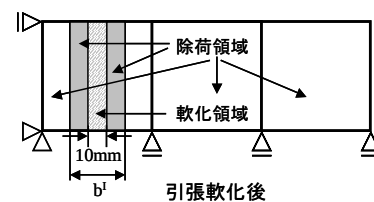
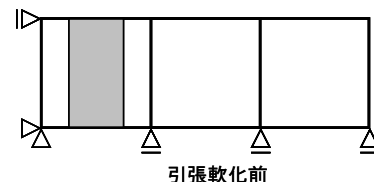


図 - 8 軟化過程

3.2 解析結果

図 - 9 に解析結果を示す。図中に記した LEVEL1, LEVEL2, LEVEL3 はそれぞれ弾性時 (0.5Mpa), 弾性限界時 (2.0Mpa), および軟化時 (1.0Mpa) における各領域のひずみに対応している。

まず, Case1, Case2 および Case3 においては要素 1 中に, 同様の岩盤節理状況の領域をその数および領域幅を変え配置している。どのケースにおいても局所化領域のひずみに差異はほとんど無く, 節理幅に解析結果は依存しない結果となった。また, 荷重ピーク後においては, 軟化指定局所化領域において急激にひずみが増大し, それにともないその他の領域では徐々にひずみが減少する結果となり, 一般的なひび割れ発生時におけるコンクリートの傾向と一致している。このことから局所化情報が必要となるが, 応力 LEVEL に応じ, 自動的に局所化領域の属性や幅を変更することが可能であると言える。

次に, Case4 においては, 要素 1 中に, 異なる岩盤節理状況が存在するケースである。同図に示すように, 1 要素内に異なる属性を導入した場合においても, 理論解とほぼ一致した。

Case5 においては, 全要素に局所領域を配置

し、数多くの節理が存在するケースを想定しており、領域 および領域 に関しては要素境界をまたぎ局所化領域を配置しているが、局所化領域数の増加および配置位置にともなう解析誤差はほとんど生じていない。

以上の結果から本解析モデルは 1 要素内に任意数の局所化領域を要素境界を意識する必要が無く、また応力 LEVEL 応じ、自動的に属性やその幅を変更することが可能であることから、節理状況に依存せず、時々刻々と変化する岩

盤付着性状を評価する要素モデルとして非常に適していると考えられる。

しかしながら、既に述べた様に岩盤節理の深さ、ピッチ、幅等の節理パラメータと局所化度合いを定量化する必要があり、今後の課題としたい。

以下に本研究で得られた結果を要約する。

4. 結論

本研究では境界面特性をコンクリートの要素内に初期不整として導入可能な要素モデルを提案し、パラメータスタディを実施することにより、その要素の妥当性を検証した。以下に本研究で得られた結果を要約する。

- 1) 本研究において構築した要素モデルを用いることにより、岩盤付着性状等の局所的に異なる性状を、1 要素内に任意数導入可能となった。
- 2) 本モデルは特性要素長を用いることにより、局所化領域の互いの影響を考慮することが可能である。

参考文献

- 1) 村上祐貴，遷移材齢時におけるコンクリートの局所的熱変形性状に及ぼす岩盤節理の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，第 25 巻，第 1 号，pp1043-1048，2003
- 2) Belytschko,T ,Fish,J, and E.Engelmann,B : A Finite Element With Embedded Localization Zone ,Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering Vo70, pp.59-89, 1988
- 3) 鷲津久一郎：コンピュータによる構造工学講座 -3-B(エネルギー原理入門)，培風館，1970
- 4) Belytschko,T , Bachrach,W : Efficient Implementation of Quadrilaterals With High Coarse-Mesh Accuracy , Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering , Vo54 , pp-279-301 ,

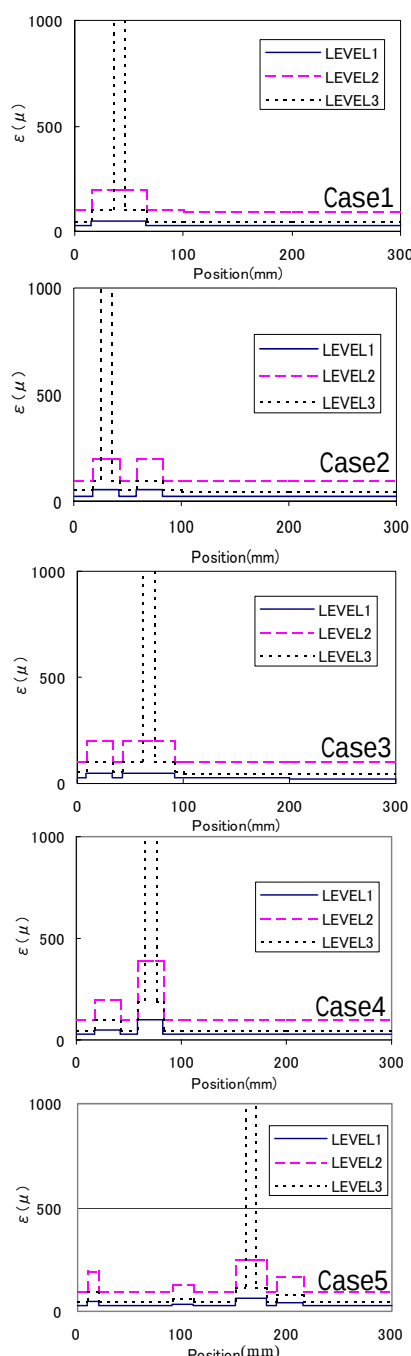


図 - 9 解析結果