

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：21401
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760529
 研究課題名(和文) サブストラクチャ疑似動的実験を用いた非線形弾性骨組の残留変形に関する研究
 研究課題名(英文) STUDY ON RESIDUAL DEFORMATION OF A NONLINEAR ELASTIC STRUCTURAL FRAME OBTAINED BY SUBSTRUCTURE PSEUDO-DYNAMIC TEST
 研究代表者
 小幡 昭彦(OBATA AKIHIKO)
 秋田県立大学・システム科学技術学部・助教
 研究者番号：30433147

研究成果の概要(和文)：

本研究の目的は、非線形弾性復元力特性と呼ばれる特殊な復元力特性を有する鋼構造骨組を対象にサブストラクチャ疑似動的実験を行い、非線形弾性復元力特性を有する骨組が大地震時においても被害が少なく、損傷を軽微に留められることを確認することである。実験は従来の剛接合柱梁接合部を有する架構モデルと非線形弾性復元力特性を有する架構モデルの比較を行い、その結果より非線形弾性復元力特性を有する架構は残留変形が少ないということが確かめられた。

研究成果の概要(英文)：

The purpose of this study is to clarify that the damage due to Level 2 earthquake ground motions of the steel structural frame with a nonlinear elastic hysteresis is small obtained by substructure pseudo-dynamic test. It is compared the steel structural frame with nonlinear elastic joint and the steel structural frame with rigid joint. As the result of test, That residual deformation is smaller the structural frame with non-linear elastic joint than the structural frame with rigid joint.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：建築構造，鋼構造，非線形弾性復元力特性，サブストラクチャ疑似動的実験，残留変形

1. 研究開始当初の背景

本研究の目的は、非線形弾性復元力特性と呼ばれる特殊な復元力特性を有する鋼構造骨組を対象にサブストラクチャ疑似動的実験を行い、非線形弾性復元力特性を有する骨組が大地震時においても被害が少なく、損傷を軽微に留められることを確認することである。

図1は弾性関節接合を柱梁接合部に適用した場合の概念図である。図1の場合、梁は柱を貫通する高強度で弾性範囲が広い線材（接合ボルト）で圧着接合される。接合ボルトに

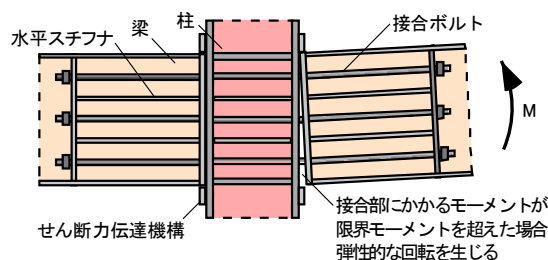


図1 弾性関節接合の概念図

は弾性限界耐力の半分程度の初期張力が加

えられる。中程度以下の地震に対しては、接合ボルトの初期張力により接合部は剛接合として働く。さらに強い地震に対しては、接合ボルトの高弾性特性を活かして、柱と梁端の圧着面における離間に伴う回転を生じることになるが、その場合でも、部材の降伏は離間に伴い圧縮力を伝達し回転軸となる部位の極めて狭い範囲に限定される。なお、接合ボルトは常に弾性範囲にとどまるものとする。

非線形弾性復元力特性を目指す主な目的は、大地震を受けた際にも柱や梁などの主要部材が弾性範囲内にあることを保証できる変形限界値を大きくすることで、構造物全体としての損傷を軽微な範囲にとどめ、地震前の状態に復旧することが容易となるように変形領域を広げることにある。従来の柱梁接合部では、構造物の耐震性能をエネルギー吸収能力に期待し、接合部の塑性変形を許容している。その結果、骨組には残留変形が生じ、建物の再利用が困難になる可能性が高い。一方、弾性関節接合ではエネルギー吸収に関しては、交換可能な部材の塑性化や制振装置を積極的に用い、柱・梁等の主要構造部材には、剛性・耐力的な要素のみ負担させ、構造部材の降伏による残留変形を防止する。柱梁要素や接合部は弾性範囲内にとどめられるために、地震被災後の建築物の再利用が可能となる。原点指向型非線形弾性復元力特性は、山田らによって提案された「弾性関節接合」の特徴的な復元力特性である。

