

V-22 有限要素解析を用いた斜めひびわれ発生前における RC はりのせん断疲労強度の評価

北海道大学大学院 学生員 水河 洋介
北海道大学工学部 正会員 佐藤 靖彦
北海道大学工学部 正会員 上田 多門
北海道大学工学部 正会員 角田 史雄

1. はじめに

せん断疲労に関しては、これまで多くの実験的な検討がなされており、せん断補強筋を持たない RC はりの疲労強度や、せん断補強筋を有する RC はりのスターラップの歪み性状に対して精度良い予測式が開発されている¹⁾。しかし、現在重要な課題として挙げられている水中下におけるせん断疲労性状をはじめ、今後厳しい環境下での疲労特性を把握及び予測していくには、実験的な検討のみでは限界がある。

Zahran²⁾は、鋼コンクリートサンドイッチはりのせん断疲労耐力を解析的に評価する手法を構築した。これは、疲労の問題を解析的に評価する研究として世界的に例を見ない、非常に価値の高い研究といえる。しかしながら、その方法では、繰返し回数が作用することによる内部抵抗力の再分配過程など、そのメカニズムを詳細に検討することは難しい。そこで本研究は、疲労荷重下における鉄筋コンクリート(以下、「RC」)はりのせん断性状を、解析的に予測・評価できる手法を開発することを目的として行った。

2. 解析方法

2.1 概説

本解析のベースとしたプログラムは、RC はりのせん断問題用として開発された WCOMR³⁾である。本解析プログラムは、8 節点アイソパラメトリック要素を用いており、各要素の応力は 9 つのガウス積分点で評価されるものである。

このプログラムは、コンクリート及び補強材の材料非線形性を考慮できるものであり、その構成則は、(1)ひび割れ発生前、(2)ひび割れ発生基準、(3)ひび割れ発生後、の大きく 3 つに分けられる。疲労荷重下の性状を解析的に評価するためには、すべての構成則を修正する必要があるが、本論文では、疲労問題を解析的に把握することの第一段階として、斜めひび割れ発生荷重が繰返し回数とともに低下することを評価することを目的とし、ひび割れ発生前の構成則及びひび割れ発生基準に繰返し荷重が作用することによる影響を組み入れる。すなわち、静的問題用に開発された構成則に繰返し荷重が作用することにより剛性及び強度が低下することを考慮するのである²⁾。以下にその方法を示す。

2.2 疲労解析の手法

(1) まず最初に静的に載荷(図 1 の O-A 区間)・除荷(図 1 の A-B 区間)し、最大、最小せん断力作用時(図 1 の A 点及び B 点)における各要素のガウス積分点の主応力 $A(\sigma_{cmax-i}, \sigma_{tmax-i})$ 、 $B(\sigma_{cmin-i}, \sigma_{tmin-i})$ を用い、以下の式により等価応力⁴⁾を算出する。

A Study on Shear Fatigue Strength of RC Beams Evaluated by FEM at pre Diagonal Crack
by Y.MIZUKAWA, Y.SATO, T.UEDA, Y.KAKUTA

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m,\max} &= \frac{\sqrt{2}}{2}(\sigma_{t\max} + \sigma_{c\max}) & \tau_{d,\max} &= \frac{\sqrt{2}}{2}(\sigma_{t\max} - \sigma_{c\max}) \\ \sigma_{m,\min} &= \frac{\sqrt{2}}{2}(\sigma_{t\min} + \sigma_{c\min}) & \tau_{d,\min} &= \frac{\sqrt{2}}{2}(\sigma_{t\min} - \sigma_{c\min}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$S_{\max} = \left[(a\sigma_{m,\max})^2 + (b\tau_{d,\max})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad S_{\min} = \left[(a\sigma_{m,\min})^2 + (b\tau_{d,\min})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで $a = \frac{0.6}{f'_c}$ 、 $b = \frac{1.3}{f'_c}$

ここに、 $\sigma_{m,\max}$ 、 $\sigma_{m,\min}$ ：最大・最小平均応力、 $\tau_{d,\max}$ 、 $\tau_{d,\min}$ ：最大・最小偏差応力、 $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ ：最大・最小等価応力。

