

論文

[1149] 離散型ひびわれモデルによる温度ひびわれの数値シミュレーション

正会員 ○森本 博昭 (岐阜大学工業短期大学部)

横井 謙二 (岐阜大学工学部)

正会員 小柳 治 (岐阜大学工学部)

1. まえがき

温度ひびわれ制御対策を検討する場合、予想される温度ひびわれの幅、間隔、長さ、および発生位置など(以後、これらを温度ひびわれ特性と総称する。)を推定することが必要となる。温度ひびわれ特性の推定法としては、コンクリートと鉄筋の付着方程式を基礎とする方法⁽¹⁾、あるいは、Compensation Plane法を基礎とする方法⁽²⁾などが提案されている。これらに対して、本研究では、汎用性、適用性等を考慮して、温度ひびわれ特性を総合的に推定することができる非線形有限要素解析による温度ひびわれの数値シミュレーション手法を考え、ここでは、特にコンクリートの引張軟化特性の導入法についての基礎的検討を行う。

2. 解析手法

有限要素法によるひびわれ解析を行う場合、最も重要となるのがひびわれの表現である。現在、有限要素解析で用いられるひびわれモデルは、離散型モデルと分散型モデルとに大別される。

本研究では、ひびわれを直接表現でき、かつその確認が容易であること、ひびわれ幅、長さ、間隔などのひびわれ特性の定量的評価が比較的容易であること、および、結合要素を導入することによりコンクリートの引張軟化、コンクリートと鉄筋の付着、および打継面のすべりなどの特性を同一の手順で解析に導入できるなどの特徴を考慮して離散型のひびわれモデルを採用した。離散型ひびわれモデルでは、ひびわれの発生、進展に伴うリメッシュが必要となるが、本研究では二重節点を導入し処理の簡便化を計った。すなわち、ひびわれが発生する以前は、二重節点間を剛性無限大のひびわれ結合要素で接合しておく。そして、結合要素周辺がある破壊基準に達したときひびわれが発生すると考え、節点間の接合を一旦切り放しひびわれを表現した。この際、節点間の切り放し方向を変えることにより

X方向とY方向のひびわれが表現できる。ひびわれ幅は、二重節点における各節点の相対変位差により算定した。二重節点の基本的構造を図-1に示す。ひびわれが発生した後のコンクリートの引張軟化特性は、ひびわれ結合要素の剛性を適当に調整することにより表現することにした。コンクリートの引張軟化特性には、仮想ひびわれモデル(Fictitious Crack Model)⁽³⁾型の軟化曲線を採用した。解析にあたっては、

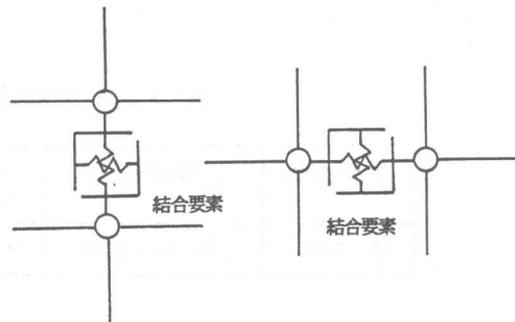


図-1 二重節点の構造

実際の軟化曲線を二直線により近似した、いわゆる1/4モデルを用いた。ひびわれ結合要素の剛性調整によりコンクリートの引張軟化特性を考慮する具体的方法として、本研究では、ひびわれ要素周りの平均的応力とひびわれ幅が所定の引張軟化特性を満足するよう、結合要素の剛性を調整して行くことを考えた。すなわち、本手法（以後、これを手法Aと呼ぶ）は、ひびわれ要素周りの平均的応力と、ひびわれ幅と引張軟化曲線から求まる応力とが合致するよう結合要素の剛性を修正、再評価して行くものである。