2. 研究の目的

図2に本研究で目指す非線形弾性復元力特性の概要を示す。接合部における非線形弾性復元力特性は、接合部圧着面が弾性的に離間し、回転を伴う変形をおこすことで剛性に変化する。中程度の地震においては、接合部は離間せず、剛接合として挙動する。入力地震動レベルが大きくなるにつれて、接合部モーメントが大きくなり、ある限界モーメントに差し掛かった時点で接合部は離間する。離間後は接合部の回転に従い接合部モーメントは大きくなるが、その時点で梁及び接合ボルトなどの接合部の構成部品が弾性範囲内であれば、離間・回転を生じても接合部は弾性挙動をし、除荷時に原点に戻り残留変形は生じない。この離間を生じる限界荷重を離間荷重、離間によって生じた回転角を離間回転角と呼称する。図3に接合部回転バネのモデル化の概念を示す。

非線形弾性復元力特性は、極大地震時において、梁部材のフランジ圧縮塑性化を許容する。その場合においても接合ボルトは弾性とし、接合面における応力伝達を接合ボルトを介して行い、架構の脆性的な崩壊を防止する。これまでの研究で、本研究の中核をなすサ

ブストラクチャ擬似動的実験の一次実験がすでに行われており、その実験結果より、実験システムの精度向上とさらなる追加検討が必要であると判断される。本研究によりサブストラクチャ擬似動的実験について実験システムを改良・確立し、その後、非線形弾性復元力特性を有する鋼構造骨組について残留変形という観点から更なる考察を行った。

3. 研究の方法

(1) 実験対象架構概要

図4に実験対象架構モデルを示す。対象架構は9層1スパンの鋼構造一構面とする。架構モデルは、各層の柱梁接合部および柱脚接合部に弾性関節をモデル化した非線形弾性回転バネを有する非線形弾性架構モデルに加え、各層の柱梁接合部および柱脚接合部の非線形弾性回転バネを除いた剛接合モデルの二種類とする。試験体に置き換えて実験を行う柱梁接合部は図4中の第一層梁両端のA接合部、B接合部の2部分である。架構荷重は、床単位荷重を 7.0kN/m^2 として算出し、各層の重量は 580kN 、構面の総重量は 5220kN である。減衰は $h=0.05$ とした。

