

委員会報告

「マスコンクリートの温度応力研究委員会報告」

幹事 小野 定（清水建設）

マスコンクリートの温度応力研究委員会

- | | |
|----------------------|----------------|
| 〈委員長〉 田辺 忠顕（名古屋大学） | |
| 〈幹事〉 梅原 秀哲（名古屋工業大学） | 小野 定（清水建設） |
| 倉林 清（戸田建設） | |
| 〈委員〉 石川 雅美（東急建設） | 川口 徹（大林組） |
| 近藤 吾郎（京都大学） | 佐藤 良一（宇都宮大学） |
| 庄野 昭（間組） | 布谷 一夫（竹中工務店） |
| 服部 高重（大成建設） | 林 徹（熊谷組） |
| 三島 徹也（前田建設工業） | 森本 博昭（岐阜大学） |
| 山川 秀次（電力中央研究所） | 山本 英夫（小野田セメント） |
| 万木 正弘（鹿島建設） | 吉川 弘道（武蔵工業大学） |
| 〈旧委員〉 曾根 徳明（小野田セメント） | 吉岡 保彦（竹中工務店） |

1. 委員会設立の背景と活動状況

昭和56年に組織されたマスコンクリートの温度応力研究委員会では、主として応力発生メカニズムの解明、応力の算定方法について研究した。そしてその最終的な検討結果を昭和60年8月、9月、10月のコンクリート工学誌上において報告した[1]。そのなかで、今後に解明されるべき問題としてクリープ、若材令コンクリートの応力・ひずみ関係、外部拘束係数の精度の向上などが挙げられているが、ひびわれ幅やひびわれを拘束する鉄筋の応力については言及されていなかった。これらの問題は、その頃すでに指摘されており委員会の中で議論されなかったわけではないが、合理的、統一的な理論的扱いが、まだ当分不可能であるような潜在的な認識があって、近い将来の委員会テーマになり得ないような一般的認識が持たれていたように思われる。平成元年に第2回のマスコンクリートの温度応力研究委員会が組織され、むしろひびわれ幅やひびわれを拘束する鉄筋の応力の推定方法を中心に委員会活動を行うようになったのは、予想外に早い研究活動の進展から、これらの問題にある回答を与えられそうな情勢になってきたことによる。

このような背景のもとに組織された当委員会では、主として「水和熱に起因する温度ひびわれのひびわれ幅の算定方法」、温度応力の簡易計算方法として広く使用されている「コンペンセーションプレートン（ライン）法（CLM, CPM）を用いた温度ひびわれ幅の簡易算定法」について研究した。

平成元年に活動を開始し、以来3年にわたって調査研究を行った。この間21回の委員会を開催し、平成2年8月には『コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関するコロキウム』[2]を開催した。

ここでは、本委員会活動により得られた成果について概説する。なお、その詳細については、今年度内に発刊予定の本委員会の最終報告書に記述されているので参照されたい。

2. 研究の概要

コンクリート構造物におけるひびわれは各種の要因によって生じ、その要因毎にひびわれの様相を異にし、その制御方法は多岐にわたる。一般の鉄筋コンクリート部材の場合には、硬化した状態においてコンクリートと鉄筋の複合体に荷重が作用するために、ひびわれ発生前のコンクリートおよび鉄筋の応力分布は比較的によく分かっている。しかし、温度応力の場合には、ひびわれが発生する以前のコンクリート中の応力分布が必ずしも良く分かっておらず、不明な場合が多い。温度応力によるひびわれ幅に影響を及ぼす最大の要因は、ひびわれ発生前のコンクリートの応力であるから、精度の良い推定を行うには発生以前のコンクリートの応力の精度の良い推定が不可欠となる。このようなことから、本委員会では、水和熱が原因となるひびわれ（温度ひびわれ）の幅（温度ひびわれ幅、以下ひびわれ幅）を解析的に究明するために、表-1に示すような解析的検討を行った。

