

論文

[1190] 壁状構造物の温度ひびわれ幅の評価に関する実験的研究

正会員○河野一徳（前田建設工業技術研究所）

正会員 三島徹也（前田建設工業技術研究所）

正会員 佐藤文則（前田建設工業技術研究所）

1. はじめに

温度応力によるひびわれ幅を解析的に算定する方法の代表的なものとして、田辺らのコンペーション・プレーン（ライン）法を拡張した方法[1]（以下拡張CP法と略す）、佐藤らの鉄筋とコンクリートの付着を基礎とした方法[2]、吉川ら、森本らのFEMを用いた方法[3]、[4]が挙げられる。しかしながら、いずれの方法においてもモデル化やパラメータ値の与え方などに検討課題が残されており、実用レベルでのひびわれ幅予測に適用するためには、それぞれの課題についての詳細な検討が必要と考えられる。

本論文は、筆者らが温度ひびわれ幅の評価を目的として実施した小型模型実験の概要、および実験により得られたひびわれ幅の実測値と解析結果の比較検討の内容について述べたものである。実験は、佐藤らの方法[5]を参考とし、試験体中に埋め込んだステンレス製のスチールパイプに温度コントロールした水を流すことにより、試験体に温度応力によるひびわれを人為的に発生させる方法[6]で行なった。また、ひびわれ幅の解析は、拡張CP法[1]および離散ひびわれモデルを組み込んだFEM[7]を用いて行なった。なお、実験方法は文献[6]において報告したものと基本的に同じであるが、今回新たにひびわれ発生時におけるコンクリートの応力解放領域を実測し、解析における基本データとした。

2. 小型模型実験

2. 1 試験体

図-1に試験体の形状寸法を示す。試験体は基礎コンクリート上に壁を打設する場合を模擬した構造とし、全長3m、幅40cm、高さ1mの拘束体に幅20cm、高さ40cmの被拘束体を打ち継いで作製した。被拘束体には直径13mmの異形鉄筋を壁の中心に上下2段に配置した。また、拘束体と被拘束体は拘束鉄筋で接合した。なお、被拘束体の中央部には、ひびわれを誘発するために深さ10mmの切り欠き部分を設けた。試験体は、外部からの拘束の影響を極力受けないようにするため、単純支承上に設置した。実験実施時における拘束体および被拘束体のコンクリート強度は、それぞれ355kgf/cm²（材令28日）、201kgf/cm²（材令8日）であった。

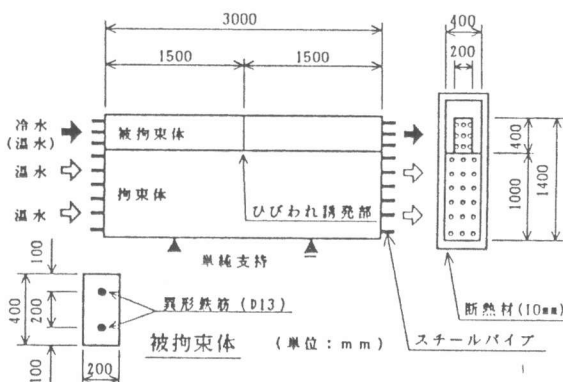


図-1 試験体の形状寸法

2. 2 実験方法

実験の基本原理は、試験体に埋め込んだスチールパイプに温度コントロールした水を流すことにより拘束体と被拘束体の間に人為的に温度差を生じさせ、被拘束体に温度荷重によるひびわれ

を発生させるものである。実験は、拘束体および被拘束体の温度を同時に約50℃まで上昇させた後、拘束体の温度は約50℃に保持したまま、被拘束体のみを冷水により徐々に冷却するという手順で実施した。なお、実験時には試験体を断熱に近い状態とするため、試験体全体を厚さ10cmの発泡スチロールで覆った。

