ベースプレート下面側にリブ補強を施した鉄骨造露出型柱脚の構造性能

STRUCTURAL BEHAVIOR OF EXPOSED TYPE STEEL COLUMN BASE HAVING BASE PLATE WITH EMBEDDED RIB REINFORCEMENTS

萩野 毅*, 原田幸博**, 渡辺 亨***, 森田耕次****

Tsuyoshi HAGINO, Yukihiro HARADA, Toru WATANABE
and Koji MORITA

We propose a new type of exposed steel column base with a base plate reinforced from underneath by rib plates embedded in the base concrete. A series of cyclic loading tests on actual-sized square tube column base specimens show that the combination of a short square stub column and rib plates arranged radially outside the stub column can effectively reinforce the base plate from underneath. Local behavior of the column base is estimated through plastic and finite element analyses; the findings of these analyses can be used for preventing local collapse and fracture of reinforced column bases.

Keywords : Rib Reinforcements , Exposed Type Steel Column Base , Structural Behavior

リブ補強, 露出柱脚, 構造性能

1. はじめに

露出型柱脚において、柱脚に生じた曲げモーメントなどの応力は、ベースプレートを介してアンカーボルトの引張力とコンクリートへの圧縮力で基礎柱型に伝達される。ここで、ベースプレートは、主に面外への曲げ抵抗によって力を伝達する。ベースプレートの面外方向への曲げに対する剛性・耐力を確保するためには、板厚を大きくするかリブプレートによる補剛、補強を施す方法が考えられ、ベースプレート上面に配置されたリブプレートに関する研究¹⁾²⁾や設計法³⁾もある。しかし、平板の板厚を大きくする方法は、柱外径が大きくなるに従い必要板厚が大きくなるため、鋼材の入手が困難となる場合がある。また、ベースプレート上面でリブプレートによって補強する場合には、ベースプレートの板厚は抑えられるが、リブプレートの大きさや枚数が増えることによって製作・加工が複雑になると共に、アンカーボルトの配置も締付け工具の施工性確保のために大きな制約を受けてしまう。ここで、リブプレートによる補強とアンカーボルト締付けに関する良好な施工性を両立させる方法の一つとして、リブプレートをベースプレート下面側に配して基礎コンクリート内に納める工法が考えられる。

ベースプレート下面のリブ補強工法に関連する既往の研究としては、ベースプレート下面側に配されるシアプレートに関する研究⁴⁾

が挙げられる。しかし、対象とされているシアプレートは柱外径よりも小さくせん断抵抗能力のみを期待するものであり、本研究で想定するようなベースプレートの補強効果はないと考えられ、参考になる知見は得がたい。

そこで本研究は角形鋼管柱の露出型柱脚を対象とし、まずベースプレート下面へのリブプレートによる補強方法について提案し、その有効性について実大柱脚実験で検証する。さらに、ベースプレート構成部材の形状寸法をパラメータとしたFEM解析を行い、ベースプレート耐荷機構のモデル化とその検証を行う。

2. ベースプレート下面側へのリブプレート補強方法

本論文で扱うベースプレートとして、補強に係わる溶接量を少なくすることを考慮しつつアンカーボルトに対する面外曲げに有効となるような補強方法と考え、ベースプレート下面に上面に取り付く柱材と同じ外形を有する角形鋼管（以下、シアコラムと呼ぶ）を取り付け、外側にむけてアンカーボルトを挟むように放射状にリブプレートを配置した形状（図1）とした。リブプレートは、内部に無収縮モルタルを充填したシアコラムとベースプレートに垂直に取り付けてベースプレートの面外変形を抑える役割を果たすもので、柱脚の設計応力が大きくなりアンカーボルトの本数が増加する場合には

* 旭化成建材(株)

(千葉大学大学院工学研究科 博士後期課程)

** 千葉大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

*** 岡部(株) 博士(工学)

**** 千葉大学 名誉教授・工博

Asahi Kasei Construction Materials Corporation

(Graduate Student, Graduate School of Engineering, Chiba University)

Prof., Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

Okabe Corporation, Dr. Eng.

Prof. Emeritus, Chiba University, Dr. Eng.

図1 ベースプレート形状

図2 荷重概要

図3 ベースプレート埋め込み状況

図4 座金

径や本数の増加を考慮して柱外形寸法を□400とし、M48 アンカーボルト8本でアンカーボルト耐力の上昇に合わせてベースプレート構成要素の板厚や高さを25-4M36と比べ大幅に増加させた40-8M48U、ベースプレート構成要素の板厚が25-4M36とほぼ同一の40-8M48D、アンカーボルトがM36の12本でベースプレートの板厚を25-4M36より小さくした40-12M36である。試験体一覧を表1に示す。

使用する鉄骨柱は、全塑性耐力がアンカーボルトの降伏を想定する柱脚モーメントの概ね1.2倍程度となる断面性能を有する角形鋼管とし、載荷点が25-4M36でベースプレート下面より2250mm、40-8M48Uで同じく2453mm、40-8M48Dと40-12M36で2775mmと各試験体で異なる中で、弾性範囲に留まるように板厚を設定した。

ベースプレートの形状寸法及びリブ補強形状を図1に示す。柱材が□400の試験体では、柱角部に配置されたアン

カーボルトを角部柱面に近くなるよう配置しており、中間に配置されたアンカーボルトと柱フランジ面からの距離が異なる。また、リブプレートの下端角部は、基礎コンクリートへの応力集中を緩和するためにリブプレート高さに対して約半分の寸法で隅切りを施している。また、ベースプレート下面のリブプレート等は基礎梁の主筋との干渉を避けなければならない。従って、ベースプレート下端は基礎梁主筋の上端より上で、コンクリートの打設を基礎梁の上端までとするが、基礎柱型の主筋及びフープ筋をベースプレート上面近くまで配置する。コンクリート上面に、ベースプレート下面高さにシアコラム内側に納まるレベルモルタルを作製して柱建方を行い、基礎柱型の大きさで型枠を作製し、流動性の高い高強度無収縮モルタルをベースプレート上面まで打設する(図3)。

