

論文

[1030] 大型試験体によるマスコンクリートの温度応力実験

- 正会員 石川 雅美 (東急建設(株) 技術研究所)
- 正会員 前田 強司 (東急建設(株) 技術研究所)
- 正会員 西岡 哲 (東急建設(株) 技術研究所)
- 正会員 田辺 忠顕 (名古屋大学工学部土木工学科)

1. はじめに

マスコンクリートの温度応力問題において、外部拘束の作用は、コンクリート内に発生する温度応力を規定する上で最も支配的な要因のひとつである。温度応力に対する外部拘束の影響の度合いは、主に2つのパラメータ：①打継面（あるいはコンクリートの拘束面）での付着性状、②打設されたコンクリートのL/H（長さ/高さ）によって評価できると考えられる。著者らは、まず、打継面の付着性状に着目して、この付着性状の違いが、温度応力に対してどのように影響するかを明らかにする目的で、実構造物大の大型マスコンクリート試験体を用いて、温度応力実験を行った。実験に用いたマスコンクリート試験体は、図1に示すように、拘束体（高さ1.0m、幅0.95m、長さ、15.0m）と被拘束体（高さ1.0m、幅0.3m、長さ、15.0m）とから成り、この両者の間の打継面の付着性状別に3体の実験を行った。実験は、拘束体の上面に壁状の被拘束体を打継ぎ、この拘束体を打設した直後から材令28日までの試験体全体の温度、応力、ひずみ、そして変位を詳細に計測した。この実験の最も特徴的なところは、以下の3点である。

- ①試験体全体の拘束に関する境界を明確にしておくため、拘束体下面と、その下の土間コンクリートとの間に特殊なすべり機構（まさつ係数 $\mu=0.1$ ）を設けた。
- ②応力、ひずみ、変位をそれぞれ独立に、そして同一の箇所で測定した。特に変位については、1/2000 mm の分解能を持つ高感度型変位計を多数使用して、温度上昇から降下に至るまでの試験体全体の変形を測定した。
- ③実験はプレハブの室内で行い、外気温などの環境条件の変動を小さく抑さえ、計測されたデータの信頼性を高めた。

本報は、このような特徴を持った実験の結果について報告したものである。その結果、打継面がどのような付着性状であっても、拘束体と被拘束体の間に相対変形が生じること、また被拘束体の熱変形により端部がそり上がることなどの現象をはじめて実験的に確認した。

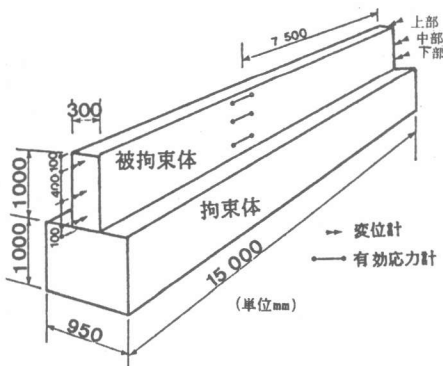


図1 マスコンクリート試験体

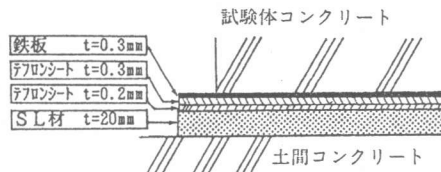


図2 拘束体底部のすべり機構

表1 コンクリートの配合

呼び強度 kg/cm ²	スランプ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位量kg/m ²				混和剤 Poz. No.70
					C	W	S	G	
240	9	58.9	49.7	4 ± 1	280	165	913	948	2.80

C ; 普通ポルトランドセメント

2. 実験の概要

これまで行われた多くの大型試験体による温度応力実験では、その拘束体コンクリートは直接地盤に打設されているため、地盤からの外部拘束を多少なりとも受けると考えられる。しかし、実験により、外部拘束の作用を評価しようとするのであれば、試験体全体の拘束に関する境界条件を十分明確にする必要がある。そこで本実験では、図2に示すような特殊なすべり機構（土間コンクリート上にセルフレベリング材（SL材）を打設し、その上にテフロンシート2枚と鉄板を敷いたもの）を設け、拘束体の水平方向の変形をできるだけ許容するようにした。このすべり機構の上に、拘束体として、高さ 1.0m、幅 0.95m、長さ 15.0m、の鉄筋コンクリートブロックを作成し、その上に打継面の性状を変えた3種類の被拘束体（高さ 1.0m、幅 0.3m、長さ 15.0m）を打設した。以下打継面の性状の異なる各モデルを、M1, M2, M3 と呼ぶ。各モデルの特徴は以下の通りである。

