

[49] コンクリートの疲労性状に関する基礎研究

正会員 小玉克巳 (武蔵工業大学工学部)

正会員○石川善信 (武蔵工業大学大学院)

1. 序 論

繰返し応力を受ける鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリート等の構造部材が劣化する過程は、殆どの場合 劣化の発端はコンクリートにおける 引張ひびわれの発生である。ひびわれが進行し厳しい環境条件下では、時間の経過と共に部材の劣化延いては構造物の耐久性が損なわれる場合が少なくない。従って、コンクリートの疲労強度及び疲労ひびわれを検討する事は、極めて重要となるのである。

本研究では、前記の問題点を解明するための必要な基礎資料を得るため、若干のプレストレストを導入したコンクリート梁の疲労試験を行ったのであるが、ほぼ一定の上限荷重載荷時におけるコンクリートの最大曲げ引張応力度が $30 \sim 90 \text{ kg/cm}^2$ に達する様な梁について、コンクリートにひびわれが発生するまで載荷を繰返し、コンクリートの曲げ引張疲労強度について検討した。

次いで円柱形供試体についてコンクリートの引張疲労試験を行い、ひびわれの進行状況を確認すると共に、その引張疲労強度を求め、曲げ引張疲労強度との関連性について検討し、それぞれの場合における疲労強度を試験した結果に基づき、コンクリートの疲労性状を論じたものである。

2. 試験方法

コンクリートの配合は、大部分のものは表-1 に示す配合 1 であり、一部の試験には配合 2 を用いた。供試体の養生は、脱型後 直ちに湿布により行い 試験は、材令 15 日以後に行った。

プレストレストコンクリート梁供試体の形状及び寸法は、図-1 に示す通りで $10 \times 20 \times 120 \text{ cm}$ の矩形断面である。梁供試体は、ポストテンション方式で試験日の 3 日前に有効プレストレスが $30 \sim 80 \text{ kg/cm}^2$ の間でそれぞれ所定の値となる様に導入した。この理由は、梁下面の最大曲げ引張応力度を相

違させる場合、上限荷重を変化させる代わりに導入する有効プレストレスを相違させたものであって、下限荷重を 0.55 t と一定とする事で応力振幅の影響を無視できると考えたからである。また、疲労試験機における上限荷重の検定は、耐圧板に付属したロードセルで実施するので、上限荷重をほぼ一定として載荷すればロードセルのひずみも一定となるので試験精度も向上すると考えたからである。導入するプレストレス量は、コンクリートのひずみ、鋼棒のひずみ、オイルジャッキのメーターの読み等を測定して決定した。

試験には、構造物疲労試験機を用い、毎分 360 回の片振り荷重を載荷した。載荷方法は、スパン 80 cm 、載荷点の間隔を 20 cm とし、2 点載荷で試験を行った。疲労試験開始前及び載荷回数がそれぞれ 0.5, 1, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 万回毎に達した時に試験機の運転を中止し、上限荷重まで静的載荷し、ワイヤストレインゲージを用い 載荷点間の底面部ひずみを測定した。ひびわれが明瞭に認められた時点で疲労試験を中止した。また、200 万回の繰返し載荷で破壊しなかった供試体も、そこで試験を中止した。

引張供試体は、 $\phi 15 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形供試体を使用し、引張試験は、割裂試験によった。載荷方法は図-2 に示す方法で行い、荷重が縦横両方向共に偏心しない様、常に十分な注意を払った。

表-1 コンクリートの配合

番号	セメント	混和剤	粗骨材の積寸径(mm)	水セメント比(%)	単位セメント量(kg/m ³)	粗骨材量(%)	スランプ(cm)	空気量(%)
1	早強ポルトランドセメント	NL-4000	20	50	390	44	14	1.5
2	早強ポルトランドセメント	NL-4000	20	45	433	44	10	2.0

