

U型擁壁の温度応力に関する研究

Study on Thermal Stress of U-shaped Retaining Wall

西田 徳行* 湊 康裕**
 Noriyuki Nishida Yasuhiro Minato
 土橋 吉輝*** 平野 瞬一****
 Yoshiteru Dobashi Shun-ichi Hirano
 志水 尚僖*****
 Naonobu Shimizu

要 約

本研究は、U型擁壁の底版および側壁を施工する際に発生するコンクリートの温度、ひずみおよび応力を計測し、この実測データをもとにコンクリートの温度応力を算出するために必要なパラメータである有効弾性係数および外部拘束係数について検討したものである。

その結果、土木学会の提案する有効弾性係数の値よりも本研究で得られた近似式の値は、大きくなった。また、底版部材内の弾性係数を一定とした場合、 R_N の平均値は0.196、 R_M の平均値は0.869であった。

目 次

- §1. まえがき
- §2. 計測概要
- §3. コンクリートの物性試験
- §4. 計測結果および考察
- §5. まとめ

§1. まえがき

現在、コンクリートの水和熱に起因する温度応力に関する研究^{1)~7)}は数多くなされ、その解析手法については、ほぼ確立されている。しかし、解析に用いるパラメータの値については不明な点が多く、これが解に与える影響は大きいので、温度ひびわれ発生を防止および制御する上で温度応力の正確な事前予測が難しいのが現状である。

この問題に対して各指針等では、温度ひびわれ発生を判断を確率的事象としてとらえることで処理しているが、一方、解析に必要なパラメータの適切な値を知ることも望まれている。

本研究目的は、鉄道地下化工事におけるU型擁壁の底版および側壁を施工する際に発生するコンクリートの温度、ひずみおよび応力を計測し、これらの計測結果と解析値を比較検討することで、この種の構造物に対する適切な解析パラメータの値を知ることにある。

具体的には、簡便な温度応力の計算法としてJCI指針⁸⁾や土木学会標準示方書⁹⁾で提示されているCompensation Line (Plane)法(以下CLMおよびCPMと略記)を用いる際、必要なパラメータである有効弾性係数および外部拘束係数について検討を行った。

§2. 計測概要

2-1 工事概要

本工事は鉄道地下化工事であり、計測を行った構造物は、Fig. 1に示すブロック長20mのU型擁壁で、コンクリート部材厚は、底版1.0m、側壁1.0mである。

*技術研究部土木技術課
 **技術研究部海洋技術課
 ***技術研究部土木技術課係長
 ****技術研究部土木技術課課長
 *****中部(支)名鉄小牧(出)所長

施工は底版および側壁の2回に分けてコンクリートを打設した。底版は5月19日に厚さ20cmの均しコンクリート上に打設し、その17日後の6月5日に側壁を打設した。底版打設時の隣接ブロックは、一方が既に打設された状態であり、側壁打設時の隣接ブロックの側壁は両方も打設されていない。コンクリートの養生は、底版コ

ンクリート上面で養生マットおよび散水、側壁では散水をそれぞれ打設翌日から4日間行った。また、型枠は合板を用い、底版および側壁とも脱型はコンクリート打設から6日後に行った。

