

学 位 論 文 題 名

軟弱地盤における山留め工の挙動に関する研究

学位論文内容の要旨

安全でしかも経済的な山留め掘削技術の確立は、地下空間の有効利用および基礎構造物の合理的な施工に不可欠である。わが国の大都市の多くの臨海部では、軟弱な粘性土が厚く堆積しており、この軟弱地盤対策は臨海部の開発において大きな技術課題となっている。山留め掘削もその例外ではなく、工事中に過大な変形が生じて掘削を中断したり、山留め工が崩壊した例が未だ数多く報告されている。

本論文では、東京国際空港沖合展開工事で施工された、2つのタイプの山留め工を事例として取り上げた。その1つは、掘削深さが11m前後と比較的浅いため、根入れ部の地盤改良を行わない山留め工である。もう1つは、掘削深さが15mから20mにおよぶため、根入れ部を深層混合処理（DM）工法で改良した山留め工である。これらの事例の一部の工区で、施工中に山留め壁の変位が大きくなったり、中間杭の浮き上がりが生じたりしたため、掘削を中断して対策工を施した。

本研究では、これらの山留め工で計測されたデータにもとづき、軟弱な地盤における山留め工の挙動を明らかにするとともに、地盤を弾塑性体とした有限要素法（FEM）による解析を行い、現行の設計法に種々の観点から考察を加え、これらの結果を用いて、異常な挙動を示した原因を追求し、軟弱な地盤における山留め工の設計および施工時の留意点を明らかにしている。

本論文は七章より成っている。各章を要約すると以下のようなものである。

第1章では、まず研究の目的と意義を述べ、山留め工が通常の土木構造物に比べて異なる点について述べ、さらに、研究方針と論文の構成を示している。

第2章では、対象を軟弱地盤に限定して、わが国で現在用いられている山留め工の設計法についてまとめている。現行の設計法における主要な検討項目は、1）土圧のつりあい、2）掘削底面の安定、3）山留め壁の曲げモーメントと切梁軸力の検討であり、3）においては、地盤を水平バネに置き換える地盤バネ法が標準的な設計手法となっていることを説明している。

第3章では、根入れ部を地盤改良していないアクセス道路の山留め工の事例を取り上げている。

この山留め工の大きな特徴は、軟弱地盤が厚く堆積しているため、山留め壁の下端が支持層に到達していないことである。

山留め壁の変位が大きくなり工事を中断した工区は、いずれも軟弱層の上部にあった砂層が掘削された工区で、また変形が大きくなった時点は、この砂層の掘削が終了した時と一致する。計測結果から、掘削底面にあたる深度では、掘削側の土圧が一軸圧縮強度 q_u から求めた Rankine の受働土圧より小さな値しか発揮されなかったことが明らかにされた。このため、山留め壁が掘削側に大きく変形し、これに伴い中間杭が浮き上がったとしている。

第4章では、根入れ部を DM 工法によって改良した山留め工を解析の対象としている。この山留め工の中で、異常な挙動が観測され工事を中断した工区と、中断することなく最終掘削を終了した工区があった。これらの違いが生じた原因を、計測結果と現行の設計法に照らし合わせて検討している。

工事を中断した直接の原因は、中間杭の異常な浮き上がりで、中間杭の浮き上がりの形状は、中央部の浮き上がり量が大きく周辺に近づくにつれ小さくなる弓状であった。一方、対策工なしで掘削を終了した山留め工では、中間杭の浮き上がり量自体も小さく、また中間杭が全体に浮き上がる形態を示した。改良地盤の下端の原地盤の強度で定義される安定数 N_f で比較すると、工事を中断しなかった工区の N_f は4.19であるのに対し、中断した工区では5.73から6.17とかなり大きく、この N_f の値は、根入れ部を DM 改良した山留め工の安定性を検討する上で重要な指標であるとしている。この値の有効性は、次の第5章で実施した FEM 解析によっても確認された。

第5章では、地盤を弾塑性体とした FEM 解析を行い、その結果を現行の設計法と比較した。その結果、FEM 解析と地盤バネ法による予測値を実測値と比較すると、FEM 解析による方がよりの確に山留め工の挙動を表現できることを明らかにしている。

DM 工法で改良された地盤は改良土の強度が大きくばらつくこと、また未改良土を内在しているため、強度の設定が難しいが、FEM 解析あるいは地盤バネ法による計算結果によれば、この強度の設定が山留め壁の曲げモーメントや切梁軸力の値に及ぼす影響は小さいことを指摘している。

第6章では、山留め掘削における地盤のせん断強度の設定方法について、在来の文献によって検討している。また、事例として取り挙げた山留め工に過大な変形が生じた原因について、土のせん断強度の設定方法の観点から、盛土の場合と比較しながら考察を行っている。

