

# 複半月充填支圧ボルト接合による 高強度鋼梁継手の載荷性状

玉井宏章\*・森田真理乃\*\*・島田有二郎\*\*\*

## Cyclic loading test of High-strength Beam Joint by Use of Half-moon Shaped Bearing Bolts

by

Hiroyuki TAMAI\*, Marino MORITA \*\* and Yujiro SHIMADA\*\*\*

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 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. Slip back phenomena, in which the diagonal cut face of the shank slips out of its normal position, doesn't occur during elastic cyclic loading. The half moon bolts always penetrate the connected steel plate so as to fill up a hole. Hence, the present beam joint maintains constant stiffness during elastic cyclic loading.

**Key words :** Bearing, Bolted connection, High-Strength Steel, H-SA700

### 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。このような背景から、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) 施工管理を簡潔化するといった課題を克服しうる複半月充填ボルト接合法を提案している。

本研究では、この接合法について、梁継手試験体を用いて4点曲げ漸増繰返し載荷実験を行い、自己充填性、接合部剛性、弾性限耐力及び終局耐力について実験的・解析的に検討する。

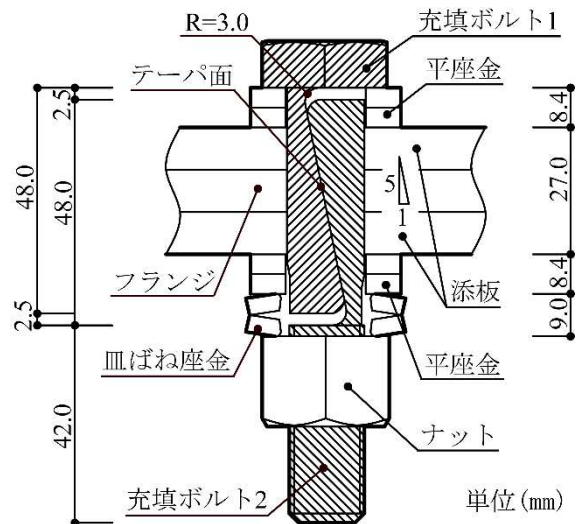


図1 複半月充填ボルト（試験体下フランジ）

平成29年6月19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 (Faculty of Engineering)

