

## 複半月充填ボルト支圧接合の基本特性

玉井 宏章\*・桐山 尚大\*\*・山下 祥平\*\*・中島康太\*\*\*

### Fundamental Mechanical Properties of Joint using Half-Moon-Shaped Bearing Bolt

by

Hiroyuki TAMAI\*, Takahiro KIRIYAMA\*\*, Shohei YAMASHITA\*\*  
and Kouta NAKASHIMA\*\*\*

We present the shear joint using half-moon-shaped bearing bolt as an effective fastener between high-strength steel members. Experimental studies were carried out to clarify the maximum strength of the bolted joint and the elastic stiffness of beam flange joint. Also, materially and geometrically non-linear finite element analyses were carried out to show the mechanical properties of the joint with half-moon shaped bearing bolts. This paper shows the concept and capabilities of presented bolts. Obtained result was summarized as follows. The shank of the half-moon-shaped bolt has enough ultimate strength: 0.9 times the shear strength of effective sectional area. Slip back phenomena, in which the diagonal cut face of the shank slips out of its normal position, doesn't occur during large shear forces on the bolts. The half moon bolts always penetrate the connected steel plate so as to fill up a hole. Hence, the present shear joint maintains constant stiffness during a large number of pulsating cyclic loadings.

**Key words :** *Bearing Bolt, Built-up Member, H-SA700A, High-Strength Steel.*

#### 1. はじめに

近年、建築構造で利用するための普及型高強度鋼 (H-SA700) が開発され、その利用技術に関する研究が多く行われている<sup>1,2)</sup>。高強度鋼部材の接合では、超高力ボルト摩擦接合を行っても、かなり多くのボルト本数が必要と考えられる。

H-SA700 の高強度鋼は普通鋼の約 2 倍以上の降伏耐力があり、従来の高力ボルト摩擦接合を用いるとボルト一本あたりのすべり耐力は被接合鋼材の強度にかかわらず一定なので、鋼種を高強度鋼とした場合、同形状部材の所要ボルト本数は 2 倍以上となるためコンパクトな詳細とは言い難くなる。

抵抗特性を変え接合耐力を上げる方法としては、リベット及びボルトによる支圧接合があるが、初期の接合部剛性が低く、繰返し荷重を受ける部位では支圧接合を行う普通ボルトは使用を制限されている<sup>3)</sup>。

筆者等は、普及型高強度鋼部材として溶接を用いない乾式組立材を提示している<sup>2)</sup>。この高強度鋼部材を普及させるためにも、接合部剛性が維持・確保でき、接合耐力が高く、コンパクトな詳細で、かつ簡便に施工しうる接合法が望まれる。

この様な背景から、本研究ではボルト接合のせん断力伝達方法に関して、1). 接合耐力を高強度化する、2). 接合剛性を維持・確保する、3). 接合部詳細をコンパクト化する、4). 施工管理を簡略化する、といった課題を克服しうる接合法を提案する。

まず、提案する接合方法を解説し、接合部の引張試験を行って、接合部の降伏耐力、最大耐力の性状を示し、その抵抗性状を複合非線形有限要素法解析と比較して示す。最後に本接合方法を用いた梁継手を有する単純支持梁について、繰返し中央載荷試験を行って、繰返し荷重下における接合部の剛性変化を示し、提案する接合方

---

平成27年1月23日受理

\* システム科学部門 (Division of System Science)

\*\* 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

\*\*\* 工学部工学科 (Department of Engineering)

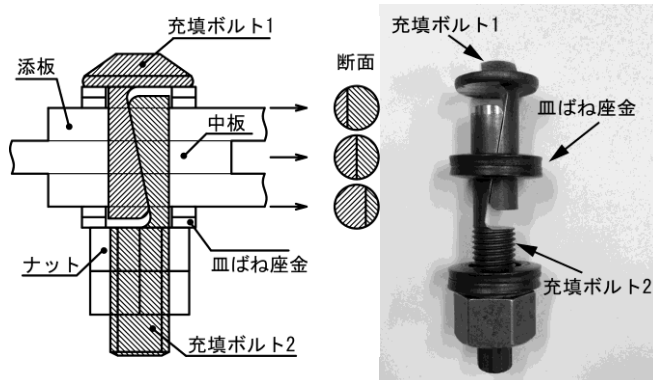


図1 複半月充填ボルト

法の優位性を示す

## 2. 複半月充填ボルト支圧接合

### 2.1 接合方法

提案するボルトの支圧接合方法を図1に示す。鋼種が14Tの高力ボルトをテーパをつけて軸部を2つに分割している(図中、充填ボルト1, 2)。ボルト軸が引張されると軸径が膨らむようにテーパがつけてある。ナット、皿ばね座金は複数個用い、ナットは緩みが生じないようにロックナットを使用する。ボルト孔の形状は、円形でボルトの初期軸径より1.0mm程度大きく設定する。テーパ角度は、皿ばね座金の弾性復元変形の1/2の充填ボルト2の軸方向移動に対して、1.0mmだけ充填ボルトの長径が大きくなるように設定する。初期導入張力はボルト最小軸断面の降伏軸力の1/2程度以下与える。充填ボルト1, 2の接触面は、荷重作用方向と直交するように設置する。

### 2.2 複半月充填ボルトの機能

この接合方法は、半月形断面のボルトが、ボルト孔を荷重方向にギャップを除去するように充填するので、以降では複半月充填ボルトと呼ぶことにする。

4枚の座金はボルトの締付力によって軸方向に弾性変形で縮んでいる(皿ばね座金1枚(M18用)のばね剛性は120kN/mm程度である)。繰返し荷重に対して、ボルトとナットには緩みは生じず、中板、添板及びボルトにずれが生じてボルト孔が拡径されても、座金の弾性変形が復元され、充填ボルト2が入り込むため、せん断方向にボルトの緩み(ギャップ)は生じない。この自己充填機能を複半月充填ボルトは有している。

