鉄骨構造露出柱脚におけるアンカーボルトのせん断抵抗力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE SHEAR RESISTANCE OF ANCHOR BOLTS IN EXPOSED TYPE OF STEEL COLUMN BASES

河野 久夫*1, 九谷 和秀*2, 増田 貫志*3

Hisao KAWANO, Kazuhide KUTANI and Kanshi MASUDA

The authors have already reported the results of the study on the shear resistance of anchor bolt concerned with diameter of anchor bolt, side cover and edge distance to the concrete footing, when shearing forces act upon embedded anchor bolts. Considering the damage conditions of bolts in past earthquakes, in this paper the authors will analyze the failure characteristics of the anchorage of bolts and evaluate the ultimate strength when the bolt heads are subjected to tensile and shearing forces using the specimens whose distance from center of anchor shank to the edge of concrete footing is comparatively short.

Keywords : column base, anchor bolt, concrete footing, edge distance, shear resistance

柱脚, アンカーボルト, 基礎コンクリート, 縁端距離, せん断抵抗力

1. はじめに

兵庫県南部地震における鉄骨造建築物の被害調査報告書¹⁾には、露出柱脚のアンカーボルトの破断ならびにベースプレート下のコンクリートの破壊により建物の倒壊あるいは大破を招いたものがかなり多く見受けられたことが報告されている。このような柱脚の損傷に起因する地震被害を低減する方策として、アンカーボルト自体に関しては、ねじ部の早期破断を防止し、十分な塑性変形能力を確保する観点から、日本鋼構造協会によって建築構造用転造ねじアンカーボルト・ナット・座金のセットが規格化²⁾され、着実に普及し始めているものと推察される。また、基礎コンクリートの著しい破壊を防止する観点から引き抜きを受けるアンカーボルトの定着に関しては、九谷ら³⁾、三谷ら⁴⁾の研究があり、既に研究成果の一部は鋼構造接合部設計指針⁵⁾に取り入れられている。

ところで、柱脚部には軸力、曲げモーメント以外にもせん断力が作用しており、通常の設計では、せん断力はベースプレートとコンクリートの摩擦抵抗力あるいはアンカーボルトのだぼ作用によって基礎コンクリートに伝達されるとしている。しかし、各種合成構造設計指針⁶⁾ならびに鋼構造接合部設計指針においても、アンカーボルトのせん断抵抗力と基礎コンクリートの縁端距離との関係は明確に述べられていない。従って、引張力とせん断力の組み合わせ応力を受けるアンカーボルト自体および定着される側の基礎コンクリートの耐力評価式を得ることは未解決の重要な課題の一つと言える。

ここで、コンクリート中に埋め込まれたアンカーボルト等の力学性状に関する既往の研究として、以下のような研究成果がある。

Fisherら⁷⁾は、頭付きアンカーボルトに組み合わせ応力を作用さ

せた場合の耐力評価式を提案しているが、アンカーボルトの埋め込み長さが軸径の約5~10倍と比較的短い。また、松崎ら⁸⁾⁹⁾は、機器配管用支持構造物の埋め込み金物の耐力に関する一連の実験を行い、終局耐力に関する評価式を提案しているが、埋め込み長さは金物の軸径に対して比較的短い。ついで、河村ら¹⁰⁾は、水平力を受ける埋め込み鉄筋の耐力評価に関する実験を行い、その耐力の推定式を提案しているが、埋め込み長さは鉄筋径の約5~8倍と比較的短い。さらに、細川¹¹⁾は、あと施工アンカーの定着機構を解明している。

しかしながら、上記の研究成果は、いずれもアンカーボルト軸径に対する埋め込み長さが比較的短い場合の耐荷性状であり、軸径の20倍程度以上の埋め込み長さを要する鉄骨柱脚に用いるアンカーボルトの挙動と直接対応させるには難点がある。

