

複半月充填ボルト支圧接合梁継手の繰返し載荷実験

玉井 宏章*・中島 康太**・山下 祥平**

Loading Test on Bearing Bolt Beam Joint using Half-Moon-Shaped Bolts

by

Hiroyuki TAMAI*, Kota NAKASHIMA** and Shohei YAMASHITA**

We present the beam joint using half-moon-shaped bearing bolts as an effective fastener between high-strength steel members. In order to give a half-moon-shaped bearing bolt filling force, it is necessary to use a washer with restoring force such as a dish washer. Hence, in this study, loading test and F.E.M analysis of a dish washer is performed to clarify behavior of a dish washer. Also, repeat loading test of a beam joint using this jointing method is performed, self-filling function and joint stiffness are investigated.

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

1. はじめに

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の研究者によって行われている¹⁾. 高強度鋼部材の接合では, 超高力摩擦ボルト接合を行っても, かなり多くのボルト本数を必要とすることが既往の研究で明らかとなっている²⁾. この鋼材を用いた乾式組立材³⁾を普及させるためには, 接合方法をより耐力が高くかつ簡便にすることが必要と考えられる.

著者らは, 溶接を行わない場合の接合方法, 特にボルト接合のせん断伝達に関して, この問題を解決する新たな接合形式として, 複半月充填ボルト接合法を提案している²⁾.

複半月充填ボルトに充填力を付与するためには, 皿ばね座金のような復元力特性を持った座金の使用が不可欠となるため, 使用する座金に対し剛性性状を明らかにし, 初期導入張力を明確に設定する必要がある. そのため本研究では皿ばね座金の載荷試験と有限要素法解析を併せて行い, その性状の比較・検討を行った. また, 本接合方法を用いた梁継手試験体について繰返し載荷試験を行い, 自己充填性と接合部剛性を調査したので報告する.

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なくすように充填するので, 複半月充填ボルトと呼んでいる.

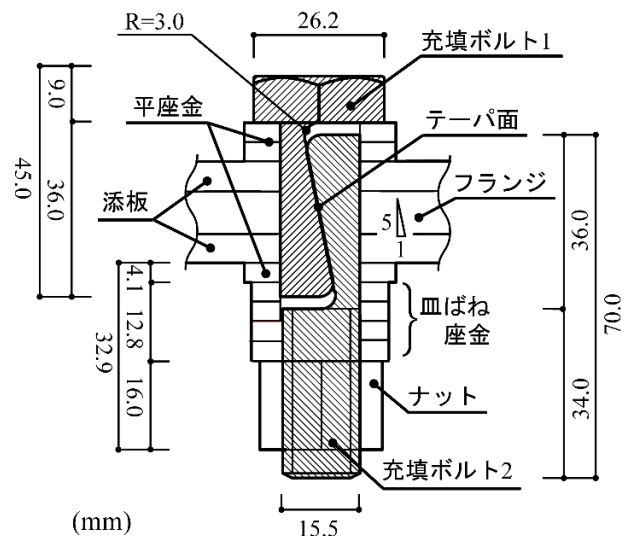


図1 複半月充填ボルト (梁継手試験体下フランジ接合部)

4枚の皿ばね座金はボルトの締め付け力によって軸方向に弾性変形で縮んでいる. 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は, リベット接合同程度 (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

