

[157] 錨板付基礎ボルトの静的破壊機構に関する実験的研究

正会員 中沢 好夫 (新日本製鐵設備技術本部)  
 長谷川昭美 (新日本製鐵設備技術本部)  
 木下 雅敬 (新日本製鐵設備技術本部)  
 正会員 ○本間 宏二 (新日本製鐵設備技術本部)

1. はじめに

製鉄設備における機械設備、建築物は種々のアンカーボルトを介してコンクリートに定着されているが、一般に呼び径30以上のものが使用されている。図1に示すように支圧部の形状がねじ込み錨板タイプであるアンカーボルトを錨板付基礎ボルトと称しているが、そのうち呼び径20mm~56mm(以下M20~M56)を対象とし、コンクリート部分の静的破壊機構の解明を目的とした実験を行なった。建築学会の「各種アンカーボルト設計指針<sup>1)</sup>」ではM25以下の頭付きアンカーボルトについて設計法を示しており、その中でコンクリート部分のコーン状破壊によって決まる許容引張力、及びアンカーボルト頭部に接するコンクリートの支圧強度から決まる許容引張力の算定式を与えている。しかしながら、対象とする錨板付基礎ボルトは、頭部の形状が頭付スタッドと異なりねじ込み錨板タイプであること、M25以上を対象とすることから、本指針によるコンクリートのコーン状破壊耐力推定式の適用性について検討する必要がある。そこで、M20~M56の錨板付基礎ボルトについて実際に引抜試験を実施し、錨板径、ボルトサイズの影響による破壊状況の確認、及び終局耐力に及ぼす影響について考察を行なうものである。

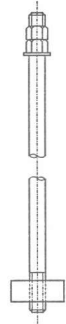


図1 錨板付

2. 実験内容

表1 供試体の仕様 基礎ボルト

2.1 供試体について

供試体の仕様は、ボルトサイズの影響を調べる目的のシリーズとしてCASE1, 2, 3, 4、錨板径の影響を調べる目的からCASE2, 5, 6を設定した。CASE1, 2, 3, 4については「各種アンカーボルト設計指針」の頭付きアンカーボルトの対象範囲を拡張してコンクリート躯体への埋込み長さ及び錨板径を決定した。その際、アンカーボルトの鋼材の降伏がコンクリートのコーン状破壊、支圧破壊に先行しないように、かつ、コンクリートのコーン状破壊で決定する許容引張力と支圧強度により決定する許容引張力が同等になるように設定した。また、錨板厚 $t$ についてはねじ部剪断破壊、および錨板の降伏を考慮して錨板径の0.45倍とした。CASE2, 5, 6についてはアンカーボルトの径 $d$ 、錨板厚 $t$ を一定とし錨板径のみを $2d$ から $5d$ までの間で3種類変化させた。コンクリート供試体の寸法については図3に示す載荷装置の反力梁の支点が破壊面を拘束しないようにボルト中心から反力梁支点までの長さは埋込み長さの3倍とし、供試体の高さは基礎ボルトの埋込み長さの3倍以上とした。そして、すべてのケースでアンカーボルト軸部にシリコングリースを塗布し油紙を巻きつけてコンクリートとの付着を切っている。

実験ケース	ボルト径 $d$ (mm)	錨板径 $D$ (mm)	錨板厚 $t$ (mm)	埋込長さ $L$ (mm)	A(mm)	B(mm)
CASE1	20	40	18	150	1500	500
CASE2	32	64	29	250	2100	800
CASE3	42	84	38	350	2900	1100
CASE4	60	112	50	470	3500	1500
CASE5	32	124	29	250	2100	800
CASE6	32	160	29	250	2100	800

2.2 実験用材料

1) コンクリート 使用したセメントは高炉セメントB種、粗骨材は高炉スラグ砕石、細骨材は山砂であり、混和材としてAE減水剤を用いた。コンクリートの配合は表2に、圧縮強度、引張強度試験結果を表3に示す。

2) 基礎ボルト 基礎ボルトの材料は引張強度が約110kg/mm<sup>2</sup>のSCM435及びSNM439を使用した。基礎ボルト軸部の引張強度試験結果を表4に示す。また、錨板についてはSS41を使用した。

