

論文 繰返し引張応力下におけるコンクリートの破壊プロセスに関する研究

高橋 剛^{*1}・丸山 久一^{*2}・下村 匠^{*3}・Zaidir^{*4}

要旨：繰返し引張応力を受けるコンクリートの破壊プロセスについて検討する目的でアンカーボルトの動的引抜き試験を実施した。その際、コンクリート供試体内にインクなどの注入液を注入することによって、所定の繰返し回数におけるコンクリートの内部ひび割れを直接観察した。その結果、本方法により、疲労過程におけるひび割れ進行状況について評価することができた。

キーワード：アンカーボルト、動的引抜き試験、注入液、ひび割れ進行

1. はじめに

コンクリートの引張応力やひび割れの挙動が構造物全体に対して大きな影響を及ぼす現象の代表例として、アンカーボルトの引抜きが考えられる。

最近のアンカーボルトの引抜きについての解析的研究 [1] では、破壊力学的な考えを考慮したモデルが用いられるようになってきているが、解析結果を検証するための高精度でかつ詳細な実験データの蓄積が望まれており、特にアンカーの耐荷機構を検証する上では、コンクリート内部での破壊の進行状態に関するデータが重要と考えられている。また、アンカーボルトの引抜きにおいて、疲労性状に関してまだ明らかになっていない点が多く、疲労データを多く蓄積し、破壊メカニズムを解明する必要がある。

金属材料においては、光学顕微鏡や電子顕微鏡を用いた実験結果により、疲労過程におけるき裂の発生と進行の機構が明らかにされている。コンクリートにおいても、X線等を用いて静的載荷時のひび割れ伝搬について検討が進められているが [2]、疲労破壊機構の解明には未だ至っていないのが現状である。

このような状況のもと、本研究では、アンカーボルトの静的引抜き試験において、コンクリート供試体内に注入液を注入する方法で、荷重増加に伴うひび割れ進行状況を直接観察し、その有効性を検討した結果を踏まえて [3]、アンカーボルトの動的引抜き試験を実施し、同様の方法で繰返し引張応力下におけるコンクリート破壊プロセスについて検討することとした。

3. 実験概要

3.1 アンカー供試体

本研究では、動的引抜き試験において破壊形式がコンクリートのコーン破壊となるように、頭付きスタッドアンカー（強力六角ボルト）を使用し、ボルトヘッド以外ではコンクリートとの付着をなくすために、ビニールテープで周囲を巻いた。アンカーの材質は構造用合金鋼であり、埋込み深さは $h=30\text{mm}$ ($\phi 16\text{mm}$) および 45mm ($\phi 20\text{mm}$) とした。図-1, 表-1にボルト図およびボルト諸元を示す。

*1 三井建設（株），工修（正会員）

*2 長岡技術科学大学教授 工学部建設系，Ph.D.（正会員）

*3 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系，工博（正会員）

*4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科，工修（正会員）

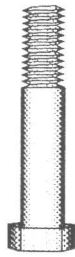


図-1 ボルト図

3.2 コンクリートブロック

アンカー母材として使用したコンクリートブロックの形状は、図-2に示すように400mm×400mm×250mmであり、試験機に固定する目的でシース管を埋め込んで穴を設けた。

コンクリートは設計強度29.4MPa、最大骨材寸法25mm、設計スランプ100mmの早強ボルトランドセメントを用いたレディミクストコンクリートを使用

した。試験開始時のコンクリート材齢は約1ヶ月、試験時のシリンダー圧縮強度は31.9MPa（平均値）であり、試験期間中でのシリンダー圧縮強度の増加は認められなかった。

