

## 鋼多主桁橋の非線形リダンダンシー解析

## NONLINEAR REDUNDANCY ANALYSIS FOR A MANY MAIN GIRDERS STEEL BRIDGE

見原理一\*，加藤修\*\*，岩崎英二\*\*\*，奥井義昭\*\*\*\*

Riichi MIHARA, Osamu KATOU, Eiji IWASAKI and Yoshiaki OKUI

**ABSTRACT** This paper is the nonlinear redundancy analysis which examined the valuation method in consideration of nonlinear. This analysis can take yield after the fracture of a member. By this method, an elucidation and surplus proof stress of a collapse mechanism can be presumed.

**KEYWORDS**：非線形リダンダンシー解析，ひび割れ，ソリッド要素，シェル要素  
Nonlinear redundancy analysis, crack, solid element, shell element

## 1. まえがき

線形リダンダンシー解析は、比較的容易な計算手法であり、複雑な形式の橋梁などの構造設計への利用が期待される。しかし、線形リダンダンシー解析は、各部材が弾性状態を保持しているものと仮定し、部材の終局を橋梁全体の終局状態と判定する。したがって、必ずしも正しい構造系としての余耐力を評価していない。材料非線形が卓越する場合など線形リダンダンシー解析の適用が疑問視される場合や、線形リダンダンシー解析では過度に安全側の評価になる場合などでは、非線形解析によってリダンダンシー解析を実施する必要がある。

本検討では、非線形解析を実施し、部材破断後の橋梁全体の破壊挙動を把握することを目的として検討している。

## 2. 対象橋梁および解析モデル

図-1、図-2に対象とした橋梁を示す。設計条件などは、文献<sup>1)</sup>を参考に表-1に示すように決定した。解析は非線形(材料非線形、幾何学的非線形ともに考慮した複合非線形)解析とし、汎用有限要素解析ソフト(midas FEA:MIDAS IT社)を用いて解析を実施している。

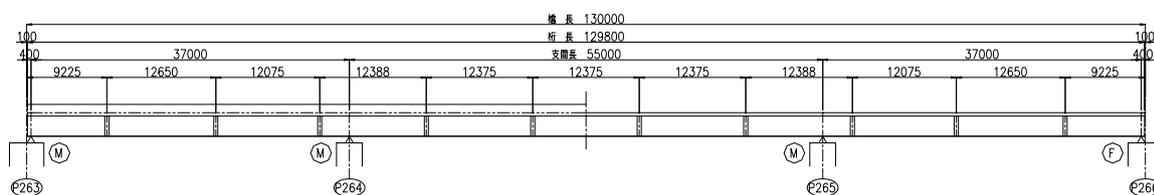


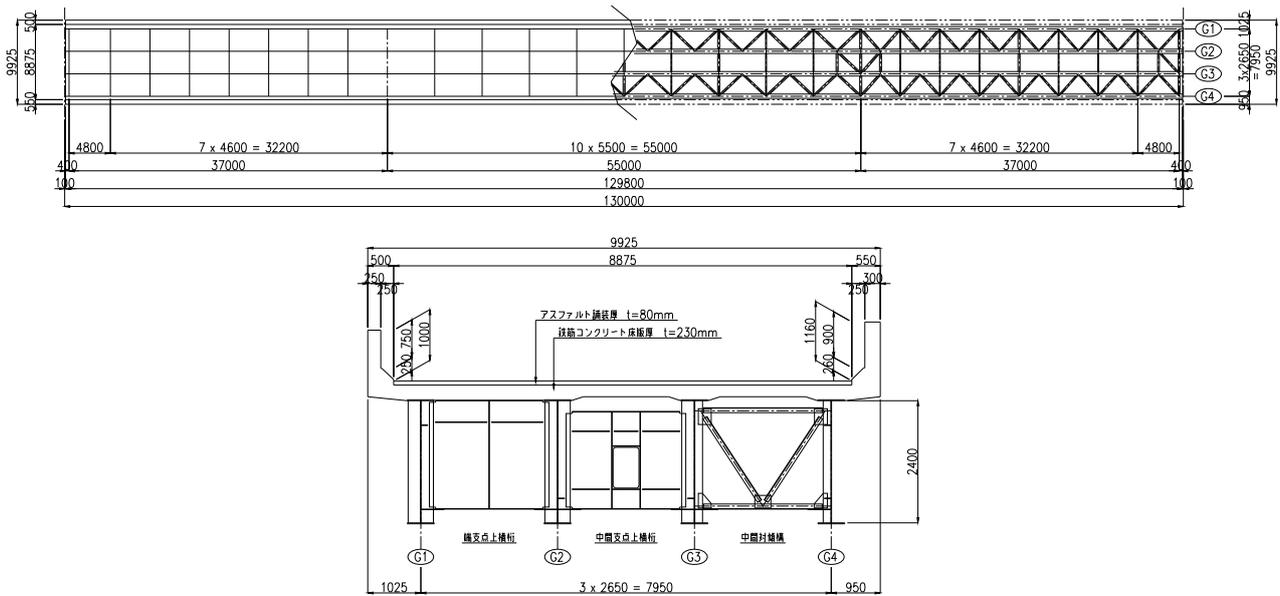
図-1 3径間連続非合成4主I桁(側面図)

\*工博 JIPテクノサイエンス(株)(〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町1-2-5)

\*\*工学 (株)ニューブリッジ設計部(〒103-0013 東京都中央区日本橋人形町3-7-1)

\*\*\*工博 埼玉大学教授 大学院理工学研究科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

\*\*\*\*工博 長岡技術科学大学教授 大学院理工学研究科(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

