

鋼桁橋の線形リダンダンシーに関するケーススタディ

CASE STUDY OF LINER REDUNDANCY FOR I SECTION STEEL GIRDER BRIDGE

加藤修* , 岩崎英治** , 日向優裕*** , 三木英二****

藤野明義***** , 吉岡勉***** , 奥井義昭*****

Osamu KATO, Eiji IWASAKI, Masahiro HIMUKAI, Eiji MIKI
Akiyoshi FUJINO, Tsutomu YOSHIOKA and Yoshiaki OKUI

ABSTRACT In this paper, behavior of steel girder bridge after serious damage is studied. Obtaining results are follows: Possibility of collapse of multi-girders bridge is low, even if main girder is damaged and the slab plate is a healthy. Damage of inner girder is not serious compared to the damage of outer girder. On the other hand, possibility of collapse of two-girders bridge is high when it compare to the multi-girders bridge. In particular, there is this tendency to simply-supported bridge. However, future problem is that how do we evaluate multi-damaged bridge to girder and slab.

KEYWORDS : 鋼桁橋, リダンダンシー, FEM 解析

I section steel girder bridge, redundancy, FEM analysis

1. まえがき

近年、構造物の崩壊や重要部材の破断事例を受けて、構造物の限界または冗長性を明らかにすることが求められている。既に、一部のトラス橋¹⁾を中心とした検討が進められている一方、桁橋においては幾つかの研究報告²⁾³⁾⁴⁾はあるがトラス橋ほど研究事例は充実していない。しかしながら、桁橋においても重大損傷が発生した事例⁵⁾⁶⁾は存在し、近年国内では辺野喜橋⁷⁾のように鋼桁橋の落橋の事例も存在する。そこで本検討では、鋼桁橋のリダンダンシーに着目した静的な線形 FEM 解析を実施することによって、重大損傷発生後の鋼桁橋の挙動を検討することを目的とする。

2. 対象橋梁

連続桁の対象橋梁を図-1~2 に示す。このほか、連続桁の側径間と同じ支間を有する単純桁も対象とする。主桁に使用する鋼材は SM490Y 相当 ($\sigma_y=355\text{N/mm}^2$) とする。多主桁橋の床版は RC 床版 ($t=230\text{mm}$, $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$)、2 主桁橋の床版は PRC 床版 ($t=300\text{mm}$, $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$) とする。両橋共に概略設計を実施し、構造が成り立つことを確認している。

*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 3-7-10)

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

***工修 川田工業(株) 鋼構造事業部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

****工修 (株)横河ブリッジ 橋梁営業本部 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27)

*****工修 (株)横河技術情報 システム部 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27-1)

*****工博 大日本コンサルタント(株) 技術部 (〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央 1-6-35)

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

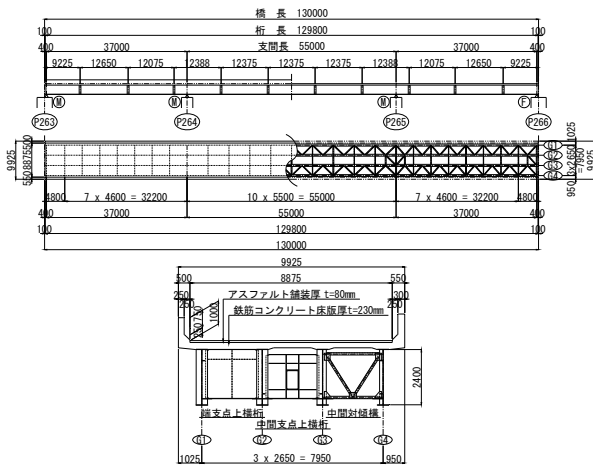


図-1 3径間連続非合成4主鋼桁橋

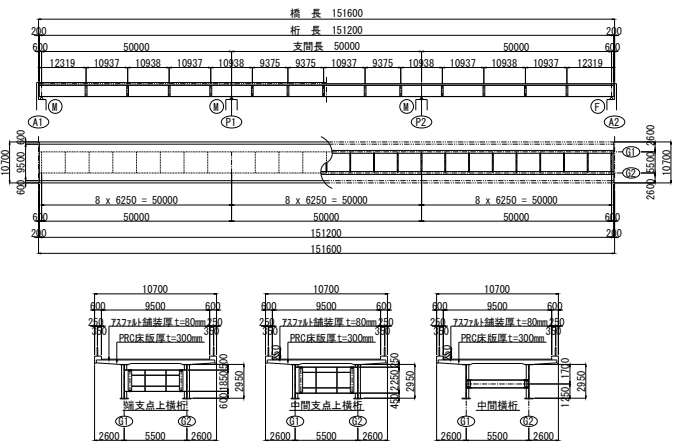


図-2 3径間連続合成2主鋼桁橋

3. 解析概要

想定した主桁の損傷を図-3、損傷の種類を表-1に示す。損傷事例を参考に、腐食(①・⑦)・疲労損傷(②～⑥)を合計7箇所想定した。なお検討の前提として、損傷は主桁の鋼部材のみに与え、損傷を与えた部分以外はすべて健全とする。着目は第1径間とする。

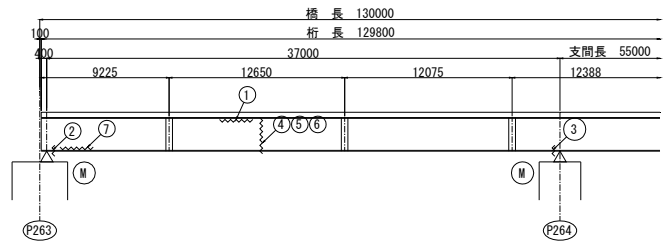


図-3 主桁の損傷位置(多主桁橋)

