柱消失後の骨組構造物の鉛直終局挙動と潜在的耐荷機構

ULTIMATE BEHAVIOR AND POTENTIAL RESISTANT MECHANISM OF FRAMED STRUCTURES AFTER MEMBER DISAPPEARANCE SUBJECTED TO VERTICAL LOAD

伊藤 拓海*, 福山 達也**
Takumi ITO and Tatsuya FUKUYAMA

Even if one or a set of structural member in building structures disappears suddenly due to accidental loads, the building should stand against vertical gravity loads, dead or live. This study investigates the structural redundancy and the effects of catenary action based on another resistant mechanism after failure mechanism formation. In this paper, the ultimate resistant mechanism of framed structures is investigated experimentally and analytically. The static loading tests have been conducted. From the comparison with analytical results, the non-linear push-down analysis shows good agreements with test result. Furthermore, the limit analysis based on the upper boundary theory is proposed.

Keywords : *Framed structure, Redundancy, Static vertical loading test, Push down analysis, Limit analysis*

骨組, 冗長性, 静的鉛直載荷実験, 弾塑性増分解析, 極限解析

1. はじめに

近年, 予想外の外乱や偶発的荷重により, 構造物は柱・梁などの構造躯体が甚大な被害を受け, 荷重伝達経路が消失し, その結果として建物が倒壊するという被害例が世界中で散見されている。一方で, 過去の建築構造物の地震被害例などに見るように, 構造躯体や接合部の破断, 座屈といった終局状態に達しても, 構造物のフェイルセーフ機構により倒壊を免れた例¹⁾や, 2001年世界貿易センタービルの同時多発テロでは, 旅客機が衝突して最終的には完全崩壊に至ったが, 構造躯体消失という最悪の事態に至り, かつ火災による高温化の過酷な状況下で数時間建ち続けたという見方もある²⁾。建築構造物は不静定次数が高く, 材料や部材の構造性能に関するばらつきを考慮して高い安全率が見積もられている。さらに, 構造部材の優れた靱性や変形能力を利用した塑性設計法が普及し, 構造物の変形能力を高めてそれを利用した設計が行われているため, 上記のような部材の消失や破断といった過酷な状況が, すぐに倒壊に結びつかないケースが散見されている。これらの冗長性は, 構造物の潜在的な性能の一つであるが, 顕在化させて積極的に評価し, 設計に取り組むことが検討されている³⁾。

文献⁴⁾では, 偶発的な荷重によって構造物のいくつかの部材が消失した場合に, 固定的積載荷重によって構造物が全体崩壊するか否かを, 構造物耐荷力の急激な減少を表す感度分析によって検討した。同文献で定義された部材感度 (Sensitivity Index) は, Frangopol らの

提案した冗長性指標⁵⁾の逆数に相当するものであり, 構造物耐荷力に対する部材の影響度や支配度を表したものである。この他にも, Feng⁶⁾らは, 骨組のある部材が消失した場合の骨組耐力と, 元の状態の骨組耐力の比を, 冗長性に関わる指標として定義している⁶⁾。Schafer⁷⁾らは, Feng⁶⁾らの定義に基づいて, 部材消失前後における座屈荷重係数の減少量を対象として, 冗長性に関わる検討を行っている⁷⁾。Paliou⁸⁾らは, 複数の部材が同時に損傷する事象のもとで, 構造物が崩壊しないための条件付確率を冗長性の指標として定義している⁸⁾。

以上の冗長性に関わる指標は, 図1に示すように, 健全な状態における骨組の耐力 $\lambda_0 P_0$ と, 部材が甚大な損傷を被った状態の骨組の耐力 $\lambda_d P_0$ との比較によって議論されている。

例えば, 文献⁴⁾の方法のように, 微小変形理論に基づく塑性解析は, 変形前の構造物の耐荷力と崩壊メカニズムを求めることができる。一方, 鉛直荷重を受ける弾塑性構造物の静的な大変形解析を行うと, 崩壊メカニズム形成後も荷重が増加することがある (図1)。これは, 崩壊メカニズム形成前の釣合では考慮していない別の耐荷メカニズムが発現するためである^{9)~12)} (図2)。Kim¹³⁾らは, 鉛直荷重を受ける骨組において, 梁軸力の鉛直分力の効果 (カテナリー効果) に注目し, 進行性崩壊の検討を行っている¹³⁾。