ベースプレート下面は複雑な形状であるが、空気抜きを目的とした孔を設ける(図1)ことによって、無収縮モルタルはベースプレート下面と基礎柱型上面の隙間に充填され、基礎柱型と鉄骨柱の密着性が確保される。また、アンカーボルトの座金にも空気抜きの溝を設け(図4)、ベースプレートとアンカーボルトとのクリアランスにも無収縮モルタルが充填される。ただし、40-8M48Dと40-12M36ではベースプレートに空気孔を設けず、事前にシアコラム側にグラウトを充填した後、柱建方を行っている。

アンカーボルトは、全試験体で高張力丸鋼(規格降伏点600N/mm²)を用い、定着板を介して基礎柱型内に定着される。アンカーボルトの基礎柱型への埋め込み深さは、25-4M36で基礎梁上面から350mm、40-8M48Uで基礎梁上面から567mmとしたが、アンカーボルトを鉄筋で補強された基礎柱型により十分に埋め込む必要があると考え、40-8M48Dと40-12M36では基礎柱型補強鉄筋量を増やすと共に、基礎梁上面からの埋め込み深さをM48で700mm、M36で600mmとし、さらに定着板とアンカーボルト位置保持を目的とした定着フレームで基礎柱型に定着させた。各試験体の基礎コンクリー

その枚数や板厚を増加させて対応する。なお、ベースプレートとシアコラムとリブプレートはそれぞれ溶接によって接合するものとし、溶接部における破壊を防ぐために完全溶込み溶接とした。

3. 実大柱脚実験

前章で提案した下面側にリブ補強したベースプレートについて有効性を確認するとともに耐荷機構を検証するための実大柱脚実験を実施する。

3.1 荷重概要

実大柱脚実験に用いる試験体は、基礎コンクリートにアンカーボルトを介して、ベースプレートを接合した鉄骨柱が固定された形状とした。試験体の基礎コンクリートを反力床に固定し、鉄骨柱頂部に取り付けた2000kNアクチュエーターによって正負交番繰り返しの曲げとせん断を柱脚部に加えた(図2)。また、制御方法は載荷点位置での水平変位量をベースプレート下面より載荷点までの高さで除した部材角の変位制御とし、 $\pm 1/800$ 、 $\pm 1/400$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ radの順に最終目標 $\pm 1/10$ radまで各1回ずつ載荷を行う。

3.2 実大柱脚試験体概要

試験体は、柱外形寸法が□250でM36アンカーボルトを柱角部にそれぞれ配置した25-4M36、柱の大径化に伴うアンカーボルトの

表1 実大柱脚実験試験体一覧

試験体名	柱サイズ (材質)	アンカーボルト 本数・径	基礎柱型寸法 (mm)	柱型補強鉄筋 立上り/フープ
25-4M36	□250×250×12 (BCR295)	4-M36	650×650	20-D22 / D13@100
40-8M48U	□400×400×22 (BCP325)	8-M48	950×950	24-D25 / D13@100
40-8M48D	□400×400×25 (BCP325)	8-M48	1000×1000	32-D25 / D16@100
40-12M36	□400×400×25 (BCP325)	12-M36	830×830	24-D25 / D16@100

図5 試験体基礎コンクリート部仕様

表2 主要部材の機械的性質 (N/mm²)

主要構成部材	形状寸法(試験体)	材質	降伏点	引張強さ
アンカーボルト	M36 (4M36)	高張力丸鋼	616	934
	M48 (8M48U)		639	979
	M48 (8M48D)		633	965
	M36 (12M36)		669	994
ベースプレート	t22 (4M36)	SN490B	370	538
	t32 (8M48U)		356	525
	t22 (8M48D)		389	542
	t19 (12M36)		361	535
リブプレート	t12 (4M36)	SN490B	364	527
	t16 (8M48U)		389	529
	t12 (8M48D, 12M36)		349	515
シアコラム	t12 (4M36)	BCR295	404	472
	t22 (8M48U)	BCP325	376	522
	t9 (8M48D)	BCR295	337	437
	t12 (12M36)		350	440

表3 基礎コンクリートと無収縮モルタルの圧縮強度 (N/mm²)

試験体名	基礎コンクリート	無収縮モルタル
25-4M36	24	69
40-8M48U	36	56
40-8M48D	31	69
40-12M36	33	68

ト部の仕様を図5に示す。なお、基礎柱型の主筋断面は、柱型断面に対して最大が25-4M36の1.83%、最小で40-8M48Uの1.35%となっている。これは、柱脚降伏耐力時に想定する引張側アンカーボルトの総引張力に対して、全主筋引張耐力がそれぞれ約250%、110%

表4 実験結果一覧 (kN・m)

試験体	柱脚降伏モーメント	最大モーメント	最終状況
25-4M36	369	-356	444 圧縮側基礎コンクリート圧壊
40-8M48U	1,773	-1,745	1,977 アンカーボルト抜出し
40-8M48D	1,586	-1,516	1,680 ベースプレート破断
40-12M36	1,353	-1,381	1,742 ベースプレート破断

となる鉄筋量である。さらに基礎梁は柱材全塑性耐力の1.5倍の曲げモーメントがベースプレート上面に生じた時に、図2に示す柱型フェイスにおいて曲げ降伏かつせん断降伏しないこととして鉄筋量を定めている。

実験に使用したアンカーボルト、ベースプレートを構成する鋼材の機械的性質を表2に、基礎コンクリートと無収縮モルタルの圧縮強度を表3に示す。

3.3 実験結果

各試験体の実験結果を表4に、柱脚部モーメント M と柱脚回転角 θ の関係($M-\theta$ 関係)を図6に示す。ここで、柱脚回転角は図2に示す試験体基礎柱型基部を不動点とする鉄骨柱基部に設置した変位計を用いて求めたもので、履歴曲線上の●印は、表4に示す柱脚降伏モーメントである。この柱脚降伏モーメントは図7に示すアンカーボルトに貼り付けていたひずみゲージの値から判断したもので、引張側第1列目アンカーボルトの全てが素材試験結果の降伏ひずみに達した時のモーメントである。

