

[73] コンクリート部材のねじり疲労性状に関する基礎的研究

正会員○児島孝之 (立命館大学)

阪 正行 (立命館大学大学院)

1. まえがき

コンクリート部材の疲労性状についての研究は1903年のVan Ornum¹⁾の無筋コンクリートに関する研究にはじまり、その後無筋コンクリート、鉄筋コンクリート部材、鉄筋、プレストレストコンクリート、PC鋼材等についての広範囲の研究が現在に至るまでになされてきている。最近においては、コンクリート構造物の設計法が限界状態設計法あるいは終局強度設計法に移行してきており、これに伴ないコンクリート部材の疲労問題も再び関心が高まっている。現在までに実施された疲労実験では、無筋コンクリート、鉄筋、PC鋼材等では一軸応力下に関するものが多く、コンクリート部材では曲げ載荷に関するものが多く、せん断に関するものは比較的少ない。さらにねじりによる疲労実験はほとんど報告がなされていないのが現状である。一方この数年来道路橋鉄筋コンクリート床板におけるひびわれ破損・破壊が問題となっているが、その原因が道路橋床版特有の移動輪荷重にあることが指摘された²⁾。このひびわれの進展には繰返し作用するせん断やねじりモーメントの影響が大きいものと考えられ、使用限界状態下におけるねじり疲労の問題として興味もたれる。

本研究はコンクリート部材のねじりによる疲労性状についての基礎的データをを得ることを目的として、無筋コンクリート、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート小型はりによるねじり疲労実験を実施した結果の報告である。

2. 使用材料および供試体

実験に用いたコンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には野洲川産川砂(比重:2.57, F.M.:2.64),粗骨材には高機産碎石(比重:2.70, 最大寸法:20mm)を使用した。

ねじり疲労用供試はりにおいて無筋および鉄筋コンクリートはりには15×15×55cmの寸法のもを、プレストレストコンクリートはりでは15×15×52cmの寸法のもを用いた。供試はりの詳細を図-1に示す。無筋およびプレストレストコンクリートはりでは、急激な破壊を防止するために、軸方向にのみφ6mmの鉄筋を4本使用した。鉄筋コンクリートはりにおいては12×12cmの閉合スターラップ(φ6mm)を6cmピッチに、軸方向鉄筋にはφ6mmを8本使用した。スターラップおよび軸方向鉄筋の体積鉄筋比はいずれも1.01%である。すべてのはりにはねじりの載荷用アーム(図-2参照)の取り付けた部分で破壊しないように12×12cmの閉合スターラップ(φ6mm)を4cmピッチに配置した。使用した

表-1 コンクリートの示方配合

| 骨材最大寸法(mm) | スランブ(cm) | 水セメント比(%) | 細骨材率(%) | 単位水量(kg) | 単位セメント量(kg) | 単位細骨材量(kg) | 単位粗骨材量(kg) |
|------------|----------|-----------|---------|----------|-------------|------------|------------|
| 20 | 10 ± 1 | 41 | 41 | 196 | 478 | 671 | 1003 |

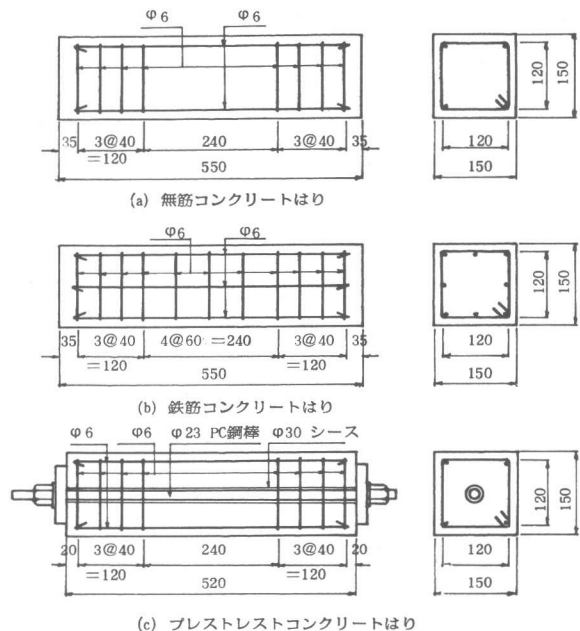


図-1 ねじり疲労試験用供試はり (単位:mm)