表-1 主桁の損傷部位

- | | |
|---|---------------------|
| ① | 上フランジと腹板との溶接部の腐食 |
| ② | 下フランジのき裂(端支点) |
| ③ | 下フランジのき裂(中間支点) |
| ④ | 腹板のき裂(下半分) |
| ⑤ | 腹板のき裂(下半分)+下フランジのき裂 |
| ⑥ | 腹板のき裂(全部)+下フランジのき裂 |
| ⑦ | 下フランジと腹板との溶接部の腐食 |

剛なずれ止め・対傾構・横構は梁要素でモデル化し、それ以外の部材はシェル要素にてモデル化する。支点上の垂直補剛材はモデル化するが、WEBの水平・垂直補剛材(格点部を含む)は省略する。スラブアンカーによる主桁と床版との合成効果を考慮することにより、たわみが減少することが報告されていることから⁸⁾、本解析では合成桁として解析を行う。故に、床版硬化前の荷重(合成前死荷重)は鋼断面、床版硬化後の荷重(後死荷重+活荷重)は合成断面で抵抗させるようモデル化する。活荷重は1.0倍のL荷重(B活荷重)としP1荷重は損傷部位直上に载荷させる。影響線を考慮しP2荷重は側径間のみ载荷する。鋼材破断に伴う衝撃は、本検討においては考慮しない。

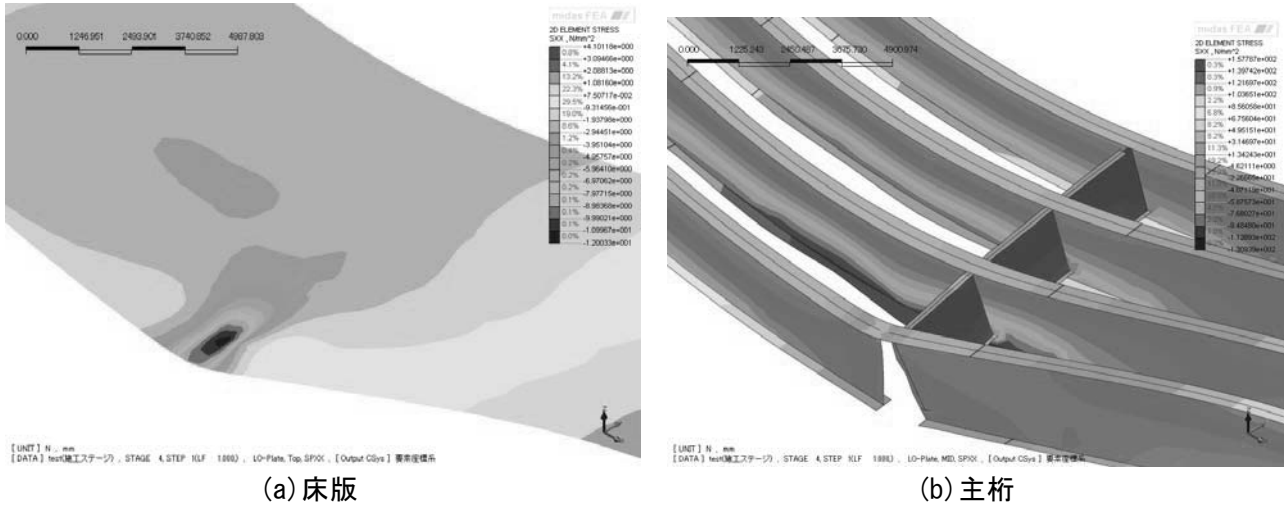
4. 解析結果

(1) 多主桁橋(G4桁に損傷を与えた場合)

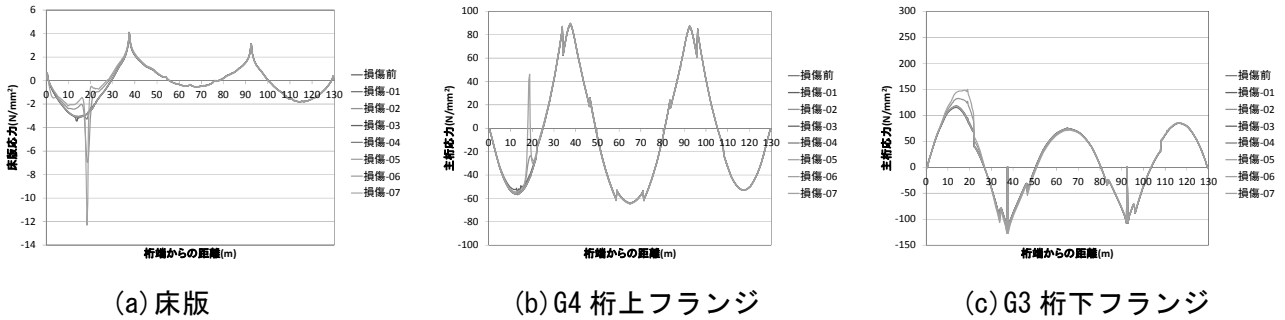
図-4(a)は、連続桁のG4桁に損傷⑥を与えたときの床版上面のコンター図であり、図-4(b)は、連続桁のG4桁に損傷⑥を与えたときの主桁のコンター図である。これより、主桁損傷部の床版上面には局所的に大きな圧縮応力が作用することが確認された。鋼材は降伏応力度(355N/mm²)に達するような応力は確認されず、G3桁下フランジに発生応力が比較的集まる傾向が確認された。

連続桁のG4桁に損傷を与えた場合、図-5(a)より、床版に大きな影響を与える損傷は、損傷⑤・⑥のみであり、それ以外はほとんど影響がないことが確認された。図-5(b)より、概ねG4桁に作用する上フランジの最大応力は、損傷前に比べて同等かもしくは低下していることが確認できる。一方で図-5(c)より、G3桁の下フランジの応力が増となっていることが確認できる。これはG4桁に損傷を与えたことによって、局部的にはあるが剛性が著しく低下したために力の再配分が行われ、G4桁に対しては作用力が小さくなったためと考えられる。一方隣接であるG3桁は、G4桁の作用力が小さくなった分を補うように増加したと考えられる。