施工場所は鋼矢板による山留め工法で開削されたGL-5mの位置にあり、周辺地盤は砂れき土である。

なお、施工前にコンクリートの温度応力解析検討を行った結果、側壁において温度ひびわれが発生することが

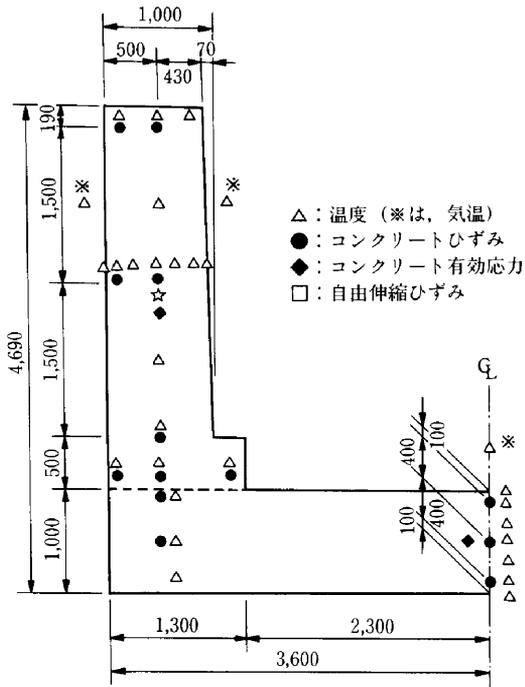


Fig.1 構造物の形状寸法と測定位置



Photo 1 ひびわれ誘発目地設置状況

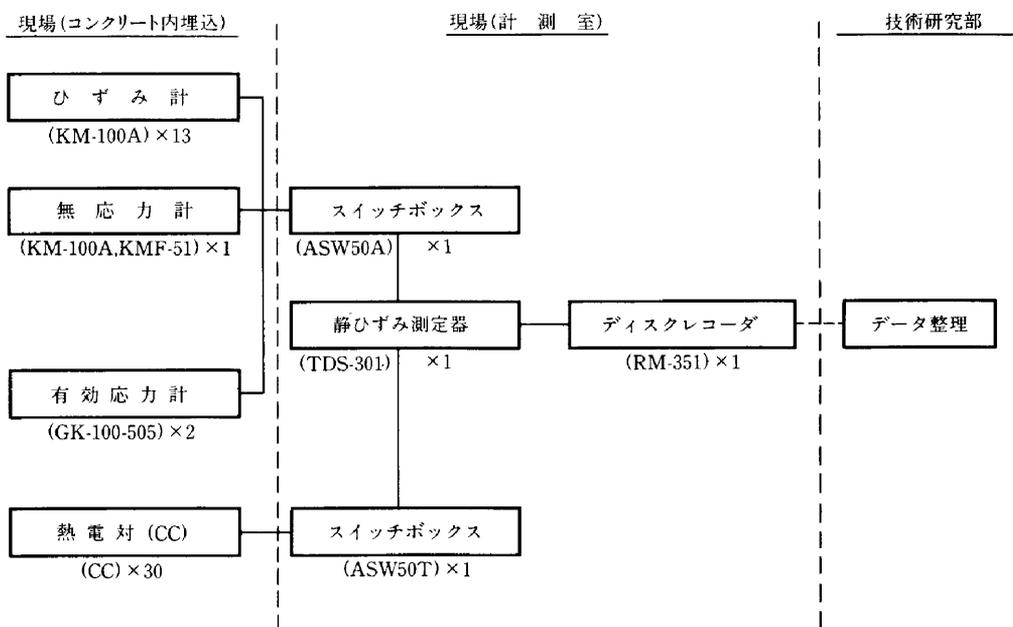


Fig.2 計測システム

懸念された。そこで、温度ひびわれ制御対策として塩化ビニール管によるひびわれ誘発目地を側壁内に約6.7m間隔で設置した。ひびわれ誘発目地設置状況を Photo 1 に示す。

2-2 計測方法

計測方法は、現場内で自動的にフロッピーディスクにデータを取込み、このデータを当社技術研究部においてパーソナルコンピュータで処理・整理する方法をとった。Fig. 2 に本計測システムを示す。

計器配置位置はブロック中央部とし、設置方向は U 型擁壁の軸方向とした。計測期間は底版で45日間、側壁で28日間行った。計測項目および使用計器を Table 1 に示す。

§ 3. コンクリートの物性試験

使用コンクリートの配合は、Table 2 に示すとおりである。打設時には物性試験用の $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 標準養生供試

Table 1 計測項目および使用計器

計測項目	使用計器	底版	側壁	合計
温度	銅・コンスタンタン熱電対	11	19	30
コンクリートひずみ	埋込み型ひずみ型 (KM-100A)	5	8	13
コンクリート有効応力	有効応力計 (GK-100-505)	1	1	2
自由伸縮ひずみ	無応力計 (KM-100A, KMF-51)	—	1	1
合	計	17	29	46

Table 2 コンクリート配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単体量 (kg/m³)				
				W	C	S	G	AE減水剤
25	8	56.0	42.8	159	284	781	1070	0.889

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

使用材料

セメント……普通ポルトランドセメント

骨材……細骨材：木曾川産 (比重2.57, FM=2.75)

粗骨材：木曾川産 (比重2.57, FM=6.75)

混和剤……AE減水剤 (ポゾリスNo.70)

Table 3 コンクリート物性試験結果

材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm²)			静弾性係数 (kgf/cm²)			引張強度 (kgf/cm²)		
	底版	側壁	平均	底版	側壁	平均	底版	側壁	平均
1	36	60	48	—	136,000	136,000	—	6.3	6.3
3	128	151	140	209,000	225,000	217,000	13.4	16.7	15.1
7	215	213	214	260,000	253,000	256,500	22.1	22.7	22.4
14	277	258	268	282,000	276,000	279,000	25.9	24.6	25.3
28	—	307	307	—	303,000	303,000	—	29.7	29.7
31	307	—	307	297,000	—	297,000	32.1	—	32.1
備考	近似式 (平均) $f_c(t) = \frac{t}{0.016 + 0.00268t}$			近似式 底版 $E_c(t) = \frac{t}{0.456 + 0.322t} \times 10^5$ 側壁 $E_c(t) = \frac{t}{0.379 + 0.320t} \times 10^5$			近似式 (平均) $f_t(t) = 1.7 \times 10^4 \sqrt{f_c(t)}$		

