

[1026] Compensation Plane 法による温度応力の リラクセーション解析

正会員 ○ 森本博昭（岐阜大学工業短期大学部）

正会員 小柳 治（岐阜大学工学部）

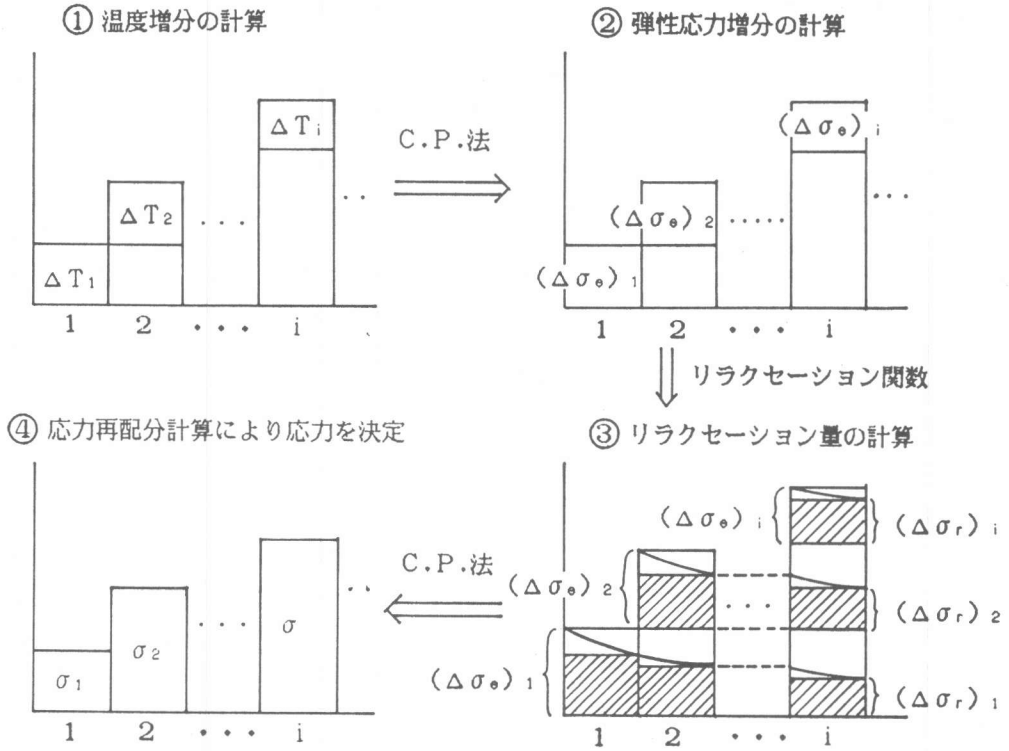
1. まえがき

Compensation Plane (Line) 法は、J C I マスコン委員会により提案された新しい温度応力の解析手法⁽¹⁾ あり、昭和61年制定土木学会コンクリート標準示方書においても、温度応力の近似計算方法として推奨されている。本手法の基本的考え方は、従来からある内部拘束応力の算定法としての Compensation Line 法⁽²⁾ における基本的な仮定である平面保持の仮定を、内部拘束に加えて外部拘束を受ける場合についても拡張適用するところにあるが、その理論的な妥当性は、種々の実測データから確認されている⁽¹⁾。本手法は、温度応力の簡易手法として今後各種構造物の温度応力解析に適用される機会が増えるものと考えられる。

さて、周知のように温度応力は、コンクリートの粘弾性的挙動によるリラクセーションの影響を大きく受ける。従って、精度のよい温度応力解析を行おうとする場合は、これを適切に考慮する必要がある。著者らは、ここ数年来、主として温度応力のリラクセーション解析に用いることを念頭においた若材令コンクリートのリラクセーション特性とその評価法に関する研究⁽³⁾⁽⁴⁾ を行ってきた。本研究は、著者らが先に提案した若材令コンクリートのリラクセーション関数⁽⁴⁾ を Compensation Plane 法に導入し、本手法においてリラクセーションを考慮した解析を可能にしたのでその詳細を述べるとともに、本手法によるコンクリート壁2例についての温度応力のリラクセーション解析結果と実測値ならびに有限要素法による解析結果とを比較検討することによりその適用性を検討したものである。

