

論文 繰返し載荷を受けるコンクリートの損傷

田所敏弥*1・佐藤靖彦*2・上田多門*3・角田與史雄*4

要旨: 本研究は、無筋の梁部材を用い、繰返し荷重を受けるコンクリートのひび割れ進展のメカニズムを明らかにすることを試みた。梁の曲げひび割れの下縁で、除荷時に圧縮力が作用することにより、ひび割れ先端部分に引張力が作用する。その結果、新たなひび割れが成長することを実験的に明らかにした。また、ひび割れが閉じようとする時に、ひび割れ面で圧縮力が作用することを考慮に入れた構成則を用いた有限要素解析により実験結果を反映することが可能となった。

キーワード: 繰返し載荷、引張軟化、ひび割れ、塑性変形、コンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物に関する工学的な問題の多くは、ひび割れの進展に支配されている。しかし、繰返し載荷によるひび割れの進展のメカニズムはほとんど解明されていないのが現状である。これはコンクリートが、金属材料に比べ微視的または巨視的欠陥が数多く介在し、非均質であり、微細ひび割れ累積領域と呼ばれるひび割れ先端の性状が未解明なため、ひび割れの進展のメカニズムの理解を困難にさせているからである。

本研究は、図1に示すような曲げを受ける梁部材を用い、梁中央に生じる曲げひび割れにおける最も単純なモードIと呼ばれる開口形の破壊を対象としている。まず、繰返し荷重下でのひび割れ進展のメカニズムを実験により明らかにした。そして、その結果をもとに、繰返し荷重下のひび割れ部の変位と伝達力との関係を表す構成則を導入した有限要素解析を行い、比較、検討を行った。

2. 実験概要

実験供試体を図1に示す。実験供試体は、無筋のモルタル梁である。

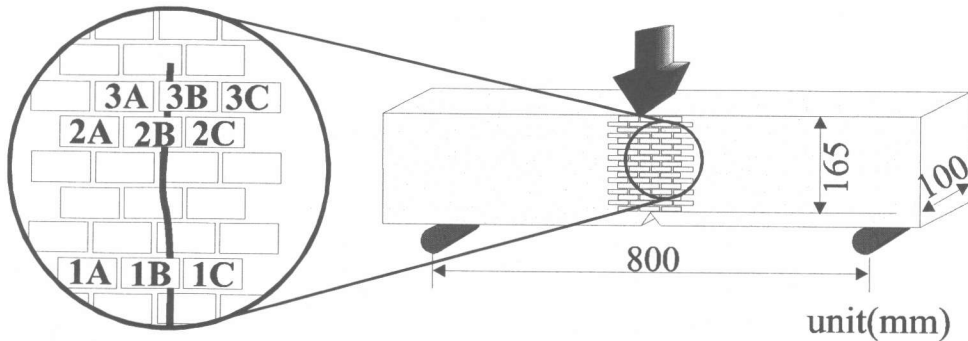


図1 供試体・ゲージ配置・ひび割れ図

- * 1 新日本製鐵株式会社 工修 (正会員)
- * 2 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻、工博 (正会員)
- * 3 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻、工博 (正会員)
- * 4 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻、工博 (正会員)

本研究では、図1に示す無筋モルタルの梁を用い、ひび割れの進展のメカニズムを明らかにするため、10回の繰返し荷重を与えた。梁中央部に梁下縁から荷重点まで高さ方向に1cm間隔に3列あるいは、4列に千鳥にゲージを貼り、繰返し荷重時のひび割れ周辺部の歪み性状を測定した。実験は、変位制御で行い、ひび割れがゲージ位置に発生するように梁中央にノッチを入れた。また、ひび割れ面で局所化する変形を測定するために検長10mmの短いストレインゲージを用いた。また、実験で用いたモルタルの圧縮強度は78.8MPaであった。

