

論文 組合せ荷重を受けるアンカーボルトの力学的挙動に関する実験研究

白井 佑樹^{*1}・戸松 一輝^{*2}・山田 哲^{*3}・坂田 弘安^{*4}

要旨：頭付きアンカーボルト，接着系アンカーボルトに組合せ荷重を作用させ，破壊性状，終局耐力，及び剛性について検討を行った。その中で，縁端距離についても検討した。破壊性状は，加力方向に応じて異なる傾向を示し，多くの試験体がコーン状破壊を示した。終局耐力は，既往の計算値では危険側に評価する傾向にあった。荷重 - 変位関係を基に検討した剛性は，頭付きアンカーボルトと接着系アンカーボルトで異なる傾向があり，これは抵抗機構の違いに起因することを述べた。またこれにより加力方向に応じた違いも生じた。縁端距離は，破壊性状には影響を与えなかったが，終局耐力，剛性に影響を与える結果となった。

キーワード：頭付きアンカーボルト，接着系アンカーボルト，組合せ荷重，縁端距離

1. 序論

各種アンカーボルトは設備機器配管等の非構造部材の取付けに加え，耐震補強のための新設耐震要素等の構造部材の応力伝達を期待した接合要素としても用いられている。これまでアンカーボルトに関する多くの引張加力実験，せん断加力実験¹⁾，またこれらに基づいた解析²⁾により国内外で広く研究が行われ，終局強度算定式に基づいた設計指針が提案されている³⁾。

今後さらに，アンカーボルトの用途が拡大していくことが考えられる。その中で，応力伝達を期待した接合要素としてアンカーボルトを用いる上で，純引張応力，純せん断応力下の力学的挙動に加え，組合せ応力下の挙動についても検討していく必要があると考える。

以上より本研究では各種アンカーボルトに組合せ荷重を作用させ，破壊性状，終局耐力，及び剛性について検討を行う。併せて，へりあきに関する検討を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1 に試験体形状を示す。試験体の大きさは，長さ700mm，高さ400mm，幅を400mmと150mmとした。アンカーボルトは試験体コンクリート中央に配置し，その周辺，及びアンカーボルト軸芯から45°に広がる円錐状のコーン状破壊予想面を鉄筋が通らないよう，コンクリートは無筋とした。

表-1 に試験体一覧を示す。試験体は12体である。実験要因は，加力方向 θ ，アンカーボルト種類，へりあき距離 c である。コンクリート設計基準強度 F_c ，及び有効埋込み長さ le は共通である。加力方向 θ は，アンカーボ

ルト材軸方向からの傾きとして定義し，0， $\pi/6$ ， $\pi/3$ を設定した。アンカーボルトには，頭付きアンカーボルト（以下，Hボルト）と有機接着系アンカーボルト（以下，Pボルト）を設定し，HボルトにはSR235($\phi 16$)，SBPR1080/1230(17mm径)を，PボルトにはSD345(D16)，SHD685(D16)を用いた。これらの純引張応力下での抵抗機構は異なっており，それによる力学的挙動の違いについて検討する。鋼種はコンクリートで終局耐力が決定するよう決定した。表-2 にアンカーボルトの材料試験結果を示す。Hボルトの定着部にはボルト径に応じて，径の1.7，2.1倍の小径を有するナットを接合した。Pボ

表-1 試験体一覧

試験体	共通要因		変動要因		
	コンクリート設計基準強度	有効埋込み長さ	加力方向	アンカーボルト種類	へりあき距離
	F_c	le	θ		c
	N/mm ²	-	rad.	-	mm
H-0-200	13.5	$12d_a$	0	H	200
P-0-200				P	
H-30-200			$\pi/6$	H	
P-30-200				P	
H-60-200			$\pi/3$	H	
P-60-200				P	
H-0-75			75	0	H
P-0-75					P
H-30-75				$\pi/6$	H
P-30-75					P
H-60-75				$\pi/3$	H
P-60-75					P