2. 解析手法

Compensation Plane 法の最大の特徴は、平面保持の仮定のもとに外部拘束効果を軸力と曲げモーメントに置換し、温度応力問題を一般部材の軸力と曲げモーメントとの問題として取り扱うところにある。Compensation Plane 法の詳細は、文献(1)などにゆずり、以下において Compensation Plane 法(以下、本文では C.P. 法と略記する)を用いたリラクセーション解析手法について述べる。C.P. 法によるリラクセーション解析手法の詳細は図-1に示す通りである。すなわち、まず適当な方法(有限要素法、差分法など)により部材各部の温度変化を求める。そして、この温度計算結果から、C.P. 法を用いて各タイムステップの弾性応力増分を求める。次に、得られた弾性応力増分について、リラクセーション関数をもとに各タイムステップにおける応力緩和を評価する。このような過程を経た後、各ステップにおいて残留応力のつり合い条件が満足されるよう C.P. 法により応力の再配分計算を行い最終的に温度応力を決定する。以上のように、本手法は 1. 温度解析 → 2. 弾性応力解析 (C.P. 法) → 3. 応力緩和の評価 → 4. 応力再配分計算 (C.P. 法) の4過程からなる。本研究では、実際の計算にあたり温度解析は有限要素法により別途実施し、その後の弾性応力解析から最後の応力再配分計算までの一連の解析過程は、J C I マスコン委員会作成のパソコンプログラム⁽⁵⁾ を基本とし、これに応力緩和に関する処理を追加した計算プログラム (NEC PC9801 シリーズ用) を用いて実施した。一方、有限要素法によるリラクセーション解析では、構成式表示にリラクセーション関数を用いたが、解析手法の



各ステップ内でC.P.法による再配分計算を行い、最終的に温度応力 ($\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i$) を決定する。たとえば、 i ステップではつり合い条件を満足させるように $(\Delta\sigma_r)_1, (\Delta\sigma_r)_2, \dots, (\Delta\sigma_r)_i$ の再配分計算を行い σ_i を決定する。

各ステップでの残留応力を計算
たとえば、 i ステップでは $(\Delta\sigma_r)_1, (\Delta\sigma_r)_2, \dots, (\Delta\sigma_r)_i$ を決定する。

図-1 解析手法詳細図

詳細は文献(4)を参照されたい。また、温度解析は前述のように有限要素法を用いたが、解析手法の詳細についても関連の図書(6)にゆずることとする。

3. 解析対象構造物

本研究で解析を行った2件のコンクリート壁の形状、寸法ならびに計器類の埋設位置をそれぞれ図-2と図-3に示す。以下、本文では図-2の壁を壁(A)、一方図-3の壁を壁(B)と呼ぶことにする。

図に示すようにいずれの壁も旧コンクリート上に打設されたもので、外部拘束をうける構造物の典型例である。壁(A)の長さ(L)と高さ(H)との比(L/H)は10.0また壁厚(D)は1.5mである(1)。一方壁(B)においてはそれぞれL/H=5.1, D=0.8mである。表-1~2に壁(A)壁(B)のコンクリート示方配合ならびに材令28日における力学的性質

4. 解析諸定数

C.P.法と有限要素法それぞれによる温度応力解析で用いた諸定数は、全て同一のものとした。

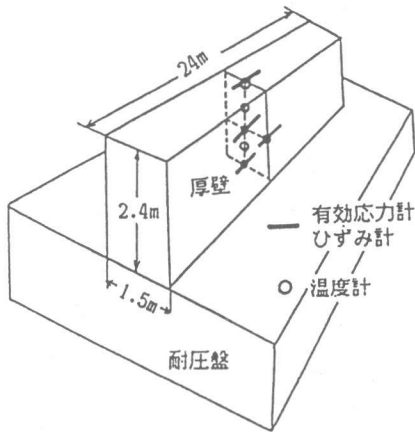


図-2 壁 (A)

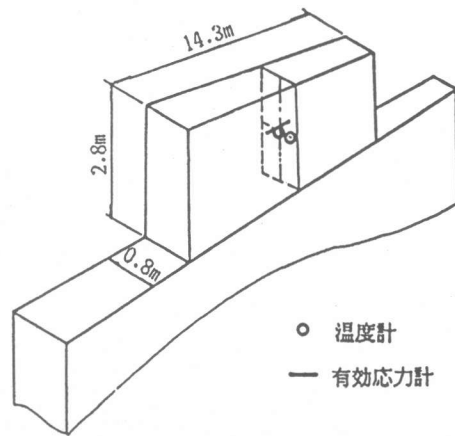


図-3 壁 (B)

