

あと施工アンカーボルトの動的引抜き破壊メカニズムに関する実験的考察

DYNAMIC STRENGTH MECHANISM OF CHEMICAL AND MECHANICAL ANCHOR BOLTS UNDER PULLOUT LOADING

園田佳巨*

佐藤紘志**

篠原敬治***

小林行雄****

Yoshimi SONODA, Hiroshi SATOH, Keiji SHINOHARA, Yukio KOBAYASHI

- * 工博 防衛大学校講師 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
 ** 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
 *** 工修 神奈川県産業技術総合研究所 材料工学部専門研究員 (〒243-04 海老名市下今泉705-1)
 **** 神奈川県産業技術総合研究所 材料工学部専門研究員 (〒243-04 海老名市下今泉705-1)

Experimental studies were performed to investigate the dynamic strength mechanism of chemical and mechanical anchor bolts under pullout loading. In the experiments, the effect of loading speed was measured on the dynamic strength and failure modes of chemical and mechanical anchors, respectively. It is confirmed that the failure mode of mechanical anchor changed radial crack into cone failure by virtue of dynamic pullout loading. In the high speed pullout test of mechanical anchors, the area of cone failure increased about 40%, but the ultimate strength didn't necessarily increase. On the other hand, most of the failure modes of chemical anchors were break away of bolt and ultimate strength of chemical anchors increased remarkably under high speed loading. Finally, axi-symmetric finite element analysis was applied to consider the response of surface strain under pullout loading tests.

KeyWords: dynamic pullout loading, cone failure, chemical and mechanical anchor bolts

1. 緒言

あと施工アンカーは施工が容易であることから、従来、主に建築分野において吊り天井や配管等の比較的軽微な用途に利用されてきたが、最近では耐震補強壁やガードレール支柱等の定着など、土木、建築分野を問わず、構造安全上重要な部位に至るまで利用され始めている。しかし、あと施工アンカーには多種多様の製品が存在することや、その性能が施工条件等に左右されやすい特徴を有することから、各種アンカーの耐力の正確な評価は困難であり、コンクリート母材への定着メカニズムによる分類を用いた簡易な評価しかできないのが現状である。現在、日本建築学会¹⁾や日本内燃力発電設備協会²⁾等々に示されている設計法も、簡易な静的な力のつり合いから得られたもので、必ずしも複雑な抵抗機構を持つあと施工アンカーの特性を正確に評価したものとは言い難い。

これまで、あと施工アンカーに関する研究は主に建築の分野で行われており、その代表的な例として、細川³⁾は、各種アンカーについて実験を主体とした詳細な検討を行い、施工条件と耐力特性の関係等について考察を行っている。また、土木分野でも、丸山らの組合せ荷重が作用したときの耐荷性状に関する研究⁴⁾や、前野らの付着型アンカーボルトの破壊機構に関する研究⁵⁾等々が挙げられる。これらの研究により、あと施工アンカーの静的耐力特性は次第に明らかにされつつあるが、動的な耐力評価に関する研究は見当たらない。しかし、耐震補強壁等の動的な荷重が作用する部位に使用されるケースが増えてきていることや、通常の固定用吊り金具等でも地震時の安全性に対する要求が厳しくなりつつある現実を考慮すると、その動的力学特性の概要を把握することは非常に重要であるものと考えられる。

そこで、本研究ではあと施工アンカーボルトに動的な引抜き荷重が作用したときの抵抗メカニズムの概要を把握することを目的に、金属系、接着系2種類の定着機構の異なるアンカーを対象に載荷速度をパラメータとした引抜き試験を行い、その動的引抜き破壊特性を検討した。

2. 実験の概要

本研究は、金属系と接着系の2種類の一般的な使用条件における動的引抜き耐力を調べることを目的としている。したがって、コンクリート母材への定着機構が全く異なる両者を力学的観点から比較するためには、ボルトの埋込み深さ等の条件を合わせる方が望ましいが、本実験ではあえて現場における一般的な使用条件下で検討を行うこととした。

2.1 実験試験体

本実験で用いた金属系(図-1(b)参照)と接着系の2種類のあと施工アンカーボルトは、それぞれ表-1に示すタイプのものである。コンクリート母材への埋め込み深さは、金属系アンカーでは30mm、接着系アンカーでは70mmと大きく異なっている。なお、使用するボルトの径がM8と小さいことから、実験結果に対する骨材の影響を極力少なくするために、本実験では、表-2に示すような示方配合による1:3モルタルを用いて試験体を製作した。なお、試験時のテストピースの圧縮強度は、210~220kgf/cm²(平均値 $\bar{\sigma} = 215\text{kgf/cm}^2$)であった。試験体の寸法は、ボルトの引抜きによるコーン破壊面の角度を45°と想定して、図-1に示すような縦300mm×横200mm×高さ150mmの直方形とした。

2.2 実験方法

載荷方法は、図-2のような引張載荷装置を高速載荷装

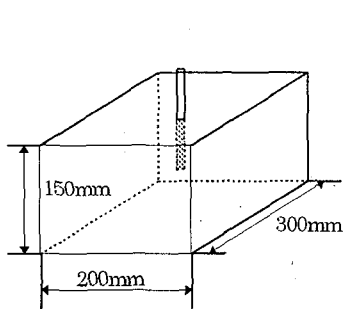
表-1 アンカーボルトの諸元

アンカー種類	タイプ	ボルト径	穿孔径	穿孔深さ
金属系アンカー	内部コーン拡張型	M8 (平均断面積 $\bar{A}=49.70\text{mm}^2$)	9 mm	30 mm
接着系アンカー	ポリエステル樹脂系	(平均破断耐力 $\bar{P}=2.53\text{tf}$)	9 mm	70 mm

