

高強度鋼用の複半月充填ボルト接合法に関する基礎的研究

その7 ボルトのせん断降伏強度の検討

玉井 宏章*・中島 康太**・山下 祥平**・村木 仁哉***

A New Fastener using Half-Moon Shaped Bolts for High-Strength Steel Member
Part 7 On Shear Yield Strength of Bolts

by

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

and Masaya MURAKI***

We present the bearing joint using half-moon-shaped bearing bolt for jointing high-strength members. In order to use the bearing joint, the strength evaluation formula should be required. Hence, in this study, Shearing test and F.E.M analysis of high-strength bolt and half-moon-shaped bearing bolt were performed to propose shear yield strength formulas. Also, the influence of deference of directions of enlarged diameter on the shear strength was investigated. From test results, it is pointed out that the correction factor of the strength evaluation formula of the half-moon-shaped bearing bolt of steel grade 4T and 10T is 1.2 and 0.8 respectively.

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

1 はじめに

著者らは、ボルト接合のせん断力伝達に関して、高強度鋼のボルト本数の問題¹⁾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⁾。

複半月充填ボルトを普及させるためには、接合部の降伏耐力式を提案する必要がある。本支圧接合法では、降伏耐力式を決定する要因として中板・添板の有効断面引張降伏、はしめけせん断降伏、支圧降伏及びボルトのせん断降伏が考えられる¹⁾。

前報文献^{2, 3)}では、ボルト接合部の引張試験を行い中板のはしめけせん断降伏と支圧降伏について現象を明らかにするとともに、大変形有限要素法解析を行って、支圧降伏の耐力式を検討して提案した。

本研究では、複半月充填ボルトと高力ボルトのせん断実験を行うとともに有限要素法解析を行い、ボルトのせん断降伏耐力式の提案を行う。また、同様に充填

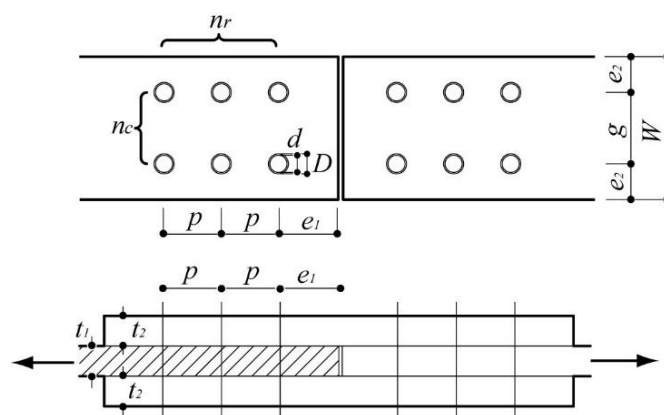


図1 継手の形状寸法

ボルトの拡径角度の違いと中板の板厚が、せん断耐力に及ぼす影響を調べたので報告する。

平成27年12月25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(University of Engineering Department)

