

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 8 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560689

研究課題名(和文) 強震を受ける鋼構造骨組の変形制御に関する研究

研究課題名(英文) Deformation-controlling design of steel frames under strong earthquakes

研究代表者

小川 厚治 (OGAWA, Koji)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：80112390

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：座屈による耐力劣化を生じる従来型筋違をもつ骨組と、最下層の一部の柱脚を滑り支承にして摩擦ダンパーとして活用した骨組の2つを対象にして、最大層間変位角と残留層間変位角の予測法を開発した。また、この予測法を逆に辿ることで、最大層間変位角と残留層間変位角を指定値以下に収める変形制御型耐震設計が可能であることを示した。解析例は、何れの骨組も安価で効率的な制震システムとして有望であることを明らかにしている。

研究成果の概要(英文)：A predicting method of the maximum and the residual inter-story drift angles in the structural steel frames under strong earthquakes was developed in this research. The frames are multi-storied steel buildings with steel braces that are conventional type braces with deterioration after buckling or with sliding frictional dampers settled at the bottoms of some columns in the first story. Taking the backtracking along the analytical path with the method, it was clarified that the deformation-controlling design that specifies the limitation of the both of the maximum physical values is feasible. The results of a series of numerical computation assert that both structural systems are suitable as the vibration control system in the sense of the economy and the efficiency.

研究分野：工学

キーワード：鋼骨組 制震 制振 筋違 滑り支承 最大変形 残留変形

1. 研究開始当初の背景

中小地震に対しては建物の損傷を防止し、大地震に対しては倒壊させず人命を保障するという現行の耐震規定の考え方は、建築構造の分野では耐震設計の根幹をなす絶対的なものと考えられていることも多い。しかし、このような考え方が、社会の一般通念として受け入れられ認知されているとは考えがたい。大地震後、傾いて修復不能の住宅を前にして、または、建物の損傷は軽微でも内部の貴重な機器が壊滅した建物を前にして、人命が守られて良かったと心から喜べるとは思えない。このような点を反省して、地震時の損傷を建築主が合意の指定レベル以下に収めるという性能設計が叫ばれているが、損傷を指定レベル以下に収める耐震設計法は未だ確立されていない。

建物の損傷を主に支配するのは最大応答値であり、修復の可否を左右するのは残留変形であろう。この研究は、強震を受ける鋼構造骨組の最大層間変位角と残留層間変位角に注目したものであり、その予測方法を確立することによって、最大層間変位角と残留層間変位角の何れに関しても指定値以下に収めるための耐震設計手順を明確にしようとするものである。

筆者は既に、履歴型ダンパー付平面骨組を対象に、最大層間変位角と残留層間変位角の予測方法、および、最大層間変位角を指定値以下に収めるための耐震設計手順を提案している。しかし、これは塑性変形を生じるのが履歴型ダンパーだけの平面骨組を対象としたものである。これを一般化して実用価値が高い設計手順にするには、少なくとも下記の3つの問題が残されていると認識している。

まず1つ目は、柱や梁の塑性化を許容した設計では重要な問題となる柱梁耐力比である。各層の最大層間変位角を予測するには、それが概ね全層一定の値で、外乱強度の増大と共に緩やかに増大する量であることが必要である。特定層に変形集中する骨組については、それが耐震設計上好ましくないだけでなく、応答の予測も困難となる。筆者らは既に、純ラーメンの平面骨組を対象に、入力地動の強さの関数として変形集中を防止するために必要な柱梁耐力比を明らかにしている。また、偏心のない立体骨組についても、水平2方向地動入力の影響を考慮した柱梁耐力比の必要値も明らかにしている。しかし、柱梁耐力比が一定でもダンパーや筋違等の耐震要素の耐力分担率が大きくなるにしたがって、層崩壊を起こしやすくなることや、偏心のある骨組では特定層への変形集中が起こりやすくなるなどの傾向を筆者は把握しており、このような点を考慮して柱梁耐力比の必要値を明確にする。

2つ目は、制震システムの選択肢の確保である。鋼構造は基本的に柔な構造であり、変形制御には何らかの制震システムが必要で、

履歴型ダンパーは非常に有力な手段である。しかし、用途や要求性能が構造物毎に異なることを考えると、様々な制震システムの選択肢を確保する必要がある。従来型筋違は圧縮側では座屈による耐力低下を生じ、引張側ではスリップ型の履歴特性をもつので、その耐震要素としての評価は極めて低い。しかし、地震下での変形を抑制する顕著な効果があることは古くから認められており、安価な制震システムの選択肢として有望である。スリップ型履歴特性が地震応答に及ぼす影響の定量化手法の確立は、従来型筋違だけでなく、柱脚や乾式柱梁接合などを持つ骨組の応答解明にも必要である。

