

論文 鉄筋破断が RC 複鉄筋版桁の固有振動数やたわみに与える影響

並松 沙樹*1・伊藤 雄郷*2・吉田 幸司*3・田辺 篤史*4

要旨: 疲労による鉄筋破断が複鉄筋版桁の健全性に与える影響について、実物大模型桁を用いた载荷実験および解析検討を実施した。载荷実験より、主鉄筋 1 本を切断した程度ではたわみは大きな変化を示さず、下段鉄筋 30 本（全部）切断するとたわみは大きく増加したが、固有振動数の変化は微小であり、終局には至らなかった。また、解析からも十分な耐力を有していることを確認できた。本研究より、①複鉄筋版桁は耐力が高い構造であり、実構造物は設計耐力に十分な余裕があること、②鉄筋破断が固有振動数やたわみに及ぼす影響は微小であり、これらを用いた鉄筋破断の維持管理指標を検討する際の課題となることがわかった。

キーワード: 複鉄筋版桁, 疲労, 鉄筋破断, 固有振動数, たわみ

1. はじめに

東海道新幹線において、道路交差部では桁下空間を確保する必要があるため 8~12m の比較的短スパンの箇所には桁高の低い RC 複鉄筋版桁が採用されている。図-1 に RC 複鉄筋版桁と RCT 桁の断面を示す。表-1 に複鉄筋版桁と T 桁の特徴の比較を示す。この橋梁は、桁高が低く、曲げ剛性が小さいため、たわみが生じやすく、鉄筋に作用する応力変動は、T 桁に比べて大きくなりやすい。また、現時点で実構造物において鉄筋破断は見られないものの主鉄筋の疲労やひび割れが懸念されている^{1),2),3)}。さらに、低剛性により固有振動数が小さくなりやすく、高速鉄道では共振の影響により荷重がさらに大きくなる場合がある⁴⁾。

このように懸念事項が多い複鉄筋版桁を今後適切に維持管理していくために、固有振動数やたわみに着目して、健全性評価に適した指標の検討を行っている。本研究では疲労による鉄筋破断を想定し、実物大模型桁を用いた载荷実験および FEM 解析により、桁の固有振動数やたわみに与える影響を定量的に把握した。

2. 载荷実験

2.1 目的

ここでは、桁の下段主鉄筋が破断した際、桁のたわみ等にどの程度影響を与えるのか、実物大模型桁を用いた载荷実験により検討を行う。

2.2 実験条件

(1) 複鉄筋版桁供試体

供試体としては、東海道新幹線の中で多く用いられている支間 10m（全長 10.7m）の複鉄筋版桁を実物大サイズにて製作し、これを用いた。作製した供試体を図-2 に示す。供試体は桁高 550mm、桁部幅 2500mm であり、供試体配筋図面を図-3 に示す。使用材料は、コンクリート $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 、鉄筋は $\phi 9$ および $\phi 13$ 、D32 とした。標準設計では主鉄筋に SD295 を用いているが、本供試体では SD345 を用いたため標準設計よりも高い鉄筋強度となっている。また、実橋は上下線セットで製作されるが今回は片線のみとするため、上下線間にあたる側に L 型のバラスト止めを設置する。このとき、バラスト止めが桁剛性に影響を与えないように、バラスト止めに隙間を

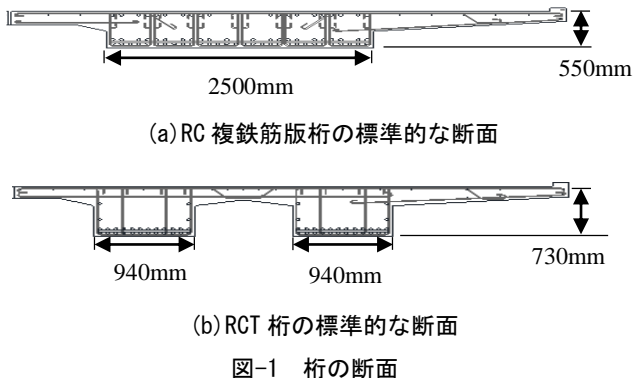


表-1 複鉄筋版桁と T 桁の特徴の比較

	複鉄筋版桁	T 桁
桁高 (道路から 桁下まで の高さ)	低い (桁下制限が厳しい)	高い (桁下制限が緩い)
鉄筋量	多い (引張鉄筋量 412cm ²)	少ない (引張鉄筋量 308cm ²)
曲げ剛性	低い (断面 2 次モーメント 0.0346m ⁴)	高い (断面 2 次モーメント 0.0609m ⁴)

