

氏名（本籍）	安藤 重裕（千葉県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第199号
学位授与の日付	平成29年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	無機系注入式あと施工アンカー材の接着特性に関する実験的研究
論文審査委員	(主査) 教授 中野 克彦 (副査) 教授 田村 和夫 教授 山田 丈富 教授 藤井 賢志 芝浦工業大学 准教授 濱崎 仁

## 学位論文の要旨

### 無機系注入式あと施工アンカー材の接着特性に関する実験的研究

接着系あと施工アンカーには、エポキシ樹脂やエポキシアクリレート樹脂等の有機系アンカーが多く使用されているが、耐熱性、耐アルカリ性等の耐久性の点からは、有機系材料より無機系材料の方が好ましいと考えられる。しかし、無機系あと施工アンカーの歴史は浅く、その特性において不明な点も多い。その特性を把握するためには、接着メカニズムを明らかにする必要がある。また、2012年12月に発生した笹子トンネル天井板崩落事故により、接着系あと施工アンカーの耐久性の評価が急務となっており、クリープ性能に対する評価手法の確立が望まれている。

そこで、本研究では、無機系注入式あと施工アンカーに関して、無機系アンカー材の材料物性値がアンカーの付着性能に及ぼす影響を調べ、無機系アンカーの一つである超速硬セメント系注入式あと施工アンカー材の接着特性と長期持続荷重下における性能について、実験的に検討し、無機系あと施工アンカーの付着メカニズムの解明およびあと施工アンカーの長期持続荷重下における性能の試験方法、評価手法の確立を目的とした。

無機系あと施工アンカーの材の接着特性を調べるため、アンカー材の材料配合を変化させて、材料強度の影響、膨張材の影響、乾燥収縮率の影響、保水性能の影響について、付着強度との関係を検討した。アンカー材の付着性能について、アンカー材の保水性能とアンカー筋の引抜き付着強度に相関性があることを明らかにし、コンクリート-アンカー材界面に形成される脆弱層が、付着強度に大きく関係することを解明した。また、アンカー材に膨張性能を保有させることにより、コンクリート-アンカー材界面に脆弱層が形成された場合でも脆弱層を低減させる効果により、付着強度は、膨張性能を有しないものより高くなるものの、アンカー材の保水能力が低い場合には、付着強度のばらつきは大きいことを示した。これらのことから、無機系注入式あと施工アンカー材の評

価基準の試験項目として、保水率試験が必要であることを提示した。

無機系注入式あと施工アンカーで主流となっている超速硬セメント系注入式あと施工アンカーについて、材料の基本物性値を把握し、アンカー材としての付着力の検証を行った。超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着強度は、コンクリート強度  $20\sim 50\text{N/mm}^2$  の範囲において、あと施工アンカーの設計において使用される基本平均付着強度 ( $\tau_{bavg}=10\sqrt{\sigma_B/21}$ ) の 1.6 倍以上であった。また、上向き、横向き、下向きの施工方向の違いについて、施工方向による付着強度に差は認められず、付着強度は約  $27\text{N/mm}^2$  以上であり、変動係数は 5%以下と小さなものであった。

あと施工アンカーの長期持続荷による影響を調べるために、ばね式クリープ試験装置を新たに製作し、その装置を用いて長期持続荷重が注入式あと施工アンカーのクリープ現象へ及ぼす各種要因について検討した。

製作したクリープ試験装置の検証では、載荷開始前から目標載荷荷重到達時までの荷重変位曲線は引張強度試験とほぼ同等であり、更に長期持続載荷試験において、クリープ変形量と回復クリープ量が同等であることが確認され、これまであと施工アンカーでは測定されてこなかった回復クリープの測定を可能とした。

長期持続荷重によるアンカー筋の拔出し量は、コンクリート強度の影響を大きく受け、載荷荷重比 50%において、母材コンクリート強度  $24\text{N/mm}^2$  のアンカー筋の拔出し量は、 $46\text{N/mm}^2$  のコンクリートの 2 倍程度であることを示し、コンクリート強度が大きくなるにともない、クリープ速度は小さくなることを明らかにした。

クリープ破壊直前の変位は、いずれの試験体においても付着強度試験の最大耐力時の変位より大きくなり、そのクリープ破壊時の変位は、クリープ破壊に至る時間が長いほど、増大する傾向が判明し、弾性ひずみにクリープひずみ加わるためと推測された。

鉄筋径の違いによるクリープ挙動への影響について、載荷荷重比の増加量に対する変位の増加割合は、鉄筋径によらず同等であることが確認された。しかし、載荷荷重があと施工アンカーのクリープ変形の絶対量に影響を与えることが判明し、載荷荷重比が同一であっても、クリープ変形量は鉄筋径が大きいものの方が大きくなった。このことから、載荷荷重比と載荷荷重の両者を考慮する上で必要があることを示した。