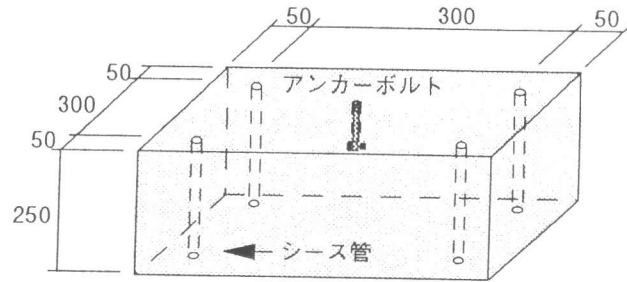


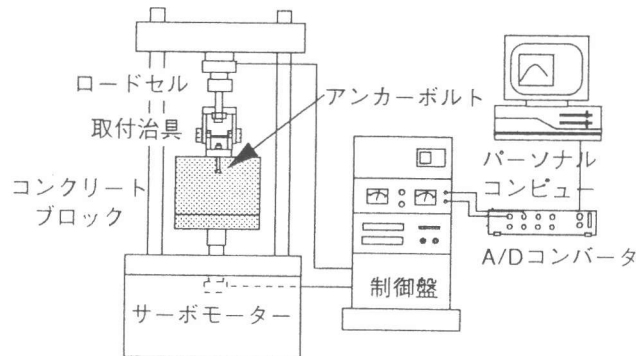
図-2 コンクリートブロック

3.3 載荷方法及び疲労試験における荷重レベル

アンカーボルトの動的引抜き試験における載荷は、図-3に示すような油圧サーボ型疲労試験機を用いて行い、最初の1サイクルは静的に載荷し、その後、繰り返し載荷速度5Hzで載荷した。加力は正弦波形を採用して行い、載荷回数、荷重振幅、変位の各データをそれぞれ載荷開始から破壊に至るまでパーソナルコンピュータに収録した。

なお、本実験では、コンクリート供試体内に注入液を注入するために、所定の繰り返し回数に達したところで載荷を中断し、注入終了後は約30分間静止させ、その後ドライヤーを用いて内部の注入液を十分乾燥させてから再び載荷を続けた。

疲労試験時の荷重レベルは、上限荷重は静的引抜き耐力の80、70、60%とし、下限荷重は10%とした（表-2）。



油圧サーボ型疲労試験機

図-3 載荷試験装置概要

表-2 荷重レベル

埋込み深さ h		30mm	45mm
静的強度 P_u		13.73kN	29.81kN
P_{max}/P_u	80%	10.98kN	23.85kN
	70%	9.61kN	20.87kN
	60%	8.24kN	17.89kN
P_{min}/P_u	10%	1.37kN	2.98kN

P_{max} ：上限荷重， P_{min} ：下限荷重

P_u ：静的引抜き強度（平均値）

3.4 注入孔の作製

注入孔は、打設時にボルトヘッドに直径2mmのチューブを8組接着させ、さらにボルト中心から16方向に一定間隔で直径1.2mmのピアノ線を設置し、脱型時にそれらを撤去することによって作製した(図-4)。なお、注入液は注射器を用いて供試体内に注入し、ひび割れは、破壊後の供試体についての注入液の着色状況を、ボルト軸方向からみた水平投影面積で評価した。

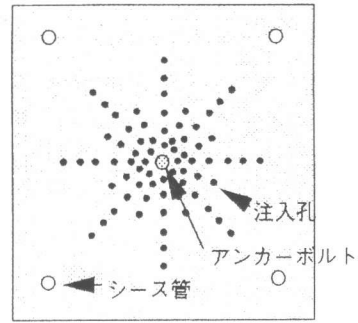


図-4 注入孔設置位置図

4. 注入液注入方法の有効性の検討

本実験に先立ち、注入液を注入する方法によって、静的引抜き試験におけるコーンひび割れの進行を観察し、その有効性について検討した[3]。

図-5に注入液としてインク・エタノール溶液およびメチレンブルー・エタノール溶液を使用した場合の破壊コーンのひび割れ進行状況を示す。

この図より、静的載荷時のひび割れは、載荷開始から最大耐力付近まではボルト近傍の領域で徐々に成長し、最大耐力の約90%を越えると急激に進行して破壊にいたったということがいえる。このことは、これまでにEligehausenらが行ったひずみゲージを使用した実験[4]と同様な傾向を示しており、各種解析的検討[1]を裏付ける結果となっている。以上のことから、注入液を注入する方法がコンクリートの内部ひび割れを評価する方法として有効であるということがいえる。

また、図-5より、メチレンブルー・エタノール溶液を用いた場合でも、インク・エタノール溶液を用いた場合とほぼ同程度のひび割れを評価していることが確認でき、動的引抜き試験においては、この二種類の注入液を用いて実験を行うこととした。