表1に入力地震動レベルと接合部の挙動目標を示す。入力地震波はEL-CENTRO NS波の主要動となる6.4秒間を行った後、25秒ま

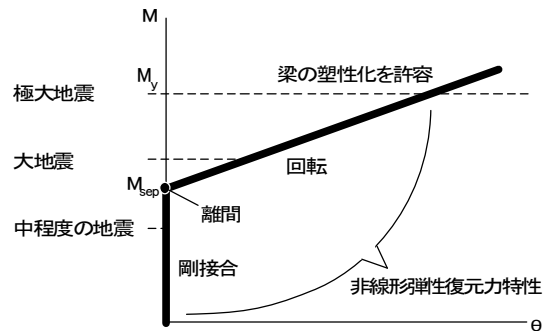


図2 非線形弾性復元力特性の概要

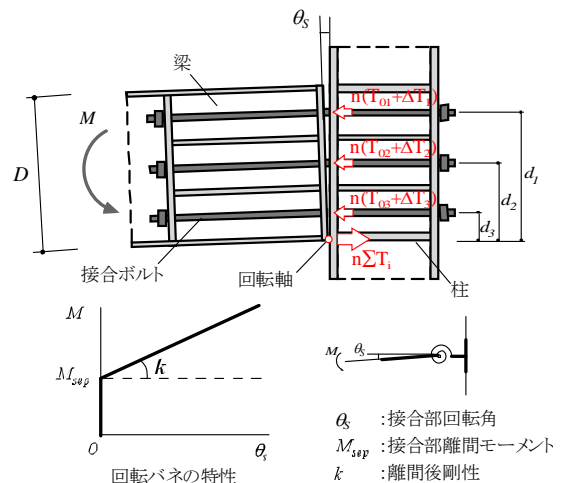


図3 非線形弾性接合部回転バネのモデル化

で無入力時間を継続した。時刻を 0.01 秒とする。本実験では、それぞれ主要動の入力地震波の最大速度を 25cm/s, 50cm/s に基準化し、連続して架構モデルおよび試験体に入力する。以下、表 1 の通り、入力地震波の最大速度を 25 m/s, 50cm/s に基準化した擬似動の実験サイクルを RUN1, RUN2 と呼称する。実験サイクル間の各変位値の取り扱いについては、RUN1 終了時において試験体に荷重されている荷重をいったんゼロに戻し、その時の変位値を初期値として RUN2 を開始している。接合部の挙動目標は、RUN1 では離間をしない剛接合とし、RUN2 において離間・回転を生じても架構全体としては弾性範囲に収め、接合ボルトを弾性範囲に収めることとした。

(2) 試験体概要

図 5 に荷重装置概要、図 6 に試験体概要を示す。試験体は架構モデルの 1/2 相当を想定し、梁に H-250×125×6×9, 柱に H-300×300×10×15 を使用する。架構モデルに対応するように、接合部に非線形弾性復元力特性を有する試験体と溶接接合による剛接合試験体の 2 体を作成し比較する。梁は図 6 に示すように鉛直縦置きに設置し、横置きされた柱に接合される。柱は柱抑え治具及びアンカーボルトにて試験床に固定される。梁上端を荷重梁に固定し、試験体梁上端に水平変位および回転角を強制する。各ジャッキに取り付けてあるロードセルより、図 4 の架構モデル試験体部分における梁せん断力および中間節点側モーメントを計測する。非線形弾性試験体は 6 本の PC 鋼棒（接合ボルト）にて圧着接合される。PC 鋼棒の張力はひずみゲージを貼付することにより計測する。接合部の回転中心となる梁フランジ上下端部には、離間回転時に圧縮応力が集中すると考えられるので、補強が必要である。本実験では、接合部回転中心の補強として、接合部圧着面から 200mm まで梁フランジに圧縮支点補強プレートをフランジ面に全周溶接することによって補強する。接合部の離間によって生じる回転は、図 6 の A 部分拡大図に示すように、接合部近辺のフランジ位置に 2 本の変位計を取り付け、その変位計の計測変位の差を変位計の間隔で除することで計測する。表 2 に本実験で使用する試験体梁と PC 鋼棒の材料特性を示す。

試験体に導入する初期張力は、PC 鋼棒をカプラーで延長し、梁上端に設置したジャッキを使用して緊張し、ナットを調整することで導入する。導入時張力量は PC 鋼棒に添付したひずみゲージから読み取る。本試験体では、離間荷重を高め確実に確保することを目的として、梁上下段 PC 鋼棒に 0.2% オフセット耐力の 50% である 70kN(2600 $\mu\epsilon$)、梁中段 PC 鋼棒に 0.2% オフセット耐力の 70% である

