

Tensile Strength of Anchor Bolt Set by Adhesives



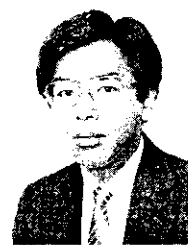
片岡 洋
Hiroshi Kataoka
土建技術部 水島土建
技術室 主査(課長)



岡本 勝昭
Katsuaki Okamoto
土建技術部 水島土建
技術室 主査(課長補)



谷敷 多穂
Kazuho Tanishiki
土建技術部 水島土建
技術室



上赤 正和
Masakazu Kamiaka
土建技術部 水島土建
技術室

1 緒 言

水島製鉄所は昭和36年に建設を開始し、基礎工事用としてこれまでに、鋼管ぐい54万t、コンクリート365万m³を使用している。溶鉱炉、転炉、圧延設備などの大型設備をはじめとし、配管やコンベアーなどの輸送設備に至るまで、機械と基礎を接合する方法としてそのほとんどにアンカーボルトを用いている。設備そのものが大規模であり、取扱う製品が重量物であることから、アンカーボルトに作用する荷重は大きく、アンカーボルトの耐力および施工精度の良否が操業に与える影響は大きい。そのため、水島製鉄所では建設開始以来、躯体コンクリート打設前にあらかじめ所定の位置に設置しておく直埋めボルト(先付けボルト)を使用してきた。

しかし、近年、高度成長期に建設された重厚長大を特色とした企業と同様、当製鉄所の設備も老朽化してきているため、より競争力のある合理的かつ効率的な設備へのリフレッシュが展開されている。これにともない、既存の基礎を有効に利用できることを特徴とする穿孔ボルト(後付けボルト)が数多く使用されるようになったが、破壊過程や疲労特性に関する技術資料が少なく、実験的確認が必要となった。

* 昭和62年10月6日原稿受付

要旨

既存のコンクリート構造物を有効に利用するための技術の一つである接着材を用いて固定したアンカーボルトについて、引抜き荷重作用時における力学的な諸特性を、各種の引抜き実験ならびに疲労実験を通じて調査した結果から破壊過程の推論および引抜き耐力の算定を行い、以下の諸事項が明らかとなった。

- (1) ボルト素材に丸鋼を用いた場合、異形棒鋼や全ネジ切り棒鋼に比べ、著しく引抜き耐力が低下する。
- (2) 大口径(M90)、小口径(M30)ともに、同様の耐力機構を有し、ボルト径の10倍以上の穿孔長があれば実用上十分な引抜き耐力が確保できる。
- (3) 疲労特性はボルト素材の疲労特性と一致する。

Synopsis:

Through various pull-out tests and fatigue tests, a survey has been made for the mechanical characteristics of bolts set in bored holes using adhesive material, which are available in existing foundations. The results are given as follows:

- (1) When a round bar is used as material of the bolt, its tensile strength is decreased compared with that of the deformed bar or all-screw-cutting bar.
- (2) Both large-diameter (M 90) and small-diameter (M 30) bolts show the same failure mechanism, and when the length of the boring hole is ten times larger than its diameter, bolts tensile strength is sufficient for practical use.
- (3) The fatigue characteristics of the bolt are the same as those of the bolt material.

本稿では、大口径ボルトを含め、接着材により固定された穿孔ボルトの各種引抜き実験の結果に基づいて、破壊の進行過程、耐力算定式の提言および疲労特性について述べる。

2 穿孔ボルトの概要

工場のリフレッシュにともないアンカーボルトがFig. 1の上段に示す先付けボルトから下段の後付けボルトに変遷した理由は、

- (1) 既存の基礎コンクリートを解体せずにボルトの据付けができ、建設コストの削減が可能であること
- (2) 限られたスペースで短期間で施工でき、稼働設備への影響が少ないこと
- (3) 火気を使用せずに施工でき、作業そのものが安全であることなどである。