複半月充填ボルト接合は、リベット接合同程度(0.2mm以内<sup>3)</sup>)に緩み(ギャップ)は解消されると考えられ、従来の支圧接合の接合剛性の問題点を解決でき、かつ、ボルトに強度の高い超高力ボルト(14T以上)を用いても、遅れ破壊の心配は少なく<sup>4)</sup>、ボルト1本あたりの許容耐力と最大耐力は、通常の高力ボルト摩擦接合に

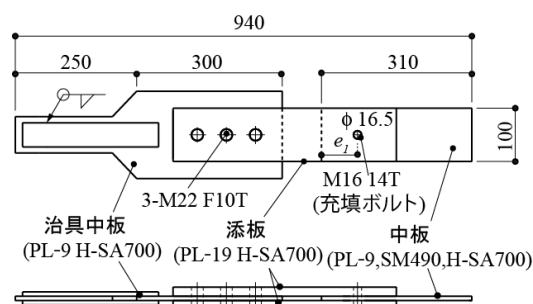


図2 充填ボルト支圧接合部の引張試験

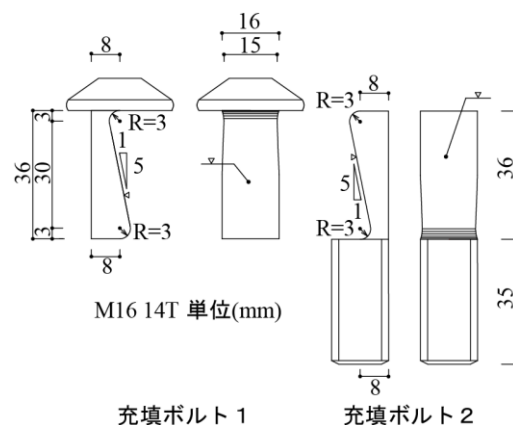


図3 充填ボルト試験体

比べて高くできるので、結果としてコンパクトな接合部となる。したがって、板厚が厚く高強度の鋼材に対して非常に効率のよい接合が期待できる。

## 3. 载荷実験と解析の概要

### 3.1 接合部引張試験

複半月充填ボルトを用いた支圧接合部の基本性状を調べるために、接合部の引張载荷試験を行った。

ボルト1本を用いた充填ボルト接合部について、中板のはしめけ破断からボルト折損に至るように中板形状を変化させた接合部引張試験を行った。充填ボルト支圧接合部の引張試験体を図2に示す。中板は鋼種H-SA700Bの板厚9mm幅100mmではしあき $e_1$ を30,40,60mmとして直径16.5mmの孔が中心線上にあって、この中板に板厚19mmの添板ではさみ込み、複半月充填ボルト(14T M16)で緊結している。つかみ部は予想最大耐力の2.5倍の強度を有するよう、両側に9mmの板を隅肉溶接したつかみ部を添板と高力ボルト摩擦接合(3-M22(F10T))した。添板とつかみ部は、弾性範囲に留まるので繰返し利用した。

図3に使用した複半月充填ボルトを示す。ボルト軸は皿ばね座金の弾性復元変形5mmに対して1mmの径の拡径が生じるよう1/5radの角度でテーパがついている。14T M16のボルト1本から切断加工し、加工面の処理は切削仕上げ加工のまま(摩擦係数は0.30程度)としている。

## 複半月充填ボルト支圧接合の基本特性

表 1 素材試験結果 (接合部引張試)

鋼種	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$\varepsilon_u$	$\varepsilon_i$
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	%
H-SA700	795	862	11.7	6.6
14T	1476	1584	20.4	6.5

$\sigma_y$ :降伏応力(0.2%オフセット耐力),  $\sigma_u$ :引張強度,  
 $\varepsilon_u$ :破断伸び,  $\varepsilon_i$ :一様伸び

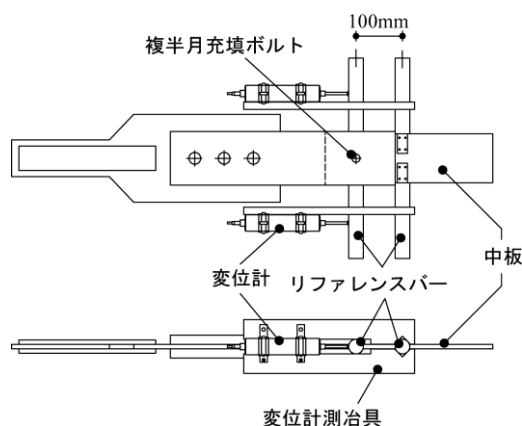


図 4 変位計測道具 (接合部試験)

テーパ部の付け根の入隅部には、応力集中を防止するように半径 3mm の R をとっている。

中板および 14T ボルトの素材試験結果を表 1 に示す。表中には降伏応力 (0.2%オフセット耐力) : $\sigma_y$ , 引張強さ: $\sigma_u$ , 破断伸び: $\varepsilon_u$  及び一様伸び: $\varepsilon_i$  を示す。

素材試験にあたり、箔大歪ゲージの他に一様伸びを計測するため、検長 50mm の伸び計 (変位計) も併せて利用した。

計測方法は、荷重は、アムスラー試験機から荷重  $P$  を、変位は、図 4 に示す変位計測道具を用いて、ボルト位置 (添板にリファレンスバーが溶接されている) と中板との 100mm 区間の相対変位: $\delta$  を試験体左右に設置した高精度変位計からの計測値を平均して求めた。

