

[15] ボックスカルバートの温度応力の実測と解析

正会員 竹下 治之 (日本国土開発技術研究所)
 正会員 ○浅沼 潔 (日本国土開発技術研究所)
 横田 季彦 (日本国土開発技術研究所)

1. まえがき

マッシブなコンクリート構造物では、セメントの水和熱に起因する温度応力によるひびわれの発生が懸念される。温度応力に関しては、現在までに数多くの研究がなされているが、若材令時におけるコンクリートの諸物性については不明点が多く、温度応力の正確な事前予測の障害となっている。

本研究は、このような現状から、鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの施工時に発生する温度応力に対し、コンクリートの温度、ひずみおよび応力を測定し、これらの測定値から、見掛けひずみ、拘束度、応力ひずみ、有効弾性係数、クリープ係数および弾性係数低減率などを算定し、通常用いられている内部および外部拘束応力解析手法について検討を行ったものである。

2. 実験概要

実験を行った構造物は、図-1に示すブロック長12.5mのボックスカルバートで、底板打設2週間後に側壁および頂版を同時に打設した。軸方向鉄筋はD22が125mmピッチで配置されている。計測位置は、同図に示すように、ブロック中央部の側壁および頂版の2断面であり、計測方向は、ボックスカルバートの軸方向に一致させた。

使用計測器を表-1に示す。これらの計測器は、予め温度ドリフト量を測定しておき、各実測値の補正を行った。なお、無拘束状態の供試体にこれらの計測器を埋設し、コンクリートの熱膨張係数の外、応力計の温度ドリフト量を測定し、この実測値の補正を行った¹⁾。

コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリート強度試験は、所定の材令で、JIS A1108 および JIS A1113 に準じて圧縮強度および割裂引張強度試験を行った。また、弾性係数の測定も同時に行った。なお、データ解析に当たっては、計測値の変動を除去するため移動平均法により処理した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの温度

コンクリート温度の経時変化を図-2に示す。同図から分かるように、材令約1日で中央部で最高温度に達した後、緩やかな温度降下を示し、材令約10日でほぼ一定温度となった。頂版および側壁の最高温度変化量は、それぞれ、27.9℃および32.7℃であった。また、両者の内表面の最大温度差は、それぞれ、9.1℃および9.5℃であった。

3.2 コンクリートのひずみ

断面の平均ひずみと平均温度変化量との関係を図-3に示す。同図から求めた拘束度を表-3に示す。同表から、頂版は外的に無拘束に近い状態であるが、側壁はかなり大きな拘束を受けていることが分かる。なお、側壁において引張ひずみが急激に減少しているが、これは、材令約6日に発生したひびわれにより引張応力が緩和されたためである。

図-4に頂版におけるひずみの分布を示す。同図に示されるように、断面内のひずみ分布は近似的に中央部を頂点とする放物線形である。このような傾向から、一般に内部拘束応力の弾性解析において使用されている平面保持の仮定は正確には成立しないものと思われる。

図-3に示す無拘束ひずみと温度変化量との関係から、実構造物における各測定点の温度変化量に対応する無拘束ひずみを求め、次式によって応力ひずみを算出した。頂版における応力ひずみの経時変化を図-5

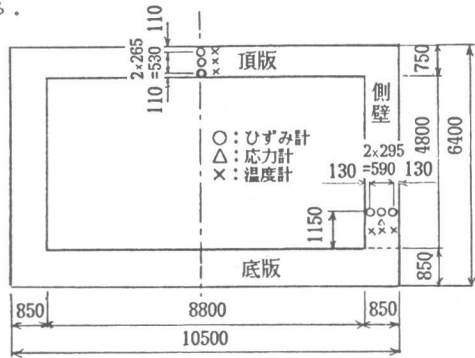


図-1 計測位置

表-1 使用計測器

計測項目	計測器名
温度	銅・コンスタンタン熱電対 (T)
ひずみ	電気抵抗式ひずみ計 (KM-100B)
応力	電気抵抗式応力計 (GK-60-202)

表-2 配合表

スラン プ (cm)	空気量 (X)	水セメ ント比 (X)	細骨材 率 (X)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 AE減水剤
				水 W	セメン ト C	細骨材 S	粗骨材 G	
8±1	4±1	52.0	39.7	156	300	745	1133	0.75

