

建築研究資料

Building Research Data

No. 162

August 2014

免震建築物の設計用地震層せん断力係数 に関する検討

Evaluation on Distribution of Story Shear Coefficient
for Structural Design of Seismically Isolated Building

飯場正紀、田村和夫、猿田正明、西村拓也、森川和彦、北村佳久、小林正人、石原直
Masanori Iiba, Kazuo Tamura, Masaaki Saruta, Takuya Nishimura, Kazuhiko Morikawa,
Yoshihisa Kitamura, Masato Kobayashi and Tadashi Ishihara

独立行政法人 建築研究所

Published by
Building Research Institute
Incorporated Administrative Agency, Japan

はしがき

地震時の上部構造の加速度応答を低減する構造システムの1つとして免震構造があり、地震後の機能維持が必要な建築物等での利用が広がっている。免震建築物は、近年開発された構造方法であり、一般的に基礎構造と上部構造の間に免震層を設け、そこに免震部材を設置した構造である。免震建築物の地震時応答は、免震部材や上部構造の構造特性の影響を大きく受けるため、上部構造や免震部材の構造のモデル化には、より一層の慎重な対応が必要である。

建築基準法関連法令における免震建築物の地震時安全性を評価する方法として、下記の方法が示されている。

- 1) 時刻歴応答計算(大臣認定)
- 2) 限界耐力計算に準ずる方法

時刻歴応答計算に基づく方法は、建築基準施行令第81条の規定に基づく構造計算であり、上部構造、免震層、基礎構造及び表層地盤の構造性能が適切にモデル化され、それに基づいて免震建築物の地震時挙動が確認される。一方、限界耐力計算に準ずる方法は、建築基準法施行令第81条第2項等の規定に基づく構造計算であり、平成12年建設省(現国土交通省)告示第2009号に、免震建築物の構造安全性の検討方法が示されている。本告示では、時刻歴応答計算を行わず、加速度応答スペクトルを用いる方法を採用している。このため、上部構造は剛体と仮定した1自由度系モデルによる応答計算となるため、上部構造の地震層せん断力の評価には、別途算定式が提示されている。

最近では、免震建築物をより長周期化させる設計、上部構造の水平剛性を小さくする設計、または地震時における免震層の変位応答低減のために各種支承材・減衰材を組み合わせた設計等が行われ、告示2009号が施行された平成12年当時と比較して、免震建築物の設計手法が多様化してきている。このため、改めて地震層せん断力係数の算定式の検討を行うこととした。

建築研究所では、この課題への対応として、個別重点研究課題「長周期地震動に対する超高層建物および免震建物の耐震性能評価技術の開発(平成18～平成20年度)」および「長周期建築物の耐震安全性対策技術の開発(平成21～平成22年度)」を行うとともに、国土交通省・建築基準整備促進事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討(平成20～21年度)」(事業主体：清水建設、小堀鐸二研究所、日本免震構造協会)との共同研究において、免震建築物に関する多くのパラメータを設定し、時刻歴応答計算を通して、上部構造の地震層せん断力の評価を行い、上部構造の地震層せん断力係数の算定式の提案を行った。本建築基準整備促進事業の事業主体から、共同研究の成果を本資料として取りまとめることをご了承いただいた。建築基準整備促進事業でご協力いただいた関係者の方々にはお礼を申し上げます。

今後の免震建築物の地震時安全性の評価のために、本資料を利用していただきたい。

平成26年8月
独立行政法人建築研究所
理事長 坂本雄三

免震建築物の設計用地震層せん断力係数に関する検討

飯場正紀¹⁾、田村和夫²⁾、猿田正明³⁾、西村拓也³⁾、
森川和彦³⁾、北村佳久³⁾、小林正人⁴⁾、石原直¹⁾

概 要

建築物の地震時応答を評価する方法として、加速度応答スペクトルに基づく方法がある。免震建築物においても、限界耐力計算に準ずる方法が示され、平成 12 年建設省（現国土交通省）告示第 2009 号（以下、告示 2009 号）では、加速度応答スペクトルによる免震層の応答を算定する方法を採用している。免震建築物は、1 自由度系に置換され、等価周期、等価粘性減衰定数を用いて、地震応答を算定される。免震建築物の場合、上部構造を剛体と仮定し、免震層より上部の全質量を等価質量とし、免震層に設置される免震部材（または免震材料と呼ぶ）の力学特性に基づき、免震層を等価剛性と等価粘性減衰定数にモデル化される。この方法では、免震層より上部の部分はモデル化されないため、上部構造の地震層せん断力が直接評価できず、別途、算定式が必要となる。

免震部材の支承材（上部構造の自重等を支える部材）として、天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム及び弾性すべり支承などが主に使われており、また減衰材（ダンパー）としては、鋼材、鉛、及びオイルダンパー等が使われている。近年は、上部構造の高層化に伴う免震部材の大型化、地震時の加速度応答を低減されるための免震建築物の長周期化のために、水平抵抗の非常に小さな支承材や、また地震時の免震層変位低減のための各種ダンパーを組み合わせて使用するなど、免震建築物の設計手法や免震部材の開発が積極的に行われている。

