

スラブ状コンクリートにおける温度ひび割れ制御対策の評価

Evaluation of Method to Control the Thermal Cracking in Slab-concrete under Restraint

西田 徳行*
Noriyuki Nishida

浅井 功*
Isao Asai

土橋 吉輝*
Yoshiteru Dobashi

木村 一正**
Kazumasa Kimura

要 約

コンクリート構造物の設計および施工時のひび割れ制御対策方法は、示方書などに提示されているが、その効果は対象構造物により異なるため不明な点が多いと言える。

本研究では、比較的打込み高さが小さく外部拘束の影響を大きく受けるスラブ状基礎コンクリート施工において、温度ひび割れ制御対策として低発熱型コンクリートおよび膨張コンクリートを適用し、その効果について普通コンクリートを基準に施工性、経済性、コンクリート物性などから総合的に比較・検討した。また、計測結果をもとに1次元の温度応力解析におけるパラメータの検討も行った。その結果、この種のスラブ状コンクリートでは、膨張コンクリートを適用することが最も有効であることが実証された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 試験施工概要
- § 3. 試験結果および考察
- § 4. 解析パラメータの検討
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

コンクリート構造物の温度ひび割れに関する研究は、これまでに数多くなされ、すでに示方書など^{1,2)}に設計および施工時のひび割れ制御対策が記載されている。しかしながら、その対策と効果は、対象とする構造物により異なるため不明確な点があると言われている。また、近年、低発熱型セメント、膨張混和材などを用いたコンクリートが、温度ひび割れ制御対策として実用化されている。こ

れらのコンクリートの報告²⁻⁶⁾は幾つかあるが、不明な点が多いのが現状であると言える。

本研究では、スラブ状コンクリートにおける温度ひび割れ制御対策の効果を把握・評価することを目的に、比較的打込み高さが小さく、外部拘束の影響を大きく受けるスラブ状基礎コンクリートの試験施工を行った。温度ひび割れ制御対策は、温度抑制および収縮補償を使用材料面で配慮して低発熱型コンクリートおよび膨張コンクリートを適用し、その効果については従来のコンクリート（以下、普通コンクリート）を基準に施工性、経済性、コンクリート物性、ひび割れ調査結果などから総合的に比較・検討した。また、示方書などに示されている簡易的な1次元の温度応力解析を行う際、適切な設定が必要となるパラメータの検討を計測結果をもとに行った。

