

最終講義資料

学生とともに耐震研究 36 年

コンクリート充填鋼管構造の極限耐震性能に関する研究

2010 年 2 月 26 日

熊本大学工学部百周年記念館

最 相 元 雄

熊本大学大学院自然科学研究科
(熊本大学工学部建築学科)

最終講義にあたって

最終講義では「学生とともに進めた耐震研究」について話したいと考えています。

「建物が崩壊する地震被害は如何なる場合であっても防ぎたい。このための研究としては強震動応答崩壊の解析方法を導き、これによって建物の極限耐震性能を明らかにすることが必要である。」

斯くの如く極めて単純な理由から本研究を始めました。研究を始めると、当然のことながら単なる大きい地震応答とは異なり強震動応答崩壊固有の現象が次々に現われ、解決すべき課題が尽きない研究となりました。今なお研究はその緒についたに過ぎないの感があり、ある意味で建物の強震動応答崩壊と極限耐震性能について解決すべき課題を示したことがこの研究の最大の研究成果とも考えられます。

対象とした建物はコンクリート充填鋼管 (CFT) の多層骨組が中心となりましたが、これを構成する CFT 柱についてはコンクリートと鋼管の長所と短所を巧みに組み合わせた部材で、高い終局耐力と塑性変形能力を発揮することがよく知られています。しかしながら、耐震構造要素として優れた部材であるが故に、あまり問題にされてこなかったその終局状態が注目されます。このため、数多くの CFT 柱試験体の繰返し動載荷実験によって、柱を輪切りにする形に鋼管亀裂が発生し脆性破壊する CFT 柱の終局状態を求め、この実験資料に基づいて CFT 多層骨組の強震動応答崩壊解析と極限耐震性能の研究を展開しました。

本研究では、共同研究者全員が実験に参加した研究室の学生であり、まさに「学生とともに進めた耐震研究」となりました。共同研究者が学生である場合、常に実験の目的を明確に説明する努力と実験遂行中の安全確保に細心の注意を要求されましたが、有り難いことに如何に大胆な実験計画を立てた場合であっても必ず全面的な協力が得られ、実験を最後まで遂行することができました。そして、多くの学生諸君が毎年積み重ねたたゆみない努力が研究を進める大きな力となりました。

実験に参加した全ての学生諸君に改めて感謝し、その経験が役立って諸君の将来の発展に繋がることを期待しております。

熊本大学では自由で快適な環境の中で長きにわたり教育研究に専念させていただきました。得難い環境に恵まれましたことを深く感謝致しますとともに、熊本大学のますますの発展を祈念致します。

2010 年 2 月 26 日

最相元雄

コンクリート充填鋼管構造の極限耐震性能に関する研究

1995 年兵庫県南部地震では数多くの建物崩壊を見た。耐震設計の根本的な目標のひとつは建物崩壊を防ぐことであるが、この地震被害によって改めて耐震設計における現在の課題と建物崩壊を防ぐ極限耐震設計の重要性が再認識される結果となった。本研究はこの状況に注目し「強震動応答崩壊に対する極限耐震設計」を研究目標として実施した研究で、コンクリート充填鋼管多層骨組（CFT 多層骨組）を対象とする強震動応答崩壊の数値解析法とともに、極限耐震設計の基礎資料として強震動応答崩壊の崩壊過程と崩壊機構、強震動応答崩壊を基準とする骨組損傷率、極限耐震性能、極限耐震設計の設計要因と設計条件について述べたものである。

主な研究テーマは以下のとおりである。

第 1 章 コンクリート充填鋼管柱の復元力特性と脆性破壊挙動

CFT 多層骨組が強震動を受ける場合を想定したコンクリート充填円形鋼管柱（CFT 柱）の繰返し載荷実験によって、耐震構造要素としての CFT 柱固有の復元力特性とともに、鋼管亀裂発生による CFT 柱の脆性破壊的な終局挙動に関する実験資料を得た。この実験資料は本研究全体の基礎資料に相当し、この実験資料に基づいて研究を展開した。

