

[13] Compensation-Line 法とその応用

正会員 〇石川 雅美 (東急建設技術研究所)
 正会員 西岡 哲 (東急建設技術研究所)
 正会員 前田 強司 (東急建設技術研究所)

1. はじめに

マスコンクリートの温度応力簡易算定法として新しく提案されたCompensation-Line(Plane)法は、有限要素法と比べてもかなり有力な手法である。しかしながらこの手法は、まだ実際に適用された例は少なく、またその解析精度を大きく支配するパラメータ、すなわち外部拘束係数に関する知見も十分であるとは言えない。本報告はコンクリートとその拘束体との境界面の付着力が小さいと考えられる場合について、実験結果とCompensation Line 法によるパラメトリックスタディから外部拘束係数を求め、これを実構造物に適用した例を示したものである。さらに、これらの結果について有限要素法による解析結果と比較を行った。

2. 外部拘束係数について

ここでは主に外部拘束係数について検討を加えるもので、Compensation Line(Plane)法の詳細なアルゴリズムについては文献(1)を参照されたい。Compensation Line 法を用いて温度応力解析を実施する際には、外部拘束の影響を表すパラメータとして、 R_N 、 R_M が必要となる。 R_N はコンクリートの水平方向(軸方向)の熱膨張あるいは熱収縮に対する外部からの拘束の度合と表すものであり、 R_M は上下方向の熱変形(曲げ変形)に対する外部拘束の影響を表すパラメータである。日本コンクリート工学協会(J.C.I)の提案¹⁾によれば、 R_N は解析対象となるコンクリートの形状が変化しない限り一定の値をとり、また、 R_M についてはコンクリートの温度がピークに達する前後でその値を変化させ、ピーク前を R_{M1} 、ピーク後を R_{M2} としている。そして、これら3つのパラメータ R_N 、 R_{M1} 、 R_{M2} の値はそれぞれ、コンクリートのL/H(ベース長/リフト高)と E_c/E_R (被拘束体の弾性係数/拘束の弾性係数)の値から、それらの具体的な数値が与えられている。これらのパラメータの値は、66ケースにも及ぶ有限要素解析の結果から算出されたものであるが、それらはいずれも拘束体と被拘束体が一体であると仮定して導かれたものである。本報では、拘束体と被拘束体が一体でない場合、例えば杭基礎上、あるいは柔かい地盤上に直接打設されたコンクリートのように、境界面の付着力が小さい場合の外部拘束係数について実験値と解析値から算出することを試みた。

3. 実験結果からの外部拘束係数の算出

拘束体と被拘束体との境界面の付着力が小さい場合のモデルとして、図.1に示すような1m×0.95mの断面を有し、長さ15mの試験体(L/H=15)を作成した。試験体の側面を厚さ5cmの発泡スチロールで覆い、上下方向にのみ温度勾配が生じるようにした。また、底部境界面では土間コンクリートの拘束を極力小さくするために、試験体と土間コンクリートとの間にセルフレベルング材、テフロンシート2枚、および鉄板を敷いた。この試験体に用いたコンクリートの配合を表1に示す。図.2に試験体中心断面で得られた温度履歴を示す。なお、この実験の詳細については著者らの報告²⁾を参照されたい。中心断面の底部から10cmの位置と上面から20cmの位置に埋設した有効応力計から得られた応力とCompensation Line 法による解析結果との比較を図.3に示す。

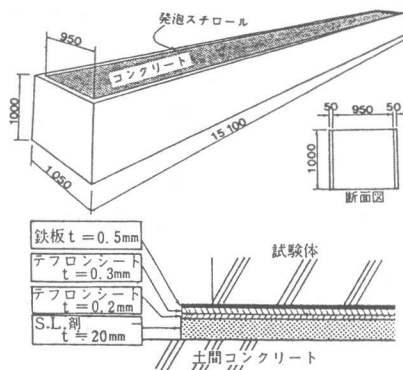


図.1 試験体の概要と底部境界面

表1 コンクリートの配合

呼び強度 kg/cm ²	スラブ 厚(cm)	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位量kg/m ³				混和剤 P oz. No.70
					C	W	S	G	
240	9	58.9	49.7	4±1	280	165	913	948	2.80

