

論文

[2157] 後打ちアンカーボルトの引抜き耐荷機構に関する研究

正会員○森山智明 (JR東日本)

正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学建設系)

清水敬二 (長岡技術科学大学建設系)

山本康之 (長岡技術科学大学大学院)

1. はじめに

コンクリート構造物に付属設備の取り付けあるいは耐震補強を行なう場合、その接合方法としてアンカーボルトを用いた工法がある。コンクリートがコーン状に破壊する場合の静的引抜き耐力に関しては、多くの研究が為されているが、大部分は埋め込み深さが10cm程度以下と限られた範囲である。一方、RC柱や鉄塔などのフーチング内への定着に関しても同様な問題があり、埋め込み深さが大きい場合の検討は必ずしも十分でない。そこで、より広い範囲で適用可能な算定式を構築するためには、より正確に耐荷機構を把握する必要がある。

本研究は、埋め込み深さ4~24cmのアンカーボルトについて静的引抜き試験を行ない、それらの破壊形状、最大耐力を基に、ひび割れの進展状況を考慮した耐荷機構を把握するためFEM解析を行った。その際、コンクリートの破壊断面の応力状態に着目し、破壊力学的考察を加えて静的引抜き耐荷機構を説明し、さらに、静的引抜き耐力の算定法を検討した。

2. 静的引抜き試験

2.1 アンカーボルト

アンカーボルトの形状、寸法を図-1、表-1に示す。埋め込み深さ $h = 4 \sim 10$ cmの市販のアンダーカット型アンカーボルトに加え、 $h = 16, 24$ cmのアンカーボルトを特別に作製した。このアンカーボルトは埋設型としたが、後打ちアンカーボルトと条件を同じくするため、ボルト周面にテープを巻き付着を無くした。

2.2 コンクリートブロック

コンクリートは、早強セメントを用いたレディーミクストコンクリートを使用し、最大骨材寸法25mm、設計スランプ8cm、呼び強度 $f_c' = 150 \sim 350$  kgf/cm<sup>2</sup>とした。試験時のコンクリートの圧縮強度および引張強度は、 $\phi 100 \times h 200$ mm円柱供試体により求めた。

2.3 載荷方法

図-2に試験装置概要を示す。アンカーボルトへの載荷は、センターホール型油圧ジャッキを用いた。荷重の検出は、埋め込み深さ $h = 4 \sim 10$ cmのボルトでは20tonロードセルを用い、 $h = 16, 24$ cmの場合は油圧ジャッキに取付けられた圧力センサーから検出した。変位は、ひ

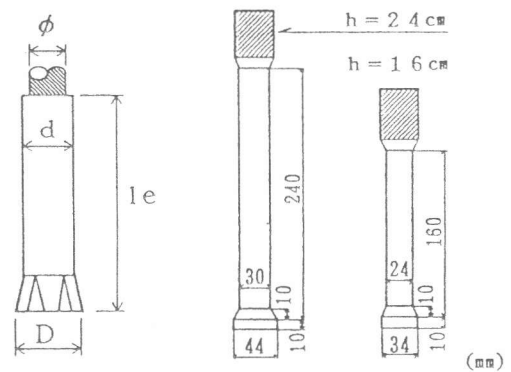


図-1 アンカーボルト形状

表-1 アンカーボルト寸法

アンカーボルト	トルク	コンクリートブロック
d l e phi D	kgf-cm	W x L x H (mm)
14 40 M 10 18	240	500x500x220
14 60 M 10 18	360	600x600x300
18 80 M 12 24	360	
22 100 M 16 28	1200	1200x600x300
24 160 34 34		1200x1200x1200
30 240 34 44		

ずみ変換型変位計より検出し、動ひずみ計、A/Dコンバータを介して、マイクロコンピュータにデータを収録した。また、反力点は埋め込み深さ  $h = 4 \sim 10$  cm の場合にはアンカーボルト位置より  $h$  の3倍、 $h = 16, 24$  cm の場合には  $5.5$  cm 離れた。