第 2 章 コンクリート充填鋼管柱の復元力モデル

CFT 多層骨組の強震動応答崩壊解析に容易に適用できることを条件として CFT 柱の復元力モデルを求めた。この復元力モデルにおける復元力特性値は降伏曲げ耐力、終局曲げ耐力、初期弾性剛性、鋼管局部座屈発生時の柱の塑性変形、鋼管亀裂発生時の柱の累積塑性変形で、各復元力特性値の決定式を導いた。これらの復元力特性値式によって表される復元力モデルは単に強震動応答中に複雑に変化する復元力を表すにとどまらず、CFT 柱の脆性破壊につながる鋼管局部座屈と鋼管亀裂発生を予測できる新たな復元力モデルとして提案したものである。この復元力モデルを適用することによって強震動応答崩壊を解析し、極限耐震性能を表すために導入した CFT 骨組損傷率を求めた。

第 3 章 コンクリート充填鋼管多層骨組の強震動応答崩壊解析

建物の地震応答解析は数限りなく行われてきたが、建物崩壊に関しては建物崩壊前の地震応答からその後発生するであろう建物崩壊を予測するのみで、建物崩壊挙動そのものを解析することは殆どなかったため強震動応答崩壊の具体的な挙動は不明である。ここでは第 2 章で導いた復元力モデルを適用することによって、各構造要素の破壊が伝搬拡大し建物全体の崩壊につながる強震動応答崩壊の解析法を導いた。この強震動応答崩壊解析法によって CFT 多層骨組内に現われる複雑な崩壊過程と崩壊機構を具体的に計算し、強震動応答崩壊に対する極限耐震設計の設計要因と設計条件に関する研究を進めた。

第4章 コンクリート充填鋼管多層骨組の損傷率と極限耐震性能

CFT 多層骨組の強震動応答崩壊解析によると、骨組内の或る CFT 柱に現れた最初の鋼管亀裂発生による脆性破壊が発端となって他の CFT 柱に鋼管亀裂が伝搬し、且つ、鋼管亀裂発生域が拡大することで骨組全体の強震動応答崩壊に到る。この CFT 骨組の強震動応答崩壊が CFT 柱の鋼管亀裂発生による脆性破壊に支配される挙動であることに注目し、CFT 柱の鋼管亀裂損傷率に基づく骨組損傷率を導いた。この骨組損傷率を適用することで強震動応答崩壊を基準とする CFT 多層骨組の極限耐震性能式を導き、極限耐震設計の設計要因と設計条件を表す基礎資料として提案した。

第5章 コンクリート充填鋼管多層骨組の最適極限耐震設計

CFT 多層骨組の強震動応答崩壊は最初に発生する CFT 柱の鋼管亀裂に支配されるため、せん断耐力が同じで現行耐震規定では同じ耐震性能とされている骨組であっても、その極限耐震性能は互いに異なる。

強震動を受ける CFT 多層骨組の各層損傷率を層方向に一様分布させて損傷集中を防ぐ条件を最適設計条件とし、これにコンクリート鋼管強度比で表した鋼管亀裂発生条件式を適用することで、コンクリート鋼管強度比の層方向分布で表現した CFT 多層骨組の最適極限耐震設計条件を導いた。

各章の研究内容を発表論文で構成する以下の各節で説明する。

第1章 コンクリート充填鋼管柱の復元力特性と脆性破壊挙動

1.1 超高強度コンクリート充填鋼管せん断曲げ柱の終局挙動に関する実験的研究

CFT 多層骨組が強震動を受ける場合を想定した CFT 柱の繰り返し載荷実験によって、柱の設計条件と荷重条件によって異なる CFT 柱固有の復元力特性と終局破壊挙動に関する実験資料を求めた。この実験資料は本研究を通しての基礎資料として位置付けられ、以下の各研究はこの実験資料に基づいて研究を展開した。

