

## 論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 安 達 俊 夫

（副査） 教授 岡 田 章

特任教授 神 田 順

建物の地下部分を構築する場合、山留め壁や支保工（切梁、地盤アンカー等）を用いて地盤を抑えながら掘削工事を行う。その際、事前に山留め解析によって工事の安全性に加え、周辺環境に有害な影響を与えないように進める必要がある。近年、都市部の建替え工事や鉄道等との近接施工の増加に伴い、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いる。山留め壁の変位の予測精度を高めるためには、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、掘削による山留め壁の変位に伴い変化することが確認されている。しかし、山留め壁の掘削側の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困難である。この梁・ばねモデルは外力（荷重）となる側圧が山留め壁の背面側から作用し、掘削側の根入れ部の地盤がそれに抵抗するという考え方に基づき、施工段階毎に単独に力の釣り合いを解く解析法である（以下、「全載荷法」と呼ぶ）。したがって、施工の連続性（施工過程）が直接考慮されないこと、および山留め壁の変位を抑えるために施工中に地盤改良を行う場合や山留め壁の断面性能が変化する場合への対応が難しい等の課題が挙げられている。

これらの課題に対して、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」と呼ぶ）が提案されている。しかし、両面ばね法は逐次計算に基づく手法であるため、従来の全載荷法に基づく梁・ばねモデルとは異なる考え方やパラメータの設定が必要となる。特に、申請者は掘削除荷時の水平土圧－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が少なく、不明な点も多いことを指摘している。

このような背景のもとで、本研究では両面ばね法による施工過程を考慮した逐次計算に基づく山留め解析法について、室内要素実験および複数事例の実測データを基に解析モデルおよびパラメータの設定法の一般化を提案し解析法の適用性を検討すると共に、控え杭形式のタイロッド山留め工法に本解析法を適用しその有効性を確認している。

本論文は、全7章より構成されている。

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概観し、本論文で提案する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）の課題を抽出し、本研究の位置付け、目的および構成を示している。

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示し、従来の梁・ばねモデルの荷重や解析法等の考え方との相違について整理している。特に従来の梁・ばねモデルでは扱うことが難しいが、本解析法（両面ばね法）では直接考慮が可能となる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」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）を把握するためのアプローチとして、掘削を模擬した独自の室内要素実験を実施している。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度合いが小さくなるが、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。本章で展開する室内要素実験によって土圧変化モデルを把握するアプローチは独創的であり評価できる。

第4章「解析モデルの提案と検証」では、第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おり、第3章と併せて本研究の中核を成す部分である。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解析を行っている。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ている。今後の課題として、バイリニアモデルを改良した非線形モデルによる土圧－変位モデルの高度化により山留め変位の小さい領域の予測精度の更なる向上が望まれる。

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のシミュレーション解析を行い、パラメータの設定法の一般化について検討している。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示し、個別事例ではなく複数事例での解析的検討に基づき本解析法の適用性およびパラメータ設定法の一般化の有効性を確認している。

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）」に対する解析法を提案している。まず、タイロッド工法を採用した現場において、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ている。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指摘している。次に、山留め壁の変位が背面地盤に及ぼす影響を把握するため、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ている。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を用いたタイロッド工法の新たな解析法を提案し、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、各章で得られた結果や知見を総括し、今後の課題を示している。

申請者の研究内容の独創性および新規性は以下の通りである。

- (1) 本解析法（両面ばね法）に必要な、任意の応力状態からの掘削除荷時の水平土圧変化は、これまでに実測側圧の分析や経験に基づいた評価法が提案されているが、本研究では掘削を模擬した室内要素実験に基づいて土圧変化モデルを提案した独創的な研究として高く評価できる。
- (2) 本研究では、複数事例のシミュレーション解析を行い、多数の実測値との比較により本解析法（両面ばね法）の適用性およびパラメータ設定法の一般化を検討し、それらの有効性を確認している。
- (3) 「控え杭形式のタイロッド山留め工法」は、控え杭と山留め壁の離隔距離が十分でない場合には、

山留め壁の変位抑制効果が低減するが、その評価法は十分に確立されていない。本研究では、山留め背面地盤の水平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解析法を新たに提案しており、新規性の高い研究として評価できる。

本論文の研究成果は、建物の掘削工事および近接施工における山留め解析に関する研究分野の進展に貢献し、建築基礎構造の発展に寄与するものと認められる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

平成28年2月18日