

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	岩盤および土砂地盤に対する現場実験に基づくアンカー体の長さとお外径が引抜き抵抗に及ぼす影響に関する研究
--------	---

氏 名	小松 晃二
-----	-------

グラウンドアンカー工法（以下、アンカーという）は、地すべり・斜面崩壊抑止、構造物の転倒・浮上り防止、土留め壁の安定などに多用されている。欧州で開発されたこの工法はわが国に導入されて 60 年以上が経ち、設計・施工基準類も整備され、その基準類は 10 年を目安に改訂が行われている。このように、アンカーは既に多くの施工実績が積み上げられ、設計・施工方法が確立されている工法であるが、根本的な問題であるアンカー体の極限引抜き力、アンカー体の長さとお外径の影響などは未解決のままである。

本研究では、アンカー体引抜きメカニズムの解明を目的として、実際に 2 箇所の現場において引抜き実験を着想・実施した。兵庫県で実施した N 値 14 の沖積砂礫地盤および CL～CM 級相当の軟岩地盤での引抜き実験では、アンカー体を引抜くために地盤工学会基準や建築学会指針などで規定されている設計下限値の 3.0 m 以下にアンカー体を短くして、アンカー体の長さとお外径を変化させて引抜き抵抗への影響を調査した。さらに、CL～CM 級相当の軟岩地盤では、アンカー体の中の PC 鋼材にひずみゲージを貼付けて、荷重とおひずみの関係から荷重の増減に伴うアンカー体の摩擦応力の分布とお応力伝達長の変化について調べた。

宮崎県の D 級相当の破碎頁岩地盤では、設計上限値である 10.0 m を超える 15.0 m のアンカー体による引抜き実験を行った。アンカー体の中の PC 鋼材にひずみゲージを貼付けて、荷重の増減を繰り返しながら載荷を行い、アンカー体における摩擦応力の分布とお応力伝達長の変化について調べた。

上記の短いアンカー体とお長いアンカー体での実験結果および既往の研究報告をもとに、アンカー体の長さとお外径が引抜き抵抗に及ぼす影響、アンカー体における応力分布の変化、有効な応力伝達長およびアンカー体引抜きメカニズムについて考察した。

実務におけるアンカー体の計算式は、アンカー体の長さとお外径が引抜き抵抗とお正比例関係にあることを前提としている。しかし、荷重の導入・増加に伴ってアンカー体に生じる摩擦応力はアンカー体全長に均等に作用せず、有効な応力伝達長にも制限があることから、アンカー体の長さおよび外径とお引抜き抵抗とおの間にお必ずしも線形関係が成り立つとは限らない。さらに、摩擦応力の分布および応力伝達長は対象となる地盤によって様々に変化することが、既往の研究および本研究での現場実験により示された。

1995 年に Littlejohn は、アンカー体の弾性係数が地盤の弾性係数の 10 倍より大きい場合に摩擦応力はアンカー体に沿って均一に分布すると指摘している。地盤の弾性係数が大きくなるにしたがって、摩擦抵抗が発揮される範囲が狭くなり、岩盤の弾性係数がアンカー体の弾性係数よりも大きくなると、摩擦応力の集中が顕著になり、摩擦抵抗が発揮される範囲はさらに狭くなることが既往の研究により示されている。D 級相当の破碎頁岩で実施した現場実験では、アンカー体長を 15.0 m まで長くしたが、アンカー体でクリープ破壊が生じた 650 kN 載荷時において、自由長とお境界から 2.0 m の範囲でお全荷重の 60% 余、自由長とお境界から 6.0 m の範囲でお全荷重の 94% を負担しており、10.0 m を超える部分には応力が伝達していないことが確認された。上記より、アンカー体の長さとお引抜き抵抗にお線形関係が成り立たないことが明白となった。

