3. 複合型露出柱脚のコンパクト型試験体に関する実験的研究

Experimental Study on Compact-type Specimens of Composite Exposed-type Column Bases

寺内将貴*　柳田佳伸*　新井佑一郎*　石鍋雄一郎**

－概要－

本研究は、複合型露出柱脚のベースプレートサイズの縮小化を図るため、配置および形状の合理化を図ったコンパクト型の試験体に関するものである。

コンパクト型は、内ベースプレートを 45 度方向に回転させ、その外周部に外ベースプレートを配置することで合理化を図った試験体（**図 1**）である。試験体は A タイプ（**図 1-a.**）と B タイプ（**図 1-b.**）の 2 種類を製作し、加力実験（**図 2**）を行った。

本報では、コンパクト型試験体の復元力特性（**図 3**）を確認するとともに、既往の実験との比較を行い、降伏耐力および回転剛性の算出式を検証した。

－技術的な特長－

複合型露出柱脚は、従来のアンカーボルト降伏要素を形成する内側のアンカーボルト、ベースプレートとベースプレート降伏要素を形成する外側のアンカーボルト、ベースプレートから構成される。

それぞれの降伏要素をほぼ同時に降伏するよう設計することで、復元力特性がスリップ型と最大点指向型を足し合わせた複合型となる（**図 4**）。これにより、アンカーボルトが塑性化し、在来型露出柱脚では耐力を負担できない領域においても、ベースプレート降伏要素による耐力負担が期待できる。

