

氏名	犬伏 徹志		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博乙第55号		
学位授与の日付	2018年3月13日		
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当		
学位論文の題目	免震建物の擁壁衝突を模擬する簡易解析モデルの構築に関する研究		
論文審査委員	主査	神奈川大学	教授 荏本孝久
	副査	神奈川大学	名誉教授 大熊武司
	副査	神奈川大学	教授 岩田 衛
	副査	神奈川大学	教授 島崎和司
	副査	神奈川大学	教授 趙 衍剛
	副査	大阪大学	教授 宮本裕司

【論文内容の要旨】

本論文は、第1章「序論」、第2章「擁壁部水平抵抗の簡易評価法の提案」、第3章「弾性擁壁に対する簡易評価法の適用性」、第4章「弾塑性擁壁に対する簡易評価法の適用性」、第5章「免震建物モデルの擁壁衝突実験のシミュレーション解析」、第6章「擁壁衝突による免震部材の引張力の検討」、第7章「結論」という、七章構成となっている。

第1章「序論」では、前述したように現在の免震建物を取り巻く環境や技術的な課題など、本研究の社会的背景と目的について述べている。また、既往研究で示されている擁壁部水平抵抗評価法の概要や課題・問題点を整理し、本研究の位置付けを明確にするとともに、本論文の構成を示している。

第2章「擁壁部水平抵抗の簡易評価法の提案」では、本研究で提案する擁壁部水平抵抗の簡易評価法の手順について述べている。簡易評価法の概要は、擁壁を多質点系曲げせん断モデルと考え、擁壁背後地盤の抵抗を杭の応答評価に用いられる動的相互作用ばね(Vesicの提案式やGazetasらによる方法)の考え方を準用して、ばねとダッシュポットで表すものである。ばねに与える非線形特性は双曲線モデルとし、最大耐力はランキンの受働土圧から求める。ダッシュポットに与える減衰係数は、擁壁背後地盤および自由地盤の等価せん断波速度からそれぞれ求めた減衰係数を重み付け平均することで設定する。擁壁には地表面位置で擁壁厚さの3倍の範囲の擁壁背後地盤質量を付加質量として与える。また、本章では擁壁部水平抵抗の簡易評価法を用いた免震建物の擁壁衝突解析モデルも提示している。衝突解析モデルでは免震建物と擁壁の間に衝突を模擬するばねを配置するが、そのばねには擁壁との衝突面に直交する免震層直上大梁の軸剛性を考慮した剛性を与える点が特徴である。

第3章「弾性擁壁に対する簡易評価法の適用性」では、三次元FEM解析との比較により第2章で提案した擁壁部水平抵抗の簡易評価法の妥当性を検証している。本章では弾性擁壁を対象としてお

り、一様な砂質土地盤、10層RC造の基礎免震建物について三次元FEMによる免震建物―地盤連成系の地震応答解析を行い、免震建物が擁壁に衝突した時の建物応答や発生する衝撃力を評価している。そして、得られた衝撃力から検討用加振力を設定し、それをを用いて擁壁部水平抵抗特性を確認している。その結果、擁壁部水平抵抗特性（履歴ループ）は紡錘形となり、擁壁厚さによって履歴ループ面積が変化するなど、擁壁背後地盤が抵抗特性に与える影響が大きいことを明らかにしている。さらに、簡易評価法を用いて擁壁部水平抵抗特性を評価し、三次元有限要素法による解析結果と比較を行い、両者が良く対応することを示している。最後に、衝突解析モデルによる地震応答解析を行い、三次元FEMによる擁壁衝突解析結果と比較することで、その妥当性を確認している。

第4章「弾塑性擁壁に対する簡易評価法の適用性」では、弾塑性擁壁を対象として第3章と同様の検証を行っている。三次元FEM衝突解析により、擁壁に弾塑性特性を与えることで擁壁弾性時に比べて建物衝突応答や発生する衝撃力は小さくなり、擁壁耐力による建物応答値の差は1層（免震層直上）では同程度であるものの、上層になるほど大きくなることを明らかにしている。また、塑性化によって擁壁の変形は大きくなり、それに伴い背後地盤の変形も進展するため、付加質量として考慮する背後地盤の範囲が擁壁弾性時よりも広くなる。そこで、付加質量を考慮する範囲を弾性時の2倍とすることで、擁壁が弾塑性挙動を示す場合についても擁壁部水平抵抗の簡易評価法は適用可能であることを示している。なお、衝突解析モデルについても三次元FEM解析結果と良い対応を示している。