3つ目は、偏心の影響である。鋼構造では意図しない偏心が生じることは稀であるが、構面数が少ない小規模な建物や工場、倉庫などで一方向に大きな開口を設けた場合や、高さ方向にセットバックさせた建物などでは偏心が避けられないものも多い。偏心の影響については既に多くの研究があるが、特定層の偏心が他の層に及ぼす影響など、層に生じる応力や変形が増大するメカニズムは未だ明らかにされていない。

2. 研究の目的

この研究では、以上の3つの課題を解決し、鋼構造骨組の最大層間変位角と残留層間変位角を指定値以下に収めるための耐震設計手法を確立することを目的とした。ただし、偏心の影響を含む立体骨組としての挙動の解明とは切り離して、平面骨組の変形制御型耐震設計法を検討した。

変形制御のための制震システムとしては、安価で高性能な制震デバイスの活用を目指すし、初年度は従来型の筋違を対象とした。さらに2年目からは、最下層の一部の柱脚に滑り支承をもつ骨組を検討対象に加えた。本研究では、この2つの制震システムを具体的な検討対象として、最大層間変位角と残留層間変位角を指定値以下に収める耐震設計法の確立を目的とした。

従来型筋違については、応答変形の顕著な抑制効果が古くから認められている一方で、座屈後繰り返し载荷を受けると早期に破断することが指摘されている。したがって、従来型筋違は、破断の生じない変形の範囲で利用する必要があり、従来型筋違を用いた最大層間変位角指定型耐震設計法の確立は、従来型筋違を安易に破断させないためにも重要である。

最下層の一部の柱脚を滑り支承とした骨組は、滑り支承を摩擦ダンパーとして活用しようというアイデアである。ここで想定する滑り支承は、従来から免震構造で利用されているような滑り支承ではなく、鉄骨基礎梁をRC基礎の上に直置きしただけの単純なものであり、鋼とコンクリートの安定した摩擦係数を制震デバイスに活用することを考えている。

偏心の影響を含む立体骨組としての挙動の解明に関しては、この問題を検討するための動力学モデルとして、直交2方向に梁をもつ魚骨形モデルを開発している。立体骨組の動的挙動に関するこの動力学モデルの近似度を高めると共に、このモデルを活用することで、偏心の影響を定量化する単純で明快な方法の確立を目指した。

3. 研究の方法

次の4つの課題それぞれに大学院生を配置して、同時進行の形で研究を進めた。

(1) 従来型筋違付骨組の最大層間変位指定型耐震設計

1対の筋違の履歴挙動は、座屈後安定軸力を弾性限耐力とする完全弾塑性の圧縮側筋違と、降伏軸力を弾性限耐力とするスリップ型の引張側筋違にモデル化することで、筋違付骨組の地震応答が近似できることは既に報告している。上記の単純化した復元力モデルを用いることで、強震下で筋違付骨組に生じる最大層間変位角を静的手段だけで予測する方法を開発する。また、この予測方法を逆に辿ることで、最大層間変位角を指定値以下に収める耐震設計手法を確立する。結果の検証のためには、魚骨形骨組を用い、上記の単純化した復元力特性を使って地震応答解析を行う。ただし、最終段階では、従来型筋違の複雑な座屈後挙動を近似できる1次元有限要素法を用いた応答解析によって検証を行う。

(2) 滑り支承をもつ鋼骨組の最大層間変位角指定型耐震設計

対象を第1層だけに強剛なダンパーをもつ骨組に単純化し、具体的な設計目標を設計してこの制震システムの実現可能性を検討する。すなわち、1次設計レベルでは、滑り支承の変形や部材の塑性変形が生じないこと、2次設計レベルでは、滑り支承をもつ第1層には1/50程度の最大層間変位角を許容してエネルギーを吸収させ、第2層以上は最大層間変位角1/100程度以下、弾性もしくは軽微な塑性変形の範囲に留めることを設計条件として設定した。

