

論文 水和発熱抑制剤の部分使用による温度応力抑制効果に関する研究

東 邦和*¹・上西 隆*²・起橋孝徳*³・廣中哲也*¹

要旨：箱形ラーメンの側壁部に発生する外部拘束ひび割れの低減を目的として、水和発熱抑制剤を混入したコンクリートを側壁下部に打設し、上部に通常コンクリートを打設した場合の温度ひび割れ抑制効果の得られるメカニズムを一連の実験および現場施工結果から明らかにした。水和発熱抑制剤を添加したコンクリートを使用することにより温度ピーク材齢が遅れ、壁体外への放熱による温度低下効果がある。また、硬化時の熱膨張に時間差があるため、ベースコンクリートおよび上部の通常コンクリートによる拘束から下部コンクリートに圧縮力が発生し、引張応力の低減に効果があることがわかった。

キーワード：水和発熱抑制剤、発熱速度、温度応力、マスコンクリート

1. はじめに

箱形ラーメン等の構造物を構築する際に、コンクリートの温度変化による体積変化が下床版により拘束を受け、側壁部のコンクリートに外部拘束ひび割れが発生することが知られている。ひび割れの発生を防止するためには、セメント量を低減したり、低発熱セメントを使用する等の対策がとられているが、その一つとして水和発熱抑制剤を用いる方法が行われている。^{1) 2)} 水和発熱抑制剤を添加することによるひび割れの防止効果のメカニズムは比較的複雑であるため、コンクリートの変形及び応力の挙動を明らかにする必要がある。今回、一連の実験および解析により、水和発熱抑制剤を部分的に使用した場合の温度応力抑制効果を明らかにした。

2. 実験概要

2. 1 使用材料と配合

実験および現場施工の使用材料を表-1に示す。コンクリートの配合を表-2に示す。室内実験では、水和発熱抑制剤の添加量を変えて温度、強度特性を検討した。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重3.16
細骨材	室内実験・予備実験：鬼怒川産川砂 比重2.58 模擬実験：栃木市尻内町産陸砂、葛生産石灰石砕砂の混合砂 比重2.62 現場施工：大和町産陸砂 比重2.55
粗骨材	室内実験・予備実験：笠間産碎石 比重2.66 Gmax20mm 模擬実験：筑波産硬質砂岩 比重2.70 Gmax25mm 現場施工：高館産碎石 比重2.60 Gmax25mm
高減水型水和発熱抑制剤	ポリヒドロキシカルボン酸エステル、特殊アニオン系活性剤
A E 減水剤	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体

2. 2 予備実験試験体

予備実験では、水和発熱抑制剤の添加量を変えて多層に打設したときの温度および変形について検討した。試験体および計器の設置位置を図-1に示す。試験体は2体作成した。試験体には、D 10の鉄筋を20cmピッチで配筋している。1体は通常のコンクリートを全高打設したものである

*1 株式会社奥村組 技術研究所構造研究室 (正会員)

*2 株式会社奥村組 技術研究所建築研究室 (正会員)

*3 株式会社奥村組 技術研究所建築研究室

表-2 配合

実験 シリーズ	No	水セメント 比 w/c %	細骨材 率 s/a %	単位量				水和熱 抑制剤	AE助剤	A E 減 水剤
				水 W	セメント C	細骨材 S	kg/m ³ 粗骨材 G			
室内実験 予備実験	1	55	45	155	282	825	1040	-	1.5	0.6
	2	55	45	155	282	825	1040	4.2(1.5%)	2.5	0.2
	3	55	45	155	282	825	1040	5.6(2.0%)	2.5	-
	4	55	45	155	282	825	1040	7.1(2.5%)	3.0	-
模擬実験	1	55	45	160	291	825	1045	-	-	2.9
	2	55	45	160	291	825	1045	5.8(2.0%)	0.728	-
現場施工	1	53	42.2	157	296	757	1058	-	-	0.25
	2	55	44.7	145	264	829	1043	7.4(2.5%)	2.5	-