このような背景から、告示 2009 号が施行された時代と比べ、免震建築物の地震応答による上部構造の地震層せん断力も上部構造や免震層の条件により大きな差が生じることが考えられる。そこで、建築基準整備促進事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討（平成 20～21 年度）、事業主体：清水建設、小堀鐸二研究所、日本免震構造協会」において、免震建築物の地震時応答に影響すると考えられるパラメータを設定し、時刻歴応答計算を通して、上部構造の地震層せん断力の評価を行った。さらに、その結果に基づいて、上部構造の地震層せん断力係数の設定の方法をまとめた。

本資料の概要を示すと、以下のようになる。

第 1 章は、上部構造の地震層せん断力の見直しを行うに当たり、過去 10 年程度の免震建築物を取り巻く状況の変化などをまとめるとともに、免震建築物の地震層せん断力係数の

1)建築研究所 2)千葉工業大学 3)清水建設 4)明治大学

見直しの目的や検討体制について示した。

第2章は、2005~2008年に設計が行われた免震建築物に関する情報を収集し、免震建築物の特徴を整理し、本検討で設定する各種パラメータの範囲の参考とした。整理項目としては、建物用途、上部構造の特性（階数、構造、固有周期、減衰定数）、地盤条件、免震部材の種類・モデル化の方法及び利用実績、免震建築物の地震応答(免震層最大変位、上部構造の最大加速度、層せん断力)等である。また実際に設計された免震建築物の地震層せん断力係数の情報を収集し、設計時の地震層せん断力係数と地震応答解析による地震層せん断力係数の比較を行った。

第3章は、免震建築物の地震応答計算を行い、上部構造や免震層の応答を求めた。地震応答解析に必要な解析パラメータとして、上部構造（階数、1次固有周期、減衰定数）、免震層（2次剛性による免震周期、降伏せん断力係数、降伏変位）、地震動（表層地盤の増幅特性）の各条件から、いくつかの代表的なケースを設定した。上部構造の1次固有周期、免震建築物の等価周期、初期剛性(免震層の1次剛性)に基づく免震周期、免震層の荷重変形関係を主なパラメータとして、地震層せん断力の高さ方向の分布係数を整理した。さらに、各パラメータによる応答結果のばらつきも考慮した回帰式を求め、回帰式の適合性を検討した。また同時に、告示2009号第6に基づく方法による地震層せん断力の高さ方向の分布係数も計算し、回帰式との比較を行った。

第4章は、免震建築物の地震層せん断力の高さ方向の分布係数の既往の設定法を参考として、新たな設定法の提案を行い、その適合性について検討した。提案の1つは、告示2009号による結果に対する補正係数（割増率）とすることであり、他の2つは、地震層せん断力の高さ方向の分布係数を新たに設定する方法とし、次の2つの方法を検討した。

- 1) 上部構造の1次固有周期に対する初期剛性による免震周期の比及び免震層の等価粘性減衰定数を用いる方法
- 2) 上部構造の1次固有周期及び免震層の等価粘性減衰定数を用いる方法

第5章に、本検討の内容をまとめるとともに、提案法の適用に当たっての注意点を示した。

Evaluation on Distribution of Story Shear Coefficient for Structural Design of Seismically Isolated Building

Masanori Iiba¹⁾, Kazuo Tamura²⁾, Masaaki Saruta³⁾, Takuya Nishimura³⁾, Kazuhiko Morikawa³⁾, Yoshihisa Kitamura³⁾, Masato Kobayashi⁴⁾ and Tadashi Ishihara¹⁾

Abstract

As a method of evaluation for earthquake response of buildings, the method based on an acceleration response spectrum was proposed. One of the methods, the response and limit strength calculation was proposed. As to seismically isolated buildings (hereafter as to SIBs), the equivalent method of the response and limit strength calculation is applied in the Notification No.2009 of 2000, Ministry of Construction (at present, Ministry of Land, Infrastructure, Management and Tourism) (hereafter as to MLIT) (hereafter as to Notification). In the method based on the acceleration response spectrum, the building is replaced to a degree of freedom model with an equivalent period (calculated from equivalent mass and stiffness) and an equivalent damping factor. In the SIB, a superstructure is set to a rigid with all of the mass above the isolated layer and the equivalent stiffness and the equivalent damping factor are calculated based on characteristics of isolators and dampers which are installed in the isolated layer. In the SIB, as the superstructure is not modeled, a shear-force of each story is necessary to be prepared as the calculated equation.

Natural rubber bearings, Lead rubber bearings and high damping rubber bearings have been mainly used as isolators and as dampers steel, lead and hydraulic ones have been used. Recently, the diversification of structural design of SIBs can be recognized, under the situations that large-size isolators for high-rise buildings are used, the period of SIBs are longer to reduce the acceleration response and various kinds of dampers are used to reduce the displacement response. As a result, various characteristics of shear force vs. deformation and damping effects are applied to the structural design for SIBs.

