

V-8 水中におけるコンクリートの曲げ疲労強度に関する研究

室蘭工業大学 学生員 渡辺 洋一

室蘭工業大学 正 員 尾崎 訓

室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之

1. はじめに

コンクリート系の材料は本来引張り強度が小さく、構造物等では圧縮力を受け持つような設計施工がなされている。しかしセメントコンクリート舗装などに用いられるような無筋コンクリートでは、曲げ応力による引張り破壊が問題となり、さらに交通荷重の繰り返しによる疲労挙動を設計に考慮した取り扱いが必要になる。また近年、水中や湿潤な環境下でのコンクリートの圧縮疲労強度の低下が報告されており、¹⁾さらに割裂引張り疲労試験においても、大気中に比較して水中で疲労強度が低下するという実験結果がある。²⁾曲げ疲労に関しては、Raithbyら³⁾が異なる4種類の環境下で曲げ疲労試験を行い、湿潤状態及び絶乾後水中につけ戻した梁は、絶乾及び気乾状態の梁に対して静的曲げ強度に対する疲労強度の比が小さくなっている事を示しており、またKlaiberら⁴⁾は、異なる配合での曲げ疲労試験結果より、特に曲げ疲労強度に及ぼす水セメント比の影響が小さいことを挙げている。

現在コンクリート舗装の設計にはセメントコンクリート舗装要綱⁵⁾における疲労曲線が用いられているが、この曲線にはコンクリートの配合や、含水状態などの設計条件に関する規定はなく、広い範囲の異なる条件での適用性を確認する必要があると思われる。本研究はコンクリート舗装版の試験施工を行うことにより、約1年間屋外に暴露したコンクリート舗装版から供試体を切り出すことによって、よりシビアな環境と思われる水中状態で無筋コンクリートの曲げ疲労試験を行ったものである。さらにコンクリート舗装版の打設の際通常の方法で打設したものと、真空処理工法によって実質水セメント比を低減させた舗装版を同時に施工することによって、両者の疲労挙動に関する比較を行った。また梁の上縁と下縁の歪み、および梁の中央でのたわみを静的な試験と動的な場合の両方で測定する事により、コンクリートの曲げ疲労性状に関する考察を試みた。

2. 実験材料および配合

本研究に用いた材料は、セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材は登別産の陸砂、粗骨材は尻屋産の石灰岩碎石で、それらの比重は3.15、2.67、2.70であった。コンクリートはレデーミクストコンクリートを使用し、その配合および測定したスランブと空気量を表-1に示す。このコンクリートの標準養生供試体の材令28日における圧縮強度は372kg/cm²、曲げ強度は52.9kg/cm²であった。また混和剤としてAE剤を使用した。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤(cc)		
25	48.3	41.2	156	323	770	1107	65	11.0	3.8

3. 実験供試体

屋外におけるコンクリート舗装版の試験施工は、レデーミクスコンクリートを使用し、棒型内部振動機および表面仕上げ振動機を用いて面積5.6m²、厚さ10cmの舗装版を2面打設した。打設終了後、1面にのみ真空処理工法を用いて30分間脱水し、脱水率(脱水量÷処理前のコンクリートの全水量)で22.9%、水セメント比で37.1%になるまで脱水することができた。その後約5時間後に無処理のコンクリート舗装版のブリーディングの終了を待って表面に散水し、ビニールシートで表面を覆って養生をした。なお打設から5日間は舗装

版の表面が乾燥しないように時折散水したが、それ以降は屋外に暴露した環境条件で約10ヶ月間放置した。材令約10ヶ月の段階で通常の方法で打設した舗装版（以下NNシリーズ）、および真空処理工法によって水セメント比と単位水量を低減した舗装版（以下NVシリーズ）よりそれぞれ40本程度の角柱供試体（幅10cm、高さ9cm、長さ40cm）を切り出し、疲労試験に使用する前に約2ヶ月間水中養生を行った。その結果気乾状態からの吸水率はNNシリーズで平均0.47%、NVシリーズで0.40%であった。また水中に2ヶ月間つけもどした後の供試体を105℃の乾燥機内で炉乾燥させることによって求めた含水率はNNシリーズで平均3.89%、NVシリーズで3.44%であった。

