

論文 移動荷重と水分の影響を同時に受ける RC 部材の疲労破壊特性

藤山 知加子*1・千々和 伸浩*2・川中 勲*3・前川 宏一*4

要旨: せん断補強鉄筋のない梁を用いて、気中、水中において静的荷重実験、定点および移動荷重点の疲労実験を行った。移動点疲労実験では、曲げひび割れが主応力作用方向の変化に従い 2 方向に分岐して進展する様子がみられた。また、曲げ圧縮を受ける上面鉄筋を適切に配置することが、移動荷重の疲労による急激な破壊を防ぐ上で重要であることが示された。水中供試体では、繰返し開閉する曲げひび割れに水中の浮遊物が介在し、部材変形の振幅が小さくなる現象が観察された。これを有限要素解析で再現することを試みた結果、荷重振幅を減少させた場合と同様に、変形振幅の減少が部材の疲労寿命を増す可能性が示された。

キーワード: 水中疲労, 疲労寿命, 移動荷重, 曲げひび割れの開閉, 有限要素解析, 振幅

1. はじめに

1960 年代に道路橋床版の深刻な損傷事例が報告されて以来、道路橋床版の疲労問題について多くの研究が行われてきた。定点荷重に比べ移動荷重では疲労による損傷が著しく進むこと、さらに水の存在によりその寿命は大幅に短くなることが今日、広く知られている¹⁾。

水が床版の疲労寿命を縮める要因としては、水中のコンクリート（あるいは水分を多く含むコンクリート）は乾燥状態に比べて強度が低下すること²⁾、高速かつ高頻度の荷重によってコンクリート細孔中やひび割れ間に高い水圧が発生して「くさび効果」によるひび割れ進展をもたらすこと、さらに、流水中ではひび割れ面のすり磨きに加え洗い流し効果がおこり、部材のせん断伝達機能が低下すること³⁾、の 3 点が指摘されている。

本稿では、せん断補強鉄筋のない梁を用いて、気中、水中の両者で定点疲労実験結果を比較し、水中で繰返し荷重を受ける RC 部材の疲労特性を検討した。次に、気中、水中の各環境で移動点疲労実験を行い、移動荷重下における水の影響を調べた。水の特性を明らかにするため、表面張力と粘性を変えた 2 種類の液体を用いて、移動点疲労実験を併せて行った。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

床版ではひび割れ進展の過程を観察することは困難であるが、梁の場合、側面から随時観察が可能であり、側面からひび割れに沿って供試体に水が浸入する状態も再現することができるため、梁を使用した。

本実験に用いる梁供試体の概要を図-1 に示す。せん断補強鉄筋は配置していない。主鉄筋は SD295 の D19 の 2

本配置とし、有効鉄筋比は 2.4% である。打設は 3 回に分けて行い、打設翌日に脱型した後は 27 日間濡布を巻いてビニール袋で覆う湿潤養生を行った。養生後は実験室内の通常環境で保存した。

2.2 実験装置

図-2 に、移動点繰返し荷重実験システムを示す。ジャッキを用いて分配桁を持ち上げて供試体上のロードセルの位置を移動し、ジャッキダウンして再び分配桁上から荷重を行うことを繰返し、梁上を移動する荷重を模擬するものである。梁を水中あるいは他の液体中に浸す場合は、梁全体をビニール袋で包んで液体を満たした。

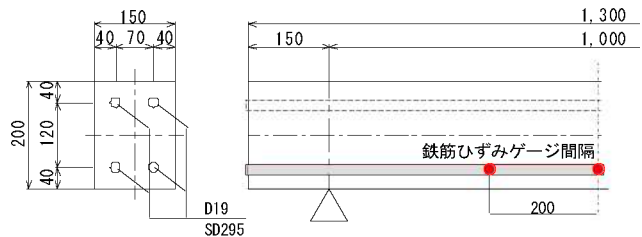


図-1 供試体概要

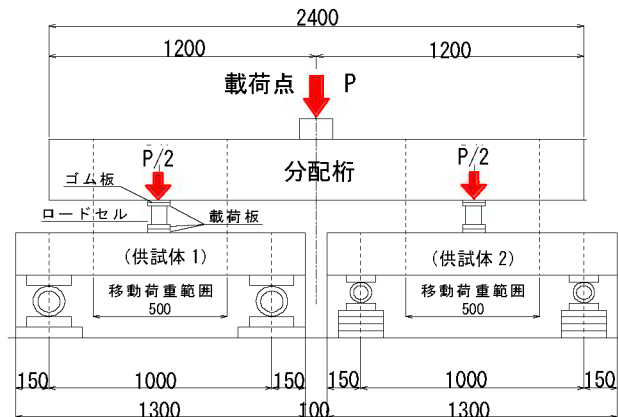


図-2 実験装置

*1 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

*4 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻教授 工博 (正会員)

