

耐震診断結果を用いた RC 造建物の 簡易動的解析モデルの構築と損傷度の予測

学位論文内容の要旨

1995年兵庫県南部地震以降、これまで多くの建物の耐震診断・改修が進められてきた。今後の地震対策を効果的に行うためには、これらの耐震診断データを分析し活用することが有効である。しかし、耐震診断は建物の静的な強度および靱性から算定される簡易な手法であるため、兵庫県南部地震の被害調査においても、構造耐震指標 I_s 値が構造耐震判定指標 I_{sd} 値以上であるにも関わらず、中破以上の被害を生じた建築があることが報告されている。従って、構造耐震指標だけでは、建物の耐震性能を適確に表すことができない場合があると考えられ、既存建物の構造耐震指標と耐震性能の関係を明らかにすることは極めて重要な課題である。さらに、これにより、既往の耐震診断結果を用いて既存建物の地震損傷度を適切に予測することもできる。

時刻歴地震応答解析は、静的解析では把握しきれない地震時における建物の動的な挙動を、地震動を直接用いて求める最も精密度の高い手法と言える。しかし、モデル化の複雑さや適切な入力地震動選択の難しさなどにより、現状では超高層建物や免震建物などの限られた建物を除き、一般に弾塑性時刻歴地震応答解析は行われていない。しかし、兵庫県南部地震以降、高密度に強震計が配備された事によって地震動記録が広範囲に入手可能となり、建物の被害についても観測記録に基づいた定量的な評価が可能になってきている。

以上を踏まえ、本論文は、鉄筋コンクリート (RC) 造建物を対象とし、耐震診断結果に基づいて既存 RC 造建物の簡易動的解析モデルを構築し、その上で、時刻歴応答解析を用いて耐震診断による構造耐震指標と耐震性能との関係を検討し、さらに、地震時における建物の損傷度を耐震診断結果を用いることで簡便かつ精度良く予測しようとするものである。まず、RC 造建物において、耐震診断結果に基づいた簡易動的解析モデルを提案した。次に、提案した簡易動的解析モデルの妥当性を検証するため、静的荷重増分解析の結果との比較を行い、提案モデルの妥当性を確認した。加えて、提案した簡易解析モデルを用いて、兵庫県南部地震で被害を受けた複数の RC 造建物の弾塑性地震応答解析を行い、解析結果と被害状況の関係を定量的に比較し、提案モデルの妥当性を示した。最後に、北海道の既存 RC 造建物を対象とし、耐震診断結果を用いてそれらの地震損傷度の予測を行った。

本論文は第1章から第7章で構成されており、以下に各章の内容について述べる。

第1章「序論」では、研究の背景、既往の研究について述べると共に、本論文の目的と位置づけを示した。

第2章「耐震診断結果を用いた RC 造建物の簡易動的解析モデルの構築」では、大地震時における既存 RC 造建物の応答性状の把握および損傷度を簡便で精度良く予測することを目的として、耐震診断結果の靱性指標 F 値および $C_T S_D$ 値に基づく建物の簡易動的解析モデルを提案した。簡易動的解析モデルの構築では、降伏時層間変形角は耐震診断結果から層毎の代表的な靱性指標 F 値に応じて、 $F \leq 1.0$ の場合 $1/250$ 、 $F > 1.0$ の場合 $1/150$ と設定し、降伏時保有水平耐力は耐震診断結果の累積強度指標と形状指標の積 $C_T S_D$ 値より算定した。

第3章「荷重増分解析による簡易動的解析モデルの検証」では、第2章で提案した簡易動的解析モデルの妥当性の検証を目的として、兵庫県南部地震によって被害を受けた RC 造建物1棟を対象に、建物の詳細な弾塑性挙動を把握するため立体フレームモデルを解析モデルとし、静的荷重増分解析及び第2次耐震診断を行った。その結果、耐震診断結果に基づく提案モデルの荷重-変形関係は荷重増分解析による荷重-変形関係と良く一致することを示した。また、耐震診断結果に基づく提案モデルを用いて弾塑性地震応答解析を行った結果、建物の最大層間変形角と実際の被害レベルが良く一致することが確認された。また、壁付ラーメン建物及び脆性破壊部材が多数存在する純ラーメン建物について、上記と同様に荷重増分解析と第2次耐震診断を行った結果においても、提案モデルの荷重-変形関係は荷重増分解析に基づく荷重-変形関係と良く一致していることが分かった。