得られた荷重  $P$  - 変位  $\delta$  関係から、初期剛性: $K$ , 降伏耐力 (剛性が初期剛性の 1/5 に低下した時点の荷重) : $P_y$ , 最大耐力:  $P_u$  とその時の変位: $\delta_u$  を求め、破壊性状 (有効断面引張破断:T, はしめけせん断破断:S, 顕著な支圧変形:R, ボルト折損:B) を調査した

### 3.2 梁継手の片振り繰返し载荷試験

充填ボルトを複数本用いた時の支圧接合部の剛性確保の程度と自己充填機能を検討するため、充填ボルト支圧接合した梁継手について片振り振幅繰返し载荷試験を行った。

梁継手試験体を図 5 に、継手詳細を図 6 に示す。

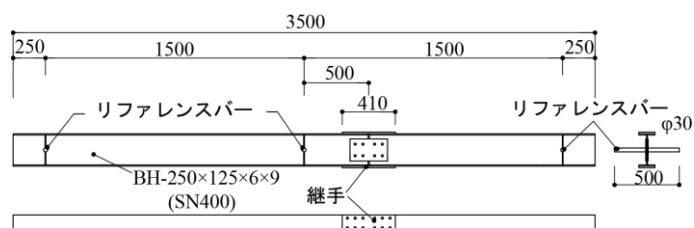


図 5 梁継手試験体

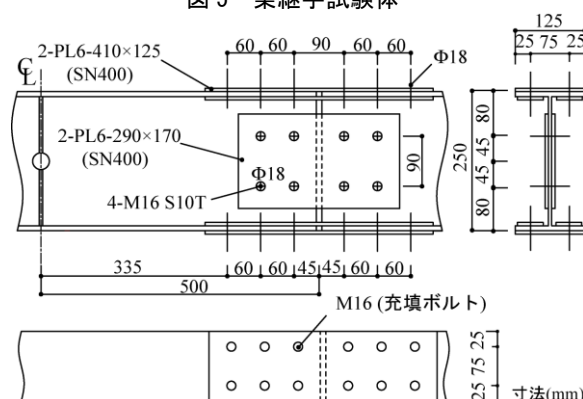


図 6 梁継手接合部詳細

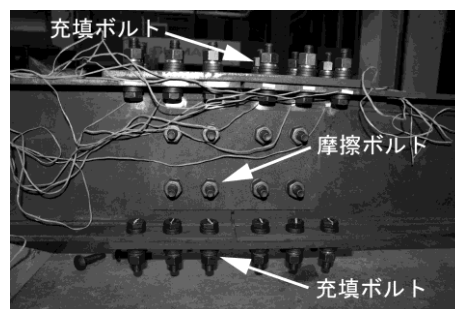


写真 1 梁継手接合部詳細

試験体は全長 3500mm, 支点間 3000mm の梁 (BH-250x125x6x9, SN400) 中央から 500mm の位置に継手を設けたものである。

継手フランジのボルト接合形式を変化させた 3 種の試験体を用意した。

上下フランジに添板 (PL6-410x125, SN400) 2 枚を介し、二面せん断状態で M16 のボルトを切断加工した充填ボルトを上下各 12 本、計 24 本を用いて支圧接合した HM 試験体、HM 試験体と同様で、上下フランジを添板を介し摩擦接合 (M16, S10T) とした FB 試験体及び、HM 試験体と異なり充填ボルトを用いず従来型の高力ボルト (M16, 14T) により上下フランジを添板を介し支圧接合とした NB 試験体を用意した。尚、いずれの試験体もボルト孔径は 18mm とし、ウェブは添板 2 枚 (PL6-290x150, SN400) を介して高力ボルト (M16, S10T) 8 本で摩擦接合した。試験体のウェブ(6mm), フランジ(9mm) の 1

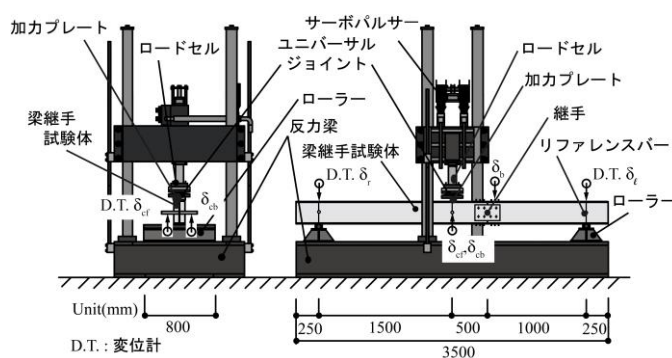


図7 荷重試験装置 (梁継手試験)

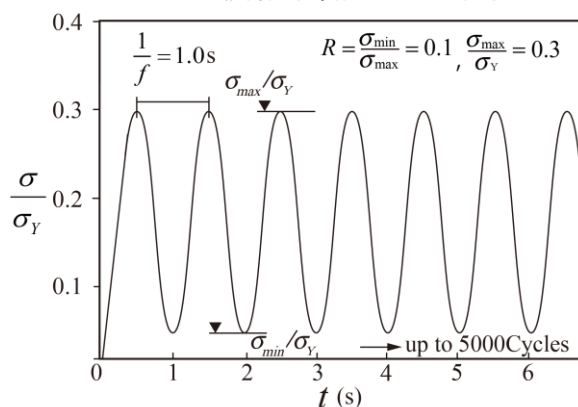


図8 加カプログラム (梁継手試験)