鉄筋は普通丸鋼で伸線加工されたものであり、明確な降伏点を有せず破断応力は 4980 Kg/cm^2 (断面積 0.272 cm^2) である。

コンクリートの練り混ぜは強制練ミキサーにより行ない、すべての供試体は打設翌日に脱型し、その後温度 20°C 相対湿度 85% の恒温恒湿室内で養生した。

プレストレストコンクリートはりにおいては一様プレストレス ($\sigma_{pe} = 70 \text{ Kg/cm}^2$) を載荷試験の1~2週間前に導入し、さらに試験の直前に再緊張を行なった。

3 実験方法

ねじりの載荷装置を図-2に示す。静的載荷および疲労用の動的載荷にはローゼンハウゼン型の疲労試験機を使用した。疲労試験に先立ち静的強度試験を実施した。この静的強度の 85% 、 75% および 65% の3種類をそれぞれ疲労実験における上限荷重とした(ただし無筋コンクリートはりでは後で述べる理由により 85% 、 77% 、 68% および 59% の4種類)。下限荷重は試験機の性能を考慮してすべて 1 t (ねじりモーメントで $5 \text{ t} \cdot \text{cm}$) とした。荷重と時間との関係はほぼ正弦波形式であり、繰返し載荷速度は無筋およびプレストレストコンクリートはりでは 450 cpm 、鉄筋コンクリートはりでは 300 cpm とした。上限荷重および下限荷重は載荷装置(図-2)に取り付けたロードセルからの出力をシンクロスコープでモニターしながら調節した。この荷重の調節は疲労試験中においても定期的に実施した。

疲労試験を実施した材令は無筋コンクリートはりでは122~181日、鉄筋コンクリートでは144~151日、プレストレストコンクリートでは155~159日である。

4 実験結果および考察

材令118日および182日におけるコンクリートの諸強度および弾性定数を表-2に示す。静的ねじり試験の結果を表-3に示す。疲労試験の実施期間が長期にわたるために材令約4ヶ月を経過した後に試験を実施した。この期間中にコンクリートの強度の増加は少なく、特に無筋およびプレストレストコンクリートのねじり強度に直接影響を及ぼす引張強度はほとんど変化がみられない。しかしながら無筋コンクリートはりの静的ねじり強度は材令121日と180日とでは 10% 以上増加している。この主原因は材令差よりも供試体を恒温室から搬出して試験を実施するまでの期間によるものと考えられる。材令121日の供試体は搬出後約2日に試験し、材令180日の供試体は搬出後十分乾燥させた後試験した。すなわち前者の供試体は乾燥収縮の影響を受けて強度低下を生じたものと考えられる。したがって疲労試験において

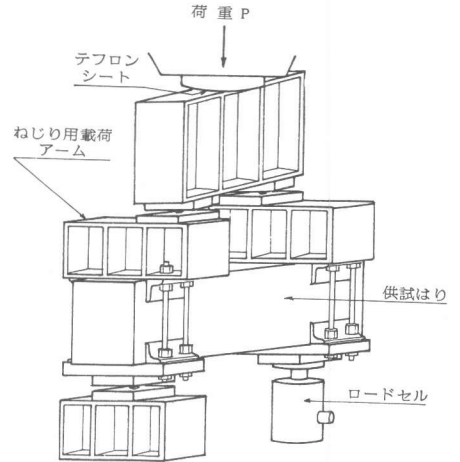


図-2 ねじり疲労試験載荷装置

表-2 コンクリートの強度および弾性定数

| | 材令118日 | 材令182日 |
|------------------------------|--------------------|--------------------|
| 圧縮強度 (kg/cm^2) | 453 | 493 |
| 引張強度 (kg/cm^2) | 34.7 | 35.2 |
| 曲げ強度 (kg/cm^2) | 54.4 | 64.8 |
| ヤング係数 (kg/cm^2) | 3.70×10^5 | 3.69×10^5 |
| ポアソン比 | 0.214 | 0.204 |
| せん断弾性係数 (kg/cm^2) | 1.52×10^5 | 1.53×10^5 |