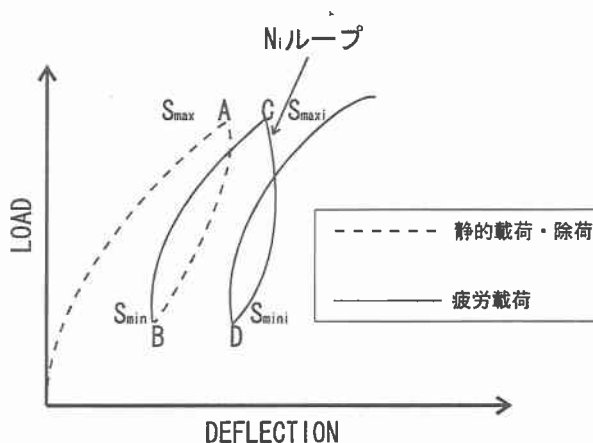


図1 解析方法

(2)Tepfer⁵⁾により提案されたコンクリートの一軸圧縮強度に対するS-N関係式(式(3))に $f_u=1.0$ 、 $f_{min-i}=S_{min-i}$ 、入力する繰返し回数 N_i を代入し、この場合の最大等価応力 $S_{\max-i}^*$ を求める。ここで得られ $S_{\max-i}^*$ は、最小せん断力時の等価応力が $S_{\min}$ である場合に、 N_i 回で破壊する為に必要な最大作用せん断力時の等価応力を表す。

$$\frac{f_{\max}}{f_u} = 1.0 - 0.0685 \times (1 - R) \times \log N \quad (3)$$

ここで、 $R = \frac{f_{\min}}{f_{\max}}$ 、 $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ ：最小、最大応力、 N ：繰返し回数。

(3)等価応力は一軸圧縮強度で正規化されたものであり、その値が1.0でコンクリートは圧縮破壊することとなる。よって、(2)で得られた $S^*_{\max-i}$ は、繰返し N_i 回後の終局強度を表すものである。すなわち、繰返し荷重が N_i 回作用することにより、破壊強度が1.0から $S^*_{\max-i}$ ($S^*_{\max-i} < 1.0$)に低下することとなる。本研究では、この $S^*_{\max-i}$ を用い、繰返し荷重が N_i 回作用後の圧縮及び引張強度を次式により低減することとした。

$$f'_{c-i} = \frac{S^*_{\max-i}}{1.0} f'_{c0} \quad (4)$$

$$f_{t-i} = \frac{S^*_{\max-i}}{1.0} f_{t0} \quad (5)$$

ここで、 f'_{c-i} ：繰返し N_i 回後のコンクリート圧縮強度、 f_{t-i} ：繰返し N_i 回後のコンクリートの引張強度、 f'_{c0} ：コンクリート圧縮強度の初期値、 f_{t0} ：引張強度の初期値。

(4)次に(1)で得られた $S_{\min-i}$ 、 $S_{\max-i}$ を式(4)に代入し、繰返し回数 N_u を求める。この N_u は、応力振幅 $S_{\min-i}$ 、 $S_{\max-i}$ でコンクリートを破壊に至らしめるのに必要な繰返し回数を表す。

(5)(4)で得られた N_u と入力繰返し回数 N_i をBennett等により提案されている繰返し回数とコンクリートの弾性係数との関係式(式(6))⁶⁾に代入し、繰返し回数 N_i 後のコンクリートの弾性係数剛性 E_i を求める。なお、この弾性係数は引張、圧縮両方に適用されるものである。

$$R_N = 299 - 2.99 \left(\frac{E_i}{E_s} \right) \times 100 \quad (6)$$

ここに、 R_N ：疲労寿命に対して消費された割合（ $=100 \cdot N_i / N_u$ ）（％）、 E_s ：コンクリートの初期弾性係数、 E_f ：繰返し載荷後のコンクリート弾性係数。

(6)次に(3)及び(5)で求めた低減された強度及び剛性を用い図1に示すB-C区間の載荷及び、C-D間の除荷を行う。C点及びD点で主応力は、それぞれA及びB点の主応力が繰返し荷重を N_i 回経験した後の値を表している。

以上が、入力した繰返し回数 N_i に対する疲労解析である。実際の解析では上述の(1)から(6)の過程を入力したループ分だけ繰り返すこととなる（例えば、 N_i が10万回でそれを10ループ解析した場合には、合計100万回の疲労解析を行ったこととなる）。なお、次のループに進む際にはコンクリートの圧縮強度、引張強度及び剛性は常に初期値から再び減じられる。

