

氏 名	あき 秋 田 ひろし 宏
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 4 年 12 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 42 年 3 月 東北大学大学院工学研究科土木工学 専攻修士課程修了
学 院 論 文 題 目	内部拘束応力によるコンクリートのひびわれ に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 尾坂 芳夫 東北大学教授 福田 正 東北大学教授 柳澤 栄司 東北大学教授 三浦 尚

## 論 文 内 容 要 旨

コンクリート部材の温度の不均一により生じる温度応力，乾燥の不均一により生じる乾燥収縮応力，これらが外部からの拘束が無い状態で働いている場合のひびわれを扱うものである。これらの内部拘束応力は，いずれも部材内の各部が相互に拘束し合って生じるものであるため，ひびわれが生じたとしても一般には貫通することがなく，部材の破壊には直接結びつかないと考えられてきた。しかしながら，ひびわれから侵入する水分による鋼材の腐食，凍結融解作用，アルカリ骨材反応の促進，あるいは塩害等は構造物の耐久性を損なうため見過ごすことができない。とくに，コンクリート構造物のひびわれ制御を検討する場合にも，ひびわれの防止を検討する場合にも，ひびわれ挙動の詳しい解明が必要である。

しかるに，外部からの荷重による応力でないため測定が容易でないと，部材の破壊には直接結びつかないと考えられてきたこと等のため，内部拘束応力やそれによるひびわれはあまり研究されなかった分野である。そのため，円筒構造物の温度応力に関しては，弾性解析で引張応力が引張強度を越える温度差となってもひびわれが検出されない事実について，明確な説明がなされていない。また，室内乾燥実験においても，収縮応力の大きさに対する評価がまちまちであり，ひびわれは発生しないとの考え方が多い反面，ひびわれが検出されたとの報告もある。

本研究は，このように未解明な部分の多い内部拘束応力に関し，近年目覚ましく発展してきたコンクリートの破壊力学の知識をもとに，解析的ならびに実験的にその大きさを評価し，それらによるひびわれ挙動を明らかにしたものであり，全文 6 章からなる。

## 第1章 序 論

第1章では、内部拘束応力の性質、内部拘束応力によるコンクリートのひびわれ挙動解明の必要性について述べ、次いで既往の研究状況、本研究の目的および本論文の構成について述べた。

## 第2章 コンクリートおよびモルタル中の水分移動に関する考察

第2章では、コンクリートの乾燥収縮応力について知るための前段階として、コンクリート中の水分移動について、実験および数値解析により調べた。実験では、水分移動の各段階で供試体を割裂することにより含水率分布を調べ、含水率分布の変化から水分移動を把握した。数値解析では、現象が非線形の拡散方程式で表現できるものと仮定し、諸定数を実験結果との整合性から定めた。まず、コンクリートの乾燥過程について、蒸発熱の影響を調べるために、3次元および1次元の水・熱同時移動解析を行ない、常温の乾燥では蒸発熱が水分移動に及ぼす影響の小さいことを確かめた。次に、1面乾燥実験から諸定数を定め、含水率分布の実験値の整合性から解析手法の妥当性を確認し、広範な配合の6面乾燥実験から諸定数の配合依存性を明らかにした。したがって、対象とするコンクリートの配合と雰囲気湿度が定まれば、常温での内部の含水状態を任意に算出することができる。

## 第3章 コンクリートの乾燥収縮応力の評価

第3章では、前章で確立した手法により算出された含水率分布と、実験で得られた含水率-収縮ひずみの関係を用い、弾性解析および非線形解析により、角柱供試体に生じる乾燥収縮応力を算出した。ここで言う非線形解析とは、リラクセーションおよびヤング率の非線形性を考慮した解析である。表面の引張応力は、乾燥開始後30分程度で引張強度に達し、弾性解析では6時間後に引張強度の約10倍となった。非線形解析では、引張応力が引張強度を越えることはないが、長期にわたって引張強度を取り続けることから、ひびわれの発生が予想される。そこで、解析結果の妥当性を確かめるために、割裂による応力開放時のひずみを実験と数値解析により調べ、両者がほぼ一致することを示した。