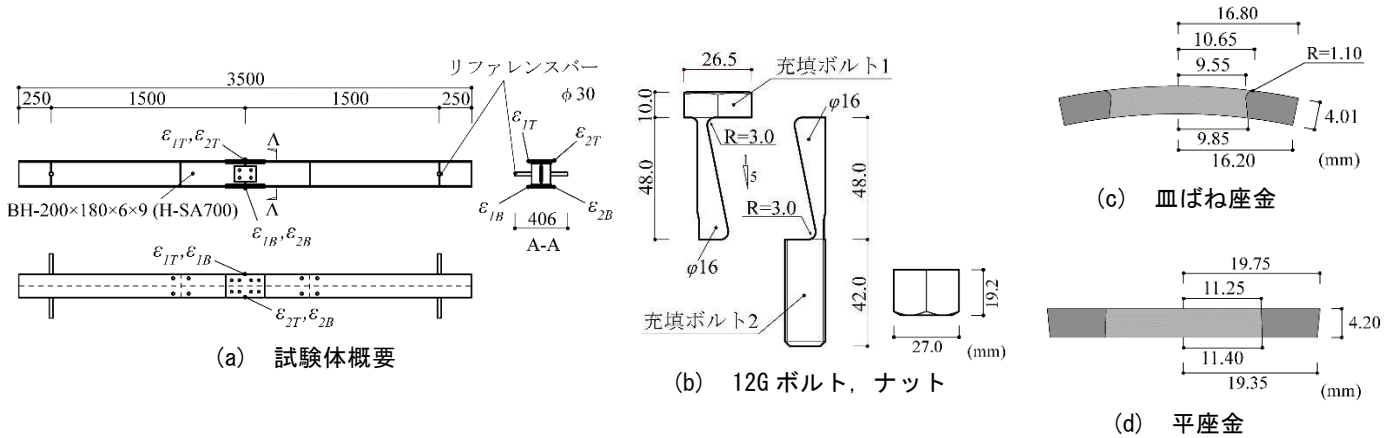


図2 試験体

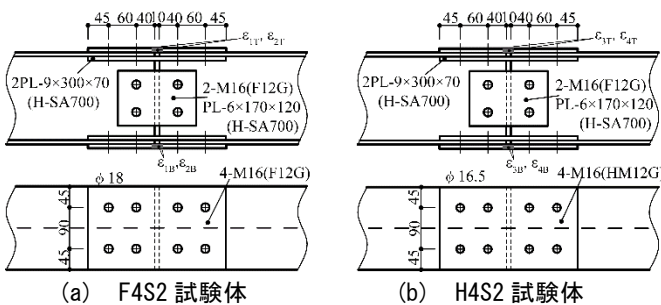


図3 試験体の継手詳細

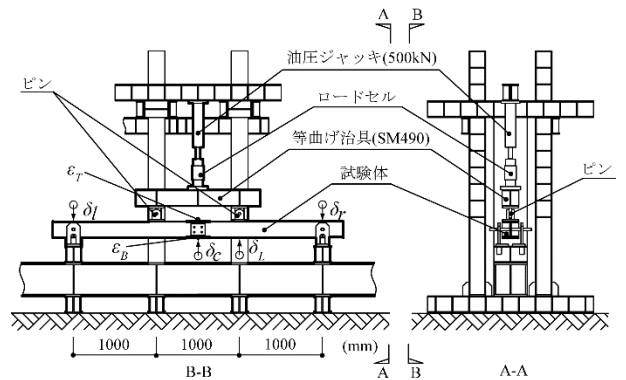


図4 荷装置図と計測計画

表1 試験・解析シリーズ

試験シリーズ	ボルト	ボルト本数	せん断面数	初期導入張力 (kN)	皿ばね位置	皿ばね数	加力プログラム	
I	F4S2T1-CE	FB	4	2	200	-	-	両振り 弾性
	H4S2T3-CE	HM	4	2	20	ナット側	2	両振り 弾性
II	H4S2T2-CE	HM	4	2	30	ナット側	2	両振り 弾性
	H4S2T3-CE	HM	4	2	20	ナット側	2	両振り 弾性
	H4S2T4-CE	HM	4	2	10	ナット側	2	両振り 弾性
III	F4S2T1-CP	FB	4	2	200	-	-	両振り 弾塑性
	H4S2T3-CP	HM	4	2	20	ナット側	2	両振り 弾塑性

FB: 高力摩擦ボルト, HM: 複半月充填ボルト

表2 素材試験結果

鋼種	板厚・径 (mm)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{st}$ (%)	$\epsilon_i$ (%)	$\epsilon_u$ (%)
12G	16	1110	1170	-	4.6	18.2
H-SA700	9	795	862	-	6.6	11.7
H-SA700	6	795	862	-	6.6	11.7

$\sigma_y$ : 降伏応力,  $\sigma_u$ : 引張強さ,  $\epsilon_{st}$ : 硬化開始歪,  $\epsilon_i$ : 一様伸び,  $\epsilon_u$ : 破断伸び

2. 充填ボルト接合法の概要

複半月ボルトを用いた充填ボルト接合法と、そのボルトを図1に示す。この接合法は、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なくすように充填し、2枚の皿ばね座金は軸方向に弾性変形に縮んでいる。繰返し荷重に対して、ボルトねじとナットには緩みは生じず、ずれが生じてボルト孔が拡張されても、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、せん断方向ボルトの緩みは生じない。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法は、リベット接合法と同等程度(0.2mm以内)にギャップは解消されるため、従来の支圧接合の初期剛性の問題点を解決でき、かつ、ボルト鋼種 12T~14Tを採用し高耐力が発揮できるので、板厚が厚く、高強度の鋼材に対して効率の良い接合が期待できる。

3. 実験及び解析の概要

3.1 実験の概要

○試験体

図2に試験体の概要を、図3に試験体の継手詳細(F4S2, H4S2)を示す。試験体は、全長 3500mm, 支点間 3000mm の梁(BH-200×180×6×9, H-SA700)に、中央部に継手を設けたものである。試験シリーズを表1に示す。シリーズIでは接合形式、シリーズIIではボルトの初期導入張力を変化させる。また、シリーズIIIについては終局まで荷重を行い、弾塑性域での挙動と終局状態を確認する。試験体はフランジの接合方法を変化させたもので、ウェブはすべて添板(PL6-170×120, H-SA700)を介して、高力ボルト(12GSHTB)4本で摩擦接合している。充填ボルトは高力ボルト(12GSHTB)を用いて作成したものを使用し、支圧接合している。ま

たボルト(12G), 梁(H-SA700), ワッシャー(S55C)の素材試験結果を表2に示す。

### ○梁継手の降伏耐力評価と設計式

支圧ボルト接合のフランジ継手を有する弾性限界荷重及び終局荷重は次式で求まる。

$$P_a = 2 \cdot \frac{M_a}{L}, \quad P_u = 2 \cdot \frac{M_P}{L} \quad (1.a,b)$$

継手の降伏モーメントは支圧接合の場合、次式が与えられる。

$$M_a = d_b \cdot \min(p_{y1}, p_{y2}, p_{y3}) \quad (2)$$

$$p_y = \beta \cdot n \cdot m \cdot A_s \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad (3.a)$$

$$p_{y1} = A_m \cdot \sigma_y \quad (3.b)$$

$$p_{y2} = n \cdot d \cdot t \cdot (\alpha \cdot F_y) \quad (3.c)$$

$$p_{y3} = 2 \cdot n_r \cdot A_{ms} \cdot \frac{F_y}{2} \quad (3.d)$$

ここで、各式中の諸量は次式のように与えられる。

$$A_m = (W - n_c \cdot D) \cdot t, \quad n = n_c \cdot n_r, \quad A_s = \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

