

露出柱脚の変形性能に関する研究

玉井宏章*・一ノ瀬直人**

On Deformation Capacity of Exposed Column-Base.

by

Hiroyuki TAMAI*, Naoto ICHINOSE**

Deformation capacity of exposed column-base depends on elongation properties of the anchor bolts. The anchor bolt consist of shank and thread. Shank of the bolt does yield when area ratio of thread to shank is lower than yield ratio. The thread of the bolt yields and short thread may break early under a severe earthquake. Then AIJ provision recommended that area ratio of thread to shank is larger than yield ratio and the shank yields before the thread reaches to its maximum tensile strength. However, it is possible to serve enough deformation capacity of the exposed column-base when thread length ratio set a proper value to a severe earthquake response. Heuce, we performed cyclic loading tests on exposed column-base to show the possibility. we investigated the mechanical properties of the column-base by comparing the simple evaluation formula and F.E.M. analysis results. The results showed the F.E.M. analysis has good accuracy with experimental results and the required deformation capacity of the column-base could satisfied by adjusiting the thread length property

Key-words : *exposed column-base, anchor bolt, thread length raio, F.E.M.*

1. はじめに

柱脚は、上部建築物と下部建築物をつなぐ重要な構造要素である。これまでの著者等は、露出柱脚において、軸力の変動による柱脚の固定度の変化や引張軸力が作用する場合の柱脚の抵抗性状、2軸曲げを受けるアンカーボルト先行降伏型露出柱脚、ノンスリップ型露出柱脚の抵抗性状やアンカーボルトの初期張力によって回転剛性が增大することを示した。次に、露出柱脚の変形能力を定量的に評価することを考える。塑性設計指針では最下層の脚部では鋼柱部材に先行して柱脚部を塑性化させる設計となっている。ここでの塑性ヒンジを有効にするためには柱脚の変形性能を保証する必要がある。そのため、接合部設計指針ではアンカーボルトの伸び能力を確保するため、軸部が降伏する前にねじ部が破断することは避け、 $(降伏強さ)/(引張強さ) < (ねじ部有効断面積)/(軸部断面積)$ を満足することが示されている。

しかしながら、アンカーボルトの限界変形はこの条件を満足しなくてもねじ部の長さを十分長くすることにより得られると考えられ、露出柱脚の変形性能を一般に必要とされる回転角以上を確保できると考えられる。

この着想を実証するために本実験では、露出柱脚の繰

返し載荷試験を行い、その抵抗性状と最大曲げモーメント耐力-限界変形角関係を示す。次に露出柱脚の限界変形角を求める簡易評価式を示し、この実験値、簡易評価式及び有限要素法解析結果を比較することによりアンカーボルトのねじ部長さを調節することで所要の変形性能を満足し得ることを示す。

2. 実験概要

○試験体

試験体の形状を図1、表1に示す。柱(□-200×200×12, BCR295)にベースプレート(PL-400×400×30, SN400)を溶接し、アンカーボルト間隔 300mm, φ24の孔を四隅に設けたものに、切削ねじアンカーボルト(SNR400, M20)4本で緊結する。アンカーボルトのナット間内法寸法(280mm)に対するねじ部長さ比を0.05(14mm), 0.20(56mm)及び0.50(140mm)と変化させた場合について、ねじ部長さ比が0.05の場合では、シングルナットとダブルナットの2ケースSN-M20L005, DN-M20L005, 0.20と0.50の場合ではダブルナットとしたケースDN-M20L020, DN-M20L050計4ケースを用意した。尚、いずれの試験

平成27年6月10日受理

*システム工学部門 (Division of System Science)

