

鋼構造建築物における高力ボルトを用いた PC ファスナー接合部の力学的性状に関する研究

その1 研究概要およびすべり試験

PC ファスナー 摩擦接合 実大実験

すべり試験 肌すき

正会員 ○西澤 淳*¹ 同 増田 浩志*²

同 滝川 靖之*³

1. はじめに

鉄骨構造の建物の外壁には予め工場で製作されるプレキャストコンクリートカーテンウォール（以下、PC版と略記する）が使用される。PC版は大梁に接合金物によって取り付けられ、この接合金物は一般にPCファスナーと称されている。PCファスナーはPC版の荷重を安全に構造体に伝達する役目を担っているが、その形状や溶接の様子は実に様々であり、非常に複雑な納まりや明らかに過剰と思われる溶接が散見される。

本研究ではPCファスナーと大梁の接合に着目し、高力ボルト接合とする場合の、力学性状および応力伝達機構を明らかにするために実大実験を行い、結果を報告する。

2. 実大曲げ実験概要

2.1 試験体 図1にPCファスナーと大梁の接合形式を示す。大梁接合形式(Gシリーズ)は、上側の添板をPCファスナーの上フランジ、下フランジ側の添板を大梁のウェブおよびスチフナに溶接で取り付け、PCファスナーは上側から取り付ける。小梁接合形式(Bシリーズ)は上下の添板を大梁側に溶接し、PCファスナーを挟むように取り付ける。なお、上フランジ添板は隅肉溶接とした。また、ボルト接合との比較のため現在、広く用いられている溶接による接合タイプのWタイプを計画した。

図2に実大曲げ実験の試験体形状を示す。大梁部分にH-600×300×12×25を用いPCファスナーを想定したH形鋼を取り付けた。大梁を挟んでPCファスナーの反対側には600mmの間隔で大梁のねじれ止め治具を取り付けた。ねじれ止め治具はPCファスナーと平面的にずらすことで、大梁ウェブの局部変形を拘束しないようにした。試験体の鋼種はSS400であり、高力ボルトは全てS10T(M22)を使用した。標準ボルト張力である226kNを目標値とし、ボルト頭部にひずみゲージを貼付し、張力を測定しながら締付けを行った。

2.2 実験変数 表1に試験体の一覧を示す。実験変数はPCファスナーを想定したPCファスナーのサイズ、肌すき量、バックスチフナの有無および板厚、フランジ添板厚およびウェブのボルト本数とした。肌すきについてはそれぞれの部材に許容差が認められており、添板とPCファスナーの間には肌すきが生じることは施工上避けられない。

2.3 荷重方法 図3に荷重方法を示す。2000kN 万能試験機に試験体の上下を反転しセットし、ファスナー先端と大梁ねじれ止め治具の先端をピン支持し、中央の梁に荷

