論文　打継部欠陥がコンクリートの局所的熱変形性状におよぼす影響に関する研究

村上　祐貴*1・福井　亨平*2・内堀　学*1・大下　英吉*3

要旨：温度応力解析と実測値が定性的にも一致しない要因の一つとして，拘束体・被拘束体間の付着性状が局所的に異なることが挙げられる。著者ら [1]は以前，打継面に欠陥部を有する拘束体を用い温度応力実験を実施したところ，欠陥部直上に打設された被拘束体のひずみが局所化することが明らかとなった。しかしながら，そのメカニズムの解明までには至らなかった。そこで本研究では，雰囲気温度変動下において各種打継欠陥部を有する拘束体に打継ぎ打設された被拘束体の局所ひずみ分布を計測するとともに 2 次元温度応力解析を実施し，境界面の挙動について検討を行った。

キーワード：温度応力，節理，局所化

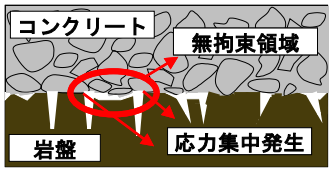
1. はじめに

現在，数値計算技術の向上に伴い，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はあるが，温度応力解析に関しては定性的にも定量的にも評価が可能であるとは言い難い。その要因としては，水和反応過程における線膨張係数や弾性係数，はく離現象，打継面における付着性状等が挙げられる。特に，付着性状に関しては未だ未解明の部分が多い。

一般にマスコンクリートの温度応力解析を行う場合，地盤あるいは旧コンクリートといった拘束体を含めた形でモデル化が行われる。これは，被拘束体である新コンクリートの変形性状や応力性状が拘束体の熱的特性および力学的特性の影響を受けるからである。したがって，境界面特性を導入する場合においては，その境界面構成則の適否が解析精度を左右するため，詳細な検討を行う必要があり，現在までに様々な境界面構成則モデルが提案されている。例えば，石川ら [2]は境界面特性の時間依存性に着目し，材齢依存を考慮に入れた塑性モデルを提案している。**図－１**に示すように実際の打継面境界面上には大小様々な節理やひび割れ等といった欠陥部が多数存在するため，付着性状は打継打設当初から，局所的に異なっていることは明らかである。しかしながら，現在までに提案されている境界面構成則モデルは，初期状態においては付着性状が一様であることが前提条件となっている。

著者らは [1]，打継面上に欠陥部を有する拘束体を用い温度応力実験を実施したところ，欠陥直上部に打設された被拘束コンクリートにおいてひずみが局所化し，拘束体欠陥部が被拘束体の変形性状および応力性状に大きな影響を及ぼすことを明らかにしたが，その定量的な評価までには至っていない。

そこで本研究では，雰囲気温度変動下において各種打継欠陥部を有する拘束体に打継ぎ打設された被拘束体の局所ひずみ分布を計測するとともに 2 次元 FEM 温度応力解析を実施し，実測値と解析値を比較することで，境界面の挙動について検討を行った。



図－１　境界面概念図

*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）

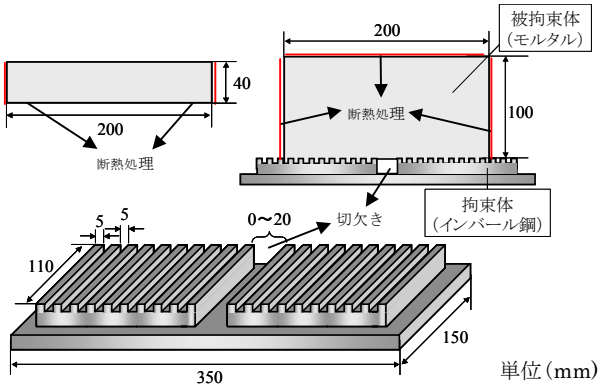
2. 実験概要

2.1 供試体

試験体は，**図－２**に示すように拘束体と被拘束体からなっており被拘束体であるモルタルの形状寸法は 100×200×40mm の壁構造部材である。拘束体にはコンクリートに比べ線膨張係数が非常に小さいインバール鋼を採用した。すなわち，拘束体・被拘束体間の温度が一様であっても外部拘束力が発生する事となる。

拘束体には幅 5mm の溝を 5mm ピッチで設け，拘束体と被拘束体の付着を向上させた。また，拘束体中心部には欠陥部を模擬した切欠きを導入し打継ぎ面上に局所的に無拘束な領域を設置した。