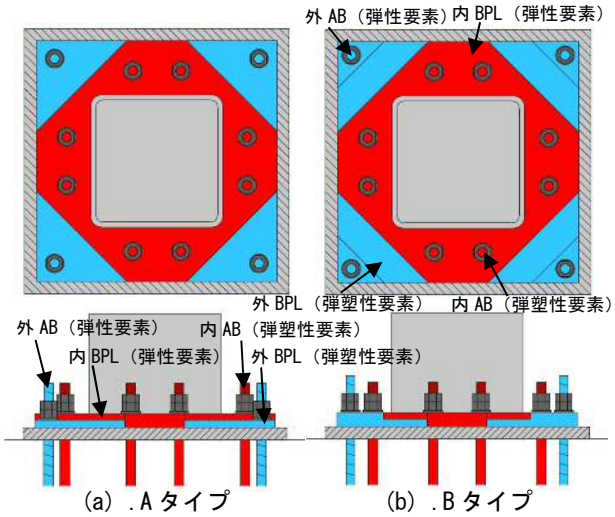

図 1　コンパクト型の構成部材の配置

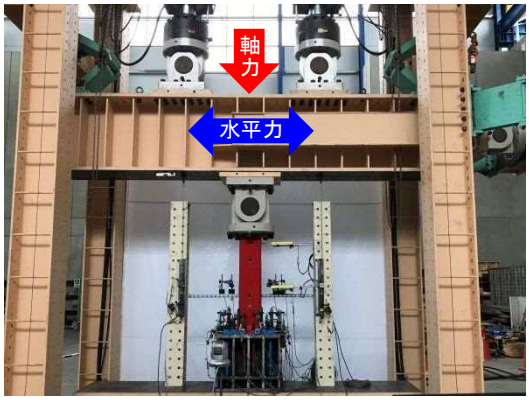

図 2　試験体加力状況

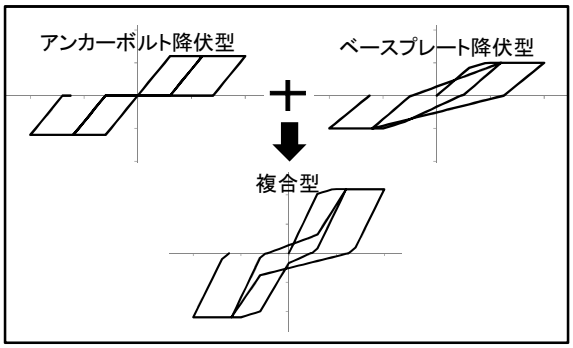

図 4　複合型露出柱脚の復元力特性モデル

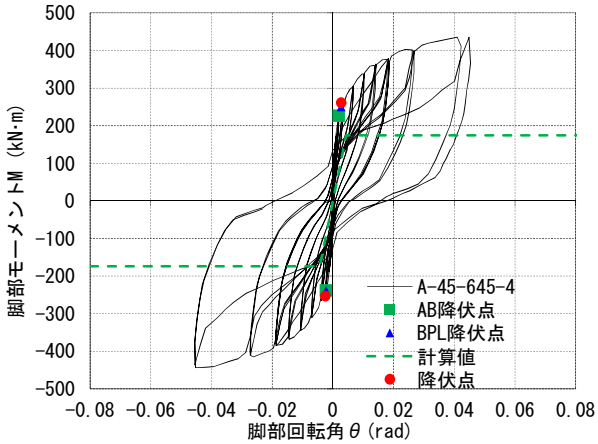

図 3　A タイプ試験体 M-θ 関係図

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室　**日本大学短期大学部 准教授

複合型露出柱脚のコンパクト型試験体に関する実験的研究

Experimental Study on Compact-type Specimens of Composite-type Exposed Column Bases

○寺内　将貴*　　柳田　佳伸*　　新井　佑一郎*　　石鍋　雄一郎**
Masaki TERAUCHI　Yoshinobu YANAGITA　Yuichiro ARAI　Yuichiro ISHINABE

ABSTRACT The Composite-type exposed column base is one type in exposed column base of steel frame building. Report the experimental results of a sample with a reduced base plate size of about 15%. It has been confirmed that it has the same performance as the previously reported composite-type exposed column base. And it was confirmed that the design formula could be applied.

Keywords :露出型柱脚, ベースプレート降伏型, アンカーボルト降伏, 復元力特性, 構造性能
Exposed-type column bases, Base plate yield type, Anchor bolt yield type, Restoring force characteristics, Structural performance

1. はじめに

鉄骨造建物における柱脚は、露出型柱脚、根巻型柱脚、埋込型柱脚の 3 形式に大別できる[1)]。その中でも、露出型柱脚が最も広く用いられており、複合型露出柱脚はその 1 種類である。

露出型柱脚を用いた骨組の降伏形式は、柱ヒンジ型と柱脚ヒンジ型に分類することができるが、柱脚ヒンジ型とした場合、その多くはアンカーボルト降伏型と呼ばれる降伏形式を採用している。

アンカーボルト降伏型は、アンカーボルトを先行降伏させることで地震エネルギーを吸収するが、アンカーボルトが塑性化した領域ではスリップ型の復元力特性となることから耐力負担ができない領域を有する。一方、ベースプレートを降伏形式とする露出柱脚も提案されてきたが、エネルギー吸収性能は高い[2)]ものの、単体では回転剛性の確保が難しいこと、また、変形性状が複雑なため耐力、剛性等の性能評価が困難であることから、一般的にはあまり用いられていない。

そこで、筆者らは、アンカーボルト降伏要素とベースプレート降伏要素が形成される複合型露出柱脚の開発を行ってきた[3)、4)]。複合型露出柱脚は、アンカーボルトとベースプレートが、ほぼ同時に降伏するよう設計する。これにより、アンカーボルト降伏要素で回転剛性を確保し、ベースプレート降伏要素で、アンカーボルトが塑性変形した領域においても十分な耐力を保持する柱脚が実現する。

本報では、複合型露出柱脚の構成部材の配置および形状をより合理化したコンパクト型試験体（**図 1**）の加力実験について報告する。

2. 実験概要

コンパクト型は、既報[3)、4)]の複合型露出柱脚の内ベースプレートを 45 度回転させ、外周部に外ベースプレートを配置する。これにより、ベースプレート降伏要素を合理的に配置することができ、柱サイズ 250 角の複合型露出柱脚のベースプレートサイズを 15%程度縮小化できる。

コンパクト型試験体の試験体諸元を**表 1**、試験体の形状を**図 2**～**図 5** に示す。コンパクト型試験体は外ベースプレートに段差を設けない A タイプと外ベースプレートに段差を設け降伏領域をより明確化した B タイプの 2 種類の形状とし、合計 7 体の試験体を製作した。試験体名は、（タイプ）－（内ベースプレート板厚）－（軸力）－（内アンカーボルト本数）で表記する。

