

[2007] RC 壁状構造物の温度ひびわれ制御対策とその効果

正会員 ○新開 千弘 (大林組技術研究所)
 芳賀 孝成 (大林組技術研究所)
 正会員 十河 茂幸 (大林組技術研究所)

1. ま え が き

上下水道施設の水槽やカルバートなどで施工されるRC壁状構造物において、温度応力が原因となるひびわれの発生がしばしば問題となる。このひびわれは、多くの場合コンクリート断面を貫通しているため、構造物の水密性や耐久性などの観点から発生を制御する必要がある。

しかし、このひびわれを制御するための技術は、温度応力の予測解析や制御手法の評価などにおいて、未だ十分とは言えない。そこで、プレストレスの導入、プレクーリングの実施、膨張材の使用による温度ひびわれの制御効果の比較を、RC壁状構造物を縮小したモデルを用いた実験により行った。さらに、解析によって、配合を変更した場合のひびわれ制御効果についての検討も行った。

2. モデルによる検討

2.1 実験の概要

一般にRC壁状構造物は、底版などのコンクリート構造物に拘束される状態で施工される。この状況をモデルにより再現し、温度応力の発生状況を各種制御対策により比較検討した。

(1) 実験モデル 実験に用いたモデルは、図-1に示す高さ1.0m、幅0.3m、長さ15mのRC壁で、底版コンクリートにより拘束される。モデルの配筋などの概要を表-1に示す。なお、底版は、断面積の異なる2種類を使用した。実験は先に、底版コンクリートを施工し、これが十分なコンクリート強度に達した後、壁部のコンクリートを打設した。壁部の打設にあたっては、水和熱の外部への放出を防止し、温度上昇を確保するため、壁の全面及び底版側面を10cm厚の発泡スチロールで覆った。なお、実験は3回に分けて実施し、底版は毎回転用した。

(2) 実験の組合せ 比較項目は、制御対策としてプレストレスの導入3ケース、膨張材の利用2ケース、プレクーリングの実施2ケース、および無対策4ケースで、計11体のモデルを使用した。組合せを表-2に示す。

(3) 使用材料と配合 実験には、いずれも普通ポルトランドセメントを用いた配合強度430Kgf/cm²のレードミクストコンクリー

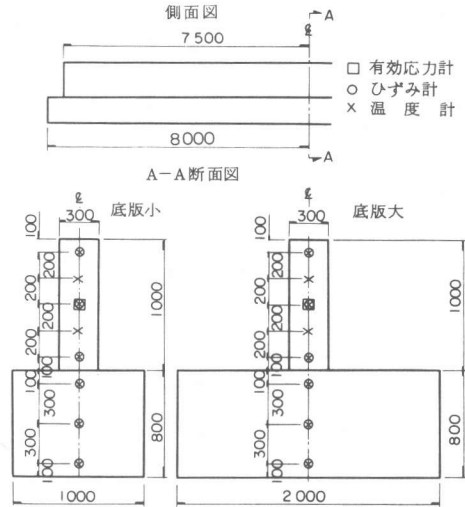


図-1 実験モデル概略

表-1 実験モデル概要

	断面積 (m ²)	段面積比	配筋	
			タテ	ヨコ
壁	0.3	—	D13 × 18本	D13×@200 2列 (底版立上げ筋)
底版	小	1:2.7	D25 × 15本	スターラップ D13×@200
	大	1:5.3	D25 × 26本	立上げ筋 D13×@200 2列

表-2 実験の組合せ

制御対策	底版	供試体数	備考
対策なし	大	1	
	小	3	
プレストレス	小	3	プレストレス導入力3ケース
膨張材	大	1	単位セメント量の30%を膨張材に置換
	小	1	
プレクーリング	小	2	冷却温度2ケース

トを使用した。その基本配合を表-3に、また、標準養生供試体の試験結果の平均を図-2に示す。

表-3 レデーミクストコンクリーの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (Kg/m ³)				
					W	C	S	G	減水剤
25	12	4	44.0	40.7	163	370	723	1076	0.862