実験では CFT 柱の終局曲げ耐力とともに終局破壊挙動を対象として CFT 柱の繰り返し動載荷実験及び静載荷実験を実施した。これらの挙動に関わる CFT 柱の設計条件と荷重条件として、鋼管の材料と径厚比、充填コンクリート圧縮強度、柱軸力比、柱長さ、載荷速度、載荷履歴を設定し、試験体はこれらを実験変数として系統的に設計した計 74 体の試験体である。

注目すべき実験結果として鋼管亀裂発生による CFT 柱の脆性破壊挙動を示した。即ち、CFT 柱は高い終局曲げ耐力と塑性変形能力を発揮するが、最終的には柱脚近くに鋼管を輪切りにする形に鋼管亀裂が現れ、復元力を急激に且つ完全に失う場合があることを示した。この CFT 柱の脆性破壊挙動は骨組の極限耐震性能を確保するためには極めて不利な挙動であり、第2章以下に示す CFT 柱の復元力モデル及び強震動による CFT 多層骨組損傷の研究においては、CFT 柱の鋼管亀裂を不可欠な検討要因として鋼管亀裂発生条件式を導入し具体的に鋼管亀裂との関連性を示した。

本実験以後も数々の CFT 柱の実験結果が報告されているが、鋼管亀裂による脆性破壊に関しては一部の試験体に鋼管亀裂が発生したという実験報告に限られており、系統的な CFT 柱の鋼管亀裂実験資料を示した本実験は、試験体寸法が限られているという難点はあるものの、現在もお貴重な実

験資料となっている。

第2章 コンクリート充填鋼管柱の復元力モデル

2.1 超高強度コンクリート充填鋼管柱の終局曲げ耐力に関する研究

CFT 多層骨組の極限耐震性能を支配する設計要因のひとつとして CFT 柱の終局曲げ耐力を求めた。CFT 柱の終局曲げ耐力は一般化累加強度式で比較的簡単に計算できるためこの方法がひろく使われているが、その結果は実際の最大曲げ耐力より低い値を予測すること、コンクリート鋼管強度比などの CFT 柱設計条件によって予測精度が著しく異なることに難点がある。その原因は冷間成形鋼管の明確に現れない降伏応力度を鋼管強度の基準値とすることと CFT 柱設計条件によって異なるコンクリート拘束効果の影響によるものである。

これに対して、本研究の終局曲げ耐力式も同じ累加強度の考え方に基づくが、冷間成形鋼管においても的確にその材料特性を表すことができる鋼管引張強さを鋼管強度の基準値とした。また、CFT 短柱圧縮試験と von Mises の降伏条件を用いた鋼管応力度解析に基づいてコンクリート拘束効果式を導き、この式を適用して CFT 柱の鋼管最大応力度とコンクリート最大応力度を表すことによって CFT 柱の実際の最大曲げ耐力を良く近似する終局曲げ耐力式を導いた。とくに、CFT 柱設計条件による影響については、材料特性を表す変数としてコンクリート鋼管強度比を導入しコンクリート拘束効果式を表したことによって、この終局曲げ耐力式は普通強度コンクリート充填円形鋼管柱から超高強度コンクリート充填円形鋼管柱まで柱設計条件によらず幅広く適用できる。

2.2 コンクリート充填円形鋼管柱の鋼管局部座屈に関する研究

2.3 Local Buckling of CFT-Column under Seismic Load

CFT 柱では鋼管局部座屈が発生しても充填コンクリートによって鋼管の局部座屈変形が拘束される結果、直ちに顕著な復元力低下が現われない。しかしながら、地震力のような繰り返し荷重を受けると鋼管の局部座屈変形はその後に発生する鋼管亀裂の要因となる場合があるため、CFT 骨組の極限耐震性能を考えるうえで鋼管の局部座屈は無視できない。このため、極限解析の上界定理に基づく解析として降伏曲面と降伏曲線で構成される局部座屈変形の崩壊機構を提案し、CFT 柱の鋼管局部座屈解析法を導いた。

