

論文

[1195] 有限要素法によるスラブ状コンクリートの温度ひびわれ解析

岩本 隆裕<sup>\*1</sup>・竈橋 広文<sup>\*2</sup>・森本 博昭<sup>\*3</sup>・小柳 治<sup>\*4</sup>

1. はじめに

マスコンクリート構造物では、セメントの水和熱により大きな温度変形が生じる。この温度変形が基礎、岩盤あるいはコンクリート自身に拘束されることによって温度応力が発生し、この応力が過大になると温度ひびわれが発生する。この温度ひびわれを完全に防止することは、技術的あるいは経済的に困難な場合が少なくない。そこで最近では、ひびわれの発生はある程度許容するが、ひびわれを制御し、ひびわれ幅をある許容値以下に制限しようとする考え方が注目されている。これに伴い、ひびわれ幅、長さ、間隔、位置等の温度ひびわれ特性を精度良く推定する方法の確立が強く求められている。

著者らは、これまでに外部拘束応力が卓越する壁状構造物について有限要素法を用いた温度ひびわれ解析を実施し、その解析手法の適用性について検討している[1]。これまでの研究成果から、壁状構造物には本解析手法は有効であり、十分な適用性を有することが明らかとなっている。そこで本研究は、外部拘束に加えて内部拘束も大きく影響するスラブ状コンクリート（橋脚フーチング）を対象として、本解析手法の適用性を検討したものである。

2. 解析対象構造物および解析手法

2.1 解析対象構造物

本研究で解析対象構造物として取り上げたフーチングは、阪神高速道路公団で施工された橋脚（多柱式基礎）フーチングである[2]。図-1にフーチングの概形を示す。このフーチングは、幅26m、奥行き3.5m、高さ2.9mの大きさを持ち、コンクリートは2層打ちにより施工された。第1層の高さは1.6m、第2層が1.3mである。コンクリートは、表-1に示すような配合によって、第1層が7月21日に、第2層が8月3日（第1層打設後、材令13日）に打設された。

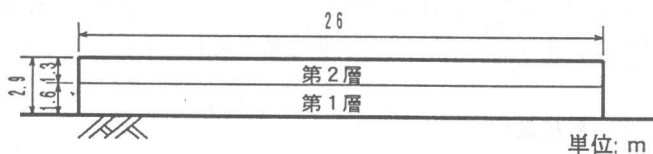


図-1 解析対象構造物

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
49.0	43.0	169	345	761	1027

- \* 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）
- \* 2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）
- \* 3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）
- \* 4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

## 2. 2 解析手法

温度ひびわれ解析手法として本研究では、離散型ひびわれモデルを導入した有限要素法を用いた。本手法では、ひびわれが発生する位置に図-2に示すような二重節点を設けてひびわれを表現する。二重節点における二つの節点は、予め大きな剛性をもつ結合要素で連結されている。そして、二重節点回りの応力が引張強度を上回ったときに結合要素の剛性を0近くまで低下させることによってひびわれを表現する。一方、鉄筋コンクリートのひびわれ解析では、鉄筋とコンクリートの付着のモデル化が重要な問題となる。本研究では、図-3に示すように、ひびわれ近傍一定区間に付着の無い領域(付着喪失等価領域 $l_s$ )を設けることによって付着をモデル化している。

