

論文

[1223] 2層打設されたRC部材の自由曲げ変形と温度応力に関する実験的研究

山下浩*¹、佐藤良一*²、氏家勲*³、伊沢良則*⁴

1. まえがき

層状に打設される大断面の鉄筋コンクリート（RC）構造物や内巻きをして仮設構造物を本体の構造物として利用するような大断面の構造物では、水和熱による温度応力を受けた後に外荷重を受けることになるが、この温度応力あるいは温度ひび割れの影響が設計上取り扱われることはほとんどないと思われる。これは、温度応力が終局耐力にほとんど影響を及ぼさないと考えられてきたことによるとと思われる。しかし、使用時の状態においてはひび割れ幅などに影響を及ぼすと考えられることから、筆者らは2層に打設されるマスコンクリートのはりモデルを用いて、温度応力と外力を受けたときに生じる鉄筋応力やひび割れ幅に及ぼす温度応力の影響を実験的に検討してきた[1], [2]。

その結果、温度応力の影響は明らかに認められ、鉄筋比が小さい場合には、温度応力の影響がない部材と比べて小さな外力で降伏する場合もあることも確認した。2層に打設される部材の温度応力は、拘束体からの拘束と被拘束体および拘束体からなる部材の変形（以下、自由変形という）が拘束されることによって生じるため、自由変形の評価はきわめて大切となる。自由変形は当然拘束体と被拘束体の剛性比に影響され、拘束体の断面積が大きい場合には自由変形が小さく、小さい場合には大きくなり、この自由変形が外的に拘束された場合既設コンクリートが小さいことが必ずしも温度応力の影響が小さいとは限らない可能性がある。

そこで、本論文の目的の一つは2層に打設されたはりモデルを用いて、新設のコンクリートが水和熱によって温度上昇、降下したときのはりモデルの自由曲げ変形に及ぼす拘束体断面積の影響を把握すること、二つ目はこの自由曲げ変形が地盤あるいは自重などによって完全に拘束されると想定しさらにその後応力が加算される方向に外力曲げモーメントを受けたときの鉄筋応力度やひび割れ幅に及ぼす温度応力の影響を、拘束体断面積とそれによって異なる自由曲げ変形の観点から、把握することなどである。

2. 実験の方法

実験の方法は基本的には文献[1]と同様であるので、新たに加えた点を中心にその概要を以下に述べる。

2. 1 使用材料

一層目の拘束体にはレディーミクストコンクリートを、二層目の被拘束体には室内配合したコンクリートを用い、それらの粗骨材最大寸法、水セメント比、単位セメント量はともに20mm、42.3%、380kg/m³である。標準養生したコンクリートの力学的特性は表-1に示すとおりである。主鉄筋とし

表-1 コンクリートの力学的特性

供試体		圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
温度部材50	被拘束体	599	50.2	40.4x10 ⁴
常温部材50	拘束体	410	38.2	32.6x10 ⁴
温度部材20	被拘束体	498	45.5	30.9x10 ⁴
常温部材20	拘束体	448	36.5	31.7x10 ⁴

- * 1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)
- * 2 宇都宮大学助教授 工学部建設学科、工博 (正会員)
- * 3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 (正会員)
- * 4 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

て用いた鉄筋は、SD295D16、SD295D13であり、それらの実測弾性係数と降伏点応力は 203×10^4 、 193×10^4 、3533、3575 (kgf/cm²)である。また、スターラップと拘束体の圧縮鉄筋にはSD295D10を用いた。

2. 2 供試体の作製

本研究に用いた供試体は2種類で、拘束体となる1層目および被拘束体となる2層目のブロックの寸法が15x30x540cm、50x50x540cmおよび15x30x420cm、50x20x420cmの供試体をそれぞれ2体ずつ合計4体製作した。これら4体の供試体はいずれも2層にわけてコンクリートを打設して製作した。4体のうち断面の異なる2体実際に即した温度履歴を被拘束体に与え、自由曲げ変形挙動を実測した後、載荷実験を行った(以後、断面が50x50cmの拘束体を温度部材50、50x20cmの拘束体を温度部材20という)。他の2体は、温度履歴以外はすべて同じで、メタルフォームを用いた通常の方法で製作し、載荷実験に供した。(以後同様に常温部材50、常温部材20という)。温度部材は、引張部に温度応力を受けたRCばりとなる。