2.3 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。数字は試験体の番号である。11 ケース、A~Dの4シリーズで構成されている。実験シリーズAは、(1)気中、(2)水中、(3)気中から水中、という3つの条件で行う静的載荷実験である。実験シリーズBは、(4)気中定点疲労実験、(5)水中定点疲労実験で、水中で繰り返し荷重を受けるRC部材の疲労特性を探るものである。

実験シリーズCでは、(6)気中移動点疲労実験、(7)水中移動点疲労実験で、移動荷重による破壊特性と水の関係について、シリーズBの結果と比較しながら考察する。

実験シリーズDでは、移動荷重に対する上面鉄筋の影響を調べるため、上面鉄筋を除いた供試体を用いて移動点疲労実験を行った。同時に、(10)界面活性剤を添加した水、(11)50%グリセリン水溶液を用いた実験を行った。(10)のケースは、媒質のもつ表面エネルギーの大きさによって媒質中のコンクリート強度が低下するという理論⁴⁾を参考に、界面活性剤(台所洗剤)を添加して表面張力を60%程度低下させたものである。(11)のケースは、グリセリンを用いて液体の粘度を水の6倍程度に高め、荷重によりひび割れが開閉したりずれを生じたりする際にひび割れ間の溶液の圧力が高まって起こる「くさび効果」の再現を目論んだものである。本来「くさび効果」の再現には高速の荷重が必要であるが、本実験に用いる荷重装置の制限内では再現が難しい。よって、液体の粘性力と速度(勾配)がほぼ比例関係にあることを利用して、液体の粘性を高めることで高速荷重の効果を擬似的に再現することを試みた。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験

梁の疲労実験は長期間にわたるため、材料試験は梁の実験開始時、中間期、終了時に分けて実施した。図-3に気中および水中の圧縮強度試験結果を示す。浸水は24時間以上とし、重量増加がなくなるまで行った。乾燥は105℃に設定した循環送風式乾燥炉を用い、重量変化がなくなるまで10日程度行った。乾燥による重量減少は、全重量の6%、220g程度であった。水中での試験数は少ないが、気中に比べ約20%程度の強度低下が見られた。

3.2 シリーズA：静的載荷実験

図-4に、本シリーズの荷重-支間中央変位の関係を示す。各ケースとも初期剛性はほぼ等しく、変位が1mmを超える80kN付近で最初の斜めせん断ひび割れが発生したが、その後急激に耐荷力を失うことはなく、両側にせん断ひび割れが発生した後、最終的に片側のひび割れが梁上面まで貫通して破壊に至った。次に、破壊時のひび割れの様子を写真-1~3に示す。鉄筋ひずみはいずれ

表-1 実験ケース

荷重条件	静的載荷		定点疲労		移動点疲労	
	有	無	有	無	有	無
圧縮側鉄筋	有	無	有	無	有	無
気中	1	-	4	-	5	8
水中	2,3	-	6	-	7	9
界面活性剤添加水中	-	-	-	-	-	10
グリセリン水溶液中	-	-	-	-	-	11