§ 2. 試験施工概要

2-1 工事および試験概要

本工事は、中部電力(株)愛知変電所新設の内、GIS (ガス

* 技術研究所土木技術課

** 中部(支)中電愛知(出)

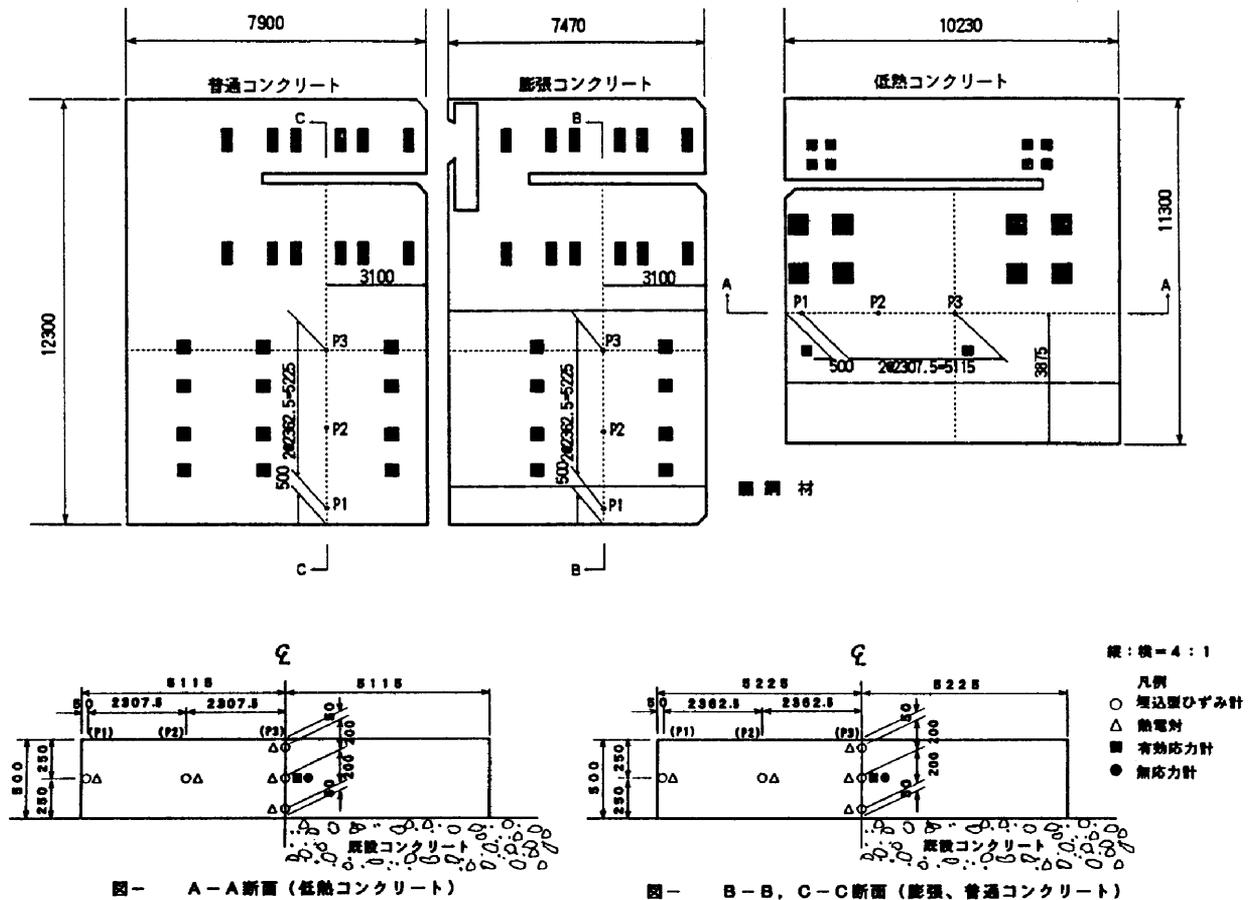


図-1 形状寸法および計器配置図

絶縁遮断器) 基礎コンクリート施工である。試験施工を行ったスラブ状コンクリートは厚さ50cmの2次コンクリートであり、既設の1次コンクリート(厚さ1m)上に打設することから厳しい外部拘束条件となり、セメントの水和熱による温度ひび割れの発生が予想された。

工事名称：愛知変電所(500/275KV)新設の内
機器基礎工事

所在地：愛知県西加茂郡小原村大字川下地内

試験場所：500KV GIS Cブロック

試験規模：3ブロック(57.8m³, 45.9m³, 51.9m³)

打設年月日：1993年9月10日

現場計測：1993年9月10日～10月1日

試験工事は、2つの温度ひび割れ制御対策を施したコンクリートと従来のコンクリートの施工を、同規模な3つのブロックに対して同日に行った(図-1参照)。

2-2 温度ひび割れ制御対策

一般に、コンクリートの温度ひび割れ制御対策の基本的な考え方は、以下のとおりである。

①コンクリートの温度を小さくする。

→ セメント量の低減、低熱性セメントの使用、打込み

温度の低減、リフト高の低減、クーリングなど。

②発生する応力を小さくする。

→ 外部拘束度の低減、温度差の低減など。

③発生する温度応力に対する抵抗力を付与させる。

→ プレストレスの導入、鉄筋量の増加など。

本試験工事では、施工条件、地理的条件および使用する生コンクリート工場の設備条件などを使用材料面で配慮して；水和熱抑制型膨張材を用いた膨張コンクリート(①、③)および超低発熱セメントを用いた低熱コンクリート(①)の2つのひび割れ制御対策を適用した。

2-3 コンクリート配合および打込み

試験工事に使用したコンクリート配合(設計基準強度 $f_{ck}(28) = 240\text{kgf/cm}^2 (23.5\text{MPa})$)を表-1、打込み時間を表-2に示す。養生方法は湛水養生とし、実施期間はコンクリート打設の翌日から材齢7日まで行った。

2-4 現場計測および強度試験

温度ひび割れ計測に関する測定は、標準養生供試体によるコンクリートの力学的特性としての強度試験(圧縮強度、引張強度、静弾性係数)および打設コンクリートの現場計測(20日間)とした。現場計測の項目と使用計

表-1 コンクリート配合

種類	粗骨材の最大寸法(mm)	スラップの範囲(cm)	空気量の範囲(%)	水比 W/C (%)	細骨材 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
						水 W	セメント C	混和材 (BLEN)	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
低熱	25	8±2.5	4±1	50.0	43.0	148	296	—	771	1039	0.592
膨張	25	8±2.5	4±1	50.0	43.0	158	286	30	768	1036	0.632
普通	25	8±2.5	4±1	50.0	43.0	158	316	—	768	1036	0.632

設計基準強度 : $f'_{ck}(28)=240\text{kgf/cm}^2$

表-2 打込み時間および初期値設定時刻

種類	打込み時間(時刻)	一般的な凝結時間(hr)	表面仕上げ完了(時刻)	初期値設定時刻		時間差(hr)
				温度	ひび割れ	
低熱	10:55-12:30	7.9(晩朝)~11.7(晩朝)	翌 2:00頃	13:00	21:00	8.0
膨張	9:00-10:20	6.5(晩朝)~ 8.5(晩朝)	15:30頃	11:00	14:00	3.0
普通	13:45-15:30	4.0(晩朝)~ 5.1(晩朝)	17:00頃	16:00	18:00	2.0

表-3 現場計測項目

計測項目	計器	型名	個数
コンクリート温度	熱電対	T-GS-0.65	5箇所×37m ² ×15
コンクリート応力	有効応力計	GK-60-505	1箇所×37m ² ×3
コンクリート熱膨張率	無応力計	KM-100B+KM-F-51	1箇所×37m ² ×3
コンクリートひずみ	埋込型ひずみ計	KM-100B	6箇所×37m ² ×18
外気温	熱電対	T-GS-0.65	1箇所