Ostermayer は 1974 年ロンドン会議において、約 300 例のアンカーの現場試験から得られた結果をもとに、アンカー体の引抜き抵抗にアンカー体径 (100~150 mm) の影響はほとんどみられないことを指摘している。本研究における現場実験では、N 値 14 の沖積砂礫地盤で、90 mm, 115 mm, 135 mm の 3 種類のアンカー体の外径と引抜き抵抗力が線形関係にあることは確認できたが、CL~CM 級相当の軟岩地盤では、アンカー体径 115 mm が 135 mm よりも大きな引抜き抵抗力を示し、アンカー体の外径と引抜き抵抗力が線形関係はみられなかった。アンカー体の外径と引抜き抵抗力には、アンカー体の長さも影響して線形関係が示されないことが推定された。

アンカー力を長期間維持するには、地盤に対するアンカー体の摩擦抵抗による負荷を抑制すべきであり、アンカー体の設計に用いる周面摩擦応力度の過大な評価に問題があることを指摘し、現場実験によりアンカー体の引抜け挙動を明らかにしたうえで、新たに塑性変位の増加率を用いた設計方法を提案した。これは、塑性変位の増加率が急増する荷重をもとに設計周面摩擦応力度を決定する方法であり、従来の設計方法よりも安全側になるが、塑性変位の増加率の急増時点で既に最大周面摩擦応力度の作用位置が自由長との境界付近からアンカー体先端方向へ移動していることが現場実験で確認されており、過剰設計ではないと考えた。

本研究での現場実験結果から、過大な荷重の作用によるアンカー体の伸張による細径化あるいは引張り破壊が周面摩擦抵抗の低下を引き起こすメカニズムを考察し、岩盤の強度が大きくなると岩盤側ではなく、アンカー体の変形あるいは破壊により引抜き抵抗力が決定されることを説明した。さらに、アンカー体の変形あるいは破壊は、アンカー体グラウトの強度だけではなくアンカー体径、アンカー体に占めるグラウト断面積の大小および PC 鋼材外縁から削孔孔壁までの間隔に影響されることを指摘した。

これらの現場実験結果および既往の研究報告をもとに、多くのアンカー引抜き試験等のデータ解析、研究を積み重ねることにより、アンカー力の大きさ、アンカー体設置地盤の種類、性状、強度に対して最適なアンカー体の長さとお外径を設計する方法の確立が今後の課題と結論付けた。