一方、鉄骨柱脚に用いるアンカーボルト等の力学性状に関する既往の研究として、以下のような研究成果がある。

Klingnerら¹²⁾は、19φのアンカーボルトにせん断力を作用させた場合の実験を行い、縁端距離、ヘアピン補強、荷重条件等の影響を検討するとともに、終局時のせん断耐力に関する評価式の検証を行っている。また、秋山ら¹³⁾は、剛強な基礎コンクリートに埋め込まれたアンカーボルトとシアプレートのせん断抵抗に基づく耐力評価式を提案している。さらに、九谷ら¹⁴⁾は、アンカーボルトのだぼ作用により抵抗する基礎コンクリートのせん断耐力を既往の評価式を用いて検証している。ついで、中島ら¹⁵⁾は、引張力、せん断力およびそれらの組み合わせ応力を受けるアンカーボルトの実験を行い、ねじ部、モルタル層および繰返しせん断荷重の影響について検

*1 ㈲オフィスボンド 代表取締役

*2 九州産業大学工学部建築学科 助教授・工博

*3 九州産業大学工学部建築学科 教授・工博

Director, Office Bond Co., Inc.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Univ. of Kyushu Sangyo, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Univ. of Kyushu Sangyo, Dr. Eng.

い方の値の20倍程度とした。なお、全てのアンカーボルトは、埋め込み先端部にアンカープレート(φ×t, φ:直径, t:板厚)を有し、M12, W1/2, M16, M20の順に、それぞれ30×12, 35×12, 40×12, 50×16とした。また、ねじ部でのせん断破壊を避けるためアンカーボルトは基礎コンクリート上面から上24mmまでを軸部、それより上をねじ部とした。

本実験において、アンカーボルト中心から基礎コンクリート縁までの縁端距離 e_l は40mm~200mmとし、基礎コンクリートの幅は試験体の最大縁端距離の2倍の400mmとした。基礎コンクリートの形状は、加力方向 θ が $0^\circ \sim 60^\circ$ の試験体をL形とし、 $\theta = 90^\circ$ の試験体を逆T形(図-1中に破線で示す)とした。なお、基礎コンクリート内の補強筋は加力時の曲げモーメントや運搬時の応力に抵抗させるためであり、実験結果に影響を及ぼさないように配慮した。

基礎コンクリートにはレディーミグストコンクリート(普通ポルトランドセメント)を使用し、骨材の最大寸法は20mm以下とした。また、鋼材の引張試験結果を表-2に、コンクリートの性状を表-3に示す。

表-2 鋼材の引張試験結果

鋼材	呼び径	鋼種	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	伸び (%)	降伏比 $\frac{\sigma_y}{\sigma_u}$
アンカーボルト	12φ	SS400	491	543	11	0.90
	13φ		341	478	28	0.71
	16φ		308	452	34	0.68
	20φ		325	456	32	0.71
補強筋	D13	SD295A	326	488	29	0.67
	D16		329	480	26	0.69

表-3 コンクリートの性状

適用	圧縮強度 F_c (N/mm ²)	スランプ (mm)
M12シリーズ	20.4	78
W1/2シリーズ	27.9	155
M16シリーズ	29.7	104
M20シリーズ	26.4	172

加力装置ならびに加力状況は、図-1および写真-1に示す通りであり、基礎コンクリートを鋼製ベッドに固定し、加力治具を介してアンカーボルトに $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の方向に加力を行った。アンカーボルトは二重ナットのうえに手締めとし、加力治具と基礎コンクリート上面間の摩擦抵抗を減少させるため、テフロン加工鋼板(板厚6mm, 摩擦係数0.06)を加力治具下面に敷き、295kN油圧ジャッキ(295kNロードセル付き)を用いて破壊に至るまでの単調載荷実験を行った。なお、アンカーボルト頂部の水平および鉛直変位は電気式変位計を用いて約980N刻みで測定した。

3. 実験結果および考察

3-1. 破壊形式の分類

著者らの一連の実験結果¹⁶⁾および今回の実験結果から柱脚部の破壊は表-4に示すように5つの形式に分類できる。なお、各試験体の破壊形式をそれぞれ表-1に示す。

3-1-1. 破壊形式1

基礎コンクリート前面が半楕円状に剥離する破壊を破壊形式1とし、図-2および写真-2に示す。試験体数は表-4に示すように22

図-2 破壊模式図(形式1)

写真-2 破壊状況(形式1)

図-3 破壊模式図(形式2)

写真-3 破壊状況(形式2)

