

[1228] 壁体の3次元温度ひびわれ解析

篠橋広文^{*1}・森本博昭^{*2}・小柳 治^{*3}

1. はじめに

温度ひびわれ解析を2次元的に行った場合、例えば壁状構造物においては内部拘束の影響あるいは断面方向についての温度ひびわれ幅の変化が厳密に解析できないなど、その適用性に限界がある。従って、温度ひびわれの特性をより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、離散ひびわれモデルを導入した温度ひびわれ解析モデルを用いて、壁状構造物の3次元温度ひびわれ解析を試みたものである。解析結果をもとに、壁状構造物における温度ひびわれ性状、実測値との対応および2次元解析結果との相違点などを明かにする。

2. 解析対象構造物

解析対象構造物は、図-1に示すようにコンクリート基礎上に打設された壁供試体である[1]。供試体の長手方向の鉄筋比は約0.27%である。

3. 解析概要

3.1 解析条件

供試体コンクリートの引張強度 $\sigma_t(t)$ および弹性係数 $E(t)$ の評価は、強度試験結果から得られた次式を用いた。

$$\sigma_t(t) = \frac{t}{0.1408 + 0.0343t} \quad (1)$$

$$E(t) = \frac{t}{1.137 \times 10^{-5} + 2.914 \times 10^{-6} t} \quad (2)$$

t は材令(日)である。

引張強度については応力増加速度、施工条件などを考慮して式(1)で求められる引張強度の80%の値を用いた。弹性係数については式(2)より求められる値に弹性係数低減率[2]を乗じた値を有効弹性係数として用いた。また、熱膨張係数には壁体内に埋め込まれた無応力計より求められた値($8.45 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)を用いた。コンクリートの断熱温度上昇式は、温度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を選定した。

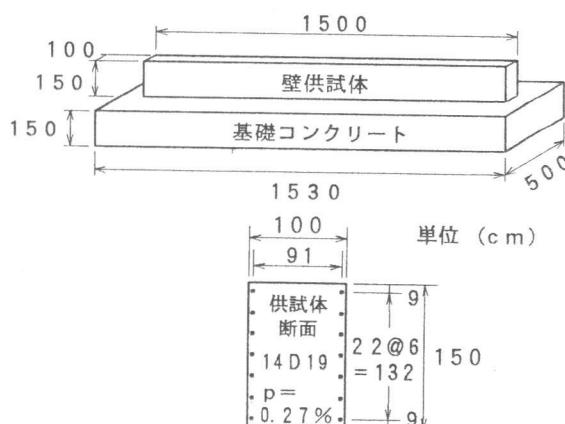


図-1 解析対象構造物

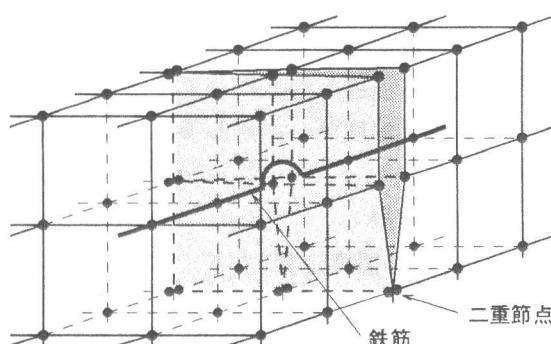


図-2 3次元ひびわれ解析モデル

*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）

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

Q は断熱温度上昇量(°C)、 t は材令(日)である。

3. 2 ひびわれ解析

(1) 3次元解析

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壁体内の温度分布を供試体軸方向に同一として供試体各部の温度変化を与えた。

