

# 論文 高速列車走行を模擬した繰返し荷重下における RC 単純梁の疲労に関する基礎的研究

山口大地\*1・藤山知加子\*2・Benny Suryanto\*3・Peter Woodward\*4

**要旨:** 本論文では、高速列車走行を模擬した繰返し荷重が RC 単純梁の疲労に与える影響について実験と解析で検討した。静的解析で得られた耐力は実験値を上回ったものの、斜めせん断ひび割れの発生を含む損傷の進行過程と破壊形態が再現された。同解析モデルを用いた動的解析では、列車走行速度を模擬した荷重の移動速度が高速になるにつれて、RC 単純梁の固有周期と荷重の周期の不一致によって損傷の進行過程が大きく異なること、この影響により部材の応力振幅が増加し、算出疲労寿命が短くなることを示した。

**キーワード:** 高速列車走行, RC 単純梁, FEM, 疲労寿命, 変形性状, 共振速度

## 1. はじめに

RC 梁の疲労に関する研究は 1960 年代から数多く行われており、静的荷重試験と動的荷重試験では鉄筋コンクリート梁の破壊形態が異なることが報告されている<sup>2)</sup>。これらの研究によって、定点繰返し荷重による梁の疲労に関する基本的性状が明らかにされてきた。近年では、解析的検討においても列車走行時の鉄道橋の桁のたわみ量が、構造物の剛性が異なると変化することを精度良く表現できることが報告されている<sup>3)</sup>。

これに対し、鉄道コンクリート構造物の疲労設計は、許容応力度を制限することから始まったが、「鉄道構造物設計標準・同解説(コンクリート構造物)」(平成 4 年制定)より終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態に対して個々に安全性の検討をする限界状態設計法が取り入れられた。疲労設計においては、短スパンの橋梁のような持続荷重が短く、列車の繰返し荷重の作用頻度が大きい構造物には、変動荷重の繰返しによって破壊に至る疲労限界状態における照査が重要であると示されている。

また、列車走行による荷重作用位置の移動に伴う変動荷重は、静的応答成分に対して動的応答成分により増加する応力やたわみを衝撃係数として乗じる手法にとどまらず、動的シミュレーション<sup>4)</sup>によって得られた速度パラメータから衝撃係数を算定することによって考慮する手法も示された。これらの研究成果に基づく設計手法の発展に加え、荷重の大きさや速度が管理され、車両とレールの仕様により荷重走行位置が特定可能である鉄道の特性から、RC 鉄道構造物において疲労による重大な損傷はこれまで報告されていない。

しかし、今後列車速度の向上に伴い、既設の RC 構造

物において当初想定されていたものとは異なる荷重が作用する可能性や、我が国とは異なる管理体制や設計基準で運営される海外の鉄道事情のもと、新たに RC 構造物の設計施工を考えなければならない可能性もある。

そのため、本研究では、列車の走行荷重を模擬することが可能な疲労加速試験機 GRAFT II<sup>5)</sup>による実験と、コンクリート疲労損傷を構成則によって直接考慮することが可能な非線形有限要素解析ソフト「COM3D」による解析を用いて、列車走行速度の向上が RC 単純梁の疲労に関して与える影響に関して基礎的研究を行った。なお、本プロジェクトは表 1 の 4 ケースについて実験を行っているが、本稿では解析的検討に主眼を置き、実験 Case1 の結果と再現解析、また他のケースの動的解析結果の報告を行う(実験結果については別報で報告予定である)。

## 実験

### 2.1 実験概要

実験は、Heriot-watt 大学(イギリス・スコットランド)所有の列車の走行荷重を模擬した繰返し荷重が可能な疲労加速試験機 GRAFT II (The Geo-pavement and Railways Accelerated Fatigue Testing Facility) 図-1 を用いて行った。上部より最大 6 つのアクチュエータを同時に制御することが可能であり、各アクチュエータの最大荷重は 170kN である。本論文の実験では 1 つの載荷板に対して 2 つアクチュエータによる載荷を行った。