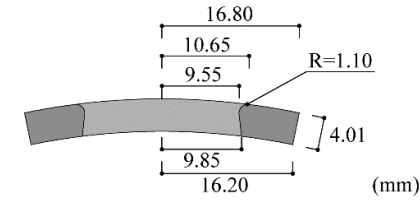


図 2 (a) 皿ばね座金試験体

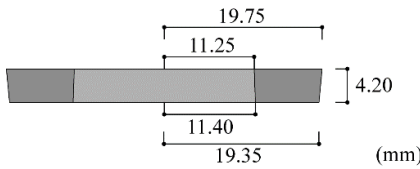


図 2 (b) 平座金

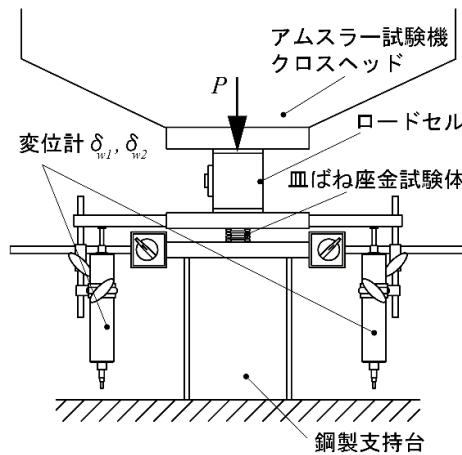


図 3 皿ばね座金載荷試験

表 1 試験シリーズ



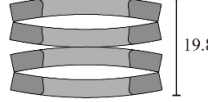
試験体名	形式
DW1	 4.95
DW2	 9.90
DW4	 19.80

表 2 素材試験結果

形状	鋼種	σ_y	σ_u	ϵ_{st}	σ_y/σ_u	ϵ_i	H_v
		N/mm ²	N/mm ²	%		%	-
皿ばね座金	S55C	1376	1521	1.0	0.90	6.9	440
平座金	S45C	572	727	2.0	0.79	12.8	213

σ_y : 降伏応力, σ_u : 最大応力, ϵ_{st} : 加工硬化開始ひずみ, σ_y/σ_u : 降伏比, ϵ_i : 一様伸び, H_v : ビッカース硬さ

表 3 応力 - ひずみ関係の数値モデル (べき乗則)

形状	鋼種	σ_y	ϵ_{pst}^*	ϵ_0^*	m	C	n
		N/mm ²	%	%	-	N/mm ²	%
皿ばね座金	S55C	1376	0.3	-0.3	2.0	1.42	7.0

σ_y : 降伏応力, ϵ_{pst}^* : 加工硬化開始ひずみの塑性成分, ϵ_0^* : 修正ひずみ, m : 修正係数, C, n : 実験定数

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がよい接合が期待できる。テーパ部の付け根は応力集中が起きないように R がとっており、テーパ角度は 5mm の軸方向のずれに対して、1mm 拡幅するように設定している。テーパ面は切削仕上げのまま摩擦係数は実測値で 0.306 である。

3. 載荷試験と解析の概要

3.1 皿ばね座金載荷試験

○試験体

図 2 に(a)皿ばね座金試験体と、充填ボルト設置の際に使用した(b)平座金を示す。皿ばね座金試験体は、外径 34mm、内径 19mm の一般ボルト用皿ばね座金 M18 の重荷重タイプを用意した。

○試験方法

図 3 に皿ばね座金の載荷装置を示す。

試験は 300kN 容量のアムスラー試験機を用いて載荷を行う。試験体の上下をリファレンスバーの付いた鋼板で挟んで固定し鋼製支持台に設置し、上部クロスヘッドよりロードセルを介して、静的単調圧縮載荷を行う。皿ばね座金の沈下量: δ_w は、治具に取り付けた左右の変位計の値: δ_{w1}, δ_{w2} を平均して求めた。

加力プログラムは、静的単調載荷として 40kN まで載荷し除荷した。

3.2 皿ばね座金の圧縮解析

○真応力 - 対数塑性ひずみ関係

降伏棚を除くひずみ硬化領域での真応力 - 対数ひずみ関係は、次のべき乗硬化則が良好に成立することが知られている。

$\epsilon_p^* \geq \epsilon_{pst}^*$ のとき、

$$\sigma^* = \sigma_y^* \cdot C \cdot (\epsilon_p^* - \epsilon_0^*)^n \quad (1.a)$$

ここに、 σ_y^* は降伏応力、 ϵ_p^* は塑性ひずみ、 ϵ_0^* は修正ひずみ、 ϵ_{pst}^* 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。