(4) 計測項目 計測項目は、コンクリート温度、ひずみおよび有効応力とした。計測位置を図-1に示す。

2.2 無対策の温度応力

(1) 温度上昇 対策を実施しない場合の壁部温度計測結果の例を図-3に示す。最高温度上昇量は38℃となり、温度応力を再現するのに十分な温度変化量を確保できた。また、断面内の温度勾配は下方70cmにおいて最大21℃となり、それより上方での温度差はなかった。また、長さ方向の温度差はほとんどなかった。

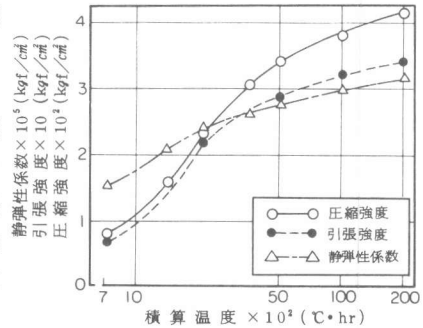


図-2 基本配合コンクリートの物性

(2) 発生応力 ひずみ計から求めた応力度の経時変化の例を底版が小さい場合について図-4に示す。また、底版が大きい場合の断面中心応力度も併せて示した。発生引張応力度が最も大きいのは断面中心で、上下端の値はほぼ等しく中心の約45%程度である。

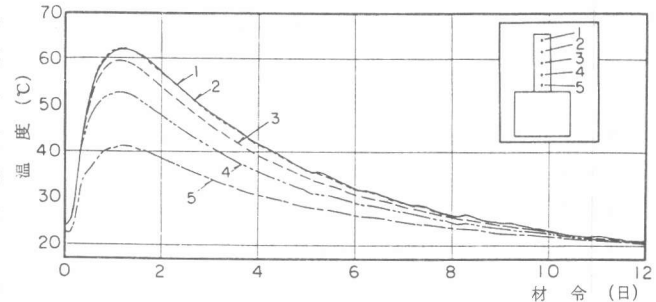


図-3 温度の経時変化 (無対策)

この様な温度、応力発生状況から、このモデルによって実際の壁状構造物の温度応力を再現できるものと判断した。底版の大小による比較では、大きな底版を用いたモデルの引張応力度が材令12日で約20%大きく、より拘束度が大きいことを確認できる。

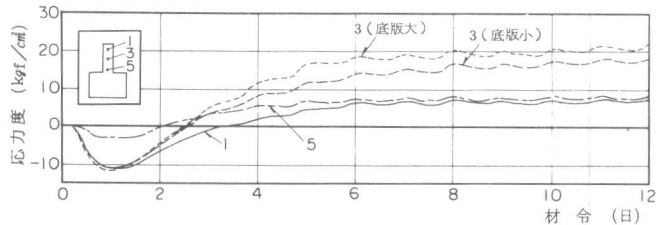


図-4 応力度の経時変化 (無対策)

(3) ひびわれ 底版が大きい場合では、無対策のモデルにいずれもひびわれが発生した。この時の有効応力計から求めた断面中心の引張応力度は、推定される部材引張強度の58%、81%で、ひびわれを防止するには、温度ひびわれ指数¹⁾に換算して約1.7以上が必要であることが認められた。一方、底版が小さいモデルには、いずれもひびわれの発生は見られなかった。

2.3 プレストレスによる温度応力制御効果²⁾

(1) 実験方法 実験には、同じ日に打設した底版の小さいモデル4体を使用し、うち3体に異ったプレストレスを導入した。プレストレスの導入は、壁部に縦方向約23cmピッチで配した4本のアンボンドPCケーブル(7本より15.2mm)を等しい力で緊張して行った。緊張力の総和を表-4に示す。プレストレス導入時期は、壁の発生応力度が圧縮から引張に転じた後の材令78時間とした。

表-4 実験ケースとPC緊張力

No.	総緊張力 (ton)	
	計画	実測
P-0	0	0
P-1	18.8	20.0
P-2	37.5	39.0
P-3	70.0	76.1

(2) 実験結果 有効応力計から求めた断面中心における応力度の

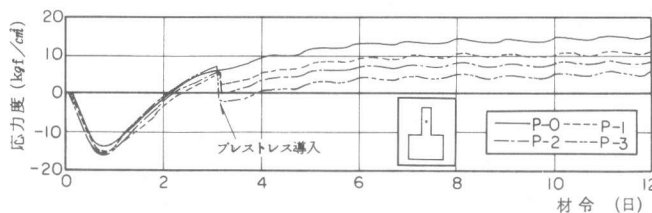


図-5 応力度の経時変化 (プレストレス)