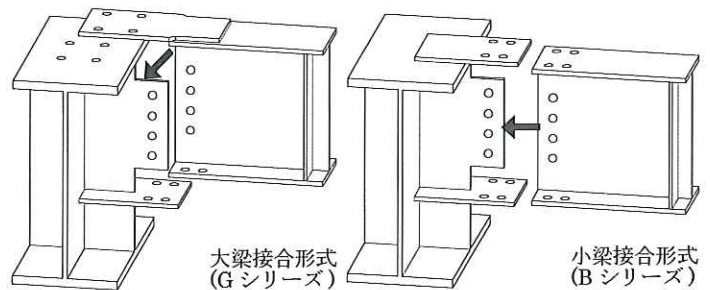


図1 PCファスナーの接合タイプ

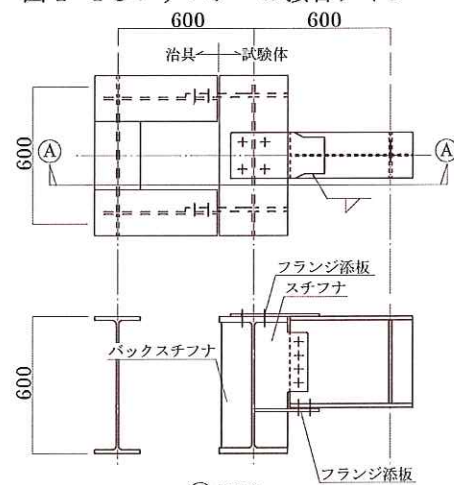


図2 試験体形状

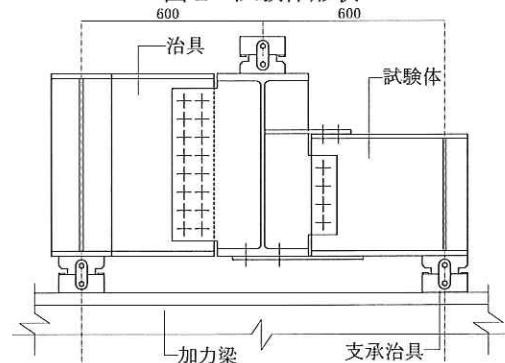


図3 荷重方法

表1 実大曲げ実験試験体一覧

試験体名	PCファスナーサイズ	肌すき量 (mm)	添板厚 (mm)	バックスチフナ厚 (mm)	ウェブボルト	
1	G4-2-12	H-400×200×8×13	2mm	PL-12	PL-12	4-M22
2	G3-2-12	H-300×200×8×12	2mm	PL-12	PL-12	3-M22
3	G6-2-12	H-600×200×11×17	2mm	PL-12	PL-12	6-M22
4	G4-4-12	H-400×200×8×13	4mm	PL-12	PL-12	4-M22
5	G4-2-12TS	H-400×200×8×13	2mm	PL-16	PL-12	4-M22
6	G4-2-9	H-400×200×8×13	2mm	PL-12	PL-9	4-M22
7	G4-2-0	H-400×200×8×13	2mm	PL-12	—	4-M22
8	G4-2-12W	H-400×200×8×13	2mm	PL-12	PL-12	4×2-M22
9	W4-0-12	H-400×200×8×13	—	—	PL-12	—
10	B4-2-12	H-400×200×8×13	2mm	PL-12	PL-12	4-M22
11	B4-6-12	H-400×200×8×13	6mm	PL-12	PL-12	4-M22

表 2 すべり試験概要および結果

試験体名	添板	肌すき量 (mm)	内側縁端距離(mm)	経過時間	加力直前の張力				すべり荷重(kN)				すべり係数			
					A	B	C	平均	A	B	C	平均	A	B	C	平均
S-12-0-40	PL-12	0	40	1週間	232	226	228	229	648	609	629	629	0.697	0.674	0.689	0.687
S-12-2-40	PL-12	2.3	40	1週間	202	192	190	212	502	512	525	513	0.620	0.666	0.689	0.659
S-12-4-40	PL-12	3.9	40	1週間	197	204	199	200	534	529	535	533	0.678	0.648	0.671	0.665
S-12-6-40	PL-12	6	40	1週間	270	245	246	254	522	510	513	515	0.483	0.521	0.521	0.508
S-16-0-40	PL-16	0	40	1週間	270	222	226	239	629	609	660	633	0.583	0.685	0.731	0.666
S-16-2-40	PL-16	2.3	40	1週間	226	230	219	225	452	496	472	474	0.501	0.540	0.539	0.527
S-16-4-40	PL-16	3.9	40	1週間	234	201	208	214	499	438	451	463	0.533	0.544	0.543	0.540
S-16-6-40	PL-16	6	40	1週間	226	222	—	224	489	491	—	490	0.541	0.552	—	0.546
S-12-4-55	PL-12	3.9	55	1週間	223	222	—	222	494	548	—	521	0.554	0.618	—	0.586
S-16-4-55	PL-16	3.9	55	1週間	234	230	—	232	513	549	—	531	0.548	0.598	—	0.573
S-12-4-70	PL-12	3.9	70	1週間	—	226	226	226	—	553	517	535	—	0.612	0.571	0.592
S-16-4-70	PL-16	3.9	70	1週間	199	172	226	199	482	478	481	481	0.606	0.694	0.533	0.611
S-16-0-40-2	PL-16	0	40	2週間	234	—	226	230	617	—	604	610	0.658	—	0.669	0.663
S-16-0-40-3	PL-16	0	40	3週間	233	232	226	231	623	619	626	623	0.668	0.666	0.692	0.675