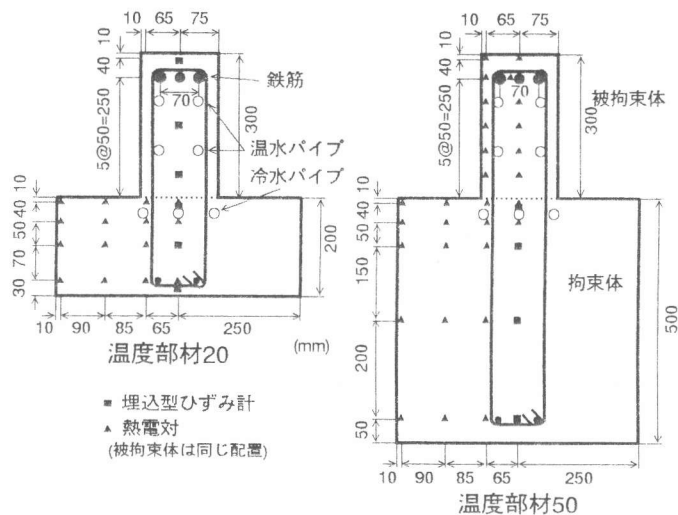


図-1 供試体断面図

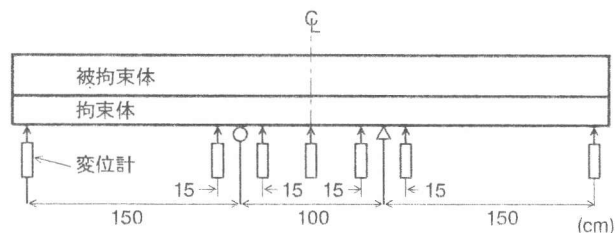


図-2 たわみの計測位置

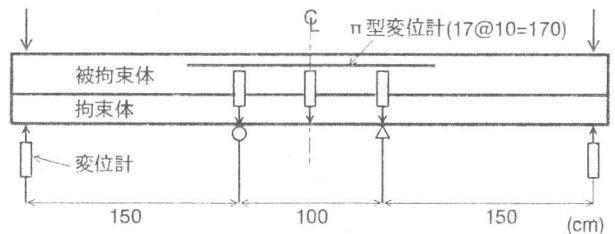


図-3 載荷実験方法

鉄筋は図-1に示すように配筋し、その被拘束体に対する鉄筋比はそれぞれ0.96%である。RCばりとしての引張鉄筋比は拘束体50の場合0.16%、拘束体20の場合0.30%となる。

被拘束体と拘束体との一体性はスターラップを10cmピッチで配筋することおよび拘束体の被拘束体との打継面を遅延剤を用いてグリーンカットすることにより確保した。

2. 3 温度ひび割れ実験および計測方法

実構造物に即した温度履歴を供試体に与える方法は文献[1]によった。計測は温度、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみの軸方向分布およびひび割れ幅について行った。コンクリートひずみと温度の断面における測定位置は図-1に示すとおりである。

水和熱によって生じる曲げ変形を拘束したときの拘束モーメントを把握するため、図-2に示す位置で温度応力のみ起因するたわみ量を測定した。自由変形平均曲率は中央点と両端部の変位量から算定した。自由変形曲率を求めるため、支点上に拘束体を設置し、被拘束体を打設した後変位の初期値を定めた。用いた変位計の精度は1/1000mmである。常温部材50は鉄筋ひずみと対応させてひび割れ幅を測定するため中央断面に予めスリットをいれた。

2. 4 載荷実験および計測方法

載荷実験は図-3に示す方法で行った。計測項目は鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、ひび割れ幅、