本研究では, 塑性解析から求める崩壊機構形成後に, 節点の移動によって別の耐荷機構が現れた場合, その機構に基づく耐力増分と

* 東京理科大学工学部第一部建築学科 講師・博士(工学)

** 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻
大学院生・学士(工学)

Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Tokyo University
of Science, B. Eng.

冗長性に関わる検討を行うことを目的としている。

部材消失後に、固定的鉛直荷重が塑性崩壊荷重を上回る場合、骨組は塑性崩壊する。これに対して、上述の塑性崩壊後の耐荷機構による耐力増分に期待することができる場合、このような崩壊を回避できる可能性がある。一方、塑性崩壊後の耐荷機構を考慮しても、耐力増分が期待できない骨組においては即座に崩壊に至る。すなわち、塑性崩壊後の耐荷機構による耐力増分の大きさにより、脆性的な終局状態を迎える骨組と、冗長性のある挙動を示す骨組が存在することが考えられる。

実際の建築構造物では、終局状態において部材の座屈、破断が生じる。さらに、接合部においても、接合要素（ボルト、溶接継目など）の破断などが生じる。これに対して、本研究では、図1,2に示すように、骨組力学としての終局耐荷機構に焦点をあて、塑性崩壊後から終局状態に至るまでの耐荷機構の推移に着目している。そのため、実際の建築構造物においては、上記の座屈や破断に起因した変形制限があるが、仮にこれらの限界状態を無視した場合、終局耐荷機構により耐力増分がどの程度得られるかに着目している。つまり、本実験により、図1に示すように、終局状態に至るまでの潜在的な骨格曲線を得ることを主たる目的としている。

本稿では、骨組の終局耐荷機構に着目して、図1に示すような脆性的な終局状態を回避するために、骨組が具備しておくべき条件に

ついて検討し、冗長性に優れた骨組の実現に向けた検討を行うことを目的としている。

2. 柱消失後骨組の静的鉛直載荷実験

2.1 実験概要

本研究では、部材消失後の骨組において、鉛直荷重に対する終局挙動について実証的な検討を行うことを目的とした実験を行った。ここでは、柱消失後の骨組を想定し、図3に示すように1層ならびに2層規模の2スパンラーメン骨組の試験体模型を製作し、静的鉛直載荷実験を実施した。

2.2 試験体と使用鋼材の機械的性質

試験模型は、鋼板（SS400, $t=32\text{mm}$ ）より切り出して柱ならびに梁部材を製作し、柱梁接合部は図3に示すように完全溶込み溶接によって製作した。部材断面については、柱が $32\text{mm} \times 60\text{mm}$ 、梁が $32\text{mm} \times 30\text{mm}$ とした。試験体の使用鋼材の機械的性質を表1に示す。また、柱と梁の塑性耐力を表2に示す。

2.3 荷重方法

図4に示すように、万能試験機により圧縮載荷実験を行った。試

図1 部材消失後骨組の荷重変形関係

図2 塑性崩壊後の節点移動を考慮した耐荷機構⁹⁾

(a) 1層骨組の試験体 (単位: mm)

(b) 2層骨組の試験体 (単位: mm)

図3 試験体の構成と寸法

試験機のカロスヘッドにナイフエッジを設置し、試験体中央部に集中鉛直荷重を与えた。図4に示すように、試験体の柱脚部を板厚32mmの鋼材を3枚重ねたもので挟み込み、高力ボルトで固定した。

実験は、1層試験体についてはナイフエッジの台座が試験体の梁に接触する直前まで加力を行った。また、2層試験体については、試験機の変位制御限界まで加力を行った。その結果として、1層試験体においては柱脚が曲げ降伏するまで載荷することができたが、2層試験体において柱脚は弾性範囲であった。