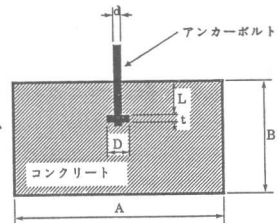


図2 供試体寸法

表2 コンクリートの配合

目標強度 (材令14日)	w/c	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
$\sigma_{14}=180$ (kg/cm <sup>2</sup> )	60%	299 kg/m <sup>3</sup>	179 kg/m <sup>3</sup>	835 kg/m <sup>3</sup>	922 kg/m <sup>3</sup>	0.598 kg/m <sup>3</sup>

表3 コンクリートの圧縮、引張強度試験結果

実験ケース	圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	ヤング係数 kgf/cm <sup>2</sup>	ポアソン比
CASE2-3	195	15.0	$1.96 \times 10^5$	0.20
CASE4-5	161	13.5	$1.72 \times 10^5$	0.21
CASE1-6	160	14.3	$1.62 \times 10^5$	0.20

(但し、引張強度は割裂試験による強度ヤング係数・ポアソン比は最大荷重の40%の点で求めた。)

### 2.3 載荷方法

載荷荷重は表5に示すように設計荷重 $P_0$ （基礎ボルト軸部の降伏荷重の2/3）、基礎ボルト軸部の降伏荷重 $P_y$ 、基礎ボルトの埋込まれたコンクリート躯体部分の破壊荷重 $P_{max}$ に至るまでの3サイクルで行なった。また、載荷速度の最大値は錨板上の支圧応力度の増分が $200\text{kg/cm}^2/\text{min}$ 以下となるように設定した。

### 2.4 測定項目

測定項目はロードセルを介して載荷荷重、ボルト上端及びコンクリート表面に取り付けた変位計により変位を測定した。また、錨板の表面、裏面に取り付けたひずみ計により載荷時に錨板に発生するひずみを測定した。載荷時および最大荷重に達した時のひびわれの発生を観察した。

表5 載荷荷重

実験ケース	設計荷重 $P_0$	降伏荷重 $P_y$ (SS41の場合)	載荷速度の最大値
case1 (M20)	4ton	6ton	2ton/min
case2 (M30)	10ton	15ton	4ton/min
case3 (M42)	21ton	32ton	8ton/min
case4 (M56)	36ton	54ton	14ton/min
case5 (M30)	10ton	15ton	4ton/min
case6 (M30)	10ton	15ton	4ton/min

表4 基礎ボルト軸部の引張強度試験結果

ボルトサイズ	材質	引張強さ $\text{kg/mm}^2$	ヤング係数 $\text{kg/mm}^2$	破断荷重 $\text{kg/mm}^2$
M20	SCM435	117.3	$2.08 \times 10^4$	173.7
M30	SCM435	117.9	$2.10 \times 10^4$	174.9
M42	SNCM439	115.1	$2.07 \times 10^4$	161.7
M56	SNCM439	114.1	$2.08 \times 10^4$	164.4

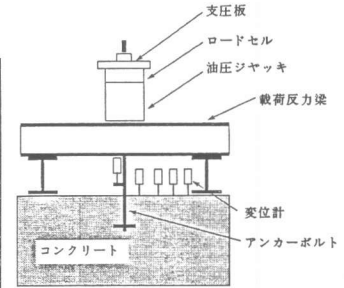


図3 載荷装置

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 破壊状況

1) コンクリート表面のひびわれ 全てのケースにおいて載荷荷重が終局荷重に達した直後にコンクリート表面にひび割れが発生した。そのひび割れの状況は図4に示すようなボルトを中心とする円形のひび割れとその周囲に放射状のひび割れが観察された。この円形のひび割れの半径とコーン状破壊面の有効水平投影面の半径(図5参照)とを比較した結果を表6に示す。これによるとボルトサイズを変化させたCASE1, 2, 3については円形のひび割れの半径と有効水平投影面の半径が一致しているのに対し、錨板径を変化させたCASE5, 6については円形のひび割れの半径が有効水平投影面の半径の1.2~1.4倍と錨板径が大きくなる程、円形のひび割れの半径は大きくなっている。