たわみ量である。ひび割れ幅は標点距離が10cmのパイ型変位計により測定した。たわみ量は精度1/200mm、1/1000mmで最大変位50mm、10mmの2種類の高感度型変位計により計測した。荷重による曲率は等曲げ区間のたわみ量から求めた。荷重は概ね0.2~0.5tfおきに載荷し、その都度上記の項目について測定した。

3. 結果と考察

図-4は温度部材の打設後の断面各位置の温度の経時変化を示したものである。打設後温度はおよそ50℃上昇した後材齢11日までに45℃低下し、その後外気温まで20℃程度低下している。材齢11日で急激に温度低下が生じているのはこの時点

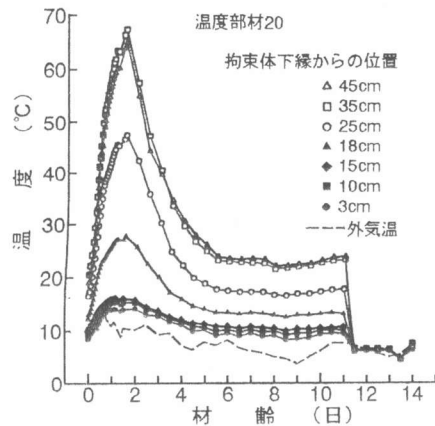


図-4 温度履歴

で被拘束体の断熱材を取り除いたことによる。

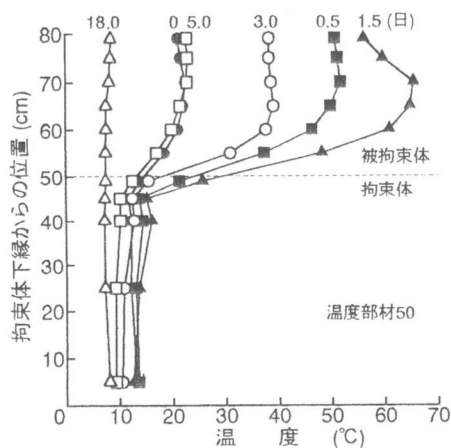


図-5 温度分布の経時変化

図-5、6は温度部材20と温度部材50の断面の幅の中央で計測された断面高さ方向の温度分布の経時変化の一例を示したものである。この図に

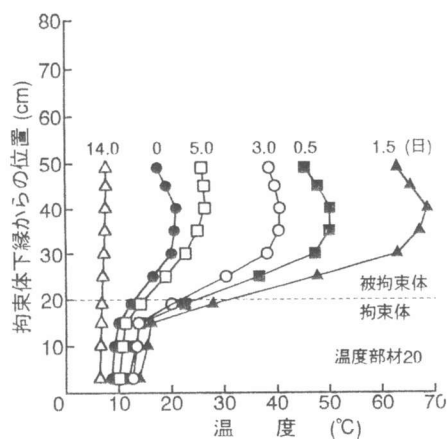


図-6 温度分布の経時変化

示すように被拘束体にはいずれも同じ温度分布が生じるようにした。

図-7は各位置の温度を考慮して求めた断面の温度勾配と実測曲率の関係を示したものである。打設直後の発熱前において温度勾配が生じているのは、拘束体と温度が異なるおよそ17℃のコンクリートを被拘束体部に打設したためである。被拘束体に同一温度勾配を与えても、図に示されているように、温度ピーク時に生じる曲率は、温度部材20は、拘束体高さが小さいため、温度部材50の3倍ほど大きい。温度上昇時に、打設後6時間以降の単位温度勾配あたりに生じる曲率は温度部材20の方がわずか