## 2. 4 試験結果

### (1) 破壊断面

写真-1 に埋め込み深さが6および24 cm の場合におけるコンクリートのコーン状破壊断面の例を示す。破断面は、①はじめ急激な角度 ( $40 \sim 55^\circ$ ) で立ち上がり、②すぐ穏やかな勾配 ( $20 \sim 35^\circ$ ) になる。③表面付近では、角度さらに小さくなるが、これは最大耐力以後の二次的な破壊であると考えられる [1]。ここで最大耐力に大きく関係していると思われる②の角度を表-2 に示す。断面1, 2 はそれぞれ直交する方向の断面である。

破断面の形状は個々のばらつきが大きいですが、断面の平均角度は  $28.4^\circ$  となり、 $h = 16, 24$  cm と埋め込み深さが大きくなった場合においても角度の差は特に見られず、コンクリートの破壊断面の形状には、 $h = 4 \sim 24$  cm の範囲では埋め込み深さ  $h$  に関係なく相似であるといえる。

### (2) 荷重変位曲線

図-3 に埋め込み深さ  $h = 6, 16, 24$  cm の荷重変位曲線を示す。荷重変位曲線は、①はじめボルト弾性を主とした剛性を示し、②ひび割れの進行により剛性低下を示し、荷重の増加に伴い変形が大きくなる。③最大耐力付近では更に剛性は低下するがボルト径が大きく埋め込み深さが深いものほど、最大耐力以降の挙動が脆性的になっている。

表-2 破断面の形状

アンカーボルト d l $\phi$	$f_c$ kgf/cm <sup>2</sup>	$f_t$ kgf/cm <sup>2</sup>	$P_{max}$ tonf	$\theta^\circ$				平均 °	
				断面1		断面2			
14 40 M10	196	17.9	2.11	28	20	48	25	28.6	
				2.12	24	30	27		27
				4.50	26	20	27		45
14 60 M10	395	29.0	5.62	29	27	27	25	25.4	
				3.92	15	18	21		25
				6.32	30	30	25		30
14 80 M12	395	29.0	6.70	24	35	21	29	31.6	
				5.61	21	26	23		22
				9.24	37	28	24		38
14 100 M16	381	25.7	8.80	30	30	31	16	30.0	
				11.10	34	32	--		--
				17.90	22	34	13		22
14 160 M34	280	21.0	18.70	37	30	26	30	27.2	
				18.10	31	29	26		26
				35.40	29	34	22		31
30 240 M34	280	21.0	35.30	32	30	26	31	29.4	
				35.30	32	30	26		31

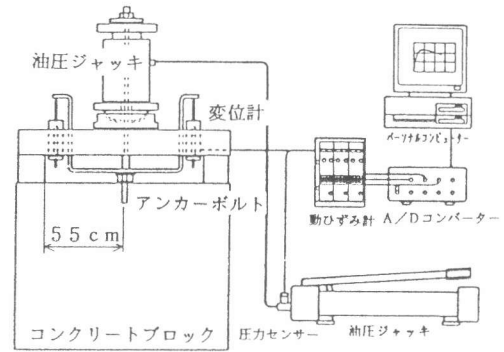
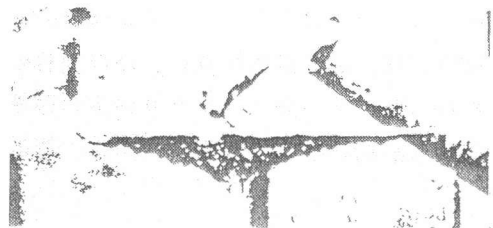
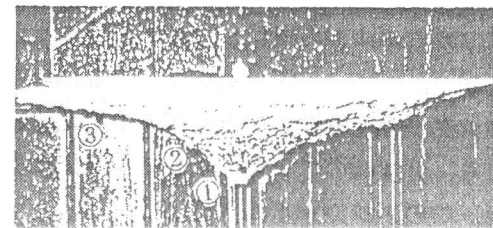