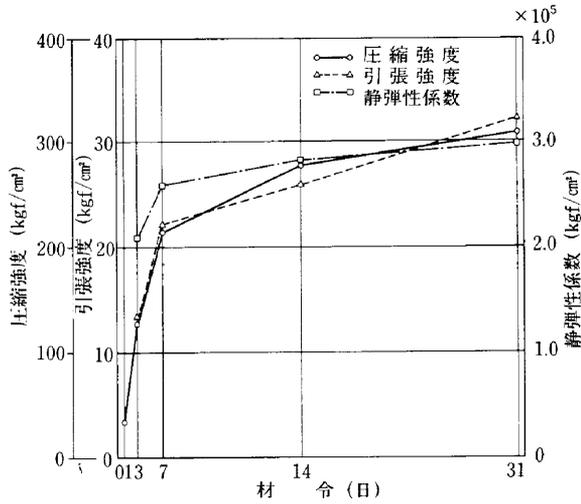


Fig.3 底版コンクリートの物性

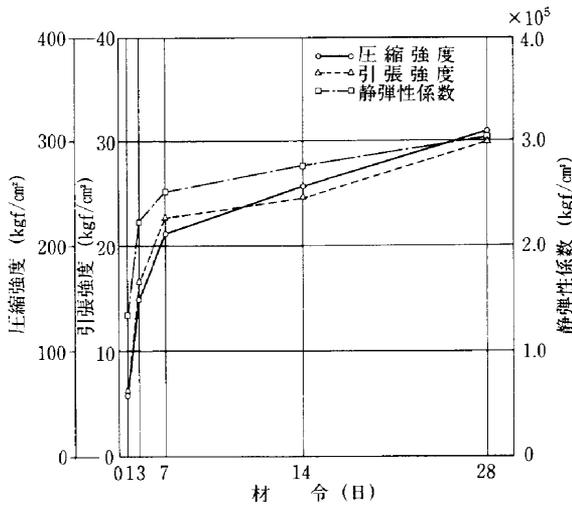


Fig.4 側壁コンクリートの物性

体を作成し、各材令において圧縮強度試験(JIS A 1108)、割裂引張強度試験(JIS A 1113)およびコンプレッソメータを用いた静弾性係数試験(JIS 原案)を行った。

試験結果を Table 3, Fig. 3 および Fig. 4 に示す。

§ 4. 計測結果および考察

4-1 コンクリート温度

底版および側壁の中心部におけるコンクリート温度の経時変化を Fig. 5 に示す。また、底版中央部および側壁中央部の温度分布を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。

底版の最高温度は、材令約 1 日で中央部において 48.9℃であり、最高温度時の温度分布は放物線状になっている。

側壁の最高温度は底版同様、材令約 1 日で中央部にお

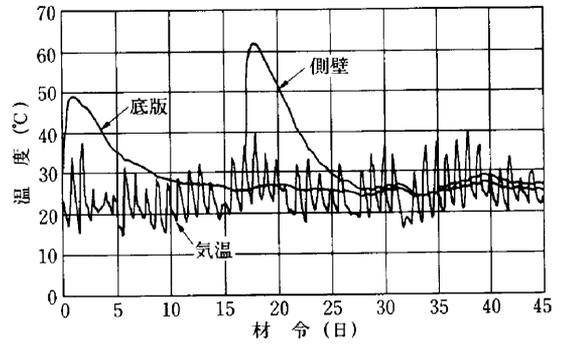


Fig.5 温度の経時変化

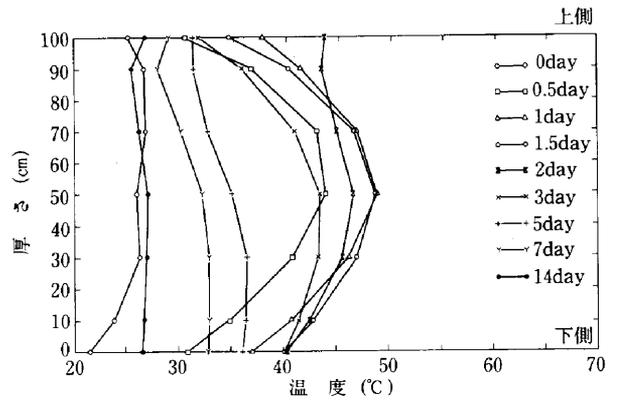


Fig.6 温度分布 (底版・中央部)

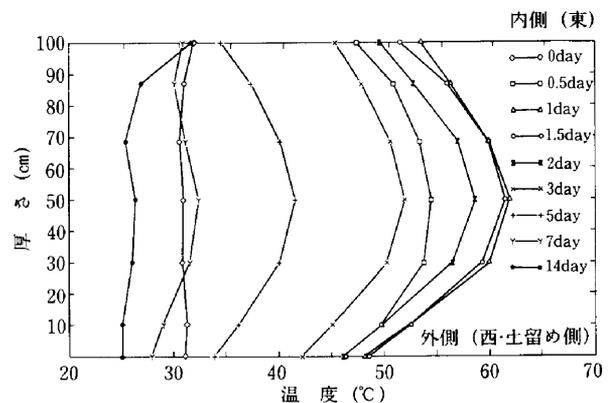


Fig.7 温度分布 (側壁・水平方向中央部)

いて 61.7℃であり、最高温度時の温度分布は放物線状になっている。側壁の内側と外側の温度を比較すると外側の方が多少温度が低かった。これは、外側が土留めのために日影になっていたためと考えられる。

底版および側壁における実測値と解析値の比較を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。

底版の温度解析は有限要素法による 1 次元熱伝導解析、側壁は有限要素法による 2 次元熱伝導解析で行った。使用した解析定数および解析モデルを Table 4 に示す。