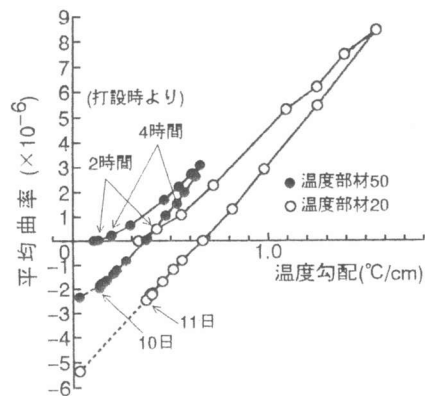


図-7 平均曲率と温度勾配の関係

であるが大きい。これは、拘束体の曲げ剛性が小さいことによって説明される。しかし、平均曲率が0になるまでの温度低下時には、逆の現象が起こり、拘束体の剛性の大きい温度部材50の方が高い勾配を示す。この現象は、温度上昇時に蓄えられた弾性エネルギーが温度低下時に解放され、被拘束体の変形を促進すると考えることによって理解される。また、打設時の温度とほぼ同じ状態に戻ったときの曲率は温度部材20の方が大きい、温度部材50との拘束体の剛性差を考えればその差は小さい。

図-8、9に温度部材50と温度部材20のそれぞれの曲率の経時変化の実測値と計算値を比較して示す。

なお、本論文では、断面内のひずみの直線性を仮定したうえで、温度履歴に応じた物性値、経時的に変化する線膨張係数およびクリープ係数の載荷時材齢を考慮して曲率および温度

応力を求めた[2]。クリープ係数は岩城らの値を用いた[3]。これらの図によれば、特に温度部材20の場合、最高温度時および安定温度時双方の曲率を精度高く予測することは難しい。これは一つにはクリープの応力履歴の依存性[4]を考慮していないためと思われる。このような履歴の下で生じる被拘束体断面の応力分布の計算結果を図-10、11に示す。計算の初期値は図-7より曲率の立ち上がりを考慮して4時間を原点