3. 実験結果及び考察

荷重と梁中央部の変位との関係を図2に示す。図2より、最大荷重を過ぎた後に10回の繰返し荷重を与えたが、その間に剛性が低下し、同一荷重に対する変位が増加していることが示されている。なお、本実験では、最大変位及び最小変位を一定として梁に繰返しの変位振幅を作用させることとしたが、実際には、変位振幅を一定にはできず、各繰返しごとに若干変位振幅が大きくなった。

荷重とひび割れ部での歪みの関係を図3～7に示す。ゲージ No.1A、1B、1C は、梁下縁のノッチ先端から

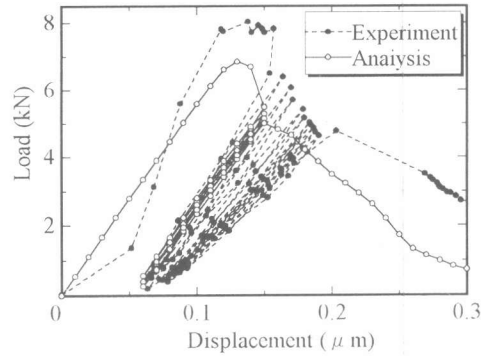


図2 荷重-変位曲線

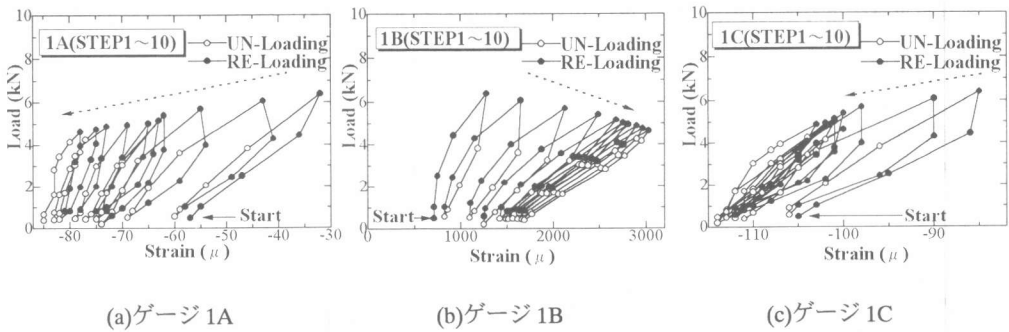


図3 荷重と歪みの関係 (ゲージ 1A,1B,1C)

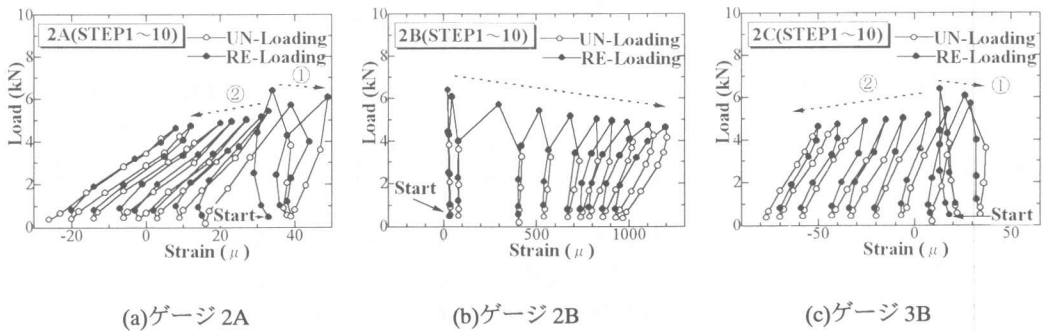
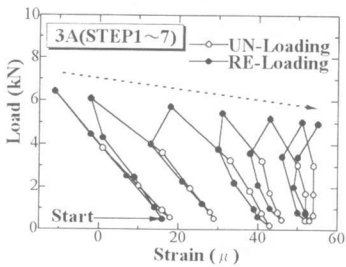


図4 荷重と歪みの関係 (ゲージ 2A,2B,2C)