*1 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部 (正会員)

*2 東海旅客鉄道株式会社 新幹線鉄道事業本部 三河安城保線所 (正会員)

*3 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部 博士(工) (正会員)

*4 株式会社日建設シビル 都市基盤・エンジニアリング部門設計部 博士(工)

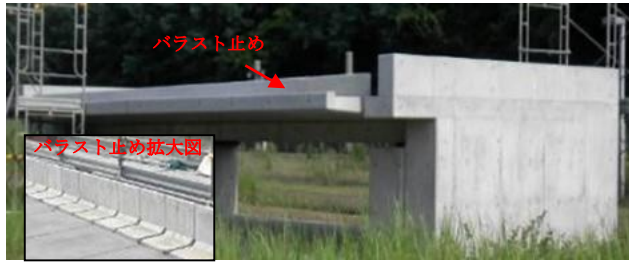


図-2 実物大桁供試体

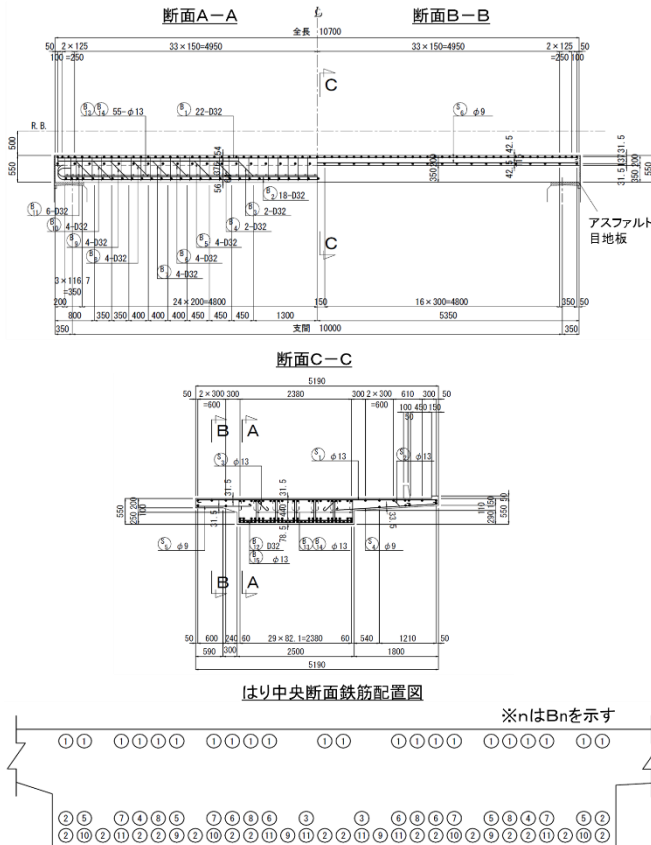


図-3 供試体配筋図面

あけている。橋台は不等沈下の影響を受けにくいように橋台底部をスラブで一体化した。

(2) 境界条件

桁は単純支持条件とする。軌道材料は、新幹線本線で用いられているものと同じ60kg レール, PCまくらぎ(3H)を使用し、道床厚はまくらぎ下300mmである。

(3) 鉄筋切断

応力変動が最大となる支間中央のコンクリートをはつり(図-4)、最下段の鉄筋を30本露出させた後に、ダイヤモンドカッターを用いて1番の鉄筋より順番に1本ずつ切断した(図-5)。鉄筋切断時には急激なたわみ増加による事故を防止するために支保工やジャッキを使用して、安全に配慮して作業を実施している。