被拘束体には，供試体の寸法が小さいことからモルタルを使用し，インバール鋼に打設後，3 日間気中養生(20℃±0.5℃，60R.H.±1%)を施した。なお，切欠きにはモルタルが充填しないよう，切欠きを発泡スチロールで塞いだ状態で打設し，脱型時に発泡スチロールを切欠きから取り除いた。なお，インバール鋼の物性およびモルタルの配合を**表－１**および**表－２**に示す通りである。



図－２　試験体形状寸法

表－１　インバール鋼物性

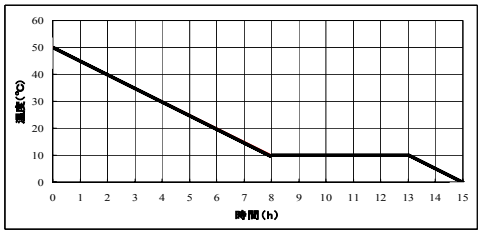
線膨張係数(μ/℃)	0.5
弾性係数(kN/mm^2)	130
熱伝導率(W/m･K)	13.5
比熱(J/kg･K)	460
比重	7.9
引張強度(N/mm^2)	470

表－２　モルタル配合

水セメント比 %	単位量 kg/m^3		
	水	セメント	細骨材
45	323	719	1165

2.2 実験方法

試験体を恒温・恒湿槽に静置し，雰囲気温度を 20℃から 50℃まで 5℃/hr の速度で昇温させた。その後，雰囲気温度を 50℃のまま 5 時間保持し被拘束体内部温度を一様に 50℃まで上昇させる。その時点を初期状態とし，**図－３**に示すように 50℃から 10℃まで-5℃/hr の速度で降温し，雰囲気温度を 10℃のまま 5 時間保持した。その後，さらに 0℃まで雰囲気温度を低下させた。被拘束体には内部拘束力を極力抑制するため，**図－２**に示す面に断熱処理を施し，また水分の逸散を防止するため，被拘束体全面をシールした。なお，炉内湿度は 60R.H±1%である。



図－３　雰囲気温度フロー

2.3 実験パラメータ

実験パラメータは**表－３**に示すように，欠陥部を模擬した切欠きの幅であり，切欠き幅が 0mm(試験体 N0)，切欠き幅が 10mm(試験体 N10)および 切欠き幅が 20mm(試験体 N20)の 3 パラメータである。切欠きは**図－２**に示すように拘束体中心部に軸直交方向に導入した。なお，試験体本数は各パラメータにつき一体である。

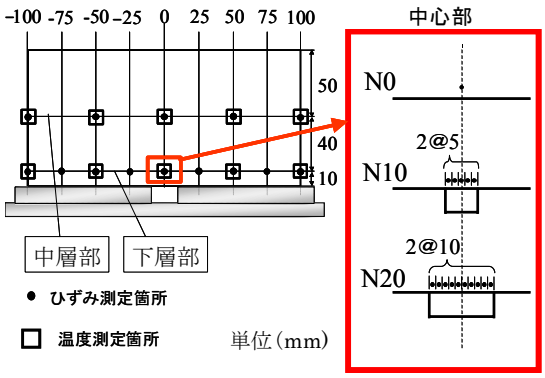
表－３　実験パラメータ

試験体	N0	N10	N20
切欠幅 (mm)	0	10	20

2.4 測定項目

測定項目は被拘束体の表面温度および軸方向表面ひずみであり，被拘束体底面から 10mm(下層部)および 50mm(中層部)の所定の位置に熱電対とひずみゲージを被拘束体表裏に貼付け測定した。**図－４**に測定箇所を示す。図中の□および●はそれぞれ表面温度測定箇所および軸方向ひずみ測定箇所を示している。表面温度は，中層部，下層部ともに両端部から 50mm 間隔で測定し，軸方向ひ

