

学 位 論 文 題 名

SEISMIC PERFORMANCE OF
STORY-DRIFT-CONTROLLED REINFORCED
CONCRETE FRAMES WITH HYSTERETIC DAMPERS

(履歴ダンパーを有する層間変位制御型鉄筋コンクリート造架構の耐震性能)

学位論文内容の要旨

Earthquakes still pose a major threat to society, causing a tremendous negative impact on the economic development of a nation. An earthquake disaster is generally associated with the collapse of building structures and houses, damaged roads, collapse of lifeline structures and bridges, but most severely, with a large number of casualties and enormous economic losses. Most injuries and casualties produced during a major earthquake are mainly caused by the collapse of building structures and/or by the fall of some of their non-structural components. Ideally, building structures are designed to withstand earthquake forces and to behave satisfactorily, without posing a major risk to the life of their inhabitants; however, the damaging nature of earthquake motions often overcomes this ideal.

Due to the worldwide recognition of the damaging effect of earthquake motions on building structures, the engineering community has focused on developing techniques to improve the seismic performance of building structures. As a result, innovative seismic design and structural analysis methodologies as well as seismic devices have been developed and gained much popularity among researches and design practitioners worldwide. This research effort has contributed to a better understanding of the seismic behavior of building structures and to a higher level of seismic safety.

With regard to design methodologies, most conventional approaches are based on the definition of a set of external forces required to be resisted by a building structure whose corresponding structural response should be within a given deformation limits and extent of structural damage. As can be inferred, this approach does not provide a direct action on the control of deformation demands on structures. On the other hand, recent approaches such as performance- and displacement-based design methodologies provide a more rational treatment of the behavior of not only conventional building structures but also structures equipped with seismic devices such as hysteretic dampers. These methodologies act more directly on the control of deformation demands and structural damage.

In the last decades, seismic response-control techniques have been used as complementary methodologies to the traditional earthquake-resistant design of building structures in order to control the deformation demand and reduce the seismic damage. These techniques introduce additional structural components (e.g., hysteretic dampers) to dissipate most of the vibration energy imposed by earthquake motions. As a result, the seismic damage is concentrated and localized under an appropriate control. Hysteretic dampers are the most prevalent energy-dissipating devices used in building structures. The frequent use of hysteretic dampers is mainly attributed to economical benefits in fabrication and on-site installation, and simple modeling. Hysteretic dampers are strategically installed in a main structure to dissipate most of the hysteretic energy, whereas the main structure is kept either elastic or within low inelastic response.

To date, most research efforts on building structures with hysteretic dampers have focused on steel-

framed structures, but recent studies on reinforced concrete (R/C) building structures with energy-dissipation devices indicate that the performance of hysteretic dampers is highly affected by the degree of damage in the structural components of the R/C main structure. Thus, further investigation on the seismic performance of R/C buildings that incorporate hysteretic dampers is needed. In addition, most previous studies have defined the size of dampers based on a required yield strength and stiffness, and the scheme used for defining the mechanical properties of hysteretic dampers does not provide control over the yield deformation of dampers or deformation of the overall structure. Consequently, it is essential that the deformation of the main structure and hysteretic dampers be carefully controlled, especially for R/C buildings.

Therefore, the objective of this study is to examine the influence of a deformation-controlling scheme, referred to as the 'constant yield story-drift ratio' and introduced herein as an alternative to control the deformations of hysteretic dampers and those of the overall structure, on the seismic performance of R/C frames with hysteretic dampers. For this purpose, this study is divided into a set of parametric studies conducted on a series of analytical building models of R/C frames with hysteretic dampers defined by the proposed scheme. The building models comprise a wide range of structural parameters and mechanical properties of hysteretic dampers. For each parametric study, the seismic response of the corresponding analytical building models was calculated through non-linear time-history analysis. Particular focus is given to the investigation of the reduction in the story drift demand and seismic damage after installing dampers to an R/C frame.

Moreover, an equivalent single-degree-of-freedom (SDOF) system model is proposed for the estimation of the earthquake response, particularly the story drift demand, of R/C frames with hysteretic dampers. The proposed model, unlike commonly used single-spring SDOF system models, differentiates the restoring force characteristics of R/C frame and hysteretic dampers to explicitly take into account the hysteretic behavior of dampers. Thus, a parametric study was conducted on a series of frame models and their corresponding equivalent SDOF system models, and the seismic responses were compared.

The results of the set of parametric studies indicate that the 'constant yield story-drift ratio' scheme presented in this study leads to a relatively constant distribution over the building height of the reduction of the story drift demand and seismic damage in the R/C main structure. The decrease in the demand of inelastic work on the R/C main structure certainly reduces the damage in its structural elements and provides a higher structural safety. This decrease is mainly attributed to the fact that, by controlling the yield deformation of the dampers through the proposed scheme, the damper system is ensured to dissipate hysteretic energy before the R/C main structure yields, and therefore it dissipates most of the hysteretic energy. However, the overall bending deformation of the building was shown to affect the efficiency of the damper system, by reducing the deformation of the dampers at the upper stories. Thus, the energy dissipated by the dampers is reduced and the structural members of the R/C main structure must sustain even more inelastic work than that in the case of the building without dampers.

