

論文

[2028] シアキー付き穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーの繰返し引抜耐力

浜田公也*1・河村博之*2

1. まえがき

現在使用されているあと施工アンカーは、施工管理の良否が耐力および変形量に大きく影響するものが多く、また、耐久性、耐火性にも疑問のあるものが多いため、筆者等は、新しい形式のシアキー付き穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーを考案開発し、実用化するための基礎的な研究を行ってきた[1][2]。アンカーボルトに作用する荷重としては、静的荷重はもちろんのこと、振動を伴う設備器機等の取付け部に使用する場合には、動的繰返し荷重も考慮する必要がある。アンカーボルトに動的繰返し引抜荷重が作用した場合、静的引抜力を受ける場合と同様に、埋込みボルト頭付近やシアキー部分には局部応力集中が生じると考えられるが、その力学的性状は明らかでない。本報告は、表記アンカーボルトに動的繰返し引抜荷重が作用した場合、繰返し回数によって耐力性状や変形状がどのように変化するかを明らかにするために、動的繰返し引抜実験を行い、静的引抜耐力に比べどの程度の耐力を示すかを調べたものである。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状と作製

動的繰返し引抜耐力と静的引抜耐力とを比較するため、供試体の形状は、静的引抜耐力を調べた場合の実験供試体[1][2]と同じにした(図-1)。シアキーの施工方法についても同様であるが、シアキー位置は、既報[2]の実験結果より、好ましい位置($h-h_0 \approx 1.5d$ (h, h_0 は図-2参照)、 d :ボルト直径)とした。埋込みボルトは、市販の六角ボルトM12、M16、M20を用い、それぞれのシアキー形状は図-2に示す。使用したレディミクストコンクリートの調合(セメント:細骨材:粗骨材=1:2.42:3.70、水セメント比=0.57、細骨材の粗粒率は2.70、粗骨材の粗粒率は6.56)と、充填セメントモルタルの調合(セメント:砂:フライアッシュ=1:1:0.25、水セメント比=0.46、砂は海砂で0.6mm以下とし粗粒率は1.73、AE減水剤としてポゾリスをセメント重量の1%を混入、コンシステンシーはJロート方法によるフロー値28秒)も、静的引抜力が作用した場合に使用した実験供試体[1][2]のものと同

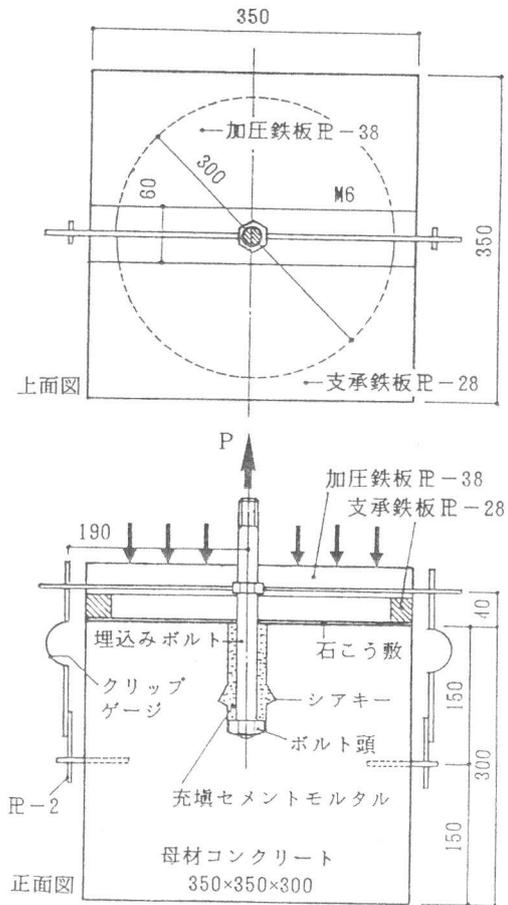


図-1 供試体形状

*1 三菱建設(株)技術開発部主任研究員、博士(工学) (正会員)

*2 九州産業大学教授 工学部建築学科、工学博士 (正会員)

