

論文

[1197] 箱型ラーメンの温度ひびわれに対する検討

岩田道敏\*1・斉藤啓一\*2・庄司公男\*3・井ノ川尚\*4

1. はじめに

箱型ラーメンは、鉄道、道路等さまざまな用途において数多くの施工例がある。しかし、側壁部を構築する際、コンクリートの温度変化に伴う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温度ひびわれの内の外部拘束ひびわれと呼ばれるひびわれが多く発生することが知られている。このひびわれは貫通ひびわれとなることから、構造物の美観のみならず耐久性、漏水等の観点からひびわれの発生を防止することが望まれている。

これまでも、この外部拘束ひびわれを抑制するために、膨張剤を用いる方法、低発熱セメントを用いる方法等様々な検討が行なわれているが、今回、箱型ラーメンの温度ひびわれ抑制対策として、高減水型水和熱抑制剤（以下水和熱抑制剤という）を用いた方法に着目し、実施工を行なったので、その検討内容と施工結果を報告する。

2. 検討内容

2. 1 配合試験

設計ならびに施工上の条件を考慮し、単位セメント量を減じるとともに、水和熱抑制剤の効果を充分に発揮する添加量を試験的に求めるため、配合試験を行なった。一般的な鉄道における箱型ラーメンの配合条件を表-1に示す。

使用した水和熱抑制剤は、ポリヒドロキシカルボン酸エステルと特殊アニオン系活性剤を主成分とし、

表-1 配合条件

スランプ	8 ± 2.5 cm
空気量	4.5 ± 1%
呼び強度	24.0 kgf/cm <sup>2</sup>
W / C	5.5%以下

表-2 配合試験結果

配合番号	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/ m <sup>3</sup> )				混和剤			スラブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	AE減 (%)	SU (%)	AE剤 (A)		
1	53.0	42.2	157	296	757	1058	0.25	—	—	7.5	4.4
2	48.3		143		778	1084	—	2.00	2.5	7.0	4.0
3	53.0			270	783	1092	—	2.00	2.5	7.0	4.0
4	55.0		44.7	145	264	829	1043	—	2.00	2.5	7.0

※AE減: AE減水剤 SU: 水和熱抑制剤

- \*1 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 新仙台工事区 施設技術係、工修 (正会員)
- \*2 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 工事管理室 設計第1係長 (正会員)
- \*3 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 土木第1 主任技師
- \*4 住友セメント(株) 中央研究所・セメントコンクリート研究所 商品開発室 主任研究員

セメントの水和熱抑制効果と減水効果をあわせもつものである。

配合は、標準配合に対し、① s/a、セメント量を一定とし、単位水量を変化させたもの、② s/a、W/C を一定とし、セメント量、単位水量を変化させたもの、③s/a、W/C、セメント量、単位水量の全てを変化させたものの3通りについて、配合条件を満たす配合を試験練りにより求めると共に、その配合について圧縮強度および引張強度試験を行なった。表-2に配合試験結果、表-3に強度試験結果を示す。

表-3 強度試験結果

配合番号	W/C (%)	s/a (%)	圧縮強度 (上段) 引張強度 (下段) (kgf/cm <sup>2</sup> )			
			3日	5日	7日	28日
1	53.0	42.2	174 15.1	226 20.5	270 22.1	380 23.0
2	48.3		189 17.0	317 22.1	368 25.8	480 30.6
3	53.0		162 13.2	256 21.2	296 23.6	387 24.4
4	55.0	44.7	136 12.2	221 19.8	274 22.2	398 24.1

これより、いずれの配合においても7日強度および28日強度で水和熱抑制剤を用いないコンクリート（以下無添加という）を上回る強度が得られ、強度的には問題が無いと判断したことから、実施工には単位セメント量が少なく、水和熱が一番低いと考えられる配合番号4を採用することとした。