2.4 計測計画

計測について、荷重は試験機のロードセルより検出した。荷重点の鉛直変位は、棒状変位計によって計測した。各階床位置における水平変位は、図5のようにレーザー変位計によって計測した。また、図5に示す位置に貼付したひずみゲージより断面の最外縁ひずみを求め、平面保持を仮定して断面のひずみ分布を求め、さらに材料試験結果の応力ひずみ曲線より断面の応力分布を求めた。得られた応力分布より、試験体の曲げモーメントならびに軸力を求めた。

2.5 実験結果

実験結果において、鉛直荷重－梁の部材角関係を図6、梁軸力と

表1 使用鋼材の機械的性質

降伏強さ	引張強さ	破断伸び	ヤング係数
241N/mm ²	406N/mm ²	35%	203GPa

表2 部材耐力

部位	曲げ耐力	降伏軸力
柱	6.77kNm	451kN
梁	1.69kNm	225kN

図4 試験体のセットアップ（2層骨組の場合）

図5 計測図（2層骨組の場合）

梁の部材角との関係を図7、鉛直荷重と柱の水平部材角との関係を図8、柱頭と柱脚のモーメントと梁の部材角との関係を図9にそれぞれ示す。なお、モーメントは、柱は骨組の内側が引張となる向きを正とし、梁は下側が引張となる向きを正とする。軸力は、引張を正とする。

耐力機構の推移を示すため、弾性範囲（(A)点）、梁端の塑性ヒンジによる塑性崩壊機構形成時（(B)点）を図10に示す。また、終局状態として、1層骨組の場合は柱脚が降伏モーメントに達した時点、2層骨組の場合は載荷を終了した時点（(C)点）の応力図と変形図を図10に示している。2.4節の方法によりひずみゲージからモーメン

(a) 1層骨組

(b) 2層骨組

図6 鉛直荷重－梁の部材角関係

(a) 1層骨組

(b) 2層骨組

図7 梁軸力－梁の部材角関係（左：実験、右：増分解析）

トと軸力を求め、図 10 に合わせて示している。なお、ひずみゲージが剥がれて曲げモーメントを求めることができなかった場合については、節点まわりのモーメントの釣合いより求め、同図の破線で示している。さらに、1 層骨組の荷重変位関係や梁軸力－梁部材角関係の結果において、その勾配が大きくなった点を(D)点とする。これらの各時点における実験結果を図 6～9 に合わせて示す。また、実験終了後の試験体の様子を図 11 に示す。

図 6 の結果より、(B)点において梁端の塑性ヒンジ形成による塑性崩壊後、ひずみ硬化によって荷重が増分するが、その後剛性が大きくなって荷重が増加する様子が確認できる。この第 3 勾配に関して、1 層骨組の試験体においては、図 7 (a)の(D)点以降で梁軸力と梁部材角関係の勾配が増加するが、この時点と対応している。さらに、

図 8 鉛直荷重－柱の水平部材角関係
(左：実験，右：増分解析)

図 9 柱頭・柱脚モーメント－梁の部材角関係
(左：実験，右：増分解析)

図 10 実験結果における応力図と変形図の推移
(単位：モーメント[kN m]，軸力[kN] (左図)，変位[mm] (右図))

図 9 (a)の(D)点以降で柱脚モーメントが増加する時点と対応していることが確認できる。

また、図 8 の結果より、荷重変位曲線上の 2 次勾配において柱の水平変位が急激に増加している様子が確認できる。さらに、2 層骨組の試験体においては、2 層部の層間変形が 1 層に比べて非常に小さく、水平変形していない様子が確認できる。これは、図 11 の載荷後の試験体写真と対応していることが確認できる。

以上の崩壊プロセスならびに耐荷機構の推移は、第 2 勾配においては塑性ヒンジ部の梁のひずみ硬化による荷重増分であるが、その後、荷重点の鉛直変位が増加して梁軸力が増加し、柱の水平耐力によって荷重点の鉛直分力が増加している。