じである。また、穿孔側面が清掃不良となった場合や充填セメントモルタルの収縮肌割れが生じた場合でも、十分アンカーボルトの耐力が確保できる設計を目標としているので、付着力を低減させるために、穿孔側面にマシン油を塗布したことも、既報[2]と同様である。

2.2 供試体の種類

実験供試体の種類を表-1に示す。動的繰返し引抜力が作用した場合の耐力が、静的のそれと比較して、どの程度の耐力低下を示すかを調べるための供試体であり、ボルト径と埋込み深さを組合

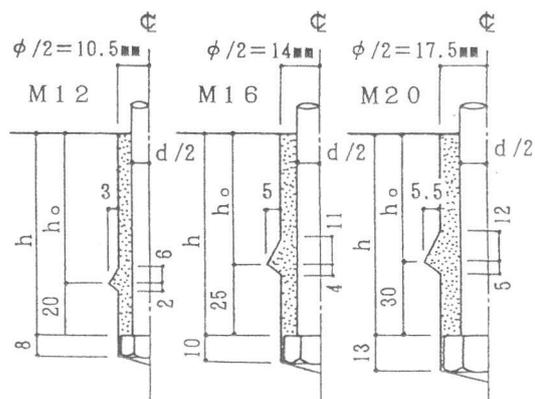


図-2 シアキー形状

表-1 供試体の種類

ボルト径	埋込み深さ h (mm)	1 段目: 繰返し上限荷重 $U P_N$ (kg)		2 段目: 繰返し下限荷重 $L P_N$ (kg)		3 段目: 破壊時繰返し回数 N (回)		4 段目: 破壊形式		コンクリート(σ_B)とセメントモルタル($f\sigma_B$)の圧縮強度 (kg/cm ²)	静的耐力推定値とその時の破壊形式
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦			
M12	50	$U P_N$: 1060 $L P_N$: 290 N: 21 破壊: 拔出し	1060 310 34 拔出し	950 400 59 拔出し	830 420 3644 拔出し	720 380 2000000↑ 破壊無			$\sigma_B = 355$ $f\sigma_B = 423$	1430kg 拔出し	
	90	$U P_N$: 4270 $L P_N$: 1090 N: 59 破壊: 拔出し	3460 1270 1381 拔出し	2550 1090 499762 拔出し	2090 910 376234 拔出し	1580 970 2000000↑ 破壊無			$\sigma_B = 345$ $f\sigma_B = 461$	5310kg 拔出し (ボルト)	
	130	$U P_N$: 4550 $L P_N$: 910 N: 13114 破壊: ボルト	4000 910 28064 ボルト	3590 950 63945 ボルト	3090 910 99613 ボルト	2610 970 351729 ボルト	2060 970 2000000↑ 破壊無		$\sigma_B = 348$ $f\sigma_B = 462$	8660 kg 拔出し (ボルト)	
M16	50	$U P_N$: 1250 $L P_N$: 260 N: 39 破壊: 複合	1160 240 417 複合	980 260 12855 拔出し	870 240 109359 拔出し	730 260 2000000↑ 破壊無	580 260 2000000↑ 破壊無		$\sigma_B = 315$ $f\sigma_B = 425$	1610kg 複合	
	90	$U P_N$: 4550 $L P_N$: 360 N: 4 破壊: 拔出し	4640 460 330 拔出し	4270 550 66 拔出し	3530 870 17252 拔出し	3270 800 53659 拔出し	2910 760 358484 拔出し	2550 760 2000000↑ 破壊無	$\sigma_B = 349$ $f\sigma_B = 424$	8500kg 拔出し (ボルト)	
	130	$U P_N$: 7360 $L P_N$: 1640 N: 41673 破壊: ボルト	6550 1550 48921 拔出し	5730 1640 174981 ボルト	5000 1550 270222 ボルト	4180 1460 773573 ボルト	3640 1180 2000000↑ 破壊無		$\sigma_B = 325$ $f\sigma_B = 428$	12800kg 拔出し (ボルト)	
M20	50	$U P_N$: 1380 $L P_N$: 360 N: 3 破壊: 複合	1270 400 16 複合	1220 350 93 複合	1060 350 21057 複合	890 350 2000000↑ 破壊無			$\sigma_B = 341$ $f\sigma_B = 435$	1840kg 複合	
	90	$U P_N$: 7270 $L P_N$: 1640 N: 581 破壊: 拔出し	6550 1640 2174 拔出し	5730 1550 911149 ボルト	4910 1640 2000000↑ 拔出し	4140 1680 2000000↑ 破壊無			$\sigma_B = 343$ $f\sigma_B = 424$	9200kg 拔出し	
	130	$U P_N$: 10550 $L P_N$: 2180 N: 26 破壊: 拔出し	10180 2550 19992 ボルト	8910 2550 120237 拔出し	7820 2550 291527 ボルト	6460 2550 818001 ボルト	5090 2550 2000000↑ 破壊無		$\sigma_B = 348$ $f\sigma_B = 353$	14640kg 拔出し (ボルト)	