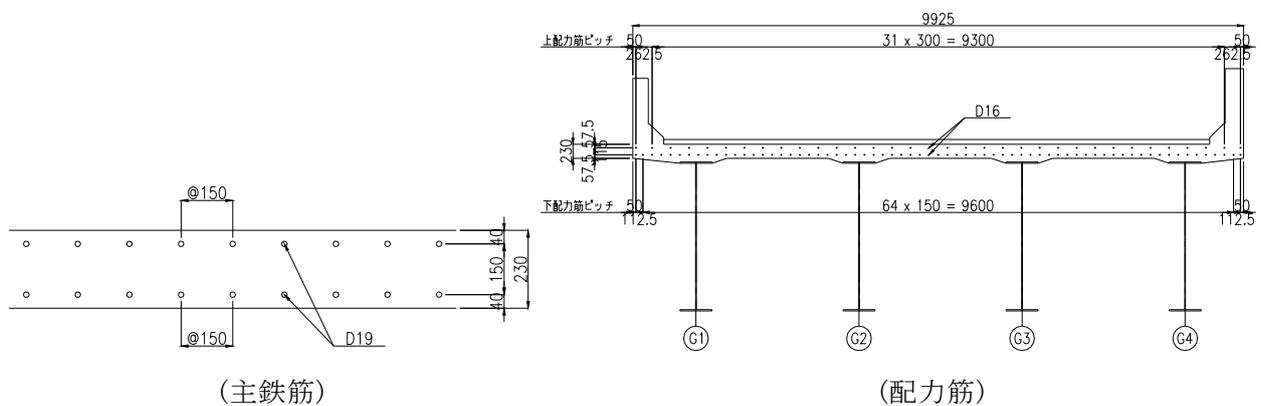


図－２ 3 径間連続非合成 4 主 I 桁 (平面図・断面図)

表－１ 対象橋梁の設計条件

形式	3 径間連続非合成 4 主 I 桁	
規格	B 活荷重	
支間長	37m + 55m + 37m	
有効幅員	8.875m	
舗装	アスファルト舗装厚 $t = 80 \text{ mm}$	
床版	鉄筋コンクリート床版厚 $t = 230 \text{ mm}$ $\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$	Mohr-Coulomb 降伏基準適用
計画交通量	1000 台/日・方向以上	
使用鋼材	SM490Y, SM400, SS400, S10T 鉄筋 SD295	Von Mises 降伏基準適用 バイリニア型の非線形特性適用
適用示方書	道路橋示方書 平成 14 年 3 月	

床版はソリッド要素でモデル化し、床版内の鉄筋は埋込鉄筋要素を用いてモデル化している。図－3 に配筋図を示す。



図－３ 床版内の配筋図

主桁・横桁はシェル要素でモデル化し、ずれ止め・対傾構・横構はバー要素でモデル化している。なお、ウェブの水平・垂直補剛材は解析結果に影響を与えないと判断し、モデル化から省略している。解析モデル図を図-4～図-7に示す。

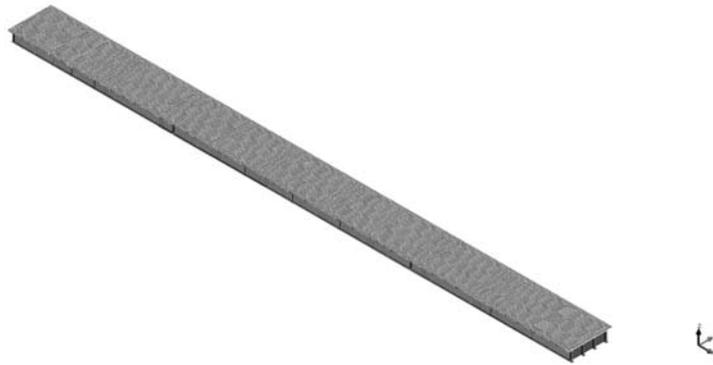


図-4 全体図(床版上面より)

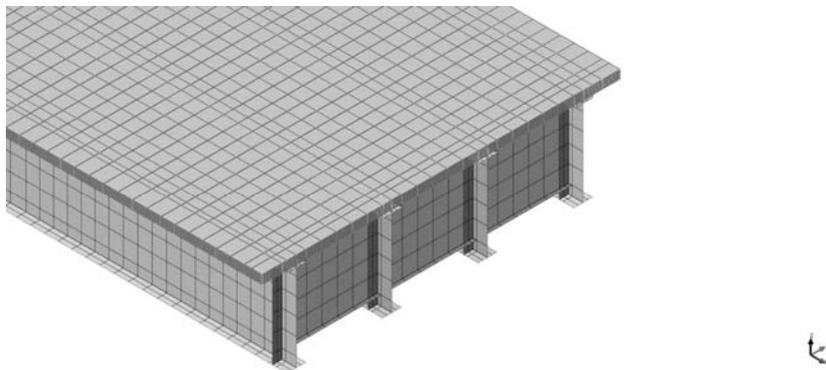


図-5 端支点部拡大図(床版上面より)

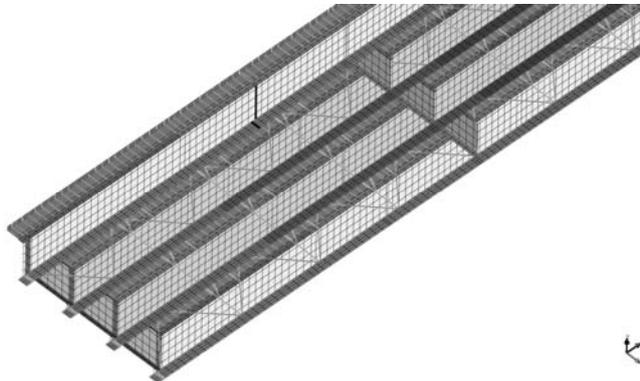


図-6 端支点部拡大図(床版下面より)

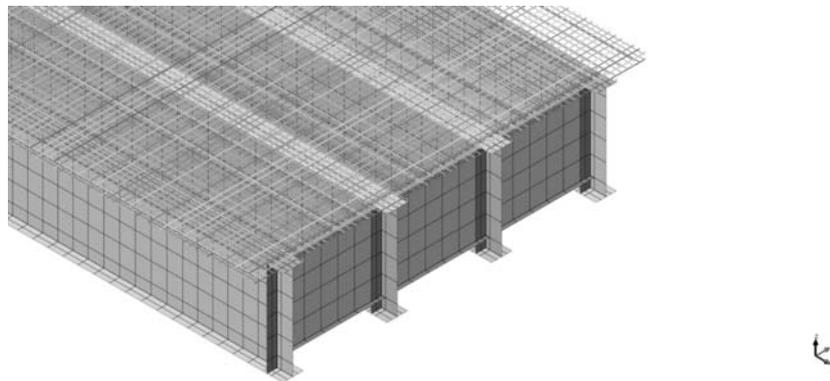


図-7 床版内の鉄筋表示(床版コンクリートを非表示)