- ① M1：拘束体上面をサンドブラスト処理した後、入念に被拘束体（無筋）を打継いだ。通常のコンクリート構造物の打継ぎ状態を想定したモデルである。
- ② M2：拘束体と被拘束体の間にSL材、テフロンシートなどを用いた図2と同じすべり機構を設けた。従って、被拘束体（無筋）は、拘束体から外部拘束をほとんど受けないと考えられる。実験終了後被拘束体をジャッキで押し、このすべり機構の摩擦係数調べたところおよそ0.1であった。
- ③ M3：打継面及び被拘束体内に通常の壁式構造物と同程度の配筋を施し、被拘束体に対する拘束体からの外部拘束の作用を大きくしたもので、打継面の付着が最も大きいモデルと位置づける。図3にこのモデルの配筋を示す。

なお、拘束体は各モデルで共通である。

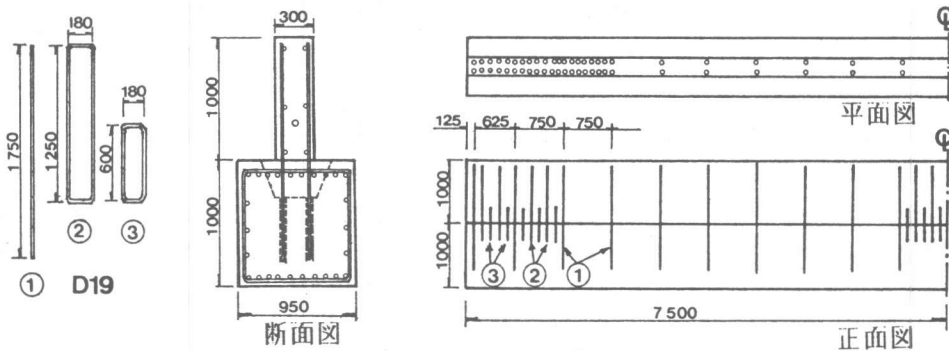


図3 試験体配筋図 (M3)

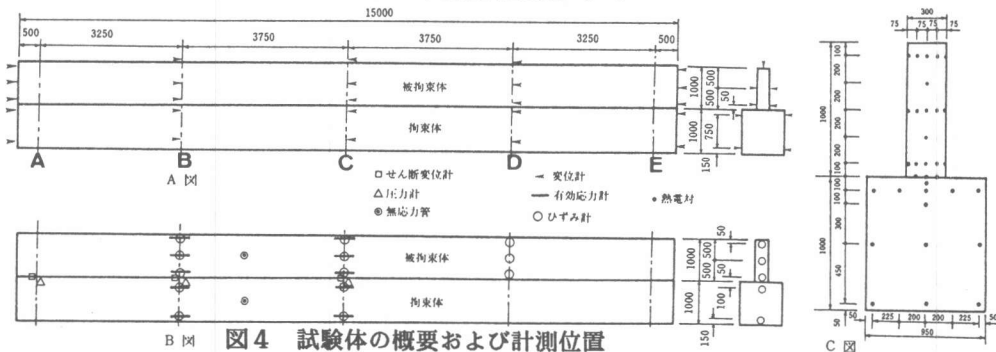


図4 試験体の概要および計測位置

このマスコンクリート温度応力実験は、被拘束体を打設した直後から材令28日までに試験体全体が示した温度応力挙動を観察したものである。実験は、プレハブ室内で行ったため環境の大きな変動はない。試験体の温度上昇量を大きくするため、拘束体側面に5cm、被拘束体側面に10cmの断熱材（発泡スチロール）を貼付けた。試験体に用いたコンクリートの配合を表1に示す。このコンクリートの弾性係数を次式で近似した。

$$E_c(t) = t * 10000 / (0.03371 + 0.03853 * t)$$

ここで、 $E_c(t)$ は材令 t 日の弾性係数、 t は材令（日）

拘束体は、1985年7月2日に作製した。拘束体作製時にもその温度応力挙動を観察しており、詳細については著者らの報告[1]を参考にされたい。被拘束体 M1 は85年8月21日に、M2 は 86年11月18日に、M3 は87年9月2日に、それぞれ打設した。試験体の計測断面は、図4に示すようにA～Eまでの5断面とした。計測項目を表2にまとめて示す。計測間隔は、材令3日までが30分、それ以降28日までを2時間とした。