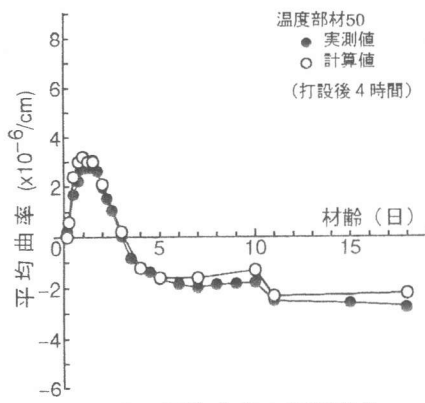


図-8 平均曲率の経時変化

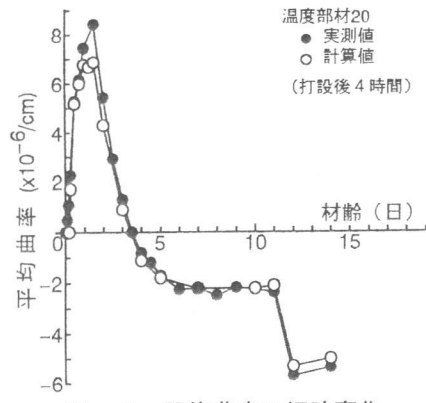


図-9 平均曲率の経時変化

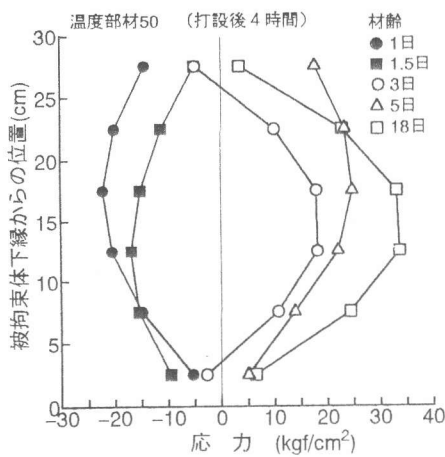


図-10 温度応力分布

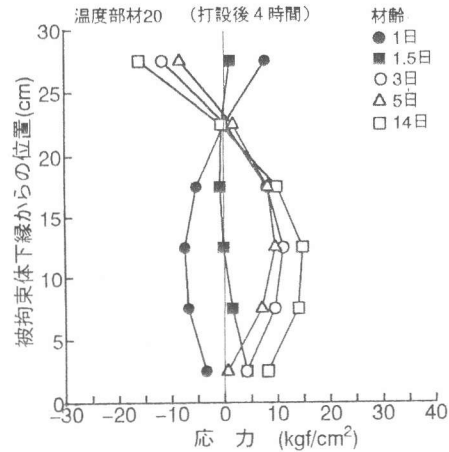


図-11 温度応力分布

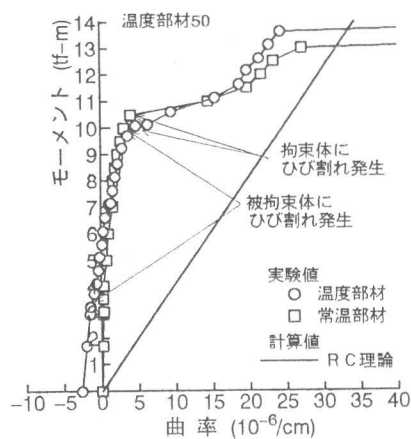


図-12 モーメント-曲率関係

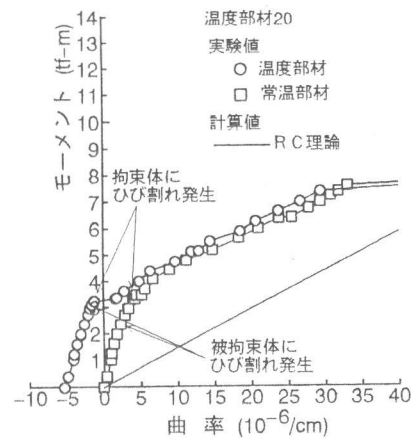


図-13 モーメント-曲率関係

とした。最大圧縮応力は温度部材50においては 22.0 kgf/cm^2 、温度部材20においては 7.4 kgf/cm^2 である。最大引張応力は温度部材50においては 33.8 kgf/cm^2 、拘束体50においては 14.9 kgf/cm^2 であった。

図-12、13は温度応力を受けた2種類の断面の異なるのRC部材のモーメントと平均曲率の関係を、水和熱によって生じた負の曲率を考慮し、同一諸元の温度応力を受けないRC部材の実験値と比較して示したものである。この場合、曲率ゼロのところのモーメントが自由変形曲率が完全に拘束されたときのモーメントとなる。

ちなみにひび割れ発生モーメントの実測値を計算値と比較すれば表-2のようである。拘束体の断面積が大きい部材の場合明らかに温度応力の影響が認められ、計算値もこれを裏付けている。し

しかし、拘束体の断面積が小さい場合には、温度部材20の被拘束体のひび割れ発生モーメント3.3tf-m、常温部材20のそれは2.4tf-mと温度応力の影響は認められなかった。これは、図-11に示すように温度応力が引張縁では圧縮になっており、また、荷重によって生じる引張応力の勾配が急であるため、最大引張応力位置では荷重による引張応力がそれほど大きくないため、結果としてひび割れ発生に温度応力がほとんど影響しなかったからである。なお、常温部材のひび割れ発生モーメントが小さいのは1ヶ月強の期間に乾燥収縮の影響を受けたためと思われる。

ひび割れ発生後の変形拘束モーメントはひび割れによる剛性低下を考慮した、 $M_T = (M_{ex} + M_T) \phi_T / (\phi - \phi_T)$ [2]によって求めた。ただし、 M_T は変形が完全に拘束

されたときのモーメント、 M_{ex} は外力モーメント、 ϕ_T は自由変形曲率、 ϕ は変形拘束モーメントと外力モーメントが同時に作用したときの曲率である。

この考え方に従い、図-12、13から部材断面の降伏時における変形拘束モーメントの割合は、温度部材50の場合、降伏モーメント13.5tf-mに対して変形拘束モーメントは1.4tf-mで10.0%、また、温度部材20の場合7.38tf-mに対して1.14tf-mで、15%と温度部材20の方が温度応力の影響が大きい。

