

マスコンクリートの熱変形および熱応力に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THERMAL STRESS AND THERMAL DEFORMATION OF MASSIVE CONCRETE

石川雅美*・前田強司**・西岡哲***・田辺忠顕****

By Masami ISHIKAWA, Tsuyoshi MAEDA, Tetsu NISHIOKA and Tada-aki TANABE

The effect of external restraint is one of the most important factors in discussing the mechanism of the thermal stress in massive concrete. From the results of recent theoretical investigations, relative displacement in both horizontal and vertical direction is suggested to be occurring at a joint of restrained concrete and restraining body such as rock or soil or even old concrete cast sometime ago before the casting of new concrete. These phenomena, however, have not confirmed by experimentally. In this paper, it was shown that the results of the thermal stress experiment with large scale massive concrete specimens were made having two parts, the base and wall on it. Each specimen has the different rigidity at its joint. The thermal deformation of these specimens was observed with high sensitive displacement meter, and the above mentioned phenomena were confirmed. The relationship between thermal deformation and rigidity of a joint was discussed based on the results of this experiment.

Keywords: mass concrete, thermal stress, compensation line method

1. はじめに

マスコンクリートの温度応力発生に支配的影響を及ぼす外部拘束の実体は、有限要素法(FEM)による温度応力解析を通じてかなり明らかにされてきた。すなわち、温度変化に伴うコンクリートの体積変化を拘束するという比較的漠然とした従来の考え方から、打継面での相対変位による水平方向拘束の低減や、曲げ変形とそれに対する鉛直方向の拘束などという、より具体的な外部拘束のメカニズムが解析的な面から考えられるようになった¹⁾。しかしながら、打継面の相対変位や曲げ変形といった現象は、解析的には示唆されていても実現象としてまだ実測されているわけではない。これまで行われた研究は、実構造物において実測した応力、ひずみなどをもとにした実験的研究、あるいは、各種解析法を用いた解析的研究のどちらかであり、応力あるいはひずみに重点を置いたものがほとんどであった。したがって、マスコン

クリート硬化時の熱変形を直接実測した例に関しては、ほとんど報告されていないのが現状である。

そこで著者らはコンクリート硬化時の熱変形に着目した実験を行い、マスコンクリートの熱変形を直接計測することにした。この実験の目的とするところは、1) 解析的に示唆されている曲げ変形や、打継面での相対変位を実験的に確認し、2) 観察されるコンクリートの変形パターンと外部拘束作用の大きさとがどのような関係となるのかを明らかにすること、3) また、コンクリート内部の応力およびひずみ分布のパターンと変形とはどのような関係があるかなど、実際の変位現象を確認し、そのうえで、ひずみ分布、応力分布を明らかにすることにある。温度応力実験におけるひずみは、周知のように温度ひずみ成分、応力ひずみ成分、クリープひずみ成分の和であり、いずれの成分の量を単独で計測しても、その他の量が不確定であれば、その量も不確定となる。そこで本実験では、ひずみの各成分量が不明確にならないように、変位だけでなく、温度、応力、ひずみを測定し、それらのデータを互いに照合することによって、マスコンクリート硬化時の性状に対して多角的に観察した。

著者らはこの実験に関し、その第1報として、実験の概略および観察されたデータについて簡単な報告を行った⁵⁾。本報では、同実験の内容について、詳しく述べる

* 正会員 工修 東急建設(株)技術研究所土木構造研究室(〒213 川崎市宮前区宮崎2-13-2)

** 正会員 東急建設(株)技術研究所土木構造研究室(同上)

*** 正会員 東急建設(株)技術研究所土木構造研究室長(同上)

**** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科(〒464 名古屋市千種区不老町)

と同時に、コンパンセーションライン法（C.L 法）を用いて、観察された変形についての理論づけ等を行い、上記 3 点の実験目的に対し検討を加えたものである。

2. マスコンクリート温度応力実験

マスコンクリートの温度応力に及ぼす外部拘束の影響の度合いは、主に 3 つのパラメーター、1) 拘束体の剛性、2) 打継面（あるいは拘束面）での付着性状、3) 打設されたコンクリートの L/H （長さ/高さ）、など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、この性状の違いが温度応力挙動にどのように影響するかを調べた。実験に用いた試験体は、図-1 に示すように拘束体（高さ 1.0 m、幅 0.95 m、長さ 15.0 m）と壁状の被拘束体（高さ 1.0 m、幅 0.3 m、長さ 15.0 m）とから成る実構造物の大規模マスコンクリート試験体である。

これまで行われた大型試験体を用いた温度応力実験では、拘束体となるコンクリート部分が直接地盤に打設されていたため、被拘束体が拘束体から受ける外部拘束の影響と、その他地盤などからの影響との区別が不明確であった。外部拘束の作用を実験的に明らかにしようとするのであれば、試験体全体の外部拘束に関する境界条件を十分に明確にしておく必要がある。そこで、本実験では拘束体底面に特殊なすべり機構を設け、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。このすべり機構は、図-2 に示すように床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 枚と厚さ 0.3 mm の鉄板を敷いたものである。本実験には、試験体全体の拘束条件を明確にしたことのほかに、以下のような特徴がある。

- 1) 応力、ひずみ、変位をそれぞれ独立に、そして同一箇所で測定した。特に変位については、1/2 000 mm の分解能をもつ高感度型の変位計を 70 台使用して、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。

- 2) 実験はプレハブの室内で行い、外気温などの環境

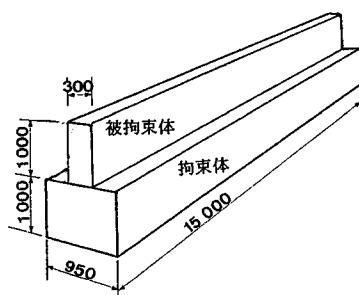


図-1 大型マスコンクリート試験体

条件の変動を小さく押さえ、計測データの信頼性を高めた。

実験は、図-3 に示すように、拘束体と被拘束体の間の打継面の性状の異なる 3 体について実施した。以下、打継面の性状の異なる各モデルを M1, M2, M3 とよぶ。各モデルの特徴は次のとおりである。

