

論文 マスコンクリート構造物の3次元温度ひびわれ解析

高井茂信^{*1}・国枝 稔^{*1}・森本博昭^{*2}・小柳 治^{*3}

要旨：温度ひびわれ解析を2次元的に行った場合、例えば壁状構造物では内部拘束応力の影響あるいは厚さ方向についての温度ひびわれ幅の変化などが厳密に解析できないなど、その適用性には限界がある。したがって、温度ひびわれの性状を精度よく解析するためには3次元解析が必要になってくる。

本研究は、壁状構造物を対象に3次元温度ひびわれ解析を実施して、離散型ひびわれモデルを導入した解析モデルの検討を行うとともに、壁状構造物における温度ひびわれの性状を明らかにしたものである。

キーワード：温度ひびわれ、3次元有限要素法、離散型ひびわれモデル、付着喪失等価領域

1. はじめに

温度応力およびひびわれ幅の分布性状を詳細に解析するためには3次元解析が極めて有効である。しかし、3次元温度ひびわれ解析モデルについての検討は十分ではないのが現状である。本研究は、実用的な3次元温度ひびわれ解析モデルの確立を目的として、壁状構造物を対象とした3次元温度ひびわれ解析により、解析モデルの適用性および温度ひびわれの3次元的性状を明らかにするものである。

2. 3次元温度ひびわれ解析モデル

先頃、JCIマスコンクリート温度応力研究委員会（以下、マスコン委員会という）から温度ひびわれの実用的解析モデルが提案された[1]。提案されたモデルは、離散型ひびわれモデルを用いたものである。鉄筋は棒要素で表現され、コンクリートの付着はひびわれ近傍一定区間に付着のない領域（付着喪失等価領域 l_s ）を設けることによりモデル化されている。解析モデルの適用性については種々の角度から検討され、解析モデルの精度に大きな影響を与える

l_s については10~15cm程度の値が適当であると報告されている[1]。しかし、この値は2次元モデルについての検討から得られたもので、3次元モデルに対する適性値は不明である。本研究では、図-1に示すようなJCIマスコン委員会提案モデルを3次元場に拡張した解析モデルを用

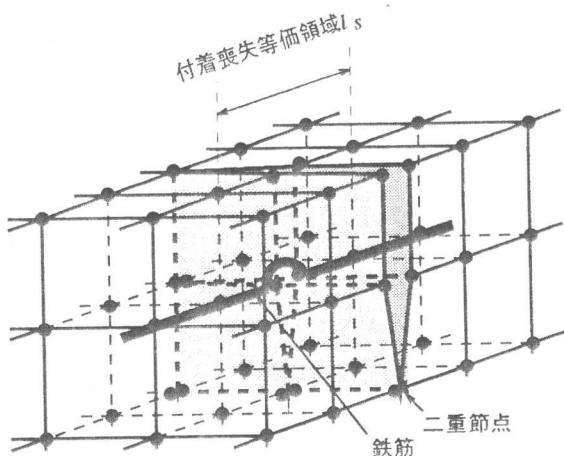


図-1 3次元鉄筋コンクリートひびわれモデル

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

いて、 l_s の値が解析結果に及ぼす影響、 l_s の適性値、および温度ひびわれの3次元的分布性状を明らかにする。

3. 解析概要

3.1 解析対象構造物

解析対象構造物は、図-2に示すようなコンクリート基礎上に構築された壁状構造物である[2]。壁長手方向の鉄筋比は0.27%である。実測による壁中心の最大温度上昇は約31°Cであった。

3.2 解析条件

供試体のコンクリートの圧縮強度および弾性係数発現式については、強度試験結果から得られた次式を用いた。

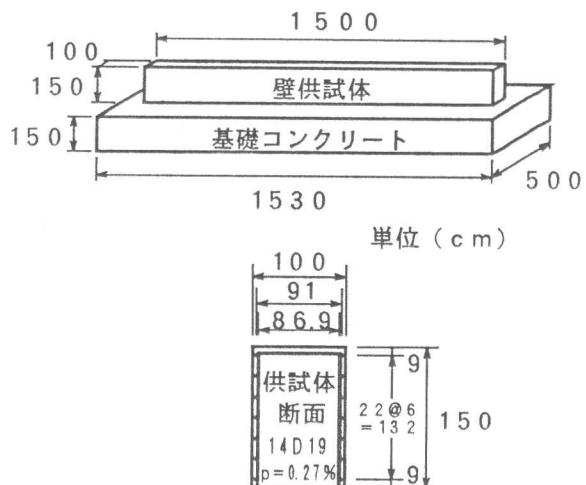


図-2 解析対象構造物

$$\text{引張強度 } \sigma_t(t) = \frac{t}{0.1408 + 0.0343t} \quad (t : \text{day}) \quad (1)$$

