

論文の内容の要旨

氏名：實 松 俊 明

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：施工過程を考慮した逐次計算に基づく山留め解析法とその適用性に関する研究

根切り時における山留め壁の応力・変位の計算には、簡便さと実用性から山留め壁を梁、地盤の抵抗をばねとして扱う「梁・ばねモデル（弾塑性法）」が広く用いられている。一般的な「梁・ばねモデル（弾塑性法）」は、外力（荷重）となる側圧が山留め壁背面側から作用し、根切り底以深の掘削側地盤がそれに抵抗する考え方（以下、全載荷法とする）に基づいて、施工段階毎に単独に力の釣り合いを解くもので、多くの指針・規準類に採用されている。一方、全載荷法は各施工段階の解析を独立に行うため、施工の連続性（施工過程）が直接考慮されないこと、および施工中に地盤や山留め壁の剛性が高くなるケースへの対応が難しい等の課題があり、各掘削段階で開放される掘削側の側圧を増分荷重として、それに対する増分応力・変位を算出し、順次累加する逐次計算による山留め解析法が提案されている。

近年、都市部の建替え工事および鉄道や高速道路等との近接工事の増加に伴い、山留め壁の応力だけでなく変位についても高い予測精度が求められており、山留め壁に作用する側圧（土圧＋水圧）の適切な評価が重要である。山留め壁の背面側側圧については、実測値に基づく多くの研究が行われており、背面側側圧は掘削による山留め変位に伴い変化することが確認されている。しかし、山留め壁の掘削側根入れ部のみに地盤ばねを配置する従来の梁・ばねモデル（弾塑性法）では、これらの側圧挙動やプレロード等により山留め壁が戻る際の背面側側圧の増加の影響を直接評価することは難しい。

このような背景のもと、施工時の山留め挙動をできるだけ再現する試みとして、山留め壁の両面に地盤ばねを配して背面側側圧の変化を直接評価すると共に、施工過程（施工の連続性）を考慮した逐次計算に基づく山留め解析法（以下、両面ばね法とする）が提案されている。しかし、両面ばね法は逐次計算法であるため、掘削前の初期側圧の設定や掘削直後に床付け以深の地盤に残留する側圧（平衡側圧）の扱いなど、従来の全載荷法に基づく梁・ばねモデル（弾塑性法）とは異なる考え方やパラメータが必要となる。平衡側圧については、実測値や要素実験、模型実験に基づく検討が行われており、一般的な梁・ばねモデル（弾塑性法）における平衡側圧の評価法に採用されている。しかし、これらの検討は掘削による土被り圧減少に伴う静止土圧・側圧の変化を対象にしたもので、逐次計算で必要な、掘削中に地盤反力が発生した状態からの土被り圧減少に伴う土圧・側圧変化について検討した例は見当たらない。また、土圧－変位関係モデル、パラメータの設定法および解析法の適用性に関する検討例も少なく不明な点が多い。

そこで本研究では、施工過程および背面側側圧の変化を考慮した逐次計算に基づく山留め解析法（両面ばね法）について、まず種々の応力状態から掘削除荷した時の土圧変化を把握するため室内要素実験を実施した。次に、室内要素実験や実測側圧の分析結果に基づき土圧変化モデルを構築し、側圧が実測されている鉄筋コンクリート地中連続壁の事例解析により土圧変化モデルの検証を行った。また、ソイルセメント壁を対象にした複数事例のシミュレーション解析を行い、解析モデルに適したパラメータの設定法を提案すると共に、従来の全載荷法に基づく梁・ばねモデル（弾塑性法）との相違を含め解析法の有効性について検討した。最後に、評価法が十分に確立されていない「控え杭形式のタイロッド山留め工法」の挙動解析に本解析法を適用し、実測値との比較を行った。

本論文は全7章で構成されている。

第1章「序論」では、各種の山留め解析法に関する既往の研究および特徴をまとめると共に、施工過程を考慮した逐次計算に基づく山留め解析法（両面ばね法）の課題を取りあげ、本研究の位置付け、目的および構成を説明している。

第2章「逐次計算による山留め解析法」では、両面ばね法の概要について述べている。現在広く用いられている従来の梁・ばねモデル（弾塑性法）との荷重や解析法等の考え方の相違について整理し、梁・ばねモデル（弾塑性法）では扱うことが難しいが、本解析法（両面ばね法）では直接考慮可能な地下工法の例として、「施工中に山留め壁の断面剛性が高くなる場合（免震ピットの擁壁部）」や「施工中に変位抑制対策のため掘削底面を地盤改良する場合」等を挙げている。

