

論文

[1188] マスコンクリート構造物に生じる温度応力の評価方法に関する
基礎的検討

正会員○川口 徹 (大林組技術研究所)

正会員 中根 淳 (大林組技術研究所)

1. はじめに

マスコンクリート構造物中に発生する温度応力の計測用に、有効応力計が盛んに用いられており、この分野の研究の進展に大いに寄与している [1], [2]。この有効応力計は、対象とするコンクリートの力学性状（弾性係数、クリープ特性の経時変化を含む）がわからなくても温度応力が計測できることが特徴の一つである。一般には応力を直接計測することは困難である。そのためこの有効応力計でも荷重変換器であるロードセルを用いて応力の換算を行っている。しかし、計測上の留意点、特にその測定精度についてはあまり知られていない。

一方、埋込み型のコンクリート歪計は有効応力計に比べて小型で安価な上、計器設置上の制約条件はほとんどないため現場計測には適用しやすい。しかし、打設直後からのコンクリートの力学性状を適正に把握しないと正確な温度応力を評価することは難しいという短所を有している。

本論では、有効応力計の計測精度に関する基礎的な検討の結果と、埋込み型歪計による計測値から精度よく温度応力を評価するための方法について検討した結果について述べる。

2. 有効応力計の計測精度に関する基礎的な検討

2.1. 有効応力計の基本機構

有効応力計は図-1に示す機構で、ロードセルと被測定部コンクリートと同一時期に打込んだ柱状コンクリートを直列配置したものである。応力計の長手方向の両端2面と被測定部コンクリートの間およびロードセルと柱状コンクリートとの間は、特殊なアンカーボルトで互いに接続されている。これにより圧縮応力ばかりでなく、引張応力の測定も可能になっている。応力計の長手方向に平行な残りの周囲4面は被測定コンクリートとは切り離されている。ただし、湿気は自由に移動できる構造になっている。周囲の被測定部コンクリートと湿気の移動を自由にするにより、計器内のコンクリートの物性をフレッシュコンクリートの状態から充分硬化した状態まで被測定部コンクリートと同一にするためである。このような機構により、打設直後から時間とともに大きく変化する被測定部のコンクリートの弾性係数と応力計全体としての弾性係数とを常にできるだけ一致させることができるようになってい

2.2. 有効応力計の特性に関する検討

この有効応力計の基本的な特性について、力の釣合いと変形の適合条件をもとに理論的な検討を行った。以下の仮定が成立つものと

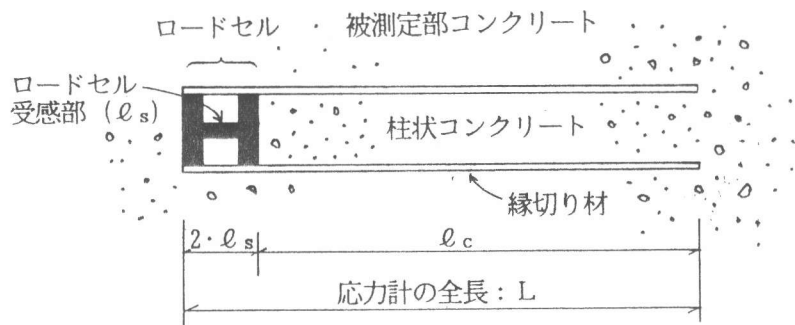


図-1 有効応力計の基本機構

する。有効応力計と周囲の被測定部コンクリートは完全に密着して一体化している。又、有効応力計内部のロードセル部と柱状コンクリートも完全に一体化している。ロードセル部とコンクリート部のいずれも、応力と歪の間にはフックの法則が成立つ。又、コンクリートのクリープ歪は作用している応力に比例

表-1 ①、②、③式の計算に用いた記号

応力計内部のコンクリート柱状部長さ： ℓ_c
応力計内部のロードセルのセンサー部長さ： ℓ_s
応力計内部のロードセルのセンサー支持板厚さ（両端合わせて）： ℓ_s
応力計の全長： $L = \ell_c + 2\ell_s$
コンクリート柱状部断面積、ロードセル支持板断面積： A_c
ロードセルのセンサー部断面積： A_s
任意の時間(t_0)のコンクリートの弾性係数： E_c
ロードセルのセンサー部、支持板の弾性係数： E_s
時間 t_0 から t 時間経過後のコンクリートのクリープ係数： m
コンクリートの線膨張係数： α_c
ロードセルの " ： α_s
時間 t_1 から t' 時間経過後のコンクリートの乾燥収縮歪： ε_{cs}

