

# 複半月充填ボルトの形状と初期剛性に関する実験的研究

山西 央朗\*

(令和 4 年10月28日受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON SHAPED & INITIAL STIFFNESS OF HALF-MOON-SHAPED-BOLT.

Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 28, 2022)

### Abstract

The author present the shear joint using half-moon-shaped-bolt. The half-moon-shaped-bolts always penetrate the connected steel plate so as to fill up a hole. The bolt resists a sharing force as the bearing bolt. Moreover, the present shear joint maintains constant stiffness during a large number of pulsating cyclic loadings.

An experimental study was carried out to clarify the stiffness of the bolted joint. The slip of the half-moon-shaped bearing bolt occurred in the case of all parameter. The stiffness of the half-moon-shaped-bolts was depended on half-moon-shaped bearing bolt cutting slope, set up angle.

**Key Words:** bearing joint, half-moon-shaped-bolts, stiffness & bolt cutting slope

### 1. 序論

高強度鋼材における乾式接合形式の一手法として玉井により提案, 研究<sup>1-4)</sup>が進められた“複半月充填ボルト (図中表記 = HMS-bolt)”は, 支圧接合により継手の応力伝播を実現する工法である. 具体的にはボルト軸部と貫通孔内壁間の隙間を充填する機能 (以後, 自己充填機能と記す) を有するため, 高力ボルトによる摩擦接合にて実用されているボルト貫通孔径 (M24まではボルト軸径の 2 mm 増を直径とする形状) を採用しても, 隙間による抵抗力のスリップ (ボルトのせん断抵抗が 0 の領域) が極小さくなる. このため, 理想的には初期張力導入の工程を省略できると共に, ボルト軸径に対して拡大された貫通孔のディテールを有しながらも支圧接合が実現できるものである.

このように, 施工性の確保と共に支圧接合による構造性能が期待できるが, 自己充填機能を得るためにはある程度

の初期軸力導入が必要である. また母材と添え板の貫通孔間に平面的な位置ずれが存在する場合は, せん断力作用時に位置ずれの解消が成される時点で, 再度, 自己充填機能を発揮する必要がある. これらを実現する為に, 皿パネを複数枚重ねて初期軸力の導入, そして復元力の確保により複半月充填ボルトの自己充填機能を継続的に維持しなければならない. これについては, 引き続きより合理的なディテールを追跡する必要がある.

更に, 自己充填機能は機械的な機構 (後述する図 1, 図 8 を参照) により実現されるため, スリップを完全に解消することは現在も実現できていない. そして, これまでの研究では, 冒頭に述べたように高強度鋼材における乾式接合形式を意識した終局耐力検討の研究がなされていた<sup>1-4)</sup>.

このような背景に対して, 著者は一般的に利用することを目標に, 特に施工性と弾性剛性に着目して研究を再開する. 具体的には, 支圧接合として期待すべき機能を確保す

\* 広島工業大学建築工学科 准教授

る為にどの程度のせん断剛性を得るべきかを検討し、実現に向けた改善を行わなければならない。そのためには、

- i. 梁断面形状を考慮した必要せん断剛性の精査
- ii. 繰返し載荷下にて現われるスリップの抑制を追跡する必要がある。

本論文では、改めて複半月充填ボルトの動作と機能を確認する。また、より簡便に初期軸力と継続的に自己充填機能を維持する為に必要な復元力を、皿バネに変わり圧縮コイルバネを用いて実現する。更に、複半月充填ボルトの形状や配置条件を変数とした要素実験により繰返し載荷下にて得られる弾性領域のせん断剛性を検討する。

## 2. 複半月充填ボルト

図1に母材と添え板のボルト貫通孔の平面的な配置と複半月充填ボルトの動作を示す。(a)に示すように、母材と添え板のボルト貫通孔が一致している場合、複半月充填ボルトを通して、ナットを締め付けることにより隙間を充填するので載荷方向(作用するせん断力)の正負に関係無く抵抗可能である。一方、(b)に示すように母材と添え板のボルト貫通孔が一致していない場合、設置時の隙間は(a)と同じく充填できるが、正負どちらか(図1(b)においては圧縮方向)に対して隙間が生じることになる。このような貫通孔の不一致は実施行時には必ず発生するが、設置時の自己充填機能のみでは補うことはできない。

そこで、図2に示すように長ナットによりネジ部を延長しここに圧縮コイルバネを設置する。また、延長したネジ部に圧縮コイルバネを押さえつけるための鋼板(spring counter)、追加ナット(add. nut)を用いて圧縮コイルバネを密着長まで縮める。これにより、簡便に張力導入(バネの圧縮最大荷重)を制御可能であり、かつ自由長-密着長は皿バネに比較して確保し易いので単位変位あたりの復元力の低下を抑制できる。

## 3. 載荷実験

### 3.1 実験変数

表1に実験変数を、図3に複半月充填ボルトの形状、図4にボルト設置時の貫通孔内壁とボルト軸部の設置状況を、図5に載荷方向と複半月充填ボルトの切断面設置角度の関係を示す。尚、表1中には変数と図の対応を明記している。

図3より、複半月充填ボルトには高力ボルト(M16, F10.9)を用い、切断勾配5, 7, 10を確保できる軸部長を採用し、軸部一杯を切断する。これは、貫通孔内壁との接触度合いを変数とするためであり図9(b), 10(b), 11(b)中より、勾配5は添え板とは板厚の半分以下の接触状態、勾配7は板厚の半分以上、勾配10は板厚全域で接触してい