最大層間変位角の予測方法、最大層間変位角指定型耐震設計法としては、全層にダンパーをもつ骨組に対して既に提案している方法を基本的には用いる。

(3) 剛なダンパーをもつ鋼骨組の残留層間変位角

従来型筋違は通常の履歴型ダンパーに比べればエネルギー吸収効率が悪く、ダンパーに比べて筋違の耐力分担率は高く設定する必要がある。また、滑り支承の変形だけで地震入力エネルギーの大部分を消費するには、滑り支承部分はかなり強剛な構造とする必要がある。したがって、本研究で取り挙げた2つの制震システムは、通常のダンパー付骨組に比べれば、エネルギー吸収する構造要素部分と残りの弾性骨組部分の剛性比が大き

くなる。

筆者は既に履歴型ダンパー付骨組の残留変形の予測法を提案しているが、この方法は、ダンパーの剛性比が大きい骨組の残留変形を過大に評価する傾向がある。ダンパーの剛性比が大きい骨組に対しても有効で、複雑な座屈後挙動をとる筋違付骨組についても適用可能な残留層間変位角の予測方法を確立する。

(4) 偏心が立体骨組の地震応答に及ぼす影響

偏心が立体骨組の地震応答に及ぼす影響は、2方向魚骨形骨組を用いて検討する。それに先だって、汎用構造解析ソフトを活用して、立体骨組の部材レベルでの地震応答解析を行い、その結果が2方向魚骨形骨組モデルによって近似できることを確認する。また、置換された2方向魚骨形骨組の柱や梁に対して用いる降伏曲面の形状についても検討する。

本研究では、この2方向魚骨形骨組を用いた弾性応答解析結果に基づいて、偏心をもつ鋼重層骨組に生じる地震荷重分布を定量化する。

4. 研究成果

主な研究成果は以下の通りである。

(1) 従来型筋違付骨組の最大層間変位指定型耐震設計

まず、従来型筋違付骨組の地震応答解析によって検討した結果、終局耐力が同じであれば、筋違の耐力分担率が大きいほど最大層間変位角は小さくなる傾向があるが、極端に耐力分担率を大きくすると一部の層への変形集中が起こることを明らかにした。したがって、利用できる筋違の耐力分担率には上限値がある。本研究では、筋違付骨組の等価な柱梁耐力比という概念を導入し、ラーメン骨組に対して提案していた柱梁耐力比の下限値と組み合わせることで、変形集中を避けるための筋違の耐力分担率の上限値を明らかにした。

次に、筋違の復元力特性を単純化し、エネルギーの釣合から筋違付単層骨組の最大層間変位角応答を予測する方法を提案した。また、筋違付骨組を等価1自由度系に置換する方法を提案し、前記の単層骨組の応答予測法と組み合わせることで、重層筋違付骨組の最大層間変位角の予測方法を確立させた。この予測方法の妥当性は、筋違について単純化された復元力モデルを用いた地震応答解析結果と共に、1次元有限要素法を用いて筋違の挙動を詳細に再現した地震応答解析結果においても検証している。

(2) 滑り支承をもつ鋼骨組の最大層間変位角指定型耐震設計

第1層だけに強剛なダンパーをもつ骨組に単純化して、筆者が既に提案している履歴型ダンパー付骨組の応答予測法と、地震応答解析の両面から、この制震システムを用いて

前記した設計目標を達成できる可能性を検討した。その結果、前記の条件を満たす設計が現実的な構造パラメータの範囲で可能であることを明らかにした。また、適正な構造パラメータについても検討を進め、次のような結果を得ている。

滑り支承部分がすべりを開始するときの層間変位角は小さいほど履歴減衰効果は大きくなるが、1/500程度にすれば十分な効果が期待できる。

滑り支承部分の耐力分担率は、大きいほど履歴減衰効果が大きくなる傾向があり、また、1次設計で滑りを生じさせないためにも0.5程度以上が必要である。一方、滑り支承部分の耐力分担率を大きくすると、滑り支承部分の残留変形が増大する。

第2層以上の上層部の層せん断力が、通常の骨組の層せん断力分布に比べて大きくなる傾向があり、この傾向は層数が多いほど、また、滑り支承部分の耐力分担率が大きいほど強くなる。