なお、本研究では、手法Aに加えて比較検討のため、ひびわれ発生後のコンクリートの引張剛性を無視した場合（以後、これを手法Bと呼ぶ）についても解析を行った。

3. 構造物モデル

解析の対象とした構造物は無筋の壁構造物である。本研究では、ひびわれ解析手法におけるコンクリート引張軟化特性の取り扱いに関する基礎的検討を主目的としているため、図-2に示すように、壁構造物の中央部を簡略化した系について解析を行った。構造物モデルの一方の側面と底面には、拘束バネを設けて外部拘束が卓越する壁構造物の応力状態を再現した。そして、もう一方の側面は、二重接点構造とすると共に、ひびわれ結合要素を配置した。壁の高さは50cmとし、高さ方向の有限要素分割は100分割とした。

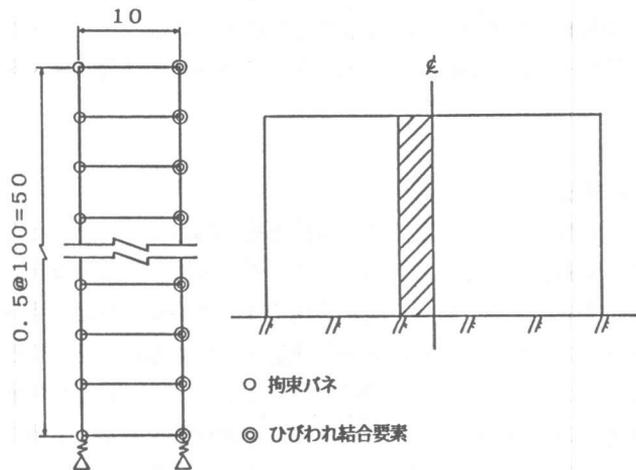


図-2 壁構造物モデル（単位：cm）

表-1 コンクリートの物性

ポアソン比	熱膨張係数	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
0.167	10.0×10 ⁶	3.0×10 ⁵	20.0

4. 解析条件

解析に用いたコンクリートの物性を、表-1にまとめて示す。また、図-3に、コンクリートの引張軟化曲線モデルを示す⁽⁴⁾。解析は増分的に行い、ひびわれ発生までは1つの解析ステップ当り1℃の温度降下を、そしてひびわれ発生後は0.5℃の温度降下を与えた。また、ひびわれは、主応力が引張強度を上回ったときに発生すると考えた。ひびわれの発生方向は、本手法の性質上、水平と鉛直の2方向に限定した。

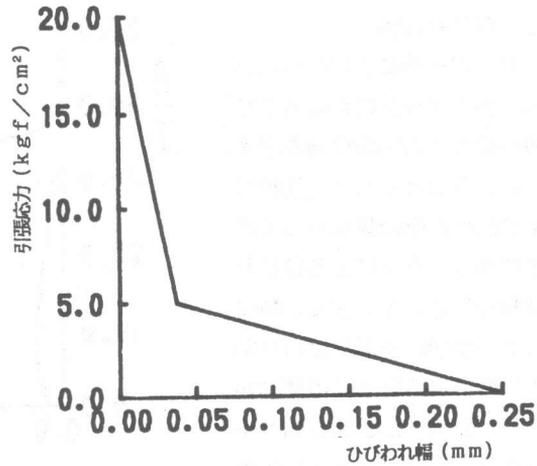


図-3 引張軟化曲線の2直線近似モデル

5. 解析結果と考察

5-1. ひびわれの発生と進展

A法による解析の結果、図-4に示すように6step(累計温度降下量6℃)において壁底部にひびわれが発生し、以後、温度降下と共に上部方向にひびわれが進展してゆき、30step(累計温度降下量18℃)で底部から49.5cmの位置まで達した。コンクリートの引張剛性を無視した場合(手法B)のひびわれ進展を図-5に示す。図から、ひびわれの発生時期は、A法と同時期であるが、その後のひびわれの進展はA法に比べて早くなっており、26step(累計温度降下量16℃)でひびわれは壁上端に達する。ひびわれ進展に関してA法とB法を比較すると、コンクリートの引張剛性が進展の防止に寄与することがわかる。