載荷荷重比によるクリープ挙動の検討から、クリープ破壊が生じない限界の荷重であるクリープ限度は、無機系あと施工アンカーでは載荷荷重比 0.6~0.7 程度、有機系あと施工アンカーのクリープ限度は載荷荷重比 0.5 程度であることを明らかにした。

実験により得られたクリープ曲線とクリープ破壊線図から、長期におけるクリープ変形量の推定方法を検証した。クリープ曲線から長期のクリープ変形量を予測する場合、クリープ曲線の推定に適用する推定式は、有機系アンカーでは EOTA ETAG 001 Part5 で適用されている指数関数が、無機系アンカーでは JIS A1157 のコンクリートの圧縮クリープで適用されている対数関数を適用した場合に、クリープ破壊線図とクリープ曲線からの推定式が同等になることを突き止め、クリープ曲線からの長期の変位推定に適用する推定式を提案した。

これらの結果より、クリープ限度の推定とクリープ曲線からの長期における変形量推定を組み合わせたクリープ評価方法の検証を行い、この評価方法により有機系あと施工アンカーおよび無機系あと施工アンカーのクリープ評価が可能であることを示した。

以上のように本論文では、これまで提示されていなかった無機系注入式あと施工アンカーの付着メカニズムを明示し、あと施工アンカーの長期持続荷重下における各種要因がクリープ変形量に与える影響を把握し、あと施工アンカーのクリープ評価方法を新たに提示した。

## 審査結果の要旨

接着系あと施工アンカーには、エポキシ樹脂やエポキシアクリレート樹脂等の有機系アンカーが多く使用されているが、耐熱性、耐アルカリ性等の耐久性の点からは、有機系材料より無機系材料の方が好ましいと考えられる。しかし、無機系あと施工アンカーの開発に関する歴史は浅く、その特性については不明な点が多い。その特性を把握するためには、接着メカニズムを明らかにする必要がある。

また、2012年12月に発生した笹子トンネル天井板崩落事故により、接着系あと施工アンカーの耐久性の評価が急務となっており、クリープ性能に対する評価手法の確立が望まれている。

本論文では、無機系注入式あと施工アンカー（以下、無機系アンカー）に関して、無機系アンカーを構成するアンカー材の材料物性値が、アンカーの付着性能に及ぼす影響を調べ、無機系アンカーとしての最適な品質を確保できる超速硬セメント系無機系アンカーを提案している。この無機系アンカーに関して、多くのパラメータによる実験を行い、実験結果を検討することにより、提案した無機系アンカーの接着メカニズムを解明している。さらに、あと施工アンカーの長期持続荷重下におけるクリープ性能の試験方法および評価手法を提案している。

本論文は、全5章で構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景、本研究に関連する既往の研究、研究の範囲を論じながら、本研究の目的と位置付けを示している。

第2章「無機系注入式あと施工アンカーの付着メカニズム」では、アンカー材の材料配合を変化させて、膨張剤の影響、乾燥収縮率の影響、保水性能の影響を確認している。結果として、コンクリートとアンカー材の界面に形成される脆弱層が付着強度に大きく関係し、この脆弱層とアンカー材の膨張率、乾燥収縮率および保水率と付着強度との関連性を明らかにし、アンカー材の付着性能に必要な物性の条件は圧縮強度と保水率であることを示し、その基準値を提示している。

第3章「超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの開発」では、自らが開発した超速硬セメント系注入式アンカー（以下、超速硬系アンカー）について、材料の基本物性値を示し、アンカー材としての付着強度の検証を行っている。結果として、超速硬系アンカーは第2章で示した材料の基準値を満たしている。付着強度は、施工に関するばらつきを考慮しても、基本となる付着強度の値を適切な安全率を有して確保できることを示している。

第4章「超速硬セメント系注入式アンカーの長期持続荷重に関する評価」では、ばね式クリープ試験装置を製作し、クリープ性能に関する試験方法と評価方法を提案している。アンカー材の種類、載荷荷重比、コンクリート強度、アンカー筋径を要因としたクリープ試験を、提案したばね式クリープ試験装置により実施し、測定値の信頼性を検証している。これらの実験よ

り得られたクリープ曲線とクリープ破壊線図から、クリープ限度推定とクリープ曲線からの長期における変形量推定を組合せたクリープ評価方法を提示している。

第5章「結論」では、本論文の各章で得られた結果を総括している。

本論文は、上述の通り、無機系アンカー材の接着特性について、初めて接着メカニズムと長期持続荷重下におけるクリープ性能という観点から研究したものである。また、この結果を用いて実用的な無機系アンカーの付着性能評価へと展開できる具体的な評価方法も提案されている、工学的価値の高い研究である。

以上のことから、学位申請者である安藤重裕は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。

以上