• 繰返し上限荷重 $U P_N$ 、繰返し下限荷重 $L P_N$ は実荷重であり、試験機制御の都合上、目標値とは若干異なる。
 • ①~⑦は同一形状の供試体で、繰返し上限荷重、繰返し下限荷重が異なる。
 • コンクリート、セメントモルタルの圧縮強度は、実験開始時と実験終了時の平均値を示す。
 • ↑はこの値以上であることを示す。 • ボルト破断耐力は M12: 5.1t、M16: 8.1t、M20: 12.5t である。
 • 最右欄中の () 内の破壊形式は、ボルト破断耐力がコンクリート破断耐力より小さい場合に記入した。

わせて変化させた供試体について、繰返し上限荷重を変化させたものである。表中の静的推定耐力は、ボルトの破断耐力は使用するボルトによって異なるので、コンクリートが破壊する場合について記した(ボルトの破断耐力が小さい場合はボルトで破断する)。

2.3 加力および測定方法

加力、変形装置は図-1で示したが、加力は嶋津製作所製サーボパルサ(EA20型、最大動的荷重20t、アクチュエータストローク±50mm)を使用し、荷重の測定にはアクチュエータに取付けてある20t用ロードセルを用いた。ボルトの拔出量はクリップゲージ(測定範囲:±5mm、感度: $1100 \times 10^{-6}/\text{mm}$)を用い、動歪計を介してデータレコーダーと電磁オシログラフにて記録した。記録回数は $m \times 10^n$ ($m=1 \sim 9$, $n=0 \sim 6$)回毎に記録し、最高200万回までとした。加力方法は、ASTM[3]に基づき、また、他の疲労試験研究[4]~[6]を参考に、図-3に示すように、上限荷重と下限荷重の平均荷重までは静的に加力し、その後繰返し加力した。加力サイクルは5Hz一定で、入力波形はsin波とした。上限荷重は、静的引拔力を受けた場合の耐力推定式[2]により求めた供試体の推定耐力(表-1中に値を示した)を、一定の比率で10%づつ階段状に差し引いた値を、下限荷重は一律推定耐力の20%を目標としたが、制御の都合でばらついた。なお、埋込みボルトを加力装置にセットする際、軽く手締めした。

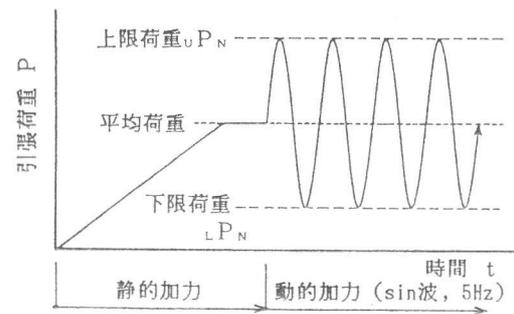


図-3 加力方法

3. 実験結果

3.1 破壊形状

動的繰返し引拔力が作用した場合に生じる破壊形状は、図-4に示すように、充填部拔出し破壊および複合破壊のコンクリート破壊とボルト破断の3タイプが生じた。これらは、静的引拔力が作用した場合の破壊形状[1][2]とほぼ同様であり、また、拔出した充填部のボルト頭付近のセメントモルタルが支圧破壊を起こしていることについても同様である