重を負荷する3点曲げ形式で行なった。PC版は通常は4個のPCファスナーで支持され、鉛直荷重はこのうち2個のPCファスナーが負担している。地震時にPC版はロッキングによって層間変形に追従するので、PC版の全重量を1個のPCファスナーが負担することになる。更に、上下動の最大1Gが負荷される。PC版の重量は一般的なもので最大で80kN程度なので、PCファスナーには160kNの鉛直荷重が作用する。これを本研究ではPCファスナーの必要耐力の目安とした。

荷重は単調荷重として、主すべりの発生またはPCファスナー端部の鉛直変位が約30mmになるまで荷重した。

3. すべり試験

添板とPCファスナーの肌すきは、接合部の耐力に影響を与える重要な因子であると考えられることから、実大曲げ実験に先立ち、実大曲げ実験と条件を合わせてすべり試験を行なった。

3.1 実験概要 表2に概要および結果の一覧を示す。実験変数は肌すき量、添板厚、内側縁端距離および発錆促進剤を塗付から締付けまでの時間である。高力ボルトS10T(M22)とし、摩擦面処理はショットブラストの後、発錆促進剤を塗布し赤錆を発生させた。実大実験を考慮して、発錆促進剤の塗布から締付けまでの期間も変数とした。標準ボルト張力である226kNを目標値とし、ボルト頭部にひずみゲージを貼付し、張力を測定しながら締付けを行った。2本目を締め付けた後に1本目の増し締めは行っていない。

3.2 実験結果 図5にすべり荷重と肌すき量の関係を示し、図6にすべり係数と肌すき量の関係を示す。すべり係数は添板厚によって傾向が異なっている。添板厚12mmでは肌すき4mmまですべり係数は低下していないが、16mmの場合には肌すき2mmですべり係数が低下した。添板厚16mmの場合、12mmの場合と比べ添板の剛性が大きいので摩擦面が密着し難い。そのため、締付け時と比べ軸力が低下していない場合でもすべり荷重が低下し、すべり係数も低下する。添板厚12mmの試験体で、肌す

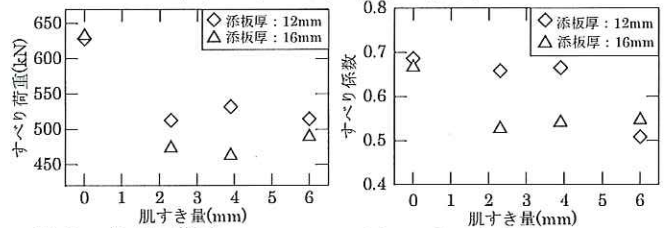
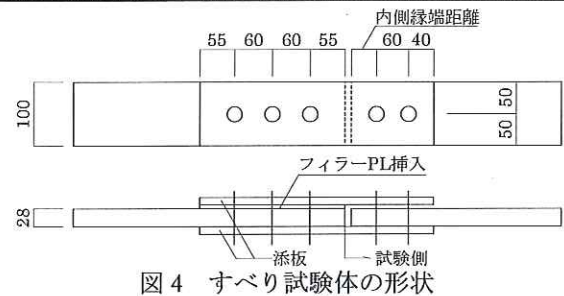