*技術研究所　構造研究部　建築構造研究室
**日本大学短期大学部　准教授

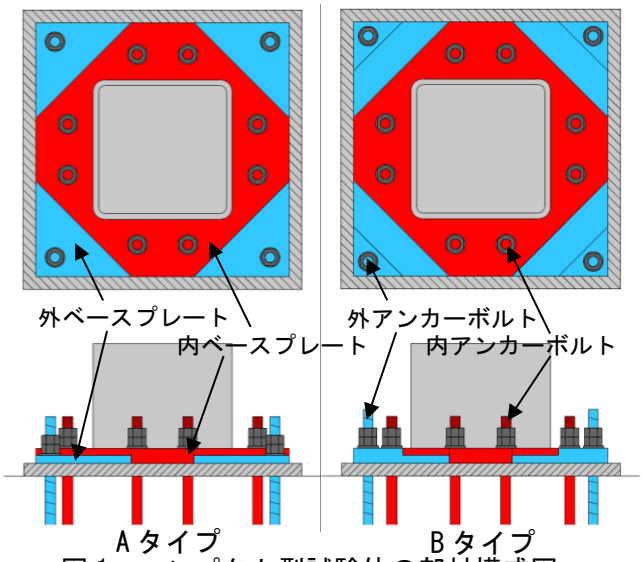

図１　コンパクト型試験体の部材構成図

表１　試験体諸元

試験体名※1	A-40	A-45	B-40	B-45
柱	BCR295 - 250×250(mm)　t=16mm			
	h=1,058mm	h=1,053mm	h=1,058mm	h=1,053mm
内 BPL※2	SN490C - 495×495(mm)		SN490C - 425×425(mm)	
	t =40mm	t =45mm	t =40mm	t =45mm
外 BPL※2	SS400 - 550×550(mm) ※4		SN400B-550×550(mm) ※4	
	t =16mm	t= 19mm	t =16mm	t= 19mm
内 AB※3	ABR400 - M22		ABR490 - M22	
	ℓ =508mm※5	ℓ =513mm※5	ℓ =508mm※5	ℓ =508mm※5
外 AB※3	SD490 - D29		TS700※6-M30	
	ℓ =484mm※5	ℓ =487mm※5	ℓ =508mm※5	ℓ =508mm※5

※1：試験体名　（タイプ）－（内 BPL 板厚）
※2：BPL＝ベースプレート　※3：AB=アンカーボルト
※4 外 BPL の寸法はベースプレート全体の寸法を記載 ※5：有効長さ
※6：建築構造用 700N/mm² アンカー用ボルト

表２　載荷プログラム

	サイクル数	制御
正負交番繰返し載荷	１回	弾性範囲確認　水平荷重 30kN
	２回	柱部材角 R=　1/200　rad
		R=　1/133　rad
		R=　1/100　rad
		R=　1/67　rad
		R=　1/50　rad
		R=　1/40　rad
		R=　1/33　rad
	アンカーボルト締直し補修作業	
	２回	R=　1/33　rad
		R=　1/25　rad
		R=　1/17　rad