第4章「動的簡易解析モデルを用いた RC 造建物の被害分析」では、第2章で提案した簡易動的解析モデルを用いて、兵庫県南部地震の際に小破から崩壊までの被害を受けた複数の RC 造建物を対象とした弾塑性地震応答解析を行い、地震動レベルと建物の最大応答変形角との関係を求めた。その結果、解析による建物の最大層間変形角と実際の被害レベルは良く対応することを示した。

第5章「北海道における RC 造建物の耐震診断及び耐震補強の現状」では、北海道の既存 RC 造建物の耐震診断・改修の現状及び耐震性能の把握を目的として、まず、それらの耐震診断結果を用いて、耐震診断・改修の進展状況及び補強前後の既存建物の耐震性能の比較などを行った。その結果、補強方法は耐震壁増設とこれを併用したものが最も多いこと、補強後の建物については靱性性能が改善されていること、構造耐震指標 I_s/I_{s0} は $1.0 \sim 1.2$ に集中しており、それほど余裕を持った補強計画が行われていないこと、などが分かった。また、耐震診断結果から算定される保有水平耐力と新耐震設計法による必要保有水平耐力との関係を検討した。その結果、補強後の97%の建物では、保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回っていることが分かった。また、保有水平耐力が必要保有水平耐力を下回っている建物では、基準化水平耐力（保有水平耐力/必要保有水平耐力）が最小の層の強度指標 $C_T S_D$ 値はほぼ 0.4 以下、基準化水平耐力が最小の層の構造耐震指標 I_s 値はほぼ 0.8 以下であることが分かった。

第6章「北海道における RC 造建物の損傷度の予測」では、第2章で提案した簡易動的解析モデルを用いて、北海道における複数の RC 造建物を対象とした弾塑性地震応答解析を行い、建物の最大層間変形角と地震動レベルとの対応関係を求めて建物の耐震性能を定量的に分析した。この際、建物の建設年度、層数および用途を考慮した。その結果、設定した各地震動レベルで中破以上の被害を受ける可能性が、補強計画後では補強計画前より大幅に低減するこ

とを明らかにした。また、大地震レベルとなる 50cm/s 入力の場合には、大破を上回る被害を受ける建物の割合は、補強前が約 60%であり、補強計画後が約 30%であることを示した。

第 7 章「結論」では、各章で得られた結論を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 緑 川 光 正
副 査 教 授 城 攻
副 査 教 授 上 田 正 生

学 位 論 文 題 名

耐震診断結果を用いた RC 造建物の 簡易動的解析モデルの構築と損傷度の予測

現在、1981年以前に建設された耐震性能に劣る建物が数多く残されており、これらの既存建物に対する耐震診断及び耐震補強の促進が社会的に大きな課題となっている。

このような状況の下、本論文は、鉄筋コンクリート (RC) 造建物を対象とし、耐震診断結果に基づいて既存 RC 造建物の簡易動的解析モデルを構築し、その上で、時刻歴応答解析を用いて耐震診断による構造耐震指標と耐震性能との関係を検討し、さらに、耐震診断結果を用いることで地震時における建物の損傷度を簡便かつ精度良く予測しようとするものである。

本論文は以下に示す第1章から第7章で構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景、既往の研究について述べると共に、本論文の目的と位置づけを示した。

第2章「耐震診断結果を用いた RC 造建物の簡易動的解析モデルの構築」では、大地震時における既存 RC 造建物の応答性状の把握および損傷度を簡便で精度良く予測することを目的として、第2次耐震診断結果の靱性指標 F 値および累積強度指標と形状指標の積 $C_T S_D$ 値に基づく建物の簡易動的解析モデルを提案した。簡易動的解析モデルの構築では、降伏時層間変形角は耐震診断結果から層毎の代表的な靱性指標 F 値に応じて、 $F \leq 1.0$ の場合 $1/250$ 、 $F > 1.0$ の場合 $1/150$ と設定し、降伏時保有水平耐力は耐震診断結果 $C_T S_D$ 値より算定した。