表2 計測項目及び計測点数

計測項目	計器	M1	M2	M3
温度	CC熱電対	45(41)	34(42)	34(42)
応力	有効応力計	8(4)	8(4)	8(4)
ひずみ	埋設型歪計	9(4)	9(4)	9(4)
熱膨張係数	無 応力計	1(1)	1(1)	1(1)
相 対 変 位	切 断 変 位 計	3	0	3
鉄 筋 応 力	歪 ゲージ	0	0	27
変 位	変 位 計	42(24)	34(36)	34(36)
圧 力	力 圧 力 計	3	0(11)	0

* 数字は被拘束体の計測点数
() 内は拘束体の計測点数

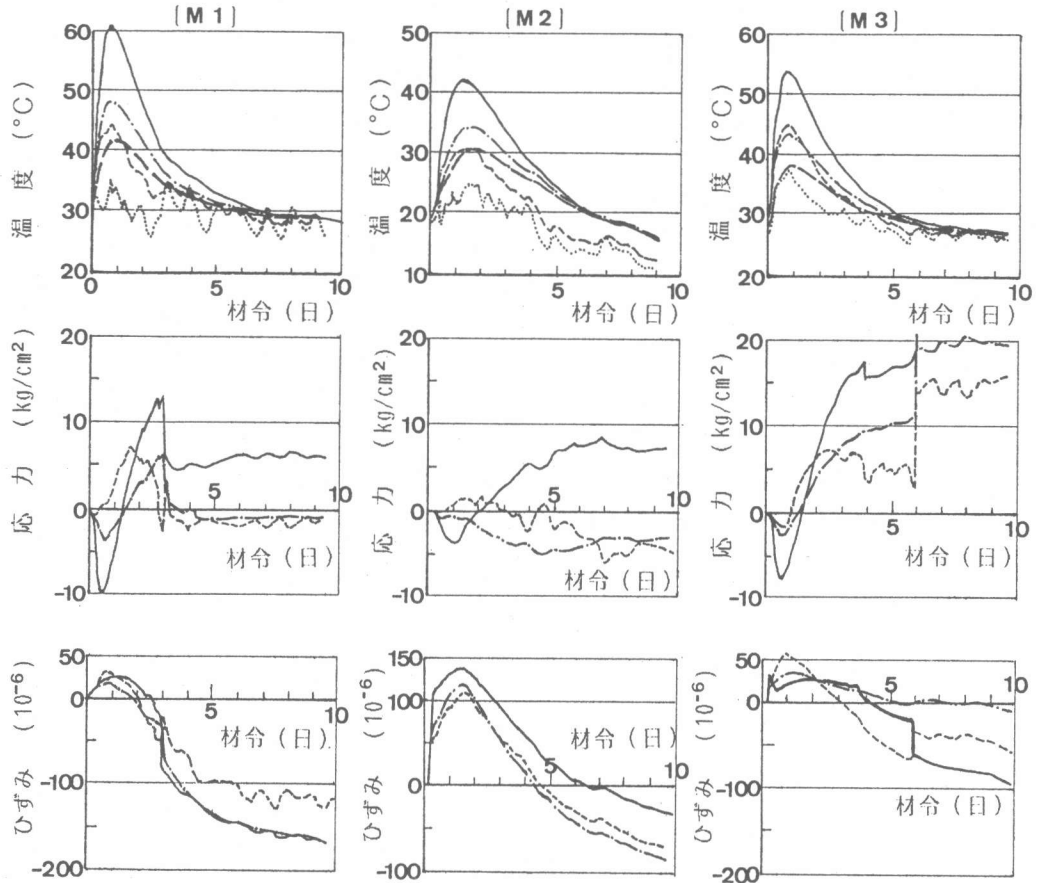


図5 各モデルの温度、応力およびひずみの計測結果

3. 計測結果

試験体長手方向の中心断面（C断面）で測定された3つのモデルの温度と応力、そしてひずみの計測結果を図5に示す。

①温度について：A～Eの各断面に熱電対を埋設し温度を3次元的に測定した。各モデルにおけるコンクリートの打込み温度、最高上昇温度などを表3にまとめて示す。観察された打込み温度と、最高上昇温度は、M1が33.6°Cと26.8°C、M2が17.6°Cと24.3°C、M3が31.5°Cと22.1°Cであり、この実験からでは打込み温度と最高上昇温度との明瞭な関係は認められなかった。しかし、温度がピークに達する材令は打込み温度に左右されるようであり、打込み温度が17.6°Cと最も低いM2は30.7時間後に最高温度に達したのに対し、打込み温度が30°Cを超えたM1とM2では打設後それぞれ16.5時間と19.9時間で最高温度となっている。

②応力について：著者らは 応力の発生パターンを、外部拘束が卓越する場合のA型と、打継面の鉛直方向の付着が僅かで水平方向の拘束が比較的少ない場合のB型とに分類した[2]。M3は、クラック発生以前は典型的なA型と言える。M2はその拘束条件から明らかなように典型的なB型で、内部拘束が卓越する場合の応力パターンとなっている。M1はM2とM3の間となっているがほぼA型と判断される。M1には材令3日で断面を貫通するクラックが発生したが、クラック発生時の応力は13.2kg/cm²であり、その時点での引張強度（推定20.6kg/cm²）と比較して、低い値であった。クラックは、試験体長手方向中心からA側に12cmのところでも発生した。クラックが発生した時点で、B断面に埋設した有効応力計の値もC断面と同様に急激な応力低下を示した。M2ではクラックの発生は認められず、M3では材令6日にやはり断面を貫通するクラックが発生した。クラック発生時の応力は17.5kg/cm²である。このとき、応力の値が急激に引張へ移行しているのは有効応力計の位置にクラックがはいったためである。