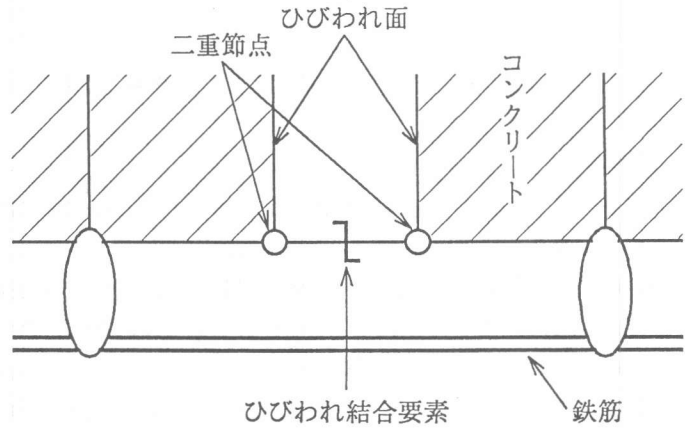


図-2 二重節点構造

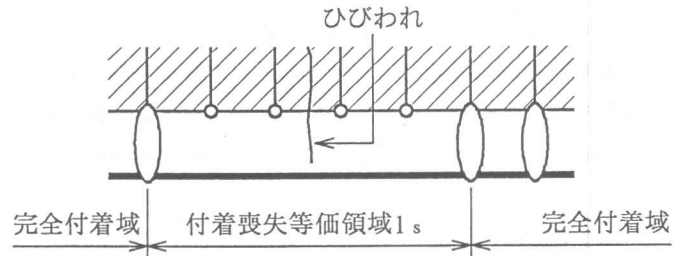


図-3 付着喪失等価領域 $l_s$

## 3. 解析条件

本研究では、施工条件が異なる2つのケースについて解析を行った。一つは、実測値との比較、検討を目的として、施工時の平均的外気温 $30^{\circ}\text{C}$ の条件で解析したもの(以下解析ケース1という)である。他の一つは、第2層を打設する前に第1層に内部拘束による温度ひびわれが発生する場合について解析を行い(以下解析ケース2という)、第1層の内部拘束による表面ひびわれがフーチング全体のひびわれ発生状況におよぼす影響を検討したものである。このケースでは、冬場に施工される場合を想定して外気温を $10^{\circ}\text{C}$ に設定するとともに、第1層の引張強度を低く設定して、強制的に第1層に内部拘束応力による表面ひびわれを発生させた。

温度ひびわれ解析で用いた引張強度および弾性係数は、次式(1)~(3)で示される。

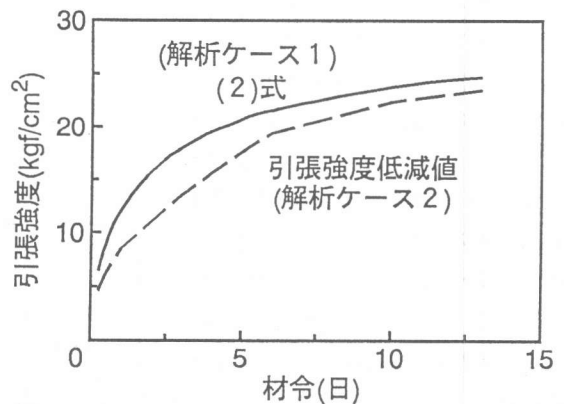


図-4 解析における引張強度

このケースでは、冬場に施工される場合を想定して外気温を $10^{\circ}\text{C}$ に設定するとともに、第1層の引張強度を低く設定して、強制的に第1層に内部拘束応力による表面ひびわれを発生させた。

温度ひびわれ解析で用いた引張強度および弾性係数は、次式(1)~(3)で示される。

$$\sigma_c(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95t} \sigma_c(91) \quad (1)$$

$$\sigma_t(t) = 1.4\sqrt{\sigma_c(t)} \quad (2)$$

$$E(t) = 1.1 \times 10^4 \sqrt{\sigma_c(t)} \quad (t \leq 3)$$

$$E(t) = 1.5 \times 10^4 \sqrt{\sigma_c(t)} \quad (t > 3) \quad (3)$$

ここで、 $t$ : 材令、 $\sigma_c(t)$ : 材令 $t$ における圧縮強度、 $\sigma_c(91)$ : 91日材令における圧縮強度 (404kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_t(t)$ : 材令 $t$ における引張強度、 $E(t)$ : 材令 $t$ における弾性係数

ただし、解析ケース2では、引張強度を図-4に示すように低減した。

表-2 熱伝導解析諸定数

熱伝導率	2.3kcal/m・h・°C
比熱	0.28kcal/kg・°C
熱伝達率	7.0kcal/m <sup>2</sup> ・h・°C
断熱温度上昇特性	$Q = K[1 - \exp(-At)]$ $Q$ : 断熱温度上昇量(°C) $t$ : 材令(day) $(K=54.5 \quad A=1.51)$

図-5に温度ひびわれ解析におけるフーチングの要素分割図を示す。各要素の温度データは、要素分割図において同一層(高さ方向)の要素については同じ温度変化を与えた。各層の温度データは、FEM2次元熱伝導解析によって得られたものを用いた。