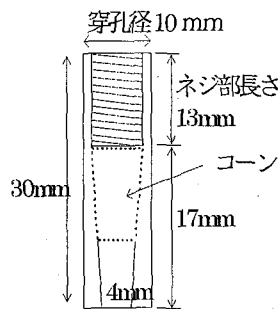
表-2 モルタルの示方配合

呼び強度 (Kgf/cm^2)	水セメント比 W/C(%)	空気量 (%)	単位量(kgf/m^3)		
			水	セメント	細骨材
180	72.0	4.0	285	396	1434

(圧縮強度平均値 $\bar{\sigma} = 215 \text{ kgf/cm}^2$)



(a) 試験体寸法



(b) 金属系アンカー寸法

図-1 試験体構造寸法

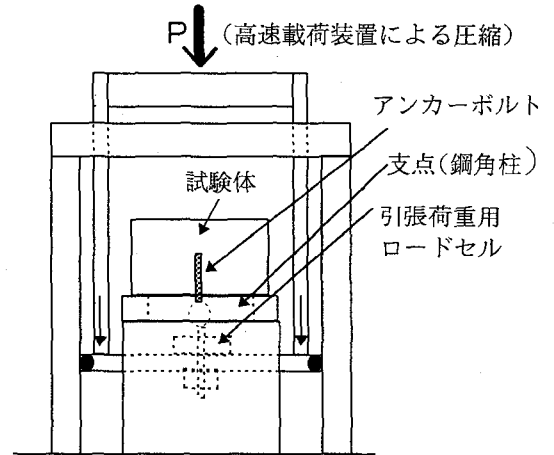


図-2 引抜き載荷試験状況

置 (最大容量 50tf, 最大載荷速度 4m/s の下に設置することにより、圧縮力を引張力に変換してボルトに引き抜き荷重を与えた。試験体は、ボルト設置面を下側に向け、載荷装置の下部側の可動フレームを跨ぐようにして4辺を支点間距離 16cm (支点幅 2 cm) で単純支持させた。ボルトの定着は、先端に取り付けたアイナットを介して可動フレームと連結させ、締付けトルクは与えないように設置した。なお、試験体側面の拘束条件は自由とした。

計測項目は、引き抜き荷重と載荷変位および試験体表面ひずみの3項目であり、引抜き荷重は引張圧縮両用型ロードセル (定格容量 5tf) で、載荷変位はレーザ式変位計 (測定範囲 300mm±100mm) を用いて計測した。試験体のひずみは、ボルト埋込み側表面ひずみのみを計測対象とし、図-3 に示すようにボルト中心からの距離が 25mm、50mm の2箇所 で2軸ゲージを用いて、半径方向および円周方向のひずみを計測した。

実験ケースは、表-3 に示すように2種類のアンカーボルトに対して、静的・低速・高速の3種類の載荷速度に

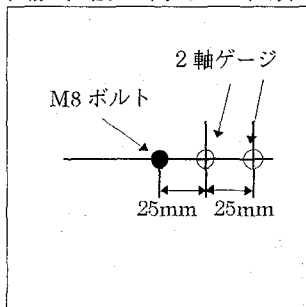


図-3 ひずみゲージの貼付位置

よる引抜き試験をそれぞれ5回ずつ行った。なお、この表中の載荷速度は、図-4 に示すようなレーザ式変位計による実測の引張変位-時間関係の勾配から換算した値の平均値を示しており、ひずみ速度は使用したボルト長さを基準に計算した公称ひずみをもとに求めている。この表より、本実験ケースが、 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ レベルの広範囲なひずみ速度範囲を網羅していることが認められる。

表-3 実験ケース一覧

実験ケース	回数	平均載荷速度 (cm/s)	平均ひずみ速度 ($1/\text{s}$)
静的載荷	5	9.32×10^{-4}	1.16×10^{-4}
低速載荷	5	3.272	0.41
高速載荷	5	360.7	45.9