## 2.2 断熱温度上昇試験

水和熱抑制剤を用いる効果を施工前に予測・解析するための材料定数を得ると共に、発熱抑制効果の高い水和熱抑制剤の添加量を確認するために断熱温度上昇試験を行なった。試験には、新たに開発した装置[1]を使用した。

試験を行なった配合は、表-2における配合番号1の無添加の場合と、水和熱抑制剤を用いた配合番号4、および配合番号4でさらに水和熱抑制剤の添加量を2.5%としたものの計3通りである。断熱温度上昇試験結果を図-1に、断熱温度上昇速度を図-2に示す。

図-2より配合番号4で水和熱抑制剤の添加量を2.5%とした場合には、無添加の場合と比べ、断熱温度上昇量が約4℃低く、発熱速度が1/2程度となっており、断熱温度

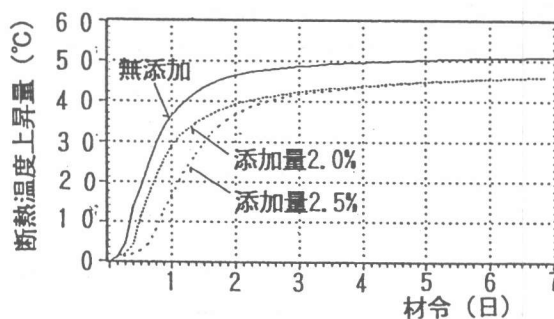


図-1 断熱温度上昇試験結果

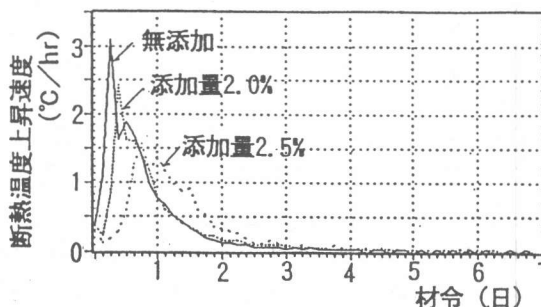


図-2 断熱温度上昇速度

上昇試験からは、顕著な発熱抑制効果が確認できた。

### 2. 3 温度上昇予測

上述の検討結果を基に、配合番号4で水和熱抑制剤の添加量を2.5%とした場合についてFEM2次元温度解析[2][3][4]を行ない、実際の構造物における温度上昇予測を行なった。表-4に材料定数を、図-3に解析モデルを示す。なお、材料定数は実験結果による値を用いた。

温度上昇を予測する際、養生温度が大きな影響をおよぼす。実施工では、施工時の外気温が15℃程度と予想されたため、水和熱によるコンクリート温度上昇時には特に散水等は行なわず、側壁部内のコンクリート温度の下降が始まった時からジェットヒーターにより加熱を行ない、コンクリートの急激な温度低下が生じないような養生方法を採用することとしている。そこで、温度上昇予測に際しては、実施工の際の養生方法の検討に反映できる様に、養生を行なう環境温度を表-5に示す4通りの組合せについて検討を行なった。図-4に温度上昇予測結果を示す。

これより、配合番号4で水和熱抑制剤の添加量を2.5%し、環境温度をP2とした場合、無添加の場合と比較して最高温度で8.7℃、ピーク時から材令7日までの温度変化量を9.3℃低下する結果となった。

### 2. 4 温度ひびわれ指数

温度上昇予測結果を基に、CP法により温度応力解析[2][3][4]を行ない、温度ひびわれ指数の計算を行

表-4 材料定数

コンクリート比熱	0.305 (kcal/kg°C)
熱伝導率	2.2 (kcal/m・hr°C)
熱伝達率	1.0 (kcal/m <sup>2</sup> ・hr°C)
コンクリート密度	2300 (kg/m <sup>3</sup> )