## 第4章 温度応力によるコンクリートのひびわれ特性

第4章では、温度応力によるひびわれの例として、内外に温度差を受けるコンクリート製円筒のひびわれ挙動を、無筋の小型円筒による実験、有限要素法を用いた解析により調べた。実験では、底版の有無により円筒のひびわれ挙動が全く異なり、底無円筒ではほぼ180℃の位置に2本のひびわれが生じ、底付円筒は本実験の温度範囲ではひびわれが検出されなかったが、ほぼ等間隔に3～4本のひびわれが生じることが予想された。また、円筒外周のひずみを測った結果から、図1に示すようにひびわれが通った測点(4と9)でひずみが急増する時期よりも、さらに遅れてひびわれが検出されることもわかった。実験終了後にひびわれを確認することは困難であり、内外温度差が取り除かれるとひびわれも閉じることが知られた。さらに、実験でひびわれが検出される温度差は、弾性解析により縁応力が引張強度に達する温度差の3倍近くになることが確かめられたため、温度

ひびわれに関する不可欠な事実が解明された。

## 第5章 仮想ひびわれモデルによるひびわれ挙動の解析

第5章では、荷重の異なる3種類のひびわれ強度を対象に、仮想ひびわれモデルを用いた解析結果と、前章までのあるいは本章の実験結果と照合し、破壊力学にもとづく検討を行なった。まず、一般的な外力の例として、3等分点荷重を受ける梁の曲げひびわれの解析を行ない、単独の仮想ひびわれを想定するだけでは縁応力が引張強度を越える部分があるため、複数の仮想ひびわれを想定する必要があることを示した。

次に、内部拘束応力の例として、内部に温度差を受ける底無円筒の解析から、複数の仮想ひびわれ相互には、図2に示したように内外温度差が大きくなるに従い、あるひびわれが進展すれば隣接するひびわれが閉じる関係があることが知られた。また、解析では底付円筒の仮想ひびわれ幅が底無円筒の半分程度であり、実験でひびわれが検出されなかったことに対応する。また、実験でのひずみ急増期(図1の測点4と9に見られる)に対応すると考えられる挙動が、図3のような仮想ひびわれモデルによる解析では瞬時にひずみが増大するため、同モデルでは骨材のかみ合い効果等が十分に表現できていないと判断される。ただし、ひずみ急増期の内外温度差も実験結果に近いこと、ひびわれの通った測点のひずみ増加とそれ以外の測点のひずみ減少が解析できていること等から、仮想ひびわれモデルがひびわれ挙動の解析に有効であることがわかった。また、図1と図3に現れているように、表面の引張応力が引張強度に達する時期、観測ひずみが急増する時期、実際にひびわれが検出される時期の3者が区別できることを示した。弾性解析で求めたひびわれ検出時の応力は、温度応力で約3倍、乾燥収縮応力で約10倍となるため、これらの内部拘束応力に関しては、ひびわれ発生限界状態の定義を再検討する必要があることが示された。

さらに、角柱供試体を対象に一定条件の室内乾燥実験を行なった結果、目視やルーペではまったく検出できなかったひびわれが、湿布で拭くあるいはインクを塗ることにより確認できることがわかった。これは、従来、外部から拘束を受けなければ乾燥収縮ひびわれは発生しない、と考えられてきたことが誤りであることを示している。したがって、つぎの問題として目に見えないひびわれがどの程度有害であるのかを調べる必要があることが示された。

