

論文 鉄骨部材と RC 部材を接合するアンカーボルトの側方破壊耐力に及ぼす縁端距離の影響

浅田 勇人*1・吉敷 祥一*2・山田 哲*3

要旨: 単体アンカーボルトのせん断載荷実験を行うとともに既往の試験体のデータベースを作成し、側方破壊の最も基本的なパラメータである縁端距離が側方破壊耐力に及ぼす影響を検討した。その結果、合成構造設計指針の耐力評価式では縁あき距離の減少に伴う耐力の低下を適切に評価できておらず、縁あき距離が端あき距離の 1.5 倍未満であると側方破壊耐力を過大評価する可能性があることがわかった。一方、Hofmann らによって提案された評価式は、全体的に過大評価する結果となったが、縁あき距離の減少に伴う耐力の低減効果を適切に評価できており、縁端距離に関わらず、実験結果と安定してよい対応を示した。

キーワード: 鉄骨部材, アンカーボルト, 側方破壊挙動, 縁端距離, 破壊耐力

1. はじめに

鉄骨造建築物の露出型柱脚や S+RC の混合構造では、鉄骨構造と鉄筋コンクリート構造の接合にアンカーボルトが使用される。このアンカーボルトはコーン状破壊の防止や引抜き剛性を確保するために埋込み長さを長くしたものが多く存在する。埋込み長さの長いアンカーボルトを使用した接合部の地震被害としては、アンカーボルトの伸び出し、破断などの被害とともに鉄筋コンクリート構造側の破壊がある。後者のうち端あき距離（応力方向に対するコンクリート母材自由端までの距離）が少なく、大きなせん断力が生じる部位では側方破壊が生じる。この側方破壊の耐力評価式は各種合成構造設計指針・同解説¹⁾によって評価式(以下、指針式)が示されているが、その適用性は、広範な埋め込み長さや軸径をもつアンカーボルトに対して十分に検証されているとは言い難い。

一方、これまでに側方破壊については、埋込み長さが短いアンカーボルトを対象として比較的多くの研究が行われてきた^{例えば2)~4)}。しかしながら、鉄骨造柱脚に使用されるような埋込み長さが軸径の 20 倍以上となるアンカーボルトを対象とした研究は河野らによる研究⁵⁾⁶⁾などがあるがその数は少なく、側方破壊耐力に最も影響のある縁端距離についても十分に議論されていない。

本研究ではアンカーボルト単体のせん断載荷実験を行うとともに、既往の試験体のデータベースを作成し、側方破壊の最も基本的なパラメータである縁端距離が側方破壊耐力へ及ぼす影響について把握するとともに、既往の耐力評価式の適用範囲について検討する。

2. せん断載荷実験

2. 1 試験体形状

試験体形状を図-1 に示す。試験体は鉄骨造露出型柱脚を想定したアンカーボルトと、立上部及び基礎梁の一部を模擬した鉄筋コンクリート立上部からなる。アンカーボルトの埋込み状況を図-2 に示す。本実験は露出型柱脚に使用するアンカーボルトを想定して埋込み長さ l_e は 400mm、軸径 d (呼び名) は 19mm と 23mm の 2 種類とした。なお、埋込み長さは軸径に対して、それぞれ約 20 倍、17 倍である。アンカーボルト下部には $\phi 60 \times 22$ のアンカープレートをナットに溶接して固定した。アンカーボルトはコンクリートの側方破壊に先行して、塑性化が著しく進展しないように SBPR1080/1230 の PC 鋼棒とした。鉄筋コンクリート部の立上部形状は、平面形状が 600×600 mm、高さ 500mm となっており、この立上部内にアンカーボルトを埋設する。使用したコンクリートは全試験体とも、同一の調合設計とした普通コンクリートである。なお、試験体は図-1 に示したようにアンカーボルト周辺にせん断力の加力方向に対して平行となる鉄筋は一切配さず、加力方向の端あき距離に近い側には立上部主筋も配筋していない。コンクリートと鋼材の機械的性質を表-1 に示す。

2. 2 実験パラメータ

試験体一覧を表-2 に示す。本実験の主たるパラメータであるアンカーボルトの縁端距離の定義を図-3 に示す。アンカーボルトの端あき距離 c_1 とは加力方向のコンクリート立上部自由端までの距離とし、縁あき距離 c_2 は加力方向に対して直交する側のコンクリート立上部の自由端までの最小距離とした。基準試験体の端あき距離 c_1