$$\text{弾性係数 } E(t) = \frac{t}{1.137 \times 10^{-5} + 2.914 \times 10^{-6}t} \quad (t : \text{day}) \quad (2)$$

引張強度については温度応力の増加速度などの影響を考慮して式(1)で求められる引張強度の80%とした。また、クリープの影響は式(2)の値に弾性係数低減率[3]を乗じて考慮した。弾性係数低減率は、打設直後で0.8、材令7日以降は一定値0.56、打設直後から材令7日の間は直線補間とした。熱膨張係数は無応力計より求められた値($8.45 \times 10^{-6}/\text{°C}$)を用いた。コンクリートの断熱温度上昇Q(°C)は、熱伝導解析を行い実測値に最も近い温度変化が得られるような次式により評価した。

$$Q = 57.87 \{ 1 - \exp(-0.716t) \} \quad (t : \text{day}) \quad (3)$$

3.3 温度ひびわれ解析

温度解析は有限要素法を用い、壁断面について実施した。解析により得られた温度分布を壁供試体長手方向に同一として供試体各部の温度変化を与えた。 l_s の値については5cm、10cm、15cm、20cmの4ケースについて検討した。コンクリート打設温度、外気温については実測値を用いた。

温度ひびわれ解析は、次のような手順により実施した。

- ①ひびわれ発生予想位置を図-1のようにモデル化する。ひびわれをはさむ相対する二つの節点（本研究では、二重節点という。）は極めて大きな剛性をもつ結合要素で連結しておく。
- ②温度応力の計算を増分的に進めていく。そして、各時間ステップにおいて、二重節点周りのコンクリートの応力の平均値と引張強度を比較する。
- ③応力が引張強度を上回った場合は、その位置の結合要素の剛性を極めて小さな値に変化させ

てひびわれを表現する。

- ④ひびわれ発生とともに応力再分配計算を行い、ひびわれ発生後の応力および変形を求める。
ひびわれ幅を二つの節点の変位の差として算定する。
⑤応力再分配の結果、ひびわれの進展、あるいは新たなひびわれの発生があった場合は、③から④の処理を繰り返す。

4. 解析結果

4.1 ひびわれ幅

図-3～図-5に壁の上段位置と中段位置における表面のひびわれ幅の実測値ならびに $l_s = 5$ ~20cm 各々に対する 3 次元解析による表面と中心におけるひびわれ幅の経時変化を示す。

実測によると、ひびわれは材令 7 日に発生している。ひびわれ幅は中段よりも上段の方が大きい。発生直後のひびわれ幅は中段で 0.37mm、上段で 0.47mm 程度で、その後材令の進行にともない若干増大する傾向を示す。材令 14 日でのひびわれ幅は中段で 0.38mm、上段では 0.48mm となっている。

次に解析値に注目すると、ひびわれは材令 5 日に発生し、上段、中段位置ともに、中心部のひびわれ幅は表面部よりも大きく算定されている。これは中心の方が表面に比べ大きな引張応力が発生しているためである。このことから、壁表面に温度ひびわれの発生が認められた場合、それは貫通ひびわれである可能性が極めて高い。なお、ひびわれ幅算定値が材令 11 日前後で減少しているが、これは日平均気温の変動によるものである。