実験に用いた RC 単純梁の寸法を図-2 に示す。支間長 5m で中央から両端に 1200mm の位置に載荷板を設置し実験を行った。なお、コンクリートの圧縮強度は 31.8N/mm<sup>2</sup>、主鉄筋およびスターラップの降伏強度は

\*1 法政大学 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻 (学生会員)

\*2 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 准教授 工博 (正会員)

\*3 Heriot-watt University Institute for Infrastructure and Environment Assistant Professor

\*4 Heriot-watt University Institute for Infrastructure and Environment Professor

345N/mm<sup>2</sup>であった。

## 2.2 静的载荷実験

静的载荷実験における耐荷力-変位関係を図-3、ひび割れ進行過程を図-4に示す。なお、図-3で用いた変位は支間中央底面の変位である。まず、変位 1.0mm で梁中央底面に曲げひび割れが発生した。そして、変位 7.0mm で底面に発生したひび割れがせん断ひび割れに移行した。その後、せん断ひび割れは伸び続け、変位 16.0mm・荷重 250kN 時に載荷板から支承にかけて最大幅 2.0cm 程度のせん断ひび割れが発生したため、静的载荷実験を終了した。

## 3. 解析モデル

### 3.1 概要

解析に用いた RC 単純梁モデルを図-5に示す。実験では動的载荷時の試験体の安定のため支承位置で試験体の鉛直変位を拘束するシステムとなっているため、本解析でも拘束位置には支承板を上下に設置した。また、載荷位置では実験で用いたものと同様の載荷板をモデル化した。

### 3.2 物性値

物性値は実験値で得られた値を用い、コンクリート圧縮強度 31.8N/mm<sup>2</sup>、鉄筋およびスターラップの降伏強度を 345N/mm<sup>2</sup>とした。コンクリートの引張試験は実施していなかったため、引張強度を 1.15N/mm<sup>2</sup>、1.6N/mm<sup>2</sup>、2.3N/mm<sup>2</sup>の3パターンで検討した。なお、梁の上下主鉄筋は RC 要素としてモデル化し、スターラップは線要素を用いて再現した。

## 4. 静的解析

### 4.1 静的解析条件

変形挙動、破壊形態の確認を行った。載荷条件は、変位制御とし、載荷板上面に3点載荷を行った。載荷速度は30秒ごとに0.5mmとし、計100mm鉛直方向変位を与えた。

### 4.2 耐荷力-変位関係

引張強度を3パターンに設定して解析を行った結果、図-6のような耐荷力-変位関係が得られた。解析で得られた耐荷力は、いずれも図-3で示した実験の最大耐荷力よりも100kN程度大きい値となった。実験に用いられた RC 単純梁は、乾燥収縮の影響などによって解析の仮定よりも引張強度が低下していた可能性がある。本稿では、損傷の進行および破壊形態が最も実験と類似した引張強度 2.3N/mm<sup>2</sup>の結果について分析を行った。

はじめに、変位 8.0mm で剛性の低下が見られ、変位 16.0mm で耐荷力は360kNとなり、最大耐荷力に達した。その後は変位 32.0mm の点を境に、耐荷力が減少したが、変位 60.0mm の前後で耐荷力が増加と減少を繰り返した。

表-1 実験ケース

Case	速度			供試体条件
	静的	低速	高速	
Case 1	○			乾燥
Case 2		○		乾燥
Case 3			○	乾燥
Case 4			○	湿潤