ここに示した鋼管局部座屈解析法は CFT 柱変形を解析できるもので局部座屈後の荷重変形関係を解析できる。従って、この方法では繰り返し荷重を受ける CFT 柱を対象として、鋼管局部座屈が発生する柱の塑性変形、即ち、鋼管局部座屈発生条件となる柱の限界塑性変形を計算できる。

また、鋼管局部座屈に関しては設計要因として鋼管径厚比のみが注目されているが、本解析結果では CFT 柱の鋼管局部座屈発生までの塑性変形を対象とする場合には、この他にコンクリート鋼管強度比、柱アスペクト比（柱長さとお管外径の比）、柱軸力比の影響が顕著であることを示した。

2.4 コンクリート充填鋼管柱の鋼管亀裂と累積塑性変形能力に関する研究

繰り返し荷重を受ける CFT 柱の終局破壊状態には圧縮荷重による軸方向塑性変形が徐々に増加した後これが急増して軸力保持不能となる状態と、柱端近くに鋼管を輪切りにする形に鋼管亀裂が発生して曲げ耐力が急激に低下する場合の 2 種類の終局破壊状態があることを実験結果 (1.1 節) で示した。前者は徐々にその終局状態に到るのに対して後者は脆性的な破壊挙動で、これは耐震構造要素として極めて不利な終局状態である。したがって CFT 柱に耐震構造要素としてその高い終局曲げ耐力と塑性変形能力を発揮させるためには、鋼管亀裂発生による終局状態を予測できることが必要である。このため、鋼管亀裂発生条件式を提案し、鋼管亀裂発生までの柱の累積塑性変形能力式を導いた。

CFT 多層骨組の強震動応答中に繰り返し荷重を受けて CFT 柱に鋼管亀裂が発生する挙動は、周知の疲労破壊理論である Palmgren-Miner 則に基づいて CFT 柱の鋼管亀裂発生までの累積塑性変形を求めることができる。しかしながら、その計算結果によると実験結果の平均値を予測できるが実験結果が幅広く分布する亀裂現象では予測誤差の幅を明確に決定できないという難点がある。

このため CFT 柱の鋼管亀裂発生を同じ低サイクル疲労破壊挙動と考えるが、

「鋼管の局部座屈変形によって生じる引張塑性歪も含めて、繰り返し荷重によって生じる鋼管の引張塑性歪累積値が鋼管破断伸びとコンクリート鋼管強度比で定義される CFT 柱固有の限界値に達すると鋼管亀裂が発生する」

という実験結果に基づく仮説を導入し鋼管亀裂発生条件式を導いた。この条件式で各試験体の鋼管亀裂発生を予測し CFT 柱の鋼管亀裂発生までの累積塑性変形を求めると実験結果の下限值と良好に対応し、この条件式が安全側の誤差で鋼管亀裂発生を予測できることと極限耐震性能評価に適用する鋼管亀裂発生条件式として適切且つ有効であることを示した。

また、この鋼管亀裂発生条件式に基づく新たな概念として「鋼管亀裂損傷率」を導入した。鋼管の引張塑性歪累積値が CFT 柱固有の限界値に達すると鋼管亀裂が発生するという条件より、強震動応答する CFT 柱の鋼管亀裂損傷率はその時点の引張塑性歪累積値と限界値との比で表せる。第 3 章以下の研究では、この鋼管亀裂損傷率が CFT 骨組の地震応答崩壊と極限耐震性能を支配する要因となることを示した。

2.5 Restoring Force Characteristics and Model of Concrete Filled Steel-Tube Column

2.6 コンクリート充填鋼管柱の復元力特性と復元力モデルに関する研究

2.7 Restoring Force Model of Concrete Filled Steel Tube Column under Seismic Load

CFT 柱の復元力特性はコンクリートと鋼管の材料特性に支配される他に、CFT 柱固有の鋼管とコンクリート間の相互作用、鋼管の局部座屈と鋼管亀裂の発生、さらには動的荷重による載荷速度効果の影響を受けるが、これら諸々の影響を考慮して導いた復元力特性値式に基づき CFT 多層骨組の強震動応答解析さらには強震動応答崩壊解析に比較的容易に適用できる CFT 柱の復元力モデルを提案した。