経時変化を図-5に示す。プレストレス導入により、直接的に発生引張応力度が減少するのに加えて、その後の温度降下に伴う引張応力度の増加量も減少する傾向が見られる。この様に、プレストレス導入は温度応力の低減に直接、間接的に有効な手段の一つであることが認められた。

図-6にプレストレス導入による中央断面の応力度変化量を示す。破線で示したプレストレス導入量の予測値に比べて、緊張力が大きい場合には所定の圧縮応力の導入ができていない。また、長さ方向においては、図-7に示す様に端部の応力度増加量が大きく、壁の両端がそり上る変形を生ずる。したがって、プレストレスによって、より大きな圧縮力を導入するためには、上下方向にも緊張をするなどの対策が必要となる。

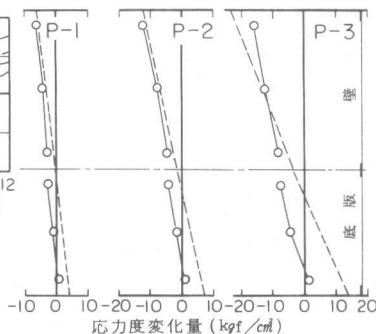


図-6 プレストレスによる
応力度変化(上下方向)

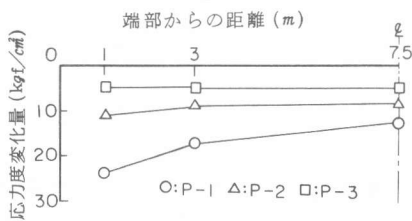


図-7 プレストレスによる応力度変化
(長さ方向)

2.4 膨張材による温度応力制御効果

(1) 実験方法 実験には、基本配合コンクリートを使用した底版の小さいモデル(E-0)、膨張コンクリートを使用した底版の小さいモデル(E-1)および底版の大きいモデル(E-2)の3体を使用した。膨張コンクリートは、基本配合の単位セメント量の30Kg/m³を水和熱抑制型膨張材を置換したものとした。また、モデルと同断面のダミー供試体により無応力計による膨張コンクリートの自由膨張ひずみの測定も併せて実施した。なお、モデルの打設は3体とも同じ日に行った。

(2) 実験結果 膨張コンクリートの物性を図-8に示す。膨張コンクリートは供試体作製時に拘束を与えなかったため、基本配合コンクリートに比べ、引張強度が若干小さい結果となった。

断面中心における温度および有効応力計から求めた応力度の経時変化を図-9に示す。初期の温度上昇は、E-1, 2の方が若干遅れる傾向を示すが、最高温度および

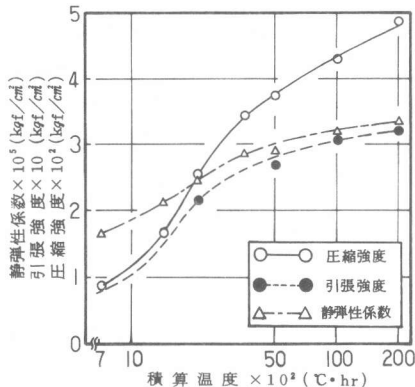


図-8 膨張コンクリートの物性

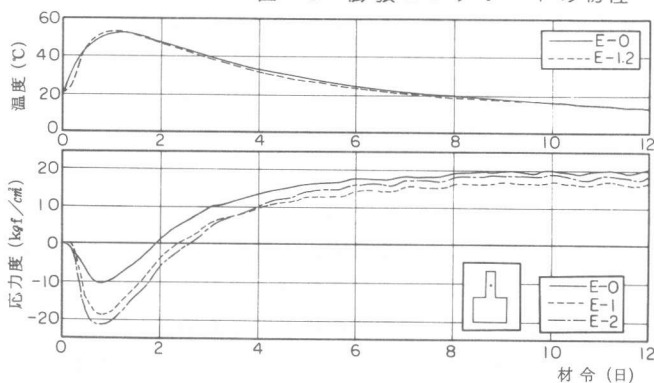


図-9 温度・応力度の経時変化 (膨張材)