*1 日本学術振興会特別研究員 (東京工業大学大学院生) 修士(工学) (正会員)

*2 東京工業大学 建築物理研究センター 助教 博士 (工学) (会員外)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授 博士 (工学) (会員外)

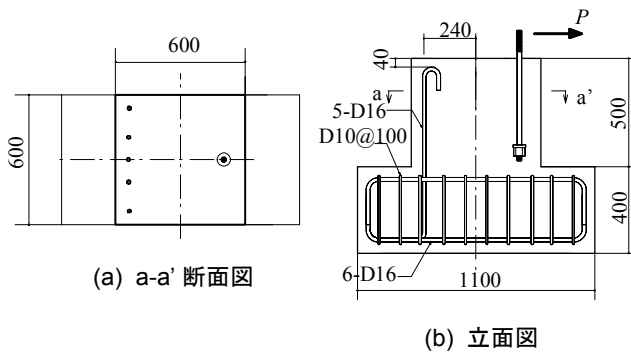


図-1 試験体形状

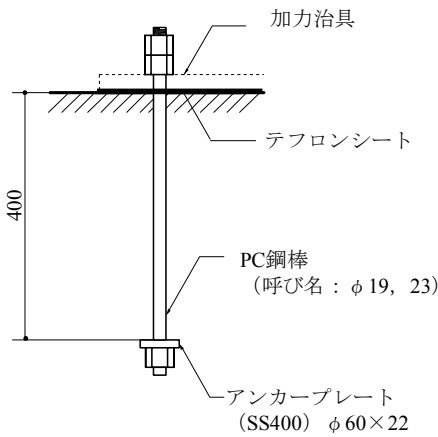


図-2 アンカーボルトの埋込み状況

表-2 試験体一覧

試験体名	アンカーボルト		端あき距離 c_1 [mm]	縁あき距離 c_2 [mm]
	軸径 d [mm]			
U-100	φ 23		100	300
U-160			160	($=1.9c_1$ 以上)
U-100(100)			100	$120(=1.0 \cdot c_1)$
U-160(240)				$240(=1.5 \cdot c_1)$
U-160(200)				$200(=1.25 \cdot c_1)$
U-160(160)				$160(=1.0 \cdot c_1)$
U-160(80)				$80(=0.5 \cdot c_1)$
U-160_19		φ 19		

は160mmとし、縁あき距離 c_2 は300mmとした。縁あき距離は端あき距離に対して1.9倍程度となる。端あき距離 c_1 の減少による影響を確認するために、縁あき距離を基準試験体と同一とし、端あき距離を100mmとした試験体を1体用意した。また、端あき距離 c_1 に対する縁あき距離 c_2 の減少による影響を検討するために端あき距離 c_1 に対して縁あき距離 c_2 を0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 1.9, 3.0倍($=c_2/c_1$)とした計6種類を用意した。さらに、アンカーボルトの軸径あるいは曲げ剛性が耐力へ与える影響を確認するために、他の試験体と同じ埋込み長さで軸径のみを19mmとした試験体を1体用意した。以上のパラメータを反映させた計8体である。

表-1 使用材料の機械的性質

(a) コンクリート

割裂強度	圧縮強度	ヤング係数
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
2.03	24.7	2.36×10^4

W/C=68%, スランプ値12cm 骨材の最大粒径は13mmである。セメントは早強ポルトランドセメントである。

(b) アンカーボルト

鋼種	降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	破断伸び [%]
PC鋼棒(φ19)*1	1187	1269	12
PC鋼棒(φ23)*1	1217	1282	12