2. 3 計測項目

計測項目は、拘束体温度、被拘束体温度、ひびわれ幅、鉄筋ひずみ、拘束体と被拘束体間の相対変位および被拘束体コンクリートの内部ひずみとした。ここで、コンクリートの内部ひずみは、ひびわれ発生時における被拘束体コンクリートの応力解放領域を知ることが主目的として測定した。温度は銅-コンスタンタン熱電対、ひびわれ幅はπ形変位計（感度1/1000mm）、相対変位は非接触型変位計、鉄筋ひずみは鉄筋の溝切り部分に貼付したひずみゲージによりそれぞれ計測した。また、コンクリートの内部ひずみは直径10mmの亚克力製丸棒に貼付したひずみゲージにより測定した。この亚克力棒には10cm間隔に支圧板（ナット）が取り付けられており、ひびわれ発生時におけるコンクリート内部ひずみの変化に追従できる構造となっている。図-2に鉄筋ひずみ、コンクリート内部ひずみ、ひびわれ幅および相対変位の測定位置を示す。

2. 4 実験結果

(1) 温度の履歴および分布

図-3に試験体中央断面の各測点における温度履歴を示す。被拘束体の温度は拘束体に近い部分ほど高くなっているが、これは下方の高温の拘束体から熱の供給を受けたためである。壁の中心部と表面の温度差は実験開始時に2℃程度あったが、時間の経過とともに減少し、実験開始30分以降はほぼゼロとなった。なお、実験においては図-3のB点における温度を被拘束体温度の代表値としてモニターした。以後の説明においては、温度降下量としてB点における温度降下量を用いることとする。