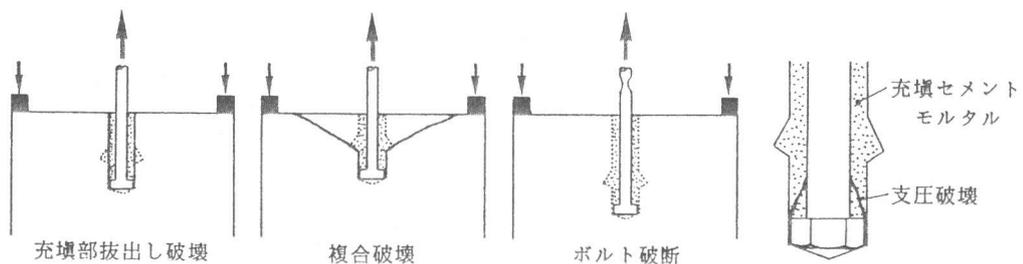


図-4 破壊形状

3.2 上限荷重と繰返し回数の関係

上限荷重 $U P_N$ と破壊時繰返し回数 N の関係を図-5に示す。図中に、静的引拔荷重が作用した場合の耐力推定式[2]で求めた値とその時の破壊形式を、繰返し回数1回のところにプロットした。繰返し回数が増えると小さな荷重で破壊しているが、静的引拔荷重時と動的繰返し荷重時では破壊形式が変わっているものもある。1つはボルト破断から拔出し破壊に変わったもので、ボルトM12、M16、 $h=9\text{cm}$ の供試体が該当し、もう1つは複合破壊から拔出し破壊に変わったもので、ボルトM16、 $h=5\text{cm}$ が該当する。これは、アンカーボルトが引拔力を受けた場合、コンク

リートや充填セメントモルタルの内部、特に埋込みボルト頭付近やシアキー部分には応力集中が生じるために、一般に言われているように応力集中の大きい方が、また脆性材料の方がより耐力低下を生じ易いためにシアキー部分が疲労破壊し、抜出したと考えられるが、その定量的な関係は明らかにならなかった。

3.3 繰返し回数毎の変形量と繰返し回数の関係

繰返し回数毎の変形量 δ_N と繰返し回数 N の関係を示す。変形量の進行状況は全体的に繰返し回数が増す毎に大きくなっており、しかも上限荷重が大きいものほどその傾向は強い。動的曲げ試験におけるコンクリートのひびわれ発生状況は、静的試験と非常に類似しており、残留ひずみは繰返し回数の増加に伴って徐々に増加し、かつ同一回数では応力の大きいものほど大きいことが報告されている[7]。表記アンカーにおいても、静的引抜き力が作用する場合と、上限荷重を一定にした動的繰返し引抜き力が作用する場合を比較すると、両者とも応力集中の大きいところから局部的に逐次破壊し、残留変形が認められる。この残留変形量は、荷重が大きいほど多くなり、また、繰返し回数が増すほど大きくなる傾向がある。

繰返し回数が200万回の時点で破壊せず、変形の増加率が少なく安定しているものもあったが、このままで繰返し回数を増すと、疲労限界らしきものはなく、いずれは破壊するものと思われた。