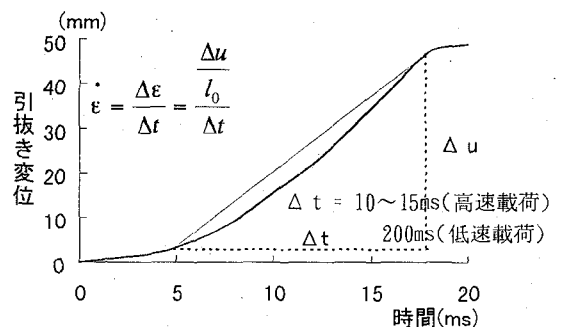


図-4 ひずみ速度の換算方法

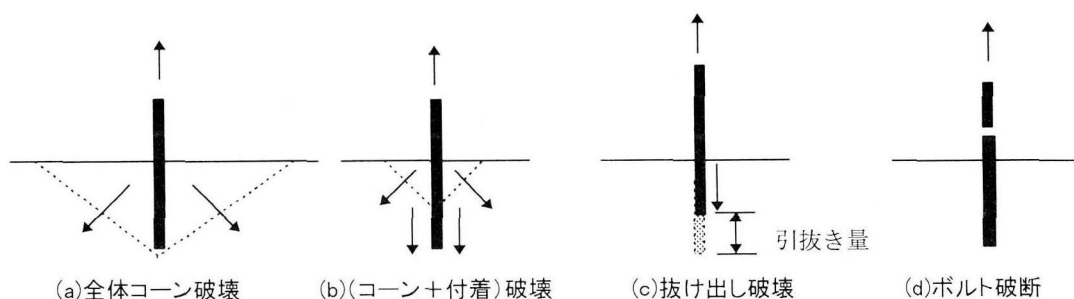


図-5 引抜き力を受けるアンカーボルトの破壊形態

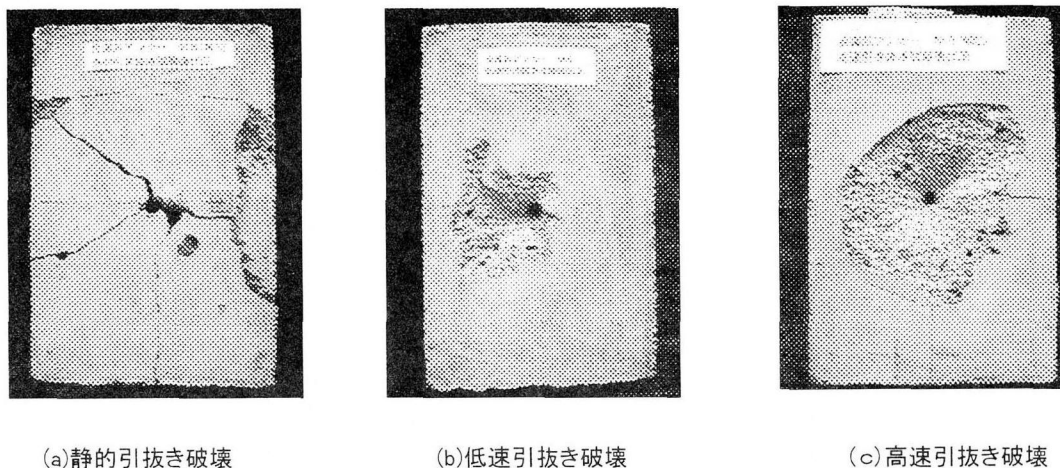


写真-1 金属系アンカーの引抜き破壊形態

表-4 コーン破壊面の直径と引抜き耐力の比較

(a)低速載荷

計測位置	低速No1	低速No2	低速No3	低速No4	低速No5
0-180° (ライン)	8.4	7.6	14.0	4.9	6.6
10-190°	8.4	8.5	13.4	7.6	6.4
20-200°	8.7	8.8	12.4	4.7	5.2
30-210°	9.7	9.8	11.3	6.6	10.9
40-220°	11.8	10.8	10.0	10.5	10.7
50-230°	16.2	11.8	10.8	10.3	10.0
60-240°	16.0	12.8	10.1	10.2	12.3
70-250°	14.1	13.3	8.7	11.3	10.2
80-260°	12.6	14.8	8.4	11.5	11.1
90-270°	10.4	11.7	6.6	11.6	10.4
100-280°	9.7	11.1	6.9	6.9	4.5
110-290°	8.7	11.8	7.2	8.1	4.0
120-300°	8.4	9.5	7.4	8.8	3.5
130-310°	8.3	7.8	7.5	7.6	3.6
140-320°	9.5	6.8	8.1	11.2	4.7
150-330°	9.7	6.3	9.0	11.0	5.3
160-340°	8.8	6.3	10.3	10.2	5.7
170-350°	8.6	6.7	12.4	10.7	4.7
コーン径平均値	10.4	9.8	9.7	9.1	7.2
標準偏差	2.1	2.2	1.9	2.0	2.8
最大耐力P(tf)	1.11	1.10	1.07	1.07	1.05

(全試験体 コーン径平均 $\bar{d}=9.2\text{cm}$ 、耐力平均 $\bar{P}=1.08\text{tf}$)

(b)高速載荷

計測位置	高速No1	高速No2	高速No3	高速No4	高速No5
0-180° (ライン)	11.1	15.3	13.5	14.1	13.8
10-190°	11.6	15.4	13.7	13.4	12.5
20-200°	12.3	16.2	14.1	14.5	12.0
30-210°	13.0	17.5	14.0	16.7	11.7
40-220°	13.3	19.3	14.1	16.8	12.2
50-230°	13.3	18.8	14.1	17.0	13.2
60-240°	12.1	16.3	14.1	15.5	13.6
70-250°	13.0	15.1	13.9	14.7	14.1
80-260°	14.2	14.8	14.0	14.4	12.4
90-270°	14.8	15.4	12.5	15.0	10.9
100-280°	14.8	14.3	12.1	15.1	9.7
110-290°	15.1	14.0	14.4	14.1	9.6
120-300°	13.9	14.4	14.6	12.8	10.7
130-310°	13.2	14.2	13.9	12.3	12.4
140-320°	12.9	12.9	13.7	12.9	12.1
150-330°	11.9	13.3	14.8	11.8	13.0
160-340°	11.4	13.7	13.7	12.5	13.2
170-350°	11.0	14.2	13.7	13.6	14.5
コーン径平均値	12.9	15.3	13.8	14.3	12.3
標準偏差	1.0	1.3	0.4	1.2	1.1
最大耐力P(tf)	1.22	1.23	1.19	1.22	1.11

(全試験体 コーン径平均 $\bar{d}=13.7\text{cm}$ 、耐力平均 $\bar{P}=1.19\text{tf}$)

3. 実験結果および考察

3.1 破壊形態の比較

一般に、アンカーボルトに引抜き力が作用する場合の破壊形態には、図-5に示すような(a)全体コーン破壊、

(b)(コーン+付着)破壊、(c)抜け出し破壊、(d)ボルト破断の4種類があると言われている³⁾。そこで、ここでは金属系、接着系それぞれのアンカーボルトの引抜き破壊形態に荷重速度が与える影響について検討を行った。