対象は繰り返し荷重を受ける CFT 柱の材端曲げモーメントで、その復元力履歴形状は CFT 柱の設計条件と荷重条件によって著しく異なるため単純な復元力モデルで表現することは難しいが、各瞬間の CFT 柱復元力をその瞬間の柱軸力に対応する終局曲げ耐力で無次元化するとその無次元復元力の履歴形状は規則的となる。しかも、鋼管の局部座屈発生までの無次元復元力を Tri-linear モデルで、局部座屈発生後の無次元復元力を修正 Clough モデルで良く近似できることを示した。

また、CFT 柱の復元力特性値は降伏曲げ耐力、終局曲げ耐力、初期弾性剛性、鋼管局部座屈発生時の柱の塑性変形、鋼管亀裂発生による終局状態までに生じる累積塑性変形の各値であることが 1.1 節の実験資料によって示されているため、これら各復元力特性値の決定式を CFT 柱固有の諸性状に基づいて解析的に導いた。これらの復元力特性値式を用いて上記の無次元復元力モデルを表すと、地震応答解析に容易に適用できる CFT 柱の復元力モデルとなり、柱の設計条件と荷重条件に関係なく CFT 柱の実験値を良く近似できた。

2.8 動的変動軸力を受ける鉄筋コンクリートせん断曲げ柱の復元力モデルに関する実験的研究

2.9 Restoring Force Model of RC Beam-Column Subjected to Dynamically Varying Axial Force

2.10 鉄筋コンクリート部材の復元力特性に及ぼす載荷速度効果に関する研究

2.11 変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の動的復元力特性と動的復元力モデルに関する実験的研究

2.12 Dynamic Restoring Force Model of RC-Column under Seismic Load

強震動応答崩壊に対する極限耐震設計研究の第一段階として、本研究は柱部材の終局破壊挙動が脆性的で且つ明確な CFT 多層骨組を研究対象としたが、過去の地震被害を考えるならば鉄筋コンクリート多層骨組 (RC 多層骨組) の強震動応答崩壊に対する極限耐震設計はさらに緊急で重要な課題であり同じ研究対象である。CFT 多層骨組と RC 多層骨組の間には広い意味での合成構造として共通の側面をもつ反面、顕著に現れる各々の構造固有の挙動が存在することに注目し、CFT 柱と同様に RC 柱の復元力特性値式と復元力モデルを求めたものである。研究では RC 柱の繰り返し動載荷実験と同じ変位履歴の静載荷実験を実施し、これから得られた実験資料に基づいて研究を進めた。

柱の復元力履歴形状とその復元力モデルについては CFT 柱と RC 柱ともに基本的には共通している。複雑な RC 柱の復元力履歴形状も各瞬間の柱軸力に対応する終局曲げ耐力で無次元化すると、その無次元復元力は規則的な履歴形状となり、CFT 柱と同様にその履歴形状は Bi-linear モデルと修正 Clough モデルを組み合わせることによって良く近似できる。しかしながら、CFT 柱と比較してコンクリート材料特性がより顕著に現れる RC 柱では載荷速度効果と変動軸力効果が復元力に強く影響する実験結果が得られた。このため、RC 柱の動載荷実験結果と静載荷実験結果に基づいて、2.9 節と 2.10 節では載荷速度効果式を導き、2.11 節と 2.12 節では無次元復元力による変動軸力効果のモデル化を示した。得られた載荷速度効果式を無次元復元力モデルに適用して RC 柱の復元力モデルを求めると、極めて複雑な履歴形状となる RC 柱の動的な復元力を変動軸力効果も含めて良く近似できることが確かめられた。また、この復元力モデルは RC 多層骨組の強震動応答解析に容易に適用できることを 2.8 節の数値解析結果で示した。