$$\alpha = 2.01^3, \quad F_y = \min(\sigma_y, 0.7 \cdot \sigma_u),$$

$$A_{ms} = [(n-1) \cdot p + e_1] \cdot t$$

継手の最大モーメント  $M_P$  は、摩擦接合、支圧接合の場合ともに次式で与えられる。

$$M_P = d_b \min\{p_{u1}, p_{u2}, p_{u3}, p_{u4}\} \quad (4)$$

$$p_u = n \cdot m \cdot A_s \cdot \sigma_u / \sqrt{3} \quad (5.a)$$

$$p_{u1} = A_m \cdot \sigma_u \quad (5.b)$$

$$p_{u2} = 2 \cdot n_c \cdot A_{ns} \cdot \sigma_u / 2 \quad (5.c)$$

$$p_{u3} = A_m^* \cdot \sigma_u + 2 \cdot A_{ns} \cdot \sigma_u / 2 \quad (5.d)$$

$$p_{u4} = \gamma \cdot p_{u4}^* \quad (5.e)$$

$$p_{u4}^* = (n - n_c) \cdot \sigma_u \cdot t \cdot \min(p, 3 \cdot d) + n_c \cdot \sigma_u \cdot t \cdot \min(e_1, 3 \cdot d) \quad (5.f)$$

$n_r \geq 2$ かつ $e_1 \leq 3 \cdot d$ のとき、

$$\gamma = a \cdot \frac{e_1}{(n_r - 1) \cdot p} + b \leq 1 \quad (6.a)$$

$n_r = 1$ または $e_1 > 3 \cdot d$ のとき

$$\gamma = 1 \quad (6.b)$$

上式中の諸量は、次式のように与えられる。

$$A_m^* = \min(g - D, 2 \cdot e_2 - D) \cdot t$$

ここに、梁の支点と加力点の距離 $L(L=1000\text{mm})$ , 上下フランジの板厚中心間距離 $d_b$ , 板幅 $W$ , ボルトの行・列数 $n_r \cdot n_c$ , ボルト孔径 $D$ , ピッチ, はしあき距離, ゲージ距離, へりあき距離 $p, e_1, g, e_2$ , 材の板厚, 摩擦面数, 降伏応力, 引張り強さ $t, m, \sigma_y, \sigma_u$ , ボルト軸径 $d$ , ボルト軸断面積(公称値) $A_s$ , ボルトの降伏応力, 引張強さ $b\sigma_y, b\sigma_u$ である。また,  $a, b$ は実験定数で $a=0.240, b=0.699$ である。H4S2T3-CE試験体では,  $P_a=240\text{kN}$ となる。また, F4S2T1-CE試験体ではすべり耐力で決まり,  $P_a=180\text{kN}$ となる。

次に充填ボルト接合梁継手のフランジ部の設計を考える。充填ボルト接合を用いた場合に必要ボルト本数は, (3)式から, 次式で求められる値のうち, いずれか大きい値で求めることができる。

$$n_b = \frac{P_{y1}}{b q_y}, \quad b q_y = \beta \cdot m \cdot A_s \cdot \frac{b \sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (7.a)$$

$$n_l = \frac{P_{y1}}{b q_y}, \quad e q_y = d \cdot t \cdot (\alpha \cdot \sigma_y) \quad (7.b)$$

### ○載荷装置と加力プログラム

図4に載荷装置を示す。試験体の両端をピンとローラーで支持し, 等曲げ治具(BH-200×200×6×9, SM490)とロードセルを介して中央部より左右に500mmの点離れた支点を上下させて漸増繰返し載荷を行う。加力プログラムは, シリーズI, IIでは荷重制御で圧縮と引張を1サイクルとし, 正負交番漸増繰返し載荷として, 20kN, 40kN, 60kN, 80kN, 100kNの荷重振幅について各2サイクルずつ載荷を行う。シリーズIIIでは弾塑性範囲で加力することとし, 変位制御で圧縮と引張を1サイクルとし, 正負交番漸増繰返し載荷として5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mmの荷重振幅について各2サイクルずつ載荷し, その後終局まで圧縮単調載荷を行う。

### ○計測計画

計測方法は, ロードセルから荷重 $P$ を, 中央たわみ $w_c$ は中央の変位 $\delta_c$ と支点変位 $\delta_l, \delta_r$ を平均した値の差により求める(図5参照)。

$$w_c = \delta_c - \frac{\delta_l + \delta_r}{2}, \quad w_L = \delta_L - \frac{\delta_l + \delta_r}{2} \quad (8.a,b)$$

継手が完全な場合, 無次元化荷重 - 中央たわみ関係は次式が与えられる。

$$\frac{w_c}{l} = \frac{23 \cdot P \cdot l^2}{1269 \cdot E_s \cdot I_s} \quad (9)$$

ここに $P$ は荷重,  $E_s$ はヤング率,  $I_s$ はH型鋼梁の断面二次モーメントである。

ひずみを計測し, 局率を確認するため, ひずみゲ-

ジを試験体中央断面の表裏に2枚ずつ貼付け、歪 $\varepsilon_{1T}$ 、 $\varepsilon_{1B}$ 及び $\varepsilon_{2T}$ 、 $\varepsilon_{2B}$ を計測する。

$$\kappa = \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_B}{D} \quad (10)$$

$$\text{ここに、} \varepsilon_T = \frac{\varepsilon_{1T} + \varepsilon_{2T}}{2} \quad (11.a)$$

$$\varepsilon_B = \frac{\varepsilon_{1B} + \varepsilon_{2B}}{2} \quad (11.b)$$

荷重： $P$  - 中央たわみ $w_C$ 関係と曲げモーメント： $M$  - 計測曲率： $\kappa$  とから継手の平均値曲げ剛性が継手の剛性として評価できる。