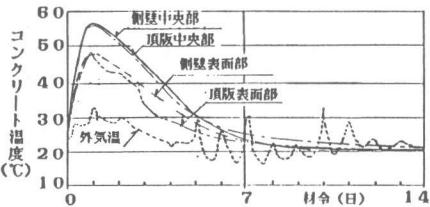


図-2 コンクリート温度の経時変化

に示す。

$$\epsilon = \epsilon_m - \epsilon_0 \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 ϵ : 応力ひずみ、 ϵ_m : 見掛けひずみ、 ϵ_0 : 無拘束ひずみ

同図に示されるように、最高温度時までは中央部に圧縮ひずみが、表面部で引張ひずみが増加し、その後は両ひずみとも減少して、やがて逆転する。このような傾向は、内部拘束応力が卓越する構造物の挙動をよく表している。なお、ここにいう表面部の応力ひずみとは、断面内の応力ひずみ分布図より外挿して求めた頂版両表面のひずみの平均値をいう。

表-4に、頂版における中央部および表面部の応力ひずみの分布特性を示す。同表から、圧縮ひずみに対する引張ひずみの比の平均値は約2.2であり、弾性解析から求められる値2.0とは若干異なる。これは、弾性解析では断面内のコンクリートの弾性係数を一定としているのに対し、実際は断面内では異なり、特に、打設初期では中央部の弾性係数が表面部より大きくなり、応力が釣合うために表面部のひずみが増大するためと考えられる。

一般に、断面内の温度差に基づき発生する内部拘束応力は、断面内の平面保持を仮定し弾性解析理論より次式により求められる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{表面部: } \sigma_s = 2 \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot E_c / 3 (1 - \nu) \\ \text{中央部: } \sigma_c = \alpha \cdot \Delta T \cdot E_c / 3 (1 - \nu) \end{array} \right\} \text{----- (2)}$$

ここに、 α : コンクリートの熱膨張係数 ΔT : ある材令における内外面の温度差

E_c : クリップを考慮した有効弾性係数 ν : ポアソン比

しかし、実際の変形は図-4のひずみの分布図からも分かるように、中央部を頂点とする放物線形をなす。いま、各材令における断面内の温度差と、実際に発生した応力ひずみとの関係を求めると表-5のようなになる。同表から、各材令における中央部と表面部のひずみの和は、その温度差に対応する無拘束ひずみに比較し、かなり小さい値となっている。このような結果からも、断面内の平面保持の仮定は成立しがたく、(2)式により応力算定を行えば、かなり大きな応力値を算出することになると考えられる。

3.3 コンクリートの応力

図-11に応力の経時変化を示す。同図に示されるように、打設初期には中央部に圧縮応力が発生し、材令約0.7日で最大となり、その後は圧縮応力は減少し引張応力に移行する。このような応力履歴は、温度変化に伴うコンクリートの体積変化が旧コンクリートによって拘束されるために生じるものであり、外部拘束応力が卓越する構造物の挙動をよく表している。材令約6日で引張応力が急変しているが、これは、前述したように、同時期に発生したひびわれによって応力が緩和されたためである。また、同図から分かるように、コンクリートの引張応力がほぼ引張強度に達した時点でひびわれが発生している。

3.4 有効弾性係数

ひびわれ発生前の応力ひずみと発生応力との関係を示した図-7から、両者の差分を用いて有効弾性係数を求めた。その結果を図-8に示す。なお、同図には、積算温度から算出した弾性係数も示した。