解析における境界条件(荷重・拘束)は、設計条件に準拠し、鉛直・橋軸直角方向が固定、橋軸方向は端支点側のみ固定とし、他は可動とする。また、荷重は施工ステップを考慮し、前死荷重・後死荷重・活荷重を個別に載荷している。

### 3. 材料特性

解析に使用する物理定数(弾性剛性)を表-2に示す。

表-2 物理特性(弾性剛性)

材料	物理定数[N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	備考
鋼材	2.0×10 <sup>5</sup>	0.3	
コンクリート	2.0×10 <sup>4</sup>	0.167	σ <sub>ck</sub> = 24 N/mm <sup>2</sup>

コンクリートの非線形特性は、引張側はコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>、圧縮側は道路橋示方書<sup>3)</sup>の特性曲線に準拠した。また、本検討では、コンクリートの破壊モードは曲げ破壊先行型と仮定し、固定ひび割れモデルを適用した。

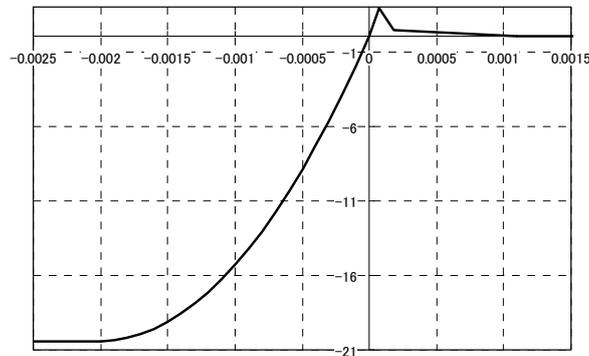


図-8 コンクリートの非線形特性曲線(応力-ひずみ)

主桁・鉄筋の非線形特性は道路橋示方書<sup>3)</sup>の特性曲線に準拠し、降伏点強度を超えた後の2次勾配はE/100とした。また、鋼材の非線形構成則はVonMises降伏基準を適用した。

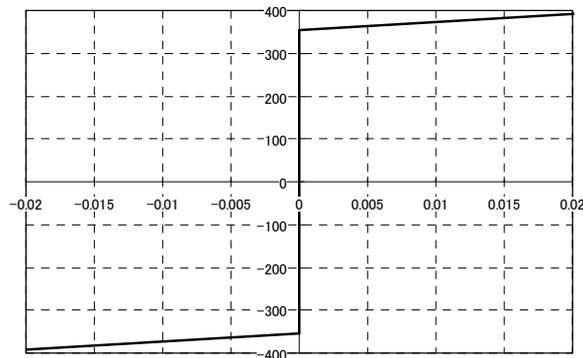


図-9 鋼材の非線形特性曲線(応力-ひずみ)

スラブアンカーはφ16を使用するものと仮定し、既往の論文・実験結果<sup>4)</sup>を参考にスラブアンカー1本当たりの材料特性を算出し適用した。

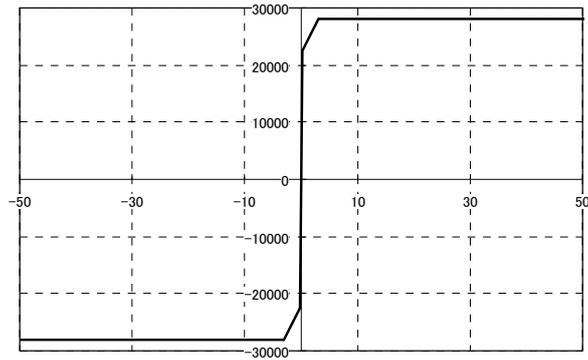


図-10 スラブアンカーの非線形特性曲線(荷重-変位)

#### 4. 損傷部のモデル化

本検討では、着目する主桁それぞれが単独で損傷する場合と組合せで損傷する場合について解析を実施した。損傷部のモデル化を図-11～図-14に示す。

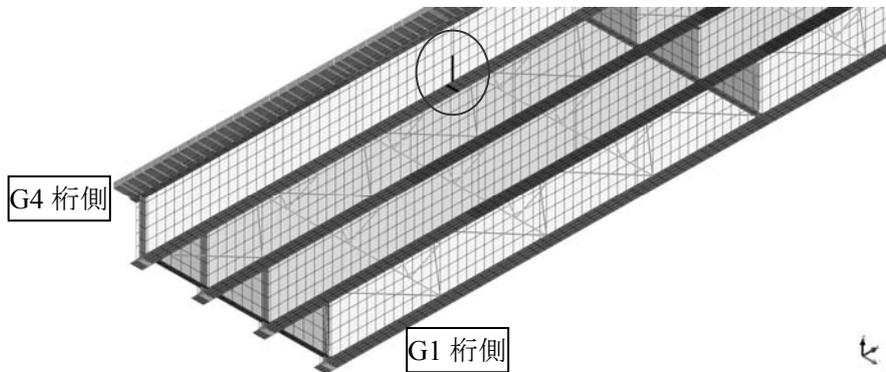


図-11 損傷箇所(ケース1: G4桁ウェブ高の半分まで亀裂)

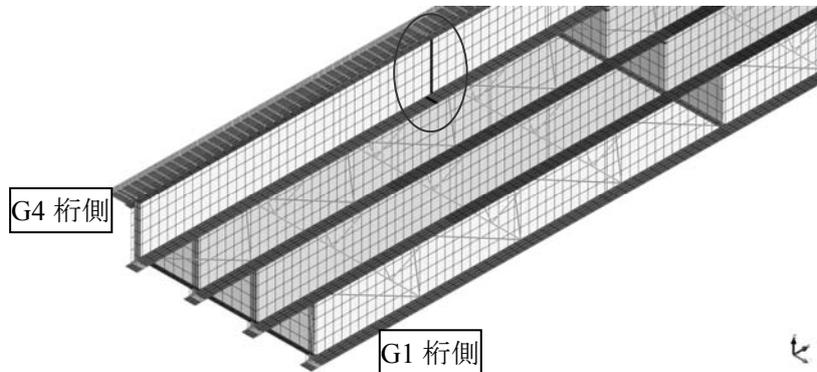


図-12 損傷箇所(ケース2: G4桁ウェブ高の全高亀裂)