表-3 静的ねじり強度試験結果

| 無筋コンクリートはり | | 鉄筋コンクリートはり | | | | |
|------------|------|-------------|-----------------|------|-------------|-------------|
| No. | 終局強度 | No. | ひびわれ強度 | 終局強度 | | |
| 材令121日 | 1 | 31.5 t · cm | 材令120日 | 1 | 30.0 t · cm | 44.1 t · cm |
| | 2 | 33.5 | | 2 | 34.3 | 44.1 |
| | 3 | 32.4 | | 3 | 33.4 | - |
| | 4 | 35.8 | | 平均 | 32.6 | 44.1 |
| | 5 | 30.0 | プレストレストコンクリートはり | | | |
| | 6 | 31.9 | 平均 | | | 32.5 |
| 材令180日 | 1 | 32.5 | 材令155日 | No. | ひびわれ強度 | 終局強度 |
| | 2 | 38.5 | | 1 | - | 68.3 t · cm |
| | 3 | 37.5 | | 2 | - | 67.5 |
| | 4 | 36.0 | | 3 | - | 70.0 |
| | 5 | 31.6 | 平均 | - | 68.6 | |
| | 6 | 38.6 | 平均 | 35.9 | | |

表-4 静的ねじり強度の理論値 (t · cm)

| | 弾性理論 | 24.4 ※ | 24.7 ※ ※ |
|---------------------|-----------------------|--------|----------|
| 無筋コンクリート はり | 弾塑性理論 ³⁾ | 35.1 | 36.8 |
| | Hsu ⁴⁾ | 34.1 | 35.1 |
| | 塑性理論 | 39.0 | 39.6 |
| 鉄筋コンクリート はり | Hsu ⁴⁾ | 50.9 | 51.8 |
| | Lampart ⁵⁾ | 55.4 | 55.4 |
| プレストレスト コンクリートはり | 弾塑性理論 | 59.2 | 63.6 |
| | Hsu | 61.0 | 61.8 |

※、※※：各々表-2の材令118日および182日のコンクリート強度による

プレストレストコンクリートはりの値は無筋コンクリートはりの理論値に係数 $1 + \sigma_{pe} / \sigma_{tu}$ を掛けて求めた。

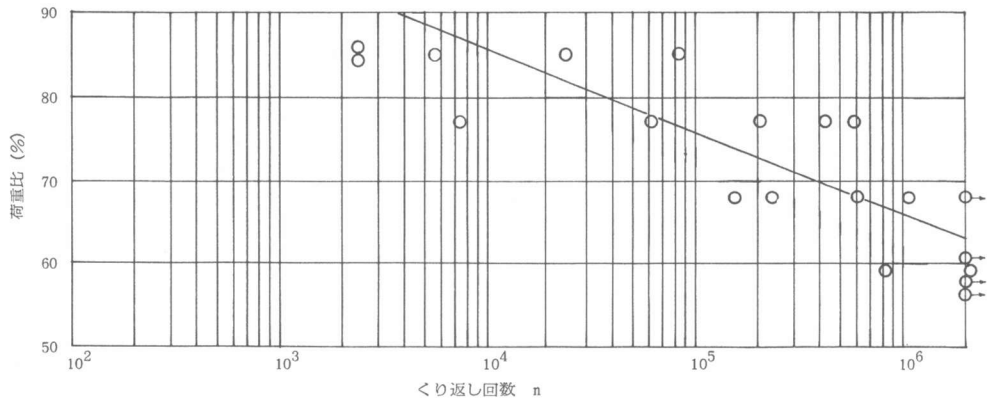


図-3 荷重比とくり返し回数との関係 (無筋コンクリートはり)