第3章「荷重増分解析による簡易動的解析モデルの検証」では、第2章で提案した簡易動的解析モデルの妥当性の検証を目的として、兵庫県南部地震によって被害（大破）を受けた RC 造建物1棟を対象に、建物の詳細な弾塑性挙動を把握するため、フレーム解析モデルによる荷重増分解析及び第2次耐震診断を行った。その結果、耐震診断結果による提案モデルの復元力特性は荷重増分解析による荷重-変形関係と概ね対応することを示した。また、耐震診断結果に基づく提案モデルを用いて地震応答解析を行った結果、損傷度クライテリアの区分による大破と対応する入力地震動最大速度は、 $50 \sim 60 \text{ cm/s}$ となることを示した。続いて、靱性能により分類した建物および崩壊形式により分類した建物を対象に、上記と同様に荷重増分解析と第2次耐震診断を行った結果、提案モデルの復元力特性と荷重増分解析による荷重-変形関係は、高さ方向に強度・剛性分布が一様な建物では概ね対応しているが、高さ方向に強度・剛性分布が極端に変化する建物では対応しないことが分かった。

第4章「簡易動的解析モデルを用いた RC 造建物の被害分析」では、第2章で提案

した簡易動的解析モデルを用いて、兵庫県南部地震の際に小破から崩壊までの被害を受けた複数の RC 造建物を対象とした弾塑性地震応答解析を行い、入力地震動レベルと建物の最大応答変形角との関係を求めた。その結果、損傷指標 $D \geq 50$ の建物の最大層間変形角平均値が損傷度クライテリアの大破以上になる入力地震動最大速度は 50cm/s 前後となること、 $D < 50$ の建物の最大層間変形角平均値が損傷度クライテリアの中破以下に留まる入力地震動最大速度は 50cm/s 程度であること、また、最大層間変形角平均値と損傷指標 D 値はほぼ相関しており、本手法による解析結果は被害状況と概ね対応していることを示した。

第 5 章「北海道における RC 造建物の耐震診断及び耐震補強の現状」では、北海道における既存 RC 造建物の耐震診断・改修の現状及び耐震性能の把握を目的として、まず、耐震診断・改修の進展状況を整理し、それらの耐震診断結果を用いて、補強前後における既存建物の耐震性能の比較検討を行った。その結果、補強方法は耐震壁増設とこれを併用したものが最も多いこと、補強後の建物については靱性性能が改善されていること、構造耐震指標の要求値に対する比 I_s/I_{so} は 1.0~1.2 に集中しており、それほど余裕を持った補強計画が行われていないことが分かった。また、耐震診断結果による保有水平耐力と現行耐震設計法による必要保有水平耐力との関係を検討した結果、補強後の 88% の建物は、保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回っていることを示した。なお、補強前の全建物と補強後に Q_u (保有水平耐力) $\geq Q_{un}$ (必要保有耐力) となる建物は強度型建物と思われ、補強後においても $Q_u < Q_{un}$ となる建物は靱性型または強度靱性型建物と思われる。さらに、保有水平耐力と耐震診断結果との関係を検討した結果、保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回るためには、 $C_T S_D$ 値は 0.4 以上、 I_s 値は 1.0 以上が必要であることを明らかにした。

第 6 章「北海道における RC 造建物の損傷度の予測」では、第 2 章で提案した簡易動的解析モデルを用いて、北海道における複数の RC 造建物を対象とした弾塑性地震応答解析を行い、建物の最大層間変形角と入力地震動レベルとの対応関係を求めて既存建物の地震時損傷度を定量的に分析した。その結果、崩壊に近い被害を受ける可能性のある建物の割合は、最大地動速度 30cm/s の入力地震動レベルでは、補強前 23%、補強後 4%、最大地動速度 40cm/s では、補強前 48%、補強後 18%、最大地動速度 50cm/s では、補強前 66%、補強後 35% であり、補強後が補強前を大幅に下回り、補強計画を実行することによって既存建物の耐震性能を大幅に向上させることができることを明らかにした。さらに、本解析によって求めた中破以上の被害を受ける可能性のある建物の損傷度と信頼性理論に基づく既往の研究の検討法で算定した損傷度とを比較した結果、最大地動速度 20cm/s の入力地震動レベルでは、補強前 14%、補強後 3% で、既往の検討法による損傷度 (震度 V 程度の場合、補強前 19%、補強 2%) を下回り、最大地動速度 30cm/s では、補強前 44%、補強後 16% で、既往の検討法による損傷度 (震度 VI 程度の場合：補強前 45%、補強 13%) と良く対応していることを示した。第 7 章「結論」では、各章で得られた結論を総括した。

これを要するに、著者は、耐震診断結果に基づいて RC 造建物の簡易動的解析モデルを構築し、その簡易解析モデルを用いて地震時における建物の損傷度を簡便かつ精度良く予測したものであり、建築構造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。