第5章「免震建物模型の擁壁衝突実験のシミュレーション解析」では、本研究で提示する衝突解析モデルを用いて、既往研究として大阪大学で実施された免震建物模型を用いた擁壁衝突実験のシミュレーション解析を行っている。実験で使用した建物模型は金属製の剛体、免震層はガイドレールと引張バネで復元力を再現している。擁壁材料はゴムチップを配合した複合改良地盤であり、本章ではその材料特性をノーマルトリニアでモデル化している。解析の結果、衝突回数をやや多く評価する傾向があるものの、得られた建物加速度応答値は実験結果と良く対応している。また、解析では衝突が発生するたびに最大応答変位が増大しており、材料特性のモデル化に課題があるものの、免震層全体の復元力特性は実験で得られた特性の傾向を概ね捉えている。特に衝突回数の少ないケースでは比較的良く対応しており、衝突解析モデルの有効性を確認している。

第6章「擁壁衝突による免震部材の引張力の検討」では、擁壁との衝突によって発生する免震建物のロッキング挙動による免震部材への引張力について、本研究で提示する衝突解析モデルを用いて解析的に検討している。ここでは免震部材に作用する引張力に着目している。発生する過大な引張力を低減・制御する方法として、免震部材の下フランジに板ばねを設け、それを曲げ降伏させることにより剛性の低減とエネルギー吸収を行う新たな制御機構を提案している。そして、既往の引抜き力低減機構を用いた場合の解析結果と比較することで、その有用性を示している。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果を総括している。

【論文審査の結果の要旨】

免震構造は、1995年の兵庫県南部地震を契機に高い耐震性能が評価され、地震後の建物機能維持や財産の保全の観点から集合住宅に、事業継続性の観点から事務所や生産施設、物流施設に普及してきた。さらに、現在では主要な病院や官公庁施設など地震災害時に重要な拠点となる建物にも免震構造が多く適用されてきている。大きな被害が発生した東北地方太平洋沖地震や熊本地震においても、いずれの免震建築物にも継続使用上の大きな支障は見られず、一定の免震効果が発揮されたとの報告がなされている。その一方で、東北地方太平洋沖地震では片振幅で約40cm（両振幅で約70cm）、熊本地震では片振幅約45cm（両振幅で約90cm）もの大きな免震層変位が記録されている。そして近い将来、南海トラフの巨大地震動や上町断層帯地震など、現行の設計レベルを超える大振幅地震動の発生が予測されている。これらの地震動が免震建物に入力した場合に、擁壁への衝突発生が危惧されている。過去国内で免震建物が擁壁に衝突した事例は報告されていないが、実大免震建物の擁壁衝突実験や模型衝突実験により、上部構造にパルス的な過大な加速度応答が発生することや免震建物のロッキング振動が励起されることなど、擁壁衝突時の建物応答の傾向は明らかになりつつある。そして、それらの影響により、上部構造や免震部材が致命的な損傷を受け、遂には免震建物の極限事象に至る危険性があり、大振幅地震動に対してどのようにして免震建物の安全性を担保するかが喫緊の課題となっている。

免震建物と擁壁との衝突を回避する方法としては、建物と擁壁の間に十分な水平クリアランスを確保することが挙げられるが、限られた敷地面積の中では建築計画を制限することになり、また破断・座屈防止のために過大な径の免震部材を用いると、中小地震に対しての免震効果を低下させてしまうなど、経済的な観点からは非効率と言える。

一方で、免震建物と擁壁との衝突を許容することも考えられる。この場合には、擁壁衝突による上部構造および免震部材の応答や損傷を適切に評価し、安全性を見極めることが不可欠となる。背後地盤を含めた擁壁（以降、擁壁部と称する）の水平抵抗特性によって建物の衝突応答も異なるため、設計や解析ではその特性を適切に設定する必要があるものの、擁壁部水平抵抗特性評価については依然不明確のままである。既往の研究では、擁壁部水平抵抗特性の設定方法が極めて曖昧なものや、背後地盤の効果を無視して大幅に簡略化したものなどが多く、擁壁衝突時の建物応答を定量的に評価することができていない。そのため、現状では衝突現象を正確にシミュレーションするためには、高度な三次元FEMを用いた動的解析に頼らざるを得ず、実務的にも非常に困難であると言える。

そこで本論文では、擁壁衝突時における擁壁部水平抵抗特性のモデル化方法として、杭の応答評価に用いられる動的相互作用ばねの考え方を準用して簡易に評価する方法を提案する。さらに、提案した簡易評価法を用いた免震建物の擁壁衝突解析モデルを提示し、三次元FEM解析との比較によりそれらの妥当性を検証する。次に、既に行われている免震建物模型の擁壁衝突実験について、衝突解析モデルを用いてシミュレーション解析を行い、その有効性を検討する。最後に、擁壁との衝突によって発生する免震部材の引張力を評価し、その低減・制御方法について検討する。

以上のように本論文により示された知見は、将来的に普及する免震建物の設計において極めて有用な示唆を与え、活用されることが十分期待される。従って、本論文は博士（工学）の学位論文として十分価値のあるものと認められる。