

学位論文の要旨

氏名

川添 敦也

学位論文題目

残留変形を抑制する鉄筋コンクリート造骨組の地震応答

大地震後も鉄筋コンクリート（RC）造建築物を継続して使用するためには、部材の損傷防止だけではなく、残留変形の抑制も重要である。地震時に最大層間変形角が $1/50\text{rad}$.に達しても、地震後の残留変形が $1/400\text{rad}$.未満に抑制されるRC造建築物の開発を目指している。提案する設計法により、これまでの免震・制震構造に比べ極めて安価な方法で、地震後の残留変形を抑制できる可能性がある。RC梁の上端筋の一部を高強度鉄筋に置き換え、1階のRC柱の復元モーメント比を制限することによって、部材の残留変形角が $1/400\text{rad}$.未満まで抑制できることを、明らかにしている。本論文は、残留変形を適切に評価するため、実験結果を基に部材の解析モデルを開発して、それらを用いるRCフレームの解析方法についてまとめたものである。

第1章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べた。

第2章では、RC梁の解析モデルを提案し、解析と実験の結果の比較検討を行った。塑性ヒンジは、マルチスプリング、せん断スリップはせん断バネ、鉄筋の拔出は、回転バネでそれぞれモデル化した。コンクリートのひび割れによる剛性の低下についても考慮した。従来型梁の鉄筋にはすべて普通鉄筋が用いられ、改良型梁では一部に高強度鉄筋が使用されている。従来型梁と改良型梁を、それぞれの解析モデルにモデル化した。準静的加力による実験と同様の変位履歴となるように加速度データを作成し、解析モデルの質点に作用させた。梁の各部分の変形の割合、吸収エネルギー、および残留変形などの解析結果について検討を行った。各部の変形の割合は適正な範囲に収まっており、吸収エネルギーについても、解析値と実験値に大きな差は無かった。残留変形については、解析値は実験値を下回ったが、梁の最大変形と二次剛性により、解析モデルの残留変形が変化する現象は再現できた。

第3章では、RC柱の解析モデルを提案し、解析と実験の結果の比較検討を行った。第2章の梁と同様に柱のモデル化と解析を行った。復元モーメント比（ γ ）は柱の残留変形に関する指標であり、柱の解析モデルのパラメータを設定するために用いた。解析プログラムの制約により、解析手順は実験を十分に再現できなかった。しかし、 γ が 0.4 を超える場合、解析モデルでも、 $1/50\text{rad}$.程度の変形角を経験しても、残留変形が $1/400\text{rad}$.未満に抑制されることを確認した。

第4章では、第2章で提案した梁の解析モデルと第3章で提案した柱の解析モデルを用いて、平面RCフレームの解析モデルを作成し、5つの地震波を用いて時刻歴応答解析を行った。高強度鉄筋の割合によって、5階建のRCフレームと12階建のRCフレームを、それぞれ4つのタイプに分けた。梁上端筋における高強度鉄筋の割合は、改良型Ⅰ,改良型Ⅱ,改良型Ⅲでそれぞれ、100%, 50%, 25%とした。

別記様式第3号-2

残留層間変形角は地震波およびフレームのタイプによって大きく異なり、二次剛性が増加するほど抑制されることが確認された。具体的には、5階建の従来型フレームでは、Hachinohe波で、最大残留変形角が1/272radに達したが、改良型Ⅰ、改良型Ⅱ、改良型Ⅲでは、それぞれ81%、74%、48%減少した。同様に、12階建の従来型フレームでは、El Centro波で、最大残留変形角が1/414radに達したが、改良型Ⅰ、改良型Ⅱ、改良型Ⅲでは、それぞれ58%、49%、36%減少した。

最大層せん断力は、地震波に関係なく、フレームの二次剛性が高くなるほど、高くなる傾向があった。具体的には、5階建のベースシア係数は、El Centro波で、改良型Ⅰ、改良型Ⅱ、改良型Ⅲでそれぞれ33%、23%、12%、従来型よりも増加した。同様に、12階建のベースシア係数は、Hachinohe波で、改良型Ⅰ、改良型Ⅱ、改良型Ⅲでそれぞれ35%、22%、12%、従来型よりも増加した。

最大層間変形角については、フレームのタイプによる顕著な違いは認められなかった。

第5章では、第2章から第4章までの研究成果を総括した。さらに、二次剛性が増加したことにより生じる問題点について考察し、残留変形の評価方法に関する今後の課題についての検討を行った。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Seismic response of reinforced concrete frame inducing self-centering

Name: Atsuya Kawasoe

Recent Earthquakes often proves that conceptual change is necessary when designing a structure for earthquake prone areas. Many buildings damaged in earthquakes had to be demolished due to high repair costs making restoration unfeasible. Current design principles aim to save lives at the expenses of structural damage. The objective of new design approaches is to minimize damage with no loss of life and therefore minimize the cost of repair.