(4) 静的载荷実験

静的载荷実験では、新幹線の軸重16tfにおける2点载荷を想定した32tf台車を用いて荷重を作用させ、たわみ計測を実施した。たわみは、スピンドル型の変位計(計



図-4 鉄筋はつり状況

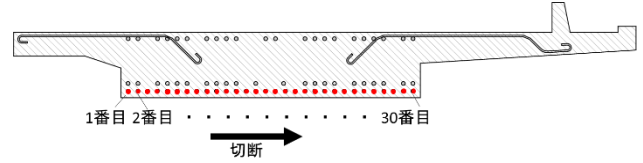


図-5 鉄筋切断順序

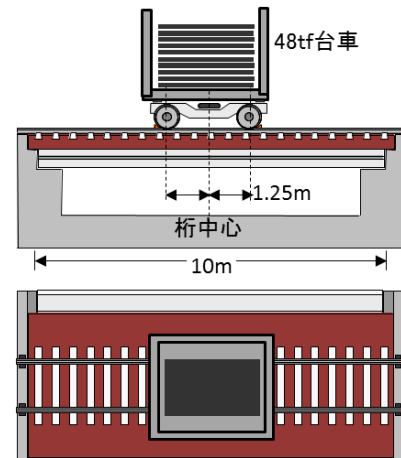


図-6 载荷状況

測精度は0.001mm)を支間中央桁下面に設置し、計測した。荷重载荷位置は、桁中心から1.25m両端とし(図-6)、48tfまで実施した。48tfで载荷試験を実施するタイミングは、1本切断時、8本切断時、15本(下段主鉄筋半分)切断時、30本(下段主鉄筋全部)切断時の4回とし、15本切断と30本切断の間は、桁や台車が不安定となる可能性があることから台車による载荷試験は行わない。

(5) 動的载荷実験

動的载荷実験では、鉄筋を1本切断する度に40kgの重錘(30cmの高さから落下)および1tの土嚢(1mの高さから落下)を橋軸垂直方向の桁中央に落下させ、その前後20秒程度の応答を動的に計測し、動的特性の変化を確認した。1ケースで10データ取得し、FFTにより周波数スペクトルのピークを検出し、10データの周波数の平均値を固有振動数とした。ピーク算出においては、1次固有振動数に着目するために、抽出する振動数範囲を1~15Hzに限定し、この範囲でピークの検出を行った。