さて、 l_s の値によるひびわれ幅算定値への影響に注目すると、 l_s が値を大きくなると、ひびわれ幅の値も大きく算定されることがわかる。例えば、

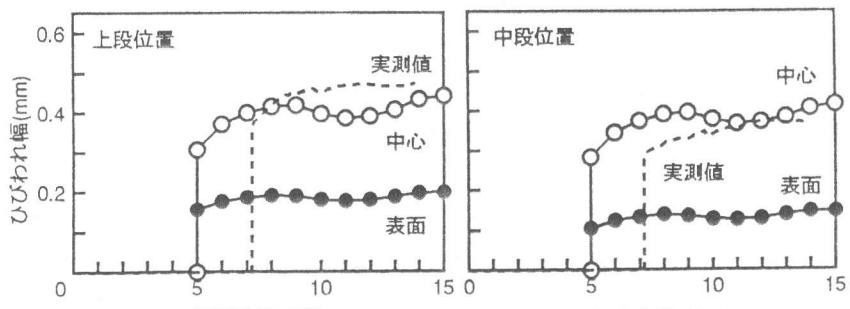


図-3 ひびわれ幅経時変化($l_s=5\text{cm}$)

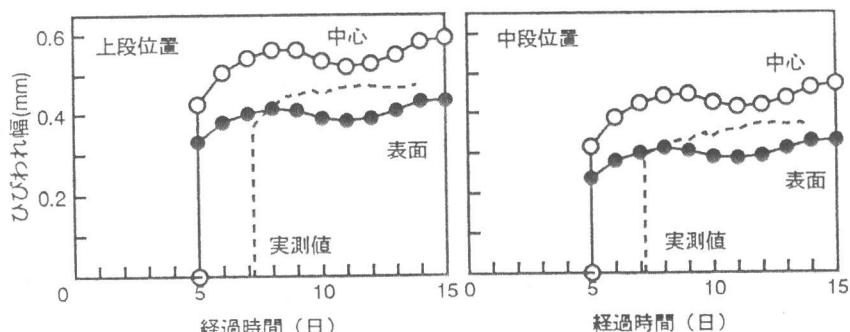


図-4 ひびわれ幅経時変化($l_s=15\text{cm}$)

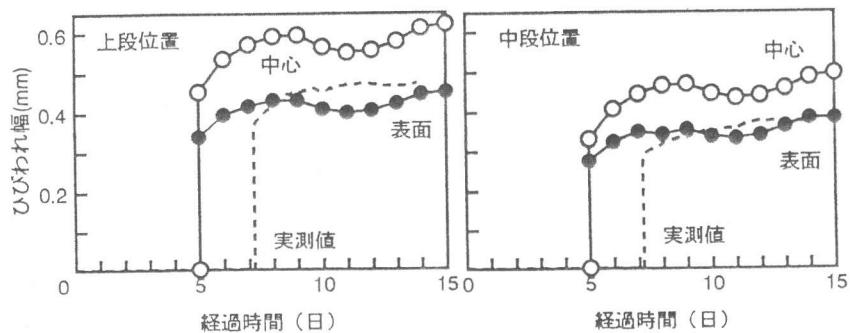


図-5 ひびわれ幅経時変化($l_s=20\text{cm}$)

図-6は、材令14日のひびわれ幅算定値と l_s の関係をまとめたものである。図から、壁上段表面部では、 $l_s = 5\text{cm}$ の時約0.2mm、 $l_s = 10\text{cm}$ の時約0.34mm、 $l_s = 15\text{cm}$ の時約0.43mm、そして $l_s = 20\text{cm}$ の時約0.45mmとなっている。

壁中段位置においても同様な傾向が認められる。このような l_s とひびわれ幅の関係は、付着とひびわれ幅に関する実際の挙動をよく表現している。さらに、 l_s が大きくなると中心部と表面部とのひびわれ幅の値の差が小さくなることがわかる。例えば上段位置において、 $l_s = 5\text{cm}$ の時両者の差は約0.25mmであるのに対し、 $l_s = 10\text{cm}$ では約0.2mm、 $l_s = 15\text{cm}$ では約0.18mm、そして $l_s = 20\text{cm}$ の時は約0.17mmのように減少傾向を示している。これは l_s が小さくなるとひびわれ幅の鉄筋による拘束効果が減少するためである。