③ひずみについて：M1とM3の伸びひずみは25～50x10⁻⁶程度とM2に比べてかなり小さい。M3では鉄筋の拘束作用が働いているはずであるが、M1と同程度あるいは多少大きめの伸びひずみを示している。M2は、初期に大きな伸びひずみを示し、材令5日程度で収縮側へ移行している。応力と同様にひずみのパターンを分類すると、M1とM3はA型、M2は典型的なB型のようなものである。

4. 変形に関する考察

図6に示すような試験体全体の熱変形を1/2000mmという高い精度で計測した温度応力実験は本実験がはじめてである。表4は計測された各モデルの変位の代表点をまとめたものである。この表で、M1とM3については拘束体上部の変位であるが、M2については、水平方向は中部の値、鉛直方向は上部の値である。M2のA側の鉛直変位計にトラブルがありこ

表3 温度計測結果のまとめ

	M1	M2	M3
打込み 温度 (°C)	33.8	17.6	31.5
最高 温度 (°C)	60.4	41.9	53.6
同上 材令 (hr)	19.9	30.7	16.5
温度 上昇量 (°C)	26.6	24.3	22.1
定常 温度 (°C)	25.0	11.5	24.4
クラック発生までの 温度降下量 (°C)	20.8		24.2

表4 各モデルの最大変位のまとめ

		M1		M2		M3	
		変位(mm)	材令(日)	変位(mm)	材令(日)	変位(mm)	材令(日)
水平変位	A側膨張	0.794	1.23	0.626	1.51	0.800	0.92
	E側膨張	0.599	0.70	-0.733	1.33	0.577	1.05
	A側収縮	-1.037	15.00	-0.763	15.00	-1.060	14.00
	E側収縮	-1.324	15.00	-0.866	15.00	-0.577	14.00
打設位置に戻る材令	A	2.28		A	3.35	A	2.75
	E	2.03		E	3.25	E	2.50
鉛直変位	A側膨張	-0.150				-0.208	1.00
	E側膨張	-0.088		0.695	1.83	-0.085	1.22
	A側収縮	0.713				1.228	14.00
	E側収縮	1.063		0.306	15.00	1.108	14.00
打設位置に戻る材令	A	1.32		A		A	2.00
	E	1.19		E		E	1.73