$0 \leq \epsilon_p^* \leq \epsilon_{pst}^*$ のとき、

$$\sigma^* = \sigma_y^* \quad (1.b)$$

塑性ひずみの定義から、

$$\epsilon^* = \epsilon_e^* + \epsilon_p^* = \frac{\sigma^*}{E} + \epsilon_p^* \quad (2)$$

ここに、 ϵ_e^* は弾性対数ひずみである。

真応力と公称応力、対数ひずみと公称ひずみには以下の変換則が成立する。

$$\epsilon = \exp(\epsilon^*) - 1, \quad \epsilon^* = \ln(1 + \epsilon) \quad (3.a,b)$$

$$\sigma = \sigma^* / \exp(\epsilon^*), \quad \sigma^* = \sigma \cdot (1 + \epsilon) \quad (3.c,d)$$

ϵ_p^* を定めれば、(1.a,b)式より真応力 σ^* が決定され、対応する対数ひずみは(2)式で得られる。(3.a), (3.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 σ_y , 引張強さ σ_u , 一様伸び ε_i が求めれば, べき乗硬化則の材料定数 n, C は以下のように決定できる.

$$n = \ln(1 + \varepsilon_i) - \varepsilon_0^* \quad (4.a)$$

$$C = \frac{\exp(n + \varepsilon_0^*)}{\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \cdot n^n} \quad (4.b)$$

修正ひずみ ε_0^* は, 実験素材試験と適合するように次式で与える.

$$\varepsilon_0^* = \varepsilon_{psr}^* - m \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (4.c)$$

ここに, m は修正係数で降伏棚の影響を適切に考慮するように注意する.

材料定数を決定するために素材試験を行ったので, これを表 2 に示す. 尚, 材料特性はビッカース硬さ試験により得られた, ビッカース硬さ H_v を次式で換算したものとしている³⁾.

$$\sigma_y = 3.54H_v - 182 \quad (5.a)$$

$$\sigma_u = 3.5H_v - 19 \quad (5.b)$$

ここに, σ_y :降伏応力, σ_u :引張強さである.

表 3 に解析に用いた応力 - ひずみ関係のべき乗側モデルの諸定数を示す.

○解析モデル

皿ばね座金の対称性を考慮して, 図 4 に示す 1/4 の領域を解析する. 皿ばね座金は 4 節点四面体立体要素を用いて要素分割をし, 鋼板及び皿ばね座金どうしの接触・離間を考慮した. 尚, 上下鋼板は剛体としてモデル化した. 皿ばね座金の応力 - ひずみ関係は n 乗則に従うものとし, 複合非線形問題として扱った. 節点数は 9228, 要素数は 43152 とした.

3. 3 梁継手の繰返し载荷試験

○試験体

図 5, 6 に梁継手試験体と継手部詳細をそれぞれ示す. 試験体は, 全長 3500mm 支点間が 3000mm の梁 (BH-250-125×6×9,SN400) に, 中央点より 500mm の位置に継手を設けたものである.

試験体は, 継手形式を変化させたものを用意した.

継手は, 上下フランジに添板 (PL6-410×125,SN400) 2 枚を介し 2 面せん断状態で, ボルト上下各 12 本, 計 24 本で接合し, ウェブは添板 (PL6-290×150,SN400) 2 枚を介して高力摩擦ボルト (8-M16,S10T) 8 本で摩擦接合している. いずれもボルト孔径は 18mm としている. 継手詳細を図 6 に示す.