各試験体の最終状況は、25-4M36は繰返し載荷による基礎コンクリートの劣化による耐力低下、40-8M48Uはアンカーボルト降伏後に柱脚回転角が0.04radを超えた後にアンカーボルトが抜け出し耐力低下を生じた。40-8M48D、40-12M36は、いずれもアンカーボルト降伏以降に柱角部からベースプレートが破断した。(図8)

柱脚部モーメントとベースプレート変形との関係を包絡線で表し

図6 柱脚部モーメント M と柱脚回転角 θ の関係

図7 柱脚部モーメント M とアンカーボルトひずみの関係 (包絡線)

図9 柱脚部モーメント M とベースプレート変形 δb の関係

図8 各試験体終局状況

図9に示す。ベースプレートの変形 δb は図10に示す各試験体各部に設置した変位計と柱脚回転角 θ を用いて求めた。

25-4M36では図10(a)に示す柱基部とベースプレート上面に設置した変位計 $dC, d1, d2$ の鉛直変位を用いた。

$$\delta b = dC - \theta \times 70 + \theta \times 25 - (d1 + d2)/2 \quad \dots (1)$$

40-8M48Uは図10(b)に示す柱基部と柱角部と柱フランジ部に配置されたアンカーボルト頂部に設置された $dC, d2, d3$ の鉛直変位を用いた。

$$\text{角部: } \delta b = dC - \theta \times 70 + \theta \times 35 - d2 \quad \dots (2)$$

図10 ベースプレート変形抽出に用いた変位計

$$\text{フランジ部: } \delta b = dC - \theta \times 70 + \theta \times 75 - d3 \quad \dots (3)$$

40-8M48D, 40-12M36は柱角部と柱フランジ部それぞれで図10(c)(d)に示すベースプレート上面に設置した変位計 $d10, d11, d15, d16$ の鉛直変位を用いて式4, 式5で表される。

$$\text{角部: } \delta b = d16 + L_1 \times \theta - d15 \quad \dots (4)$$

$$\text{フランジ部: } \delta b = d11 + L_2 \times \theta - d10 \quad \dots (5)$$

ここで、 L_1, L_2 はそれぞれ図10(c)(d)に示す柱角部と柱フランジ部における変位計間距離である。

ベースプレートの変形は、40-8M48Dを除きいずれの試験体もアンカーボルト降伏までわずかで、角部とフランジ部の差異も大きくないことから、ベースプレート下面側への本補強方法が有効であることがわかった。しかし、40-8M48Dはアンカーボルト降伏以前より変形が増加し、特に角部の変形が大きい。また、各試験体の $M - \theta$ 関係においても、他の試験体がスリップ型の復元力特性を有するのに対し、紡錘型を示しており、ベースプレートの面外変形によって復元力特性に差異が出ている。さらに、最終的にはベースプレート破断を生じていることから、ベースプレートのメカニズムの把握と余裕を持った設計が必要であると考えられる。

なお、40-8M48Uにおいてアンカーボルトが抜け出してしまったことに対して、アンカーボルト埋め込み深さ不足が考えられる。

本実験のようなアンボンドタイプのアンカーボルトを用いた柱脚は、アンカーボルトの引抜力の反力を基礎柱型の補強鉄筋等に期待するために十分な重ね継手長さが必要となる。このことは、九谷・増田の研究⁶で言及されており、アンカーボルトの埋め込み深さに着目した実験結果から基礎柱型の設計においてアンカーボルトと主筋の重ね継手長さならびに帯筋量を十分に確保しなければならないと述べられている。下面に補強を施したベースプレートを使用する場合、終局時に埋め込まれたリブプレート等が周辺の高強度無収縮モルタルを破壊し、補強鉄筋の付着耐力が不足する可能性があることから、アンカーボルトの埋め込み深さについてはさらに注意が必要であり、この点は、今後の研究課題としたい。

4. 柱脚実験 FEM 解析

3章で行った耐荷機構検証実験では、ベースプレート破断を確認することができたが、アンカーボルトに対するベースプレートの最適設計にはベースプレートの変形挙動把握が必要であると考え、FEM 解析によって変形の把握を図ることとした。そこでまずは解析モデルの条件設定と妥当性検証のために、ベースプレートの変形が大きかった 40-8M48D 試験体について、素材値を用いた非線形解析を実施し、実験結果との比較を行う。ここで使用する解析ソフトは MSC. Marc 2008 である。

4.1 解析モデル

解析モデルは対称性を考慮した 1/2 モデルで、アンカーボルトをト

図 11 FEM 解析モデル

図 12 FEM 解析材料データ (アンカーボルト, ベースプレート)

ラス要素, その他要素を 6 面体ソリッド要素とした。解析モデルを図 11 に示す。

解析モデルは、基礎梁を省略したものでコンクリート高さを実際の試験体と同じ 1450mm とし、柱材長さもベースプレート下面から 2775mm とした (図 11 (a))。ベースプレート要素は厚さ方向に 4 層、シアコラムの要素を厚さ方向に 2 層としたが、モデル簡略化のために、リブプレートの角部隅切りとスカラップを省略し、シアコラムの高さをリブプレートと同一とした (図 11 (d))。図 11 (b), (c) に示す記号の境界条件は、A: 柱材の頂部節点群を剛体化 (中心に対して、回転と並進の自由度を有する) し、剛体中心に強制水平変位, B: アンカーボルト (トラス要素) の下端節点の鉛直変位を拘束, C: 基礎梁の高さまでに該当するコンクリート側面節点群の水平変位を拘束, D: コンクリート下面節点群の鉛直変位を拘束, その他条件として、ベースプレート下面, リブプレート, シアコラムとコンクリートとの間には接触を考慮したが、摩擦は考慮しない。また、リブプレート下面とコンクリートは非接触とした。

アンカーボルト頂部は、ナットの 2 面幅で節点群を剛体化したベースプレートのボルト孔の中心位置とトラス要素のアンカーボルト上端接点の鉛直変位 (引張のみ) を接合している。

