

複半月充填ボルト支圧接合部の降伏耐力式

玉井 宏章*・山下 祥平**・中島 康太**

Yield strength formula of the Half Moon Shaped Bolt Bearing Connection

by

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

To design the joint, the strength evaluation formula, such as yield and maximum strength of the bearing joint, are required. In particular, high accurate load vs. displacement relation is required to determine the yield strength. Further, large deformation and contact problems must be solved to determine the maximum strength. In this study, F.E.M analysis of high-strength bolted joint is performed. Influence of hole diameter ratio, steel grade and joint plate's end distance to joint plate's yield strength are shown. After that we discuss about the design formulas.

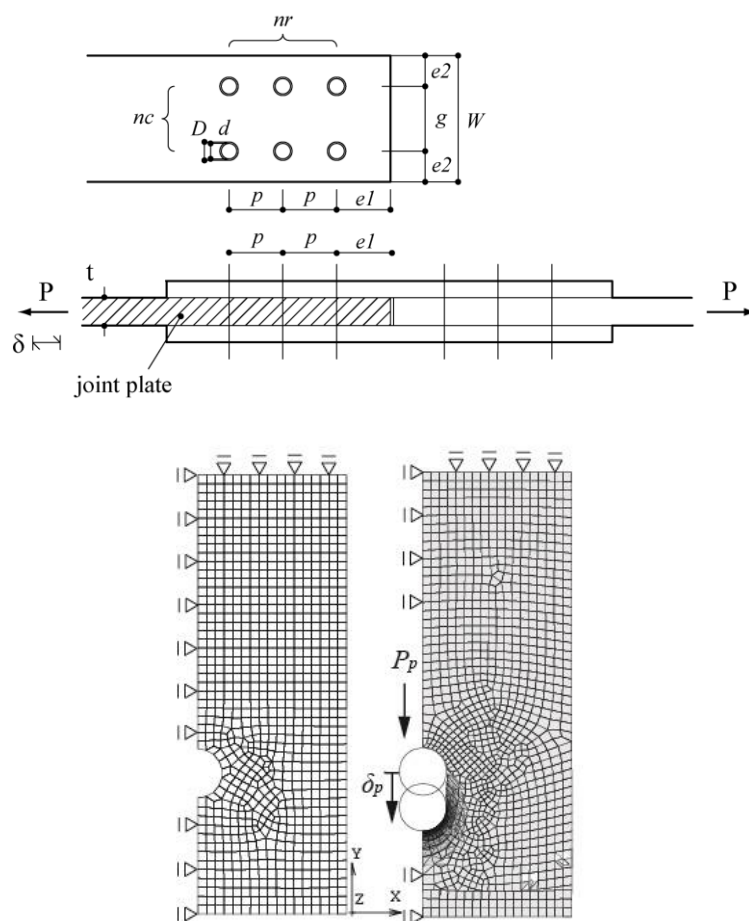
Key words : Bearing Bolt, Built-up Member, H-SA700A, High-Strength Steel.

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¹⁾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力伝達に関して,この問題を解決する新たな接合形式として,複半月テーパ充填ボルト接合法を提案している²⁾.

支圧接合を高強度鋼板の接合に用いるためには,ボルト接合部の支圧による最大耐力や降伏耐力の評価式等の設計式を作る必要がある.特に降伏耐力を定めるには精度の高い荷重-変位関係が必要となること,支圧降伏以降の大きな変形下における耐力上昇性状を追跡する必要性から,本研究では,高力ボルト接合継手について有限要素法解析を行い,ボルト孔径比,鋼種及び中板の端あき距離の中板の支圧降伏耐力に及ぼす影響を示し,当該設計式について考察する.継手について有限要素法解析を行い,ボルト孔径,鋼種及び中板のはしあき距離の中板の支圧降伏耐力に及ぼす影響を示し,当該設計式について考察する.



