



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	設計想定を超える地震動に対して高い耐震安全性を有する免震構造の研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	濱口, 弘樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13215号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/69410
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hiroki_Hamaguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 濱口 弘樹

学 位 論 文 題 名

設計想定を超える地震動に対して高い耐震安全性を有する免震構造の研究
(A Seismic Isolation System with High Seismic Safety Margin against Input Ground Motions
exceeding Design Level)

1995 年兵庫県南部地震以降、日本国内において建物の設計用地震動レベルを上回る巨大地震がたびたび発生している。免震建物といえども、巨大地震を受けて深刻な被害を生じる事態に至る可能性を否定することはできない。こうした現状に鑑みて、設計想定を超える地震動に対する免震建物の耐震安全性向上は喫緊の課題である。本論文は、建築基準法に規定される設計レベルを上回る巨大地震に見舞われた場合でも、免震建物の主な極限事象である上部建物の擁壁への衝突、上部建物の過大応答、免震部材の損傷の全てを回避することが可能な、新しい免震支承および免震構造システムを提案し、その実用化を目標に掲げて行った研究をまとめたものである。

第 1 章「序論」では、上記研究目標掲げるに至った経緯を概説した。巨大地震を受ける免震建物に想定される極限事象、およびその対策に取り組んだ既往研究の整理と分類を行った。この結果、いずれの研究成果も上記の極限事象全てを回避することは困難であるとの考えに至った。

第 2 章「新免震支承 FSLRB の提案」では、従来型の鉛プラグ入り積層ゴム (Lead Rubber Bearing、以下 LRB) にすべり機構を直列配置した新免震支承フェイルセーフ LRB(Fail-Safe LRB、以下 FSLRB) の概念と構成に言及した。設計レベルの地震動に対しては、支承の上下いずれかの端部がボルト接合、他端が摩擦接合の LRB として、従来型 LRB と変わらぬ機能を発揮する。一方、設計レベルを超える地震動に対しては、すべり機構部の摺動によって LRB の損傷や上部構造への過度の地震力伝達を防止する。まず、FSLRB と従来型 LRB の縮小試験体の性能比較実験を行い、FSLRB が従来型 LRB よりも高い変形性能を有することを確認した。FSLRB の利点を最大限に活用するには、LRB 部ゴムが硬化し始めるせん断歪み 250% 程度ですべり機構部が摺動開始する安定した摩擦力を有することが望ましい。このために必要な最適摩擦係数の定め方を提示した。また、質点系モデルの地震応答解析により、最適摩擦係数を有する FSLRB 免震建物が従来型 LRB 免震建物よりも高い耐震安全性を有することを確認した。以上の検討を踏まえ、FSLRB のすべり機構部に用いる材料の選定を行った。目標性能に最も近い摩擦特性を有し、かつ耐候性の高い材料として、四フッ化エチレン樹脂系すべり材と鏡面仕上げステンレス鋼板の組み合わせを選定した。

第 3 章「FSLRB の免震特性」では、選定したすべり機構部を角型 LRB に直列配置した FSLRB 試験体を用い、免震支承としての性能確認ならびに動・静摩擦係数評価式の同定を行った。□-414mm 縮小試験体の動的加振実験では、FSLRB の基本特性を確認した。面圧 10N/mm² 程度の一定面圧下において整形な Tri-Linear 形状を示すこと、摩擦係数は概ね面圧のべき乗に比例して低下し、ごく低速度域を除いては速度によらず概ね一定の値を示すこと、などを明らかにした。□-900mm 実大試験体の準静的載荷実験では、LRB 部の 2 次形状係数が小さい FSLRB は過大面圧下での摺動時にすべり面の一部が浮き上がり、すべり機構部の損傷に至る恐れがあることを確認した。この結果を受け、適正使用限界面圧および終局限界面圧を規定した。2 次形状係数の異なる 2

種類の□-200mm 縮小試験体を用いた動的加振実験では、1 方向加振、2 方向加振の間で諸特性に有意な差のないこと、適正面圧下で使用すれば LRB 部のねじれは問題とならないことを確認した。最後に、□-600mm および□-900mm 実機仕様試験体を用い、諸特性の最終確認を行った。また、第 2 章で言及したすべり機構部の縮小試験体を含む全 7 試験体のデータを統合し、すべり面の面圧分布偏在を考慮した実効面圧の考え方を導入することにより、FSLRB の形状諸元によらず適用可能な汎用性の高い動・静摩擦係数の評価式を構築した。

第 4 章「FSLRB の耐候性・経年変化」では、FSLRB の免震性能を大きく左右する LRB 部およびすべり機構部の特性について、耐候性・経年変化を評価した。LRB 部については、天然ゴム系材料を用いた積層ゴムに関する既往の研究成果を整理し、被覆ゴムが果たす役割の重要性を示した。また、被覆ゴム材料の耐候性・経年変化に大きな影響を及ぼす劣化因子として、酸素および水 / 塩水を抽出した。実際に積層ゴムの被覆ゴムとして使用される天然ゴム系、天然ゴム・エチレンプロピレンジエンゴム複合材系の 2 種類のゴム材料に対して上記劣化因子を促進付与する実験を行い、物理・化学特性の変化を定量的に評価した。すべり機構部については、摩擦特性の経年変化を論じた既往研究が非常に少ないことから、FSLRB すべり機構部の縮小試験体を用いて、5 年間の屋外暴露による摩擦係数の変化、ならびに 2 か月間の塩水サイクル噴霧による摩擦係数の変化を実験的に評価した。これらの結果、LRB 部、すべり機構部ともに高い耐候性を有し、数十年にわたって安定した性能を維持できるものと判断した。

第 5 章「FSLRB 適用建物の耐震安全性」では、建物振動モデルの時刻歴地震応答解析に基づき、FSLRB を適用した免震建物の耐震安全性を評価した。原子力発電所建屋のタービン棟および原子炉棟を共通ラフト上に構築し、これを全て FSLRB で支持する FSLRB 建物モデル、および全て従来型の LRB で支持する LRB 建物モデルを作成し、観測地震動を用いた時刻歴応答解析を行った。まず、設計レベルの地震動に対して両建物の挙動にほとんど差のないことを確認した。一方、巨大地震動に対しては両建物の応答に顕著な差が現れた。上部建屋に関して、FSLRB 建物は加速度や層せん断力を LRB 建物に比べて大きく低減することができる。免震部材についても、LRB 建物ではゴムせん断破断の恐れが否定できない一方、FSLRB 建物では LRB 部のゴムせん断歪みを概ね線形範囲内に留めることが可能である。これらの解析結果より FSLRB 建物の優位性は明らかである。ただし、FSLRB 建物が長周期地震動を受ける場合、免震層の最大変位や残留変位が LRB 建物に比べて桁違いに大きな値となる場合のあることが分かった。また、各 FSLRB の残留変位はゴム部が個々に異なる方向と大きさを有するという特徴が明らかとなった。ただし、巨大地震動を受けて生じた免震層の残留変位を解消しないまま設計レベルの後続地震動を受けても、上部建屋および免震層の挙動にとりたてて問題を生じることはない。また、免震層に過度のねじれを生じさせないためには、各 FSLRB の摩擦力が平面的になるべく均一になるような配置計画とすることが望ましい。最後に、FSLRB 建物に生じた残留変位を除去し、上部建屋および個々の免震部材を原位置に復旧する方法の提案を行った。

第 6 章「結論」では、本研究の成果を総括するとともに、今後の展望について述べた。

以上の研究の結果、提案する新免震支承 FSLRB、およびこれを用いた免震構造システムに実用化の目途を立てることができた。