ずみは，中層部に関しては，全パラメータ両端部から 50mm 間隔で測定している。下層部に関しては，両端部より 75mm までは 25mm 間隔で測定し，下層中心部においては，試験体 N0 は 1 点，N10 は 2mm 間隔で 5 点，N20 に関しては 2mm 間隔で 10 点ひずみを計測し，切欠きを有する試験体に関しては切欠き直上部の軸方向ひずみを細かく計測した。なお，本実験に用いたゲージの標点間距離は，切欠き内部が 1mm であり，その他の計測箇所は 10mm である。1mm ゲージに関しては，その信頼性を確認するため，切欠き内部に 10mm ゲージを貼付け，同様の実験を行ったところ，1mm ゲージで計測したひずみの平均値と 10mm ゲージで計測したひずみ値がほぼ同程度で合ったことから，信頼性があると判断した。また，各実験パラメータにおいて，被拘束体と同じ形状寸法の試験体を作成し，壁厚中心断面の内部温度を測定した。軸方向における測定箇所は，表面温度測定箇所と同様である。また，被拘束体と同一の配合で 4×4×16cm のモルタル角柱供試体を 2 体作成し，自由収縮ひずみおよび表面温度を計測し，各試験体の線膨張係数を算定した。



図－４　計測位置図

3. 実験結果

3.1 被拘束体の熱的特性および力学的特性

表－４に各試験体の線膨張係数および測定開始時における圧縮強度および弾性係数を示す。

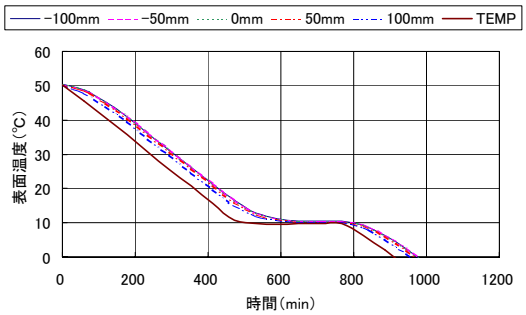
各試験体間の線膨張係数，圧縮強度，および弾性係数に差異はほとんど生じておらず，パラメータ間の熱的特性および力学的特性はほぼ同様であるといえる。

表－４　線膨張係数

試験体名	線膨張係数 μ/℃	圧縮強度 N/mm^2	弾性係数 kN/mm^2
N10	10.9	25.9	17658
N20	10.7	25.7	17700
N30	10.6	25.1	17432

3.2 温度履歴

図－５に試験体 N0 における下層部の表面温度履歴を示す。図中の測定名称の 0mm，±50mm および±100mm は**図－４**に示したように中心部を 0mm とし，そこから計測箇所までの距離を表している。**同図**より，各測定点における表面温度履歴にはほとんど差異が生じていないことが分かる。これは表面中層部および壁厚中心断面に関しても同様の結果であった。また，表面温度と内部温度の差異もほとんど生じていなかった。試験体 N10 および N20 に関しても試験体 N0 と同様の結果であり，本実験においては雰囲気温度変動下において被拘束体の温度は一様に変化するため，内部拘束力はほとんど生じておらず，外部拘束力のみが作用していると考えられる。

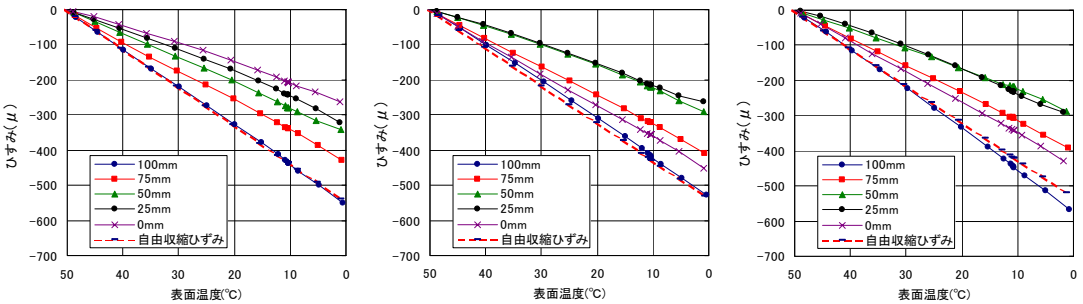


図－５　下層部温度履歴(試験体 N0)