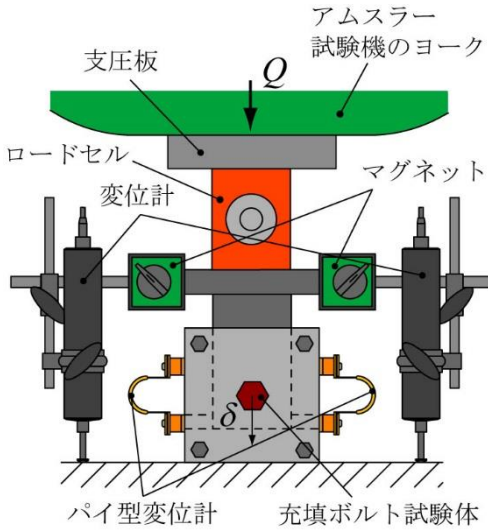


図 2 加力試験の概要

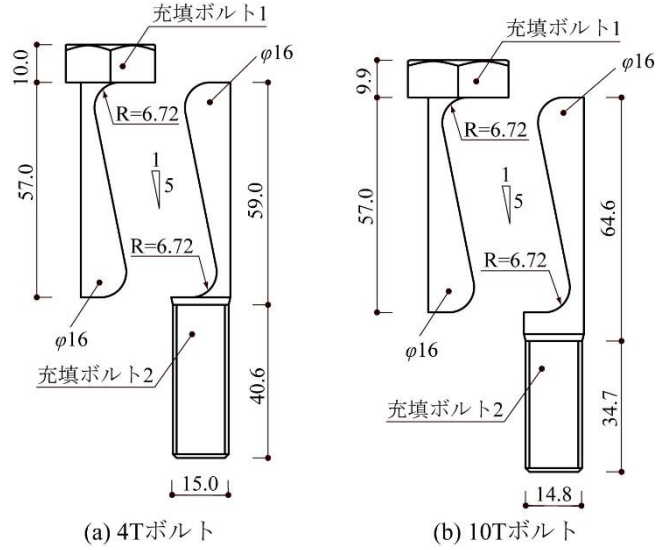


図 3 充填ボルト試験体

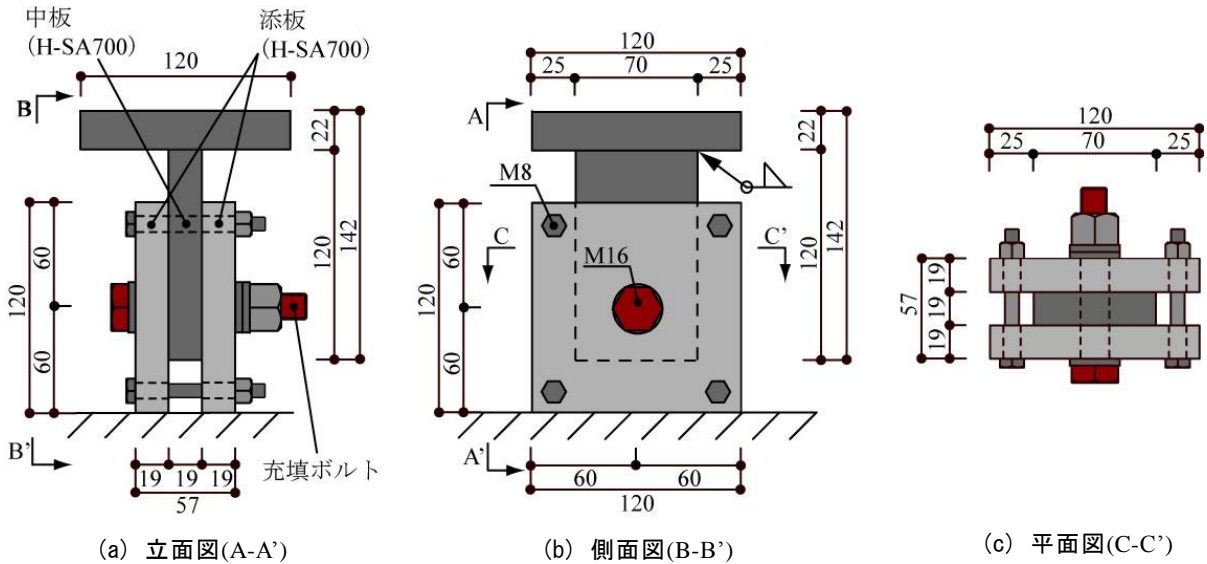


図 4 加力治具の詳細

2. 支圧ボルト降伏耐力評価式

複半月充填ボルトによる接合は、抵抗形式としては、支圧ボルト接合に分類される。本節では、文献 2~3 を参考に設計に利用する。支圧接合継手の降伏耐力評価式を示す。代表的継手の形状を図 1 に示す。ボルト配列、継手形状、母材の材料特性は、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、ゲージ間隔、へりあき距離: p, e_1, g, e_2 、材の板厚、摩擦面数、降伏応力、引張強さ: t, m, σ_y, σ_u で表す。ボルトに関するデータは、ボルト軸径: d 、軸断面積: bA_s 、ボルトの降伏応力、引張強さ: $b\sigma_y, b\sigma_u$ で表す。

この継手の降伏耐力 Q_{by} の算定式を、以下に示す。

$$Q_{by} = \min ({}_b P_y, P_{y1}, P_{y2}, P_{y3}) \quad (1)$$

$${}_b P_y = \beta \cdot n \cdot m \cdot {}_b A_s \cdot b \sigma_y / \sqrt{3} \quad (2.a)$$

$$P_{y1} = A_m \cdot \sigma_y \quad (2.b)$$

$$P_{y2} = n \cdot d \cdot t \cdot (\alpha \cdot F_y) \quad (2.c)$$

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

ここで、各式中の諸量は、次式のように与えられる。

$$A_m = (W - n_c \cdot D) \cdot t, \quad n = n_c \cdot n_r, \quad {}_b A_s = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad \alpha = 2.01 \quad (3)$$

$$F_y = \min(\sigma_y, 0.7 \cdot \sigma_u), \quad A_{ms} = [(n_r - 1) \cdot p + e_1] \cdot t$$

3. 载荷実験概要

本実験では、ボルトのせん断耐力に関する実験を行い、力学的特性を検証する。载荷実験の概要を以下に示す。

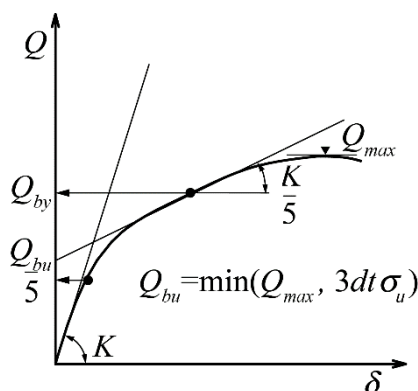


図5 降伏応力の算定法

加力試験の概要を図2に、充填ボルト試験体を図3に、加力治具の詳細を図4に示す。試験体は添板(19×120×160mm)2枚で中板(19×70×160mm)1枚を挟み、φ16.5mmの孔にφ16mmの高力ボルトと充填ボルトを設置する。図4に示すように、ボルト軸部と中板、添板との接触を考慮し、平座金はヘッド側に1枚、ナット側に2枚設置した。荷重試験装置は2000kN容量のアムスラー試験機を用いる。試験はアムスラー試験機よりロードセルを介して上部鋼板より荷重を行う。荷重： Q はロードセルから、中板と添板との相対変位： δ は左右の変位計と、中板と添板に取り付けたパイ型変位計（容量2mm）で計測する。変位1.5mmまでは左右のパイ型変位計を、その後破断までを左右の変位計を用いた。添板、中板ともに鋼種をH-SA700とした。