(通常試験体)。もう一体は水和発熱抑制剤の添加量を 2.0%、1.5%および 0%としたコンクリートを順に3層に打設したものである(抑制試験体)。

2.3 模擬試験体

模擬実験では箱形ラーメン側壁を模擬した試験体で温度、変形、応力の挙動を検討した。試験体を図-2に示す。試験体は長さ6mであり、ベースコンクリートの上に厚さ30cmの壁を打ち継いだものである。D 13の鉄筋を縦筋30cm横筋20cmのピッチで配筋している。

試験体は2体作成し、1体は通常のコングリートを全高打設したものである(通常試験体)。もう1体は、水和発熱抑制剤を2%添加したコンクリートを高さの1/2打設し、さらにその上に、通常コンクリートを全高まで打設したものである(抑制試験体)。両試験体ともに、壁部全表面に5cm厚の発泡スチロールを取り付けマスコンクリートを模擬している。測定計器は壁厚中央に図に示すように配置した。

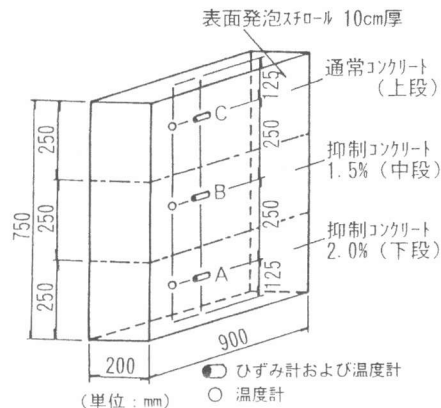


図-1 予備実験試験体

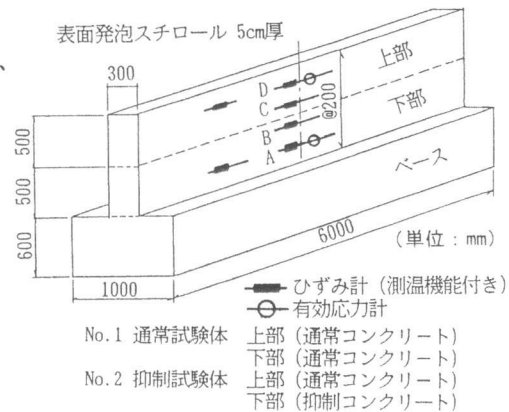


図-2 模擬実験試験体

3. 実験結果および考察

3.1 温度上昇および強度試験結果

断熱温度上昇試験結果を図-3に示す。水和発熱抑制剤は、温度上昇の勾配を緩くする効果がある。これは、コンクリートの発熱に伴って抑制剤の遅延効果が大きくなるためである¹⁾。