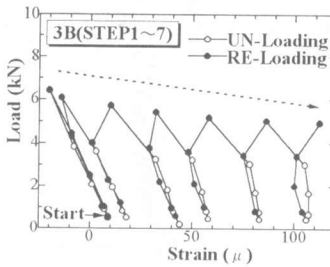
高さ 6.5cm、ゲージ No.2A、2B、2C は高さ 10.5cm、ゲージ No.3A、3B、3C は高さ 11.5cm の位置である。なお、1 回目の繰返し载荷前の点を図中に『Start』で示した。また、図 1 のひび割れ図から分かるようにひび割れは 1B、2B、3B を通って進展した。そのため 1B、2B、3B の引張歪みは、繰返し回数に従い単調増加する。

まず最初にゲージ No.1A、1B、1C について見てみる (図 3)。1B の両隣の 1A、1C は、1 回目の繰返し载荷前から圧縮を示している。これは既に 1B にひび割れが発生していることを示している。コンクリートが引張破壊する時、塑性変形が生じ、マクロなひび割れへと成長する。そして、除荷時にひび割れ面が閉じようとする時、塑性変形のため、ひび割れ前の位置まで閉じることができず、そこに接触応力が作用する。この接触応力、つまり、圧縮応力のため 1A、1C では除荷時に圧縮歪みが増加する。更に、繰返し回数に従って圧縮歪みは増加するが、除荷時の圧縮歪みの増加量、および繰返しに伴う圧縮歪みの増加量は減少する。ゲージ 1A、1C の歪みの平均値にモルタルの弾性係数を掛けて求めた応力は 10 回目の繰返し载荷の時、圧縮応力でありその値は約 3.0MPa であった。ひび割れ面に生じた塑性変形によって、ひび割れが閉じようとする時、圧縮力が作用する現象は、Reinhardt らのコンクリートの一軸引張繰返し試験[1]でも観察されている (図 8 参照)。

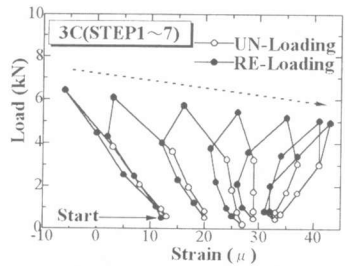
次に、ゲージ No.2A、2B、2C について見てみる (図 4)。2A、2B、2C では、2 回目の繰返し载荷までは同様な右下がり曲線が、引張方向にシフトしている。この右下がりの曲線は、除荷時に引張歪み、つまり引張応力が増加していることを意味している。この要因は先に述べたゲージ 1A、1C の位置で除荷時に圧縮応力を伝達するため、この力と釣り合う引張応力がひび割れ先端周辺の 2A、2B、2C の位置に作用するためと考えられる。この現象は、次に述べるゲージ No.3A、3B、3C の位置でより顕著に現れる。引張歪みの大きさから、2 回目の繰返し载荷までは、まだコンクリートにひび割れが発生していないと判断される。そして、2B では、3 回目以降は引張方向に歪みが大きくシフトするが、2A、2C で



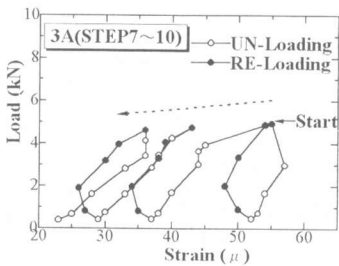
(a)STEP1-7



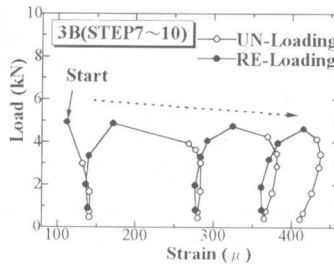
(a)STEP1-7



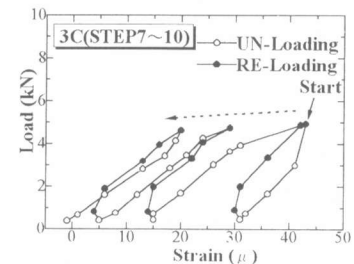
(a)STEP1-7



(b)STEP7-10



(b)STEP7-10



(b)STEP7-10

図 5 荷重と歪みの関係 (3A)