○降伏耐力の算定法

実験及び解析から得られた荷重-変形関係を基本データとして、以下に示すスロープファクター法を用いて降伏耐力を求めた(図5参照)。

まず、最大耐力と支圧基準耐力($3d \cdot t \cdot \sigma_u$)のいずれか小さい値を Q_{bu} とし、その1/5以下の初期荷重-変位関係データから最小2乗法によって初期剛性 K を求める。

荷重-変位関係の勾配が初期剛性の1/5となる荷重値を降伏荷重 Q_{by} とする。 Q_{by} を求めるアルゴリズムは、 $K/5$ の勾配を持ち実験の荷重-変位関係の点を通る直線のy切片が最大となる点の荷重値が Q_{by} となる。

○実験シリーズ

試験シリーズを表1に示す。シリーズIでは、鋼種を4T、10Tとした高力ボルト試験体と充填ボルト試験体をそれぞれ3本ずつ計12本用意した。シリーズIIで

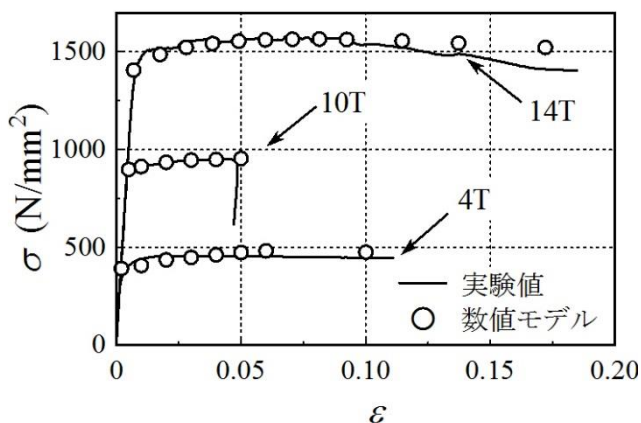


図6 公称応力 - 公称ひずみ関係の実験値と数値モデル

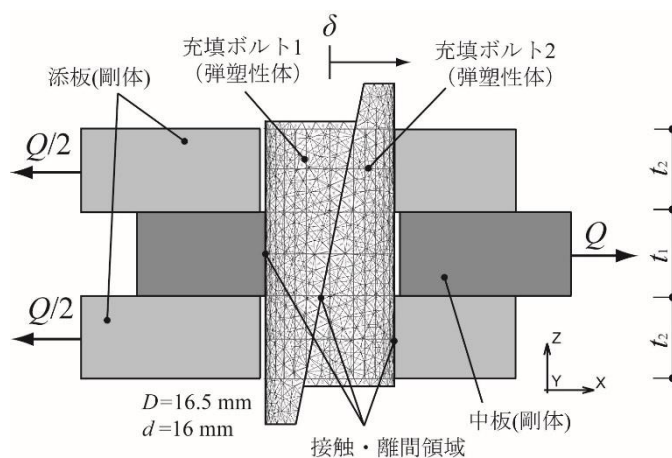


図7 複半月充填ボルトの解析モデル

は、鋼種を4T、10Tとした充填ボルト試験体においてボルトの拡径方向を加力方向に対して $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ と変化した試験体を1本ずつ計6本用意した。

4. 解析概要

○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。

$$\begin{aligned} \epsilon_p^* \geq \epsilon_{pst}^* \text{ のとき,} \\ \sigma^* = \sigma_y^* \cdot C \cdot (\epsilon_p^* - \epsilon_0^*)^n \end{aligned} \quad (3.a)$$

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。

$$\begin{aligned} 0 \leq \epsilon_p^* \leq \epsilon_{pst}^* \text{ のとき,} \\ \sigma^* = \sigma_y^* \end{aligned} \quad (3.b)$$

塑性ひずみの定義から、

表 1 試験シリーズ

試験シリーズ	ボルト	板厚(mm)		加力方向に対する ボルトの拡径角度(度)	
		中板: t_1	添板: t_2		
I	NF04B19S19D00	F4T	19.0	19.0	-
	HM04B19S19D00	HM4T	19.0	19.0	0
	NF10B19S19D00	F10T	19.0	19.0	-
	HM10B19S19D00	HM10T	19.0	19.0	0
II	HM04B19S19D00	HM4T	19.0	19.0	0
	HM04B19S19D45	HM4T	19.0	19.0	45
	HM04B19S19D90	HM4T	19.0	19.0	90
	HM10B19S19D00	HM10T	19.0	19.0	0
	HM10B19S19D45	HM10T	19.0	19.0	45
	HM10B19S19D90	HM10T	19.0	19.0	90
III	HM14B06S13D00	HM14T	6.0	13.5	0
	HM14B09S12D00	HM14T	9.0	12.0	0
	HM14B12S10D00	HM14T	12.0	10.5	0
	HM14B16S19D00	HM14T	16.0	8.5	0