図-2 実験装置概要



(a)  $h = 6$  cm  $P_{max} = 5.6$  tonf  $f_c = 400$  kgf/cm<sup>2</sup>



(b)  $h = 24$  cm  $P_{max} = 35.5$  tonf  $f_c = 280$  kgf/cm<sup>2</sup>

写真-1 コンクリート破壊断面

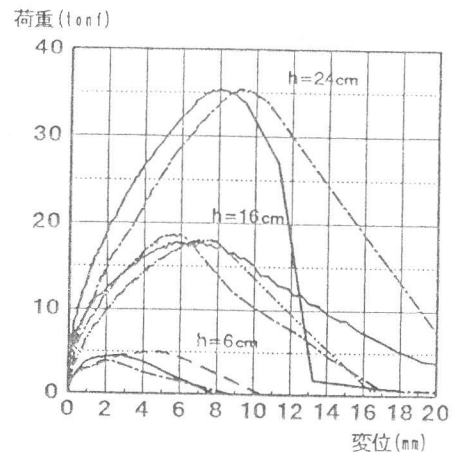


図-3 荷重-変位曲線

### 3. 静的耐荷機構の検討

#### 3. 1 FEMによる解析

実験結果を観察すると、ボルトの埋め込み深さが4～24cm程度の範囲では、破断面の形状が相似であった。そこで、解析モデルとしてはとりあえず、図-4に示すように60×60×30cmのコンクリートブロックに8cmの埋め込み深さを有するアンカーボルトを対象とした。解析は、4節点矩形要素を用い、軸対称として線形解析を行った。図中の荷重される要素は、下部の要素と分かれており応力の伝達を無くしている。図中の一点破線は静的引抜き試験より得られた平均的コーン状の破壊断面であり、写真-1(b)の破断面③は最大耐力に関係ないものとし、破断面①②を適用した。

解析方法は、仮定した断面に沿ってひび割れが進行していくものとし、ひび割れ長さ $a$ を各ステップごとに伸ばした。ひび割れの設定は、破壊断面のひび割れが進行したと仮定した要素に新たに節点を設けて要素分割を行い、ひび割れ上での応力伝達を無視した。破壊面での最大主応力が、コンクリートの引張強度に達したときひび割れが進行するとした。

#### 3. 2 解析結果

まず、ひび割れの進行によって最大耐力および破壊面の応力状態が、どの様に変化していくかを調べるために弾性解析を行った。解析の結果、コンクリートの圧縮強度( $f_c$ )を $300\text{kgf/cm}^2$  ( $f_t=26.0\text{kgf/cm}^2$ )としたときの引抜き耐力が最大になったのは、ひび割れ長さ $a$ の破壊断面長さ $l$

に対する比 $a/l=0.43$ の時であり、その応力状態を図-5に示す。この結果は、Eligehausenらの研究[2]において、非線形解析を行った結果の最大耐力は $a/l=0.45$ の時に生じていることと一致している。また、仮定した破壊面の表面付近では主応力はほぼ零で、写真-1(b)に示す破断面③部分は最大耐力には関係がないことを示している。ところで、FEM線形解析で得られた最大耐力 $P_{\max}=3.1\text{tonf}$  ( $a/l=0.43$ )は、実験値の引抜き耐力 $6.3\text{tonf}$ と大きくかけ離れている。これは、コンクリートの破壊力学的検討でも、明らかにされているように、ひびわれが発生しても、ひびわれ幅が小さい場合には、コンクリートは引張力を負担できるという事実を無視しているためと考えられる。