Furthermore, the results of analyses indicate that, even though the purpose of damper installation is to reduce deformation demands, the story drift demand may be increased compared with that of the building without dampers depending on the stiffness and response period of the R/C main structure. Finally, the results of analyses demonstrated a good correspondence between estimated story drift demands using the proposed SDOF system model and those of frame models, and showed that the proposed model is capable of estimating the participation of dampers into the total hysteretic energy dissipation, in most cases. These results therefore indicate that the proposed model can be useful in structural design practice.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 緑 川 光 正

副 査 教 授 後 藤 康 明

副 査 教 授 菊 地 優

副 査 准教授 岡 崎 太一郎

学 位 論 文 題 名

SEISMIC PERFORMANCE OF STORY-DRIFT-CONTROLLED REINFORCED CONCRETE FRAMES WITH HYSTERETIC DAMPERS

(履歴ダンパーを有する層間変位制御型鉄筋コンクリート造架構の耐震性能)

過去数十年間、地震応答制御技術は、必要とされる変形を制御して地震被害を低減させるために従来の耐震設計を補うものとして使われてきた。この技術では、新たな構造部材(履歴ダンパーなど)を取り入れ、地震動により入力される振動エネルギーの大部分を吸収させる。その結果、適切な制御のもとで地震による損傷をその部位に集中させることが可能となる。履歴ダンパーは建築構造物に使われるエネルギー吸収デバイスとして最も普及しており、その主な理由として、製造費用が低く、現場で設置可能であり、解析でのモデル化が容易であることが挙げられる。履歴ダンパーは履歴エネルギーの大部分を吸収する目的で主架構に設置され、主架構は弾性状態もしくは僅かな非弾性応答の状態に保たれる。

これまで、履歴ダンパーを有する建築構造物に関する研究は主に鉄骨構造物について行われてきたが、エネルギー吸収デバイスを有する鉄筋コンクリート(R/C)構造物について行われた最近の研究結果は、履歴ダンパーの性能はR/C造主架構の構造部材が受ける損傷の度合いに大きく左右されることを示しており、履歴ダンパーを有するR/C造架構の耐震性能についてさらに研究する必要がある。また、過去の研究では必要とされる降伏強度や剛性に基づいてダンパーの形状を決定しており、そこで用いられる履歴ダンパーの力学的特性を設定する方法では、ダンパーの降伏変形や架構全体の変形を制御することはできない。よって、特にR/C造建物では主架構と履歴ダンパーの変形を慎重に制御することが極めて重要である。

以上の背景の下、本研究の目的は、履歴ダンパーの変形と架構全体の変形を制御する新たな手法としてここに提案する「一定の降伏層間変位比」と呼ぶ変形制御法が、履歴ダンパーを有するR/C造架構の耐震性能に及ぼす影響を検証することである。そのため、この手法により設定される履歴ダンパーを有するR/C造架構の解析モデルに対してパラメトリックスタディによる検討を行う。幅広い構造パラメータと履歴ダンパーの力学的特性を包含した架構の解析モデルの地震応答は非線形時刻歴解析により計算し、特に、R/C造架構にダンパーを設置した後の必要層間変位と地震損傷

の低減について重点的に検討する。

更に、履歴ダンパーを有する R/C 造架構の地震応答、特にその必要層間変位を推定するための等価 1 質点系モデルを提案する。このモデルでは、一般的に使用されるばねが一個だけの 1 自由度 (SDOF) 系とは異なり、R/C 造架構と履歴ダンパーの復元力特性を別個に考慮するため、ダンパーの履歴特性を明確に考慮することができる。そして、一連の架構モデルとそれに対応する等価 1 質点系モデルに対してパラメトリックスタディを行い、その地震応答を比較した。

一連の研究の結果、「一定の降伏層間変位比」の方法により、R/C 造主架構の必要層間変位と地震損傷の高さ方向分布が比較的一定に減少するように制御できることを示した。R/C 造主架構の弾塑性応答が減少すれば、その構造要素への損傷も確実に軽減され構造の安全性が高まる。これは、この方法を用いてダンパーの降伏変形を制御することにより R/C 造主架構が降伏する前にダンパー機構が確実に履歴エネルギーを吸収し、履歴エネルギーの大半を吸収するために可能となる。しかしながら、建物全体の曲げ変形は上層のダンパーの変形を減らし、ダンパー機構の効果に影響することも示した。すなわち、ダンパーが吸収するエネルギーは減少し、R/C 造主架構の構造部材はダンパーのない建物に比べてより大きな弾塑性変形に耐えなければならなくなる。

更に、解析結果は、ダンパー設置の目的が必要とされる変形の低減にあるにも係わらず、R/C 造主架構の剛性や応答周期によってはダンパーのない建物の場合に比べて必要層間変位が増加する場合があることを示唆している。また、解析結果では、提案する 1 質点系モデルと架構モデルを用いた場合の必要層間変位は良く一致しており、本提案モデルを用いてダンパーの履歴吸収エネルギー全体への寄与を推定することが可能であることを示した。よって、本提案モデルは構造設計において有用であると言える。

これを要するに、著者は、履歴ダンパーを有する鉄筋コンクリート造建築構造物を対象として、履歴ダンパーの変形と架構全体の変形を制御することにより、鉄筋コンクリート造架構の地震時損傷軽減についての新知見を示すとともに新たな提案をしたものであり、耐震工学及び耐震設計法の発展に対して学術上貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。