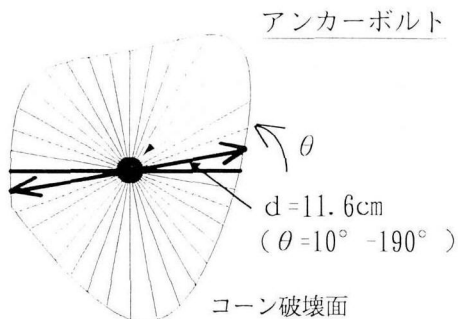


図-6 コーン破壊面の計測方法

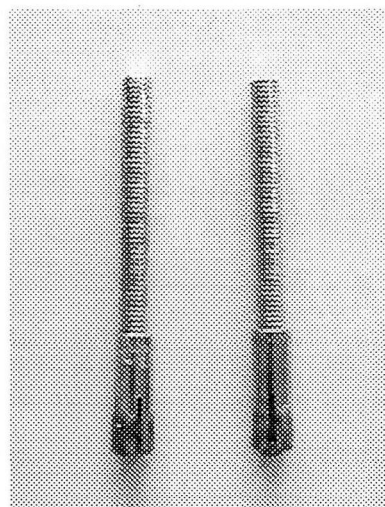
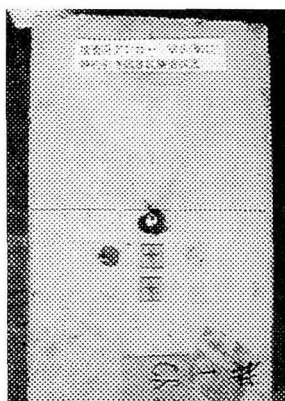
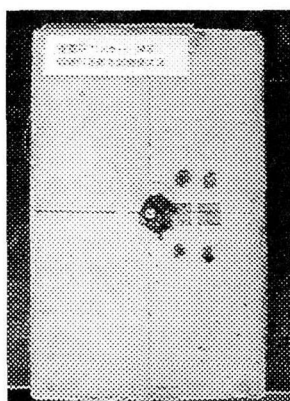


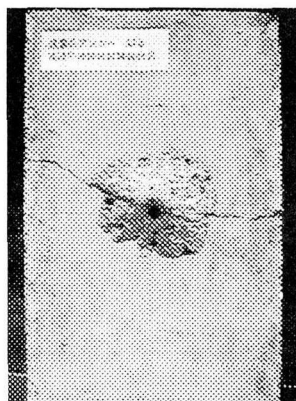
写真-2 試験後の金属系アンカーボルトの状況



(a)静的引抜き破壊



(b)低速引抜き破壊



(c)高速引抜き破壊

写真-3 接着系アンカーの引抜き破壊形態

(1)金属系アンカー

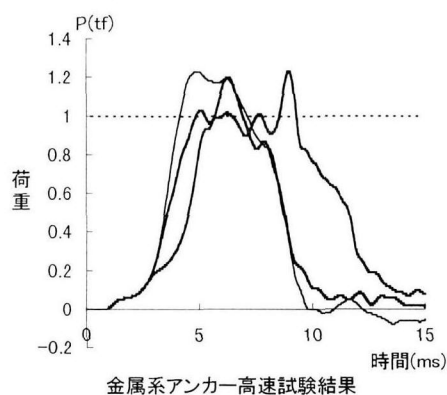
金属系アンカーの場合、載荷速度にともなう顕著な破壊形態の変化が認められた。写真-1 (a)~(c)は、それぞれ静的載荷、低速載荷、高速載荷による破壊形態の一例を示したものである。すなわち、本試験条件では静的荷重に対する破壊はアンカーの拡張力による放射状のひび割れによるものと考えられるが、低速および高速載荷においては明瞭なコーン破壊が発生することが認められた。表-4は、コーン破壊を示した低速・高速載荷実験の試験体について、図-6に示すようにボルト中心を基準にコーン破壊面の直径を 10° 毎に測定した結果を整理したものである。この表より、載荷速度が約 3.3cm/s の低速度から約 3.6m/s へと100倍程度大きくなることにより、コーン破壊面の平均直径 $\bar{d}$ が、 9.2cm から 13.7cm へと50%程度も大きくなることからわかる。また、低速載荷の場合の方が、計測位置によるコーン直径のばらつきが大きくなる傾向にあることが認められた。すなわち、写真-1 (b), (c)からも観察されるように、高速載荷後の試験体は、破壊面が大きくかつ真円に近い形状のコーン破壊を示す傾向にあるのに対して、低速載荷後の試験体は試験体表層部の局所的な強度のばらつきに依存したと思われる不規則な形状のコーン破壊を示した。これは、ここで行った高速載荷ケースのようにひずみ速度レベルが

10^2 近くまで高くなると、低速載荷で見られるような局所的に弱い個所に破壊が進展するだけの時間的余裕が失われるためであるものと推察される。なお、深さ方向におけるコーン破壊の角度には、いずれの試験体においても顕著な変化は見られなかった。

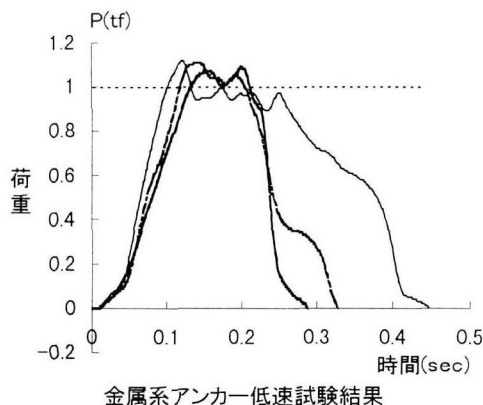
実験後のボルトの状況を写真-2に示す。この写真より、アンカーの表面には拡張部以外には摩耗した形跡は見られず、本形式のアンカーの引抜き抵抗力は拡張部に依存するものと考えられる。なお、この拡張部のみに摩耗した形跡が見られる現象は、載荷速度に関わらず全実験ケースで認められた。したがって、本形式のアンカーへ動的な引抜き力が作用する場合にも、拡張部のみに力が伝達すると考えられることが推察された。