### 3.2 有限要素解析の概要フランジ

図5に梁継手の解析モデルを示す。解析対象の対称性を考慮して1/4領域について解析を行った。継手近傍を除く梁は、自由度を縮減するため弾性要素を用いて表し、立体要素とはリジットリンクを用いて接続した。それ以外の部材は双1次変位関数と完全積分を用いた四面体要素を採用した。素材試験から求めた応力-歪関係から真応力-真歪関係を用い、ナット-スプライスプレート間、梁フランジ-スプライスプレート間が接触離間する複合非線形立体問題として取り扱う。

#### ○初期引張力の導入方法

ボルトの締付は、ボルトに接触しているワッシャーに初期圧縮力を与えて導入する。ワッシャーの有限要素分割を2つの領域に分け、仮想切断面上の節点自由度に対して初期圧縮力を与えた後に対応する節点間の相対変形を拘束する操作を行う。 $f_i$ 、 $u_i$ 及び $f_b$ 、 $u_b$ を仮想断面上下の節点力、節点変位とし、 $u^*$ を共通パラメータ、 $f^*$ を対応する節点力とすると次式が成り立つ。

$$u_i = u^*, \quad u_b = u^* \quad (12.a,b)$$

エネルギー保存則より

$$f^* \cdot u^* = f_i \cdot u_i + f_b \cdot u_b \quad (13)$$

(12.a,b)式を(13)式に代入すると、

$$f^* \cdot u^* = f_i \cdot u^* + f_b \cdot u^*$$

任意の $u^*$ について上式が成立するので、

$$f^* = f_i + f_b \quad (14)$$

が得られる。(14)式は変位拘束したときに得られる条件式となる。また、初期圧縮力 $f_{pre}$ は $f_b$ に等しくなるので次式の関係が成立する。

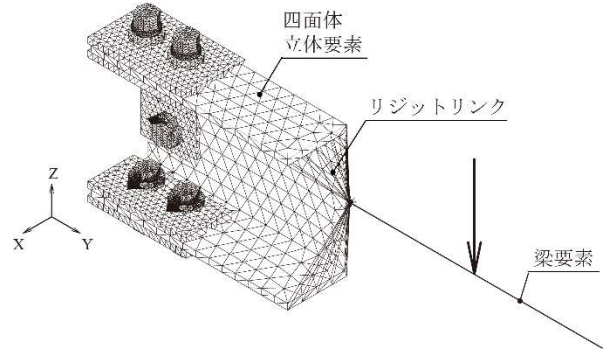


図5 梁継手の解析モデル

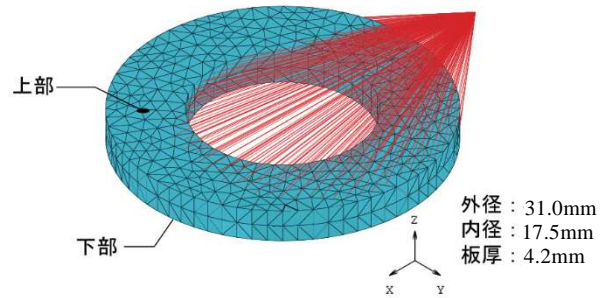


図6 ワッシャーのモデル化

表3 応力-歪関係係数値モデル

鋼種	板厚・径	$\sigma_y$	$\varepsilon_{pst}^*$	$\varepsilon_0^*$	$m$	$C$	$n$
	(mm)	( $N/mm^2$ )	(%)	(%)	—	( $N/mm^2$ )	—
12G	16	1124	0.7	-0.7	2.5	1.26	0.047
H-SA700	9	808	—	-1.60	5.0	1.39	0.078
H-SA700	6	808	—	-1.60	5.0	1.39	0.078
S55C	4	1376	0.3	-0.30	2.0	1.42	0.07

$\sigma_y$ : 降伏応力,  $\varepsilon_{pst}^*$ : 加工硬化開始歪の塑性成分,  
 $\varepsilon_0^*$ : 修正歪,  $m$ : 修正係数,  $C$ ,  $n$ : 実験定数

$$f_b = f_{pre}$$

整理すると、

$$f^* = f_i + f_b, \quad f_{pre} = f_b \quad (15.a,b)$$

初期圧縮力に対する変形を $u_{pre}$ とすると、再びエネルギーの保存則より

$$\begin{aligned} f_i \cdot u_i + f_b \cdot u_b &= f^* \cdot u^* + f_{pre} \cdot u_{pre} \\ &= (f_i + f_b) \cdot u^* + f_b \cdot u_{pre} \\ &= f_i \cdot u^* + f_b \cdot (u^* + u_{pre}) \end{aligned} \quad (16)$$