図-4 破壊模式図(形式3)

写真-4 破壊状況(形式3)

図-5 破壊模式図(形式4)

写真-5 破壊状況(形式4)

図-6 破壊模式図(形式5)

写真-6 破壊状況(形式5)

体である。基礎内部を起点として水平移動したアンカーボルト部分の長さ L_a の平均値は3.1dとなっている。また、基礎コンクリート前面の破壊した長さ L_b の平均値は1.8e1であり、加力方向 θ が大きくなる程 L_b は小さくなる傾向がみられた。さらに、基礎コンクリート前面の破壊幅 L_c は3.5～7.0e1の範囲にあり、平均値は5.1e1となっている。縁端距離の平均値が4.1dと比較的短い試験体がこのような破壊を起こした。

3-1-2. 破壊形式2

基礎コンクリート前面が長方形に剥離する破壊を破壊形式2とし、図-3および写真-3に示す。試験体数は11体である。 L_a の平均値は3.1dであり、 L_b の平均値は1.9e1となっている。また、加力方向 θ が大きくなる程 L_b は小さくなる傾向がみられた。これらの値はいずれも破壊形式1と似かよっている。基礎コンクリート上面端部の破壊した長さ L_d は5～63mmの範囲にあり、平均値は41mmとなっている。このような破壊を起こした試験体のうちの7体はM20シリーズであった。縁端距離が4.1～7.8dの範囲で平均値は5.0dと破壊形式1に比べ若干大きく、また、アンカーボルトの剛性が大きい試験体がこのような破壊を起こした。

3-1-3. 破壊形式3

破壊形式1と2の複合破壊を破壊形式3とし、図-4および写真-4に示す。試験体数は9体である。 L_a の平均値は1.9dであり破壊形式1、2と比較するとやや短くなっている。また、 L_b の平均値は2.1e1であり、加力方向 θ が大きくなる程 L_b は小さくなる傾向がみられた。なお、 L_d は20～75mmの範囲にあり、平均値は34mmとなっている。これらは破壊形式2と似かよっている。さらに、基礎コンクリート前面端部から破壊面までの長さ L_e は0～90mmの範囲にあり、平均値は42mmとなっている。このような破壊を起こした試験体の縁端距離の平均値は4.9dであり、破壊形式2とほぼ同じ値である。

3-1-4. 破壊形式4

せん断力またはせん断力と引張力の組み合わせ応力によるアンカーボルト破断を破壊形式4とし、図-5および写真-5に示す。そのうち、軸部で破断したものが13体、ねじ部で破断したものがNo. 29, 31の2体である。加力の初期段階では、加力方向のアンカーボルト近傍のコンクリート表面にちびり破壊を生じた。その後は、コンクリート表面にひび割れの発生は認められず、荷重のみが増大し、アンカーボルトが破断した。 L_a の平均値は1.1dであり、コンクリートで破壊した破壊形式1～3と比較するとかなり小さくなっている。また、加力方向のコンクリート表面の剥離幅 L_f の平均値は

56mmであり、横方向の剥離幅 L_g の平均値は91mmとなっている。縁端距離が6.9d以上で、加力方向 θ が0°～60°の試験体がこのような破壊を起こした。

3-1-5. 破壊形式5

純引張力によるアンカーボルト破断を破壊形式5とし、図-6および写真-6に示す。アンカーボルトの破断はねじ部で破断したものが6体、軸部で破断したものが2体となっている。軸部で破断した試験体はNo. 17, 22でいずれもM12の転造ねじボルトである。アンカーボルトが引張力を受けて、加力の初期段階ではアンカーボルト周辺のコンクリート表面がほぼ円形状に剥離し、その後アンカーボルトが破断して最大荷重に達した。 L_a の平均値は0.9dである。また、アンカーボルト周辺のコンクリートの剥離した円形状の直径 L_h の平均値は71mmとなっている。

3-2. 耐力評価

3-2-1. 純引張力を受ける場合

アンカーボルトの引張耐力に及ぼす基礎コンクリート縁端距離の影響を調べるための試験体No. 5, 10, 15, 16, 17, 18の6体と、縁端距離は十分あり、アンカーボルトが破断すると考えられるNo. 5, 22の2体の合計8体に純引張力を加える実験を行った。