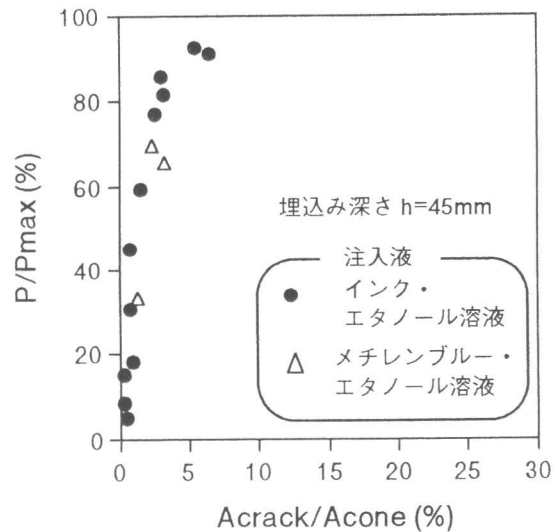


図-5 静的ひび割れ進行状況

5. 動的引抜き試験結果

5.1 繰返し載荷回数と変位の増加

本実験においては、200万回疲労載荷を行っても破壊しなかったものを除けば、全てコンクリートのコーン破壊となった(そのうち一体についてはへりあき不足も含む)。

図-6(a)~(c)に繰返し載荷に伴う上限荷重作用時の軸方向変位の増加量を示す。ここで、横軸は疲労寿命のばらつきを考慮して繰返し回数比(%)で表示した。これらの図より、供試体によってその挙動は多少異なるが、埋込み深さや荷重レベルの違いによる影響はあまりみられなかった。

既往の研究によると、一般に圧縮応力場における繰返し回数とひずみの関係は、①初期応力繰返しにより、ひずみがかなり急激に増加する遷移領域、②繰返し回数とひずみの増大がほぼ一定な定常領域、③破壊に近づき再度急激にひずみが増加する加速領域の三段階に分けることができ

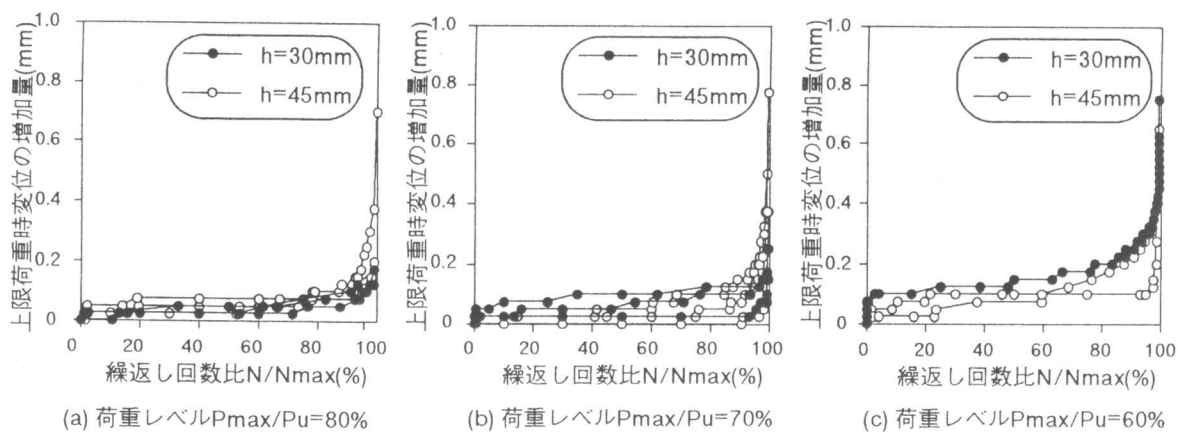


図-6 繰返し载荷に伴う上限変位の増加

る [5]。図-6 (a) ~ (c) より、全体的にみると本実験結果からも同様の傾向がみられ、全寿命の約 80% を過ぎた頃から加速的に変位が増加していることがわかる。

5.2 疲労耐力

図-7に上限荷重比と繰返し回数の関係を示す。図-7においては、破壊形式が全てコンクリート破壊であったために片対数表示とした。なお、疲労耐力の評価のため、土木学会コンクリート標準示方書のコンクリート疲労強度算定式 [6] を図中に示した。疲労強度算定式によると、コンクリートの疲労強度 frd は疲労寿命 N と永久荷重による応力度 σ_p の関数として以下の式で表されている。

$$frd = k_1 f_d \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \left(1 - \frac{\log N}{K}\right) \quad (1)$$

ただし、 $N \leq 2 \times 10^6$

ここに、 frd : コンクリートの設計疲労強度

f_d : コンクリートの設計強度

k_1 : 圧縮、曲げ圧縮の場合 $k_1 = 0.85$

引張、曲げ引張の場合 $k_1 = 1.00$

K : 一般に $K = 17$

アンカーボルトの引抜きにおいては、荷重を受け持つ面積がはっきりしていないため、図-7においては式 (1) の応力を荷重に置き換えて以下の式で表示することとした。

$$\log N = 17 \left(1 - \frac{P_{max} - P_{min}}{P_u - P_{min}}\right) \quad (2)$$