4.2 実験解析結果

本解析は、ベースプレート、シアコラム、リブプレートの弾塑性挙動の把握を目的とし、ベースプレート各要素とアンカーボルトを弾塑性体とした。各素材データは実験素材試験結果に基き、例としてアンカーボルトとベースプレートの応力-ひずみ関係を図 12 に示す。なお、角形鋼管柱と基礎コンクリートは弾性体とした。これは柱部材の塑性化は、解析結果に柱脚自身の挙動によらない水平耐荷性能の低下を含む恐れがあり、柱脚の挙動をベースプレート上面に

図 13 FEM 解析結果と実験結果の比較

表5 解析モデル一覧 (mm) と解析結果 (ベースプレート耐力及び初期剛性)

モデル	因子	ベースプレート	リブプレート		シアコラム		全塑性耐力 (kN)		初期剛性 ($\times 10^3 \text{kN/rad}$)	
		板厚	板厚	高さ	板厚	板厚	柱フランジ部	柱角部	柱フランジ部	柱角部
B22R103	実験モデル (基準)	22	12	103	9		795	634	563	425
B22R128	リブプレート高さ	22	12	128	9		893 (1.12)	750 (1.18)	611 (1.09)	474 (1.12)
B22R078	リブプレート高さ	22	12	78	9		680 (0.86)	501 (0.79)	458 (0.81)	343 (0.81)
B28R103	ベースプレート厚	28	12	103	9		1,000 (1.26)	768 (1.21)	623 (1.11)	480 (1.13)
B32R103	リブプレート厚	32	12	103	9		1,132 (1.42)	862 (1.36)	679 (1.21)	523 (1.23)
B32R078	リブプレート厚	32	12	78	9		1,000 (1.26)	715 (1.13)	611 (1.09)	457 (1.08)

おける回転角で評価しているの、柱部材の変形量を正確に再現する必要はないと考えたからである。

解析結果と実験結果の比較を図13に示す。単調荷重である解析結果が、繰返し荷重の実験においても引張力のみを伝達するアンカーボルトについては包絡線に対応すると考え、柱脚部モーメント M と柱脚回転角 θ の関係と、柱脚部モーメント M と各アンカーボルト張力の関係について実験結果との比較を行った。ここで、解析の柱脚回転角は図13(c) 中◎で示した柱材内面で中心線にある2節点の鉛直方向変位より求め、アンカーボルト張力の実験値はひずみの値(図7) から求めたものである。

また、ベースプレートの変形は、単調荷重と繰返し荷重を単純に比較することは難しいが、アンカーボルトの張力との関係で実験結果の包絡線との比較を行った(図13(d))。ベースプレートの変形は柱角部と柱フランジ部それぞれで比較し、実験と解析で変位抽出個所が異なるため計測位置間距離で除した変形角で表した。実験は図10(c) に示した変位計位置、解析は図13(c) 中●に示す各部柱外面と各部ベースプレートの外端における節点の変位を用いて式4、式5を用いてベースプレート変形 δb を求め、 δb を節点間距離で除したものである。

この結果から、本解析モデルのアンカーボルト弾性範囲における柱脚部モーメント-柱脚回転角関係の柱脚剛性やベースプレートに面外曲げを生じさせる各箇所のアンカーボルト張力が概ね実験結果を表現できたと考える。そこで、本解析モデルを用いて、リブプレート高さ、ベースプレート厚みを因子としたパラメータ解析を行った。

4.3 パラメータ解析

パラメータ解析では、ベースプレートの弾塑性挙動をより明確にするため、アンカーボルトを弾性体とし、その他条件は先の実験解析と同一である。本解析のモデル一覧を表5に示す。先の実験・解析同様、柱角部・柱フランジ部に配置された引張側アンカーボルトに対応するベースプレートの変形を求める。ベースプレート変形角は、図13と同じ節点を用いて求め、初期剛性に対して1/3接線剛性となった時をベースプレート全塑性耐力とし、その時の各部に対応するアンカーボルト張力の値を表5に示す。ここで、ベースプレート全塑性耐力を1/3接線剛性時としたことについて、この方法によって定義した耐力が文献⁹⁾において接合部の各部の降伏が進行し一種の使用限界に達した状態であると考えられると記述されていること、また塑性耐力の計算値がこの方法による実験値と一致する研究例が紹介されていることから採用した。表中()内数値は基準モデルとした実験モデルB22R103に対する比で、各モデルにおける比を図14に示す。また、アンカーボルト張力とベースプレート変形角の関係

図14 基準モデルに対する耐力と剛性の比

図15 アンカーボルト引張力とベースプレート変形関係

を柱のフランジ部と角部に分けて図15に示す。

これらの結果によると、柱角部より柱フランジ部のほうが耐力と剛性ともに高い。リブプレート高さは各部において耐力と剛性に影響し、柱角部の方が耐力に影響を大きく受ける。ベースプレート板厚は柱フランジ部において耐力と剛性への影響が大きく、特に耐力への影響が大きい。

5. 柱脚耐荷機構と下面に補強を施したベースプレートの耐荷機構

柱脚とベースプレートの耐荷機構を推定しそれぞれの耐力評価式を提案する。

5.1 柱脚耐荷機構

(1) 柱脚耐荷モデルの仮定

実験における計測結果から柱脚耐荷モデルを仮定する。

露出型柱脚は、柱脚部に生じたモーメントに対してアンカーボルト引張力とベースプレートが基礎柱型コンクリートを圧縮する力で抵抗する。そこで、本柱脚においてもアンカーボルトによる柱脚耐力 ${}_{ab}M$ の耐荷モデル(図16)を考えた。このモデルの妥当性を確認するために、実験における柱頂部水平力から求めた柱脚部モーメント M と、その時の各列アンカーボルトのひずみ(図7) から求めた張力 ${}_{ab}T$ で上記耐荷モデルに基づき求めた柱脚耐力 ${}_{ab}M$ を比較する。ここで、圧縮反力の中心位置を、ベースプレート下に埋め込んだモールドゲージ(図18)の柱脚部モーメント毎のひずみ分布の推移(図17)を参考に圧縮側柱内面とすれば、アンカーボルトによる柱脚耐力は式6で求めることができる。

$${}_{ab}M = \sum ({}_{ab}T_n \times J_n) \quad \dots (6)$$

ここで、 ${}_{ab}T_n$ 、 J_n は引張側第 n 列のアンカーボルト張力と圧縮反力

図16 アンカーボルトによる柱脚耐力の耐荷モデル

図 17 ベースプレート下ひずみ分布

表 6 柱脚降伏耐力の実験値と仮定値 (kN・m)