ここで、純引張力を受けるアンカーボルトの終局引張耐力 T_u は、学会指針⁹⁾の各種アンカーボルトの設計指針・同解説に示される耐力評価式を準用した(1)式で求めた。すなわち、鉄骨構造露出柱脚に適用するためには、アンカーボルトに変形能力を持たせる観点から基礎コンクリートの破壊を避け、基礎コンクリートのコーン状破壊により決まる終局引張耐力 T_1 、アンカープレートに接するコンクリートの支圧により決まる終局引張耐力 T_3 がアンカーボルトの破断により決まる終局引張耐力 T_2 を上回る必要があるとした。

$$T_u = T_2 \quad (1)$$

ただし、 $T_2 < \min(T_1, T_3)$

ここに、 T_1 : 基礎コンクリートのコーン状破壊により決まる場合のアンカーボルト1本当りの終局引張耐力(N)

$$T_1 = 0.313 \phi_1 A_c \sqrt{F_c}$$

$$\phi_1 = 0.6 (\phi_1 : \text{低減係数})$$

T_2 : アンカーボルトの破断により決まる場合のアンカーボルト1本当りの終局引張耐力(N)

$$T_2 = b \sigma_u \cdot b A_e$$

T_3 : アンカープレートに接するコンクリートの支圧

表-4 破壊形式の分類

()内は平均値を示し、[]内は純せん断を受ける試験体数を示す。

分類	破壊状況	実験変数		破壊面の寸法			個数
		e1/d	θ	L_a/d	$L_b/e1$	$L_c/e1$	
破壊形式	1 基礎コンクリート前面の半楕円状破壊	3.2～5.6 (4.1)	0°～60°	1.0～6.1 (3.1)	1.0～3.0 (1.8)	3.5～7.0 (5.1)	22 [5]
	2 基礎コンクリート前面の長方形破壊	4.1～7.8 (5.0)	0°～45°	1.5～6.1 (3.1)	1.6～2.9 (1.9)	—	11 [4]
	3 形式1と2の複合破壊	3.6～7.0 (4.9)	0°～60°	1.0～3.3 (1.9)	0.9～3.7 (2.1)	—	9 [3]
	4 せん断力、または引張力とせん断力によるアンカーボルトの破断	6.9～18.8	0°～60°	0.2～2.8 (1.1)	—	—	15 [4]
	5 引張力によるアンカーボルトの破断	3.2～18.8	90°	0.7～1.2 (0.9)	—	—	8

により決まる場合のアンカーボルト1本当りの終局引張耐力(N)

$$T_3 = f_n \cdot A_o$$

F_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

A_c : コンクリートのコーン状破壊面の有効水平投影面積(mm²)

A_o : アンカープレートの支圧面積(mm²)

$b\sigma_u$: アンカーボルト鋼材の引張強度(N/mm²)

bA_e : アンカーボルトの軸断面積とねじ部有効断面積(JISB1051)のうち小さい方の値をとる(mm²)。

f_n : コンクリートの支圧強度で $\sqrt{A_c/A_o} \cdot F_c$ とする(N/mm²)。

ただし、 $\sqrt{A_c/A_o}$ が10を超えるときは10とする。

本実験においては、アンカーボルトの埋め込み長さは20dと比較的長く、 $T_2 < \min(T_1, T_3)$ の条件を満たしており、純引張力を受ける全ての試験体はコンクリートのコーン状破壊を起こすことなく、アンカーボルトの破断により最大荷重に達している。なお、表-1に示すように、実験耐力 P_{max} と計算耐力 $P_{cal}(=T_u)$ の比 P_{max}/P_{cal} は1.04~1.12を示しており、その平均値は1.07であり、実験耐力と計算耐力は比較的良好に対応していると言える。

以上から、引張力を受けるアンカーボルトの終局引張耐力 T_u は学会式を準用した(1)式により評価できることが確認された。

3-2-2. 純せん断力を受ける場合

純せん断力を受けるアンカーボルトについての研究結果は文献16)に報告済みであるが、再現性を確認するため特に基礎コンクリートの縁端距離が短い場合について追加実験を行った。