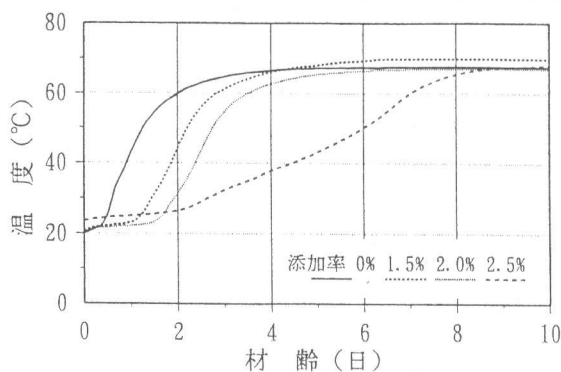


図-3 断熱温度上昇試験結果

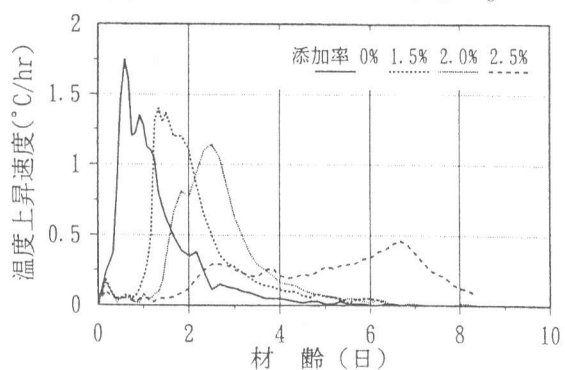


図-4 温度上昇速度の経時変化

温度上昇速度（発熱勾配）の経時変化を図-4に示す。水和発熱抑制剤を添加したコンクリートの温度上昇速度は小さく、速度のピークも遅れており、特に添加量2.5%のものは顕著である。単位セメント量が同じであれば、水和発熱抑制剤を用いることによる断熱温度上昇量の最大値はほぼ同じであるが、温度上昇速度が小さくなり、壁状構造物のように放熱が大きい場合には温度上昇量が低下する。

圧縮強度、引張強度、静弾性係数の試験結果を図-5、6、7に示す。水和発熱抑制剤を1.5~2.0%添加したものは、初期材齢では無添加のものに比べて強度が小さいが、材齢7日ではほぼ同様な強度発現を示している。ただし、添加量が2.5%になると、強度発現はかなり遅くなる。

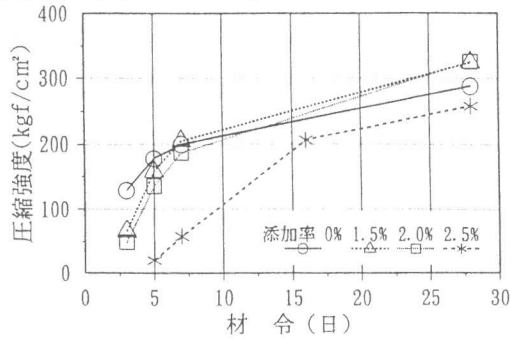


図-5 圧縮強度試験結果

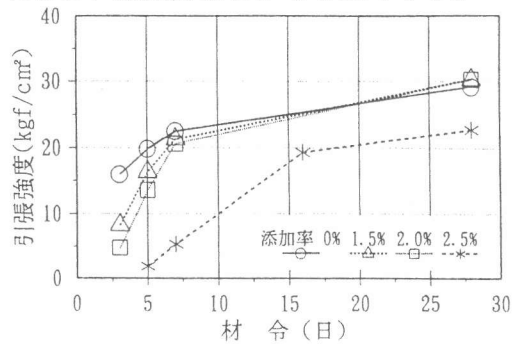


図-6 引張強度試験結果

3.2 予備実験結果

試験体の温度の経時変化を図-8に示す。抑制試験体は温度ピーク時期が遅れている。抑制供試体上部の通常コンクリート部(2C)は極く初期には通常試験体と同様な温度上昇をしているが、下部の抑制コンクリートに熱が伝わることによって温度ピークが低くなるとともに、ピーク時期も遅れている。

実ひずみの経時変化を図-9に示す。実ひずみは温度膨張ひずみを含む試験体の実変形である。抑制試験体上部の通常コンクリート(2C)の初期の実ひずみは通常試験体と同じ大きさであるが、水和発熱抑制剤を添加した部分(2A, B)は大きな実ひずみを示している。これは初期に通常コンクリートに引きずられて抑制コンクリート部が伸び変形し、さらにその後の発熱による膨張により、通常試験体の約1.5倍のひずみが生じたと考えられる。このことから抑制コンクリート部は硬化の初期には通常コンクリート部の伸びを拘束することなく、追随する動きをするといえる。