1) 弾性係数

壁 (A) の解析で用いた弾性係数は実験により求めた次式 (1) により評価した。

$$E(t) = 0.3506 \times \frac{t}{2.1453 + t} \times 10^6 \quad (1)$$

一方、壁 (B) では著者らの研究成果⁽⁷⁾ による次の評価式を用いた。

$$E(t)/E(28) = 1.55 \log_{10} t + 0.48 \quad (0.7 \leq t \leq 1.4) \quad (2-a)$$

$$E(t)/E(28) = 0.21 \log_{10} t + 0.68 \quad (1.4 \leq t \leq 41) \quad (2-b)$$

ただし、(1) (2) 式において

t : 材令 (日)

$E(t)$: 材令 t における弾性係数 (kgf/cm²)

$E(28)$: 材令 28 日における弾性係数 (kgf/cm²)

2) リラクセーション関数

解析で用いたリラクセーション関数は次のような双曲線形の実験式である。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + Ct}{A + t} \quad (3)$$

ここで、t : 時間 (hr)

σ_t : 時間 t での残留応力

σ_i : 初期載荷応力

A, C : 実験定数

式中の実験定数 A, C の値については、壁 (A) (B) とともに図-4 ならびに次に示すような評価式により決定した⁽⁴⁾。なお、これらは著者らが実験により求めたものである。

$$A = -8.25 \log_{10} t + 23.52 \quad (t < 7 \text{ day}) \quad (3-a)$$

$$= 7.43 \quad (t \geq 7 \text{ day}) \quad (3-b)$$

表-1 コンクリート示方配合

	slump (cm)	s/a (%)	W/C (%)	単位重量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
壁 (A)	15	44	50	173	346	793	996
壁 (B)	8	44.7	55.5	163	294	813	1031

表-2 コンクリートの力学的性質 (材令28日)

	壁 (A)	壁 (B)
圧縮強度 (kgf/cm ²)	321	288
引張強度 (kgf/cm ²)	—	21.7
弾性係数 (kgf/cm ²)	3.45×10^5	2.48×10^5

$$C = 0.25 \log_e t + 0.04$$

$$(t < 7 \text{ day}) \quad (4-a)$$

$$= 0.07 \log_e t + 0.40$$

$$(t \geq 7 \text{ day}) \quad (4-b)$$

3) その他

コンクリートの熱膨張率は、
 $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ (一定) とした。(8)

C.P.法では、旧コンクリートを拘束体と考えて解析を行った。その際の外部拘束係数はJCIマスコン委員会同定の図表より壁(A)では $R_N = 0.9$, $R_{M1} = 1.08$, $R_{M2} = 1.09$ 、一方、壁(B)では $R_N = 0.7$, $R_{M1} = 1.12$, $R_{M2} = 1.70$ とした。また、熱伝導解析で用いた諸定数を表-3に示す。(8)(9)

5. 解析結果と考察

1) 温度解析

有限要素法による壁(A)と(B)の温度解析結果のうち、図-5, 6に壁中央の中心と表面の解析値を実測値と合わせて示す。図-5より、壁(A)中心の温度は実測で材令2.5日で 52.4°C (打ち込み温度からの温度上昇 36.4°C)のピーク値(解析値、材令3日、温度 51.4°C)を示している。実測値と解析値との対応は中心、表面とも良好で、両者の差は 5°C 以内に収まっている。一方、図-6より壁(B)中心の温度は材令1~1.5日で 50.0°C (打ち込み温度からの温度上昇 36.4°C)の最高温度(解析値、材令1日、温度 51.0°C)に達する。実測値と解析値との対応は良好であり、両者の差は 5°C 以下である。

2) 温度応力解析

図-7~9に壁(A)に対するC.P.法と有限要素法による温度応力解析結果のうち、壁中央中心、底部中心ならびに頂部表面における解析結果をそれぞれにおける実測値とあわせて示す。各図から、壁(A)に生じる温度応力は、いずれの部分においても温度上昇期に圧縮応力となり、以後温度降下に伴い引

