

論文の内容の要旨

論文題目 微視的機構に着目した膨張コンクリートのひび割れ抵抗性およびひび割れ後の軟化性状に関する研究と RC 部材への適用

Crack Resistance and Post Cracking Behavior of Expansive Concrete Based on Microscopic Mechanism and Application to RC members

細田 暁

膨張材を添加した膨張コンクリートは、硬化過程に膨張することを唯一最大の特徴とする材料である。自由に膨張させた場合は強度が低下するなど、メリットはほとんどないが、膨張を鋼材で拘束することによって、伸びた鋼材が持つ引張力の反力として、コンクリートには圧縮応力(ケミカルプレストレス)が導入される。ケミカルプレストレス部材は、ひび割れ抵抗性が大きく、ひび割れ幅も小さい、など種々の利点がすでに報告されている。また、欧米と異なり、日本では膨張材単体で生産されているため、構造物の要求性能に応じて任意の配合の膨張コンクリートを製造することが可能である。RC 構造物の高耐久化が強く望まれている現在、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と思われる。

しかし、膨張コンクリートは、養生条件など現場での施工に影響されやすいということと、そのひび割れ抵抗性やひび割れ後の挙動を定量評価する技術が十分ではないことにより、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。また、1960年代から1980年代にかけて行われた膨大な研究を取りまとめた形の「膨張コンクリート設計施工指針」(土木学会、1993年)においても、膨張コンクリートに特有な性状を十分に引き出すには至っておらず、実験事実が散乱しており、膨張コンクリートの挙動が十分に知識化されていないと思われる。そこで、本研究では、膨張コンクリートの普及に寄与することを念頭に、過去の研究成果と自ら戦略的に行って得た実験結果を通じて、膨張コンクリートの挙動を知識化することを目標に掲げた。

本研究は大きく分けて2本の柱からなる。2章から4章では、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。非線形挙動を示して変形能力が大きくなれば、比較的高鉄筋比で用いることが多いケミカルプレストレスト部材のひび割れ抵抗性に大きく影響を及ぼすからである。5章から7章は、研究のもう一つの柱であり、ケミカルプレストレスト部材のひび割れ発生以降における性状の機構解明を目指した。特に、曲げひび割れ幅が小さくなることを、膨張コンクリートに特有の性状を把握した上で機構解明に取り組むことにした。曲げひび割れ幅が著しく小さくなることは膨張コンクリートを使用する最大のメリットであり、その機構解明は不可欠であると考えたからである。

2章では、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ト部材は、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が明らかになった。除荷過程を含む繰り返し載荷を行うことで、除荷後に残留ひずみが発生し、最大経歴応力の増加につれて除荷時剛性が低下することが明らかとなった。これらの実験事実を元に、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の挙動をモデル化した。膨張コンクリートは、応力方向に並列に配置した微小構成要素からなるものとし微小構成要素はセメントの水和とともに生成され、膨張材の水和反応に伴い、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。引張外力が作用した場合は、微小構成要素が破断することによって、ほぼ弾的な挙動をする除荷時における剛性が低下し、除荷後の残留ひずみが発生するというコンセプトを提案した。このコンセプトにより、ケミカルプレストレスト部材、自由膨張部材の各種材齢における非線形挙動を定性的に説明することができた。

3章では、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。

2章と3章での議論は、骨材、セメントペースト、膨張材の複合材料である膨張コンクリートにおいて、それぞれの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、4章では、膨張コンクリートの非線形挙動およびひび割れ発生までの変形能力が大きいことの機構についてさらに深く考察をするため、骨材の影響を取り除いた膨張ペーストの実験を行った。また、一軸方向に鋼材で拘束する場合の、軸直交方向の膨張性状についても既往の研究も参考にして議論を行った。これらから得た知見と、2章、3章で考察した内容とを合わせて、ケミカルプレストレストコンクリートの引張応力下における非線形挙動および変形能力に対