**工学科研究科 (Graduate School of Engineering)

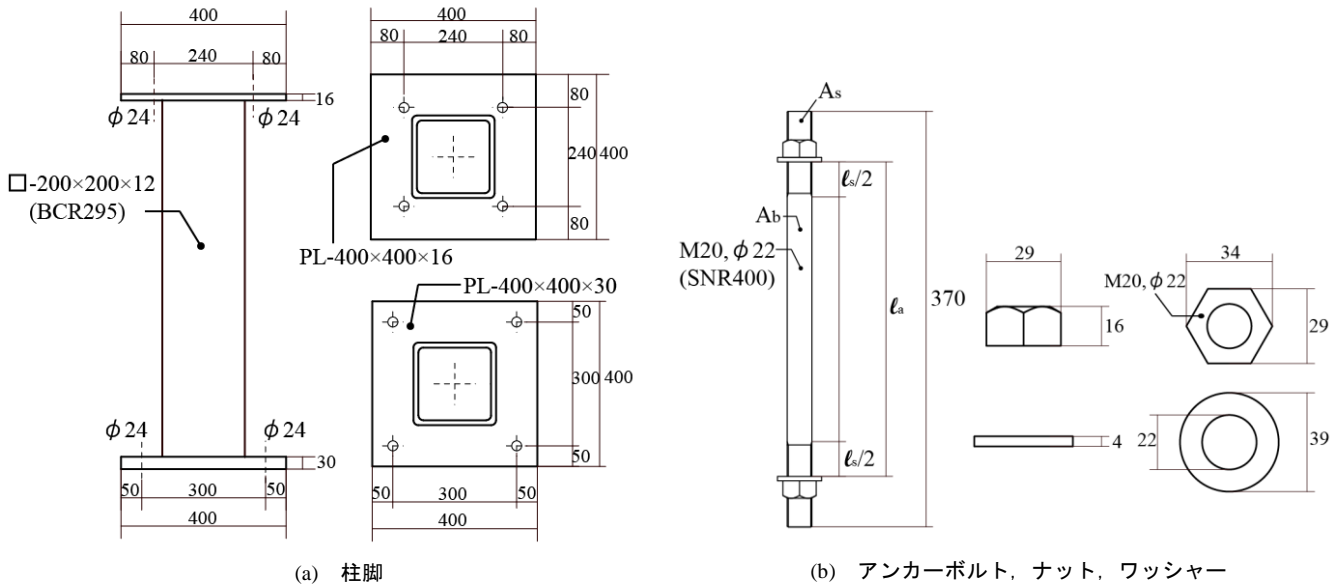


図1 試験体の形状

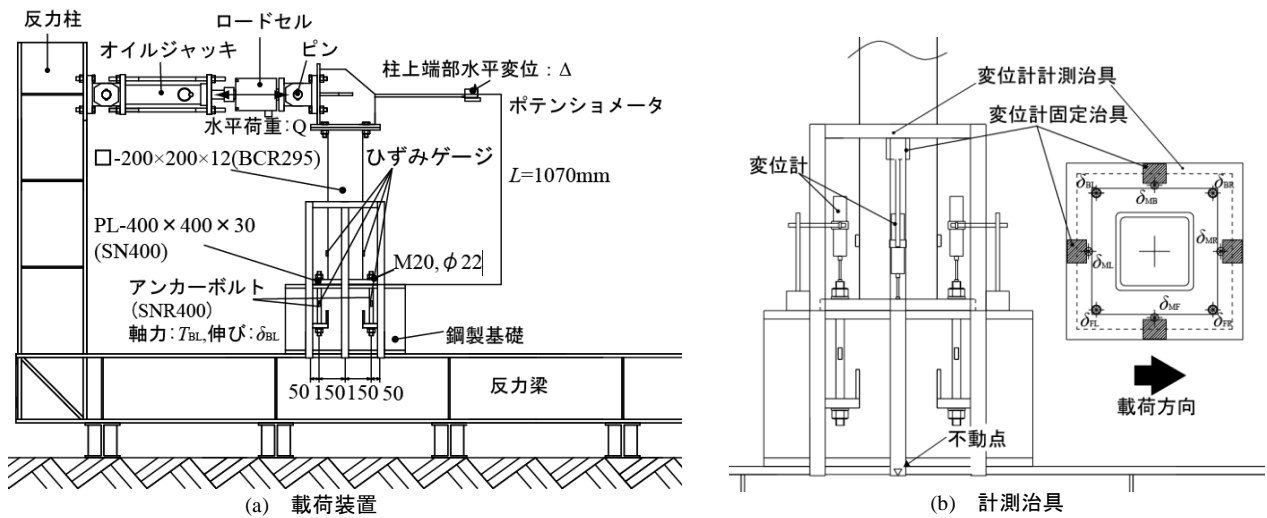


図2 荷装置と計憶方法の概要

表1 試験体

試験体名 (SNR400)	ねじ部	軸部 断面積 $A_s (mm^2)$	ねじ部 断面積 $A_n (mm^2)$	全長 $\ell_s (mm)$	軸部長さ $\ell_s (mm)$	ねじ部長さ $\ell_n (mm)$
SN-M20L005	M20	380.0	239.5	280.0	266.0	14.0
DN-M20L005	M20	380.0	239.5	280.0	266.0	14.0
DN-M20L020	M20	380.0	239.5	280.0	224.0	56.0
DN-M20L050	M20	380.0	239.5	280.0	140.0	140.0

表2 素材試験結果

	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	ϵ_{su} %	ϵ_i %	ϵ_{su} %
BCR295	365	454	-	22.0	41.3
SNR400	293	435	2.91	22	31.5

σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強さ, ϵ_{su} : 加工硬化開始ひずみ
 ϵ_i : 一様伸び, ϵ_{su} : 破断伸び

体もアンカーボルトの(降伏強さ/引張強さ)は0.68, (ねじ部断面積/軸部断面積)は0.63であり, 軸部の塑性化は生じない設定となっている。

表2に柱脚(BCR295)及びアンカーボルト(SNR400)の素材試験結果を示す。

○荷方法

図2(a)に荷装置を示す。試験体の柱頂部にヨークを取り付け, ピン, ロードセルを介して反力フレームに取り付けたオイルジャッキ(350kN)から正負交番繰返し荷を行う。荷は柱上端部ピン位置の水平変位 Δ にベースプレート下面からの距離 L で除した変形角 $R (= \Delta/L)$ を制御する変位制御で行う。

○試験体シリーズ

試験体シリーズは以下のものを用意した。

SN-M20L005 試験体について, アンカーボルトの導入張力を軸部降伏軸力の0.55, 0.15, 0.0倍, 40kN, 20kN, 0kNとし, 弾性範囲で1サイクル正負交番繰返し荷を行う実験3ケース(実験I)と, SN-M20L005, DN-M20L005, DN-M20L020及びDN-M20L050各試験体について, 設計水平力(短期許容耐力)時で2回程程度加力した後, 0.01(rad)から0.01(rad)刻みで柱脚が最大曲げモーメントに達し, 耐力が低下するまで, 各サイクルで2サイクル繰返し漸増振幅繰返し荷を行う実験4ケース(実験II)を行う。

○計測方法

計測方法の概要を図2(b)に示す。

荷重はジャッキ先端のロードセルから水平力 Q を、歪は歪ゲージを各アンカーボルトの軸部に2ヶ所、柱下端部から150mm位置の四面に4ヶ所貼付し、各歪ゲージの値からアンカーボルト軸力 (T_{BL} , T_{BR} , T_{FL} , T_{FR}) 及びベースプレート位置抵抗曲げモーメント M を求めた。変位は、金属製の計測治具を用いて4本のアンカーボルト伸び δ_{BL} , δ_{BR} , δ_{FL} , δ_{FR} 及びベースプレートの中央線上の浮き上がり δ_{BM} , δ_{FM} , δ_{LM} , δ_{RM} を計測した。

3. 有限要素解析の概要

図3に柱脚の解析モデルを示す。解析対象の対称性を考慮して1/2領域について解析を行った。角形鋼管の柱上部は、自由度を縮減するため弾性梁要素を用いて表し、立体要素とはリジットリンクを用いて接続した。それ以外の部材は双1次変位関数と完全積分を用いた四面体要素を採用した。素材試験から求めた応力-歪関係から真応力-真歪関係を用い、ナット-ベースプレート間、鋼製基礎-ベースプレート間が接触離間する複合非線形立体問題として取り扱う。

○初期引張力の導入方法

ボルトの締付は、ボルトに接触しているワッシャーに初期圧縮力を与えて導入する。ワッシャーの有限要素分割を2つの領域に分け、仮想切断面上の節点自由度に対して初期圧縮力を与えた後に対応する節点間の相対変形を拘束する操作を行う。 f_t , u_t 及び f_b , u_b を仮想切断面上下の節点力、節点変位とし、 u^* を共通パラメータ、 f^* を対応する節点力とすると次式が成り立つ。

$$u_t = u^*, \quad u_b = u^* \quad (1.a,b)$$

エネルギー保存則より

$$f^* \cdot u^* = f_t \cdot u_t + f_b \cdot u_b \quad (2)$$

(1.a,b)式を(2)式に代入すると、

$$f^* \cdot u^* = f_t \cdot u^* + f_b \cdot u^*$$

任意の u^* について上式が成立するので、

$$f^* = f_t + f_b \quad (3)$$

が得られる。

(3)式は変位拘束した時に得られる条件式となる。また、初期圧縮力 f_{pre} は f_b に等しくなるので次式の関係が成立する。

$$f_b = f_{pre}$$

整理すると、

$$f^* = f_t + f_b, \quad f_{pre} = f_b \quad (4.a,b)$$

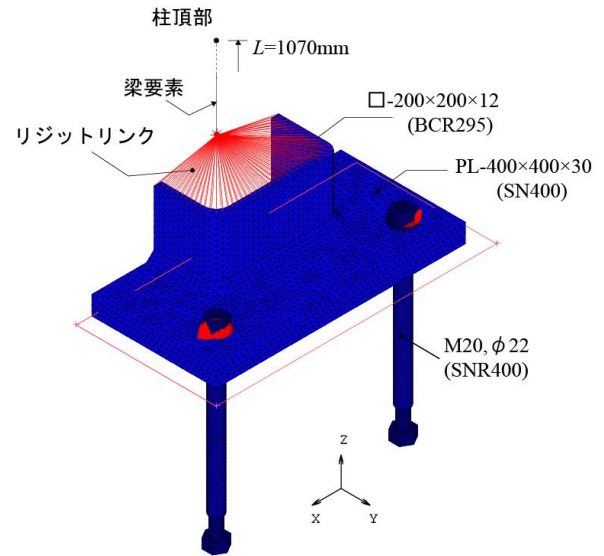


図3 柱脚の解析モデル

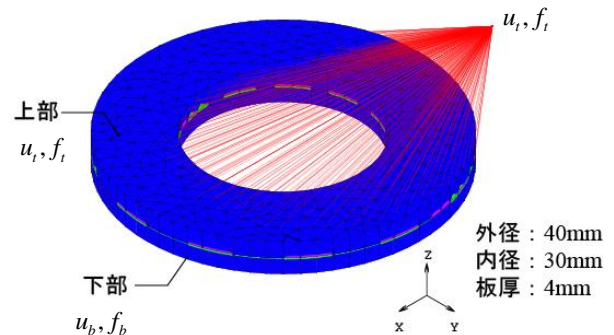


図4 ワッシャーのモデル化

初期圧縮力に対する変形を u_{pre} とすると、再びエネルギーの保存則より

$$\begin{aligned} f_t \cdot u_t + f_b \cdot u_b &= f^* \cdot u^* + f_{pre} \cdot u_{pre} \\ &= (f_t + f_b) \cdot u^* + f_b \cdot u_{pre} \\ &= f_t \cdot u^* + f_b \cdot (u^* + u_{pre}) \end{aligned} \quad (5)$$

任意の f_t , f_b に対して上式は成立するので、次式が得られる。

$$u_t = u^*, \quad u_b = u^* + u_{pre} \quad (6.a,b)$$

よって(6.a,b)式から u_{pre} は、

$$u_{pre} = u_b - u_t \quad (7)$$

となり u_{pre} 相対変位となっていることがわかる。

さて、 $u_{pre} = 0$ を条件として与えれば対応する u_t は u_b と等しくなり、 $f_{pre} = f_b = -f_t$ となる。一方、 $f_{pre} = C$ と条件として与えれば $f_b = C$ となり $u_{pre} = u_b - u_t$ となり、 u_{pre} だけ相対変位が生じ初期圧縮力が導入される。

以上の関係をマトリックス表示すると、

$$\begin{bmatrix} u & u_{pre} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f^* \\ f_{pre} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} u & u_{pre} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_t \\ f_b \end{Bmatrix}$$

から

$$\begin{Bmatrix} f^* \\ f_{pre} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_t \\ f_b \end{Bmatrix}$$

逆関係を求めると、

$$\begin{Bmatrix} f_t \\ f_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f^* \\ f_{pre} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

また、

$$\begin{bmatrix} f_t & f_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_t \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_t & f_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^* \\ u_{pre} \end{Bmatrix}$$

から

$$\begin{Bmatrix} u_t \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^* \\ u_{pre} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

全体剛性方程式において、荷重ベクトル、変位ベクトル $\{f_t \ f_b\}^T$ 、 $\{u_t \ u_b\}^T$ を(8)、(9)式を用いて $\{f^* \ f_{pre}\}^T$ 、 $\{u^* \ u_{pre}\}^T$ に変換すれば、 $u_{pre}=0$ とすれば相対変位は固定され、一方、 $f_{pre}=C$ とすれば初期圧縮力を導入することができる。

○接触・離間の取扱い

鋼製基礎は剛体面で表し、アンカーボルトはナットとボルトとを1体として要素分割した。ねじ部は簡易評価法で用いた断面積を有する一様円形断面でナット端に、ねじ長さの半分ずつ上下に設定した。アンカーボルト下端部の境界条件は固定とした。ベースプレート、ワッシャー、ナット付アンカーボルト及び鋼製基礎とは互いに接触・離間するものとし、せん断方向の摩擦係数は0.25と仮定した。解析対象は実験Ⅱとし、荷重はアンカーボルト初期引張力40kNを導入した後、柱頂部の水平変位を、変形角で0.06(rad)になるまで単調に荷重した。

4. 柱脚限界変形角評価法

柱脚の限界状態として、最大の抵抗曲げモーメント M_{max} となる時点と想定し、その時の変形角 R_E で変形性能を示すこととする。アンカーボルトは脆性的な破断は生じないとすると、アンカーボルトの全長、ねじ部長さ比、軸部・ねじ部の断面積及び応力-ひずみ関係が求められると文献1の手法によりアンカーボルト単体の最大軸力 T_{max} と限界伸び δ_E が求まる。これらを用いて、幾何学的な関係と力の釣合いより、 M_{max} と R_E は次式で求まる。

$$M_{max} = n \cdot (d_t + d_c) \cdot T_{max} \quad (10,a)$$

$$R_E = \left(\theta_E \cdot L + \frac{Q_{max} \cdot L^3}{3EI_c} \right) / L \quad (10,b)$$

ここに、

$$\theta_E = \delta_E / (d_t + d_c) \quad (11,a)$$

$$Q_{max} = M_{max} / L \quad (11,b)$$

n : 引張側のアンカーボルト本数, EI_c : 柱の曲げ剛性

θ_E : ベースプレート限界回転角, d_t : 柱図心から引張側アンカーボルトまでの距離(=150mm), d_c : 柱図心から圧縮合力位置までの距離(限界時は $d_c=200$ mm)

また、限界時以外の $M-R$ 関係の簡易評価を行う際には、アンカーボルトの伸び δ (mm) と変形角 R との関係は実験値を用いて多項式近似した次式を用いる。(図7(c), 8(c) 参照)

$$\delta(R) = 1488 \times R^2 + 218.1 \times R - 0.7247 \quad (12)$$

5. 実験・評価法・解析結果

実験・評価値・解析の結果を図5~10、写真1及び表3に示す。

図5には、実験Ⅰにおいて、アンカーボルトに導入する初期張力を0kN、20kN、40kNと変化させた時の柱脚の抵抗曲げモーメント M と変形角 R との関係を示す。図6、7、図8、図9及び図10には、それぞれ、実験ⅡのSN-M20L005、DN-M20L005、DN-M20L020及びDN-M20L050各試験体について、(a)柱脚の抵抗曲げモーメント M と変形角 R の関係、(b)右側奥のボルトの伸び δ_{BL} と変形角 R の関係、(c)ねじ部断面積で除した右側奥のボルト軸力 T_{BL}/A_s と δ_{BL} をねじ部長さで除した値 δ_{BL}/l_s との関係について実験値を実線、F.E.M.解析値を破線、評価値を一点鎖線で示し、(a)図と(b)図には、最大抵抗曲げモーメント時を実験値○、F.E.M.値△、評価値□で示す。尚、図6(b)(c)に示すアンカーボルトの伸びは、ねじ部のむしれによる変位計のデータ欠損がある。

* $\delta_{BL}-R$ 関係の Eval は全ての DN, SN について

$$\delta(\Delta) = 0.013 \times \Delta^2 + 0.2039 \times \Delta - 0.7247 \quad \text{とする。}$$

* SN-M20L005 の F.E.M. は DN-M20L005 と同じとする。

図10にはねじ部長さ比 l_s/l_a が0.05、0.20及び0.50の限界値を(○, △, □), (●, ▲, ■), 破線の(○, △, □)で(実験値, 評価値, 解析値)の順に表記しており、ねじ部長さ比 l_s/l_a が0.05、0.10、0.20、0.50で、ねじ部断面積比 A_s/A_b が0.5、0.63、0.687、0.70、0.80、0.90、0.95の時の評価値を網図で示している。

表3には各試験体の最大水平力 Q_{max} 、最大曲げモーメント M_{max} 、アンカーボルト最大張力 T_{max} 、限界水平変位

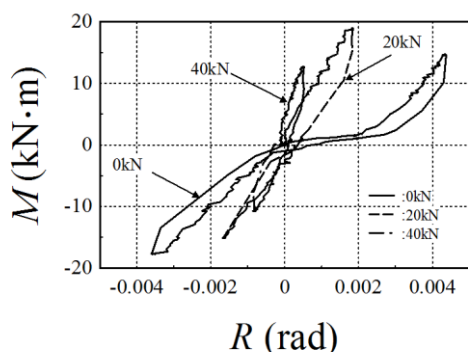
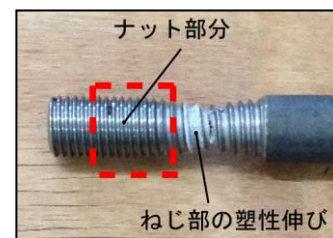


図5 M-R 関係(実験 I)

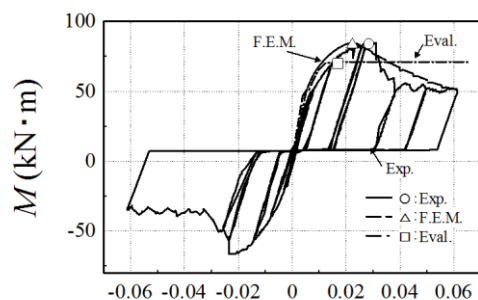


(a) SN-M20L005



(b) DN-M20L005

写真1 実験後のねじ部の塑性状況(実験 II)



(a) M-R 関係

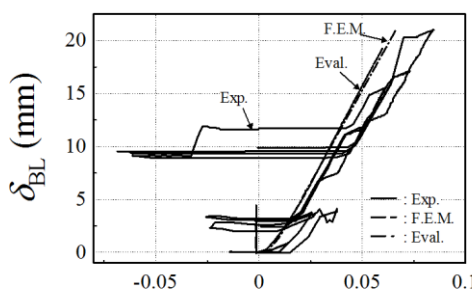
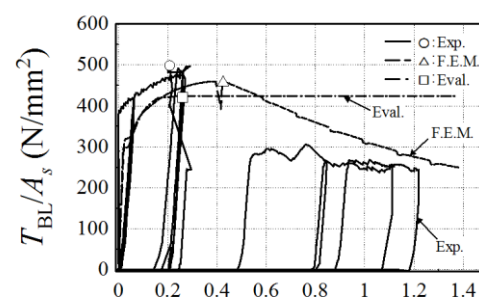
(b) δ_{BL} -R 関係(c) T_{BL}/A_s - δ_{BL}/ℓ_s 関係

図6 SN-M20L005 試験体の結果(実験 II)

Δ_E , 限界伸び δ_E , 限界変形角 R_E と必要量 0.03(rad)との大小関係を実験値, 評価値, 有限要素解析値とともに示す。これらの結果から, 以下に各項目毎に分けて考察を行う。

○初期張力の回転剛性に及ぼす影響

図 5 より, アンカーボルト初期張力が大きくなる程, 回転剛性は高くなり, 軸部降伏軸力の 50%程度(40kN)の張力を導入すれば, M-R 関係にはスリップは生じず高い回転剛性を確保できることがわかる。以降では, アンカーボルトの初期導入張力は 40kN にすることにした。

○柱脚の抵抗性状

図 6(a), 図 7(a)及び写真 1 よりシングルナットの SN-M20L005 はダブルナット DN-M20L005 に比べ, M-R 関係は早期に耐力低下が生じている。これは写真 1 にあるように, 引張試験時と異なり柱脚では, アンカーボルト頭部にてこ作用が生じるため, ねじ山がつぶれてスリップしてしまう。これを防止するには, ダブルナットで緊結する必要がある。図 7(a)(b), 図 8(a)(b)及び図 9(a)(b)表 3 よりねじ部長さ比を 0.05 から大きくすることで, 限界変形角 R_E は, 0.039(rad)から 0.055(rad), 0.076(rad)と大きく増大し, 必要とした量 0.03(rad)より十分大きく設計できることがわかる。

○解析の精度

図 7, 図 8, 図 9, 図 10 及び表 3 の実験値と F.E.M.解析値より, ダブルナットの試験体の場合 F.E.M.解析値は実験値と比べ, 初期の抵抗曲げモーメントは大きく, 大変形角時の抵抗曲げモーメントの劣化は早期に生じる。特にねじ部長さ比の小さい DN-M20L005 試験体では, その傾向が強い。これは, F.E.M.はベースプレートの曲げ変形を硬めに評価しているため, アンカーボルトの伸びは大きくなること, また実験ではナット内のねじ部も塑性化が生じており実験のねじ部長さ比は大きめとなるため, F.E.M.では早期にねじ部にネッキングが生じ, 初期では耐力は高め, 大変形角時に早期に抵抗曲げモーメントが低下すると考えられる。DN-M20L020 では, M-R 関係, T_{BL}/A_s - δ_{BL}/ℓ_s 関係は, F.E.M.解析値と実験値でよく一致している。

○限界変形角評価

図 10 と表 3 から評価値と解析値の限界変形角について, ほぼ等しく実験値を安全側に評価しており, 今回提案した限界変形角評価法はねじ部長さ比 0.2 以上の場合において安全側に予測し得る。また必要変形角 0.03rad を満たすには, ねじ部長さ比 0.2 程度に調節すると良いことがわかる。

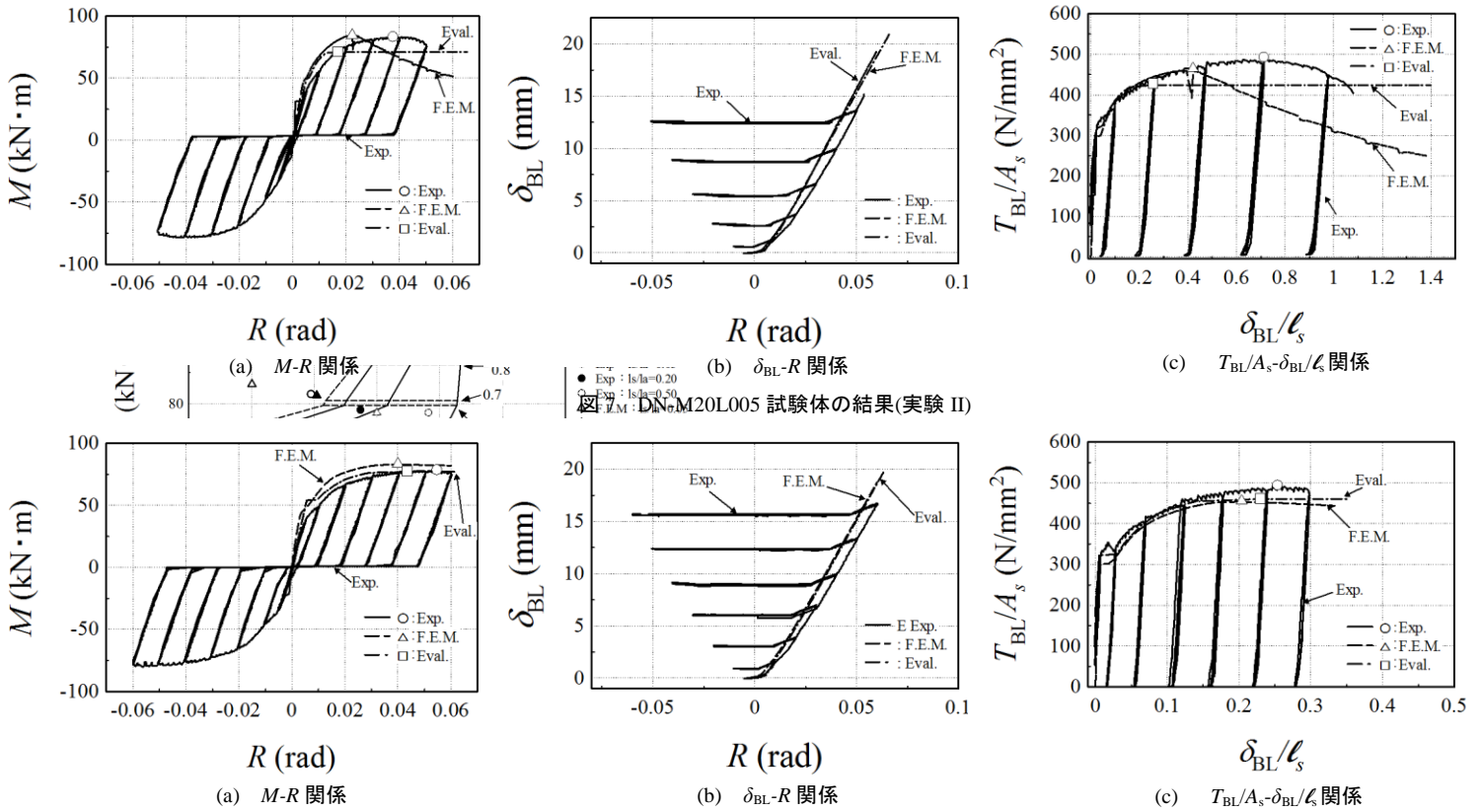


図8 DN-M20L020 試験体の結果(実験 II)

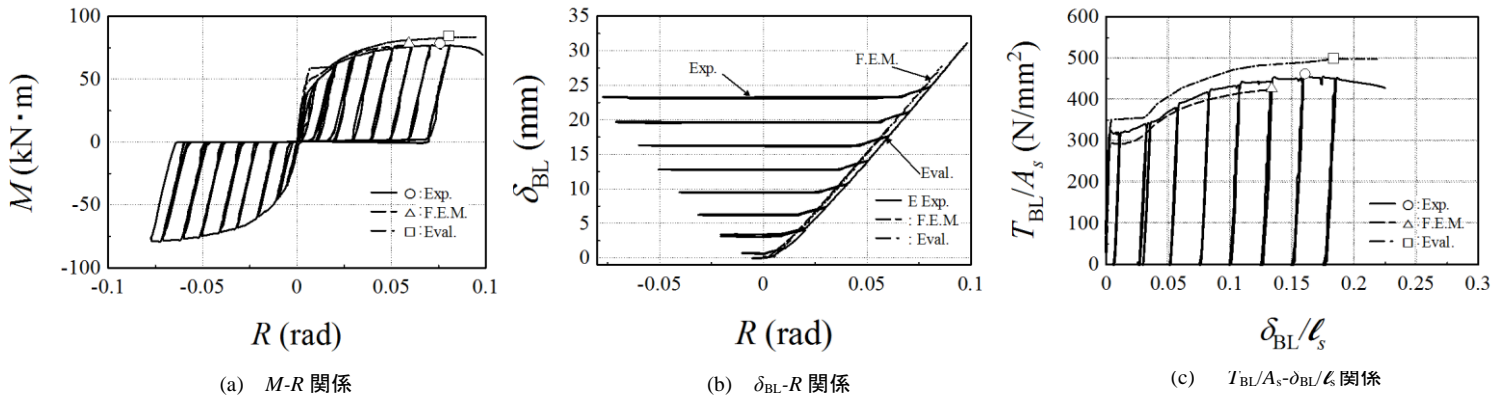


図9 DN-M50L020 試験体の結果(実験 II)

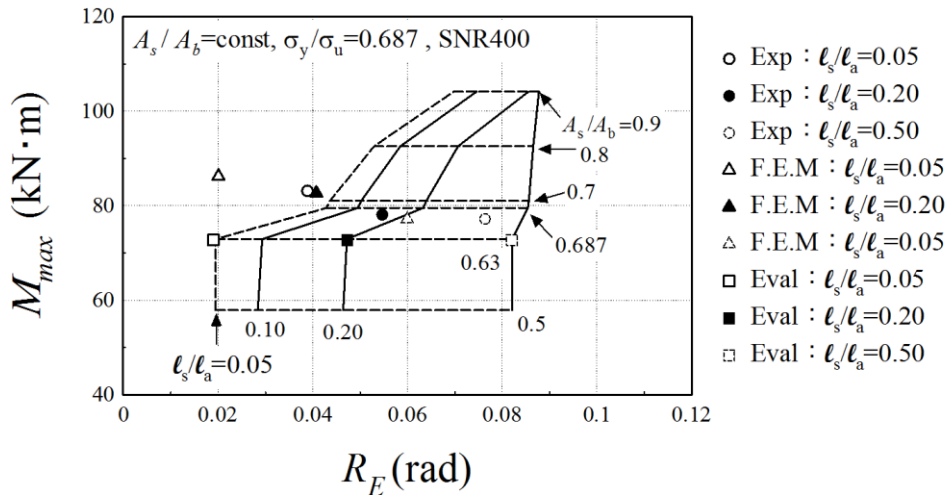


図10 柱脚の最大曲げモーメント-限界変形角関係

表 3 実験 II・評価法・解析結果

	Q_{\max} (kN)	M_{\max} (kN·m)	T_{\max} (kN)	Δ_E (mm)	δ_E (mm)	R_E (rad)	Capacity of Remark
SN-M20L005	79.6	85.2	120	30.0	3.77	0.028	-
	68.1(0.86)	72.9(0.86)	104(0.87)	20.3(0.68)	3.64(0.97)	0.019(0.68)	
	80.7(1.01)	86.3(1.01)	111(0.93)	21.4(0.71)	7.49(1.99)	0.020(0.71)	
DN-M20L005	77.9	83.3	113	41.7	9.31	0.039	<0.03
	68.1(0.87)	72.9(0.88)	104(0.92)	20.3(0.49)	3.64(0.39)	0.019(0.48)	
	80.7(1.04)	86.3(1.04)	111(0.98)	21.4(0.51)	7.49(0.80)	0.020(0.51)	
DN-M20L020	73.2	78.3	109	58.6	14.5	0.055	<0.03
	68.1(0.93)	72.9(0.93)	104(0.95)	50.3(0.86)	12.9(0.89)	0.047(0.85)	
	77.4(1.06)	82.8(1.06)	109(1.0)	43.9(0.75)	10.5(0.72)	0.041(0.75)	
DN-M20L050	72.3	77.4	109	81.7	31.1	0.076	<0.03
	68.1(0.94)	72.9(0.94)	104(0.95)	87.7(1.08)	26.3(0.84)	0.082(1.08)	
	77.9(1.07)	83.4(1.07)	119(1.09)	85.6(1.05)	30.5(0.98)	0.08(1.05)	

1st row : Experimental

2nd row : Evaluation

3rd row : F.E.M. Analysis

Value in parenthesis is ratio to experimental result

6. まとめ

本研究では、露出柱脚の載荷試験を行い、柱脚の抵抗性状を明らかにし、また提案する解析手法を用いて解析を行い、実験値と解析値を比較し、解析値の精度を検証した。さらに実験値と解析値、限界変形角評価法により、アンカーボルトのねじ部長さを調節した際の保有限界変形角を示した。数少ない実験からの結果ではあるが、得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) ねじ部長さを大きくすることにより、限界変形角を必要変形角の 0.03(rad)以上を確保できる。
- 2) 今回提案した解析手法はねじ部長さを十分とることで、実験値との誤差は少なく、F.E.M.解析結果と良く一致する。
- 3) アンカーボルトの伸び性能評価式を用いた限界変形角評価法は、ねじ部長さ比 0.2 以上の場合において安全側に予測し得る。

- 4) (降伏強さ/引張強さ)が(ねじ部断面積/軸部断面積)を上回らず、軸部が塑性化しない場合においても、ねじ部長さ比を 0.2 程度に調節することにより、必要変形角 0.03(rad)を上回る保有限界変形角を有する柱脚を設計できる。

参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 力久陽介: 露出柱脚の変形性能について -その 1 アンカーボルトの伸び性能について-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.893-894, 2013.8.
- 2) 玉井宏章, 力久陽介, 高松隆夫: アンカーボルトの伸び性能について, 鋼構造年次論文報告集, 第 21 章, pp.645-651, 2013.11.