2.13 Steel Bar Fracture of Reinforced Concrete Frame under Extremely Strong Ground Motion

2.14 Damage of Reinforced Concrete Structure under Extremely Strong Ground Motion

2.15 Steel Bar Fracture of Reinforced Concrete Frame under Extremely Strong Seismic Load

CFT 柱の鋼管亀裂発生による脆性破壊が CFT 多層骨組の極限耐震性能を決定するのと同様に、主筋破断による RC 柱の脆性破壊に支配される RC 多層骨組の極限耐震性能を示した。

強震動応答で発生する RC 柱の主筋破断を極低サイクル疲労破壊として解析し主筋破断の極低サイクル疲労破壊式を導いた。この主筋破断の極低サイクル疲労破壊式については、RC 柱の繰り返し載荷実験によってその妥当性を示すとともに、これを適用して RC 多層骨組の強震動応答損傷解析法を導き提案した。

第 3 章 コンクリート充填鋼管多層骨組の強震動応答崩壊解析

3.1 コンクリート充填鋼管多層骨組の激震動応答と崩壊挙動解析に関する研究

3.2 Seismic Response and Collapse of Concrete Filled Steel Tube Frame under Extremely Strong Ground Motion

3.3 Dynamic Collapse of CFT-Frame under Extremely Strong Ground Motion

現在までに数限りなく行われてきた地震応答解析の対象は建物崩壊前までの地震応答に限られ、建物崩壊に関してはこの建物崩壊前の地震応答からその後発生するであろう建物崩壊を予測するのみで実際の建物崩壊が直接解析されることは殆んどなかったため、具体的な建物崩壊挙動が明らかにされてない。このため強震動による建物崩壊を直接解析する強震動応答崩壊解析法を導き提案した。

CFT 柱と H 形鋼梁の CFT 多層平面骨組を解析対象とし、この骨組を剛体の柱梁接合部パネルと両端に弾塑性ヒンジを持つ柱及び梁部材で構成される解析モデルで表した。また、CFT 柱両端に設けた弾塑性ヒンジの復元力は第 2 章で求めた復元力モデルで表した。強震動応答崩壊解析では単なる大変形地震応答解析にとどまらず、鋼管亀裂発生による CFT 柱の脆性破壊とこれによって発生する衝撃力の伝搬と部材間の応力再配分、骨組落下によって骨組内の各所に発生する柱梁接合部パネル間や構造要素間の衝突を解析する必要がある。デジタルコンピュータによる数値解析では不可避な数値誤差の問題や低い計算速度による時間的な制約があっても、目的とする上記の解析を確実に実行するための数々の工夫によって建物崩壊の新たな解析方法を示した。

提案した解析方法によって得られた CFT 多層骨組の強震動応答崩壊は具体的且つ詳細な解析結果で、次のような CFT 多層骨組の強震動応答崩壊過程が示された。即ち、

「CFT 多層骨組の強震動応答では、最初に或る CFT 柱に鋼管局部座屈が発生する。鋼管局部座屈が発生するとその柱に鋼管亀裂損傷率の顕著な増加が始まる。その後、鋼管亀裂損傷率が単調に増加し鋼管亀裂発生に到る。骨組内のいずれかの柱に最初の鋼管亀裂が現れるとその層の他の柱にも連鎖的に亀裂が発生するとともに、鋼管局部座屈と鋼管亀裂発生範囲が他の層の柱にも拡がる。同時に急激な骨組の落下が始まり、上下層間での柱梁接

合部パネルの衝突を繰り返しながら骨組は崩壊する。」

骨組の設計条件に応じて強震動応答崩壊過程は複雑に異なるが、上記の CFT 多層骨組の崩壊過程に示すように、共通して最初に発生した CFT 柱の鋼管亀裂が骨組全体の崩壊と直接関係するため、骨組崩壊を支配する損傷率を CFT 柱の鋼管亀裂損傷率で表せる。この結果より強震動応答崩壊に対する極限耐震性能を CFT 柱の鋼管亀裂損傷率で評価した。この方法によって実際に強震動応答で発生する骨組損傷率を解析したのが次の第 4 章である。