3. 鉛直静的弾塑性増分解析と耐荷機構の推移

3.1 鉛直静的弾塑性増分解析による解析的検討

図 3 の骨組に対して、弾塑性ジョイントモデル（柱梁端）による静的弾塑性解析プログラム^{注1)}を用いて荷重増分解析を行う^{14)~16)}。これにより、実験では求めることができなかった耐荷機構の推移に関して、解析的な検討を行うことを目的としている。

3.2 鉛直静的弾塑性増分解析の概要

同プログラム^{注1)}の手法は、以下の解析仮定をしている（図 12）。

- 1) 柱・梁部材を弾性要素と複数の履歴パネからなる弾塑性ジョイント部分で置換する
- 2) 弾塑性ジョイントは塑性ヒンジが生じやすいところに置く
- 3) 弾塑性要素は有限の長さを持つ
- 4) 弾塑性要素における短軸履歴パネによって部材の軸力・2 軸曲げの弾塑性挙動を表現する。これにより、軸力-曲げの耐力相関が自動的に考慮される

(a) 1 層骨組 (b) 2 層骨組

図 11 実験終了後の試験体の様子

図 12 弾塑性ジョイント要素の成分^{注1)}

5) せん断、ねじりモーメントに対する要素は、せん断パネ、ねじり回転パネによってそれぞれ独立にモデル化する

6) 弾性要素については通常の弾性はり要素を用いる

7) 材料の非線形性は、弾塑性要素の両端面を結ぶ複数の軸パネの復元力-変位関係から得られる履歴特性の形で与える

8) 節点移動による鉛直荷重の影響、すなわち $P-\Delta$ 効果を考慮する

3.3 解析モデルと条件

本稿では、平面骨組を対象として 2 次元の弾塑性増分解析を行う。ここで、実験結果の終局状態において、梁軸力の水平分力により柱脚部モーメントが増加する際、柱脚部の固定治具に変形が確認された。そこで、図 13 に示すように、解析モデルは柱脚部を回転パネでモデル化し、柱・梁の部材端には弾塑性ジョイントを設けて、平面モデルによってモデル化する。なお、柱脚パネは弾性範囲とし、実験結果と一致するように回転パネ剛性を調整した。1 層骨組の場合については、図 6 (a)に示すように(D)点まで実験結果と一致するように回転パネの剛性を調整した。

弾塑性ジョイント部における各短軸履歴パネの復元力特性は、材料試験結果の応力ひずみ曲線に基づいて Tri-linear 型でモデル化する。弾塑性ジョイント部の断面は、図 14 に示すように 10 本の弾塑性ジョイントパネで近似した。各短軸履歴パネの耐力は、図 14 で示される各パネの支配面積に材料試験結果の応力度を乗じて求めた。また、軸剛性は軸パネの長さ 20mm（柱部材長さの 5%、梁部材長さ 3.3%）として求めた。ここで弾塑性ジョイントの長さに関して、部材の塑性化領域の広がりやその長さに応じて決定する方法も考えられる。文献¹⁵⁾では、材長の 15%程度を塑性化領域の長さの上限値とし、また弾塑性ジョイントが長くなると部材耐力や部材全体の弾性変形にも誤差を生じることなどを勘案し、材長の 10%としている。また文献¹⁷⁾では、マルチスプリングの長さは短めに設定することが

図 13 解析モデル

図 14 弾塑性ジョイント部の断面のモデル化

好ましいが、短すぎると収束安定性が悪くなることが指摘されている。さらに文献¹⁷⁾では、部材の反曲点に応じて弾塑性ジョイントの必要長さを導いている。本稿では、これらの条件を勘案して上記の長さを設定した。なお、ジョイント長さを変化させて解析を行ったが、終局耐力や耐荷機構の推移に有意差がないことを確認しており、本稿では上記の条件の解析結果を示している。