- 1) M1：拘束体上面をサイドブラスト処理した後、入念に被拘束体（無筋）を打継いだ。通常の無筋コンクリート構造物での打継ぎを最も入念に行った場合を想定したモデルである。この場合に、打継面に相対変位が生じるか否かを観察するため、せん断変位計と、受感部にアンカーを設け、引張側も測定可能のように、独自に開発したひずみ変換型圧力計を打継面内の 3 か所に設置した。

- 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。したがって、被拘束体（無筋）は、自重作用の他は拘束体から外部拘束など、ほとんど受けないと考えられる。被拘束体が比較的自由な変形をしたときの打継面の圧力分布を測定するため、打継面内の 11 か所に小型の圧力センサー（圧縮域のみ測定可能）を設置した。実験終了後試験体をジャッキで押し、このすべり機構の静止摩擦係数を調べたところおよそ 0.1 であった。

- 3) M3：打継面およ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。打継面内の 3 か所に M1 と同じせん断変位計を設置した。M3 では、配筋が施してあるため、サンドブラスト処理は行わなかったが、打継ぎにあたっては、打継面にセメントベーストを塗布した。

このほか、拘束体を作製したときにも、その応力、および変形を計測しており、後の議論では、拘束体のみの場合として M0 とよぶことにする。

拘束体と、3 つの被拘束体に使用したコンクリートは、表-1 に示すように、単位セメント量 280 kg/m³、水セメント比 58.9 %、呼び強度 240 kg/m³ の通常の土木構造物に用いられる一般的な配合である。実験を行ったプレハブ室内において水中養生した円柱供試体の圧縮強度、および弾性係数の、最小二乗法による近似式を図-

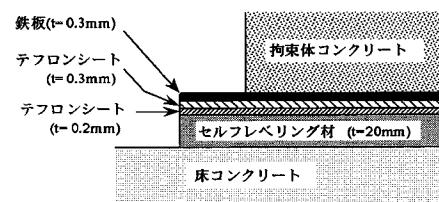


図-2 拘束体底面の特殊なすべり機構

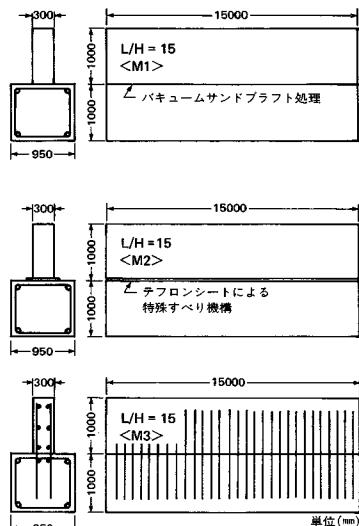
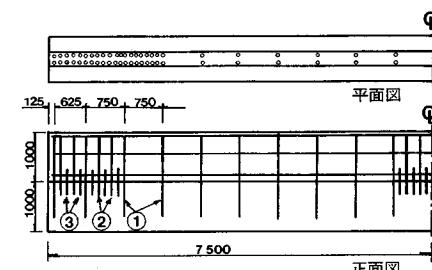
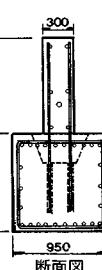
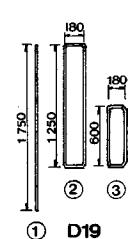


図-3 各試験体の打継面の特徴

4, 5 に示す。

拘束体部分のコンクリートは、1985年7月2日に打設した。この拘束体上に時期をずらして、M1, M2, M3 の3つの被拘束体を作製した。被拘束体 M1 は'85年8月21日に作製し、実験を開始した。M1 の実験終了後、被拘束体部だけを取り壊し、拘束体上面に図-2



正面図

側面図

図-6 M3 の配筋図

と同じすべり機構を作製し、その上に被拘束体 M2 を、'86年11月18日に作製した。M2 の試験終了後、被拘束体と拘束体の上半分を撤去し、拘束体に鉄筋をたて込み、配筋を施した。図-6 にこのモデルの配筋を示す。'87年8月7日に拘束体を修復した後、'87年9月2日に被拘束体 M3 のコンクリートを打設した。

これら3つの試験体において、拘束体の上面に被拘束体を打設した直後から、材令28日程度までの試験体の温度、応力、ひずみ、そして変位を計測した。各試験体の計測項目を表-2にまとめて示す。図-7は、M1 と M3 および、M2 の応力計、ひずみ計、せん断変位計などの設置位置を示したものである。ただし、圧力計は、M1だけにセットされている。計測断面は、図-7に示すように、A~E の5つである。

M2 と M3 では、M1 と比べ、変位計の不動ばりのたて込み位置の関係で設置位置が多少異なる。M1 では、不動ばりは床コンクリート中に定着しているが、M2, M3 では、床コンクリートの下1mまで掘り下げ、ここにコンクリートブロックとともに定着させた。そして、床コンクリートと、このコンクリートブロックとの境界には、発泡スチロールを入れて互いの干渉をなくし、不動点としての信頼性を高めた。また、不動ばりの温度を測定しておき、室温の変化による不動ばりの温度変形量を算出した。不動ばりの温度変形は、水平方向の変位に対しては、無視し得るほど小さいため補正は行わなかつたが、鉛直方向では、コンクリートの鉛直変位の最大値の2割程度であったので、これを補正した。

M1, M2 と M3 の変位の測定位置を図-8に示す。これらの図で、被拘束体最上部の変位計と、A および E 断面以外の変位計は鉛直と水平を一組として、表側と裏側にそれぞれ一組ずつセットしてある。計測間隔は、30分から2時間である。また、本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、拘束体の側面に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。被拘束体上面は、乾燥を防ぐため、被拘束体上面の温度