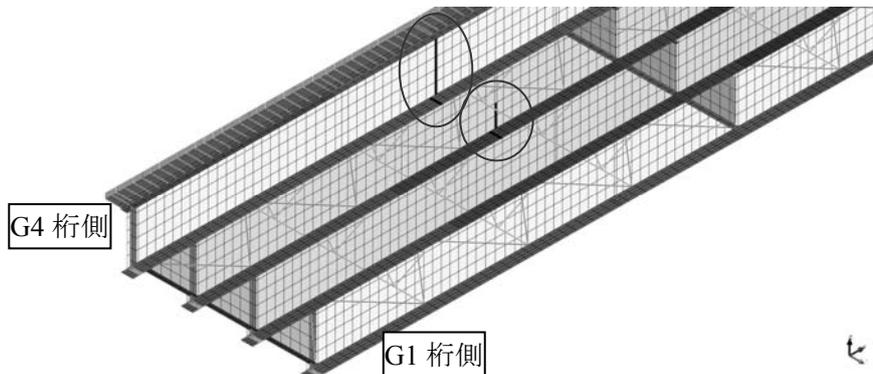


図-13 損傷箇所(ケース3: G4桁ウェブ全高・G3桁ウェブ高の半分まで亀裂)

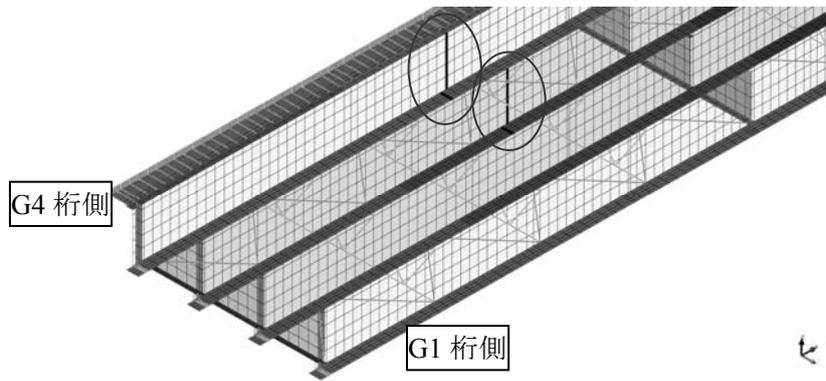


図-14 損傷箇所(ケース4 : G4 桁ウェブ全高・G3 桁ウェブ全高亀裂)