(2) ひびわれ幅

図-4にひびわれ幅の実測結果を示す。ここで、ひびわれ幅は壁の両側における測定値の平均値とした。ひびわれは被拘束体の温度降下量

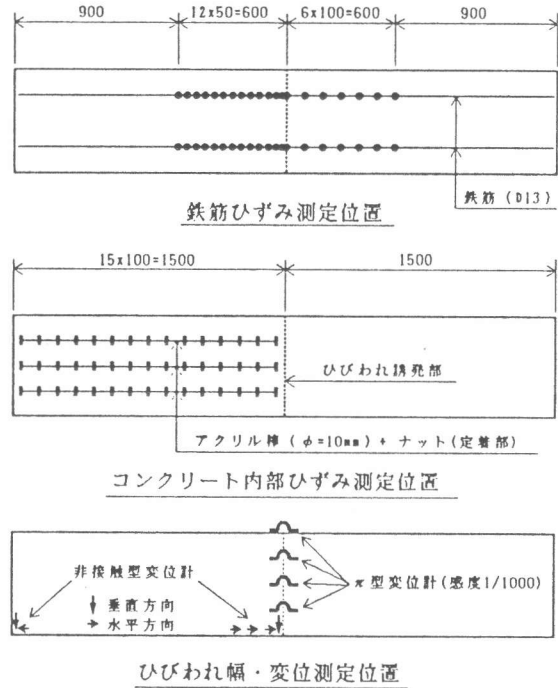


図-2 計測位置図

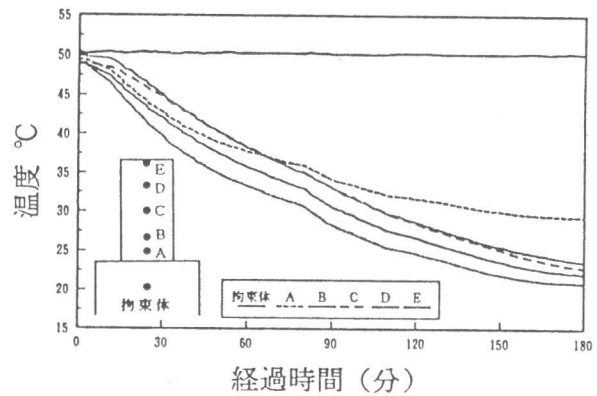


図-3 温度履歴および分布

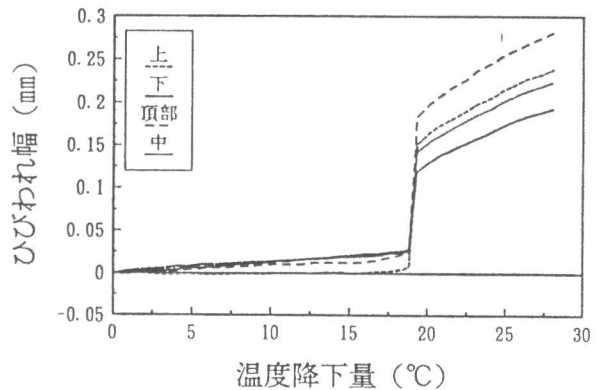


図-4 ひびわれ幅の実測結果

が19.3°Cとなった時点で発生した。ひびわれ発生直後の鉄筋高さの位置におけるひびわれ幅は、それぞれ0.15mm, 0.12mmであった。

(3) 拘束体と被拘束体間の相対変位

図-5に温度降下量と拘束体、被拘束体間の相対変位の関係を示す。垂直方向の場合、被拘束体端部は温度降下とともにほぼ一様な割合でそり上がっていくが、被拘束体中央部はひびわれ発生直後に急激な浮き上がりが生じた後、ほぼ端部と同じ割合でそり上がっていくことがわかる。一方、水平方向の場合はひびわれ発生直後にひびわれ面近傍において拘束体と被拘束体間にずれが生ずることがわかる。このずれの量はひびわれ位置から遠ざかるにつれて小さくなる。これらのことは、ひびわれ発生直後にひびわれ面近傍において拘束体と被拘束体間に剥離が生じることを示していると考えられる。

(4) 鉄筋ひずみの分布

図-6にひびわれ発生直後におけるひびわれ位置近傍の鉄筋ひずみ分布を示す。鉄筋ひずみ分布はひびわれ位置から約20~30cmの位置でフラットになる二等辺三角形に近い形状となった。

(5) コンクリートの解放ひずみ量

図-7にひびわれ発生時におけるコンクリート解放ひずみの分布を示す。ここでコンクリート解放ひずみは、ひびわれ発生前後におけるコンクリート内部ひずみの減少量と定義した。図-7よりひずみ解放量はひびわれ位置に近いほど、また上部ほど大きいことがわかる。ただし、ひびわれ面近傍においては中段の値が上段よりも大きくなっている。これは、中段には鉄筋がないことの影響と考えられる。図-8に解放ひずみ量のコンターを示す。同図より応力解放領域は0 μ の右側の領域に相当すると考えられる。

3. 拡張CP法によるひびわれ幅の解析

3.1 拡張CP法の基本仮定[1]

拡張CP法の基本仮定[1]を以下に示す。

- ①ひびわれ断面の鉄筋ひずみ、ひびわれ周辺のコンクリートひずみは高さ方向に直

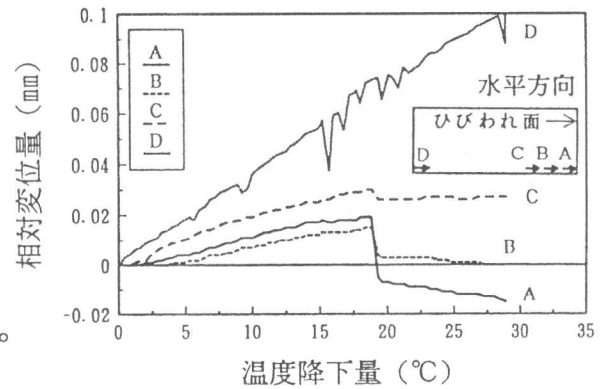
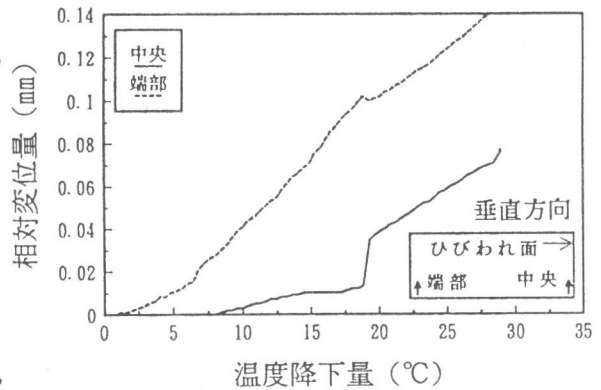