任意の $f_i$ 、 $f_b$ に対して上式は成立するので、次式が得られる。

$$u_i = u^*, \quad u_b = u^* + u_{pre} \quad (17.a,b)$$

よって(17.a,b)式から $u_{pre}$ は、

$$u_{pre} = u_b - u_i \quad (18)$$

となり  $u_{pre}$  は相対変位となっていることが分かる。

さて、 $u_{pre}=0$  を条件として与えれば対応する  $u_i$  は  $u_b$  と等しくなり、 $f_{pre} = f_b = -f_t$  となる。一方、 $f_{pre} = C$  を条件として与えれば  $f_b = C$  となり、 $u_{pre} = u_b - u_i$  となるので、 $u_{pre}$  だけ相対変位が生じ初期圧縮力が導入される。

以上の関係をマトリックス表示すると、

$$\begin{bmatrix} u & u_{pre} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f^* \\ f_{pre} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} u & u_{pre} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_t \\ f_b \end{Bmatrix}$$

から

$$\begin{Bmatrix} f^* \\ f_{pre} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_t \\ f_b \end{Bmatrix}$$

逆関係を求めると、

$$\begin{Bmatrix} f_t \\ f_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f^* \\ f_{pre} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

また、

$$\begin{bmatrix} f_t & f_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_t & f_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^* \\ u_{pre} \end{Bmatrix}$$

から

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^* \\ u_{pre} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

全体剛性方程式において、荷重ベクトル、変位ベクトル  $\{f_t \ f_b\}^T$ 、 $\{u_i \ u_b\}^T$  を(19)、(20)式を用いて  $\{f^* \ f_{pre}\}^T$ 、 $\{u^* \ u_{pre}\}^T$  に変換すると、 $u_{pre}=0$  とすれば相対変位は固定され、 $f_{pre} = C$  とすれば初期導入張力を導入することができる。

### ○接触・離間の解法

梁フランジと充填ボルトの接触、充填ボルト同士等の接触は、節点で接触・離間を判定し、接触面接線方向については、次式のクーロン摩擦力を生じるものとした。

$$f_t \leq -\mu \cdot f_n \cdot t \quad (21)$$

ここに、 $\mu$ ：摩擦係数、 $f_t$ ：接線方向に作用する力、 $f_n$ ：接線方向の反力、 $t$ ：相対速度方向の接線ベ

クトルである。

$$t = \frac{V_r}{|V_r|}, \quad V_r : \text{相対滑り速度}$$

梁フランジと充填ボルトとの間の摩擦係数  $\mu$  は加工のままの表面状態であるとして 0.25、充填ボルトのテーパ面相互の摩擦係数  $\mu$  は実測値の 0.302、摩擦接合面の梁と添板間の摩擦係数  $\mu$  は 0.45 とした。複合非線形解析の手法として、変位増分法とニュートン・ラプソン法による反復法を併用した。連立 1 次方程式のソルバーは非正定値解法を採用した。

### ○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。

$$\varepsilon_p^* \geq \varepsilon_{p, st}^* \text{ のとき,}$$

$$\sigma^* = \sigma_y^* \cdot C \cdot (\varepsilon_p^* - \varepsilon_0^*)^n \quad (22.a)$$

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。

$$0 \leq \varepsilon_p^* \leq \varepsilon_{p, st}^* \text{ のとき,}$$

$$\sigma^* = \sigma_y^* \quad (22.b)$$

塑性歪の定義から、

$$\varepsilon^* = \varepsilon_e^* + \varepsilon_p^* = \frac{\sigma^*}{E} + \varepsilon_p^* \quad (23)$$

ここに、 $\varepsilon_e^*$  は弾性対数歪である。

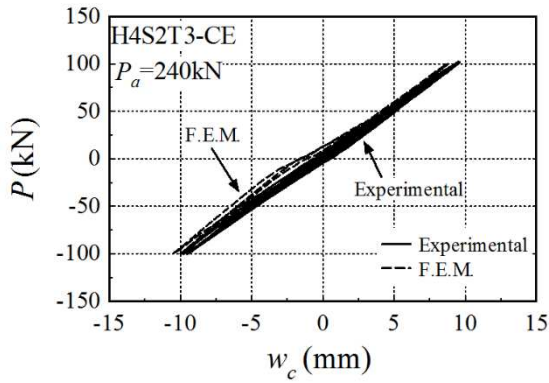
真応力と公称応力、対数歪と公称歪とは以下の変換則が成立する。

$$\varepsilon = \exp(\varepsilon^*) - 1, \quad \varepsilon^* = \ln(1 + \varepsilon) \quad (24.a,b)$$

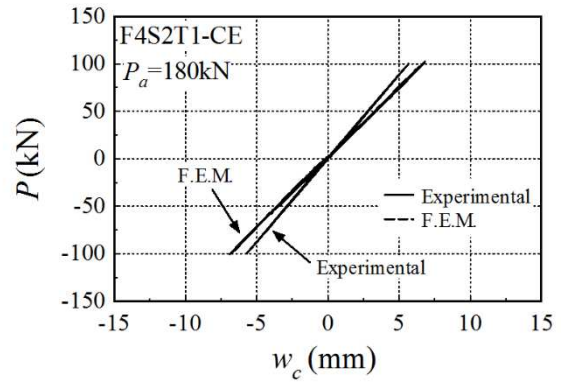
$$\sigma = \sigma^* / \exp(\varepsilon^*), \quad \sigma^* = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (24.c,d)$$

