

公益財団法人 セコム科学技術振興財団
研究成果報告書

研究課題名

超高層建物の $Q - \Delta$ 共振リスクの解明と耐震設計法・制震改修法の開発

Investigation of $Q - \Delta$ Resonance Risk in Super-High-Rise Buildings and Development of Seismic
Design and Seismic Control Retrofitting Methods

研究期間

令和元年 10 月 ～ 令和 5 年 9 月

報告年月

令和 5 年 12 月

研究代表者

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 教授

小檜山 雅之

Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University

Masayuki Kohiyama

概 要

日本では南海トラフの地震が切迫しているといわれている。大きなマグニチュードの地震は震源から遠方まで届く長周期地震動を発生させる。関東、関西、中京の大都市圏は軟弱な地盤上にあり、長周期地震動で長時間揺れが続きやすい。一方、超高層建物は固有周期が長く、長周期地震動で共振しうる。実際に、東日本大震災では震源から約 800 km 離れた大阪府咲洲庁舎が大きな被害を生じた。大都市圏では超高層建物の棟数は増え続けており、都市機能を維持するため、耐震安全性をしっかりと確保する必要がある。ねじれ振動はこれまで、質量と耐力要素（壁や筋かい）がバランス良く配置された建物には生じないと考えられてきた。しかし、研究代表者らはバランスの良い建物でも特定の条件が揃えばねじれ振動が誘発され大きな応答になりうる $Q - \Delta$ 共振現象を発見した。そのメカニズムは、次のとおりである。水平 2 方向の剛性が異なる鉛直部材（柱や壁）が水平方向に大きな変位（変位ベクトルを Δ とする）を生じたとき、その復元力ベクトル Q とすると変位ベクトル Δ の外積 $Q \times \Delta$ に比例したねじりモーメント（復元トルク）が発生する（このメカニズムを $Q - \Delta$ 効果と呼ぶ）。建物の直交 2 方向の並進モードの固有振動数の和または差がねじれモードの固有振動数と一致すると、発生するねじりモーメントでねじれモードの共振現象が生じるというものである（以下、この現象を $Q - \Delta$ 共振と呼ぶ）。

現在の耐震設計においては $Q - \Delta$ 共振は全く考慮されていないため、超高層建物に危険が潜んでいる可能性がある。そこで本研究課題では、これまで耐震設計の盲点となっていた $Q - \Delta$ 共振について、超高層建物の応答とその発生確率を予測する理論を構築し、この問題に効果的に対処する新築建物の耐震設計法、既存建物の制震改修法を開発した。まず令和元年度に数理的に取り扱いやすいガウス型白色雑音地動を仮定して、2 層せん断型建物モデルを対象に $Q - \Delta$ 共振の条件式およびねじれ応答を予測する理論を構築した。そして、幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析および振動台実験を行い、理論式の妥当性を検証した。また、構築したねじれ応答の理論式をもとに、ねじれ応答の確率分布を明らかにした。続く令和 2 年度には非定常有色雑音地動を受ける多層せん断型建物モデルに適用できるよう理論の改良を行った。そして、有限要素解析および 4 層試験体を用いた振動台実験により改良した理論の妥当性を検証した。令和 3 年度には曲げ変形が顕著に表れる多層曲げせん断型モデルに非定常有色雑音地動が入力した場合の理論の拡張を行った。そして、有限要素解析および曲げせん断型の 4 層試験体を用いた振動台実験により拡張理論式の検証を行った。令和 4 年度には構築した $Q - \Delta$ 共振の条件式およびねじれ応答の予測式を活用し、新築建築物および既存建築物の安全性を確保する方法について検討を行った。具体的には水平 2 方向の固有周期が異なる場合にも応答を低減できる揺動・転動複合型の同調質量ダンパーの開発を行った。開発したダンパーの有効性は数値解析と振動台実験により検証を行った。

得られた研究成果は超高層建物の耐震性能の向上に寄与し、南海トラフの地震などの海溝型地震で発生が予測されている長周期長時間地震動による被害リスクを低減するものと期待される。