る。また、この度は、切断代による影響を排除する為にボルトヘッド側に1本のボルト、ネジ部側に1本のボルトを用い、1組のボルトセットを作成するために、計2本のボルトを使用している。また、切断面を合致させるために切断面を機械仕上げとしている。

図4より、複半月充填ボルトは切断したボルト間の相対位置の移動により隙間を充填する。このため、充填時には切断始終位置近傍において断面が不連続となる。これを考慮しなければ(a)に示すように、添え板との接触不良が発生する。このため、(b)に示すように座金等を用いてボルト軸方向位置を調整して表裏の添え板との接触不良が発生しない位置を確保しなければならない。ここでは、(a)の条件となるものを1変数として採用し、その影響も検討する。

図5より、複半月充填ボルトの充填効果は、切断面垂直方向(充填方向)にしか発揮されたい。このため、載荷方向に対して充填方向の設置角度が重要な因子となる。ここでは、充填方向の設置角度を0度、45度、90度を採用する。

表1より、上記3項目の変数と共に、図1の母材と添え板のボルト貫通孔の平面的な配置、図2のバネの設置の有無を変数として、更に、勾配7のボルトのみ弾塑性載荷実験を行い、計25種類の実験変数を採用する。

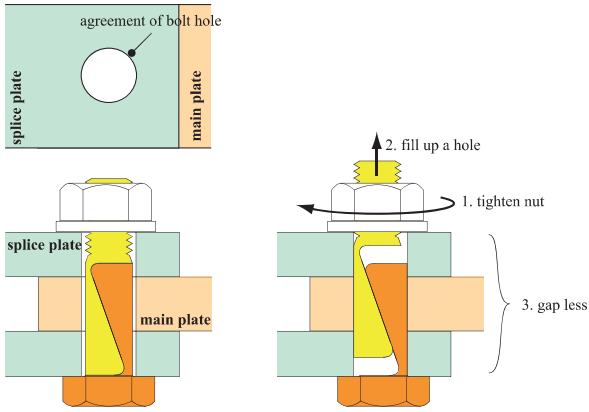
尚、図1の条件は、(b)においては最も隙間が大きくなる状態を確保する。具体的には、複半月充填ボルトを通した後に、貫通孔内壁とボルト軸部が接触するように母材と添え板を移動している(ボルトの充填のための移動が生じない設置)。

### 3.2 セットアップと実験装置

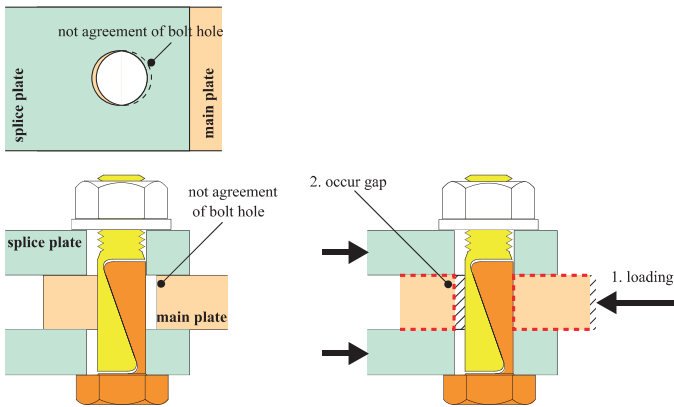
図6、表2に母材と添え板の形状と素材特性を、図7に試験体セットアップと実験装置を示す。

図6より、要素実験は継手の片側(セットアップでは下側)にのみ複半月充填ボルトによる支圧接合を実施し、もう一方はこの構造性能抽出の妨げにならないように作用荷重に対して弾性的な挙動を得るM16の高力ボルト3本による摩擦接合を採用している。図3の影響を確実に得る為に、母材の板厚はボルト径に対する標準的な板厚よりも1サイズ厚いもの( $t=19\text{mm}$ )を採用している。

図7より、載荷は油圧ジャッキにより静的に加力を行う。また、継手の剛性を検討する為に上下母材の端部に変位計および測定子カウンターを設置し、母材間の相対変位を計測している。次に、ロードセルにより計測した荷重値を制御値として、この度は完全に弾性範囲に収まる領域の剛性を追跡するため、10, 20, 40kNを2サイクルづつ正負交番に載荷する。また、弾塑性領域の挙動を検討するため、パイロット試験として、勾配7のボルトに対して、