する。ロードセルは完全弾性体とする。以下の計算では表-1に示す記号を用いた。

a). 一定持続外荷重を受けた場合

まず時間 t_0 で外力荷重により応力計を含む被測定部コンクリート全体に一樣な応力(σ)を受けたと仮定した時に t 時間経過後にこの応力計が検知する応力を σ' として σ'/σ を算定すると次のようになる。ただし、乾燥収縮歪は生じないとする。また、コンクリートの弾性係数は時間変化を受けても一定のままであるとする。

$$\left(\frac{\sigma'}{\sigma} \right)_a = \frac{1 + 2n}{1 + \frac{n}{k} \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{1}{1+m}} \quad \text{-----①}$$

ここに、 $\ell_s/\ell_c = n$ 、 $A_s/A_c = \beta$ 、 $E_s/E_c = k$

b). 一樣な温度上昇 ΔT を受けた場合

この応力計を含む被測定部コンクリート全体が一樣な温度変化 ΔT を受けそれによる熱変形が完全拘束された場合に被測定部コンクリートに発生する応力(σ)と応力計が検知する応力(σ')の比 σ'/σ を算定すると次のようになる。ただし、クリープ歪、乾燥収縮歪は生じないとする。また、温度変化によりコンクリートの弾性係数は変化しないとする。

$$\left(\frac{\sigma'}{\sigma} \right)_b = \frac{1 + 2n \cdot \gamma}{1 + \frac{n}{k} \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)} \quad \text{-----②}$$

ここに、 $\alpha_s/\alpha_c = \gamma$

c). 一樣な乾燥収縮歪を受けた場合

この応力計を含む被測定部コンクリート全体が時間 t_1 から t' 時間後に一樣な乾燥収縮歪 ε_{cs} を受けそれによる変形が全く外部から拘束されない場合に応力計が検知する応力(σ')を算定すると次のようになる。ただし、クリープ歪は生じないとする。また、コンクリートの弾性係数は時間変化を受けても一定のままであるとする。

$$(\sigma')_c = \frac{2n}{1 + \frac{n}{k} \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)} \cdot E_c \cdot \varepsilon_{cs} \quad \text{-----③}$$

これらの算定結果から l_s / l_c
 $= n$ が小さいほど、①、②式の値は1に、③式の値は0に近くなり、応力計の精度が高くなることがわかる。

最大骨材寸法20~25mmのコンクリートに対して実用化されている有効応力計の各部の寸法は以下の通りである。

$$L = 50\text{cm}, \quad l_c = 45\text{cm}, \\ l_s = 2.5\text{cm}, \quad A_c = 25\text{cm}^2, \\ A_s = 1.32\text{cm}^2$$

これに対して、コンクリート弾性係数の想定される変動範囲(5000~ $4.0 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)でこの応力計の検知精度を算定したものが図-2~4である。なお、 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ 、 $\alpha_s = 11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ とした。

図-2は、①式の $(\sigma' / \sigma) a$ を算定した結果で、実線は $m=0$ (クリープ変形なし)、破線は $m=1$ (クリープ係数で1相当のクリープ変形あり)の場合である。

図-3は、②式の $(\sigma' / \sigma) b$ を算定した結果で、実線は $\gamma = 1$ ($\alpha_c = 11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)、破線は $\gamma = 1.375$ ($\alpha_c = 8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)の場合である。

図-4は、③式の $(\sigma') c$ を $\epsilon_{cs} = 100 \times 10^{-6}$ と仮定して算定した結果である。

これらの結果から次のことがわかる。有効応力計の検知精度はコンクリートの弾性係数の大きさにより変化する。弾性係数が小さい場合は発生する応力を大きめに評価し、逆に、弾性係数が大きい場合には応力を小さめに評価する傾向がある。クリープ、熱膨張係数や乾燥収縮歪みによっても多少影響を受ける。ただし、周囲のコンクリートと密着するよう正しく設置すれば、実用上は充分は精度を有していることがわかる。当然のことながら設置方法が正しくなければ、その精度は期待できない。