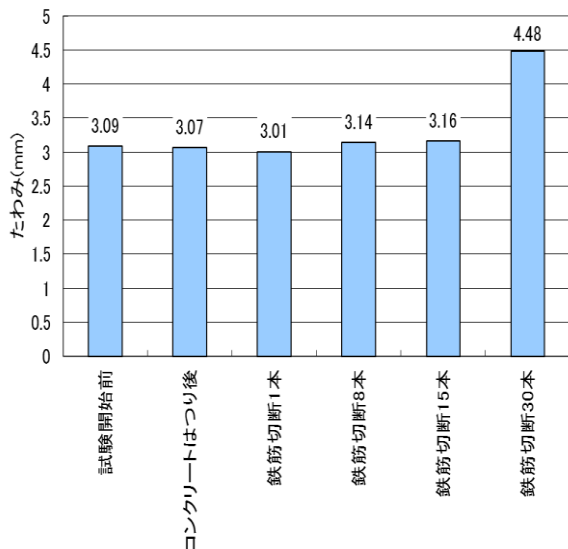


図-7 鉄筋破断によるたわみの変化

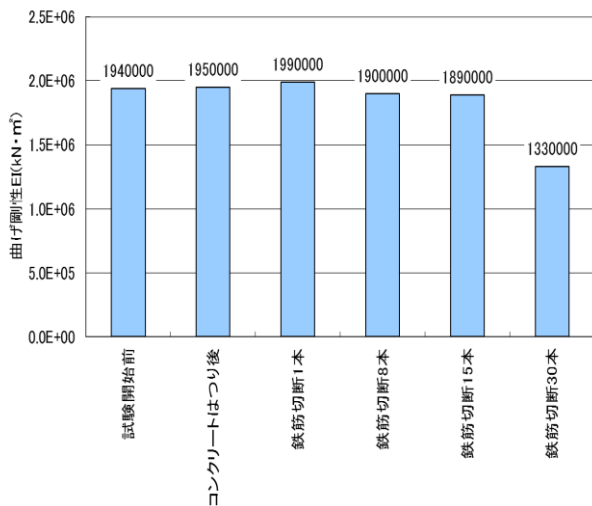


図-8 鉄筋破断による見掛けの曲げ剛性の変化

2.3 実験結果および考察

(1) 静的載荷実験結果

主鉄筋破断によるたわみと見かけの曲げ剛性の変化を比較したものを図-7 および図-8 に示す。見かけの曲げ剛性は、2点載荷のたわみ算定式から曲げ剛性について解いた式(式(1))を用いて算出した。

$$EI = \frac{PL^3}{24\delta} \alpha (3-4\alpha^2) \quad (1)$$

ここで、P: 荷重(両端支持は荷重合計)(kN)、L: 支間長、 δ : たわみ(m)、 α : a/L 、a: 両端支持(4点曲げの支点から載荷点までの距離)(m)である。

試験開始前とコンクリートはつり後を比較すると、たわみの変化は約0.7%減とほとんどなく、支間中央部のコンクリートをはつり取った影響はないことがわかる。これは、すでにひび割れが発生しており、コンクリートが応力を伝達していなかったためと考えられる。コンクリートはつり後と鉄筋切断1本の結果を比較すると、1本切断したにもかかわらずたわみは約2%減少するという

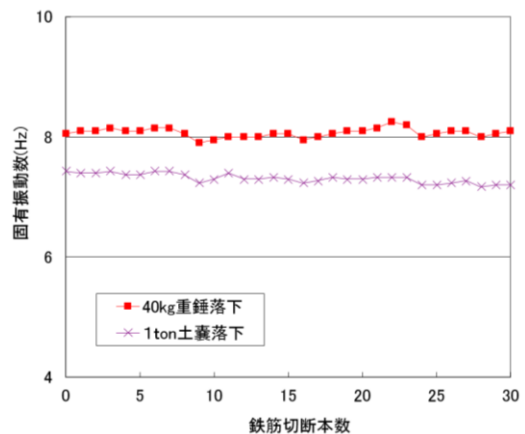


図-9 鉄筋破断による固有振動数の変化

結果となっている。たわみの減少は、外気温等の温度影響や計測誤差、計算誤差などによるものと考えられる。

この結果は、主鉄筋を1本切断した程度ではたわみが大きく変化しないことを示しており、たわみを用いた維持管理指標を検討する際の課題である。

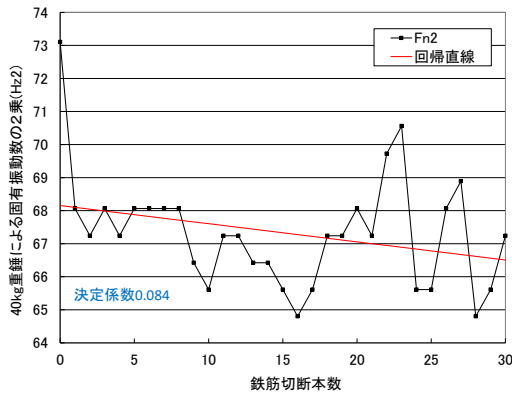
鉄筋切断8本と鉄筋切断15本の結果を比較すると、鉄筋切断が進むにつれてたわみは増加しているものの、その変化は微々たる程度である。主鉄筋下段30本中半分の15本を本切断すると、たわみが5%増加した。鉄筋切断30本の結果を見るとたわみは大きく増加しており、試験開始前と比較すると約45%増加したが、終局には至らなかった。標準設計よりも強度の高い鉄筋を用いたため、少なからずその影響も考えられるが、複鉄筋桁は耐力の高い構造であり、設計耐力に十分な余裕があるであろうことがわかった。