(a) Type A : HMS-bolt set up



(b) Type B : HMS-bolt set up for not agreement of bolt hole

Fig.1 Bolt hole arrangement

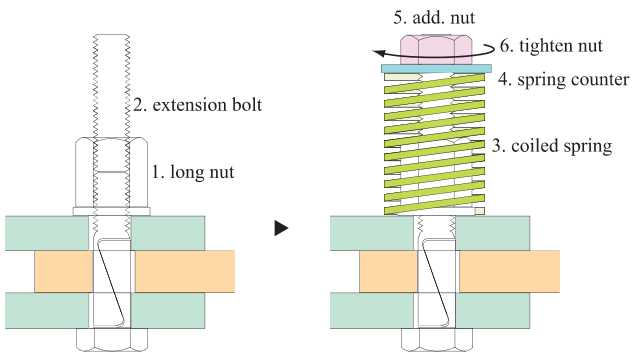
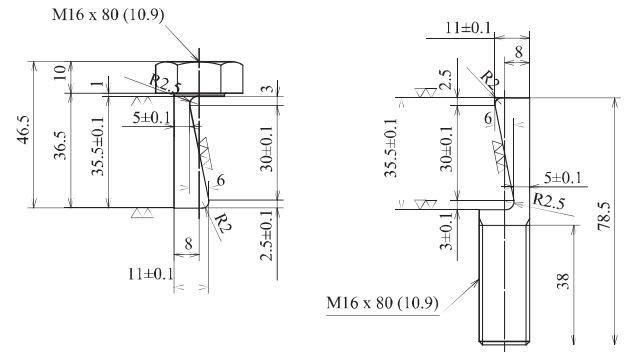
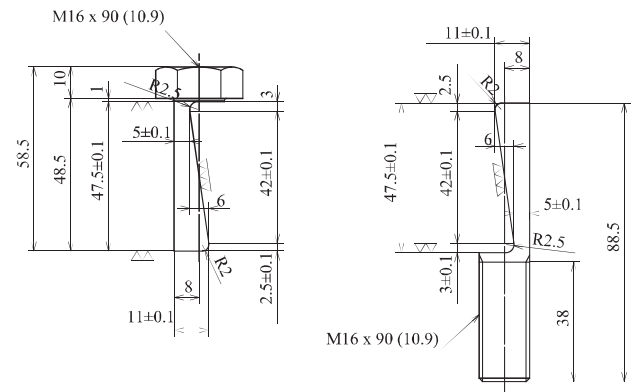