図 6 荷重と歪みの関係 (3B)

図 7 荷重と歪みの関係 (3C)

は、3回目以降、圧縮方向に歪みがシフト（図4中②）する。これは、2Bの位置でマイクロなひび割れが発生し始めたため、徐々に引張応力を2A、2Cに伝達できなくなることと、1A、1Cと同様に除荷時に2Bで生じた塑性変形の増加と対応して除荷時に徐々に2A、2Cにひび割れ面で伝達する圧縮応力が、増加することが要因だと考えられる。

最後に、ゲージ No.3A、3B、3C について見てみる（図5,6,7）。この位置はグラフが重なるため繰返し回数1~7と7~10に分けて示した。まず、7回目までの繰返し荷荷を見ると3A、3B、3Cすべてにおいて、除荷時に引張歪みは増加しながら、繰返し回数を増すごとに引張方向にシフトしていることが示されている。これも既に述べた既存のひび割れ面における圧縮応力が要因となって生じる引張応力の作用であると考えられる。そして、その引張歪みがある値に達した時、すなわちコンクリートが引張強度に達した時、3Bの位置つまりひび割れ面は更に大きな変形を生じる。本研究ではある値、つまり、コンクリートの限界弾性歪みは2B、3Bより引張歪み約150 μ であると考えられた。そして、限界弾性歪み以降は、図8のReinhardtらの一軸引張繰返し試験の包絡線にも示されているように、引張歪み（ひび割れ変位）の増加とともに徐々に引張力を伝えなくなると考えられる。その結果、3A、3Cは、7回目の荷荷以降、引張歪みが減少する方向へのシフトが起こると考えられる（図5及び7の下図参照）。

2回目の繰返し荷荷で2Bにひび割れが進展して、7回目の繰返し荷荷で3Bまでひび割れが進展したため、4回の繰返し荷荷で2Bから3Bまでの1cmひび割れが進展したことになる。

このように、ひび割れ面の存在する梁部材に繰返し荷荷を行うと、ひび割れ面は必ず塑性変形を含んでいるため除荷時に圧縮応力が作用する。そして、その圧縮応力と釣り合うためにひび割れ先端周辺のまだひび割れの入っていない健全な部分が引張応力を負担し、新たなひび割れが進展する。この新たなひび割れの進展により生じた塑性変形が次の新たなひび割れの要因になることが、以上の実験から観察された。

4. 解析概要

本解析において、鉄筋コンクリート部材用2次元有限要素解析プログラムWCOMR[2]を用いた。なお、今回対象とした梁は、無筋コンクリートであるため、コンクリートの引張特性は、引張剛性モデルを修正した式(1)を用いた。これは、図8に示したReinhardtらが行った一軸引張繰返し試験の結果を参考に、除荷時にひび割れ面で伝達される圧縮応力を考慮できるようにした