図-5 拘束体と被拘束体間の相対変位

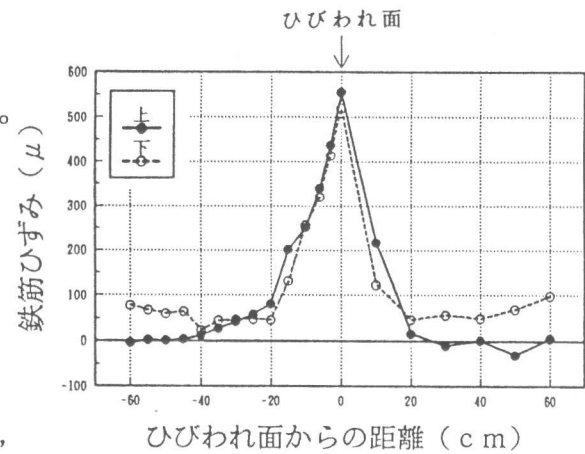


図-6 鉄筋ひずみの分布

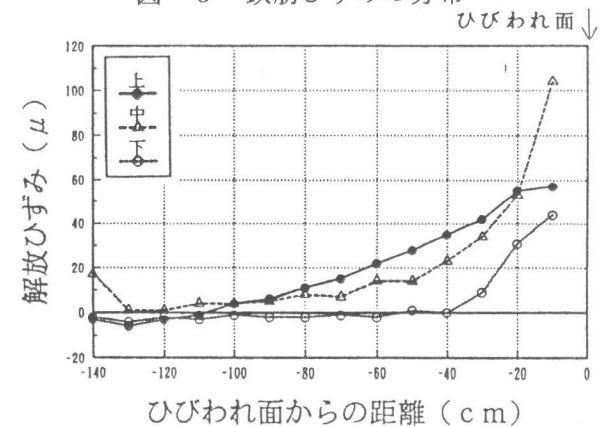


図-7 コンクリート解放ひずみの分布

線分布している。

- ② 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の付着はないがそれ以降の区間では両者は完全に付着している。
- ③ 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一部が剥離している。
- ④ コンクリート応力の減少はある領域（ひびわれ影響領域）において平均的に生じ、その他の領域では生じない。

図-9に鉄筋とコンクリートに付着がない領域 l_s およびひびわれ影響領域 l_c の概念図を、また図-10に仮定②の鉄筋ひずみ分布をそれぞれ示す。図-10に示すように、拡張CP法においては、ひびわれ位置を中心とした $2l_s$ (l_s の2倍) の区間は鉄筋とコンクリートの付着が完全に切れているが、それ以外の区間では両者は完全に付着していると仮定している。拡張CP法においてはこの l_c と l_s の比、すなわち l_c/l_s を基本パラメータとして計算を進め、ひびわれ面における鉄筋ひずみを算定する。ひびわれ幅は、この鉄筋ひずみに $2l_s$ を乗ずることにより求まる。

3. 2 基本パラメータの設定

基本パラメータ l_c/l_s の値は 8~10程度[1]とされているが、ここではひびわれ発生時における鉄筋ひずみ分布、および l_c に相当するコンクリートの応力解放領域の実測結果をもとに、 l_c/l_s の値を以下のように定めて解析を行った。 l_s の値は、図-10の仮定を図-6に適用すると $2l_s$ が 20~30cmの範囲になると考えられることから 25cmの1/2の12.5cmとした。また、 l_c の値は、図-7をもとに上下の各鉄筋高さの位置における応力解放量がゼロとなる位置（各110cm, 40cm）の midpoint、すなわち 75cmの位置とした。したがって、 $l_c = 75\text{cm}$ 、 $l_c/l_s = 75/12.5 = 6.0$ となる。ひびわれ発生時期は、実測データに合わせた。