次に、図-3～図-5において実測値との対応を検討する。各図中のひびわれ幅の実測値は表面部での値である。実測による最大ひびわれ幅は上段で0.48mm、中段位置で0.38mmである。3次元解析において、 $l_s = 15\text{cm}$ 、および 20cm としたとき上段、中段ともに実測値に近い対応を示すことがわかる。一方、 $l_s = 5\text{cm}$ のときは実測値の約40%、 $l_s = 10\text{cm}$ のとき約60%程度の値となり、実際より危険側の値を推定することになる。このように、ひびわれ幅についての解析値と実測値との対応から、本解析例では3次元温度ひびわれ解析モデルにおける l_s の値としては、15cm～20cm程度が適当であった。

4.2 鉄筋応力

図-7～図-10は、各 l_s の値に対する鉄筋応力の解析値と実測値とを比較したものである。各図から、 l_s が大きくなるにともない鉄筋応力解析値は小さくなる傾向を示す。これは l_s が大きくなると鉄筋ひずみが平均化されて小さくなるためである。実測の鉄筋応力は材令8日で約2060kgf/cm²に対して、 $l_s = 15\text{cm}$ とした3次元解析では約2150kgf/cm²とその差は約90kgf/cm²で両者の対応は非常に良好である。

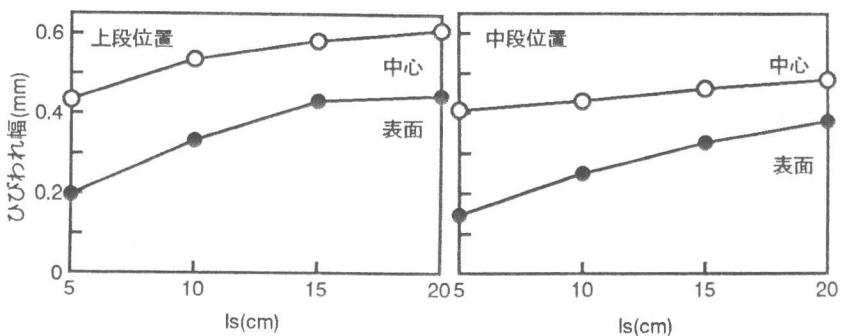


図-6 l_s の値によるひびわれ幅変化（材令14日）

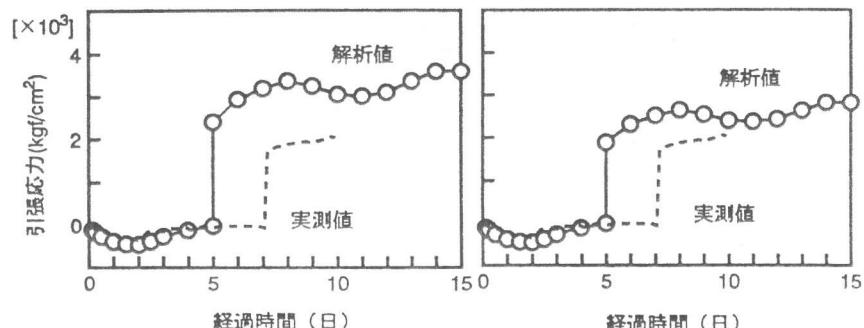


図-7 鉄筋応力($l_s=5\text{cm}$)

図-8 鉄筋応力($l_s=10\text{cm}$)

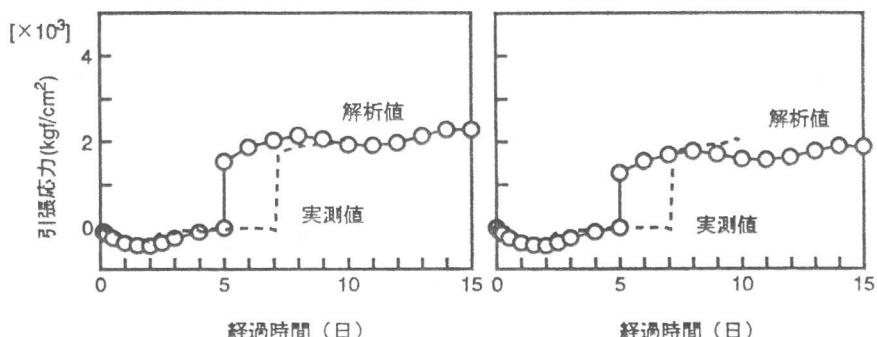


図-9 鉄筋応力($l_s=15\text{cm}$)

図-10 鉄筋応力($l_s=20\text{cm}$)