2) コーン状破壊の観察 さらに破壊したコンクリート塊を引抜き、内部の破壊状況を観察すると、図4に示すように全てのケースにおいて錨板を頂点とするコーン状であり、その外径はコンクリート表面で観察された円形のひび割れの径よりも大きい。また、支圧応力が最も大きい錨板に接する部分の状況は、CASE1, 2, 3, 4のシリーズではいずれもコンクリートの粉化が見られた。CASE5, 6の錨板径の大きいシリーズでは支圧応力による粉化は確認されなかった。表7に実験時の最大荷重に対する錨板上の支圧応力分布を等分布とした時の支圧応力度 $\sigma_b$ とコンクリートの圧縮強度 $F_c$ との比 $\sigma_b/F_c$ の値を示す。粉化の著しいCASE1, 2, 3, 4では $\sigma_b/F_c$ の値は7~9であるのに対し、CASE5, 6の場合は $\sigma_b/F_c$ の値は1~2にあることがわかる。このことから支圧応力度 $\sigma_b$ と圧縮強度 $F_c$ の比 $\sigma_b/F_c$ の値が1~2程度であれば支圧応力による粉化はおこらずに7以上になると著しい粉化をおこしていたことがわかる。

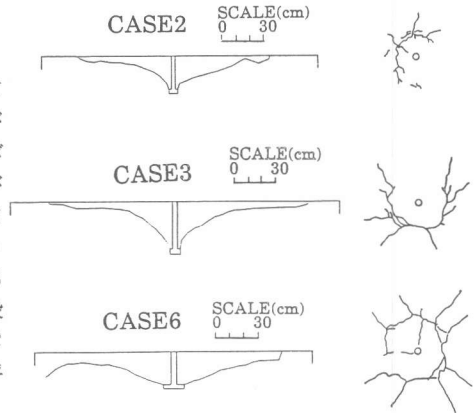


図4 コンクリート表面のひび割れとコーン状破壊の断面形状

表6 有効水平投影面の半径との比較

	観察された円の半径(m/m)	水平投影面の半径(m/m)
CASE1(M20)	約160	170
CASE2(M30)	約290	282
CASE3(M42)	約390	392
CASE4(M56)	観察されず	528
CASE5(M30)	約400	314
CASE6(M30)	約450	330

表7 最大荷重に対する $\sigma_b/F_c$

CASE	最大荷重 $P_{max}$ (ton)	支圧応力度 $\sigma_b$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	圧縮強度 $F_c$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\sigma_b/F_c$
CASE1	12.7	1348	160	8.4
CASE2	31.5	1422	195	7.3
CASE3	61.6	1483	195	7.6
CASE4	111.5	1509	161	9.3
CASE5	35.0	310	161	1.9
CASE6	34.3	178	160	1.1

3) コンクリート内部の応力状態 錨板上の支圧応力を等分布と仮定し、8節軸対称要素を使用したコンクリート部分のFEM弾性解析により、設計荷重 $P_0$ が作用したときのCASE6における主応力分布を求めた結果を図6に示す。これから設計荷重時における引張側の主応力面が破壊に至ったときのコーン状破壊面に非常によく一致していることがわかる。コンクリートの破壊過程においてひび割れがこの主応力面に発生し成長伝播したと考えるとコーン状破壊は引張応力に起因した破壊であることが推定される。

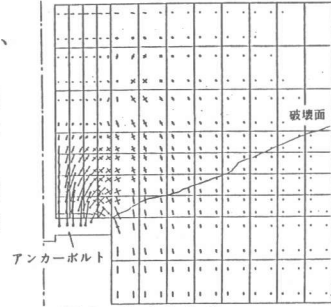


図6 主応力分布

### 3.2 終局耐力について

松崎らのコーン状破壊に対する 引張耐力推定式<sup>3)</sup>

$$P_{max} = \sqrt{F_c} A_c \quad (1)$$

と、表7に示す実験において得られた最大荷重との比較は図7のようになり、M56クラスの大径ボルトを含めたCASE1, 2, 3, 4の実験結果は

(1)式の値に対して-8~+12%の間にあり、終局耐力推定に有効な方法である。錨板の大きさを4d, 5dとしたCASE5, 6についてはいずれも松崎らの提案式より小さな値を示し、錨板径が5dのCASE6では-16%となっている。一方、コンクリートの割裂試験による引張強度 $\sigma_t$ と有効水平投影面積 $A_c$ による推定式は実験結果による回帰分析から