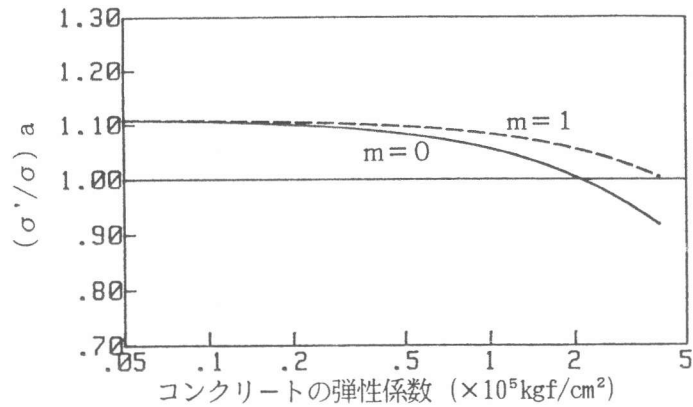


図-2 一定持続荷重を受けた場合の有効応力計の検知精度

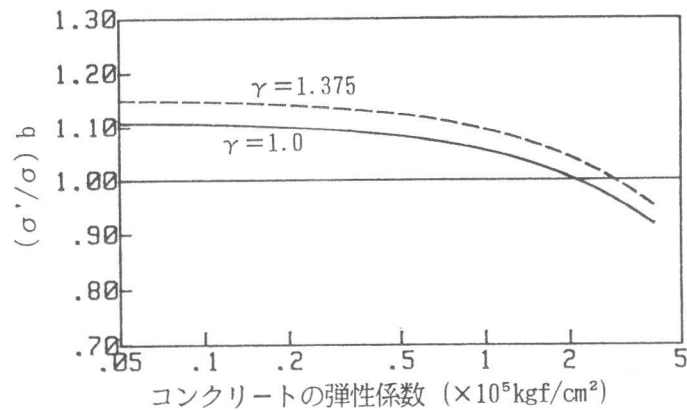


図-3 温度上昇 ΔT による熱変形が完全拘束された場合の有効応力計の検知精度

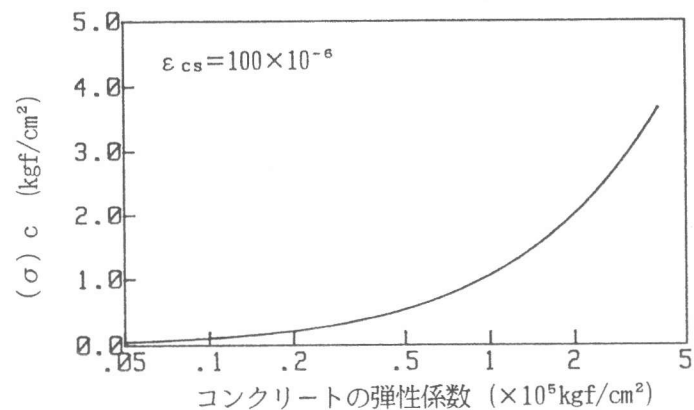


図-4 乾燥収縮歪が生じた時に有効応力計が検知する応力

3. 埋込み型歪計による計測値からの温度応力の評価方法に関する検討

3.1. 有効応力計と埋込み型歪計の比較

前節で有効応力計は適正な使い方をすれば、実用的な精度で温度応力を計測できることを述べた。しかし、この応力計で温度応力を計測するためには、計測開始直前に測定しようとする周囲のコンクリートと同じものを計器の中に詰めなければならない。そのため、配筋の入り組んだ箇所やコンクリート打設中に人が近づくことのできない場所での計測は困難である。また、この計器は比較的高価である。

これに比べて、埋込み型歪計は小型で、しかも事前に設置しておくだけでよいので現場計測では使いやすい。しかし、周知のように埋込み型歪計の計測値から温度応力を求めるためには初期材令のコンクリートの弾性係数、クリープ特性の時間依存性を正しく評価しておく必要がある。ここでは、対象とするコンクリートの初期物性に関するデータを事前に求めておくことによって埋込み型歪計の計測値からどこまで精度よく温度応力が評価できるかを検討した。具体的には、同一箇所計測した有効応力計の計測結果との比較を行った。