4. 静的曲げ強度試験

静的曲げ強度試験は、供試体をほぼ2ヶ月間水中につけもどした後材令約1年の段階で水中で試験を行った。その際の載荷装置の支点間隔は30cmで、10cm間隔の3等分点に2点載荷で行った。また供試体の上縁と下縁における歪を測定するために上縁に3cm、下縁に12cmの歪ゲージを防水を施した状態で接着して試験を行った。さらに梁の中央でのたわみを測定するためにカンチレバーに歪ゲージを接着したたわみ測定用の装置を開発し、供試体に装着した状態で使用した。それらの装置の概略図を図-1に示す。静的

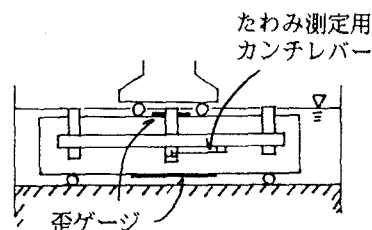


図-1 載荷状態および歪、たわみ測定装置装着図

曲げ強度試験の結果は平均でNNシリーズが64.3kg/cm²、NVシリーズが75.0kg/cm²であった。NNシリーズ供試体の曲げ応力(荷重)－歪および曲げ応力(荷重)－たわみ曲線の代表例を図-2に示す。一般に圧縮における応力－歪曲線は載荷初期にはほぼ直線であるが、圧縮強度の50%付近で明らかに直線から離脱するのに対し曲げにおける曲げ応力(荷重)－歪曲線は曲げ強度の50%付近まではほぼ直線で近似することができ、直線部分の占める割合が高く、より弾性的な挙動になっている。また低応力では上縁の歪と下縁の歪に大差はみられないが高応力になるにつれ下縁の歪が増大して破壊に至っている傾向がみられた。曲げを受ける無筋コンクリートの場合、クラックが生じない程度の低応力ではかなり弾性的な挙動を示すが、特に下縁

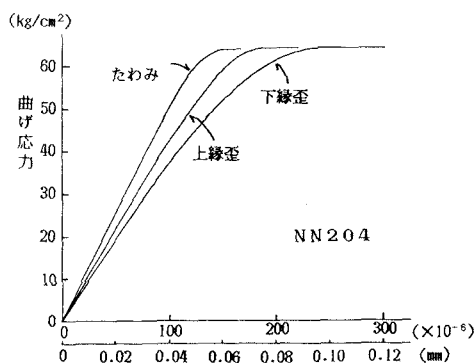


図-2 静的応力－歪、たわみ曲線

歪が降伏し始める高応力になると微小なクラックが致命的となり、圧縮などに比較すると少ない歪で破壊に至るというコンクリートの曲げに特有の脆性的な性状が観察された。またNNシリーズとNVシリーズでは曲げ変形性状に大きな差は見られなかった。

5. 疲労試験概要

疲労試験は構造物疲労試験機（島津サーボバルサEHF-30型）を使用し、繰り返し荷重の形式を正弦波、載荷速度は5Hzに統一した。載荷装置は静的試験と同じものを使用し支点間隔30cm、3等分点に2点載荷で行った。またそれらの周囲をアクリル版で囲み、中に水を注入することで疲労試験は静的試験と同様に常に水中で行った。繰り返し荷重の最大応力比 S_1 は静的基準曲げ強度の59%から80%の間で変化させたが、最小応力比 S_2 は静的強度の10%に統一した。静的試験と同様に供試体の上縁と下縁での歪および梁の中央でのたわみをある一定間隔で作動するデータレコーダに記録して解析を行った。また繰り返し荷重は供試体が破壊するまで載荷したが、繰り返し回数が200万回を越えるものに対しては疲労試験を打ち切った。

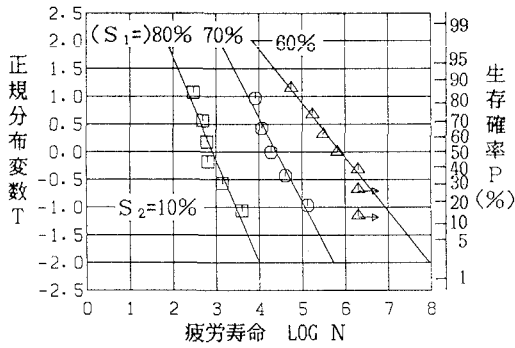


図-3 P(T)-N線図 (NNシリーズ)

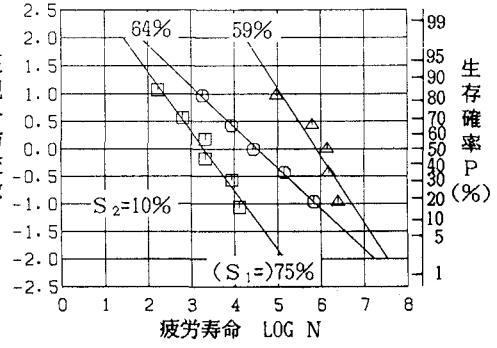


図-4 P(T)-N線図 (NVシリーズ)