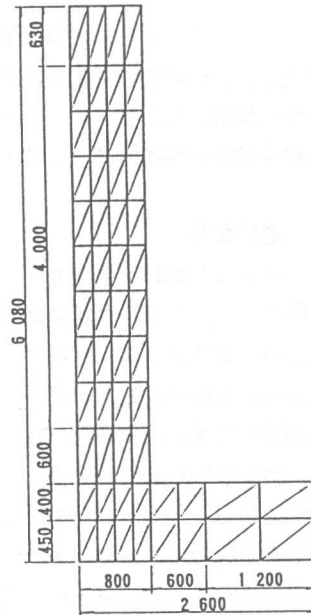


図-3 温度解析モデル

表-5 環境温度 (°C)

記号	温度上昇時	温度下降時	配合番号
無添加	20	20	1
P1	15	20	4
P2	15	25	
P3	20	20	
P4	20	25	

※打ち込み時のコンクリート温度20°C

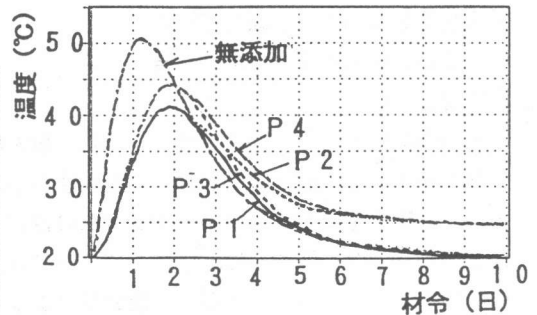


図-4 温度上昇予測結果

なった。図-5に温度ひびわれ指数の計算結果を示す。

ひびわれ指数を計算する際の拘束体は下床版とし、拘束度は参考文献[2]、[3]より $R_N : 1.0$ 、 $R_{M1} : 0.9$ 、 $R_{M2} : 3.0$ とした。

これより、一番ひびわれ指数の大きい環境温度P2においては、ひびわれ指数は1.85程度となり、無添加の場合のひびわれ指数0.85と比較すると、1.00程度改善される結果を得た。

以上の検討により、水和熱抑制剤を用いて施工し、その際の養生方法を工夫することにより、温度ひびわれの発生が防止できるとの結果が得られた。そこで、コンクリートの配合を配合番号4で水和熱抑制剤の添加量を2.5%とし、養生温度を環境温度P2に近似する様に管理して実施工を行なうこととした。

### 3. 施工概要

施工を行なったのは、壁厚0.8m、延長21.5mの複線鉄道用箱型ラーメンである。形状を図-6に示す。水和熱抑制剤は図-6中の斜線部で示した側壁部に使用した。当日の気象条件等を表-6に示す。なお、図-6に示す位置に熱電対を埋め込み、コンクリート温度の経時変化の測定を行なった。

施工手順としては、両側の側壁に各々1台ずつのポンプ車を配し、1層を約50cmとし、順次打込みを行ない、作業終了までに約7時間を要した。

水和熱抑制剤を用いたコンクリートは、無添加のコンクリートと比べ若干粘りが強く、流動性が小さくなるので、実施工においてはバイブレータの台数を通常の3台から5台に増やした。また、ブリージングも無添加のコンクリートに比べると、幾分多いようであった。