但し，H：頭付きアンカーボルト，P：接着系アンカーボルト

*1 東京工業大学 総合理工学研究科 日本学術振興会特別研究員 DC 修士（工学）（学生会員）

*1 東京工業大学 総合理工学研究科

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授 工学（博士）

*4 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 工学博士（正会員）

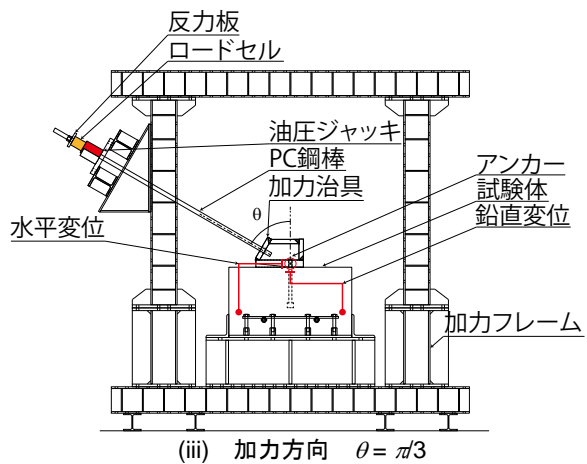
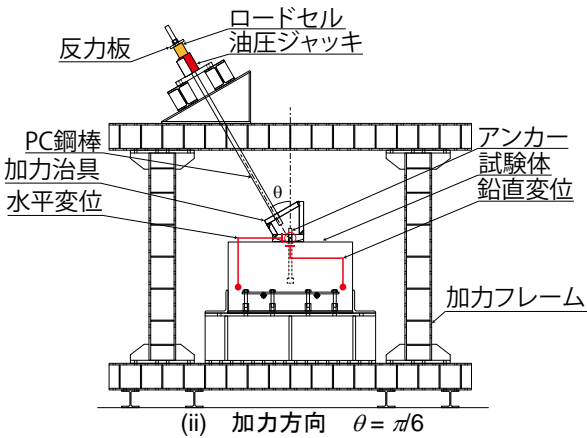
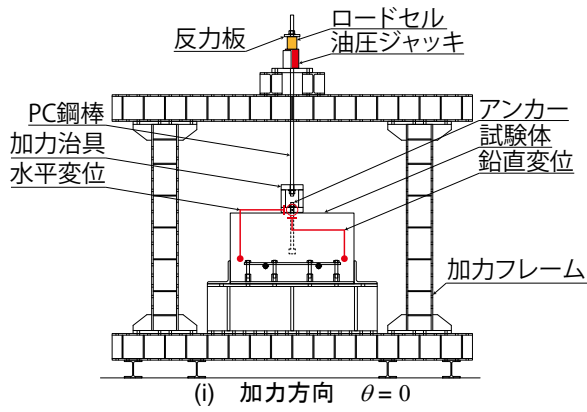


図-2 セットアップ状況, 及び計測状況

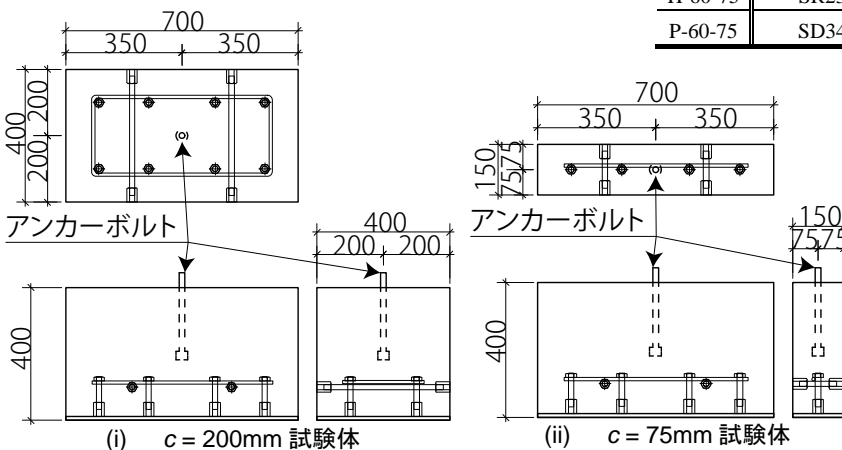


図-1 試験体形状

トの接着部には、回転・打撃式フィルムチューブタイプ有機系アンカーを用いた。へりあき距離 c は、 $c = 200\text{mm}$ と $c = 75\text{mm}$ を設定した。但し本論では、加力直交方向の縁端距離をへりあき距離とする。 $c = 200$ 試験体ではへりあきの影響は少ないと考えている。へりあきに偏心はない。コンクリート設計基準強度 F_c は 13.5N/mm^2 である。表-2 に実験時のコンクリートの材料試験結果を示す。骨材の最大寸法は 20mm とした。有効埋め込み長さは、 $12d_a$ とした。ここで d_a はアンカーボルトの直径である。