して総合的な考察を行った。

膨張コンクリートは、少なくとも一軸に鋼材で拘束をしておけば、それと直交する方向には自由膨張とはならず、圧縮応力が蓄積されることが分かった。スターラップなどによって直接膨張を拘束すれば、導入される圧縮応力はさらに大きくなるのは当然である。骨材が存在する膨張コンクリートでは、特に骨材界面が弱点となって引張荷重が作用すると剥離が徐々に生じるが、マトリックス部分には大きな圧縮ひずみが存在しており、また直交圧縮力の効果もあって、局所的な損傷が急激にマクロなひび割れに発展することはない。そのために、徐々に除荷時剛性が低下しながらも、ひび割れ発生までに大きな変形能力を示すと考えられる。また、ケミカルプレストレスト部材に骨材が存在していることの意味について考察した。骨材が存在することによって界面が弱点となるのはデメリットである。しかし、軸方向圧縮力でがっちりとかみ込まれた骨材は、膨張エネルギーに対して大きな拘束となり全体の変形を抑制する効果があると考えられる。また、骨材が存在することで特にケミカルプレストレスト部材ではコンクリートの破壊エネルギーを大きくする効果が生じる。

5章から7章では、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。

5章では、ケミカルプレストレスト部材の **Tension Stiffening** およびひび割れ間隔について検討するため、一軸引張試験を行った。普通コンクリートの実験結果と比較すると、ひび割れ発生以後にあたかも塑性領域があるかのように応力の軟化が非常に緩慢であることが示された。また、引張強度が大きくなっていることも考慮すると、**Tension Stiffening** の効果はかなり大きくなる。一軸引張試験から得られたケミカルプレストレスト部材のひび割れ間隔は、普通コンクリートを想定した解析結果と比較して、相当に小さく、鉄筋比によっては半分程度のものもあった。**Tension Stiffening** 効果が大きく、ひび割れの分散性が大きいことの原因として、拘束された膨張コンクリートは変形能力が大きく、局所化抵抗性が大きいため、鉄筋周辺に発生する後藤クラックの発生および進展に対する抵抗性が大きく、付着性状が優れているためであると考えた。

6章では、ケミカルプレストレスト曲げ部材の性状、スターラップを配置することによる多軸拘束の効果、さらに曲げひび割れ幅が小さくなる機構について検討した。高さ方向にひずみ勾配がある曲げ部材においては、引張縁底面で発生し始めた曲げひび割れの高さ方向の進展が非常に緩やかであることが分かった。スターラップによって膨張を多軸に拘束した場合は、多軸に導入されるプレストレスの効果で、曲げひび割れの高さ方向の進展がスターラップのない場合よりもさらに緩やかになることが分かった。スターラップによる多軸の拘束は、部材断面が大きくて断面内の鉄筋間距離が広い場合、また型枠の拘束が十分でないときに、さらに大きく発現する。膨張エネルギーをコンクリートの性能を高めるために有効に利用ができ、スターラップのない場合よりも曲げひび割れ発生開始荷重が大きく改善された。そして、膨張コンクリートに特有な性状を踏まえた上で、ケミカルプレストレスト部材でひび割れ幅が小さくなる機構について角田の研究を参考に考察を行った。ひび割れ間隔が小さくなること、付着性状がよいので、ひび割れ間の鉄筋の平均ひずみが小さくなり、コンクリート表面の弾性ひずみが大きくなること、コンクリー

ト表面の塑性残留ひずみ大きいこと、ケミカルプレストレスの解放によるコンクリートの戻り変形などによって、ひび割れ幅が小さくなると考えられる。

7章では、RC部材の終局変形性能に収縮・膨張が及ぼす影響を検討した。養生条件が悪い場合でも、膨張材を添加することによって、十分な養生を施した場合と同程度の変形性能を確保することができた。また、自己充填コンクリートのように、自己収縮が卓越する場合においても、膨張材を添加することによって変形性能が改善された。

自己充填コンクリートに膨張材を添加した場合は、ひび割れ発生後の追加膨張が構造性能をさらに改善することが分かった。

本研究では、ケミカルプレストレスト部材がひび割れ発生までに示す非線形挙動と大きな変形能力の機構解明を通じて、膨張コンクリートに特徴的な性状を把握することができたと考えている。また、ひび割れ発生以降も、特に曲げ部材において膨張コンクリートの効果が著しく発現することを示し、その機構を説明した。膨張コンクリートにおけるスターラップ、型枠、鋼材などによる拘束の効果も明らかにできたと考えている。