び温度降下時の傾向は、いずれもほぼ等しい。

温度上昇時に発生するコンクリートの圧縮応力度は、ケミカルプレストレスの作用により E-0 に比べ E-1, 2 の方が大幅に大きい。E-0 と E-1 の最大圧縮応力度の差から求めたケミカルプレストレス量は約 8 Kgf/cm² である。しかし、温度が降下して発生応力が圧縮から引張に転じるに従って、E-0 と E-1 の応力度差は減少し、材令 12 日では約 4 Kgf/cm² と、初期に導入されたケミカルプレストレスの半分程度になる。これは、膨張材の膨張ひずみの発生が初期に集中するため、ケミカルプレストレスの増加が初期の段階でほぼ終了し、以後はクリープなどの影響でその効果が減ずるためと思われる。なお、ダミー供試体のひずみ測定結果では、膨張作用は約 14 時間でほぼ終了していた。

E-2 は底版が大きく強い拘束を受けるため、ケミカルプレストレス量は E-1 に比べさらに大きい。E-2 は、同じ条件で実験したモデルがないため単純な比較はできないが、図-4 の底版の大きなモデルの例と比較・推定しても、発生引張応力度の低減効果は E-1 以上になるとは思われぬ。

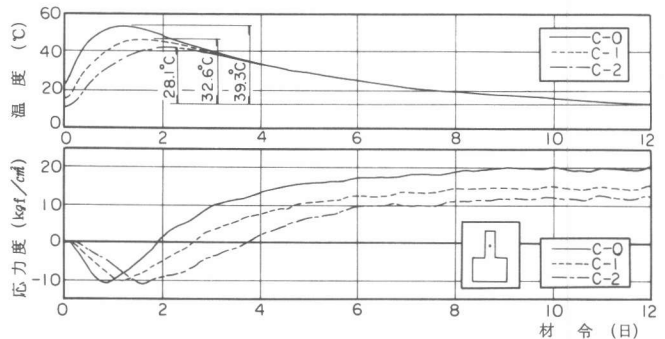
2.5 プレクーリングによる温度応力制御効果³⁾

(1) 実験方法 実験は同じ日に打設した底版の小さいモデル 3 体を使用し、うち 2 体を目標冷却温度 -5℃、-10℃ として液体窒素を用いたプレクーリング⁴⁾ を実施した。実験に用いたコンクリートは基本配合としたが、冷却中のアジテートによる若干のスランプロスを想定し、単位水量のみを若干割増した。

(2) 実験結果 プレクーリング実施前後におけるコンクリート温度と冷却量を表-5 に示す。冷却により、コンクリートの打設温度は C-0 に比べ C-1 で 6.5℃、C-2 で 10.4℃ 低くなった。断面中央における温度および有効応力計から求めた応力度の経時変化を図-10 に示す。プレクーリングによって最高温度が低くなり、その材令も遅くなった。また、材令 12 日におけるコンクリート温度までの、最高温度からの降下量は、C-0 の 39.3℃ に対して C-1 で 32.6℃、C-2 で 28.1℃ となり、ほぼプレクーリングした温度だけ温度降下量も小さくなった。また、引張応力度の発生は、最高温度到達材令の遅れに伴って遅くなり、同じ材令における発生引張応力度はかなり小さくなった。ちなみに、材令 12 日では、引張応力度が C-0 に比べて C-1 で約 5 Kgf/cm²、C-2 で約 8 Kgf/cm² 減少しており、温度応力がプレクーリングの実施によって大幅に減少することが確認できる。

表-5 実験ケースとコンクリート温度

No.	コンクリート温度 (°C)			
	目標冷却量	冷却前	冷却後	実施冷却量
C-0	0	18.0	—	0
C-1	-5.0	17.0	11.5	-5.5
C-2	-10.0	17.0	7.6	-9.4



3. 解析による配合の比較 図-10 温度・応力度の経時変化 (プレクーリング)

コンクリート配合による温度応力制御対策のうち、流動化剤および高炉セメント B 種を使用し、コンクリートの温度上昇を抑制する方法について、前述のモデル実験に近似した条件での温度測定結果を用い、応力解析により比較検討を行った。

(1) 解析の概要 解析は、基本配合 (N)、流動化剤の使用による単位セメント量の低減 (P) および高炉セメント B 種を用いて強度管理材令を 91 日とした場合 (B) の 3 ケースに