2.1 穿孔ボルトの種類

現在、一般的に使用されている穿孔ボルトは、その固定方法によ

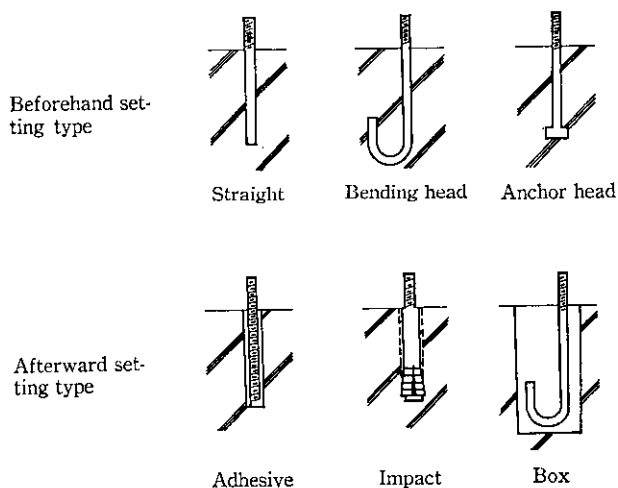


Fig. 1 Types of anchor bolts

って Fig. 1 下段に示す打撃式と接着式に大別できる。打撃式は施工が簡易で、充填材の養生が不要といった利点はあるが、引抜き耐力が小さく、配管がサポートなどの軽微な構造物に限定される。したがって、水島製鉄所では、引抜き耐力が大きく、大口径の施工が可能な接着式を採用している。以下これを穿孔ボルトと称する。

2.2 充填材

穿孔ボルトにおける充填材の役割は、ボルトに加わる引抜き荷重を基礎コンクリートに確実に伝達することであり、ボルトおよびコンクリートに対して強固な付着力が必要である。また、穿孔壁とボルトの間隙に充填することから、十分な流動性が要求される。このような条件から充填材としては一般的にエポキシ樹脂かポリエステル樹脂のいずれかが用いられている。しかし、ポリエステル樹脂は、Table 1 に示すように、硬化時の収縮率が大きいために、穿孔壁との剝離を誘発しやすく、耐アルカリ性に乏しいことから、当製鉄所ではエポキシ樹脂を充填材に採用している。

Table 1 Comparison of characteristics of epoxy resin with those of polyester resin

	Epoxy resin	Polyester resin
Legal sorting		
Main matter	Fourth group of petroleum	Fourth group of petroleum
Hardener	Fourth group of petroleum	First group of peroxides
Conservative-ness	Long term storage is possible	Storage stability is bad
Workability	Very easy	Complexity
Intensity occurrence	Decided by atmosphere temp	Possibly ajusted by hardener or hastening matter
Hardening construction	3~5%	7~11%
Adhesive force for steel plate	120~200 kgf/cm ²	60~80 kgf/cm ²
Chemical-proof	Alkali-proof	Hydrolysis inside alkali

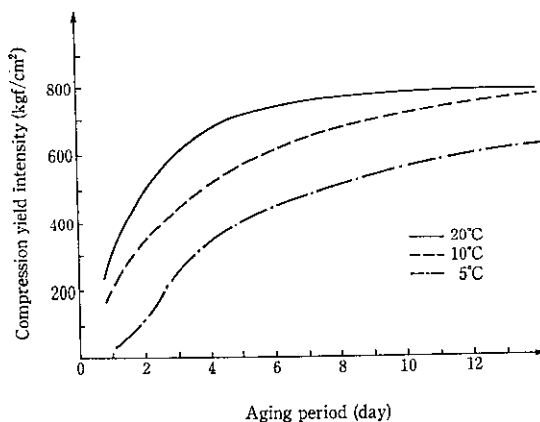


Fig. 2 Relationship between aging period and compression yield intensity of epoxy resin at each temperature

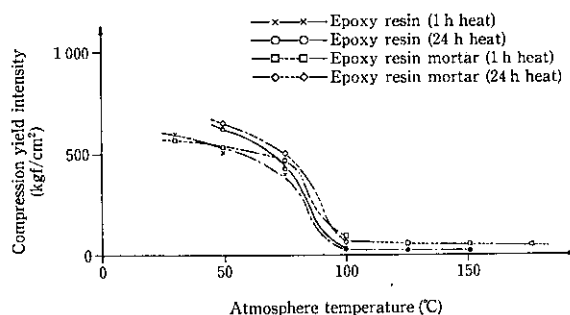


Fig. 3 Effect of test atmosphere temperature on compression yield intensity of resins and resin mortars

穿孔ボルトの引抜き耐力に影響を及ぼすエポキシ樹脂の性質として、Fig. 2 に示すような低温時における強度発現の遅れと、Fig. 3 に示す高温時における著しい強度低下がある。当所では、これらの性質を考慮し、寒冷時においてはボルトと樹脂のプレヒーティングや養生雰囲気温度の調整あるいは寒冷型樹脂の使用などの仕様を定め、高温に対しては使用上限温度 (80°C) の設定や断熱による品質管理を実施している。

3 静的引抜き実験

エポキシ樹脂を用いた穿孔ボルトの静的な引抜き耐力を求めるために、小口径ボルト (M30) と大口径ボルト (M90) の現場引抜き実験を行った。

3.1 実験概要

主な比較項目は、ボルト素材、穿孔長および穿孔径の違いによる引抜き耐力の差であり、各供試体のボルト、穿孔寸法ならびにコンクリートの仕様を Table 2 に示す。供試体の製作は、既存の鉄筋コンクリートの機械基礎にダイヤモンドコアドリルを用いて穿孔し、ボルトを建込んだ後に、樹脂を充填して定着させた、なお、No. 8 は 2 層、No. 9 は 3 層に分割して充填し、各層の充填間隔を 2 時間とした。