(2) 動的載荷実験結果

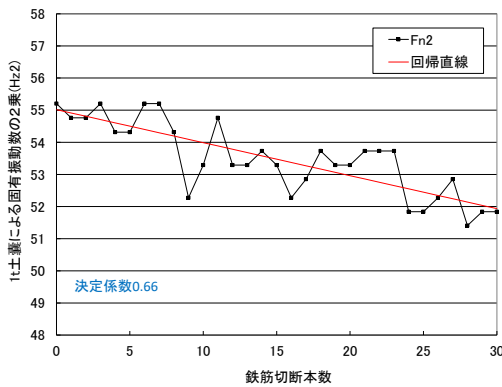
鉄筋切断による固有振動数の変化を図-9に示す。鉄筋破断により固有振動数は鉄筋の切断に伴い減少するものの、その変化量は極めてわずかである。40kgの重錘落下だけではなく、1tの土嚢落下の結果であっても、固有振動数の変化は小さく、固有振動数によって鉄筋の健全度を評価することは容易でないことがわかった。これは、固有振動数 F_n は式(2)に示すように、桁の曲げ剛性の平方根に比例するため、剛性の変化が固有振動数に及ぼす影響が小さくなると考えられる。ここでは、mは桁の質量(kg)である。

$$F_n \propto \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2)$$

鉄筋破断では、剛性が変化するのは桁の1部分のみであり、大部分は元の剛性を有したままである。そのため、桁全体の剛性低下は微小であり、固有振動数に及ぼす影響が小さかったと考えられる。固有振動数は列車通過後の自由振動部から算出が可能であり、入力変動する条件下であっても出力が変化しないことから健全度評価の指標となり得る。そこで、動的載荷実験による固有振



(a) 40kg 重錘落下



(b) 1t 土嚢落下

図-10 固有振動数の2乗と鉄筋切断本数の関係

動数の計測結果について、鉄筋破断本数と固有振動数の二乗の関係を回帰分析により求めたところ、図10(a)、(b)の結果となった。40kg重錘落下時の決定係数は0.084であるが、1t土嚢落下時は0.66であり、回帰のばらつきも小さい。また、現状では感度が鈍いものの1t土嚢落下時の固有振動数の結果から列車通過後の固有振動数の変化で鉄筋破断本数を推定できる可能性はあると思われる。

3. 鉄筋破断に関する解析検討

3.1 目的

静的荷重実験では、安全面を考慮して鉄筋切断15～29本のたわみ計測を行わなかった。そのため、静的線形解析により鉄筋切断15本～29本切断時のたわみを推定した。

3.2 解析条件

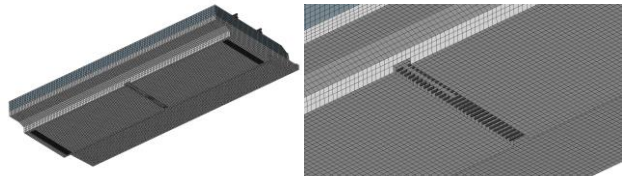
(1) 解析モデル

鉄筋破断を模擬した解析モデルを図-11(a)に示す。解析コードにはAbaqus ver6.14-1を使用した。表-2に材料特性を示す。

鉄筋切断位置では支間中央のコンクリートの要素を無くし、鉄筋をむき出しの状態とし、実験と同条件とした。また、支間中央の鉄筋要素を逐次消去していくことで鉄筋破断を模擬した。図-11(b)は、鉄筋を15本切断した時の状態を示している。

表-2 材料特性表 (鉄筋破断解析)

		コンクリート	鉄筋	バラスト
ヤング率	kN/mm ²	25	200	0.12
ポアソン比		0.2	0.3	0.2
出典		文献5)		文献2)



(a) 全体 (b) 支間中央拡大 (鉄筋15本切断時)

図-11 鉄筋破断解析モデル

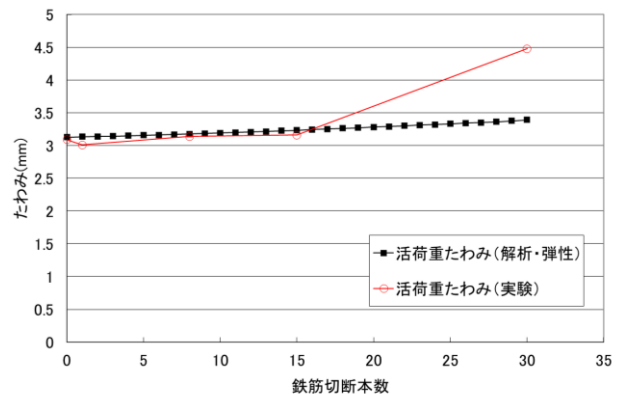


図-12 鉄筋切断本数と活荷重たわみの関係 (実験との比較)