実際のはり部材では各 Gauss ポイントでの最大主応力及び最小主応力、すなわち、応力振幅はそれぞれの位置で異なる。よって、各 Gauss ポイントで圧縮強度、引張強度及び剛性が異なることとなる。ただし、本解析では、Gauss ポイントにひび割れが入った場合は、その Gauss ポイントにおける剛性は、その時点での値で一定としている。すなわち、ひび割れ発生後の繰返し回数に対する修正は行っていないのである。

3. 数値解析

3.1 解析供試体の説明

ここで、2.で示した解析手法を用いて、繰返し荷重を受けるせん断補強筋を有する RC はりの斜めひび割れ発生荷重の評価を試みる。

本解析のモデルとした供試体を図 2 に示す⁷⁾。また、要素分割を図 3 に示す。

数値解析は全部で 4 ケース行った(表 1 参照)。ケース 1 は、静的に載荷を行ったものであり、静的荷重下での斜めひび割れ発生荷重を求めることを目的に行った。本プログラムのように分散ひび割れモデルを用いる場合、斜めひび割れ発生荷重をひび割れ性状より一義的に評価することは難しい。そこで、簡単のため、図 3 のハッチで示す要素の 9 つのガウス積分点におけるせん断補強筋の応力の平均値が増加し始める時のせん断力を斜めひび割れ発生荷重と定義することとした。その時のひび割れ性状を図 4 に示す。

表 1 解析供試体の概要

ケース	解析の種類	作用最大せん断力 (kN)	作用最小せん断力 (kN)	斜めひび割れ 発生回数(回)
1	静的	—	—	—
2	疲労	70	20	20~30
3	疲労	60	20	6000~7000
4	疲労	50	20	500000~600000

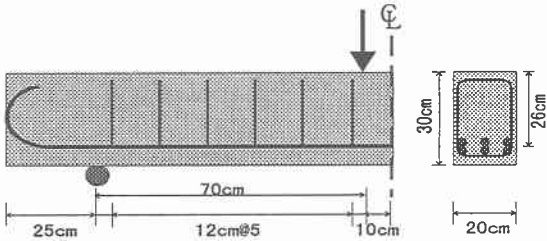
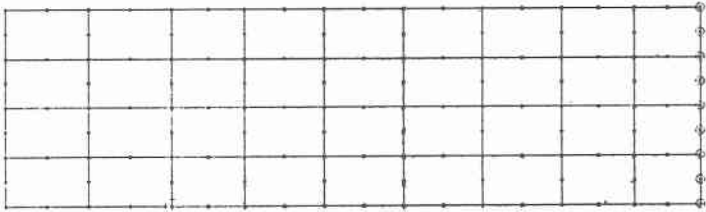


図 2 モデル化したはり供試体



●：可動節点、◎：強制節点

図 3 要素分割図

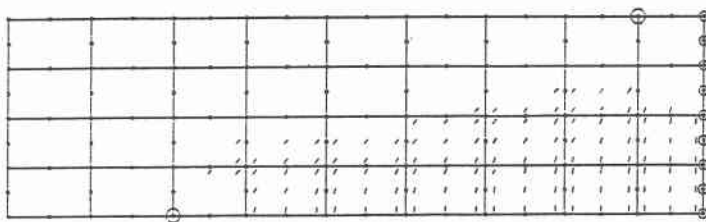


図4 斜めひび割れ発生時のひび割れ性状（静的載荷）

ケース2からケース4は、最小作用せん断力が全て20kNで一定とし、最大作用せん断力をそれぞれ、70kN、60kN、50kNとしたものである。なお、本供試体のコンクリート標準示方書式⁸⁾（式(7)）により求めた斜めひび割れ発生荷重は67.5kNであり、解析結果（ケース1の斜めひび割れ発生荷重）と概ね一致している。

$$V_{cr} = 0.2 f_c^{\frac{1}{3}} (100 p_w)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d}{100} \right)^{-\frac{1}{4}} b_w d \quad (7)$$

