

## 半剛接鉄骨骨組の部分構造地震応答実験

Substructuring Earthquake Response Tests on Semi-rigidly Jointed Steel Frames

林 暁光\*・大井 謙一\*・高梨 晃一\*・嶋脇 與助\*

Xiaoguang LIN, Kenichi OHI, Koichi TAKANASHI and Yosuke SHIMAWAKI

## 1. はじめに

鉄骨構造の柱梁接合部において、剛接合として溶接接合とする場合が多い。この種の接合部では一般的に通しダイヤフラム形式などが用いられ、複雑な溶接ディテールとなり、これに伴う工費がかかる。また、溶接に起因する破壊現象の発生も指摘されている。一方、剛接合の代わりにアングルなどの金物とファスナーを介して接合するディテール、いわゆる半剛接合がある。日本では鉄骨構造の設計におけるこの種のディテールは一部の工業化システム住宅を除いては、ほとんど用いられていない。しかし、半剛接合は骨組の柔性を増加させることによって変形が大きくなりやすい反面、柱梁部材の製作誤差を比較的容易に吸収でき、施工及び品質管理は比較的容易である。また、スプリットティー接合やアングル接合などのディテールが多様で接合部の剛性、耐力の選択範囲が広く、強震時における骨組の崩壊モードやエネルギー吸収能力を制御できる可能性があるなどのメリットも考えられ、構造設計の自由度を広げることになる。

本研究では半剛接合ディテールとしてスプリットティー接合とアングル接合の2種類を選び、部分構造として接合部付き梁試験体を製作し、静的実験でその復元力特性を確認するとともに、部分構造法を用いたハイブリッド地震応答実験手法の2層半剛接鉄骨フレームへの応用を試みる。本論では単調荷重と繰り返し荷重の静的実験結果および2層骨組モデルの地震応答実験について報告する。

## 2. 静的荷重実験の概要

実験のセットアップを図1に示す。半剛接合の荷重試験体は梁部分とその下端の接合部部分で構成されている。梁の下端をアングルなどを介して床上のベースブロックに接

\*東京大学生産技術研究所 第5部

合する。上端は荷重端として繰り返し荷重できるようにアクチュエータとピン接合している。測定パラメータとしては荷重点変位、荷重のほかに、梁接合端の回転角、梁端フランジの浮き上がりなども測定している。半剛接合部としての梁下端の接合部は下記2種類のディテールを用いて、それぞれ単調荷重および繰り返し荷重を各1回、合計4回の静的荷重実験を行った。なお、静的実験の荷重はコンピュータを用いて変位制御で行っている。試験体の1部分である梁はSS400鋼材のH-250×125×6×9を用いている。

(a) スプリットティー接合：図2は接合部の詳細を示している。スプリットティーはSS400鋼H-150×150×7×10より切断して製作した(長さが13cm)。ティーの各接合面(ウェブとフランジ)ではそれぞれ4本の高力ボルト(F10T)を使用しており、締め付けトルクは3000kgcmを目標値としている。よって、ボルト張力は約11.4tonとなる。また、M16の高力ボルトに対して、ボルト穴とのクリアランスを2mmとしている。

(b) アングル接合：図3は接合部の詳細を示す。この場合は梁のフランジに接合されるトップとシートアングル各1個、梁のウェブに接合されるサイドアングル2個を使用し、SS400鋼L-75×75×9×8.5から製作した。長さがそれぞれ13cmと20cmとしている。また、ボルトの種類などはスプリットティーの場合と同じである。

## 3. 静的荷重の実験結果

表1は梁および接合部材の材料試験結果であり、JIS1A号試験片による素材実験の平均値を示している。また、接合部の崩壊モードを仮定して、この実測 $\sigma_u$ を用いて算出した接合部の最大耐力も同表に示している。