2.2 実験方法

図-2 にセットアップ状況, 及び計測状況を示す。加力フレームにアンカーボルトが垂直になるよう試験体をセットし、試験体を下部からボルトにより固定した。加力方向に応じた加力治具を介してアンカーボルトと、PC鋼棒、センターホール型油圧ジャッキ、ロードセル、そして反力板が接続されている。油圧ジャッキによるPC鋼棒の引張力の作用線が試験体コンクリート表面とアンカーボルトの界面に交わるようにした。加力は一方向載

表-2 使用材料の力学的特性

試験体	アンカーボルト		コンクリート		
	ボルト種類	降伏強度	圧縮強度	ヤング係数	引張強度
	-	σ_y	σ_B	$E_c(\times 10^4)$	σ_T
-	-	N/mm^2	N/mm^2		
H-0-200	SBPR1080/1230	1154	16.6	1.91	1.6
P-0-200	SHD685	760	16.5	1.89	1.5
H-30-200	SBPR1080/1230	1154	17.2	1.97	1.8
P-30-200	SHD685	760	16.8	1.93	1.6
H-60-200	SBPR1080/1230	1154	17.5	2.01	1.9
P-60-200	SHD685	760	17.5	2.01	1.9
H-0-75	SR235	320	16.4	1.88	1.5
P-0-75	SD345	385	16.4	1.88	1.5
H-30-75	SR235	320	16.6	1.91	1.6
P-30-75	SD345	385	16.7	1.92	1.6
H-60-75	SR235	320	17.4	1.99	1.8
P-60-75	SD345	385	17.4	1.99	1.8



(iii) Hボルト



(iv) Pボルト

荷とし、破壊が生じるまで行った。

計測項目は、ロードセルによる PC 鋼棒の軸力 n_e 、アンカーボルトの鉛直変位 δ_v 、水平変位 δ_H 、アンカーボルト (H ボルトのみ) に貼付した歪ゲージによる歪度である。図-2 に示すように変位は、加力治具に設置したターゲットにより計測した。そのため、コンクリート表面からターゲットまでのアンカーボルトの変形量を含んでいる。歪ゲージは、コンクリート表面から $2d_a$ 、 $4d_a$ 、 $10d_a$ の位置に、加力方向に合わせて表裏に計 6 枚貼付した。

3. 実験結果

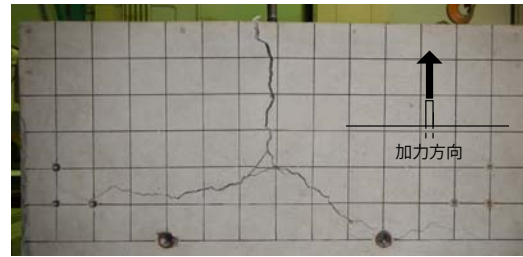
3.1 破壊性状

表-3 に試験体の破壊状況の一覧を示す。アンカーボルトの降伏は生じず、全ての試験体において、最大荷重時にコンクリートのコーン状破壊、及び割裂破壊が発生し、荷重は低下した。P ボルトの単純引張加力試験体 (P-0-) では、コンクリートからアンカーボルトが抜け出る性状に併せてコンクリートに割裂破壊が生じた。