(a) 初期メッシュ (b) リゾーニング後のメッシュ

図2 中板の解析モデル

2. 耐力評価式

複半月テーパ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2～6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： $n_c \cdot n_r$ 、せん断断面数： m 、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、降伏応力、引張強さ： t, 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、 A_s 、ボルトの降伏応力、引張強さ、 σ_y, σ_u で表す。

この継手の降伏耐力 P_y の算定式を、以下に示す

○降伏耐力の評価式

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

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

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

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

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

ここで、各式中の諸量は次式のように与えられる

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

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

3. 解析モデルと解析シリーズ

接合部の支圧降伏荷重を規定するには、初期の荷重-変形関係と最大耐力を把握する必要がある。

予備接合部引張試験結果²⁾から 1) 充填支圧ボルトが中板のボルト孔側に接触し剛性が変化する挙動と、2) 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挙動が、解析的に追跡すべき挙動と考えられる。

そこで、解析モデルでは以下の点に工夫を施した。

- 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
- 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) 体積ロッキングを回避する要素を用いる。

○真応力-対数塑性歪関係

降伏棚を除く歪効果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成立することが知られている。

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

$$\sigma^* = \sigma_y^* \cdot C \cdot (\varepsilon_p^* - \varepsilon_0^*)^n \quad (3)$$

表 1 素材試験結果

Grade of Steel	σ_y	σ_u	ε_{st}	ε_u	ε_i
	N/mm ²	N/mm ²	%	%	%
SS400 ⁵⁾	271	414	1.50*	30.0	19.6*
SM490 ²⁾	382	546	1.63	20.1	18.0
SA440 ⁹⁾	469	636	1.10	16.0	12.9
H-SA700 ¹²⁾	795	862	-	11.7	6.6

*assumed values, $\varepsilon_i = 0.53 - 0.51 \cdot \sigma_y / \sigma_u$

表 2 応力・歪関係係数値モデル

Grade of Steel	Test Series	σ_y	ε_{pst}	m	C	n
		N/mm ²	%	-	N/mm ²	%
SS400	N1,N2	271	1.37	5.0	2.47	17.1
SM490	OM, HM	397	1.37	5.0	2.31	16.0
H-SA700	HA	808	-	5.0	1.39	7.8
SA440	-	469	0.87	3.0	1.97	11.7

表 3 解析シリーズの概要

Series	n_r (-)	n_c (-)	e_1 (mm)	D (mm)	p (mm)	W (mm)	Plate (Grade)	Bolt (Type)
I	1	1	40	16.5	-	100	H-SA700	HM14T M16
II	1	1	20	16.5	-	100	SS400 SM490 H-SA700 SA440	-
III	1	1	20~80	16.5 17 18 19 20	-	100	H-SA700 SS400 SM490 SA440	-

n_r :列数, n_c :行数, e_1 :はしあき距離, p :ピッチ, W :板幅, Grade:鋼種,

HM:複半月充填ボルト, F:通常摩擦ボルト, $n_c = 1, t = 9\text{mm}$

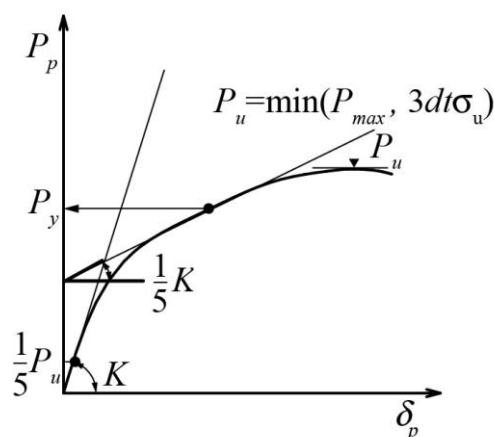


図 3 降伏耐力の算定法

ここに、 σ_y^* は降伏応力、 ε_p^* は塑性歪、 ε_0^* は修正歪、 ε_{pst}^* は加工硬化開始歪の塑性成分、 C, n は実験定数である。