試験体は, フランジ接合用ボルトを高力ボルト (24-M16F10T)を用いて摩擦接合した FB 試験体, 同様のボルト

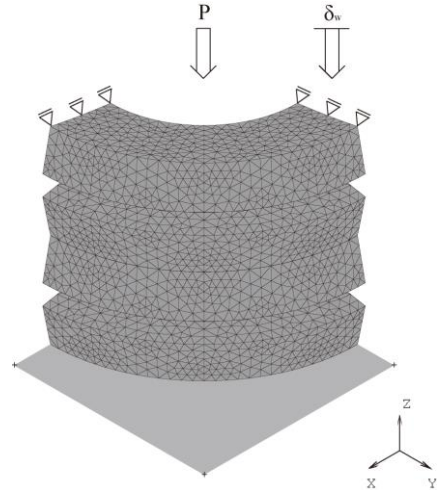


図 4 解析モデル

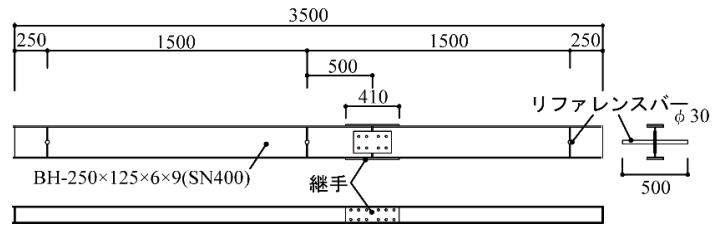


図 5 梁継手試験体

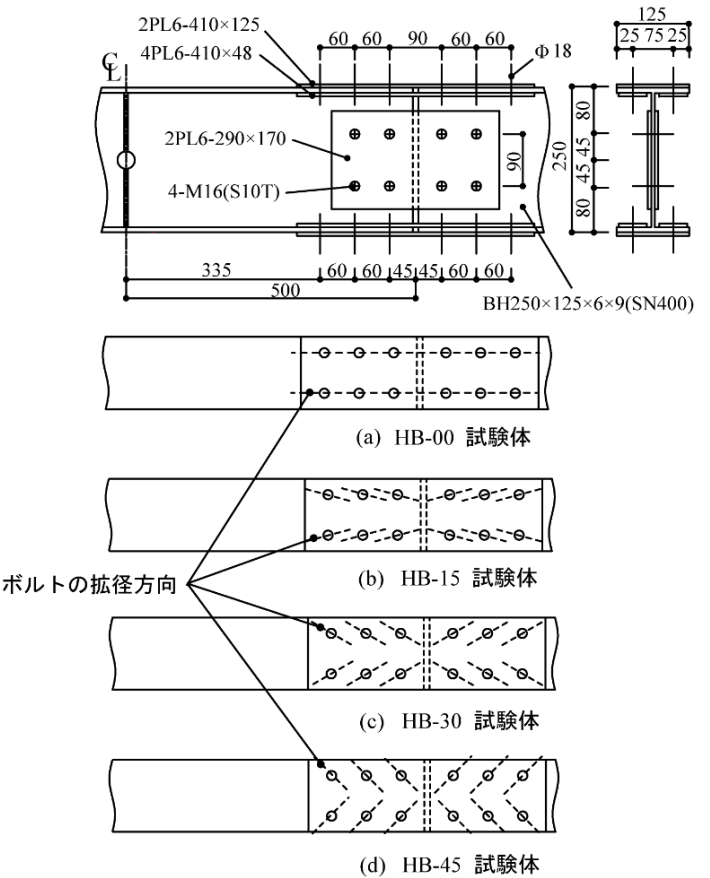


図 6 継手部詳細

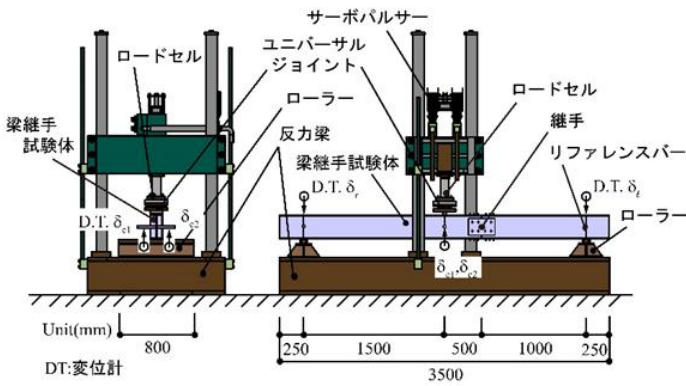


図7 荷装置

表4 素材試験結果

鋼種	σ_y	σ_u	ϵ_u	ϵ_{st}	ϵ_i
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)	(%)
SN400(6mm)	330	444	26.1	2.7	15.4
SN400(9mm)	280	414	25.1	2.1	19.4
F10T	898	950	17.5	-	4.8