(2)接着系アンカー

接着系アンカーの場合には金属系アンカーと顕著に異なり、写真-3 (a)~(c)に見られるようにほとんどの試験体でボルト破断型の破壊を示した。わずかに高速載荷ケースの2体が、比較的に狭い領域における付着破壊とコーン破壊との複合型を示しただけである。この破壊形態の相違は、接着系アンカーボルトの埋込み深さが 70mm と金属系の約2倍であることが主な原因であり、妥当な結果であると思われる。すなわち、一般にアンカーの設計に用いられている次式でコーン破壊強度とボルト破断



(a)高速載荷



(b)低速載荷

図-7 金属系アンカーの荷重-時間関係

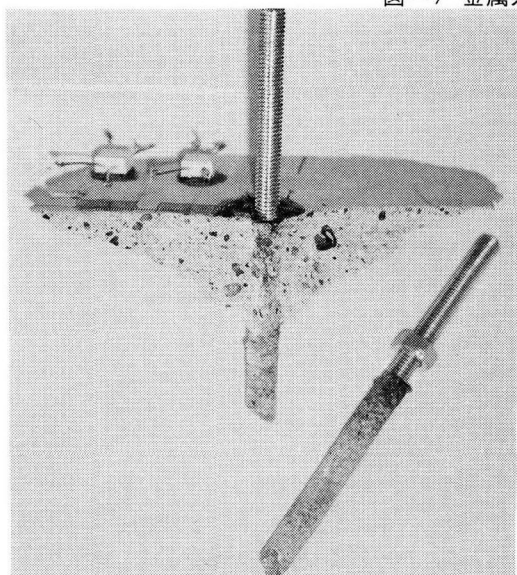


写真-4 付着破壊を示した接着系アンカーの状況

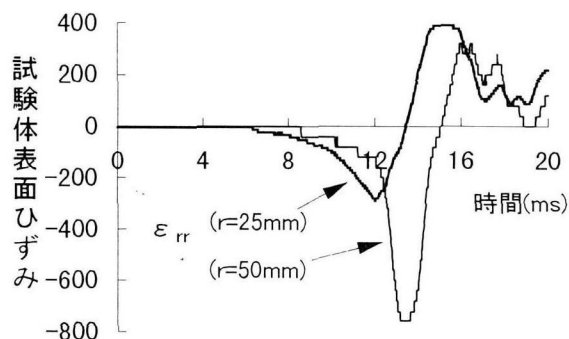


図-8 ひずみ-時間関係(金属系アンカー, 高速載荷)

強度を比較すると、明らかにボルト破断強度の方が小さく、少なくとも静的載荷実験においては接着系アンカーボルトの破断が先行する結果が裏付けられる。

①コーン破壊強度（ただし、 45° のコーン破壊面の広がり仮定している）

$$P_c = A_c \cdot \sigma_t = \left[\pi \left\{ l_c \tan \theta + \frac{d}{2} \right\}^2 - \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] \cdot \sigma_t = \left\{ 3.14(7.0 \tan 45^\circ + 0.40)^2 - 3.14 \cdot 0.40^2 \right\} \cdot 20.0 = 3.43 \times 10^3 (\text{kgf}) \quad (1)$$

ただし、 l_c : アンカーボルトの埋込み深さ、 d : ボルトの直径、 σ_t : モルタル母材の引張強度、ここでは圧縮強度の10%程度の値として、 20.0 kgf/cm^2 とした。

②ボルト破断強度

$$P_s = A_s \cdot \sigma_{ts} = 0.49 \cdot 4100.0 = 2.01 \times 10^3 (\text{kgf}) \quad (2)$$

ここに、 σ_{ts} : 鋼材の引張強さ、 A_s : 有効断面積(cm^2)

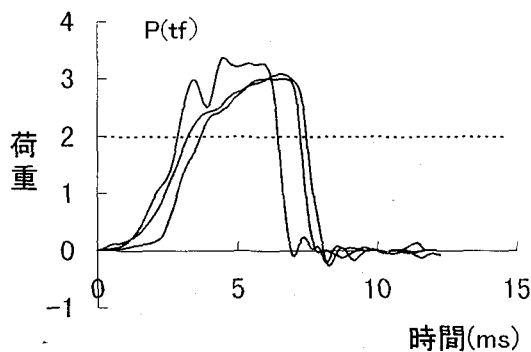
なお、付着破壊を示したケースの実験後のボルトの状況を写真-4に示す。この写真からわかるように、2ケースともボルトが付着破壊を示した部分には、試験体に穿孔した孔とほぼ同じ直径の円筒形状の接着層が、ボルトの周囲にほとんど損傷を受けずに残存していることが認められる。したがって、接着系アンカーにおいて付着

破壊や抜け出し破壊が生じる場合には、コンクリートと接着剤の界面において破壊が生じる可能性が非常に高いことが明らかとなった。

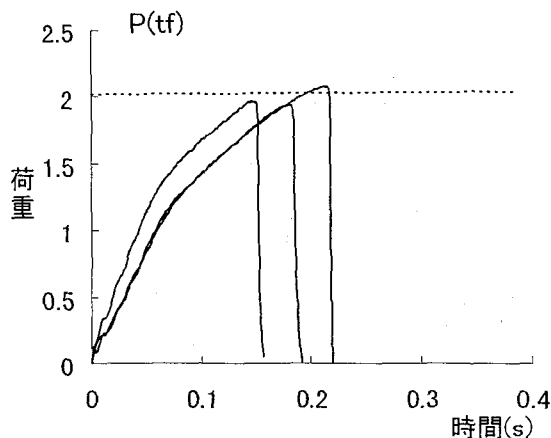
3.2 引抜き荷重-時間関係

(1)金属系アンカー

図-7(a)および(b)は、それぞれ高速載荷、低速載荷試験で得られた引抜き荷重-時間関係を3ケース示したものである。図中の時間軸に平行な破線は、静的試験で得られた最大耐力の平均値を示している。これらより、静的試験結果と比較して、載荷速度の増加とともに最大耐力が10%程度高くなることが認められる。これは、載荷速度の変化にともない、放射状のひび割れ破壊からコーン破壊へと破壊形態が移行したことによるものと考えられる。また、低速載荷と高速載荷との比較から、コーン破壊面直径の拡大率が50%程度であるのに比べて、最大耐力の増加率は10%以下とかなり小さく、両者の間に明確な相関は見られないことがわかる。これは、図-8で示すように高速載荷時の試験体表面のひずみの最大値が約12~14msで発生しているのに対して、最大耐力は図-7(a)に示したように約5~7msで最大値に達しており、引抜き耐力が最大値に至るときには未だコーン破壊面が形成される過程にあり、両者の間に時間的なずれ