$\varepsilon_p^*$  を定めれば、(22.a,b)式より真応力  $\sigma^*$  が決定され、

対応する対数歪は(23)式で得られる。(24.a)、(24.c)式を用いて、対応する公称応力 - 公称歪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  $\sigma_u$ 、一様伸びが  $\varepsilon_1$  が求めれば、べき乗硬化則の材料定数  $n$ 、 $C$  は以下のように決定できる。

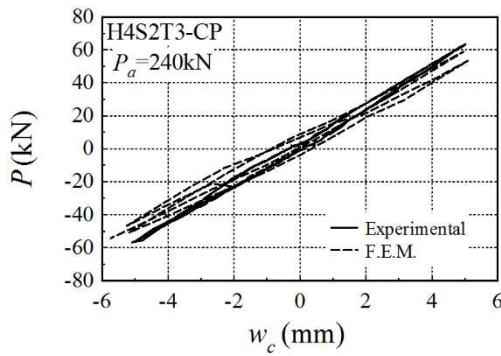


(a) H4S2T3-CE

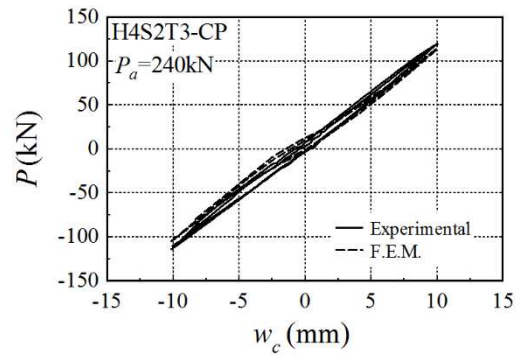


(b) F4S2T1-CE

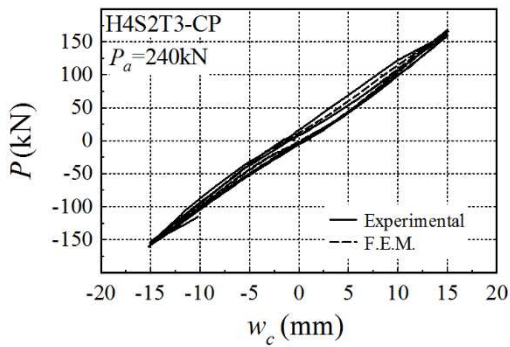
図7 荷重 - 中央たわみ関係 (シリーズ I)



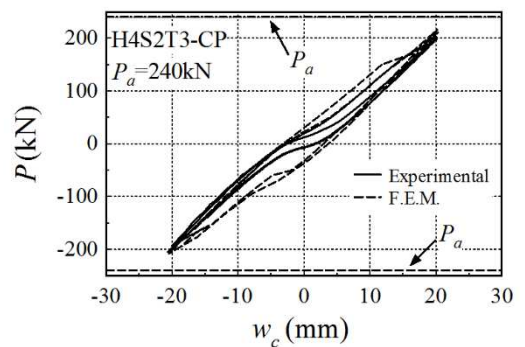
(a)  $w_{ca}=5\text{mm}$



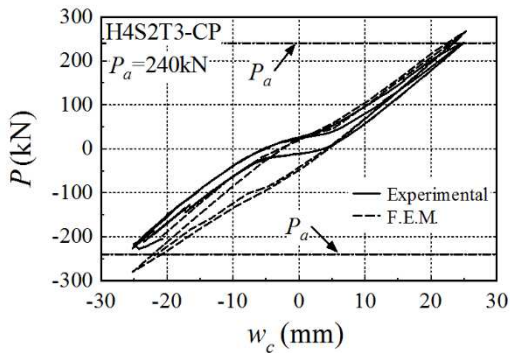
(b)  $w_{ca}=10\text{mm}$



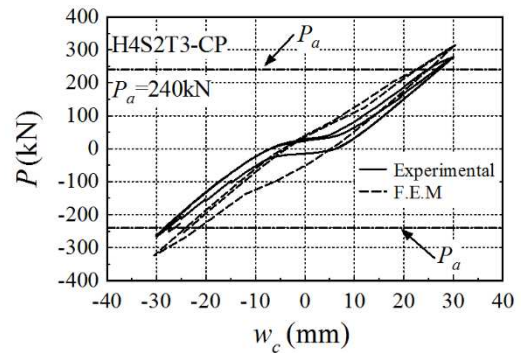
(c)  $w_{ca}=15\text{mm}$



(d)  $w_{ca}=20\text{mm}$



(e)  $w_{ca}=25\text{mm}$



(e)  $w_{ca}=30\text{mm}$

図8 荷重 - 中央たわみ関係 (H4S2T3-CP, シリーズ III) ( $w_{ca}=5\sim 30\text{mm}$ )

表 4 弾性定変位振幅時の無次元化荷重 (シリーズ I・II)