HM:複半月充填ボルト, F:通常摩擦ボルト

ボルト孔径はすべて $D=16.5\text{mm}$, ボルト径はすべて $d=16\text{mm}$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_e^* + \varepsilon_p^* = \frac{\sigma^*}{E} + \varepsilon_p^* \quad (4)$$

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.

$$\varepsilon = \exp(\varepsilon^*) - 1, \quad \varepsilon^* = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5.a, b)$$

$$\sigma = \sigma^* / \exp(\varepsilon^*), \quad \sigma^* = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (5.c, d)$$

ε_p^* を定めれば, (3.a,b)式より真応力 σ^* が決定され, 対応する対数ひずみは(4)式で得られる. (5.a), (5.c)式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.

$$n = \ln(1 + \varepsilon_i) - \varepsilon_0^* \quad (6.a)$$

$$C = \frac{\exp(n + \varepsilon_0^*)}{\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \cdot n^n} \quad (6.b)$$

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.

$$\varepsilon_0^* = \varepsilon_{pst}^* - m \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (7)$$

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.

図 6 には, 4T, 10T, 14T 鋼種の素材実験結果と本解析で採用した n 乗硬化則の数値モデルの公称応力 - 公称ひずみ関係を示す.

表 2 素材試験結果

鋼種	σ_y	σ_u	ε_u	ε_i
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(%)
4T	404	469	28.2	9.0
10T	898	950	17.5	4.8
14T	1476	1584	20.4	6.5
H-SA700	795	862	11.7	6.6

σ_y :降伏応力, σ_u :最大応力, ε_u :破断ひずみ, ε_i :一様伸び

表 3 応力・ひずみ関係数値モデル

試験体	鋼種	σ_y	ε_{pst}^*	ε_0^*	m	C	n
		(N/mm ²)	(%)	(%)	-	(N/mm ²)	(%)
4T-1	4T	392	0.2	0.2	1.2	1.38	4.0
4T-2	4T	391	0.2	0.2	1.1	1.35	3.6
4T-3	4T	431	0.2	0.2	1.0	1.31	2.8
10T-1	10T	973	0.1	-0.8	3.0	1.29	5.3
10T-2	10T	706	0.1	-1.0	4.0	1.29	5.5
10T-3	10T	905	0.3	-0.8	3.5	1.26	4.8
14T-1	14T	1454	0.4	-0.3	5.0	1.43	9.8

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

○解析モデル

図 7 に複半月充填ボルトの解析モデルを示す.

ボルトは三次元四面体要素を用いて要素分割をし, 中板及び添板は剛体としてモデル化した. 中板とボルトは摩擦接触し, 摩擦係数 μ は加工のままの表面状態であるとして, 0.25 と仮定した. 本解析では, 中板に加力: Q を作用させ, 強制変位: δ を与える. 中板, 添板及びボルトは n 乗則に従うものとして有限要素法解析を行った.

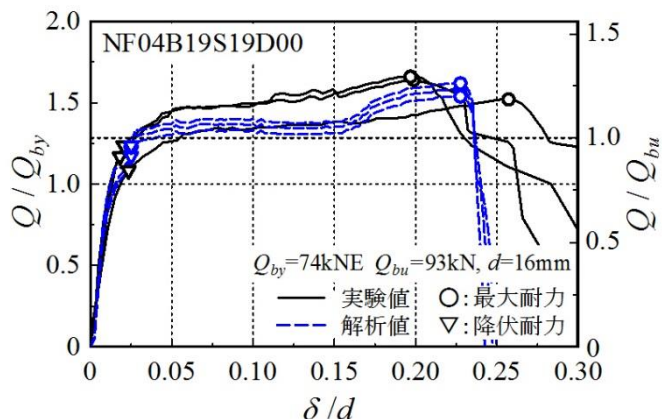
尚, 解析プログラムは, MSC MARC2012 を用いて行った.

○解析シリーズ

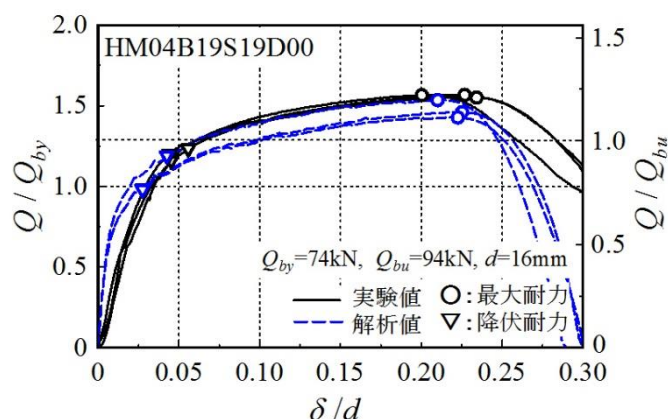
表 2 に素材試験結果を示し, 表 3 に素材の応力-歪関係数値モデルのパラメータを示す.