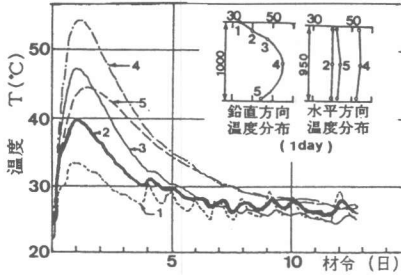


図.2 試験の温度履歴

実線は実測値であり、点線は解析値である。打設されたコンクリートの弾性係数が増加するのに従って E_c/E_R の値が変化するのでCompensation Line法に用いる外部拘束係数を各材令で変化させることも考えられるが、ここではJ.C.I手法に則り、 R_N 一定、温度ピーク前の R_{M1} 、ピーク後の R_{M2} の3つの値を用いた。そして、実測温度をもとに実験値と一致するようにこれら3つの値を変化させ計算を行った。その結果、 $R_N=0.05$, $R_{M1}=1.3$, $R_{M2}=1.8$ としたときが図に示すように良好な一致を示した。このことより、Compensation Line法は、実測された温度をもとに外部拘束係数を適切に選択すれば、かなりの精度で温度応力の推定が可能であると考えられる。なお、この計算に用いた弾性係数は、この試験体と同一バッチの円柱供試体から得られた値にクリープを考慮して0.6を乗じた値を用いた。0.6というクリープの評価は、実測されたひずみから計算した応力と有効応力計の応力とを比較して得られたものである。また、伊藤³⁾らも円柱供試体の弾性係数を有効弾性係数に換算する際のクリープの影響を0.6と報告している。

4. 実構造物の解析例

実際の構造物から得られた応力とこれをCompensation Line法によって解析した値を比較した2つの例について述べる。最初の例は長さ38m、幅32m、高さ6mのフーチングである。(軸方向に対するL/Hは6.33)このフーチングは直径2m、長さ27m~42mの場所打ち杭で支持された軟弱地盤上の構造物である。図.4に示すように、中心断面内の3ヶ所にひずみ計を埋設し、その値をもとに温度応力を計算した。なお、この計算の過程で用いた弾性係数は、前節に示した試験体の例を参考にして円柱供試体から得られた弾性係数に0.6を乗じたものである。

表2 コンクリートの配合

呼び強度 kg/cm ²	スランプ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位置kg/m ³				湿和剤 Poz. 100XR
					C	W	S	G	
395	8	45	43	2.0	390	176	799	1063	975ml