6. P-N線図およびS-N線図

各最大応力比ごとの供試体の疲労寿命に対する生存確率 P を $P=1-r/(n+1)$ 、非破壊の供試体を含む場合には $P=1-r/(n+2)$ によって求め、それらが対数正規分布に従うと仮定して直線回帰を行ったものが図-3、4に示すP-N線図である。このグラフより各最大応力比 S_1 に対し、生存確率50% ($T=0$) に相当する疲労寿命を求め、最大応力比との関係をS-N線図上でべき乗回帰したものが図-5および図-6である。これらの結果をさらに修正グッドマン線図を利用して完全片振りの場合に換算して、セメントコンクリート舗装要綱に示されている疲労曲線と比較したものが図-7に示すS-N線図である。この図より求めた繰返し回数200万回に相当する最大応力比は、セメント舗装要綱で50%、本研究でのNNシリーズで53%、NVシリーズで51%であった。このように低応力では舗装要綱に示された疲労曲線と同等程度の疲労強度をNNおよびNVシリーズの両方で示したが、高応力では下回る傾向がみられた。Rait hbyら³⁾は、1度絶乾にした供試体を再び水中につけ戻した供試体の疲労強度が常に標準養生下にあったものより低下することを示している。これらの結果は1度乾燥した供試体を再び水中あるいは湿潤な環境下に戻ることがコンクリートの曲げ疲労に対する耐久性に不利に影響すること示唆していると思われる。さらにKlaiberら⁴⁾によれば、コンクリートの曲げ疲労挙動は粗骨材の影響を受け、特に高い応力では石灰岩を用いたものより砂利を粗骨材に用いたものの方が大きな疲労寿命を与えると報告している。石灰岩はそのセメントペーストとの付着の良さによって低応力では有利な条件を持っていると考えられるが、それ自身の強度が劣るために高応力では不利になるとと思われる。本研究における破断面の観察においても石灰岩に特有である骨材での破壊が多くみられた。またNNとNVシリーズに関しては、疲労寿命のばらつきを考慮すれば疲労強度に大差は

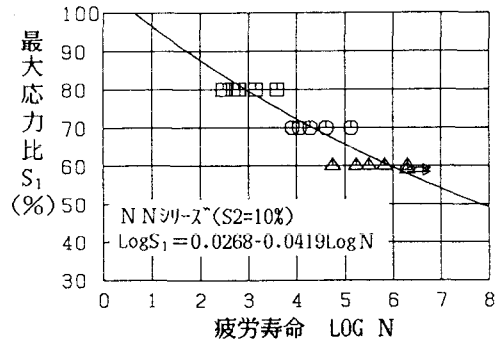


図-5 S-N線図 (NNシリーズ)

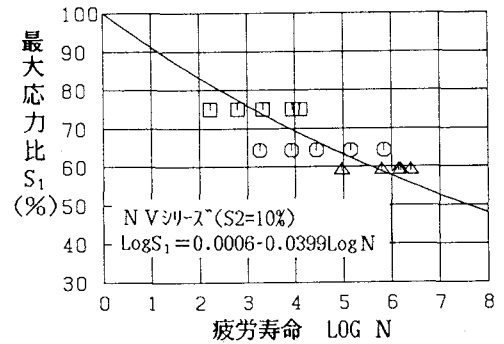


図-6 S-N線図 (NVシリーズ)

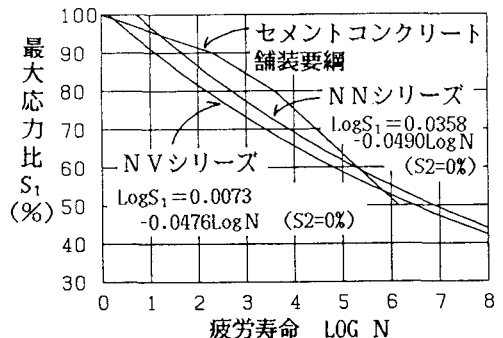


図-7 各種S-N線図

なく、曲げ疲労強度に関して水セメント比の影響が小さいとするKlaiberら⁴⁾の研究報告を裏付ける結果となった。しかし曲げ強度で表した200万回疲労強度は、NNシリーズで34.1kg/cm²、NVシリーズで38.3kg/cm²となり、真空処理による静的強度の増大によって実質的に疲労強度は10数%改善された。