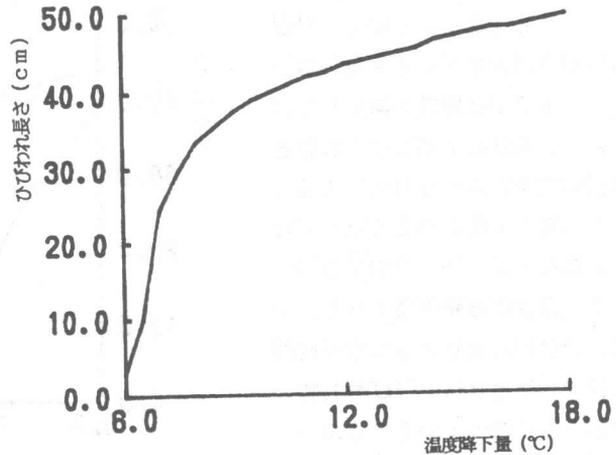


図-4 ひびわれの進展(A法)

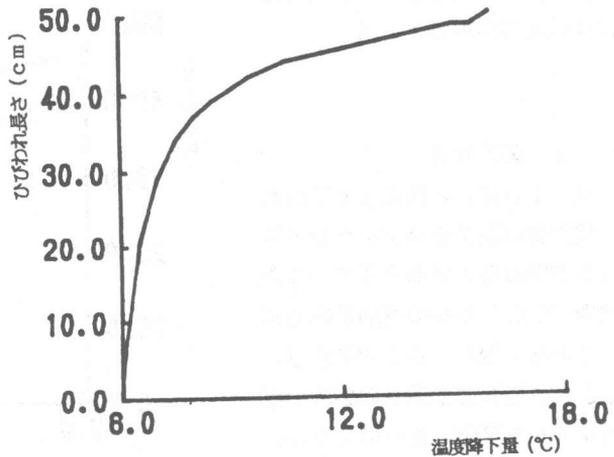


図-5 ひびわれの進展(B法)

5-2. ひびわれ幅

図-6～図-9に、ひびわれ発生後の、各ステップにおけるひびわれ幅の壁高さ方向の分布を示す。図中には、A法とともに、比較のためにB法の解析結果も示してある。各図から、A法によるひびわれ幅はB法に比べて小さく、特にひびわれ発生後、まだひびわれ幅が小さい時期においてこの傾向が著しい。これは、ひびわれ幅が小さいうちは、コンクリートにはまだかなり大きな引張剛性が残存しているためである。しかし、ひびわれ幅が増大するにともないコンクリートの引張剛性が減少して行くため、A法によるひびわれ幅と引張剛性を無視したB法によるひびわれ幅との差が小さくなって行く。たとえば、図-9の26ステップ（累計温度降下量16℃）では、ひびわれ幅が大きくなる底部では、A法とB法のひびわれ幅の差が小さくなっている。しかし、ひびわれ幅がまだ増大していない上部では両解法のひびわれ幅には大きな差異が生じている。

5-3. 応力分布

図-10に、A法によるひびわれ発生後の各ステップにおける壁高さ方向の応力分布を示す。また、図中にはひびわれの進展位置も示してある。なお、各応力の値は、ひびわれ結合要素周りの応力の平均値として算出したものである。各図から、すでにひびわれが発生している部分においても、ひびわ

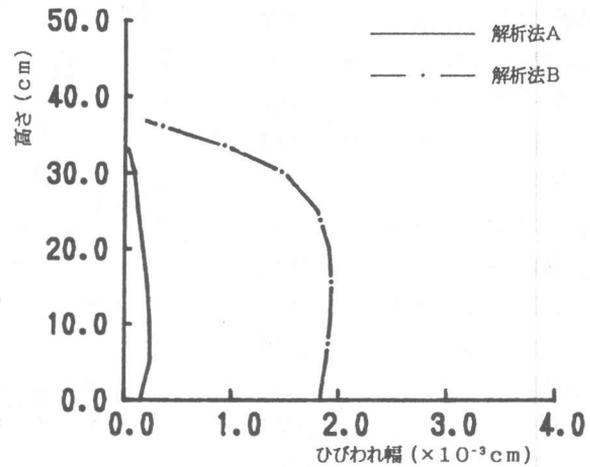


図-6 ひびわれ幅の高さ方向の分布 (10step)