複半月充填ボルト支圧接合部の降伏耐力式

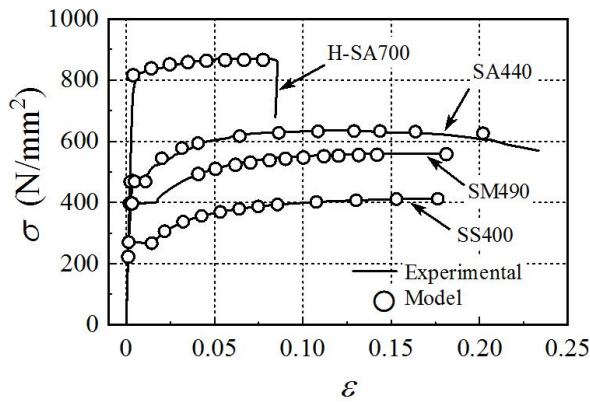
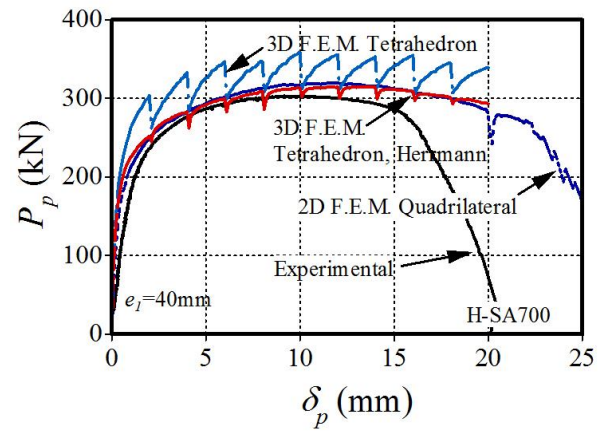
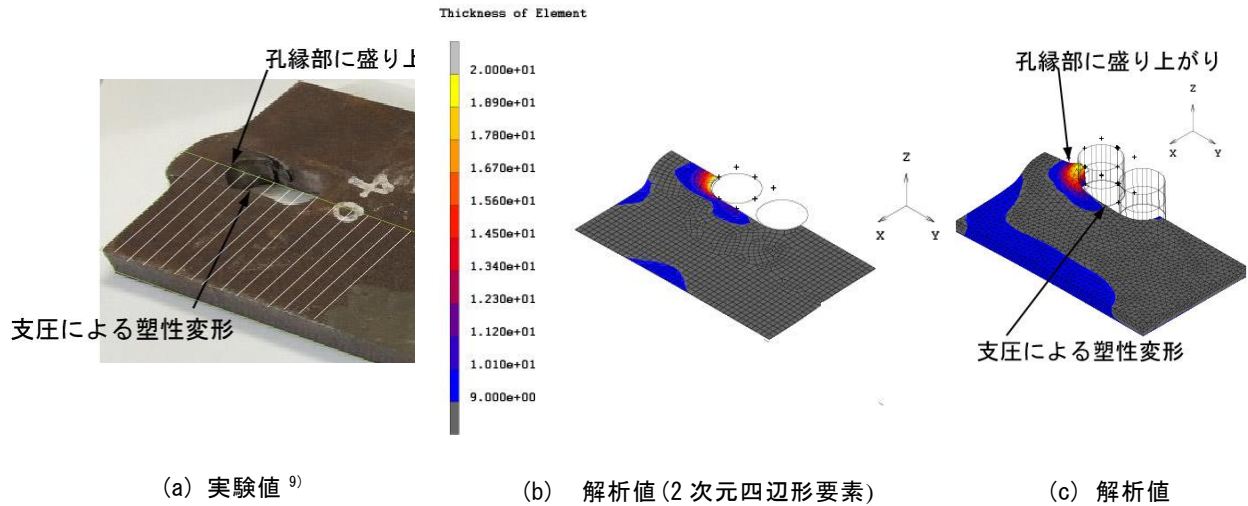


図4 公称応力-公称歪関係の実験値と数値モデル

図5 中板の支圧面増厚による影響
(シリーズ I, H-SA700 中板, 1 行 1 列配置)図6 中板の最終状況
(シリーズ I, H-SA700 (HA40 試験体))

降伏棚の領域は次式で表せる.

$$0 \leq \varepsilon_p^* \leq \varepsilon_{pst}^* \text{ のとき,} \quad \sigma^* = \sigma_y^* \quad (4.a)$$

塑性歪の定義から,

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

ここに, ε_e^* :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.