弾塑性増分解析過程において、曲げ系から軸力系へ移行する際、曲げによる圧縮が引張に転じることがある。そこで、軸パネに対してスケルトン・シフト・モデル^{14), 18)}と呼ばれる履歴則を適用する。このモデルは、予め正側負側に設定したスケルトンを、それぞれ逆方向のスケルトン上で過去に経験した塑性変形に比例させてシフトさせる。またスケルトンから除荷が起こり、逆側のスケルトンに到達するまでの除荷曲線に対して、図15のようにRamberg-Osgoodモデルで用いられる連続的な関数でモデル化する。この履歴則は、紡錘型の履歴曲線を示す部材の復元力特性モデルとして採用されているが、スケルトンをシフトさせる際の比例常数(シフト係数) ψ を調整することにより、様々な履歴モデルを表現することができる。例えば、 $\psi=1$ とすると軟化部分を考慮しない加藤・秋山モデル¹⁹⁾に一致し、 $\psi=2$ として軟化部分の関数式を線形ないし区分線形に変更すると単軸等硬化化モデル、 $\psi=0$ としてノーマル・パイリニア・モデルや進行スリップ・モデルなども表現することができる。軟鋼の繰返し載荷実験結果に適用した例では、シフト係数 $\psi=0.65 \sim 0.85$ 、丸み係数 $r=5$ を用いて実挙動を再現している^{15), 16)}。また、極低降伏点鋼を用いた履歴型ダンパーの復元力特性に適用した例では、丸み係数8、シフト係数 $\psi=0.9^{18)}$ 、 $\psi=0.97^{20)}$ 、 $\psi=0.65^{21)}$ が採用されている。さらに文献¹⁵⁾では、シフト係数は軟鋼の実験結果との適合度に大きな影響を与えるが、丸み係数の選択については、ある範囲で変動しても影響が大きいことを示している。以上より、本稿ではシフト係数 $\psi=0.5$ 、丸み係数5とした。なお、シフト係数0.4~0.9、丸み係数1, 5とした場合の解析を行ったが、終局耐力や耐荷機構に有意差がないことを確認している。

3.4 実験結果と解析結果の比較と考察

弾塑性増分解析結果において、鉛直荷重-梁の部材角関係を図6、梁軸力と梁の部材角との関係を図7、鉛直荷重と柱の水平部材角との関係を図8、柱頭と柱脚のモーメントと梁の部材角との関係を図9に、実験結果と比較して示す。

図6の結果より、弾塑性増分解析は、(D)点まで実験結果の荷重変位関係を追跡できていることが確認できる。図7の結果より、梁端

図15 除荷時曲線のモデル^{14), 18)}

降伏による崩壊モード形成後、梁軸力が増加する傾向を追跡できている。図8の結果より、2層骨組の場合は1層の柱の水平変位が増加し、実験結果と同様の崩壊機構によって終局状態を迎えている様子が確認できる。図9の結果より、曲げ応力分布は実験結果と同様の傾向を示していることが確認できる。

ここで、図6(a)に示す1層骨組の鉛直荷重-梁の部材角関係の結果において、(D)点以降、弾塑性増分解析は実験結果と比較して変形が大きくなっている。同図の結果では、(D)点までを追跡できるように柱脚回転パネを調整したが、これに対して回転剛性を大きくすると柱の水平変位が小さくなり、梁の部材角が小さくなる。また、回転剛性を小さくすると梁の部材角が大きくなる。以上の検討結果より、柱脚回転パネを調整することで終局状態における骨組の変位が異なり、(D)点以降も荷重変位関係を追跡できることを確認している。ただし、塑性崩壊後の耐荷機構の推移や応力図の傾向に大差はなく、本解析手法によって終局状態と終局耐力を精度よく追跡できると考えられる。

2層骨組の実験では、試験機の変位制御限界に達したため、試験体の終局状態まで加力することができなかった。これに対して、増分解析においては、実験では載荷できなかった大変形領域まで解析を行い、1層の柱脚が曲げ降伏して終局状態に達したことを確認している。