(2) 荷重条件・境界条件

台車相当の32tfの活荷重をレール上に載荷し、線形振動解析により支間中央部の活荷重たわみを算出した。境界条件は単純支持とした。

3.3 解析結果および考察

解析により得られた活荷重たわみと載荷実験による活荷重たわみの比較を図-12に示す。鉄筋切断15本までは、実験結果と解析結果がよく一致していることがわかる。したがって、載荷実験では15本切断時までは全ての鉄筋が弾性範囲内にあったこと、30本切断後は32tf載荷において鉄筋の一部が局所的に降伏している可能性があり、たわみが増加したことがわかった。

4. 終局耐力に関する解析検討

4.1 目的

載荷実験では、下段の主鉄筋30本(全部)を切断し、64tf載荷しても終局には至らなかったため、終局耐力は不明であった。そこで、鉄筋破断により設計計算⁵⁾の耐力がどの様に変化するかを検討した。その結果を図-13に示す。図中の設計値は安全係数を考慮したもの、赤線は各種安全係数を1.0としたものである。緑色の線と紫色の線は安全係数を1.0としたうえで、鉄筋の降伏強度

をそれぞれ 1.1 倍, 1.2 倍とした場合の結果である。これは実構造物において鉄筋の降伏強度は規格値の 1.1~1.2 倍程度であり, 実際に供試体の鉄筋強度は規格値の 1.17 倍であった。

図-13(a)を見ると 19 本切断時に設計計算における曲げ降伏耐力に達する結果となった。安全係数を非考慮にすると 26 本切断時に, さらに鉄筋降伏強度を 1.1 倍や 1.2 倍にすると, それぞれ 28 本, 30 本切断時に降伏する結果となった。よって, 30 本切断時には鉄筋降伏強度が高くとも降伏耐力は超過することが予想できる。実際に, 載荷実験において, 試験結果とも整合する。この様に降伏耐力についてみると, 比較的実験に近い結果となっていることがわかる。

図-13(b)を見ると設計計算における終局耐力は 24 本切断時に終局となっている。安全係数を 1.0 とすると 30 本切断でぎりぎり終局に至らない結果となっている。鉄筋降伏強度を大きくすると終局耐力は増加するが, 64kN 載荷時の曲げモーメントには到達していないことがわかる。実際には 64kN 載荷しても試験体は終局に至らなかったため, この結果は実験と整合していないことになる。

降伏耐力は比較的よく整合したのに対し, 終局耐力が整合しなかった理由として, はね出し部などにより桁上面側の断面幅が広がっていることが影響したと考えられる。降伏耐力は桁下面側の鉄筋により支配されることから, 実物と設計用断面の幅が等しいので, 設計と実験の差が小さかったが, 終局強度は桁上面のコンクリートの圧縮ひずみで支配されるので, 実物はコンクリート桁幅が設計の仮定 (2500mm) に比べて広くなり, コンクリートの圧縮ひずみが大きくなりづらく, 結果として実際の終局耐力と設計値が乖離したのと考えられる。

そのため, 非線形 3 次元 FEM Pushover 解析により終局耐力について検討を行った。

4.2 解析条件

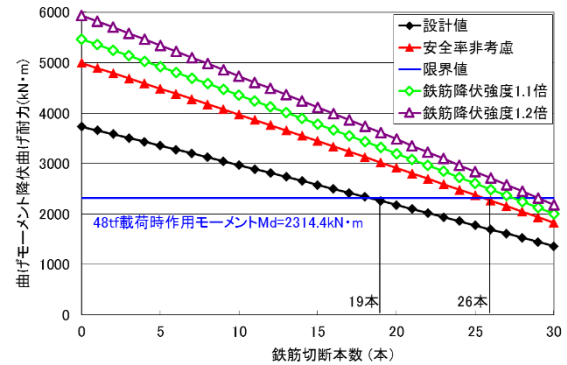
(1) 解析モデル

対称条件を考慮してハーフモデルとした。また, 解析に用いる材料の非線形特性を設定するため, 試験体から取り出した供試体を用いて材料試験を行い, その結果より材料特性のモデル化を行った。