σ_y : 降伏応力, σ_u : 最大応力, ϵ_u : 破断ひずみ, ϵ_{st} : 加工硬化開始ひずみ, ϵ_i : 一様伸び

トで支圧接合した NB 試験体, 複半月充填ボルト (24-M16 F10T)を用い支圧接合した HM-45S00 試験体, HM-45D00 試験体, 充填ボルトの拡径方向を梁材軸方向に対して 0 度, 15 度, 30 度, 45 度とした HM-26D00, HM-26D15, HM-26D30, HM-26D45 試験体 (図 6) の計 8 体を用意した。

充填ボルトは図 1 に示すように平座金 3 枚, 皿ばね座金 4 枚を用いており, HM-45S00 試験体はボルト設置前に張力を導入, 除去しボルトを十分に拡径させた後, 初期導入張力としてボルト最少断面の降伏耐力の 85%である 45kN を与え設置した. HM-45D00, HM-26D00, HM-26D15, HM-26D30, HM-26D45 試験体はダブルナットを使用し, HM-45D00 試験体は同じく 45kN で設置し, 以下の 4 つの試験体の初期導入張力はボルト最少断面の降伏耐力の 50%である 26kN を与え設置した. 尚, 軸力はナット回転法を用いて算出した。

素材試験は, 試験体の梁ウェブ(6mm), 梁フランジ(9mm)は JIS1A 号試験片, 高力ボルト F10T は JIS4 号試験片を使用する. 尚, それぞれ 3 体ずつの素材引張試験結果の平均値を表 4 に示す。

○荷装置と加力プログラム

支点間 3000mm のローラー上に試験体を設置し, 加力プレート (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。(荷装置を図 7 に, 加力プログラムを図 8 に, 試験体設置状況を写真 1 にそれぞれ示している。

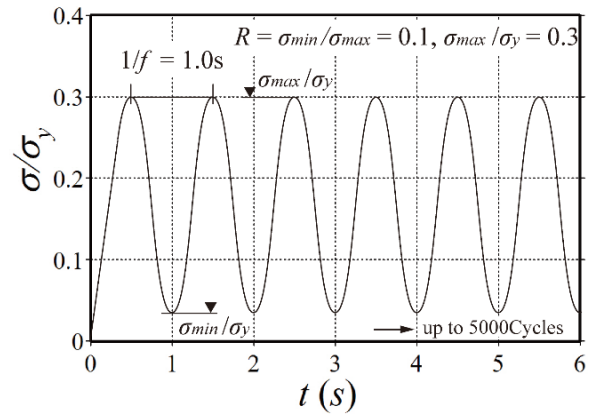


図8 加力プログラム

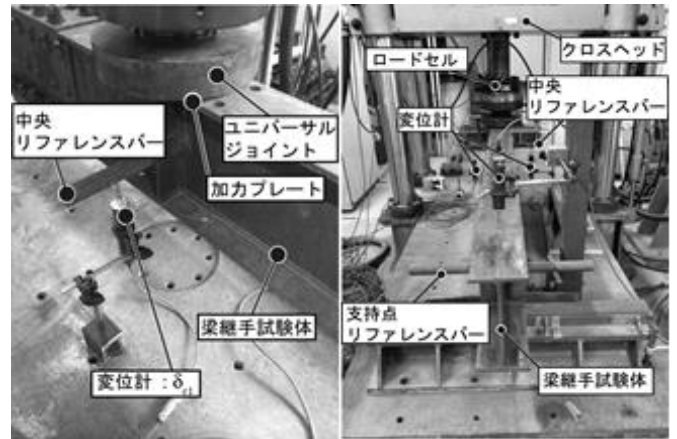


写真1 試験体設置状況

加力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 (=σ_{min}/σ_{max}) を 0.1, 降伏応力に対する最大応力振幅の比:σ_{max}/σ_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を用いて求める。