以上より、弾塑性増分解析によって実験結果を追跡できているとともに、図10の崩壊プロセスを解析によって追跡できる。

4. 塑性解析による鉛直終局耐力評価

4.1 塑性解析による終局耐力評価の概要

文献⁹⁾では、下界定理に基づく極限解析法のひとつである Compact Procedure 法(以下 CP 法)を用いて崩壊機構を数値演算によって求め、その結果から崩壊直前の変形を計算し、新たな耐荷機構の発現を探索する一連の解析法を提案した。得られた耐荷機構に対して、上界定理に基づく塑性解析によって、終局状態における耐力と崩壊機構を追跡できる可能性について検討した^{9), 10), 12)}。前章のように、静的弾塑性解析を行えば、崩壊時の変形と崩壊機構形成後の耐荷機構を追跡することが可能であるが、文献⁹⁾の手法は塑性解析法の新たな可能性を検討したものである。

文献¹¹⁾では、多層骨組の鉛直終局耐荷機構について解析的な検討を行った。同文献によると、梁端塑性ヒンジ形成による塑性崩壊機構を形成後、梁軸力によるカタナリー効果によって柱消失層の柱が水平崩壊し、終局状態に至ることを示した。これは、本稿第2章、第3章と同様の結果である。

そこで、文献⁹⁾の手法により鉛直荷重を受ける骨組構造物の終局挙動を追跡してその耐力を評価し、実験結果ならびに解析結果との比較、検討を行う。ここでは、終局状態における崩壊モードが柱消失層の水平崩壊によるものと仮定し、極限解析によって評価する。

4.2 終局状態における崩壊モードと解析モデル

実験結果ならびに弾塑性増分解析の結果において、柱消失層の水平崩壊によって終局状態を迎えることを確認した。そこで、梁端の曲げ降伏による崩壊機構形成後、図16の崩壊モードによる終局状態を仮定し、終局耐力を求める。なお、塑性ヒンジの曲げ耐力 M_{pc} 、 M_{pb}

は、塑性断面係数に材料試験結果の降伏強さを乗じて求める。また、実験結果ならびに弾塑性増分解析の結果で、塑性崩壊後に梁軸力が増加することが確認されたが、本章の塑性解析においては耐力相関の影響は考慮しないものとする。

ここで、実験結果ならびに弾塑性増分解析結果において、梁端降伏による崩壊機構形成時には、柱の水平変位はほぼ確認されなかった。しかし、その後の梁軸力の増加により、終局状態においては柱の水平変形が大きくなる様子が確認された。そこで、梁端降伏による崩壊機構形成時の柱の水平変形は無視するが、図 16 に示すように終局状態においては柱の応力と変形が図 17 のような状態になるものと仮定する。また、塑性ヒンジ以外の部材は剛体とし、図 16、17 の機構を仮定することで、荷重点の鉛直変位を求めることができる。これにより、図 16 の塑性解析モデルより、終局耐力を求めることが可能となる。

実験結果において、柱脚部の治具に回転角が生じたため、この結果に基づき、前章の弾塑性増分解析では柱脚部に弾性回転バネを設けた。その結果、実験結果を精度良く追跡できることを確認した。一方、本章の塑性解析法について、崩壊機構形成後の耐荷機構に対する汎用的な耐力評価法としての有効性及適用性を検討するにあたり、柱脚固定とした場合の終局挙動と耐力に対して検証する。この場合、実験結果を参照することができないため、前章の弾塑性増分解析法により柱脚固定の場合の結果を求めて、本章の塑性解析結果

との比較、検討を行う。

4.3 解析結果の比較

図 16、17 の解析モデルに基づき、1 層骨組ならびに 2 層骨組の終局耐力と、柱の水平変位 δ_p 、梁の部材角 δ_H/L を求め、柱脚固定とした場合の弾塑性増分解析と塑性解析による解析結果を表 3 に示す。

