

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 細田 暁

鉄筋コンクリート（RC）構造物にとってひび割れの発生は宿命付けられたものであるが、一層の高耐久化が強く望まれている現在、ケミカルプレストレスを導入することによりひび割れ抵抗性を大きく、またひび割れ幅も小さくすることができる膨張コンクリートを適切に使用することは、非常に有力な手段である。しかし、膨張コンクリートの使用に関しては設計施工指針が取りまとめられているものの、実験室レベルでは必ず高性能化が図れるにも関わらず、実構造物ではその効果が現れないということも少なくなかった。また、ひび割れ抵抗性やひび割れ後の挙動を定量評価する手法が十分ではないこともあり、これまではプレキャスト製品を中心として収縮補償を目的として利用されている程度であるのが現状である。そこで、本研究では、膨張コンクリートの使用を一般的にすることでコンクリート構造物の信頼性を抜本的に向上させることを念頭に、膨張コンクリートの本質を根本的に理解することに努め、ひび割れ抵抗とひび割れ幅減少の機構を解明することで、実構造物において膨張コンクリートの効用を確実に最大に発揮させるための知見の一般化・知識化を図ることを目的とした。

研究の一つ目の柱として、過去の研究で実験事実のみが報告されていた、膨張コンクリート（載荷前に拘束を解除）がひび割れ発生までに示す非線形挙動の機構を解明することにした。非線形挙動によって変形能力が大きくなることは、ケミカルプレストレス部材のひび割れ抵抗性に大きな影響を及ぼすが、このような特徴は高いひび割れ抵抗性やひび割れ幅減少機構を根本的に支配する膨張コンクリート固有の特性を如実に表していることが判明した。

まず、鋼材で拘束された膨張モルタルの、ひび割れ発生までの非線形挙動の機構を明らかにすることを目的として、除荷過程を含む繰り返し載荷を薄い梁および一軸引張部材に対して行った。ケミカルプレストレス部材は、引張応力下でひび割れ発生までに非線形挙動を示すことから、圧縮応力下のコンクリートの構成則である弾塑性破壊モデルを参考にして、一軸引張応力下の膨張コンクリートを応力方向に並列に配置した微小構成要素のまとめりとらえるコンセプトを構築した。微小構成要素はセメントの水和とともに生成され、膨張材の反応に伴い微小構成要素には強制的に初期ひずみのばらつきがもたらされるものと考えた。このコンセプトにより、ケミカルプレストレス部材、自由膨張部材の非線形挙動を合理的に説明することができた。

次に、鋼材で拘束していない膨張モルタルに対して、様々な条件でひび割れ発生まで除荷過程を含む繰り返し載荷を行い、観察される非線形挙動の考察を行った。種々の材齢で検討を行ったところ、微小構成要素の破壊とそれによってもたらされる塑性変形だけでは説明できない現象が特に材齢1日や3日程度の若材齢時に見られた。このような若材齢時には、セメントの水和反応が載荷時間中にも起こっている可能性が考えられ、セメントの水和によって新たな微小構成要素が形成されることが、除荷時剛性が低下しない方向へ、また塑性変形が増加する方向に寄与する、という考察を加えた。

ここまでの議論は、骨材、セメントペースト、膨張材のそれぞれが果たす役割を明確に意識せ

ず、相互に及ぼす影響についても考慮していない。そこで、膨張コンクリートの非線形挙動の機構についてさらに深く考察をするため、骨材を取り除いた膨張ペーストの実験を行った。まず、水和生成物の形態が相当に異なる2種類の異なる膨張材を用いたところ両者の非線形挙動はほとんど一致し、膨張作用によって変化がもたらされたマトリックスおよび骨材の部分の挙動に着目した本研究の基本コンセプトの妥当性が確認された。しかし、ペーストの場合には、除荷後の残留ひずみは発生したが、除荷時の剛性の低下はほとんど認められなかった。膨張ペーストの変形性能は膨張モルタルより格段に大きかったが、最大経験ひずみが増加しても除荷時剛性がほとんど低下しない機構については明らかではなく、今後の検討課題である。

本研究におけるもう一つの柱として、膨張コンクリートのひび割れ発生以降の挙動について考察を行った。ケミカルプレストレスト部材では、ひび割れ発生以降もその幅が非常に小さく、これはRC構造物の耐久性の観点からは非常に大きなメリットとなるからである。まず、膨張コンクリートのTension Stiffeningについて検討するため、一軸引張試験を行った。拘束鉄筋比が1.3%~3.9%の範囲において、膨張コンクリートは従来提案されているモデルよりもTension Stiffening効果はるかに大きいこと、また、普通コンクリートと比較すると、ひび割れ発生以後の軟化が非常に緩慢であることが示された。Tension Stiffening効果が相当に大きくなるのは、膨張コンクリートでは鉄筋周辺に発生する微細ひび割れに対する抵抗性が大きくコンクリートが大きな変形能力を持っているためと考えられ、破壊力学的にとらえて一言で表現するとすれば、付着性状に優れ破壊エネルギーが大きいということになる。ただし、このことの意味は、材料単体としては極めて脆性的である高強度コンクリートが鉄筋との組合せによるシステムとして靱性的挙動を示すのとは大きく異なり、十分に拘束された膨張コンクリートは、コンクリートそのものがひずみのばらつきによってひび割れの局所化に対して高い抵抗性を有しているためと考えられる。

次に、ケミカルプレストレスト部材のひび割れ抵抗性に対する、多軸拘束の効果について検討を行った。ケミカルプレストレスト部材では、ひび割れが発生しても剛性が急激に変化することがなく、ひび割れの進展が普通RCに比べて緩慢であることが実験結果から分かった。膨張コンクリートは、ひび割れ部以外のコンクリートの応力解放も緩慢であるため、さらにひび割れ幅が小さくなると考えられる。引張縁における変形の局所化は、骨材とマトリックスの界面が剥離を開始する点であると思われるが、この時点では、膨張コンクリートのマトリックス部分には依然として微視的に圧縮応力が蓄積されている部分がかかなり存在しており、そのため、局所化が開始した後も、ひび割れの進展に大きなエネルギーを要すると考えた。また、スターラップによる多軸拘束の影響について検討したところ、多軸拘束の有無で、ひび割れが発生を開始した後の部材の剛性に相当な違いが見られ、また、斜めひび割れ発生荷重にもかなりの違いが見られた。多軸拘束を行うことの影響は大断面であるほど顕著であったことから、大断面を有する実大規模構造物では多軸拘束を行うことが設計上の要件として極めて重要であることが判明した。

本研究は以上に述べたように、膨張コンクリートが引張において示す非線形挙動の微視的機構の解明を端緒として、膨張コンクリートを用いた構造部材の高いひび割れ抵抗性やひび割れ幅の減少機構を明らかにし、これらを統一的に解釈すること成功している。また、膨張コンクリートの効用を実構造物において確実に具現化するための方策についても重要な知見を提示しており、今後コンクリート構造物の信頼性向上に膨張コンクリートを有効活用して行く可能性を大きく切り開くものである。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。