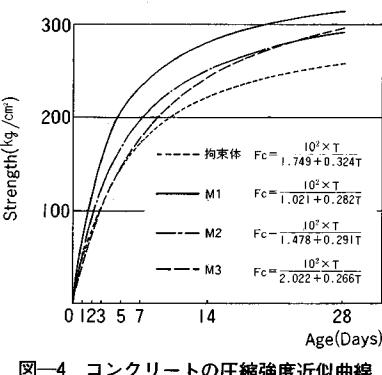


図-4 コンクリートの圧縮強度近似曲線

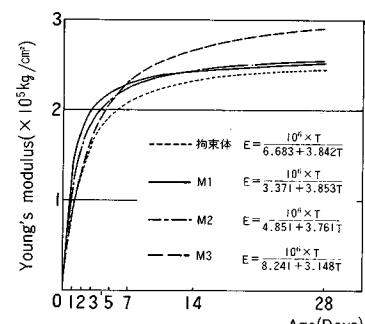


図-5 コンクリートの弾性係数近似曲線

と同じ温度で湛水養生とした。

3. 実測されたマスコンクリートの熱変形性状

図-9は、M0(拘束体のみ), M1, M2, M3の試験体の温度上昇過程から降下に至るまでの試験体全体の変形を70台の高感度型の変位計(分解能1/2000mm)を用いて測定した変形図である。この図からまず明らかなことは、解析的にのみ指摘されていた曲げ変形が、拘束体のみの試験体(M0)も含めて、いずれの試験体についても実測され、その存在が初めて確認されたことである。また、いずれの試験体においても打継面に水平方向のすべりが生じていることが明らかとなった。

最初に最も単純な拘束体の変形について述べると、温度がピークに達する材令1日において、全体として下に凸な曲げと水平方向の伸びを生じ、端部の鉛直上昇変位は、A側の平均とE側の平均で、それぞれ、0.265mm, 0.186mm、同様に水平変位は、A側で1.010mm, E側で0.700mmとなるのが認められた。その後、材令の経過とともに、収縮に転じ、材令10日の時点では反転して、上に凸の曲げ変形と、水平方向は初期状態を超えて収縮となり、それぞれ、A側-0.130mm, E側-0.089mmの鉛直変位、A側-0.535mm, E側-0.684mm

の水平変位を生じる結果となった。ここで、水平方向の変位については、打設終了直後の位置より膨張側をプラス、収縮側をマイナスとした。また、鉛直方向については、打設終了直後の位置より上側をプラス、下側をマイナスとした。

拘束体との接着面にテフロンシートのあるM2では、被拘束体の左右の変形が非対称になっている。これは、A側の鉛直方向の変位計にトラブルがあり、この位置の変位を正確に測定できなかったためである。拘束体(M0)は、M2と同様な拘束条件をもち、後で述べるが、温度分布から決まる自由変形の形状も同様である。M2のE側は、拘束体と同様の変形形状となっている。したがって、M2のA側もE側と同様な変形をしているものと推測されるが、M2についての以下の議論は、E側の変形について行うものとする。E側のピーク温度時の水平変位は0.537mm、上方への鉛直変位は0.359mmであり、材令10日の水平変位は-0.900mmであった。M0の材令10日の鉛直変位は、初期の位置より下側であったが、M2は、初期の位置より上側の+0.154mmであった。M1, M3の試験体では、M0, M2とは逆に温度上昇時に端部が下方に変位しながら膨張し、上に凸の形になった。温度降下時には、端部は逆に上にそり上がりながら収縮する、いわゆる下に凸の形になる挙動が観察された。これら試験体の詳細な変位量については表-3を参照されたい。

さて次に、実測変形の理論的な説明づけ、あるいは妥

表-1 コンクリートの配合

呼び 強度 kg/cm ²	スラ ンブ (cm)	W/C (%)	S/I (%)	空気量 (%)	単位質量kg/m ³					混和 No.70
					C	W	S	G		
240	9	58.9	49.7	4±1	280	165	91.3	94.8	2.80	

C:普通ポルトランドセメント

表-2 計測項目

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	B.C(4)	6(4)	6(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	ヒン断変位計	3	0	3
筋筋応力	歪ゲージ	0	0	27
変位	変位計	42(24)	34(36)	34(36)
圧力	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

表-3 変位置のまとめ

打設温度(℃)	拘束体		M1		M2		M3	
	A側	E側	A側	E側	A側	E側	A側	E側
26.0	33.8	33.8	17.6	31.5				
温度上昇率(1/day)	1.0day		0.63day		1.22day		0.71day	
ピーク温度(℃)	54.3		60.4		41.9		53.6	
変位量(mm)								
A側	1.099	0.821	0.384	0.331	0.685	0.528	0.398	
水平(下)	0.588	0.567	0.611	0.716	0.736	0.525		
水平(中)	0.921	0.579	0.797	0.602	0.400	0.434	0.769	0.545
水平(上)	0.326	0.105	-0.314	-0.063	0.137	-0.399	-0.055	
鉛直(下)	-0.080	0.017			0.341	-0.203	0.088	
鉛直(中)	0.203	0.266	0.020	0.071	0.634	-0.201	-0.050	
鉛直(上)	0.265	0.186	-0.107	0.012	0.359	-0.242	-0.074	
水平(下)	-0.614	-0.665	-0.995	-1.173	-0.973	-0.983	-0.574	0.339
水平(中)			-0.937	-1.272	-0.741	-0.851	-0.774	-0.455
水平(上)	-0.456	-0.702	-0.817	-1.188	-1.006	-0.966	-1.053	-0.616
水平平均	-0.535	-0.684	-0.925	-1.235	-0.840	-0.900	-0.790	-0.464
鉛直(下)	-0.076	0.045	0.677	1.017		0.031	0.924	1.173
鉛直(中)			0.572	0.978		0.107	1.089	1.369
鉛直(上)	-0.184	-0.223	0.515	0.721		0.419	1.143	1.119
鉛直平均	-0.130	-0.089	0.582	0.934		0.154	1.067	1.280