図5 すべり荷重・肌すき量関係

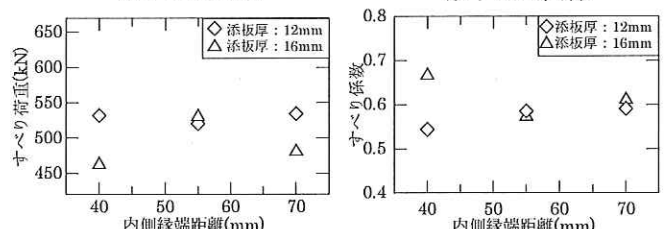


図6 すべり係数・肌すき量関係

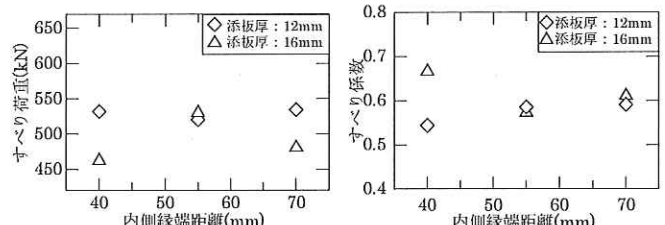


図7 すべり荷重・内側縁端距離関係

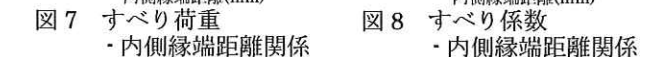


図8 すべり係数・内側縁端距離関係

き6mmで大きくすべり係数が低下しているのは、肌すき4mmまでは摩擦面が十分に密着していたが、6mmでは十分に密着していなかったためであると考えられる。添板厚16mmの試験体も同様に、肌すき2mmで摩擦面が十分に密着していないものと考えられる。

内側縁端距離とすべり係数には明確な関係は見られなかった。また、発錆促進剤を塗付してからの時間経過による違いは見られなかった。

4. まとめ

鋼構造建築物における高力ボルトを用いたPCファスナー接合部の力学的性状を明らかにするために実大実験とすべり試験を行なった。その1では実大実験の概要とすべり試験の結果について報告した。

*1 株式会社 角藤 博士 (工学)

*2 宇都宮大学 教授・博士 (工学)

*3 宇都宮大学 大学院生

*1 Kakuto Corporation., Dr.Eng.

*2 Prof.,Dept. of Architecture Faculty of Eng.,Utsunomiya Univ.,Dr.Eng.

*3 Graduate St,Graduate school of Eng,Utsunomiya Univ.

鋼構造建築物における高力ボルトを用いたPCファスナー接合部の力学的性状に関する研究
その2 実験結果および考察

PCファスナー 摩擦接合 実大実験
すべり試験 肌すき

正会員 ○滝川 靖之*1 同 増田 浩志*2
同 西澤 淳*3

1. はじめに

本報その2では、実大曲げ実験の結果をまとめ、提案するPCファスナー接合部の力学性状を検討した。計算で得られたPCファスナー接合部の降伏曲げ耐力および降伏せん断力と実験結果の比較を行った結果を報告する。

2. 実大曲げ実験

実験時の変形性状から、すべての試験体でせん断力が支配的であることが明らかになった。また、すべりが生じた試験体では、降伏曲げ耐力よりもすべり耐力の方が大きいという結果となった。以下、各試験体の降伏挙動および計算式との対応について考察する。

2.1 実験結果及び考察 表1に実験結果および計算値を示し、図1にPCファスナー先端部のM-R関係を示す。すべり耐力の実験値 eM_s は試験体で主すべりが確認された時の値であり、降伏曲げ耐力の実験値 eM_y は slope factor 法¹⁾より、曲線と初期剛性の1/3の直線の接点の値である。また、すべり耐力計算値 cM_s および降伏曲げ耐力の計算値 cM_y についても示す。