試験体名	$B M_y$ (実験値)	$ab M_y$ (計算値)	耐力差	埋込深さ
25-4M36	369	279	90	112mm
40-8M48U	1,773	1,424	349	162mm
40-8M48D	1,586	1,408	178	130mm
40-12M36	1,353	1,180	173	130mm

中心位置からの距離である (図 16)。

実験において引張側第 1 列目アンカーボルトが全て降伏した時の柱脚部モーメント (柱脚降伏時モーメント $B M_y$) と式 6 で引張側第 1 列目アンカーボルトにアンカーボルト降伏耐力を用いて求めた計算値 (柱脚降伏耐力 $ab M_y$) との比較を表 6 に示す。

アンカーボルトのひずみを元に求めた柱脚降伏耐力は誤差を含むものであるが、すべての試験体において柱脚降伏時モーメントがアンカーボルトによる柱脚降伏耐力に比べかなり大きくなっている。さらに、シアコラムの埋め込み深さが大きいほどその差も大きい。この差が、リブプレートベースプレート下の基礎柱型に埋め込んだことによる効果であると言える。そこで、図 16 に示したアンカーボルトによる耐荷モデルを修正し、リブプレートが基礎柱型に埋め込まれたことによる効果を考慮した柱脚耐荷モデルを提案する (図 19)。以降では、この耐荷モデルの妥当性を論じる。

(2) 柱脚耐力評価式の仮定と妥当性検証

リブプレートを基礎柱型に埋め込んだ柱脚の曲げ耐力 $R M$ をアンカーボルトによる柱脚曲げ耐力 $ab, R M$ とリブプレートが基礎柱型内に埋め込まれたことによる柱脚曲げ耐力 $Rib, R M$ の和で評価することとする。なお、柱脚に生じたせん断力は、本実験の範囲においてはボルト孔クリアランスに充填された高強度無収縮モルタルによって圧縮側アンカーボルトに伝達されるものとする。

①アンカーボルトによる柱脚耐力

図 17 に示したベースプレート下のひずみ分布に基づき、圧縮中心位置を圧縮側柱内面、中立軸位置を柱心と柱面の 3/5 の位置とする。また、各列アンカーボルト

図 19 下面に補強を施したベースプレートを用いた柱脚の耐荷モデル

図 20 リブプレート埋込みによる柱脚耐力

トの引張力は、ベースプレートの平面保持仮定に基づいて中立軸からの距離に比例して生じるものとすれば、アンカーボルトによる柱脚曲げ耐力は式 7 で求めることができる。

$$ab, R M = \sum \left(\frac{d_n}{d_1} \times ab T_1 \times J_n \right) \quad \cdots (7)$$

ここで、 $ab T_1$ は引張側第 1 列アンカーボルト張力、 J_n と d_n は引張

側第 n 列アンカーボルトの圧縮反力中心位置からと中立軸からの距離である (図 19)。

②リブプレート埋込みによる柱脚曲げ耐力 (図 20)

柱脚に生じた曲げモーメントによって、基礎柱型から立上った主筋とフープ筋で補強されたベースプレート周辺の無収縮モルタルに図 20 に示すような水平反力が発生するものと仮定する。ここで、無収縮モルタルに生じた水平反力は、圧縮束によって基礎梁主筋に伝達されるか、ベースプレート周辺を拘束するフープ筋と基礎柱型主筋を介して基礎柱型に伝達されるものと推測されるが、本試験体のように下面に補強を施したベースプレートの下端を基礎梁主筋に近くするために立上りを出来る限り小さくするとともに、ベースプレート周辺に十分な補強鉄筋を配置することが必要である。

埋め込まれたシアコラムとリブプレートの幅はほぼベースプレート幅 B と同じであり、シアコラムとリブプレートの下端位置もほぼ同じであることから、埋め込まれたリブプレートによる柱脚曲げ耐力は簡易的に式 8 で表わされる。

$$Rib, R M = \frac{(sc h + pl t)}{2} \times \sigma_y \times B \times Rib J \quad \cdots (8)$$

ここで、 pl はベースプレート幅、 sc はシアコラム高さ、 h はベースプレート厚み、 σ_y 無収縮モルタル圧縮強度とし、埋め込まれたリブプレートの回転に伴う水平力の釣り合いから中立軸をシアコラム高さベースプレート板厚の和の中間とすれば、応力間距離 $Rib J$ は、 $Rib J = (sc h + pl t) / 2$ となる。

実験におけるアンカーボルト降伏値と無収縮モルタル圧縮強度 σ_y を用いて式 7、式 8 から求めた柱脚降伏曲げ耐力 $R M_y$ を表 7 に示す。

表 7 中、() は本評価式による計算値 $R M_y$ をアンカーボルト降伏時のモーメント $B M_y$ で除した値であるが、概ねよく対応している。また、リブプレート埋込みによる柱脚曲げ耐力は表 6 に示すアンカーボルト降伏時の柱脚部モーメントとアンカーボルトによる柱脚耐力の差と比較しても概ね評価できていると考える。ただし、計算値は無収縮モルタルが圧縮強度に達していることを前提とした柱脚曲げ耐力であり、アンカーボルトが降伏し柱脚の回転角が大きくなれば、ベースプレート周辺の無収縮モルタルがパンチングシア破壊

表 7 耐荷モデルに基づく柱脚降伏曲げ耐力 (kN・m)

試験体名	$ab, R M_y$	$Rib, R M_y$	$R M_y$	$B M_y$
25-4M36	279	97	376 (1.02)	369
40-8M48U	1,410	257	1,667 (0.94)	1,773
40-8M48D	1,429	198	1,628 (1.03)	1,586
40-12M36	1,128	181	1,309 (0.97)	1,353