表-4 コンクリート強度試験結果

材齢(日)	低熱コンクリート(kgf/cm ²)			膨張コンクリート(kgf/cm ²)			普通コンクリート(kgf/cm ²)		
	圧縮	弾塑性	引張	圧縮	弾塑性	引張	圧縮	弾塑性	引張
3	63	180000	7	189	240000	18	141	210000	17
7	120	210000	13	239	270000	23	214	250000	23
14	200	270000	21	270	300000	28	255	270000	26
28	226	300000	23	298	290000	30	263	290000	28
95	315	350000	31	385	340000	33	312	310000	33

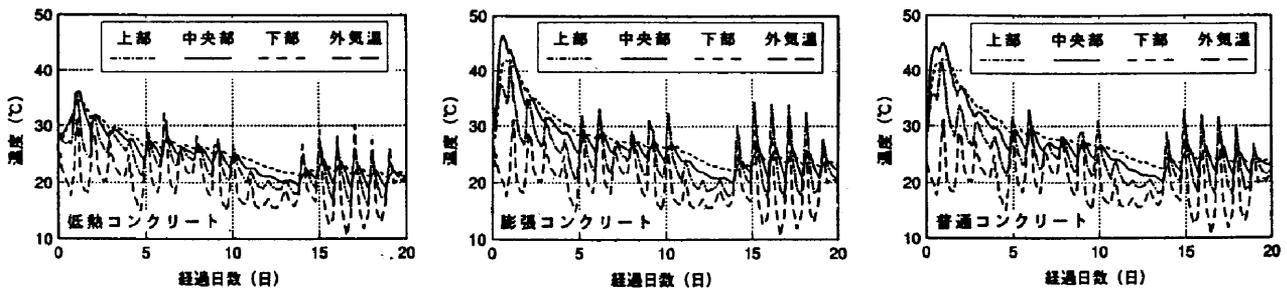


図-2 コンクリート温度の経時変化

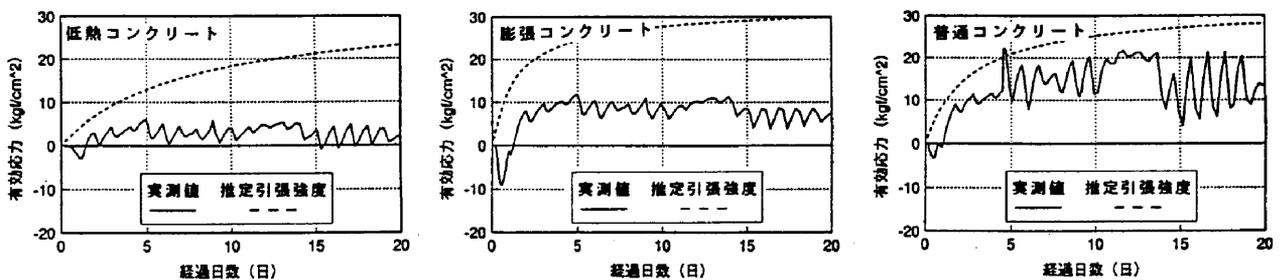


図-3 コンクリート有効応力の経時変化

器を表-3、計器設置位置を図-1に示す。

§ 3. 試験結果および考察

3-1 計測結果および強度試験結果

各コンクリートにおける平面中央部の温度経時変化を図-2、応力経時変化を図-3に示す。なお、超低発熱型セメントを用いた低熱コンクリートなどでは、温度と応力の発現に時間差が生じる²⁾とされていることから、

本計測では有効応力計の値をもとに初期値設定時刻を区別した(表-2参照)。強度試験結果を表-4に示す。

3-2 ひび割れ制御対策の総合評価

ひび割れ調査は材齢17日と材齢76日の2回行った。材齢76日のひび割れ発生状況を図-4示す。低熱コンクリートの最高温度は、36.1°C(1.08日)で最も小さく、発生応力は推定引張強度を下回っているが、打設後4日目に亀甲状の表面ひび割れが発見された。これは、コンクリート部材内の温度差に伴う内部拘束による応力と、凝

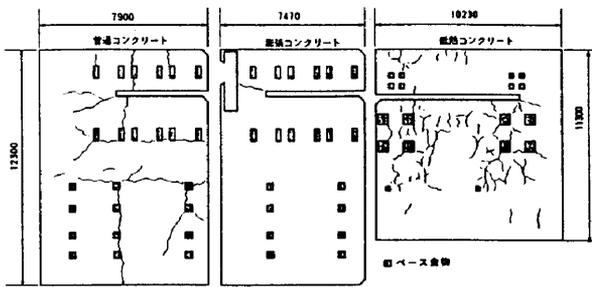


図-4 ひび割れ調査結果 (材齢76日)

表-5 温度ひび割れ制御対策の総合評価

種類	ひび割れ本数	ひび割れ幅(mm)	ひび割れ種類	施工性	経済性	総合評価
低熱	多数	0.10以下	温度ひび割れ、プラスチックひび割れ(表面)	×	△	△
膨張	1本	0.10程度	温度ひび割れ(貫通)	○	△	○
普通	16本程度	0.10~0.15	温度ひび割れ(貫通)	△	○	×