図-1 GRAFT II

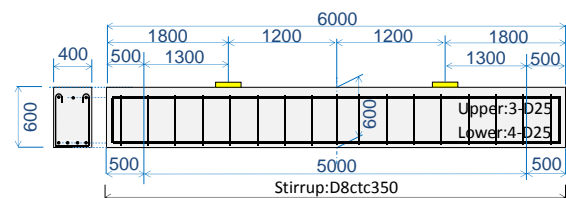


図-2 RC 梁寸法

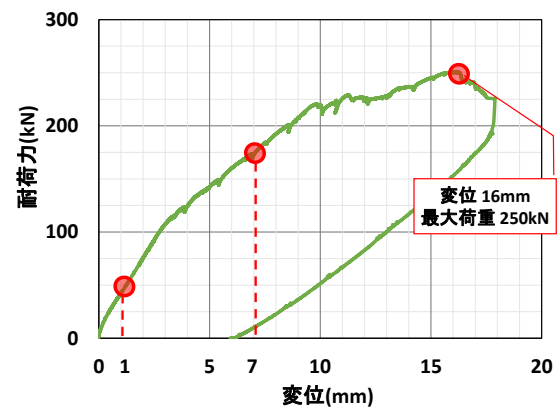


図-3 耐荷力-変位関係

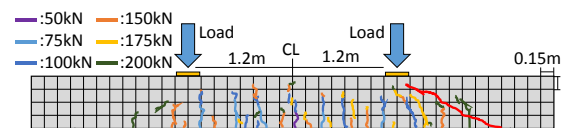


図-4 ひび割れ進行図

### 4.3 主ひずみ分布および変形状

図-7に最大主ひずみ分布および変形図を示す。まず、変位 2.0mm で RC 単純梁モデル底面にひずみの集中がみられたが、ひずみの値は 140μであった。本稿で用いた解析

コードの構成則でのひび割れ発生基準に達しておらず、この時点では、ひび割れは発生していないと判定できる。次に図-6で剛性の低下が見られた変位 8.0mm 時において RC 単純梁底面に集中していた高ひずみ領域が斜めせん断位置に見られるようになった。ひずみの値は 1200 $\mu$  程度であり、コンクリートにひび割れが発生し、剛性が低下したものと考えられる。その後、変位 16.0mm 時点で耐荷力のピークを迎えた。

#### 4.4 鉄筋の応力-変位関係

静的解析における RC 単純梁の破壊形態の特定のため、引張鉄筋、スターラップの各部材の応力を抽出した。各鉄筋の応力-変位関係を図-8に示す。変位 2.0mm 付近で RC 単純梁底面の引張縁コンクリートにひび割れが発生し、変位 12.0mm でスターラップ 1 が降伏、続く変位 46.0mm でスターラップ 2 が降伏に至った。この後に、RC 単純梁の耐荷力が大きく低下した。しかし引張鉄筋の最大応力は 150MPa 程度となっており降伏には至っていなかった。したがって、本論文の静的荷重下における破壊形態は斜め引張破壊である。

### 5. 動的解析

#### 5.1 解析モデルの拘束条件

既往の研究<sup>6)</sup>において下面のみ鉛直方向の変位拘束をした解析結果を報告したが、GRAFT II の実験では動的載荷時の試験安定のため上面を抑えるシステムが構築されているため、本論文でも上面にも拘束を施した。

#### 5.2 荷重モデルの設定

動的解析では列車の 2 つの車軸を 1 つの車軸として単純化した。この車軸に作用する荷重を RC 単純梁上面の 3 点に時間差で載荷することで、走行荷重を再現した。繰返し載荷の 1Cycle は列車 1 編成(10 両)の走行とした。速度は、新幹線の最高営業速度である 320km/h およびその 10 分の 1 の速度である 32km/h と、これに加えて共振現象の疲労寿命への影響を把握するため、共振速度の設定を行った。

共振速度を求めるため、固有値解析を行ったところ、RC 単純梁モデルの固有振動数を 1 次振動モード 18.8Hz、2 次振動モード 75.1Hz となった。この値を用いて共振速度を既往の研究<sup>7)</sup>に基づき以下の式より算出した。

$$V = f \times L_v \quad (1)$$

ここで、 $V$  は共振速度、 $f$  は梁の固有振動数、 $L_v$  は車両長である。1 次振動モードの共振速度は 376km/h、2 次振動モードの共振速度は 1502km/h と求められた。これより、現行の新幹線の走行速度を考慮した上で 1 次振動モードの 2 次共振速度である 160km/h、2 次振動モードの 6 次共振速度である 288km/h を本論文で用いる共振速度として設定した。本論文では新幹線の軸重の 1.5 倍の 240kN