(a) ベースプレートのひずみ

(b) リブプレートのひずみ

図 21 40-8M48D ベースプレート各部のひずみ

を生じ始め、埋込まれたリブプレートによる柱脚耐力に期待することは過大な評価となるため、注意が必要である。

5.2 下面に補強を施したベースプレートの耐荷機構

5.1 節で提案した柱脚耐荷機構モデルはアンカーボルト耐力を求めるに当たってベースプレートに平面保持が成り立つことを前提としている。従ってアンカーボルト降伏以前にベースプレートが大きく変形しないことが肝要である。そこで本節では、下面に補強を施したベースプレートの耐荷機構を把握し、耐力評価式を提案する。

(1) 変形モデルの仮定

実験の試験体 40-8M48D における、正載荷時に引張側となるベースプレートの角部とフランジ部のひずみを図 21 に示す。また、それぞれのゲージの配置を図 22 に示す。

ベースプレートのひずみは上面において引張ひずみ、下面が圧縮ひずみとなっていることから、ベースプレートにアンカーボルト引張力による曲げが生じていることがわかる。また、正載荷時にアンカーボルト引張側となるリブプレートのひずみは、正載荷時に圧縮ひずみが生じ、負載荷時には引張ひずみを生じている。

補強を上面に施したベースプレートの設計³⁾として、引張側をベースプレートの面外曲げで、圧縮側をリブプレートと柱面とのせん断耐力で検討する方法があるが、図 21 に示す今回柱脚実験を実施したベースプレート各部のひずみから、引張側においてベースプレート面外曲げとリブプレートの圧縮抵抗を累加して評価できるものと考え、図 23 に示すベースプレートの変形モデルを仮定した。

ここで、無収縮モルタルの充填によって拘束されているシアコラムは、柱材およびベースプレートと一体化した回転変

図 23 ベースプレート変形モデルの仮定

図 22 ベースプレートひずみ計測位置

形をすると仮定する。これは実験終了後のベースプレート裏側観察において、シアコラム内に充填された高強度無収縮モルタルに大きな損傷がなかったことに基づく。

これらの仮定した変形モデルに基づき、下面に補強を施したベースプレートの耐荷モデルと耐力評価式を以下に示す。

(2) 耐荷モデル及び耐力評価式

図 23 で仮定したベースプレート変形モデルにおいて、ベースプレートの変形が柱脚変形に大きく影響を及ぼす引張側について、有効断面等を定め耐力評価式を提案する。角屋らの研究⁷⁾を参考に、柱角部、柱フランジ部それぞれに配置されたアンカーボルトに生じた引張力に対して、ベースプレートが全塑性状態になる時の耐荷機構モデルを図 24 のように仮定し、検討を行うこととする。この耐荷機構モデルでは、柱脚に曲げが作用した際にアンカーボルトに生じる引張力 abT に対して、ベースプレートの面外曲げとリブプレートの圧縮及びせん断で抵抗すると考える。そこで、面外曲げに対するベースプレート有効断面が柱材もしくはシアコラムの溶接余盛を考慮した位置にあるとして、下面に補強を施したベースプレートの全塑性耐力時の abT_p 、すなわち bpP_p が、ベースプレートの面外曲げ抵抗耐力 plM_p による偶力とリブプレートのせん断抵抗耐力 $RibQ_y$ の和であるとする式 9 で表される。

$$bpP_p = \frac{plM_p}{abL} + RibQ_y \quad \dots (9)$$

ここで、 abL は有効断面からアンカーボルト張力の作用点までの距離とし、作用点はベースプレートのボルト孔の内面とする。

なお、式 9 中のベースプレートの面外曲げ抵抗耐力 plM_p とリブプレートのせん断抵抗耐力 $RibQ_y$ は、図 24(a) の耐荷モデルに従って、以下の (i) (ii) の要領で導出される。

(a) 耐荷モデル

(b) ベースプレート有効幅 (例：アンカーボルト 12 本タイプ)

図 24 ベースプレート耐荷モデル

(i) リブプレートのせん断抵抗耐力 $_{Rib}Q_y$

全塑性耐力時にはリブプレート下端から圧縮降伏状態に達すると仮定し、リブプレート断面内で下端から圧縮負担領域とせん断負担領域を分けて考えることとする (図 24(a))。リブプレートのシアコラム面における鉛直方向力 (せん断力) と水平方向力 (圧縮力) をそれぞれ $_{Rib}Q_y$, $_{Rib}N_y$, 圧縮負担領域の鉛直方向中心からベースプレート板厚方向中心までの距離を $_{bp}h$ とおくと、これらの間には、幾何学的な関係から、

$$_{Rib}N_y = \frac{_{ab}L}{_{bp}h} \times _{Rib}Q_y \quad \dots (10)$$

が成り立つ。ここで、

$$_{Rib}N_y = _{Rib}A_N \times _{Rib}\sigma_y \quad \dots (10-1) \quad _{Rib}Q_y = _{Rib}A_S \times _{Rib}\tau_y \quad \dots (10-2)$$

$$_{Rib}A = _{Rib}A_N + _{Rib}A_S \quad \dots (10-3)$$

であり、 $_{Rib}\sigma_y$ はリブプレートの降伏点、 $_{Rib}\tau_y$ はリブプレートのせん断降伏応力 ($=_{Rib}\sigma_y/\sqrt{3}$)、 $_{Rib}A$ は耐力モデルに関わるリブプレート全断面積、 $_{Rib}A_N$ はリブプレートの圧縮負担領域の面積、 $_{Rib}A_S$ リブプレートのせん断負担領域の面積である。ここで、 $_{Rib}A$ として算定するリブプレート枚数は、本研究で対象としたディテールにおいて柱角部で 2 枚とし、柱フランジ部では柱フランジ部に配置されたアンカーボルトを挟むように配置されたリブプレートのみとする (つまり、40-8M48U,D で 2 枚、40-12M36 で 3 枚)。