温度応力およびひびわれ解析は、離散ひびわれモデルを導入した有限要素法を用いた。3次元鉄筋コンクリートひびわれ解析モデルを図-2に示す。離散ひびわれモデルを採用した場合、ひびわれ発生にともない要素の再分割処理が必要となる。本研究では、あらかじめひびわれが発生する位置、すなわち供試体軸方向の中央断面に二重節点構造を設けることにより処理の簡略化を計る手法を用いた。二重節点は、あらかじめ大きな剛性を持つ結合要素で連結されているが、節点まわりの応力がコンクリートの引張強度を超えたとき、この結合要素の剛性を0近くまで低下させることによってひびわれが表現される。また、鉄筋の付着についてはひびわれ面から一定区間に付着喪失等価領域(l_s)を設けることによりモデル化する。 l_s の値はひび割れ幅算定値に大きな影響をおよぼす。本研究では、2次元解析を行った従来の研究[3]を参考に l_s の値を10cmとした。3次元温度応力およびひびわれ解析に用いた要素分割図を図-3に示す。

(2) 2次元解析

温度解析は、3次元解析と同様である。温度応力およびひびわれ解析では3次元ひびわれ解析と同型の2次元離散ひびわれモデルを導入したFEMを用いた。

壁体の2次元解析では次のような問題点が指摘される。まず、断面方向に生じる温度分布の取り扱いとその影響が不明であること、さらに計算される応力あるいはひびわれ幅が断面のどの位置におけるものなのか、またこれらと実際との対応が不明であるなどの点である。そこで2次元解析では3次元解析との比較によりこれらの点についての知見を得るために次の2つのケースについて解析を実施した。

ケースa：温度データとして壁厚さ方向の平均温度を用いた解析

ケースb：温度データとして壁中心の温度を用いた解析

4. 解析結果

4. 1 壁体の温度上昇

温度解析より得られたコンクリートの温度履歴を図-4に示す。壁中心のコンクリートは打設後材令約2日でピーク温度46.1°Cを示し、打設温度からの温度上昇量は31.1°Cである。壁表面部のピーク温度は37.6°Cである。中心と表面部の温度差は材令3日前後で最大となり、その時の温度差は約13.3°Cである。材令9日前後で温度が再上昇する傾向がみられるが、これは外気温の影響である。また、解析値と実測値とを比較すると両者の対応は非常に良好である。