号試験片 3 本から平均して求めた素材引張試験結果を表 2 に示す。

荷重装置を図 7 に、加カプログラムを図 8 にそれぞれ示す。

支点間 3000mm のローラー上に試験体を設置し、加カプレート(PL6-200×10, SN400)、ユニバーサルジョイント、ロードセルを介して、上部クロスヘッドから、試験体中央に圧縮荷重: $P$  を作用させ片振り荷重振幅繰返し荷重を行った。加カプログラムは荷重制御で、継手位置の鋼梁のフランジ縁応力を応力振幅比: $R (= \sigma_{\min} / \sigma_{\max})$  を 0.1、降伏応力に対する最大応力振幅の比: $\sigma_{\max} / \sigma_y$  を 0.3 とし、振動数は 1Hz で 5000 回繰返し荷重した。なお、フランジ縁応力は、継手部の曲げ剛性は鋼梁と同等とした計算値より求めている。

計測方法は図 7, 図 9 に示すように、荷重についてはクロスヘッド下部のロードセルから荷重: $P$  を、変位については充填ボルトの貫入量: $\delta_b$  をボルトヘッド頭の鉛直変位から求めた。中央たわみ: $w$  は中央点の表裏の変位: $\delta_{cf}, \delta_{cb}$  と支点変位: $\delta_{cl}, \delta_{cr}$  を平均した値の差により求めた。

$$w = (\delta_{cf} + \delta_{cb} - \delta_{cl} - \delta_{cr}) / 2 \quad (1.a)$$

1~5000 回までの各サイクルにおける荷重-たわみ関係を 1/100s で計測を行い、最小二乗法を用いて梁の剛性: $K$

表 2 素材試験結果 (梁継手試験)

SN400	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$\epsilon_u$	$\epsilon_{st}$	$\epsilon_i$
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(%)	(%)
6mm	330	444	26.1	2.7	15.4
9mm	280	414	25.1	2.1	19.4

$\sigma_y$ : 降伏応力,  $\sigma_u$ : 最大応力,  $\epsilon_u$ : 破断ひずみ,

$\epsilon_{st}$ : 加工硬化開始ひずみ,  $\epsilon_i$ : 一様伸び

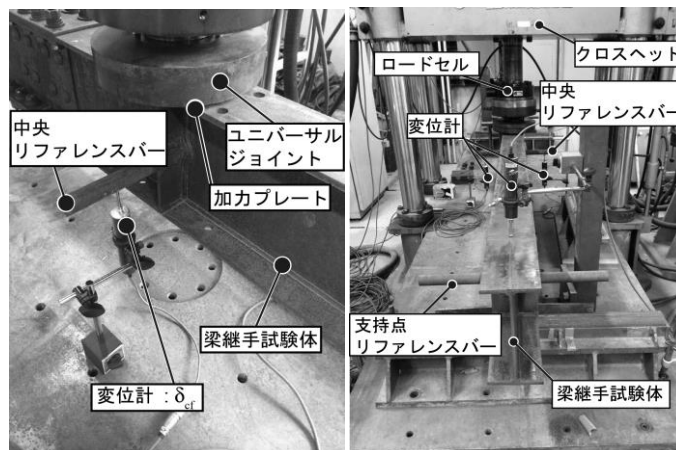


図9 変位計測方法 (梁継手試験)

を求めた。継手に剛性低下が生じず完全であるとする、中央たわみ: $w$  と中央荷重: $P$  には次式が成り立つ。

$$\frac{w}{L} = \frac{P \cdot L^2}{48 \cdot E_s \cdot I_s}, \quad \frac{P}{w} = \frac{48 \cdot E_s \cdot I_s}{L^3} = K_s \quad (1.b, c)$$

ここに、 $L$ : 支点間距離,  $E_s \cdot I_s$ : 梁の曲げ剛性,  $K_s$ : 継手が完全の時の梁の剛性。

以降の荷重-たわみ関係は(1.b)式の左右項の諸量を用いて無次元化し、継手の剛性は(1.c)式の右辺項の剛性で無次元化してそれぞれ示す。

### 3.3 接合部の引張解析

接合部の引張荷重試験では、設計上重要な降伏耐力と最大耐力を調査した。降伏耐力は剛性の低下率から、最大耐力はボルトの折損、中板・添板の支圧変形、はしめだけで決定される。

実験結果を参考に以下の項目を考慮した解析を行う。

- 1) 中板のボルト孔が大変形して拡がりつつ耐力が上昇する複合非線形性状と、2) 充填ボルトが互いに接触しながらせん断破断する特性を考慮する。

解析モデルでは、具体的に以下の点に工夫する。

- 1) 鋼素材特性に真応力-対数塑性歪関係を用いる。
- 2) ボルトと中板との接触・離間を取扱う。

表3 応力-歪関係の数値モデル (べき乗則)

鋼種	$\sigma_y$	$\varepsilon_p^{*st}$	$\varepsilon_0^*$	$m$	$C$	$n$
	N/mm <sup>2</sup>	%	%	-	N/mm <sup>2</sup>	%
H-SA700	808	-	-1.60	5.0	1.39	0.078
14T	1454	-	-0.70	1.0	1.41	0.075

$\sigma_y$ : 降伏応力,  $\varepsilon_p^{*st}$ : 加工硬化開始ひずみの塑性成分,  
 $\varepsilon_0^*$ : 修正ひずみ,  $m$ : 修正係数,  $C, n$ : 実験定数

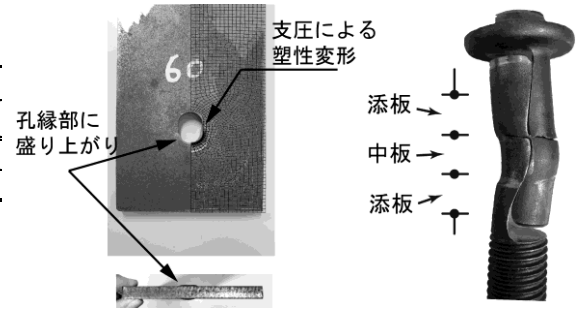


写真2 試験後の中板と充填ボルト (接合部引張試験,  $e_f=60\text{mm}$ )