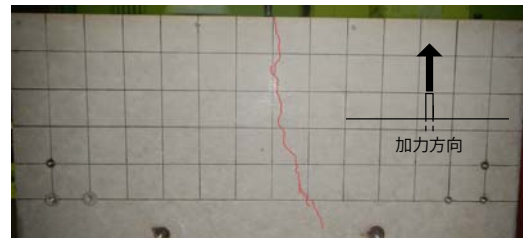
写真-1 に破壊性状の一例を示す。破壊面をみると、H ボルトの単純引張加力 ($\theta=0$) では、アンカーボルトの材軸に沿ってひび割れが生じ、材端位置から加力垂直方向左右にひび割れが進展した。それに対し P ボルトの単純引張加力 ($\theta=0$) では、材軸に沿ってひび割れが生じるのみであった。組合せ荷重を受ける場合 ($\theta=\pi/6, \pi/3$) では、H ボルト、P ボルトともに同様の破壊性状を示した。 $\theta=\pi/6$ 方向加力では、アンカーボルト材端を中心に、加力垂直方向に傾いた方向にひび割れが進展する傾向にあった。 $\theta=\pi/3$ 方向加力では、アンカーボルト材軸に沿ってひび割れが生じ、材端から加力垂直方向に傾いた方向にひび割れが進展する傾向にあった。へりあき距離 c の違いによる破壊性状の違いはなかった。P ボルトの割裂破壊を示した単純引張加力試験体を除く試験体においては、一般的なコーン状破壊状況⁴⁾とは異なる破壊形状が見られたが、文献⁵⁾にも示されているように、最終的な破壊面の形状と実際の破壊耐力とは対応しないと考え、ここではコーン状破壊とした。

3.2 終局耐力

表-3 に試験体の終局耐力の一覧を示す。終局耐力は実験時の最大荷重とした。加力方向 θ に応じて PC 鋼棒の軸力 n_e を分解し、アンカーボルト材軸方向の引張力成分 p_e と材軸垂直方向のせん断力成分 q_e を示す。併せて、各種合成構造設計指針・同解説³⁾による指針式の計算値を示す。計算値は実験の破壊性状に対応する式のみを示した。コーン状破壊の評価式については、elighausen ら⁶⁾による実験式の計算値も示す。式内において、へりあきの影響を考慮して式を展開している。但し低減係数 ϕ は考慮していない。式の詳細については参考文献を参照さ



(i) 加力方向 $\theta=0$ (H-0-75)



(ii) 加力方向 $\theta=0$ (P-0-75)



(iii) 加力方向 $\theta=\pi/6$ (H-30-75)



(iv) 加力方向 $\theta=\pi/3$ (P-60-200)

写真-1 破壊状況 (mesh@50mm)

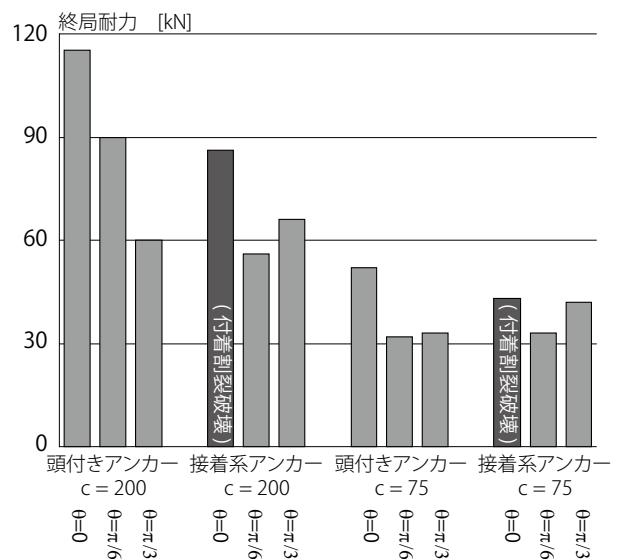


図-3 終局耐力

りたい。

図-3 に各試験体の終局耐力を示す。加力方向 θ に着目すると、 $\theta=0$ で最も耐力が高く、 $\theta=\pi/6$ と $\theta=\pi/3$ では低くなった。また $\theta=\pi/6$ と $\theta=\pi/3$ では同程度の耐力となった。P ボルトにおいては、単純引張加力 ($\theta=0$) と $\theta=\pi/6, \pi/3$ 方向加力で破壊性状が変化している。次にアンカーボルトの種類に着目すると、単純引張加力 ($\theta=0$) では、H ボルトの方がP ボルトより耐力は高い。これは破壊性状の違いによるものであり、アンカーボルトの抵抗機構の違いが影響している。それ以外の加力方向ではH ボルトとP ボルトで同程度の耐力となっている。これは破壊性状がともにコンクリートのコーン状破壊であったためである。最後にへりあきの違いに着目する。へりあき c が63%減少している $c=75$ 試験体では、同一の加力方向で比較すると45%から64%耐力が低下した。