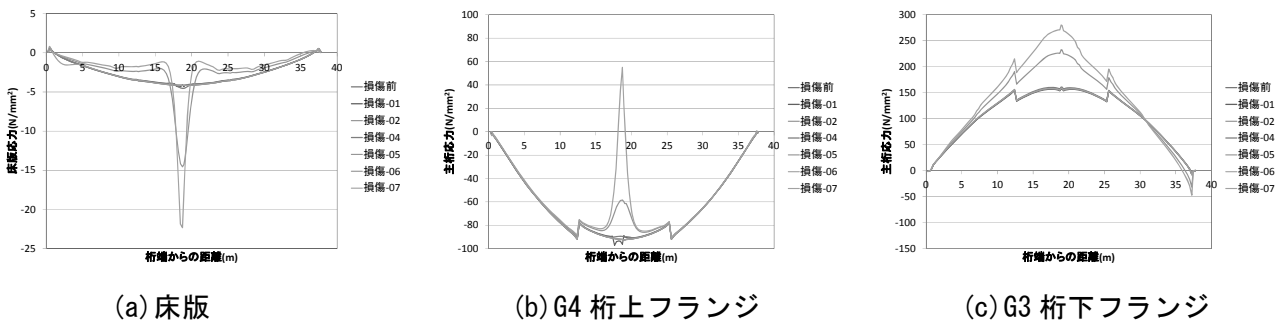
単純桁の G4 桁に損傷を与えた場合、図-6(a)～(c)より、床版・主桁の発生応力は、連続桁の場合と同様の傾向であることが確認された。しかし表-2 より、損傷⑤・⑥における床版のピーク応力に着目すると、連続桁よりも単純桁の発生応力が大きい。よって同じ損傷であっても、連続桁よりも単純桁の方が影響は大きいと判断できる。



(a) 床版 (b) 主桁
図-4 3 径間連続非合成 4 主桁橋における主桁損傷時(G4)のカウンター図



(a) 床版 (b) G4 桁上フランジ (c) G3 桁下フランジ
図-5 3 径間連続非合成 4 主桁橋における G4 主桁損傷時の応力度



(a) 床版 (b) G4 桁上フランジ (c) G3 桁下フランジ
図-6 単純非合成 4 主桁橋における G4 主桁損傷時の応力度
表-2 非合成 4 主桁橋における G4 主桁損傷時の最大応力度

(単位: N/mm²)

| | 床版応力 | | G4上フランジ応力 | | G4下フランジ応力 | | G3下フランジ応力 | | |
|------|-------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|
| | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | |
| 損傷前 | -3.11 | -4.16 | -56.32 | -92.62 | 119.50 | 158.10 | 117.00 | 158.60 | |
| 損傷-① | -3.45 | -4.34 | -56.91 | -97.17 | 115.50 | 156.20 | 115.40 | 157.30 | |
| 損傷-② | -3.11 | -4.16 | -56.32 | -92.62 | 119.40 | — | 117.00 | 158.60 | |
| 損傷-③ | -3.11 | — | -56.32 | — | 119.50 | 158.10 | 117.10 | — | |
| 損傷-④ | -3.28 | -4.55 | -56.25 | -91.91 | 173.60 | 219.40 | 118.40 | 161.00 | |
| 損傷-⑤ | -6.96 | -14.55 | -55.34 | -90.63 | 92.41 | 105.90 | 132.20 | 232.90 | |
| 損傷-⑥ | 最大応力 | -12.30 | -22.33 | -54.34 | -90.62 | 76.75 | 73.98 | 149.60 | 280.20 |
| | 損傷部 | — | — | 46.18 | 54.99 | — | — | — | — |
| 損傷-⑦ | -3.10 | -4.15 | -56.30 | -92.61 | 118.70 | 157.80 | 117.30 | 158.60 | |

(2) 多主桁橋(G3 桁に損傷を与えた場合)

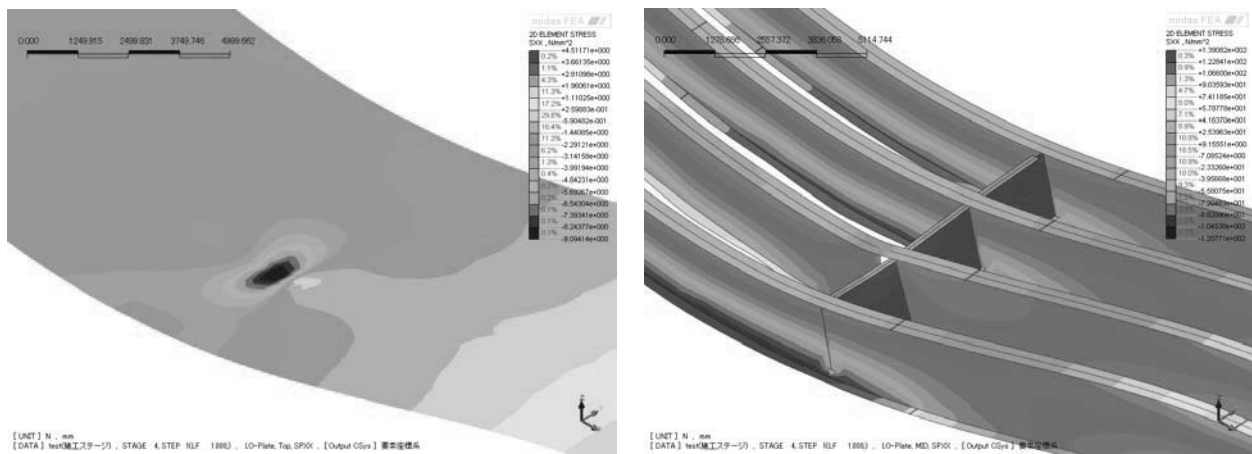
図-7(a)は、連続桁のG3桁に損傷⑥を与えたときの床版上面のコンター図であり、図-7(b)は、連続桁のG3桁に損傷⑥を与えたときの主桁のコンター図である。G4桁に損傷を与えた場合と同様、主桁損傷部の床版上面には局所的に大きな圧縮応力が作用することが確認された。鋼材は降伏応力度(355N/mm²)に達するような応力は確認されず、G1・G2・G4桁下フランジにはほぼ均等に応力が作用していることが確認された。