盛土と比べて山留め掘削の安定性の検討において大きく異なる点は、1)全応力解析の適用性、

2) 強度の異方性, 3) 許容できる変形の大きさである。全応力解析を適用すると、盛土では平均主応力の増大による強度増加を無視することになるので安全側の答が得られるのに対し、掘削の場合には平均主応力が減少し膨張による強度低下が生じるため、全応力解析は危険側の答を与えることになる。また、盛土の場合には地盤の大部分の応力状態は圧縮となるが、山留め掘削では伸張状態とする。このような問題に注目して行なった根入れ部の粘性土を対象とした土質試験の結果によれば、三軸伸張強度は q_u の 75% 程度になり、 q_u の代わりに三軸伸張強度を用いて計算した受働土圧は、アクセス道路の山留め工で計測された掘削側の土圧と一致するという設計上重要な知見を得ている。

第 7 章は本論文の結論で、一連の研究成果をとりまとめている。

すなわち q_u を用いて Rankine 土圧によって粘性土地盤の受働土圧を求めると、実際に発揮する受働抵抗力を過大に評価する。このため、受働土圧の算定に当たっては三軸伸張試験の結果を用いるか、あるいは q_u によって計算する場合には、その値を低減させる必要がある。また、根入れ部を深層混合処理工法で地盤改良する山留め工では、今回の事例で観測された挙動、あるいは FEM による数値解析から、改良部下端の原地盤強度で定義された安定数 N_f の値が、山留め工の安定性を検討する上で重要な指標となることが明らかにされた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	土岐祥介
副査	教授	角田與史雄
副査	教授	三田地利之
副査	教授	小幡守

本論文は、施工現場から得たデータと地盤を弾塑性体とした有限要素法 (FEM) 解析から、軟弱な粘性土地盤における山留め工の挙動を明らかにするとともに、その合理的設計方法を提案して成果を挙げたものである。

第 1 章では、山留め工が通常の土木構造物に比べて異なる点と、研究の目的を述べている。

第 2 章では、わが国で現在用いられている軟弱粘性土地盤の山留め工の設計方法について総括している。主要な検討項目は、1) 土圧のつりあい、2) 掘削底面の安定、3) 山留め壁の曲げ

モーメントと切梁軸力の検討であり、3)においては、地盤を水平バネに置き換える地盤バネ法が標準的な設計手法となっていることを説明しているほか、情報化施工による次段階予測手法について述べている。

第3章では、本研究で事例として取り上げている、東京国際空港沖合展開工事で施工されたアクセス道路の山留め工について説明している。この大きな特徴は、軟弱地盤が厚く堆積しているため、山留め壁下端が支持層に到達していないことで、一部の工区で、山留め壁の変位が大きくなり工事を中断した。計測結果から、掘削底面の深度では、掘削側の土圧が一軸圧縮強度 q_u から求めた Rankine の受働土圧より小さな値しか発揮しなかったことが明らかにされた。このため山留め壁が掘削側に大きく変形し、これに伴い中間杭が浮き上がったと推論し、その原因を明らかにしている。

第4章では、根入れ部を深層混合処理 (DM) 工法によって改良した山留め工を解析の対象としている。この山留め工の中で、異常な挙動が観測され工事を中断した工区と、中断することなく最終掘削を終了した工区とがあった。この違いが生じた原因を、計測結果と現行の設計法に照らし合わせて検討している。

工事を中断した直接の原因は、中間杭の異常な浮き上がりであった。改良地盤の下端の原地盤の強度で定義される安定数 N_f で比較すると、工事を中断しなかった工区の N_f は4.19であるのに対し、中断した工区では5.73から6.17とかなり大きく、この N_f の値は、根入れ部を DM 改良した山留め工の安定性を検討する上で重要な指標であるとしている。この値の有効性は、FEM 解析によっても確認されている。

第5章では、地盤を弾塑性体として FEM 解析を行い、その結果を現行の設計法と比較している。FEM 解析と地盤バネ法による予測値を実測値と比較すると、FEM 解析による方が的確に山留め工の挙動を表現できることを明らかにしている。

第6章では、山留め工に過大な変形が生じた原因について、土のせん断強度の設定方法の観点から、盛土の場合と比較しながら考察を行っている。盛土と比べて山留め掘削の安定性の検討において大きく異なる点は、1) 全応力解析の適用性、2) 強度の異方性、3) 許容できる変形の大きさである。全応力解析を適用すると、盛土では平均主応力の増大による強度増加を無視することになるため安全側の答が得られるのに対し、掘削の場合には平均主応力が減少するため膨張による強度低下が生じ、全応力解析は危険側の答を与えることになる。また、盛土の場合には地盤の大部分の応力状態は圧縮状態となるが、山留め掘削では伸張状態となる。

このような問題に注目して行なった根入れ部の粘性土を対象とした土質試験の結果によれば、

三軸伸張強度は q_u の75%程度になり, q_u の代わりに三軸伸張強度を用いて計算した受働土圧は, アクセス道路の山留め工で計測された掘削側の土圧と一致するという設計上重要な知見を得ている。

第7章では, 各章で得られた主な結論を要約している。

以上を要するに, 本論文は, 最近開発が著しい沿岸域の軟弱地盤における山留め工の挙動の解明に極めて有用な知見を与えるもので, 安全で経済性の高い設計法の確立に寄与するところ大である。

よって著者は博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。