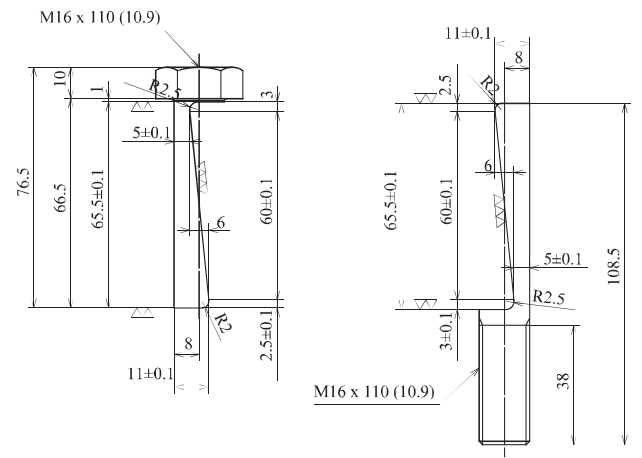
Fig.2 Coiled spring setup



(a) slope 5



(b) slope 7



(c) slope 10

Fig.3 HMS-bolt detail

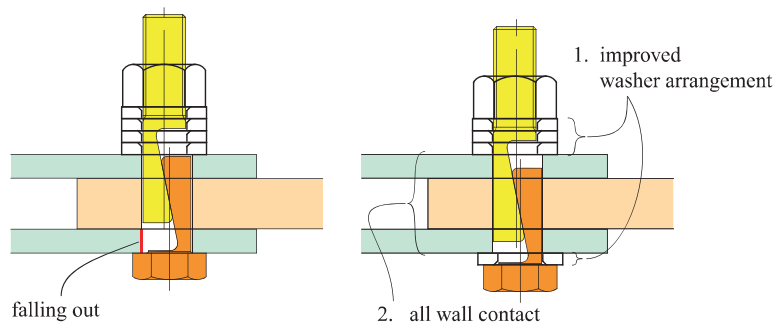


Fig.4 Bolt setup

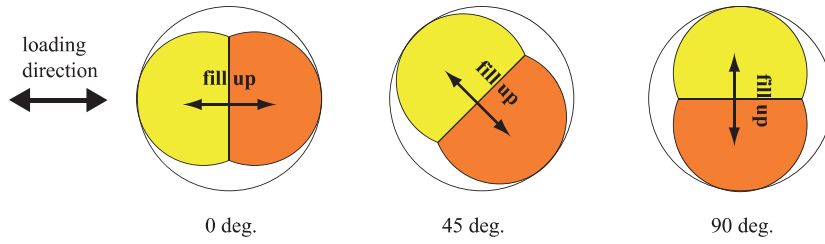


Fig.5 Bolt setup angle

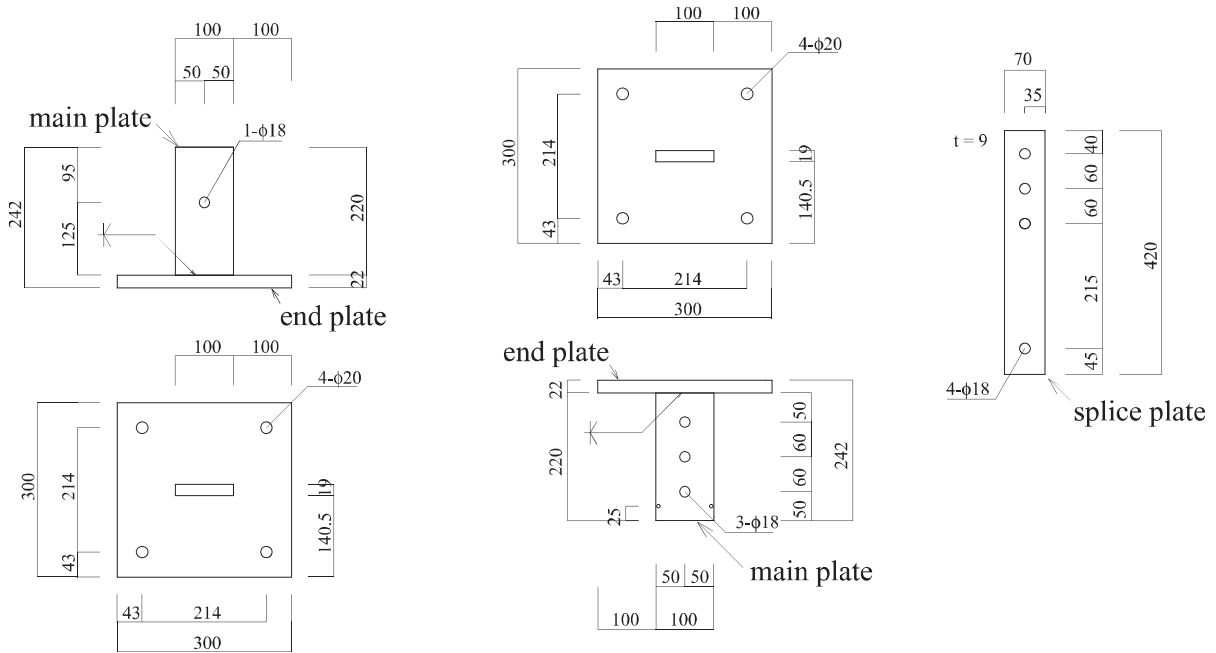


Fig.6 Main plate & splice plate

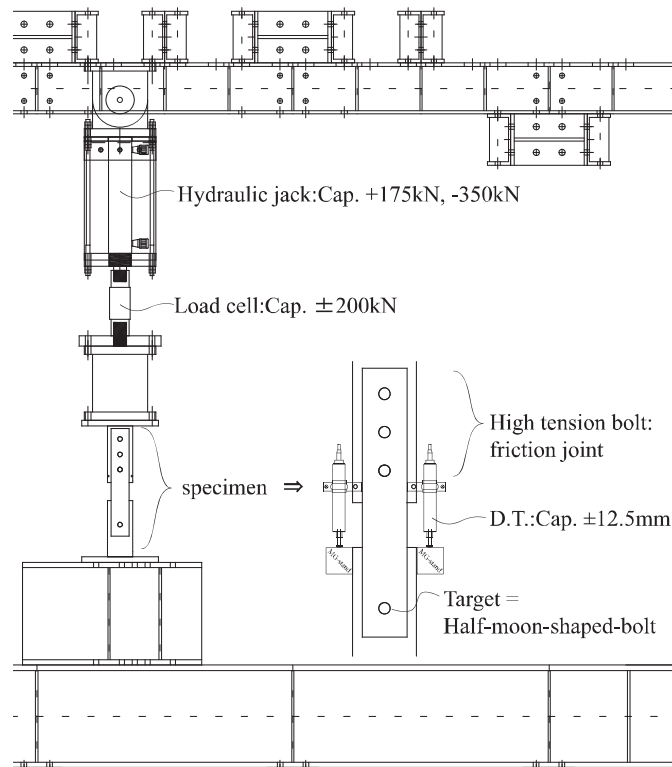


Fig.7 Apparatus & specimen setup

Tabel 1 Specimen code & parameter

No.	code	bolt cutting slope (in fig. 3)	bolt set-up (in fig. 4)	bolt hole agreement (in fig. 1)	spring (in fig. 2)	bolt setup angle (in fig. 5) deg.	region	stiffness (after 2nd cycle) kN/mm
1	5 - falling out		falling out	A				
2	5 - A - non - 0				non	0		64.6
3	5 - B - non - 0			B				
4	5 - B - set - 0				set			47.6
5	5 - A - non - 45	5	adjust	A	non	45		
6	5 - B - set - 45			B	set			24.2
7	5 - A - non - 90			A	non	90		
8	5 - B - set - 90			B	set			21.2
9	7 - falling out		falling out	A				
10	7 - A - non - 0				non	0		128.6
11	7 - B - non - 0			B				
12	7 - B - set - 0				set		elastic	117.3
13	7 - A - non - 45	7	adjust	A	non	45		
14	7 - B - set - 45			B	set			34.3
15	7 - A - non - 90			A	non	90		
16	7 - B - set - 90			B	set			32.5
17	10 - falling out		falling out	A				
18	10 - A - non - 0				non	0		146.2
19	10 - B - non - 0			B				
20	10 - B - set - 0				set			114.3
21	10 - A - non - 45	10	adjust	A	non	45		
22	10 - B - set - 45			B	set			35.6
23	10 - A - non - 90			A	non	90		
24	10 - B - set - 90			B	set			32.7
25	7 - plastic	7	adjust	B	set	0	elasto/plastic	

±40kN 載荷した後に引張方向に弾性限界の2倍程度の荷重に達するまで載荷を行い、その後、再度±40kNの載荷を行っている。

Tabel 2 Material properties for plate

	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_Y$ (N/mm <sup>2</sup> )
main plate	205000	303
splice plate	205000	336