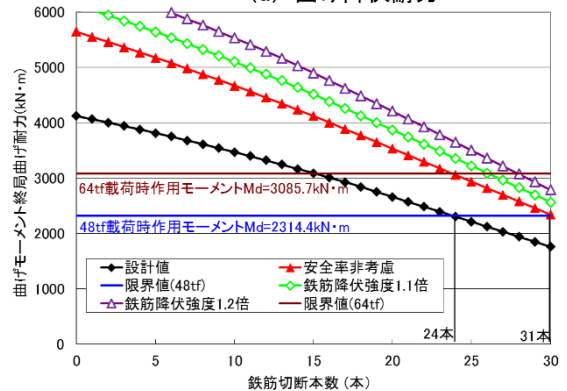
コンクリートは Abaqus の「コンクリート損傷塑性」モデル⁶⁾を用いてモデル化し, その特性は圧縮試験による応力ひずみ関係と割裂引張試験引張強度を用いて定義した。圧縮強度は 39.6N/mm², 引張強度は 3.34N/mm²とした。表-3 に材料特性を示す。

(2) 荷重条件・境界条件

最初に死荷重を慣性力として作用させた上で, RC 標準に示す応力ひずみ関係をベースとした実験での車輪



(a) 曲げ降伏耐力



(b) 終局曲げ耐力

図-13 設計計算における鉄筋切断本数と耐力の

表-3 材料特性表 (終局耐力解析)

		コンクリート	主鉄筋	バラスト
		f_{ck} 24	SD345	-
ヤング率	kN/mm ²	30.8	200	0.12
ポアソン比		0.2	0.3	0.2
比重		2.3	7.8	1.9
圧縮強度	N/mm ²	39.8	-	-
引張強度	N/mm ²	3.337	-	-
降伏強度	N/mm ²	-	400	-
出典		要素試験結果		文献 2)

位置に強制変位を与えて, Pushover 解析を実施した。支間中央に対称面を設け, 支承部はローラー支持とした。また, バラスト部のみ上下線間について対象条件を設定した。

4.3 解析結果および考察

本解析では, コンクリートの負勾配や破壊を考慮していないため終局の判断が困難であった。そのため, 設計標準⁵⁾における終局の定義に基づいて桁部のコンクリート圧縮ひずみの最大値が 3500 μ に到達した時点を終局と定義して評価を行った。

図-14 に鉄筋切断前後の荷重と支間中央たわみの関係を示す。鉄筋は, 下段の主鉄筋 30 本全てを切断した場合を想定している。図中の記号は, ■が鉄筋の初降伏, ▲が最大荷重, ◆が終局を表している。また, 記号の横の数値は, その時点の荷重を示している。

鉄筋切断前は、最大荷重に到達する前に終局を迎えたが、鉄筋切断後は最大荷重を超えてしばらくした後に終局に到達するという結果となり、載荷実験時の最大荷重の2倍程度の耐力を有していたと想定される。今回の解析モデルでは、終局耐力の算定を目的に設計標準の構成則を用いて解析したため、コンクリート内に鉄筋がある場合の付着による鉄筋ひずみの局所化による強度低減を考慮していない。そのため、実験の最大荷重においても鉄筋は弾性的のままとなっているが、実構造物ではひび割れ部でのひずみの局所化により、多少の降伏は生じた可能性がある。

終局時の変形図を図-15に示す。終局に到達しても外観からはたわみが大きい様には見えないことがわかる。これは、複鉄筋版桁の鉄筋量が多いため、鉄筋降伏後比較的早い段階でコンクリートが圧壊するためと考えられる。