結時間が長いことによるレイタンス処理などの施工上の要因が複合された結果、発生したものと推定される。また、低熱コンクリートは、凝結時間が長いことから表面仕上終了までの作業時間が他に比べて長くなった(表-2参照)。膨張コンクリートの最高温度は、46.4℃(0.54日)であり、他と比較して最も高かった。また、発生応力は、推定引張強度よりも小さい。ひび割れは、材齢17日に1本発見された。これは、応力が集中しやすいプロック形状が変化する箇所に発生しており、結果的に外部拘束が卓越した温度応力によるものと推定される。普通コンクリートの最高温度は、45.1℃(0.96日)であり、発生応力は材齢4.5日程度で推定引張強度を上回った。ひび割れは、コンクリート中に埋設されたベース金物に沿って16本発生しており、規則性が認められた。また、ひび割れ発見は、打設後4日目であったことから外部拘束が卓越した温度応力による貫通ひび割れと推定された。ひび割れ幅は、材齢76日の調査において0.10~0.15mmであった。その後、冬季測定において0.3mm程度(普通コンクリート)になったものがあった。これは、冬季冷込みに伴う収縮により、ひび割れ幅が大きくなったものと考えられる。

本試験施工において低熱、膨張および普通コンクリートを適用した温度ひび割れ制御対策を総合的に評価した結果、表-5に示すように膨張コンクリートを適用することが最も有効であることが実証された⁷⁾。

§ 4. 解析パラメータの検討

コンクリートの温度応力解析は、温度をもとに応力を

求めることから、まず、温度を正確に求めることが必要である。一般に、温度解析結果は応力解析よりも実測値と良く一致するが、部材厚さが薄くなると環境温度と放熱の影響によりセメントの水和反応が不活性になる場合があり、断熱温度上昇の推定式による解析値と合わない場合があると言われている。また、応力解析では若材齢時コンクリートの力学的特性が十分に解明されているとは言い難いため、正確に予測することは難しい。さらに、近年、温度ひび割れ制御対策として超低発熱型セメントおよび膨張混和材などが実用化されているが、これらを用いたコンクリートの温度応力発生状況および解析手法については、不明な点が多い。

ここでは、実測結果と解析結果を比較し、今後、この種の解析を行う場合の各コンクリートの性状と適切なパラメータ値の把握を目的に検討した^{8,10,12)}。

4-1 コンクリートの有効弾性係数

簡易的にクリープやリラクゼーションを考慮する方法として用いられる有効弾性係数を計測データから設定する場合、データ処理が複雑となることが多い。そこで、ひずみ、応力などの計測結果を用いて有効弾性係数の設定方法を検討した⁸⁾。

(1) 有効弾性係数の設定方法

有効応力と有効ひずみの関係は、次式で与えられるとする。

$$\Delta\sigma = \Delta\varepsilon_e \cdot E_e(t)$$

ここに、 $\Delta\sigma$ ：有効応力増分 (kgf/cm²)

$\Delta\varepsilon_e$ ：有効ひずみ増分

$E_e(t)$ ：時間 t の有効弾性係数 (kgf/cm²)

有効弾性係数の設定は、実測の有効応力と有効ひずみの関係が連続的であることを確認し、各計測区間の有効弾性係数を求めた(図-5、6参照)。この段階で回帰式を求めることは可能であるが、実測データは大きくばらついていることが一般的である。そこで、実測データをHanningウィンドウ⁹⁾による3回の平滑化を行い、最小二乗法で回帰式を求めた(図-6参照)。このHanningウィンドウとは、次式によって平滑化を行うものである。

$$G_k = 0.25G_{k-1} + 0.50G_k + 0.25G_{k+1}$$

ここに、 G_k ：ある点における値

G_k ：ある点における重み平均値

なお、値が負になるものと 5.0×10^3 kgf/cm² (4.9×10^4 MPa)以上のものは平滑化の際に無視した。これは、ひずみ計と有効応力計の感度の違いや、設置位置の多少のズレにより生ずるものと考えられる。つぎに、計算応力(実測有効ひずみ×有効弾性係数)と実測値の比較検討を行い、初期の圧縮側応力ピーク材齢を目安に係数の