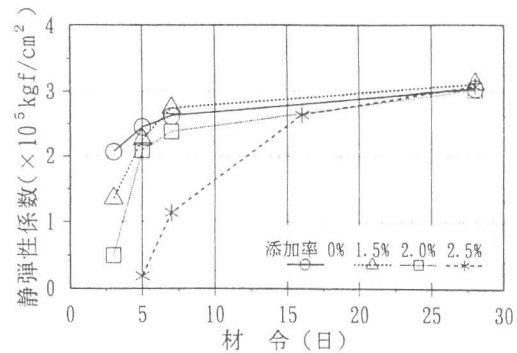


図-7 静弾性係数試験結果

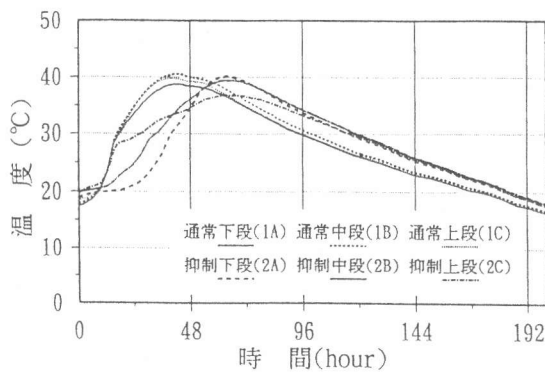


図-8 温度経時変化

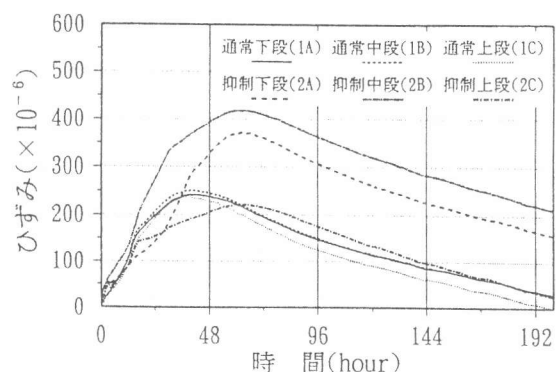


図-9 実ひずみ経時変化

3. 3 模擬実験結果

壁部温度の測定結果を図-10に示す。抑制試験体は通常試験体と比較すると抑制コンクリートの発熱の遅れにより、温度ピーク時期が約24時間遅れた。

ひずみ計による壁部実ひずみの測定結果を図-11に示す。抑制試験体は、下部の抑制コンクリートの剛性が小さいので、上部コンクリートはほぼ自由な膨張ひずみを示している。通常試験体上部はベースによる拘束を受け、抑制試験体の約2/3の大きさの膨張ひずみを示した。

有効応力計による応力度の測定結果を図-12に示す。通常試験体の上部は、温度上昇に伴って初期に圧縮力が導入されている。抑制試験体の上部は拘束が小さいので圧縮力の導入は少なく、通常試験体の約1/3の大きさである。抑制試験体下部は、圧縮応力の発生が大きく、引張り側への移行が3.5日遅れる結果を得た。いずれの試験体も下部は温度の低下とともに上部より大きい引張り力が生じている。本試験体では発泡スチロールによる放熱の制限により、抑制試験体における放熱による温度ピーク低減効果が得られない。したがって抑制試験体の温度降下量が通常試験体よりわずかに大きく、温度の低下に伴い抑制試験体の下部も通常試験体と同じ引張り力が生じた。なお、本実験では発生応力度が小さいので、ひびわれは生じていない。

実験結果のシミュレーションを2次元FEM 温度解析およびCompensation Plane法応力解析で行な

った結果を図-13に示す⁴⁾。熱特性は計算値の温度履歴が実測値の温度履歴に近似するように設定した。熱特性を表-3に示す。強度特性、拘束係数は実験値を用いた。

温度解析結果では抑制供試体の水和発熱抑制剤を混入したコンクリートの発熱が遅れ、熱が上下方向に伝わる実験結果を比較的よく表すことができた。応力度についてCP法では、初期に上部通常コンクリートの膨張変形に対