シリーズ I, II は実験シリーズと同様の試験体で 4T, 10T それぞれ 3 本ずつ表 3 に示す異なる応力 - ひずみ関係数値モデルを用いて解析を行う. シリーズ III では, 鋼種を 14T とし中板の板厚: t_1 を 6,9,12,16 mm と変化させ, それらに対応する添板の板厚: t_2 をそれぞれ 13.5,12.0,10.5,8.5mm と変化させた充填ボルト試験体について解析を行う.

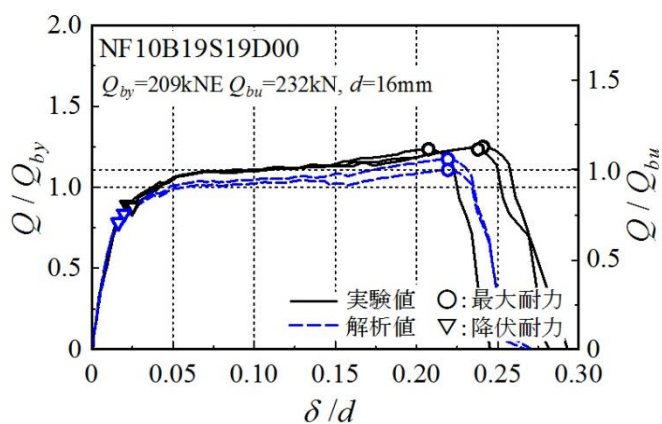
高強度鋼用の複半月充填ボルト接合法に関する基礎的研究
その7 ボルトのせん断降伏強度の検討



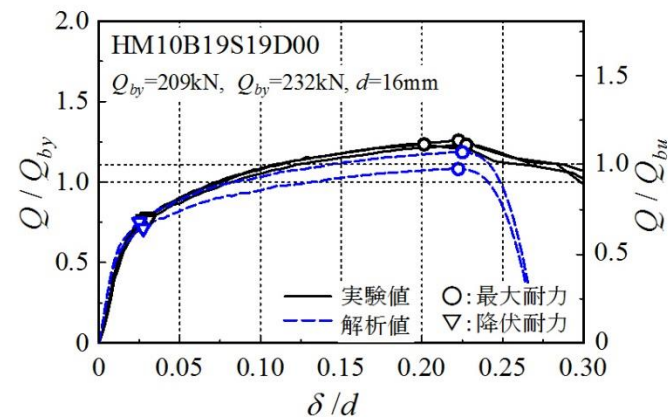
(a) NF04B19S19D00 (実験値,解析値)



(b) HM04B19S19D00 (実験値,解析値)



(c) NF10B19S19D00 (実験値,解析値)



(d) HM10B19S19D00 (実験値,解析値)

図8 ボルト鋼種の検討 (シリーズI)

5. 実験及び解析結果と考察

結果を図8～図11, 写真1, 2及び表4に示す。

図8には, シリーズIについて, せん断荷重をボルトのせん断降伏耐力評価値で無次元化した Q/Q_{by} 及びせん断荷重をボルトの最大耐力評価値で無次元化した Q/Q_{bu} と, 変位をボルト軸径で無次元化した δ/d との関係, 試験体ごとに実験値と解析値を併せて示す。

尚, (c)NF10B19S19D00 試験体及び(d)HM10B19S19D00 試験体の解析値は, 表3より素材特性が特に低い値を示した 10T-2 の値を用いたものは, 外れ値として除いている。

図9には, シリーズIIについて図8と同様の関係を充填ボルトの鋼種ごとに, 実験値と解析値を分けて示す。尚, HM04B19S19D00 試験体及び HM10B19S19D00 試験体の実験値は表4の1～3の試験体のうち1の試験体の値を採用し, 解析値は表3の4T-1 試験体及び 10T-1 試験体の応力・ひずみ関係数値モデルを採用した値である。

図10には, 充填ボルトを加力方向に対する拡径角度を 0° , 45° , 90° と変化させた時のボルト孔とボルト断面の状況を示し, 写真1には充填ボルトの破断後の断面を, 写真2には充填ボルトの終局状態を示す。

図11には, シリーズIIIにおける図8及び9と同様の関係を, ボルト軸径 d と中板の板厚 t_1 の比 d/t_1 を 2.67, 1.78, 1.33, 1.00, 0.84 と変化させた試験体の解析結果を示す。

表4には, シリーズI, II, IIIについて求めたせん断降伏耐力 Q_{by} と最大耐力 Q_{bu} の実験値, 解析値, 評価値及びそれらの評価値に対する実験値, 解析値の比率を示す。尚, 解析値の NF10B19S19D00 試験体及び HM10

B19S19D00 試験体の Q_{by}^{cal} , Q_{bu}^{cal} は, 表3より素材特性が特に低い値を示した 10T-2 の値を用いている試験体2の値を除いて, 平均値を算出している。

