

アンカーボルトの引抜き破壊挙動 に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON PULL-OUT FRACTURE BEHAVIOR OF ANCHOR BOLT

山田 和夫
Kazuo YAMADA

ABSTRACT In this study, the acoustic emission method was applied to clarify the fracture process of concrete. The effects of loading method and support condition on the fracture behavior of concrete subjected to the pull-out loading of anchor bolt were discussed experimentally and analytically by paying attention to the crack propagation in a specimen. Following results were obtained in this study:

1) Kaiser effect is recognized in the cyclic pull-out loading of anchor bolt, but is recognized unclearly in the loading level that the non-linear behavior of $P-\delta$ relation is remarkable and then the macroscopical crack is observed.

2) The fracture process of concrete subjected to the pull-out loading can be predicted by using the AE source location search technique.

3) The shape of $P-\delta$ relation obtained by the cyclic loading is more brittle than that obtained by the monotonic loading.

4) The fracture process of concrete subjected to the pull-out loading can be predicted by the finite element method considering the tensile crack by a smeared failure model.

1. はじめに

アンカーボルトの引抜き耐力および最終破壊形態に及ぼす各種要因の影響については、すでに数多くの研究者によって精力的な研究が行われており、引抜き耐力に対する各種の算定式も提案されている^{1) -3)}。しかし、アンカーボルトの引抜き破壊挙動については、今のところ不明な点が多いようである。そのため、本研究ではアンカーボルトの引抜き破壊

過程の追跡にアコースティック・エミッション（以下、単にAEと略記する）法^{4),5)}を適用し、アンカーボルトの引抜き破壊挙動に及ぼす載荷履歴および支持点の影響について実験的および2次元有限要素法（以下、単にFEMと略記する）による解析によって検討を行った。

2. 実験および解析方法

2.1 実験の概要

本実験では、図-1に示すような $35 \times 35 \times 8$ cmの

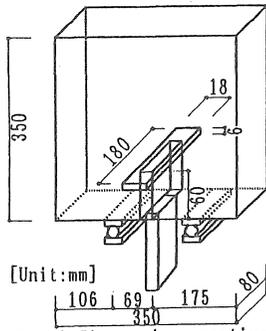


Fig. 1 Size and proportion of specimen

Table 1 Mix proportion

W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)				Slump (cm)
	Water	Cement	Sand	Gravel	
54	200	370	710	1060	16.4

[Note] W/C: Water-cement ratio by weight.

Table 2 Concrete strength

Compressive strength (kgf/cm ²)	Split tensile strength (kgf/cm ²)
473	37.1

平板試験体を使用し、実験要因として加力方法（単調漸増載荷および漸増繰返し載荷の2種類）を取り上げた。アンカーボルトは、埋込み深さ（d）を6cmとし、埋込み区間の付着が零となるように工夫した。また、アンカーボルトの形状はT字の板状のもので、ヘッド部分の高さをd/10の6mm、幅を3d/10の18mm、軸部分の幅をd/10の6mmとした。試験体の製作に際しては、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂（最大寸法=5mm、比重=2.60）および天竜川産の川砂利（最大寸法=15mm、比重=2.65）を使用した。コンクリートの調合は、水セメント比（W/C）を54%、設計スランプを18cmに設定して試し練りによって決定した。本実験で用いたコンクリートの調合表および強度試験結果を、それぞれ表-1および表-2に示す。試験体は、コンクリート打設後試験体脱型までの1週間は日に2回の散水による湿布養生、試験体脱型後試験時までは日に1回の散水による湿布養生を行った。試験材令は、コンクリート強度が十分に安定した19週とした。

2.2 載荷および計測方法

アンカーボルトの引抜き載荷には、100tf アムスラー型万能試験機を使用した。載荷速度は、荷重増分が8.3kgf/sとなるように手動によって制御した。

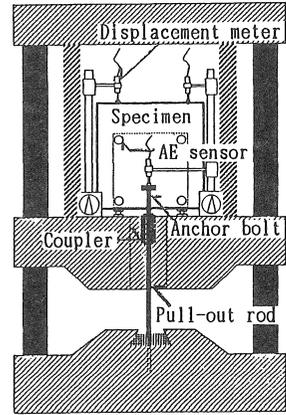


Fig. 2 Loading and measuring procedure

なお、漸増繰返し載荷では、1サイクル当りの荷重増分を300kgf（単調漸増載荷により得られた引抜き耐力の約1/10）とし、下限荷重は300kgfとした。測定項目は、荷重、両支持点上部およびアンカーボルトヘッド部の拔出し変位とした。荷重および各変位データは、動ひずみ計およびデジタル・データレコーダ（サンプリング速度=2000点/秒）を使用して取り込むとともに、X-Yレコーダで同時記録させた。また、4チャンネルのAE計測システムを用いてAEイベント数の計測と2次元破壊源探索も行った。なお、破壊源探索に必要な縦波速度（V_L）は、ファンクション・ジェネレータによって2.5μsの矩形パルスを試験体に入力することによって計測した（V_L=3900m/s）。載荷方法、荷重、変位およびAEの計測位置を図-2に示す。