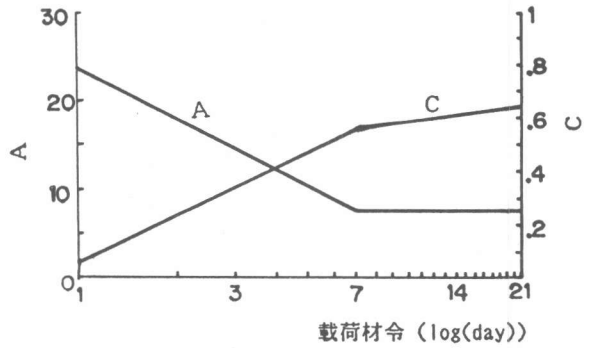


図-4 載荷材令とA, Cの関係

表 3 コンクリートの熱的性質

	壁 (A)	壁 (B)
断熱温度上昇	$T = 55.1(1 - e^{-0.574t})$	$T = 37.8(1 - e^{-0.0731t})$
コンクリート熱伝導率 (kcal/mh $^\circ\text{C}$)	2.16	同左
コンクリート比熱 (kcal/kg $^\circ\text{C}$)	0.24	同左
熱伝達率 (kcal/m 2 h $^\circ\text{C}$)	10.0(コンクリート面) 5.0(型枠面)	同左
コンクリート打設温度($^\circ\text{C}$)	16	25

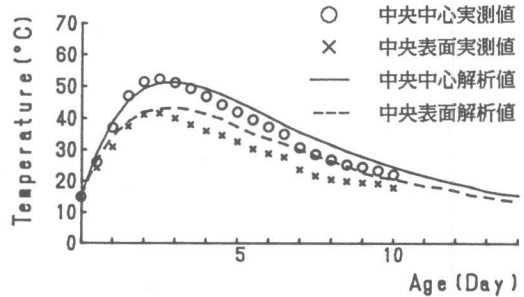


図-5 温度の経時変化 壁(A)

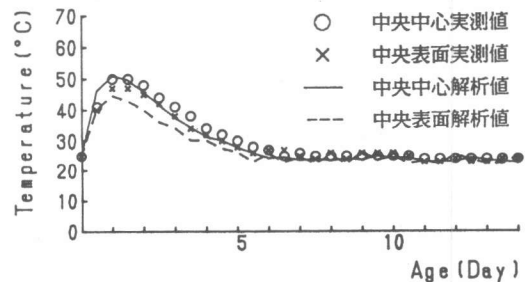


図-6 温度の経時変化 壁(B)

張応力へと移行していく傾向を示している。実測によると壁中央部中心において最も大きな応力が生じている。図-7から、C.P.法と有限要素法の解析値を比較すると両者は全般的によく合致しているが、C.P.法の方がやや応力緩和を大きく評価する傾向にあり有限要素法の解析値に対してC.P.法の解析値は18%程度の差異を生じている。中央中心での実測値とC.P.法ならびに有限要素法による解析値とを比較すると、実測値と両解析それぞれ全般的によく合致しており、たとえば最大圧縮応力度では実測値の

14.7 kgf/cm²に対してC.P.法では15.3 kgf/cm²、有限要素法では18.7 kgf/cm²、また材令6日での引張応力度は実測値の6.0 kgf/cm²に対してC.P.法は5.3 kgf/cm²、有限要素法では5.7 kgf/cm²を与えている。このように本例では実測値との対応においてはC.P.法は有限要素法と同程度の精度を持つ解を与えていると言えよう。図-8から、底部中心においてもC.P.法と有限要素法は定性的にはよく合致した解析値を与えている。しかし、C.P.法は有限要素法にくらべ応力緩和量を中央中心よりさらに大きく評価する傾向にあり有限要素法の解析値に対してC.P.法の解析値は最大50%程度の差異を生じている。ただし、材令初期における実測値との比較においては、両解析値とも実測値に近い値を与えており、解析精度についての両者の優劣の判断はつけがたい。図-9から、頂部表面においてもC.P.法は有限要素法にくらべ応力緩和量を大きく評価する傾向にあるが、実測値との対応においては、有限要素法による解析値と同様、良好な結果を与えている。図-10に壁(B)中央中心における温度応力の解析値と実測値を示す。壁(B)に発生する温度応力は、壁(A)同様、外部拘束が卓越する場合の典型的な傾向を示している。C.P.法と有限要素法の解析値を比較すると、壁(A)同様、両者は定性的にはよく合致するもののC.P.法の方が応力緩和量を大きく評価しており、C.P.法は最大引張応力度では有限要素法の値に対して35%程度小さな値を与えている。しかし実測値と比較すると、最大引張応力度について実測値の