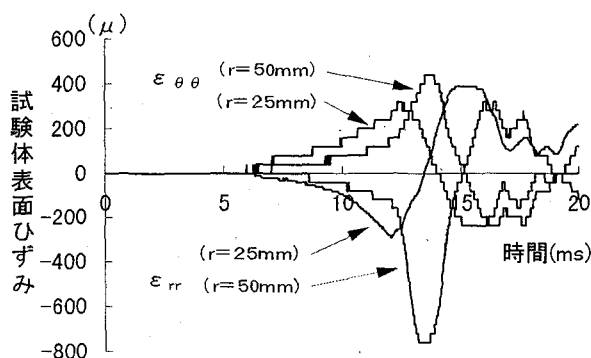


(a)高速載荷

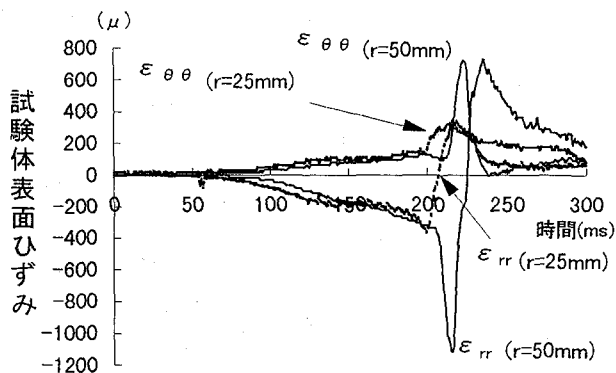


(b)低速載荷

図-9 接着系アンカーの荷重-時間関係



(a)高速載荷



(b)低速載荷

図-10 金属系アンカー試験体表面ひずみ-時間関係

が存在するためであると考えられる。

したがって、動的な荷重がアンカーボルトに作用する場合には、最終的に形成されるコーン破壊面における力の釣り合いからコーン破壊に対する引抜き耐力を求めることは過大な評価を与える危険性があり、望ましくないものと考えられる。

(2)接着系アンカー

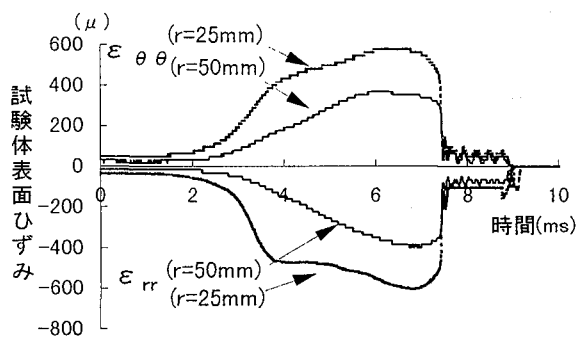
図-9(a)~(b)は、接着系アンカーにおける高速載荷、低速載荷試験時の引抜き荷重-時間関係をそれぞれ3ケース示したものである。これらより、接着系アンカーの場合には高速載荷試験において最大耐力の増加が40%程度見られ、非常に顕著に表れていることがわかる。これは、高速載荷時にはボルトのひずみ速度が約40(1/sec)と鋼材のひずみ速度依存性が顕著になり始める 10^2 レベルに近くなるために、最大耐力の著しい増加につながったものと考えられる。したがって、コンクリート母材の損傷が比較的軽微で、ボルト破断型の破壊形態を示す場合には引抜き耐力は鋼材自体のひずみ速度依存性により決定され、載荷速度とともに増加すると考えて差し支えないものと考えられる。なお、図-9(a)の3ケースの中で、最大引き抜き荷重が式(1)で求めた静的なコーン破壊強度に近い3.4tf程度にまで達した例があるが、現実の実験結果においても写真-4で示した

ようなコーン破壊とボルトの付着破壊の複合破壊が生じている。本実験では、高速載荷実験5ケースの中の2ケースで、コーン破壊をとともうボルトの抜け出しが発生しており、載荷速度の増大にともなう破壊形態の移行が生じる可能性があることが確認された。

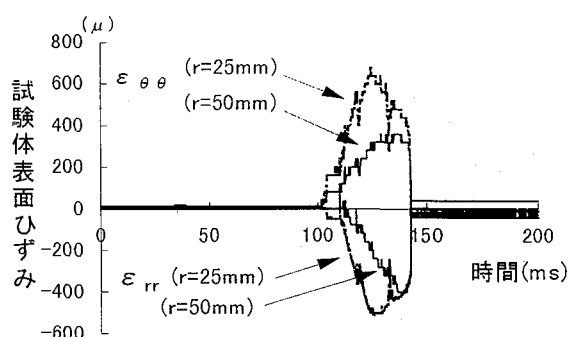
3.3 試験体表面ひずみ-時間関係

(1)金属系アンカー

図-10(a)は、高速載荷ケースの試験体表面に貼付した2軸ひずみゲージにより計測した半径方向のひずみ ϵ_{rr} と円周方向のひずみ $\epsilon_{\theta\theta}$ の時間的変化を示したものである。この図より、ボルト中心から50mm離れた位置のひずみは、25mm離れた位置より2ms程度の時間的遅れとともに最大値に至ることがわかる。また、両ひずみ成分とも、12msまでの単調な上昇域では25mm位置の値の方が大きいのにに対して、その後50mmの位置のひずみの方が大きくなり、特に半径方向の圧縮ひずみが急激に増大することが認められる。これは、コーン破壊の進展が12~14msにおいて試験体表面にまで達し、破壊面に近い50mm位置にその影響がより大きく表われたためであるものと推察される。この傾向は、図-10(b)に示す低速載荷ケースにおいても見られ、やはり200ms以降に50mm