3.3 被拘束体の熱変形挙動

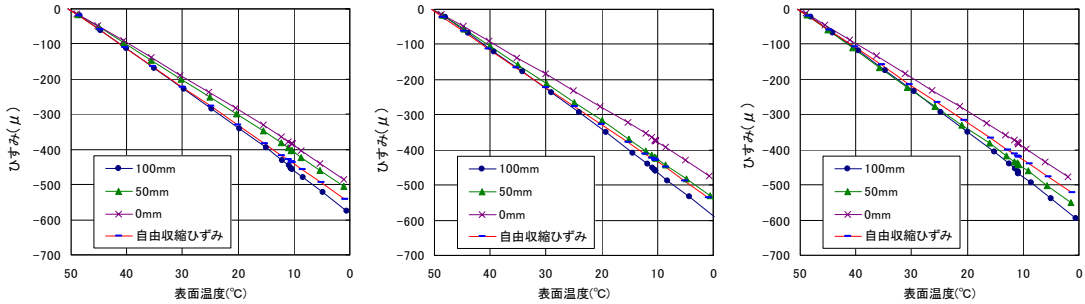
(1)全体的な熱変形挙動

図－６，７に各パラメータにおける被拘束体下層部および中層部における表面ひずみの履歴を示す。**各図**(a)～(c)は，それぞれ試験体 N0，N10 および N20 に対応しており，測定名称は中心部から測定箇所までの距離と対応しているが，測定値は被拘束体中心部を対象として同一距離にある測定値を平均したものである。また，試験体 N10 および N20 の切欠き断面内のひずみは，その領域に発生されたひずみの平均値とした。なお，図中の自由収縮ひずみとは，算定した各パラメータの線膨張



(a)　試験体 N0　　(b)　試験体 N10　　(c)　試験体 N20

図－６　ひずみ-温度履歴(下層部)



(a)　試験体 N0　　(b)　試験体 N10　　(c)　試験体 N20

図－７　ひずみ-温度履歴(中層部)

係数に表面平均温度を乗じたものである。

まず，下層部に関しては，試験体 N0 の収縮ひずみは，端部(100mm)から中心部(0mm)に向かうに従い，小さくなっており，中心部が最も外部拘束の影響を受けていることが確認できる。

次に，切欠きを有する試験体 N10 および N20 に関しては，試験体 N0 の傾向とは異なり，中心部の収縮ひずみが端部の次に大きくなっている。その収縮量は，表面温度 0℃において，試験体 N0 に比べ試験体 N10 が約 190μ，試験体 N20 が約 170μ 大きな値となっている。これは，切欠き直上の被拘束コンクリートは，拘束体との付着が無いために，局所的に拘束されておらず，他の領域に比べひずみが大きくなったものと考えられる。

一方，中心部から 25mm および 50mm の箇所においては切欠きを有する試験体 N10 および N20 の方が切欠きの無い試験体 N0 に比べ，収縮ひずみが小さくなっている。その値は表面温度が 0℃において，25mm では約 60μ，50mm の箇所では約 50μ 程度，収縮ひずみが小さくなっており，これは，3.3.2(2)項において詳述する。

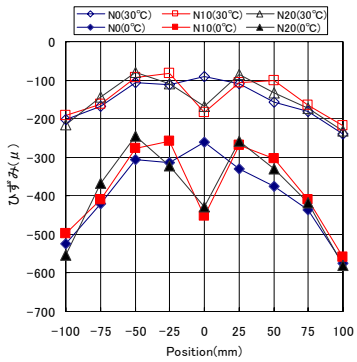
次に，中層部に関してであるが，全ての試験体において端部から中心部に向かうに従い，収縮ひずみは小さくなっているもののその差は下層部に比べ非常に小さく，外部拘束作用が小さいことを意味する。また，全試験体において，端部のひずみが自由収縮ひずみよりも小さくなっており，温度降下に伴う熱収縮とは他の変形性状も作用していることが想定される。

(2) 切欠き近傍の局所的な熱変形挙動

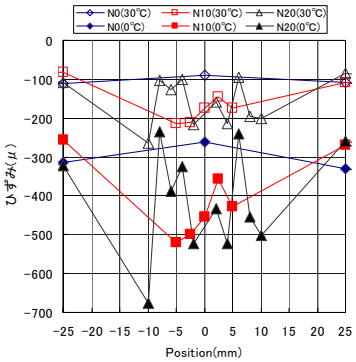
図－８，９に表面温度が 30℃および 0℃における被拘束体全体のひずみ分布および切欠き近傍のひずみ分布を示す。図中の○，□，△はそれぞれ表面温度 30℃時における試験体 N0，N10 および N20 に対するひずみ分布であり，●，■，▲は表面温度 0℃時におけるひずみ分布である。なお，**図－８**に示す試験体 N10 および N20 の中心部におけるひずみはそれぞれ，計測した 5 点および 10 点の平均ひずみである。