表-1 ひびわれ幅に関する研究の概要

| 研究分類 | 研究の小分類 | 研究内容 |
|---------------|--|---|
| ひびわれ幅に関する研究 | _____ | 既往の研究調査（ACI, BS5337, 小野の提案, 万木らの提案, 長滝・佐藤らの方法、拡張CP法など） |
| 統計的方法の検討 | _____ | 実施工結果を基にして、統計的方法により解析し提案された方法（小野の提案, 万木らの提案）の適用性について検討。 |
| 一軸モデルによる検討 | ①一軸モデル ②バネ拘束モデルを取り入れた一軸モデル | ・一軸モデルによりひびわれ幅を推定する方法の検討。 ・ひびわれ部の鉄筋とコンクリートの付着が消滅する領域（以下、鉄筋の付着消滅領域）について解析的に検討。 |
| FEMによる検討 | ①FEMによる解析モデルの検討 ②壁状構造物を対象にした貫通ひびわれの解析 ③ボックスカバートを対象にした貫通ひびわれの解析 ④スラブ状構造物を対象にした表面ひびわれの解析 | ・解析モデルの適用性について検討し、FEMひびわれ解析モデルを提案した。 ・壁状構造物、スラブ状構造物およびボックスカバートを対象にして、貫通ひびわれおよび表面ひびわれを解析し実測値との比較検討を行った。なお、表面ひびわれは解析だけである。 |
| CPL(CPL)による検討 | ①CPM(CPL)を基にしたひびわれ幅の計算方法の検討 ②新しいひびわれ幅の計算方法（CPひびわれ幅法）による壁状構造物を対象にした貫通ひびわれの解析 ③CPひびわれ幅法によるボックスカバートを対象にした貫通ひびわれの解析 ④CPひびわれ幅法による表面ひびわれの解析 | ・CPひびわれ幅法は、名古屋大学グループが提唱した「拡張CP法」を発展させた方法で、新たに温度ひびわれのモデル化と定式化を行った。 ・CPひびわれ幅法により、壁状構造物、スラブ状構造物およびボックスカバートを対象にした貫通ひびわれおよび表面ひびわれの解析を行い、実測値との比較検討を行った。 ・ひびわれ発生にともなうひびわれ部の応力解放領域について検討した。 |
| 各種方法の比較検討 | ①各種方法と実測値との比較 ②CPひびわれ幅法とFEMとの比較 | ・統計的方法、FEMおよびCPひびわれ幅法と実測値との比較検討を行った。 ・CPひびわれ幅法とFEMとの比較検討を行うことにより、CPひびわれ幅法の適用性を検討した。 |

3. 温度ひびわれ幅に関する研究の概要

ひびわれ幅に関する既往の研究について調査した。ひびわれ幅の算定方法を提案している主な方法は以下のとおりである。

- (1)統計的方法 …… 小野らや万木らが提案している方法がある。これらの方法は、実施工結果を基にして統計モデルを与えている。
- (2)一軸法 …… マスコンクリートを一軸部材に置き換えて提案された方法で、長滝・佐藤らの提案、吉川らの提案、BS5337の提案等がある。
- (3)構造全体の応力再分配を考える方法 …… 名古屋大学グループが提案している拡張CP法、山崎らの提案、ACI207委員会の提案がある。
- (4)FEMによる方法 …… 離散型モデル、分散型モデルを用いた解析が行われている。

4. 有限要素法によるひびわれ幅の解析

4.1 解析モデル

FEMによりひびわれ幅を解析的に求める場合、ひびわれの発生、ひびわれコンクリートの構成則、鉄筋とその構成則、コンクリートと鉄筋との付着等が適切に評価されたモデルを設定する必要がある。FEMで用いられているひびわれモデルは、離散型モデルと分散型モデルに大別される。離散型ひびわれモデルは、図-1のように要素の再分割によりひびわれをミクロ的に表現するもので、ひびわれが離散的に発生する場合の解析に適している。一方、分散型ひびわれモデルは、図-2のように、有限要素でひびわれを表現した構成則を用いることにより、ひびわれをマクロ的にモデル化するものである。分散型ひびわれモデルは、多数のひびわれが多方向に発生する場合の解析に適している。解析モデルは、コンクリートのひびわれモデルに、鉄筋モデル、鉄筋付着モデル、材料特性モデル、ひびわれ面でのせん断伝達モデル等を組み合わせて構築される。解析モデルの構築に際しては、解析モデルを構成する各モデル間の整合性を保つこと、および解析目的に即したモデル化を行うことが重要である。