#### 4. 実験結果と考察

図8に載荷時に母材と添え板の貫通孔の相対的な位置変化が生じる条件下で、圧縮コイルバネの復元力により自己

充填機能が確保されている場合の動作と機能を示している。

図9～13に実験結果として、継手のせん断力、母材間の相対変位関係、弾塑性実験の後のボルトの写真を示す。尚、図9～11の(i)には代表的な変数を重ねて示すと共に、自己充填機能発揮後の弾性剛性(正負40kN間の割線剛性)を併記している。

尚、実験において、ボルトのスリップバック(接触力により充填方向と逆にネジ側のボルトが移動する現象)は見られなかった。

##### 4.1 自己充填機能

図8より、母材と添え板のボルト貫通孔が平面的に一致していない場合、一方向に加力すると隙間が生じる(step

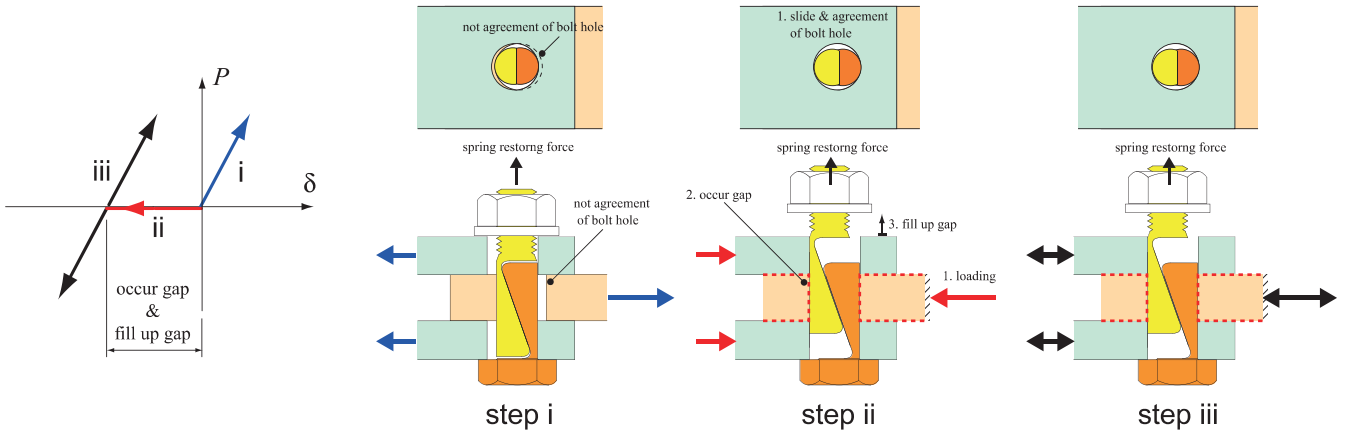


Fig.8 Concept & function of HMS-bolt

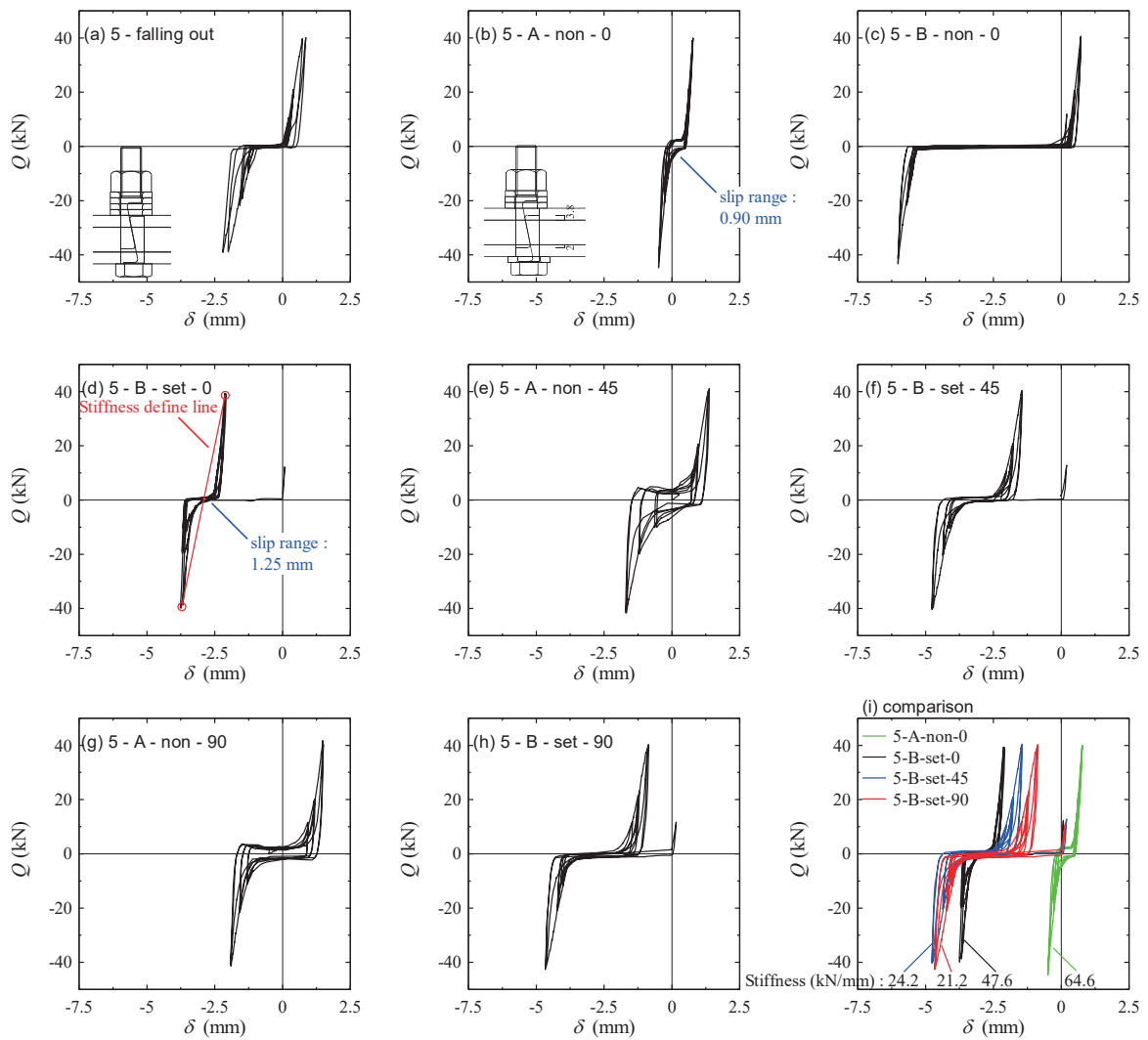


Fig.9 Shearing force  $Q$  - displacement  $d$  relationship for slope 5

ii-1&2). このときに、圧縮コイルバネの復元力によりネジ側のボルトが移動し、隙間を充填する (step ii-3)。この結果、載荷方向に関係無くスリップが生じることなく支圧接合が得られる。

図9～11中の (b), (c), (d), (i) を検討する。まず、

(b) は図1 (a) の状態であり、理想的な条件下の性能を示している。完全にスリップを0にすることはできないが、ボルト軸径とボルト貫通孔の直径差により生じるスリップ量 = 4.0mm 超 ((c) より、この度の試験体では 5 mm 程生じている) を十分に小さくできている。但し、勾配5の