図1-aより、変数がPCファスナーサイズの場合、PCファスナーの断面性能に大きく影響を受けているため降伏曲げ耐力は基準となる試験体G4-2-12と比べG3-2-12は32%低下しており、G6-2-12は35%増加している。初期剛性に関しても同様の増減を示した。

図1-bより、変数が肌すき量および添板厚の場合、降伏曲げ耐力についてG4-2-12と比べG4-4-12は同等であり、本実験による肌すき量の違いが降伏挙動に与える影響は小さいと考えられる。また、降伏曲げ耐力についてG4-2-12と比べG4-2-12-TSは若干増加している。

図1-cより変数がバックステフナ厚の場合、降伏曲げ耐力についてG4-2-12と比べG4-2-9は1.7%低下し、G4-2-0は12%低下した。また、初期剛性についてG4-2-12と比べG4-2-9は25%低下し、G4-2-0は30.6%低下した。

図1-dより、ウェブボルト本数を変えた場合の初期剛性および降伏曲げ耐力にほとんど差はみられない。ウェブボルト本数が2倍になるとウェブ接合部のすべり耐力も約2倍になるはずであるが、本実験ではG4-4-12-Wのウェブボルトの加力直前の張力が低下していたため、ウェブ接合部のすべり耐力が予想より低下したものと考えられる。

図1-eより、接合形式を変えた場合の初期剛性および降伏曲げ耐力にほとんど差はみられない。挟み込む接合形式であるBシリーズはB4-2-12よりもB4-6-12で先にすべりが生じた。これは肌すき量が大きく、加力直前のウェブボルト張力が大きく低下していたためと考えられる。ま

表1 実大加力実験結果

試験体名	cMs (kNm)	cMy (kNm)	eMs (kNm)	eMy (kNm)	eMs/cMs	eMy/cMy	eMy/iMy
G4-2-12	312	249	—	234	—	0.94	2.43
G3-2-12	234	200	262	159	1.12	0.79	1.66
G6-2-12	468	373	—	316	—	0.85	3.29
G4-4-12	312	249	—	231	—	0.93	2.41
G4-2-12TS	345	253	364	270	1.00	1.07	2.81
G4-2-9	312	227	343	230	1.17	1.01	2.40
G4-2-0	312	236	325	206	1.04	0.87	2.14
G4-2-12W	476	358	—	237	—	0.66	2.47
W4-0-12	—	270	—	251	—	0.93	2.62
B4-2-12	312	237	308	226	0.99	0.95	2.35
B4-6-12	312	213	293	243	0.94	1.14	2.53

表2 各試験体フランジ添板の降伏せん断力および加力直前のボルト張力

試験体名	aQ_y (kN)	bQ_y (kN)	N_w (kN)	aN_f (kN)	bN_f (kN)
G4-2-12	66.5	9.7	229	225	220
G3-2-12	66.5	9.7	243	236	238
G6-2-12	66.5	9.7	232	239	226
G4-4-12	66.5	9.7	229	229	224
G4-2-12TS	118	16.3	226	225	225
G4-2-9	66.5	9.7	208	200	215
G4-2-0	66.5	9.7	217	218	217
G4-2-12W	66.5	9.7	195	220	224
B4-2-12	66.5	9.7	218	221	221
B4-6-12	66.5	9.7	194	206	204

aQ_y : 上フランジ添板降伏せん断力
 bQ_y : 下フランジ降伏せん断力
 N_w : 加力直前のウェブボルト張力の平均
 aN_f : 加力直前の上フランジボルト張力の平均
 bN_f : 加力直前の下フランジボルト張力の平均