既に述べたが，切欠きを有する試験体 N10 および N20 の中心部の平均ひずみは，局所的に拘束が無いため，収縮ひずみ量は試験体 N0 に比べ著しく大きくなっている。また，中心断面から 25mm，および 50mm の箇所の収縮ひずみが試験体 N0 よりも小さくなっている。

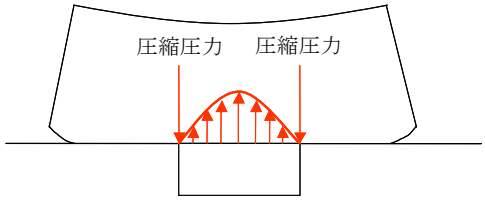
これは，切欠き内部の鉛直方向の熱変形が全体的な熱変形挙動と異なるためであると思われる。**図－10** に示すように温度降下時において切欠き



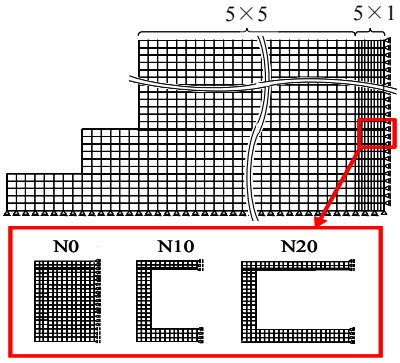
図－８　全体ひずみ分布



図－９　切欠き近傍ひずみ



図－10　鉛直方向の変形挙動



図－11　要素分割図

内部の領域においては，被拘束体との付着が無いために，切欠き端部を支点とし上に凸なる熱変形が生じる。一方，温度降下時において被拘束体は下に凸なる変形を呈している。そのため，切欠き端部近傍においては強い圧縮圧力が作用しており，それに伴い，水平方向の拘束力も大きくなり，上記性状を示したものと考えられる。

次に**図―９**に示した切欠き内部の局所ひずみ分布は，試験体 N10 に関しては切欠き内部における全ての測定箇所の収縮ひずみが試験体 N0 の中心部におけるひずみより大きくなっている。

一方，試験体 N20 に関しては切欠き端部において非常に大きな収縮ひずみを生じているが，中心部に向かうに従い，急激に収縮ひずみが小さくなり，さらに中心部に向かうと，再び収縮ひずみが大きくなっている。

試験体 N20 においては，切欠き幅が大きいことから，切欠き端部近傍に作用する圧縮圧力も大きくなり，**図－9** に示すように，切欠き端部近傍においてひずみが急激に変動したものと想定される。

4. 境界面特性に対する解析的検討

4.1 解析概要

3.3.2(2)項において，切欠き端部近傍においては，切欠き内部の局所的な熱変形挙動の影響により，強い鉛直方向の圧縮力が作用し，それに伴い他の領域に比べ，水平方向の拘束力も大きくなっていると論じた。また，供試体端部においても，はく離現象により，はく離の支点においては，局所的に鉛直剛性および水平剛性が大きいと考えられる。[2)]