このように、鉄筋応力についての検討からも $l_s = 15\text{cm}$ 程度が適当であることがわかる。

4.3 コンクリート応力

図-11は、 $l_s = 15\text{cm}$ とした場合のひびわれ面から約2mの位置におけるコンクリート応力についての解析結果と実測値とを示したものである。コンクリート応力については l_s の影響はほとんど認められなかった。なお、3次元解析結果については壁中心部と表面部の値を示した。図より、材令初期に発生する圧縮応力については解析値は実測値より大きくなる傾向にある。しかし、壁体の温度降下とともに次第に増加していく引張応力については解析値と実測値との対応は非常に良好である。また、壁中心では全般的に表面より大きな応力が発生することがわかる。図中、計算値において材令5日前後に若干 ($2 \sim 3 \text{kgf/cm}^2$) の応力開放が認められるが、これはひびわれ発生によるものである。

4.4 応力ならびにひびわれ幅の3次元分布性状

図-12は、 $l_s = 15\text{cm}$ とした場合のひびわれ面から約2m離れた位置におけるコンクリート応力の3次元表示である。図は視点を斜め上方においていた鳥瞰図である。この図より、壁に発生したコンクリート応力の3次元的分布状態を的確に把握することができる。壁におけるコンクリート応力は内部拘束応力と外部拘束応力が複合することにより、材令の進行とともに壁断面に対して凹面から凸面へと、また壁の高さ方向にはやや上へ開いた形状へと移行していく。また、壁に発生する温度応力のうち、最大の引張応力は壁中段付近の中心に発生し、その大きさは表面応力の約1.4倍程になることがわかる。

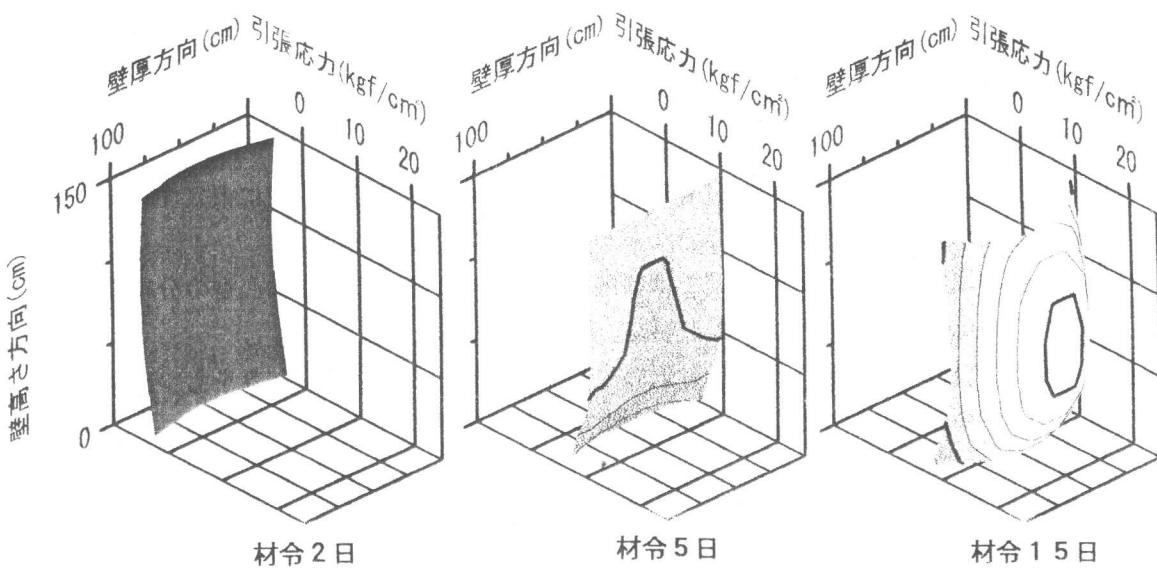


図-12 コンクリート応力経時変化（3次元表示）

図-13は、 $l_s = 15\text{cm}$ とした場合のひびわれ幅の3次元表示図である。図から、壁のひびわれ幅の3次元的分布状況とその経時変化を視覚的、かつ的確に認識することができる。壁断面上に