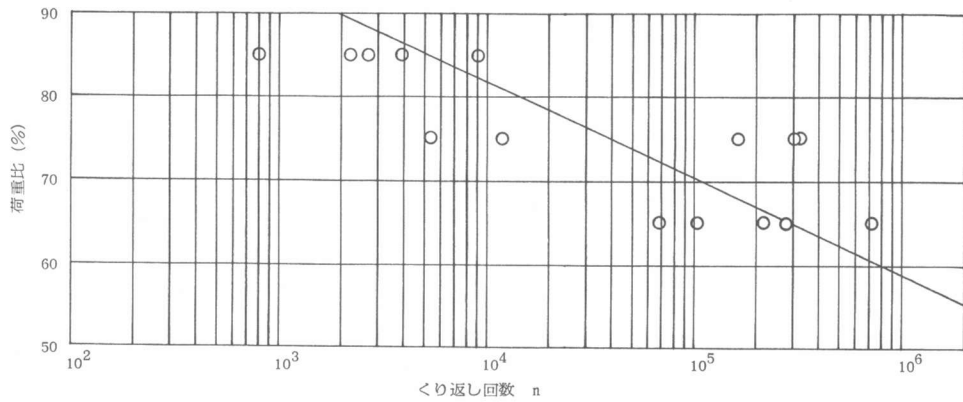


図-4 荷重比とくり返し回数との関係 (鉄筋コンクリートはり)

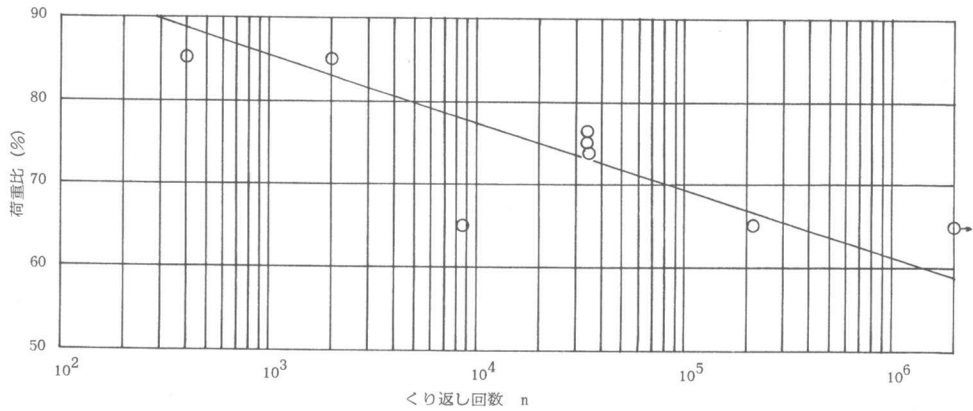


図-5 荷重比とくり返し回数との関係 (プレストレストコンクリートはり)

は材令180日の静的ねじり強度を基準として荷重比を決定した。

表-4には各はりの静的ねじり強度の理論値を示した。無筋コンクリートはりでは弾塑性理論値³⁾ ($Tu = kb^2h\sigma_{tu}$ においてkの値は材令118日および182日に対してそれぞれ0.30および0.31を用いた), およびHsu⁴⁾の実験式は実験値とよく一致している。鉄筋コンクリートはりの理論値は^{4,5)}、実験に用いた鉄筋が明確な降伏点を有しないので理論式の計算には降伏値の代りに引張強度を用いたために実験値よりもかなり大きな値となっている。プレストレストコンクリートはりの理論値は実験値よりもやや小さい値となっている。

疲労試験の結果を表-5に示す。疲労試験用の供試体は各荷重比(静的強度に対する)に対して、無筋および鉄筋コンクリートはりでは5本、プレストレストコンクリートはりでは3本とした。これらのはりの静的強度に対する荷重比と疲労寿命との関係を図-3, 4, 5に示す。各荷重比に対する平均疲労寿命は、コンクリートの圧縮疲労においてなされているような統計的手法⁶⁾を用いて決定した。すなわち各荷重比の疲労寿命より生存確率を求め、この生存確率と疲労寿命との関係を対数正規確率紙上にプロットし、さらにこの関係を最小二乗法により直線と仮定し、これより生存確率50%の疲労寿命を平均疲労寿命とした。これらを表-6に示す。コンクリートの疲労破壊は一般にS-N曲線を直線と仮定して論じられる場合が多いが、今回の実験結果も同様に表-6の値を用いて最小二乗法によりS-N直線を求めた。これらを表-7および図-3, 4, 5に示す。このS-N直線より200万回および1000万回疲労強度を求め表7に示す。無筋およびプレストレストコンクリートはりの1000万回疲労強度は56~53%であり、これは従来圧縮・曲げの疲労強度とされている55%とほぼ同様の傾向を示すものと考えられる。鉄筋コンクリートはりではこれらよりやや低い値を示した。今回の少ない実験結果からは明確な結論は得られないが、鉄筋コンクリートはりでは疲労強度は使用鉄筋、ひびわれ性状、ダウエル作用と密接な関係があるものと推察され、今後の研究が期待される。