また、本実験では柱脚のみの性能確認とするため、基礎部に鋼製基礎を用いて実験を行った。載荷プログラムを表２に示す。加力は軸力を一定に

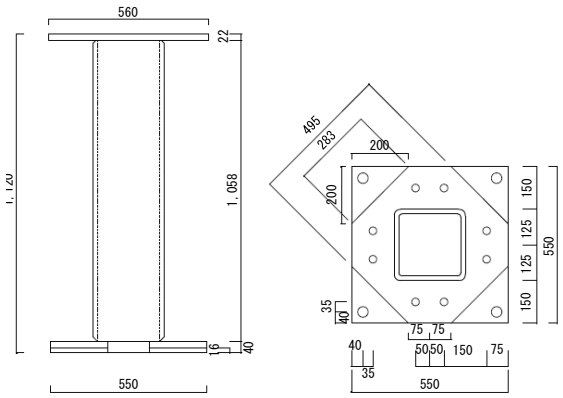

図２　A-40 試験体寸法

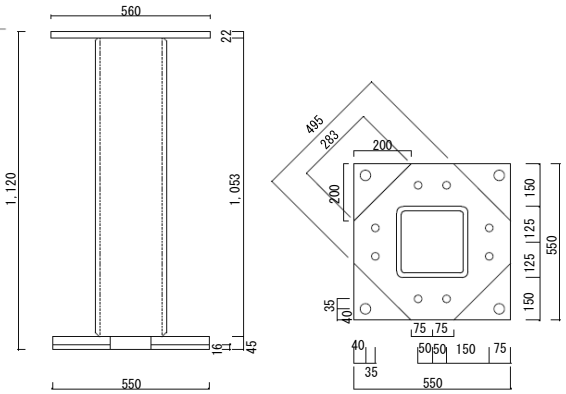

図３　A-45 試験体寸法

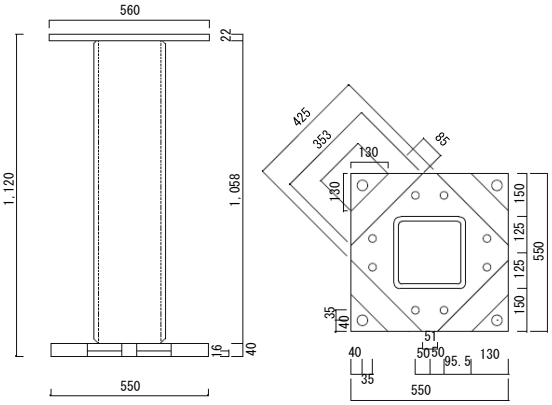

図４　B-40 試験体寸法

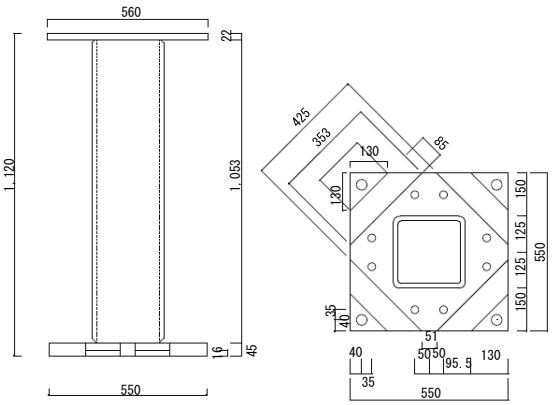

図５　B-45 試験体寸法

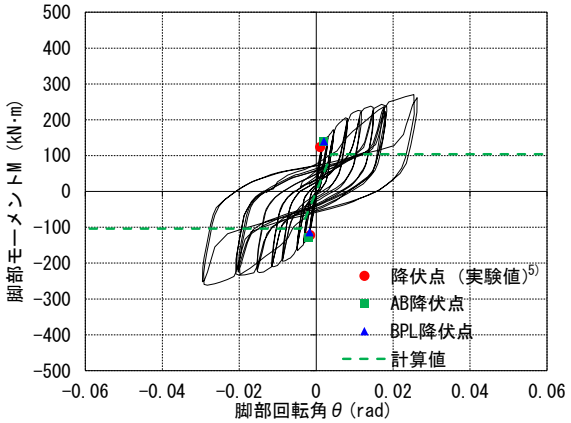

図６　A-40-0-4 M-θ関係図

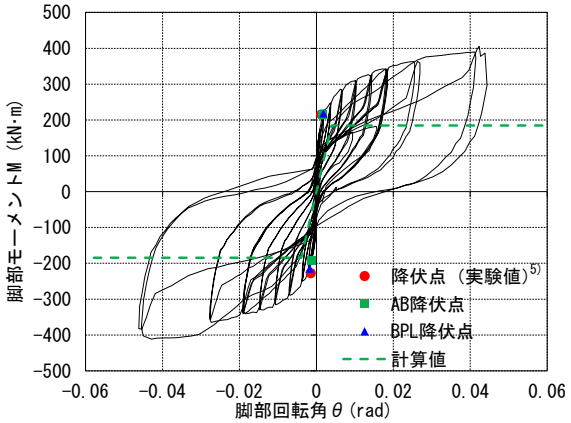

図７　A-40-645-4 M-θ関係図

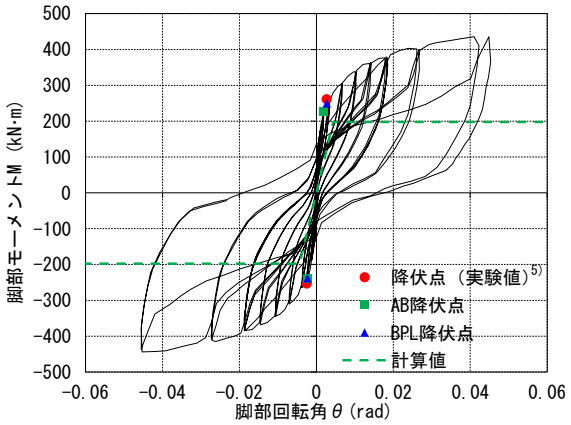

図８　A-45-645-4 M-θ関係図

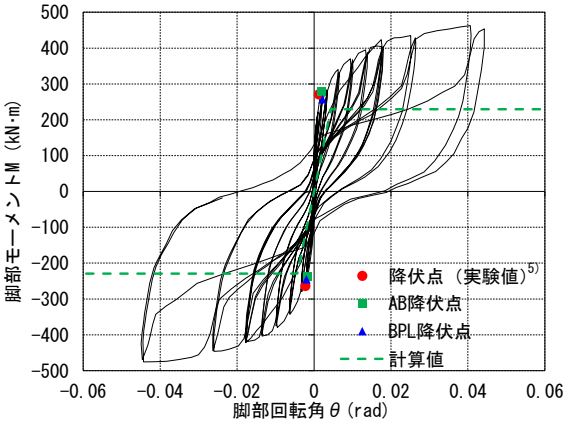

図９　A-45-645-8 M-θ関係図

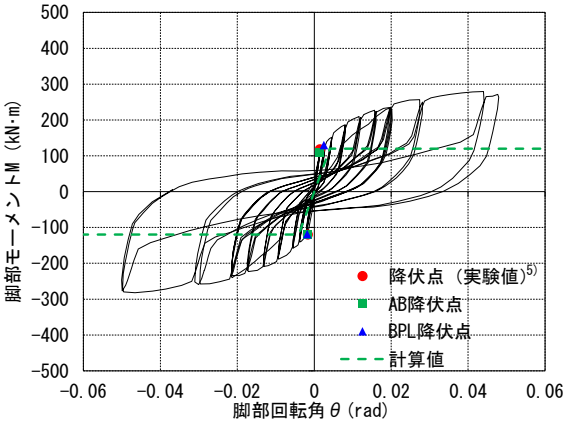

図 10　B-40-0-4 M-θ関係図