以上の結果から、この構造システムは、5、6層程度以下の低層骨組に対し、耐力分担率を0.5程度として用いるのが最も有効であると考えている。

(3) 剛なダンパーをもつ鋼骨組の残留層間変位角

筆者が既に履歴型ダンパー付骨組の残留変形の予測法として提案した方法は、最後の塑性変形が生じ残留変形が確定する半サイクルの履歴挙動におけるエネルギーの釣合から誘導した。この方法では、ダンパーの剛性比が2程度以下の骨組については、残留変形の上限を精度良く近似できるものであるが、ダンパーの剛性比が大きい骨組に対して残留変形を過大に評価する。ここでは、最大変形到達後、正負2方向に塑性変形を繰り返しながら残留変形が減少する過程を損傷分配則を使って評価するなどの方法で検討を進めた。その結果、非常に単純で適用範囲が極めて広い残留変形の上限値の予測式を提案した。複雑な座屈後挙動をとる筋違付骨組についても、筋違を座屈後安定耐力をもつ完全弾塑性要素とみなして適用すれば、この予測式で残留変形の合理的な近似が得られることを確認している。

(4) 偏心が立体骨組の地震応答に及ぼす影響

まず、2方向魚骨形骨組による解析結果が、多層多スパン立体鋼骨組の地震応答を精度良く近似できるように、2方向魚骨形骨組における構造要素の降伏曲面の形状について検討した。その結果、元の骨組の層せん断力と全体ねじれに対応する2方向魚骨形骨組の応力の降伏相関関係は、以前に提案していた円形よりも放物線の方が適当であることなどを明らかにした。

次に、このモデルを用いた広範な弾性応答解析によって、主に偏心をもつ骨組に生じる地震荷重の定量化を試みた。その結果、単一

層に偏心をもつ骨組であっても、偏心によるねじりモーメント、ねじれ変形は全層に生じること、1層の骨組では重心位置に水平力が作用すると考えることで、地震荷重は概ね評価できることなどの結果を得たが、重層骨組に生じる地震荷重分布の定量化には至れなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

小野俊哉、山成實、小川厚治、強震を受ける滑り支承付鋼重層骨組の最大層間変形角応答、日本建築学会構造系論文集、査読有、第80巻、791-799、第711号、2015

宮地伸伍、小川厚治、筋違付多層骨組の最大層間変位角指定型耐震設計、日本鋼構造協会鋼構造論文集、査読有、Vol.21、No.84、125-136、2014

宮地伸伍、小川厚治、従来型筋違付多層骨組における耐力分担率の上限値の検討、鋼構造年次論文報告集、査読有、第22巻、384-391、2014

永野貴也、小川厚治、静的骨組解析結果による鋼ラーメン骨組の魚骨形骨組へのモデル化、鋼構造年次論文報告集、査読有、第22巻、405-412、2014

本田貴也、小野俊哉、山成實、小川厚治、剛性比の大きい履歴型ダンパーをもつ骨組の残留変形、日本建築学会構造系論文集、査読有、第79巻、第706号、1951-1960、2014

宮地伸伍、小川厚治、従来型筋違付一層骨組における最大層間変位角の予測、日本建築学会構造系論文集、査読有、第79巻、第702号、1175-1182、2014

Shingo Miyaji, Minoru Yamanari, Koji Ogawa, Effect of Conventional Braces in Multi-story Steel Frames on Seismic Response, Proc. of Pacific Structural Steel Conference 2013, 800-805, 査読有、Singapore (Singapore), 2013

Takaya Nagano, Yusuke Nonaka, Minoru Yamanari, Koji Ogawa, Prediction of Torsional Moment in Multi-story Steel Moment Frames with Eccentricity, Proc. of Pacific Structural Steel Conference 2013, 891-897, 査読有、Singapore (Singapore), 2013

Yusuke Nonaka, Takaya Nagano, Minoru Yamanari, Koji Ogawa, Proposal of New Yield Surface of Simplified Dynamic Model for Three-dimensional Multi-story Steel Moment Frames with Eccentricity, Proc. of Pacific Structural Steel Conference 2013, 19-24, 査読有、Singapore (Singapore), 2013

江原大輔、小川厚治、偏心を有する鋼重層立体骨組の単純化動力学モデルの降伏曲面、日本鋼構造協会鋼構造論文集、査読有、Vol.20、No.77、35-47、2013

江原大輔、小川厚治、偏心を持つ鋼重層骨組の単純化動力学モデルの降伏曲面と地震応答、鋼構造年次論文報告集、査読有、第20巻、477-484、2012

Yoshinori Sakai, Daisuke Ehara, Minoru Yamanari, Koji Ogawa, Seismic Response of Three-dimensional Multi-story Steel Moment Frames with Eccentricity, Lisbon (Portugal), Proc.of 15th World Conference on Earthquake Engineering, USB Pub., 10 pages, 査読有、2012