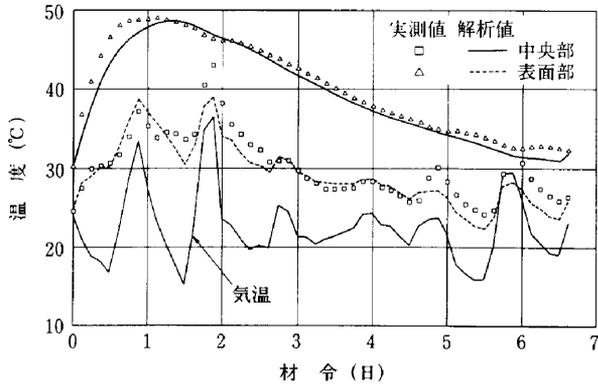


Fig.8 底版温度の実測値と解析値

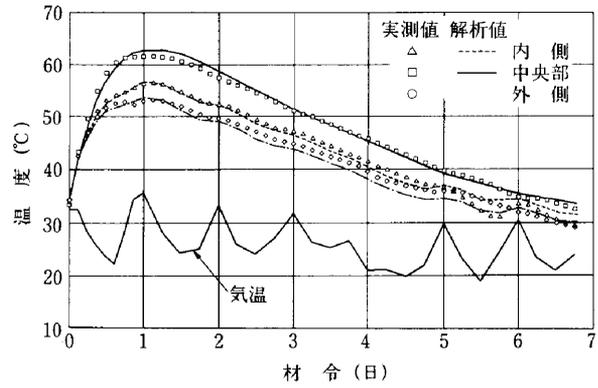


Fig.9 側壁温度の実測値と解析値

Table 4 温度解析条件

	解析定数	解析モデル
底版	コンクリート 熱伝導率 2.0kcal/m・h・°C 熱容量 504kcal/m ³ ・°C 熱伝達率 (養生マット+散水) 7.5kcal/m ² ・h・°C コンクリート打設温度 28.0°C 断熱温度上昇 $Q=37.8 (1 - e^{-1.24t})$ 地盤 熱伝導率 1.7kcal/m・h・°C 熱容量 570kcal/m ³ ・°C 地盤初期温度 固定温度15°Cと打設時気温の間を直線分布するものとした。 外気温 実測データ使用	1次元モデル
側壁	コンクリート 熱伝導率 2.0kcal/m・h・°C 熱容量 504kcal/m ³ ・°C 熱伝達率 散水…12.0kcal/m ² ・h・°C 合板…7.0kcal/m ² ・h・°C 露出面…10.0kcal/m ² ・h・°C コンクリート打設温度 34.0°C 底版コンクリート温度 25.0°C 断熱温度上昇 $Q=37.1 (1 - e^{-1.808t})$ 地盤 熱伝導率 1.7kcal/m・h・°C 熱容量 570kcal/m ³ ・°C 地盤初期温度 固定温度15°Cと打設時気温の間を直線分布するものとした。 外気温 実測データ使用	2次元モデル

4-2 コンクリートの熱膨張率

コンクリートの熱膨張率は、側壁中央部に設置した無応力計から温度変化によるゼロ点移動を考慮した自由膨張ひずみを測定し、下式より求めた。

$$\alpha = \Delta \epsilon_t / \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 α ：コンクリートの熱膨張率 ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta \epsilon_t$ ：自由伸縮ひずみ増分
 ΔT ：温度変化量 ($^{\circ}\text{C}$)

自由伸縮ひずみと温度の関係を Fig. 10 に示す。ひずみと温度のピークは一致しており、熱膨張率はピーク前で $10.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、ピーク後で $10.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。

4-3 コンクリートの有効ひずみと有効応力

実測ひずみには、応力によるひずみ、自由伸縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみが含まれている。ここでは乾燥収縮によるひずみは無視できると仮定し、自由伸縮ひずみを差引いたひずみを有効ひずみとした。したがって、有効ひずみは下式より求められる。

$$\Delta \epsilon_e = \Delta \epsilon_p - \alpha \cdot \Delta T \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $\Delta \epsilon_e$ ：コンクリートの有効ひずみ増分
 $\Delta \epsilon_p$ ：実測ひずみ増分

一方、ここで述べる有効応力とは有効応力計から求められるコンクリートの温度応力であり、コンクリート打込み後からの弾性係数の変化過程における応力である。

なお、有効応力と有効ひずみの関係は、次式で与えられるものとする。

$$\Delta \sigma = \Delta \epsilon_e \cdot E_e(t) \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\Delta \sigma$ ：有効応力増分 (kgf/cm^2)
 $E_e(t)$ ：材令 t の有効弾性係数 (kgf/cm^2)

温度応力は、一般に内部拘束応力と外部拘束応力に分

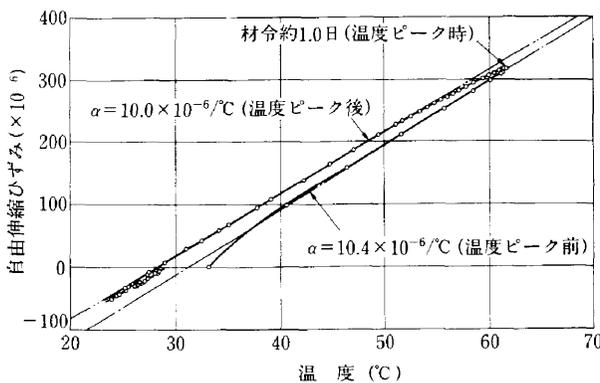


Fig.10 自由伸縮ひずみと温度の関係

けて考えることができる。前者は対象構造物の断面内に不均一な温度分布が生じる場合の応力であり、後者は対象構造物全体の温度変化に伴う体積変化が外部からの拘束を受ける場合の応力である。一般的には拘束条件や構造物の形状などにより、どちらかの応力が卓越する。

(1) 有効ひずみ

底版のひずみ性状は、Fig. 11 からわかるように上部では引張から圧縮へ、中央部は圧縮から引張へと時間の経過に伴って移行する内部拘束が卓越した状態であることを示している。また、側壁下の底版のひずみは、材令17日において急激に圧縮側にひずみが増加しているが、これは側壁コンクリート打込み（重量）の影響である。