付着モデルにおける付着の無い領域の長さは、ひびわれ面から両側10cmを仮定した。熱伝導解析で用いた解析諸定数を表-2に示す。

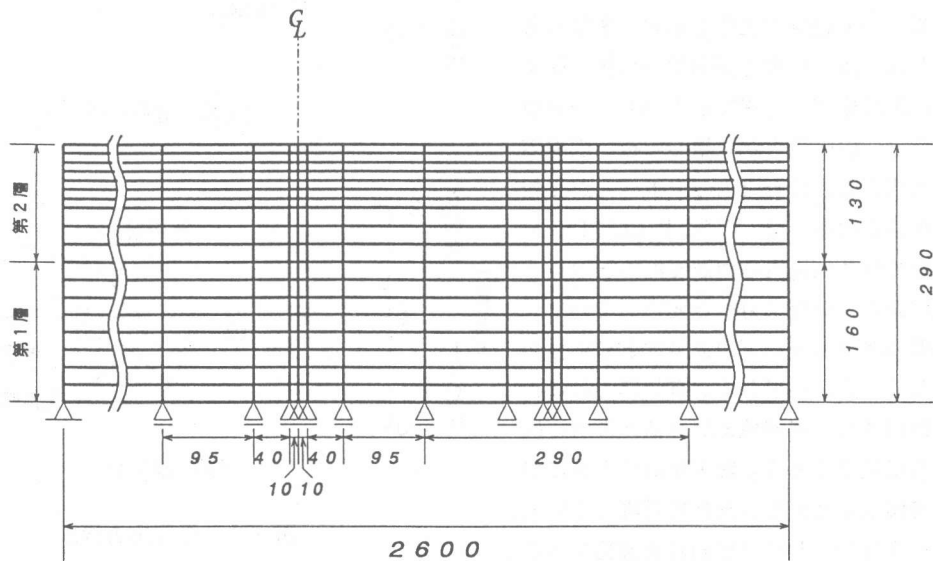


図-5 要素分割図

#### 4. 解析結果および考察

##### 4.1 ケース1の解析結果の検討

図-6にフォーミング第1層ならびに第2層の中心部における温度の経時変化を示す。ここで、図中の実測値とは、構造物中に埋め込まれた熱電対によって得られたものであり、解析値とは、熱伝導解析により得られたものである。図に示すように解析値と実測値とは全般的に良く合致している。第1層中心部の温度は、打設後約2日で最高温度が約80℃に達する。その後、温度は降下していくが、材令14~15日において、第2層コンクリート打設の影響でわずかな再上昇がみられる。第2層コンクリート中心部の最高温度は、第1層よりやや低い70℃程度となっている。

図-7(a)~(d)に第1層および第2層の中心と下部における温度応力を示す。図-7(a)および(b)から、第1層の温度応力は第2層が打設されるまでは、内部拘束応力が支配的となり、下部では引張応力から圧縮応力へと、一方中心部では圧縮応力から引張応力へと変化していく。しかし、第2層が打設されると熱的および力学的影響を受けやや複雑な変化を示す。すなわち下部では一旦引張応力が急増した後、徐々に再び圧縮応力へと移行していく。一方中心部では、引張応力が急増した後、圧縮応力へと変化し、打設以前の引張応力が反転した状態となる。図-7(c)および(d)から第2層では外部拘束応力が支配的となり、圧縮応力から引張応力へと変化していく。中心部の応力の方が下部より大きな応力が発生している。各図から、有効応力計によって計測された実測値と解析値との対応は全般的に良好である。解析値は第1層における複雑な応力変化も良好に再現している。

図-8(a)~(d)にひびわれ進展図を示す。図-8(a)から、第2層打設後間もなくの材令14日において、内部拘束応力が主要原因と

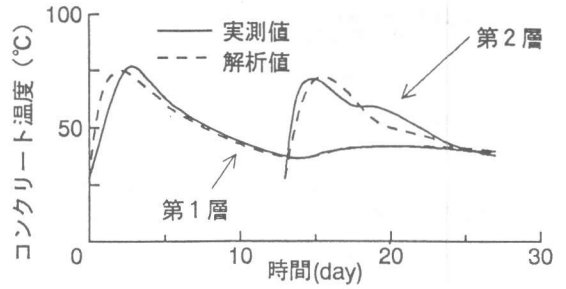
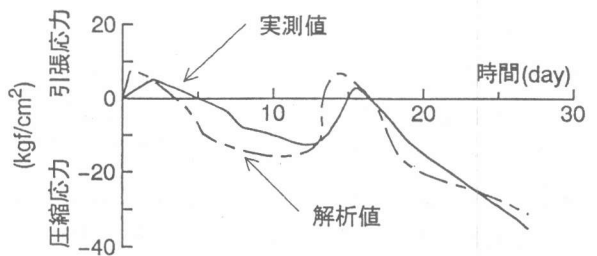
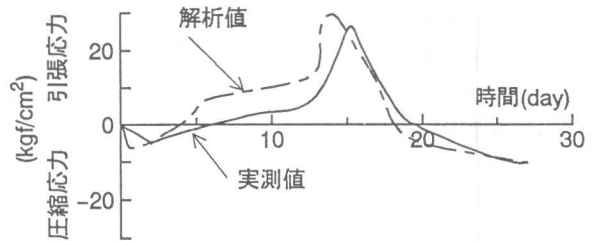