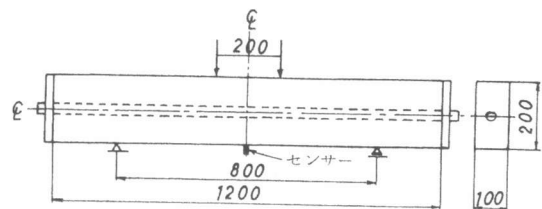


図-1 梁供試体の形状及び寸法

引張供試体における疲労試験は、一部のものは所定の回数で試験機の運転を中止し、両端面（A面、B面、図-2参照）中央部のひずみを測定したが、大部分のものは、連続運転を行い疲労破壊するまで繰返し荷重を行った。また、下限荷重は0.55tとした。

コンクリートにひびわれが発生する時期の判定は目視では、殆んど不可能であるので、コンクリートに貼付されたワイヤーストレインゲージのひずみから推定し、更にAcoustic Emission（以下AEと略す）法からもひびわれ発生を推定した。本実験に用いたAE装置のブロックダイアグラムを図-3に示す。

梁供試体では、底面中央部に引張供試体では、A面もしくはB面、両端面中央部より上方3cmの位置に、それぞれセンサーを装置した。このAE法を静荷重試験及び疲労試験に用い、累積AEカウント数及びAE波形を測定した。また、疲労試験中においても、連続的に測定した。疲労試験機の運転音による雑音が、AE波測定精度をそこなうので、特に静的荷重の場合と周波数帯域を変化させる事によって、この雑音を除去したのである。

3. 試験結果及び考察

3-1 繰返し荷重を受けるコンクリートの疲労強度

疲労試験における上限応力比の設定は、梁供試体の場合、上限荷重載荷時のコンクリートの曲げ引張応力度とひびわれ発生時のコンクリートの曲げ引張応力度との比とした。引張供試体の場合は、上限荷重載荷時におけるコンクリートの引張応力度と静的強度試験で求めた強度との比とした。

以上の方法で、応力比と破壊までの荷重回数の対数をとったグラフは、図-4である。荷重回数と応力比とは、直線関係にありその200万回疲労強度は、曲げ引張疲労試験で59%、引張疲労試験で62%であった。図-4より、曲げ引張疲労強度と引張疲労強度とは、極めて近似する事が明示されている。養生条件、材令、強度等にかかり影響されると思われる、今後一層の検討を必要とするが、これは注目に値する事象である。

有効プレストレスの量に応じて、ひびわれの発達が違う事が確認できたので、特に15×15×53cmの無筋曲げ供試体で疲労試験を行った結果、上限応力比60%の時、40万回で側面にひびわれが発生し、その後、ひびわれはあまり進展せず、荷重回数100万回を越えても疲労破壊しなかった。この事は、ひびわれの拡大を粗骨材粒が妨げているものと考えられる。さらにそれを確かめるために、長さ約60cmのプレキャストコンクリート片2個をモルタル接合した梁について疲労試験を行った。この種の接合梁を用いた理由は、モルタル接合部分が弱点となり、ひびわれが必ずそこで発生する事、また、接合部には、粗骨材粒が存在しないため、前記の検討が容易となると考えたからである。

応力比と荷重回数との関係を図-5に示す。モルタル接合梁の200万回疲労強度が、一体梁に比べて15%程

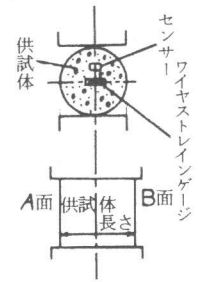
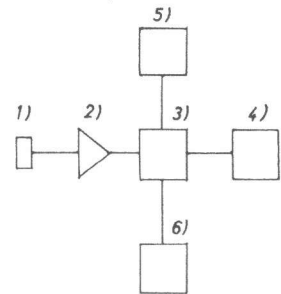