養生方法については、事前検討の結果をふまえ、コ

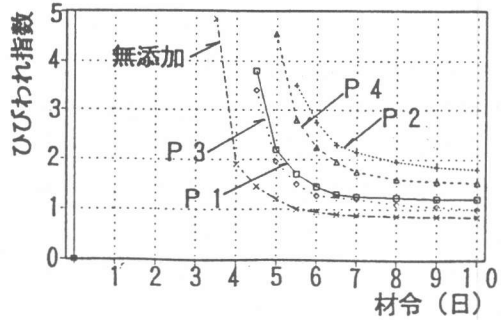


図-5 ひびわれ指数計算結果

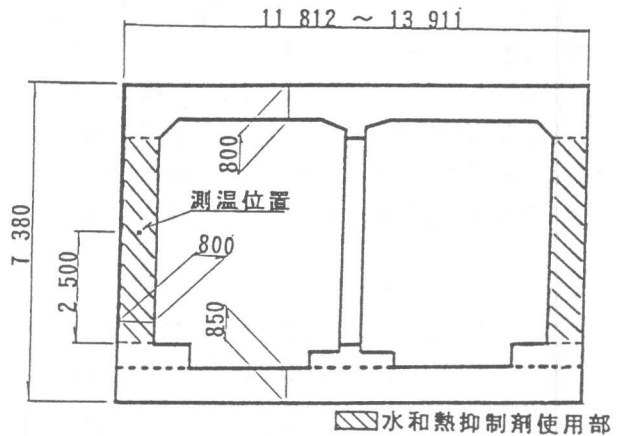


図-6 施工函体断面図

表-6 打ち込み条件

季節	春
天候	曇り
風向・風速	無風
函体内温度	17~18℃
打ち込み温度	22~25℃

ンクリート函体の温度の測定を行ない、温度上昇が緩やかになりはじめた材令2日目に養生シートで函体を被覆し、コンクリート温度がほぼピークに達した材令3日目の午後から5日間、ジェットヒーター2台により保温養生を行なった。その後は、養生シートを被覆したまま放置し、材令21日目に脱型を行なった。

#### 4. 施工結果

##### 4. 1 温度履歴

コンクリート内部温度、養生温度、外気温度の履歴および解析値を図-7に示す。

コンクリート内部温度の履歴を見ると解析値と比較して、予測最高温度ではほぼ一致している。しかし、最高温度に達するまでの日数は、解析では1.8日になっているが、実測値では顕著なピークが見られないほど緩やかな温度履歴を示し、ピーク材令は3~5日となった。また、温度下降時の温度履歴も、解析値と比較してかなり緩やかな変化となっている。

実測値と解析値との違いについては、打ち込み温度の違い、養生温度の違い等様々な要因が考えられ、今後検討していく必要があると考えている。

また、今回の水和熱抑制剤を用いたコンクリートの温度履歴と、秋期に他の箇所で行われた無添加コンクリートの温度履歴を図-8に示す。

なお、無添加コンクリートを打ち込んだ函体の壁厚は0.7m、打ち込み温度17~18℃、外気温度12±5℃であり、保温養生等は特に行っていない。

図-8を見ると、水和熱抑制剤を用いた場合、打ち込み温度、および最高温度に達するまでの周囲の温度が共に約5℃高いにもかかわらず、コンクリートの最高温度は無添加の場合と比較して約2℃低下している。また、温度下降時の履歴も、水和熱抑制剤を用いた場合、無添加に比べて緩やかな曲線を描いており、急激な温度低下によるコンクリートの引張応力の発生が緩和されていることが予想されることから、応力的にかなり有利な状態であることがわかる。

##### 4. 2 温度履歴の実測値を用いたひびわれ指数の検討

実施工を行なった結果、脱型時にはマスコンの温度応力が原因と考えられるひびわれは発生せず、打ち込み後約4か月経過した時点で片側の側壁中央部に乾燥収縮が原因と思われる微細なひびわれが1本発生したのみであった。