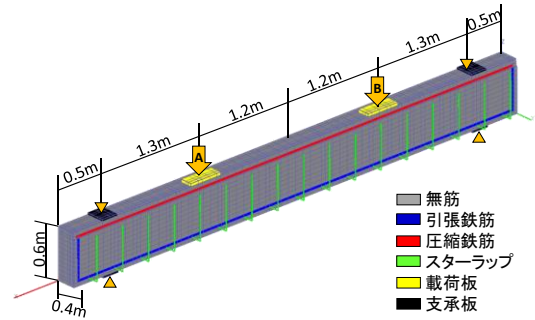


図-5 解析モデル

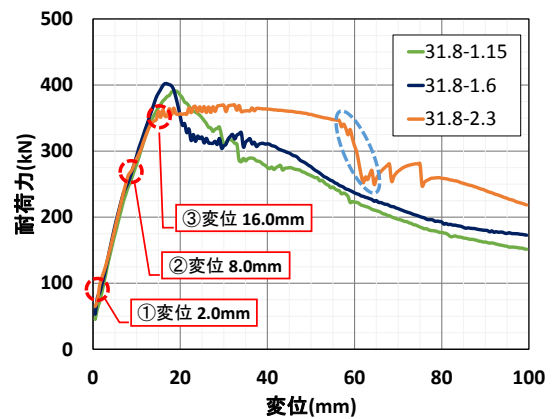


図-6 耐荷力-変位関係

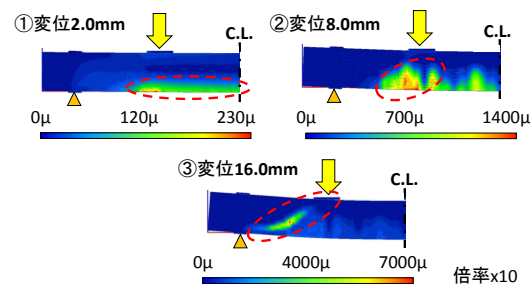


図-7 主ひずみ分布および変形図

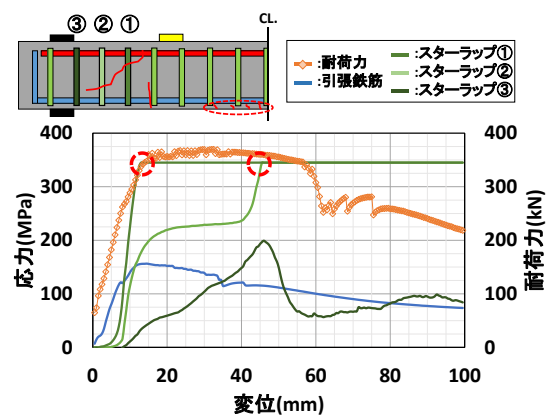


図-8 応力-変位関係

を用いて解析を行った結果を示す。

#### 5.3 構造解析に基づく疲労寿命の検討

図-9に速度別のたわみ-繰返し回数関係を示す。疲労

寿命は、梁中央底面・鉛直下方向の変位が 20mm に達した時の繰返し回数とした。

この判定基準のもとでは、32km/h は、10 万回走行後もたわみは最大で 7mm 程度となっており破壊には至らなかった。載荷時の RC 単純梁は、片振り状態であった(図-9(a))。

160km/h も 32km/h と同様に 10 万回繰返し走行を行っても破壊に至らなかったが、最大たわみ 10mm 程度となっており、上下に振動する様子が確認された。(図-9(b))

320km/h(図-9(d))では、繰返し走行 38 回目、288km/h(図-9(c))で最も早い繰返し回数の 18 回目で破壊に至った。速度の影響に加え、共振現象による影響が生じたものと考えられる。320km/h、288km/h においても、160km/h と同様に RC 単純梁が上下方向に両振り状態で振動していた。