シリーズ	無次元化剛性																				平均	
	サイクル1		サイクル2		サイクル3		サイクル4		サイクル5		サイクル6		サイクル7		サイクル8		サイクル9		サイクル10			
	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張		
I	F4S2T1-CE	0.90	1.01	0.93	0.97	0.98	0.97	0.96	0.97	0.98	0.97	0.98	0.96	0.98	0.97	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.97
	H4S2T3-CE	0.75	0.74	0.69	0.75	0.67	0.67	0.66	0.71	0.66	0.67	0.66	0.70	0.67	0.68	0.67	0.70	0.67	0.67	0.67	0.69	0.69
	H4S2T2-CE	0.78	0.88	0.80	0.85	0.76	0.76	0.74	0.78	0.73	0.75	0.73	0.76	0.73	0.75	0.73	0.76	0.73	0.74	0.73	0.75	0.76
II	H4S2T3-CE	0.75	0.74	0.69	0.75	0.67	0.67	0.66	0.71	0.66	0.67	0.66	0.70	0.67	0.68	0.67	0.70	0.67	0.67	0.67	0.69	0.69
	H4S2T4-CE	0.73	0.84	0.75	0.82	0.75	0.78	0.73	0.78	0.74	0.76	0.73	0.76	0.73	0.76	0.73	0.75	0.74	0.76	0.74	0.75	0.76

シリーズ	F4S2T1-CE試験体との剛性の比																				平均	
	サイクル1		サイクル2		サイクル3		サイクル4		サイクル5		サイクル6		サイクル7		サイクル8		サイクル9		サイクル10			
	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張		
I	F4S2T1-CE	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	H4S2T3-CE	0.83	0.74	0.74	0.78	0.68	0.70	0.69	0.73	0.67	0.69	0.68	0.73	0.68	0.70	0.68	0.71	0.67	0.69	0.68	0.71	0.71
	H4S2T2-CE	0.86	0.87	0.85	0.88	0.77	0.79	0.77	0.80	0.75	0.77	0.74	0.79	0.74	0.77	0.75	0.77	0.74	0.76	0.74	0.76	0.78
II	H4S2T3-CE	0.83	0.74	0.74	0.78	0.68	0.70	0.69	0.73	0.67	0.69	0.68	0.73	0.68	0.70	0.68	0.71	0.67	0.69	0.68	0.71	0.71
	H4S2T4-CE	0.81	0.84	0.80	0.85	0.76	0.80	0.76	0.80	0.76	0.78	0.75	0.79	0.74	0.78	0.74	0.77	0.75	0.77	0.75	0.76	0.78

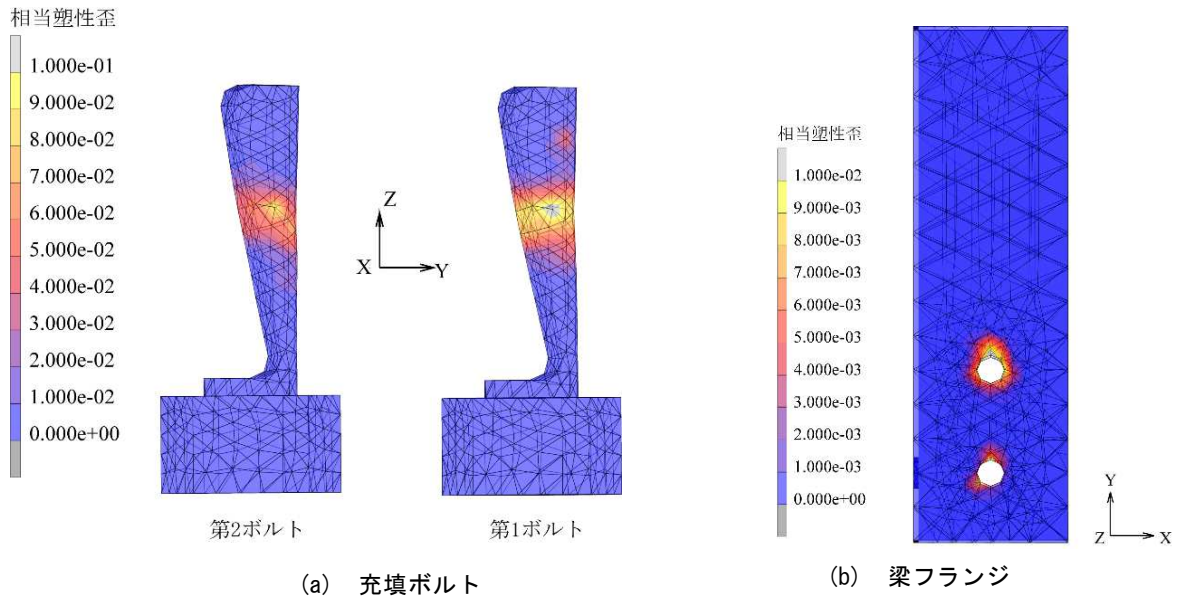


図 9  $w_{ca}=30\text{mm}$  振幅時の相当塑性歪分布 (H4S2T3-CP, シリーズ III)

$$n = \ln(1 + \epsilon_i) - \epsilon_0^* \quad (25.a)$$

$$C = \frac{\exp(n + \epsilon_0^*)}{\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \cdot n^n} \quad (25.b)$$