なお、式 10 中の、 $_{bp}h$ は未知数であるが、ベースプレートの全塑性耐力時のアンカーボルト張力 $_{ab}T_p$ によってベースプレートに生じる曲げモーメント $_{Ribbp}M_p$ に関して次式を成り立たせるように定まっている必要がある。

$$_{Ribbp}M_p = _{ab}T_p \times _{ab}L = _{pl}M_p + _{Rib}N_y \times _{bp}h \quad \dots (11)$$

さらに、せん断力に着目すると、式 (10-2)、(10-3) から、圧縮負担面積 $_{Rib}A_N$ は $_{bp}h$ を用いて次式で表される。

$$_{Rib}A_N = \frac{_{ab}L \times _{Rib}A}{_{bp}h \times \sqrt{3}} \left/ \left(1 + \frac{_{ab}L}{_{bp}h \times \sqrt{3}} \right) \right. \quad \dots (12)$$

以上に記した式 (10)、(11)、(12) を満たす $_{bp}h$ を得るには収束計算が必要であるが、得られた $_{bp}h$ から $_{Rib}N_y$, $_{Rib}Q_y$ を算定できる。

(ii) ベースプレートの面外曲げ抵抗耐力 $_{pl}M_p$

上記 (i) で得られた $_{Rib}N_y$ に釣合うように、ベースプレートには引張力が作用する。ベースプレートの曲げ耐力は、この引張力の存在により低減されることにことになる。ベースプレート面外曲げ抵抗耐力 $_{pl}M_p$ は、ベースプレートの有効断面の幅 D を用いて以下の式 13 で得られる。

$$_{pl}M_p = _{pl}\sigma_y \times _tD \times \left(_{pl}t - _N h_y \right) \times \frac{_{pl}h_p}{2} \quad \dots (13)$$

$$_N h_y = _{Rib}N_y / \left(_{pl}\sigma_y \times _tD \right) \quad \dots (13-1)$$

$$_N h_p = _{pl}t - \left(_{pl}t - _N h_y \right) / 2 = \left(_{pl}t + _N h_y \right) / 2 \quad \dots (13-2)$$

ここで、 $_{pl}\sigma_y$ はベースプレート降伏点 (N/mm²) である。なお、ベースプレートの有効断面の幅 D は、柱角部がアンカーボルトをはさんで配置されたリブプレートから 45 度の方向に広がると考えて定めるものとし、柱フランジ部はシアコラム角の曲面頂点を結ぶ水平投影距離として以下の式で表される (図 24(b))。

$$\text{柱角部: } _{kt}D = _{k,Rib}L + 2_{k,ab}L, \quad \dots (13-3)$$

$$\text{柱フランジ部: } _{ft}D = _sD - _sr \times _st \times (2 - \sqrt{2}) \quad \dots (13-4)$$

ここで、 $_{k,Rib}L$ は柱角部のリブプレート間隔、 $_{k,ab}L$ は柱角部直近アンカーボルト孔内面縁からシアコラム角部までの距離、 $_sD$ はシアコラム外径、 $_sr \times _st$ はシアコラム角部曲面半径で、 $_sr$ はシアコラムの材質が BCR295 の場合に 2.5、BCP325 の場合に 3.5、 $_st$ がシアコラム厚である。

(3) 耐力評価式の妥当性検証

実験結果や FEM 解析結果と比較を行い、耐力評価式の妥当性を検証する。

まず、柱脚実験試験体の形状と素材値を代入して求めたベースプレート各部全塑性耐力の計算結果を実験結果と比較する。ここで、試験体の角部では、柱材とベースプレート下面のシアコラムの板厚が異なる場合に鋼管角部の曲げ半径が異なることから、 $_{ab}L$ の算出において、シアコラムの曲げ半径を使用した。また、溶接余盛は、40-8M48D、40-12M36 で実測値 (角部: シアコラム溶接余盛 9mm、柱フランジ部: 柱材溶接余盛 7mm) を用い、他は柱角部でシアコラム板厚の 1/2、柱フランジ部で柱材板厚の 1/3 と仮定した。なお、実験におけるリブプレートには、図 24 に示すようにベースプレートとシアコラムの溶接線との干渉を避けるためのスカラップを施しており、式 10 におけるリブプレート断面積 $_{Rib}A$ を求める際に有効断面位置におけるスカラップ寸法 (表 8) をリブプレート高さから減じている。

このようにして求めた各試験体における計算値を表 8 に示し、各部アンカーボルト引張力とベースプレート変形関係における比較を図 25 に示す。

40-12M36 において、計算値がフランジ部でやや過小評価となっている。しかし、他の試験体では明確なベースプレート変形が見られなかったため、4 章で行った FEM 解析のアンカーボルト弾性としたパラメータ解析の結果と比較を行う。ここで、4 章でも述べた通り、解析モデルはシアコラム角部の曲げ半径は柱材と同一で、溶接余盛もスカラップも考慮していない。

耐力評価式に FEM 解析モデルの形状と素材値を代入して求めたベースプレート各部全塑性耐力の計算結果と表 5 に示す FEM 解析における 1/3 接線剛性時耐力を比較した結果を表 9 に示す。表中、計算値の () は、FEM 解析値に対する比率である。また、先に紹介した図 15 においてこの計算値の比較をしている。

計算値は、各部ともにリブプレートの高さの変化などに概ね良い対比を示しているが、ベースプレートがリブプレート高さに対して

表 8 柱脚実験試験体ベースプレート全塑性耐力 (kN)

試験体名	柱フランジ部	柱角部	スカラップ ^a
25-4M36	—	634	30mm
40-8M48U	1,416	985	40mm
40-8M48D	829	793	25mm
40-12M36	914	553	25mm

表 9 耐力評価計算値と FEM 解析結果 (kN)

モデル	柱フランジ部		柱角部	
	計算値	解析値	計算値	解析値
B22R128	921 (1.03)	893	754 (1.01)	750
B22R103	804 (1.01)	795	637 (1.01)	634
B22R078	690 (1.01)	680	523 (1.04)	501
B28R103	1,056 (1.06)	1,000	787 (1.02)	768
B32R103	1,257 (1.11)	1,132	906 (1.05)	862
B32R078	1,144 (1.14)	1,000	792 (1.11)	715