連続桁のG3桁に損傷を与えた場合、図-8(a)より、床版に大きな影響を与える損傷は、損傷⑤・⑥のみであり、それ以外はほとんど影響がないことが確認された。図-8(b)より、概ねG3桁に作用する上フランジの最大応力は損傷前に比べて同等か、もしくは低下していることが確認できる。一方で、図-8(c)より、G4桁の下フランジの応力が増となっていることが確認できる。これは、G4桁に損傷を与えたときと同様の傾向である。

単純桁のG3桁に損傷を与えた場合、図-9(a)～(c)より、床版・主桁の発生応力はG4桁に損傷を与えた場合かつ、連続桁の場合と同様の傾向であることが確認された。また表-3より、床版のピーク応力に着目すると、発生応力はG4桁に損傷を与えた場合と同様、連続桁よりも単純桁の発生応力が大きいため、連続桁よりも単純桁の方が影響は大きいと判断できる。

図-4(b)と図-7(b)を比較すると、図-4(b)はG4桁の隣接であるG3桁に集中的に応力が作用しているのに対し、図-7(b)はG3桁以外のすべての桁の下フランジに、ほぼ均等に応力が作用している。これはG4桁に隣接する主桁が1本であるのに対し、G3桁に隣接する主桁が複数本あることから、力が均等に分配されたためと考える。よってG3桁に損傷を与えた場合、G4桁に損傷を与えた場合と比較して隣接する主桁による補完性が高いと考えられる。

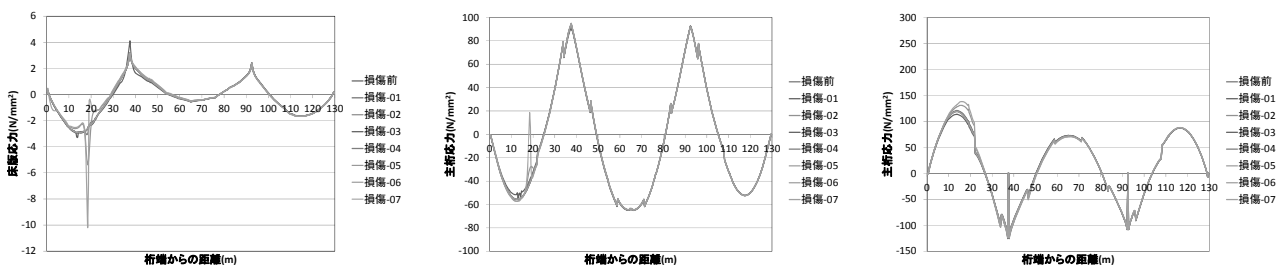
以上により多主桁橋においては、外桁・中桁間わず1本の主桁に重大損傷が発生しても床版が健全な状態であれば主桁の補完性が高く、比較的危険な状況になりにくいと考えられる。



(a) 床版

(b) 主桁

図-7 3径間連続非合成4主桁橋における主桁損傷時(G3)のコンター図



(a) 床版

(b) G3 桁上フランジ

(c) G4 桁下フランジ

図-8 3径間連続非合成4主桁橋におけるG3主桁損傷時の応力度

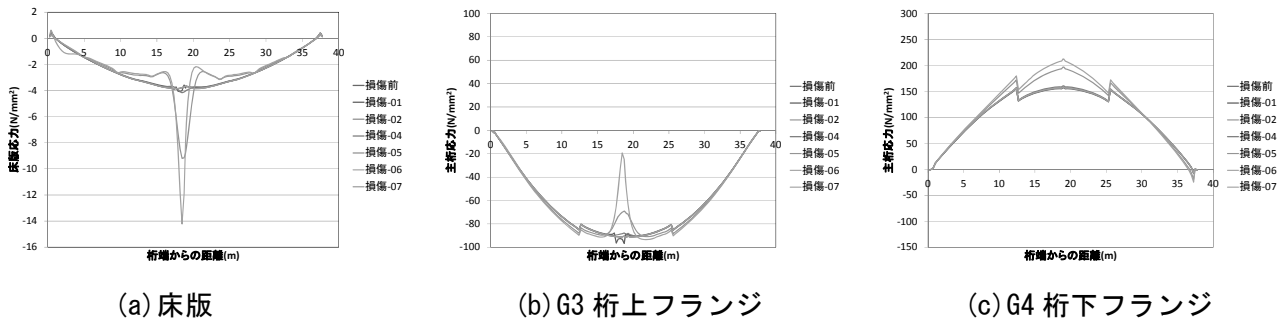


図-9 単純非合成4主鉄桁橋におけるG3主桁損傷時の応力度
表-3 非合成4主鉄桁橋におけるG3主桁損傷時の最大応力度

(単位: N/mm²)

| | 床版応力 | | G3上フランジ応力 | | G3下フランジ応力 | | G4下フランジ応力 | | |
|------|-------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|
| | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | |
| 損傷前 | -2.92 | -3.86 | -55.52 | -91.35 | 117.00 | 158.10 | 119.50 | 158.10 | |
| 損傷-① | -3.30 | -4.07 | -54.97 | -96.69 | 112.70 | 156.80 | 113.90 | 156.80 | |
| 損傷-② | -2.92 | -3.86 | -55.52 | -91.35 | 117.00 | — | 119.50 | 158.10 | |
| 損傷-③ | -2.95 | — | -55.65 | — | 117.70 | 158.10 | 121.10 | — | |
| 損傷-④ | -3.08 | -4.16 | -55.69 | -90.56 | 161.20 | 160.60 | 120.50 | 160.60 | |
| 損傷-⑤ | -5.38 | -9.19 | -57.16 | -90.92 | 96.45 | 196.90 | 130.90 | 196.90 | |
| 損傷-⑥ | 最大応力 | -10.20 | -14.22 | -57.30 | -93.45 | 86.34 | 212.30 | 138.10 | 212.30 |
| | 損傷部 | — | — | 18.68 | — | — | — | — | — |
| 損傷-⑦ | -2.91 | -3.85 | -55.56 | -91.36 | 116.30 | 158.10 | 119.70 | 158.10 | |