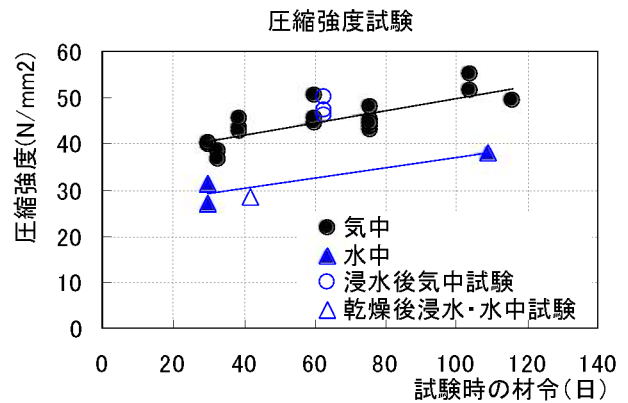


図-3 気中・水中圧縮強度試験

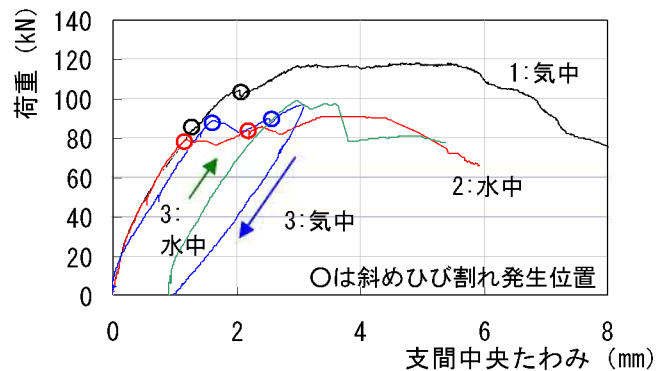


図-4 荷重-変形関係(シリーズA)

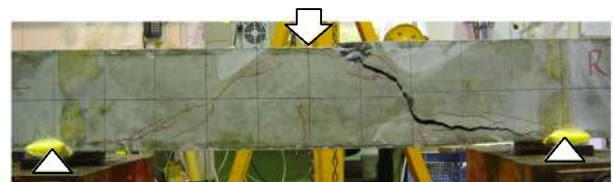


写真-1 破壊時ひび割れ(ケース1)

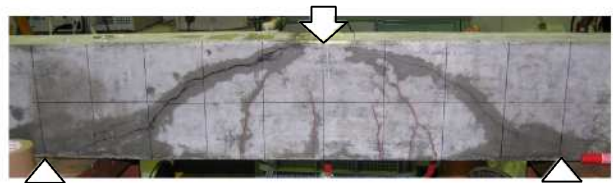


写真-2 破壊時ひび割れ(ケース2)



写真-3 破壊時ひび割れ(ケース3)

も 2000 μ 以下で、降伏していなかった。最大耐力は、ケース(1)が 118.2kN、ケース(2)が 90.5kN、ケース(3)では 97.7(kN)であった。ケース(3)では両側に斜めひび割れが生じた後に水中環境で再载荷を行ったが、水中に入れる以前の耐荷力を上回ることにはなかった。

気中のケース(1)に比べ、水を用いたケース(2)とケース(3)での耐力が小さい理由として、コンクリートの強度低下のほかに、斜めせん断ひび割れに進入した水がひび割れ面の応力伝達特性を低下させているか、あるいはひび割れ面の摩擦を低下させた可能性がある。

3.3 シリーズ B：定点疲労実験

本実験では最小荷重を 10kN とし、最大荷重を変化させた。また、剛性変化と残留変位に着目して疲労損傷過程を調べるため、500~600 回ごとに载荷を止めて除荷し、再载荷を行うものとした。図中の線の色の違いは、別の日に行なった実験であることを示す。ひび割れの進展が停止して安定した状態に入った場合は、適宜荷重レベルを上げてひび割れ進展と破壊の様子を観察した。

破壊時のひび割れの様子、荷重-変形関係を、写真 4、5 および図 5、6 に示す。ケース(4)・気中では 4370 回前後で R 側の曲げひび割れが急激に斜めせん断ひび割れ形状に発展し、これが上面まで貫通した後、定着部が破壊して終局に至った。鉄筋のひずみは支間中央で最大で約 1400 μ であり、終局時にも降伏はしていない。図 5 からは、剛性が徐々に低下し、斜めひび割れ発生後に急激に損傷が進行したことがわかる。

ケース(5)・水中でも同様のひび割れ進展過程が見られたが、ケース(4)と同じ载荷回数においては、上面のひび割れは貫通しなかった。残存耐力を知るために、一日をおいて静的载荷実験を行ったところ、以前の荷重を超えることなく上面载荷板付近のコンクリートが圧壊し、終局に至った。よって、疲労寿命自体はケース(4)とほぼ同じであったと言える。鉄筋のひずみは支間中央の最大で約 1700 μ であり、終局時にも降伏していない。