実験値と計算値を比較する。図-4 には単純引張加力 ($\theta=0$) における実験値と計算値の関係を示す。但しここでは前述のように、計算値は実験時の破壊性状に対応する式のみを用いている。P ボルトの試験体と指針式³⁾の計算値は良く対応しており、またへりあき距離 $c=75$ 試験体においても同様であった。表-3 には指針式³⁾における付着劣化部 ($2d_a$) を考慮せずに算出した計算値を併せて示すが、その精度は向上している。H ボルトの試験体は40%から60%過大評価とする傾向にあった。これは文献³⁾で既に指摘されており、低減係数 $\phi=2/3$ を乗ずる形で対応している。本実験でも低減係数相当の66%を乗じることで、へりあき距離 $c=75$ 試験体も含めて良く対応していることが分かる。しかし低減係数に関しては工学的な根拠に乏しく、更なる検討が必要であると考えられる。

最後に実験式⁶⁾の計算値は、実験値と良く対応しており、へりあき距離 $c=75$ 試験体でも同様の結果であった。

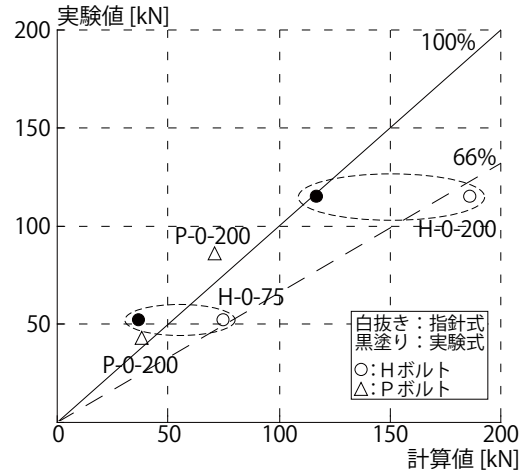


図-4 実験値と計算値の関係 ($\theta=0$)

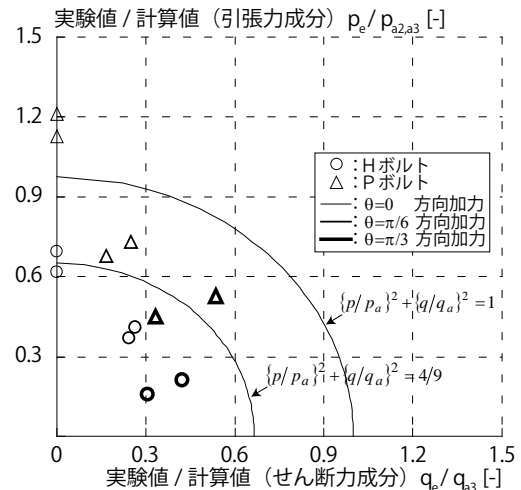


図-5 実験値と計算値の関係 ($\theta=0, \pi/6, \pi/3$)

表-3 実験結果一覧

試験体	破壊状況	実験値			指針式 ³⁾			実験式 ⁶⁾
		終局耐力			引張力を受ける時		せん断力を受ける時	引張力を受ける時
		PC 鋼棒軸力	引張力成分	せん断力成分	コーン状破壊	付着破壊	コーン状破壊	コーン状破壊
		n_e	p_e	q_e	p_{a2}	p_{a3}	q_{a3}	-
-	-	kN			kN			kN
H-0-200	コーン状破壊	115	115	-	186	-	-	117
P-0-200	付着割裂破壊	86	86	-	-	71(86)*	-	-
H-30-200	コーン状破壊	90	78	45	190	-	170	-
P-30-200	コーン状破壊	56	49	28	-	72	168	-
H-60-200	コーン状破壊	60	30	52	192	-	171	-
P-60-200	コーン状破壊	66	33	57	-	73	171	-
H-0-75	コーン状破壊	52	52	-	75	-	-	37
P-0-75	付着割裂破壊	43	43	-	-	38(46)*	-	-
H-30-75	コーン状破壊	32	28	16	75	-	66	-
P-30-75	コーン状破壊	33	29	16	-	39	66	-
H-60-75	コーン状破壊	33	16	28	77	-	67	-
P-60-75	コーン状破壊	42	21	36	-	39(46)*	67	-