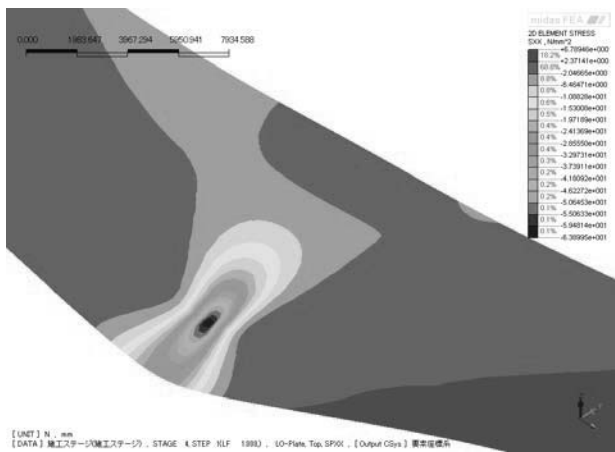
(3) 2主桁橋

図-10(a)は、連続桁のG2桁に損傷⑥を与えたときの床版上面のコンター図であり、図-10(b)は、連続桁のG2桁に損傷⑥を与えたときの主桁のコンター図である。これより、主桁損傷部の床版上面には局所的に非常に大きな圧縮応力が作用することが確認され、鋼材は局所的にではあるが降伏応力度(355N/mm²)に達するような応力が確認された。

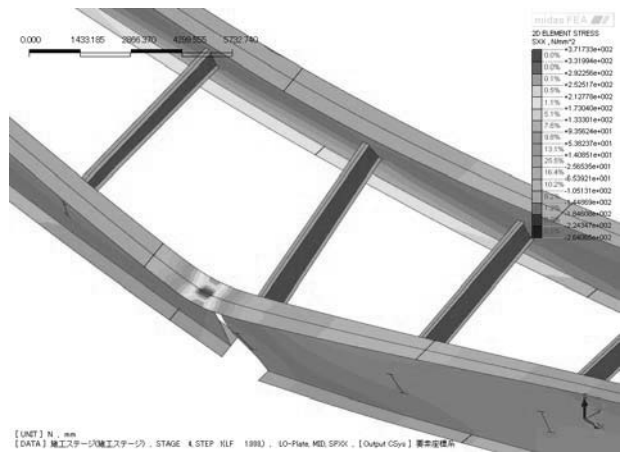
連続桁のG2桁に損傷を与えた場合、図-11(a)より、床版に大きな影響を与える損傷は、損傷⑤・⑥のみであり、それ以外はほとんど影響がないことが確認された。図-11(b)より、概ねG2桁に作用する上フランジの最大応力は損傷前に比べて同等か、もしくは低下していることが確認できる。一方で、図-11(c)より、G1桁の下フランジの応力が増となっていることが確認できる。これは、多主桁橋に損傷を与えたときと同様の傾向である。

単純桁のG2桁に損傷を与えた場合、図-12(a)～(c)より、床版・上フランジの発生応力は、連続桁の場合と同様の傾向であることが確認された。下フランジの発生応力は、連続桁においては損傷部位近辺に発生応力が集中する一方で、単純桁においては広範囲にわたって発生応力が増加することが確認された。これは、橋梁全体が平面的に回転する挙動が確認され、固定点側の水平変位が拘束されていることもあり、損傷⑤・⑥では損傷部から固定点側のG1桁下フランジに引張力が作用し、広い範囲に影響を及ぼしているためである。

表-4より、損傷⑤・⑥における床版のピーク応力に着目すると多主桁橋同様、連続桁よりも単純桁の発生応力が大きいため、連続桁よりも単純桁の方が影響は大きいと判断できる。また、連続桁・単純桁共にコンクリートの設計基準強度を大幅に上回る応力が確認されることから、局所的にはあるが床版が機能していない可能性がある。よって多主桁橋に比べて2主桁橋は、重大損傷が発生した場合比較的危険な状況になりやすいと言える。特に2主桁橋の単純桁は最も危険性が高いと言える。しかしながら、極一部の部材の耐力が極端に低下しても橋梁全体としての耐荷力は有しているため、重大損傷の発生と同時に即落橋に至る可能性は低いと考えられる。