ボルトが疲労破断した場合についても、アンカーボルト抜出し変形量の進行状況は、コンクリート母材破壊であ

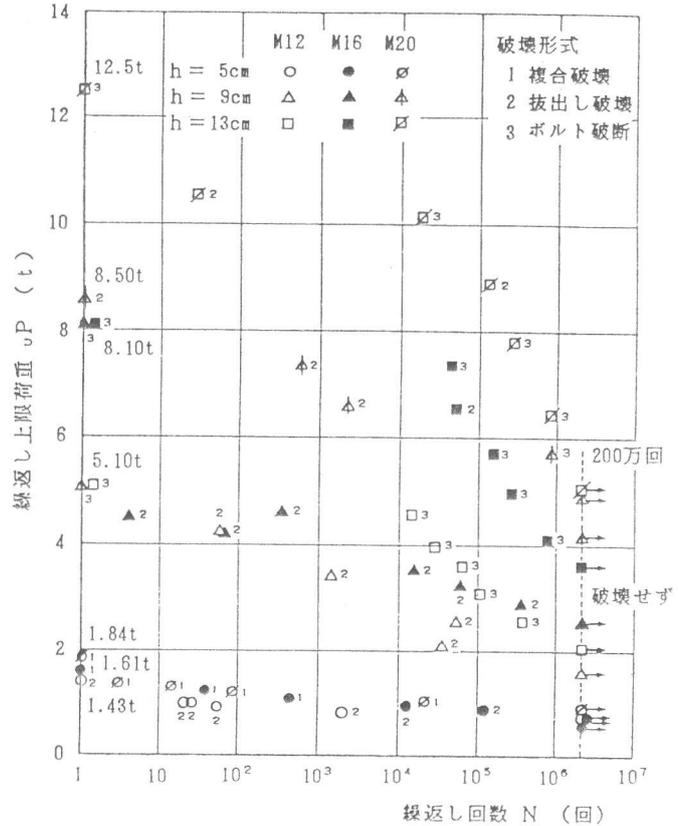


図-5 uP_N と N の関係

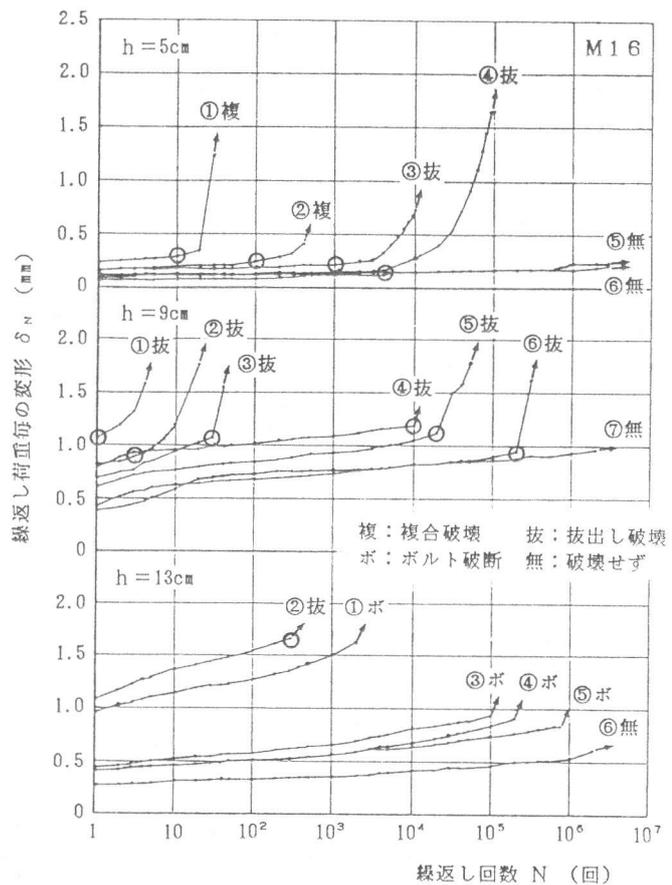


図-6 δ_N と N の関係

る複合破壊や抜出し破壊と同様に、上限荷重の大きい方が変形量の増加率も大きく、繰返し回数が増すにつれてその傾向が強い。これは、ボルト破断するまでにある程度の部分的なコンクリート母材破壊が生じているためである。なお、ボルトM12、M20についてもM16と同様な傾向であるため図は省略した。変形量と繰返し回数の関係を定量化することはできなかったが、今回の実験範囲では変形は2.5mm以下であった。

4. 耐力の推定とボルトの設計

4.1 耐力推定

図-7に uP_N/P_{cal} と N の関係を示すが、複合破壊と抜出し破壊はその抵抗機構が異なるため別々に図示した。ここで、 uP_N は繰返し上限荷重、 P_{cal} は静的耐力推定式より求めた荷重（図中の P_{cal} の値はコンクリートが複合破壊および抜出し破壊する場合の耐力推定値およびその時の破壊形式で、参考文献「2」参照）、 N は繰返し回数である。図からも分かるように、アンカーボルトの疲労耐力は、ボルト頭付近およびシアキー部分のセメントモルタルおよびコンクリート内部に存在するマイクロクラックの成長伝播が繰返し回数によって増進されるために、静的耐力より低下することが明らかになった。そこで、表記アンカーにおけるアンカーボルトの疲労耐力推定式の形を、静的推定耐力を繰返し回数によって低減する形として求めてみた。いま、金属疲労実験において従来から提案されている