*1: ミルシートによる。

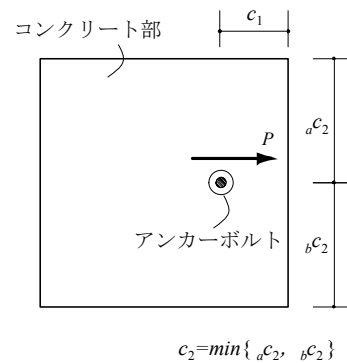


図-3 縁端距離の定義

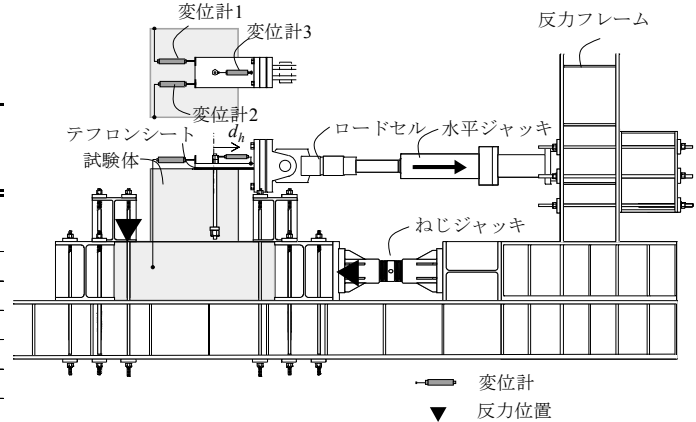


図-4 セットアップ

2.3 荷重方法と計測計画

試験体のセットアップを図-4に示す。試験体と加力治具はコンクリート立上部から突出したアンカーボルトを加力治具にナットで手締めにて固定した。ナットはダブルナットとした。加力治具とコンクリート立上部上面の摩擦を軽減するために、加力治具の下面とコンクリートの間にテフロンシートを介させた。試験体に作用する水平荷重 P は水平ジャッキに装備されたロードセルによって測定した。加力点の水平変位 d_h は図-4に示すばね式変位計1,2によって計測したコンクリート部に対する相対水平変位(変位計1,2の計測値の平均値)から加力治具上に設置した変位計3によって計測したアンカー

ボルトと加力治具の孔間のクリアランスによるあそびを差し引いたものとした。試験体は鉄筋コンクリート基礎の基礎梁を模した部分の上面と側面を鉄骨治具によってそれぞれ反力フレームに固定し、水平と鉛直の反力をとった。載荷は水平ジャッキによって試験体を破壊に至らしめるまで単調に行った。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊状況

本実験の試験体はいずれも側方破壊に至った。破壊面形状の例を図5-(a)~(c)に示す。計測はレーザー式変位計を用いて破壊面を30mmまたは15mmピッチ(端あき距離が100mmの試験体)のグリッドの交点について行った。図-5(a)のように端あき距離が100mmの試験体は半円錐状の破壊面を形成した。一方、端あき距離 c_1 を160mmとした試験体については、縁あき距離 c_2 を端あき距離 c_1 の約1.9倍確保したにもかかわらず、図-5(b)のように破壊面が側面に達しており、上面からみると概ね長方形のような破壊面を形成した。また、アンカーボルトの端あき距離と縁あき距離が等しい試験体では、図-5(c)のように、縁あき距離が少ない側では側面に達しており、縁あき距離が十分な側では半円錐状に広がる形状となった。なお、この実破壊面の水平投影面積にコンクリートの引張割裂強度を乗じた見かけの破壊耐力はいずれの試験体でも実験結果を大幅に上回っており、筆者らが引抜き実験で同様の知見⁷⁾を得たように最終的な破壊面の大きさや形状が実際の破壊耐力と直接的に対応しない。

3.2 水平荷重-水平変位挙動

アンカーボルトの縁端距離が異なる試験体の水平荷重 P -水平変位 d_h 関係を図-6(a), (b)に示す。縁端距離の違いが初期の剛性へ及ぼす影響はほとんどみられない。また、最大耐力時の水平変位は縁あき距離の減少に伴い耐力が低下することによって若干小さくなるが、本実験の範囲では最大耐力時における水平変位に及ぼす縁あき距離の影響は小さい。