To minimize damage of the building and residual deformation after earthquake is essential so that reinforced concrete buildings (RC building) can be continuously used after major earthquakes. I have been developing a structural design methodology for RC buildings that suppress the residual deformation at less than $1/400$ rad., even if the maximum story drift reaches $1/50$ rad. at the earthquake, without vibration control and seismic isolator.

This technique consists of replacing a part of top reinforcements in beams with high-strength bars; controlling the restoring moment ratio in column hinges at first story of the buildings. This technique is cheaper than conventional damping systems or isolation systems.

In Chapter 1, background and purpose of this study, and structure of this thesis are described.

In Chapter 2, analysis models for the RC beams with high-strength bars are described, and the analysis results are compared with the experiment results. Plastic hinges in the beam are modelled to a multi-spring: shear slip is modelled to a shear spring: pullout of reinforcements from columns is modelled to a rotational spring. Reduction of stiffness due to crack in concrete is considered in the beams. As for conventional beams, ordinary steel bars are used in all reinforcements, however, as for improved type beams, which high-strength bars are used partially. The conventional beams and the improved beams are modelled by each analysis models. The accelerations of displacement history based on the experiments by the quasi-static loading are prepared. In the analysis, the accelerations act on the mass point of the beam models. The analysis results are examined on absorption energy, residual deformation, ratio of the deformation of all parts, etc.

The analysis predicted the residual deformation slightly less than the experimental values, however, it was found that the analysis predicted changes of the residual deformation according to maximum displacement and second rigidity in the beams after flexural yielding.

In Chapter 3, analysis models for RC columns are described, and those analysis results are

compared with experiment results. RC columns also are modelled and are analyzed using similar modeling to the beam in Chapter 2. The restoring moment ratio (γ) is defined as an index that affects significantly to the residual deformation of the columns after flexural yielding at the bottom of column. Parametric analysis was conducted to clarify the residual displacement with the ratio γ . It is revealed that, when γ being beyond 0.4, the residual deformation is suppressed less than $1/400\text{rad.}$, even if the maximum deformation of the columns reached to $1/50\text{rad.}$

In Chapter 4, analysis models for one-way RC frames are made using the analysis models for beams in Chapter 2 and the analysis models for columns in Chapter 3. Moreover, as for these analysis models, time history response analyses using five earthquake waves are conducted. 5 stories RC frames and 12 stories RC frames are classified into four types according to the ratio of high-strength bar in the beams. The ratios of high-strength bars of the top reinforcement in the beam are 100%, 50%, 25%, respectively in the case of the improved type I, type II, type III.

The residual deformation of analytical results varies significantly due to the earthquake waves or the frames. As the second stiffness in beams due to the high strength bars increases, the residual deformation tends clearly to be reduced. By Hachinohe wave, maximum residual deformations of the conventional frame with 5 stories reach $1/272\text{ rad.}$, the decreasing rates are 81%, 74%, 48%, respectively in the case of the improved beams type I, type II, type III. Likewise, by El Centro wave, maximum residual deformation of the conventional frame with 12 stories reaches $1/414\text{rad.}$, its decreasing rates are 58%, 49%, 36%, respectively in the case of the improved beams type I, type II, type III.

Regardless of earthquake waves, as the second stiffness of the frame was higher, the story-shearing force tended to be higher. In case of El Centro wave, the increasing rates of the base shear coefficient at the conventional frame with 5 stories are 33%, 23%, 12%, respectively in the improved beams type I, type II, type III. Likewise, in case of Hachinohe wave, the increasing rates of base shear coefficient at 12 stories are 35%, 22%, 12%, respectively in the improved type I, type II, type III. No remarkable differences by the type of frames are recognized about the maximum story deformation.

In Chapter 5, the results of the research from Chapter 2 to Chapter 5 are summarized. Furthermore, problems due to increasing the second stiffness of the frame are described, and future plan about the evaluation methods of the residual deformation is described.