Pushover 解析による代表的な点における荷重と変位を整理したものを表-4に示す。表中では鉄筋切断前後での比較も合わせて示している。荷重は鉄筋切断により、切断前の1/3程度に低下している。この低下率は、降伏、最大、終局ともにほぼ同じ値であった。降伏変位も荷重と同じく1/3程度であったが、終局変位だけは元の2/3程度と大きくなった。これは、鉄筋切断により鉄筋量が減少した結果、鉄筋降伏後にコンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみに到達するまでの余裕が出来たためと考えられる。

5. まとめ

本研究により以下のことがわかった。

- ・載荷実験において、主鉄筋を1本切断した程度ではたわみは大きな変化を示さず、たわみを用いた維持管理指標の検討時の課題であることがわかった。また、下段主鉄筋30本全てを切断しても、終局には至らなかったため、複鉄筋版桁は耐力の高い構造であり、設計耐力に十分な余裕があるであろうことがわかった。

- ・載荷実験において、下段主鉄筋30本全てを切断しても、固有振動数の変化はわずかであった。そのため、固有振動数による鉄筋の健全度評価は困難であった。しかし、1t土嚢落下時の固有振動数を回帰分析した結果、現状では感度が鈍いものの1t土嚢落下時の固有振動数から鉄筋破断本数を推定できる可能性があることもわかった。

- ・終局耐力に関する解析結果において、下段主鉄筋30本全てを切断しても、最大荷重を超えた後に終局に至り、載荷実験の最大荷重の約2倍の耐力を有していることがわかった。

(謝辞) 本論文をまとめるにあたり、神戸大学名誉教

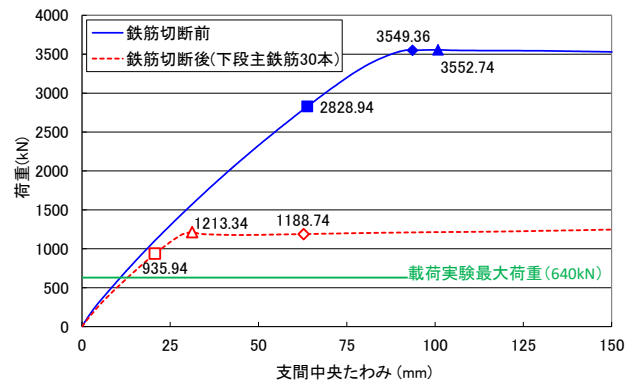
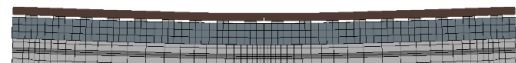
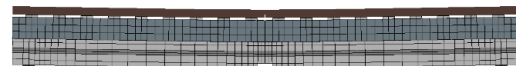


図-14 荷重変位関係および終局時荷重



(a) 鉄筋破断前 (等倍, $\delta = 93.6\text{mm}$)



(b) 鉄筋破断後 (等倍, $\delta = 62.8\text{mm}$)

図-15 終局時の変形図

表-4 Pushover 解析結果

	鉄筋切断前	鉄筋切断後	比率
降伏荷重(kN)	2828.94	935.94	33.1%
最大荷重(kN)	3552.74	1213.34	34.2%
終局荷重(kN)	3549.36	1188.74	33.5%
終局変位(mm)	93.6418	62.8077	67.1%
降伏変位(mm)	63.8388	20.6817	32.4%

授 川谷充郎博士に指導頂きました。ここに記して、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 伊藤雄郷, 大野雄史, 吉田幸司, 西山誠治, 田辺篤史: 複鉄筋版桁鉄道橋の健全度評価のための簡易指標の提案, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.876-887, 2017.
- 2) 伊藤雄郷, 吉田幸司, 西山誠治, 田辺篤史, 川谷充郎: バラスト軌道による荷重分散効果がRC複鉄筋版桁のたわみに与える影響, 第21回鉄道工学シンポジウム, 2017.
- 3) 加藤信二郎, 久保木結, 吉田幸司, 伊藤雄郷: 複鉄筋コンクリート版桁のたわみに関する検討, 第24回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2017.
- 4) 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, pp.31-36, 2006.
- 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・解説 (コンクリート構造物), 丸善, 2004.
- 6) Simulia: Abaqus Theory Guide Dassault Systems, 2014.