第 4 章 コンクリート充填鋼管多層骨組の損傷率と極限耐震性能

4.1 コンクリート充填鋼管多層骨組の強震動応答と骨組損傷に関する研究

4.2 強震動を受けるコンクリート充填鋼管多層骨組の損傷と柱梁耐力比に関する研究

柱梁耐力比 (COF) は多層骨組の耐震性能を支配する重要な耐震設計要因であるが、梁降伏型骨組の良好な地震応答性状となるためには、要求される COF 値は骨組の構造種別、振動特性、作用する地震動等の条件によって異なる。とくに、CFT 柱は終局曲げ耐力よりも大幅に低い応力状態で剛性低下するため、CFT 柱と H 形鋼梁で構成される CFT 多層骨組では終局曲げ耐力以下で剛性低下する柱と剛性低下しない梁との組合せによって相対的に柱は塑性化しやすくなり、梁降伏型骨組となる条件が厳しくなる。このように COF 値の決定条件が複雑で厳しい CFT 柱と H 形鋼梁で構成される CFT 多層骨組を対象に、ここでは強震動応答崩壊に対する極限耐震設計で要求される COF 値を求めた。

解析対象とした CFT 骨組は最上層を除き全ての柱梁接合部における COF 値は等しいという条件で設計し、その COF 値が互いに異なる骨組を用意した。入力地震動は現実的で極めて強い地震動として 1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台加速度記録 (JMA-KOBE NS & UD) と El Centro NS(1940) を選び、これに対する地震応答で発生した塑性変形率、鋼管局部座屈損傷率、鋼管亀裂損傷率を求めた。

上記条件下の強震動応答崩壊解析によると、CFT 多層骨組の骨組崩壊に関係する鋼管局部座屈損傷率と鋼管亀裂損傷率の値は骨組の COF 値によって大きく異なるが、極めて強い記録地震動に対しても鋼管局部座屈も鋼管亀裂も発生させないために必要な CFT 多層骨組の COF 値には下限値が存在し、その値は $COF=2.0$ で近似できるという結果を得た。

4.3 強震動を受けるコンクリート充填鋼管多層骨組の損傷とコンクリート鋼管強度比に関する研究

CFT 柱と H 形鋼梁で構成される CFT 多層骨組が強震動を受けて崩壊する挙動を数値解析すると、CFT 柱の鋼管亀裂発生が骨組崩壊の直接の原因になる結果が得られた (第 3 章)。一方、CFT 柱の繰り返し動載荷実験 (1.1 節) によると、CFT 柱の復元力を支配する降伏曲げ耐力、終局曲げ耐力、鋼管局部座屈と鋼管亀裂で表される塑性変形能力の各値が CFT 柱のコンクリート鋼管強度比の値と深く関わる結果が得られた。とくに、鋼管亀裂がコンクリート鋼管強度比に支配される実験結果と CFT 柱の鋼管亀裂が骨組全体の強震動応答崩壊と関係するという解析結果の両者に注目すると、コンクリート鋼管強度比は CFT 多層骨組の極限耐震設計要因となる。この理由によって、ここではコンク

リート鋼管強度比に支配される CFT 多層骨組の極限耐震性能を定量的に求め、両者の関係を示した。

コンクリート鋼管強度比を設計変数とし系統的に設計した CFT 多層骨組を強震動応答崩壊解析した結果、各骨組は同じ層せん断耐力と層せん断耐力分布さらに同じ柱梁耐力比で設計したにも拘わらず、発生する骨組損傷率はコンクリート鋼管強度比の増加とともに単調且つ顕著に増加する挙動が得られた。この結果より強震動応答崩壊を防ぐために必要な極限耐震性能は骨組耐力と柱梁耐力比の条件だけで確保することは困難で、その極限耐震性能はコンクリート鋼管強度比に支配されることを示した。

また、観測記録された極めて強い地震動を受けた場合であっても、強震動応答崩壊につながる CFT 柱の鋼管亀裂を発生させないために必要な CFT 柱のコンクリート鋼管強度比 (ρ) には上限値が存在し、その値は $\rho=11.0$ で近似できる結果を示した。