図 5 と図 6 の荷重-変位関係を比較すると、図 6 では剛性の低下よりも残留変位の蓄積が顕著である。さ

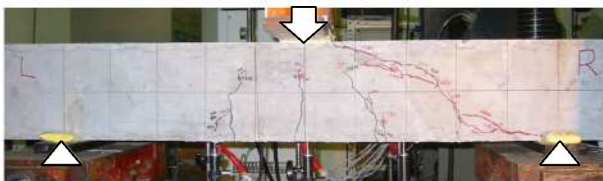


写真-4 破壊時ひび割れ (ケース 4)

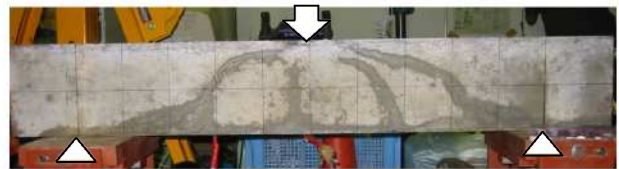


写真-5 破壊時ひび割れ (ケース 5)

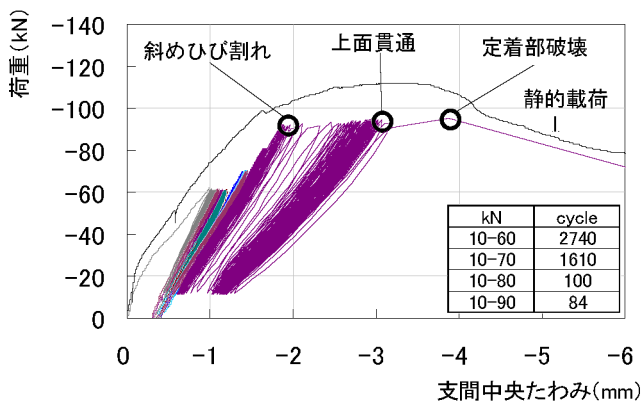


図-5 荷重-変形関係 (ケース 4)

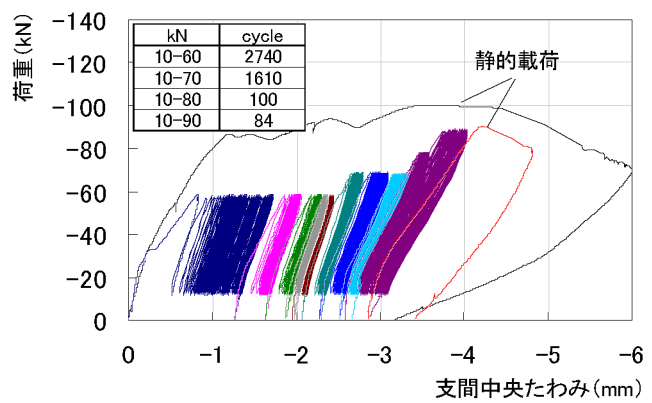


図-6 荷重-変形関係 (ケース 5)

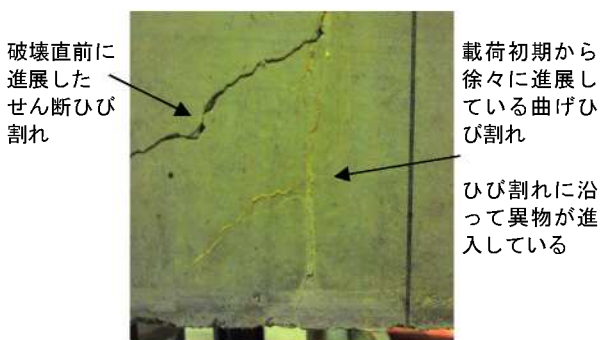


写真-6 供試体表面の様子 (ケース 5)

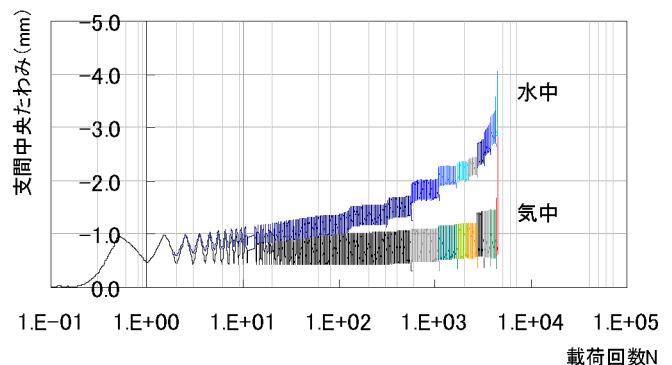


図-7 载荷回数と変位 (ケース 4, 5)