して下部抑制コンクリートの拘束が小さいことによる変形挙動を十分に表わすことができず、上部通常コンクリートの圧縮力が実験結果より大きく計算された結

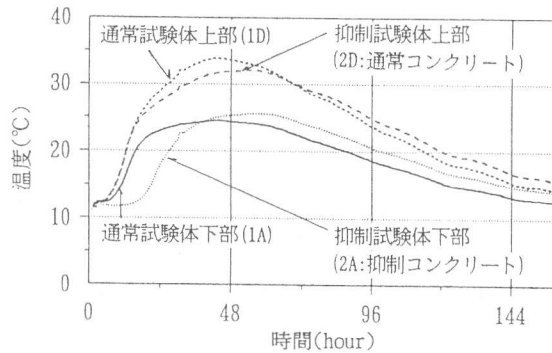


図-10 温度経時変化

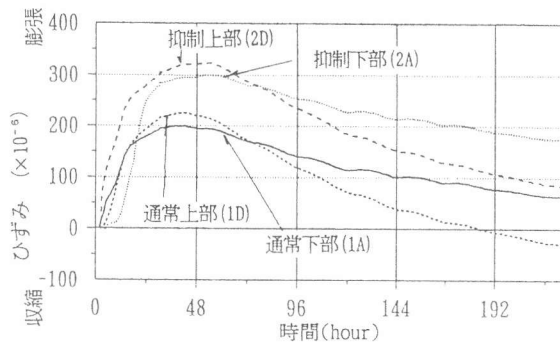


図-11 ひずみ経時変化

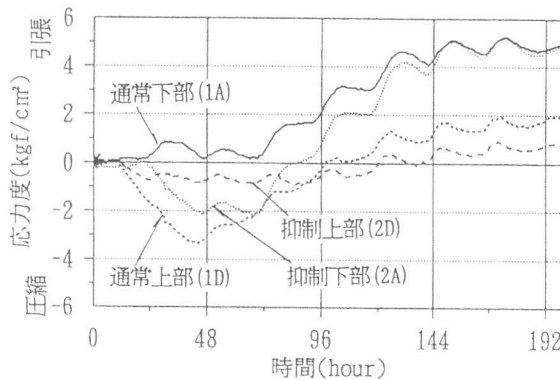


図-12 応力度経時変化

表-3 熱特性

種類	Q ₀ (°C)	A	B (日)	比熱 (kcal/kg°C)	熱伝導率 (kcal/cm・h°C)	密度 (kg/m ³)
通常コンクリート	44	1.0	0.3	0.305	0.022	2300
抑制コンクリート	44	0.7	1.4	0.305	0.022	2300

断熱温度上昇式 $Q=Q_0(1-e^{-A(t-B)})$

果になった。また、温度ピークの遅れにより下部抑制コンクリート応力度の引張側への移行時期が材齢 3.5日以降に遅れる結果は、強度特性データを細かく入力することによって、挙動をよく表すことができた。また、ひび割れ指数の解析結果では、抑制コンクリート部に圧縮力が発生する分だけ上部通常コンクリートの引張力が大きくなり、その部分のひび割れ指数が早期に減少する結果、および抑制試験体下部ではひび割れ指数が小さくなる時期が遅れる結果を示した。