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

$$\sigma = \sigma^* / \exp(\varepsilon^*), \quad \sigma^* = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (6.a,b)$$

ε_p^* を定めれば, (3)式と(4.a)式より真応力 σ^* が決定され, 対応する対数歪は(4.b)式で得られる. (5.a), (6.a)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ことになる.

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.

$$n = \ln(1 + \varepsilon_i) - \varepsilon_0^* \quad (7)$$

$$C = \frac{\exp(n + \varepsilon_0^*)}{\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \cdot n^n} \quad (8)$$

修正歪 ε_0^* は, 実験素材試験と適合するように次式で与える.

$$\varepsilon_0^* = \varepsilon_{0st}^* - m \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (9)$$

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

表 4 シリーズⅡの結果(中板鋼種)

Series	Grade of plates	α
Ⅱ	SS400	1.71
	SM490	1.77
	SA440	1.90
	H-SA700	2.01

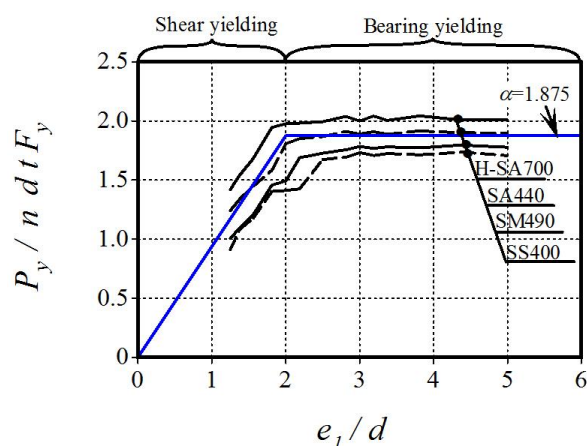
図 7 鋼種の支圧降伏耐力に及ぼす影響
(解析シリーズⅡ, 1 行 1 列配置)

表 5 シリーズⅢの結果(孔径変化)

(a) H-SA700		
Series	D (mm)	α
Ⅲ	16.5	2.01
	17.0	2.09
	18.0	2.21
	19.0	2.30
	20.0	2.38
(c) SM490		
Series	D (mm)	α
Ⅲ	16.5	1.77
	17.0	1.88
	18.0	1.88
	19.0	1.97
	20.0	2.01

(b) SS400		
Series	D (mm)	α
Ⅲ	16.5	1.71
	17.0	1.73
	18.0	1.84
	19.0	1.93
	20.0	1.98
(d) SA440		
Series	D (mm)	α
Ⅲ	16.5	1.90
	17.0	1.91
	18.0	1.93
	19.0	1.93
	20.0	2.01

○接触・離間の解法とリゾーニング手法

中板は, ボルト孔が拡大して初期形状から大きく変化する. 初期メッシュのままだと, 要素のゆがみが甚大となり解の誤差が大きくなるため, 200 ステップ解析過程において 10 ステップごとに, リゾーニングを計 20 回行った. リゾーニングには 2 次元アドバンシングフロント法⁸⁾を用いた.

中板と充填ボルトの接触, 充填ボルト同士の接触については, 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.

$$f_t \leq -\mu \cdot f_n \cdot t \quad (10)$$

ここに, μ : 摩擦係数, f_t : 接線方向に作用する力,

f_n : 法線方向の反力, t : 相対速度方向の接線ベクトル.

$$t = \frac{V_r}{|V_r|}, \quad V_r: \text{相対滑り速度.} \quad (11)$$

中板と充填ボルトとの間の摩擦係数 μ は加工のままの表面状態であるとして 0.250 程度となる.

複合非線形解析の解法として, 変位増分法とフルニュートン・ラブ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.