らに、除荷時にひび割れの閉合が妨げられているかのような曲線形状がみられる。実験後ケース(5)の供試体を観察すると、初期段階から発生し開閉を繰り返していた曲げひび割れに沿って異物が付着しているのが観察された(写真-6)。本実験では、計測のために鋼材を梁と同じ水中に置いていたが、この鋼材の腐食が著しかったことから、ひび割れに付着した異物は水中を浮遊していた鉄錆と、梁の損傷過程で生じたモルタルの粉末であると考えられる。図-7に、載荷回数と変位の関係を示す。気中に比べ水中梁の変位の振幅は小さい。原因のひとつとして、曲げひび割れ内への異物の侵入が、除荷時の形状回復を妨げたと推定した。

以上の結果から、定点荷重疲労実験において、気中では急激なせん断破壊に至る梁でも、水中では圧縮側コンクリートの強度低下とひび割れ開閉性状の変化により変形が蓄積し、最終破壊に影響を及ぼすことがわかった。

3.4 シリーズ C : 移動点労実験

幅 10cm の載荷板を 50cm の範囲で順に移動させ、5 点で 10 回ずつの繰返し載荷を行った。5 箇所の載荷が終わった時点で、移動荷重の繰返し数として 10 回と数え、再び最初の載荷点に戻るものとした。本シリーズの破壊時のひび割れの様子を写真-7, 8, 荷重-変形関係を図-8, 9 に示す。

移動点による疲労であるため、定点疲労時に比べて広い範囲に曲げひび割れが発生した。その後、両端のひび割れが支承と上面とに向かって進展し、上面で左右のひび割れがつながってアーチ状の破壊領域を形成した。最終的にはアーチ頂上部の圧縮破壊とアーチ基部(定着部)の付着破壊により、ケース(6)・気中が終局を迎えた。移動荷重の総経過回数は、90 回未満であった。ケー

ス(7)・水中の残存耐力を知るため、引き続き支間中央点で静的載荷実験を行ったところ、耐荷力は上昇せず変位が伸び、ケース(6)と同様の破壊形態で終局を迎えた。静的載荷実験の結果は図-9中に赤線で示す。

写真-8 では、下側から進展した曲げひび割れが、有効高の半分ほど伸びた後、2 方向に分岐する様子が見られる。これは、ひび割れが主応力作用方向の変化に従いその方向を柔軟に変化させながら、徐々に進展してきたことを示す。つまり、曲げひび割れが早期に上方まで進展する場合や、あるいは道路橋床版で指摘されるように、上面ひび割れとつながって貫通ひび割れを形成する場合とは異なり、鉛直方向のひび割れによるコンクリートのブロック化は見られなかった。このような状況下では、ひび割れ面の水が、交番せん断力を受けるひび割れ面のせん断伝達機能を著しく低下させるという機構は、支配的要因にはならない。次に、水による圧縮部コンクリートの強度低下について、議論の必要がある。ただし、本シリーズの供試体は上面にも 2.4% の鉄筋を配置していたため、水によるコンクリート強度低下は、疲労寿命の低下に直結しなかったものとも考えられる。

本シリーズでは、定点疲労とは異なる移動点疲労の破壊の特性が確認された。また、移動荷重による破壊モードは想定されたものと異なったが、単純に載荷回数を比較した場合、定点荷重に比べ移動荷重の疲労寿命は大幅に低下することが確認された。

3.4 シリーズ D : 各種液体中の移動点疲労実験

本シリーズで用いた液体の物性値を表-2 に示す。液体の粘度は「JIS Z 8803 液体の粘度-測定方法」に従い毛细管粘度計で、表面張力は「JIS K 3362 合成界面活性剤試験方法」に従い滴数計により計測した。



写真-7 破壊時ひび割れ (ケース 6)

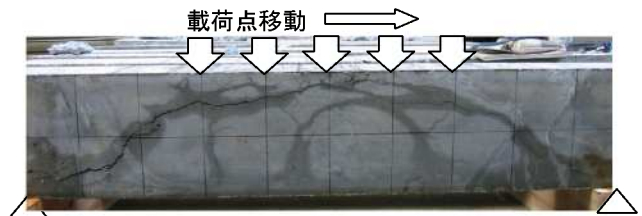


写真-8 破壊時ひび割れ (ケース 7)