3.2. 埋込み型歪計の計測値からの温度応力の算定

方法

次の仮定が成り立つものとする。図-5に示す時間区分重ね合せ法を適用する。時間区分 Δt_i ($=t_i - t_{i-1}$)内でコンクリート弾性係数 E_{ci} は一定であるとする。さらに、その間に発生する温度応力の増分 $\Delta\sigma_i$ は時間区分 Δt_i の中間時点でステップ関数状に作用するとする。また、その間の歪の増分 $\Delta\varepsilon_i$ ($=\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$ 、 ε_i は歪計で計測された時間 t_i での歪。ただし、温度変化による膨張収縮歪を除く)は弾性歪の増分 $\Delta\varepsilon_{ei}$ とクリープ歪の増分 $\Delta\varepsilon_{ri}$ の和であるとする。 $\Delta\sigma_i$ と $\Delta\varepsilon_{ei}$ の間には、フックの法則が成り立ち、クリープ歪は応力に比例するとする。以上から次式が成り立つ。

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma_i \quad \text{-----④}$$

$$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} = \Delta\varepsilon_{ei} + \Delta\varepsilon_{ri} \quad \text{---⑤}$$

$$\Delta\sigma_i = E_{ci} \cdot \Delta\varepsilon_{ei} \quad \text{-----⑥}$$

$$\Delta\varepsilon_{ri} = \Delta\varepsilon_{ri/1} + \Delta\varepsilon_{ri/2} \quad \text{-----⑦}$$

$$\Delta\varepsilon_{ri/1} = \sum_{n=1}^{i-1} \Delta\sigma_n \{ \phi(t_i - t_{on}, t'_{on}) - \phi(t_{i-1} - t_{on}, t'_{on}) \} \quad \text{---⑧}$$

$$\Delta\varepsilon_{ri/2} = \Delta\sigma_i \cdot \phi(t_i - t_{oi}, t'_{oi}) \quad \text{---⑨}$$

$$t_{oi} = t_{i-1} + \Delta t_i / 2 \quad \text{-----⑩}$$

ここに、 $\phi(t_i - t_{oi}, t'_{oi})$ は、有効載荷材令(t'_{oi})で載荷された応力によって($t_i - t_{oi}$)時間後に生じる単位応力当たりのクリープ歪である。なお、有効材令(t'_i)の算定には次式を用いるものとする。 T_i は、時間 t_i でのコンクリート温度(°C)である。

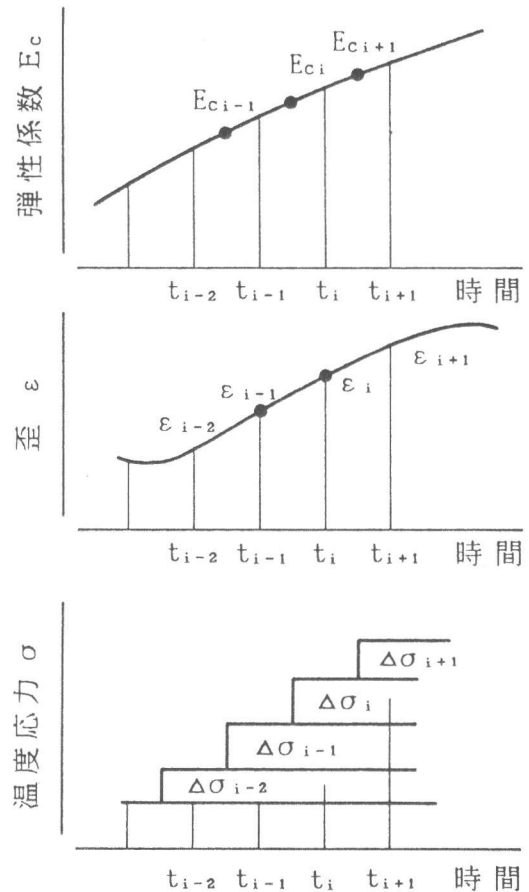


図-5 温度応力算定のための時間区分重ね合せ法

$$t'_i = \sum_{n=1}^i \Delta t_n \cdot (T_n + T_{n-1}) / 20 \quad \text{-----} \text{⑪}$$

以上から、次式が求まる。

$$\Delta \sigma_i = E_{ci} \cdot \{ (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) - (\Delta \varepsilon_{ri}/1 + \Delta \varepsilon_{ri}/2) \} \quad \text{-----} \text{⑫}$$