図-7 有効応力計、ひずみ計などの埋設位置

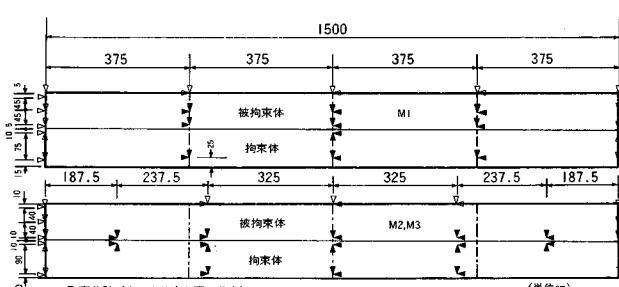
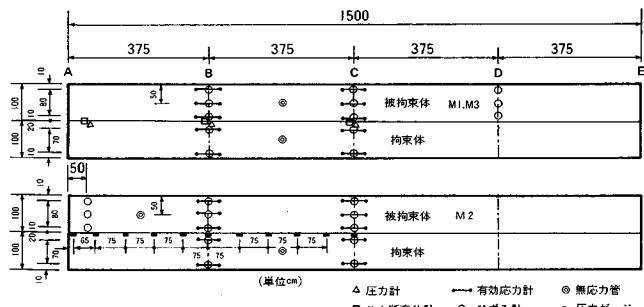


図-8 変位の測定位置

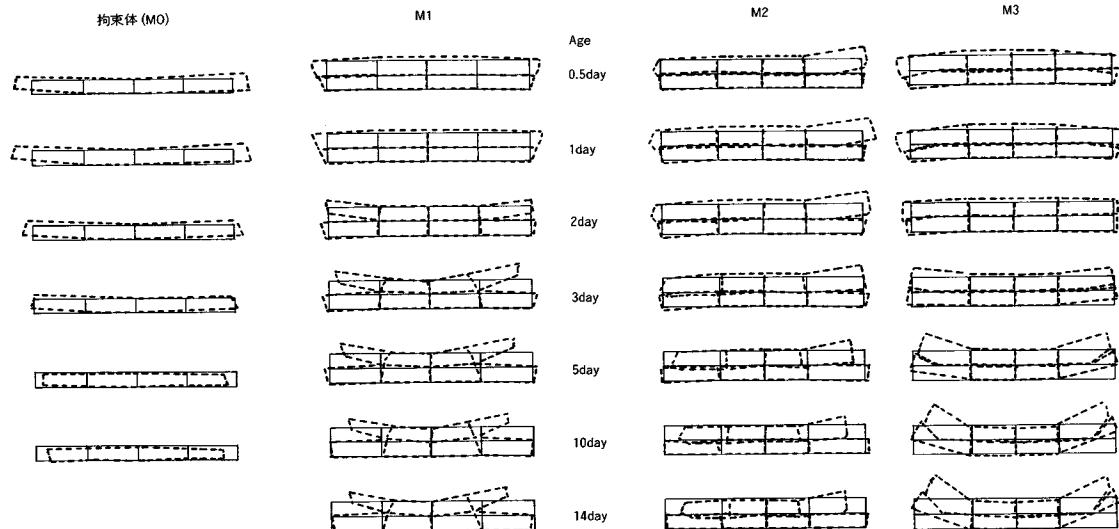


図-9 各試験体の変形図

当性の検討が必要となる。詳細な数値モデルにより、クラック面、あるいは剥離面における応力伝達、時間依存性の若材令コンクリートの物性の変化などにより行う検討は別報に譲り、ここでは大局的に理解を可能にするC.L法、あるいはC.P法的観点から以下の考察を行ってみた。図-10①～③は、被拘束体の中央断面で計測された温度を示したものであるが、この温度に対して、C.L法を用いて自由な熱変形の曲率 ϕ と軸方向平均ひずみ成分 ϵ を時系列として求めると、図-11、12のようになる。これらの図で、右側の縦軸の数字はそれぞれ、曲率に対応する試験体端部の鉛直変位量と、平均自由膨張ひずみに対応する水平変位量である。すなわち、これらは試験体が、無重力状態で自由な熱変形を受けるとき、端部が記録する鉛直変位と水平変位を表わしていると考えられる。M2についてこれをみると、材令4日ないし5日頃までは、直線的に負の曲率（下に凸）が増大し、材令2日ぐらいでは $\phi = -4 \times 10^{-7}/\text{cm}$ （端部の浮き上

がり変位量 1.125 mm）となっている。実際には、図-9に示したように下に凸ではあるが、端部の浮き上がり量は 0.26 mm 程度と、自由熱変形の 1/4 程度となっている。これは、当然のことながら、自重による拘束効果のためであろう。材令 5 日以降は、自由変形の曲率は、徐々に減少し、材令 2 週程度では、 $(-1) \times 10^{-7}/\text{m}$ にまで減少するようであるが、実測では、平均の浮き上がり量はほぼゼロとなっている。平均自由膨張ひずみから計算される水平方向の変位量は、材令 1.5 日で最大 2 mm、材令 2 週で -0.9 mm となっているが実測ではそれぞれ、0.5 mm と -0.9 mm であった。すなわち、実測の平均水平変位量は、ひずみから計算される値に対して膨張域で 1/4 程度、引張域ではほぼ同様な値であった。これらの差は自重作用、あるいは水平方向のテフロンシートの摩擦による外部拘束の影響と考えられる。

さて、M0、M2 と全く逆の変形となった M1 および M3 の変形も基本的には、M0、M2 と同様の自由変形

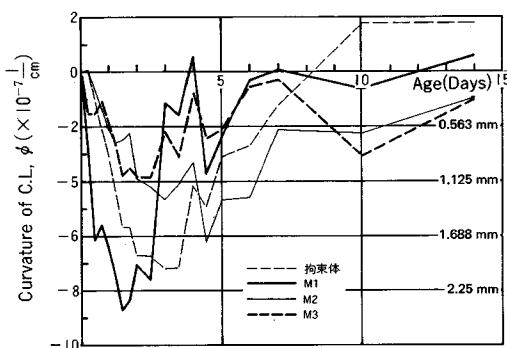
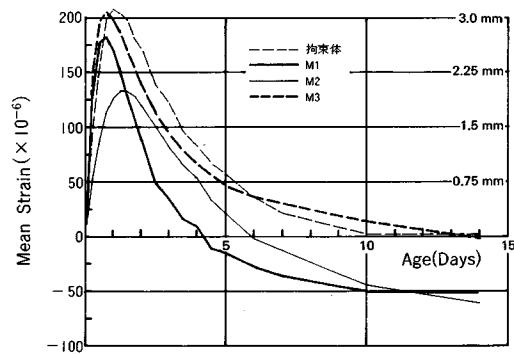
図-11 曲率 ϕ の傾きの履歴