図 25 アンカーボルト張力とベースプレート変形角関係とベースプレート全塑性耐力計算値

表 10 ベースプレート最大耐力の検討 (kN)

試験体名	柱フランジ部		柱角部		最終状況
	最大耐力 (計算値)	A.Bt 最大張力	最大耐力 (計算値)	A.Bt 最大張力	
	$F_{pl}P_u$	$F_{ab}T_u$	$K_{pl}P_u$	$K_{ab}T_u$	
25-4M36	—	—	808 (1.24)	650	基礎圧壊
40-8M48U	1,853 (1.59)	1,168	1,221 (1.14)	1,072	定着破壊
40-8M48D	1,031 (0.94)	1,101	969 (0.98)	994	BPI 破断
40-12M36	1,111 (0.78)	1,422	652 (0.95)	686	BPI 破断

相対的に厚くなったときに解析値に対してやや過大評価となっている。これは、本評価式がベースプレート厚とリブプレート高さのバランスに関する適用範囲を有する可能性があり、今後もさらに検討を進める予定である。

5.3 ベースプレートの破断について

40-8M48D, 40-12M36 は、柱材角部を端に発したベースプレート破断を生じた。そこで、5.2 節のベースプレート全塑性耐力の検討を参考に、最大耐力の検討を行う。ベースプレートの破断は、ベースプレートの全塑性状態からさらに荷重が上昇し、ベースプレートが引張強度に達することとして破壊モデルを仮定した。このモデルは図 24 に示した全塑性モデルの $_{pl}\sigma_y, _{pl}N_y, _{pl}Q_y$ を $_{pl}\sigma_u, _{pl}N_u, _{pl}Q_u$ に置き換えたことによって $_{pl}h_u, _{pl}h_u$ が変化する以外、有効断面の位置や幅も全塑性モデルと同一とする。

破壊モデルに基づくベースプレート最大耐力 $_{bp}P_u$ は、全塑性耐力と同様にベースプレートの面外曲げ終局耐力 $_{pl}M_u$ の偶力とリブプレートのせん断抵抗耐力 $_{rib}Q_y$ の和で表すことができものとし、先の式 9-式 13 において $_{pl}\sigma_y, _{pl}N_y, _{pl}Q_y$ を $_{pl}\sigma_u, _{pl}N_u, _{pl}Q_u$ に置き換えて得られる。

仮定したモデルを用いて、柱脚実験試験体におけるベースプレート最大耐力計算値を実験におけるアンカーボルトの最大引張力と比較した結果を、表 10 と図 25 のアンカーボルト張力-ベースプレート変形角関係に示す。ここで、表中の () はベースプレート最大耐力値をアンカーボルト最大引張力で除した値である。なお、ベースプレート引張強さには素材試験結果を用いた。

これらの結果からベースプレート破断を生じた試験体で、アンカーボルト最大引張力がベースプレートの最大耐力を上回っており、ベースプレートの最大耐力を評価できていると考える。ただし、40-12M36 の柱フランジ部が 0.78 と過小評価となっていることから柱フランジ部にアンカーボルトが複数本配置される場合の評価に課題が残る。

6. まとめ

露出型柱脚のベースプレート下面側への補強方法について実大柱脚実験を行い、効果的な補強方法の提案とそのメカニズムを検証した。本研究において明らかになったことを以下に示す。

- 1) 本提案のベースプレート補強方法は、内部に無収縮モルタルを充填したシアコラムとベースプレートにそれぞれ垂直に取り付けられたリブプレートが、ベースプレートの面外変形を抑える役割を果たすとともに、圧縮およびせん断で抵抗することによりベースプレートの曲げ耐力向上に有効であることがわかった。
- 2) 本提案の下面側へのリブプレートによる補強を施したベースプレートを用いた柱脚の曲げ耐力について、アンカーボルトによる抵抗とベースプレート下面側に施したリブプレートなどを基礎柱型に埋め込んだことによる抵抗によって評価できることを実験により確認した。
- 3) 本提案の補強方法による補強を下面に施した場合のベースプレートの耐荷機構を仮定し、実験および FEM 解析によってその妥当性検証を行い、概ね評価できた。
- 4) リブプレート高さはベースプレートの曲げ耐力剛性に影響し、柱角部において耐力に与える影響が大きい。また、柱フランジ部においてはベースプレート厚みが曲げ耐力に与える影響が大きい。
- 5) 露出型柱脚において、アンカーボルトの降伏に先行してベースプレートが大きく変形しないことが重要であるが、下面に補強を施したベースプレートを実用化するに当たって、提案したベースプレート耐力評価式が有効であることを確認した。

参考文献

- 1) 小川壽, 足立拓郎: L 型平板の応力集中について (第 4 報 リブ補強による変形抑制効果), 宇部工業高等専門学校研究報告, 第 20 号, 1975.3
- 2) 五十嵐定義, 脇山公三, 井上一郎, 松本竹二, 村瀬良秀: 高力ボルト鋼管フランジ継手の極限設計法に関する研究 その 2 リブ・リング付き継手, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 358 号, pp.71-82, 1985.12
- 3) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 日本建築学会, 2006.3
- 4) 秋山宏, 黒沢裕, 和国信之, 西村功: 鋼構造露出柱脚のせん断耐力-アンカーボルト, シアプレートのせん断抵抗, 日本建築学会論文報告集, 第 338 号, pp.71-76, 1984.4
- 5) 九谷和秀, 増田貴志: 鉄骨柱脚部の力学性状に関する実験的研究 アンカーボルトの埋込み深さ (その 1), 日本建築学会研究報告 九州支部 1, 構造系 (34), pp.401-404, 1994.3
- 6) 独立行政法人 建築研究所, 社団法人 日本鉄鋼連盟: 鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究 委員会報告書, 2002.4
- 7) 角屋治克, 渡辺亨, 鈴木正裕, 萩野毅, 染谷友英: 露出型柱脚の力学的性状に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 6 巻, pp.261-268, 1998.11

(2012年4月6日原稿受理, 2012年9月6日採用決定)