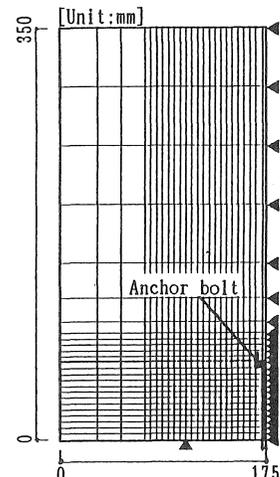
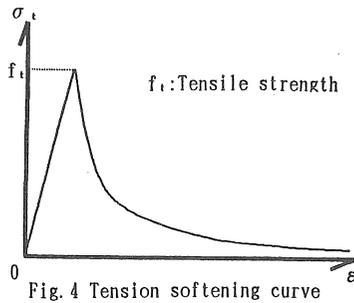


Fig. 3 Analytical model



2.3 解析方法および試験体のモデル化

アンカーボルトの引抜き破壊挙動を明らかにするためには、各荷重レベルにおける試験体内部のひびわれ進展状況を正確に把握しておく必要がある。そのため、本研究ではコンクリートの引張破壊を考慮したFEM解析を行い、実験結果との比較検討を行った。FEM解析モデルは、図-3に示すように対称性を考慮して1/2モデルとし、各要素は4節点アイソパラメトリック要素でモデル化した。構成素材の構成則としては、コンクリートに対してはZ.P.

Bazantらが最初に提案したエンドクロニック理論⁶⁾を、アンカーボルトに対してはbi-linear型のモデルを用いた。ただし、エンドクロニック理論ではコンクリートの引張破壊が考慮されていないため、コンクリートのひびわれモデルとして、筆者らの既往の研究⁷⁾⁻¹⁰⁾および近藤ら¹¹⁾と同様の分布ひびわれモデルを採用し、ひびわれの発生は最大主応力によって判定した。なお、ひびわれ発生後は図-4に示す引張軟化モデルを用いた。解析は、加力節点の変位増分が0.001cmとなるように設定した変位制御による非弾性増分解析とし、支持点の自由度および支持点間隔が破壊過程に及ぼす影響について検討を行った。

3. 結果およびその考察

3.1 ひびわれの発生・進展状況

図-5(a)~(c)は、載荷方法の異なる試験体によって得られた各荷重レベルにおけるAE法による破壊源探査の結果および肉眼によって観察したひびわれ進展状況を示したものである。これらの図によ