図-2 引張試験荷重状態



- 1) センサー
- 2) プリアンプ
- 3) ディスクリミネーター
- 4) ペンレコーダー
- 5) オシロスコープ
- 6) カウンター

図-3 AE測定ブロックダイアグラム

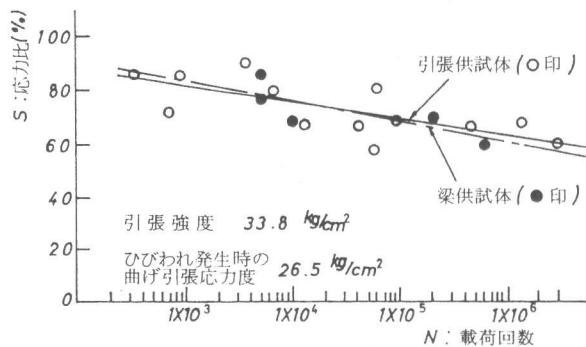


図-4 上限応力比と荷重回数との関係

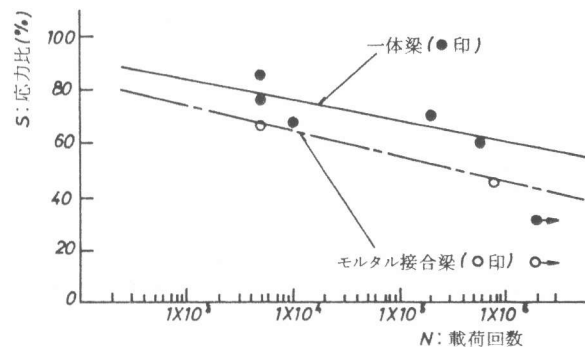


図-5 上限応力比と荷重回数との関係

度劣っていた。この理由は、粗骨材粒とモルタルの付着及び粗骨材粒のかみ合せの影響によるものと思われる。

3-2 繰返し載荷を受けるコンクリートの引張疲労性状

試験に用いた疲労試験機には、前後左右に動く載荷板が取り付いており、細心の注意を払って供試体を据え付けて静的に荷重を載荷すれば、偏心を防ぐ事ができたが、疲労試験においては、繰返し載荷に伴い、載荷分布幅に多少の差異が生ずるので、両端面ほぼ同時にひびわれが発生したものは少なかった。その一例として、上限応力比68%で繰返し載荷を行った引張供試体において、繰返し載荷回数32万回でA面の中央部より上方及び下方約2cmの位置で長さ約1.5cmのひびわれが発生し、35万回で各々のひびわれが載荷点間で連続した。最初にひびわれが発生してから、86万回後に疲労試験を中止し供試体長さ方向に約1.5cmづつダイヤモンドカッターで切断し、鏡面研磨した後、顕微鏡で供試体長さ方向の破壊の要因となるひびわれの進行状況を観察した結果を示したものが図-6である。ひびわれ発生面より長さ方向に1.5cm、4.5cm、7.6cmの中央部より上方3cmの位置でのひびわれ状況を写真-1に示す。ひびわれの幅は、長さ方向に従って減少してゆき、長さ方向約7.5cmの所では、中央部をはさんでひびわれは連続しておらず、微小ひびわれは端面より長さ方向に約10cmの位置まで確認できた。この様にひびわれが供試体長さ方向に約半分進行しても、疲労破壊を起こさなかった。この事は、上限応力比、応力振幅、載荷速度等に影響されると思われるが、3-1で詳細に述べた様に、粗骨材粒とモルタルの付着ならびに粗骨材粒のかみ合せの影響を明瞭に示すものと思われる。また、載荷点付近における、応力分配の影響によるためとも考えられる。