(a)高速載荷



(b)低速載荷

図-11 接着系アンカー試験体表面ひずみ-時間関係

位置で半径方向の圧縮ひずみが急激に増大することが確認された。

(2)接着系アンカー

図-11(a)および(b)は、それぞれ高速載荷時と低速載荷時の半径方向のひずみ ε_{rr} と円周方向のひずみ $\varepsilon_{\theta\theta}$ の時間的変化を示したものである。これらと図-7(a)の比較より、接着系アンカーの場合には各ひずみ成分と引抜き耐力の両者が最大値を示す時間にずれはほとんど無く、ほぼ5~7msでピークを示すことが認められた。また、明らかにボルトに近いゲージの方が、より大きなひずみをとることが認められ、中心より25mm位置で半径方向に最大引張ひずみ $\varepsilon_{rr} = 600\mu$ 、円周方向に最大圧縮ひずみ $\varepsilon_{\theta\theta} = -600\mu$ を示したのに対し、50mm位置ではそれぞれ70%程度の値に低下している。

したがって、ボルトと試験体との間に十分な付着強度が存在し、試験体自体に破壊が見られない場合には表面のひずみ分布はボルト中心からの距離とともに減少する傾向にあると考えられる。なお、本実験では金属系、接着系を問わず、全実験ケースで半径方向のひずみは圧縮ひずみを、円周方向のひずみは引張ひずみを示した。これについては、次節で簡易解析による考察を試みた。

4. 解析的考察

前節で示したように、ボルト中心からの距離が25mm、50mmの試験体表面のひずみは半径方向に圧縮の値を、円周方向に引張の値が得られた。これは、試験体表面の鉛直方向変位が、図-12のようなモードをとることを示唆しているものと考えられるが、試験体表面の鉛直変位分布に着目した研究例⁶⁾は非常に少ない。そこで、ここでは本実験を軸対称問題としてモデル化し、簡易な2次元有限要素法により考察を行った。

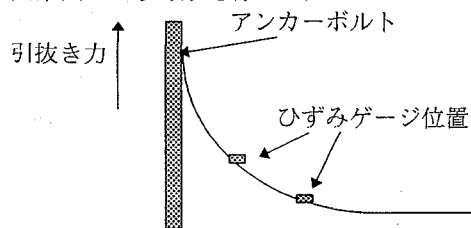


図-12 試験体表面鉛直変位分布

4.1 解析手法

本実験の境界条件は4辺単純支持であり、厳密には軸対称条件とは言えない。しかし、金属系アンカーで見ら

れたコーン破壊の状況等から、長辺と短辺の支間距離の相違の影響は小さいものと考えられる。そこで、ここでは2次元モデルで簡易に考察を行うため、ボルト中心を回転軸とした軸対称問題と仮定してモデル化した。したがって、半径方向ひずみ ε_{rr} と円周方向ひずみ $\varepsilon_{\theta\theta}$ は、以下の式で求めた。

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial N_i}{\partial r} u_i, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u}{r} = \frac{N_i}{r} u_i \quad (3)$$

ここに、 N_i :形状関数 u_i :半径方向節点変位

解析モデルは、図-13に示すような三角形1次要素を用いて、要素数1208個に分割した。境界条件として、AB辺を半径方向(水平方向)に拘束、DE部分(支点)を鉛直方向に拘束するとともに、ボルト上端の2節点に対して鉛直方向に強制変位 $\delta = 0.10\text{mm}$ (引抜き変位)を与えた。数値計算で用いたボルトおよびモルタル試験体の材料諸元値を表-5に示す。

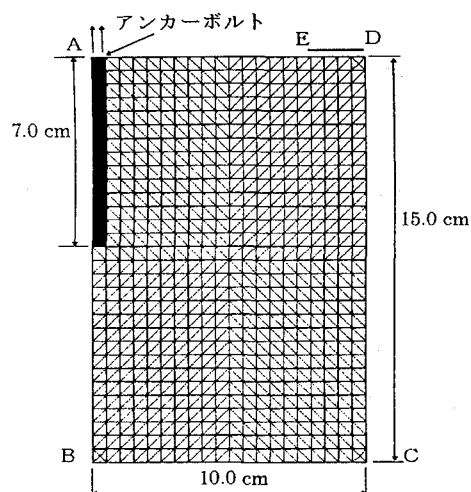


図-13 解析モデル

表-5 計算に用いた材料諸元

材料	アンカーボルト	モルタル母材
弾性係数(kgf/cm ²)	2.1×10^6	2.2×10^5
ポアソン比	0.29	0.15

なお、金属系アンカーの定着機構は、摩擦力および拡張部の支圧力等の影響が混在し、モデル化が困難である。そこで、試験体との定着部に破壊が見られなかった接着系アンカーを対象に、ボルトは試験体に完全に付着しているものと仮定して解析を試みた。