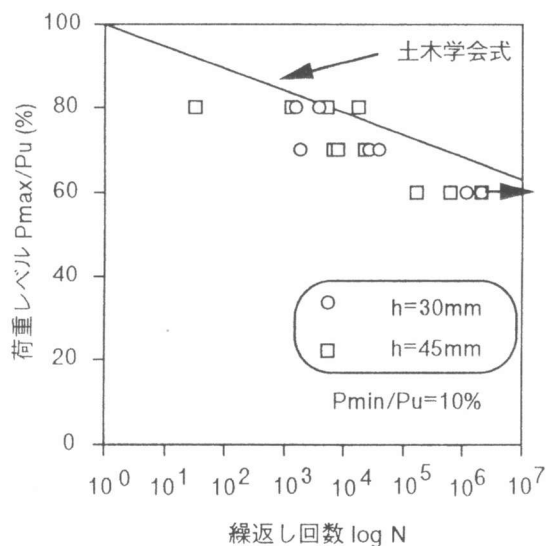


図-7 上限荷重比と繰返し回数の関係

ここに、 P_{max} : 作用上限荷重、 P_{min} : 作用下限荷重、 P_u : 静的強度

本試験結果では、荷重レベルが60%で200万回繰返し载荷でも破壊しないものがみられた。それ以外のものをみると、各荷重レベルにおいて、疲労寿命に多少のばらつきはあるものの、埋込み深さの違いによる影響はあまりみられなかった。しかし、土木学会式と比べると、そのほとん

どは危険側となっている。

アンカーボルトの引抜きによるコーンひび割れは、ボルト定着部からコンクリート表面へ向かってコーン状に進行する。一方、応力解析 [8] によれば、発生応力はひび割れ先端部のある有限な領域（軟化域及び弾性域）で大きく集中している。したがって、疲労ひび割れが進行すると、ひび割れ先端部の周長が長くなり荷重を受け持つ面積が大きくなっていくものと考えられる。このことから、動的引抜き試験においては、ひび割れの進行に伴って見掛けの作用応力が小さくなり、通常のコンクリートの疲労破壊に比べて疲労寿命が大きくなることが予想されたが、本実験においては逆の結果となった。

アンカーボルトの引抜きにおいては、ひび割れ先端における破壊モードが複雑であり、特にコンクリート表面付近では曲げ的な力も作用することが考えられることから、今後、疲労破壊メカニズムについて十分検討するとともに、多くの実験データを蓄積し、設計における疲労強度の特性値を求める必要がある。

5.3 疲労ひび割れ進行状況

図-8に注入液着色状況の代表例を示す。これはボルト軸方向から見た図であり、任意の繰返し載荷回数における注入液着色部分と完全に破壊した後のコーンの大きさを示したものである。

本実験においては、注入液としてインク・エタノール溶液とメチレンブルー・エタノール溶液の二種類を使用したため、同一供試体において二段階のひび割れを観察することができた。

図-8より、一回目の載荷によってひび割れがある程度発生していることを考えると、その後の繰返し載荷によって、ひび割れは徐々に進行し、やがて最終的な破壊に至ったということを確認することができた。

図-9に疲労試験におけるコーンひび割れ進行状況を示す。この図は繰返し載荷回数の増加に伴うひび割れ面積の増加を示したものであるが、最終的な破壊コーンの大きさのばらつきや疲労寿命のばらつきを考慮し、横軸は繰返し載荷回数比、縦軸はひび割れ面積比（水平投影面積比）で表示した。また、図中において、載荷回数が一回（ $N=1$ ）の点は、静的引抜き試験結果より推定したそれぞれの荷重レベルにおける値を用いた。