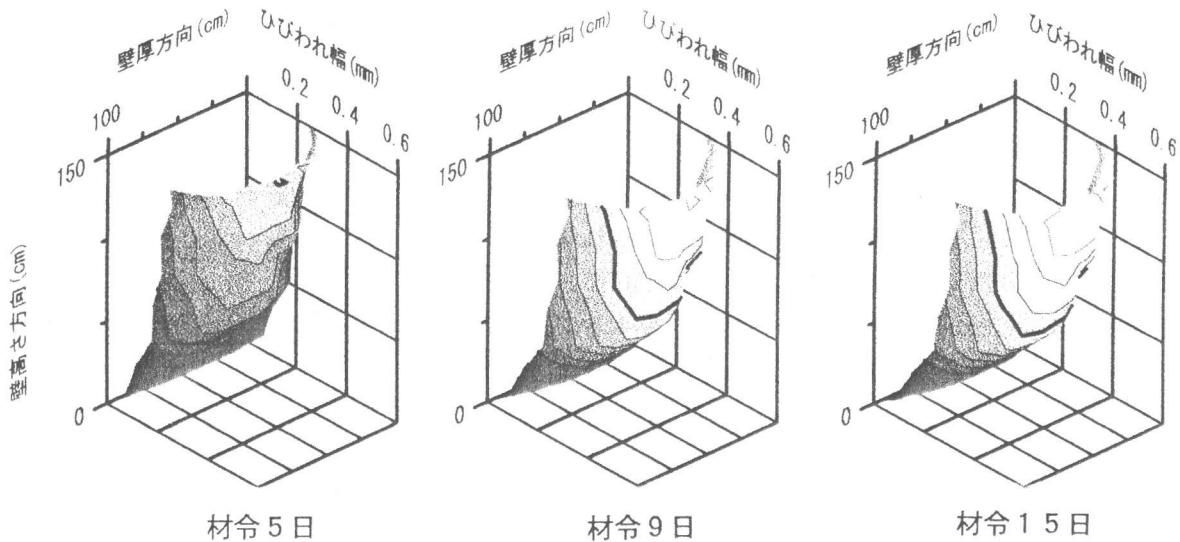


図-13 ひびわれ幅経時変化（3次元表示）

おけるひびわれ幅の分布状況に注目すると、中心方向および上方向に膨らみと広がりを持つ曲面をなしていることが分かる。すなわち壁中心のひびわれ幅は表面のひびわれ幅に比べ大きく、例えば中段で1.5倍程度になっている。材令の進行にともなうひびわれ幅分布曲面の形状には大きな変化は認められない。また、付着喪失等価領域 l_s の変化にともなうひびわれ幅分布曲面の形状の変化は生じない。

5.まとめ

本研究では3次元温度ひびわれ解析モデルの適用性ならびに壁状構造物のひびわれ幅の分布性状などについて検討を行った。本研究の成果として次のような知見が得られた。

- ①離散型ひびわれモデルを組み込んだ3次元温度ひびわれ解析モデルにより、温度ひびわれに関する実際の現象を表現することができた。
- ②付着喪失等価領域 l_s の値が大きくなるとひびわれ幅算定値は大きくなり、また中心部と表面部とのひびわれ幅の差が小さくなる傾向を示す。
- ③3次元温度ひびわれ解析モデルで付着喪失等価領域 l_s の値を15cm程度に仮定すると、ひびわれ幅、鉄筋応力およびコンクリート応力などが実測値とよく合致した。
- ④壁状構造物の温度応力は、材令後期では壁中段付近の中心に頂点をもつ凸型の分布性状を示した。中段中心の応力は表面の応力の1.4倍程度になった。
- ⑤壁状構造物のひびわれ幅は、壁上段付近の中心に頂点をもち上部に広がりをもつ凸型の分布性状を示した。壁中段中心のひびわれ幅は表面のひびわれ幅の1.5倍程度となった。

参考文献

- 1)JCI;マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書（■温度応力ひびわれ幅算定方法についての提案）、PP. 46~67、1992.9
- 2)JCI;底面で連続拘束を受ける鉄筋コンクリート壁状構造物の温度ひびわれ制御実験、マスコンクリートのひびわれ制御指針、pp. 127~155、1986
- 3)JCI;マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書、pp. 24~28、1985.11