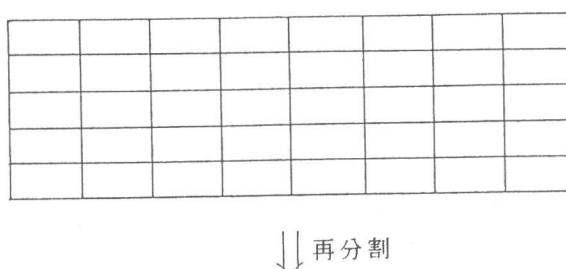


図-1 離散型ひびわれモデル

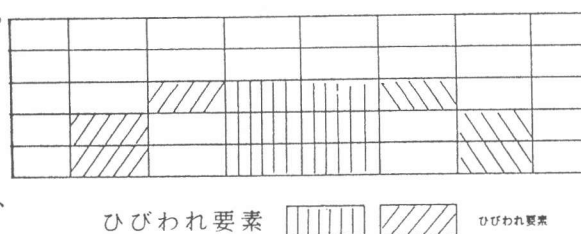


図-2 分散型ひびわれモデル

4.2 解析モデルの適用性

壁状構造物を対象にして、解析モデルの適用性について検討した。検討に使用したデータは、(社)日本コンクリート工学協会の「マスコンクリートのひびわれ制御指針」の資料1[3]に示

されているものである。

(1) 離散型ひびわれモデル

解析では、各材令において各要素毎にひびわれ発生の判定を行い、ひびわれが発生した場合はその部分に離散型ひびわれを設けている。図-3に材令14日におけるひびわれパターンの実測結果（供試体番号1-2、以下本文中で示したデータは全て同じ供試体である）と解析結果を示す。解析結果はほぼ実測結果と一致している。図-4に、壁中央部中段と下段におけるひびわれ幅の実測値と解析値の比較を示す。両者は比較的良い対応を示している。

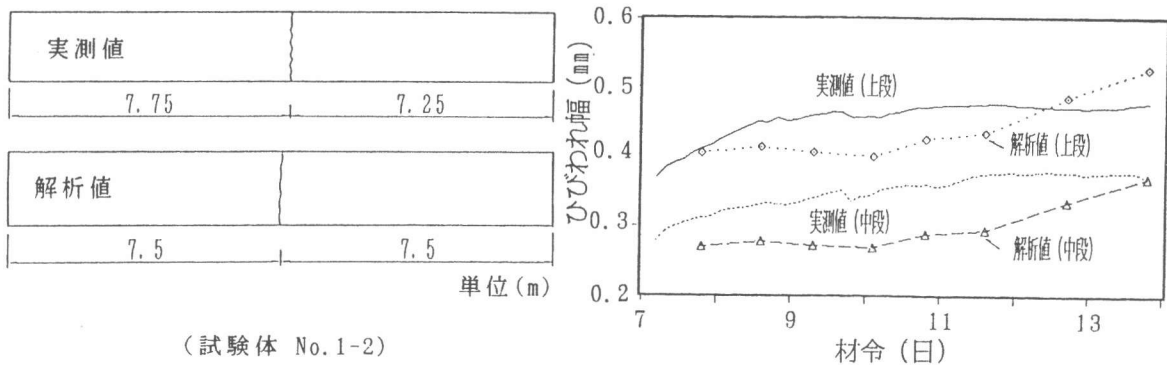


図-3 ひびわれパターン実測と解析の比較 図-4 ひびわれ幅実測値と解析値の比較

(2) 分散型ひびわれモデル

分散型ひびわれモデルでは、ひびわれ要素の剛性を極端に小さくすることにより、実質的に離散型ひびわれモデルに対応するひびわれモデルが得られる。ひびわれ発生部の要素分割幅を7.5cm、15cmおよび30cmに変えて解析を行った結果、ひびわれ幅で0.1mm程度の差が認められたが、解析値と実測値は良く一致することが明らかになった。

4.3 FEMによる温度ひびわれ解析モデルの提案

研究成果として、実用上十分な精度が得られる解析モデルを提案した。提案した解析モデルの概要は次のとおりである。

- (1) コンクリートひびわれモデル …… 離散型ひびわれモデルを推奨。
- (2) 鉄筋付着モデル …… 鉄筋の付着消滅領域を仮定することにより付着すべりをモデル化。
- (3) 鉄筋モデル …… トラス要素。
- (4) コンクリートの構成式 …… 弾性構成式を用いる。
- (5) 鉄筋構成式 …… 弾性構成式を用いる。
- (6) ひびわれ発生条件 …… 温度応力と引張強度の比較をもとに、ひびわれ発生の判定を行う。
- (7) ひびわれ幅の算定 …… ひびわれを挟む2つの節点相対変位差により算定する。
- (8) 要素分割幅 …… ひびわれ直交方向へは10~100cm程度、ひびわれ方向へは10~50cm程度の範囲とする。