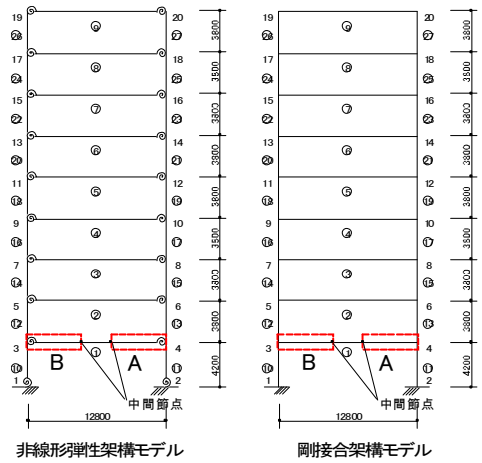


図 4 実験対象架構モデル

表 1 入力地震動レベルと接合部の挙動目標

	基準速度	地震の規模	接合部の挙動目標
RUN1	25cm/s	レベル1中地震	剛接合
RUN2	50cm/s	レベル2大地震	離間回転を許容

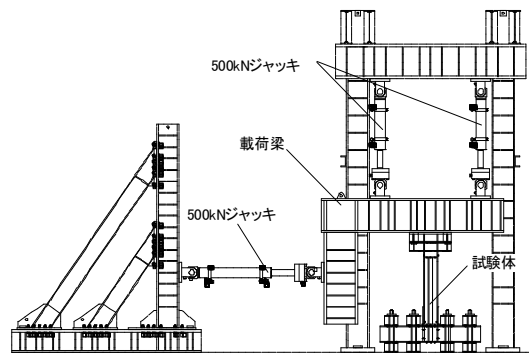


図 5 荷重装置概要

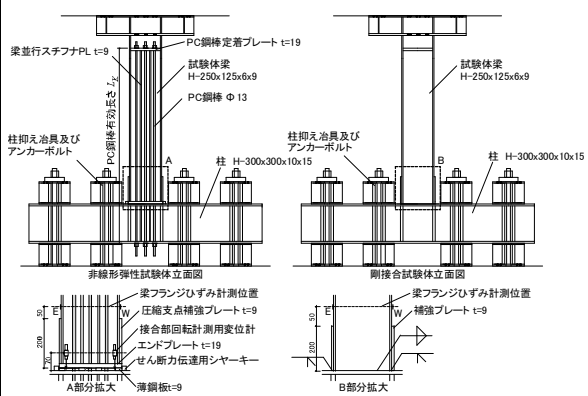


図 6 試験体概要

表 2 試験体梁と PC 鋼棒の材料特性

	断面積 (mm ²)	断面二次 モーメント (mm ⁴)	ヤング係 数 (N/mm ²)	降伏応力 度 (N/mm ²)	降伏ひず み度 ($\mu\epsilon$)	0.2%オフ セット耐力 (kN)	引張強さ (N/mm ²)	最大引張 荷重 (kN)
試験体梁	3697	3960x10 ⁴	2.05x10 ⁵	351	1712	522	1137	151
PC鋼棒	132			1062	5180	141	1137	151

98kN(3600 $\mu\epsilon$)の初期張力を目標に導入する。目標初期張力より計算された試験体の離間モーメント M_{sep} は 63.8kNm(架構モデル上では 1722kNm)であり、試験体梁縁降伏モーメントの 57.3%に相当する。なお、初期張力導入に当たっては、各試験体ともに目標初期張力に誤差 ± 5.0 kN 程度で導入することができた。

(3) 実験システムおよび加力装置

本実験システムは 4 台の PC を並列に使用する。応答計算用 PC は架構モデルの応答解析を行い、各試験体の制御用 PC に実験対象部分を含む応答計算の結果より得られた次ステップの試験体目標変位を送信する。各試験体の制御用 PC は加力用コントローラ及びポンプユニットと連動し、応答計算で得られた目標変位まで試験体の載荷を行う。その後、各ジャッキに取り付けられているロードセルの値より目標変位時における試験体の復元力を算出し、制御用 PC を通じて応答計算にフィードバックされる。同時に、試験体に取り付けられたひずみゲージ、変位計の値を計測用 PC に取り込む。各 PC 間は LAN (TCP/IP)によって接続され、計測データは応答計算用 PC および計測用 PC いずれかに蓄積される。

サブストラクチャ擬似動の実験における制御プログラムの手順を以下に示す。

1. あるステップにおいて応答計算用 PC によって目標変位(梁端中間節点における鉛直変位及び回転角)の計算を行う。
2. 応答計算用 PC より各制御用 PC に目標変位を伝達する。
3. 制御用 PC は加力システム(コントローラおよびポンプユニット)を制御し、目標変位まで加力を行う。
4. 目標変位に到達した時点での各荷重(水平ジャッキおよび上部鉛直ジャッキ 2 本の荷重より柱梁接合部および中間節点部のモーメントおよびせん断力)を復元力として、応答計算用 PC にフィードバックする。
5. 復元力が応答計算用 PC にフィードバックされると同時に、応答計算用 PC から計測用 PC にデータ計測開始のコマンドを転送する。
6. 計測用 PC が変位計およびひずみゲージのデータを取得。応答計算用 PC はフィードバックされた復元力を基に、1.の手順に戻り次ステップの応答計算を行う。