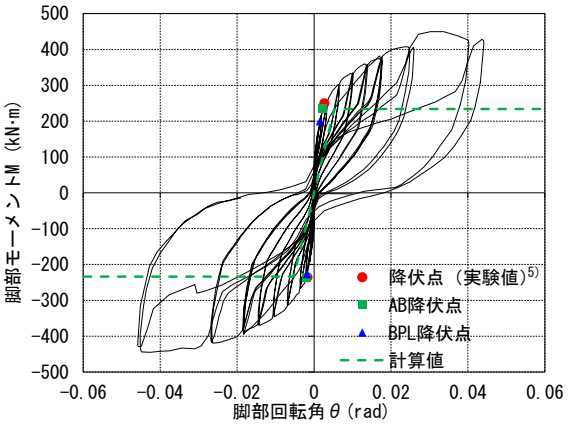

図 11　B-45-645-4 M-θ関係図

（軸力 N=0 もしくは、N=645kN）保持し、水平荷重を作用させる。柱に取り付けた変位計を基準として、柱部材角 R=1/200rad から R=1/17rad まで正負交番繰返し載荷を実施することとした。

また、コンパクト型は８本の内アンカーボルトを挿入する構成となるが、基本的な挙動を把握することを目的とし、左右４本の内アンカーボルトのみを挿入した試験体と８本すべての内アンカーボルトを挿入した試験体がある。

3. 実験結果

各試験体の M-θ（脚部モーメント - 脚部回転角）関係を図 6～図 12 に示す。アンカーボルト降伏は内アンカーボルトに取り付けたひずみゲージの値が材料試験より求めた降伏ひずみの

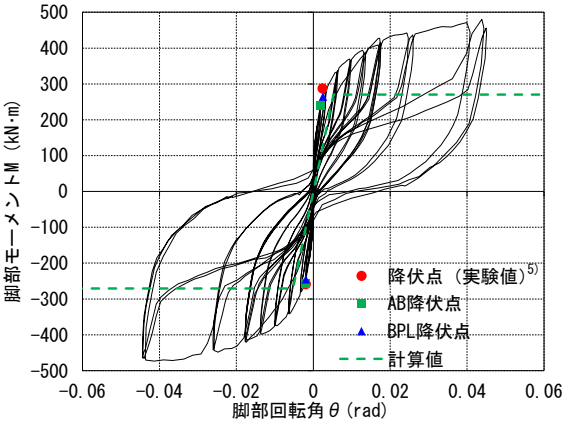

図 12　B-45-645-8 M-θ 関係図

・複合型露出柱脚の降伏曲げ耐力式

$$M_{by} = \frac{{}_b\sigma_{yo} \cdot b \cdot B_o \cdot t_o^2}{d \cdot c_m} + n_t \cdot {}_b a_{ie} \cdot {}_a\sigma_y \cdot (d_c + d_t) + M_N \quad (1)$$