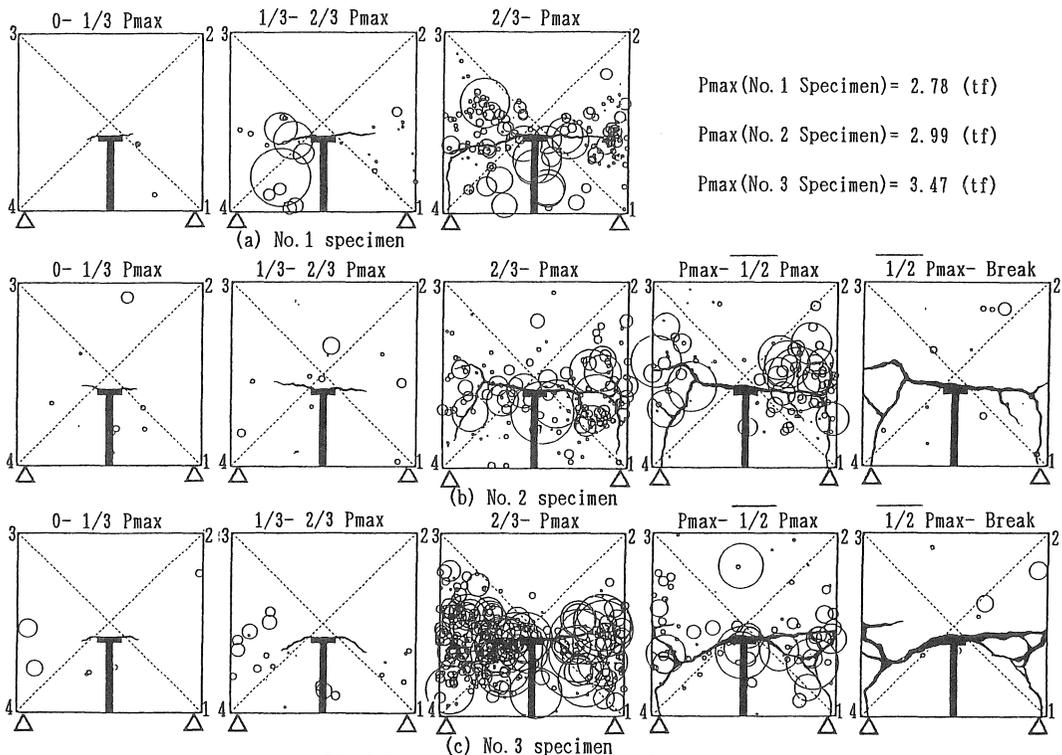


Fig. 5 Results of AE source location search

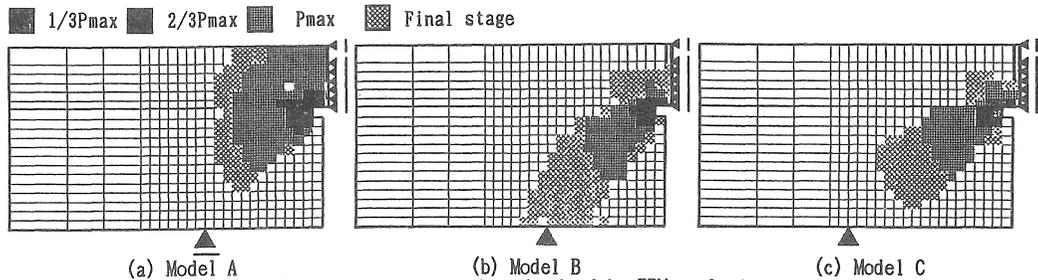


Fig. 6 Crack propagation obtained by FEM analysis

れば、初期ひびわれの発生から最終破壊に至るまでのひびわれ発生・進展状況は、荷重方法によって相違しているのがわかる。すなわち、単調漸増荷重を行ったNo. 1 試験体では、支持点とアンカーボルトのヘッド上部とを結ぶコーン状ひびわれよりも水平方向に伸びるひびわれの方が卓越しているのに対して、漸増繰返し荷重を行ったNo. 2およびNo. 3試験体では、コーン状のひびわれと水平方向に進展するひびわれとがほぼ同程度の明確さで現れている。一方、AE法による破壊源探索の結果について注目してみると、最大荷重までの範囲におけるAEの発生位置は、いずれの試験体も荷重の増大に伴って進展するひびわれ近傍にある程度の幅をもって分布しており、特に規模の大きなAEほどひびわれ位置近傍に集中して発生しているのが読み取れる。また、各荷重レベルごとに観察した巨視的なひびわれ先端のやや前方では、比較的規模の小さなAEが発生しているのがわかる。このことは、巨視的ひびわれの前方で微視的ひびわれが発生・累積していることを意味しており、微視的ひびわれが巨視的ひびわれと連結することによってひびわれが進展していることを示唆している。これに対して、最大荷重以降の範囲においては、AEの発生位置は荷重に伴ってさらにひびわれ進展方向に移動していくが、ひびわれの後方ではAEはほとんど発生しなくなっている。

図-6は、FEM解析によって得られた各荷重レベルごとのひびわれ進展状況を示したものであり、図(a)がローラー支持の場合(モデルA)、図(b)がピン支持の場合(モデルB)、図(c)がピン支持で支点間距離を大きく設定した場合(モデルC)についての結果である。これらの図によれば、いずれのモデルも荷重初期にはアンカーボルトのヘッド上部からひびわれが発生しているのがわかる。その後、ひびわれ領域は荷重の増大とともにある程度の幅を