本実験では、数値積分法にはオペレータ・スプリッティング法(以下、OS 法と略す)を使用する。なお、OS 法では特に応答変形が大きくなる荷重 step において不釣り合いモーメントの影響が大きく現れることが明らかとなっている。本実験においては、この不釣り

合いモーメントの結果への影響を極力抑えることを目的とし、とくに応答変位の大きな荷重 step についてさらに時間刻みを細かく分割する方法を採用する。

4. 研究成果

以下に実験結果を示す。本実験では、試験体に置き換えた B 接合部において制御に問題が発生したため、結果の検討は A 試験体の変形状、応答特性についての結果を中心に示す。

図 7 に非線形弾性試験体における各入力地震動レベルごとの接合部モーメントと離間回転角の関係を示す。図中赤色太破線はこれまでの研究成果により提案されている計算式より求めた理論計算の結果である。図より、すべての試験体、入力地震動レベルにおいて、おおむね離間後に剛性が低下し、非線形弾性的な挙動が確認できた。RUN1、RUN2 各入力時において、接合部モーメントの小さい段階において接合部が回転を生じていることが確認できる。この現象は、これまでの弾性関節接合における静的載荷実験等においても確認されており、エンドプレートの面外変形により離間過程が生じていることに起因していると考えられる。本試験体において、RUN1 ではほぼ線形的な挙動、RUN2 においては離間回転が増加する現象が確認でき、二次勾配と近い履歴を描いている。以上より、設計クライテリアに即した接合部の