Under the background, there are considered to be much difference of the story shear-force of superstructure by time history analysis from that calculated by the model at the age when the Notification was in force.

Under the Construction-Standards Maintenance Promotion on the task topic, No. 12 (2008-2009) supported by the MLIT, the evaluation of the story shear-force distribution

1)Building Research Institute, 2)Chiba Institute of Technology,
3)Shimizu Corporation, 4)Meiji University

of superstructure based on results of time history analysis of SIBs had been conducted. The analysis had been done through setting several parameters which to affect earthquake responses. Regression equations for the story shear-force distribution of superstructure were summarized and proposed.

Outlines of the report are summarized in the following.

Chapter 1: To evaluate the story shear-force distribution of superstructure, surveys on tendency of the situation of SIBs during the past decade are summarized. And purposes and the organization of the evaluation are described.

Chapter 2: The information of SIBs, isolators and dampers which had been designed from 2005 to 2008 is surveyed to find out the parameters focused on the study. The analyzed items are building uses, characteristics of superstructure (number of stories, structure, natural period and damping factor, etc.), soil conditions, kinds and modeling of isolators and dampers, past results and earthquake responses of SIBs (maximum acceleration and displacement and story shear-force) etc.

Chapter 3: The earthquake responses of superstructure and isolated layer are calculated through the time history analysis. As parameters of the models, 2 to 4 cases are selected from following items; superstructure (1st natural period, damping factor), isolator and damper (yield shear-force and yield displacement and natural period with second stiffness of isolator), earthquake motion. The story shear-force distributions of superstructure are analyzed under the several key parameters; natural period of superstructure, isolated period of SIB based on 1st stiffness, equivalent period of SIB and equivalent viscous damping factor based on shear-force vs. deformation at isolated layer. The regression equations including dispersion are calculated among the key parameters. And the degree of fitness of regression equations to earthquake response is confirmed.

Chapter 4: The new proposals on the calculation equations of story shear-force distributions of superstructure are conducted. One of the proposals is a revised coefficient method of the present evaluation method. The others are new proposals for evaluating the story shear-force distributions of superstructure. There are two equations with different key parameters as follows;

- a) Parameters; the ratio of natural period of superstructure to the isolated period of SIB based on 1st stiffness, and the equivalent viscous damping factor based on shear-force vs. deformation at isolated layer
- b) Parameters; the natural period of superstructure and the equivalent viscous damping factor described before

Chapter 5: The concluding remarks are summarized and some notices are presented for application of the proposed method.

目次

はしがき	
概要	i
Abstract	iii
第1章 はじめに	1-1
1-1 背景	1-1
1-2 目的	1-2
1-3 検討体制	1-3
第2章 免震建築物の設計用地震層せん断力係数の実情調査	2-1
2-1 調査目的	2-1
2-2 調査対象	2-1
2-3 調査結果	2-1
2-3-1 性能評価シートの調査結果	2-1
2-3-2 設計例の詳細情報調査結果	2-16
2-3-3 免震部材種別による水平特性の変動に関する調査結果	2-31
第3章 免震建築物の地震応答特性の検討	3-1
3-1 目的と検討方法	3-1
3-2 解析パラメータの設定	3-2
3-3 地震応答解析	3-11
3-3-1 代表モデルの結果	3-11
3-3-2 解析パラメータを変えた結果	3-20
3-4 解析結果の分析	3-44
3-4-1 パラメータと応答値との対応	3-44
3-4-2 層せん断力係数増幅の要因検討	3-79
第4章 免震建築物の設計用地震層せん断力係数設定法（案）	4-1
4-1 提案の背景	4-1
4-1-1 既往の設定法	4-1
4-1-2 地震層せん断力係数設定上の課題	4-6
4-2 地震層せん断力係数設定法の提案	4-7
4-2-1 設定法の基本的な考え方	4-7
4-2-2 地震層せん断力係数設定法1, 2, 3	4-7
4-3 提案手法と応答解析の比較	4-10
4-3-1 設定法1に対する検討	4-10
4-3-2 設定法2に対する検討	4-18

4-4	提案手法の適用性に関する検討	4-26
4-4-1	建物階数のパラメータを変えた場合の検討	4-26
4-4-2	異なる入力地震動に対する検討	4-37
4-4-3	転倒モーメントの算定法に関する検討	4-41
4-5	提案手法の基準化に向けたパラメータ平滑化に関する検討	4-49
4-5-1	区分毎の回帰式の連続化	4-49
4-5-2	複数のパラメータ空間上の平面回帰式	4-56
4-5-3	平均値からのばらつきを考慮した平面回帰式	4-68
4-5-4	パラメータが変動したときの影響	4-83
4-5-5	3層、5層、20層モデルの検討	4-84
4-5-6	観測波に対する検討	4-88
4-5-7	粘性系ダンパーによる影響	4-92
4-6	設計用地震層せん断力の算出方法の提案	4-100
第5章	まとめ	5-1
5-1	本検討のまとめ	5-1
5-2	提案手法適用上の注意と今後の課題	5-3
	謝辞	
	参考文献	
付録1	各免震部材のばらつき幅の整理	付-1