○解析モデル

解析対象の対称性を考慮して, 図 2 に示す中板の半領域を解析する. 中板はボルト孔から 100mm と十分離れた位置を荷重方向に固定した. ボルトは剛体とし,

複半月充填ボルト支圧接合部の降伏耐力式

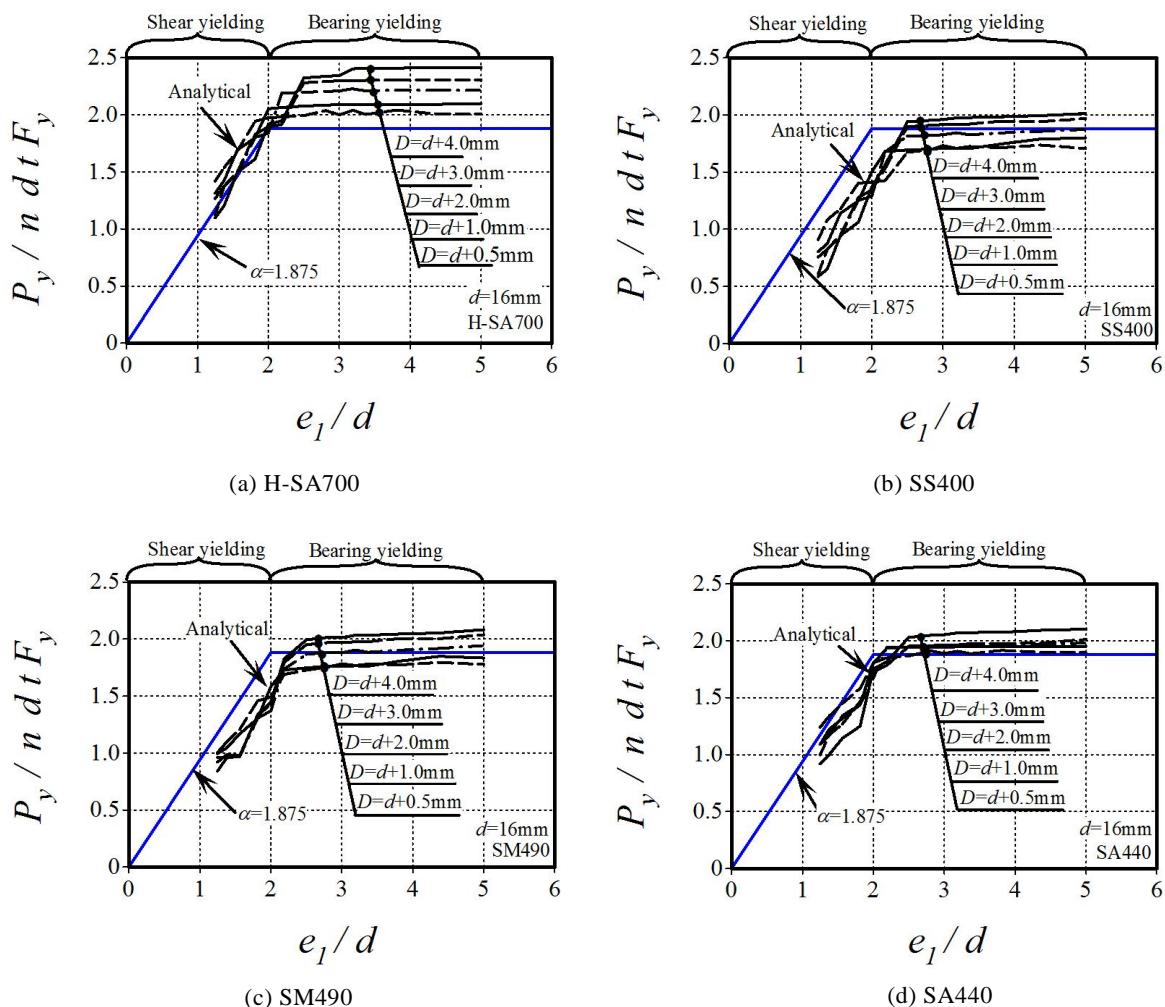


図8 ボルト孔径の支圧降伏耐力に及ぼす影響
(解析シリーズⅢ, 1行1列配置)