図-12 軸方向ひずみ履歴

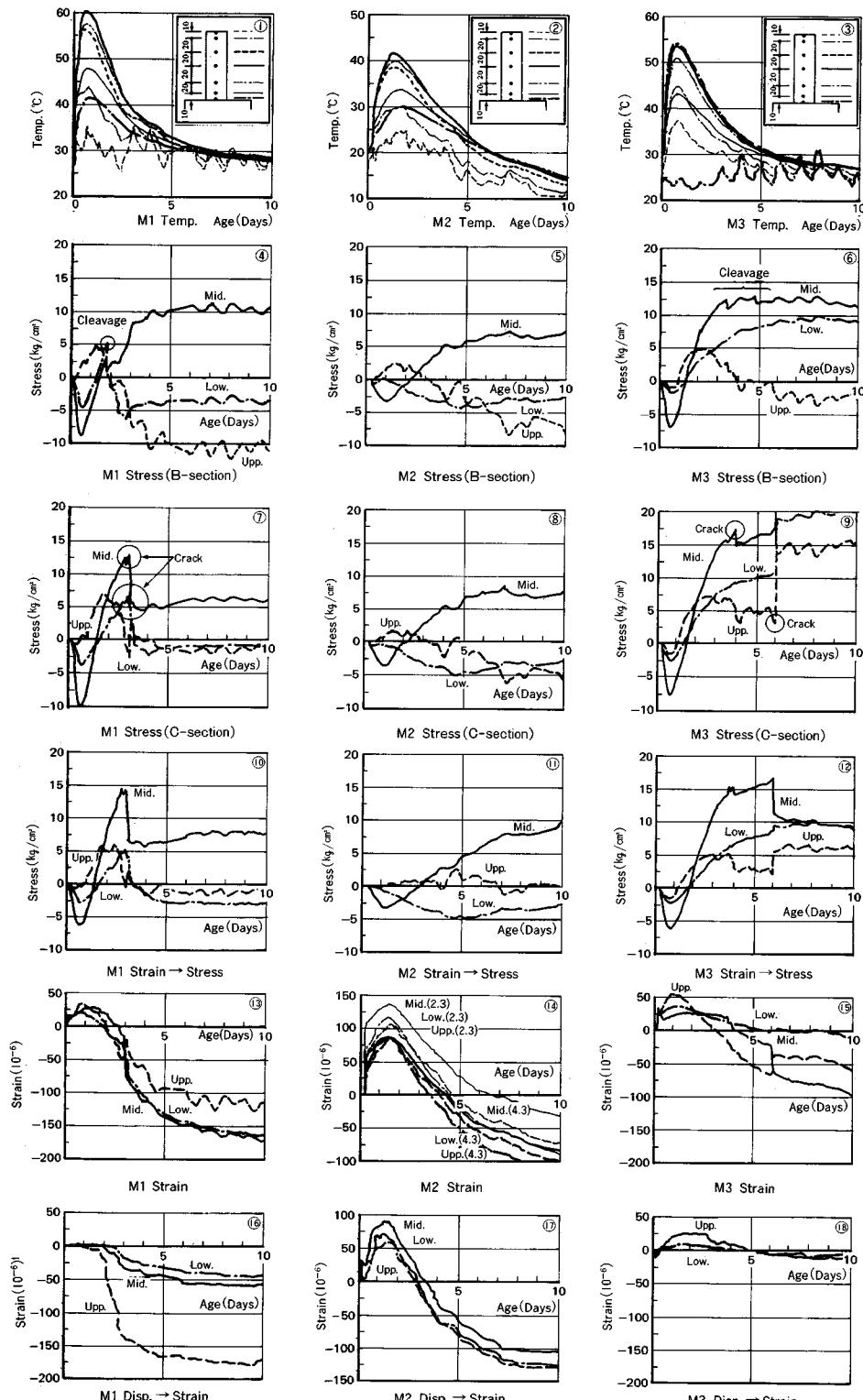


図-10 各試験体の温度、応力、およびひずみ履歴

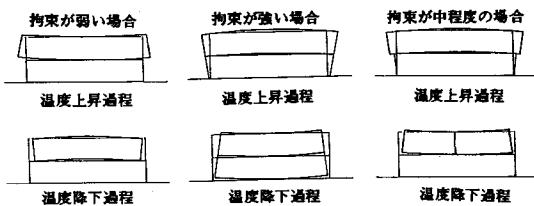


図-13 各試験体の変形形状のモデル化

を起こそうとする上部コンクリートを拘束体が拘束する程度に応じて、変形レスポンスをすると考えることにより、説明することが可能と思われた。すなわち、図-11の ϕ の傾きから、M1は材令2日から、M3は材令2.5日から、それまでの下に凸の傾向を強める状態から反転し、上に凸の状態に向かう。材令2週で、M1はわずかに上に凸となるが、M3は上に凸の状態まで至らない。CL法による以上の自由変形の推定に対し、実測の結果によれば、温度上昇時に上に凸の形となり、温度降下時には、逆に端部がそり上がる下に凸の形になった。M1では、材令1.5日、M3では、材令3日に上に凸から下に凸の状態になる。したがって、M1とM3の変形は、自由変形とは明らかに全く逆の変形パターンになったのである。