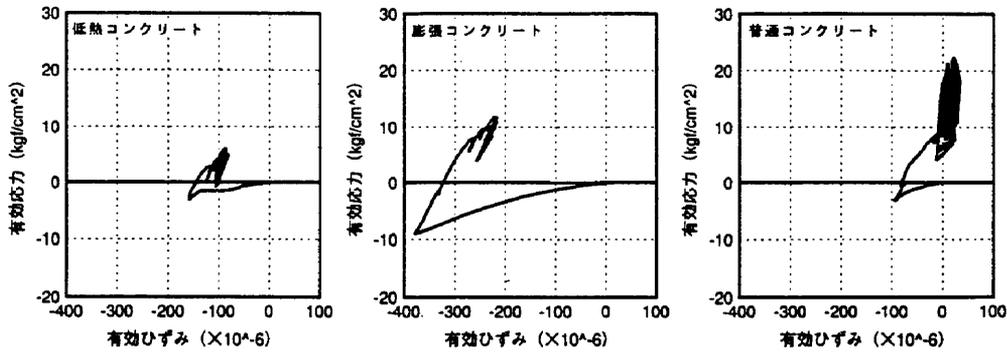


図-5 有効応力と有効ひずみの関係

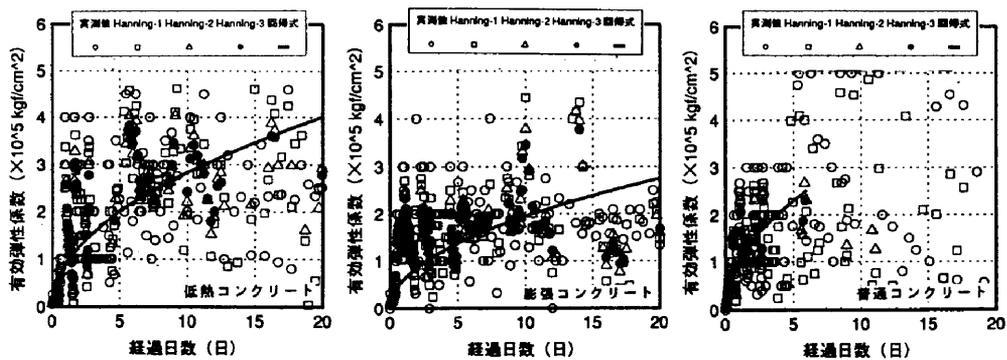


図-6 実測弾性係数の平滑化

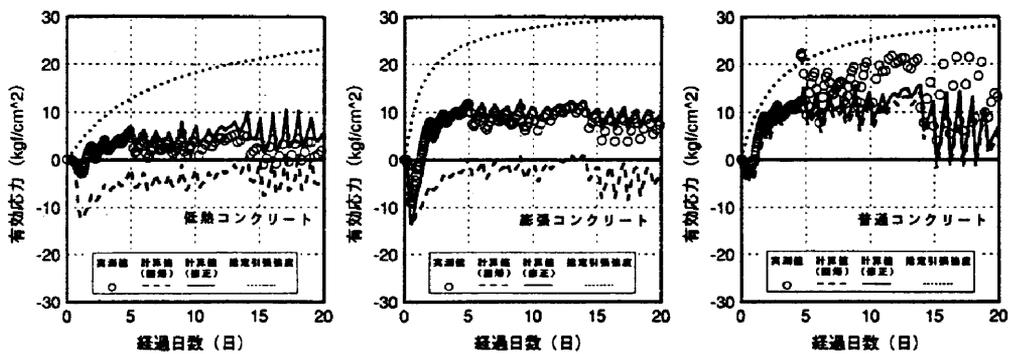


図-7 計算応力と実測応力の経時比較

表-6 各コンクリートの有効弾性係数

種類	有効弾性係数推定式 (kgf/cm²)
低熱	回帰 $E_s = 89600 \sqrt{t}$
	修正 $1.1258 \pm t E_s = 19000, \Delta E_s = 89600 \sqrt{t}$
膨張	回帰 $E_s = 61600 \sqrt{t}$
	修正 $0.5428 \pm t E_s = 61600 \sqrt{t}, \Delta E_s = 160000$
普通	回帰 $E_s = 102900 \sqrt{t}$
	修正 $0.4178 \pm t E_s = 30000, \Delta E_s = 102900 \sqrt{t}$

普通コンクリートは、材齢6日以内のデータ使用。

修正を行った。

(2) 検討結果

求めた回帰式と修正有効弾性係数を表-6, 計算応力と実測値の経時変化比較を図-7に示す。低熱コンクリートでは、材齢1.125日までを一定値とする修正有効弾性係数を用いた計算値が実測値と良く一致したが、材齢約5日以降、多少のズレが生じている。これは、コンクリート表面部に発生したひび割れの影響と考えられる。膨張コンクリートでは、材齢0.542日以降を一定値とする修正有効弾性係数を用いた計算値が実測値とほぼ一致した。なお、0.542日以降、有効弾性係数が一定値となるのは、膨張効果と発現応力との相殺作用と考えられる。普通コンクリートでは、材齢約5.0日のひび割れ発生前まで実測

表一七 温度解析条件およびパラメータ

温度解析条件およびパラメータ (解析期間7日)			
環境条件	外気温		実測温度
	既設コンクリート温度		25.0℃
	地盤温度		20.0℃
コンクリートの打込み条件	打込み温度		28.1℃(既設), 30.6℃(既設), 29.4℃(普通)
	打込み高さ		50cm
	養生方法		灌水養生 7日間
熱特性	熱容量	地盤	900 kcal/m ³ ℃
		コンクリート	715 kcal/m ³ ℃
	熱伝導率	地盤	1.5 kcal/mh℃
		コンクリート	2.4 kcal/mh℃
熱伝導率 養生面		7 kcal/m ² h℃	
コンクリートの断熱温度上昇式	低熱コンクリート		$Q(t)=22.6(1-e^{-0.11t})$
	膨張コンクリート		$Q(t)=46.7(1-e^{-0.11t})$
	普通コンクリート		$Q(t)=46.8(1-e^{-0.11t})$

値と一致している。ひび割れ発生後は、図一五の勾配が途中で急に変化している。また、3回の平滑化を行うことで6日以降のデータは自動的に消去された。

4-2 温度応力解析

(1) 解析手法

温度解析の手法は、対象構造物がスラブ状であり、端部を除き熱拡散(放熱)方向がコンクリート上面および下面からの1次元であると判断されることから、1次元有限要素法による非定常熱伝導解析とした。