3.3 既往の耐力評価式

本研究では側方破壊耐力の計算値を、式(1)の指針式と、式(2)のHofmannによって提案されたCCD(Concrete

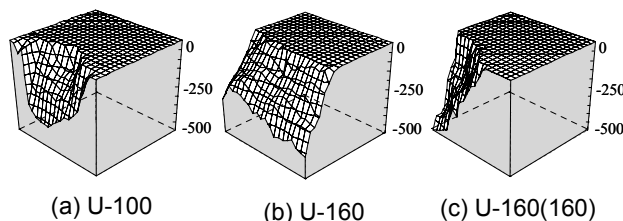
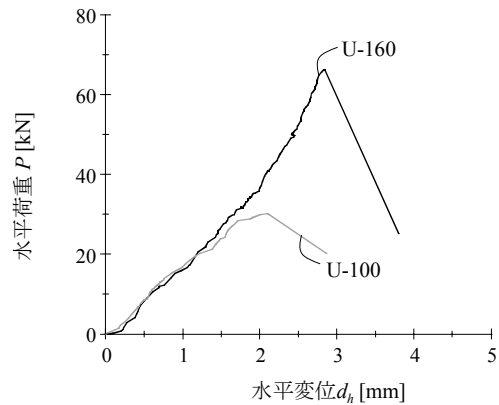
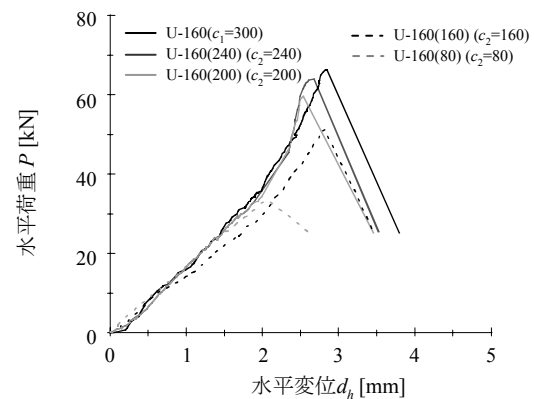


図-5 破壊面形状の例



(a) 端あき距離 c_1 による影響



(b) 縁あき距離 c_2 による影響

図-6 水平荷重 P -水平変位 d_h 関係

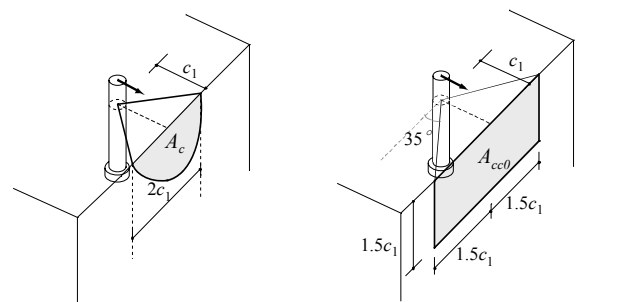


図-7 指針式で計算上想定する破壊面

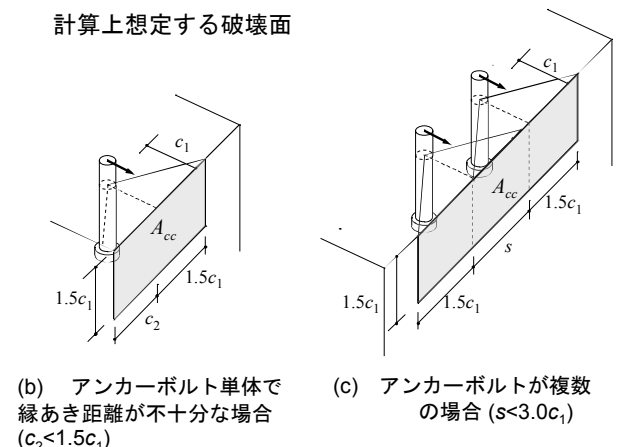


図-8 CCD式で計算上想定する破壊面

Capacity Design)法に基づく破壊耐力評価式⁸⁾(以下, CCD式)によって算出した。以下に各評価式について説明する。指針式は, ACI349-76⁹⁾を参考とした式であり, 図-7に示すようにアンカーボルト軸心から 45°に広がる半円錐状の破壊面を仮定し, その有効投影面積 A_c にコンクリートの引張強度 ($=0.31\sqrt{\sigma_B}$) を乗じたものを破壊耐力とした評価式である。

$$A_{U-c}P_u = 0.31\sqrt{\sigma_B} \cdot A_c = 0.31\sqrt{\sigma_B} \cdot \frac{\pi \cdot c_1^2}{2} \quad (1)$$