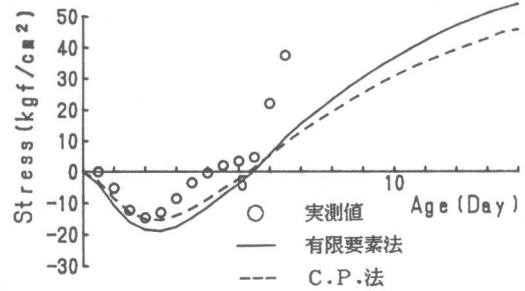


図-7 応力の経時変化 壁(A) 中央中心

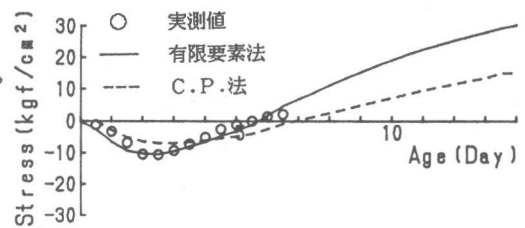


図-8 応力の経時変化 壁(A) 底部中心

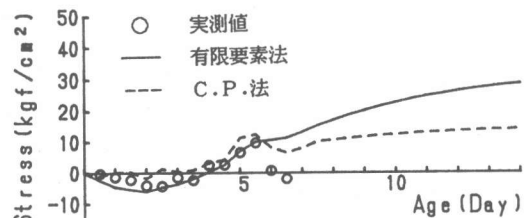


図-9 応力の経時変化 壁(A) 頂部表面

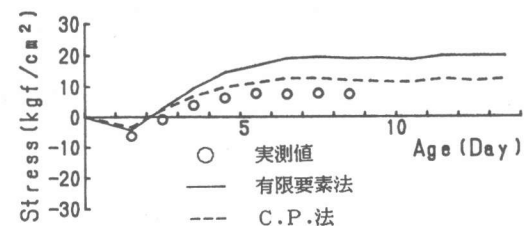


図-10 応力の経時変化 壁(B) 中央中心

9~10 kgf/cm²に対してC.P.法では12.6 kgf/cm²、一方有限要素法では19.9 kgf/cm²となっており、少なくとも有限要素法に比べ実測値との対応が悪いという結果とはなっていない。壁(A)ならびに壁(B)のいずれの解析においてもC.P.法は有限要素法に比べて応力緩和量を大きく評価する結果が得られた。この原因の一つとして、両解析手法における応力緩和に対する処理過程が同一ではないことが考えられるが、これについてはさらに検討が必要である。

6. まとめ

本研究は、Compensation Plane 法を用いた温度応力のリラクセーション解析手法を提案するとともに、本手法によるコンクリート壁2例についての解析結果を実測値ならびに有限要素法による解析結果と比較検討することにより本手法の適用性を検討したものである。

本研究で得られた結論を要約すれば次のようになる。

- (1) 若材令コンクリートのリラクセーション関数を Compensation Plane 法に導入することにより、温度応力のリラクセーション解析を実用上十分な精度で行うことが可能である。
- (2) コンクリート壁2例についての Compensation Plane 法による温度応力リラクセーション解析値と実測値とはよく合致し、その解析精度は実用上十分であると考えられた。
- (3) Compensation Plane 法と有限要素法による解析値は定性的にはよく合致したが、Compensation Plane 法においては応力緩和量を大きく評価する傾向が認められた。しかし本研究の範囲内では、実測値との対応においては有限要素法による解析値と少なくとも同程度の精度をもつ解析結果が得られた。

(参考文献)

- (1) マスコンクリートの温度応力研究委員会：外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案，マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1985
- (2) 小沢章三：マスコンクリートの初期ひびわれとその防止対策に関する研究（I），発電水力，57号，pp.48~61，1962
- (3) 平田正成，河合 敦，森本博昭，小柳 洽：若材令コンクリートのリラクセーション特性評価法に関する研究，土木学会第41回年次講演会概要集，pp.377~378，1986
- (4) 平田正成，森本博昭，小柳 洽：マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析，第9回コンクリート工学年次論文報告集，pp.19~24，1987
- (5) マスコンクリートの温度応力研究委員会：マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム，日本コンクリート工学協会，1985
- (6) たとえば，O. C. ツィエンキーヴィッツ（吉識雅夫，山田嘉昭監訳）：マトリックス有限要素法，培風館，1975
- (7) 森本博昭，小柳 洽：コンクリート構造物の温度応力解析における2，3の問題点，JCI マスコンコロキウム論文集，pp.69~74，1982
- (8) マスコンクリートの温度応力研究委員会：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，マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1985
- (9) 小柳 洽，森本博昭：コンクリート構造物の熱伝導解析についての二、三の考察，岐阜大学工学部研究報告，第31号，pp.135~144，1981