本検討では、施工ステップを考慮して解析を実施している。図-15に解析手順を示す。

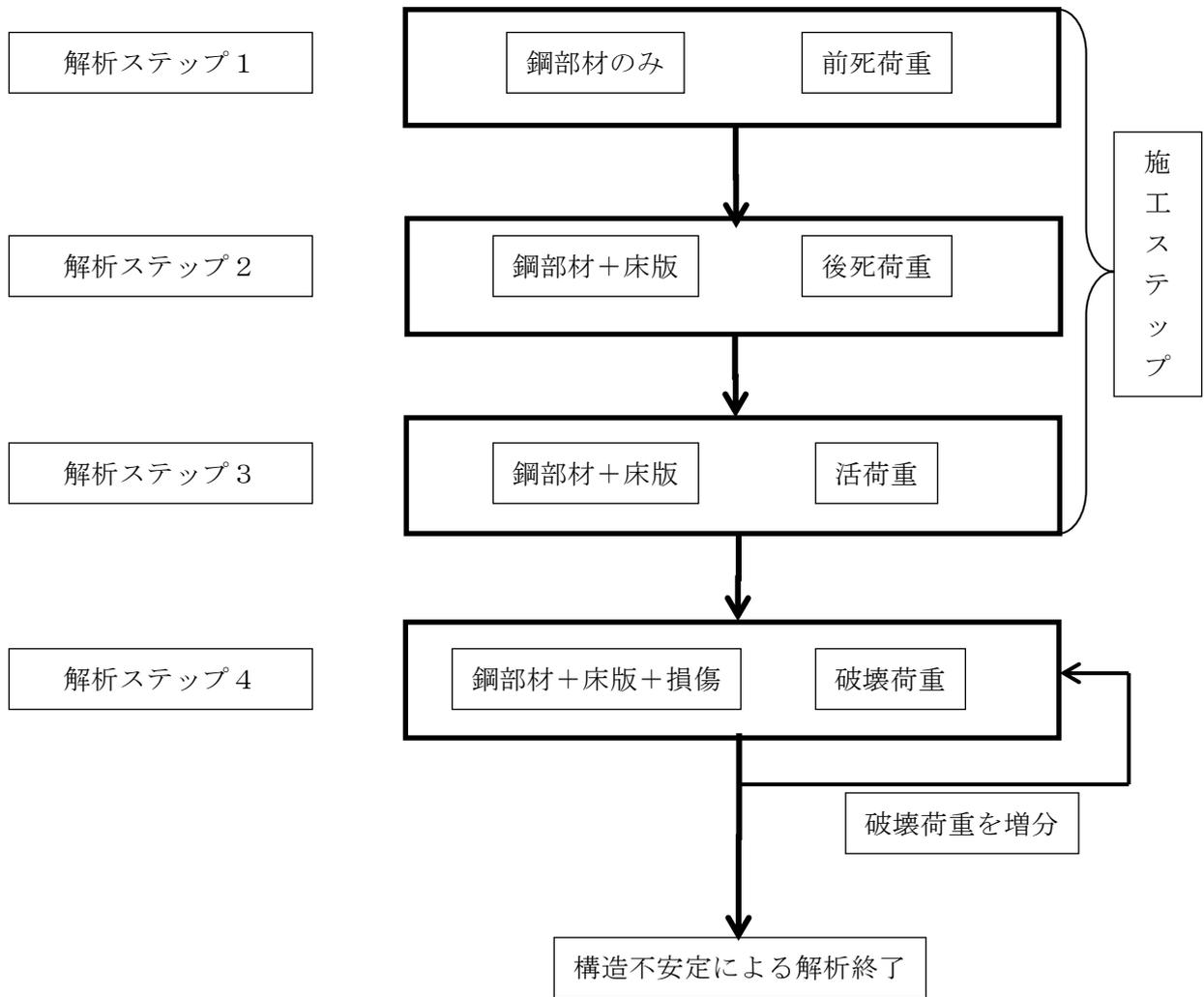


図-15 非線形を考慮した段階施工解析の解析手順

## 5. 解析結果

### ・変形挙動について

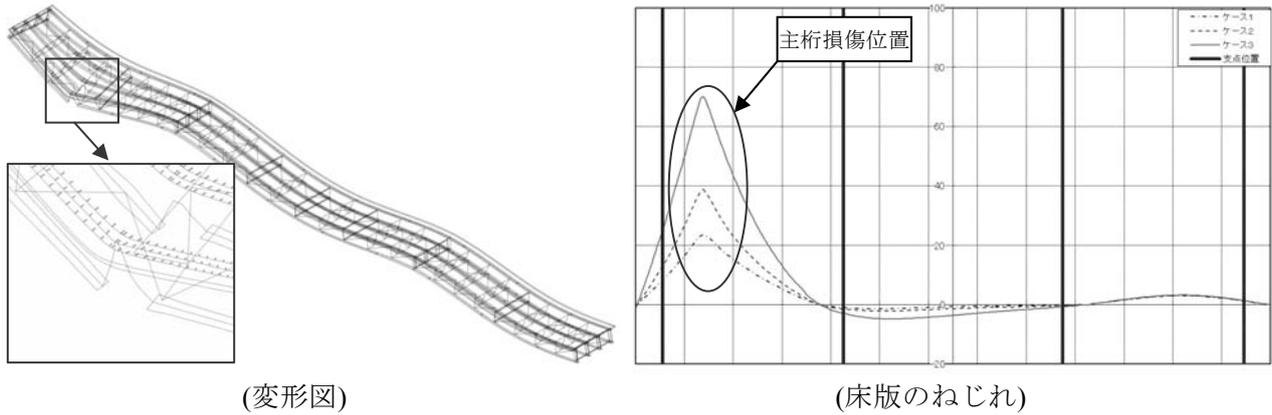


図-16 変形挙動

損傷程度（損傷度：青(一点破線) < 赤(破線) < 緑(実線)）によって床版のねじれが増加する傾向を示した。

### ・床版コンクリートのひび割れについて

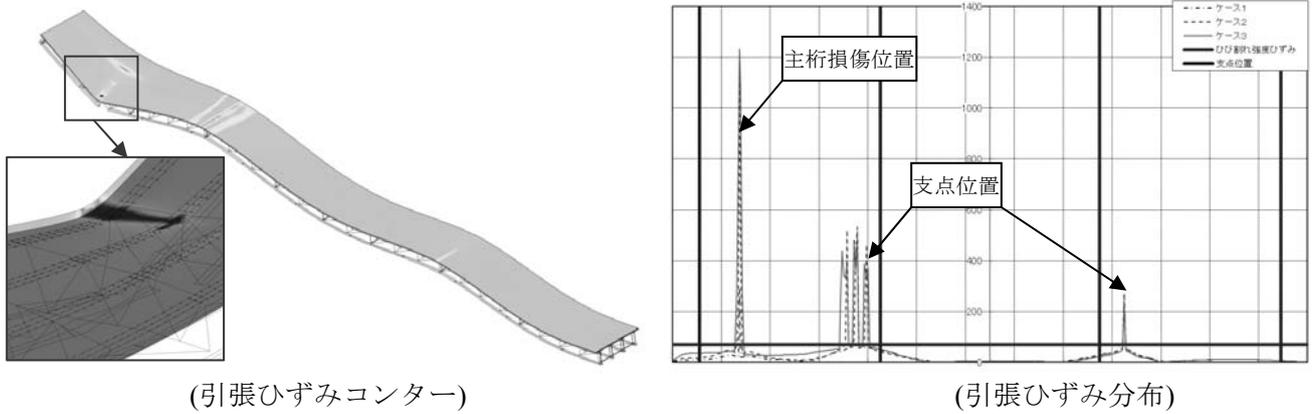


図-17 引張ひずみ

損傷が外桁のみの場合(ケース 1, 2)では、終局時においてもひび割れが床版を貫通することは無かった。一方、外桁・内桁ともに損傷した場合(ケース 3)では、終局時にひび割れが床版を貫通し、かつ床版の全幅に渡ってひび割れが進展したため、本橋は構造不安定となった。なお、支点部近傍では損傷程度による影響をほぼ受けていない傾向を示した。