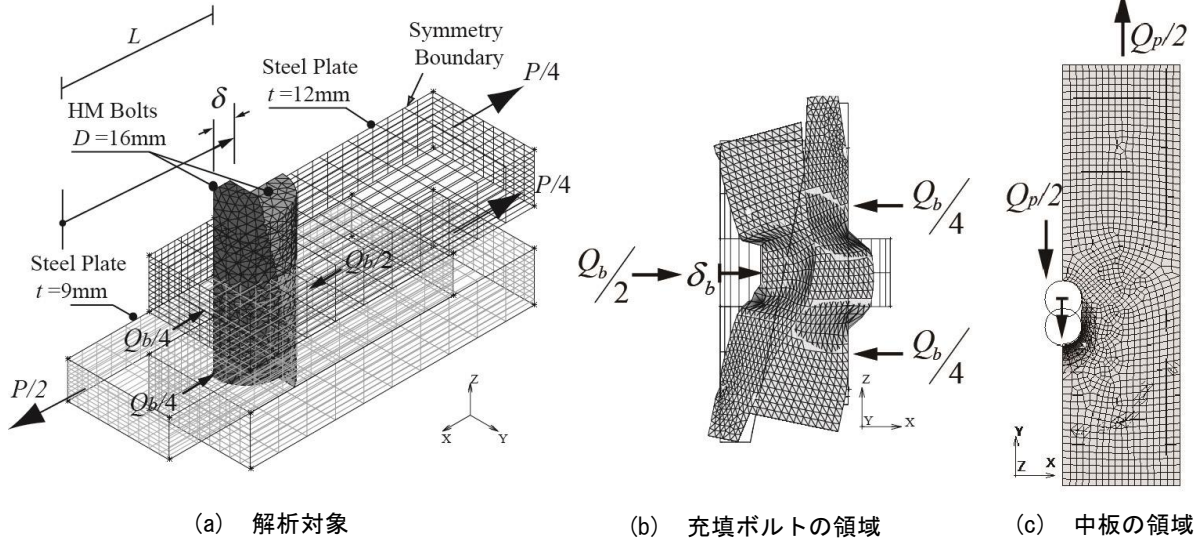


図10 領域分割した分散型解法の概要 (接合部引張試験)

- 3) 中板のボルト孔の大変形を取扱うためにリゾーニングを行う。
  - 4) ボルトのせん断破断を追跡できるように、体積ロッキングを回避しうる要素を用いる。
- また本解析は、MSC Marc Mentat 2010 を用いて行った。

○真応力-対数塑性歪関係

降伏棚を除く歪硬化領域における真応力-対数塑性歪関係は、次式のべき乗硬化則が良好に成立することが知られている。

$\varepsilon_p^* \geq \varepsilon_p^{*st}$  のとき、

$$\sigma^* = \sigma_y^* \cdot C \cdot (\varepsilon_p^* - \varepsilon_0^*)^n \quad (2.a)$$

ここに、 $\sigma_y^*$ は降伏応力、 $\varepsilon_p^*$ は塑性ひずみ、 $\varepsilon_0^*$ は修正ひずみ、 $\varepsilon_p^{*st}$ は加工硬化開始ひずみの塑性成分、 $C, n$ は実験定数である。

降伏棚の領域は次式で表せる。

$0 \leq \varepsilon_p^* \leq \varepsilon_p^{*st}$  のとき、

$$\sigma^* = \sigma_y^* \quad (2.b)$$

塑性歪の定義から、

$$\varepsilon^* = \varepsilon_e^* + \varepsilon_p^* = \frac{\sigma^*}{E} + \varepsilon_p^* \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_e^*$ は弾性対数歪である。

真応力と公称応力、対数歪と公称歪とは以下の変換則が成立する。

$$\varepsilon = \exp(\varepsilon^*) - 1, \quad \varepsilon^* = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4.a,b)$$

$$\sigma = \sigma^* / \exp(\varepsilon^*), \quad \sigma^* = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (4.c,d)$$

$\varepsilon_p^*$ を定めれば、(2.a,b)式より真応力 $\sigma^*$ が決定され、対応する対数歪は(3)式で得られる。(4.a), (4.c)式を用いて、対応する公称応力-公称ひずみ関係が弾性範囲を除いて得られる。

素材試験で公称の降伏応力 $\sigma_y$ 、引張強さ $\sigma_u$ 、一様伸び $\varepsilon_i$ が求めれば、べき乗硬化則の材料定数 $n, C$ は以下のよう決定できる。

$$n = \ln(1 + \varepsilon_i^*) - \varepsilon_0^* \quad (5.a)$$

$$C = \frac{\exp(n + \varepsilon_0^*)}{\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \cdot n^n} \quad (5.b)$$

修正ひずみ $\varepsilon_0^*$ は、実験素材試験と適合するように次式で与える。

$$\varepsilon_0^* = \varepsilon_{p, st}^* - m \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (5.c)$$

ここに、 $m$ は修正係数で H-SA700 及び 14T ではそれぞれ 5 程度及び 1 程度の値を与える。

表 3 に解析に用いた応力-歪関係のべき乗則モデルの諸定数を示す。

### ○領域分割した分散型解法

実験挙動を追跡するには、解析対象の対称性を考慮して図 10 (a) に示すような半領域について解析すればよい。充填ボルト 1 組、中板 1 枚と添板 2 枚の半領域が対象となる。