$$P_{max} = 0.93 \sigma_t A_c \quad (2)$$

と表せる。コンクリートの引張強度は圧縮強度 $F_c$ を用いて通常おおよその値は $\sqrt{F_c}$ であり、コンクリートの割裂試験による引張強度 $\sigma_t$ の値はそれより大きい値を示すことが知られている<sup>2)</sup>。今回の割裂試験による引張強度 $\sigma_t$ との比 $\sqrt{F_c}/\sigma_t$ の値は0.88~0.94となっており、0.93という定数はこの割裂試験による引張強度を適用する場合の低減率である。

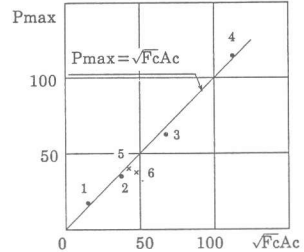


図7  $P_{max} = \sqrt{F_c} A_c$  との比較

### 3.3 荷重変位関係

実験時に測定した基礎ボルトの上端の荷重変位関係をボルトサイズを変化させたCASE1, 2, 3, 4について図8に、錨板径を変化させたCASE2, 5, 6について図9に示す。但し、荷重軸は載荷荷重 $P$ を設計荷重 $P_0$ で除した値、変位軸は変位 $\delta$ を埋込深さ $L$ で除した値を表し、両軸を無次元化した表示とした。

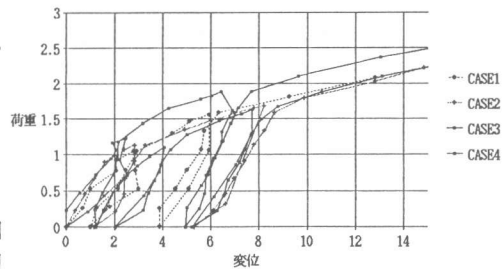


図8 基礎ボルトの上端の荷重変位関係(1)

1) ボルトサイズを変化させた実験シリーズにおける荷重変位関係 各ケースとも $P/P_0$ が1.0~1.5の範囲で明らかな屈曲点が見られ、図10に示す方法で便宜的に降伏点を定めると降伏荷重に対応する値は表8のようになる。また破壊に至ったときの最大荷重に対応する $P/P_0$ の値は3.00~3.18であり、全般的によく似た荷重変位特性を示している。降伏荷重時の錨板上の支圧応力度 $\sigma_b$ と圧縮強度 $F_c$ の比 $\sigma_b/F_c$ の値は2.4~3.8であった。

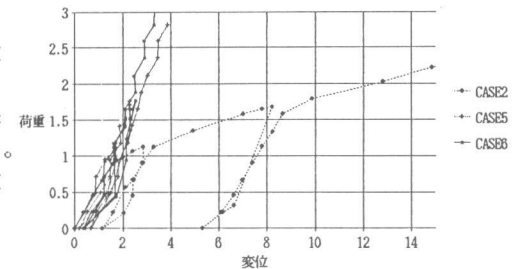


図9 基礎ボルトの上端の荷重変位関係(2)

2) 錨板径を変化させた実験シリーズにおける荷重変位関係 錨板径を変化させたシリーズについては荷重変位関係に明らかな違いが現れている。錨板径の小さなCASE2については $P/P_0$ が1程度で降伏荷重に達しているのに対し、錨板径の大きなCASE5, 6については明らかな降伏点は見られない。これらの事実と観察された錨板上のコンクリートの破壊状況と対比すると、降伏点は支圧応力度の値と密接な関係があると考えられる。CASE2における $\sigma_b/F_c$ の値は降伏荷重時で2.4、最大荷重時で7.3となり最大荷重時には著しい粉化をおこして基礎ボルト上端

表8 降伏荷重に対応する $P/P_0$

実験ケース	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
降伏荷重( $P/P_0$ )	1.1	1.05	1.5	1.25