### ・主桁の VonMises 応力分布について

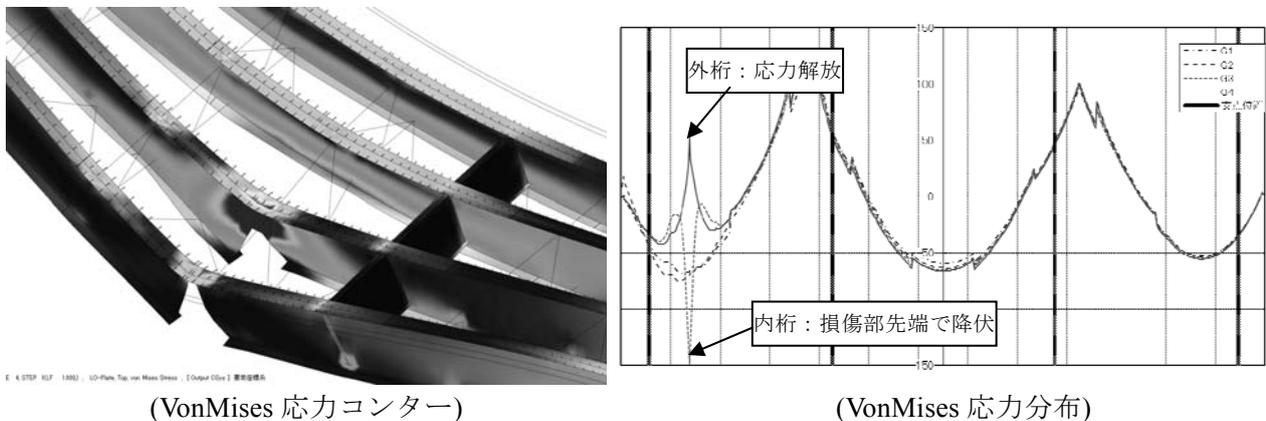


図-18 VonMises 応力

外桁(紫(実線))はウェブ全高で破断していることから応力解放が生じているが、内桁(緑(破線))は損傷部

先端位置で降伏する傾向を示した。しかし、終局時においても上フランジは降伏せず、内桁が完全に破断することは無かった。

・鉄筋の軸応力について

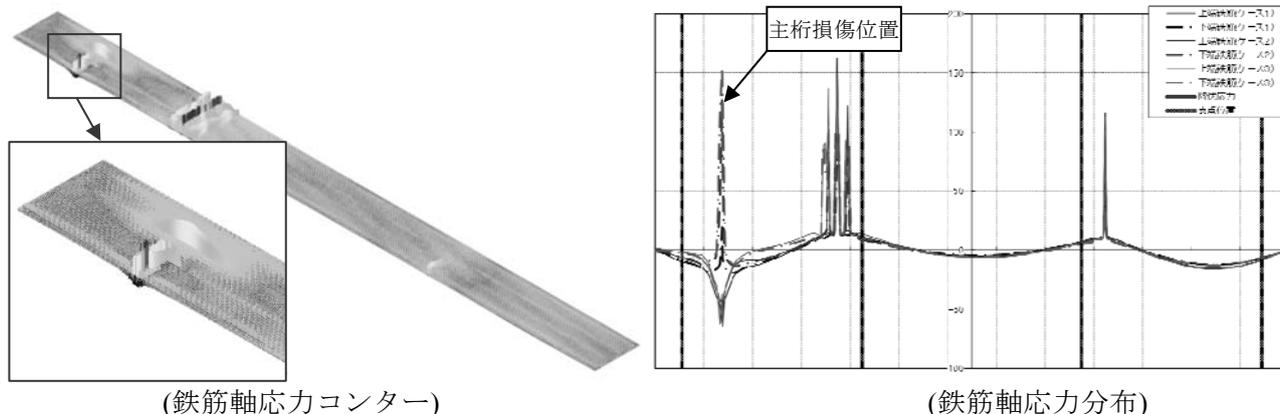


図-19 鉄筋の軸応力

損傷程度によって床版に生じるひび割れの発生領域が拡大するため、鉄筋への応力分担量が増加する傾向を示した。終局時では、鉄筋が降伏し破断することで構造不安定となった。

6. まとめ

- ・損傷程度に関わらず床版にはひび割れが生じる傾向が得られたことから、より厳密な検討を行う場合には非線形解析を実施する必要があるものと思われる。
- ・横構，対傾構は一部非線形領域に達する部材はあったが、ほとんどの部材は弾性範囲であったことから、非線形解析を実施する際には、横構，対傾構は弾性材料としてモデル化してもその影響度は少ないものと思われる。
- ・本検討では「鋼部材の亀裂の進展」は考慮していないため、主桁ウェブの亀裂先端が塑性化しているが、亀裂進展を考慮した場合、非線形挙動が変化することが予測される。

謝辞

本研究の一部は土木学会平成 25 年度重点研究課題の研究助成を受けて「鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会」の一環として実施されました。

参考文献

- 1) ガイドライン型設計適用上の考え方と標準図集(改訂版) (社)日本橋梁建設協会 平成 15 年 3 月
- 2) コンクリート標準示方書【構造性能照査編】 (社)土木学会 2002 年度制定
- 3) 道路橋示方書・同解説 1 共通編 (社)日本道路協会 平成 24 年 3 月
- 4) RC 床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価 2001 年 3 月構造工学論文集 Vol. 47A

## 鋼多主桁橋の非線形リダンダンシー解析

土木学会鋼構造委員会 /  
鋼構造のリダンダンシーに関する検討小委員会

JIPテクノサイエンス(株) 見原 理一

第17回 鋼構造と橋に関するシンポジウム(2014年8月)

土木学会

## はじめに

線形リダンダンシー解析は、比較的容易な計算手法であり、複雑な形式の橋梁などの構造設計への利用が期待される。

しかし、線形解析では、各部材が弾性状態を保持しているものと仮定し、部材の終局(破断など)を橋梁全体の終局状態と判定する可能性がある。

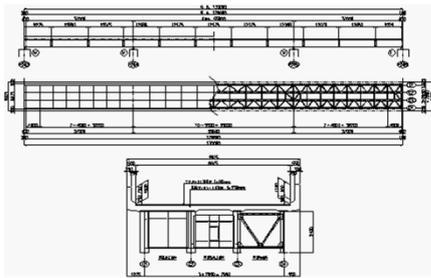
本検討では、非線形解析を実施することで、部材の線形性・非線形性を把握し、橋梁全体の破壊挙動を把握することを目的として検討を行っている。

1/18

第17回 鋼構造と橋に関するシンポジウム(2014年8月)

土木学会

## 対象橋梁



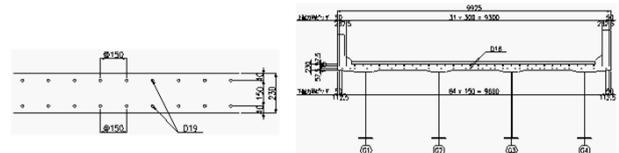
3径間連続非合成I桁橋

2/18

第17回 鋼構造と橋に関するシンポジウム(2014年8月)

土木学会

## 対象橋梁



(主鉄筋)

(配力筋)

床版内の配筋

床版:ソリッド要素

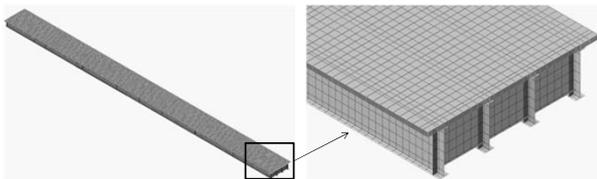
鉄筋:埋込鉄筋要素(鉄筋とコンクリートは完全付着)

3/18

第17回 鋼構造と橋に関するシンポジウム(2014年8月)

土木学会

## 解析モデル



(全体図)

(端支支点部拡大)