2 枚の添板は弾性変形のみが生じ、中板と充填ボルトが強塑性状態となる。これらの構成要素の変形と荷重の関係を力が釣り合うように、1 度にまとめて解析すると立体なのでバンド幅と自由度数が多くなり、多大な計算時間を要することとなる。

これを以下の仮定を導入して計算時間を大幅に縮減する。

- 1) 添板は十分に耐力があり、塑性化しない。
- 2) ボルトの接触断面は円形を保ち、その接触断面の変形は小さい。
- 3) ボルト中心から、中板 100mm 位置までの相対変位 $\delta$ はボルトのせん断変位と中板のボルト接触位置からの支圧による変形の和として表せる。
- 4) 中板のはしぬけ挙動は、塑性化に伴う板厚の盛り上がりの影響を受けない。

構造モデルを 2 つの領域に分割する。1 つは、勾配 1/5 のテーパ面を持つ充填ボルト軸部が剛体の中板・添板に摩擦を生じる接触をし、充填ボルトは 2 面せん断状態の 3 次元応力状態で立体要素を用いる領域とする (図 10 (b)参照)。

もう 1 つは、ボルトは剛体とし中板とボルトが摩擦を生じる接触をし、中板自体は平面応力状態の 2 次元要素を用いる領域とする (図 10 (c)参照)。

これら 2 つの領域は剛体の境界を介して次の力の釣り合い条件と変位の適合条件を満足する必要がある。

$$P = Q_p(\delta_p) \quad (7.a)$$

$$P = Q_b(\delta_b) \quad (7.b)$$

$$\delta = \delta_p + \delta_b \quad (7.c)$$

ここに、 $P$ :継手の荷重、 $\delta$ :ボルト中心から中板 100mm 位置の変位、 $Q_b$ 、 $\delta_b$ :ボルトのせん断荷重とせん断変形(剛体中板の反力と変位)、 $Q_p$ 、 $\delta_p$ :中板の支圧荷重と支

圧変形(剛体ボルトの反力と変位)である。(7.a~c)式から  $P$  と  $\delta_b$  を消去すると、

$$f(\delta_p) = Q_p(\delta_p) - Q_b(\delta - \delta_p) = 0 \quad (8)$$

$\delta$  を与え、(8)式を満足する  $\delta_p$  を求めて(7.a)式より  $P$  を求めると、継手の荷重  $P$  と変位  $\delta$  が得られることになる。

尚、ボルトに用いる要素として体積ロッキングを回避できる Hermann 要素<sup>9)</sup>を採用した。

## 4. 実験及び解析の結果とその考察

### 4.1 接合部単調引張試験・解析

接合部単調引張試験及び解析の結果を表 4, 図 11 及び写真 2 に示す。

図 11 には、全試験体について支圧耐力評価値で無次元化した接合部の荷重  $P/(3 \cdot d \cdot t \cdot \sigma_u)$  と計測区間で無次元化した接合部の変位  $\delta/L$  との関係を (a) 全体の変形領域と、(b) 初期の変形領域とに分けて示す。尚、同図には、実験による接合部の降伏耐力、最大耐力を○、▽印で、文献 7,8 から求めた中板のはしぬけ最大耐力 ( $e_1 \cdot t \cdot \sigma_u$ ) とせん断降伏耐力 ( $e_1 \cdot t \cdot \sigma_y$ )、支圧降伏耐力 ( $1.88 \cdot d \cdot t \cdot F_y$ )、ボルトせん断最大耐力 ( $A_b \cdot \sigma_{bu} / \sqrt{3}$ ) の評価値を示している。ここに  $F_y = \min(\sigma_y, 0.7\sigma_u)$  であり、 $e_1$ 、 $t$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_u$ : 中板のはしあき、板厚、降伏強さ、引張強さ、 $d$ 、 $A_b$ 、 $\sigma_{bu}$ : ボルトの軸径、断面積、引張強さである。尚、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_u$ 、 $\sigma_{bu}$  は素材試験の実測値を用いている。

表 4 には各試験体について、実験値は、初期剛性:  $K$ 、降伏耐力:  $P_y$ 、最大耐力:  $P_u$ 、最大荷重時変形:  $\delta_u$  と破壊形式を、有限要素解析値については、 $K$ 、 $P_y$ 、 $P_u$ 、 $\delta_u$  を、実験値に対する有限要素解析値の比とともにそれぞれ示す。

写真 2 には、はしあき  $e_1$  が 60mm の試験体の中板及び充填ボルトの最終状況を示す。

これらの結果から、以下のことがわかる。

- 1) 接触問題と複合非線形問題を取扱った本解法によりボルトせん断最大耐力を除き、充填ボルト接合部の荷重-変位関係において、中板の最大耐力を工学上十分な精度で追跡できる。
- 2) はしあき  $e_1$  が 60mm の試験体は、支圧耐力評価値の 90% の低い耐力で中板の孔が拡がり、支圧による大きな塑性変形が生じた後にボルトが折損した。中板の支圧最大耐力は更に上昇する傾向にある。
- 3) ボルトせん断最大耐力評価値の 90% まで充填ボルトは破断せず、ボルト軸部は高い耐力を有している。
- 4) 本接合法は初期剛性も確保でき、充填ボルトに大きなせん断力が生じても充填ボルトのテーパ面が緩む方向に滑るスリップバック現象は生じな

## 複半月充填ボルト支圧接合の基本特性

表 4 実験・解析結果(接合部引張試験)