載荷装置を Fig. 4 に示す。載荷桁の支点間距離を 3 m とし、桁反力部の支圧力の影響を除外するようにした。なお、載荷速度は小口径ボルトで 1 tf/min、大口径ボルトで 10 tf/min の急速載荷とした。測定項目は載荷荷重、ボルト各部の軸方向ひずみ、コンクリートの破壊状況である。

Table 2 Test specimens for pull-out tests

Specimen No.	Bolt		Hole		Tensile intensity of bolt (kgf/cm ²)	Base concrete	
	Shape	Diameter (mm)	Diameter (mm)	Length (mm)		Compressive intensity (kgf/cm ²)	Reinforcing rod
1	All screw cutting	30	52.2	300	>4 100	288	5 cm cover D19 @ 150 mm D16 @ 200 mm
2	Round bar	30	52.2	300	3 900-5 300	288	
3	Deformed bar	30	52.2	300	>5 000	288	
4	All screw cutting	30	52.2	300	>4 100	288	Nothing
5	All screw cutting	30	52.2	450	>4 100	235	
6	All screw cutting	30	52.2	150	>4 100	235	
7	All screw cutting	30	52.2	300	>4 100	235	20 cm cover φ13 @ 300 mm
8	All screw cutting	90	160	900	>4 100	297	
9	All screw cutting	90	160	1 350	>4 100	297	

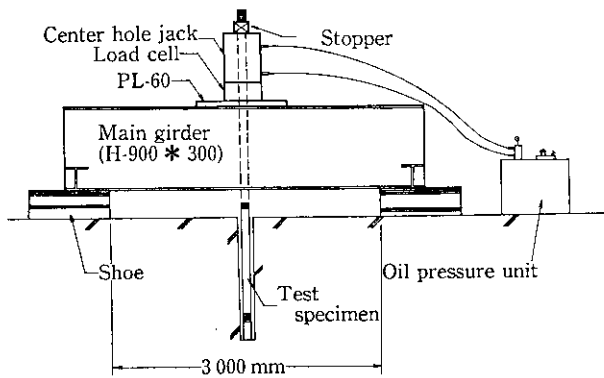


Fig. 4 Static pull-out test equipment

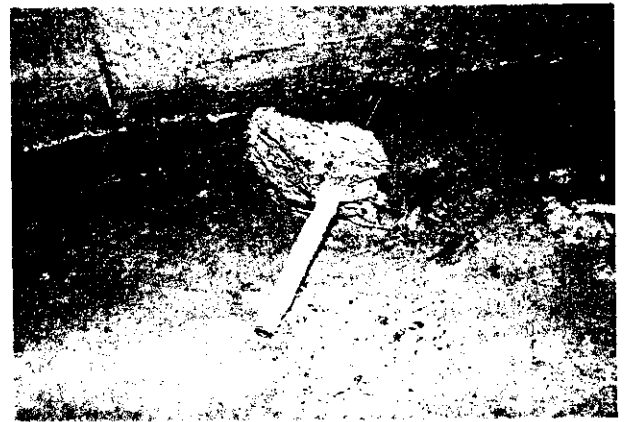


Photo 1 Fracture situation of concrete of surface layer after pull-out test of all screw cutting bolt

3.2 実験結果

実験結果は Table 3 に示すとおりで、一部の供試体を除いてほとんどが、ボルトの破断となった。以下 Table 3 の供試体 No. を用いて説明する。

3.2.1 ボルトの表面形状による差異

ボルトの表面形状が異なる供試体 No. 1, 2 および 3 において、全ネジ切および異形棒鋼を使用した No. 1 および 3 は同程度の軸応力で、Photo 1 に示すような形状で表層部分のコンクリートが破壊した。最終耐力は素材の破断強度とほぼ一致する。しかし、丸鋼を使用した場合には、表層部分のコンクリートの破壊と同時にボルト素材の降伏応力以下で引抜けた。これは、コンクリートに定着した鉄

筋と同様に、ボルト表面の凸凹が附着性能に影響を与えることを示唆するものであり、丸鋼は穿孔ボルト用としては不向きである。

3.2.2 穿孔長による差異

ボルト径 30 mm で穿孔長を変えた No. 5, 6 および 7 において、穿孔長 300 mm と 450 mm では、同程度の軸応力で、表層部分のコンクリートが破壊した後にボルトが破断したが、穿孔長 150 mm ではボルト素材の降伏応力以下でコンクリートと共に抜け出した。また、引抜き荷重作用時のボルト各部の軸方向ひずみは Fig. 5 のように、上部から下部へ逐次減少する傾向がある。これは、引抜き荷