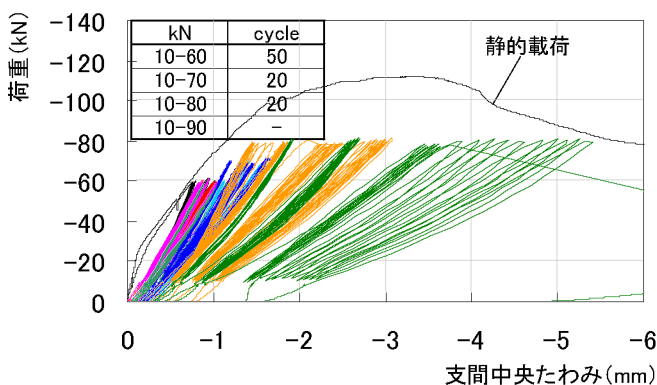


図-8 荷重-変形関係 (ケース 6)

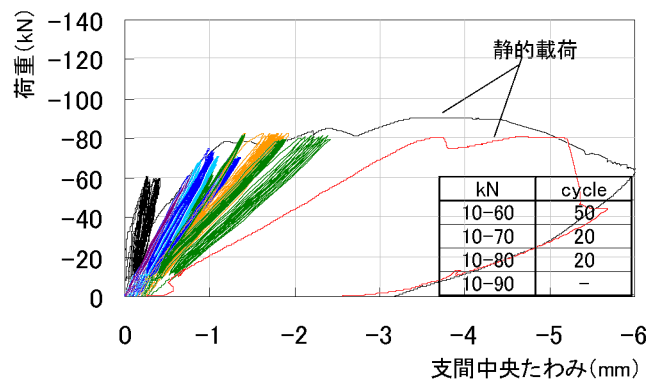


図-9 荷重-変形関係 (ケース 7)

写真-9~12, 図-10~13 に, 各種液体を用いた移動疲労実験の結果を示す。本シリーズの供試体は圧縮側に鉄筋を配置していないため, すべてのケースで斜めひび割れが上面まで貫通し, 急激な破壊が見られた。上面鉄筋を有するシリーズCでの破壊状況と比較すると, 移動荷重の疲労による急激な破壊を防ぐためには, 上面鉄筋を適切に配置することが重要であると言える。

写真-12 では, 他のケースに比べ細かく数多い曲げひび割れの分岐がみられる。粘性の高い液体を用いたことで, 開閉を繰り返す曲げひび割れ先端での圧力が高まり「くさび効果」が起こったとも考えられる。

移動荷重実験は2体一組で载荷を行うが, 界面活性剤を用いたケース(10)が最後まで残ったため, 静的载荷

表-2 各種液体の物性値

気温 16°C		水	洗剤 1%添加	グリセリン 50%水溶液
動粘度	mm ² /s	1.13	1.17	6.39
表面張力	10 ⁻³ N/m	73.34	29.39	62.39

実験を行い残存耐力を調べたところ, 最大耐力は102.3(kN)であった。本ケースで用いた液体はごく短時間でひび割れから蒸発してしまうため, 実験後のひび割れの様子を鮮明に捉えることができなかった。

本シリーズでは, 定着部の破壊を伴うなど破壊モードが異なるため単純に疲労寿命の比較はできないが, 短い順にケース(9)水中, (8)気中, (11)グリセリン水溶液中, (10)界面活性剤入り水中となった。



写真-9 破壊時ひび割れ (ケース 8)

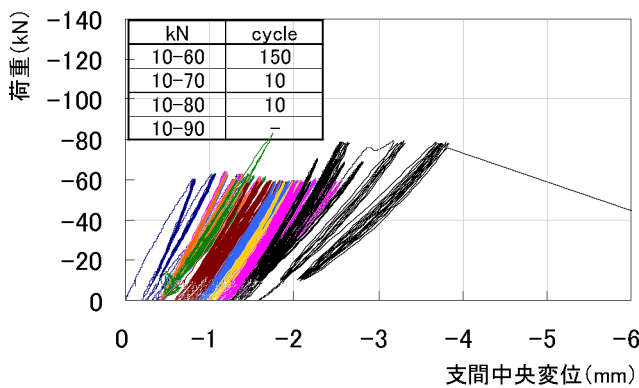


図-10 荷重-変形関係 (ケース 8)