・複合型露出柱脚の弾性回転剛性評価式

$${}_f K_r = \left(\frac{E \cdot b \cdot B_o^2 \cdot t_o}{150 \cdot d \cdot c_m} + \frac{E \cdot n_t \cdot {}_b a_i \cdot (d_c + d_t)^2}{2 l_{ai}} \right) \cdot \alpha_N \quad (2)$$

M_{by}　:複合型露出柱脚の降伏耐力
${}_b\sigma_{yo}$　:外ベースプレートの降伏応力（材料試験結果）
b　:想定降伏線の平均長さ
B_o　:外ベースプレート幅
t_o　:外ベースプレート板厚
d　:弾塑性板の幅
c_m　:ベースプレート形状定数（＝2.3）
n_t　:引張側アンカーボルト本数
${}_b a_{ie}$　:内アンカーボルトのねじ部有効断面積
${}_a\sigma_y$　:内アンカーボルトの降伏応力（材料試験結果）
d_c　:柱芯から柱外縁までの距離
d_t　:柱芯から引張側内アンカーボルトまでの距離
M_N　:軸力による付加曲げモーメント（$d_c \times N$）
${}_f K_r$　:複合型露出柱脚の弾性回転剛性
E　:鋼材のヤング係数
${}_b a_i$　:内アンカーボルトの軸部断面積
l_{ai}　:内アンカーボルトの有効長さ
α_N　:軸力効果の係数

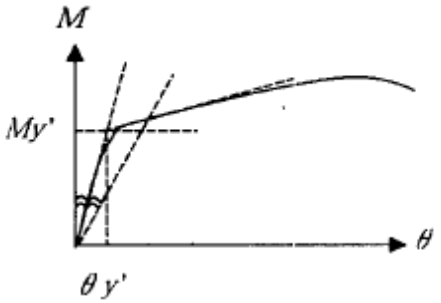

図 13　降伏点の算出方法 5)

到達した点とした。また、ベースプレート降伏点も同様に外ベースプレートに貼り付けたひずみゲージの値が降伏ひずみに達した点を記載している。

図中の計算値は複合型露出柱脚の設計式 4) である（1）式および（2）式より算出した降伏曲げ耐力および弾性回転剛性の値を示す。

本報では、内アンカーボルトおよび外ベースプレートの降伏応力を材料試験より算出した値としている。

また、降伏点は図 13 5) に示す算出方法を用いた。

3.1　復元力特性の比較

全ての試験体において、既報の複合型露出柱脚の復元力特性モデルとほぼ一致する M-θ 関係となった。このことから、コンパクト型において、既報の複合型露出柱脚と同様にアンカーボルト降伏要素とベースプレート降伏要素が複合的に形成されていることがわかる。

また、内アンカーボルトを 4 本とした試験体と 8 本とした試験体において、その復元力特性に大きな違いはなく、8 本の内アンカーボルトを挿入した試験体の方が、降伏点および最大荷重が高い傾向となった。

3.2　降伏曲げ耐力の比較

降伏曲げ耐力（計算値）と降伏点（実験値）の比較および内アンカーボルト、外ベースプレートの降伏時耐力を表 3 に示す。試験体によってはベースプレート底面と鋼製基礎間に生じるガタの影響から正負の回転角にズレが生じているため、本報では、正負の平均値を実験値としている。

A タイプ試験体では、降伏曲げ耐力（計算値）を降伏点（実験値）が上回る結果となった。また、B タイプ試験体では、計算値と実験値が、ほぼ一致するような結果となった。

既報 4) において、(1) 式は、1 割から 2 割程度安全側に評価していた。コンパクト型試験体においても同様の傾向にあることから、降伏曲げ耐力

表３　降伏曲げ耐力の比較

試験体名	降伏曲げ耐力 M_{by}（計算値）[kN・m]	降伏点 M_y（実験値）[kN・m]	M_{by}/M_y	内アンカーボルト降伏時耐力 [kN・m]	外ベースプレート降伏時耐力 [kN・m]
A-40-0-4	104.0	122.8	0.85	134.3	126.8
A-40-645-4	184.6	221.4	0.83	203.5	216.6
A-45-645-4	197.6	257.3	0.77	232.5	244.0
A-45-645-8	229.5	267.4	0.86	258.5	251.3
B-40-0-4	119.9	119.2	1.01	113.6	124.3
B-45-645-4	234.0	242.9	0.96	235.9	213.2
B-45-645-8	270.5	272.9	0.99	247.5	254.8