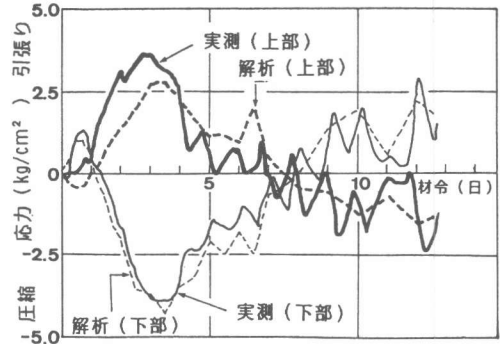


図.3 試験体の実測応力と解析応力の比較

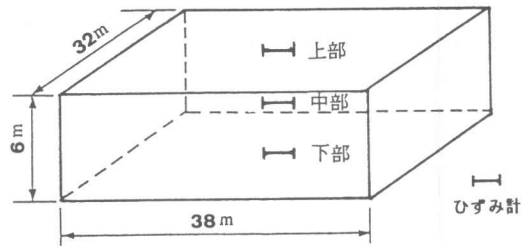


図.4 フーチング A の概要

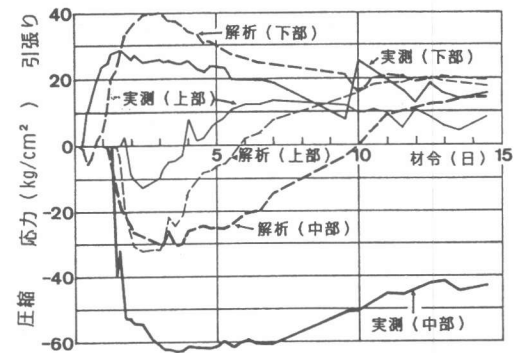


図.5 フーチング A の実測値と解析値の比較

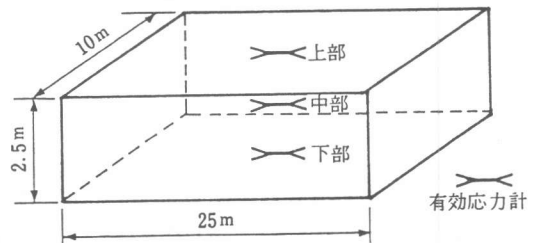


図.6 フーチング B の概要

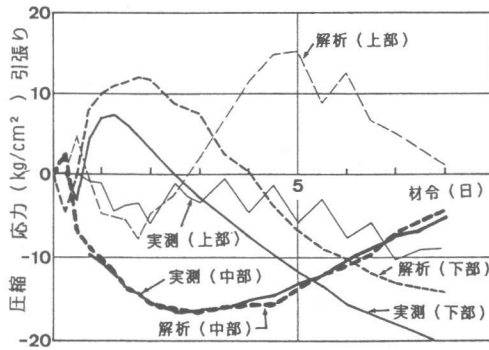


図.7 フーチング B の実測値と解析値の比較

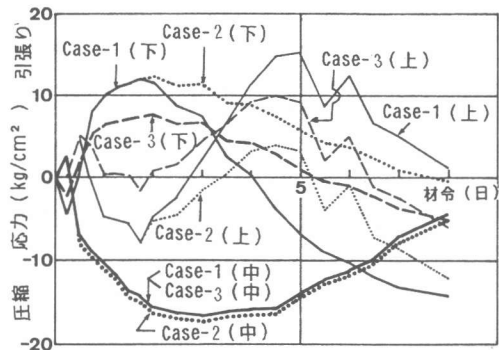


図.8 外部拘束係数のちがいによる応力パターン

コンクリートの配合を表.2に示す。実際の施工ではコンクリートは40時間にわたり連続して打設された。そこで解析では、5層に分割し、各層は瞬時に打設されることとし、その打継ぎ間隔は実施工を反映するように仮定した。打継ぎを考慮する場合には各リフト打設毎に外部拘束係数を変化させることも考えられるが、ここではリフト打設間隔が短くかつ連続打設であることから、その値は変化しないものと仮定し、実測応力と一致するように3つのパラメータ R_N 、 R_{M1} 、 R_{M2} を逆解析的に算出した。その結果、 $R_N=0.2$ 、 $R_{M1}=1.3$ 、 $R_{M2}=1.8$ となった。図.5はこの解析値と実測値の比較を示したものである。実線は実測値を表わし、点線は解析値を表わしている。傾向としては、断面各部の応力とも実測と解析とで非常によく一致している。ひずみ計による実測結果と解析結果とを比較した場合、現段階では、ひずみ計の初期値の設定時期の問題や弾性係数に対するクリープの影響が十分に明らかにされていないため、これらの比較に対してその絶対値のものまで論ずることは多少無理があるようにも思える。なお図.5で中部の応力が大きく異っている原因は、ひずみ計の初期値の設定が適切でないためではないかと考えられる。

表 3 各解析ケースの外部拘束係数

	Case-1	Case-2	Case-3
R_N	0.20	0.20	0.20
R_{M1}	1.30	1.30	0.75
R_{M2}	1.80	1.80	0.80

次に示す例も軟弱地盤のP C杭基礎の上に打設されたフーチングである。図.6に示すように長さ25m、幅10m、そして高さ5m(L/H=10)の中心断面内の3ヶ所に有効応力計を3本埋設した。コンクリート打設開始から終了まで、10時間程度要したため、解析では2層に分け、1層目と2層目で6時間の時間差を仮定した。前述のフーチングとこのフーチングとは、形状、寸法とも異なるが、地盤とコンクリートの境界の拘束条件が同程度であると考え、先の解析に用いた拘束係数と同じ値を用いてこのフーチングの解析を行った。図.7にこの解析値と実測値の比較を示す。この図では下部と中部の応力は実測値(実線)と解析値(点線)では、傾向はよく一致しているが、上部についてはかなりの差異が見受けられる。そこで拘束係数をパラメトリックに変化させ、解析を行ってみた。その代表的な例を図.8に示し、各解析ケースに用いた外部拘束係数を表.3に示す。Case-1は図.7の解析の外部拘束係数である。Case-2はCase-1の R_{M2} を小さくしたときの値であり、Case-1と比べ中部の応力についてはほとんど変化が見られないが、上部と下部のピーク温度以降の応力の増加、減少傾向はゆるやかになっている。実測と比較するとCase-1とは逆に上部が合って下部が合わないという結果になっている。Case-3はCase-2の R_{M1} を小さくしたものであるが、Case-2と比べ下部の応力は小さくなり上部の応力は逆に大きくなっている。中部の応力についてはあまり変化がない。この理由は R_M が曲げ成分を支配するパラメータであり、中立軸付近の応力にはあまり影響しないためである。これら3ケースの上部の応力について考察してみる。Case-1では上部の解析応力が材令3日以降に急激に引張側に移行し、実測の応力傾向と大きく異なっている。しかしこの傾向は応力値や増減幅に大小はあるものの、Case-1だけではなく R_M の値を変化させたCase-2やCase-3の場合でも見受けられる。したがって、上部に関する実測と解析との差異は、拘束係数に起因するものではなく、入力温度かあるいは何か別の原因で計算誤差が生じたと考えられる。そこで、上部についての結果を除外して考えると、これら3ケースのうち、実測結果に最も対応するのはCase-1であると考えられる。