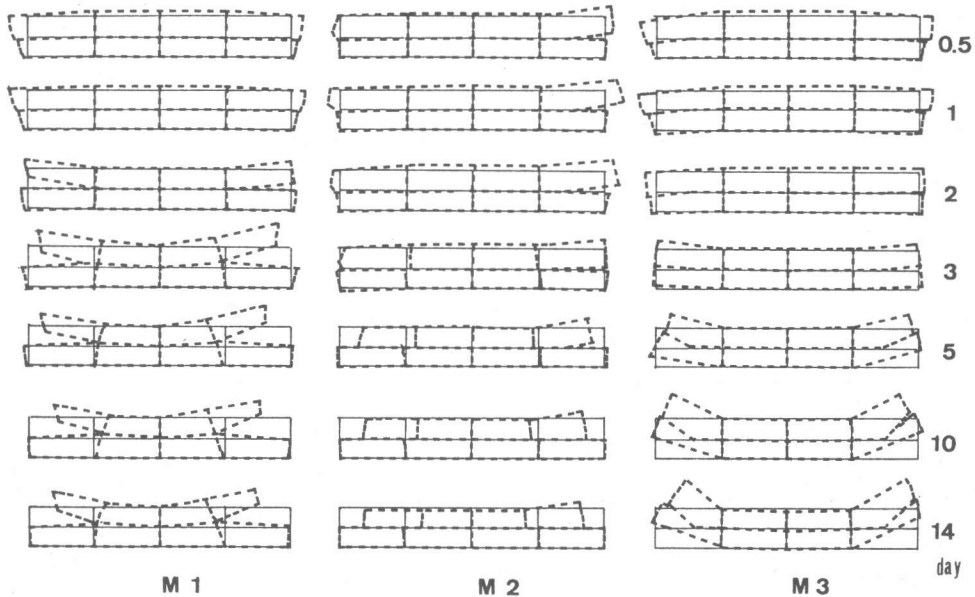


図6 実測した各モデルの熱変形

の位置の鉛直変位は正確に測定されていないが、E側とほぼ同様な変位をしてると推測される。水平変位は膨張をプラス、収縮をマイナスとした。鉛直変位は、打設当初の位置より上方をプラス、下方をマイナスとした。A側とE側とで最大変位の生じている材令が異なっているが、各モデルの両端の水平膨張変位の合計を求めると M1 は 1.393mm、M2 は 1.377mm、M3 は 1.398mm である。この値を表3で示したそれぞれの最高温度上昇量で割ると 1°C あたりの膨張変位は M1 が 0.0524mm/°C、M2 が 0.0566mm/°C、M3 が 0.0633mm/°C となる。また、最大膨張変位から定常温度に降下するまでの収縮量と温度 1°C あたりの収縮量はそれぞれ、M1 は 3.754mm、0.106mm/°C、M2 は 3.0141mm、0.099mm/°C、M3 は 2.998mm、0.102mm/°C である。この結果は、単に最大変位と最高温度から求めたものであるが、この実験から、熱変形によって生ずる水平方向の最大変位は打継面での付着性状とはあまり関係がないようである。

しかし、試験体全体の変形のパターンは、打継面での付着性状に大きく左右される。最も拘束の少ないモデル M2 では、温度上昇過程では端部がそり上がり、降下過程においてはこの傾向が弱められるか、もしくは上昇時とは逆の傾向となるようである。これと同様な拘束状態にある拘束体コンクリートブロックを作製した時[1]にも、このような変形パターンが観察された。また、M2 は他の2つモデルと異なり、上部ではなく被拘束体の高さの1/2の位置で水平変位が最も大きく現われている。外部拘束の作用が小さい M2 ではほぼ自由変形となっており、温度の最も高い中部が最大変位を示したと思われる。一方、M1 および M3 は、温度上昇時には試験体長手方向の中央付近が盛り上がり端部が下方へ変位する、いわゆる上に凸のかたちとなる。温度が降下するのにしたがって、今度は逆に端部がそり上がる。M1 では、被拘束体の端部だけが上方へそり上がり打継部に剝離が生じている。鉄筋を挿入した M3 では、被拘束体の変形が鉄筋により拘束体に伝達され、拘束体もそり上がっている。変形図から判断すると、M3 の場合にも、打継部に剝離が生じているようであるが、目視では確認できなかった。