の算出は、内アンカーボルトと外ベースプレートの降伏耐力の単純累加である（1）式が適用できることを確認した。

また、内アンカーボルトと外ベースプレートが降伏点（実験値）付近で降伏ひずみに達していることから、それぞれの降伏形式がほぼ同時に降伏していることが確認できる。

3.3　試験体の変形状況

試験体の変形状況を**写真 1～4** に示す。

A タイプ試験体（**写真 1**、**2**）、B タイプ試験体（**写真 3**、**4**）において、コンパクト型複合型露出柱脚の降伏概念図（**図 14**）のように内アンカーボルトおよび外ベースプレートが変形している。

また、外アンカーボルトが逆八の字型に曲がるよう変形している。これは、既往の実験でも同様の現象を確認しているが、柱部材角 R=1/33rad を超えた変形角から外ベースプレートの浮上りに伴い発生する。しかし、外アンカーボルトに緩み等は発生せず、最終サイクルまで固定機能を失わないことを確認している。

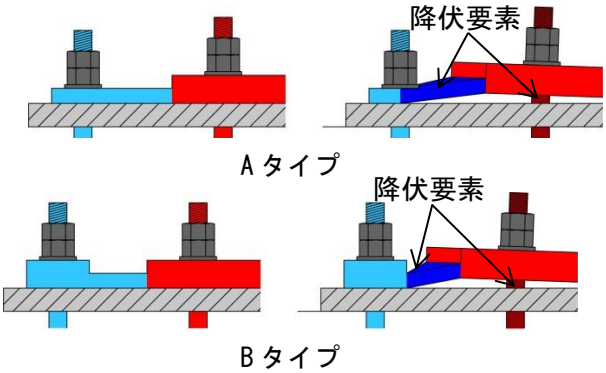

図 14　コンパクト型降伏概念図

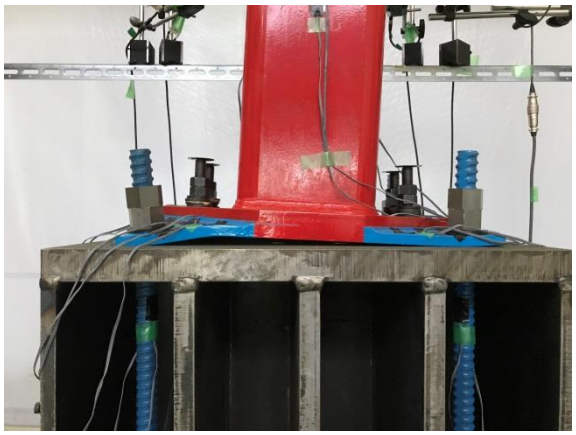

写真 1　試験体 A-40-0-4 加力状況 R=1/17rad

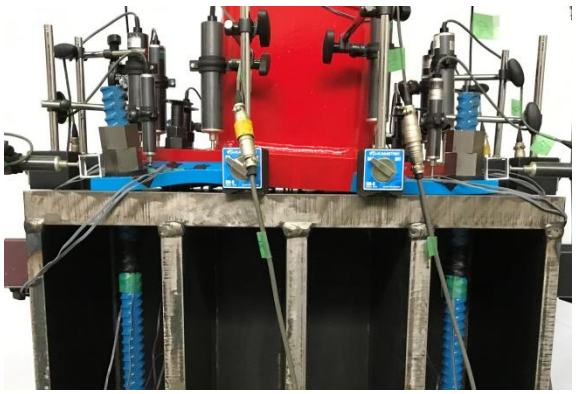

写真 2　試験体 A-45-645-4 加力状況 R=1/17rad

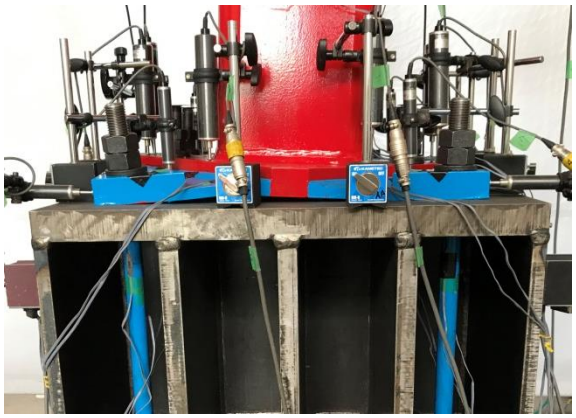

写真 3　試験体 B-40-0-4 加力状況 R=1/17rad

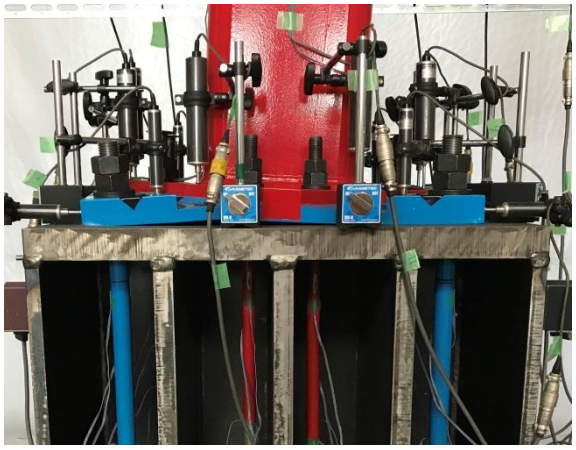

写真 4　試験体 B-45-645-8 加力状況 R=1/17rad

ンカーボルト本数の違い（**写真 3、4**）による影響は目視では確認されなかった。

3.4　内アンカーボルトと外ベースプレートの降伏変形角

複合型露出柱脚の耐力は、内アンカーボルトと外ベースプレートの耐力の単純累加により算出できる。これは、それぞれの降伏形式がほぼ同時に降伏することが重要な要素となる。

表 4 にそれぞれの降伏変形角（脚部回転角）を示す。

ほぼ全ての試験体において、内アンカーボルトと外ベースプレートが同時期に降伏していることが確認できる。一部の試験体において、乖離が見られるが、試験体と鋼製基礎のガタによる影響が考えられ、正負の平均とした場合、0.8～1.3 程度になる。

表 4　内アンカーボルトと外ベースプレートの降伏変形角の比較