ついて実施した。

コンクリートの配合は、モデル実験と同じ材料を使用し、配合強度430Kgf/cm²でスランプ12cmの配合を試験練によって決定した。コンクリートの配合を表-6に、各配合における強度試験結果を図-

表-6 解析ケースとコンクリート配合

No.	セメント	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (Kg/m ³)					
				W	C	S	G	減水剤	流動化剤
N	N	44.0	40.7	163	370	716	1077	0.93	—
P		44.0	42.0	151	343	761	1085	0.86	2.58
B	BB	54.5	42.0	160	294	761	1089	0.74	—

11に示す。高炉セメントを使用した場合には、強度管理材令を91日としたため、水セメント比が大きくなることにより、単位セメント量が大幅に減少した。

コンクリートの温度履歴は、4面を厚さ10cmの発泡スチロールで断熱し、両端部を放熱面とした30×30×180cm 供試体を作製し、前述のモデル実験に近い状況での測定値を応力解析に用いた。応力解析は、クリープを考慮した単純拘束モデル法により、モデル実験の底版の大きいものを想定して行った。

(2) 解析結果 温度測定結果を図-12に示す。図中に示した破線は、前述のモデル実験における断面

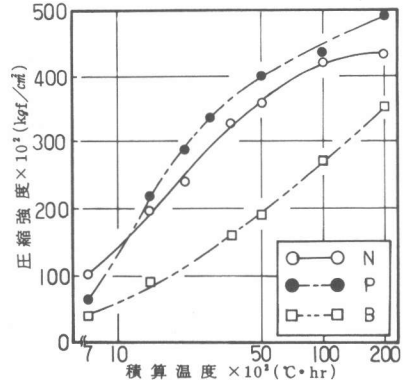


図-11 コンクリートの強度

中心温度の測定結果例である。Nの温度履歴はモデル実験に比べて最高温度が高く、逆に温度降下速度は早い、全体として近似した結果が得られた。また、配合の違いを比較すると、Nに比べPでは約7°C、Bでは約13°C最高温度が低く、その到達時間も遅くなっている。

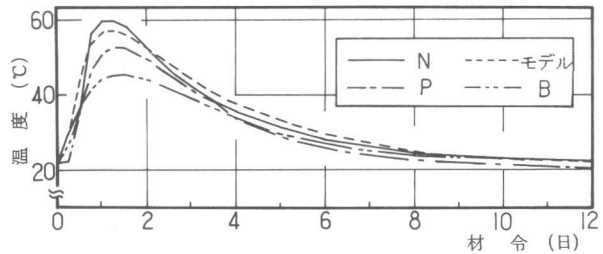


図-12 温度の経時変化 (解析)

応力解析結果を図-13に示す。最高温度の低下に伴ない、P、Bいずれの場合も引張応力度は減少しており、また、発生時期も遅れる傾向にある。材令12日における引張応力度の比較では、Nに対してPは約85% Bは約55%となり、特にBを用いた場合の温度応力低減効果が大きい。しかし、Bの場合には強度発現も遅く、温度ひびわれ制御効果は、引張応力度低減量だけでは十分に評価できない。

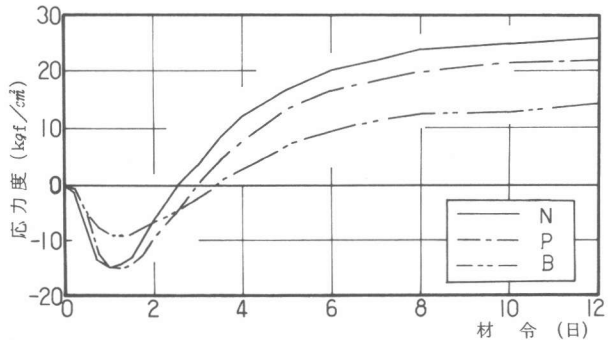


図-13 応力度の経時変化 (解析)

4. 温度ひびわれ制御効果の比較

各温度ひびわれ制御対策について、コンクリート部材引張強度と発生引張応力度の比から定まる温度ひびわれ指数を求め、その経時変化を図-14に示す。温度ひびわれ指数は、いずれも材令10日~12日において最低値となり、最もひびわれ発生の危険性が高くなる。温度ひびわれ指数の上昇に大きな効果が見られる対策は、プレストレスの導入、プレクーリングの実施で、流動化剤および高炉セメントの使用もかなり効果的である。ただし、この結果では個々の対策