これらの結果から得られる知見を以下に示す。

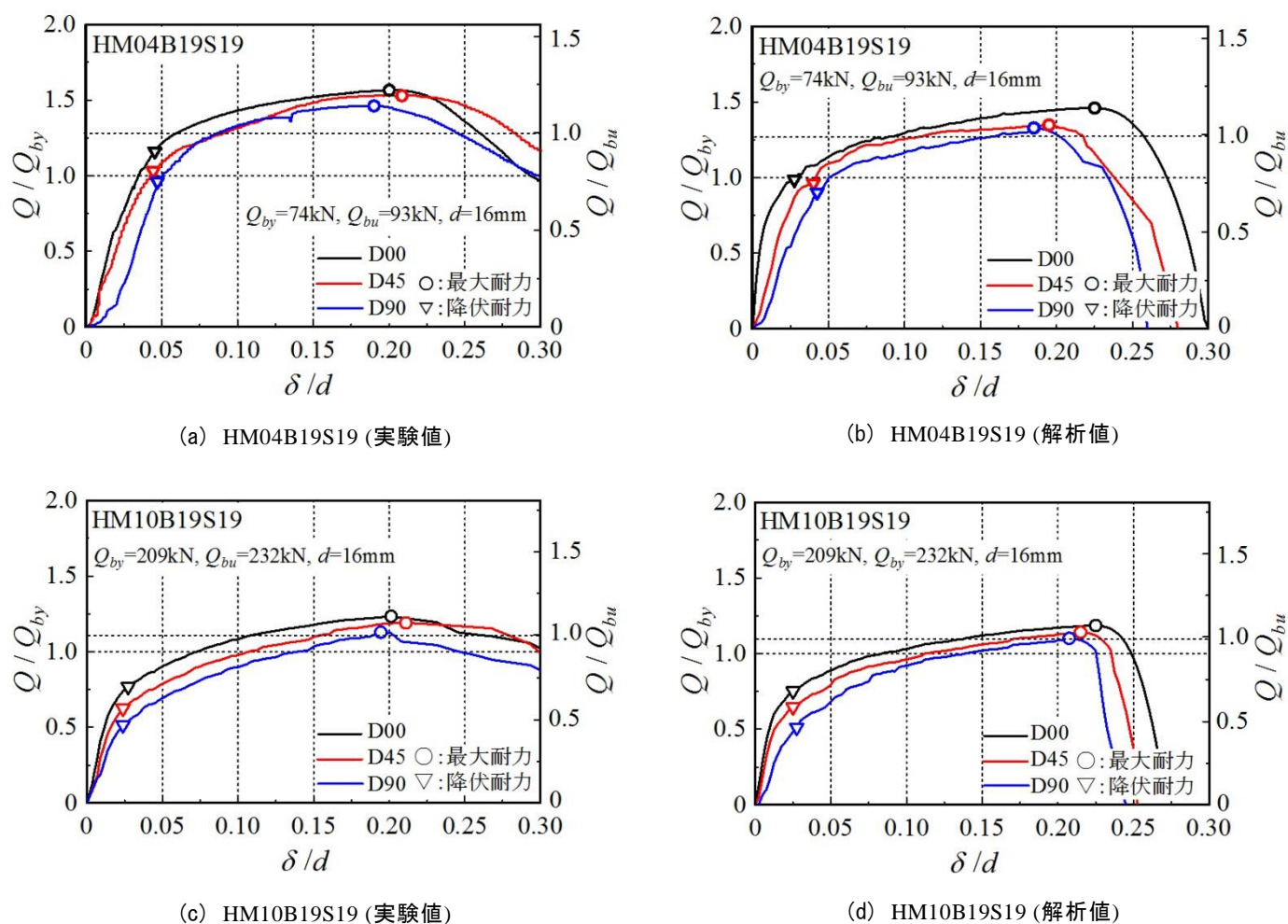


図9 充填ボルト荷重角度の検討 (シリーズII)

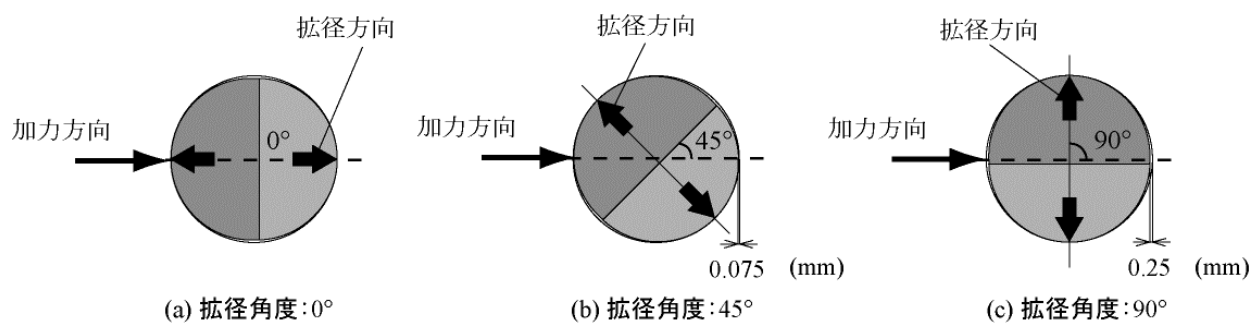


図10 充填ボルト拡張角度 (シリーズII)