ここで, σ_B :コンクリート圧縮強度, c_1 :端あき距離である。

CCD式は線形破壊力学に基づく端あき距離に対する寸法効果¹⁰⁾を考慮し, 指針式のように端あき距離 c_1 の2乗に比例するのではなく, c_1 の1.5乗に比例する式となっている。またアンカーボルトの軸径及び埋込み長さの影響を考慮している。

$$CCD_c P_u = \frac{A_{cc}}{A_{cco}} \cdot \Psi_{s,v} \cdot P_0 \quad (2)$$

$$P_0 = 3.0 \cdot d^\alpha \cdot l_e^\beta \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot c_1^{1.5} \quad (3)$$

$$\alpha = 0.1 \cdot \left(\frac{l_e}{c_1}\right)^{0.5} \quad (4) \quad \beta = 0.1 \cdot \left(\frac{d}{c_1}\right)^{0.2} \quad (5)$$

$$\Psi_{s,v} = 0.7 + 0.3 \cdot c_2 / (1.5 \cdot c_1) \leq 1 \quad (6)$$

ここで, l_e :埋込み長さ, d :アンカーボルト軸径である。

CCD式では図-8(a)に示す 35°に広がる破壊面を想定し, その側方側の有効投影面積を用いて縁あき距離 c_2 及びアンカーボルトの群効果による影響を評価する。まず, 図8-(a)に示すアンカーボルト1本が縁あき距離の影響を無視するために必要な最小の有効投影面積 A_{cc0} (端あき距離 c_1 の3倍の幅と c_1 の1.5倍の高さをもつ長方形)を算出する。図8-(b)のようにアンカーボルトが十分な縁あ

き距離をもたず, 縁あき距離が c_2 の場合には, 投影面積 A_{cc} を計算し, 縁あき距離の不足による耐力への影響を A_{cc0} との面積比によって得る。さらに, 縁あき距離 c_2 が $1.5c_1$ より小さいときは, 縁あき距離 c_2 の不足による応力分布の修正が必要となり, そのための補正係数 $\psi_{s,v}$ を考慮する。また, 図8-(c)のようにアンカーボルトが複数存在し群効果による影響を考慮する際も同様にアンカーボルト間距離 s ($<3.0c_1$) を反映した投影面積 A_{cc} と A_{cc0} との面積比によってその影響を評価する。なお, 本研究では偏心荷重を加えておらず, コンクリート立上部の高さも $1.5c_1$ より大きいためそれらの影響はなく, 式(2)については偏心荷重の影響及び立上部高さの影響による補正係数は省略して示している。

3.4 側方破壊耐力

3.4.1 縁端距離の影響

実験結果一覧を表-3に示す。表中には各評価式によって算出した側方破壊耐力の計算値も併せて示してある。同一の端あき距離をもち $c_2/c_1=1$ である試験体の最大耐力 $eP_u(c_2/c_1=1)$ で除し基準化したものを, 端あき距離に対する縁あき距離の比 c_2/c_1 との関係として図-9に示す。図中には, 同一の縁端距離と埋込み長さをもち軸径のみ 19, 23mm とした試験体が併せて示してあるが, 両者の最大耐力の差異はほとんどなく, 軸径あるいは曲げ剛性の影響による側方破壊耐力への影響は小さいことが確認できる。縁あき距離の影響についてみると, 端あき距離の大小にかかわらず端あき距離に対する縁あき距離の比 (c_2/c_1) の減少によって最大耐力が低下している。端あき距離と縁あき距離が等しい $c_2/c_1=1.0$ の試験体の最大耐力に比べて, $c_2/c_1=0.5$ の試験体は 30%程度低下している。一方, $c_2/c_1=1.0$ の試験体に比べて $c_2/c_1=1.9$ 倍以上とした試験体では最大耐力は上昇する傾向にあるが, $c_2/c_1=1.5$ の試験体と $c_2/c_1=1.9$ 以上の試験体の最大耐力では差異が

表-3 実験結果一覧

試験体	eP_u *1 [kN]	$A_{U-c}P_u$ *2 [kN]	$CCD_c P_u$ *3 [kN]	$eP_u/A_{U-c}P_u$	$eP_u/CCD_c P_u$
U-160	66.27	61.92	74.39	1.07	0.89
U-100	30.16	24.19	43.63	1.25	0.69
U-100(100)	24.02	24.19	32.72	0.99	0.73
U-160(240)	63.99	61.92	74.39	1.03	0.86
U-160(200)	59.57	61.92	64.78	0.96	0.92
U-160(160)	51.43	61.92	55.79	0.83	0.92
U-160(80)	33.34	49.82	39.67	0.67	0.84
U-160_19	63.35	61.92	71.08	1.02	0.89