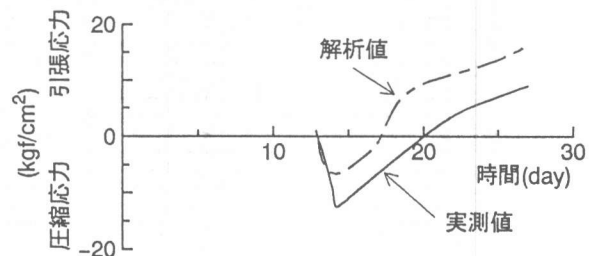
図-6 コンクリートの温度履歴



(a)第1層下部



(b)第1層中心部



(c)第2層下部

図-7 温度応力履歴

考えられるひびわれが第1層中心部付近から底面に向かって発生する。ひびわれ幅は、中心部で最も大きく0.5mm程度となる。しかし、第1層のひびわれは、図-8(b)~(d)に示すように材令が進行するにともない次第に小さくなり、最終的には閉じてしまう。第2層コンクリートについては、図-8(c)および(d)に示すように材令18日において外部拘束が主原因となり中心部から上部（フーチング表面部）に向かってひびわれが発生する。ひびわれ幅は、中心部が最も大きく材令の進行にともない若干増大するが大きな変化はない。材令27日におけるひびわれ幅は、中心部で0.33mm、表面では0.13mmとなった。一方、実測値では、材令20日において第2層上部に0.1mm程度のひびわれが観測されており、その後の観測では、ひびわれ幅の増大は認められなかった。

以上のように、2層打ち施工のフーチングについての温度応力ならびにひびわれ幅の解析値と実測結果との対応は良好であった。このことから、本解析手法はこの種の構造物についても適用が可能であると考えられる。

#### 4. 2 ケース2の解析結果の検討

温度解析の結果、第1層中心部の最高温度は72℃であり、第2層中心部の最高温度は65℃程度であった。最高温度は、ケース1のものに比べて、大差はないが最高温度以降のコンクリート温度の降下はかなり大きなものとなった。

図-9(a)~(g)に温度ひびわれ解析によって得られたひびわれ進展図を示す。図-9(a)から、第1層打設後2日目でも内部拘束による表面ひびわれが、第1層底面部と表面部に発生する。その後、このひびわれは、次第にひびわれ幅を減じ、最終的には図-9(b)に示すように閉じてしまう。しかし、第1層には、第2層打設後12時間後に再び図-9(c)に示すようなひびわれが中心部から底面および上部に向かって発生する。ひびわれ幅は、中心部において