側壁について、鉛直方向および中央部水平方向のひずみの経時変化をそれぞれ Fig. 12 および Fig. 13 に示す。側壁のひずみは中央部および下部で最高温度時まで圧縮ひずみが増加し、その後は温度降下に伴って大きく引張方向に移行することが Fig. 12 からわかる。これは、側壁において外部拘束が卓越した状態であることを示している。また、Fig. 13 において表面部に比べて中央部のひずみが、大きくなっているが、これは断面内の温度変化量の違いによる内部拘束の影響である。

なお、温度ひびわれ制御対策として側壁内にひびわれ誘発目地を設置した結果、目地中にひびわれが発生した。このひびわれの発見は、脱型後4日（材令10日）であったが、ひびわれの発生時期は、実測値を見ると Fig. 12 において側壁下の底版のひずみが材令7日で急激に引張方向に移行していることや、側壁では材令7日を境に側壁上部以外のひずみが圧縮方向へ移行していることなどから材令7日であったと考えられる。ひずみ量が変化した理由は、側壁にひびわれが発生したことにより外部拘束が緩和されたためと考えられる。

(2) 有効応力

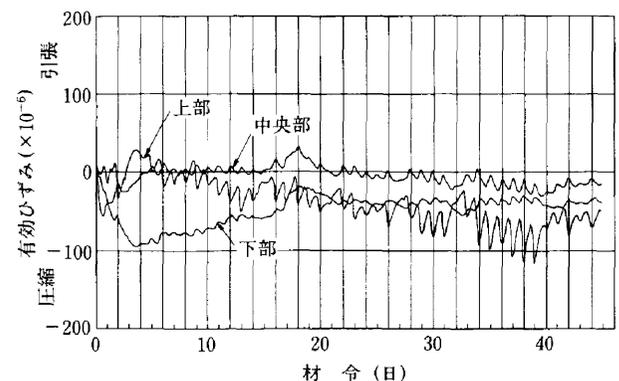


Fig.11 底版の有効ひずみの経時変化 (中央断面)

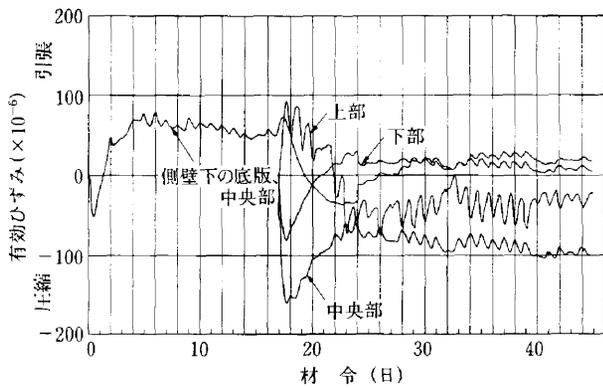


Fig.12 側壁の有効ひずみの経時変化(鉛直方向)

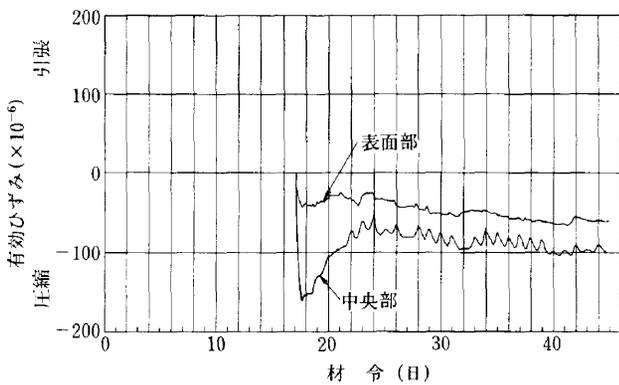


Fig.13 側壁の有効ひずみの経時変化(水平方向)

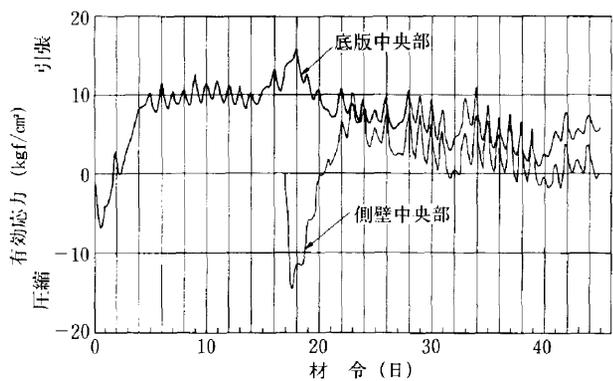


Fig.14 有効応力の経時変化

底版および側壁の中央部における有効応力の経時変化を Fig. 14 に示す。底版中央部の有効応力は、コンクリート温度が最高となる材令1日よりも早い材令0.6日で圧縮側のピーク(約7 kgf/cm²)に達した後、引張方向に移行した。その後、材令5日程度で引張応力は、約10kgf/cm²となるが、側壁コンクリート打込みの影響で一時的に引

張応力が増した後、徐々に圧縮方向に移行して5 kgf/cm²程度の引張応力に安定している。

側壁中央部の有効応力は、底版と同様にコンクリート温度が最高となる材令よりも早い材令0.85日程度で圧縮方向のピーク(約14kgf/cm²)に達した後、引張方向に移行した。しかし、材令7日で引張応力8 kgf/cm²程度に達した後、応力経時変化の勾配が変化して圧縮方向に移行して2 kgf/cm²程度の引張応力に安定した。これは、前述したように発生したひびわれにより応力が緩和されたためである。