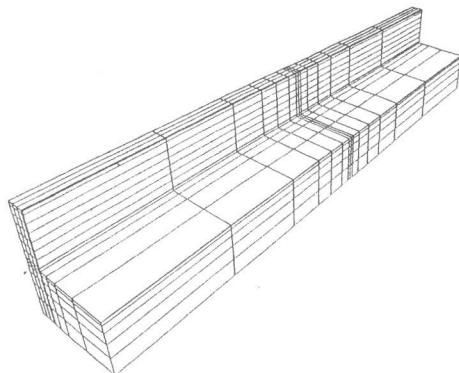


図-3 要素分割図

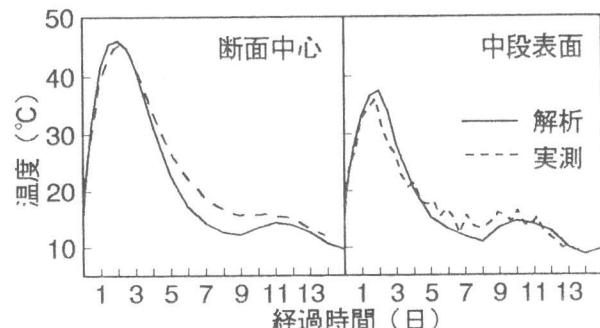


図-4 コンクリート温度履歴

4.2 コンクリート応力

図-5および図-6は、3次元解析によるコンクリート応力の3次元表示図である。

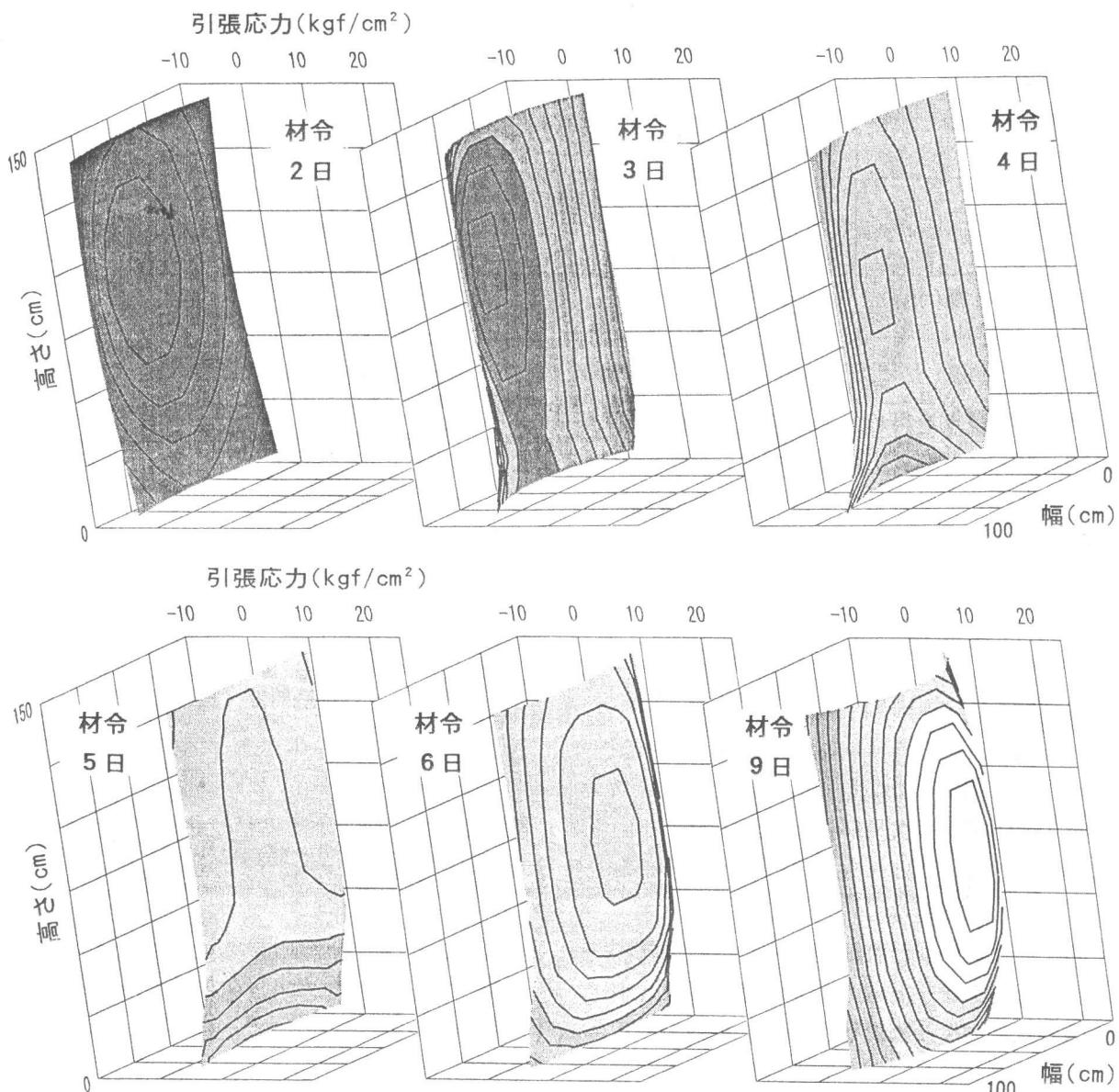


図-5 コンクリート応力【鳥瞰図】

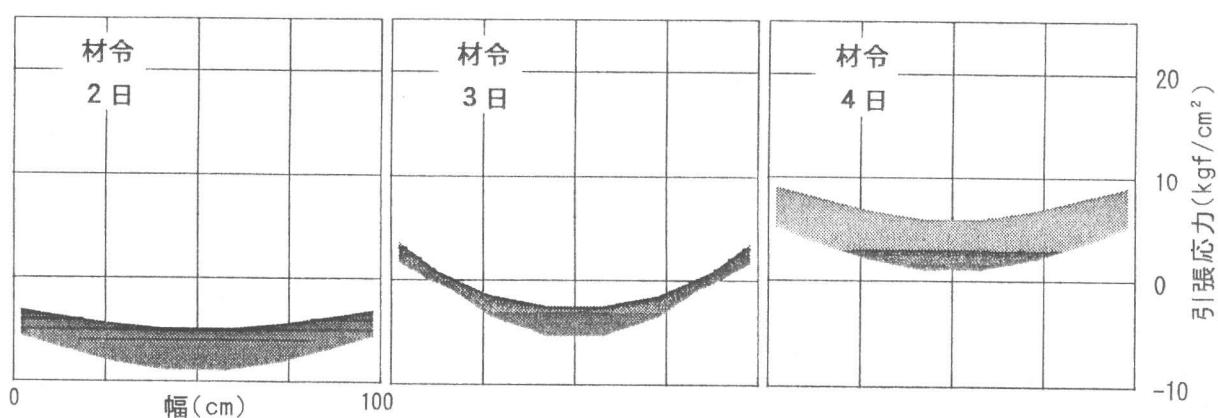


図-6 コンクリート応力【視点：真上】

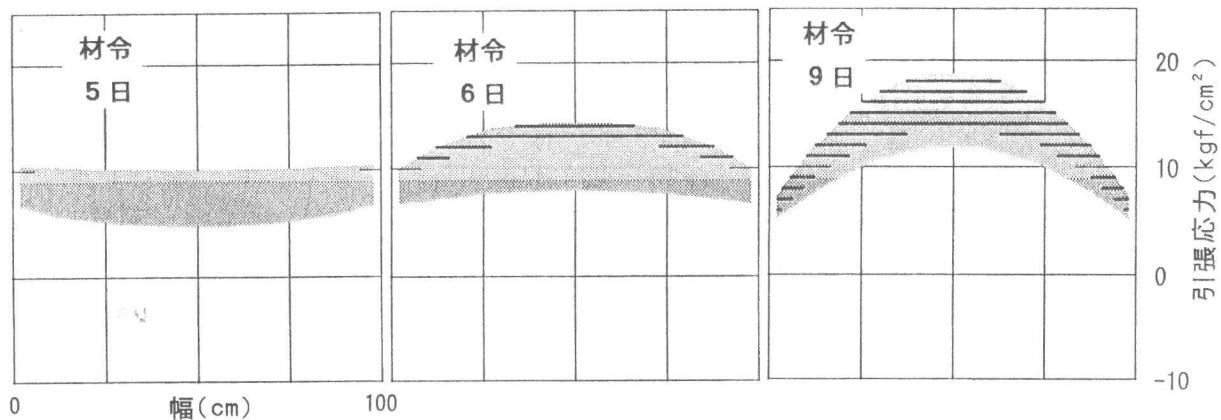


図-6 コンクリート応力【視点：真上】（つづき）

図-5は視点を斜め上方においていた鳥瞰図であり、図-6は壁真上に視点をおいた図である。各図から、壁のコンクリート応力の3次元的分布性状とその経時変化を視覚的かつ的確に把握することができる。すなわち、壁におけるコンクリートの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上に開いた形状へと移行していくことがわかる。このような空間的な情報は、2次元解析からは得られないものであり、ここに3次元解析の重要性を確認することができる。

図-7は、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実測値（中心応力）と3次元解析値を示したものである。なお、3次元解析による応力は壁中心と表面部の値を示した。図より実測値と壁中心の解析値を比較すると、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、壁体の温度降下にともない次第に増大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。壁表面部の解析値は内部拘束応力の影響で全般的に中心より応力が小さくなることがわかる。