本実験では、試験体16体中アンカーボルトにより基礎コンクリートがパンチングシアー破壊し、最大荷重に達した試験体はNo. 1, 6, 11, 23~25, 34, 39, 43, 52, 56, 60の12体である。それらの破壊状況は、破壊形式1~3に示す通りである。一方、アンカーボルトがせん断破壊を起こし、最大荷重に達した試験体はNo. 18, 26, 27, 47の4体であり、その破壊状況は破壊形式4に示す通りである。

学会指針⁹⁾では、アンカーボルトがせん断力を受けて、基礎コンクリートがパンチングシアー破壊する場合の終局せん断耐力 cQ_u の評価式として(2)式が示されている。

$$cQ_u = 0.313 A_{co} \sqrt{F_c} \quad (2)$$

ここに、 A_{co} : 有効投影面積(半円, mm²)

ところで、鉄骨構造露出柱脚に用いるアンカーボルトの埋め込み長さは20d程度と比較的長く、有効投影面積 A_{co} については実状に合うように検討する必要がある。図-7に、 e_l が50~275mmでアンカーボルト径が13φ~56φの45体¹⁰⁾と、今回追加した e_l が40~100mmでアンカーボルト径が12φ~20φの12体の合計57体についての A_{co} - e_l 関係を示す。なお、図中の A_{co} の値は P_{max} を $0.313\sqrt{F_c}$ で除して求めた。

$$A_{co} = 1.109 e_l^2 + 123.6 e_l \quad (3)$$

図-7より、(3)式で表わされる A_{co} - e_l 関係は実験結果と高い相関($R^2=0.97$)が認められる。なお、参考のため今回の実験の中から一例として、純せん断力を受けて基礎コンクリートが破壊した12体について、コンクリート前面における破壊面積の実測値 A_c と e_l の関係を図-8に示す。この面積にはコンクリート表面が薄く広く剥離した部分も含まれるため、かなりのバラツキが生じ、また、半円(図中の破線)および(3)式(図中の実線)で表わされる有効投影面積と比較して極めてかけ離れた値を示している。現時点では、実際の破壊面積から耐力を予測するのは困難と考えられる。

図-7 A_{co} - e_l 関係

図-8 A_c - e_l 関係

図-9 有効投影面積(A_{co})

実用設計では有効投影面積の簡便な作図法が要求されることから、本論文では、図-9に示すように基礎コンクリート中における応力が45°方向に作用するものと仮定し、また、コンクリート上面

から深さ h までのアンカーボルトを投影した面積、すなわち長方形と半円からなる面積を有効投影面積と想定した。

図-9の有効投影面積は(4)式で表わされ、この場合の長方形部分の高さ h は(3)式と(4)式を等値して(5)式のように得られる。

$$A_{co} = \pi e_l^2 / 2 + 2e_l \cdot h \quad \text{ただし, } 40\text{mm} \leq e_l \leq 275\text{mm} \quad (4)$$

$$h = 61.8 - 0.23 e_l \quad \text{ただし, } h \geq 0 \quad (5)$$

図-10に、純せん断力を受ける試験体57体についての $h-e_l$ 関係を示す。大局的にみて、ばらつきは大きい(5)式は概ね実験結果の傾向を表わしていると言えよう。

図-10 $h-e_l$ 関係

従って、基礎コンクリートのパンチングシア破壊による終局せん断耐力を求める際の有効投影面積の実用的評価式として(4)、(5)式が提案できる。また、パンチングシア破壊した試験体57体の実験耐力と(4)、(5)式に基づく計算耐力 $P_{cal}(=cQu)$ の比 P_{max}/P_{cal} は0.53~1.27の範囲にあり、平均値は0.95であり、比較的良好に対応しているものと判断される。