これまでの実験結果の考察から、被拘束体の変形のパターンは、大きく2つに分類できるようである。すなわち、1) 自由な変形形状とは全く逆の変形形状を示す、打継面にある程度以上の拘束がある場合のM1, M3型と、2) 自由変形形状がほぼ保存される、打継面にほとんど拘束がない場合のM2型である。これら3つの被拘束体の変形挙動は、温度上昇時と温度降下時でそれぞれ図-13のようにモデル化できるようである。一般に、コンクリートが外部拘束を全く受けずに自由な熱変形をする場合には、その温度分布によって図-14のような2通りの変形形状となると考えられる。すなわち、温度の高い部分が、断面の形状と剛性から計算される重心よりも、下側にあるか上側にあるかによって、変形が上に凸になるか、下に凸になるかが決定される。もちろん、そのどちらでもない中立な場合もあるが、実際のマスコンクリートにおいては、まれであろう。

実測結果から推測すると、このような自由な変形は、拘束面の拘束の度合いによって全く異なった見掛けの変形形状に容易に変化し得るようである。このような現象

は、解析的にもシミュレートされている。著者らは、FEMを用いて本試験体のパラメトリックスタディを行った³⁾が、その場合でも、拘束面の拘束係数の微妙な違いだけで、異なる変形形状が得られた。以上要するに、コンクリートが見掛け上どのような変形形状となるかは、温度分布から決定される自由変形の形状とそれに作用する外部拘束によって決定されることが実験的にも明らかになったのである。

4. マスコンクリートにおけるひずみ分布

(1) ひずみ計の改良

前述した変形性状は直ちにひずみ分布に反映されるのであるが、生じているひずみ分布は、応力の算定にあたって、特に重要な要因であり、応力計が開発される以前は、このひずみ値が計測し得る唯一の量でもあった。著者らは、拘束体作製時において、観察されたひずみ値と有効応力計との比較から、ひずみ値の精度に疑問を抱いた⁴⁾。すなわち、埋設型コンクリートひずみ計のコンクリート内での定着性が不十分な場合もあり得ると考えた。そこで、図-15に示すように、これまで用いていたひずみ計のフランジ部にねじ型の金具を取り付け、その定着性を高めるような改良を加えた。その結果、十分とはいえないまでも以前に比べれば良好と思われる計測結果を得ることができた。そこで、ひずみ計の改良についてまず述べることにする。

図-16は、本実験で用いたマスコンクリート大型試験体とは別の、高さ1.0m、幅0.3m、長さ5.0mのコンクリートブロック硬化時に、その中央断面に埋設した2種類のひずみ計の応力換算値と有効応力計の値を比較したものである。改良型のひずみ計は標準型に比べ、圧縮域においても引張域においても有効応力計と良好な対応を示した。ここでは示さないが、同ブロックにセットした、変位計から求めたひずみとの比較においても、改良型は良好な対応を示した。なお、ひずみから応力への変換には、次式を用いた。

ここで、 $\sigma(t)$ は材令 t における応力、 $\epsilon(t)$ は材令 t における応力成分ひずみの増分、 $E(t)$ は材令 t の弾性係数、そして、 ϕ はクリープなどを考慮した弾性係数に対する低減係数である。図-17 は、同じコンクリートブロックの上層部、中層部、下層部の 3 か所に埋設し

温度の高い部分が上にある場合

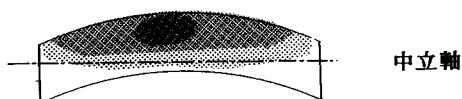
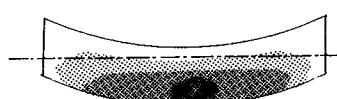


図-14 マスコンクリートの自由な熱変形形状

温度の高い部分が下にある場合



た2種類のひずみ計からコンクリート断面内のひずみ分布を求めたものである。標準型のひずみ計では、ひずみが直線分布しているといいがたいが、改良型のものは、ひずみの直線性がほぼ成立しているといえるであろう。著者らは、これらのデータをもとに、温度応力実験を行っていく過程で、標準型のひずみ計から改良型のものへ切り替えていった。M1は、拘束体、被拘束体ともにすべて標準型、M2は、拘束体が標準型で、被拘束体が改良型、M3は、拘束体の下側が標準型でそれ以外は改良型である。

(2) マスコンクリートにおけるひずみ分布

図-10⑬～⑯に各被拘束体の埋設したひずみ計から得られた変形成分ひずみを示す。ひずみ計の初期値は、M1とM3では、コンクリート打設終了後2.0時間、M2については、2.3時間(図-10⑰中のカッコ内に2.3と記してある曲線)とした。M1とM3では、最大膨張ひずみの値は、M2に比べ小さくなっている。これは、拘束効果が大きいので、当然の結果といえる。変位計から求めたひずみ(図-10⑯、⑰、⑱)では、M1、M3のスパン中央のひずみは、ほとんどゼロの値を示し、材令の増加とともに収縮ひずみが増加している。一方M2では、初期に急激に膨張ひずみが一見生じているよううに見える。図-10⑰は、M2の被拘束体両端部の変形量を試験体長で割ってひずみを求めたものであるが、これによれば、初期の急激な膨張ではなく、その最大膨張ひずみ量も 80×10^{-6} 程度と小さい。そこで、初期値を、打設終了後4.3時間として整理すると(図-10⑰中のカッコ内に4.3と記してある曲線)変位から求めたひずみ

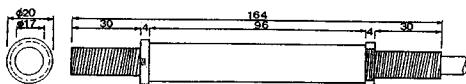


図-15 改良型ひずみ計

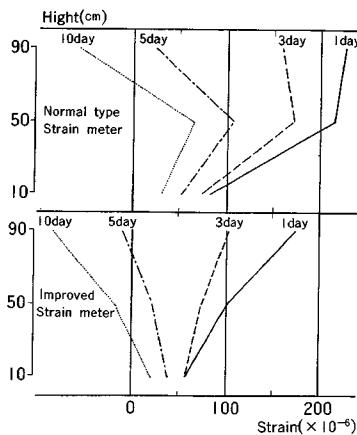


図-17 断面内のひずみ分布の比較

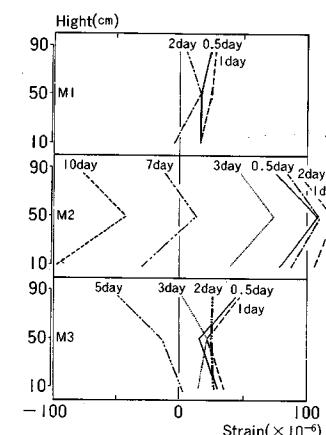


図-18 M1, M2, M3のひずみ分布

みと終始一致する傾向が得られた。変位計から、求めたひずみはかなり安定しているのに対して、ひずみ計の値は多少変動している。ひずみ計のとらえるひずみは、局所的であり、かつコンクリートとひずみ計の剛性の比なども関係してくるため、変動幅が大きいようである。いずれにしても、初期材令では、従来ひずみ計で測定されていた値は、実際よりも大きめの値を与えていたということが、この変位による測定値からもいえそうに思われる。