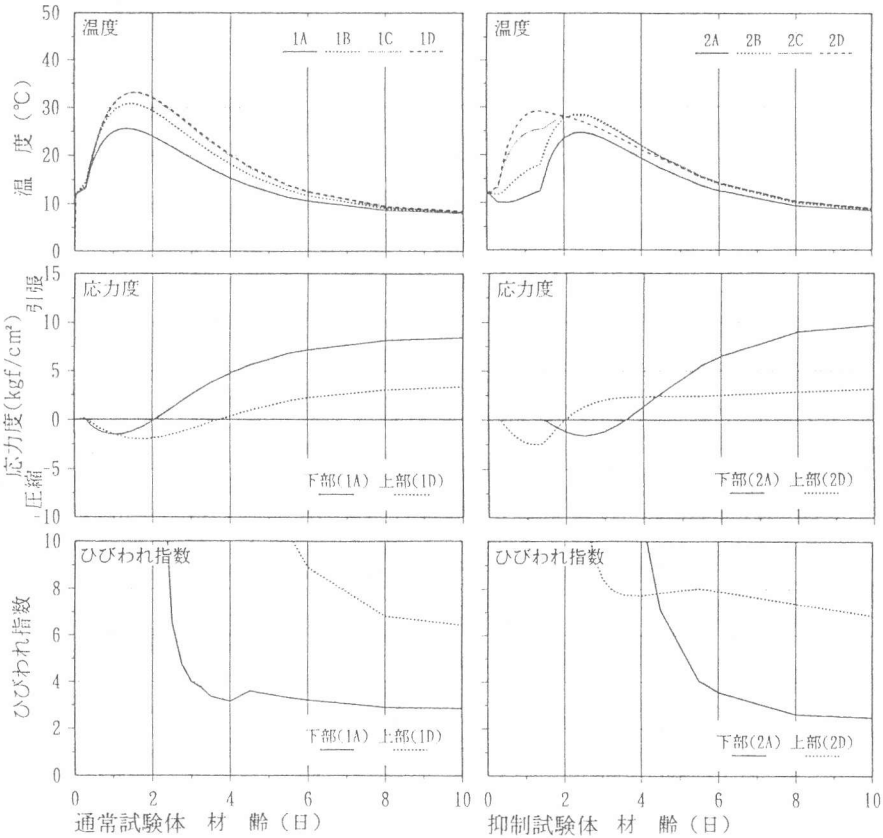


図-13 温度応力解析結果 (CP法)

4. 実施工測定結果の検討

実施工が行われた複線鉄道用箱型ラーメンの形状を図-14に示す。水和発熱抑制剤は斜線部分に示された側壁部の下部1.5mに使用している。水和発熱抑制剤添加部の上部は通常のコンクリートを引き続いて打設している。温度測定結果を図-15に示す。通常コンクリート部も含めて抑制対策部の温度降下が緩やかになっているのは、水和発熱抑制剤を2.5%添加しており抑制コンクリート部の発熱が材齢2日を過ぎてても緩やかに続いているためである。2次元FEM 温度応力解析による応力度計算結果を図-16に示す。通常施工と比べて抑制下部のコンクリー

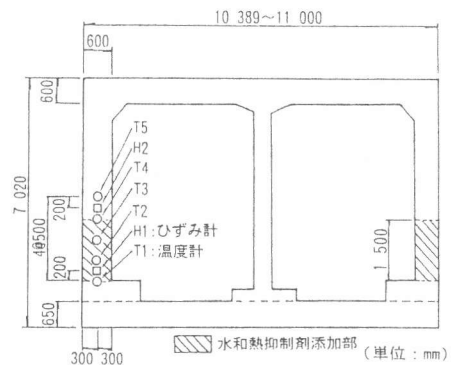


図-14 施工函体の形状

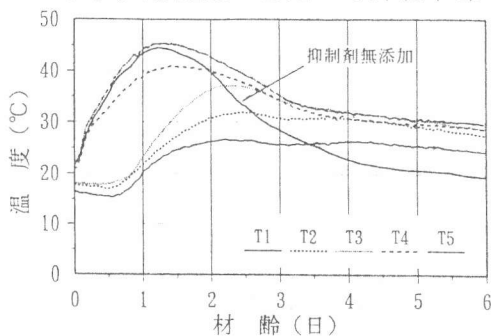


図-15 温度測定結果²⁾

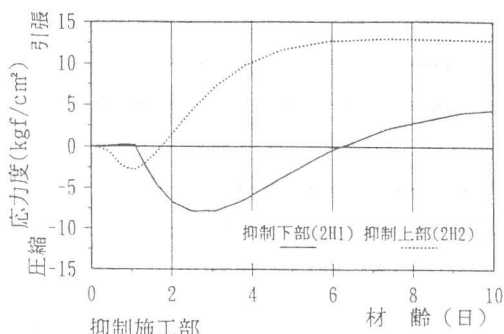


図-16 応力度(FEM温度応力解析)