中板とボルトは、摩擦接触する。ボルトを強制変位 δ_p させて、加力 P_p を作用させる。

距離 e_1 を様々に変化させて解析し、ボルト孔径が中板の支圧荷重 P_p -支圧変位 δ_p 関係に及ぼす影響を調べるシリーズ(シリーズⅢ)を用意した。

解析では、鋼種に応じた表2に示す数値素材特性パラメータ及びボルトと中板との摩擦係数 μ は0.25を採用した。中板の要素は、平面応力状態を仮定した2次元四辺形要素を用いている。中板は、平面応力状態の4節点2次元四辺形要素を用いる場合と、支圧部の増厚の効果を見るため、3次元応力状態の4節点3次元四面体要素(Herrmann要素⁷⁾)を用いる場合を用意した。

○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3参照)。

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 P_u 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 $1/5K$ となる荷重値を降伏荷重 P_y とする。 P_y を求めるアルゴリズムは、 $1/5K$ 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 P_y となる。

○解析シリーズ

各試験体の素材試験結果を表1に示す。また対応する素材の応力-歪関係数値モデルのパラメータを表2に示し、解析シリーズの概要と解析パラメータを表3に示す。まず中板の鋼種をH-SA700試験体で $e_1=40\text{mm}$ について、有限要素法モデルを3次元四面体要素(Herrmann要素)として解析し比較して、2次元四辺形

要素の有効性を示すシリーズ(シリーズⅠ), 中板の鋼種を H-SA700, SM490, SS400, SA440 として, はしあき距離 e_1 を様々に変化させて解析し, 鋼種とはしあき距離の中板の支圧荷重 P_p -支圧変位 δ_p 関係に及ぼす影響を調べるシリーズ(シリーズⅡ), 中板の鋼種を H-SA700, SS400, SM490, SA440 とし, ボルト孔径 D を 16.5, 17, 18, 19, 20(mm)と変化させ, はしあき距離 e_1 を様々に変化させて解析し, ボルト孔径が中板の支圧荷重 P_p -支圧変位 δ_p 関係に及ぼす影響を調べるシリーズ(シリーズⅢ)を用意した。

解析では, 鋼種に応じた表 2 に示す数値素材特性パラメータ及びボルトと中板との摩擦係数 μ は 0.25 を採用した。中板の要素は, 平面応力状態を仮定した 2 次元四辺形要素を用いている。

4. 解析結果とその考察

図 4 に種々の鋼種の素材実験結果と本解析で採用した n 乗硬化則の数値解析モデルの公称応力-公称歪関係を示す。解析シリーズⅠの結果を図 5, 6 に, 解析シリーズⅡ, Ⅲの結果を図 7, 8 及び表 4, 5 に, それぞれ示す。降伏耐力, ボルトの行数, ボルト軸径, 板厚, 基準強度をそれぞれ, P_y, n, d, t, F_y とする。

図 5 には, 実験値⁹⁾は実線で, 2 次元四辺形要素の解析値を破線で, 3 次元四面体要素で体積ロッキングを回避しうる要素(Herrmann 要素⁷⁾)を用いた解析値を点線で, 通常の 3 次元四面体要素の解析値を一点鎖線で示す。3 次元四面体要素(Herrmann 要素)として解析し比較して, 2 次元四辺形要素の有効性を示すシリーズ(シリーズⅠ), 中板の鋼種値 α を示す。以上の図より得られる考察を項目毎に整理して示す。

4.1 解析予測の精度

○支圧面増厚の影響

大きな支圧変形に伴って表裏に 0.16mm 程度の板厚が図 5, 6(a), (c)からわかるように中板の支圧面では孔縁部が盛り上がる。図 5 からわかるように, 通常の 3 次元四面体要素では, 解析途中の収斂計算前に体積ロッキングのため荷重が高めとなる一方, Herrmann 要素を用いることにより, 初期から最大荷重までの荷重-変位関係は, 3 次元解析と実験値は良好に一致する。また, 2 次元四辺形要素における解もこれらの両者と同様に一致することから, 支圧面の変形に伴う増厚の中板最大耐力に及ぼす影響は小さく, 従ってより簡易な 2 次元四辺形要素を用いた解析手法により H-SA700 鋼板を含む中板の支圧降伏現象を良好な精度で追跡しうることをわかる。