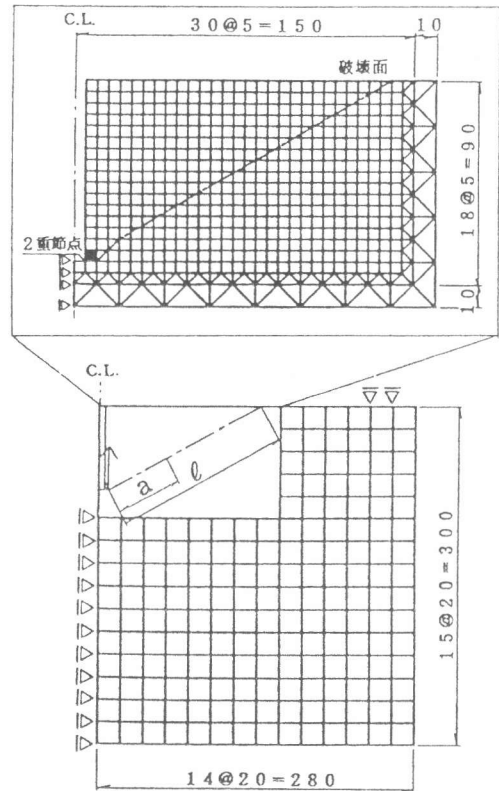


図-4 解析モデル

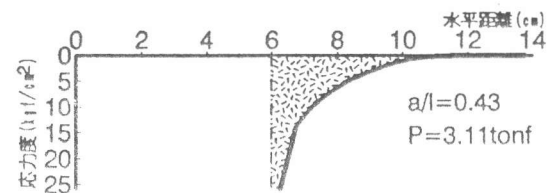


図-5 破壊面での主応力状態

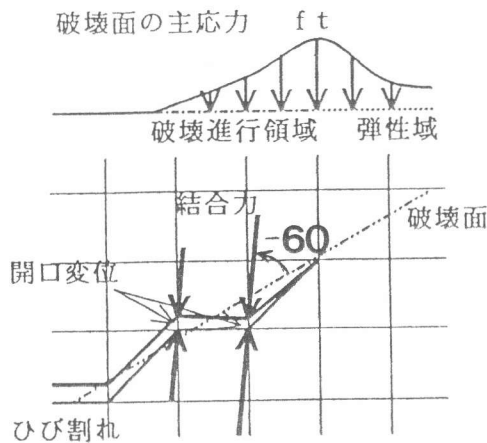


図-6 仮想ひび割れモデル

そこで、弾性解析での最大荷重時のひび割れ進行長さ  $a/\ell = 0.43$  の場合について、図-6 に示すひびわれ幅に応じた引張応力が作用するようにしてFEM解析を行った。ひび割れの近傍の破壊進行領域（フラクチャープロセスゾーン）を塑性域として扱い、ひび割れと引張応力の関係は、図-7 に示す1/3モデル [3] を使用した。このモデルに表されるような破壊進行領域の状態は、大塚らの研究 [4] により視覚的に確認されている。解析では、ひび割れ先端付近の開口変位に応じた応力分に相当する結合力を節点に付加し、開口変位と応力のチェックを数回行い収束させた。その結果、計算で実験値と同じ最大耐力6.3 tonfが得られる時の破壊面の主応力状態は図-8 に示すようであった。

アンカーボルトの引抜き耐力は、主応力にその作用面積を乗じ、その鉛直成分として得られる。主応力の作用方向は、解析結果によると弾性域では破壊面に対して、ほぼ60°の時に最大応力となっているので、塑性域でも図-6 に示すように破壊面から60°とした。

ここで破壊進行領域と仮定した塑性領域部の受け持つ耐力  $P_V$  と、弾性領域で受け持つ耐力  $P_E$  は、表-3 より、およそ  $P_V : P_E = 1 : 1$  となる。

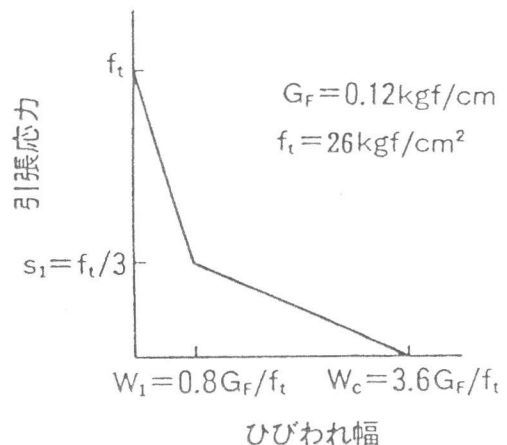


図-7 1/3モデル [3]