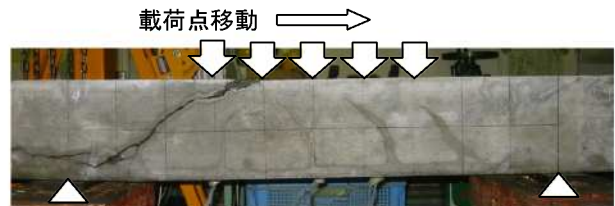


写真-10 破壊時ひび割れ (ケース 9)

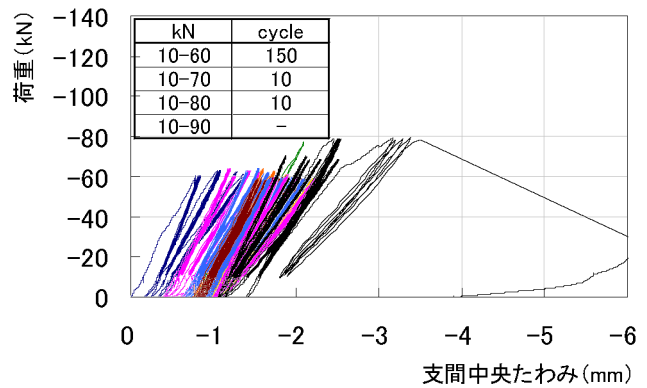


図-11 荷重-変形関係 (ケース 9)



写真-11 破壊時ひび割れ (ケース 10)

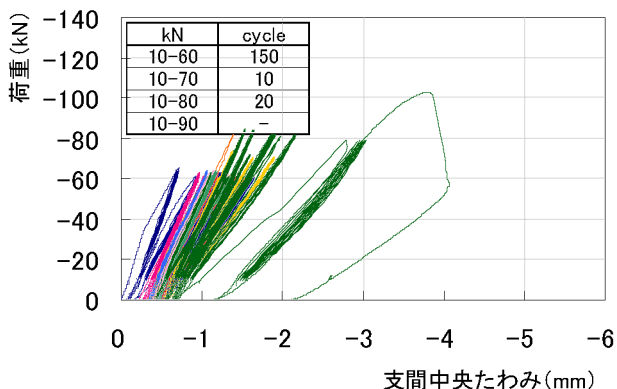


図-12 荷重-変形関係 (ケース 10)

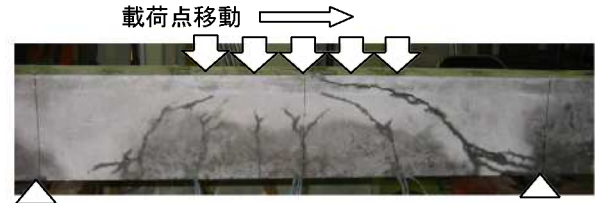


写真-12 破壊時ひび割れ (ケース 11)

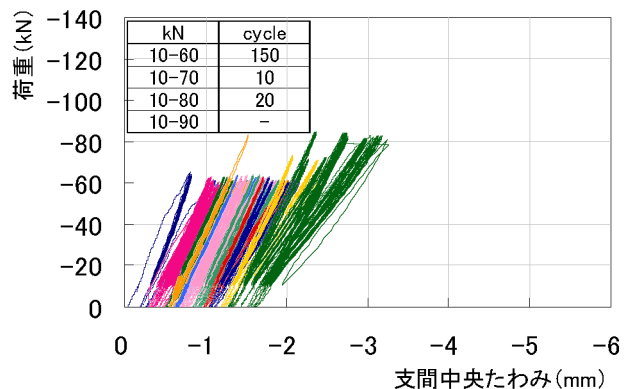


図-13 荷重-変形関係 (ケース 11)

4. 解析モデルの検討

4.1 再接触モデル

シリーズB 定点疲労実験で見られた、繰返し開閉するひび割れ内に水中で浮遊する異物が付着して梁の変形振幅が小さくなる現象を、有限要素解析プログラムを用いて再現することを試みた。使用するプログラムは、繰返し荷重を受ける構造物の疲労損傷過程を考慮できるもので、その信頼性は実験により確認されている⁵⁾。

図-14に、解析で用いるプログラムのコンクリート一軸圧縮—引張の連続モデルの概念を示す⁶⁾。引張の構成則と圧縮の構成則は、再接触モデルにより結ばれている。実験でみられたうな、異物混入によりひび割れが閉じにくくなる現象は、ひび割れ間の鉄筋コンクリート自体の応力—ひずみ関係を変化させるものではない。本稿では、圧縮、引張自体の構成則は変更せずに、ひび割れ面の再接触挙動を変更することで、この現象を再現することを試みた。具体的には、再接触が始まるひずみの幅と同時に、最大再接触応力を増加させるものである。図-15に再接触モデル変更前後のコンクリート一軸圧縮—引張挙動を示す。