そこで、マスコンの温度ひびわれが発生しなかった原因を検証するため、温度履歴の実測値を

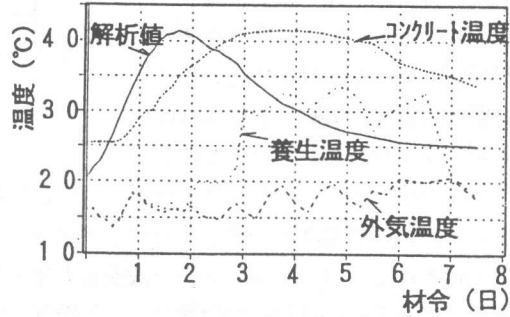


図-7 実測温度履歴

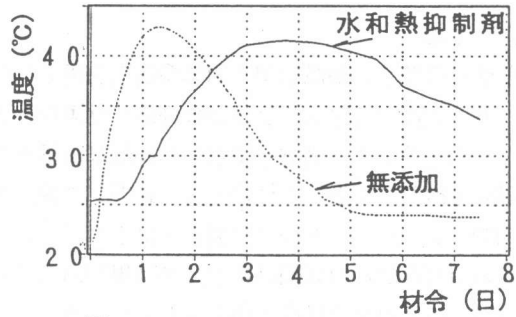


図-8 無添加コンクリートとの比較

用いて、ひびわれ指数の算定を行なった。算定方法としては、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、断熱温度上昇量式の係数をトライアルで求め、その結果を用いて、温度履歴、温度応力および、ひびわれ指数の計算を行なった。ヤング係数の算出は  $E_c(t) = 1.5 \times 10^4 \times \sqrt{f'(t)}$

(kgf/cm<sup>2</sup>) により行い、材令3日までは低減係数0.733をかけ合わせた。また、強度の推定は実験における強度発現過程により行なった。図-9に温度

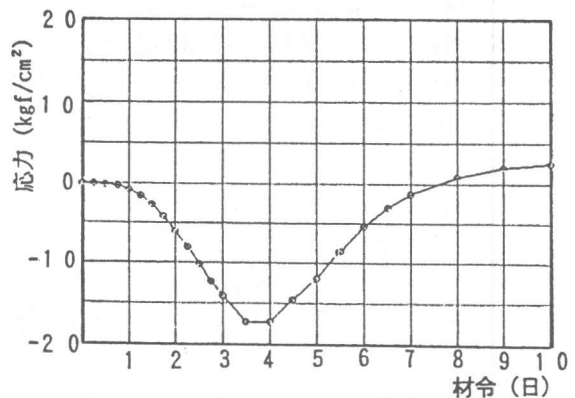


図-9 温度応力計算値

応力の計算結果を示す。これより、材令7日目までの応力は圧縮側の値を示し、かつ、コンクリート温度がほぼ外気温度と一致する材令10日目まで計算しても、わずかな引張応力しか発生しないことがわかる。コンクリートの引張強度の発現過程が明確ではなく、引張強度に推定値を用いた結果ではあるが、ひびわれ指数は6.5程度となった。このように、今回の施工結果は初期の温度ひびわれに対して応力的に非常に有利な状態にあることが解析からも推測された。

## 5. まとめ

事前解析の結果、高減水型水和熱抑制剤を用いた場合、無添加の場合と比較してひびわれ指数が1.00程度改善され、ひびわれ抑制に効果があるという結果を得た。

また、配合番号4で高減水型水和熱抑制剤の添加量を2.5%とした場合、養生温度を事前解析の環境温度P2に近づく様に十分に管理して施工を行なった結果、温度ひびわれは発生せず、無添加のコンクリートを用いた場合には1スパン3~4本発生しているのと比較すると、箱型ラーメンの温度ひびわれの抑制に十分な効果があることが確認できた。

今後は、事前解析の精度の向上や施工性について、さらに検討を行なって行きたいと考えている。

謝辞：今回の施工にあたり協力を戴いた(株)奥村組仙台支店仙石線宮城野工事所（山下重信所長）の皆様、技術的指導をして戴いた東日本旅客鉄道(株)東京工事事務所石橋忠良氏に、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 鈴木康範, 原田修輔, 前川宏一, 辻 幸和: 新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の定量化、土木学会論文集 第396号/V-9、1988
- 2) 日本コンクリート工学協会ひびわれ調査研究委員会編: マスコンクリートのひびわれ制御指針、日本コンクリート工学協会、1986
- 3) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会編: コンクリート標準示方書施工編(平成3年度版)、土木学会、1992
- 4) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム集、日本コンクリート工学協会、1989