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 0765 号	氏名	小松 晃二
最終試験担当者	主 査 鈴木 素之 審査委員 進士 正人 審査委員 中田 幸男 審査委員 中島 伸一郎 審査委員 渡邊 学歩 審査委員 兵動 正幸		
【論文題目】			
岩盤および土砂地盤に対する現場実験に基づくアンカー体の長さおよび外径が引抜き抵抗に及ぼす影響に関する研究 (Study on effects of length and outer diameter of anchor body on pull-out resistance for rock and soil ground using field experiments)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>グラウンドアンカー工法（以下、アンカーと称す）は、地すべりや斜面崩壊抑止などに多用され、近年頻発している自然災害に対する防災・減災において重要な工法である。欧州で開発されたこの工法は我が国に導入されてから60年以上経過し、設計・施工方法が確立され、施工実績が積み上げられている。しかしながら、アンカー体の極限引抜き力、アンカー体の長さおよび外径が引抜き抵抗に及ぼす影響など根本的な技術課題が未解決のままである。</p> <p>申請者は、アンカー体引抜けメカニズムの解明を目的として、兵庫県と宮崎県の2箇所の現場において鉛直に打設したアンカーの実物大現場引抜き実験を着想・実施した。引抜き実験結果および既往の研究をもとに、アンカー体の長さおよび外径が引抜き抵抗に及ぼす影響、アンカー体における応力分布の変化、有効な応力伝達長およびアンカー体の引抜け挙動を明らかにしたうえで、現行設計方法の問題点を指摘した。</p> <p>また、供用中アンカーの残存引張り力の低下が多く現場から報告されていることから、アンカー体の設計に極限周面摩擦応力度を用いていることに問題があると考え、現場実験によりアンカー体の引抜け挙動を明らかにしたうえで、アンカーの残存引張り力を長期間維持するために、塑性変位の増加率の変動から求まる設計周面摩擦応力度を用いた設計方法を提案するに至った。学位論文では、得られた成果を以下の6章にとりまとめている。</p> <p>第1章では、アンカーの現状と課題、特にアンカー体の計算方法に関する問題点を指摘したうえで、本研究の背景および目的を述べている。また、本論文の構成と本論文で使用するアンカーの専門用語について解説している。</p> <p>第2章では、アンカーの発展経緯と引抜き抵抗を發揮する原理について説明している。また、本研究に関係する既往の研究の要約と整理をソイルアンカーとロックアンカーに大別して示している。</p> <p>第3章では、短いアンカーの引抜き実験結果を説明し、考察を述べている。この引抜き実験は、N値14の沖積砂礫地盤とCL～CM級相当の軟岩地盤で行い、アンカー体を引抜くために設計下限値3.0m以下にアンカー体を短くし、その範囲でアンカー体の長さおよび外径を変化させて引抜き抵抗への影響を調べている。また、新しい指標となる塑性変位の増加率が砂礫地盤と軟岩地盤で大きく異なることを示している。さらに、CL～CM級相当の軟岩地盤では、アンカー体の中のPC鋼材にひずみゲージを貼付けて、荷重の増加に伴う短いアンカー体の摩擦応力の分布と応力伝達長の変化についても調査し、その実験結果について考察している。</p> <p>第4章では、長いアンカーの引抜き実験結果を説明し、考察を述べている。この引抜き実験は、D級相</p>			

当の破砕頁岩地盤で設計上限値 10.0m を超える 15.0m のアンカー体により行い、アンカー体の中の PC 鋼材にひずみゲージを貼付けて、荷重の増加に伴う長いアンカー体の摩擦応力の分布と応力伝達長について調べ、自由長との境界から 2m の範囲に応力が集中していること、10m を超える部分には応力が伝達されていないことを明らかにしている。また、650kN 載荷で 700 分間のクリープ試験を行った結果、載荷から 5 時間以上経過後に塑性変位量の急増がみられ、アンカー定着後のクリープ破壊の危険性を指摘している。

第 5 章では、上記 2 箇所の現場引抜き実験結果と既往の研究をもとに、アンカー体の長さ・径と引抜き抵抗力の間に線形関係が成り立たないことを指摘している。また、アンカー力の増加に伴うアンカー体の微小な横ひずみによる引抜き抵抗力の低下可能性を推定し、ロックアンカーではアンカー体の径が大きくなると引抜き抵抗が低下する可能性があることを示している。アンカー体の引抜け挙動の差異はアンカー体と地盤の相対的な力学特性の差異に起因するとして、そのメカニズムについて考察している。

第 6 章では各章の結論を総括し、現行のアンカー設計方法の問題点を明らかにしたうえで、本研究成果のアンカー設計方法への反映と今後の課題について言及している。

公聴会における主な質問項目は、1) 実工事で充填されるグラウトの影響、2) 緊張力低下メカニズムとその管理手法、3) 長さ5m以上のアンカーの荷重伝達、4) アンカー体の設置地盤の評価、5) 周面摩擦応力度の算出などに関するものであり、いずれの質問に対しても申請者からの確かかつ十分な答弁がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、新規性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである（関連論文：計2編）。

- 1) 小松晃二，兵動正幸，鈴木素之：グラウンドアンカーの引抜き耐力に関する現場実験に基づく検討，地盤と建設，Vol.35，No.1，pp.63-76，2017.
- 2) 小松晃二，兵動正幸，鈴木素之：岩盤を対象としたアンカー体の長さとお径が引抜き抵抗力に及ぼす影響とその支持機構，土木学会論文集，Vol.74，No.4，pp.469-487，2018.