3. 3 解析結果および実測値との比較

図-11、図-12にそれぞれ拡張CP法による鉄筋ひずみ、ひびわれ幅の算定結果と実測値の比較を示す。計算においては $l_c/l_s = 6.0$ とし、コンクリートのヤング係数は強度試験結果をもとに $2.38 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ (拘束体)、 $2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ (被拘束体) とした。本解析の場合、拘束体と被拘束体をリフト打設を想定した1つの構

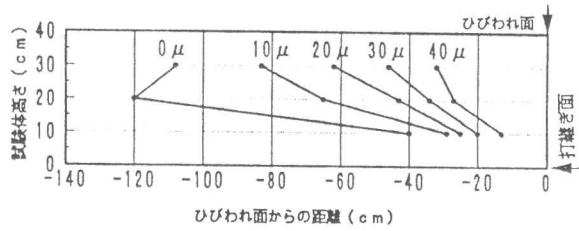


図-8 解放ひずみ量のコンター

(付着の無い領域) (完全付着領域)

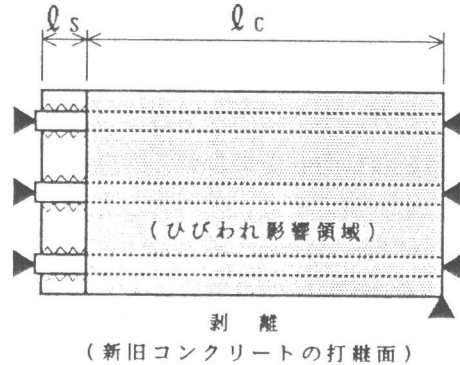


図-9 l_c および l_s の概念図[1]

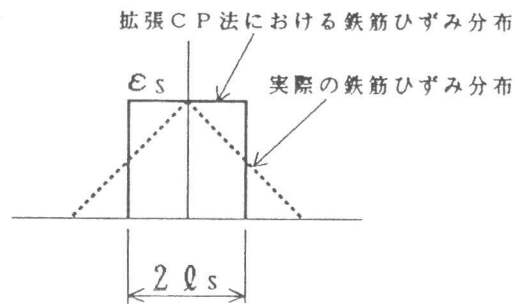


図-10 鉄筋ひずみ分布の仮定[1]

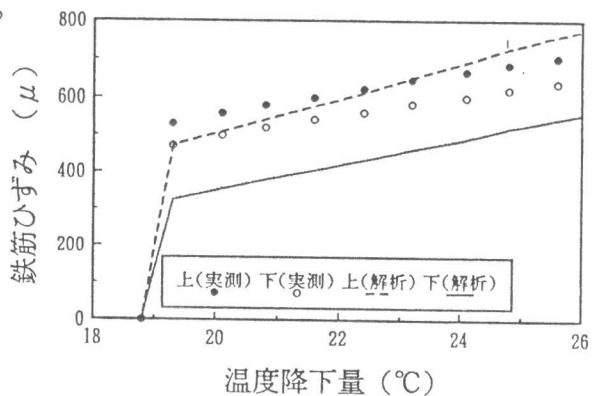


図-11 鉄筋ひずみの解析結果(拡張CP法)

造体と考えている。したがって、試験体を軸方向の拘束がなく、試験体中央部における自重による曲げモーメントがゼロとなるように単純支持としたことから、外部拘束係数 R_N 、 R_M の値はいずれもゼロとした。なお温度データは実測値を用いた。これらの図より鉄筋ひずみ、ひびわれ幅とも実測値よりも解析結果の方がやや小さめとなるが、両者は比較的良好に一致しているといえる。解析結果がやや小さめとなった原因のひとつに、 l_c の値が小さかったことが考えられる。 l_c に影響を与える要因として、被拘束体の壁高、拘束鉄筋量や打ち継ぎ面の状態などの拘束条件などが考えられ、今後これらの影響に対する検討を行っていく必要がある。