Table 3 Results of static pull-out tests

Specimen No.	Destruction of base concrete				Final destruction		
	Load (tf)	Axial stress on bolt (kgf/cm ²)	Destruction shape		Load (tf)	Axial stress on bolt (kgf/cm ²)	Type of destruction
			Angle	Depth (cm)			
1	14~15	3 180	45°	4	23.2	4 920	Fracture
2	21.6	2 720	—	2	21.6	2 720	Pull out
3	27~28	3 590	45°	4	36.4	6 130	Fracture
4	14~15	2 830	45°	7	23.6	4 450	Fracture
5	13~14	2 640	45°	6	22.2	4 180	Fracture
6	11.9	2 240	45°	12	11.9	2 240	Pull out
7	15~16	3 010	45°	6	23.6	4 450	Fracture
8	130~140	2 650	45°	16	222.8	4 220	Pull out
9	150~160	2 840	45°	17	227.4	4 310	Pull out

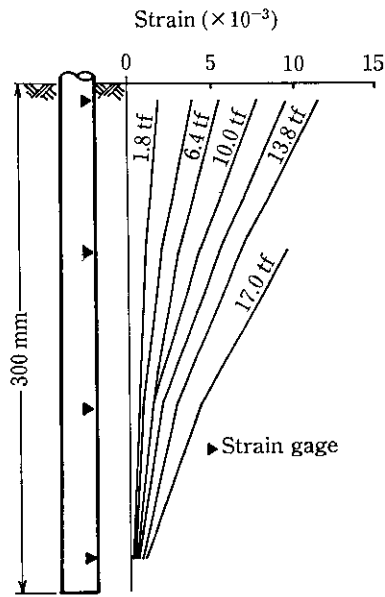


Fig. 5 Strain of the M 30 bolt in axial direction

重に対してボルトと樹脂の接着面全域が均等に抵抗するものではなく、上部の付着力に依存する傾向が強いことを示しており、コンクリートに定着された異形鉄筋の軸方向ひずみの分布¹⁾に類似している。全ネジ切ボルトのネジ山は、樹脂との付着において、異形鉄筋のふし部と同様の働きがあると言える。

3.2.3 ボルト径による差異

大口径ボルトも、小口径ボルトと同様に、ボルト素材の降伏応力度前後の引抜き荷重で表層部分のコンクリートが破壊した。しかし、最終的な破壊は No. 8 および 9 とともに、ボルトと充填材の境界面で付着破壊を起して引抜けとなっており、小口径の場合と異なる。しかし、引抜け時のボルト軸応力度は、No. 2 や No. 6 のような小さい応力度ではなく、ボルトの破断応力直前であり、No. 8 と No. 9 は No. 5 や No. 7 と同レベルと考えられる。また、引抜き荷重作用時のボルト各部の軸方向ひずみは、Fig. 6 のとおりであり、小口径ボルトと同等の荷重伝達の傾向を示していることから、小口径、大口径ともに、ボルト径の 10 倍以上の穿孔長を確保すれば、実用上十分な引抜き耐力が得られるものと判断される。