供試体載荷点付近では、中央部に向う微小ひびわれが認められた。静荷重試験においてこのひびわれは、供試体全体が荷重に対する耐荷力を失って左右に分離する直前であり、破壊に伴う二次的な作用で発生するものであって、本質的な破壊現象には関係が薄い¹⁾と言われている。実際に顕微鏡で観察すると、載荷点間のひびわれとこの種のひびわれは連続していなかった。また、疲労破壊を起こした供試体を見ると大部分のものは、破壊に到るひびわれは、最初に端面中央部より上方及び下方にそれぞれ2~4cmの位置に発生したひびわれであり、中央部に向うひびわれは、破壊ひびわれと一致していなかった事より、この種のひびわれが疲労破壊現象には関係が薄いと思われるが、静荷重試験の場合ひびわれ発生から破壊まで瞬間的であるのに対して、疲労試験では、ひびわれ発生から破壊に到るまで時間差が生ずるので、この種のひびわれが疲労破壊に無関係であると一概には言う事ができない。この種のひびわれが、疲労破壊に対しどの様な影響を及ぼすのかは、今後一層の研究の余地があると思われる。

この供試体における載荷回数とA E波発生状況を図-7に示す。ひびわれ発生後、ある周期を持ってA E波が発生している。この事は、繰返し載荷の応力により貯えられ

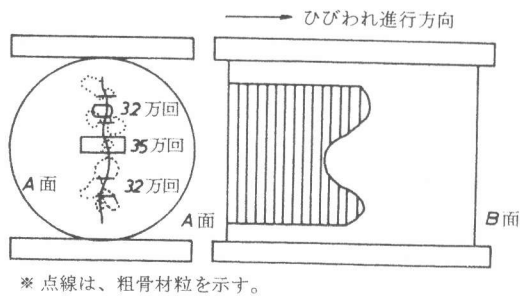
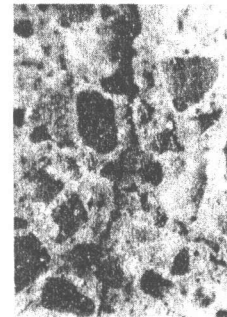


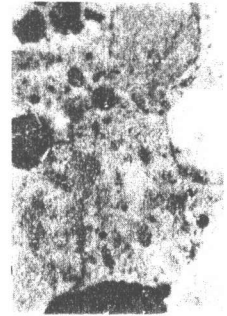
図-6 破壊の要因となるひびわれの進行状況



a) A面より1.5 cm



b) A面より4.5 cm



c) A面より7.5 cm

写真-1 ひびわれ進行状況(×80)

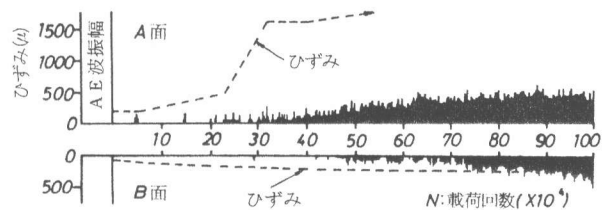


図-7 疲労試験中におけるひずみ及びA E波発生状況

ていたひずみエネルギーが徐々に解放されるため、供試体長さ方向へのひびわれは、一定の速度で進展するものではない事を示している。

以上述べた様な、コンクリートのひびわれ進行状況は、本実験の様な高サイクル疲労の場合によるものと思われる。

3-3 繰返し載荷を受けるコンクリートの疲労限度

図-8は、上限応力比89%と、高応力比で繰返し載荷を行った引張供試体のAE波形、累積AEカウント数及び供試体両端面のひずみと載荷回数を示したものである。この供試体では、1100回でA面の中央部より上下約2cmの位置で1cmのひびわれが発生し、数秒で連続し、繰返し回数3550回で疲労破壊した。疲労試験時において、ひびわれがA面に発生し、供試体長さ方向に進展してB面にひびわれが伝達されたと同時に破壊したのである。

AEは、目視によるひびわれ発生回数より早い回数でカウントし始める。これはコンクリート内部のマイクロクラックの発生を示すものである。また、図中のAE波より、微小ひびわれが徐々に伝播して行き、破壊に到る事が明瞭に示されている。