以上から、基礎コンクリートの終局せん断耐力の評価式として(2)式を用いること、ならびに有効投影面積を半円と長方形の和とすることの妥当性が検証された。

次に、アンカーボルトの終局せん断耐力 bQu は、秋山博士らの研究成果¹³⁾を引用した(6)式より求める。

$$bQu = bA_e \cdot b\sigma_u / \sqrt{3} \quad (6)$$

本実験では、全ての試験体のアンカーボルトのせん断面が軸部であることから、終局せん断耐力を求める際の bA_e は軸断面積とした。表-1に示すように、アンカーボルトが破断した試験体No. 18, 26, 27, 47の4体と前回¹⁸⁾の2体、合計6体の実験耐力と計算耐力 $P_{cal}(=bQu)$ の比 P_{max}/P_{cal} は0.97~1.45の範囲にあり、平均値は1.23であり、計算耐力は実験耐力を安全側に評価している。これは、アンカーボルトの支圧によるコンクリート表層部の剥離破壊が避けられないことから純せん断破壊になり難しく、幾分か曲げ引張破壊に移行することにより bQu を上回るものと考えられるが、実験耐力と計算耐力は概ね対応していると言える。

以上から、アンカーボルトによる終局時のせん断抵抗力 Qu は、基礎コンクリートのパンチングシア破壊による耐力 cQu とアンカーボルトの耐力 bQu の小さい方で決定されるものとし、その場合の評価式として(7)式が提案できる。

$$Qu = \min(cQu, bQu) \quad (7)$$

さて、前述の57体の実験結果の検討から、純せん断力を受けるアンカーボルトが最大荷重に達し、同時に基礎コンクリートがせん断破壊するときの最小縁端距離(限界縁端距離 ue_l と呼ぶ)の実験式は、本実験結果を加えて文献16)の式を修正し、(8)式のように表わされる。

$$ue_l = \frac{1}{0.694} \left\{ \sqrt{0.629d^2 \cdot b\sigma_u / F_c + 1497} - 38.7 \right\} \quad (8)$$

ここに、 $b\sigma_u$: アンカーボルトの引張強度(N/mm²)

F_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

d : アンカーボルト軸径(mm)

本実験では、各試験体の ue_l は、M12シリーズ: 89mm(8.4d), W1/2シリーズ: 95mm(7.4d), M16シリーズ: 116mm(7.4d), M20シリーズ: 163mm(8.3d)となる。 e_l/ue_l が1.05以下の12体は基礎コンクリートがパンチングシア破壊を起こし、 e_l/ue_l が1.16以上の4体はアンカーボルト軸部が破断している。以上のように、(8)式で与えられる限界縁端距離は、本実験結果とも比較的良好に対応しており、実用設計上の目安となろう。

3-2-3. 引張力とせん断力の組み合わせ応力を受ける場合

引張力とせん断力の組み合わせ応力($\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)を受ける試験体は41体で、そのうちアンカーボルトにより基礎コンクリートがパンチングシア破壊し、最大荷重に達した試験体はNo. 2~4, 7~9, 12~14, 28, 35~37, 40~42, 44~46, 53~55, 57~59, 61~65の30体である。その破壊状況は破壊形式1~3に示す通りである。また、アンカーボルトが破断して最大荷重に達した試験体はNo. 19~21, 29~33, 48~50の11体であり、その破壊状況は破壊形式4に示す通りである。

ここでは、純引張力を受ける8体と純せん断力を受ける16体を含めた65体(表-1参照)と、前回¹⁸⁾の純せん断力を受ける47体を含めた合計112体の試験体に対する耐力評価法について検討する。純引張力、純せん断力、また、それらの組み合わせ応力を受けるアンカーボルトの耐力評価式として、次に示す学会式⁵⁾⁸⁾(9)式を適用する。

$$\left(\frac{T}{T_u} \right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_u} \right)^2 = 1 \quad (9)$$

図-11に、全試験体112体についての $T/T_u-Q/Q_u$ 関係を示す。なお、実験値は、 $T = P_{max} \cdot \sin \theta$, $Q = P_{max} \cdot \cos \theta$ とし、図中の記号の白抜きはアンカーボルトによる基礎コンクリートのパンチングシア破壊を示し、黒塗りはアンカーボルトの破断を示す。ま

た、組み合わせ応力を受ける場合の計算耐力 P_{cal} は(10)式から求める。

$$P_{cal} = \frac{T_u \cdot Q_u}{\sqrt{T_u^2 \cdot \cos^2 \theta + Q_u^2 \cdot \sin^2 \theta}} \quad (10)$$