○計測計画

計測方法は, 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, 変位については中央たわみ: w は中央点の表裏の変位: δ₁, δ₂ と支点変位: δ₁, δ₂ を平均した値の差により求めた. 継手に剛性低下が生じず完全であるとすると, 中央たわみ: w と中央荷重: P には次式が成り立つ。

$$K_s = \frac{48E_s \cdot I_s}{L^3} \tag{6}$$

ここに, L: 支点間距離 (L=3000mm), $E_s \cdot I_s$: 梁の曲げ剛性 ($E_s \cdot I_s = 8.09 \times 10^{12} \text{Nmm}^2$).

表 5 皿ばね座金剛性 (実験値, 解析)

皿ばね座金剛性	DW1	DW2	DW4
	kN/mm	kN/mm	kN/mm
実験	119.1	61.2	30.7
解析	123.2	61.8	30.7

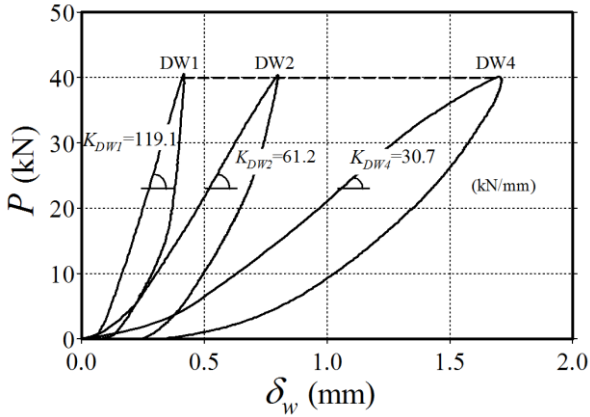


図 9 軸荷重 - 沈下量関係 (皿ばね座金)

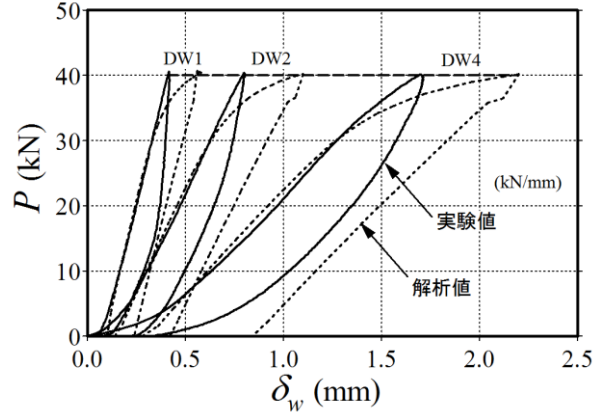


図 10 軸荷重 - 沈下量関係 (実験値, 解析値)

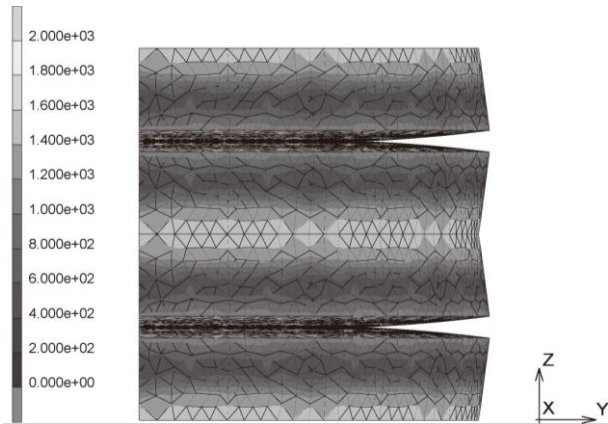


図 11 解析モデルの载荷状況 (相当応力分布, 最大荷重時)