4.2 各種条件の降伏耐力に及ぼす影響

○中板の鋼種

図 7, 表 4 より, どの鋼種ともボルト軸径で無次元化したはしあき距離 e_1/d が 0~2.0 までは, 降伏耐力 P_y は e_1/d によって変化することから, はし抜け降伏に対応する降伏耐力式(2.d)式が必要なこと。また, e_1/d が 2.5 以上となると P_y はほぼ一定となり支圧降伏耐力式(2.c)式が必要になることがわかる。(2.c)式における係数 α (ボルトの基準支圧降伏耐力で無次元化した降伏荷重値)は, 鋼が高強度化するに従って高い値を示し, H-SA700 では $\alpha=2.0$ となる。

○ボルト孔径

表 5(a)~(d)より, H-SA700 中板の場合についてボルト孔径をボルト軸径と比べ 4mm 程度まで増やすと, 降伏耐力は 15%程度まで大きくなる。同様に, SS400, SM490, SA440 中板の場合について行くと, 降伏耐力は, 13%, 12%, 6%程度まで大きくなることがわかる。 α を鋼構造設計規準値³⁾の 1.875 とした(2.c)式と(2.d)式を用いれば, H-SA700 中板と SA440 中板の降伏荷重を安全側に評価できるが, 一方で, SS400 中板と SM490 中板に関しては 1.875 より小さい値となっている。図 8 (a)~(d)より, 初期のばらつきに関しては, ボルト孔径を大きくするとボルトが完全に接触するまでの間の誤差と考えられる。また, 鋼種が高強度化するに従って, 支圧降伏耐力式の α 値が高くなっていることがわかる。

ボルト孔径を大きくすると降伏耐力が上昇する現象は, 安井の研究結果⁶⁾と逆の結果となっているが, 安井は高力ボルトの大きな初期張力による拘束効果を考慮している一方, 今回の研究は初期張力のほとんどない支圧接合を対象としているのが原因と考えられる。

5. まとめ

支圧ボルト接合部の実験結果を対象とした中板の接触・複合非線形有限要素法解析を行って, その解析精度を検証した後, 支圧ボルト接合部の H-SA700 高強度中板の降伏耐力評価式について検討を行った。得られた知見は, 以下のように要約できる。

- 1) 支圧変形により支圧面近傍が増厚する場合でも平面応力状態を仮定した 2 次元四辺形要素による解析により大変形時の支圧変形による耐力上昇の実験結果を最大荷重値まで良好に追跡できる。
- 2) 中板には, はし抜け降伏と支圧降伏の 2 種の降伏現象が存在する。
- 3) H-SA700 中板では, α を 1.875 とした(2.c)式と(2.d)式の降伏耐力算定式は, 解析値を 10%程安全側に

複半月充填ボルト支圧接合部の降伏耐力式

評価できる。また、ボルト孔径が大きくなれば、降伏耐力は上昇することから孔径の精度管理に特殊な配慮は必要ない。

謝辞

本研究の実験にあたり、桐山尚大君(株式会社フジタ技術センター)に協力を得た。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, pp.2355-2363, 2009.12.
 - 2) 玉井宏章, 高松隆夫, 尾川勝彦, 高強度鋼用の複鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻, pp.201-208, 2011.11.
 - 3) 日本建築学会, 鋼構造設計規準-許容応力度設計法-, 技報堂, 2005.9.
 - 4) American Institute of Steel Construction: Specification for Structural Steel Buildings, 2005.3.
 - 5) 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.
 - 6) 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.
 - 7) L.R.Herrmann, 'Elasticity equations for incompressible, or nearly incompressible materials by a variational theorem; J.A.I.A.A. , 3, pp.1896-1900, 1965.
 - 8) O.C. Zienkiewicz, R.L.Taylor, J.Z.Zhu; 'The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, - sixth editions, ELSEVIER, pp.383-393, 2010.
 - 9) 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.
-