4-4 有効弾性係数

ここで述べる有効弾性係数とは、コンクリート部材の静弾性係数にクリープ、リラクセーション等による影響を考慮したものであり、コンクリート硬化時の温度応力を算定するには、この有効弾性係数を適切に設定することが重要である。

本研究では、実測データをもとに有効弾性係数を求めた。有効弾性係数の算定には、まず、有効ひずみと有効応力との関係を示した Fig. 15 から各計測区間で両者の差分を用いて有効弾性係数値を求め、この値から最小二乗法によって有効弾性係数の近似式を算出した。この結果を Fig. 16 および Fig. 17 に示す。なお、実測データは発生したひびわれの影響を避けることと、コンクリート硬化時の有効弾性係数をみる意味から底版および側壁ともコンクリート打設から材令7日程度までのデータを使用した。

静弾性係数値と有効弾性係数値を比較すると、一般的に静弾性係数値が大きいとされているが、底版では材令3日まで有効弾性係数の値が静弾性係数の値を上回っている。

土木学会標準示方書では、有効弾性係数式²⁾として次式が提示されている。

$$\left. \begin{aligned} E_e(t) &= 1.1 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)} \cdots (\text{材令3日まで}) \\ E_e(t) &= 1.5 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)} \cdots (\text{材令3日以降}) \end{aligned} \right\} \cdots(4)$$

ここに、 $f'_c(t)$ ：材令t日の圧縮強度の推定値 (kg f/cm²)

本計測で得られた有効弾性係数式の値と上式の値を比較すると、全体的に土木学会式の方が小さい値をとっている。このことから本構造物の場合、土木学会式を用いると、内部拘束が卓越する(表面部と中心部の温度差が問題となる)構造物の場合、温度のピーク前において問題となる表面部の応力を小さく評価する可能性がある。一方、外部拘束が卓越する(温度降下量が問題となる)構造物の場合では、ピーク後に問題となる応力を小さく

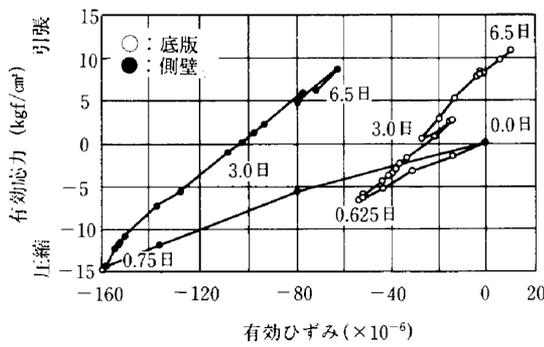


Fig.15 有効応力と有効ひずみの関係

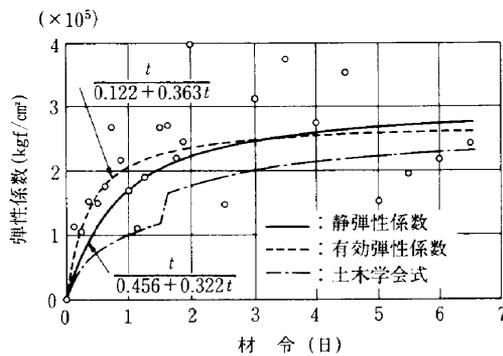


Fig.16 底版の弾性係数

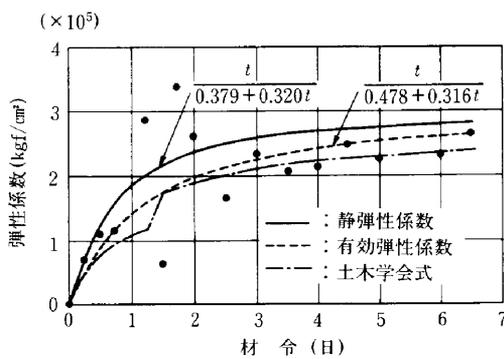


Fig.17 側壁の弾性係数

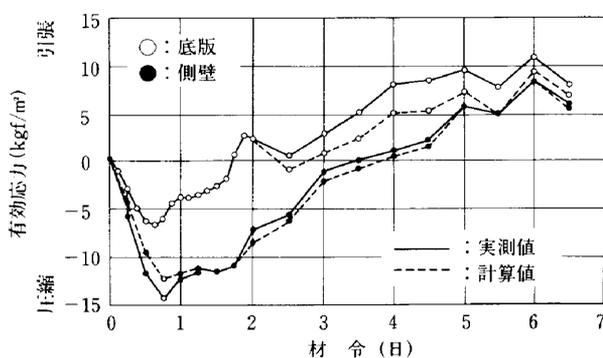


Fig.18 有効応力の実測値と計算値

評価する可能性があると考えられる¹⁾。

本研究で得られた有効弾性係数式と有効ひずみを用いて求めた応力と実測応力の比較を Fig. 18 に示す。

なお、土木学会式の適用には、 $f'_c(t)$ として圧縮強度試験で求めた材令と強度の関係式に有効材令を用いた値を使用した。

4-5 外部拘束係数

JCI 指針⁸⁾や土木学会標準示方書⁹⁾で提示されている外部拘束係数を求める図は、 $E_c/E_r = 0 \sim 40$ (E_c :被拘束体の弾性係数, E_r :拘束体の弾性係数), $L/H = 1 \sim 15$ (L :長さ, H :高さ)の範囲のものである。本底版の場合、 $E_c/E_r > 40$, $L/H = 20$ であることから、外部拘束係数は不明である。そこで、ここでは底版コンクリートの外部拘束係数を実測データから算出した。