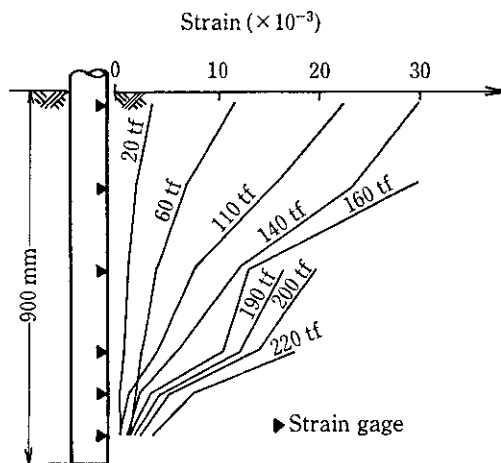


Fig. 6 Strain of the M 90 bolt in axial direction

4 破壊過程の推論

静的引抜き実験の結果に基づく穿孔ボルトの破壊過程は、次のように推論できる。

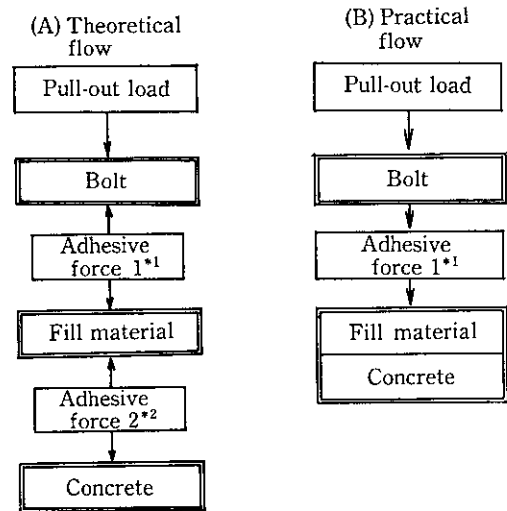
4.1 破壊モード

穿孔ボルトに作用する引抜き荷重は、理論的には Fig. 7 の (A) の順で基礎コンクリートへ伝達されるが、静的引抜き実験において充填材自体の破壊や充填材と基礎コンクリートの付着破壊が生じていないことから、実用上 Fig. 7 の (B) のような伝達順序と考えられる。また、実験において、最終的な破壊がボルトの破断あるいはボルトの引抜けとなっても、これに先行して表層部分のコンクリートが局部的に破壊する 1 次破壊が起る。よって、破壊過程は次の二とおりに限定できる。

- (1) 表層部分のコンクリート破壊 → ボルトの破断
- (2) 表層部分のコンクリート破壊 → ボルトの引抜け

4.2 1次破壊

1 次破壊によって形成される表層部分のコンクリート破壊片は、一連の引抜き実験をとおして円錐形状を呈する。これは、せん断支配の主応力面におけるコンクリートの破壊である。この破壊が、Fig. 8 に示す深さ x_n なる部分のコンクリートのせん断抵抗力 $Q(x_n)$



*1 Adhesive force between bolt and fill material
*2 Adhesive force between fill material and concrete

Fig. 7 Flow diagram of pull-out load's transmission

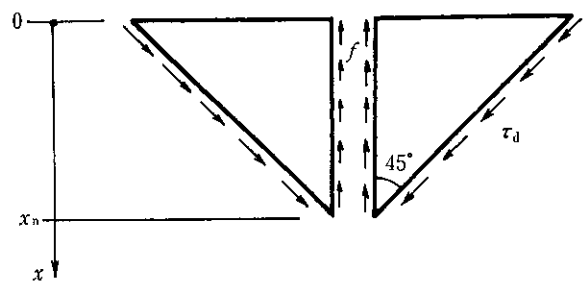


Fig. 8 The balanced model for initial destruction test

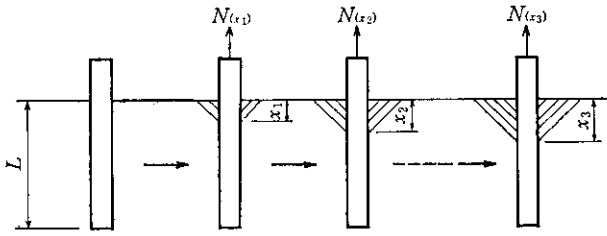


Fig. 9 Progression of initial destruction

とボルトと充填材の付着力によって伝達される引抜き力 $T_{(x_n)}$ との力のつり合いによって起るものと仮定すると、(1) 式の条件で破壊し、(2) 式の条件では破壊が起らないこととなる。

$$T_{(x_n)} = \int_0^{x_n} \pi df(x) dx > Q_{(x_n)} = \sqrt{2} \pi \tau_d x_n^2 \dots \dots \dots (1)$$

$$T_{(x_n)} = \int_0^{x_n} \pi df(x) dx < Q_{(x_n)} = \sqrt{2} \pi \tau_d x_n^2 \dots \dots \dots (2)$$

- ここに、 x_n : 破壊深さ (cm)
- d : ボルト径 (cm)
- f : ボルトと先充填材の付着応力度 (kgf/cm²)
- τ_d : コンクリートのせん断強度 (kgf/cm²)

また、実験にて破壊したコンクリートは、形状は保持しているものの、残存耐力はなく、(1) 式から (2) 式の関係に転換するまでに、引抜き荷重の増加にともなって Fig. 9 に示すように、破壊が順次深さ方向へ進行したようである。

4.3 2次破壊

1次破壊が進行し、 $T_{(x_n)}$ と $Q_{(x_n)}$ の関係が (2) 式となれば1次破壊は終了し、引抜き荷重に抵抗するものは1次破壊面以下のボルトと充填材の付着力だけであり、付着力の深さ方向への分布を平均値として扱うことによって、次式で表わせる。

$$S = (L - x_3) \pi d \bar{f} \dots \dots \dots (3)$$

- ここに、 S : ボルトと充填材の付着力による引抜き抵抗力 (kgf)
- L : 穿孔長 (cm)
- x_3 : 1次破壊の最終深さ (cm)
- d : ボルト径 (cm)
- \bar{f} : ボルトと充填材の平均付着強度 (kgf/cm²)