図4はスプリットティー接合およびアングル接合の単調荷重実験の結果を示している。縦軸は梁端モーメントを梁

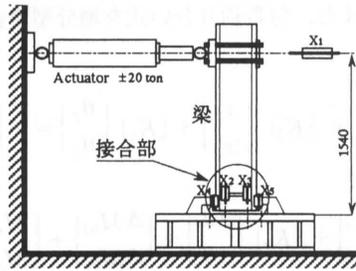


図1 実験のセットアップ

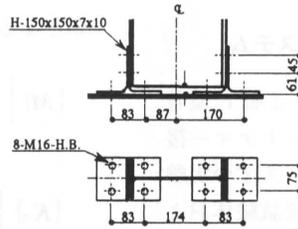


図2 スプリットティー接合

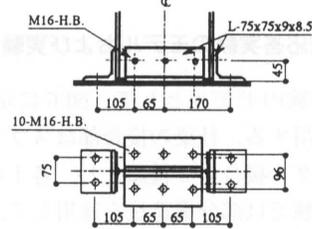


図3 アングル接合

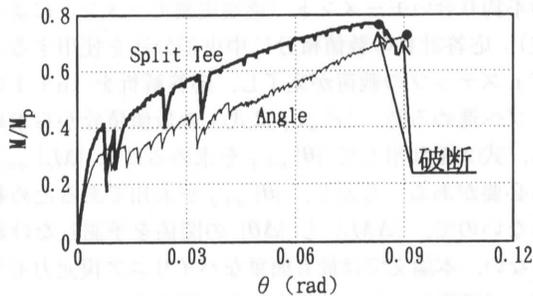
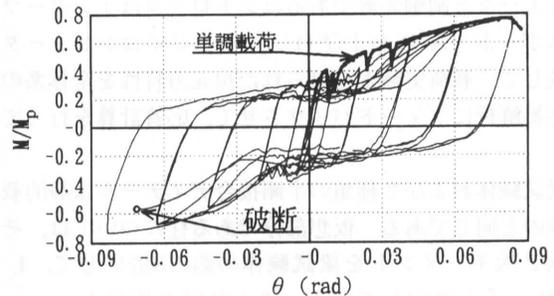
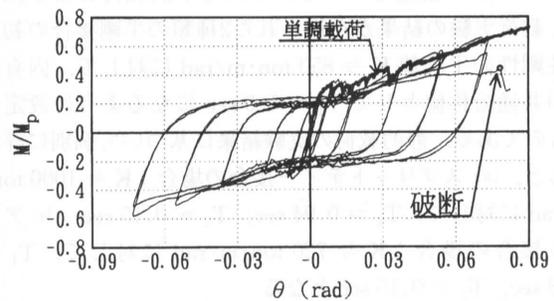


図4 単調荷重実験



a) スプリットティー接合



b) アングル接合

図5 繰り返し荷重実験

表1 鋼材の性質および接合部の計算耐力

部材名	部位	降伏点 $\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_u$ (t/cm <sup>2</sup> )	降伏比 Y R (%)	伸び (%)
梁	フラスク	3.00	4.44	68	20
	ウェブ	3.20	4.52	70	20
スプリット	フラスク	3.28	4.75	69	16
	ウェブ	3.15	4.69	67	18
アングル		2.99	4.57	65	20
接合部 耐力		ティー接合 : 0.74Mp    アングル接合 : 0.54Mp			

の全塑性モーメント  $M_p$  で無次元化している。横軸は接合部の回転を含む梁の部材回転角である。両タイプとも塑性化してから初すべりを生じ、その後すべりを繰り返しながら、塑性変形が進行する。アングル接合の場合は、塑性化してからほぼ一定の勾配を保っており、バイリニアに近い性状を示している。スプリットティー接合の場合では終局に近づくとき若干の剛性低下が認められる。すべり耐力については、使用した試験体は黒皮仕上げで、すべり係数が通常0.35~0.45となる場合が多いが、このスプリットティー接合の単調荷重実験ではすべり係数=0.39となっている。

図5は繰り返し荷重実験の結果から得られた復元履歴特性を示している。荷重方法は変位制御を用いて弾性限界回転角を規準として、その±1倍、±2倍、±4倍、±6倍、

±8倍、……で2サイクルずつ繰り返し荷重を行い破壊に至らしめる加力履歴を設定した。同図では、初すべり荷重は単調荷重のそれと若干の差があるが、おおむね一致している。また、その骨格曲線は単調荷重のものとい対応を示している。破壊までは  $M/M_p$  が0.8以下にとどまり、梁が塑性化せず、塑性変形によるエネルギーが全部スプリットティーやアングルによって吸収され、変形が接合部に集中していることが分かる。復元履歴では接合部ボルトのすべりによってスリップ現象が顕著に現れており、非常に複雑な履歴特性となっている。また、スリップ区間の平均荷重レベルは初すべりの約6割となっている。スリップ区間の長さは荷重サイクルの変位幅の増加に伴い増大し、クリアランス量に基づくスリップ量を大幅に超えている。これは主に支圧力によるボルト孔の拡大に起因していると考

研 究 速 報  
えられる。

4. 地震応答実験のモデルおよび実験システム

地震応答実験のモデルとして、図6に示す2層F型骨組モデルを採用する。柱梁の接合部はスプリットティー接合およびアングル接合の2種類とし、各1ケースずつ実験を行った。実験では部分構造法を適用して、梁試験体および接合部だけを実験体として載荷実験を行う。残りの柱に対して弾性柱と仮定して、仮想構造部分としてコンピュータ内でシミュレートする。加力装置としてのアクチュエータと制御装置であるコントローラはインターフェイスボード(A/DおよびD/A)を通じてコンピュータに接続して、載荷実験から得られた復元力特性を全体系の地震応答解析にフィードバックさせて、応答計算を行っている。