4. FEMによるひびわれ幅の解析

4.1 解析方法

FEM解析は、ひびわれ面およびコンクリートの打ち継ぎ面を離散ひびわれモデルを組み込んだ接合要素[7]でモデル化して行った。図-13に要素分割図を示す。要素分割は試験体の対称性を考慮して、試験体の左半分のみについて行った。ひびわれ断面、打ち継ぎ面については、それぞれ鉄筋の抜け出し特性を考慮した接合要素[8]、骨材のかみ合いによる応力伝達特性を考慮した接合要素[9]を適用した。計算は拘束体と被拘束体の温度の差の平均値を一様温度荷重として入力することにより行った。

4.2 解析結果および実測値との比較

(1) 変形状況

図-13にひびわれ発生後の全体変形図を示す。図-13より、端部およびひびわれ位置近傍の打ち継ぎ部において、実験結果でも述べた剥離現象が生じることが確認できる。

(2) 鉄筋ひずみの分布

図-14にFEM解析により得られた鉄筋ひずみの分布と実測した鉄筋ひずみの分布を示す。実測と解析がよく一致していることから、鉄筋ひずみの分布は文献[8]のモデルによってほぼ評価できるものと考えられる。

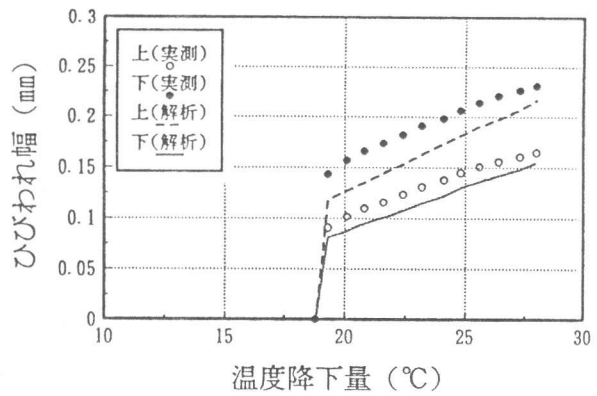


図-12 ひびわれ幅の解析結果(拡張CP法)

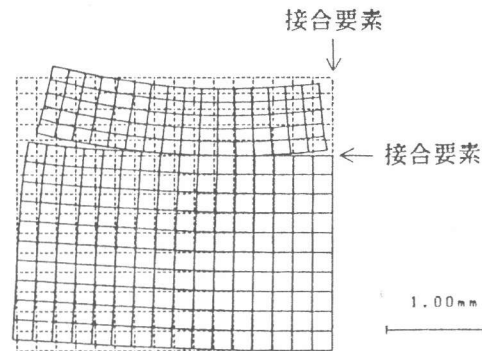


図-13 要素分割および変形図

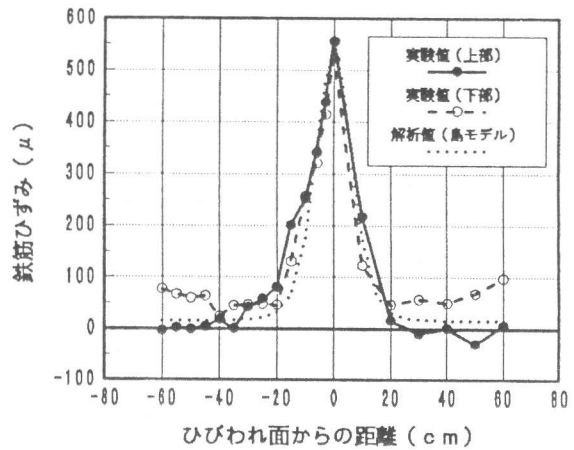


図-14 鉄筋ひずみ分布(FEM解析)