図-8は、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3次元解析値と2次元解析値を示したものである。図中のハッチング部は中心と表面部の応力で囲まれる領域である。図中に示した3次元解析と2次元解析を比較すると、2次元解析結果は両ケースとも3次元解析で得られる表面部応力と中心応力のほぼ中間的な値を与えることがわかる。2次元解析の2つのケースを比較すると、中心温度を用いたケースbが平均温度を用いたケースaに比べ10%程度高い応力を与えることがわかる。

4. 3ひびわれ幅

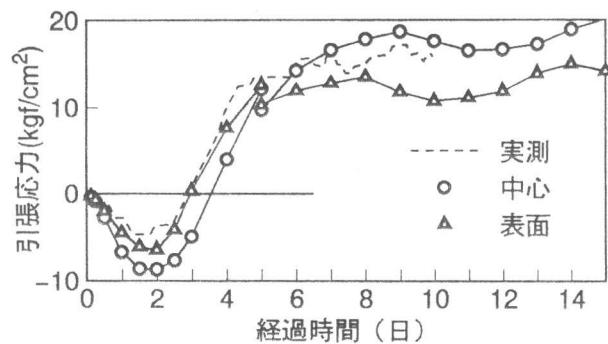


図-7 コンクリート応力（3次元と実測）

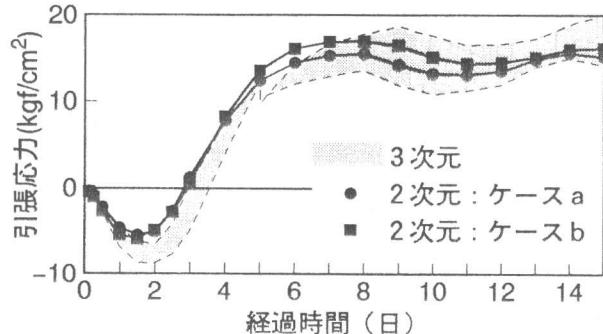


図-8 コンクリート応力（2次元と3次元）

図-9および図-10は、3次元解析によるひびわれ幅の3次元表示図である。

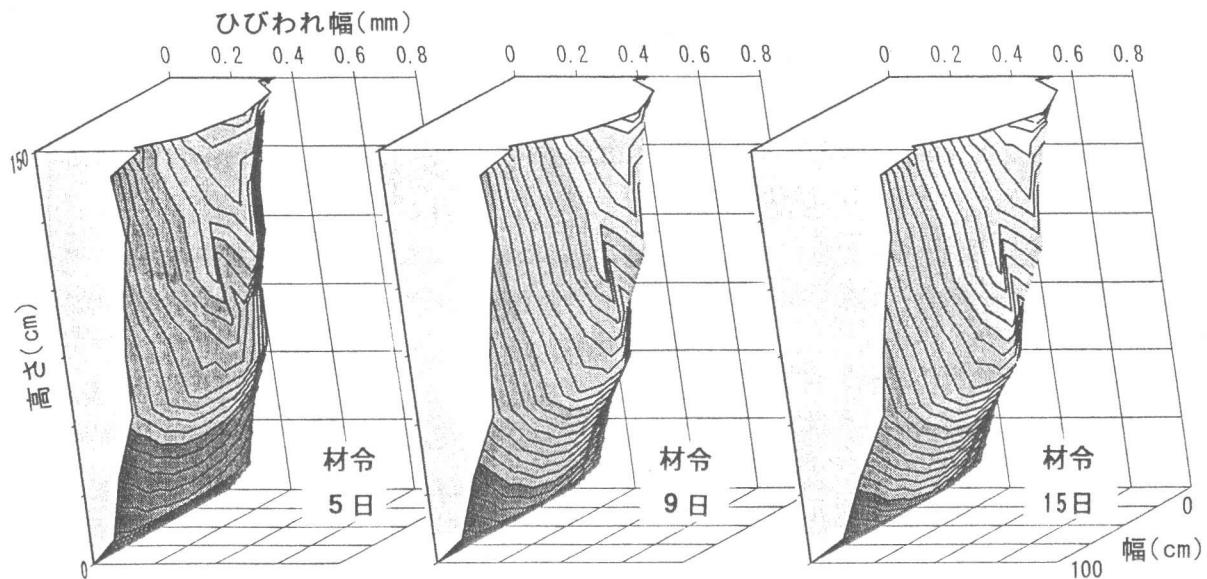


図-9 ひびわれ幅【鳥瞰図】

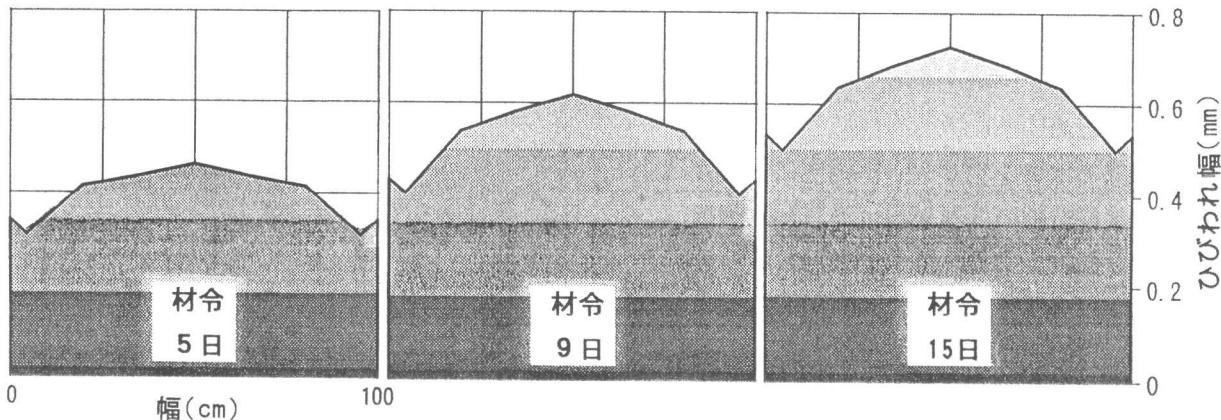


図-10 ひびわれ幅【視点：真上】

図-9は視点を斜め上方においていた鳥瞰図、また図-10は壁の真上に視点をおいた図である。すでに示したコンクリート応力についての3次元表示図と同様、各図から壁に発生したひびわれ幅の3次元的分布性状を的確に把握することができる。壁断面におけるひびわれ幅の分布性状に注目すると、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わかる。また、鉄筋位置においては鉄筋による拘束のため局部的にひびわれ幅が小さくなっていることがわかる。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。