図-11より、純引張力を受ける試験体の計算耐力は実験耐力を比較的好く評価していることが分かる。また、純せん断力を受ける試験体の P_{max}/P_{cal} は0.7~1.3の広範囲にあるが、計算耐力は実験耐力を概ね評価していると言えよう。さらに、組み合わせ応力を受ける試験体のうち、アンカーボルトが破断した試験体は全て計算耐力を上回るが、基礎コンクリートがパンチングシア破壊した試験体は計算耐力を下回る傾向がみられる。しかしながら、全試験体の P_{max}/P_{cal} の平均値は0.95であり、実験耐力と計算耐力には相関が認められる。

引張力とせん断力の組み合わせ応力を受ける41体のうちアンカーボルトが破断した11体の P_{max}/P_{cal} は1.05~1.35の範囲にあり、平均値は1.22であり、計算耐力は実験耐力を若干過小評価している。これは、中島博士ら¹⁵⁾による軸部にせん断面を有するM12およびM16のアンカーボルトの実験結果と似かよった傾向を示している。

基礎コンクリートがパンチングシア破壊した30体の P_{max}/P_{cal} は0.56~1.08の広範囲にあるが、平均値は0.8であり、計算耐力は実験耐力を過大に評価している。なお、試験体No. 25は $cQu/bQu = 1.06$ であるが基礎コンクリートがパンチングシア破壊し、No. 29は $cQu/bQu = 0.91$ であるが、アンカーボルトが破断している。これは、 cQu と bQu の値が近似しているためであろう。他の試験体の破壊は全て予測通り cQu と bQu の小さい方で決定された。

以上から、引張力とせん断力の組み合わせ応力を受けるアンカーボルトによる終局時のせん断抵抗力の評価式として(9)式の妥当性が検証された。

図-11 $T/T_u - Q/Q_u$ 関係 (A_{co} が半円+長方形の場合)

3-2-4. 実用設計式

現行の設計では、基礎コンクリートのパンチングシア破壊による終局せん断耐力 cQu の実用設計式として(11)式⁹⁾が提示されている。そこでは、有効投影面積を半円とし、低減係数 ϕ を0.6としている。

$$cQu = 0.313 \phi A_{co} \sqrt{F_c} \quad (11)$$

ここに、 A_{co} : 半円の面積 ($\pi e l^2/2$) (mm^2)

ϕ : 低減係数 (=0.6)

図-12に、(11)式に基づく $T/T_u - Q/Qu$ 関係を示す。図にみられるように、現行の設計法によると、全ての試験体が安全側に評価されるが、 P_{max}/P_{cal} の変動幅は1.05~4.0と著しく大きい。また、 cQu/bQu が0.57~0.88の範囲にある試験体4体は、予測に反してアンカーボルト自体が破断した。以上から、有効投影面積を半円とし、低減係数 ϕ を0.6とする(11)式は実験結果を極端に過小評価することが判明した。

本論文では、有効投影面積の評価式として(4)、(5)式を、また低減係数として $\phi = 0.6$ を、実用設計に対する終局せん断耐力の評価式として(12)式を提案する。

$$cQu = 0.313 \phi A_{co} \sqrt{F_c} \quad (12)$$

ここに、 A_{co} : $\pi e l^2/2 + 2 e l \cdot h$ (mm^2)

ϕ : 低減係数 (=0.6)

図-13に、(12)式に基づく $T/T_u - Q/Qu$ 関係を示す。図にみられるように、全ての試験体の P_{max}/P_{cal} の変動幅は0.89~2.1と幾分大きい、 A_{co} を半円とした図-12の場合と比較してかなり小さくなっている。また、112体中110体(98.2%)の試験体が安全側に評価されている。

図-12 $T/T_u - Q/Q_u$ 関係 (A_{co} が半円で $\phi = 0.6$ の場合)

図-13 $T/T_u - Q/Q_u$ 関係 (A_{co} が半円+長方形で $\phi = 0.6$ の場合)