*1 eP_u :最大耐力。*2 指針式より算出した側方破壊耐力の計算値。

*3 CCD式より算出した側方破壊耐力の計算値。

*4 各計算値の相関性をみると,

$eP_u/A_{U-c}P_u$ の平均値は, 0.98, 変動係数は 0.17 である。

$eP_u/CCD_c P_u$ の平均値は, 0.84, 変動係数は 0.10 である。

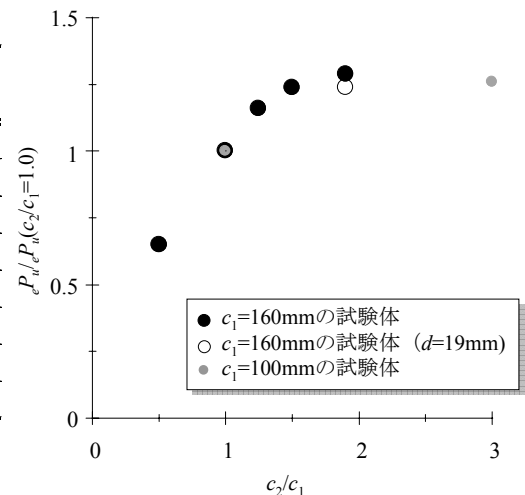


図-9 最大耐力 eP_u と c_2/c_1 の関係

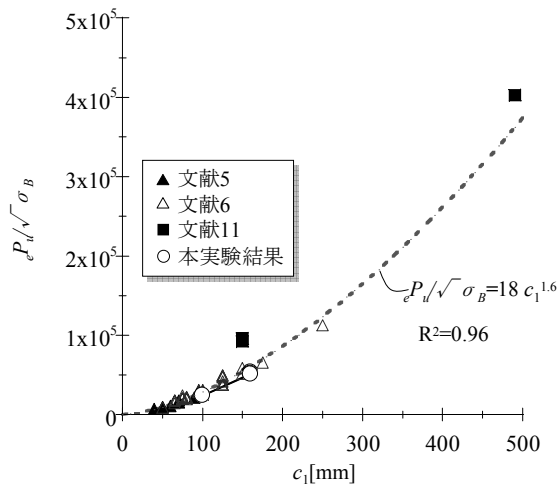
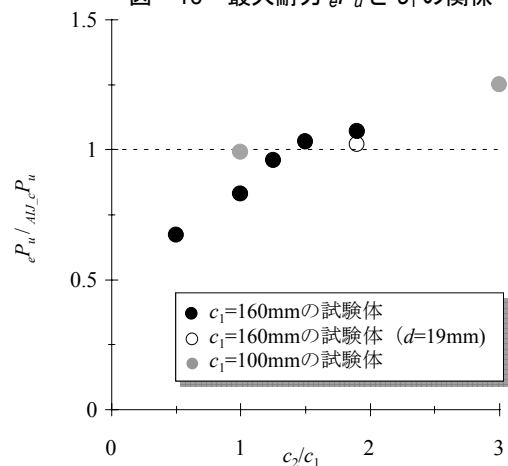
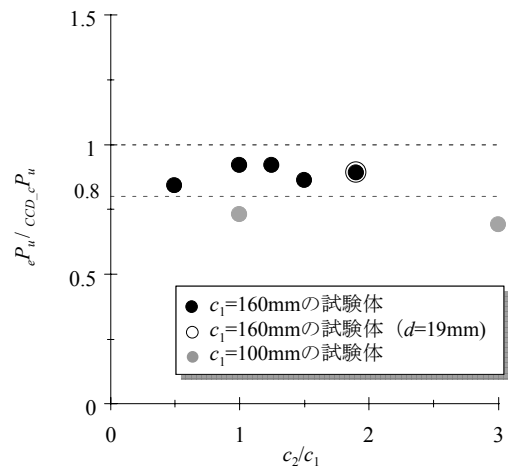


