論文 コンクリート部材の曲げ疲労破壊に関する研究

益田 彰久\*1・小澤 一雅\*2・松岡 茂\*3

要旨:破壊力学の考えに基づき,コンクリート部材の疲労は繰返し荷重下におけるひび割れ の進展である,と考え引張軟化曲線に繰り返し載荷の影響を考慮した計算モデルを提案した。 このモデルを用いて引張軟化曲線の形態が異なるプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コ ンクリートの繰り返し載荷試験を計算した結果,破壊載荷回数と荷重および変位の関係は実 験結果と近いものとなり,破壊挙動を表現することができた。

キーワード:疲労,曲げ破壊,引張軟化曲線

1. はじめに

現在供用されている社会基盤構造物の多くは コンクリート構造により築造されている。しか し近年は景気の落ち込み・社会構造の変化のた め新設構造物は減少する傾向にあり,そのため 既存構造物の維持・管理の重要性が増している。 またコンクリート構造物の劣化を原因とする事 故が社会の関心を集めておりその要因としては 鉄筋の腐食・中性化・疲労等が知られている。

これら社会基盤構造物のうち,特に交通機関 に供用されるものは多数の繰り返し外力を受け る。外荷重が静的に作用したときひび割れが発 生したとしても設計上問題がない場合があるが, 繰り返して加力されることにより疲労破壊へ至 ることが懸念される。このような疲労挙動を推 定することは維持管理やライフサイクルコスト を算定する上で不可欠なことであり,既存構造 物を補修・補強する場合に有効な情報となる。 しかしながらそれを求める有効な技術が確立さ れていないのが現状である。

本論文では曲げひび割れで決定される疲労破 壊に着目し,コンクリートの引張破壊特性であ る引張軟化曲線に対し繰り返し載荷の影響を考 慮した計算モデルを提案した。そしてこのモデ ルを用いた計算により曲げ疲労破壊を表現する ことを試みた。

## 2. 繰り返し載荷の影響を考慮した計算 モデル

繰り返し載荷による影響について,堀井ら<sup>1)</sup> が繰り返しによるひび割れ進展に着目した研究 報告をしており,コンクリートのような脆性材 料では繰り返し載荷によるひび割れの進展で疲 労挙動を説明できる,としている。そこでコン クリートの構成則のうち引張応力側については



- 図 1 繰り返し荷重下のプレーンコンク リートの引張軟化曲線<sup>2)</sup>
- \*1 鉄建建設(株) エンジニアリング本部技術研究所 (正会員) \*2 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 助教授 工博 (正会員) \*3 鉄建建設(株) エンジニアリング本部技術研究所 博(工) (正会員)

繰り返しの影響を考慮することとし,圧縮応力 側については影響は無いものとした。

Reinhardt ら<sup>2</sup>はプレーンコンクリートの繰り 返し引張試験を行い図 - 1に示す引張軟化曲線 を求めている。ここでは

- 1)除荷 載荷と1回繰り返した後の応力値
  は除荷前の応力値に対し 低下しており,その割合は一定である。
- 2)載荷時の勾配はひび割れ幅が大きくなる
  につれ緩やかになっており,すべて原点
  を指向している。
- 3)除荷 載荷によって得られる関係の全体 的な包絡線は単調載荷の引張軟化曲線と ほぼ重なっている。
- 等が報告されている。

そこで繰り返し載荷の影響を受ける引張軟化 曲線として図 - 2 に示すように単純化したモデ ルを採用した<sup>1)</sup>。その仮定は以下の通りである。

- ある荷重状態における引張応力が引張軟
  化曲線上の点 t1にある状態で,除荷され
  再度載荷されると同一ひび割れ幅での応力は t2となる。
- 2)除荷・再載荷経路は原点を通る直線とす る。
- 3) 引張軟化曲線上の点 t1 は,除荷され再 度載荷された場合でも t3 を越えないも のとする。また, t3 を越えるひび割れ幅 が生じる場合には引張軟化曲線に従う。