主桁・横桁:シェル要素

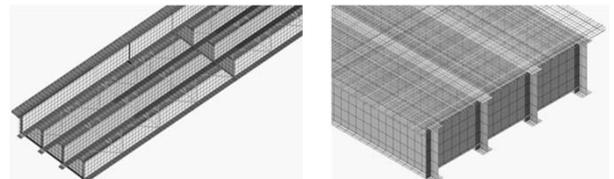
ずれ止め・対傾構・横構:バー要素

4/18

第17回 鋼構造と橋に関するシンポジウム(2014年8月)

土木学会

## 解析モデル



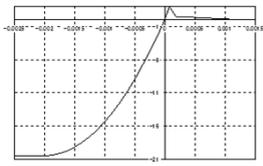
(主桁部表示)

(床版内の鉄筋表示)

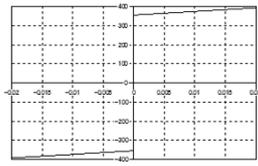
床版と主桁間はずれ止めにより接続

5/18

### 非線形特性



(コンクリート)

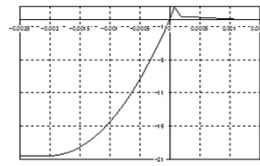


(鋼部材)

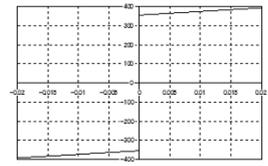
コンクリート:破壊モードは「曲げ破壊先行型」と仮定し「固定ひび割れモデル」を適用

鋼部材 : VonMises降伏基準を適用

### 非線形特性



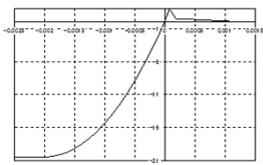
(コンクリート)



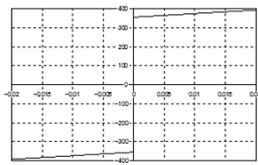
(鋼部材)

固定ひび割れモデル:ひび割れ発生後の主応力軸の角度変化に依存せず、一度発生したひび割れの方角(角度)は変化しないモデル。

### 非線形特性



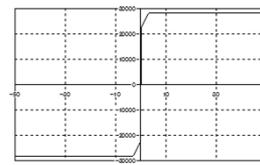
(コンクリート)



(鋼部材)

VonMises降伏基準:せん断ひずみエネルギーが降伏点(面)強度に到達した際に降伏するという概念(3次元の応力空間では円筒形の降伏面)

### 非線形特性

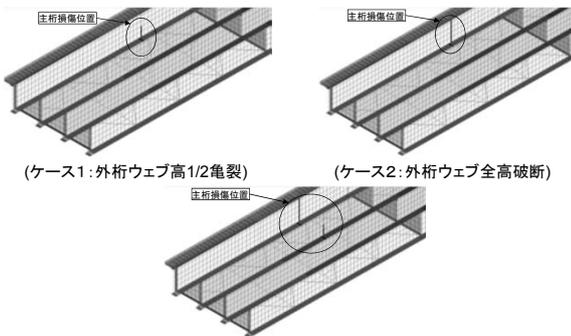


(スラブアンカー)

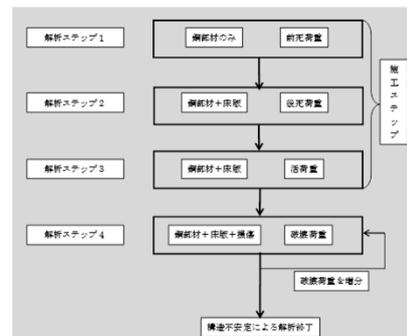
スラブアンカーの特性曲線は、既往の論文・実験結果より決定

参考文献) RC床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価 2001年3月構造工学論文集Vol.47A

### 損傷部のモデル化

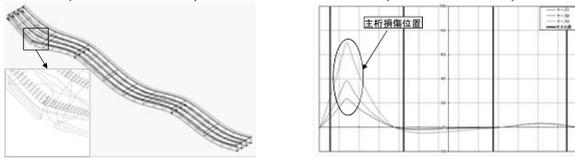
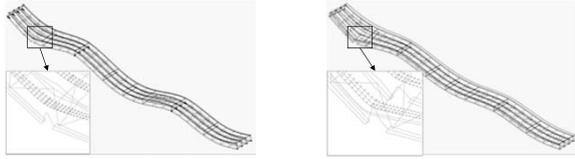


### 解析手順



非線形を考慮した段階施工解析の解析手順

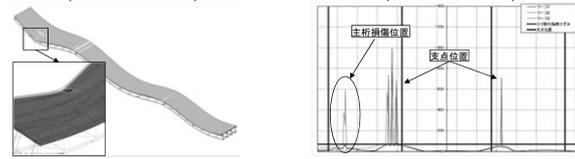
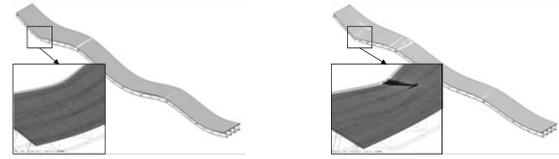
### 解析結果(変形挙動)



損傷程度によって床版のねじれが増加

10/18

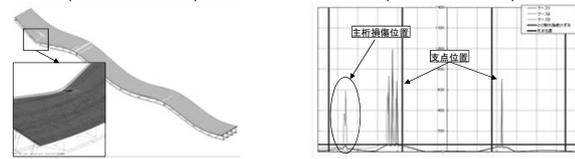
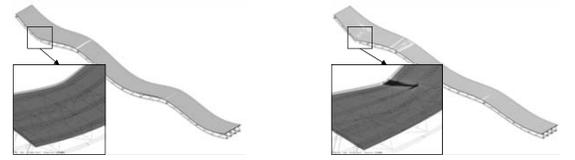
### 解析結果(引張ひずみ)



外桁・内桁ともに損傷した場合のみひび割れは床版を貫通

11/18

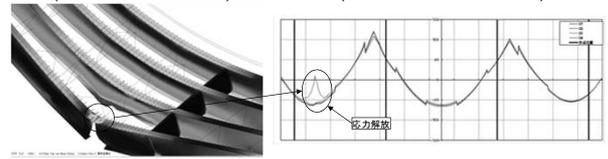
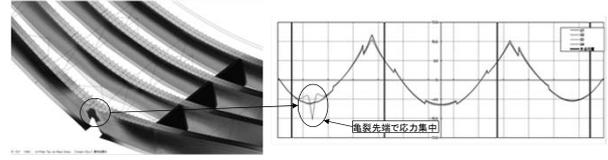
### 解析結果(引張ひずみ)