第3章「掘削除荷時の水平土圧変化に関する室内要素実験」では、両面ばね法による荷重評価に必要な

掘削除荷時の土圧変化（平衡土圧）を把握するために実施した、掘削を模擬した室内要素実験について述べている。実験装置には、鉛直応力と側方応力を独立して制御できるように改良した三軸試験装置を用い、豊浦砂およびカオリン粘土（MC クレー）を対象に、種々の応力状態から側方ひずみを生じさせない条件で鉛直応力を除荷させた時の側方応力の変化について検討している。また、供試体の側方ひずみを高い精度で測定するために、三軸試験装置は2重セル方式としている。実験により得られた鉛直応力の除荷時における側方応力の挙動は、砂では除荷開始時の土圧係数が大きくなるに従って側方応力の残留割合が小さくなるが、全体的には粘性土も含めて側方応力が残留しながら徐々に減少する傾向を明らかにしている。

第4章「解析モデルの提案と検証」では、3章に示した室内要素実験結果および過去に実施した実測側圧の分析結果に基づいて、本解析法（両面ばね法）に用いる土圧－変位関係モデルおよび掘削除荷時の土圧変化モデルを提案している。土圧－変位関係は履歴を考慮したバイリニアモデルとし、掘削除荷に伴う土圧変化モデルは室内要素実験で得られた側圧の残留を考慮した関係を用いている。これらの解析モデルを検証するため、山留め変位と側圧が詳細に実測されている鉄筋コンクリート地中連続壁を対象に、山留め壁の挙動解析を行った。解析値と実測値を比較した結果、山留め壁の実測側圧および変位について概ね良い対応を示し、本モデルの妥当性が確認されている。

第5章「複数事例のシミュレーション解析による解析法の適用性検討」では、現在多く用いられているソイルセメント壁による山留め壁を対象に複数事例（8現場、14測点）のシミュレーション解析を行い、パラメータの設定法について提案している。検討事例は、根切り深さが約8m～20m、山留め架構が比較的単純で近接構造物等がなく、施工情報（掘削や支保工架設の時期・深さ）だけでなく土質試験により地盤情報が明確な現場としている。各種のパラメータのうち特に不明な点が多い掘削側側圧（最大値）の評価法を何通りか設定して、山留め変位・曲げモーメント、支保工反力の解析値と実測値を比較した結果、本解析モデルに適したパラメータ設定法（砂質土は掘削側側圧の最大値をクーロン式、粘性土はランキン・レザール式で評価）を提案している。また、従来の全載荷法に基づく梁・ばねモデル（弾塑性法）と比較して、実測値に対する解析値のばらつきが全体的に小さいことを確認し、本解析法の有効性を示している。

第6章「控え杭を用いたタイロッド山留め工法の挙動評価」では、本解析法の応用として、一般的な工法（切梁、地盤アンカー）ではなく評価法が十分に確立されていない「控え杭形式のタイロッド山留め工法（以下、タイロッド工法と呼ぶ）」に対する挙動評価法の提案を行っている。まず、タイロッド工法を採用した4現場において、山留め壁および控え杭の水平変位およびタイロッド軸力の計測を行い、控え杭の変位抑制効果について検討した。その結果、山留め壁と控え杭の離隔距離が短い場合には、山留め変位に伴う背面地盤変位の影響を考慮して変位抑制効果（控え杭の水平抵抗ばね）を適切に低減させる必要があることを示している。次に、山留め壁の変位が背面地盤に及ぼす影響（影響範囲と程度）を把握するため、山留め壁の背面地盤の水平変位を別途計測・収集（11現場、12断面）し、山留め変位と背面地盤の水平変位の関係について分析した。実測値の分析結果より、山留め壁から背面側に離れるに従って地盤の水平変位は減少し、変位の発生深度も浅くなる傾向がみられ、山留め変位を基に、背面側の任意の位置における地盤の水平変位を簡易に評価する手法を提案している。最後に、離隔距離が短い場合にも適用可能な、山留め壁の背面地盤変位の影響を考慮した両面ばね法によるタイロッド工法の挙動解析法を提案し、4現場における実測値との比較により、地盤定数や解析パラメータの設定法を含めた提案手法の有効性を確認している。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果や知見を総括した内容を示している。