表 3 の結果より、解析結果による終局耐力は、弾塑性増分解析結果と比較して 1 層骨組の場合 0.97 倍、2 層骨組の場合 0.98 倍となっている。これより、図 16、17 の解析モデルによる終局耐力は、増分解析の結果を比較的精度良く評価できていることが確認できる。また、骨組の変形として、柱の水平変位ならびに梁の部材角について塑性解析モデルは増分解析の結果を下回っている。ここで、文献¹⁷⁾では弾性部材の曲げ剛性や軸剛性は、弾塑性ジョイントの長さや部材の反曲点に応じて補正する必要がある、補正しない場合は曲げ剛性が小さく評価されることを示している。本章の弾塑性増分解析では弾性部材の剛性の補正を行っていないため、増分解析結果において柱の水平変位が大きくなったものと考えられる。

(a) 1 層骨組の場合

(b) 2 層骨組の場合

図 17 終局状態における柱の応力状態と水平変位

表 3 結果の比較

(a) 1 層骨組の場合

	増分解析	塑性解析	比較※
終局耐力	14.46kN	14.01kN	0.97
柱の水平変位	3.79mm	3.44mm	0.91
梁の部材角	0.123rad	0.110rad	0.89

※比較は、(塑性解析／増分解析)の比率を示す。

(b) 2 層骨組の場合

	増分解析	塑性解析	比較※
終局耐力	27.82kN	27.30kN	0.98
柱の水平変位	2.62mm	1.91mm	0.73
梁の部材角	0.101rad	0.080rad	0.79

※比較は、(塑性解析／増分解析)の比率を示す。

(a) 1 層骨組の場合

(b) 2 層骨組の場合

図 16 鉛直終局耐荷機構と塑性解析モデル

以上より、部材の面外挙動や座屈、破断などの不安定挙動が生じない場合、鉛直荷重を受ける骨組が梁端に塑性ヒンジを形成した後、図 16, 17 の解析モデルによって終局挙動ならびに終局耐力を評価することができる。

5. 結び

本研究では、部材消失後の骨組において、鉛直荷重に対する終局挙動について明らかにするために実験ならびに解析的な検討を行った。以下に結論を示す。

1. 1 層 2 スパンならびに 2 層 2 スパンの骨組において、1 層の中央柱が消失した後の状態を想定し、試験模型を製作した。
2. 圧縮荷重試験を行い、梁端の塑性ヒンジ形成による崩壊機構を形成後、荷重点の変位が進むに従って柱の水平変位、梁軸力、柱脚モーメントの増加により鉛直分力が増加する様子を確認した。
3. これにより、鉛直荷重を受ける柱消失後骨組の終局挙動ならびに耐荷機構の推移を実験によって明らかにした。すなわち、梁端曲げ降伏の崩壊機構形成後に、荷重点の移動によって梁軸力が増加し、当該層の柱の水平力が増加する。最終的に、柱脚に塑性ヒンジを形成して当該層の柱が水平崩壊し、骨組の終局状態を迎える。
4. 弾塑性増分解析を行い、実験結果を追跡できることを確認した。2 層骨組の実験では、試験機の変位制御限界に達したため試験体の終局状態まで載荷できなかったが、増分解析によって 1 層骨組と同様、柱消失層の柱脚が塑性ヒンジを形成して終局状態に達することを確認した。
5. 上記の耐荷機構の推移により、柱の水平耐力が、梁軸力の増加を生み、荷重点の鉛直分力として骨組の鉛直耐力の増加をもたらすことを確認した。
6. さらに、実験ならびに増分解析の結果を考慮して、終局状態における崩壊モードが柱消失層の水平崩壊によるものであると仮定し、節点移動を考慮した解析モデルに基づき、終局耐力を求めた。
7. 結果として、増分解析結果における終局耐力に対して、1 層骨組では 0.97 倍、2 層骨組では 0.98 倍の予測精度となっており、概ね精度良く評価できることを確認した。

謝辞

本稿の実験は、平成 22 年度東京理科大学特定研究助成金（研究代表者：伊藤拓海）より助成をいただきました。また、実験の実施にあたり、東京理科大学学部生 井上瑛文君、木藤陽平君、森健士郎君、元・東京理科大学学部生 涌井将貴君の協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会、阪神淡路大震災調査報告、1997.10
- 2) FEMA-403, World Trade Center Building Performance Study, Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations, 2002.5