5. CPMを用いた温度ひびわれ幅の計算

5.1 解析方法

図-5に示すような基礎コンクリート上に壁

状構造物が打込まれた場合を考える。この構造物に同図に示すような温度応力による貫通ひびわれが生じたとする。貫通ひびわれが生じた時、ひびわれ断面の鉄筋ひずみは急激に増加し、逆にひびわれ周辺のコンクリートひずみは応力緩和により減少する。また、ひびわれ断面の両側で、鉄筋とコンクリートの付着がある程度破壊され、同時に新コンクリートと基礎コンクリートの境界面では剥離が生じるもの考えられる。その後、これらのひずみは部材の温度変化に伴って増減し、それによってひびわれ幅も増減する。このようにひびわれ幅を算定する場合、コンクリート応力の解放によって生じるひびわれとその後の温度変化に起因するひびわれ幅の増減という二つの現象をモデル化する必要がある。そこで、図-6に示すようなモデルを考え、以下のような仮定を導入して定式化を行った。

- 1) <仮定1> …… ひびわれ断面の鉄筋ひずみおよびひずみ周辺のコンクリートひずみは高さ方向に直線分布している。
- 2) <仮定2> …… 図-6に示すように、ひびわれ断面を中心に、ある区間では鉄筋とコンクリートに付着は無い（以下、鉄筋の付着消滅領域）。鉄筋の付着消滅領域の長さを $2l_s$ とする。
- 3) <仮定3> …… 図-6に示すように、ひびわれ断面を中心に、新コンクリートと基礎コンクリートの打継面が片側 l_c の区間で剥離している。
- 4) <仮定4> …… コンクリート応力の減少はある領域（以下、応力解放領域）において平均的に生じ、その他の領域では生じない。応力解放領域の長さは片側 l_c とする。

ひびわれ幅 (w) は、 $w = 2l_s \cdot \varepsilon_s$ で求まる。ここに、 ε_s はひびわれ部の鉄筋のひずみである。なお、以上のような仮定で誘導された方法を「CPひびわれ幅法」とよぶことにした。

5.2 CPひびわれ幅法の適用性

壁状構造物、ボックスカルバートおよびスラブ状構造物を対象にしてCPひびわれ幅法の適用性について検討した。なお、壁状構造物とボックスカルバートは貫通ひびわれ、またスラブ状構造物は表面ひびわれを対象にしている。検討に使用したデータは、FEMの検討で使用したのと同じ(社)日本コンクリート工学協会の「マスコンクリートのひびわれ制御指針」の資料1[3]に示されているものである。

解析は、温度解析に二次元FEMを応力解析にCP法を、そしてひびわれ幅の解析にCPひびわれ幅法を用いた。コンクリート温度経時変化、コンクリート応力経時変化、鉄筋ひずみ経時変化、およびひびわれ幅経時変化の実測値と解析値との比較を、それぞれ図-7から図-10に示す。図-10の結果からひびわれ幅の解析値は実測値と良い一致を示しており、CPひびわれ幅法は充分