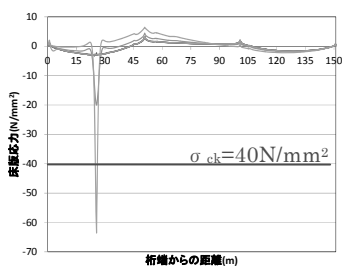


(a) 床版

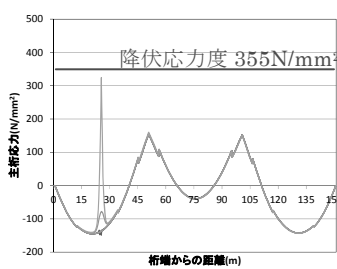


(b) 主桁

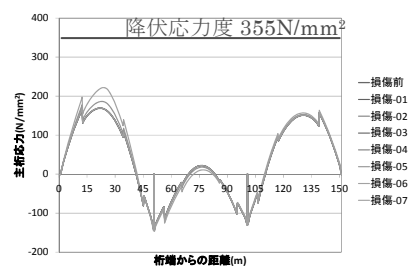
図-10 3径間連続合成2主桁桁橋における主桁損傷時(G2)のコンター図



(a) 床版

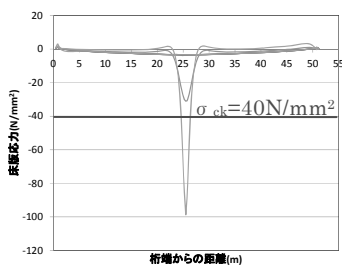


(b) G2 桁上フランジ

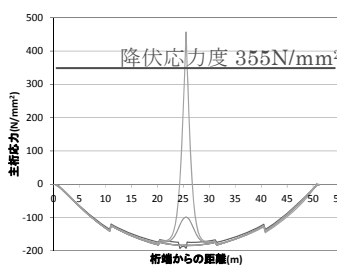


(c) G1 桁下フランジ

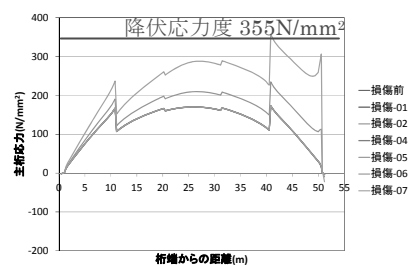
図-11 3径間連続合成2主桁桁橋におけるG2主桁損傷時の応力度



(a) 床版



(b) G2 桁上フランジ



(c) G1 桁下フランジ

図-12 単純合成2主桁桁橋におけるG2主桁損傷時の応力度

表-4 合成2主桁桁橋におけるG2主桁損傷時の最大応力度

(単位: N/mm²)

| | 床版応力 | | G2上フランジ応力 | | G2下フランジ応力 | | G1下フランジ応力 | | |
|------|--------|--------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|--------|--------|
| | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | 連続桁 | 単純桁 | |
| 損傷前 | -2.94 | -3.42 | -145.30 | -184.60 | 191.80 | 185.70 | 169.20 | 173.10 | |
| 損傷-① | -3.35 | -3.80 | -149.00 | -193.00 | 188.00 | 179.60 | 168.70 | 173.20 | |
| 損傷-② | -2.94 | -3.42 | -145.30 | -184.60 | 191.90 | — | 169.20 | 173.10 | |
| 損傷-③ | -2.94 | — | -145.30 | — | 191.90 | 185.70 | 169.20 | — | |
| 損傷-④ | -2.94 | -3.71 | -145.30 | -183.20 | 252.00 | 221.30 | 169.50 | 173.60 | |
| 損傷-⑤ | -20.02 | -31.06 | -143.00 | -180.90 | 162.80 | 156.10 | 186.40 | 234.90 | |
| 損傷-⑥ | 最大応力 | -63.57 | -98.67 | -140.60 | -179.50 | 115.30 | 106.00 | 221.90 | 357.60 |
| | 損傷部 | — | — | 324.50 | 457.00 | — | — | — | — |
| 損傷-⑦ | -2.94 | -3.41 | -145.30 | -184.60 | 191.60 | 185.60 | 169.30 | 173.40 | |

5. まとめ

本検討では、鋼桁橋のリダンダンシーに着目した静的な線形 FEM 解析を実施することによって、重大損傷発生後の挙動を検討した。主桁に損傷が発生した場合、多主桁橋においては損傷後において

も主桁フランジ応力に余裕が確認できるため、落橋に至る可能性は低いと考えられるが、連続桁に比べて単純桁の方が落橋に至る可能性は高いと考える。なお、中桁が損傷を受けた場合は、同じ損傷であっても外桁が損傷を受けた場合と比較して危険な状況にはなりにくいと考えられる。

2主桁橋においては、損傷の度合いによっては床版が局部的に機能しない恐れがあり、また鋼材は局部的に降伏応力度に達するような応力が確認できることから、落橋に至る可能性が多主桁橋に比べて高いと考えられる。特に2主桁橋の単純桁は最も可能性が高いと判断できる。しかしながら、極一部の部材の耐力が極端に低下しても橋梁全体としての耐荷力は有しているため、重大損傷発生直後に落橋に至る可能性は低いと考えられる。なお2主桁橋は合成桁を対象としたことから、非合成桁に比べてフランジの耐力が低い。故に、非合成桁の2主桁橋の場合は、合成桁の場合よりも主桁の耐力には多少余裕があると推測する。

何れのケースにおいても、床版が作用力に対して十分抵抗できるような状態であれば、主桁に損傷が発生しても床版が抵抗するので落橋に至るケースは少ないと言える。しかし床版は、輪荷重が直接作用する過酷な条件で使用されることから劣化が表れやすい部位でもある。また経年劣化等により鋼桁の損傷部位が一か所のみとは限らない。よって、床版を含む複数の損傷が同時に作用する場合、如何に評価すべきかが今後の課題と言える。

謝辞

本検討は土木学会平成25年度重点研究課題の研究助成を受けて、土木学会 鋼構造委員会 鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会の検討成果の一部を取りまとめたものである。本検討を進める上で貴重なご意見を頂きました委員の皆様に対し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、永谷ら：我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討 土木学会論文集 A, Vol. 65, No2, pp.410-425, 2009.5
- 2) 遠藤・依田：合成2主桁橋のリダンダンシーに関する基礎的考察 第35回土木学会関東支部技術研究発表会
- 3) 片山ら：初期損傷を有する合成2主桁橋のリダンダンシーに関する基礎的研究 第36回土木学会関東支部技術研究発表会
- 4) 村上ら：鈹桁橋のリダンダンシーに関する一考察 第30回日本道路会議
- 5) www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf
- 6) LEHIGH, FHWA, LICHTENSTEIN : Hoan Bridge Failure Analysis, <http://edu.docdat.com/docs/250/index-631881.html>
- 7) 例えば、インフラ事故, 日経BP社, 2013年10月
- 8) 中島・溝江：活荷重レベルにおける連続非合成桁の挙動に関する一考察 土木学会論文集 No. 626/I-48 pp.163-172, 1999.7