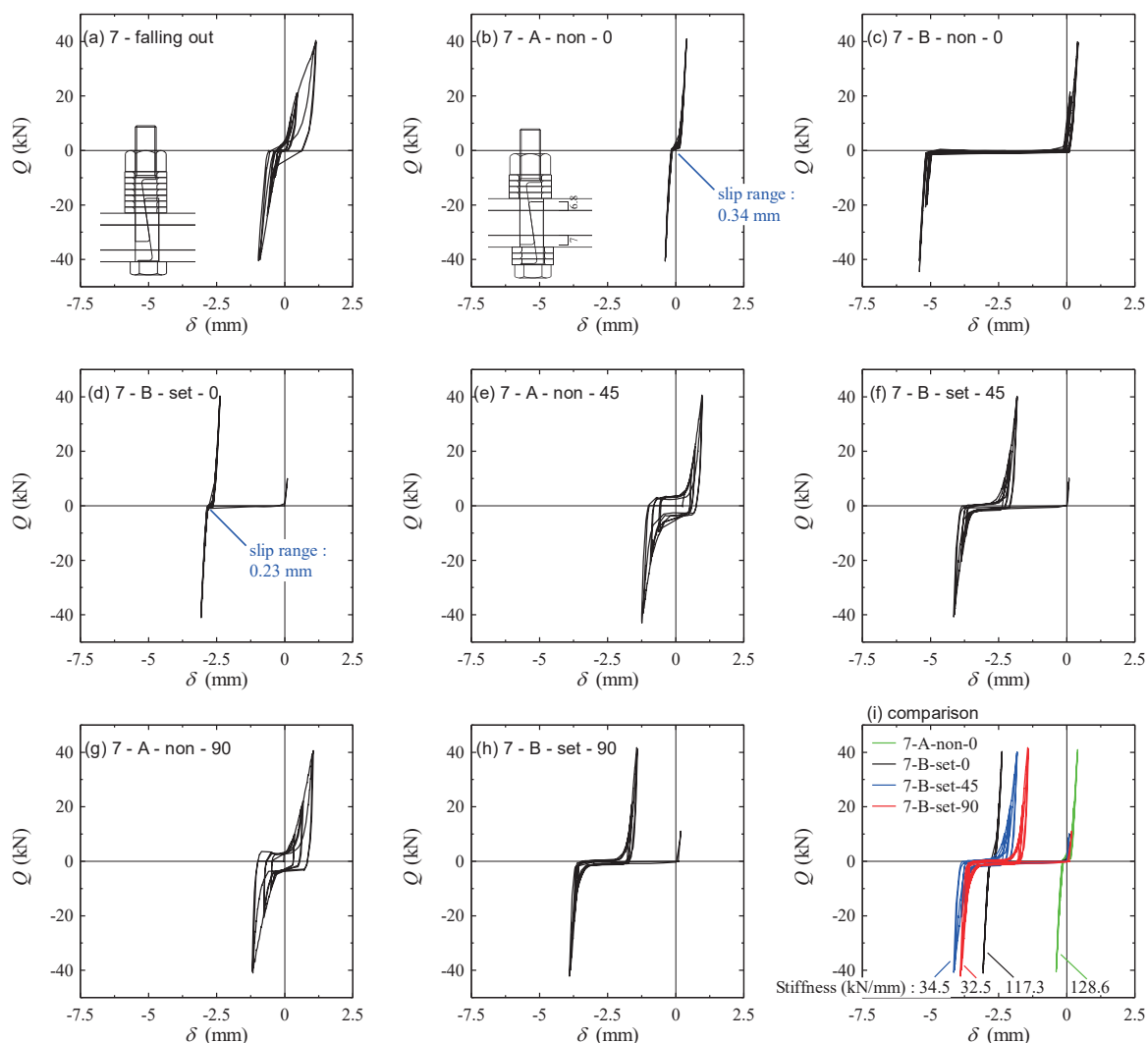


Fig.10 Shearing force  $Q$  - displacement  $d$  relationship for slope 7

場合は図 9 (b) 中に形状を示しているようにボルト軸部と添え板の貫通孔内壁の接触幅が小さく、これに起因してスリップ量 = 0.9mm と比較的大きい値を示したと考えている。

これに対して、(d) は载荷時に圧縮コイルバネによる自己充填機能を経験している。(i) から、(b) と (d) の弾性剛性は 0.74~0.91 の比率で (d) が低い結果となっている。これは、ネジ側ボルトに作用する引抜き力の差（設置時にある程度のトルクを掛けておきかつ復元力の差（圧縮コイルバネは伸びる程復元力が低下する）が生じる）によるものと考えている。

最後に、図 10, 図 11 より、弾性剛性を確保する観点においては、添え板の貫通孔内壁とボルト軸部とがある程度以上接触していないとスリップ量が大きくなり、今度の条件では勾配 7 以上の接触領域が必要であることが分かる。

#### 4.2 充填方向の設置角度

図 9 ~ 11 中の (e), (f), (g), (h), (i) を検討する。先ず、設置角度が生じることで、 $0^\circ$  に比較して著しく弾性

剛性が低下していることが読み取れる。切断勾配 5, 7, 10, また設置角度  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  間で低下度合いの差異はあるものの、いずれも半分以下であり構造性能としては致命的である。このため、設置角度は  $0^\circ$  とすることが重要であることが分かる。

#### 4.3 接触不良による脱落

図 9 ~ 11 中の (a), (b) より、軸方向の位置を十分に考慮せず、片側の添え板とボルト部とが接触せずに脱落する場合、スリップ量が大きくなる。脱落の度合いによりスリップ量も変化し、特に、図 11 (a) では、ボルト軸径とボルト貫通孔の直径差により生じるスリップ量を超過している。これは、偏心により継手、ボルトが回転したためである。

板厚が厚くなると、充填時のボルトの移動量が大きくなる。この場合、軸方向の位置を慎重に検討しなければ、脱落の度合いが大きくなり、図 11 (a) に近い構造性能に低下する可能性がある。