図-10⑩～⑫は、ひずみ計から応力を算出したものであるが、各被拘束体の有効応力計の計測結果と非常によく対応している。また、図-18は、被拘束体の断面内のひずみ分布を示したものである。クラック発生以降は、ここには示していない。M1、M3では、ひずみの直線性がほぼ成り立っているといえるような良好な結果であったが、M2では、中層部のひずみが大きく卓越している。ひずみの直線性については、材令1日を基底にとって整理すると、これらの試験体では、ほぼ成立しているといえよう。材令1日以前については、さらに検討が必要と思われる。

5. クラック、剝離、および応力分布について

M1、M2、M3のC断面およびB断面における応力測定値の経時変化を、図-10④～⑨に示した。

図-10④によればM1試験体では、材令1.5日のとき、B断面上層部と中層部の応力に急激な低下がみら

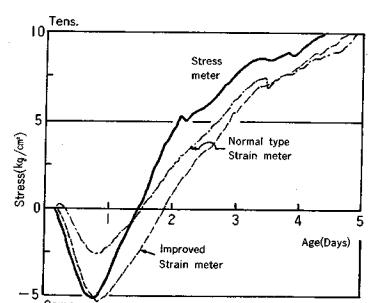


図-16 ひずみ計と有効応力計の比較

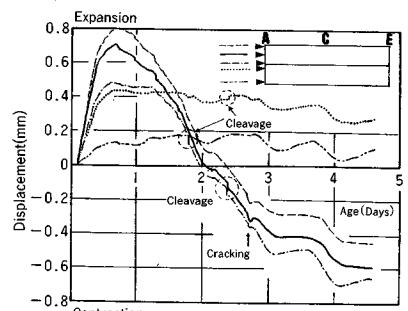


図-19 M1A側の変位履歴

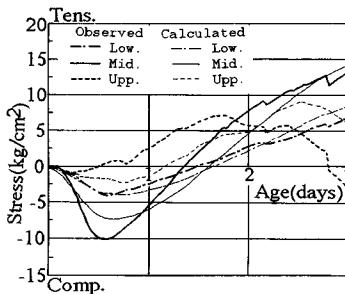


図-20 M1 の解析と実測応力の比較

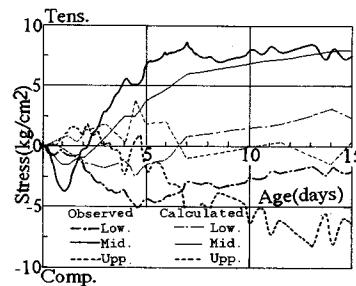


図-21 M2 の解析と実測応力の比較

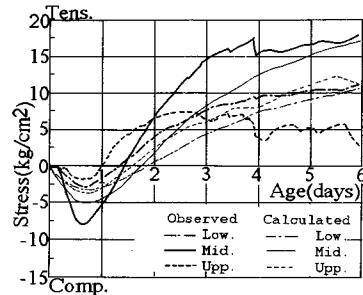


図-22 M3 の解析と実測応力の比較

れた。これは、打継面の剥離による影響である。材令 2.5 日にも B 断面の応力に変動が起こっており、剥離がさらに進行したものと思われる。この現象は、A 側で測定した水平方向の変位の経時変化にも現われている。図-19 にその部分を示す。材令 2.5 日では、剥離によって、被拘束体下層部は縮み、拘束体上層部は伸びている。従来のマスコンクリートに関する研究では、水平方向にのみ注意が払われており、剥離について言及した論文はほとんど見当たらない。このような剥離による応力開放は、曲げ変形、あるいは鉛直変形の存在が温度変形の中に確認されていれば、当然予想されたことであった。C 断面では、材令 3 日に、上層部と中層部の応力に急激な低下がみられたが、これはこの付近に生じたクラックの影響であると考えられる。材令 5 日以降は、B, C 両断面ともに応力は平衡状態となった。試験終了後目視により観察したところ、両端部とも試験体長さの 1/4 程度まで剥離が進行していること、また鉛直方向クラックは C 断面より A 側に 12 cm のところで発生していることを確認した。

M2 の応力履歴の B 断面を図-10④に、C 断面を⑧に示す。M2 では、B, C 両断面ともほぼ同様の応力履歴を示した。両断面の中層部は、材令 1.2 日の温度ピークとともに、最大圧縮応力となり、これ以降引張側へ向かい材令 6 日頃から平衡状態となった。上層部の当初からのゆっくりとした圧縮応力増加傾向は、材令 5 日頃から平衡状態になった。下層部では、材令 2 日頃を変曲点として、引張応力増加傾向から圧縮側へと推移した。

M3 の C 断面では、材令 4 日付近に中層部に発生したクラックは、材令 6 日に上下へ発展し、断面を貫通した。このとき有効応力計の値が急激に引張側へ移行しているのは、クラックが有効応力計をまたいで発生したためである。C 断面では、このクラック以降各部の応力はほぼ平衡化した。B 断面の応力を観察すると、材令 3.5 日に剥離による応力変動が起こっている。