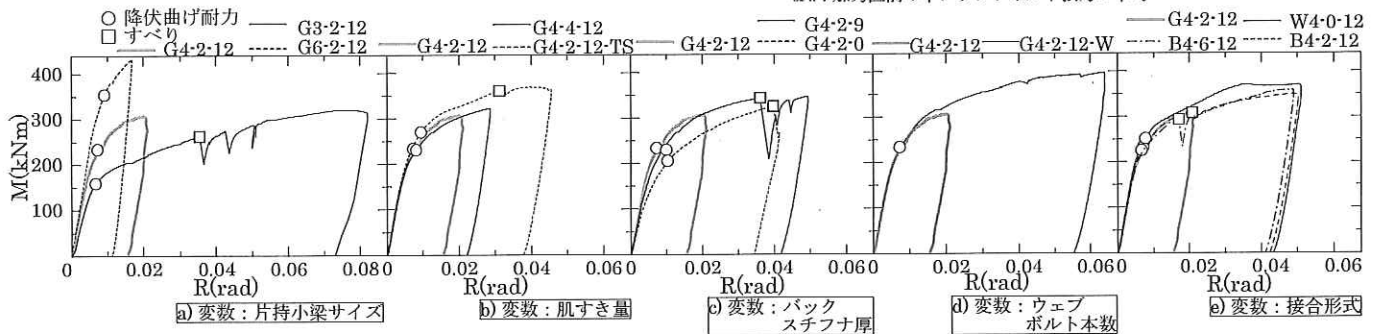


図1 実大加力実験 M-R 関係

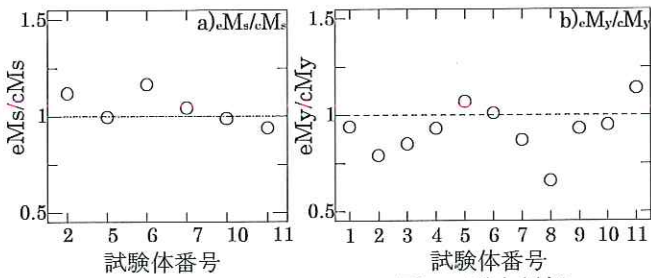


図2 耐力評価

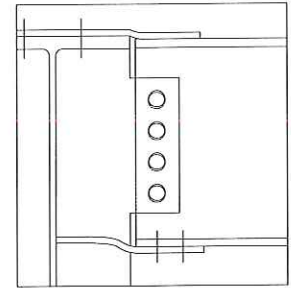


図3 変形状態

た、従来の接合形式である W シリーズは溶接部では破壊は起きず、PC ファスナーが降伏した。G4-2-12 の降伏曲げ耐力は W シリーズの降伏曲げ耐力と比べ若干低くなっているが、変形角が 1/100 程度までは同様な挙動を示しており、PC ファスナーとして十分な力学性能を示した。後述するが、PC ファスナーに作用する最大荷重による作用モーメントに比べ W シリーズの降伏曲げ耐力はかなり余裕があるため、さらなる簡略化の可能性があると見える。

2.2 実験結果と計算値の対応 表 2 にフランジ添板およびウェブ添板の降伏せん断力、フランジ接合部およびウェブ接合部のボルト張力平均値を示す。また図 2 に試験体の降伏曲げ耐力について実験値を計算値で除した値を示す。

図 2-a にすべりが生じた試験体について、すべり耐力実験値 eM_s を計算値 cM_s で除した値を示す。0.94 から 1.17 であり、ばらつきがあるが概ね妥当な評価が得られた。 cM_s はその 1 で得られたすべり係数を使用してフランジ接合部およびウェブ接合部のすべり耐力を累加し算出した。

図 2-b に接合部の降伏曲げ耐力の実験値 eM_y を接合部の降伏曲げ耐力の計算値 cM_y で除した値を示す。また、図 3 に試験体の変形状態を示し、図 4 に接合部のせん断降伏モデルを示す。本実験ではせん断変形が支配的であったため、上フランジ添板がせん断降伏し、下フランジが曲げ降伏し、ウェブボルトにすべりが生じるモデルを想定する。そこで上下フランジ添板とウェブ接合部が負担するせん断力を合

$$cM_y = Q_y \cdot l$$

$$Q_y = aQ_y + bQ_y + wQ_s$$

記号

- aQ_y : 上フランジ添板の降伏曲げ耐力時のせん断力 (kN)
- bQ_y : 下フランジ添板の降伏曲げ耐力時のせん断力 (kN)
- wQ_s : ウェブボルトのすべり耐力 (kN)
- l : PC ファスナーの荷重から端部までの距離 (m)