以上の仮定に従うとパラメータは繰り返しに よる応力低減率 となり,次のように定義する。

$$\alpha = \frac{\sigma_{t2}}{\sigma_{t1}} \tag{1}$$

よって繰り返し荷重を受けることによりひび 割れ領域で分担する引張応力が低下することに なり,その結果図-3に示すようにひび割れが

1進展することになる。このひび割れの進展に よりコンクリートの疲労挙動が決定されるもの と仮定した。図 - 4にその概念を示す。繰り返 しの影響を考慮しない単調載荷により荷重 - 変 位関係が得られ,また耐力以下のある荷重値で



図 - 2 繰り返し載荷によるプレーンコン





図-4 疲労破壊の概念

繰り返し載荷することによりひび割れ(変位) は進展し荷重 - 変位関係が得られる。この繰り 返し載荷の荷重 - 変位関係が単調載荷の関係線 に達した状態,またはそれ以前に断面の応力釣 り合いが保てなくなった状態を疲労破壊とした。 算定する手順は以下の通りである。

1)単調載荷条件により繰り返し載荷荷重が 作用した場合のひび割れを考慮した応力 分布を算定し初期ひび割れ領域1cおよ び疲労破壊時ひび割れ領域1<sub>max</sub>を求める。

- 2)繰り返し載荷による断面の釣り合いから
  図-3に示すようなひび割れ領域の進展
  長1を計算する。
- 3)繰り返し荷重 P<sub>c</sub>における疲労回数 Nは 式(2)で算定する。

$$N = \frac{l_{\max} - l_c}{\Delta l} \tag{2}$$

3. プレーンコンクリートの曲げ疲労

プレーンコンクリートの場合,応力低減率 は80%前後であるとの報告がある<sup>1)</sup>。そこで鉄 道総合技術研究所で実施されたプレーンコンク リートの曲げ疲労試験<sup>3)</sup>結果を対象に計算を行 った。

小島らは圧縮強度 18N/mm<sup>2</sup> の無筋コンクリ -トで試験体を作成しており,その寸法は幅 200mm×高さ 200mm×長さ 700mm である。支 承スパンは 600mm であり,載荷点はスパン3 等分点のうちの2点である。最初に単調曲げ載 荷試験を行って最大荷重P<sub>max</sub>の確認を行い,そ の結果を受け繰り返し試験の載荷荷重をP<sub>max</sub> ×(0.5~0.9)としている。

上記の条件により各荷重値における破壊時載 荷回数を釣り合い計算により求めた。なおプレ ーンコンクリートの引張強度はKoenigら<sup>4)</sup>が提 案している式(3)よって圧縮強度から求めた。

$$f_t = 2.12 \times \ln(1 + \frac{f_c}{10})$$
(3)

また引張軟化曲線は Hordijk の提案した近似式 におけるひび割れ発生直後の接線勾配を有する 直線とした。<sup>5)</sup>

図 - 5 に載荷回数と荷重との関係で整理した 試験結果と計算結果を示す。試験値がプロット



されている範囲に対し計算ではこの範囲に近い 結果が得られ,計算は試験結果を概ね予測して いることが確認された。試験値はばらつきが大 きいため全体的に線形関係にあるように見受け られる。計算値でも荷重の大きな 0.8 以上の範 囲では直線関係に近いことが認められるが,荷 重が小さな範囲では載荷回数の増大が顕著にな り,関係線の勾配が水平に近づいていることが わかる。

4. 鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労

短繊維を混入した補強コンクリートはプレー ンに較べ大きな破壊エネルギーを持ち,引張軟 化曲線の形状もプレーンとはかなり様相が異な る。そこで鋼繊維補強コンクリート(SFRC) を用いて繰り返し載荷試験を行い,引張軟化曲 線モデルについて検討した。

- 4.1 鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労試 験
- (1) 試験概要

試験体は設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup> とした補強
 鉄筋を配しないSFRCである。鋼繊維は長さ
 30mm(アスペクト比 50)で両端をフック加工

表-1 SFRC曲げ疲労試験体の配合

粗骨材の	7=\_~	空気量	水セメ	御母共來 単位量 (kgf/m <sup>3</sup> )						
最大寸法 (mm)	スラクノ (cm)	の範囲 (%)	ント比 (%)	袖肯材率 (%)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	鋼繊維 SF
20	18	4.5	51	45.5	182	357	771	945	4.05	78