7. 動的な歪およびたわみの変化

図-8から10に全疲労寿命に対する繰返し回数のパーセンテージ (N/N_F) に対する上縁および下縁での歪と梁の中央でのたわみとの関係を代表例で示した。これらの図から全疲労寿命の80%程度までは歪やたわみに大きな変化は見られないが、それを越えた付近からグラフの勾配が急になり特に下縁の引張り歪が増大して破壊に至っている傾向がみられた。しかし残留歪および残留たわみには大きな変化はなく、歪の振幅あるいはたわみの振幅が増大して破壊に至る疲労性状が観察された。

8. まとめ

試験施工による舗装版から切り出した角柱供試体を約2ヶ月間水中につけ戻した後水中で曲げ疲労試験を行った結果は、200万回疲労強度で静的強度の53% (NNシリーズ) および51% (NVシリーズ) であった。これらの疲労曲線は特に高応力の部分でセメントコンクリート舗装要綱における疲労曲線の値を下回ったが、この事は1度乾燥した供試体を水中につけ戻すことが曲げ疲労強度に不利に影響する為と考えられる。また通常の打設方法と真空処理工法により水セメント比を低減したコンクリートでは最大応力比で表した疲労強度に大きな差は見られなかった。

最後に本研究を行うに当たり、本学卒論生の栗原浩君と徳永隆君に労をわずらわした。ここに付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 尾崎、志村：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度、土木学会35回年次学術講演会、昭和55年9月
- 2) 鈴木、尾崎、志村：大気中および水中におけるコンクリート、モルタル、ペーストの引張り疲労、土木学会第39回年次学術講演会、昭和59年10月
- 3) K,D,Raithby and J,W,Galloway: Effects of Moisture Condition, Age, and Rate of Loading on Fatigue of Plain Concrete, SP-41-2, ACI, 1974
- 4) F,W,Klaiber and D,Y,Lee: The Effects of Air Contents, Water-cement Ratio, and Aggregate Type on Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete, SP-75-5, ACI, 1982
- 5) セメントコンクリート舗装要綱、日本道路協会、1984

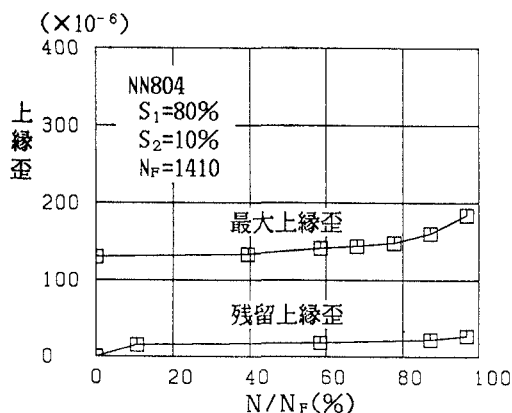


図-8 供試体の上縁歪

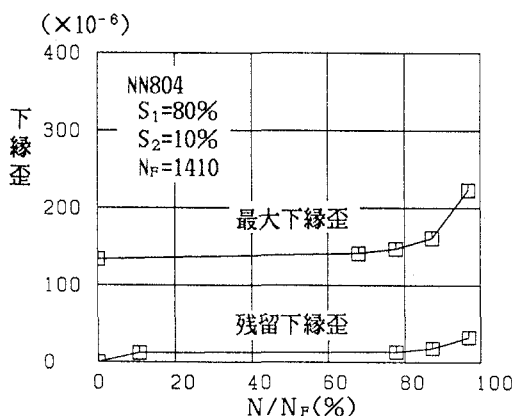


図-9 供試体の下縁歪

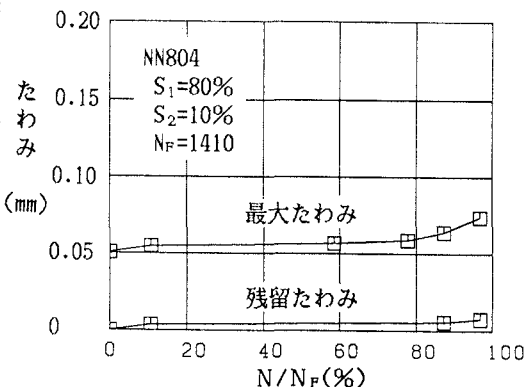


図-10 供試体の中央でのたわみ