図-10 最大耐力 eP_u と c_1 の関係



(a) 指針式の計算値と実験値との比較



(b) CCD式の計算値と実験値との比較

図-11 実験値と計算値の対応 (c_2/c_1 との関係)

小さい。換言すれば、端あき距離に対する縁あき距離の比 (c_2/c_1) が 1.5 未満であると縁あき距離の影響による側方破壊耐力の減少が顕著になると言える。

次いで、端あき距離の影響 c_1 について考察する。本実験では、端あき距離 c_1 が 2 種類しかないため、既往の実験結果を含めて検討する。本実験結果と文献 5), 6), 11) に示された既往の試験体の側方破壊耐力の実験値をコン

表-4 既往の試験体の主な変動因子の範囲

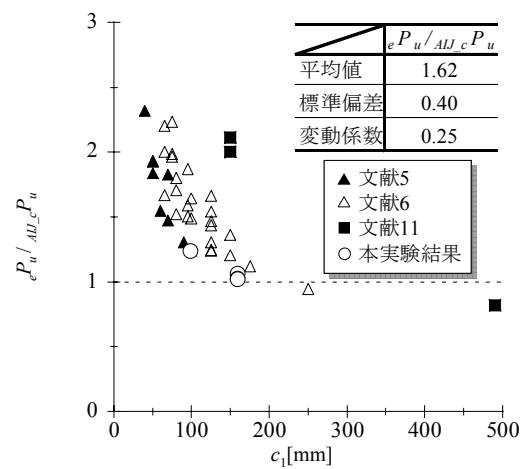
	σ_B [N/mm ²]	c_1 [mm]	c_2 [mm]	l_e [mm]	d [mm]
文献5 (計8体)	20.4~29.7	40~100	200	213~394	11~20
文献6 (計26体)	29.6	50~250	200~575	200~350	12.4~47.8
文献11 (計3体)	27.6~29.1	150~490	900	399	42

σ_B : コンクリート圧縮強度, c_1 : 端あき距離, c_2 : 縁あき距離, l_e : 埋込み長さ, d : 軸径。

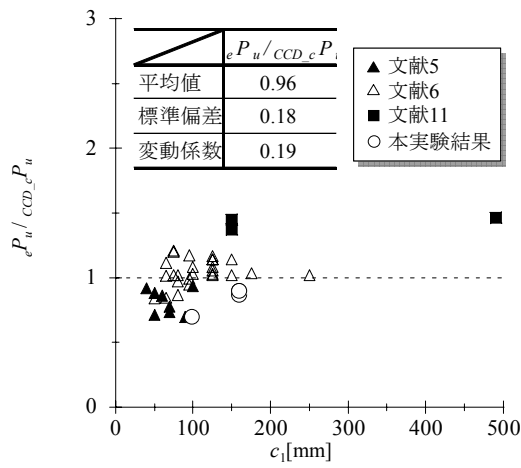
※アンカーボルトの種類はすべて先付けアンカーボルトである。

※全試験体ともアンカーボルト周辺は無筋である。

※全試験体とも縁あき距離は端あき距離の 1.5 倍以上確保してある。



(a) 指針式の計算値と実験値との比較



(b) CCD式の計算値と実験値との比較

図-12 実験値と計算値の対応 (c_1 との関係)

クリート圧縮強度の平方根で除したものと、端あき距離 c_1 との関係を図-10 に示す。既往の試験体 (計 37 体) の主な変動因子の範囲は表-4 に示すとおりである。ここでの検討では、縁あき距離の影響を無視するために、 $c_2/c_1=1.5$ 以上の試験体を対象としている。

破壊耐力は端あき距離 c_1 と強い相関性がみられることが確認できる。また、実験データを累乗近似したものを

図中に併せて示す。その相関係数の二乗値 ($=R^2$) は、0.96 となり高い相関性を示すものとなっている。耐力は端あき距離の概ね 1.6 乗に比例することが確認でき、CCD 式における端あき距離の考慮方法と適合がよいことがわかる。