計し、作用点からの距離を乗じた値を PC ファスナー接合部の降伏曲げ耐力計算値 cM_y とした。次式が算定式である。 eM_y/cM_y は 0.66 から 1.14 である。G-4-2-12-W は大幅に過大評価である。ウェブ接合部の剛性が大きいため、大梁のウェブやスチフナに応力が集中し早期に降伏したものと考えられる。G-4-2-12-W 以外の加力直前の試験体の eM_y/cM_y は 0.79 から 1.14 であり、若干過大評価となるが、計算値

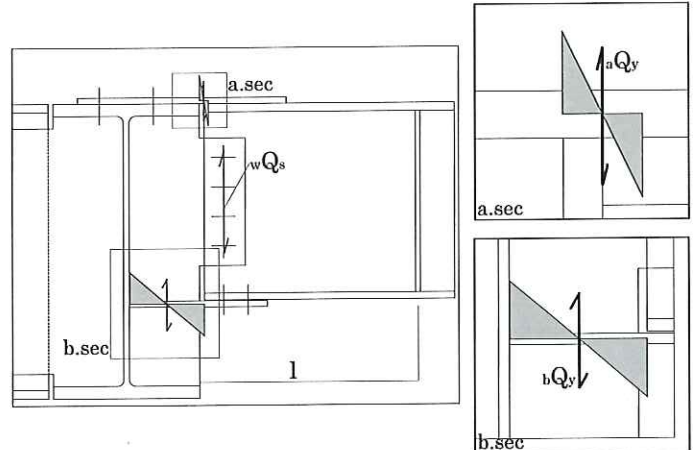


図4 せん断降伏モデル

は概ね妥当であるといえる。今後、PC ファスナー接合部において大梁のウェブやスチフナへの影響を検討していく必要がある。

図 2-c に接合部の降伏曲げ耐力実験値 eM_y を想定される曲げ荷重 iM_y で除した値を示す。 iM_y はロッキングなどを考慮した際に PC ファスナー接合部に加わる最大の曲げ荷重であり、大きさは 96kNm である。PC ファスナー自身は安全側の設計となっており、すべての試験体で eM_y/iM_y の値が 1 を大きく上回っているため、提案する PC ファスナーは十分な力学性能を有しているといえる。

3. まとめ

- ・本研究で提案する PC ファスナーの形状 (G シリーズおよび B シリーズ) は、十分な剛性および降伏曲げ耐力を発揮した。試験体の降伏前にすべりが生じることなく、接合方法として十分な力学性能を有している。
- ・本研究で提案する PC ファスナーの剛性は PC ファスナーサイズの次にバックスチフナ厚に大きく影響を受ける。
- ・ボルト張力の低下が接合部の降伏曲げ耐力に与える影響は大きい。特にウェブボルト張力により提案する PC ファスナーの挙動は大きく変化する。
- ・提案する PC ファスナー接合部降伏曲げ耐力の評価式は若干過大評価であったが概ね妥当であった。

【参考文献】

- 1) 建築研究所, 日本鉄鋼連盟: 鋼構造建築物の構造的な性能評価試験に関する研究 委員会報告書, 2002.4
- 2) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2006.3

*1 宇都宮大学 大学院生

*2 宇都宮大学 教授・博士 (工学)

*3 株式会社 角藤 博士 (工学)

*1 Graduate St, Graduate school of Eng, Utsunomiya Univ

*2 Prof., Dept. of Architecture Faculty of Eng., Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

*3 Kakuto Corporation., Dr. Eng.