5. 打継部の挙動

図7は、M1 の打継部の相対変位である。この図から判断すると、被拘束体は拘束体に対して、

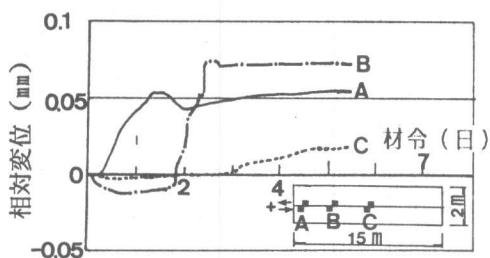


図7 M1 の打継部の相対変位

A断面では外側にB断面では内側に変位している。C断面ではほとんど変位していない。この現象は一見不可解なようであるが、図8の圧力計の値を見ると説明がつく。圧力計の値は材令1日まではAとCが圧縮に、Bが引張になっており、AとCを支点にしてBが上方へ変位している。すなわち、A付近は支点となりながらも

外側へ変位し、Bは逆に上に持ち上げられることによって中心側へ変位しようとしているようである。なお、これらの計器はクラックや剝離の発生によってそれ以降の計測値が発散している。

図9は、M3の打継部の相対変形を示したものであるが、この場合にもやはりM1と同様な傾向が見受けられる。M1とM3とでは、相対変形量がかなり異なっており、その原因については現在検討を行っているが、他の計測データも合わせて考えると、両者の示した傾向については信頼し得るものと判断される。

6. まとめ

実構造物大の大型試験体を用いてマスコンクリートの温度応力実験を行った結果、これまで明らかにされていなかった、打継面での剝離や相対変位といった現象を実験的に確認した。実験を行った3つのモデルの変形パターンから、マスコンクリートの変形パターンは大きく分けて2つに分類されると考えられた。すなわち、①外部拘束が小さく内部拘束が卓越する場合には温度上昇時においては端部がそり上がった、下に凸のかたちになり、温度降下時にはこの傾向は弱められるようである。②外部拘束が大きく卓越する場合には、温度上昇時には上に凸、降下時には逆に下に凸のかたちになる。この2つの変形パターンは著者らが分類したA型とB型の応力パターン[2]とまさしく対応するものである。そして外部拘束作用の大きさの度合いにより、応力と同様にこれら2つの変形パターンの中間的なものも存在するようである。また、変形の計測結果では被拘束体は全体的に上に凸になったり下に凸になったりしているが、打継面の挙動を観察するとこのような変形と同時に局所的にも複雑な動きをしているようである。本報では、打継面の性状の違いをパラメータとした温度応力実験について、その実験結果を報告した。この実験に関する解析的な検討は著者らの文献[3]で行っているののでそちらを参考にされたい。なお、次報では被拘束体のL/Hをパラメータにした実験について報告する予定である。

参考文献

- [1] 田辺・西岡・前田・石川：マスコンクリートの熱変形挙動の実測と解析、第8回コンクリート工学年次講演会論文集 1986, 6
- [2] 田辺・原口・石川：マスコンクリートの温度応力問題における岩盤あるいは旧コンクリートの外部拘束効果、マスコンクリート温度応力発生メカニズムに関するコロキウム
- [3] 今枝・石川・西岡・田辺：温度応力によるマスコンクリートの力学的挙動、第10回コンクリート工学年次講演会論文集 1988, 6

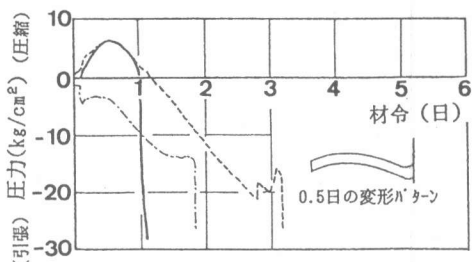


図8 M1 の打継面の圧力

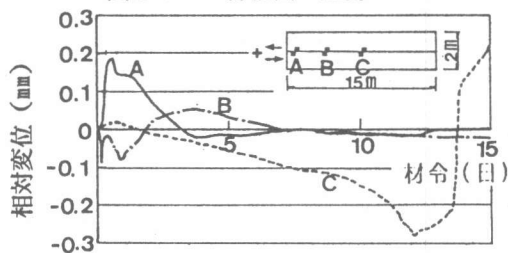


図9 M3 の打継部の相対変位