ただし、⑫式右辺中にも $\Delta \sigma_i$ が含まれることになるので、実際の数値計算では⑫式と⑨式との間で繰り返し計算を行い所定の精度を満たす $\Delta \sigma_i$ を求めることになる。結果的に求めた σ_i の信頼性は仮定する E_{ci} 、 $\phi(t_i - t_{oi}, t'_{oi})$ の信頼性に帰結することになる。

3.3. 埋込み型歪計と有効応力計による温度応力計測結果の比較

図-6に示す厚さ2.0mのマット状コンクリート構造物(幅12.0m × 奥行12.0m)の中央部高さ方向の4箇所(上、中上、中下、下)でコンクリート温度および温度応力の計測を行った。それぞれの計測箇所(埋込み型歪計と有効応力計)を並列して設置した。コンクリートの使用材料、調合は表-2に示す通りである。埋込み型歪計の計測値からの温度応力の算定に当たって使用したコンクリートの弾性係数、単位クリープ歪の時間依存関数は、同一材料・同一調合のコンクリートについての試験結果[3]をそのまま用いた(図-7、8)。

コンクリート温度の計測結果を図-9に示す。材令7日で上層のコンクリートが打設されたため、再び温度が上昇している。前節で述べた方法によって歪計の計測値から算定した温度応力の変化を図-10に示す。なお、歪計の計測値は無応力歪計で計測された見掛け上の歪を補正してから計算に用いた。同一箇所の有効応力計による温度応力の計測結果を図-11に示す。図-10と図-11の比較から両者はほぼ一致しており、コンクリートの力学性状に関する信頼性のあるデータがあれば、ここで示した算定方法によって埋込み型歪計でも有効応力計と同程度の信頼

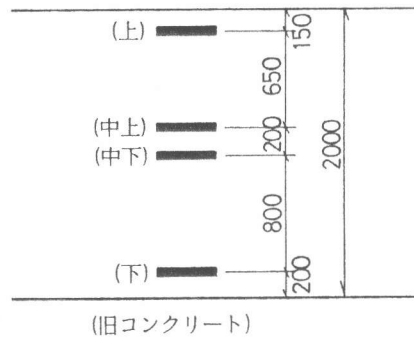


図-6 温度応力の計測を行った
マット状コンクリート構造物

表-2 コンクリートの使用材料と調合

使用材料			調合 (1m ² 当り)						
セメント	細骨材	粗骨材	W/C (%)	S/A (%)	セメント (kg)	水 (ℓ)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)	混和剤 (kg)
フライッシュ B種	砕砂 陸砂	硬質砂岩 碎石	55	43	298	164	780	1042	0.745

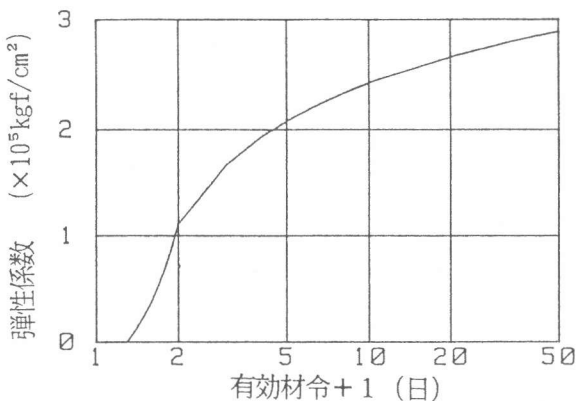


図-7 計算に用いた弾性係数発現曲線

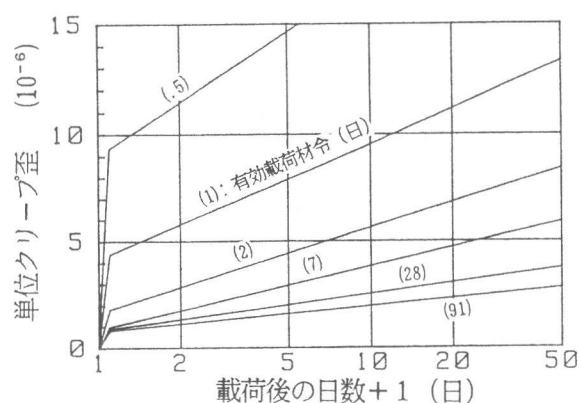


図-8 計算に用いた単位クリープ歪曲線

性で温度応力を求めることができることがわかる。

4. まとめ

本論の基礎的な検討により以下のことが明らかになった。

- 1). 有効応力計は、周囲のコンクリートと密着するよう正しく設置すれば実用上十分な精度で温度応力を計測できる。
- 2). コンクリートの力学性状に関する信頼性のあるデータがあれば、本論で示した算定方法により埋込み型歪計でも有効応力計と同程度の信頼性で温度応力を求めることができる。