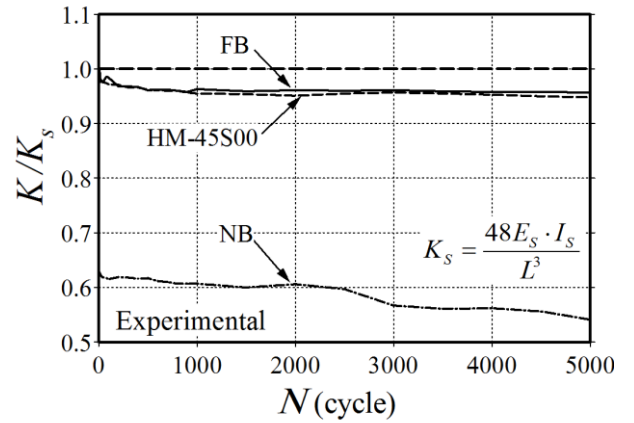


図 12 無次元化梁継手剛性 - 繰返し回数関係 (接合方法変化)

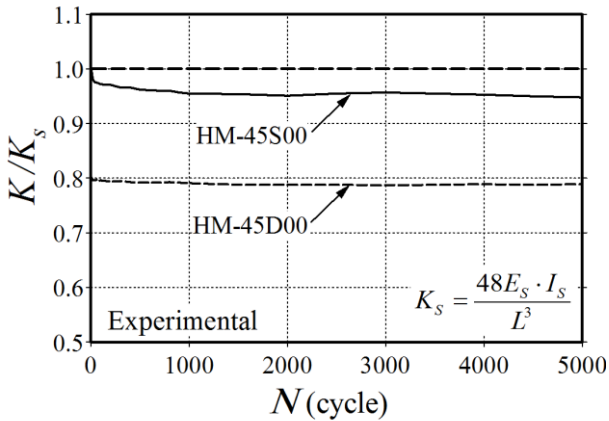


図 13 無次元化梁継手剛性 - 繰返し回数関係 (ボルト設置方法変化)

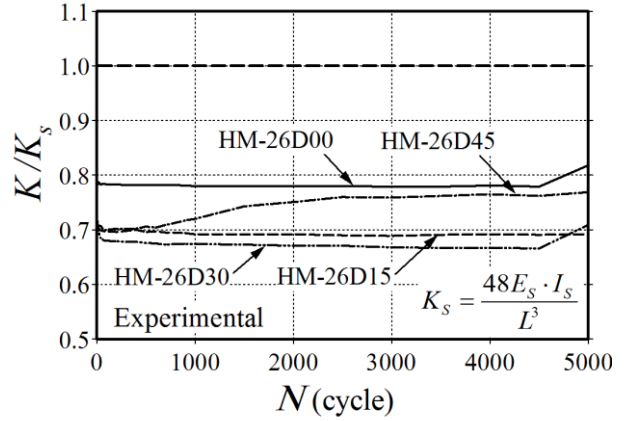


図 14 無次元化梁継手剛性 - 繰返し回数関係 (ボルト拵径方向変化)

4. 試験及び解析の結果とその考察

○皿ばね座金試験とその解析

各試験体の単調載荷時の荷重: P と沈下量: δ_w 関係 (DW1, DW2, DW4) を図 9 に、同じく試験結果と解析結果の比較を図 10 と表 5 に示す。また、解析モデルの載荷状況、最大荷重時の相当応力分布を図 11 に示す。

これらの結果は、以下の様に要約できる。

- 1) 充填ボルトを設置する際の初期導入張力(約 30kN)までは、実験値及び解析値が良好に一致する。
- 2) 解析と実験の結果(表 5)より、皿ばね座金の圧縮ばね剛性は、皿ばね座金の枚数にほぼ逆比例し、ほぼ直列ばねとモデル化できるため、所要剛性と所要ストロークを容易に設定できる。
- 3) 荷重除荷後に塑性ひずみが残っていることから 40kN 以下の荷重で降伏した。従って、充填ボルトに対し皿ばね座金が設定しているストローク量を十分に発揮させるためには、直列ばね形式で設置した場合の降伏変位を明確にする必要がある。
- 4) 実験では使用する鋼板を SN400 材としたが解析では剛体としてモデル化したため、荷重伝達に差が生じ降伏荷重に影響を及ぼしたと考えられる。