4.2 解析結果

解析は、ケース(1)気中での静的載荷実験の諸元を用い、最大耐荷力の約50%にあたる60kNの定点繰返し荷重で行った。また、図-16に載荷回数と梁下端変位の関係図を示す。再接触モデルの変更により変形振幅が小さくなった結果、荷重振幅を小さくした場合と同様に、疲労寿命が伸びる可能性が示された。

水中を浮遊する異物とその付着という物理現象を、直接定量的にモデル化することは困難である。しかし、構造部材の変形復元性が制限され変形振幅が小さくなる場合についての、定性的な傾向を示すことができた。今後の検討課題としたい。

5. 結論

本研究では、水の影響によって移動荷重下のRC部材の疲労寿命は低下するという前提のもと、損傷を早めると思われる要因を挙げてその検証を試みた。予想に反して、疲労寿命水中梁が必ずしも気中梁を下回るわけではなかったが、いくつかの知見を得ることができた。

RC部材の疲労に対して水分が与える影響は、その破壊機構により、一様ではない。ゆえに、水が及ぼす個々の物理現象を理解することが必要である。

参考文献

1) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、pp.627-632、1987。

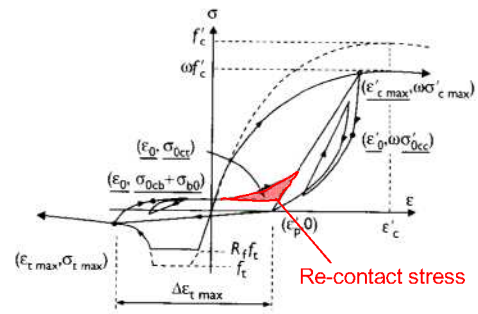


図-14 プログラムに用いる応力—ひずみ関係

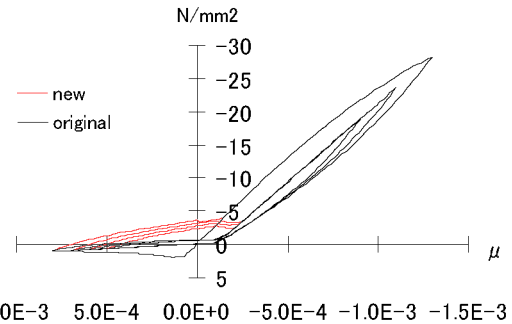


図-15 再接触モデル変更前後の応力—ひずみ関係

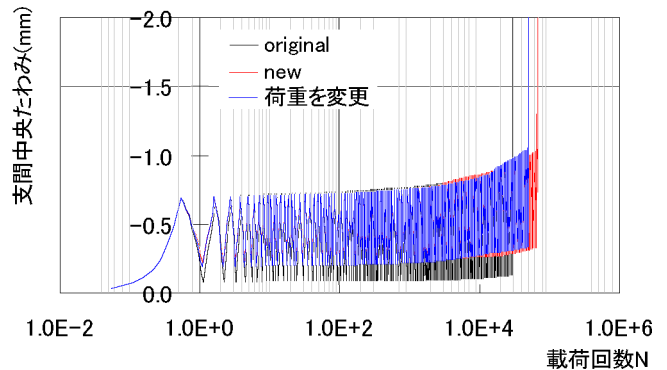


図-16 載荷回数と変位（定点疲労解析例）

- 2) 例えば、松下博通：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究、土木学会論文報告集 No.296、pp.87-95、1980.4
- 3) Gebreyouhannes, E., Kishi, T., Maekawa, K. : Response of cracked concrete interfaces subjected to reversed cyclic shear loading and the effect of water, Proceedings of the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, 525-530, 2006.
- 4) 堀素夫：表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ、窯業協会誌、Vol.70, No.7, pp.54-59, 1962.
- 5) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X. : Three-Dimensional Fatigue Simulation of RC Slabs under Traveling Wheel-Type Loads, Journal of Advanced Concrete Technology, 4(3), 2006, pp.445-457.
- 6) Maekawa, K., Pimanmas, A., and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003