そこで、同一の外力モーメントを受けたときに生じている鉄筋応力度を、温度部材50と常温部材50を比較して示したのが図-14である。また図-15は温度部材20と常温部材20を比較したものである。図の横軸は、外力が作用する以前に、自由変形曲率が完全に拘束されたときに生じる鉄筋応力度の実測値である。いずれの拘束体の場合も温度応力の影響が認められ、常温部材の場合より鉄筋応力度は大きい。特に部材20の場合は通常の理論の計算値よりも大きく、温度応力の影響を無視すれば鉄筋応力度、すなわち部材降伏時の外力モーメントも過小評価することになる。

表-2 ひび割れ発生モーメント

供試体	ひび割れ幅発生モーメント(tf-m)	
	実測値	計算値
温度部材50	3.5	2.7(33.0)
常温部材50	10.0	10.9(40.1)
温度部材20	3.3	3.4(36.9)
常温部材20	2.4	3.4(42.2)

(): 引張強度(kgf/cm²)

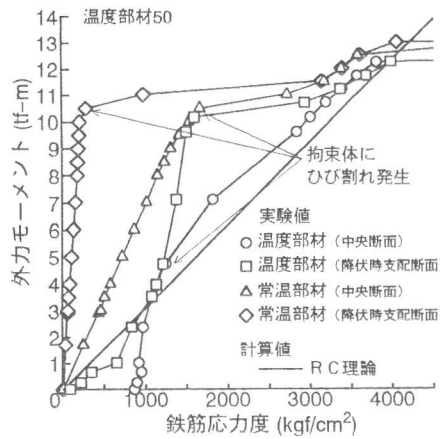


図-14 外力モーメント-鉄筋応力度

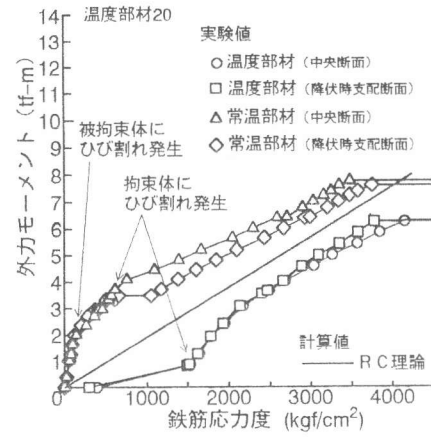


図-15 外力モーメント-鉄筋応力度

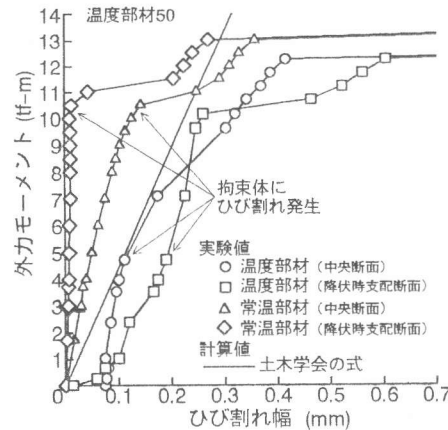


図-16 外力モーメント-ひび割れ幅

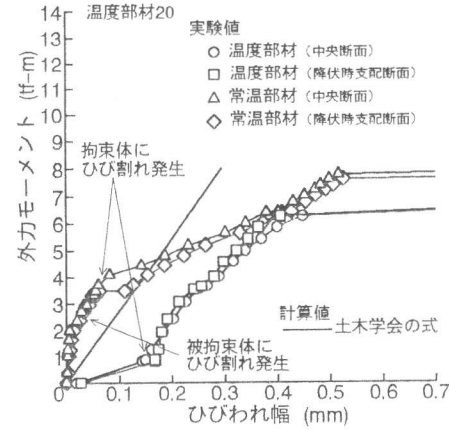


図-17 外力モーメント-ひび割れ幅

温度部材のひび割れ幅も、図-16、17に示すように、部材20および部材50ともに温度応力の影響がみられ、使用状態において常温部材より2倍以上のひび割れが

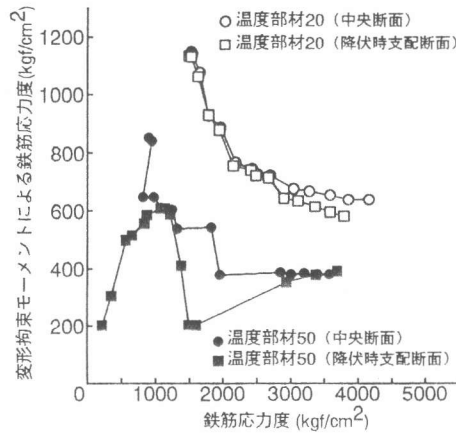


図-18 変形拘束モーメントによる鉄筋応力度

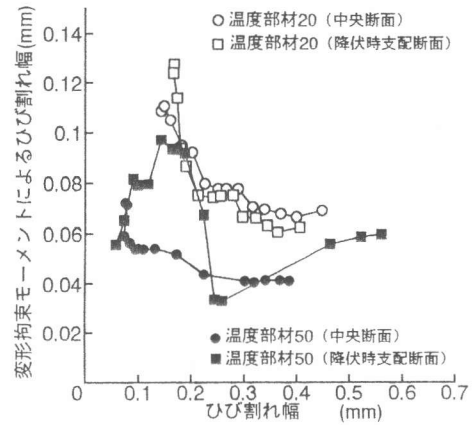


図-19 変形拘束モーメントによるひび割れ幅

認められた。なお、特に部材20の場合常温部材であってもひび割れ幅が土木学会の方法で求めた値より相当大きい、これは実測ひび割れ間隔が計算値より大きかったことによる。ちなみに、温度部材20の最大ひび割れ間隔は25.5cm、平均ひび割れ間隔は17.9cm、常温部材の最大ひび割れ間隔は32cm、平均ひび割れ間隔は19.1cmで、土木学会の式による値は14.1cmであった。