したがって、ボルトの破断荷重が N_d であるとき、2次破壊がボルトの破断あるいはボルトの引抜けとなる条件は、それぞれ次のようになる。

- ボルトの破断 : $N_d < S$
- ボルトの引抜け: $N_d > S$

5 引抜き耐力の算定

破壊過程の推論より、穿孔ボルトの耐力算定式は次式となる。

$$S_{max} = \min\{(L - x_3) \pi d \bar{f}, N_d\} \dots \dots \dots (4)$$

- ここに、 S_{max} : 引抜き耐力 (kgf)
- N_d : 素材強度から決まるボルトの破断荷重 (kgf)

いま、この算定式において、 x_3 と \bar{f} は未知である。以下にそれぞれの算定方法を示す。

5.1 1次破壊の最終深さ (x_3) の算定

x_3 は Fig. 10 において $Q(x)$ と $N(x_3)$ が接するコンクリート表面からの深さであるが、 $N(x_3)$ の曲線式が未知であるため、これを直

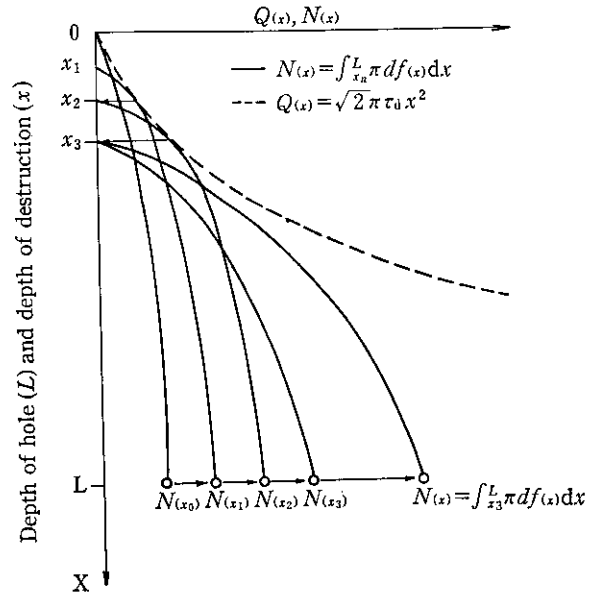


Fig. 10 Progress of initial destruction with increase of $N(x)$

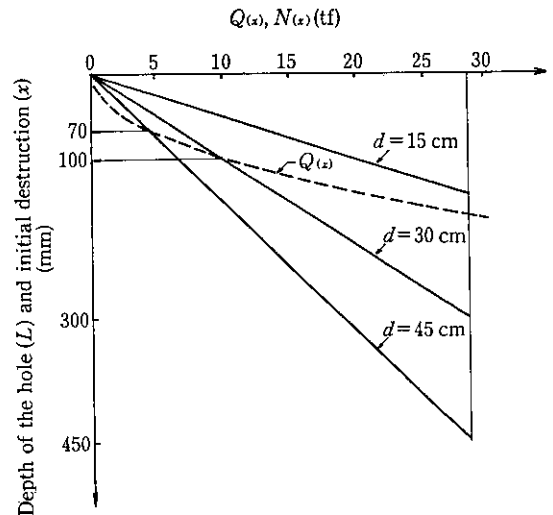


Fig. 11 Calculation diagram for initial destruction depth (M 30)

線と仮定し、Fig. 11 に示す方法で交点を求めた。この方法で x_3 を求めると、穿孔長 L の増加にともなって x_3 は小さくなり、Table 3 の結果とも傾向的に一致している。したがって x_3 は、M 30 で 7 cm、M 90 で 20 cm とするのが妥当である。

5.2 ボルトと充填材の平均付着強度 (\bar{f}) の算定

充填材をエポキシ樹脂に、ボルト素材を全ネジ切りに限定した場合 \bar{f} は穿孔径と穿孔長の影響を受ける。この影響を調べるために、破壊状態がボルト引抜けとなるように低強度の樹脂を用いた供試体 (Fig. 12) を用いて充填材の厚さ X と穿孔長 Y を変化させて引抜き実験を行った結果、 X に対しては Fig. 13、 Y に対しては Fig. 14 のような関係があり、 \bar{f} は穿孔径および穿孔長の変化にともなって次式のように補正する必要がある。

$$\bar{f} = \alpha \beta \times (\text{基準 } \bar{f}) \dots \dots \dots (5)$$

- ここに、 α : 穿孔径による影響係数
- β : 穿孔長による影響係数

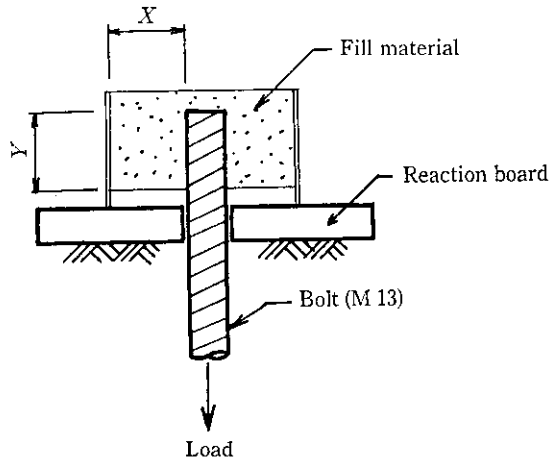


Fig. 12 Test specimen for confirmation of the influence of thickness (X) of fill material and hole length (Y)