4.4 強震動を受けるコンクリート充填鋼管多層骨組の損傷と終局耐震性能に関する研究

4.5 Ultimate Earthquake Resistant Capacity of CFT-Frame

CFT 多層骨組の強震動応答崩壊解析によると、骨組内の或る CFT 柱に現れた最初の鋼管亀裂発生による脆性破壊が発端となって他の CFT 柱に鋼管亀裂が伝搬拡大し、骨組全体の強震動応答崩壊に到る。この CFT 骨組の強震動応答崩壊が CFT 柱の鋼管亀裂発生による脆性破壊に支配される挙動であるという解析結果に注目し、CFT 柱の鋼管亀裂損傷率に基づく骨組損傷率を導くとともに CFT 多層骨組の極限耐震性能式を求めた。

CFT 多層骨組損傷率の支配要因、即ち、CFT 多層骨組における強震動応答崩壊の支配要因については、骨組の柱梁耐力比 (4.2 節) と CFT 柱のコンクリート鋼管強度比 (4.3 節) とともに層せん断耐力係数低下率 (目標とする基準層せん断耐力係数に対してその層の層せん断耐力係数が異なる割合) が主たる支配要因であるというこれまでの研究成果に基づいて、各支配要因の限界値を定量的に検討し、強震動応答崩壊に及ぼすこれらの影響をまとめて表現できる指標として「極限耐震性能指標」を導いた。

新たに導入した極限耐震性能指標を適用することで、最終的に強震動応答崩壊を対象とする CFT 多層骨組の「極限耐震性能式」が得られて、これを極限耐震設計の設計要因と設計条件を表す基礎資料として提案した。

第 5 章 コンクリート充填鋼管多層骨組の最適極限耐震設計

5.1 強震動を受ける CFT 多層骨組の CFT 柱亀裂と H 形鋼梁亀裂に関する研究

5.2 強震動を受けるコンクリート充填鋼管多層骨組の損傷分布に関する研究

5.3 Damage of Concrete Filled Steel Tube Structure under Extremely Strong Ground Motion

5.4 Crack Damage Distribution of Concrete Filled Steel Tube Frame under Extremely Strong Ground Motion

5.5 Fracture of Concrete Filled Steel Tube Frame under Extremely Strong Ground Motion

CFT 多層骨組の強震動応答崩壊解析によると、CFT 多層骨組の層せん断耐力分布が耐震規定に示

される設計用地震層せん断力分布と一致し良好な地震応答が期待される場合で、さらに柱梁耐力比が充分大きい値であっても、多くの場合に CFT 柱の亀裂破壊損傷率が一部の層や部材に集中する挙動が現われた。CFT 多層骨組の強震動応答では最初に発生する CFT 柱の亀裂破壊が骨組全体の崩壊を支配するため、骨組の極限耐震性能を確保するうえで損傷集中は極めて不利な挙動である。

強震動応答で発生する多層骨組の塑性変形に関しては、適切な層せん断耐力分布と柱梁耐力比の骨組とすることによって塑性変形が一部の層や部材に集中する挙動を防ぐことが可能である。しかしながら、せん断耐力が同じで現行耐震規定では同じ耐震性能とされている骨組であっても、CFT 多層骨組の亀裂破壊損傷率が一部の層や部材に集中し CFT 柱の亀裂破壊損傷率分布と最大塑性変形分布が大きく異なる場合があり、せん断耐力の骨組設計条件のみによって良好な最大塑性変形分布と同時に良好な亀裂破壊損傷率の分布を実現することは難しい。

このため、CFT 多層骨組の各層損傷率を層方向に一様分布させて損傷集中を防ぐ条件を極限耐震設計の最適設計条件とし、これにコンクリート鋼管強度比の関数で表された鋼管亀裂発生条件式を適用することで、コンクリート鋼管強度比の層方向分布で表現した CFT 多層骨組の最適極限耐震設計条件を導いた。