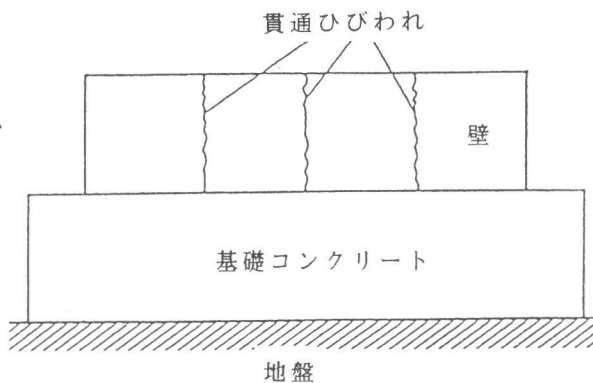


図-5 壁状構造物

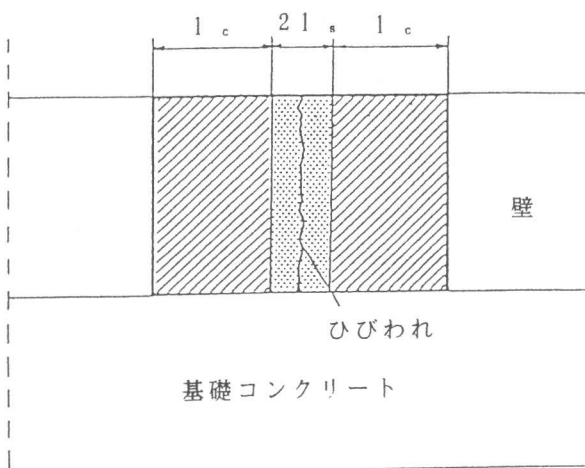


図-6 ひびわれ部のモデル化

な精度でひびわれ幅を算定できることが明らかになった。

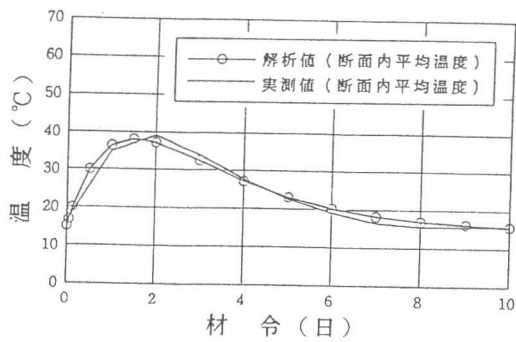


図-7 コンクリート温度経時変化の比較

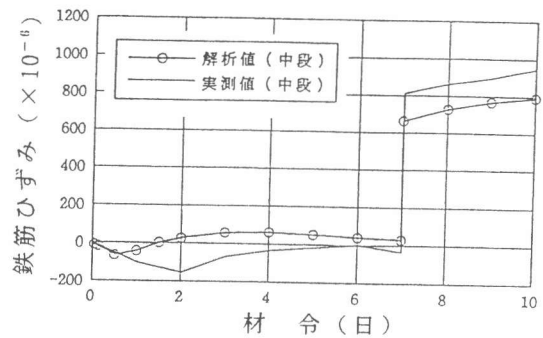


図-9 鉄筋ひずみ経時変化の比較

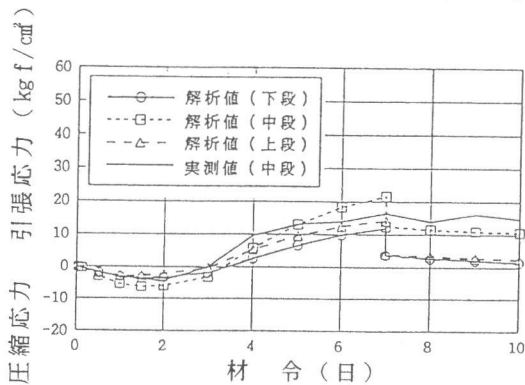


図-8 コンクリート応力経時変化の比較

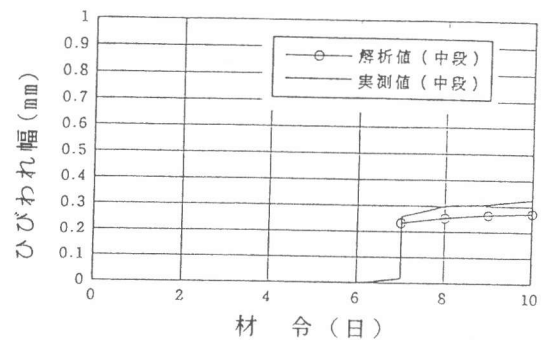


図-10 ひびわれ幅経時変化の比較

6. おわりに

本委員会は、本年の3月で終了した。昭和56年に第1回のマスコンクリートの温度応力研究委員会がスタートして以来、11年間にわたってマスコンクリートの温度応力に関する諸問題について研究を実施してきた。この間の活動により、マスコンクリートの分野で課題であった「温度応力の発生メカニズム」、「温度応力の算定」、「温度ひびわれ幅の算定」等を明らかにした。また、実用的にFEMと同程度の計算精度を得ることが出来る「温度応力の算定方法(Compensation-Plane(Line)法)および「温度ひびわれ幅の算定方法(CPひびわれ幅法)」を提案し、さらにマスコンクリートの温度応力解析を身近なパソコンで行ってもらうために、「マスコンクリートの温度ひびわれ防止・制御に役立つ一連のプログラムのフロッピーディスク」を作成・販売した。

最後に、今後新たな委員会を発足させて、上記プログラムに本委員会で研究、提案した「温度ひびわれ幅の算定方法(CPひびわれ幅法)」を組み込んだソフトの作成、講習会の開催等を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] マスコンクリートの温度応力研究小委員会：マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括(その1)、(その2)、(その3)、(その4・終)、コンクリート工学 Vol. 21, No. 8, Aug. 1983、Vol. 21, No. 9, Sep. 1983、Vol. 21, No. 11, Nov. 1983、Vol. 22, No. 1, Jan. 1984
- [2] (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関するコロキウム論文集、平成2年8月1日
- [3] (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針、pp. 127~155