図-11に、壁の上段および中段位置における実測値と3次元解析によるひびわれ幅を示す。なお、3次元解析値は中心と表面のひびわれ幅を示した。図中の3次元解析結果に注目すると、ひびわれは材令5日に発生しており、上段では中心のひびわれ幅が0.25mm程度表面より大きな値となっている。また、中段においては0.2mm程度中心の方が大きい。これは前述のように中心の方が表面部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。

表面ひびわれについて、実測値と3次元解析値を比較すると上段・中段いずれにおいても解析値は実測値に比べて全般的にやや小さい値を与えるが、最大ひびわれ幅については実測値0.48mmに対して解析値は0.42mmと両者の対応は非常に良好である。

図-12は、ひびわれ幅についての3次元解析値と2次元解析値を比較したものである。図中のハッチング部は、中心と表面のひびわれ幅で囲まれる領域である。図より3次元解析と2次元解析を比較すると、2次元解析の両ケースとも3次元解析の表面ひびわれ幅より小さな値を与える。中心ひびわれ幅と比較するとその差はさらに大きくなる。すなわち2次元解析ではひびわれ幅に関しては危険側に評価する可能性があり、解析諸定数、例えば付着喪失等価領域 l_s の値あるいは解析手法の改良などについて検討が必要である。2次元解析のケースaとケースbを比較すると、ケースbの方がケースaよりひびわれ幅を上段では約8%程度、中段では約50%程度大きく与えることがわかる。