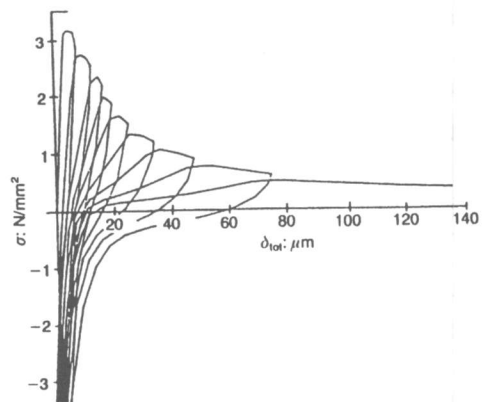


図8 Reinhardtらの一軸引張繰返し試験

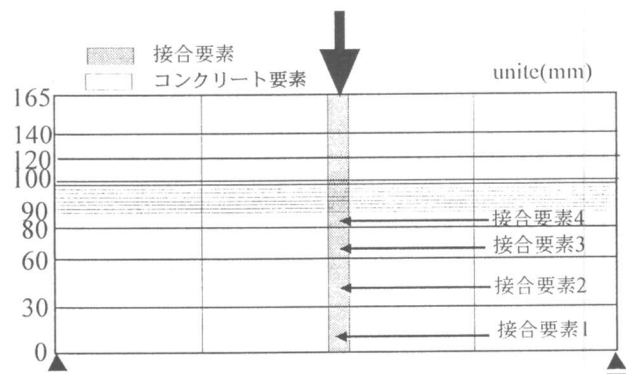


図9 要素分割図

ものである。

$$\frac{\sigma}{f_t} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{\delta}{\delta_0} \right)^3 \right\} \exp \left(- c_2 \frac{\delta}{\delta_0} \right) - \frac{\delta}{\delta_0} (1 + c_1^3) \exp(-c_2)$$

ここに、 c_1, c_2 : 材料定数 δ_0 : 引張限界変位 f_t : 引張強度

図 9 は、本解析で用いた要素分割を示す。新たなひび割れが進展する高さ 90~100mm の要素を細かく分割し、ひび割れの発生を梁中央に用意した接合要素において表現した。なお、コンクリート要素ではコンクリートの引張強度を大きくし、コンクリート要素では全くひび割れを発生させないようにした。

5. 解析結果及び考察

先に示した図 2 には実験結果とともに解析結果が示されている。解析値は、概ね実験値と一致している。図 10 はに接合要素 1~4 (図 9 参照) の荷重、除荷及び再荷重における、伝達応力とひび割れ変位との関係、すなわち、本解析プログラムに導入した構成則を示す。接合要素 1 と接合要素 2 では除荷時に圧縮応力を伝達していることが示されている。

図 11 は断面の高さ方向の応力分布を示す。図中の点線で示す初期荷重時には、引張応力が引張強度の 4.38MPa に達した部分 (高さ 9.8cm) より下縁側では、引張軟化曲線に従って引張応力が低下することが示されている。引張軟化域に達した領域では引張応力が増加できないため、代わりにまだひび割れてない健全な領域で引張応力が引張強度に達するまでは増加する。これが、単調荷重時のひび割れの進展メカニズムである。

一方除荷時においては、図 10 および、図 11 に示されているように梁下縁から徐々に引張歪みと引張応力が低下して最終的には、梁下縁で最大 1.33MPa の圧縮応力が作用する。この時、この圧縮応力と釣り合うためにひび割れ面または、ひび割れの先端周辺に引張応力が作用する。図 11 のひび割れの先端、すなわち梁下縁から高さ 9.8cm の周辺を拡大したものが図 12 である。既に引張軟化領域に入っている部分では、引張歪みは増加するが、引張応力は低下する。そのため、引張応力の増加に応えることができない。そこで、まだひび割れていないひび割れ先端付近の健全な部分で引張応力の増加を負担する。このことは、図 12 で確