この図より、荷重レベル、埋込み深さに関係なく、疲労ひび割れは一回目の載荷によって発生したひび割れがボルト近傍の領域で徐々に進行し、全寿命の約80%以降にひび割れ

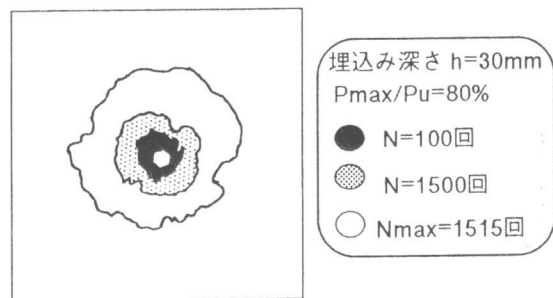


図-8 注入液着色状況（代表例）

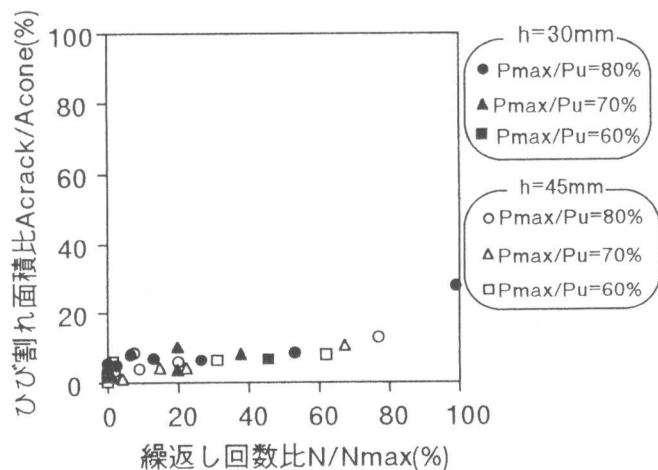


図-9 疲労ひび割れ進行状況

は加速的に進行し、最終的な破壊に至ったということがいえる。

なお、図-9は、繰返し載荷に伴う上限荷重時変位の増加量の関係(図-6(a)~(c))と形がよく似ている。そこで、図-10にひび割れ面積比(A_{crack}/A_{cone})と上限荷重時変位の増加量の関係を示すが、この図より、変位が増加したときにはひび割れ面積も増加しており、この両者には密接な関係が成立すると考えられる。このことから、変位を測定することによってひび割れの進行を予測しうることが伺える。

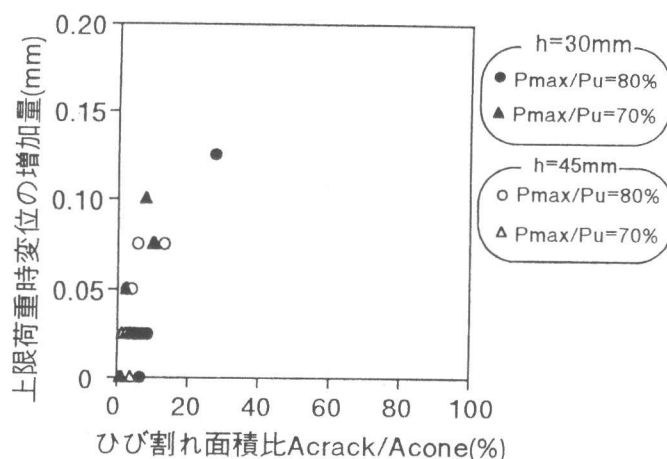


図-10 ひび割れ面積比と上限変位の増加量との関係

6.まとめ

本研究により以下の結論が得られた。

- 1) コンクリート内部に注入液を注入する方法により、アンカーボルトの動的引抜き試験におけるコンクリートの内部ひび割れを評価することができた。
- 2) アンカーボルトの動的引抜き試験におけるコンクリートの内部破壊は、載荷開始とともにボルト近傍の領域で徐々に進行し、全寿命の約80%以降に加速的に進行して最終的な破壊に至ったものと考えられる。
- 3) アンカーボルトの動的引抜き試験におけるコンクリートのひび割れ進行と変位の増加には密接な関係が成立する。

【参考文献】

- [1] 日本コンクリート工学協会：コンクリート用ファスニング技術研究委員会報告書，pp.121-128,1994.4
- [2] 庄司芳典、大塚浩司、森楨夫：コンクリートのひびわれ先端の微視的破壊挙動に関する実験的研究、土木学会第44回年次学術講演会概要集,pp.526-527,1989
- [3] Zaidir 他：A testing method of crack growth in concrete by pull-out test of anchor bolt, コンクリート工学年次論文報告集Vol.18,1996 (投稿中)
- [4] Eligehausen,R.;Sawade,G.:A fracture mechanics based description of the pull-out behavior of headed studs embedded in concrete,Fracture Mechanics of Concrete Structures (From theory to applications) edited by L.Elfgren,Chapman and Hall Ltd, London,pp.281-299.,1989
- [5] 岸谷孝一、西澤紀昭 他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 疲労、技報堂出版,1987
- [6] 土木学会：コンクリート標準示方書設計編 [平成3年版] ,pp.20-21,1991
- [7] 岩瀬裕之、六郷恵哲、小柳裕、斉藤保則：アンカーボルト引抜き試験とAE破壊源探査、土木学会第43回年次学術講演会概要集, pp.418-419, 1988.10
- [8] 森山智明 他：後打ちアンカーボルトの引抜き耐荷機構に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集Vol.13-2,pp.923-928,1991