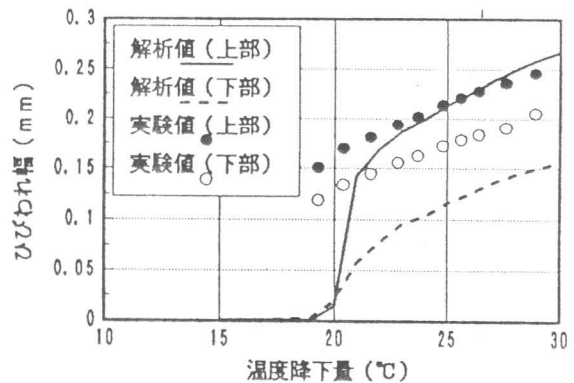


図-15 ひびわれ幅の解析結果(FEM)

(3) ひびわれ幅

図-15にFEM解析により得られたひびわれ幅と実測値の比較を示す。解析値は実測値に比べて全体的に小さめとなっているが、ひびわれ発生直後を除けばかなりよく一致している。

5. まとめ

今回行った実験、解析および両者の比較検討から得られた結果をまとめると以下のようになる。

- ① ひびわれ発生直後において、ひびわれ位置近傍の打継ぎ部のコンクリートに剥離が生ずる現象が実験およびFEM解析によって確認された。
- ② ひびわれ発生時に実測した応力解放領域の実測結果をもとにひびわれ影響領域 l_c を定め、拡張CP法[1]によりひびわれ幅を解析した。この結果、解析値は実測値よりも小さめとなったものの、両者は比較的良好一致した。
- ③ ひびわれ面および打継ぎ部を接合要素でモデル化したFEM解析[7]によりひびわれ幅を解析した。解析値と実測値が比較的良好一致したことから、温度ひびわれ幅の解析においても離散ひびわれモデルを組み込んだ解析手法が有効であること確かめられた。

拡張CP法における基本パラメータ値 l_c/l_s は、構造物の条件により変化すると考えられる。すなわち、 l_c は被拘束体の寸法や拘束状態などにより、また、 l_s は鉄筋径やかぶりなどによりそれぞれ変化すると考えられる。したがって、ひびわれ幅を精度よく評価するためには、 l_c および l_s の大きさを、これらの条件に応じて合理的に定めることが必要となる。これらの問題の検討を進めていく上では、今回に用いたFEM解析[7]が有効な手段となる考えられ、今後、FEMによるパラメータスタディおよび実験による検証を行い、 l_c/l_s の合理的な評価手法の研究に取り組んでいきたいと考えている。最後に本研究を遂行するにあたり懇切丁寧なるご指導を頂いた、名古屋大学工学部の田辺忠顕教授に対し深甚なる謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 賀茂友祐, 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
- 2) 佐藤良一, 氏家勲, 桜井実: マッシュ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
- 3) 石川雅美, 吉川弘道: マスコンクリートの温度ひび割れ解析に対する有限要素法の適用, 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JCI論文集, pp. 81-90, 1990. 8
- 4) 横井謙二, 森本博昭, 小柳治: 有限要素法による温度ひびわれ幅算定法に関する研究, 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JCI論文集, pp. 81-90, 1990. 8
- 5) 佐藤良一, 氏家勲, 岩崎肇, 額顕文博: 温度応力を受けたRC部材のひびわれに関する研究, 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JCI論文集, pp. 71-80, 1990. 8
- 6) 河野一徳, 横沢和夫, 谷直樹: マスコンクリートの温度ひびわれ幅に関する実験的研究, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 462-463, 1991. 9
- 7) 三島徹也, Bujadham, B., 前川宏一, 岡村甫: 鉄筋コンクリート離散ひびわれを構成する材料モデルの開発, 土木学会論文集, No. 442/V-6, pp. 181-190, 1992. 2
- 8) Shima, H., Chou, L. and Okamura, H.: Micro and macro models of for bond behavior in reinforced concrete, Journal of the faculty engineering, The University of Tokyo(B), Vol. 39, No. 2, 1987
- 9) Bujadham, B., Li, B., Maekawa, K.: Path-dependent stress transfer along crack in concrete, Proceedings of the JCI colloquim on analytical studies on shear design of reinforced concrete structures, JCI, pp. 65-72, Oct., 1989