図-18、19は全鉄筋応力度とひび割れ幅に占める変形拘束モーメントの影響度を温度部材20と温度部材50を比較して示したものである。これらの図から、自由曲げ変形のみが完全に拘束されたとき、既設コンクリートの拘束が小さいことが、必ずしも有利に作用しないことがわかる。

5. 結論

2層に打設されたマッシュなRCはりモデルの水和熱による自由曲げ変形が完全に拘束され、さらにその後外力を受けたときの力学性状に及ぼす温度応力の影響を拘束体の断面積の観点から実験的に検討した。本研究の範囲内で得られた主な結論は次のようである。

- 1) 被拘束体に同一の温度が発生したとき、拘束体断面積が小さくなると、拘束体からの拘束のみによって生じる温度応力は小さいが、自由変形曲率は大きくなる。この事実は、定量的な評価では十分でない面もあるが、ひずみの直線性を仮定した計算によっても示された。
- 2) 変形拘束モーメントと外力モーメントが重なって作用するとき、既設コンクリートが小さい場合、自由変形曲率が大きく生じるため、鉄筋応力度やひび割れ幅に及ぼす温度応力の影響度は、既設コンクリートの断面積が大きい場合より大きく、既設コンクリートの断面積が小さいことが必ずしも有利に作用しない。

＜参考文献＞

- [1] 佐藤良一ほか: 温度ひびわれを有するRC部材の鉄筋応力度とひびわれ挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 1、pp. 1137-1142、1992。
- [2] 伏見聡ほか: 水和熱がRC部材の変形と力学的性状に及ぼす影響に関する考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 1179-1184、1993。
- [3] 岩城良ほか: セメントの水和熱に起因する温度応力の解析手法に関する研究、鹿島技術研究所年報、第28号、1980。
- [4] 田澤榮一、飯田一彦: 硬化時温度応力の発生メカニズムについて、マスコンクリートの温度発生メカニズムに関するコロキウム論文集、pp. 101-104、1982。