したものを使用し,混入率は体積百分率で1.0% とした。表-1にSFRCの配合を示す。試験 体寸法は高さ500mm×幅500mm×長さ2500mmと した。載荷には図-6に示すように100tfアク チュエータを用いた。支承スパンは2000mmで, せん断スパン750mmの2点載荷である。プレー ンと同様,破壊性状・最大荷重を確認するため 繰り返し載荷以外に単調載荷曲げ載荷も行った。 計測については試験体の変形挙動を把握するた め,試験体中央・載荷点・支承点計5箇所の断 面中央高におけるたわみ量を載荷時間中通して 測定した。

(2) 試験結果

図 - 7 に単調載荷における荷重 - 変位関係を 示す。本試験の載荷方法は2点載荷であり,ま た試験体下面に切り欠き等も設けていないため ひび割れは載荷点間の任意の位置に発生する可 能性があり,よって試験体の変位量はひび割れ 発生位置の影響を受けてしまう。そこで横軸の 変位量としてひび割れ発生位置の影響を受けな い載荷点の変位より算出した,試験体のスパン 中央変位とした<sup>6)</sup>。また荷重値を最大荷重値で 無次元化することにより図 - 7 に示すように各 試験体結果はほぼ同一の関係となった。

繰り返し載荷の試験荷重は次のようにして決 定した。まず目標値として荷重レベル(繰り返 し荷重/最大荷重)を定めた。単調載荷試験結 果よりその荷重レベルに対応するスパン中央変 位が求まる。繰り返し載荷を開始する前に行う 単調載荷時はこのスパン中央変位値まで変位制 御により慎重に載荷し,このときの荷重値を繰 り返し載荷の最大荷重値とした。

表 - 2 に繰り返し載荷試験結果を示す。表中 の試験荷重値は計測結果から得られた極大値す べてを平均したものであり,スパン中央変位・ 荷重レベル値はこの試験荷重値を単調載荷試験 結果に当てはめて求めたものである。図 - 8 は 破壊時載荷回数と荷重との関係を整理したもの で,両者の関係は直線的であることが確認でき る。また図 - 9 に載荷回数とスパン中央変位値



図 - 6 SFRC曲げ疲労試験載荷装置



図 - 7 SFRC静的曲げ試験結果

表 - 2 SFRC曲げ疲労試験結果一	覧
---------------------	---

載荷回数	<b>試験荷重</b> (kN)	スパン中央 変位 (mm)	荷重レベル
250000以上	231	0.0870	0.7089
178366	246	0.1892	0.8215
186227	244	0.2055	0.8258
101575	254	0.2218	0.8395
42773	284	0.2401	0.8509
145223	265	0.2502	0.8558
11306	273	0.2625	0.8629
2648	405	0.4325	0.9003
816	365	0.5208	0.9095



図-8 SFRCの繰り返し載荷試験結果

の関係を示す。なお変位量はひび割れの影響に 着目するため載荷回数1回の時を0となるよう 調整した。同図によるといずれも破壊直前に急 激な変位増加を示している。また図-7および 図-9中に示す 印は繰り返し載荷の荷重-変 位関係が単調載荷の同関係と交わる点を示すが, この点を超えると試験体は急速に破壊へ向かう ことが認められる。よって図-4で示した疲労 破壊の仮定は妥当なものであると考えられる。

(3) SFRCの引張軟化曲線モデル

SFRCはプレーンコンクリートに較べ破壊 エネルギーが大きく,引張軟化曲線の勾配は非 常に緩やかである。そのためプレーンコンクリ ートのモデルをそのまま適用することは困難で ある。そこで引張軟化曲線が繰り返し載荷によ って損傷を受け,載荷回数の増大と共に損傷領 域も増大していくような,図-10に示すモデ ルを考案した。損傷を受けた領域でも繊維の架 橋効果が存在しているものと考え,損傷領域で は一定の引張応力値 ti が分布するようにした。 また引張強度ft から ti まではプレーンコン クリートの引張軟化曲線モデルの勾配を持つ直 線とした。