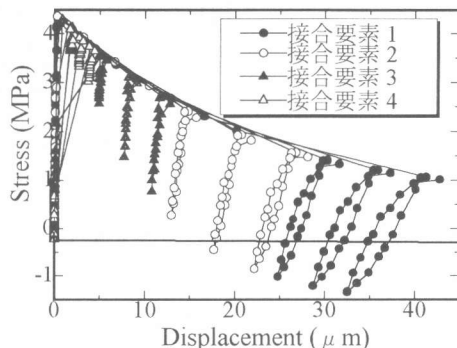


図 10 接合要素における伝達応力と開口変位の関係

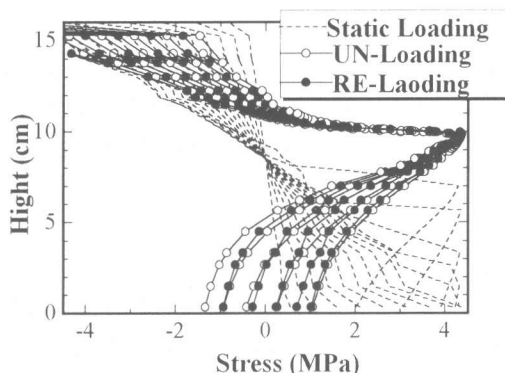


図 11 断面内の応力分布

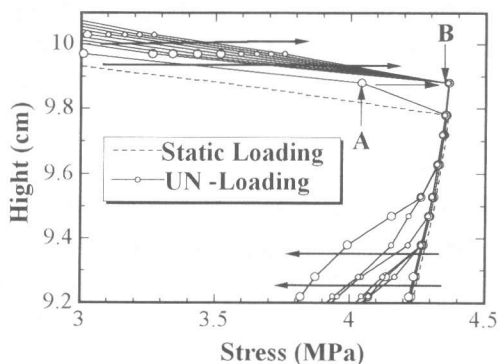


図 12 断面内の応力分布 (ひび割れ先端付近)

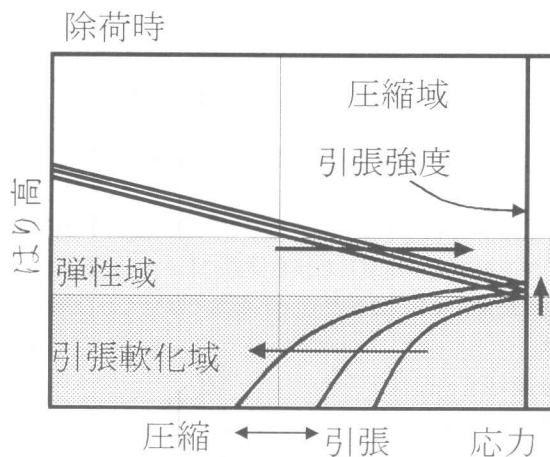


図 13 繰返し荷重下のひび割れ進展モデル

認できる。すなわち、除荷時に高さ 9.63cm より下部の引張軟化領域では引張応力が低下するが、9.78cm より上部のまだひび割れの進展していない部分では除荷時に引張応力が増加している。高さ 9.88cm の位置では除荷時に引張応力が 4.04MPa から引張強度の 4.38MPa に達したことが確認できた（図 12 中の A→B）。つまり、この時点でここまで、ひび割れが進展したと判断できる。また更に上部でも除荷時に大きい増加量ではないが、確実に引張応力が増加していることが確認できる。再載荷時には、ひび割れ先端付近のひび割れ面では引張応力が増加するが、ひび割れの進展していない健全なコンクリート部ではほとんど引張応力は増加しなかった。結果として 1 回の除荷、再載荷で 0.9mm ひび割れが進展した。実験値と比べてみると、実験では 4 回載荷で 10.0mm、解析では 1 回の載荷で 0.9mm となり、解析の方が若干小さくなった。実験において装置の都合で繰返し載荷の変位幅を一定にできず、わずかずつ増加してしまっただが、解析では一定としていることがこの差を生んだ理由のひとつと考えられる。

6. まとめ

図 13 に示すように、ひび割れ時に生じた塑性変形が要因となり、ひび割れが閉じようとする際にひび割れ面に圧縮応力が作用し、この圧縮応力と釣り合うためにひび割れ先端部に引張応力が作用する。しかし、ひび割れの進展している部分（既に引張強度に達してる引張軟化境界域）では、この引張応力に応えることができないため、まだひび割れの進展していない部分（弾性域）でこの引張応力に応え徐々に引張応力が増加しやがて引張強度に達しひび割れが進展する。このように繰返し載荷の除荷時にひび割れが進展することを実験的に確認し、解析的に検証した。

参考文献

- [1] Reinhardt, H., Cornelissen H. and Hordijk D.: Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete, Journal of Structural Engineering, pp.2462-2477, 1986
- [2] 岡村甫 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版