5.まとめ

本研究ではコンクリート基礎上に打設された壁状構造物の3次元温度ひびわれ解析を行い、温度応力ならびにひびわれ幅の分布性状などを明らかにした。本研究の成果として、次のような知見が得られた。

①3次元解析により、コンクリート応力およびひびわれ幅の3次元的分布性状とその経時変化を、視覚的かつ的確に把握することができる。

②コンクリート応力とひびわれ幅についての実測値と3次元解析値とは良好に対応しており本解析手法の有用性が確認できた。

③2次元解析によるコンクリート応力は3次元解析による中心と表面部応力のほぼ中間的な値を与える。

④2次元解析によるひびわれ幅は3次元解析の表面のひびわれ幅より小さく、中心のひびわれ幅と比較するとさらにその差は大きくなる。すなわち、2次元解析ではひびわれ幅を危険側に評価する可能性があり、2次元解析手法の改良などを検討する必要がある。

参考文献

- JCI; [資料1]底面で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
- 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
- 例えば、横井謙二ほか；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、pp. 1131~1136、1992

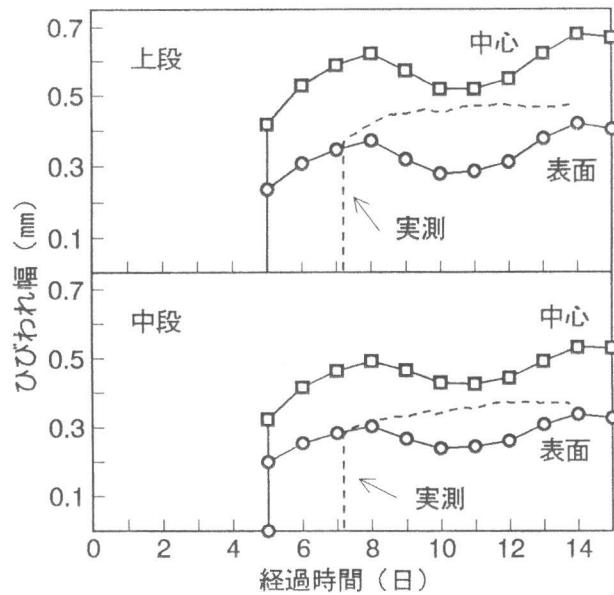


図-11 ひびわれ幅（3次元と実測）

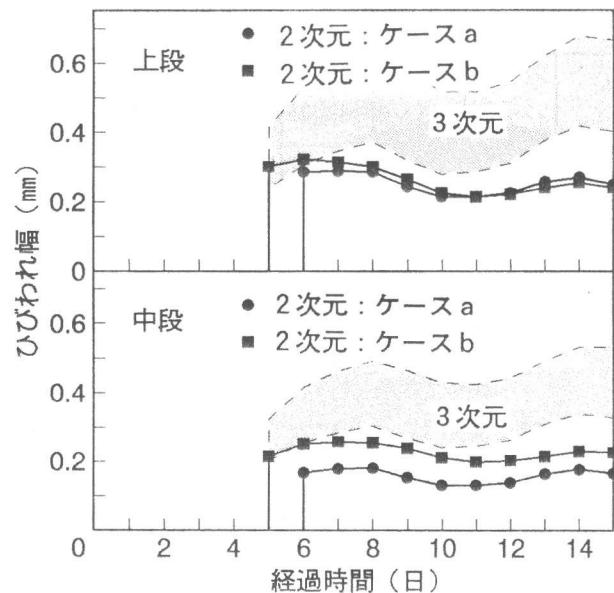


図-12 ひびわれ幅（2次元と3次元）