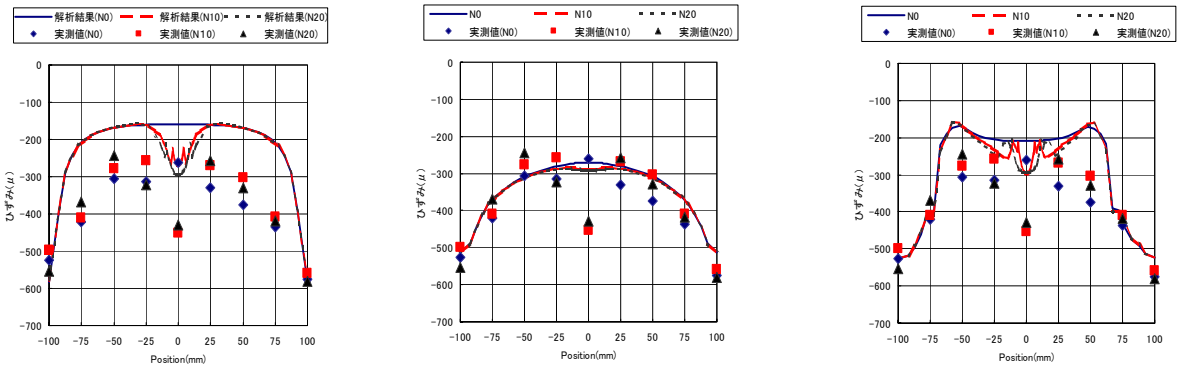
そこで，2 次元 FEM 温度応力解析を行い，上記メカニズムについて検討した。

4.2 解析条件および解析パラメータ

解析モデルを**図－11** に示す。要素は，5mm×5mm の四角形要素であり，切欠き中心部から 15mm の位置までは 1mm×5mm で分割した。また，解析モデルは対称性を考慮し 1/2 モデルとした。解析パラメータは境界面特性であり，被拘束体と拘束体が完全に拘束された場合の Case1，Joint 要素の剛性を境界面で一様にした場合の Case2，前述した現象が生じていると仮定し，局所的に剛性の大きい Joint 要素を導入した Case3 の 3 パラメータについて温度応力解析を行った。Case2 においては高辻ら[2)]の解析を参考にし，Joint 要素の鉛直剛性 kv を 1.0N/mm²/mm，水平剛性 kh を 15.0N/mm²/mm とした。また，Case3 においては，**3.3.2(2)項**において述べた観点に立脚し，被拘束体端部から 30mm～40mm の領域および切欠き端部から 3mm ～ 5mm の領域に kv=kh=100000.0N/mm²/mm，と非常に剛性の大きい Joint 要素を配置し，その他の領域においては，Case2 と同様の Joint 要素を導入した。

4.3 解析結果および考察

図－12(a)～(c)に Case1，Case2 および Case3



(a)　CASE1　完全剛性　　(b) CASE2　付着性状一様　　(c) CASE3　局所的に異なる付着性状

図－12　解析結果（表面温度 0℃）

の解析結果および実測値を示す。同図(a)～(c)はそれぞれ，Case1～3 の境界面特性の時における試験体 N0，N10 および N20 に対する表面温度が 0℃における解析結果と実測値の比較図である。

まず，Case1(完全剛性)の場合における試験体 N10 および試験体 N20 に対する解析結果は，切欠き中心部において試験体 N0 のひずみに比べ収縮ひずみが大きくなった。しかしながら，端部を除く他の領域においては実測値に比べ解析値はかなり小さな収縮ひずみ量となった。

Case2 においては，解析結果は試験体 N0 に関しては実測値と良好な一致を示しているものの，試験体 N10 および N20 に関しては中心部のひずみが試験体 N0 とほとんど差異は生じておらず，切欠き直上部の局所的な熱変形性状を捉えられていない。

次に局所的に大きい剛性の Joint 要素を導入した Case3 においては，試験体 N10 とは異なり，実測値とは差異があるものの中心部において収縮ひずみが大きくなっている。また試験体 N0 に比べ，他の領域における解析値と実測値の差異が小さくなった。

Case1，Case3 においては，切欠き導入試験体において，切欠き直上部のひずみが局所的に大きくなる性状を定性的には評価可能であった。すなわち，切欠き近傍において変形を拘束する領域の存在が切欠き内部のひずみを局所的に大きくさせる要因の一つであると考えられる。しかしながら，本解析における切欠き中心部の収縮ひずみの解析値と実測値にはかなり大きな差異が生じている。これは，簡単のため弾性解析により評価を行ったためであり，クリープ等の時間依存挙動を考慮することにより，定量的な評価可能な境界面構成則モデルを構築することが今後の課題である。

4. 結論

本研究では，雰囲気温度変動下において各種打継欠陥部を有する拘束体に打継ぎ打設された被拘束体の局所ひずみ分布を計測するとともに 2 次元 FEM 温度応力解析を実施し，境界面における欠陥部が被拘束体の変形性状に及ぼす影響について検討した。

以下に本研究で得られた知見を要約する

1) 温度降下時において，切欠き直上領域の鉛直方向への変形により，切欠き端部近傍において，局所的に大きな圧力を受ける領域が存在する。
2) 温度降下時，切欠き端部近傍に作用する大きな圧縮圧力により切欠き内部の一軸方向ひずみは局所化すると考えられる。

参考文献

1) 内堀学・村上祐貴・大下英吉：打継部の表面形状が若材齢コンクリートの初期変形性状に及ぼす影響評価，コンクリート工学年次論文集，第 25 巻，第 1 号，pp723～728，2004
2) 高辻康・石川雅美・田辺忠顕：マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関する研究，コンクリート工学年次論文集，第 12 巻，1 号，PP925～PP930，1990