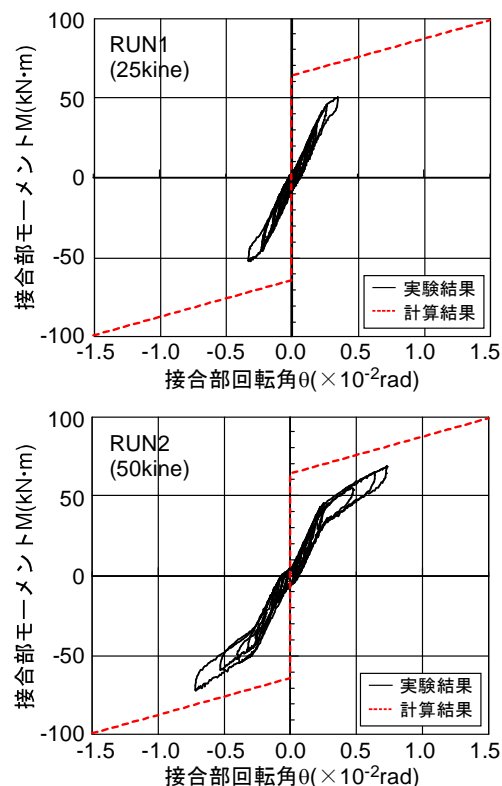


図 7 接合部モーメント M —接合部回転角 θ の関係

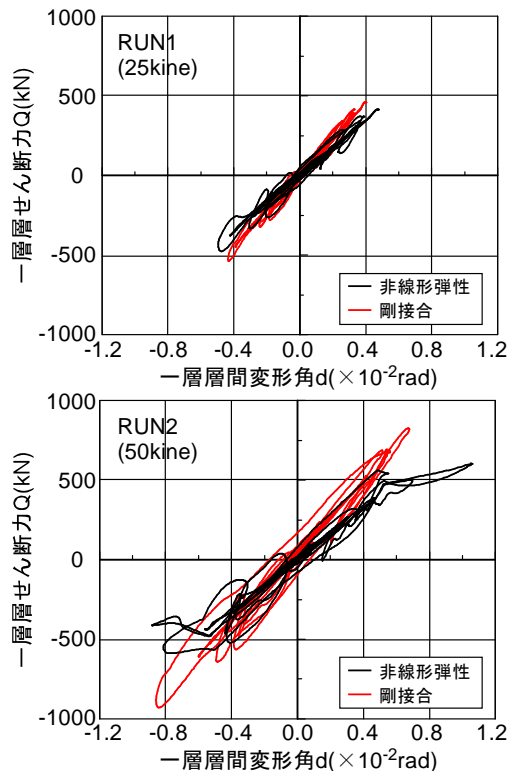


図8 一層層せん断力 Q—一層層間変形角 d の関係

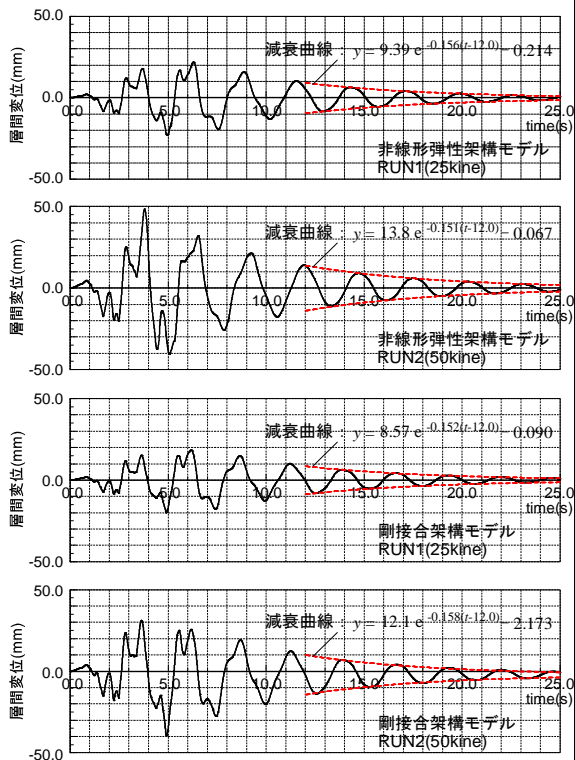


図9 一層層間変位の時刻歴

挙動がおおむね確認できた。

図8に各実験対象架構モデルにおける各入力地震動レベルの一層層せん断力と一層層間変形角の関係を示す。図より、本試験にお

いて、RUN1についてはどちらの架構モデルも剛接合の挙動を示し、RUN2においては非線形弾性架構モデルで、一層層せん断力500kN付近より剛性が低下していることが確認できる。非線形弾性架構モデルが剛接合モデルと比べ、接合部離間前の段階において剛性が低い傾向があることがわかる。これは、上記の接合部モーメント—接合部回転角関係について述べた通り、接合部モーメントの小さな段階において生じている回転が原因で架構の剛性が低下していると考えられる。この回転の詳細については、今後の検討課題である。

次に、非線形弾性架構モデルと剛接合架構モデルの応答変位を比較し、地震後の残留変位に対する考察を行った。図9に各架構モデルのRUN1、RUN2における一層層間変位の時刻歴を示す。本実験では、入力地震波は6.4sで主要動を終え、それ以降は無入力時間となる。そこで本研究では、上部構造等の応答の影響がおおむね収まり減衰自由振動を行い始めると考えられる12.0s以降の一層における層間変位応答において減衰曲線の近似式を求め、残留変形を評価しようと試みた。図中、赤色破線は減衰曲線を示す。減衰曲線の近似式における右辺第二項が残留変形に相当する。図9の結果より、RUN1、RUN2合わせた残留変形量は、非線形弾性架構モデルで0.281mm、剛接合モデルで2.263mmとなっており、非線形弾性架構モデルにおいて残留変形が低減されていることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

(1) **Akihiko OBATA, Naofumi TERAMOTO, Tetsuya NISIDA, Jun KOBAYASHI** : Experimental Study on Steel Structural Frame Connected by Beam-Column Joints by Nonlinear Elastic Hysteresis Hinge, 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisboa, paper ID 2047, 2012.9

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小幡 昭彦 (OBATA AKIHIKO)

秋田県立大学・システム科学技術学部・建築環境システム学科・助教

研究者番号：30433147

(2) 研究協力者

寺本 尚史 (TERAMOTO NAOFUMI)

秋田工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：00315631