ごとに無対策の結果が異なるため、単純に数値による比較はできない。

各温度ひびわれ制御対策を比較するため、個々の実験における材令12日の温度ひびわれ指数が無対策時に1となる状況を想定し、個々の温度ひびわれ指数を換算した結果を図-15に示す。温度ひびわれ指数の換算は、個々の制御対策における応力度を、無対策時の応力度を引張強度と等しくするために要する割増しに応じた比率もしくは量で換算することにより行った。なお、応力度の換算は、プレクーリングの実施や流動化剤、高炉セメント使用の様に、温度応力低減効果が主としてコンクリートの温度上昇量低減により得られる場合には、応力度低減比率で行った。また、プレストレスの導入や膨張材の使用の様に、温度応力低減効果が主として圧縮力による引張応力度低減によって得られる場合には、応力度低減量で行った。

この結果、プレクーリングによりコンクリートの打設温度を10℃低下させた場合の効果が最も大きく、次いで高炉セメントの使用、プレストレスの導入の順となった。また、流動化剤の使用についてもかなり効果的であることが認められる。一方、膨張材についてはその効果が、他に比べて小さかった。

5. あとがき

拘束のあるRC壁状構造物を対称として、各種温度ひびわれ制御対策を比較した結果、それらの定量的評価により、プレクーリングの実施、プレストレスの導入および高炉セメントを用いて強度管理材令を長期とする方法が効果的であることが認められた。しかし、これらの結果は一実験・解析により比較して得られたものであり、さらに、種々の条件下における調査・研究によって、実施工に適応できる様、評価の精度を向上させる必要がある。

[参考文献]

- 1) JCI編：マスコンクリートのひびわれ制御指針 pp.71~72
- 2) 新開ほか：プレストレスによるRC壁の温度ひびわれ制御に関する実験，土木学会第40回年次学術講演会概要集 1985 pp.553~554
- 3) 小沢ほか：プレクーリングによる壁状構造物の温度応力，土木学会第41回年次学術講演会概要集 1986 pp.401~402
- 4) 一瀬ほか：液体窒素によるコンクリートの冷却，セメント技術年報 1986 pp.253~256

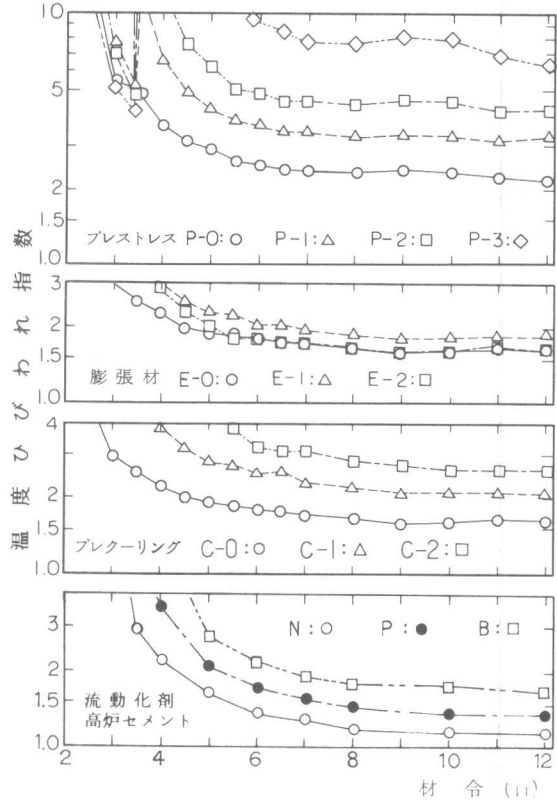


図-14 温度ひびわれ指数の経時変化

温度ひびわれ 制御対策	温度ひびわれ 制御対策	温度ひびわれ指数		
		1.0	1.5	2.0
プレ ス ト レ ス	P-1	1.13		
	P-2	1.25		
	P-3	1.42		
膨 張 材	E-1	1.05		
プレ クー リ ン グ	C-1	1.32		
	C-2	1.62		
流 動 化 剤	P	1.22		
高 炉 セ メ ン ト	B	1.47		

図-15 温度ひびわれ指数の比較