3.2 解析結果

ここで、本解析手法の妥当性を確認する目的で、上田ら¹⁾により提案されているせん断補強筋を持たないRCはりの疲労強度予測式(式(8))と比較することとした。式(8)は斜めひび割れ発生荷重を予測するものではなく、疲労強度を予測する式であるが、RCはりの斜め引張破壊強度は、斜めひび割れ発生荷重の大きさに強い相関があるため、ここでは、斜めひび割れ発生荷重の低下割合は、せん断疲労強度の低下割合と等しいと仮定し、解析結果と式(8)により得られる結果とを比較することとした。なおこの時、式(8)における静的せん断耐力 V_{cu} は斜めひび割れが発生するせん断力 V_{cr} （式(7)）に置き換えている。

$$\log \left(\frac{V_{\max}}{V_{cu}} \right) = -0.036 \times (1 - r^2) \log N \quad (8)$$

V_{cu} : 静的せん断耐力, $r = \frac{V_{\min}}{V_{\max}}$, $V_{\min}, V_{\max}$: 作用最小、最大せん断力, N : 繰返し回数。

図5に解析結果と疲労強度式の関係を示す。解析結果は疲労強度式と非常に近い値を示していると言える。

図6にケース4におけるの荷重－変位関係を示す。初期載荷の後、勾配が徐々に緩やかになっている。これは、繰返し回数の増加に伴ってコンクリートの剛性が落ちていることを意味している。また、図7は、この時における繰返し回数50万回時(斜めひびわれ発生回数)の斜めひびわれ性状を示す。静的載荷時の斜めひびわれ発生時のひびわれ性状と似た形状を示している。

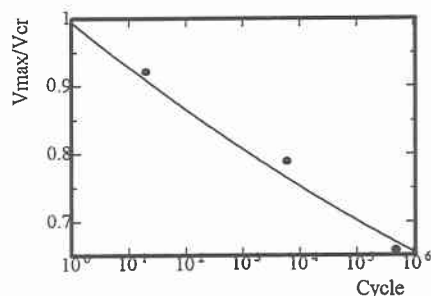


図5 解析結果と疲労強度式関係

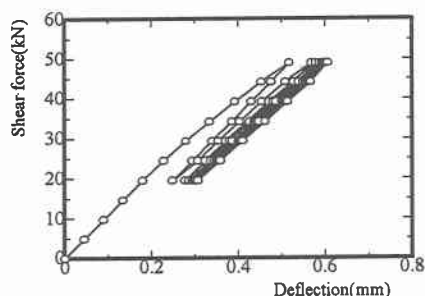


図6 荷重—変位関係(ケース4)

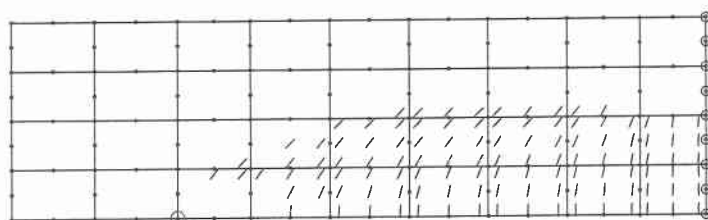


図7 斜めひびわれ性状(ケース4、50万回時)

4.まとめ

本解析手法により得られた斜めひびわれが発生する繰返し回数は、実験的に構築された疲労強度式により求められる結果との比較により正当に評価される。

今後は、斜めひびわれが発生した後の繰返し回数に伴う構成則の構築をめざす予定である。

謝辞：この研究は文部省科学研究費補助金（奨励研究(A)）の助成を受けて行ったものであり、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1)Tamon.Ueda : Behavior in Shear of ReinforcedConcrete Beams under Fatigue Loading、
東京大学博士論文、1982
- 2)Mohab Ahmed Zahran : Behavior in Shear of Steel-Concrete sandwich Beams under Fatigue Loading
北海道大学博士論文、1995
- 3)Yasuhiko.Sato : Qualitative Evaluation of Shear Resisting Behavior of Concrete Beams Reinforced
with FRP rods by Finite Element Analysis JSCE,No.484/V-22,1994
- 4)岡村、前田：鉄筋コンクリート工学 市ヶ谷出版社
- 5)Tepher.R:Tensile Fatigue Strength of Plain Concrete ACI Journal,Vol.76,No.8,1979
- 6)Bennett,E.W.andRaju,N.K : Cumulative Fatigue Damage of Plain Concrete in Compression
1969
- 7)藤本直史など：水中下における鉄筋コンクリートはりのせん断疲労性状に関する一考察
- 8)コンクリート標準示方書 土木学会 1991