温度応力解析の手法は、示方書に示されているコンベンションライン法とした。

(2) 解析条件

温度解析モデルは、23要素、24節点の1次元モデルとし、材質は打設(新)コンクリート(0.5m)、セメントの水和反応が終了していると仮定する旧コンクリート(1.0m)および地盤(3.0m)の3種類とした。境界条件は、打設コンクリートの上面を熱伝達境界、地盤の下面を断熱境界とし、熱伝達境界における境界温度および打設コンクリートの初期温度は実測値とした。なお、解析上、実測値がない節点は測点間の直線補間で設定し、旧コンクリートおよび地盤の初期温度は25℃および20℃と仮定した。温度解析条件を表一七に示す。

応力解析モデルでは旧コンクリートを拘束体として温度応力を求められるが、この場合、拘束体の剛性は旧コンクリートとその下の地盤の複合された剛性となり、その取扱いが不明瞭となる。よって、ここでは旧・新コンクリートの両者を被拘束体と考え、地盤を拘束体とした。応力解析条件を表一八に示す。

表一八 応力解析条件およびパラメータ

応力解析条件およびパラメータ (解析期間10日)			
材料	低熱	膨張	$36.1 \times 10^{-6} / \text{℃}$ (0.00~0.46日)
		普通	$12.3 \times 10^{-6} / \text{℃}$ (0.46~0.83日)
		普通	$9.8 \times 10^{-6} / \text{℃}$ (0.83~20.0日)
	膨張	膨張	$32.9 \times 10^{-6} / \text{℃}$ (0.00~0.42日)
		普通	$8.7 \times 10^{-6} / \text{℃}$ (0.42~20.0日)
		普通	$12.3 \times 10^{-6} / \text{℃}$ (0.00~0.86日)
普通	膨張	$9.8 \times 10^{-6} / \text{℃}$ (0.88~20.0日)	
	普通		
	普通		
弾性係数	低熱	$f_c = 371.3t / (14.5+t)$	
	膨張	$f_c = 338.6t / (2.51+t)$	
	普通	$f_c = 316.4t / (3.67+t)$	
引張強度	低熱	$E_c = \phi \times 15000 \sqrt{f_c}$, $1.1258tE_c = 19000$, 以降 $E_c = 89600 \sqrt{f_c}$	
	膨張	3日まで $\phi = 0.73$, $0.5428tE_c = 61600 \sqrt{f_c}$, 以降 $E_c = 160000$	
	普通	5日以降 $\phi = 1.00$, $0.4178tE_c = 30080$, 以降 $E_c = 102900 \sqrt{f_c}$	
引張弾性係数	低熱	$f_t = 33.97t / (10.74+t)$	
	膨張	$f_t = 1.4 \sqrt{f_c}$, $f_t = 33.17t / (2.64+t)$	
	普通	$f_t = 31.95t / (2.67+t)$	
外部拘束係数	外部拘束係数 R_w	0.1	
解算係数	解算係数 R_w	1.0	

□ は、示方書に提示されている推定式。R_wは、 ϕ 反転前後とも1.0。

(3) 検討方法

温度解析では熱伝達率について、①示方書を用いた場合、②熱伝達率を変更した場合の実測温度と解析値との比較検討を行った¹⁰⁾。熱伝達率に着目した理由は、部材厚が小さい場合はコンクリート温度が外気温の影響を受けやすいからである¹¹⁾。なお、比較期間は、コンクリート温度が外気温にほぼ平衡した材齢7日までとした。

応力解析ではコンクリートの力学的特性について、①示方書の推定式を用いた場合、②試験および計測結果による推定式を用いた場合、以下の実測応力と解析値との比較検討を行った¹²⁾。比較期間は10日間とした。ただし、ここでの実測応力は、部材中央断面の中央部に設置された有効応力計の値と合せるように求められた修正有効弾性係数を用いているため中央部の値は信頼できるが、上部および下部の応力は推定値である。

(4) 検討結果

温度解析ケースと結果を表一九、温度の経時変化を図一八に示す。本構造物の場合、膨張および普通コンクリートにおいて一般的な熱特性値を用いた解析値(ケース3, 5)は、ピーク温度が5℃程度大きい結果となった。これは、部材厚が小さいためにコンクリート温度が外気温の影響を大きく受けたものと考えられる。そこで、ケース4, 6に示すように熱伝達率を大きく(7→30kcal/m²h℃ (8.14→34.9 W/mk)) することで良好な結果を得た。低熱コンクリートにおいて一般的な熱特性