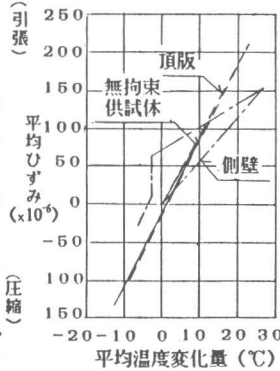


図-3 平均温度変化量と平均ひずみとの関係

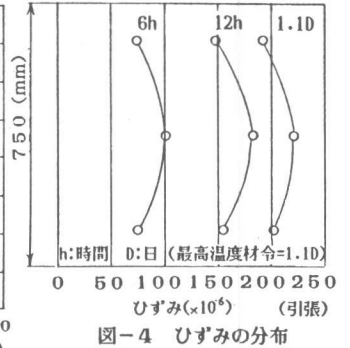


図-4 ひずみの分布

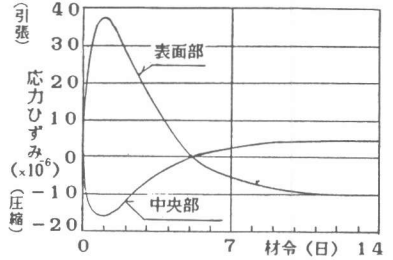


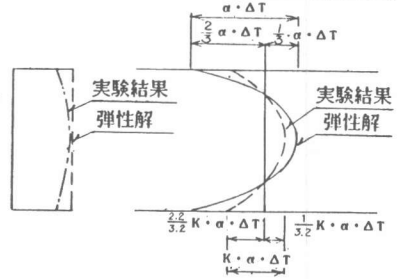
図-5 応力ひずみの経時変化(頂版)

表-3 拘束度

計測断面	温度上昇時	温度降下時	
	実験値	ひびわれ発生前 実験値	発生後 ACI値 実験値
頂版	0	0	-0.05
側壁	0.37	0.68	0.42 0

表-4 応力ひずみの分布特性

材令 h:時間 D:日	中央部ひずみ ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	表面部ひずみ ϵ_s ($\times 10^{-6}$)	$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_c}$	$\epsilon_c + \epsilon_s$ ($\times 10^{-6}$)
6h	7.2	15.8	2.08	23.0
12h	12.5	28.5	2.28	41.0
1.10	16.8	37.8	2.25	54.6



(a) 断面内の変形 (b) 応力ひずみの分布

図-6 応力ひずみの分布

表-5 断面内の温度差と応力ひずみ

材令 h:時間 D:日	表面部温度 (°C)	中央部温度 (°C)	温度差 ΔT (°C)	熱膨張係数 α ($\times 10^{-6}/\text{°C}$)	自由膨張ひずみ $\alpha \cdot \Delta T$	$\epsilon_c + \epsilon_s$ ($\times 10^{-6}$)	$k = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{\alpha \cdot \Delta T}$
6h	35.5	42.1	6.6	9.2	61	23	0.38
12h	42.3	51.4	9.1	9.2	84	41	0.49
1.10	46.9	56.0	9.1	9.2	84	55	0.65

同図から分かるように、圧縮応力が最大となる前後の時期は、有効弾性係数は不安定な値を示すが、その後は材令とともに次第に減少し、コンクリートの温度がほぼ安定する材令5日ではほぼ一定値 $1.18 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ となった。このような傾向は、青景らの実験結果とほぼ同様であった。

3.5 クリープ係数および弾性係数低減率

前述した有効弾性係数および積算温度から算出した弾性係数を用いて、次式からクリープ係数および弾性係数低減率を求めた。その結果を図-9に示す。

$$E_e = E / (1 + \phi) \quad \left. \begin{array}{l} \text{ここに、} E_e: \text{有効弾性係数 (kgf/cm}^2 \text{)}、\phi: \text{クリープ係数} \\ E: \text{弾性係数 (kgf/cm}^2 \text{)}、R: \text{弾性係数低減率} \end{array} \right\} \text{--- (3)}$$

同図から分かるように、前述した有効弾性係数と同様に、圧縮応力が最大となる前後の時期は、両者とも不安定な値を示す。これらのうち、クリープ係数は材令とともに増加する傾向を示し、材令6日で1.21であった。一方、弾性係数低減率は、材令とともに減少する傾向を示し、材令6日で0.4であった。このような傾向と数値は、青景らの結果とほぼ同様である。

後述するように、温度応力の算定には、各材令における弾性係数低減率が必要となる。図-9から、弾性係数低減率と材令の関係を図-10に示すようにモデル化し、応力の算定を行った。即ち、このモデルは、打設直後から最高温度時までの低減率を1.0、温度のほぼ安定する材令7日以降は0.4とし、その間は同図に示す二次式によって補間したものである。