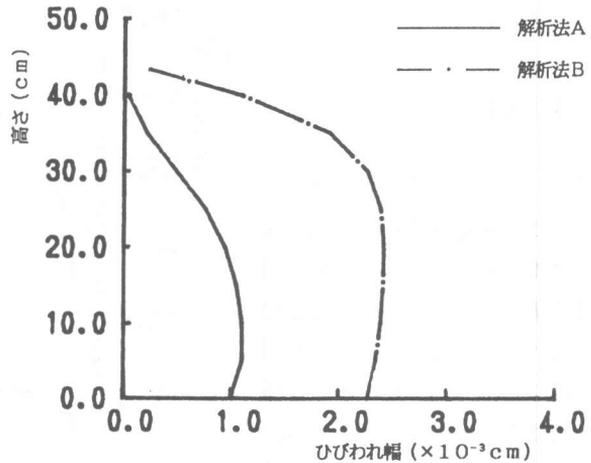


図-7 ひびわれ幅の高さ方向の分布 (14step)

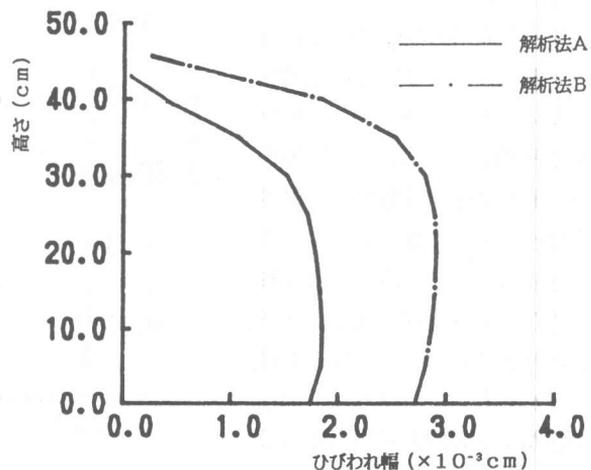


図-8 ひびわれ幅の高さ方向の分布 (18step)

れ発生後かなりの期間大きな引張応力が残存している。ひびわれがほぼ壁全長におよんだ26ステップにおいても、底部付近には6~7 kgf/cm²の引張応力が残存している。図-11は、B法によるひびわれ発生後の各段階における応力分布である。図から、A法にくらべてひびわれ発生後は、ひびわれ部分の応力が急速に減少して行くことがわかる。

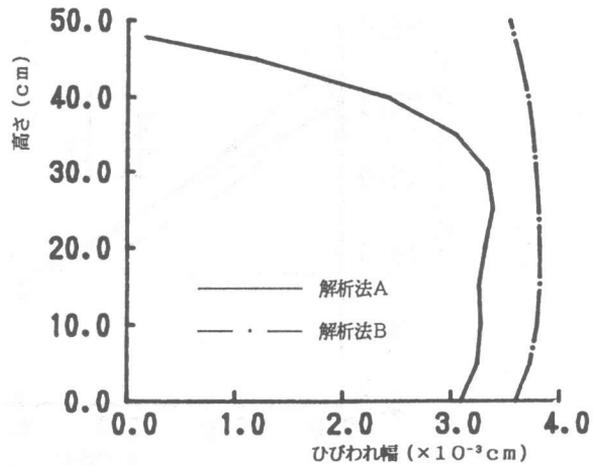


図-9 ひびわれ幅の高さ方向の分布 (26step)