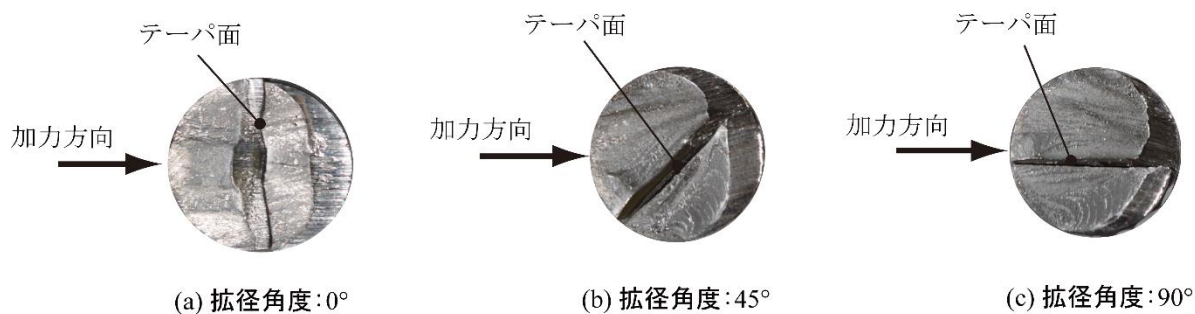


写真1 充填ボルトの破断後の断面 (シリーズII)

高強度鋼用の複半月充填ボルト接合法に関する基礎的研究
その7 ボルトのせん断降伏強度の検討



写真2 充填ボルトの終局状態 (シリーズII)

○解析精度について

図8(a), 表4より, NF04B19S19D00の降伏耐力及び最大耐力の実験値と解析値の差はそれぞれ, 4%, 1%であり, その他の試験体についても実験値と解析値が良好に一致していることから, 本有限要素法解析により, ボルトのせん断耐力を工学上十分な精度で追跡できることがわかる.

○耐力の評価

図8(a)~(d), 表4より, 4T鋼種ではNF04B19S19D00試験体とHM04B19S19D00試験体の降伏耐力は実験値, 解析値ともほぼ等しいが, 10T鋼種ではNF10B19S19D00試験体よりHM10B19S19D00試験体の方が降伏耐力は実験値では13%低く, 解析値では10%低い値を示している. また, NF試験体とHM試験体の破断近傍の最大荷重はほぼ等しい値を示している.

図9(a)~(d)より, HM試験体は加力方向と拡張方向のなす角を45°, 90°と変化させると, 0°の場合と比べせん断降伏耐力の低下は見られる一方, 最大耐力はほぼ変わらないことが分かる.

○素材特性の影響

図9(a)~(d)より, NF試験体は素材特性の影響を受け, 降伏棚が発生する一方で, HM試験体は素材特性の影響を大きく受けず, 降伏後, 最大荷重に達するまで変位が増加に伴い荷重も増加する.

○せん断降伏耐力

表4より, 実験及び解析で求めた降伏耐力: $Q_{by}^{exp}, Q_{by}^{F.E.M}$ を降伏耐力評価値 Q_{by}^{cal} で除して求めた

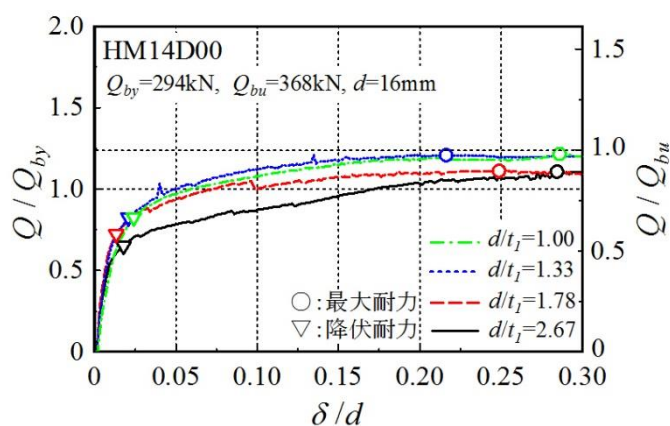


図11 中板の増厚による影響 (シリーズIII)

複半月充填ボルトのせん断降伏耐力式の補正係数 β は, 鋼種4T, 10Tでそれぞれ実験値では1.2, 0.8, 解析値では1.1, 0.7となる. 同様にしてもとめた高力ボルトの値とほぼ等しいことから, 充填ボルトは高力ボルトと同程度のせん断降伏耐力を確保できる.

○初期剛性について

図9(a)~(d)より, HM試験体は加力方向に対するボルトの拡張角度を45°, 90°と変化させると, 0°と比べ剛性の低下は実験値では, HM04B19S19D45:15%, HM04B19S19D90:19%, HM10B19S19D45:10%, HM10B19S19D90:26%, 解析値では, HM04B19S19D45:9%, HM04B19S19D90:22%, HM10B19S19D45:8%, HM10B19S19D90:29%となる. これは図10に示すように, 拡張角度が45°, 90°の場合は, それぞれ加力方向のボルト孔に0.075mm, 0.025mmのギャップが生じてしまうからであると考えられる.