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

鋼鈹桁橋の線形リダンダンシーに関するケーススタディ



2014年8月4日
 (株)ニューブリッジ 加藤 修

1

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

目的

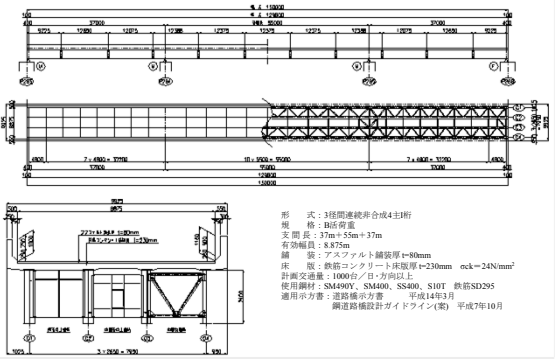
- 近年、構造物の崩壊や重要部材の破断事例を受けて、構造物の限界または冗長性を明らかにすることが求められている。
- 桁橋は、トラス橋ほど研究事例は充実していない。
- 桁橋においても重大損傷が発生した事例は存在する。
- 重大損傷発生後の鋼鈹桁橋の挙動を検討する。

支間中央での主桁の損傷事例
桁端腐食が生じた例

2

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




対象橋梁その1 3径間連続非合成4主鈹桁橋

3

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

主桁の損傷部位(連続多主鈹橋)

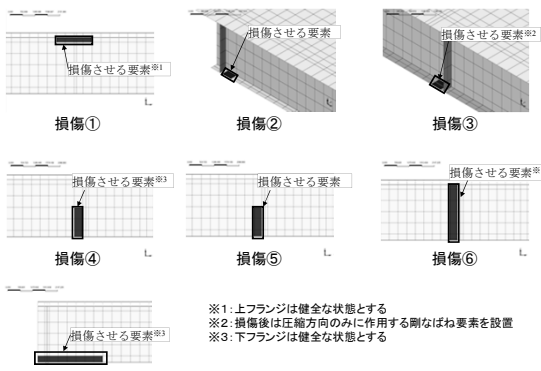


- ① 上フランジと腹板との溶接部の腐食
- ② 下フランジのき裂(端支点)
- ③ 下フランジのき裂(中間支点)
- ④ 腹板のき裂(下半分)
- ⑤ 腹板のき裂(下半分)+下フランジのき裂
- ⑥ 腹板のき裂(全部)+下フランジのき裂
- ⑦ 下フランジと腹板との溶接部の腐食