トに圧縮応力が比較的大きく導入された結果を得た。ひび割れ指数は、下部において通常施工の場合と比べてかなり大きくなっており、ひび割れに対して有利であることがわかる。ただし、上部の通常コンクリート部では通常施工の場合よりひび割れ指数がやや低下している。施工後のひび割れの観察結果では0.2~0.3

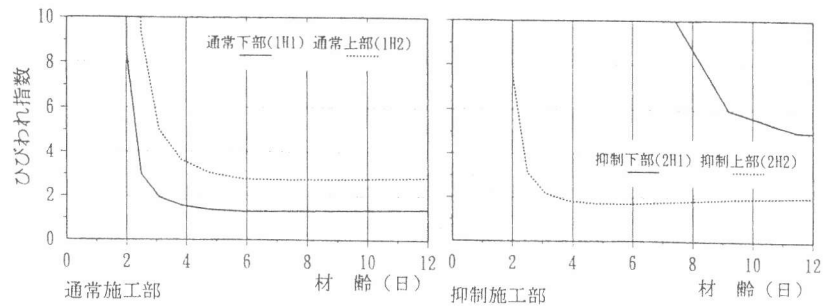


図-17 ひび割れ指数 (FEM温度応力解析)

mmの幅の乾燥収縮の影響も考えられるひび割れが打設後1カ月経過以後に3カ所観察されたが、通常の施工箇所では早期に0.4~0.8mmのひび割れが10本程度発生しており、水和発熱抑制剤を添加したコンクリートの部分打設がひび割れの低減に効果のあることが確認された。

5. まとめ

本研究で得られた結論を次に示す。

- 1) 温度応力低減効果の主要なものは、発熱速度が緩やかになることによる壁体外への放熱から温度ピークが低下することであり、抑制コンクリート部の引張応力度が低減する。
- 2) 部分打設の温度応力低減効果は、下部の抑制コンクリートの硬化と発熱膨張が遅れて生じるため、ベースコンクリートと上部の通常コンクリートとに拘束され、抑制コンクリート部に圧縮力が導入されることによる。
- 3) 初期材齢には抑制コンクリートの剛性が小さいため、上部の通常コンクリートは比較的自由的な伸び変形が生じる。
- 4) 試験体の挙動を検討することにより、部分打設した実構造物の挙動をシミュレーションすることができ、温度応力低減効果が確認された。

水和発熱抑制剤を添加したコンクリートを部分打設した場合の挙動は、各部分のコンクリートの温度履歴や剛性の変化などが影響しあうことや、放熱や拘束の条件によっても変化し複雑となる。この研究により限られた条件ではあるが、この挙動を解析できたことで、今後、他の現場での水和発熱抑制剤のより有効な適用が図れるものと考えられる。本研究にご協力頂いたJR東日本、住友セメントの関係者の方々に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 武本健示、時川 忠、阿部 力、井ノ川 尚：水和発熱抑制剤を用いたコンクリートの基礎性状、セメント・コンクリート論文集、No. 47、pp. 212-217、1993
- 2) 岩田道敏、齊藤啓一、三輪 渡：高減水型水和熱抑制剤の部分使用による箱形ラーメンの温度ひび割れ対策、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集V pp. 698-699、1993. 9
- 3) 東 邦和、上西 隆、起橋孝徳、白石祐彰：水和発熱抑制剤の部分使用によるマスコンクリートの温度応力抑制効果、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集V pp. 414-415、1994. 9
- 4) コンクリート標準示方書施工編、土木学会、1992