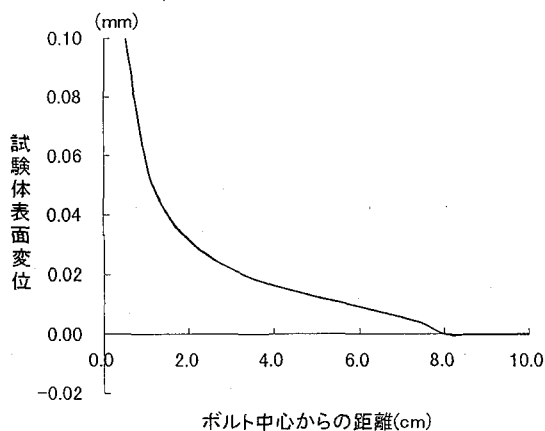


図-14 試験体表面の鉛直変位分布

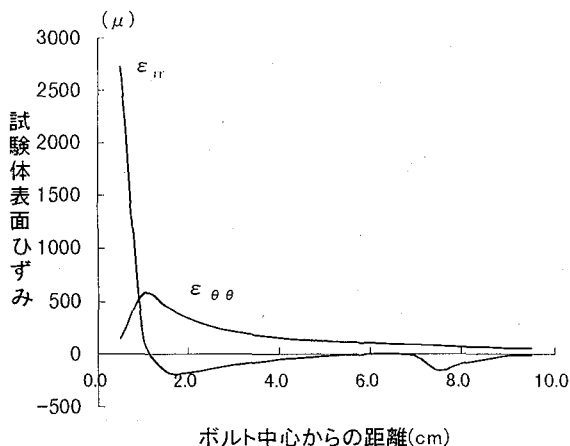


図-15 試験体表面のひずみ分布

4.2 数値計算結果および考察

図-14 は、ボルトの先端に 0.10mm の引抜き変位を与えたときの試験体表面の鉛直変位分布に関する解析結果を示している。この図より、ボルトの定着部近傍で鉛直変位が著しく小さくなり、わずか 2.0cm の距離で約 30% にまで低下し、下側に凸の曲率をする変位モードとなることがわかる。したがって、図-15 に見られるように、ボルト中心から約 2.0cm の位置付近で半径方向に圧縮ひずみが生じることが認められる。また、この図より、ボルト定着部周囲に非常に大きな引張ひずみが生じることとも認められた。したがって、接着剤に十分な引張変形能が無ければ、ボルトの抜け出しが発生する可能性があることが推察される。また、円周方向の引張ひずみも中心から 1.0cm 付近では $\epsilon_{\theta\theta} = 500\mu$ と大きく、ボルト定着部周囲から放射状にひび割れが発生する可能性があることが認められた。本実験でひずみゲージを貼付した 25mm と 50mm 位置の計算値は、実験結果と同様の傾向を示しており、円周方向は引張ひずみ、半径方向は圧縮ひずみの値を取り、ボルト中心からの距離とともに減少傾向にあることがわかる。以上の結果は、定量的な評価には不十分であるが、ここで用いた簡易な数値解析でも、ボルト破壊を示した接着系アンカーに対する定性的考察には有用な結果を与えるものと考えられる。

5. 結論

本研究は、定着機構が異なる 2 種類のあと施工アンカーボルトの動的引抜き荷重に対する破壊メカニズムについて実験的に調べ、その概要に関する考察を行ったものである。ここで得られた成果を要約すると以下のようになる。

- (1) ボルトの埋込み深さが浅い金属系アンカーは、引抜き荷重の速度が速くなるにつれてコーン破壊面積は拡大される傾向にあるが、耐力の有意な変化は認められなかった。これは、コーン破壊の形成途中で最大耐力が得られるためであると考えられる。
- (2) (1)の結果より、金属系アンカーの動的引抜き耐力の評価に、コーン破壊面積の拡大を考慮することは望ましくないものと考えられる。
- (3) ボルトの埋込み深さが深い接着系アンカーは、高速載荷の 2 ケースを除いたほぼ全ての試験体でボルト破断型の破壊を示した。また、高速載荷において顕著な耐力の増大が見られたが、これは鋼材のひずみ速度依存性に

よるものと考えられる。

(4) 接着系アンカーでコーン破壊をとまなうモードを示した 2 例は、最大荷重が静的コーン破壊耐力とほぼ同じ値に達しており、静的設計耐力を用いて破壊モードの移行の可能性が予測できるものと考えられる。

(5) 試験体表面には、半径方向に圧縮ひずみが、円周方向に引張ひずみが発生することが全実験ケースで確認された。この原因は、試験体表面の変位モードが下側に凸の曲率を有するためであることが、簡易な数値計算結果からも推察された。

(6) (5)の結果は試験体の境界条件等に依存するものと考えられ、必ずしも一般性を持たないものと思われる。したがって、各種の境界条件における検討が必要である。

謝 辞：本研究を行うにあたり、日本デコラックス(株)東京営業所所長の佐竹尚信氏および峰岸(株)東京機材部部長の松村光男氏に、それぞれ接着系アンカーと金属系アンカーの提供とともに貴重な御助力をいただいた。ここに記して、心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種アンカーボルト設計指針・同解説、1985 年
- 2) 日本内燃力発電設備協会：自家用発電設備耐震設計のガイドライン、昭和 56 年 3 月
- 3) 細川洋治：あと施工アンカーの強度と剛性に関する基礎的研究(東京大学学位論文)、平成 4 年 5 月
- 4) 堀口博明、丸山久一、清水敬二、堀内友雅：引張・せん断・組合せ荷重下でのあと施工アンカーの耐荷性状、第 21 関東支部技術研究発表会講演概要集 pp. 500-501、平成 6 年 3 月
- 5) 前野裕文、後藤芳顕、小畑誠、松浦聖：引き抜き力を受ける付着型アンカーボルトの定着部の破壊機構に関する研究、土木学会論文集 No. 441/ I -18, pp. 185-192, 1992 年 1 月
- 6) 田中礼治、大芳賀義善：あと施工アンカーの引抜き試験の標準化に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演概要集 pp547-548, 昭和 60 年 10 月

(1996 年 9 月 6 日受付)