## 第6章 結 論

第6章には、本研究での結論をまとめた。

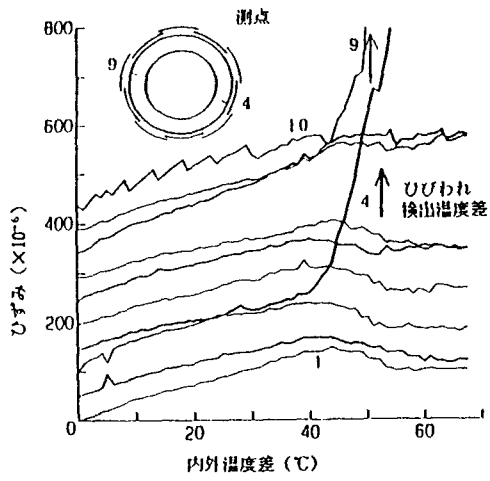


図1 観測ひずみ

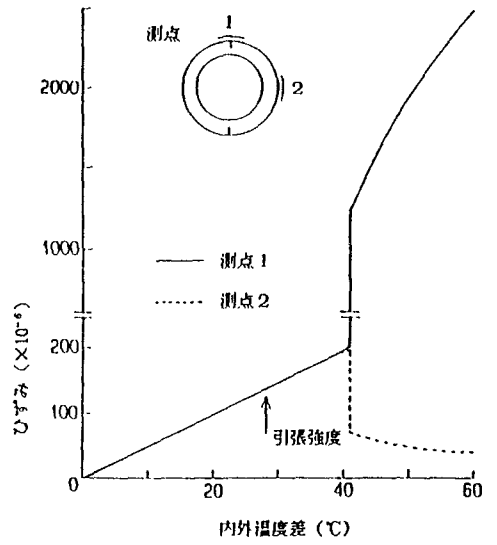


図3 解析ひずみ

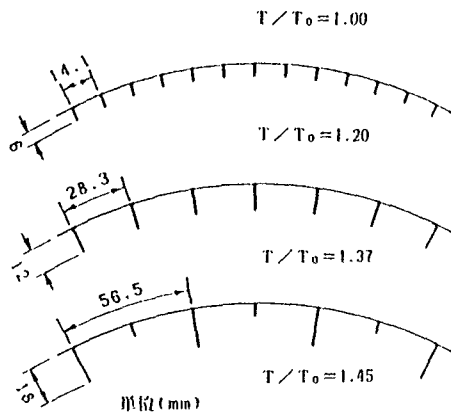


図2 仮想ひびわれの分布と進展

## 審査結果の要旨

外部からの拘束が無い場合の、コンクリートの温度応力や乾燥収縮応力によるひびわれは、それが構造物の破壊には直接結びつかないと考えられてきたため、あまり研究されなかった分野である。そのため、内外温度差により温度応力が生じる円筒構造等で、弾性解析によるひびわれ温度差以上の温度差を与えてもひびわれが検出されない不可解な事実について、明確な説明がなされていない。また、室内乾燥実験においても、収縮応力の大きさに対する評価がまちまちであり、ひびわれ発生の有無についても見解が分かれている。本論文は、内外に温度差を受ける円筒と、乾燥を受ける角柱供試体を対象として、内部高速応力によるコンクリートのひびわれ挙動を、解析的・実験的に解明したもので、全文6章からなる。

第1章では、研究の目的と本論文の構成について述べている。

第2章では、乾燥収縮応力を算出するための基礎となる、含水率分布を求めるための解析手法を確立し、解析に必要とする具体的な資料を提供している。これは重要な成果である。

第3章では、2章の手法により算出した含水率分布を基に、乾燥収縮応力を求め、それから得られる割裂時のひずみが、実験と解析ではほぼ一致することを確かめている。

第4章では、内外に温度差を受ける小型円筒のひびわれ挙動を実験的に調べ、底版の有無によるひびわれ挙動の違いを明らかにし、温度ひびわれに関する不可解な事実を解明している。これらは重要な知見である。

第5章では、コンクリートの破壊力学に基づく仮想ひびわれモデルを用いた解析により、曲げひびわれ、温度ひびわれ、乾燥収縮ひびわれの特性を調べている。特に、複数の仮想ひびわれが進展・消滅しながら成長してゆく過程を解析することにより、ひびわれ発生直前の状態を把握し、乾燥実験において、目視では検出できないひびわれが、乾燥1日以内に発生することを示している。これらは従来の認識を改めるもので、重要な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は数値解析と実験から、温度応力に関して不明だった点を解明し、乾燥収縮ひびわれに関するこれまでの認識の誤りを指摘するなど、内部高速応力によるひびわれ挙動を明らかにするとともに、ひびわれを制御あるいは防止するための基礎資料を提供したものであり、コンクリート構造工学と土木工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。