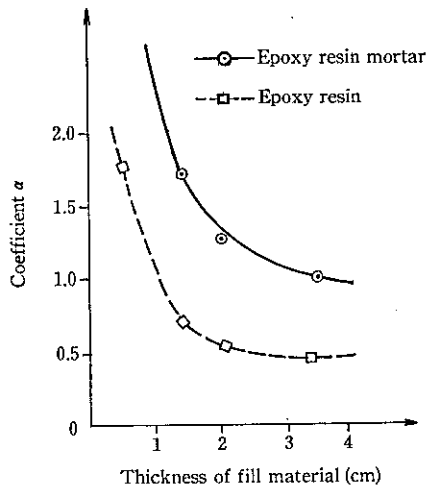


Fig. 13 Relationship between thickness of fill material and coefficient α

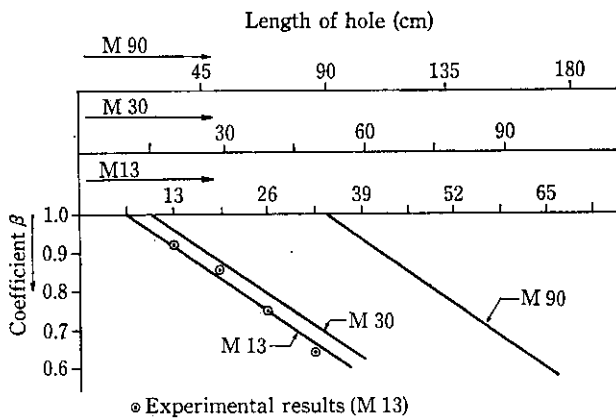


Fig. 14 Relationship between length of hole and coefficient β

なお、基準 f は 30°C 、24 h 養生時の引張せん断強度とし、エポキシ樹脂で 160 kgf/cm^2 、樹脂モルタルで 100 kgf/cm^2 である。

5.3 実験値との比較

(4) 式より算定した理論値と実験値の比較を Table 4 に示す。理論値はやや安全側を示す傾向があるが、実験値に近い値となって

Table 4 Comparison of experimental results with theoretical results

Specimen No.	1	4	5	6	7	8	9
Bolt diameter (mm)	30	30	30	30	30	90	90
Hole length (mm)	300	300	450	150	300	900	1350
L (cm)	30	30	45	15	30	90	135
x_3 (cm)	7	7	7	7	7	20	20
d (cm)	3	3	3	3	3	9	9
f (kgf/cm^2)	139	139	120	160	139	100	78
$(L \cdot x_3)df$ (tf)	30.1	30.1	43.0	12.1	30.1	198.0	253.0
N_d (tf)	>22	>22	>22	>22	>22	>220	>220
S_{max} (tf)	22	22	22	12.1	22	198.0	220
Experimental results (tf)	23.2	23.4	22.2	11.9	23.6	222.8	227.4

いる。多少の差が生じた原因としては、 α と β の確認に用いた供試体が実物に比べて小さかったことや、 x_3 を一定としたことが考えられる。

6 疲労実験

静的な引抜き耐力について前章で述べたが、設備の固定用となる穿孔ボルトには、振動などの繰返し荷重を受けるケースが多く、疲労破壊を無視できない。そこで、コンクリート、樹脂、鋼材の複合体である穿孔ボルトに、繰返し荷重を加えて、その疲労特性を把握した。

6.1 実験概要

供試体は Fig. 15 に示す一辺 90 cm のコンクリート立方体にダイヤモンドコアドリルで穿孔し、全ネジ切ボルトを挿入した後、エポキシ樹脂を充填した。なお、下側に供試体 M36 を上側に反力用ボルト M42 を配置した。