5. FEMによる解析

図.1に示した試験体の温度応力解析を2次元FEM解析プログラム(解析コードTotal-Rc)を用いて行った。この試験体から得られた温度をもとに、土間コンクリートと試験体の境界面に接合要素を用いて、この要素の剛性を種々に変化させて実測応力と一致するように接合要素の鉛直剛性とせん断剛性を決定した。図.9に先のCompensation Line法による解析応力とFEMによる解析応力の比較を示す。両者はよく一致しており、この結果からもCompensation Line法の有効性が示された。なお、FEM解析で用いた接剛要素のせん断剛性 G は 0.0001kg/cm^2 、であり、鉛直剛性 E は 1.0kg/cm^2 であった。

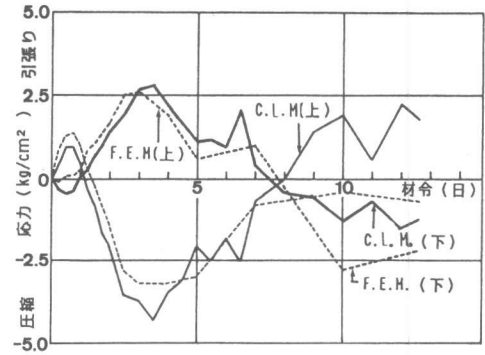


図.9 FEMとCompensation-Line法の比較

6. 外部拘束係数に関する考察

これまで示した3つの実測例はいずれも拘束体と被拘束体との間の付着が小さいと考えられる場合であった。境界面に付着がある場合には2つのパラメータ E_c/E_R と被拘束体コンクリートの L/H によって外部拘束係数の値が決定される。しかしここで示した3つの例は、いずれも L/H 、 E_c/E_R の値が異なっていにもかかわらず、 R_{M1} 、 R_{M2} の値をそれぞれの解析例と同じに仮定した場合でも実測の応力傾向と良好な対応を示した。したがって、ここで示した例を見るかぎり、境界面に付着がない場合には R_{M1} と R_{M2} の値によらず一定の値をとり得るのではないかという可能性も考えられる。一方、 R_N の値は試験体とフーチングの例で異なっている。試験体の R_N は 0.05 であり、これに対しフーチングの例では、主に杭による拘束効果と考えられるが、その値は 0.2 であった。この値は泉⁴⁾の報告した杭基礎の場合の 0.0 という拘束度とは、その算定方法が異なるため、直接的には対応しない。しかし、図.1に示した試験体の拘束条件をほぼゼロと考えても杭基礎の場合は少なくともそれ以上の拘束があると考えられることから、ここで示した $R_N = 0.2$ という値に対してもある程度の妥当性があると思われる。 R_N に関しても、境界面に付着がない場合にはそこに生じる摩擦力か、あるいは杭などによる拘束が支配的な要因となるようであり、2つのフーチングの解析例で R_N の値が変化しないことから L/H の R_N に対する影響は少ないのではないかと考えられる。ここで述べた外部拘束に関する考察については、実測例や解析例も少なく、十分であるとは言えないが、今後より多くの解析例と実測例をもとにさらに検討を行ってゆきたいと考えている。

6. 結論

- 1) Compensation-Line法はその外部拘束係数を適切に選択すれば、マスコンクリートの温度応力をかなりの精度で推測し得る有力な手法である。
- 2) 拘束体と被拘束体との境界面の付着力が小さい場合には L/H 、 E_c/E_R の外部拘束係数 R_N 、 R_{M1} 、 R_{M2} に対する寄与は付着がある場合に比べかなり小さく、特に本研究の範囲内ではほとんどないとも考えられる。

謝辞：本研究を進めるに当たり御助力いただいた名古屋工業大学梅原秀哲助教授に心から御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 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推定方法とそのパソコンプログラム」1985年11月
- 2) 石川、前田、西岡 「マスコンクリートの熱変形挙動と Compensation-Line法」
東急建設技術研究所報1986, No.11
- 3) 伊藤、他5名 「コンクリート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論文集 1985, V
- 4) 泉、足土、磯、塚山 「マシブなトンネル構造物におけるコンクリートの温度およびひびわれ測定」
セメント技術年報 XXIX 1975年