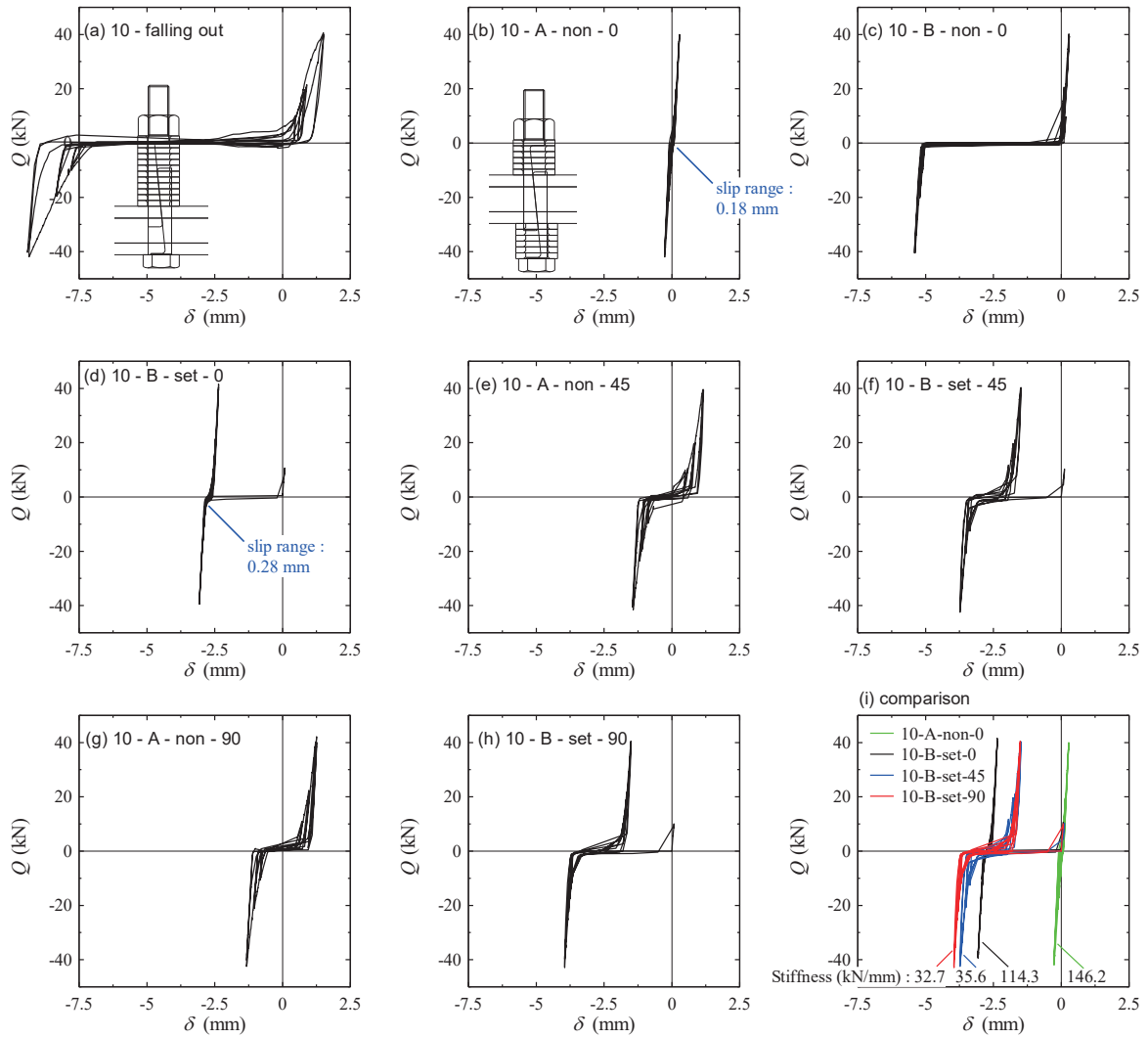


Fig.11 Shearing force  $Q$  - displacement  $d$  relationship for slope 10

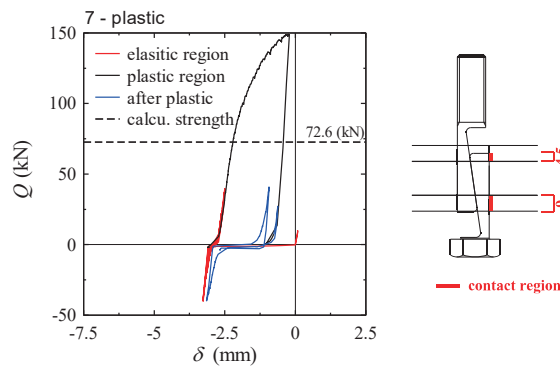


Fig. 12 Shearing force  $Q$  - displacement  $d$  relationship for slope 7 in plasto/elastic region



Fig. 13 Bolt & splice plate condition after experiment of 7 - plastic



#### 4.4 弾塑性領域

図12, 13より, 弾性限界の荷重は72.6kN 近傍である. この値は, ボルト軸部と添え板貫通孔内壁の接触位置を実験後の変形状態から推定し, 同接触面積から算出した添え板の降伏荷重である. ここから, 接触状態を考慮することで弾性限界荷重は比較的精度良く推定できることが分かる. 弾性限界荷重の2倍程度の荷重に到達した後に除荷して, 再度正負交番の弾性载荷を行っているが, 弾塑性载荷によりボルト軸部もせん断変形し, 自己充填機能が十分に発揮されなかったことに基因してスリップが2mm程に拡大している. 弾塑性履歴を受ける場合は, 自己充填機能が阻害される可能性があることが確認できた.

#### 5. 結論

複半月充填ボルトの弾性剛性に着目するため, いくつかの変数を採用した要素実験を行い以下の知見を得た.

1. 自己充填機能が発揮されても, 弾性域の繰返し载荷下の軌跡から, 支圧接合状態が得られるまでに多少のスリップが生じる. また, 添え板内壁と軸部が十分に接触していない場合は, スリップの量が大きくなる. 本実験の範囲においては, 弾性剛性を得ると言う観点から添え板厚の半分程度以上確保できていれば良いことが分かる.
2. 母材と添え板のボルト貫通孔の平面的な不一致を, 圧縮コイルバネの復元力による継続的な自己充填機能により補った場合, スリップの量が大きくなる傾向が見られた(勾配7では逆転していた). しかし, 貫通孔とボルト軸の直径差により生じるスリップの量に比較

して十分に小さい値に抑えることができる. この結果より, 皿バネの代替として圧縮コイルバネを用いることが可能であることが分かる.

3. 充填方向は弾性剛性に支配的な影響を与えるため, 载荷方向に対して充填方向の設置角度が $0^\circ$ となるように設置しなければならないことを確認した.
4. 弾塑性载荷時の弾性限界荷重は, 添え板内壁とボルト軸部の接触面積より得られる降伏荷重により評価できる. また, 弾塑性载荷後は, 添え板のみではなくボルトも塑性せん断変形する可能性がある. ボルトの塑性変形により, 本実験では自己充填機能の障害が発生し, 弾塑性载荷後にスリップの量が増大した.

#### 参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗, 高強度鋼用の複半月テーパ充填ボルト接合法の開発, 広島工業大学紀要研究編, 第45巻, pp.127-136, 2011.03.
- 2) 玉井宏章, 桐山尚大, 高松隆夫, 高強度鋼用の複半月テーパ充填ボルト接合梁継手载荷実験, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第21巻, pp.587-594, 2013.11.
- 3) 山下祥平, 玉井宏章, 桐山尚大, 高強度用の複半月テーパ充填ボルト支圧接合継手の载荷実験, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第22巻, pp.13-19, 2014.11.
- 4) 玉井宏章, 桐山尚大, 複半月充填ボルト支圧接合法について—接合部の基本特性—, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第709号, pp.511-518, 2015. 3.