$e_j$	実験値					解析値				解析値/実験値	
	$K$	$P_y$	$P_u$	$\delta_u$	F.P.	$K$	$P_y$	$P_u$	$\delta_u$	$P_y$	$P_u$
mm	kN/mm	kN	kN	mm	-	kN/mm	kN	kN	mm	-	-
30	150	184.4	236.4	6.5	S	270	175.4	250.5	8.3	0.95	1.06
40	240	195.2	303.0	9.1	S	288	174.4	322.1	13.6	0.89	1.06
60	300	119.5	335.7	7.1	R, B	289	166.9	368.0	11.0	1.40	1.10

$K$ : 初期剛性,  $P_y$ : 降伏耐力,  $P_u$ : 最大耐力,  $\delta_u$ : 最大耐力時の変位,

F.P.: 破壊形式, T: 引張破壊, S: はしめけ破壊, B: ボルト破壊, R: 支圧破壊

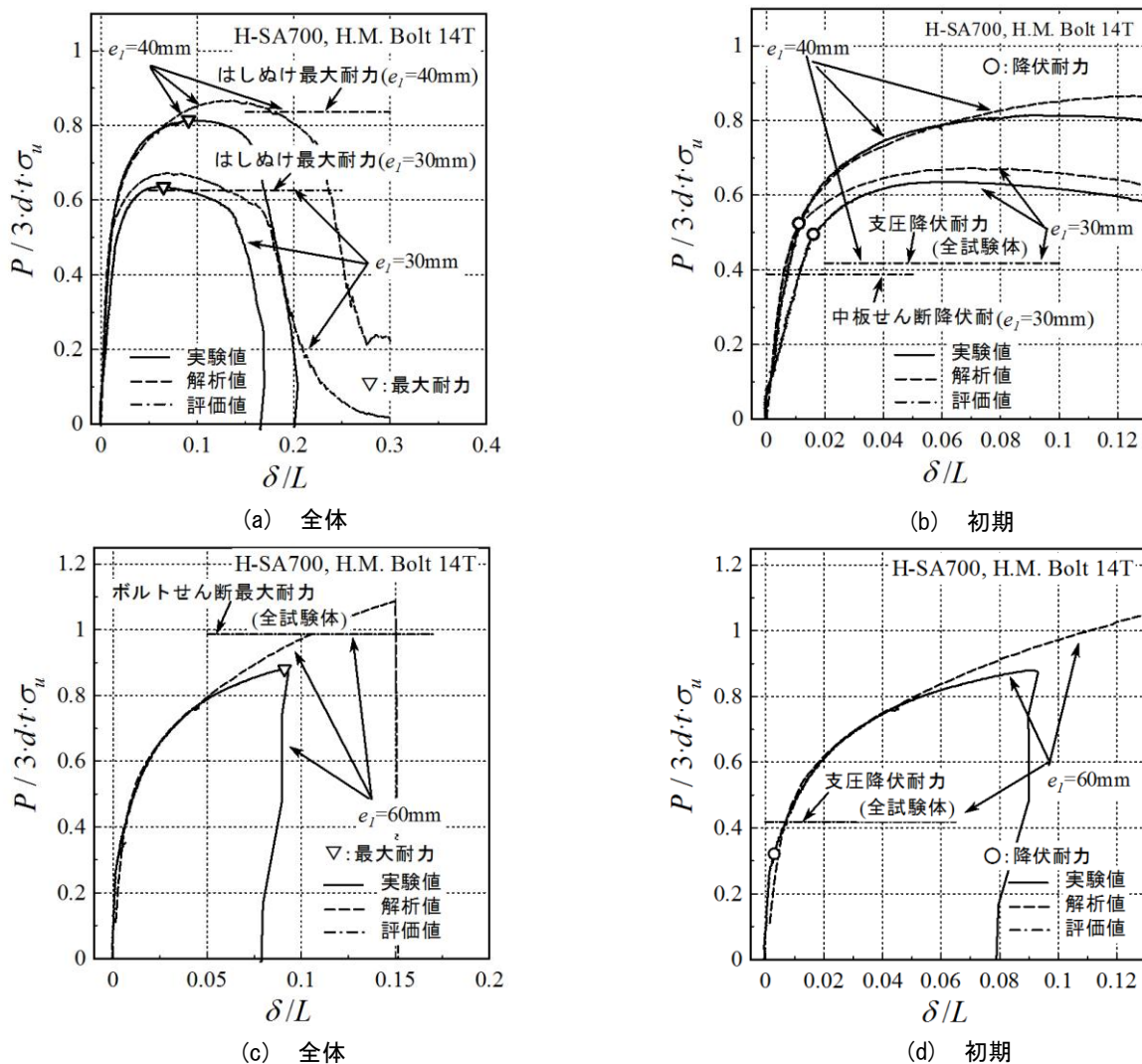


図 11 無次元化荷重-変形関係 (接合部引張試験)

い.

## 4.2 梁継手片振り繰返し载荷試験

梁継手試験体の片振り繰返し载荷試験結果を図 12~13 に示す。図 12 は、継手が完全な場合の梁の剛性  $K_S$  に対する梁継手試験体の剛性  $K/K_S = ((P/w)/(48 \cdot E_S \cdot I_S/L^3))$  と繰返し载荷回数  $N$  との関係 (FB: 摩擦接合, HM: 充填支圧接合, NB: 支圧接合) について示す。図 13 には HM 試験体について (1) 式で示した無次元化した荷重  $P \cdot L^2/48 \cdot E_S \cdot I_S$  と無

次元化した中央たわみ  $w/L$  の関係を 100 サイクル目と 5000 サイクル目について示す。

これらの結果から以下のことがわかる。

- 1) 1Hz, 5000 回程度の繰返し载荷によっても、充填ボルトは、スリップバックしない。
- 2) 充填ボルトではない従来型の高力ボルトを用いた支圧接合試験体 (NB 試験体) は継手が完全な場合の剛性  $K_S$  と比べ初期から 62% 程度の低い剛性を示し载荷の繰返しに伴って剛性は漸減する。
- 3) 摩擦接合試験体 (FB 試験体), 充填ボルト支圧接