- 3) 日本鋼構造協会、崩壊制御設計ガイドライン、2005
- 4) 伊藤拓海、大井謙一、李正林：鉛直荷重を受ける骨組構造の冗長性に関わる感度解析、日本建築学会構造系論文集、第 593 号、pp.145-151、2005.7
- 5) Frangopol, D.M. et al: Effects of damage and redundancy on structural reliability, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.113, No.7, pp.1533-1549, 1987.7
- 6) Feng, Y. S., Moses, F.: Optimum design, redundancy and reliability of structural systems, Computers and Structures, 24, pp.239-251, 1986
- 7) Schafer, B. W., Bajpai, P.: Stability degradation and redundancy in damaged structures, Engineering Structures, 27, pp.1642-1651, 2005.9
- 8) Paliou, C. Shinozuka, M., Chen, Y.N.: Reliability and redundancy of offshore structures, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.116, pp.359-378, 1990.2
- 9) 伊藤拓海：崩壊機構形成後の節点移動による変形を考慮した骨組構造物の塑性解析法、第 57 回理論応用力学講演会梗概集、2008.6
- 10) 福山達也、伊藤拓海：柔性型骨組構造物の潜在的な構造物耐力力に関する研究、その 3 崩壊機構形成後の耐荷機構を考慮した場合の骨組構造物の耐力力、2009 年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp.145-151、2010.2
- 11) 涌井将貴、福山達也、伊藤拓海：柔性型骨組構造物の潜在的な構造物耐力力評価法に関する研究、その 5 多層骨組構造物における崩壊機構形成後の終局挙動、2010 年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp.201-204、2011.2
- 12) Takumi ITO, Tatsuya FUKUYAMA: A Potential Strength and Ultimate Behavior of Framed Structures Considering Catenary Effects after Failure Mechanism Formation Subjected to Vertical Load, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.59, pp.29-38, 2011.2
- 13) Jinkoo Kim, Dawoon An: Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action, The Structural Design Tall Special Buildings, 18, pp.455-465, 2009
- 14) 孟令樺、大井謙一、高梨晃一：鉄骨骨組地震応答解析のための耐力劣化を伴う簡易部材モデル、日本建築学会構造系論文集、第 437 号、pp.115-124、1992.7
- 15) 陳以一、大井謙一、高梨晃一：3 方向変動軸力を受ける箱型断面鋼柱の弾塑性挙動、日本建築学会構造系論文集、第 447 号、pp.139-148、1993.5
- 16) 陳以一：部材の複合変動応力状態を考慮した鋼構造骨組の弾塑性挙動に関する研究、東京大学学位論文、1993.11
- 17) 石井正人、斉藤安生、浅野美次、堀井昌博：マルチスプリングモデルの特性、その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.383-386、1997.7
- 18) 大井謙一、李昇宰、西田明美：履歴型ダンパー付鉄骨架構の地震応答性状、日本建築学会構造系論文集、第 538 号、pp.171-178、2000.12
- 19) 加藤勉、秋山宏：鋼構造部材の耐力（その 3）、日本建築学会論文報告集、第 151 号、pp.15-20、1968.9
- 20) 孟令樺、田中清、三山剛史、平澤光春：極低降伏点鋼を用いた制震構造に関する研究-その 4. せん断型制御ダンパーの復元力特性モデル及びそれを用いた地震応答解析-、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.1045-1046、1994.9
- 21) 伊藤拓海、大井謙一、嶋脇興介、李王順：履歴型ダンパー付観測用既存鉄骨造骨組の地震応答実験、日本建築学会構造系論文集、第 556 号、pp.161-168、2003.4

注

- 注1) 本稿第 3 章で使用した弾塑性増分解析プログラムは、文献^{14)~16)}で採用されており、使用方法等については以下に整理されている。
大井謙一、他：鉄骨構造物の弾塑性大変形解析による耐震性向上に関する研究—弾塑性ジョイントモデルによる静的解析プログラム(JULIET)—、1992.3

(2011年9月7日原稿受理、2011年12月6日採用決定)