3.6 発生応力の算定

前述した応力ひずみ、弾性係数およびモデル化した弾性係数低減率を用いて、(4)式で示される増分法および簡易法によって側壁の外部拘束応力を求めた。また、増分法により頂版の内部拘束応力の算定を行った。即ち、増分法は、時間をあるステップに分割し、各ステップ間では弾性係数は一定とみなし、実測した応力ひずみ増分に対応する応力増分を求め、各ステップ間で生じる応力増分を重ね合わせていく方法である。

一方、簡易法は、拘束度、熱膨張係数および有効弾性係数を用い、温度変化量から算定する方法であり、有効弾性係数はある材令までの平均値を用いた。また、温度降下時においては、最大圧縮応力に最高温度からの温度変化量に対応する応力を付加した。

これらの結果を図-11に示す。また、ひびわれ発生時の最大引張応力の実測値および計算値の比較を表-6に示す。

1) 増分法 $\sigma_i = \alpha_i \cdot R_i \cdot (E_i + E_{i-1}) \cdot (\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) / 2$

ここに、 σ_i : i ステップにおけるコンクリートの応力

E_i : i ステップにおけるコンクリートの弾性係数

ϵ_i : i ステップにおけるコンクリートの応力ひずみ

R_i : i ステップにおけるコンクリートの弾性係数低減率

2) 簡易法 $\sigma = R \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot E_e$

ここに、 R : 材令における拘束度

α : 材令における熱膨張係数

Δt : 材令における温度変化量

E_e : 材令における有効弾性係数

--- (4)

これらの図表から分かるように、外部拘束応力に対しては、計算値と実測値は比較的よく一致している。即ち、ひびわれ発生時の引張応力の計算値は、実測値の約75~81%である。また、同時期における実測値あるいは計算値と推定引張強度との比は、前者で1.15、後者で0.86~0.93の値を示した。このような結果から

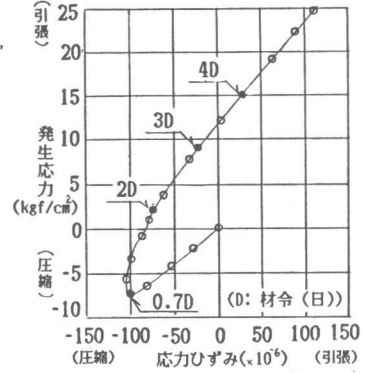


図-7 応力ひずみと発生応力との関係

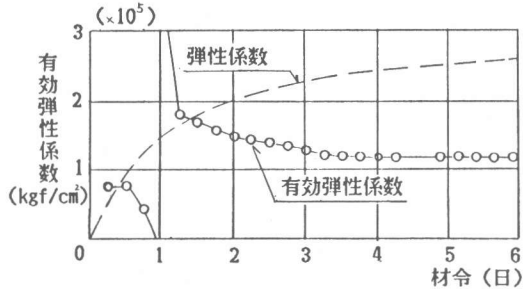


図-8 有効弾性係数の経時変化

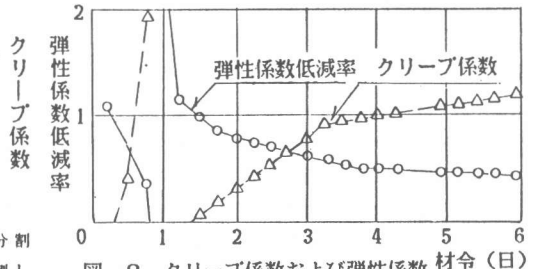


図-9 クリープ係数および弾性係数低減率の経時変化

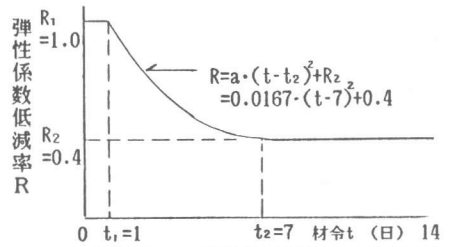


図-10 弾性係数低減率のモデル化

今後、温度応力を実測する場合、弾性係数および同低減率を適切に選定すれば、応力を実測することなく、実ひずみから比較的十分な精度で推定することが可能であると考えられる。また、コンクリート構造物の温度解析を実施すれば、前述した簡易解析法によっても比較的精度よく外部拘束応力を算定できると考えられる。なお、実測値と計算値との間に若干の差がみられるが、これは、発生応力と応力ひずみのピーク時が異なることの外、最大圧縮応力発生時期の有効弾性係数と、モデル化された弾性係数低減率から求められる有効弾性係数との差によるものと考えられる。