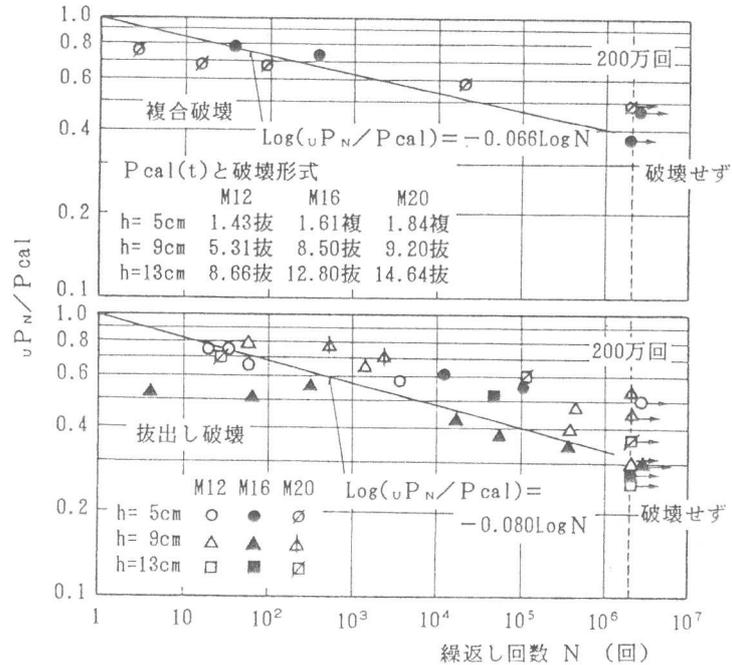


図-7 uP_N/P_{cal} と N の関係

よびコンクリート内部に存在するマイクロクラックの成長伝播が繰返し回数によって増進されるために、静的耐力より低下することが明らかになった。そこで、表記アンカーにおけるアンカーボルトの疲労耐力推定式の形を、静的推定耐力を繰返し回数によって低減する形として求めてみた。いま、金属疲労実験において従来から提案されている

$$\text{Log}(S - S_0) = c - d \cdot \text{Log} N \quad (1)$$

S : 応力度 S_0 : 耐久限度 c, d : 常数 N : 繰返し回数

式(1)[8]の形を借り、 S の代わりに uP_N/P_{cal} 、 $S_0=0$ とし、複合破壊と抜出し破壊した場合に分け、それぞれ実験値に合うように常数 c 、 d を求めると、複合破壊の場合は $c=0$ 、 $d=0.066$ 、抜出し破壊の場合は $c=0$ 、 $d=0.080$ が得られた。図-7中にはこの時の耐力推定曲線を併記した。これから、表記アンカーが N 回の動的繰返し引抜き力を受ける場合の引抜き推定耐力は、

$$uP_N = (10^{0.066 \text{Log} N})^{-1} \times P_{cal} \quad (\text{複合破壊を生じる場合}) \quad (2)$$

$$uP_N = (10^{0.080 \text{Log} N})^{-1} \times P_{cal} \quad (\text{抜出し破壊を生じる場合}) \quad (3)$$

で表すことができる。これらの耐力推定式を用いれば、複合破壊と抜出し破壊を生じる場合の各々の引抜き耐力を求めることができ、小さい方の値が必要耐力を満足するように、ボルト径と埋込み深さを決めればよい。但し、適用範囲は、繰返し回数は200万回を限度とし、アンカーの形状

等も今回の実験範囲内である。ボルト破断については、本実験がコンクリート母体の破壊によるアンカーボルトの耐力を求めることを目的としたので、ここでは言及しない。使用するボルトの材質、ネジの形状、締付力などにより疲労強度は異なり[9]、これらについては多くの研究があるので、設計時においては実際に使用するボルトに応じた疲労強度を推定すればよい。