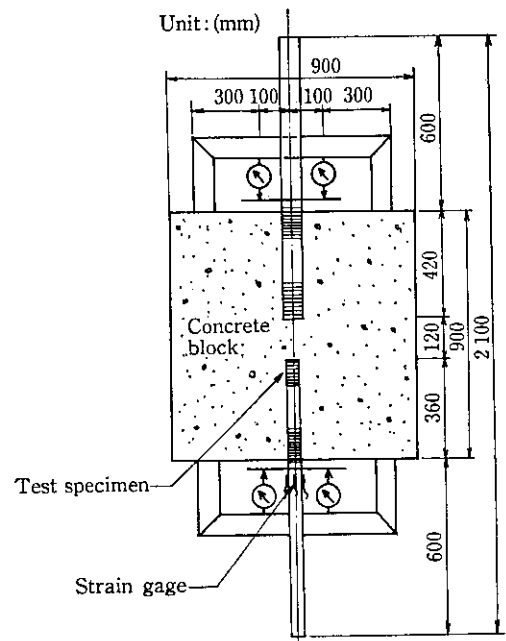


Fig. 15 Shape and size of test specimen for fatigue test

Table 5 Test stress for each test specimen

Specimen No.	Lower stress (kgf/mm ²)	Upper stress (kgf/mm ²)	Amplitude of stress (kgf/mm ²)
1	2	22	20
2	2	16	14
3	2	28	26

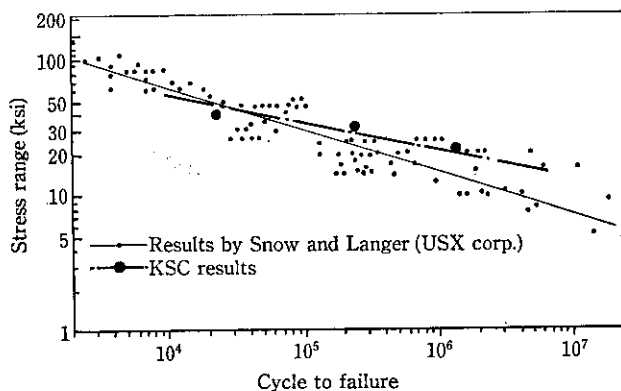


Fig. 16 Failure cycles related to stress range

応力振幅は Table 5 のとおり下限応力を一定とし、上限応力を変えた 3 ケースを設定した。載荷は電気サーボ型移動式疲労試験機を使用し、3.0 Hz の繰返し速度で破壊するまで行った。

6.2 実験結果

各供試体の実験結果を、Fig. 16 に示す既往のボルト素材の S-N

曲線にプロットすると、穿孔ボルトの疲労特性はボルト素材の疲労特性と類似しており、供試体の破壊形態もすべてボルト素材の疲労破壊である。したがって、静的な引抜き耐力の設計によって定められた穿孔ボルトの仕様であれば、充填材およびコンクリートの疲労による耐力低減は考慮しなくてよい。

7 結 論

エポキシ樹脂を用いた穿孔ボルトの各種引抜き実験に基づき、破壊過程の推論、耐力算定式の検討および疲労特性の確認を行った結果、次の知見を得た。

- (1) ボルト素材表面の形状が樹脂との付着力に与える影響は大きく、丸鋼は穿孔ボルトとして使用しない方がよい。
- (2) 引抜き荷重に対して、ボルトと樹脂の接着面全域が均等には抵抗せず、上部の付着力に依存する。
- (3) 大口径ボルト (M90) と小口径ボルト (M30) のいずれも、穿孔長がボルト径の 10 倍以上あれば、表層部分のコンクリートが破壊する 1 次破壊が先行して起り、ボルトの破断あるいはボルト破断応力付近での引抜けとなる。したがって、M90 以下の穿孔ボルトについては、ボルト径の 10 倍以上の穿孔長で設計すれば、実用上十分な耐力が得られる。
- (4) 疲労特性はボルト素材の疲労特性と一致する。

以上のことから、穿孔ボルトの設計上の耐力保証は可能であるが、いずれにせよ完全な施工管理が行われていることであり、品質管理上、寒冷時における使用樹脂や養生方法の選定には十分な配慮が必要である。

最後に、今回の実験に際して多大なご協力をいただきました株式会社熊谷組土木設計部に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岡田恒男, 松崎育弘: 「アンカーボルトの設計・施工の考え方」, コンクリート工学, 22 (1984) 7, 2-7
- 2) 上田為敏, 岡本勝昭: 「穿孔ボルトの引抜き耐力について」, 土木学会年次学術講演概要集, (1982)
- 3) 土野 秀, 白川 潔: 「大径異形鉄筋 (D51) の定着強度に関する実験的研究」, 土木学会年次学術講演概要集, (1972)
- 4) 山口章三郎: 「エポキシ系接着剤による金属接着部の耐久性に関する研究」, 工学院大学研究報告第 29 号, (1971)
- 5) 日本機械学会: 「金属材料疲労強度の設計資料 I」, (1970), 1-9, [日本機械学会]