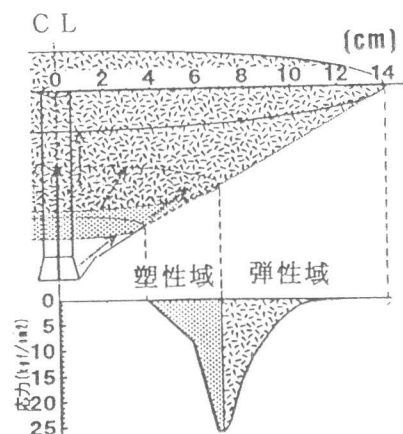


図-8 最大耐力時主応力モデル

表-3 主応力からの引抜き力の計算

水平距離 cm	面積 cm <sup>2</sup>	主応力 kgf/cm <sup>2</sup>	角 度	合計 kgf
3.75	13.60	0		0
4.25	15.41	2.22	-60.0	* 68.4
4.75	17.22	4.33	-60.0	* 149.2
5.25	19.04	6.53	-60.0	* 248.6
5.75	20.85	8.66	-60.0	* 361.1
6.25	22.66	7.33	-60.0	* 785.5
6.75	24.47	26.00	-53.6	*1071.7
7.25	26.29	24.24	-42.6	865.6
7.75	28.10	16.33	-36.0	567.4
8.25	29.91	11.51	-32.6	408.5
8.75	31.73	8.21	-27.0	292.3
9.25	33.54	5.17	-26.8	194.1
9.75	35.35	3.00	-29.1	121.4
10.25	37.17	1.37	-18.4	53.7
10.75	38.98	0.67	18.4	27.4
11.25	40.79	0.39	14.5	16.4
11.75	42.60	0.20	17.0	8.9
12.25	44.42	0.12	18.7	5.5
12.75	46.23	0.06	21.3	2.9
13.25	48.04	0.03	23.9	1.6
13.75	49.86	0.01	26.7	0.4

	破壊面	垂直力	%
塑性域 (kgf)	*2684.5	*3099.9	*51.1
弾性域 (kgf)	2565.9	2963.0	48.9
合計 (kgf)	5250.4	6062.8	100.0

#### 4. 算定式の提案

Eligehausen らの研究 [2] では、2次元線形破壊力学による引抜き耐力 ( $P_{max}$ ) は式 (1) に示されるように、埋め込み深さ  $h$  の 1.5 乗に比例している。

$$P_{max} = 15.5 f_c^{1/2} h^{3/2} \quad (f_c: \text{コンクリート引張強度}) \quad (1)$$

図-9 は、引抜き耐力が埋め込み深さ  $h$  の  $X$  乗に比例する ( $P_{max} = a \cdot h^X$ ) とした時、図に表されるそれぞれの範囲のデータに於いて、最適な  $X$  の値を回帰分析によって求めたものである。  $h$  が大きくなるほど  $h$  に対する乗数  $X$  は大きくなり、一定でないことが分かる。埋め込み深さが、8 cm 程度もしくは埋め込み深さ 4 ~ 24 cm の平均では、 $X$  は 1.5 に近づいているが、この値は実際の現象を示していない。

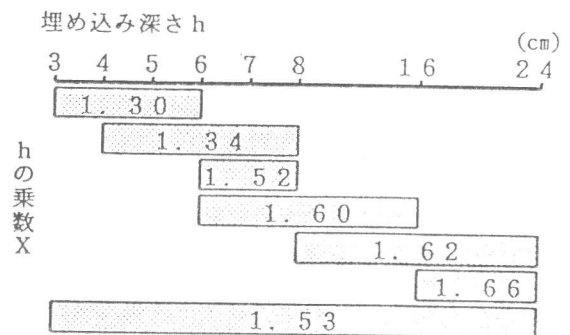


図-9 埋め込み深さに対する乗数

そこで、図-8 で示した主応力と埋め込み深さとの関係を改めて検討してみる。コーン破壊の形状が相似である点を考慮すると、弾性域での応力が作用している面積は、幅が  $h$  に比例するとともに、円周方向の長さも  $h$  に比例し、従って負担耐力は  $h$  の 2 乗に比例する。このことは松藤らの研究 [5] でも示されている。一方、塑性域では、応力の作用する面積の幅は、ひび割れ幅の絶対値に支配されるので、 $h$  に関係なくほぼ一定と考えて良い。従って円周方向の長さだけが  $h$  に比例することになる。これらの結果から、引抜き耐力  $P$  は埋め込み深さ  $h$  に対し、塑性領域では  $h$  の 1 乗、弾性域では  $h$  の 2 乗に比例する。従って引抜き耐力は、コンクリートの引張強度を用いて、式 (2) のように表される。