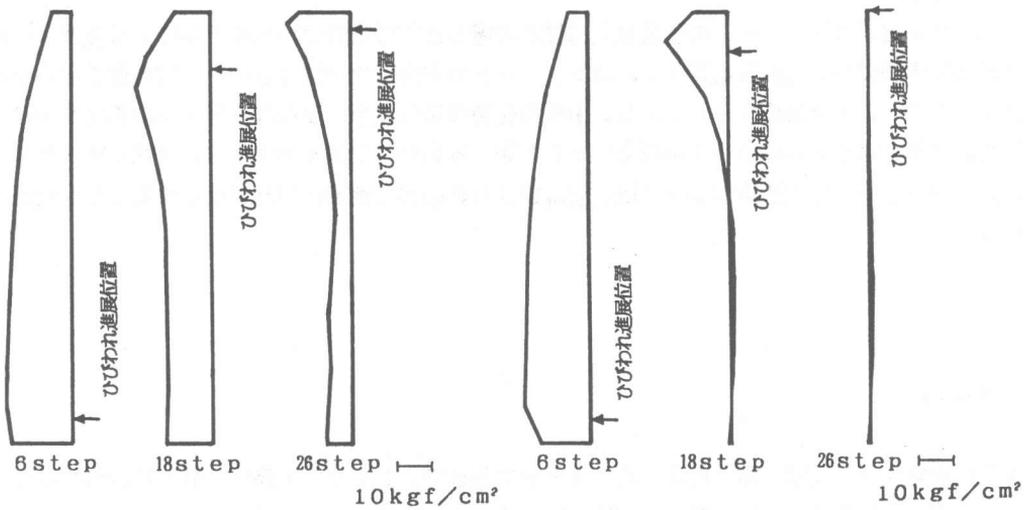


図-10 応力分布の変化 (A法)

図-11 応力分布の変化 (B法)

5-4. ひびわれ幅と応力の関係 (引張軟化特性)

図-12は、A法におけるいくつかの着目点でのひびわれ幅と引張応力との関係を示したものである。図中には、解析で用いた引張軟化特性もあわせて示してある。図から、各着目点でのひびわれ幅と応力との関係は、引張軟化曲線をほぼ満足しており、これはA法で用いた引張軟化特性の導入法が妥当であったことを示すものである。

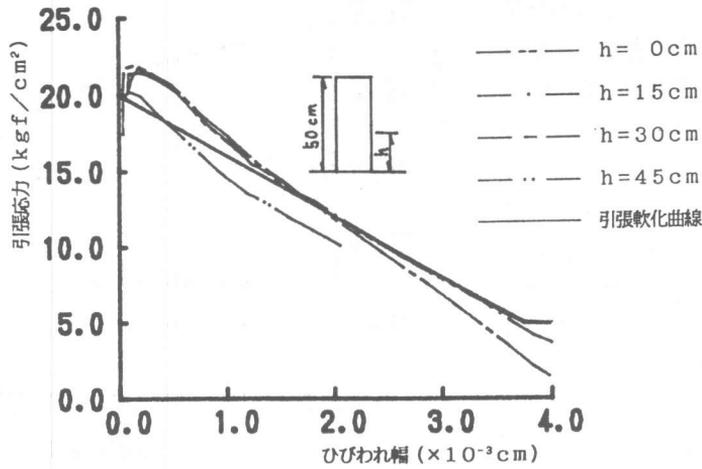


図-12 引張応力とひびわれ幅との関係

6. まとめ

本研究では、コンクリートの引張軟化特性を考慮した離散型ひびわれモデルによる温度ひびわれの解析手法について検討を行った。コンクリートの引張軟化特性をひびわれ結合要素の剛性を調整することにより表現することとし、引張軟化特性には仮想ひびわれモデル型の軟化曲線を用いた。壁構造物モデルについて解析を行った結果、本研究で提案する手法の妥当性が明らかとなった。コンクリートの引張剛性の存在は、温度ひびわれの幅と進展の抑制に寄与することが明らかとなった。

参考文献

- (1) 佐藤良一、氏家 勲、桜井 実：マツシブな鉄筋コンクリート部材の最大ひびわれ幅の予測、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、PP.451-456、1989
- (2) 賀茂友裕、田辺忠顕：マスコンクリートの温度ひびわれ幅算定法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、PP.457-462、1989
- (3) Hillerborg, A. : The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy G_f of Concrete, Materials and Structures, Vol.18, No.106, RILEM 1985
- (4) Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T., and Koyanagi, W. : Testing methods to determine tensile strain softening curve and fracture energy of concrete, Proc. of Int. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy, Sendai, Oct. 1988