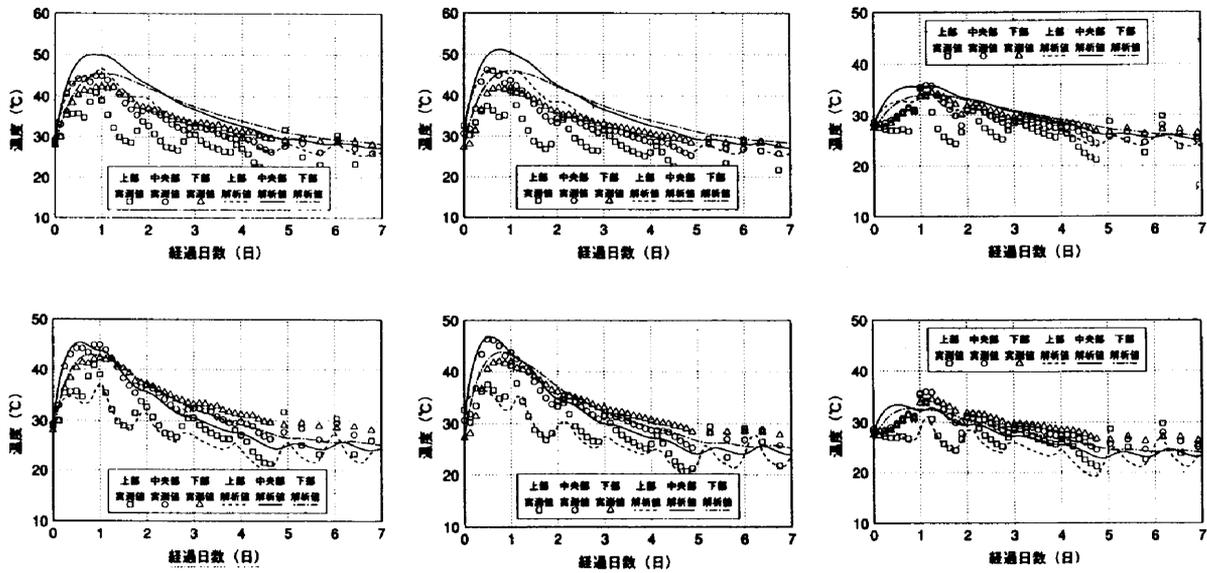


図-8 温度における実測値と解析値の経時比較

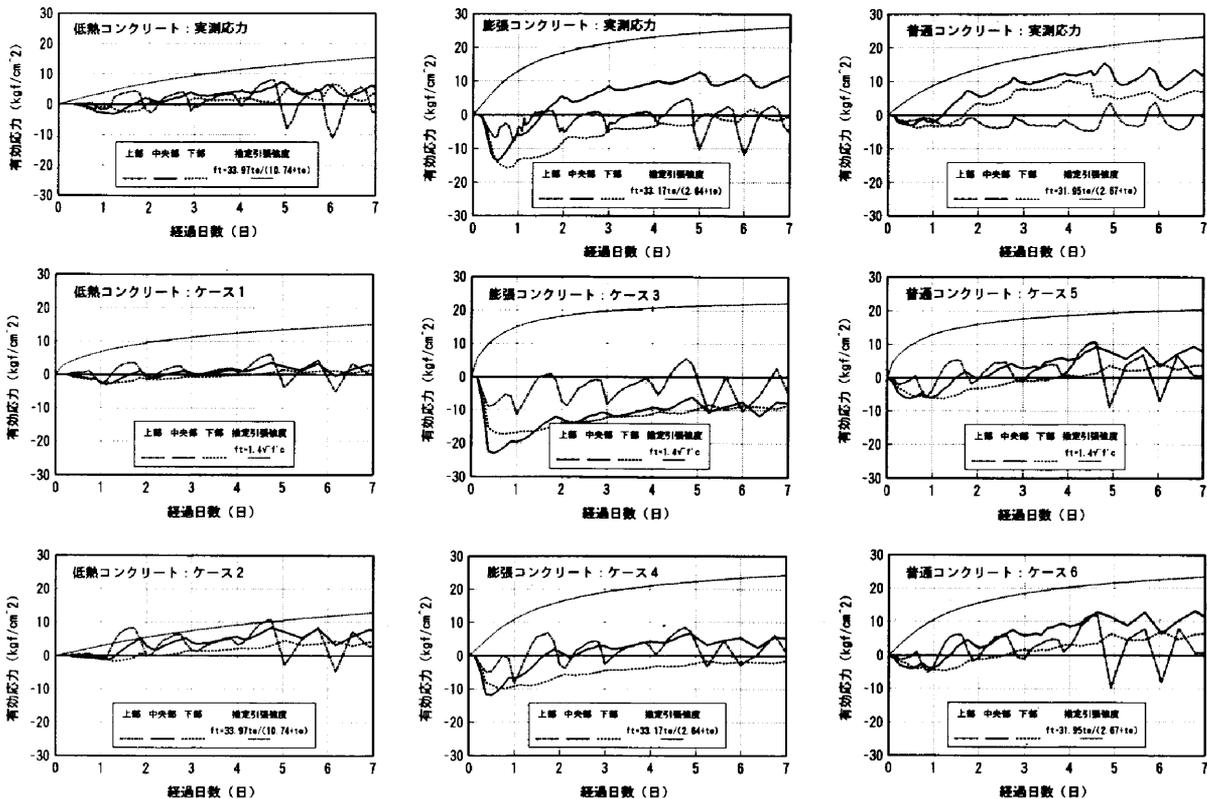


図-9 応力における実測値と解析値の経時比較

値 (断熱温度上昇式は技術資料) を用いたケース1では、ピーク温度と材齢が実測値と良く一致したが、ピーク温度に達するまでの値に多少の差が生じた。熱伝達率 $30\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (34.9W/mk) を用いたケース2では、部材の上部温度は良好な一致を得たもののピーク温度は 2.4°C 低い結果となった。これらの原因としては、断熱温度上昇式が適切でなかったこと、低熱コンクリートの発