有効ひずみ増分 $\Delta \epsilon_e$ は、コンクリート部材内の弾性係数を一定とした場合、CLMにおいて以下のように求めることができる。

$$\Delta \epsilon_e = \alpha \Delta T(y) - \Delta \bar{\epsilon} - \Delta \phi (y - Y_G) + R_N \Delta \bar{\epsilon} + R_M \Delta \phi (y - Y_G) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\Delta T(y)$:コンクリート底面からの距離 y での温度変化量

$\Delta \bar{\epsilon}$:自由な軸変形の増分

$\Delta \phi$:自由な曲げ変形の増分

Y_G :重心位置

R_N :軸拘束係数

R_M :曲げ拘束係数

同一断面の異なる鉛直方向2点の有効ひずみが与えられれば、式(5)の連立方程式を解いて R_N および R_M を次式から求めることができる。

$$R_N = \frac{1}{\Delta \bar{\epsilon} (y_1 - y_2)} [(Y_G - y_2) \{ \Delta \epsilon_e (y_1) - \alpha \Delta T (y_1) \} - (Y_G - y_1) \{ \Delta \epsilon_e (y_2) - \alpha \Delta T (y_2) \}] + 1 \dots \dots \dots (6)$$

$$R_M = \frac{1}{\Delta \phi (y_1 - y_2)} [\{ \Delta \epsilon_e (y_1) - \Delta \epsilon_e (y_2) \} - \alpha \{ \Delta T (y_1) - \Delta T (y_2) \}] + 1 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\Delta \epsilon_e (y_1)$: y_1 での有効ひずみ増分

$\Delta \epsilon_e (y_2)$: y_2 での有効ひずみ増分

$\Delta T (y_1)$: y_1 での温度変化量 (°C)

$\Delta T (y_2)$: y_2 での温度変化量 (°C)

各組合せ (Table 5, 参照) で算出した R_N および R_M の経時変化を Fig. 19, Fig. 20 に示す。式(7)から求めた R_M の特徴を以下に示す。

① 1-3の組合せの値を挟んで1-2および2-3の値が

Table 5 外部拘束係数の比較

組合せ	軸拘束係数 R_N	曲げ拘束係数 R_M	測定位置
1-2	0.192	0.892	1
1-3	0.204	0.870	2
2-3	0.192	0.845	3
平均	0.196	0.869	H=800

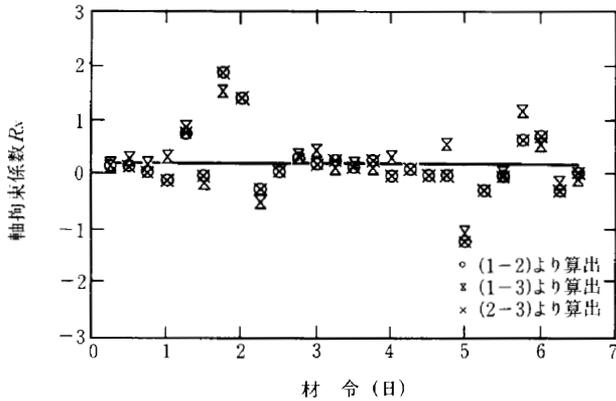


Fig.19 軸拘束係数 R_N の経時変化

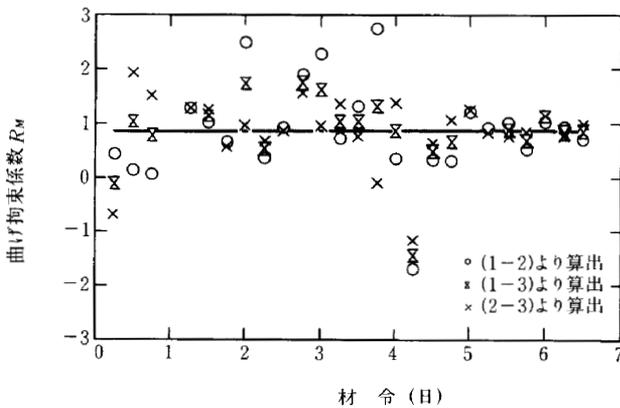


Fig.20 曲げ拘束係数 R_M の経時変化

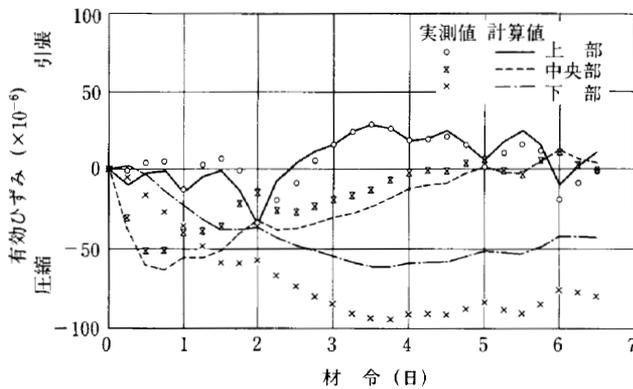


Fig.21 底版の有効ひずみの実測値と計算値

ほぼ対称な値をとる。

② 1-2と2-3の値の差は、時間の経過と共に小さくなって行く傾向がある。

③ 1-2および2-3からの R_M 値の大小関係は、材令によって異なることがある。

上記の事柄について検討を加えると、①については、 R_M の算出に用いたひずみおよび温度内に絶対的および相対的誤差が含まれているが、式(7)からの1-2と1-3の差および1-3と2-3の差は次式で表され、誤差が同一になる。