以上より走行速度の上昇は、最大たわみだけでなく RC 単純梁の振幅にも差異を生じさせることが分かった。

#### 5.4 変形性状による分析

##### (1) 載荷に伴う RC 単純梁の変形による分析

動的解析の結果より、速度ごとに載荷が行われた際の RC 単純梁の変形状態と梁中央底面のたわみが 20.0mm に達した繰返し走行後の鉛直方向変位および主応力分布を図-10 に示す。なお、32km/h および 160km/h では 10 万回走行後も梁中央底面のたわみが 20.0mm に達しなかったため、10 万回走行後の鉛直方向変位および主応力分布を示す。

32km/h では、RC 単純梁の振動がおさまった後の載荷であった。その結果、荷重位置がどこであっても曲げ変形をしていた(図-10(a))。160km/h では、前後ステップから 1 次振動モードのような変形が見てとれた。また、載荷は RC 単純梁が下方向にたわんだ際となっていた。これにより共振現象が発生し、振幅が増加すると考えられたが、本論文では、振幅の増加は見られなかった(図-10(b))。

図-10(c)(d)より 288km/h、320km/h の変形において、160km/h と大きく異なる点は、RC 単純梁が上方向にたわんだ際に載荷が行われたという点である。中央載荷板に載荷が行われる際は、3 次振動モードのような変形(図-10(c)(2)、(d)(2))、右端載荷板に載荷が行われる際は、2 次振動モードのような変形(図-10(c)(3)、(d)(3))となっており、RC 単純梁が上方向に凸に変形した状態で上から載荷され載荷位置で部分的に凹む変形が生じている。これによって、32km/h、160km/h とは異なり、RC 単純梁上面にも曲げ変形による引張応力が表れた。RC 単純梁の固有周期に対して、載荷周期の不一致によって損傷の進行に差異を生じさせることが分かった。

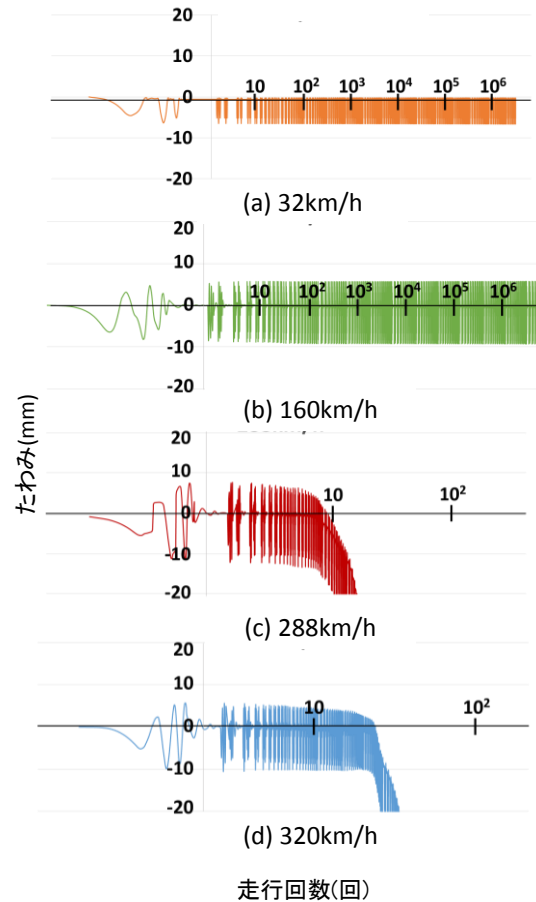


図-9 たわみ-走行回数関係

##### (2) 損傷状態による分析

次に最終的な損傷状態において分析を行った。図-11 に 32km/h、160km/h は 10 万回走行後、288km/h と 320km/h はたわみが 20mm に達したそれぞれ 18 回、38 回走行後の鉛直方向変位および主ひずみ分布を示す。図-11(a)より 32km/h では静的解析における変位 8.0mm 時(図-7)のようなひずみの分布となったことが分かる。ひずみの値は最大で 291 $\mu$  となっており、載荷板付近のスターラップの位置に最も高いひずみ値が表れた。

図-11(b)より、160km/h では、左端の載荷板から支承に伸びるひずみが顕著であることが確認された。ひずみの値は最大で 1000 $\mu$  となっており、ひび割れが発生したものの、スターラップが応力を分担したことによって大きな変形は表れなかったと考えられる。