4.2 変形量を制限したい場合のボルトの設計

変形の大部分が、ボルト頭付近の充填セメントモルタルの局部破壊によるものと考え、変形が急に増加する時の変形量 δy (図-6中○印の値) と上限荷重 $U P_N$ をボルト頭の支圧面積 $B A_0$ および充填セメントモルタルの圧縮強度 $f \sigma_B$ で除した値との関係を図-8にプロットしてみる。ほぼ、 $\delta y = 0.2 \sim 0.6 \times U P_N / (B A_0 \cdot f \sigma_B)$ の範囲に入り、平均は $\delta y = 0.4 \times U P_N / (B A_0 \cdot f \sigma_B)$

(単位：mm)である。変形を極めて小さい値に制限したい場合には、この図より制限したい変形量から押さえるべき $U P_N / (B A_0 \cdot f \sigma_B)$ の値が求まるので、この値と式(2)、式(3)から求めた耐力の両方を満足するように、ボルト径と埋込み深さを決めればよい。

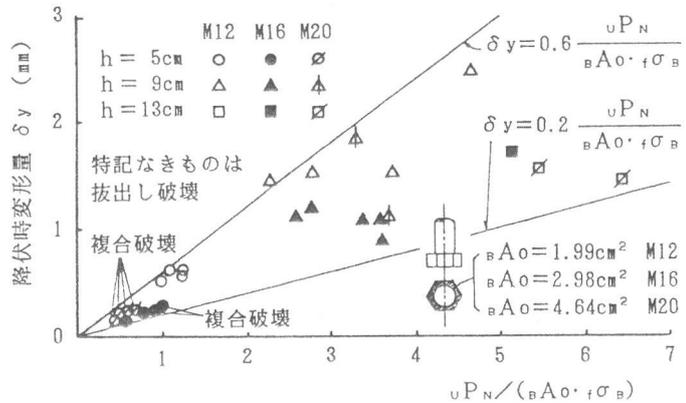


図-8 δy と $U P_N / (B A_0 \cdot f \sigma_B)$ の関係

5. あとがき

今回の実験結果より、表記アンカーが動的繰返し引抜力を受ける場合の引抜耐力は、繰返し回数 200万回時においては静的耐力の約40~50%まで低下することが明らかになった。繰返し回数によるアンカーボルトの抜き変形量の進行状況は、繰返し回数が増す毎に大きくなっており、しかも上限荷重が大きいものほどその傾向が強いことが明らかになった。また、コンクリート母材が破壊する場合のアンカーボルト引抜耐力については、静的引抜力を受けるときの推定耐力に、繰返し回数による低減係数を乗じれば求められるような耐力推定式を示した。更に、変形量を制限したい場合の設計には、許容変形量から必要繰返し耐力が求まることを示した。

参考文献

- 1) 浜田公也・河村博之：ストレート穿孔充填セメントモルタルの側面付着抵抗力とシアキーを設けた場合の引抜き耐力、日本建築学会構造系論文報告集、第421号、pp.77~87、1991.3
- 2) 浜田公也・河村博之・小森清司：シアキー位置と充填材強度が引抜耐力に及ぼす影響およびボルト頭付近の支圧破壊領域の等価付着強度、日本建築学会構造系論文報告集、第432号、pp.81~90、1992.2
- 3) ASTM E488-88：Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements¹
- 4) 松下博通：統計的手法によるコンクリートの圧縮疲労寿命分布の推定、九大工学集報、第50巻、第3号、pp.157~162、1977.6
- 5) 松下博通・徳光善治：生存確立を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究、土木学会論文報告集、第284号、pp.127~138、1979.4
- 6) 阪田憲次・木山英郎・西林新蔵：統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究、土木学会論文報告集、第198号、pp.107~114、1972.2
- 7) 藤田嘉夫・海保康男：コンクリートの引張り、圧縮および曲げに関する疲労性状、セメントコンクリート、21、pp.489~492、1967
- 8) 横堀武夫：材料強度学、技報堂、1967
- 9) 石橋正：金属の疲労と破壊の防止、養賢堂、1958