ここで、観察された応力に対する詳細な理論解析は別報に譲り、前と同様の理由から、C.L 法的観点から応

力値の検討を行ってみる。この場合に、クラックあるいは剥離の影響の少ない範囲が検討の範囲であることはいまでもない。図-20~22 は、実測された M1, M2, M3 の被拘束体 C 断面の応力と、C.L 法による応力解析の結果を比較したものである。C.L 法では、被拘束体のみを計算対象としている。M2 のような場合は、拘束の状態が特種であり、外部拘束係数を定める際、日本コンクリート工学協会 (JCI) の提案する图表¹⁾を参照することができないので、これまでの経験から、 $R_N=0.2$, $R_M=1.3$, $R_{M2}=1.8$ と仮定した。この解析の結果は、M1, M3 と比較して、実測と良好な対応を示したとはいえない。特に、材令 3 日ぐらいまでの中層部の解析応力は、実測と比べてもかなり小さい。このように、底面での拘束が小さく、かつコンクリートの厚さが薄い場合には、C.L 法は、実測と合いにくい要因があるようと思われる。

M1 と M3 の外部拘束係数は、JCI の提案する表から求め、 $R_N=1.0$, $R_M=1.02$, $R_{M2}=1.05$ とした。M1 と M3 は、形状および、拘束体と被拘束体の剛性比が同様であるため、C.L 法に用いる外部拘束係数の値は等しくなる。この解析の結果は、実測値と良好な対応を示しているが、より一層一致させようと思えば、各材令ごとに R_N , R_M を変化させる必要がある。先にも述べたように、M1 と M3 は、打継面での挙動や、応力の発生傾向が異なっているが、 R_N , R_M を一定 (constant) とおいた C.L 法を適応しても、それほど問題でないようである。

次に、これらの応力分布をクラス分けしてみる。著者らは、一方向に大きな寸法を有するコンクリートに対して、マスコンクリートの温度応力とひずみの発生パターンを大きく 2 つに分類した²⁾。すなわち、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わずかで水平方向の拘束が比較的少ない場合の B 型である。これら 3 つの試験体を、C 断面で観察された応力から、この分類に当てはめると、M2 は曲型的な B 型で、M3 は典型的な A 型となっている。M1 は、これらの中

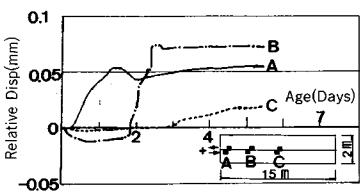


図-23 M1 の打継面の相対変位

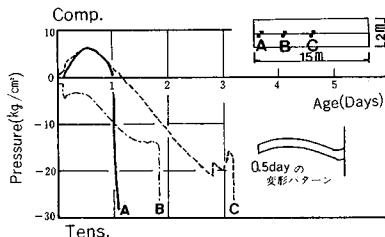


図-24 M1 の打継面の圧力履歴

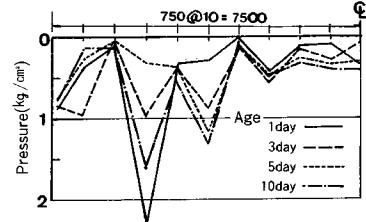


図-25 M2 の打継面の圧力分布履歴

間的な傾向と認められるが、比較的 M3 に近く、どちらかといえば A 型であろう。このような A 型、あるいは B 型の応力パターンに対応するマスコンクリートの変形のパターンは、先に示した 2 つの変形パターンとなるようである。

6. 打継部の挙動

図-23 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、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-24 の圧力計の値とあわせて、この部分の挙動を考えると次のようになるであろう。すなわち、圧力計の値は材令 1 日までは A と C が圧縮に、B が引張になっていることから、A と C を支点にして B が上方へ変位していると推測される。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-25 は、M3 の打継部の相対変形を示したものである。M1 と M3 とでは、相対変形量のオーダーが異なってはいるものの、傾向としては、一致している。図-26 は、M2 の打継面で圧力を計測した結果である。打継面の圧力は一様ではなく、長手方向にいくつかの山や谷がみられる。この現象は、解析によっても示されている³⁾。したがって、計測された打継面での圧力分布の不均一さは計器の誤差によるものではなく、実際の現象である可能性が高い。これは、被拘束体に作用する拘束曲げモーメントが長手方向でプラスになったりマイナスになったりしていることを意味するものである。ここでは、断定はできないが今後の詳細な検討が必要であろう。

7. 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い、これまで解析的にのみ示唆されていた硬化時の曲げ変形の存在や、それに伴う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。そし

て、実験的に観察された 3 つのモデルの変形パターンとそれに対する C.L 法を用いた検討から、マスコンクリートが硬化時に示す変形形状は、コンクリートの自由な熱変形と、それに作用する外部拘束の大きさの度合いにより決定されることを示した。ここでの実験のパラメーターとして着目した打継部の付着性状は、外部拘束を規定するうえでの 1 つのパラメーターであるが、付着の状態により外部拘束の大小を考えた場合には、マスコンクリートの熱変形パターンは大きく 2 つに分類される。すなわち、1) 外部拘束が大きい場合、見掛けのコンクリートの熱変形は、自由な熱変形のパターンとは異なるようであり、2) 外部拘束が小さい場合には、自由な熱変形のパターンがほぼ保存されると考えられる。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かなり複雑な動きをしているようである。しかし、これについては、さらに詳細な検討が必要であると考えている。

参考文献

- 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，1985. 11.
- 田辺忠穎・原口 晃・石川雅美：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：マスコンクリートの温度応力に関するコロキウム講演論文集, pp. 83~90, 1982. 8.
- 今枝靖典・石川雅美・西岡 哲・田辺忠穎：温度応力によるマスコンクリートの力学的挙動、コンクリート工学年次講演論文集 10-2, pp. 175~180, 1988.
- 石川雅美・前田強司・西岡 哲：コンクリート埋設型ひずみ計の改良について、第 43 回土木学会年次学術講演概要集 5, pp. 466~467, 1988. 10.
- 石川雅美・西岡 哲・前田強司・田辺忠穎：大型試験体によるマスコンクリートの温度応力実験、第 10 回コンクリート工学年次講演会論文集, 2, pp. 169~174, 1988. (1988. 10. 25. 受付)