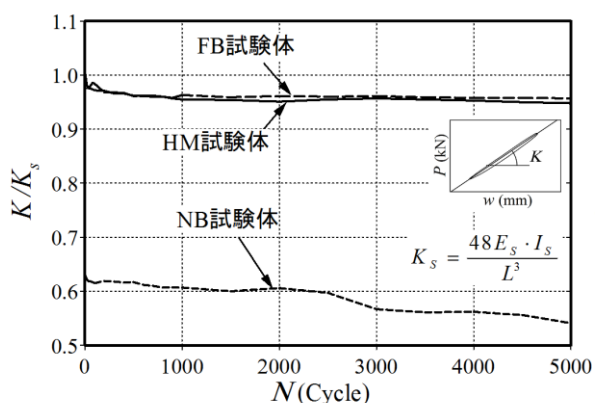


図 12 無次元化梁継手剛性-繰返し回数関係  
(梁継手試験)

合試験体(HM 試験体)ともに初期の 500 サイクルで、初期剛性の 95%まで剛性が低下する。その後、HM 試験体は剛性が微増減を繰返し FB 試験体とほぼ同じ一定の剛性を保持する。

- 4) 支圧接合した NB 試験体と HM 試験体の剛性差から、本接合法によれば、充填ボルトの自己充填機能が良好に作動し、継手の剛性を維持・確保しうる。

## 5. まとめ

高強度鋼用の効率の良い 1 つの接合法として、複半月充填ボルト支圧接合法を提案し、H-SA700 鋼材を用いた接合部について単調引張載荷試験を行って、接触・複合非線形有限要素法解析により試験を追跡した。また、本接合法を用いた梁継手接合試験体を作成して、多数回の片振り繰返し載荷試験を行って、本接合法の可能性を検討した。得られた知見は、以下の様に要約できる。

- 1) 2 つに分割した充填ボルト軸部は、充填ボルトのせん断最大耐力評価値の 9 割まで耐力を確保できる。
- 2) ボルトに折損が生じるまでの大きなせん断力を生じさせてもテーパ面ではボルトが緩む方向のずれ変形、いわゆるスリップバック現象は生じず、高い接合部の初期剛性が確保できる。
- 3) 本接合法では多数回の中規模外乱に対して充填ボルトが貫入して、梁継手の剛性が維持・確保しうる自己充填機能を有している。

## 謝辞

本実験で使用した超高力摩擦ボルトは新日鐵住金ボルト株式会社 畑中 清 氏より支給していただき

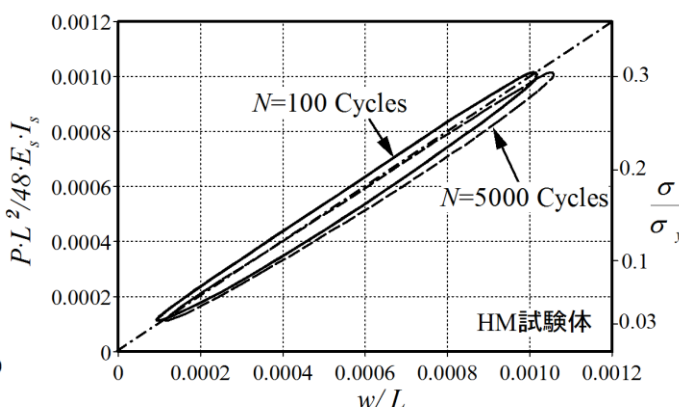


図 13 無次元化荷重-無次元化中央たわみ関係  
(梁継手試験)

ました。

研究経費の一部は科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金) (課題番号:26420554 研究代表者:玉井宏章), 前田記念工学振興財団 平成 26 年度研究助成 高強度鋼 H-SA700A 部材の接合のための複半月充填支圧ボルトに関する基礎的研究で賄われました。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 佐藤篤司, 吹田啓一郎, 井上一朗: 建築構造用高強度鋼材 H-SA700A を用いた柱梁材を弾性に留める乾式接合法の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 646 号, pp.2355-2363, 2009.12.
- 2) 玉井宏章, 山西央朗, 高松隆夫, 松尾彰: 建築構造用高強度鋼材 H-SA700A を用いた乾式組立材の横座屈性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 660 号, pp.407-415, 2011.2.
- 3) 日本鋼構造協会接合小委員会編 鋼構造資料集成: リベット接合・高力ボルト接合, 技報堂, 1977.
- 4) ばねの遅れ破壊に関する研究委員会: ばねの遅れ破壊に関する研究委員会報告その 1, ばね論文集, 第 58 号, pp.41-48, 2013.4.
- 5) O.C. Zienkiewicz, R.L.Taylor, J.Z.Zhu: The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, -Sixth editions, ELSEVIER, pp.383-393, 2010.
- 6) L.R.Herrmann, Elasticity equations for incompressible, or nearly incompressible materials by a variational theorem; J.A.I.A.A., 3, 1896, 1965.
- 7) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 技報堂, pp.41-61, 2006.
- 8) 日本建築学会: 鋼構造設計規準-許容応力度設計法-, 技報堂, p.13.2005.
- 9) American Institute of Steel Construction: Specification for Structural Steel Buildings, 2005.3.
- 10) 佐藤篤司, 吹田啓一郎, 多田裕一: 支圧を考慮した高力ボルト接合部の最大耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 662 号, pp.845-853, 2011.4.
- 11) 安井信行: 高力ボルト支圧接合部の降伏耐力, 鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻, pp.193-200, 2011.11.