支点部近傍は損傷程度による影響はほぼ受けていない

11/18

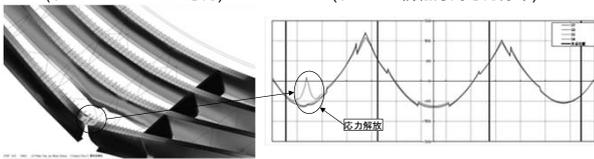
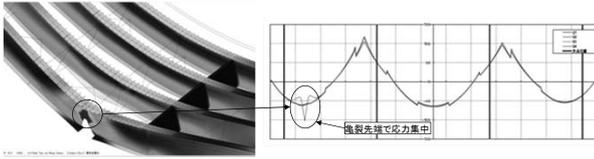
### 解析結果(VonMises応力)



ケース1では亀裂先端で応力集中が発生

12/18

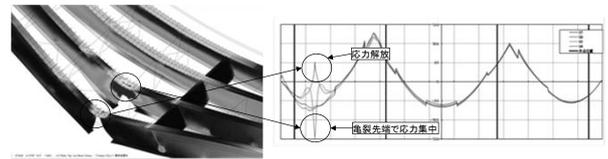
### 解析結果(VonMises応力)



ケース2ではウェブ全高を破断させているため応力解放が発生

12/18

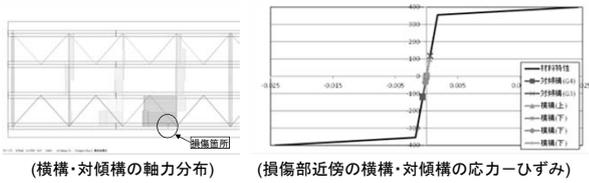
### 解析結果(VonMises応力)



ケース3では外桁はウェブ全高を破断させているため応力解放が発生し、内桁は亀裂先端で応力集中が発生

13/18

### 解析結果(横構・対傾構)

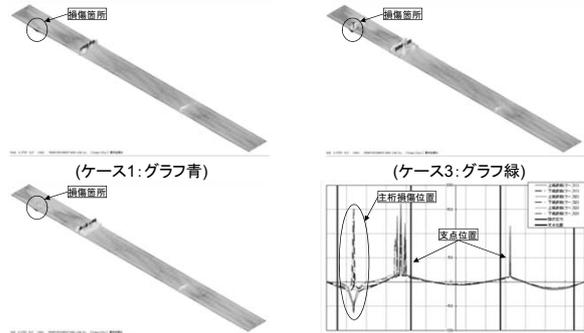


(横構・対傾構の軸力分布)

(損傷部近傍の横構・対傾構の応力-ひずみ)

- ・主桁の損傷によって横構・対傾構に応力再配分が生じ、損傷部近傍の軸力は増加した。
- ・応力再配分により横構・対傾構の軸力は増加したが、弾性領域で推移する傾向を示した。

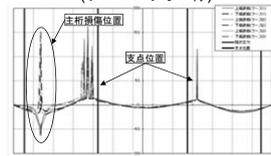
### 解析結果(鉄筋の軸応力)



(ケース1:グラフ青)

(ケース3:グラフ緑)

(損傷箇所)

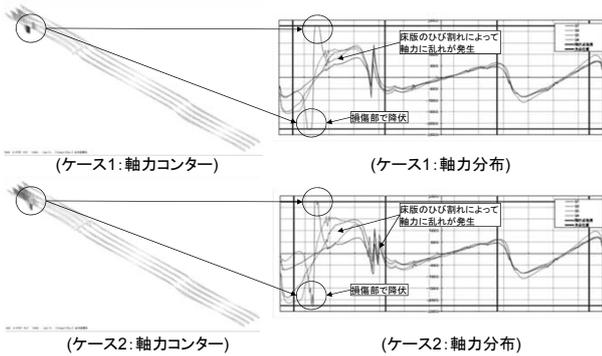


(ケース2:グラフ赤)

(鉄筋の軸応力分布)

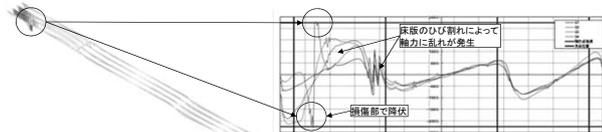
床版のひび割れ領域の拡大に伴い鉄筋軸応力も増加

### 解析結果(スラブアンカー)



(ケース1:軸力カウンター)

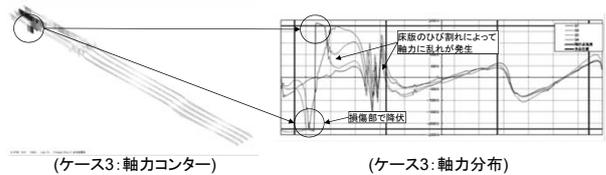
(ケース1:軸力分布)



(ケース2:軸力カウンター)

(ケース2:軸力分布)

### 解析結果(スラブアンカー)



(ケース3:軸力カウンター)

(ケース3:軸力分布)

スラブアンカーが降伏する領域は、損傷程度の影響はほぼ受けず、損傷部近傍に留まる傾向を示した。  
一方、床版のひび割れ発生領域の拡大に伴い、軸力が乱れる領域も拡大する傾向を示した。

### まとめおよび今後の課題

1. 損傷程度に関わらず床版にはひび割れが生じる傾向が得られたことから、より厳密な検討を行う場合には非線形解析を実施する必要があるものと思われる。
2. 横構・対傾構は一部非線形領域に達する部材はあったが、ほとんどの部材は弾性範囲であったことから、非線形解析を実施する際には横構・対傾構を弾性材料としてモデル化してもその影響度は少ないものと思われる。
3. 本検討では「鋼部材の亀裂の進展」は考慮していないため、主桁ウェブの亀裂先端が塑性化しているが、亀裂進展を考慮した場合、非線形挙動が変化することが予測される。