(*) : 指針式において繰り返し荷重等の影響による付着劣化部の影響を考慮せずに算出した付着破壊耐力

図-5に、単純引張加力 ($\theta = 0$) と組合せ荷重を受ける $\theta = \pi/6, \pi/3$ 方向加力における実験値と計算値の関係を示す。但しここで、組合せ荷重を受ける P ボルト試験体の破壊性状はコーン状破壊であったが、引張方向の評価は付着破壊の計算値 p_{a3} を用いた。組合せ荷重を受ける場合、引張力成分 p_e とせん断力成分 q_e それぞれに対して計算値を算出し、それぞれ除する形で整理した³⁾。文献において、組合せ荷重を受ける場合の終局耐力は式(1)で算出されるとしている。これを図中に示す。

$$\{p/p_a\}^2 + \{q/q_a\}^2 = 1 \quad (1)$$

ここで、 p は引張耐力、 q はせん断耐力、 p_a, q_a は指針式の計算値である。図より、式(1)は加力方向 θ の傾きが大きくなるに従って引張力成分が低下し、せん断力成分が増大する傾向を捉えている。しかし、組合せ荷重を受ける全ての試験体に対して危険側に評価している。単純引張加力 ($\theta = 0$) での考察で、低減係数 ϕ を乗ずることで実験結果と良い対応をした。組合せ荷重を受ける場合の終局耐力にも同様の低減係数 ϕ を乗じて式(2)を展開した。

$$\{p/p_a\}^2 + \{q/q_a\}^2 = 4/9 \quad (2)$$

図中に式(2)を示すが、低減係数を乗じた場合でも組合せ荷重を受ける試験体に対して危険側に評価した。

3.3 荷重 - 変位関係

図-6,7,8に荷重 - 変位関係を、荷重には PC 鋼棒の軸

力 n_e を引張力成分 p_e とせん断力成分 q_e に分解して、変位にはそれぞれ δ_v, δ_H を示す。但しここに示す図は、各試験体で原点が重なるように横軸をシフトしている。

H ボルトの引張力成分 p_e と鉛直変位 δ_v の関係 ($p_e - \delta_v$ 関係) (図-6(a)) をみると、40kN 程度まで直線的に推移し、その後剛性が低下し終局耐力に至った。剛性の変化はアンカーボルトの降伏によるものより、周辺コンクリートの圧縮軟化によるものとする。次にせん断力成分 q_e と水平変位 δ_H の関係 ($q_e - \delta_H$ 関係) (図-6(b)) をみると、明確な剛性の変化点を示さずに一定に推移し、終局耐力に至った。また復元力特性は $p_e - \delta_v$ 関係、 $q_e - \delta_H$ 関係、ともに加力方向 θ にかかわらず同様となった。

P ボルトの $p_e - \delta_v$ 関係 (図-7(a)) をみると初期剛性は同様である。しかし荷重が大きくなるに従って、加力方向の傾き θ が大きい試験体は剛性が低下した。P-0-200 試験体では、70kN 程度でアンカーボルトの抜け出しを確認できる。P-60-200 試験体では 20kN 程度から剛性が緩やかに低下している。次に $q_e - \delta_H$ 関係 (図-7(b)) をみると、P-60-200 試験体では 40kN 程度で大きく剛性が低下した。アンカーボルトのせん断降伏強度は 87kN であるので、周辺コンクリートの圧縮軟化によるものとする。