Daisuke Ehara, Minoru Yamanari, Koji Ogawa, Yoshinori Sakai, Simplified Dynamic Model for 3-dimensional Multi-story Steel Moment Frames with Eccentricity, Lisbon (Portugal), Proc.of 15th World Conference on Earthquake Engineering, USB Pub., 10 pages, 査読有、2012

Ryo Minatogawa, Yoshinori Sakai, Daisuke Ehara, Minoru Yamanari, Koji Ogawa, Yield Surface of Each Story for Inelastic Analysis of Frames under Horizontal Force and Torsion, Lisbon (Portugal), Proc.of 15th World Conference on Earthquake Engineering, USB Pub., 9 pages, 査読有、2012

Izumi Minatogawa, Minoru Yamanari, Koji Ogawa, Hiroyuki Hayashida, Effect of Conventional Braces on Seismic Response of Steel Frames, Lisbon (Portugal), Proc.of 15th World Conference on Earthquake Engineering, USB Pub., 9 pages, 査読有、2012

〔学会発表〕(計30件)

永野貴也、小川厚治、詳細解析結果に基づく魚骨部材の剛性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、1203-1204、神戸大学(兵庫県・神戸市)、2014.9.13

小野俊哉、山成寛、小川厚治、滑り支承をもつ骨組の最大変形の予測に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、1205-1206、神戸大学(兵庫県・神戸市)、2014.9.13

宮地伸伍、小川厚治、単純な復元力特性を持つ従来型筋違付骨組の最大層間変位角、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、1207-1208、神戸大学(兵庫県・神戸市)、2014.9.13

本田貴也、小野俊哉、小川厚治、剛性比の大きい履歴型ダンパー付骨組の残留変形に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、1209-1210、神戸大学(兵庫県・神戸市)、2014.9.13

村田宏文、小川厚治、強震を受ける従来型筋違付骨組の残留層間変位角の上限値の妥当性、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、993-994、北海道大学(北海道・札幌市)、2013.8.31

宮地伸伍、小川厚治、従来型筋違の耐力分

担率上限値の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、991-992、北海道大学(北海道・札幌市)、2013.8.31

永野貴也、江原大輔、野仲裕介、小川厚治、偏心を有する鋼重層骨組のねじれモーメントの予測(その1 静力学的検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、1013-1014、北海道大学(北海道・札幌市)、2013.8.31

江原大輔、永野貴也、野仲裕介、小川厚治、偏心を有する鋼重層骨組のねじれモーメントの予測(その2 動力学的検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、1015-1016、北海道大学(北海道・札幌市)、2013.8.31

野仲裕介、江原大輔、永野貴也、小川厚治、偏心を有する鋼構造重層骨組の単純化動力学モデルにおける新たな梁の降伏曲面の提案と検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、1017-1018、北海道大学(北海道・札幌市)、2013.8.31

村田宏文、宮下いづみ、小川厚治、従来型筋違付骨組の残留層間変位角の予測に関する研究(その1 残留層間変位角の予測式の提案)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、923-924、名古屋大学(愛知県・名古屋市)、2012.9.12

宮下いづみ、村田宏文、小川厚治、従来型筋違付骨組の残留層間変位角の予測に関する研究(その2 筋違付骨組の残留層間変位角)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、925-926、名古屋大学(愛知県・名古屋市)、2012.9.12

林田洋幸、宮下いづみ、小川厚治、従来型筋違の耐力分担率の上限値、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、927-928、名古屋大学(愛知県・名古屋市)、2012.9.12

湊川諒、江原大輔、酒井快典、小川厚治、偏心を有する鋼構造重層骨組の単純化動力学モデルの降伏曲面 その1 降伏曲面の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、963-964、名古屋大学(愛知県・名古屋市)、2012.9.12

江原大輔、湊川諒、酒井快典、小川厚治、偏心を有する鋼構造重層骨組の単純化動力学モデルの降伏曲面 その2 降伏曲面が地震応答解析結果に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、965-966、名古屋大学(愛知県・名古屋市)、2012.9.12

小野剛、酒井快典、江原大輔、小川厚治、一軸偏心を有する鋼構造重層骨組の地震応答性状に関する研究 その1 変形性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、967-968、名古屋大学(愛知県・名古屋市)、2012.9.12

酒井快典、小野剛、江原大輔、小川厚治、一軸偏心を有する鋼構造重層骨組の地震応答性状に関する研究 その2 応力分布、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造 III、969-970、名古屋大学(愛知県・名古屋市)、

2012.9.12

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 厚治 (OGAWA, Koji)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号： 80112390

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし