

(論文)

TS700 アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能

平野 公大*¹・高田 武之*²(博士(工学))・西村 有司*¹・田中 剛*³(博士(工学))

Structural Performance of Exposed Column Bases Using TS700 Anchor Bolts

Kimihiro HIRANO・Dr. Takeshi TAKADA・Yuji NISHIMURA・Dr. Tsuyoshi TANAKA

要旨

当社は基準強度490 N/mm²であるTS700アンカーボルトの国土交通大臣の認定を取得しており、大型鋼構造物の露出柱脚などへの採用実績を有している。

鋼構造建築物の露出柱脚は、一般的に「鋼構造接合部設計指針(日本建築学会)」に基づき設計される。露出柱脚に用いるアンカーボルトの指針における適用範囲は基準強度325 N/mm²までであり、TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚への現行指針の適用には個別の検討が必要である。

そこで、TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚の耐力および剛性の評価式を確立することを目的とした載荷実験を行い、実験結果が既往の評価式とおおむね良い対応を示すことを確認した。

Abstract

Kobe Steel has obtained certification from the Minister of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism for its TS700 anchor bolts, which have a standard strength of 490 N/mm², and has a proven track record of using these bolts in exposed column bases in large steel structures. Exposed column bases in steel structures are generally designed on the basis of the Architectural Institute of Japan's "Recommendation for Design of Connections in Steel Structures". However, the scope of application of the guidelines for anchor bolts used in exposed column bases is limited to a standard strength of 325 N/mm². Therefore, the application of these guidelines to exposed column bases using TS700 anchor bolts requires individual consideration. To that end, load tests have been conducted to establish evaluation formulas for the strength and rigidity of exposed column bases using TS700 anchor bolts. The results of these tests have confirmed a generally favorable response to previous evaluation formulas.

検索用キーワード

アンカーボルト, 高強度, 露出柱脚, 曲げ実験, かき出し定着破壊, 接合部パネル

まえがき = 地震国である日本において、耐震設計された鋼構造建築物や鋼製機械設備架構の骨組は、柱端部に溶接されたベースプレートおよびアンカーボルトにより鉄筋コンクリート造の基礎と接合される。当該接合部は柱脚と呼ばれ、ベースプレートおよびアンカーボルトが露出した露出柱脚、柱下端部分を鉄筋コンクリートで囲んだ根巻き柱脚、柱下端部分を完全に鉄筋コンクリート基礎に埋め込んだ埋込み柱脚がある(図1)。

この中で露出柱脚は、地震時において柱からの曲げモーメントなどに対しアンカーボルトを積極的に降伏させることで地震エネルギーを吸収させる方法が最も多く用いられている。このため、アンカーボルトには高い変形性能が求められ、設計においては露出柱脚の耐力や剛性について慎重な検討が行われている。

近年、建築物や設備架構の大型化に伴い鉄骨骨組に加えアンカーボルトについても高強度化のニーズが高まっ

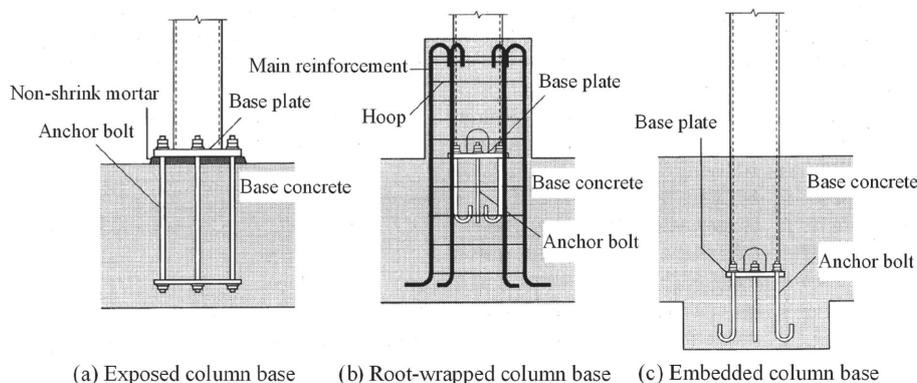


図1 柱脚¹⁾
Fig.1 Column base type¹⁾

*¹ 建設技術部 *² 事業開発部 *³ 国立大学法人神戸大学 大学院工学研究科 建築学専攻

ている。当社はテックモ(株)とともに、基準強度を490 N/mm²とすることができる「建築構造用700 N/mm²アンカー用ボルト、ナット、座金のセット（以下、TS700アンカーボルト）」の国土交通大臣の認定を取得した。

いっぽう、「鋼構造接合部設計指針¹⁾」に示されている構造用アンカーボルトの材料はSNR400A、BおよびSNR490Bのみであり、高強度タイプのアンカーボルトは同指針の適用範囲外となる。

当社はTS700アンカーボルトを用いた露出柱脚の耐力および剛性の評価方法を確立するため、神戸大学大学院鋼構造研究室と共同で露出柱脚の載荷実験を行った。本稿ではその実験結果および既往の算定方法との対応を報告する。

1. TS700アンカーボルトの概要

1.1 建築構造用アンカーボルトセットの概要

建築構造用アンカーボルトセットは、両端に所定のねじを設けたアンカーボルト1本、ナット4個および座金1枚で構成される（図2）。ねじの加工は切削加工および転造加工に大別され、切削加工はアンカーボルト素材のねじ部においてねじ山を削り出すように形成し、基準軸径=ねじ山部の径となる。いっぽう転造加工は、アンカーボルト素材を転造ダイス間で回転させ、ねじ山を盛り上げるような塑性加工を施すことでねじ山を形成するため、基準軸径<ねじ山部の径となり、切削ねじと比較

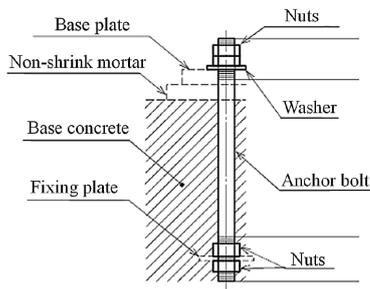


図2 アンカーボルトセットの構成
Fig.2 Configuration of anchor bolt set

し同一軸径でねじ部有効断面積を大きくとることができる（図3）。また転造ねじでは加工に伴う切粉が発生しないため素材を無駄なく使用でき環境にも優しい。

表1にJIS B 1220に規定される構造用両ねじアンカーボルトセットの構成を示す。ねじの加工について、ABMはねじを切削加工により、ABRは転造加工により製造される。ねじの呼びはABM400およびABRではM48まで、ABM490ではM100まで規格化されている。ボルトの材料について、ABM400/ABR400にはJIS G 3138で規定される建築構造用圧延棒鋼SNR400Bが、ABM490/ABR490には同SNR490Bが適用されている。

表2にボルト材料の機械的性質を、表3に建築基準法に基づくボルトの基準強度を示す。ここでABMおよびABRの基準強度は建築構造用圧延棒鋼SNR400BおよびSNR490Bの値を示す。

SNR400B/SNR490Bでは基準軸径が40 mmを超えると降伏点または0.2%耐力の値が低減され、合わせて基準強度も低減される。また降伏比はABRでは80%以下、ABMでは75%以下を規格値としている。

1.2 TS700アンカーボルトの特長

TS700アンカーボルトのセットの構成、ボルト材料の機械的性質および基準強度を同表1、2および3に示す。

TS700アンカーボルトはABRと同様に転造加工により製造されており、切削加工と比較し前節で示したような利点がある。またABRはねじの呼びがM48までしか

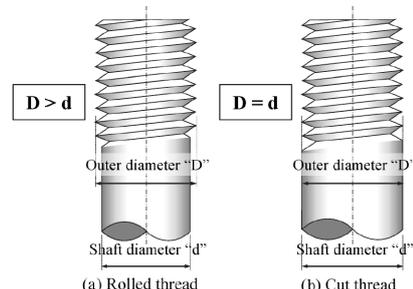


図3 転造ねじおよび切削ねじ
Fig.3 Rolled thread and cut thread

表1 アンカーボルトセットの構成
Table 1 Configuration of anchor bolt set

Type of anchor bolt set		Bolt thread processing	Nominal designation of thread	Material used	Nut	Washer
JIS B 1220 Set of anchor bolt for structures	ABM400	Cutting thread processing	M24~M48	SNR400B ^{*1)}	Vickers hardness (HV) 146~319	Vickers hardness (HV) 200~400
	ABM490		M24~M100	SNR490B ^{*1)}		
	ABR400	Rolling thread processing	M16~M48	SNR400B ^{*1)}		
	ABR490			SNR490B ^{*1)}		
TS700 anchor bolt set (MLIT Certification Number MBLT-0227)			M22~M100	KTR700 ^{*2)}	Rockwell hardness (HRC) 31 ± 5	Vickers hardness (HV) 200~300

*1) Rolled steel bars for building structures as specified in JIS G3138

*2) Special material developed by Kobe Steel, Ltd. for the TS700 anchor bolt

表2 ボルト材料の機械的性質
Table 2 Mechanical properties of bolt material

Material used	Shaft diameter (mm)	Yield or 0.2% strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)
SNR400B	≤40	235 ≤ ≤355	400 ≤ ≤510	ABM400/ABM490, ≤75 ABR400/ABR490, ≤80
	40 <	215 ≤ ≤335		
SNR490B	≤40	325 ≤ ≤445	490 ≤ ≤610	
	40 <	295 ≤ ≤415		
KTR700	20.2(M22) ≤ ≤96.0(M100)	490 ≤ ≤650	700 ≤ ≤950	≤75

表3 基準強度
Table 3 Design strength of bolt

Type of anchor bolt set			Shaft diameter (mm)	Design strength (N/mm ²)
JIS B 1220	ABM400	(SNR400B)	≤40	235 ^{*1)}
	ABR400		>40	215 ^{*1)}
Set of anchor bolt for structures	ABM490	(SNR490B)	≤40	325 ^{*1)}
	ABR490		>40	295 ^{*1)}
TS700 anchor bolt set			20.2 (M22) ≤ ≤96.0 (M100)	490

*1) Design strength of SNR400B and SNR490B based on Notification 2464 of the Building Standards Act

規格化されていないのに対し、TS700アンカーボルトはM100まで対応している。

TS700アンカーボルトの材料には当社が同ボルトのために開発した独自規格「建築構造用700 N/mm²アンカー用ボルト用鋼（以下、KTR700）」を使用している。SNR400B/SNR490Bではボルトの基準軸径が40 mmを超えると基準強度を低減する必要があるのに対し、KTR700は全ての径において基準強度を490 N/mm²としているため、ボルト径にかかわらず一定の基準強度で設計が可能である。またKTR700は降伏比75%以下を規格値としているため、降伏後の変形性能を十分に確保できる。

2. 露出柱脚の設計

2.1 柱脚の耐力

柱脚は建築物または設備架構上部から伝達される軸方向力、せん断力、曲げモーメントを基礎に確実に伝達する必要がある。鋼構造接合部設計指針¹⁾によると露出柱脚の設計において柱脚の塑性変形に期待する場合には、コーン状破壊耐力がアンカーボルトの最大引張耐力を下回らないように設計するとある。ここで、アンカーボルトの最大引張耐力については鋼構造接合部設計指針¹⁾により、コーン状破壊耐力については同指針が参考にして「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説²⁾」におけるかき出し定着破壊耐力を用いることとし、以降コーン状破壊耐力はかき出し定着破壊耐力と呼ぶ。

2.2 柱脚の剛性

柱脚の弾性剛性について、根巻き柱脚および埋込み柱脚ではコンクリートを無視した鋼断面からなる剛接柱として評価するが、露出柱脚はアンカーボルトの軸変形などを考慮し弾性回転ばねとして評価する。鉄骨骨組に水平力が作用する場合、柱脚での回転拘束度の違いによ

てとくに第一層の柱に作用する曲げモーメント分布が顕著に変化することから、露出柱脚の設計においてその弾性剛性を適切に評価することが重要である。鋼構造接合部設計指針¹⁾には露出柱脚の弾性剛性の評価方法が紹介されており、本稿においても同指針に基づき算定することとした。

2.3 適用範囲

これまで述べた各耐力・弾性剛性の評価方法はいずれも基準強度が325 N/mm²までのアンカーボルトセットを適用範囲としている。次章以降では各評価方法のTS700アンカーボルトへの適用可能性について実験的に確認した結果を述べる。

3. 実験計画

3.1 試験体

実験では逆T字型の中柱試験体を4体、L字型の外柱試験体を2体の計6体を用意した。表4に実験パラメータおよび各耐力計算値 ${}_aQ_p$ 、 ${}_LQ_u$ の一覧を、図4に試験体形状を示す。ここで、 ${}_aQ_p$ 、 ${}_LQ_u$ はそれぞれ柱脚の全塑性曲げモーメントおよびコンクリート基礎のかき出し定着破壊耐力によって決定する柱せん断力の値を示す。なお、表4に示す耐力の計算における材料強度には、鋼材、コンクリートともに規格値を用いた。

今回の実験において、アンカーボルト強度による比較を行うため、アンカーボルト降伏に先行してコンクリート基礎のかき出し定着破壊が生じてはならない。よって、I-A-375、I-T-375、およびO-A-450、O-T-450はそれぞれかき出し定着破壊耐力が露出柱脚の全塑性曲げ耐力を上回るよう、アンカーボルトの埋込み長さを決定した。また中柱形式においてはかき出し定着破壊の挙動も確認するため、同耐力と露出柱脚の全塑性曲げ耐力が同等となるよう埋込み長さを短くした試験体も2体用意した。

かき出し定着破壊耐力 T はコンクリートの寄与分 T_c と

補強筋の寄与分 T_w の和で式 (1) のように表される²⁾。

$$T = k_n(T_c + T_w) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k_n は柱圧縮応力度の効果を表す係数であり、本実験では柱軸力を考慮しないため、 $k_n=1$ とする。

本稿では、アンカーボルトの埋込み長さを定着長さと考え、式 (1) によりかき出し定着破壊耐力 T を算定し、その時の柱せん断力 ${}_LQ_u$ を求めた。

表 5 に各材料の機械的性質を示す。アンカーボルトには、KTR700 (M22) および SNR490B (M27) を使用し

表 4 試験体一覧

Table 4 List of test specimen

Specimen	Column type	Anchor bolt type	Bolt shaft diameter (mm)	Embedded length of bolt L_a (mm)	Fully plastic bending strength of column base ${}_aQ_p$ (kN)	Anchorage strength ${}_LQ_u$ (kN)
I-A-375	Inner column	ABR490	24.9	375	183	302
I-T-375		TS700	20.2		182	
I-A-250		ABR490	24.9	250	183	195
I-T-250		TS700	20.2		182	
O-A-450	Outer column	ABR490	25.1	450	186	374
O-T-450		TS700	20.4		186	

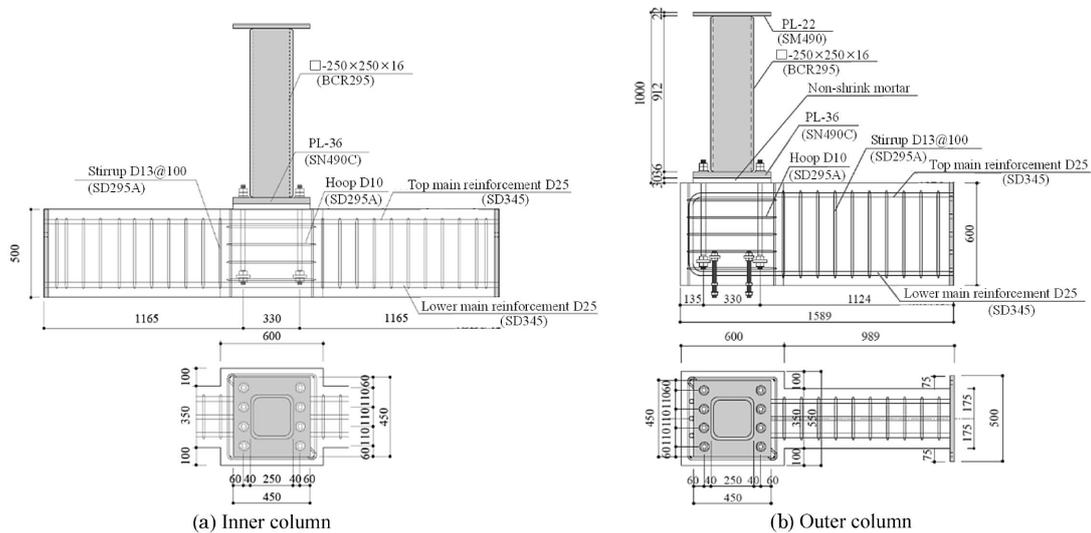


図 4 試験体形状

Fig. 4 Overview of test specimen

表 5 材料の機械的性質

Table 5 Mechanical properties of materials

(a) Inner column

Anchor bolt			
Steel type	Nominal diameter	T_p (kN)	T_u (kN)
SNR490B	M27	185	256
KTR700	M22	183	266

Reinforcement				Concrete
Steel type	Nominal diameter	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)
SD345	D25	373	552	40.0
SD295A	D13	336	465	
	D10	346	489	

(b) Outer column

Anchor bolt			
Steel type	Nominal diameter	T_p (kN)	T_u (kN)
SNR490B	M27	176	252
KTR700	M22	177	261

Reinforcement				Concrete
Steel type	Nominal diameter	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)
SD345	D25	371	565	36.6
SD295A	D13	340	487	
	D10	332	467	

T_p : Yielding axial force T_u : Tensile axial force
 σ_y : Yield strength σ_u : Tensile strength σ_B : compressive stress

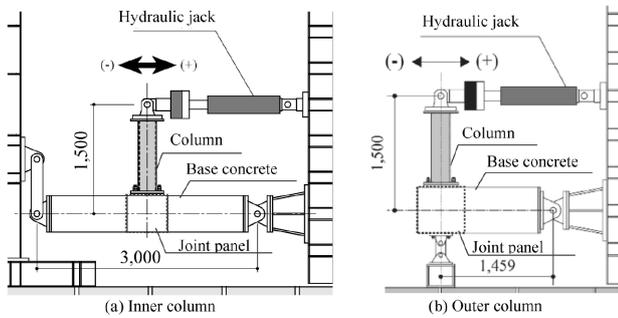


図5 荷重方法
Fig.5 Loading method

た。なお、アンカーボルト軸径はおおのこの降伏軸力 T_p および引張軸力 T_u が概ね同一となるよう決定した。

3.2 荷重方法

図5に示すように柱上端に取り付けた油圧ジャッキにより水平方向に正負交番の漸増繰返し荷重を行った。荷重履歴は層間変形角 $R=1/400$ rad, $1/200$ rad, $1/100$ rad, $2/100$ rad, $3/100$ rad, $4/100$ rad を正負各2回ずつ荷重し、その後、正方向に $R=1/10$ rad まで単調荷重した。

4. 実験結果と考察

4.1 破壊状況および最大耐力

図6に各試験体の破壊状況を、図7に荷重-層間変形関係を示す。なお、図7中の破線はアンカーボルトの降伏により決定する露出柱脚の全塑性曲げ耐力の計算値 ${}_aQ_p$ を、○印は最大荷重を示す。

中柱形式、外柱形式いずれもアンカーボルト強度による破壊性状および最大荷重の大きな差異は見られなかった。

埋込み長さが大きい中柱試験体 I-A-375, I-T-375 および外柱試験体 O-A-450, O-T-450 はいずれも $R=1/200 \sim 1/100$ rad で接合部パネル（図6中の破線で囲われた部分）に斜めひび割れが発生したが、その後も荷重は増加し続けた。その後中柱試験体は $R=1/100$ rad の変形時にアンカーボルト降伏した後、最終的には接合部パネルのせん断破壊に至った。外柱試験体は正荷重時に試験体の下部コンクリートに破壊が生じた。これは図8に示すように、本実験の正荷重時には接合部に鉛直方向の引張軸力が導入され、接合部パネルの斜めひび割れの進展に伴い、引張軸力に抵抗できなくなったためである。

アンカーボルトの埋込み長さが小さい中柱試験体 I-A-250, I-T-250 では $R=1/200$ rad で接合部パネルに斜めひび割れが生じた。その後、パネルのひび割れが梁上側へと伸展し、かき出し定着破壊に至った。

中柱試験体において、I-A-375, I-T-375 では最大荷重が ${}_aQ_p$ を上回り、I-A-250, I-T-250 では最大荷重が ${}_aQ_p$ をやや下回る。外柱試験体においては、いずれも正荷重側では最大耐力が ${}_aQ_p$ を上回っている。

埋込み長さの小さい I-A-250, I-T-250 では、最大荷重到達後の繰返し荷重において、荷重が顕著に低下している。これは、コンクリート基礎のかき出し定着破壊により、アンカーボルトの引抜きに対する抵抗力を失ったた

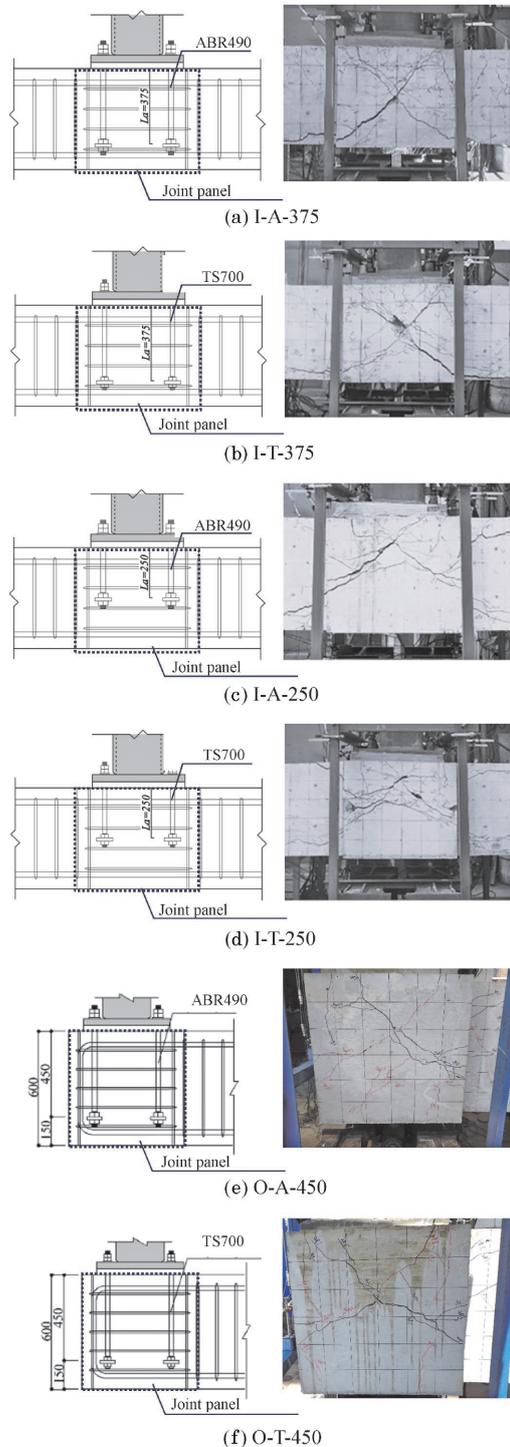


図6 破壊状況
Fig.6 Destruction status

めと考えられる。

4.2 柱脚の弾性剛性

図9に各試験体の柱せん断力 Q と層間変形角のベースプレート回転成分 R_{bp} の関係を示す。図中の破線は露出柱脚の弾性剛性の計算値 K_{BS} およびアンカーボルトの降伏により決定する露出柱脚の全塑性曲げ耐力の計算値 ${}_aQ_p$ を示す。また図中の○印は接合部パネルのせん断ひび割れ発生点を示す。

鋼構造接合部設計指針¹⁾によると、露出柱脚の弾性剛性 K_{BS} は式(2)による。

$$K_{BS} = E \cdot n_f / A_b (d_i + d_c)^2 / 2l_b \dots\dots\dots (2)$$

- E : アンカーボルトのヤング係数
- n_t : 引張側アンカーボルト本数
- A_b : アンカーボルト軸部断面積
- d_t : 柱断面図芯より引張側アンカーボルト群図芯までの距離
- d_c : 柱断面図芯より圧縮側柱フランジ外縁までの距離
- l_b : アンカーボルトの長さ (図10参照)

接合部パネルのせん断ひび割れ発生点までの荷重-変形関係の履歴と露出柱脚の弾性剛性の計算値 K_{BS} とを比較すると、いずれの試験体においても計算値は実験値を安全側に評価しており、とくに外柱試験体ではそれが顕著である。よって、本実験の範囲では、TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚においても、弾性剛性は鋼構造接合部設計指針¹⁾に基づいた設計式により安全側に評価することができる。

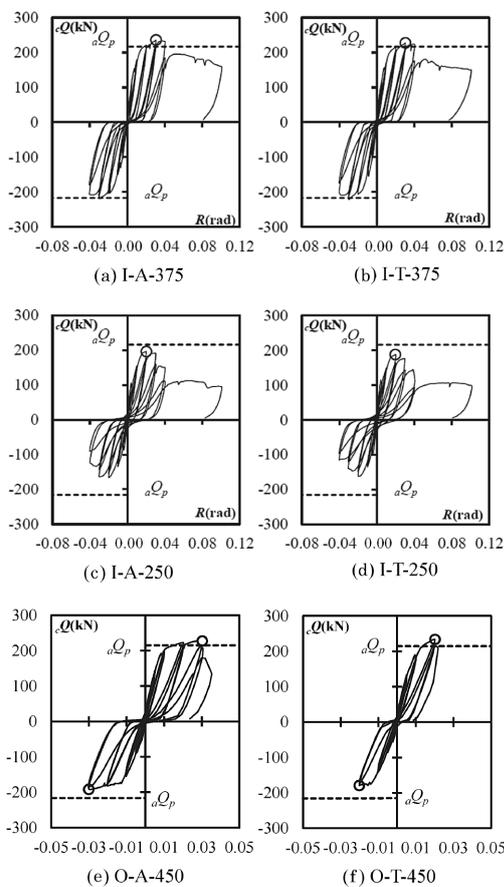


図7 荷重-層間変形角関係

Fig.7 Relationship between load and story deformation angle

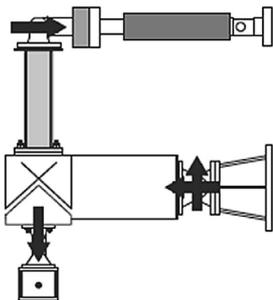


図8 柱脚下部コンクリートの破壊例

Fig.8 Example of destruction of concrete at the bottom of column base

5. 柱脚の耐力評価

5.1 終局耐力の評価式

本章では、正載荷側の最大荷重時における柱せん断力 cQ_{ue} に対して耐力評価を試みる。

アンカーボルト降伏による露出柱脚の全塑性曲げ耐力 aQ_p およびかき出し定着破壊によって決定する耐力 lQ_u 、接合部のせん断破壊によって決定する耐力 Q_u を算定し、実験値との比較を行った。なお、本計算における材料強度には材料試験に基づき得られた値を用いた。

中柱形式の露出柱脚接合部は、アンカーボルトを機械式定着とした梁主筋とみなすと、RC造におけるT形接合部を90°回転させた形状と同じものになり、また外柱形式の場合も同様に、RC造のL形接合部を90°回転させたものと同じ形状となる。既往の研究^{3), 4)}では、梁主筋を機械式定着としたT形接合部の終局せん断耐力は、定着長さ、梁の上下主筋の中心間距離および接合部の有

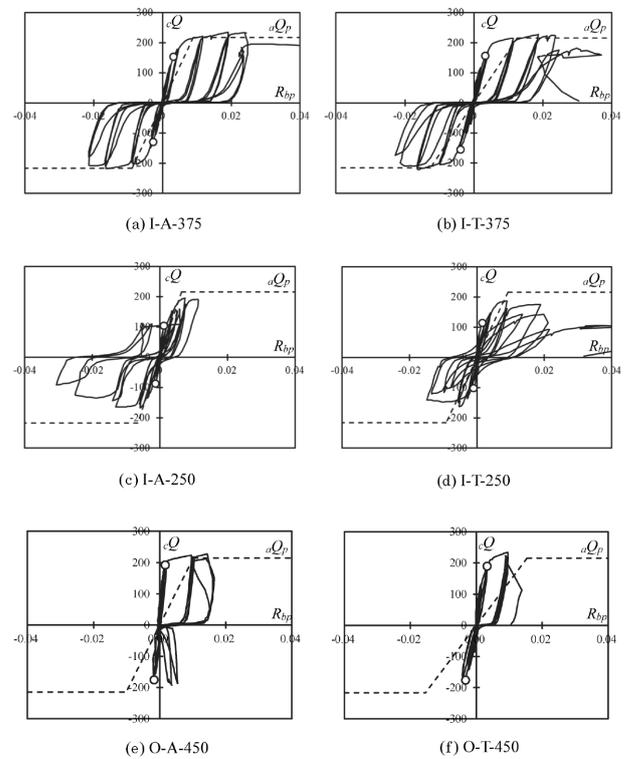


図9 荷重-ベースプレート回転角関係

Fig.9 Relationship between load and base plate rotation angle

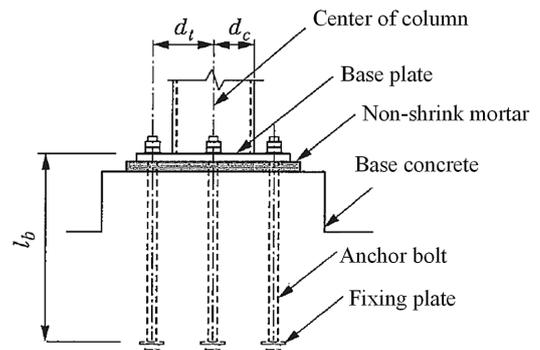


図10 柱脚関係寸法図¹⁾

Fig.10 Column base dimensions¹⁾

効幅を用いて鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説²⁾に基づき算定できることが示されている。そこで、本稿ではアンカーボルトの埋込み長さを定着長さと考え、式(3)により接合部せん断耐力 jV_u を算定し、その時の柱せん断力 jQ_u を求めた。

$$jV_u = \kappa \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot L_a \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 κ ：接合部の形状による係数（ト形接合部： $\kappa=0.7$ 、L形接合部：正載荷時 $\kappa=0.6$ 負載荷時 $\kappa=0.4$ ）⁴⁾

ϕ ：直交梁の有無による補正係数（ $\phi=0.85$ ）

F_j ：接合部せん断強度の基準値； $F_j=0.8\sigma_B^{0.7}$

b_j ：接合部有効幅

L_a ：アンカーボルトの埋込み長さ

表6にそれぞれの耐力評価式の計算値を、図11に実

表6 各耐力の計算値一覧

Table 6 List of calculated values for each strength

Specimen	Maximum Load cQ_{uc} (kN)	Fully plastic bending strength of column base aQ_p (kN)	Anchorage strength iQ_a (kN)	Shear fracture strength of joint panels jQ_u (kN)
I-A-375	236	218	375	281
I-T-375	227	217	375	281
I-A-250	196	217	211	187
I-T-250	187	217	211	187
O-A-450	228	215	354	189
O-T-450	234	216	354	189

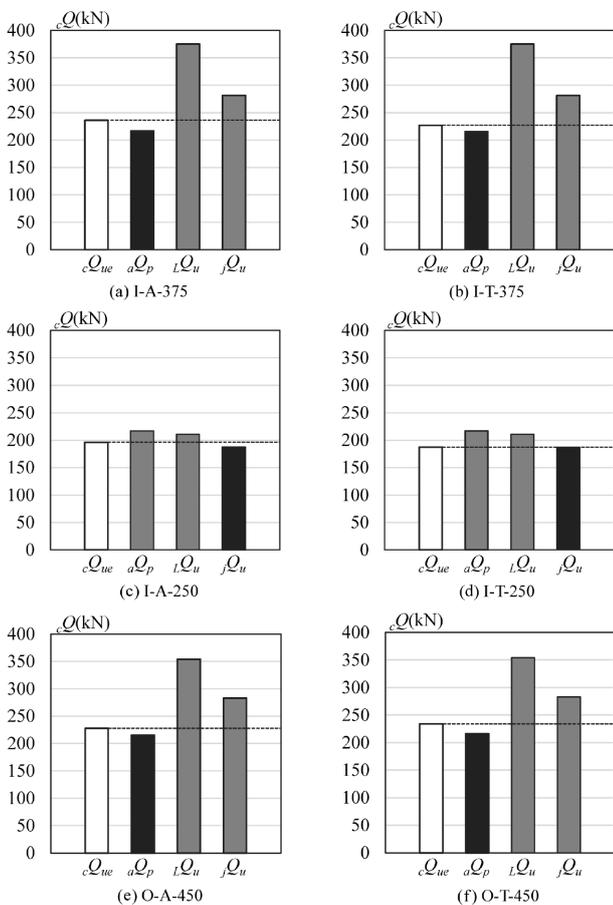


図11 実験値と各耐力評価式との比較

Fig.11 Comparison of experimental values with each strength evaluation formula

験値 cQ_{uc} と各計算値との比較を示す。

中柱形式および外柱形式いずれの試験体も、実験値は露出柱脚の全塑性曲げ耐力 aQ_p の値と良い対応を示す。

埋込み長さの大きい中柱試験体I-A-375, I-T-375および外柱試験体O-A-450, O-T-450において、各耐力の計算値は露出柱脚の全塑性曲げ耐力の値が最も小さく、接合部パネルのせん断耐力、かき出し定着破壊耐力の順に大きくなる。これらの試験体はアンカーボルトの降伏が先行した後、最大荷重に到達し、最終的には接合部パネルがせん断破壊した。接合部パネルのせん断耐力および基礎コンクリートのかき出し定着破壊耐力に余裕があったため、 $R=4/100$ radまで荷重低下が小さかったと考えられる。

埋込み長さが比較的小さい中柱試験体I-A-250, I-T-250においては、各耐力の計算値は接合部パネルのせん断耐力が最も小さく、露出柱脚の全塑性曲げ耐力とかき出し定着破壊耐力がほぼ等しい値となっている。これらの試験体はアンカーボルトが降伏した後、最大荷重に到達し、最終的には基礎コンクリートのかき出し定着破壊が生じた。接合部パネルのせん断耐力およびかき出し定着破壊耐力が小さいため、 $R=3/100$ rad以降の荷重において、荷重低下が著しくなったと考えられる。

むすび = TS700アンカーボルトを用いた露出柱脚の実験的研究の結果、得られた知見を以下に述べる。

①露出柱脚の荷重実験において、ABR490を用いた試験体とTS700アンカーボルトを用いた試験体はおおむね同様の挙動を示した。すなわちアンカーボルトの基準強度を 325 N/mm^2 から 490 N/mm^2 に増加させても柱脚の全塑性曲げ耐力が同程度ならば、各試験体の破壊性状および最大荷重に与える影響は小さい。

②本実験において、露出柱脚の全塑性曲げ耐力は鋼構造接合部設計指針¹⁾に、かき出し定着破壊耐力は鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説²⁾に基づいて算定したが、実験結果は評価式とよい対応を示す。また、露出柱脚の弾性剛性は鋼構造接合部設計指針¹⁾に基づいて算定したが、試験体のアンカーボルト強度および埋込み長さにかかわらず、実験の荷重履歴から読み取れる剛性を十分に安全側に評価する。

謝辞

本実験のアンカーボルトの製作についてはテックモ(株)の協力を賜りました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 鋼構造接合部設計指針, 2021-02.
- 2) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999-08-01.
- 3) 益尾 潔ほか, 日本建築学会構造系論文集, 2005, 70巻, 第590号, pp.87-94.
- 4) 建築構造技術支援機構, SABTEC機械式定着工法設計指針, 2014-06.