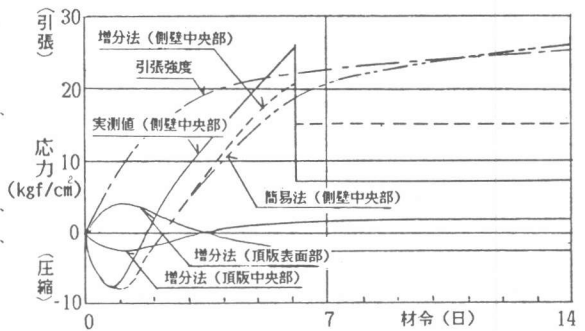


図-11 発生応力と計算値の比較

表-6 発生応力と計算値の比較

解析方法	(1)	(2)	(3)	比		
	実測値	計算値		推定引張強度	(2)/(1)	(1)/(3)
増分法	25.4	20.6	22.1	0.81	1.15	0.93
簡易法		19.1		0.75		0.86

図-11に見られるように、頂版では温度上昇時に中央部で圧縮応力が、表面部で引張応力が発生し、降下時には、中央部で引張応力が、表面部で圧縮応力が発生する。

しかし、壁厚750mmの本実験の場合、この内部拘束応力は前述した外部拘束応力と比較すると非常に小さいことが分かる。

4. まとめ

結論を要約すると以下のようである。

- (1) 部材厚が0.75～0.85mの本実験では、コンクリート温度は打設後約1日で最高温度に達し、約10日後に安定した。また、断面内の温度分布は、中央部を頂点とする放物線形をなし、最大温度変化量は約28～33℃、断面内の最大温度差は約9℃であった。
- (2) 本実験のようなボックスカルバートでは、側壁には外部拘束応力と内部拘束応力が同時に発生するが、一般的に、前者が支配的であり、近似的には後者を無視することができる。一方、頂版においては、ほぼ内部拘束応力のみであり、その発生応力も小さい。従って、外部拘束応力によるひびわれが側壁に発生しやすくなる。
- (3) 外部拘束応力が支配的な側壁では、温度上昇とともに比較的小さな圧縮応力が発生し、その後は、温度降下とともに次第に引張応力に移行する。本実験では、ひびわれの発生がなければ、引張応力は圧縮応力の約4倍と推定される。一方、内部拘束応力が支配的な頂版では、温度上昇とともに断面中央部で圧縮応力、表面部で引張応力が発生し、その後は、温度降下とともに、これらの応力は逆転する。
- (4) 上記のような理由により、側壁のほぼ中央部にコンクリート打設約6日後にひびわれが発生したがこの時の温度応力は約22～25kgf/cm²であり、推定引張強度とほぼ同等であった。
- (5) 遅延剤を散布し水洗浄による打継処理後、新コンクリートを打継いだ本実験の場合、外部拘束度は温度上昇時で0.37、降下時で0.68であった。
- (6) 有効弾性係数は、温度が降下するに従い次第に減少し、温度安定とともに、ある一定値となる。本実験の場合、その値は $1.18 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。また、この有効弾性係数から求められるクリープ係数は材令とともに増加し、弾性係数低減率は材令とともに減少する傾向を示す。後者については、解析のためのモデル図を示した。
- (7) 外部拘束応力算定においては、計測ひずみ値から算出した計算値と実測値はよく一致した。また、計測温度を基に通常の簡易計算式により算出した計算値も、実測値と比較的良好一致した。このような結果から、外部拘束応力算定に対しては、計算定数を適切に選定することにより、比較的精度よく発生応力を算出することができるものと考えられる。一方、内部拘束応力算定においては、通常適用されている平面保持を仮定した弾性解析理論に基づく簡易計算式によれば、算出応力は過大評価となる傾向があると考えられる。

参考文献 1. 竹下治之、浅沼源、横田学彦：マスコンクリート中の計測器の特性について 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、1984
2. 青景平晶、前野宏可、伊藤祐二：大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、1984