持って拡大していくが、ひびわれの発生状況は解析モデルによって相違している。すなわち、支持点による拘束が最も大きいモデルBでは、コーン状ひびわれのみが先行するが、支持点による拘束効果とその次に大きいモデルCでは、コーン状ひびわれの進展と同時にアンカーボルトのヘッド部から水平方向に進展するひびわれも確認できる。一方、支持点の拘束が最も小さいモデルAでは、コーン状のひびわれおよび水平方向のひびわれはほぼ同時に進行しているのがわかる。以上のひびわれ進展状況に関する解析結果と前掲の図-5に示した実験結果とを比較すると、ローラー支持としたモデルAの解析結果が実験結果の破壊状況と最もよく一致しているのがわかる。

図-7は、漸増繰返し荷重を行った試験体によって得られた10秒ごとのAEイベント数と荷重時間との関係を示した一例である。この図によれば、本実験のように除荷後休息時間をおかずに再荷重を行った場合には、先行荷重を越えた荷重レベルの荷重を行わなければAEはほとんど発生しないというカイザー効果が図-7中のA点の繰返し範囲まで明確に認められる。しかし、繰返し上限荷重が最大荷重に近づく(B点)とカイザー効果は次第に不明瞭となり、さらに最大荷重以降の範囲になると、低荷重レ

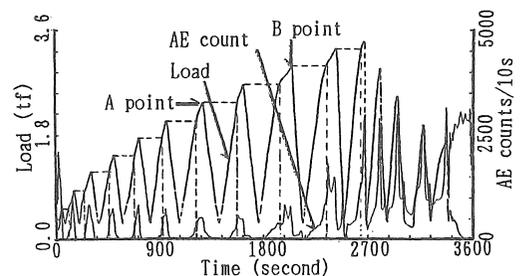
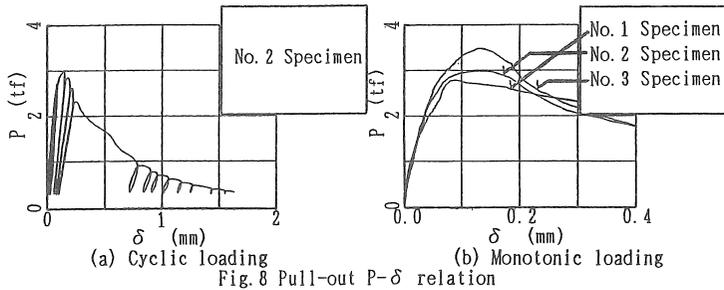


Fig. 7 Relationship between load, AE events and time (No. 3 Specimen)

Table 3 Experimental and analytical results

Specimen	Maximum load (tf)	Condition
Experiment	No. 1	2.78
	No. 2	2.99
	No. 3	3.47
Analysis	Model A	2.24
	Model B	2.87
	Model C	2.42

[Note] S: Support span.



ベルの段階からA Eが頻発し始めているのが観察される。このように、カイザー効果が不明瞭となるのは、微小ひびわれが相互に連結し、コンクリートの内部構造が不安定となるためと考えられる。

3.2 アンカーボルトの引抜き荷重-拔出し変位関係

表-3は、本実験および解析によって得られたアンカーボルトの引抜き耐力を一覧表にして示したものである。この表によれば、引抜き耐力に関する実験結果はピン支持に設定したモデルBの解析結果とよく一致しているのがわかる。なお、引抜き耐力の解析結果は、ローラー支持とした場合よりも水平方向の変形を拘束したピン支持の方が、また同じ拘束条件であれば、支持点間隔が短い方が大きくなる傾向を示している。

図-8(a)および(b)は、アンカーボルトの引抜き荷重(P)とヘッド部の拔出し変位(δ)との関係を示したもので、図(a)が漸増繰返し載荷時、図(b)が単調漸増載荷時(ただし、漸増繰返し載荷を行った試験体については包絡線で示してある)の結果である。まず、図(a)によれば、漸増繰返し載荷によって塑性ひずみが増大していく様子を読み取れる。また、図(b)によれば、いずれの試験体も最大荷重の少し手前から非線形性が著しくなっているが、このP-δ関係の非線形性が顕著となる荷重は、カイザー効果の認められなくなる荷重とほぼ一致して

いることがわかった。一方、最大荷重以降の挙動については、単調漸増載荷を行った No. 1 試験体よりも漸増繰返し載荷を行ったNo. 2 およびNo. 3 試験体の方が脆性的な性状を示しているのがわかる。これは、最大荷重以降の範囲になると、繰返し載荷を行った試験体の方が単調漸増載荷を行った試験体に比べて試験体内部の劣化度が大きく、耐力低下に結び付くひびわれを進展させたためと思われる。