図-9は、上限応力比32%の梁供試体の疲労試験中におけるひずみ及びAE波発生状況を示すものである。AE波の発生は殆んど認められず、供試体底面のひずみも極めて小さく、200万回繰返し載荷してもひびわれは生じなかった。

厳しい繰返し応力を受ける重要な構造物 例え、海洋浮上プレストレストコンクリート構造物等では、マイクロクラックが発生しない限度の引張応力度に基づいて設計する必要があるので、この種の限度を推定する手法として AEは極めて有効である事が認められた。

繰返し載荷を行ってもコンクリートが疲労破壊しない限度は、コンクリートの品質・養生ならびに材令・粗骨材の品質・上限応力ならびに応力振幅・載荷速度等により異なるが、この実験の場合には、コンクリートの曲げ引張強度の40%、引張強度の45%程度である事が認められた。

4. 結 び

若干のプレストレスを導入したコンクリートの梁供試体についての曲げ引張疲労試験ならびに円柱供試体で行ったコンクリートの引張疲労試験等の実験結果より次の事が言える、(i)対数目盛で示した載荷回数とコンクリートの曲げ引張応力比との関係は直線的となり、その関係はコンクリートの引張の場合の関数と概ね一致する事、(ii)200万回の曲げ引張または引張の繰返し載荷にも耐え得る上限応力比はそれぞれ59%、62%である事、(iii)引張疲労試験における劣化過程を推定する手法としてAE法は、コンクリート内部のマイクロクラックの発生を感知できるので 有効である事、(iv)高サイクル疲労試験の場合、ある程度ひびわれが進展しても、粗骨材粒とモルタルの付着ならびに粗骨材粒のかみ合せの影響によりある程度疲労強度が大きくなる事、等コンクリートの疲労性状に関する事項を明らかにする事ができた。

本研究において、國方正胤先生より終始御懇篤なる御指導を賜わった。ここに謹んで厚く御礼申し上げる次第です。

参考文献：1) 町田篤彦「コンクリートの圧裂試験に関する基礎研究」土木学会論文報告集 No.297 1978-11

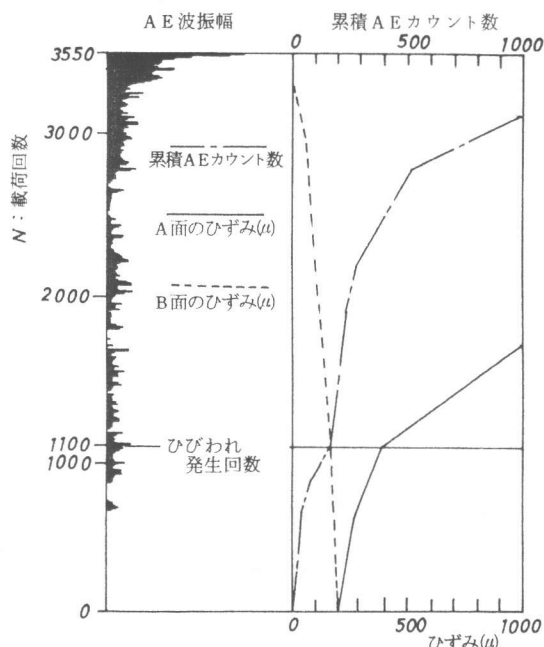


図-8 疲労試験中におけるひずみ、累積AEカウント数及びAE波発生状況

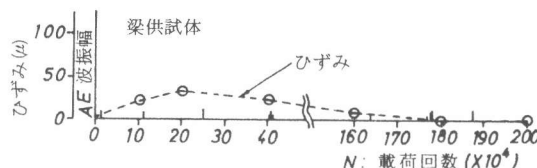


図-9 疲労試験中におけるひずみ及びAE波発生状況