3. 4. 2 評価式による計算値との対応

最大耐力 eP_u と各評価式によって算出した計算値を比較する。最大耐力と各式による計算値を比較したものを、横軸を端あき距離に対する縁あき距離の比 c_2/c_1 として図-11(a), (b)に示す。指針式によって算出した計算値は、縁あき距離が端あき距離の 1.5 倍以上確保した試験体の最大耐力と良好に対応しているが、縁あき距離が端あき距離の 1.5 未満である試験体の最大耐力については過大評価している。また、全体的に端あき距離に対する縁あき距離の減少にともない実験値を過大評価する傾向にある。これは指針式が端あき距離と同等の半径を有する半円錐状の投影面積によって縁端距離の影響を評価していることから、縁あき距離の減少による影響は $c_2/c_1=1$ 未満でなければ考慮されず、 $c_2/c_1=1$ 未満であっても投影半径の面積の減少は低減効果として適切でないことによる。つまり、指針式は縁あき距離を端あき距離の 1.5 倍以上確保していなければ、耐力を過大評価する可能性がある。一方、CCD 式による計算値は全体的に実験値を過大評価する傾向にあるが、縁あき距離が端あき距離の 1.5 倍未満であっても、縁あき距離の減少による耐力の低減効果を表現できており、縁あき距離が小さい試験体については、指針式よりも対応が良いことがわかる。

次いで、最大耐力 eP_u と各式による計算値を比較したものを、横軸を端あき距離 c_1 として図-12 (a), (b)に示す。ここでも、縁あき距離の影響を無視するために、 $c_2/c_1=1.5$ 以上の試験体を対象とした。指針式は端あき距離による寸法効果を適切に考慮していないため、端あき距離が小さい場合では、実験値を大きく過小評価し、端あき距離が大きくなると実験値を過大評価する。また、全体的に両者の対応にばらつきが大きい。一方、CCD 式により算出した計算値は、端あき距離による寸法効果を適切に評価できているため、端あき距離の大小にかかわらず実験値と良好に対応するが、やや過大評価する傾向にある。

4. おわりに

以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 縁あき距離の減少に伴い最大耐力が減少することを確認し、概ね縁あき距離が端あき距離の 1.5 倍未満となると縁あき距離の不足による側方破壊耐力の減少が顕著となることを示した。また、既往のデータベースを含めて検討した結果、端あき距離と最大耐

力は強い相関性を示し、最大耐力は概ね端あき距離の 1.6 乗に比例する。

- 2) 合成構造設計指針に示された耐力評価式は、縁あき距離の減少に伴う耐力の低下を適切に評価できておらず、縁あき距離が端あき距離の 1.5 倍未満であると側方破壊耐力を過大評価する可能性がある。また、端あき距離による寸法効果を適切考慮できておらず、端あき距離が大きくなると、実験結果を過大評価するおそれがある。
- 3) Hofmann によって提案された評価式 (式(2)) は、側方破壊耐力を全体的にやや過大評価するが、縁あき距離の減少に伴う耐力の低減効果を適切に評価できており、縁端距離に関わらず実験結果と安定してよい対応を示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説 1985
- 2) 松崎 育弘他：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 9 頭付きアンカーの支持耐力とへりあき寸法との関係、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1573-1574, 1981. 9
- 3) Klingner, R. et al. : Shear Capacity of Short Anchor Bolts and Welded Studs: Literature Review, ACI Journal, Vol.79, No.4, pp.270-279, 1982
- 4) Fuchs, W. et al. : Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete, ACI Structural Journal, V.92, No.1, pp.73-94, 1995
- 5) 河野 久夫他：鋼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、日本建築学会構造系論文集, No.567, pp.141-148, 2003. 5
- 6) 河野 久夫他：埋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
- 7) 浅田 勇人他：鉛ダンパー接合用アンカーボルトの引抜き挙動に関する基礎実験、日本建築学会構造系論文集, No.649, 2010. 3
- 8) Hofmann, J. : Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen unter beliebiger Querbelastung in ungerissenem Beton, 2004 (in German)
- 9) Proposed Addition to Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures(ACI 349-76), ACI Committee 349, ACI Journal, August, 1978.
- 10) Eligehausen, et al. : Anchorage in Concrete Construction, Ernst & sohn, 2006.
- 11) 市橋 一郎他：原子力発電所の機器定着部（基礎ボルト）に関する実験研究、太径アンカせん断実験、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.159-160, 1987. 10