$$R_{M1-2} - R_{M1-3} = R_{M1-3} - R_{M2-3}$$

$$= \frac{1}{\Delta\phi \cdot H} \{ \Delta\epsilon_e(y_1) - 2\Delta\epsilon_e(y_2) + \Delta\epsilon_e(y_3) - \alpha(\Delta T(y_1) - 2\Delta T(y_2) + \Delta T(y_3)) \} \dots\dots(8)$$

ただし、 $y_1 - y_2 = y_2 - y_3 = \frac{H}{2}$, $y_1 - y_3 = H$

この誤差の原因としては、温度およびひずみセンサーの設置位置および感度の違いによる時間的なズレがあること、コンクリート部材内の弾性係数に差(若材令時は、差が大きい)があること等が挙げられるが、明確な原因は不明である。

②については、コンクリート部材内の弾性係数の差や部材内の温度差が時間の経過とともに小さくなったためと考えられる。コンクリートの弾性係数は、一般に若材令時では温度が高い部分ほど発現が早くなるため、部材中央部と表面部で弾性係数に差が生じる。本研究では、簡便に外部拘束係数を求めるため、部材内の弾性係数を一定とした。

③については、①同様、計測誤差、温度およびひずみの時間的なズレ等が考えられるが、明確な原因の究明については今後の検討が必要である。

Table 5 に各組合せから求めた R_N , R_M の平均値を示す。本底板 ($E_c/E_r=42$, $L/H=20$, E_c : 材令7日) の場合、各指針^{8),9)}に従って外部拘束係数を推定すると、 $R_N=0.22$, $R_M=1.18$ (ピーク前), $R_M=1.08$ (ピーク後) である。これらと本検討で得られた値を比較すると、 R_N は、 R_M とも10%程度、本検討の方が小さい値であった。

なお、 R_M について各指針^{8),9)}では、コンクリート温度のピーク前、ピーク後で値を変更しているが、ここでは本研究で得られた R_N , R_M の平均値と実測温度で求めた有効ひずみと実測有効ひずみの比較を Fig. 21 に示す。実測有効ひずみと算出した有効ひずみは、上部および中央部でよく一致しているが、下部ではあまり一致していない。これは、温度とひずみの時間的なズレ等が原因で

あると考えられる。

また、側壁については CPM を適用して実測データから R_N , R_M を算出することになるが、これはについては今後の検討とする。

§ 5. まとめ

CLM および CPM を用いる際、必要なパラメータである有効弾性係数および外部拘束係数について検討を行った結果、本計測において次のような結果が得られた。

- (1) 有効弾性係数の算定式に、土木学会式を用いると、内部拘束が卓越する（表面部と中心部の温度差が問題となる）構造物の場合、温度のピーク前において問題となる表面部の応力を小さく評価する可能性がある。
- (2) 外部拘束が卓越する（温度降下量が問題となる）構造物の場合では、ピーク後に問題となる応力を小さく評価する可能性があると考えられる。
- (3) 底版の R_N は、 R_M と比較して部材内では安定しており、その値は 0.196 であった。
- (4) 底版の R_M は、材令によって大きく変動するが、その平均値は 0.869 であった。
- (5) R_N , R_M の平均値は、各指針^{8),9)}による値とおおむね一致した。

なお、本研究の結果は、あくまでも実測データを用いて有効弾性係数および外部拘束係数を求めた一例であることから、今後の課題として類似データの蓄積と CPM を用いた実測値からの外部拘束係数の算出、部材内の弾性係数の違いを考慮した外部拘束係数の算出の検討を行っていく予定である。

謝辞 最後に、現場計測およびデータ整理に御協力を頂いた関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 西田德行, 湊康裕, 土橋吉輝: コンクリート硬化時の有効弾性係数について, 土木学会年次学術講演会, 第43回, 第V部, pp.458~459, 1988
- 2) 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研究委員会報告, 1985
- 3) 前野宏司, 青景平昌, 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, pp.15~20, 1984
- 4) 田沢栄一, 飯田一彦: 硬化時温度応力の発生メカニズムについて, 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, pp.101~104, 1982

- 5) 伊藤祐二, 渡辺直樹, 他: マスコンクリートの有効弾性係数に関する研究, 土木学会年次学術講演会, 第41回, 第V部, pp.379~380, 1986
- 6) 竹下治之, 浅沼潔, 横田季彦: コンクリート硬化時の有効弾性係数に関する一考察, 土木学会年次学術講演会, 第41回, 第V部, pp.381~382, 1986
- 7) 津田昌秀, 大野一昭, 他: 実測値による Compensation Line 法の外部拘束係数の推定について, 土木学会年次学術講演会, 第41回, 第V部, pp.361~362, 1986
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書(施工編), 1986
- 9) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひびわれ制御指針, 1986
- 10) 西田德行, 土橋吉輝, 湊康裕, 浅井功: Compensation Line 法の外部拘束係数に関する一検討, 土木学会年次学術講演会, 第44回, 第V部, 1989, 投稿中