$$P_{max} = P_V + P_E = f t (a h + b h^2) \quad (2)$$

$a, b$  : 塑性領域と弾性領域の割合を表す係数

これに FEM 解析結果 (表-3) を適用すると、最大耐力は式 (3) のように表される。尚、コンクリートの引張強度は式 (4) で求めることとする。

$$\begin{aligned} P_{max} &= 3099 + 2963 = 18.0 \times 26.0 (0.9 \times 8 + 0.1 \times 8^2) \\ &= 18.0 f t (0.9 h + 0.1 h^2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P_{max} &: \text{引抜き最大耐力 (kgf)} \quad h : \text{埋め込み深さ (cm)} \\ f t &: \text{コンクリート引張強度 (kgf/cm}^2\text{)}、f t = 0.58 f_c^{2/3} \end{aligned} \quad (4)$$

今回行われた静的引抜き試験結果と破壊耐荷モデルより得られた算定式(3)の計算結果を図-10に示す。X軸には埋め込み深さh、Y軸は、試験結果のコンクリート強度の違いをなくすため、最大耐力をコンクリート引張強度で除している。Y軸右側の目盛りは、コンクリート強度  $f_c' = 300 \text{ kgf/cm}^2$  に換算した最大耐力である。

この結果から、算定式(3)を用いた計算結果は全ての埋め込み深さの範囲において良く合っている。埋め込み深さhの1.5乗とした式(1)は、16cm程度までは合っているが、さらに埋め込み深さが大きくなると実験値と合わなくなっている。破壊断面での耐力モデルから得られた算定式(3)による計算値と実験値の相関係数はデータ数74で99.8%である。

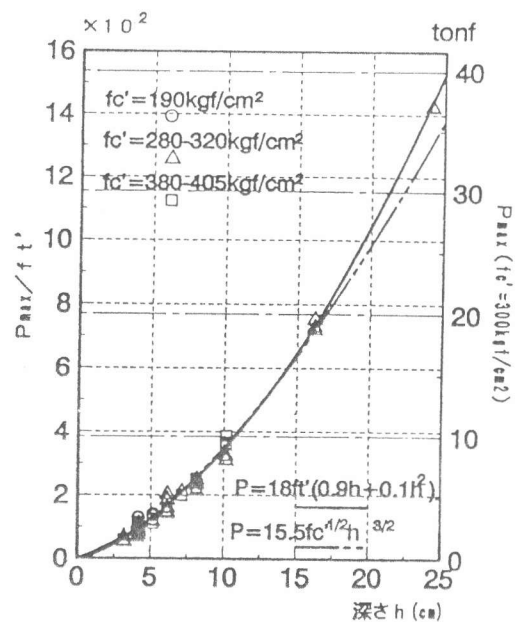


図-10 埋め込み深さと最大耐力

## 5. まとめ

- 1) アンカーボルトの引抜き試験でみられるコンクリートのコーン破壊断面は、埋め込み深さに関係なく相似である。
- 2) 今回の解析で得られた耐荷モデルにより、塑性域部は埋め込み深さhの1乗、弾性域部はhの2乗と考える算定式(3)により、引抜き耐力を精度良く算定することができる。

## [謝辞]

本研究の実験の遂行にあたり、ポッシュ株式会社には供試ボルト提供等の御支援を頂き、また、長岡技術科学大学技官の中村裕剛氏に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

## [参考文献]

- [1] 百瀬光弘, 丸山久一, 清水敬二: アンダーカット型アンカーボルトの性状に関する研究 第12回コンクリート工学年次論文報告集No. 2, pp123~123, 1990
- [2] Eligehausen, R.; Sawade, G.: Verhalten von Beton auf Zug (Behavior of concrete in tension): Betonwerk + Fertigteil-Technik, No. 5 and No. 6, 1985, in German and English
- [3] Petersson, P. E.: Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials, Report TVBM-1001, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1981
- [4] 大塚浩司, 庄司芳典: X線造影撮影法によるコンクリートの破壊プロセスゾーンの検出 コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム, JCI-C19, 1990, pp. 2-1 ~ 2-4.
- [5] 松藤康典・河村博之・佐治泰次: コンクリートに定着された鉄筋の引抜き強度に関する研究, 九州大学工学集報第44巻第6号, 昭和46年12月