○梁継手試験

梁継手試験体の片振り繰返し載荷試験結果を図 12, 13, 14 に示す。図 12 は、継手が完全な場合の梁の剛性: K_s ($=48E_s I_s / L^2$) に対する梁継手試験体の剛性: K/K_s と繰返し載荷回数: N との関係 (FB:摩擦接合, HM-45S00:充填支圧接合, NB:支圧接合) について示す。図 13 には継手が完全な場合の梁の剛性: K_s に対する充填ボルトの設置方法を変化させた HM 試験体の剛性: K/K_s と繰返し載荷回数: N との関係 (HM-45S00:ボルト設置前の張力有り, シングルナット, HM-45D00:ボルト設置前の張力無し, ダブルナット) を示す。図 14 には継手が完全な場合の梁の剛性: K_s に対する充填ボルトの拡張方向を変化させた HM 試験体の剛性: K/K_s と繰返し載荷回数: N との関係 (HM-26D00:拡張方向 0 度, HM-26D15:拡張方向 15 度, HM-26D30:拡張方向 30 度, HM-26D45:拡張方向 45 度) を示す。

これらの結果は、以下の様に要約できる。

- 1) 充填ボルト最小断面部の降伏軸力の 85% 程度の張力を有する充填支圧接合は、摩擦接合と同程度の継手剛性を発揮する。
- 2) 1Hz, 5000 回程度の多数回の繰返し載荷によっても、充填ボルトは、スリップバックせず継手剛性を維持する。
- 3) 高力ボルト支圧接合試験体 (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、載荷の繰返しに伴って剛性は漸減する。
- 4) 摩擦接合試験体 (FB 試験体), 充填ボルト支圧接合試験体 (HM-45S00 試験体) とともに初期の 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-45S00 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。

- 5) 高力ボルト支圧接合した NB 試験体と充填ボルト支圧接合した HM-45S00 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。
- 6) 高力ボルトと同程度の剛性を確保するためには、充填ボルト設置前に軸力を導入、除去し十分に拡張させる必要があり、これが今後施工性の面での課題となる。
- 7) HM-26D 試験体はすべて、繰返し載荷試験後の座金にゆるみがあるボルトが複数本存在したことから、充填ボルト接合における緩み止めにダブルナットを用いることは効率的ではない。
- 8) 梁の長手方向に対する充填ボルトの拡張方向を変化させた場合剛性は落ちるが、ボルトが梁の長手方向に回転することで剛性が回復することがある。

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、本接合法を用いて作成した梁継手接合試験体について多数回の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) 皿ばね座金の圧縮ばね剛性は、皿ばね座金の枚数にほぼ逆比例し、ほぼ直列ばねとモデル化できるため、所要剛性と所要ストロークを容易に設定できる。
- 2) 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。
- 3) 高力ボルトと同程度の剛性を確保するためには、充填ボルト設置前に軸力を導入、除去し十分に拡張させる必要がある。これが今後施工性の面での課題となる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、桐山尚大君(株式会社フジタ技術センター)の協力を得た。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, 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

複半月充填ボルト支圧接合梁継手の繰返し載荷実験

- 構造年次論文報告集, 第 19 卷, pp.201-208, 2011.11.
- 3) 金谷貴志, 引張強度及び降伏点とビッカース硬さの相関に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2006.9
 - 4) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 技報堂, 2006.
 - 5) 玉井宏章, 桐山尚大, 島津勝: 高強度鋼用の複半月充填ボルト接合に関する基礎的研究, その 2 梁継手フランジ接合部への適用, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 第 43 卷, 第 80 号, pp.39-44, 2013.1.
 - 6) 玉井宏章, 桐山尚大: 高強度鋼用の複半月充填ボルト接合に関する基礎的研究, その 3 梁継手フランジ接合部接合形式の影響, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 第 43 卷, 第 81 号, pp.7-13, 2013.7.
-