梁試験体および2種類の半剛接合ディテールは静的載荷実験のと同じである。仮想部分である柱については、その断面2次モーメントを梁試験体の約2.8倍にして、 $I_c = 10125 \text{ cm}^4$ と設定している。また各層の質量を  $m_1 = m_2 = 15.0 \text{ ton}$  に設定している。これは単調載荷および繰り返し載荷実験の結果から得られた2種類の半剛接合の初期弾性剛性の平均値  $K \cong 850 \text{ ton}\cdot\text{m/rad}$  に対して、固有周期の共通公称値として  $T_1 = 1.0 \text{ sec}$  になるように設定したものである。静的載荷の実験結果に基づいて個別に評価すると、(a)スプリットティー接合の場合： $K \cong 1000 \text{ ton}\cdot\text{m/rad}$  に対して、 $T_1 = 0.94 \text{ sec}$ 、 $T_2 = 0.15 \text{ sec}$  (b)アングル接合の場合： $K \cong 720 \text{ ton}\cdot\text{m/rad}$  に対して、 $T_1 = 1.08 \text{ sec}$ 、 $T_2 = 0.15 \text{ sec}$  となる。

5. 振動方程式

2層フレームの振動方程式を式(1)のようにまとめること

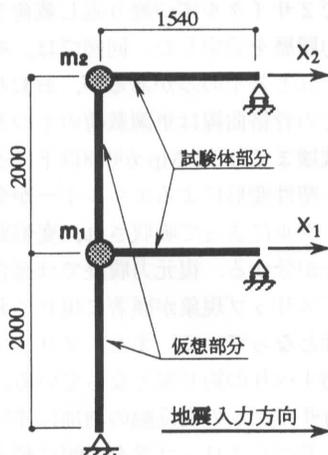


図6 地震応答実験のモデル

ができる。また、付帯釣り合い式を増分型で表示すると式(2)となる。

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + [K_1] \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} + [K_2] \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_1 \ddot{y} \\ m_2 \ddot{y} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$[K_3] \begin{Bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{Bmatrix} + [K_4] \begin{Bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta M_{b1} \\ \Delta M_{b2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} M_{u1} \\ M_{u2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $x_i$ :i層の変位、 $\theta_i$ :梁の変形を含む梁端回転角、 $M_{bi}$ :i層梁端のモーメント、 $M_{ui}$ :前ステップにおけるi節点の不釣り合いモーメント(梁端実測モーメントによって算定)。応答計算の数値積分に中央差分法を使用する。ここでnステップの載荷が完了し、応答解析を(n+1)ステップへ進める時、 $\{x\}_{n+1}$ は式(1)の数値積分から求められる。式(2)を利用して $\{\theta\}_{n+1}$ を求めるには $\{M_b\}_{n+1}$ を知る必要がある。しかし、 $\{\theta\}_{n+1}$ が未知であるため載荷できないので、 $\{\Delta M_b\}$ と $\{\Delta \theta\}$ の関係を予測しなければならない。本論文では最も簡単なバイリニア復元力モデルを用いて予測し、その結果生じる不釣り合いについては後続ステップで解消する。なお、入力地震波として、EL CENTRO NS 1940の主要動を含む10秒間を使用している。入力レベルを550 gal、時間刻みを0.01秒としている。

6. 地震応答実験の結果

図7は変位応答を示している。図中の点線は数式モデルによる解析結果である。この解析では復元力モデルとしてスケルトンシフトモデルを使用し、繰り返し載荷実験の結果に基づいてパラメータを決めており、ボルトすべりによる復元力のスリップを考慮に入れていない。同図ではアングル接合の骨組は4.5秒前後から2層と1層とも倒壊へ発散し、スプリットティーの場合との差が生じている。解析の変位応答は実験に比べ、ボルトの初すべりから差が生じ、スプリットティーの場合の最大変位応答の解析値が約2割小さくなっている。アングルの場合は解析の応答が倒壊まで至っておらず、復元力スリップの影響が大きい。

図8は梁の変形を含めた接合部の復元力履歴を示している。ボルトのすべりは初すべり耐力の2/3ぐらいのレベルで頻繁に生じ、スリップ型のループを形成している。地震エネルギー入力全部この接合部の塑性変形によって吸収されている。実測の復元力履歴と予測に用いたバイリニアモデルのループはボルトすべりによって大きく異なっているが、その予測誤差の影響として節点不釣り合いモーメントは図9で示しているように安定しており、ボルトすべり以外の所では小さい値にとどまっている。ボルトすべりの生じた所で不釣り合い力モーメントが大きくなっている