表 4 実験及び解析結果 (シリーズ I, シリーズ II, シリーズ III)

シリーズ	実験値								評価値		比率		
	Q_{by}^{exp} (kN)				Q_{bu}^{exp} (kN)				Q_{by}^{cal} (kN)	Q_{bu}^{cal} (kN)	$Q_{by}^{exp}/Q_{by}^{cal}$	$Q_{bu}^{exp}/Q_{bu}^{cal}$	
	1	2	3	平均	1	2	3	平均					
I	NF04B19S19D00	86.5	90.5	80.2	85.7	121.4	121.3	112.5	118.4	74.0	93.0	1.16	1.27
	HM04B19S19D00	86.0	89.0	91.3	88.8	115.9	114.9	116.0	115.6				
	NF10B19S19D00	183.9	184.6	186.1	184.9	258.3	258.2	261.4	259.3	74.0	93.0	1.20*	1.24
	HM10B19S19D00	160.6	160.5	163.7	161.6	258.3	258.2	263.4	260.0				
II	HM04B19S19D45	76.6			76.6	113.2			113.2	74.0	93.0		
	HM04B19S19D90	71.1			71.1	108.2			108.2				
	HM10B19S19D45	130.5			130.5	248.7			248.7	74.0	93.0		
	HM10B19S19D90	107.5			107.5	240.0			240.0				
シリーズ	解析値								評価値		比率		
	Q_{by}^{FEM} (kN)				Q_{bu}^{FEM} (kN)				Q_{by}^{cal} (kN)	Q_{bu}^{cal} (kN)	$Q_{by}^{FEM}/Q_{by}^{cal}$	$Q_{bu}^{FEM}/Q_{bu}^{cal}$	
	1	2	3	平均	1	2	3	平均					
I	NF04B19S19D00	89.3	86.8	91.3	89.1	117.6	113.9	119.9	117.1	74.3	92.8	1.20	1.26
	HM04B19S19D00	73.1	72.6	88.3	78.0	108.2	105.7	113.6	109.2				
	NF10B19S19D00	174.9	126.8	163.3	169.1**	245.5	184.4	231.4	238.5	74.3	92.8	1.05*	1.17
	HM10B19S19D00	157.0	116.6	148.9	153.0**	247.7	180.6	226.1	236.9				
II	HM04B19S19D45	71.3			71.3	99.9			99.9	74.3	92.8		
	HM04B19S19D90	66.8			66.8	98.4			98.4				
	HM10B19S19D45	132.0			132.0	238.5			238.5	74.3	92.8		
	HM10B19S19D90	106.9			106.9	230.1			230.1				
III	HM14B06S13D00	200.8			200.8	324.7			324.7	293.8	367.7		
	HM14B09S12D00	212.2			212.2	326.9			326.9				
	HM14B12S10D00	242.6			242.6	355.4			355.4	74.3	92.8		
	HM14B16S08D00	242.9			242.9	357.5			357.5				

*は、(2.a)式の β である。**は試験体1と3の平均値を示す。

○中板板厚の影響

図 11, 表 4 より中板が厚くなるにしたがって, セン断降伏耐力及び最大耐力は上昇し, d/t_1 が 1.3 以下となると一定となる。これは, 中板の板厚が小さい場合, ボルトの中板及び添板に接触する部分の降伏領域が重なることで, 耐力が低下したものと考えられる。

6. まとめ

本研究では, 複半月充填ボルトと高力ボルトのセン断実験及び有限要素法解析を行い, ボルトのセン断降伏強度の検討を行った。

得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 接触問題と複合非線形問題を取り扱う本有限要素法解析により, ボルトのセン断降伏耐力を工学上十分な精度で追跡できる。
- 2) 複半月充填ボルトのセン断降伏耐力式の補正係数 β は, 鋼種 4T, 10T でそれぞれ実験値では 1.2, 0.8 となり, 充填ボルトは高力ボルトと同程度のセン断降伏耐力を確保できる。

- 3) 充填ボルトは加力方向に対する拡張方向のなす角が大きくなるにつれて, 剛性及びセン断降伏耐力は低下する一方, 最大耐力はほぼ変わらない。
- 4) 中板板厚による軸径の比が 1.3 を下回れば, ボルトの 2 つのセン断面の降伏領域は干渉することなくセン断耐力は提案式により良好に予測できる。

参考文献

- 1) 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の開発, 鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻, pp.201-208, 2011.11.
- 2) 玉井宏章, 桐山尚大, 山下祥平, 高強度鋼用の複半月充填ボルト接合法に関する基礎的研究. その 4 充填ボルト支圧接合継手の載荷実験, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 第 44 巻, 82 号, pp.13-20, 2014.1.
- 3) 山下祥平, 玉井宏章, 桐山尚大, 中島康太, 有限要素法解析による支圧降伏耐力式の検討, 日本建築学会建築構造研究報告九州支部, 第 54 巻, pp.417-420, 2015. 3.