5 あとがき

本研究はコンクリート部材のねじり疲労性状に関する基礎的実験の報告であるが、さらに複合荷重下の疲労実験等を実施する予定である。最後に本研究は昭和53, 54年度文部省科学研究費補助金によって実施した。

参考文献

- 1) Van Ornum, J.L., "The Fatigue of Cement Product", Trans. ASCE, V.41, 1903, pp443-445
- 2) 土木学会関西支部, "鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ", 土木学会関西支部講習会テキスト, 昭和52年7月
- 3) 児島孝之, 岡田清, "ねじりを受けるプレストレストコンクリート長方形断面はりについて", 土木学会論文報告集 第232号, 1974年12月, pp49-57
- 4) Hsu, T.T.C., "Torsion of Structural Concrete—Behaviors of Reinforced Concrete Rectangular Members," Torsion of Structural Concrete, ACI Special Publication SP-18, 1968, pp203-238
- 5) Lampart, P. and Collins, M.P., "Torsion, Bending, and Confusion—An Attempt to Establish the Facts," ACI Journal, No.69-45, August 1972, pp500-504
- 6) 阪田憲次 他2名, "統計的処理によるコンクリート疲労寿命に関する研究," 土木学会論文報告集 第198号, 1972年2月, pp107-114

表-5 ねじり疲労試験結果

| 無筋コンクリートはり | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----|-------|-----|-----|--------|-----|-----|----------|-----|-----|----------|
| 荷重比 | No. | n | 荷重比 | No. | n | 荷重比 | No. | n | 荷重比 | No. | n |
| 85% | 1 | 2400 | 77% | 1 | 7400 | 68% | 1 | 155300 | 59% | 1 | 830300 |
| | 2 | 2400 | | 2 | 61750 | | 2 | 237900 | | 2 | 2150000 |
| | 3 | 5600 | | 3 | 206400 | | 3 | 602200 | | 3 | >2000000 |
| | 4 | 24000 | | 4 | 424000 | | 4 | 1075100 | | 4 | >2000000 |
| | 5 | 84300 | | 5 | 581100 | | 5 | >2000000 | | 5 | >2000000 |
| 鉄筋コンクリートはり | | | | | | | | | | | |
| 85% | 1 | 800 | 75% | 1 | 5400 | 65% | 1 | 68250 | 65% | 1 | 104150 |
| | 2 | 2200 | | 2 | 11900 | | 2 | 217200 | | 2 | 276100 |
| | 3 | 2700 | | 3 | 163200 | | 3 | 322800 | | 3 | 722200 |
| | 4 | 3900 | | 4 | 301200 | | 4 | 34800 | | 4 | 8600 |
| | 5 | 91300 | | 5 | 322800 | | 5 | 34600 | | 5 | 214050 |
| プレストレストコンクリートはり | | | | | | | | | | | |
| 85% | 1 | 400 | 75% | 1 | 34000 | 65% | 1 | 8600 | 65% | 1 | 214050 |
| | 2 | 2000 | | 2 | 34600 | | 2 | 34800 | | 2 | >2000000 |
| | 3 | — | | 3 | — | | 3 | — | | 3 | — |

表-6 疲労寿命(生存確率50%)

| 無筋はり | | 鉄筋はり | | プレストレストはり | |
|------|---------|------|--------|-----------|--------|
| 荷重比 | n | 荷重比 | n | 荷重比 | n |
| 85% | 9200 | 85% | 4400 | 85% | 900 |
| 77% | 119100 | 75% | 63400 | 75% | 34200 |
| 68% | 565700 | 65% | 198400 | 65% | 211000 |
| 59% | 4627900 | | | | |

表-7 S-N曲線と疲労強度

| はりの種別 | S-N曲線 | 200万回疲労強度 | 1000万回疲労強度 |
|-----------|-----------------------------|-----------|------------|
| 無筋はり | $S = -9.806 \log N + 124.8$ | 63.0% | 56.2% |
| 鉄筋はり | $S = -11.47 \log N + 127.6$ | 55.3 | 47.3 |
| プレストレストはり | $S = -8.066 \log N + 109.6$ | 58.8 | 53.1 |