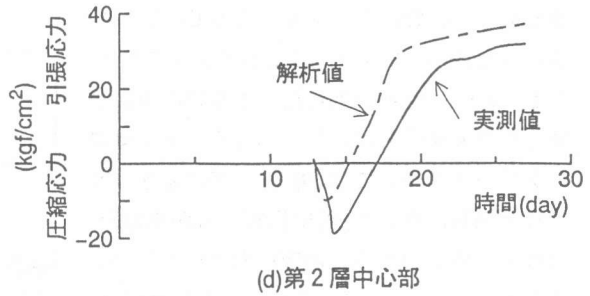


図-7 (続き) 温度応力履歴

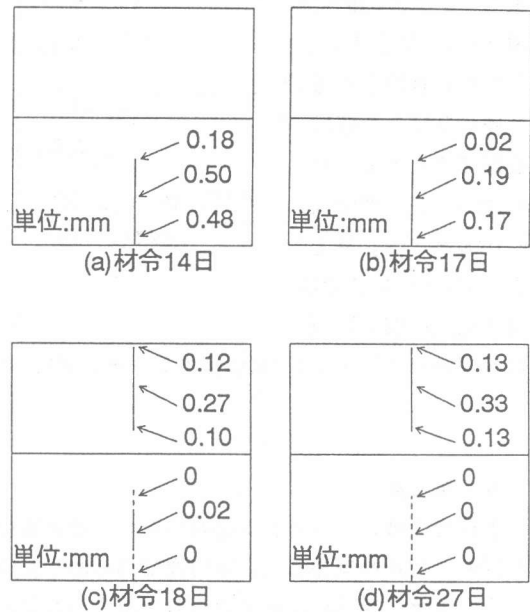


図-8 ひびわれ進展図

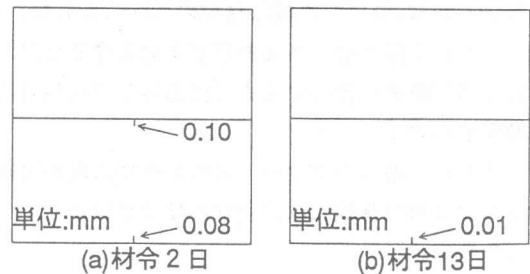


図-9 ひびわれ進展図

最も大きく0.72mmとなった。しかし、このひびわれも、図-9(d)~(g)に示すようにケース1と同様に材令の進行にともない次第に小さくなり最終的には閉じてしまう。第2層コンクリートについては、図-9(d)に示すように材令16日において、外部拘束応力が主原因となって中心部から上層部に向かってひびわれが発生する。その後、このひびわれは図-9(e)および(f)に示すように第2層上部、下部

部に向かって次第に進展していき最終的には図-9(g)に示すようなひびわれ状態となる。第2層のひびわれ幅は、中心部で最も大きくなり0.38mm、表面部では0.16mmとなる。以上のように、ケース2では、材令初期に第1層表面

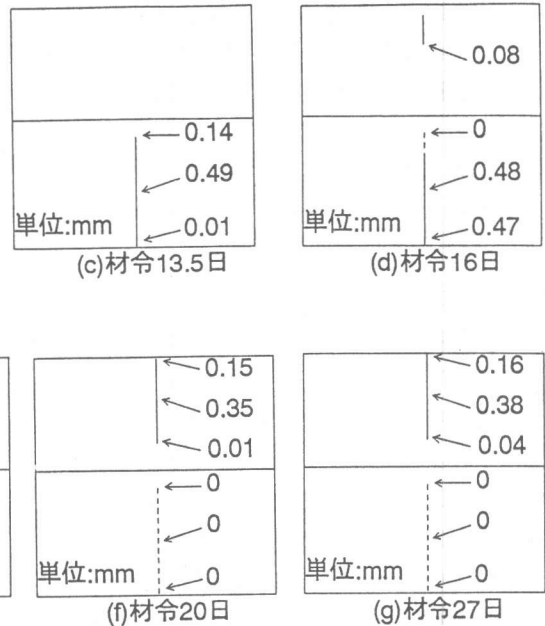


図-9 (続き) ひびわれ進展図

にひびわれが発生したが、以後のフーチングにおけるひびわれ発生状況はケース1とほぼ同様であった。

### 5. まとめ

本研究では、フーチングを対象として離散型ひびわれモデルを導入した有限要素法による温度ひびわれ解析を実施した。本研究で得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 本解析手法によって得られた温度応力およびひびわれ幅の解析値は、実測結果と良好に対応した。2層打ち施工のフーチングでは、比較的複雑な温度応力発生メカニズムとなるが、このような構造物に対しても本解析手法は適用が可能であることが明かとなった。
- (2) 2層打フーチングでは第1層にまず内部拘束が主因となるひびわれが発生する危険性がある。しかし、ひびわれ幅は材令の進行にともない次第に減少し、最終的には閉じる傾向にある。
- (3) 第2層には、外部拘束が主因となるひびわれが発生する危険性がある。この場合、ひびわれはほぼ断面を貫通するまでに進展し、ひびわれ幅も材令が進行しても大きく変化せずに残留する傾向を示す。
- (4) 第1層コンクリートの若材令期に内部拘束による表面ひびわれが生じて、以後のフーチングひびわれ挙動には大きな影響はない。

#### [参考文献]

- [1] 横井謙二、岩本隆裕、森本博昭、小柳 治：離散型ひびわれモデルによる温度ひびわれ解析；コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.1, 1992. 6
- [2] マスコンクリートの設計、施工に関する検討；阪神高速道路公団技術審議会コンクリート構造分科会資料、1988. 3