参考文献

- 1) マスコンクリートの温度応力研究小委員会：マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括（その1～4）、コンクリート工学、Vol.21, No.8, pp.4～17、No.9, pp.4～12、No.11, pp.4～12、1983、Vol.22, No.1, pp.23～27、1984
- 2) 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
- 3) 川口 徹ほか：マスコンクリートの温度応力評価に及ぼす材料特性の数値モデル化の影響、第7回コンクリート工学年次講演論文集、pp.29-32、1985

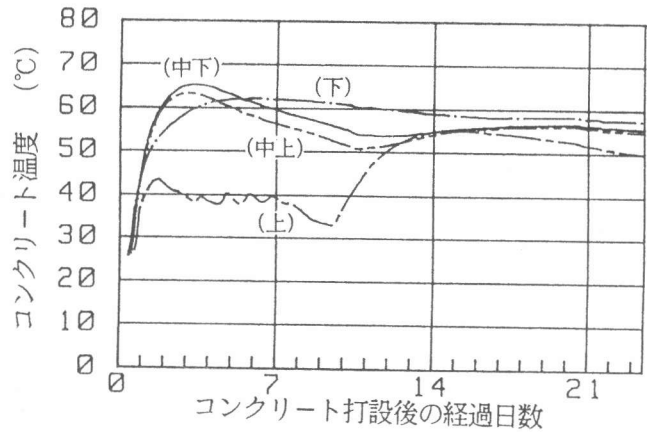


図-9 コンクリート温度の計測結果

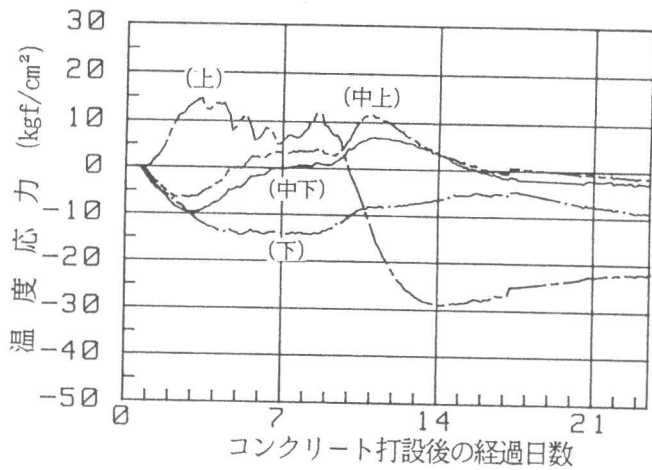


図-10 埋込み型歪計の計測値から求めた温度応力

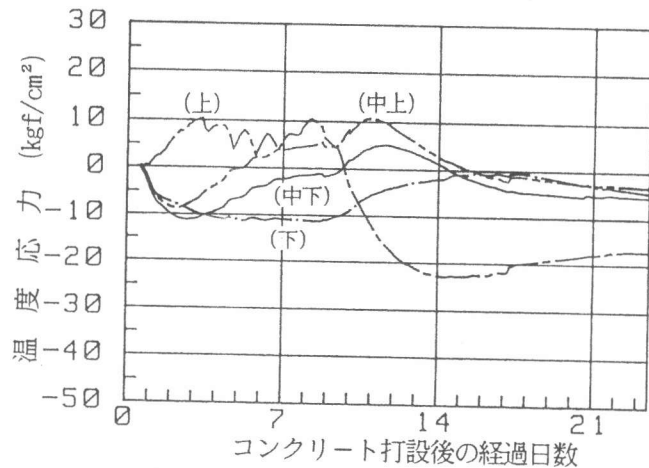


図-11 有効応力計で計測した温度応力