たわみが 20mm に達した 288km/h(図-11(c))および 320km/h(図-11(d))では、RC 単純梁の上面で大きなひずみが表れた。これは図-10(c)(d)で見られた、RC 単純梁が上方向にたわんだ際に載荷が行われたためと考えられる。また、どちらの速度においても載荷板から支承に伸びるせん断ひび割れと、引張鉄筋の上に位置する要素で鉛直方向ひずみの集中が見られた。

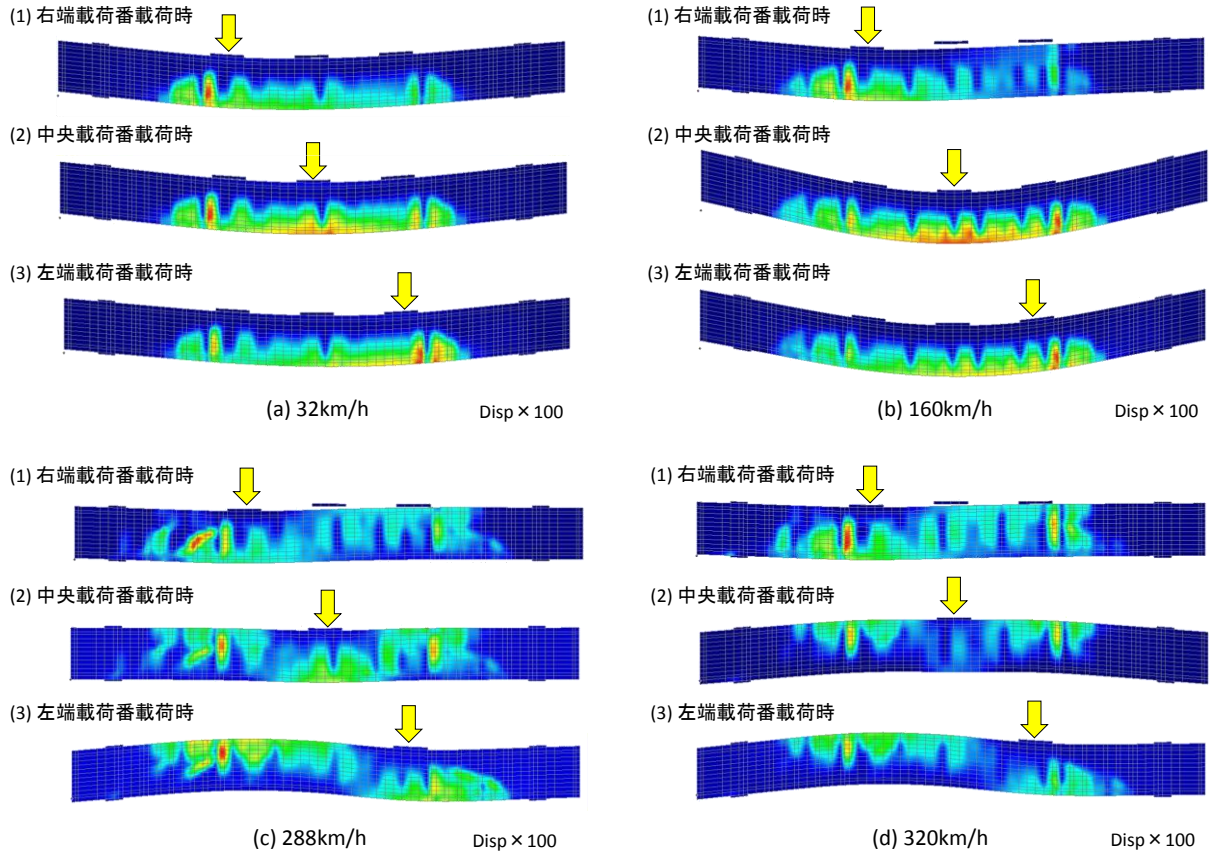


図-10 各点荷重時のRC単純梁の変形状態

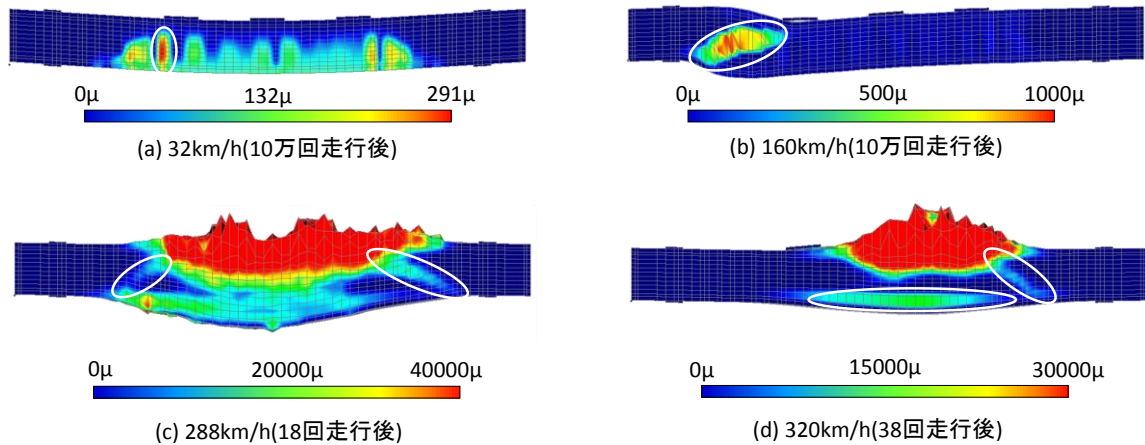


図-11 鉛直方向変位および主ひずみ分布

以上より速度が異なるとRC単純梁の損傷が進行する位置が異なることが分かった。

### 5.5 材料の応力振幅に基づく疲労寿命の検討

応力振幅に基づく疲労寿命は、圧縮鉄筋の圧縮応力・引張鉄筋の引張応力・スターラップの引張応力に着目して算出した。なお、疲労寿命の算定にはコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>より算定した。

図-12に、走行回数1回における速度別の主応力-時間関係を示す。いずれの速度においても引張鉄筋の応力が最大値を記録しているが、速度および共振現象の影響

で疲労寿命が短くなったと推測される288km/h(図-12(c))のみスターラップの応力が上昇していた。

図-12(a)に示した32km/hでは最大主応力は160MPa程度であるのに対し、速度の上昇した320km/h(図-12(d))では、最大主応力は約1.4倍の220MPa程度に増加していた。一方、288km/h(図-12(c))では最高速である320km/hよりも引張鉄筋の最大応力が大きく240MPa程度となったこと、スターラップの応力が増加することを確認した。