試験体名	内 AB 降伏変形角 [rad]		外 BPL 降伏変形角 [rad]		内 AB/外 BPL	
	+	-	+	-	+	-
A-40-0-4	0.0021	0.0020	0.0021	0.0017	1.00	1.18
A-40-645-4	0.0016	0.0012	0.0018	0.0017	0.89	0.73
A-45-645-4	0.0019	0.0023	0.0028	0.0023	0.69	1.00
A-45-645-8	0.0019	0.0017	0.0022	0.0020	0.86	0.85
B-40-0-4	0.0014	0.0018	0.0025	0.0018	0.58	1.00
B-45-645-4	0.0023	0.0021	0.0016	0.0018	1.47	1.17
B-45-645-8	0.0019	0.0021	0.0026	0.0019	0.75	1.11

4. まとめ

本実験で得られた知見を以下にまとめる。

1）コンパクト型試験体の復元力特性は、既報の複合型露出柱脚の復元力特性と一致したことから、アンカーボルト降伏要素とベースプレート降伏要素が複合的に形成されていることを確認した。

2）降伏曲げ耐力（計算値）と降伏点（実験値）がほぼ一致したことから、降伏曲げ耐力の計算式（(1) 式）が、コンパクト型においても適用できることを確認した。

3）複合型露出柱脚は、内アンカーボルトと外ベースプレートがほぼ同時に降伏することで、複合型の復元力特性となるが、実験において、ほぼ同時期に降伏していることを確認した。その比率は 0.8～1.3 程度となった。

［謝辞］

本研究を行うに際し、天雲産業（株）よりアンカーボルト（TS700）を提供していただいた。関係各位に感謝の意を表す。

［参考文献］

1）秋山宏，鉄骨柱脚の耐震設計，技法堂出版，1985.3

2）柳田佳伸，半貫敏夫 ,秋山宏：露出型鉄骨柱脚の履歴特性に関する実験的研究 ，構造工学論文集,Vol.51B,pp303-310, 2005.4

3）柳田佳伸，新井佑一郎，石鍋雄一郎，牛島栄：基礎コンクリートを配した複合型露出柱脚の性能確認実験，日本コンクリート工学会年次論文集，第 41 巻 No.1，pp.1483-1488, 2019.6

4）寺内将貴，柳田佳伸，新井佑一郎，石鍋雄一郎：複合型露出柱脚の弾塑性要素に関する実験，青木あすなろ建設技術研究所報，Vol.4，p.2, 2019.4

5）秋山宏 ,山田哲，松本由香，竹内徹，杉本浩一：鋼構造柱梁改良接合部の終局耐震性に関する実大振動台実験，日本建築学会構造系論文集, vol551, pp.141-148, 2002.1