図-9は、単調漸増載荷を行った No. 1 試験体によって得られたP-δ関係の実験結果とFEM解析による結果とを比較したものである。この図によれば、P-δ関係の実験結果は、最大荷重の少し手前まではローラー支持とした解析結果(モデルA)とほぼ一致しているが、それ以降はピン支持とした解析結果(モデルB)に近づいて行く傾向を示している。このことから、この試験体の支持条件は、載荷初期の段階ではほぼローラー支持とみなせるが、最大荷重直前になると、ローラー支持からピン支持に

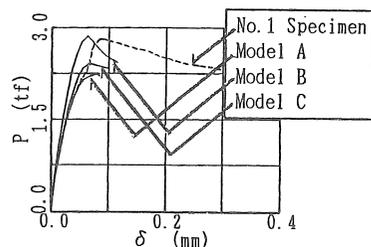


Fig. 9 Pull-out P-δ relation

近い条件へと変化していったと予想される。また、支持点間隔を13.8cmとした場合の結果(モデルB)と19.8cmとした場合の結果(モデルC)とを比較すると、支持点間隔が大きくなるほど最大荷重は低下する傾向を示すことがわかる。

4. 結 論

本研究では、アンカーボルトの引抜き破壊挙動をひびわれ進展状況に着目して実験的および解析的に検討を行った。本研究によって得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) アンカーボルトの繰返し引抜き載荷時においても、カイザー効果を認めることができる。ただし、 $P-\delta$ 関係の非線形性が顕著となり、巨視的ひびわれが明確となる荷重レベルになると、カイザー効果は急激に不明瞭となる。
- 2) AE法を適用した破壊源探査によって、アンカーボルト引抜き時のひびわれ進展過程をある程度正確に把握することが可能である。
- 3) 漸増繰返し載荷によって得られたアンカーボルトの引抜き $P-\delta$ 関係は、単調漸増載荷時のものよりも脆性的な形状を示す。
- 4) 本研究で行ったFEM解析の結果から、アンカーボルト引抜き時のひびわれ進展過程をある程度正確に把握することが可能である。

【謝 辞】

実験および計測に際して御助言を頂きました東急建設(株)の山本俊彦氏、石川雅美氏および豊田将文氏、(有)日本計測の藤瀬克彦氏に謝意を表します。また、実験および実験結果の整理に際して御助力を得た愛知工業大学大学院生の浅井陽一君および渡部憲君、並びに愛知工業大学工学部建築学科の山田研究室卒研究生諸君に謝意を表します。なお、本研究費の一部は東急建設(株)の奨学寄付金によったことを付記し、謝意を表する。

【引用文献】

- 1) 日本建築学会編:各種合成構造設計指針,1985.2
- 2) 上村克郎・小西敏正・橋高義典・関 和彦:メ

カニカルアンカーボルトの引抜き耐力に及ぼすコンクリート母材の性質、コンクリート工学年次論文報告集、第8巻、pp.405-408、1986.6

- 3) 松崎育弘:コンクリート部材に定着したアンカーボルトの支持耐力、コンクリート工学、第22巻、第7号、pp.54-61、1984.7
- 4) 重石光弘・大津政康:コンクリート構造物へのAE逆解析の適用、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、pp.311-316、1989.6
- 5) 山田和夫 他:コンクリートの曲げ破壊挙動の寸法依存性に関する実験的研究、日本建築学会東海支部研究報告集、第31号、pp.49-52、1993.2
- 6) Bazant, Z. P. and Bhat, P. D.: Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete, Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol.102, No.EM4, pp.701-722, Aug. 1976
- 7) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫:エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析-第1報:解析方法-,日本建築学会論文報告集、第326号、pp.78-90、1983.4
- 8) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫:エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析-第2報:本解析手法の特徴および解析結果と実験結果との比較検討-,日本建築学会論文報告集、第330号、pp.9-23、1983.8
- 9) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫:エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析-第3報:鉄筋コンクリート部材の力学挙動に及ぼすコンクリートの非均質性の影響-,日本建築学会構造系論文報告集、第354号、pp.1-11、1985.8
- 10) 山田和夫・渡部 憲・山本俊彦・本田義博:高強度コンクリート柱の横補強筋効果に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻、第2号、pp.535-540、1992.6
- 11) 近藤吾郎・森田司郎:引抜き力をうけるアンカーボルトの応力伝達機構の解析、日本建築学会構造系論文報告集、第435号、pp.141-150、1992.5

(受理 平成5年3月20日)