波形に着目すると、32km/h(図-12(a))では、荷重のインプットに対して波形がそのまま発現しているのに対して、

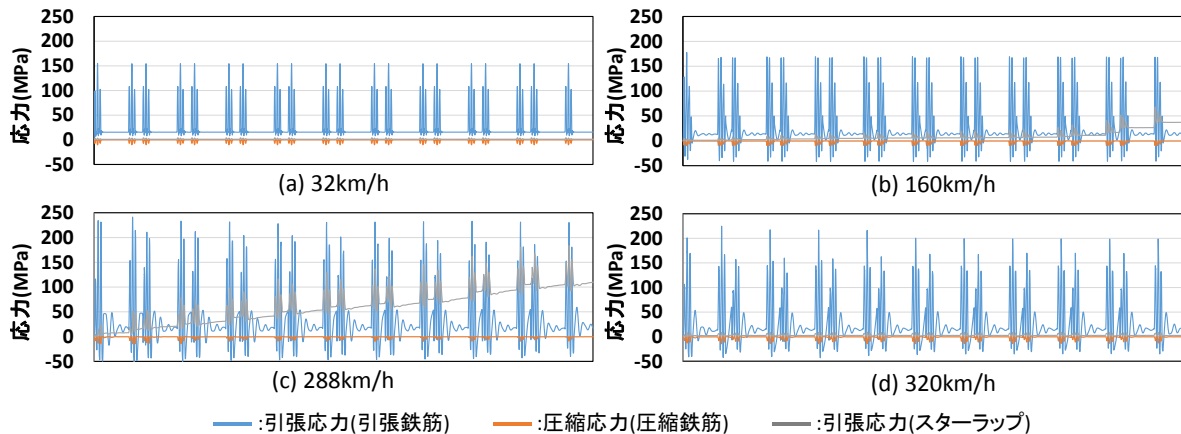


図-12 主応力-時間関係

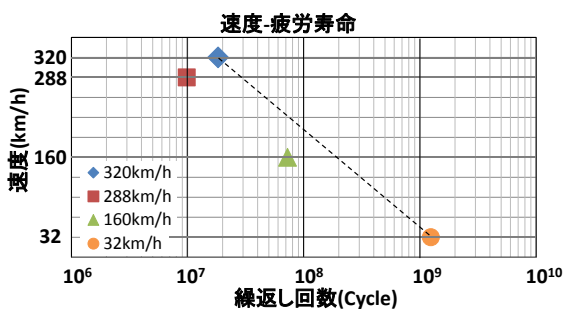


図-13 応力振幅より算定した速度-疲労寿命関係

その他の速度では、波形に乱れが生じていた。RC 単純梁固有周期と荷重周期が一致しなかったため動的応答成分が増加したことが原因と考えられる。

図-13 に材料強度より算出した疲労寿命と速度の関係を示す。図-9 と同様に 288km/h で最も疲労寿命が短くなった。320km/h では、走行速度が 10 分の 1 である 32km/h に対して  $10^2$  回ほど疲労寿命が短くなった。点線は、共振の影響を除いて速度による影響のみで疲労寿命がどの程度低下するかを示したものである。共振速度として設定した 288km/h, 160km/h では、疲労寿命が短くなっていることが分かり、これらの速度では走行速度の影響に加え共振の影響によって疲労寿命が短くなったといえる。

以上より、RC 単純梁の疲労寿命は走行速度が高速になるにつれて短くなること、速度の影響に加え共振現象による RC 単純梁の振幅の増加が疲労寿命に影響を与えることが、解析により示された。

## 6. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- (1) 静的解析で得られた耐荷力は実験で得られた値を上回ったが、破壊モードは再現することができた。
- (2) 動的解析において、列車の走行速度が高速になるにつれて、たわみと応力振幅のどちらの疲労寿命算定

法においても疲労寿命が短くなった。

- (3) 共振速度 288km/h では、たわみと応力振幅のどちらに基づく照査でも、最も疲労寿命が短くなった。
  - (4) 列車の走行速度が高速になると RC 単純梁の損傷過程に違いが生じることが、数値解析より示唆された。
- 本稿で得られた動的解析結果の検証のため、本研究では引き続き高速荷重実験結果の分析を進める予定である。

## 参考文献

- 1) たとえば、国分正胤, 岡村甫: 高強度異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートばりの疲労に関する基礎研究, 土木学会論文集第 122 号, pp.29-41, 1965.4
- 2) 堀井修身, 上田茂, 柳沢雄博: 繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリートばりの疲労強度, 港湾技術研究所報告, Vol.15, No.3, 1976.9
- 3) 金田淳, 小林薫: 高速列車走行時におけるコンクリート桁の動的挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, 2006
- 4) 曾我部正道ほか: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.724, I-62, pp.83-102, 2003.1
- 5) Saipan K: Predicting the response of a large-scale, shear-critical reinforced concrete beam using the current design procedures and Response 2000, MSc Thesis University of Heriot-Watt, 2014
- 6) 山口大地, 藤山知加子: 高速列車走行時における RC 単純梁の疲労に関する基礎的研究, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp1229-1230, 2014.9
- 7) 渡辺勉, 曾我部正道: RC ラーメン高架橋の衝撃係数に関する解析的検討, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, Apr.2010
- 8) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書(設計編), 丸善, 2007