H ボルトと P ボルトで比較すると、引張力成分に関し

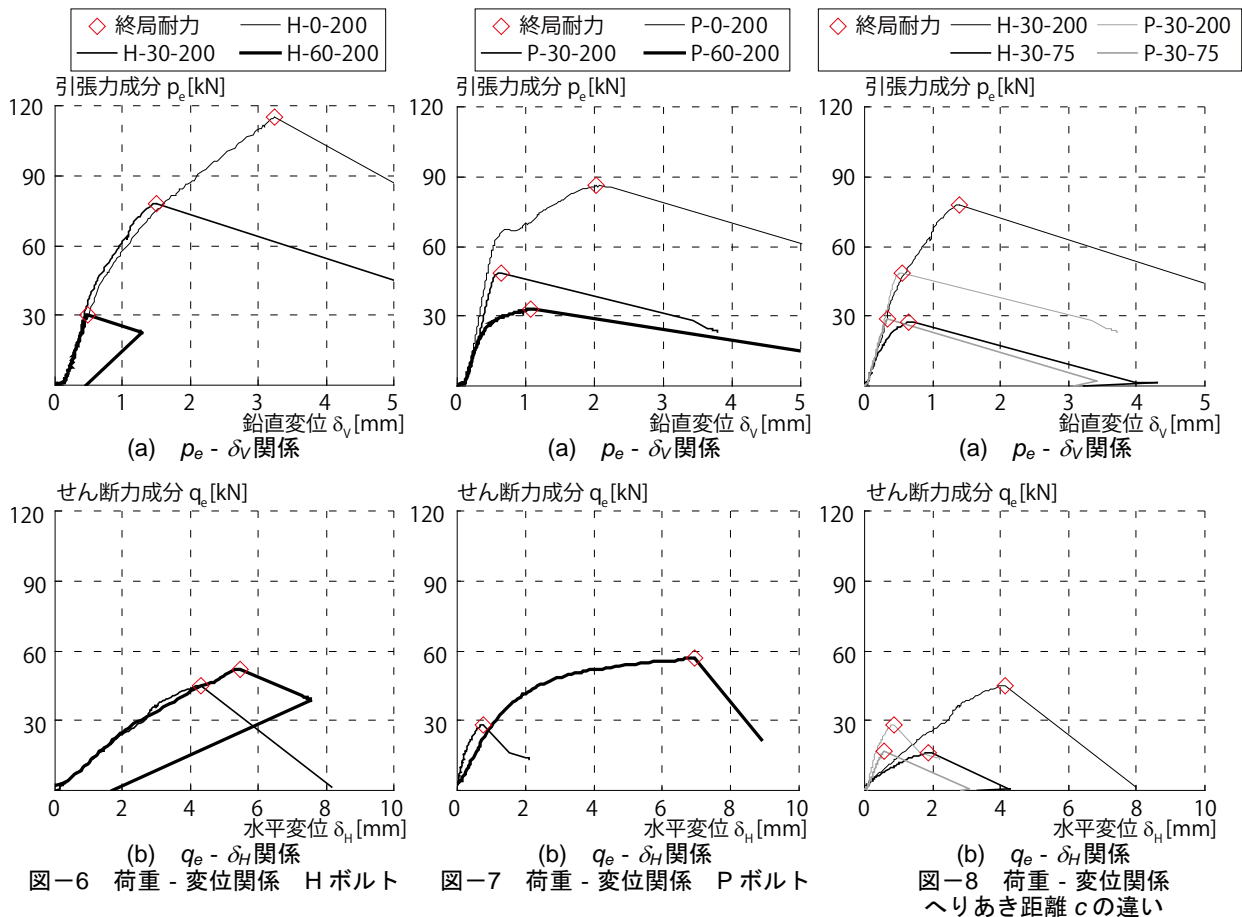


図-6 荷重 - 変位関係 H ボルト

図-7 荷重 - 変位関係 P ボルト

図-8 荷重 - 変位関係
へりあき距離 c の違い

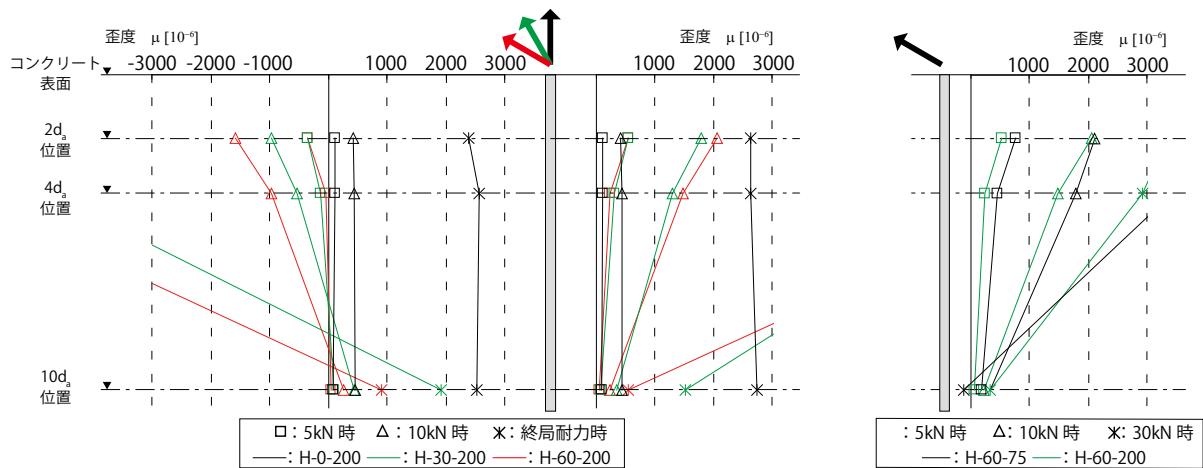


図-9 歪度分布 加力方向の違い

図-10 歪度分布
へりあきの違い

て、初期剛性には違いがあり、本実験ではPボルトの方が高い。これは両者の抵抗機構の違いであり、Hボルトは頭部の支圧により抵抗しているのに対し、Pボルトは軸部全長の付着により抵抗しているからである。またこの違いにより、Hボルトは緩やかに剛性が低下し、Pボルトは抜け出しを伴い急激に剛性が低下する特徴がある。さらにこれに起因して加力方向 θ に対しても、Hボルトは影響がほとんど見られないが、Pボルトではせん断力成分により付着が失われることで剛性が低下している。せん断力成分に関して、初期剛性は軸部の断面積が小さいPボルトの方が高い結果となった。

最後にへりあきの影響についてみると、終局耐力はへりあき距離 $c = 75$ 試験体が小さくなっている。 $p_e - \delta_v$ 関係(図-8(a))をみるとPボルトではへりあき距離 c に関わらず同様の剛性であった。一方Hボルトでは、へりあき距離 $c = 75$ 試験体で剛性劣化が早くにみられた。これより、軸部の付着により抵抗するPボルトに対して、頭部の支圧で抵抗するHボルトの復元力特性は、へりあきの影響を受けやすいことがわかる。せん断力成分について、両者のアンカーボルトとも、へりあきの影響を受け耐力、剛性ともに低下した。剛性劣化について、せん断力成分に対する抵抗機構はPボルトもHボルトと同様にコンクリートの支圧によるためだと考える。

3.4 歪度性状

図-9にHボルトに貼付した歪ゲージにより取得した歪度を加力方向 θ とPC鋼棒の軸力 n_e でまとめて示す。歪度は表裏に貼付したそれぞれのデータを示す。単純引張加力($\theta = 0$)では付着が喪失し、表裏ともに一様に歪が分布している。組合せ荷重を受ける試験体では、せん断力成分による影響で $2d_a, 4d_a$ 位置の表裏で分布が異なっているが、 $10d_a$ 位置では一様に分布している。これより、 $10d_a$ 位置ではせん断力成分の影響を受けないことが分かる。