ti と載荷回数の関係はコンクリートの種類 により変化すると考えられるため,各部材試験 結果から関係を定義することとした。今回は疲 労破壊が発生したもののうち荷重レベルが最も 小さい0.8215の試験結果から関数を求めた。そ の条件で計算した荷重 - 変位関係を表 - 3に示 す。計算では損傷応力値が引張強度の0.737よ リ小さくなると断面の釣り合いをとることがで きなくなった。このときの変位量はまだ単調載 荷の荷重 - 変位線に達していないが,実際には 平面保持が成り立っていない状態であると考え られ,この状態を計算上の疲労破壊とした。表 - 3に示す変位量に対応する載荷回数を実験結 果に照らし合わせて求めることで,式(4)に示す 載荷回数Nと損傷応力

$$O_{ti}/f_t = N^{(-0.0271)}$$
 (4)



図 - 9 SFRC曲げ疲労試験における変位と載荷回数の関係





表-3 SFRC繰り返し載荷挙動

計算	試験値	
σti∕ft	スパン中央変位	載荷回数
1.000	0.000	1
0.900	0.045	131
0.800	0.193	2641
0.750	0.571	31151
0.740	0.938	78821
0.737	1.436	127631



図 - 1 1 SFRC疲労回数と荷重の関係

## (4) 数値計算結果

式(4)の関係を用いてすべての繰り返し荷重 パターンについて計算を行った。破壊時載荷回 数と荷重の関係を図 - 11に示すが,載荷回数 については計算により精度良く算出できている ものと判断される。また図 - 12に載荷回数と 変位の関係を示す。変位量の試験値には誤差が あるため計算値と差が出ることは避けようがな いが,変位の増大する率が大きくなると疲労破 壊が近くなるという特徴は表現されている。

## 5. まとめ

コンクリートの疲労挙動は単調載荷と同様に ひび割れ進展に支配されている,という観点か ら繰り返し載荷を受けた場合の引張軟化曲線モ デルを考案し,そのモデルを用いた計算と試験 結果を比較した。その結果,破壊時載荷回数や 変位量の推移等の疲労挙動を推定することがで きることを確認した。今回は引張軟化曲線のモ デルや繰り返しによる低減モデルに簡略なもの を採用したため試験値との差が生じてしまった が,以上の成果が得られたことから基本的な考 え方に問題はないものと判断される。

本研究の基本的な考え方から,コンクリート のひび割れ発生は疲労破壊へと至る必要条件と なる。今回は対象を曲げひび割れのみとしたた め適用範囲は曲げ疲労破壊と限られたものとな ったが,今後はせん断破壊等も考慮し実構造物 を見据えた疲労破壊について検討を広げていく 予定である。

なお,この研究は文部科学省革新的技術開発 研究推進費補助金(研究課題「高性能コンクリ ートを用いた次世代建設システムに関する研 究」研究代表者:東京大学助教授小澤一雅)を 受けて実施されているものである。



## 参考文献

- Horii, H., Shin, H., C., and Pallewatta, T., M., "Mechanism of Fatigue Crack Growth in Concrete", Cement & Concrete Composites 14, pp.83-89, 1992
- Reinhardt, H. W., Cornelissen, H. A. W. and Hordijk, D. A., "Tensile tests and failure analysis of concrete", J. Structural Eng., ASCE 112, pp.2462-2477, 1986
- 3) 小島 芳之,岡野 法之,齋藤 貴,村田 一郎,木村 元哉:トンネル覆工を想定し た無筋コンクリートの疲労特性に関する実 験的研究,土木学会トンネル工学研究論 文・報告集,第10巻,pp.227-232,2000
- Koenig, G., Grimn, R. and Remmel, G. : Shear Behavior of Longitudinally Reinforced Concrete Members of HSC, JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures, pp.63-74, 1993
- 5) 松岡 茂・益田 彰久・武田 康司・土井 至朗:ひび割れ発生・進展に支配されたコ ンクリート構造物の解析モデル,土木学会 論文集,No.620/ -43,pp.1-13,1999.5
- 6) 益田 彰久,松岡 茂,柳 博文,松尾 庄
  二:鋼繊維補強コンクリート品質管理についての一考察,土木学会第55回年次学術
  講演会, -321,2000