4. まとめ

本論文では、著者らの既往研究の資料に追加して、特に基礎コンクリートの縁端距離が短い場合についての新たな実験を行い、アンカーボルトが引張力またはせん断力のいずれか一方、あるいはそれらの組み合わせ応力を受ける場合について、柱脚部の破壊形式の分類および終局時のせん断抵抗力の評価方法について検討・考察した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 本実験における破壊形式は、基礎コンクリートがパンチングシアー破壊する形式1, 2, 3とアンカーボルトが破断する形式4, 5の5通りに分類される。
- (2) アンカーボルトの終局引張耐力の評価式は、(1)式で評価できる。
- (3) 基礎コンクリートがパンチングシアー破壊する場合の有効投影面積は、半円と長方形の和からなる(4), (5)式で評価できる。
- (4) アンカーボルトの終局せん断耐力は、秋山博士らの(6)式で評価できる。
- (5) 組み合わせ応力を受けるアンカーボルトによる終局時のせん断抵抗力は、(9)式で評価できる。
- (6) 実用設計では、基礎コンクリートのパンチングシアー破壊耐力を安全側に評価する(12)式が有用である。

謝辞

本実験を行うにあたって九州産業大学の江口満氏および卒業生の渡邊、楠原、石橋、田野、山下、亀岡諸氏の助力を得た。また、実験資料の整理には(有)オフィスボンドの下瀬健二氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1995年兵庫県南部地震鉄骨造建築物被害調査報告書，1995.5
- 2) 日本鋼構造協会：建築構造用転造ねじアンカーボルト・ナット・座金のセット，JSS II13-2000，1999，6
- 3) 九谷和秀，増田貢志：鉄骨構造露出形式柱脚におけるアンカーボルトの定着に関する研究，鋼構造年次論文報告集，pp.101~108，1994.11
- 4) 田中秀宣，三谷勲，大谷恭弘，藤永隆，伊藤倫夫：アンボンド型アンカーボルトを用いた露出型柱脚の構造性能，その7，柱脚・基礎梁接合部の研究(考察)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.937~938，2001.9
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2001.11
- 6) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，1988.8
- 7) Patrick J. McMackin, Roger G. Slutter, and John W. Fisher: Headed Steel Anchor under Combined Loading: AISC Engineering Journal, Second Quarter, 1973
- 8) 松崎育弘，矢野明義，菅家重夫，阿部保彦，宇佐美滋：機器配管用支持構造物(埋込金物)の耐力に関する実験研究，その3，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1813~1814，1980.9
- 9) 松崎育弘，矢野明義，菅家重夫，阿部保彦，宇佐美滋：機器配管用支持構造物(埋込金物)の耐力に関する実験研究，その6，9，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1567~1568，pp.1573~1574，1981.9
- 10) 河村博之，浜田公也：水平力を受ける埋込み鉄筋の耐力，周辺コンクリートの大きさが与える影響について，その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1901~1902，1983.9
- 11) 細川洋治：あと施工アンカーの強度と剛性に関する基礎的研究，東京大学学位論文，1992.5
- 12) R.E.Klingner, J.A.Mendonca, J.B.Malik: Effect of Reinforcing

Details on the Shear Resistance of Anchor Bolts under Reversed Cycle Loading, ACI Journal, Vol.7, 9, No.1, pp.3~12, Jan.-Feb.1982

- 13) 秋山宏，黒沢稔，和国信之，西村功：鋼構造露出柱脚のせん断力抵抗，日本建築学会論文報告集，第338号，pp.71~76，1984.4
- 14) 九谷和秀，増田貢志：鉄骨構造露出形式柱脚部の耐荷機構に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第440号，pp.113~124，1992.10
- 15) 中島茂壽，大橋芳郎：引張力・せん断力・組み合わせ応力を受けるアンカーボルト露出部の力学的性状に関する実験的研究(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.477~478，1997.9
- 16) 河野久夫，橋俊明，増田貢志：埋め込みアンカーボルトのせん断耐力に関する実験的研究，鋼構造論文集，第3巻，第12号，pp.31~38，1996.12
- 17) 河野久夫，九谷和秀，増田貢志：引張力とせん断力を受ける埋め込みアンカーボルトの力学性状に関する実験的研究：M16，M20のアンカーボルト径に対して基礎コンクリートの縁端距離が短い場合，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.963~964，2001.9

(2002年9月10日原稿受理，2003年2月4日採用決定)