図-10に歪度をへりあきの有無でまとめて示す。同一

の荷重において、へりあきを有する方が歪度は10%程度大きくなっていった。へりあきを有する試験体は、 $10d_a$ 位置の表裏の分布が異なっており、へりあき距離 c に応じてせん断力成分の影響範囲が変化することが分かった。

4. 結論

1. 破壊性状、終局耐力は加力方向によって異なる。
2. 荷重変位関係による剛性は、アンカーボルトの抵抗機構の違いにより異なる。

参考文献

- 1) 白阪靖人, 松崎育弘, 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1 コンクリートに埋込まれたスタッドボルトの引抜き耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.2480, pp.1375-1376, 1979
- 2) Y. LI, R. ELIGEHAUSEN, J. OZBOLT, B. LEHR: Numerical Analysis of Quadruple Fastenings with Bonded Anchors, *ACI Struct. J.*, Vol.99, No.2, pp.149-156, 2002
- 3) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, pp.252-300, 2010
- 4) 安藤祐太郎, 酒井悟, 中野克彦: RC造基礎梁に定着されたアンカーボルトの構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.649-654, 2007
- 5) 浅田勇人, 吉敷祥一, 山田哲: 鉄骨造露出型柱脚における鉄筋コンクリート基礎・アンカー系の側方破壊挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.654, pp.1517-1525, 2010
- 6) R. ELIGEHAUSEN, R. MALLEE, J. F. SILVA: *Anchorage in Concrete Construction*, Ernst & Sohn 2006