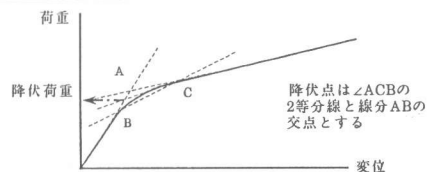


図10 降伏点の設定法

の変位が増大している。また、降伏点以後の変形がほぼ一定の割合で増していることから、降伏点以後コンクリートの粉化が変形増大の原因と考えられる。CASE 5, 6における $\sigma_b/F_c$ の値は最大荷重時においても1.1~1.9であり、粉化の状況も確認されない。

### 3. 4 錨板の応力について

実験において錨板の表面及び裏面で測定されたひずみから求めた応力と、錨板上の支圧応力を図11に示す分布を仮定した時に

解析により求めた応力の値を比較した結果を図12に示す。錨板上の支圧応力の分布は三角形分布状態と等分布荷重状態の2ケースを用い、解析は端部固定条件でFEM8節点軸対称要素による弾性解析値とした。図12はCASE6において載荷荷重(15ton)が作用したときについて比較したものであるが、実験による応力値はこれらの間にあることがわかる。

### 4. まとめ

#### (1) コーン状破壊の破壊状況と終局耐力

破壊状況はいずれのケースもコーン状の破壊面が発生したがコーン状破壊の破壊角度はボルトサイズ、錨板径に影響を受け、特に錨板径の大きい(4d程度以上)場合、破壊面が鉛直となす角は大きくなっている。終局耐力の推定については基礎ボルトのサイズがM56程度の大径でかつ錨板径が4d程度であっても

$$P_{max} = \sqrt{F_c A_c}$$

で約±10%で推定可能である。また、終局耐力推定に割裂試験による引張強度 $\sigma_t$ を用いて

$$P_{max} = 0.93 \sigma_t A_c$$

と表すこともできる。

#### (2) 支圧応力度と荷重変位関係

コーン状破壊したコンクリート塊の支圧部分の観察結果と、基礎ボルト上端での荷重変位関係における降伏荷重から、錨板上の支圧応力度 $\sigma_b$ と圧縮強度 $f_c$ の比 $\sigma_b/f_c$ の値が1~2ではコンクリートの粉化はおこらず、 $\sigma_b/f_c$ の値が2~4で荷重変位関係が降伏点に達し、以後変形が増大し $\sigma_b/F_c$ の値が7以上で著しい粉化が起きていた。

#### (3) 錨板応力から推定される支圧応力分布について

錨板径が5d以内でかつ設計荷重範囲内であれば、錨板に作用する支圧応力分布は等分布と三角形分布の間で押えることができ、錨板の設計上は応力のばらつきを含め等分布荷重を用いれば良いと考える。

### 参考文献

- 1) 各種アンカーボルト設計指針 (日本建築学会)
- 2) W. F. Chen 「コンクリート構造物の塑性解析」 丸善
- 3) 矢野、佐藤、松崎他、「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12 実験結果をもとにした設計への対応 (1)」 日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和57年10月

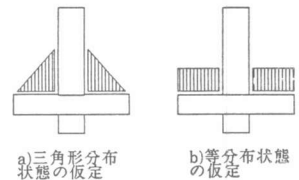


図11 錨板上の支圧応力の仮定

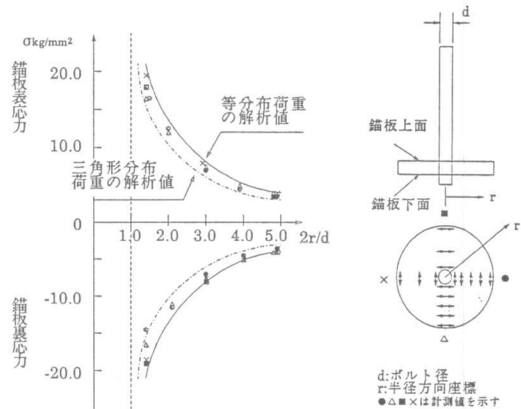


図12 錨板に発生する応力の実測値と解析値の比較