修正ひずみは  $\epsilon_0^*$  は、実験素材試験と適合するように  
に次式で与える。

$$\epsilon_0^* = \epsilon_{p-st}^* - m \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (25.c)$$

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。

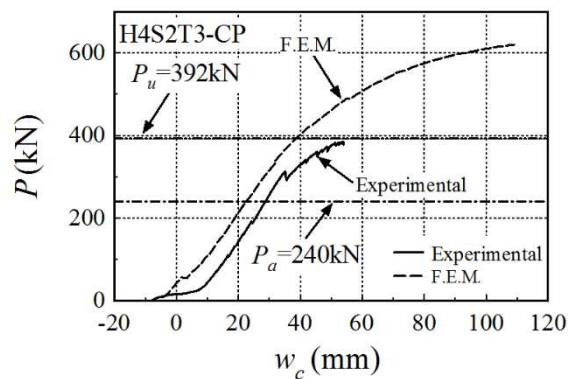


図 10 単調載荷時の荷重 - 中央たわみ関係 (H4S2T3-CP, シリーズ III)

#### 4. 結果と考察

実験結果と解析結果を図7～10、表4に示す。

図7には、シリーズⅠについて荷重 - 中央たわみの関係を実験値を実線で、解析値を破線で示す。表4には、シリーズⅠ及びⅡについて各サイクルの荷重 - 中央たわみ関係における剛性を鋼梁の曲げ剛性で無次元化した値を示す。図8には、シリーズⅢについて各振幅サイクル  $w_{Ca}=(a)5\text{mm},(b)10\text{mm},(c)15\text{mm},(d)20\text{mm},(e)25\text{mm},(f)30\text{mm}$  について図7と同様の関係を示す。図9には、シリーズⅢの  $w_{Ca}=30\text{mm}$  振幅の最終サイクル時の(a)下フランジ部の充填ボルト1及び(b)梁フランジにおける相当塑性歪の分布を等高線図で示す。図10には、シリーズⅢの単調載荷時の荷重 - 中央たわみ関係を図7と同様の方法で示す。

これらの図より得られる知見を項目毎に述べる。

##### ○自己充填機能について

図7(a)と表4のシリーズⅠの実験結果より、充填ボルト試験体は高力ボルト試験体に比べ約30%剛性が低くなっているものの、中ボルト支圧接合に見られるスリップ特性が見られないこと、また、図8(d),(e)から支圧降伏の進展により、荷重が0の付近で残留たわみが生じているが、2サイクル目には、剛性が回復していることから充填ボルトが自己充填機能を発揮している。この傾向は有限要素法解析についても確認できる。

##### ○充填ボルトの初期導入張力について

表4のシリーズⅡの実験結果より、3試験体とも同等の剛性を示していることから充填ボルト接合を用いた梁継手の剛性は初期導入張力量に大きな影響を及ぼさない。

##### ○スリップ型復元力特性の要因

図8(f)より、許容耐力を超える振幅では、スリップ型の復元力特性を示したが、図9(a),(b)より充填ボルト及び梁孔近傍の相当塑性ひずみの最大値は、第1充填ボルトで10%、第1ボルト孔で1%であり、充填ボルトの残留せん断変形が原因と考えられる。

##### ○耐力について

図10から、最大耐力以下の荷重で、リファレンスバーの耐力不足で残留塑性変形が見られたものの、設計式により最大荷重はおおむね良好に予測できている。有限要素解析が高い耐力を示すのは、等曲げ部分の梁の部が弾性梁要素に置換していることに起因している。

#### 5. まとめ

本研究では、複半月充填ボルト支圧接合梁継手の正負交番漸増振幅繰返し載荷試験及び解析を行い、自己充填機能、剛性、降伏耐力及び終局耐力の検討を行った。

得られた知見を以下に示す。

- 1) 本有限要素法解析により充填ボルト接合梁継手の剛性及び復元力特性を良好に再現できる。
- 2) 充填ボルト接合試験体では、通常の支圧接合で見られる初期スリップ現象は見られず、正負交番の繰返し荷重に対し、良好に自己充填機能を発揮する。
- 3) 充填ボルト試験体の降伏耐力と最大耐力は提案する設計式により良好に予測できる。
- 4) ボルトの初期導入張力量は、充填ボルト接合梁継手の剛性に大きな影響を及ぼさない。  
今後、リファレンスバーの耐力を適正に設計した梁継手試験体について載荷試験を行って、終局設計条件の満足度を調査する予定である。

#### 謝辞

本研究の経費の一部は、科学研究費助成事業（学術研究助成金）（課題番号:26420554、研究代表者 玉井宏章）で賄われました。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 佐藤篤司, 吹田啓一郎, 井上一郎, 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, 高松隆夫, 尾川勝彦, 高強度鋼用の複半月テーパ充填ボルト接合法に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第19巻, pp.201-208, 2011.11.
- 3) 玉井宏章, 桐山尚大, 中島康太, 山西央朗, 高松隆夫, 皿ばね座金付き複半月充填ボルト支圧接合梁継手の繰返し載荷実験, 鋼構造年次論文報告集, 第23巻, pp.278-284, 2015.11.