熱量は比較的小さいことから養生水の蒸発に伴う気化熱の影響が他よりも小さかったことなどが考えられる。

応力の経時変化を図-9 (引張応力: 正, 圧縮応力: 負) に、解析ケースと結果比較を表-10に示す。低熱コンクリートの解析値は、定性的に実測値とよく一致している。特徴としては、上部の引張応力が大きいことがあげられる。実測値と比べて解析に示方書の有効弾性係数

表一 9 温度解析ケースと結果比較

ケース	コンクリートの種類	熱伝達率 (kcal/m ² h ² °C)	ピーク温度(°C)		ピーク材齢(日)	
			実測値	解析値	実測値	解析値
1	低熱	7	36.1	35.8	1.17	1.25
2		30		33.7		0.66
3	膨張	7	46.4	51.2	0.54	0.77
4		30		46.7		0.56
5	普通	7	45.1	49.9	0.96	0.81
6		30		45.5		0.66

推定式を使ったケース1では全体的に応力が小さくなった。一方、計測結果による有効弾性係数を使ったケース2では全体的に発生応力が大きくなった。これは、示方書に示された有効弾性係数推定式が、低熱コンクリートの性状を適切に表現していないためと推定される。膨張コンクリートでは、実測値と解析値で部材内の応力分布が異なっている。特に、示方書の有効弾性係数推定式を使ったケース3では部材中央部の応力が、実測値では引張であるのに圧縮となっている。これは、膨張効果により部材内の拘束度が従来のもとは異なることや、有効弾性係数の設定が適切でないことなどが原因と考えられる。普通コンクリートは、材齢約4.5日でひび割れが発生したことから、この期間で比較すると、部材中央部の解析値は実測値より多少小さいが、その推移は一致している。

§ 5. まとめ

本試験施工では低熱、膨張および普通コンクリートを適用して温度ひび割れ制御対策を比較検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 本構造物にはひび割れ制御対策として膨張コンクリートを適用することが最も有効であった。
- (2) 膨張コンクリートは圧縮側応力のピーク材齢以降、有効弾性係数が一定値で表現される。
- (3) 膨張、普通コンクリートでは熱伝達率を30kcal/m²h²°C (34.9W/mk) とした解析値が実測温度と良く一致した。
- (4) 膨張コンクリートの応力解析では、拘束度および有効弾性係数について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 平成3年版, 1991年。
- 2) 本州四国連絡橋公団：構造用マスコンクリート委員会報告書, 平成6年3月。
- 3) 小野田セメント(株)：コンクリート技術情報 No.33 低

表一 10 応力解析ケースと結果比較

種類	実測値	示方書の推定式		実験結果の推定式	
		発生応力	ひび割れ	発生応力	ひび割れ
低熱	ケース	1		2	
	上部	1.41	1.79	1.79	0.50
	中央部	1.67	1.62	1.62	1.62
膨張	ケース	3		4	
	中央部	1.92	2.34	2.34	1.75
	中央部	5.00	4.75	4.75	4.75
普通	ケース	5		6	
	中央部	1.34	1.79	1.79	1.65
	中央部	4.79	4.62	4.62	4.62

- 1) 低熱コンクリートは、打設後3日程度で表面ひび割れが発生していたことから上部については、指数の比較対象期間を0.0~3.0日までとした。
- 2) 膨張コンクリートにおける経過日数0.125日のひび割れ指数は最も小さいが、コンクリート材齢初期の値であるため無視した。
- 3) 普通コンクリートは、4.5~5.0日程度でひび割れが生じたため、指数の比較対象期間を0.0~5.0日までとした。

発熱コンクリート, 1991年10月。

- 4) 電気化学工業(株)：デンカCSAマニュアル コンクリート構造物の収縮ひび割れ防止。
- 5) 玉野富雄・福井聡・青景平昌・広野三夫：膨張コンクリートを用いたマスコンクリートの施工, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, pp.991~916, 1991年。
- 6) 土木学会：コンクリート・ライブラリー第75号 膨張コンクリート設計施工指針, 1993年7月。
- 7) 依田真・柳瀬辰彦・西田德行・木村一正：変電所機器基礎コンクリートにおける温度ひび割れ制御対策の評価, 第49回年次学術講演概要集, 第5部, pp.1118~1119, 1994年9月。
- 8) 西田德行・土橋吉輝・依田真・柳瀬辰彦：現場計測による若材齢時コンクリートの有効弾性係数設定, 第49回年次学術講演概要集, 第5部, pp.1108~1109, 1994年9月。
- 9) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1976年。
- 10) 天野智之・西澤邦男・西田德行・土橋吉輝：スラブ状コンクリートの実測温度と事後解析の比較検討, 第49回年次学術講演概要集, 第5部, pp.1122~1123, 1994年9月。
- 11) K.Matsui, N.Nishida, Y.Dobashi, K.Ushioda: Sensitivity Analysis and Reliability Evaluation of Thermal Cracking in Mass Concrete, International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, RILEM, 1994.
- 12) 浅井功・西田德行・依田真・西澤邦男：スラブ状コンクリートの実測応力と事後解析の比較検討, 第49回年次学術講演概要集, pp.1120~1121, 1994年9月。