4

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

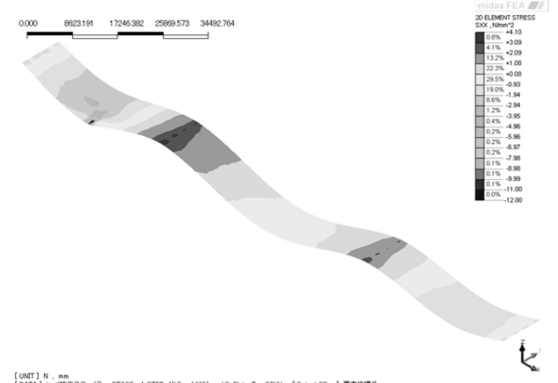
主桁損傷部位のモデル化



※1: 上フランジは健全な状態とする
 ※2: 損傷後は圧縮方向のみに作用する剛なばね要素を配置
 ※3: 下フランジは健全な状態とする

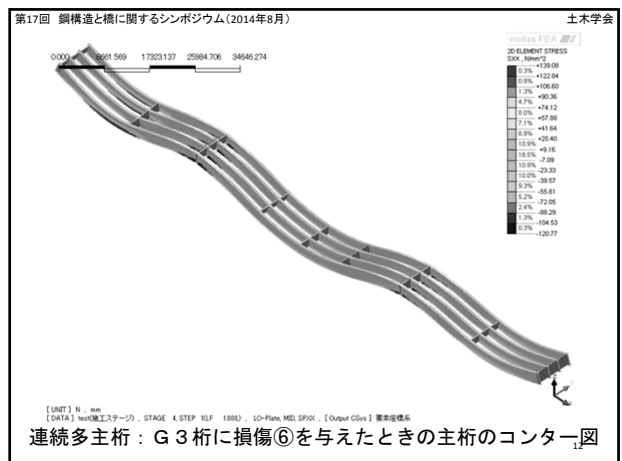
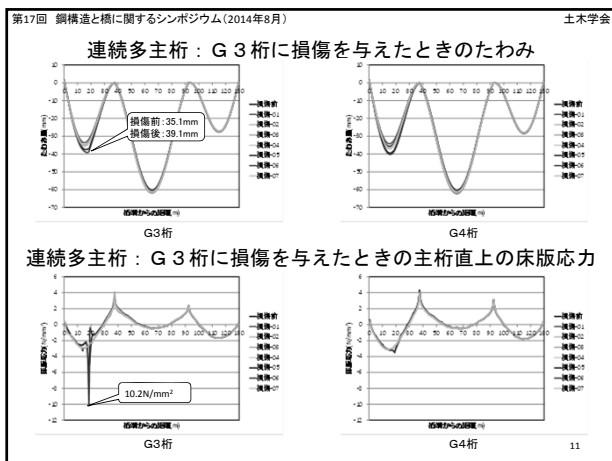
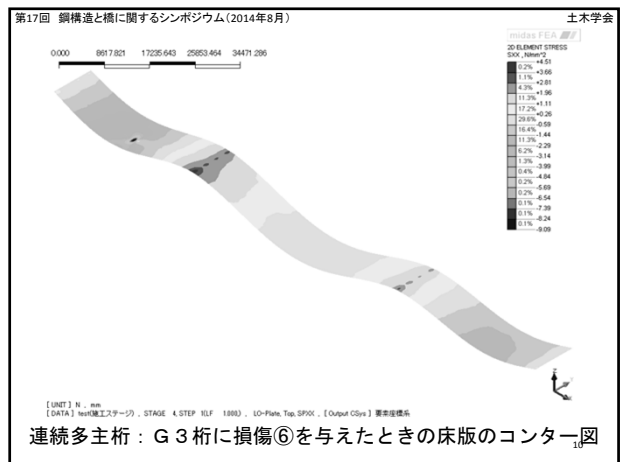
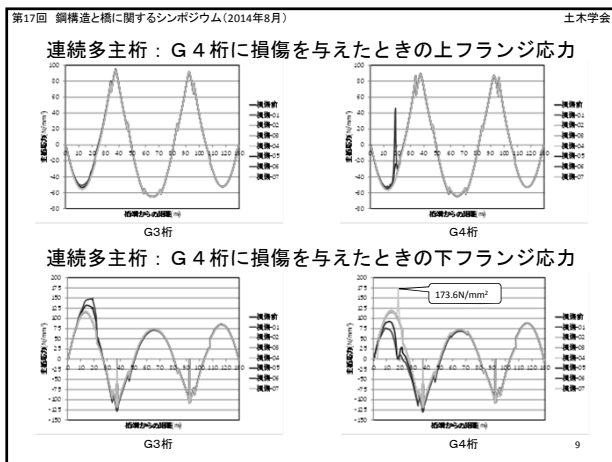
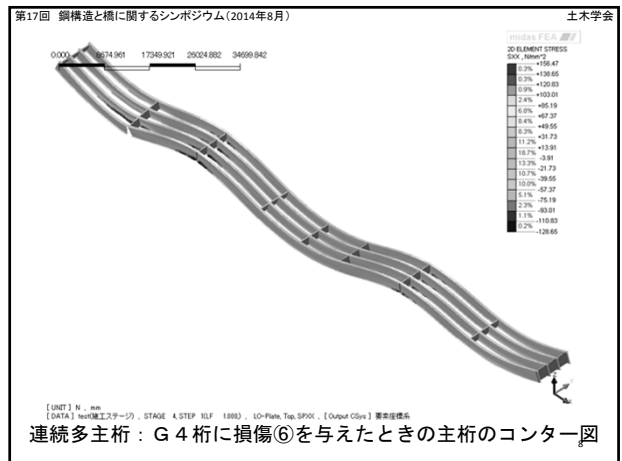
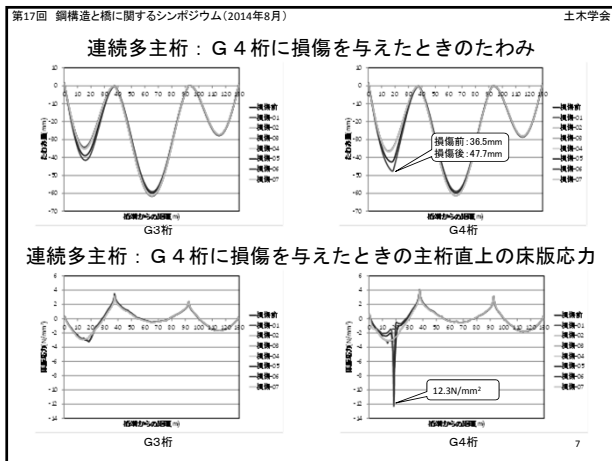
5

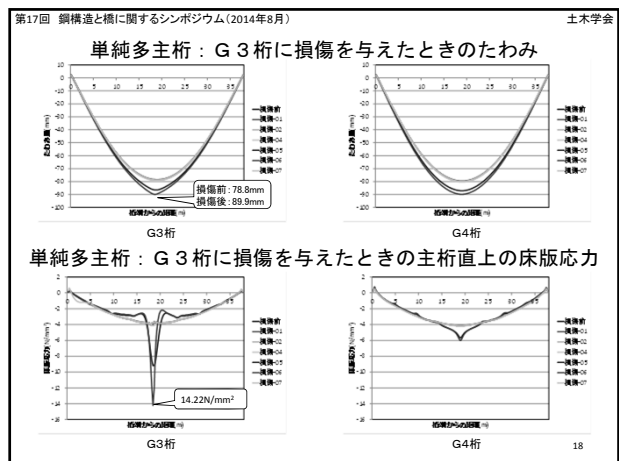
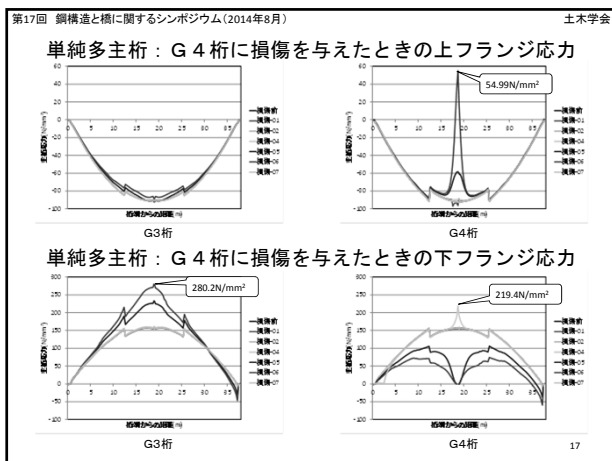
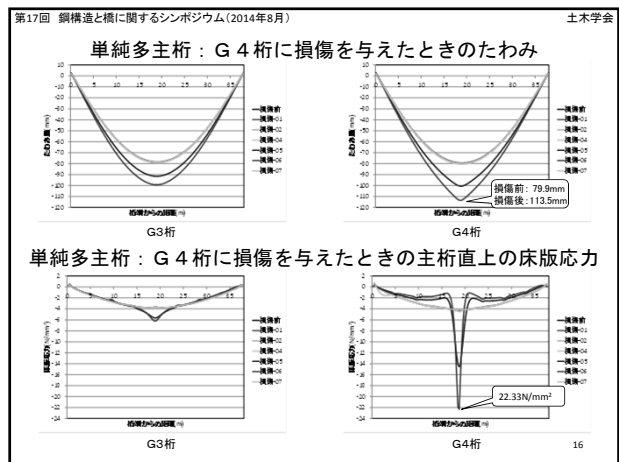
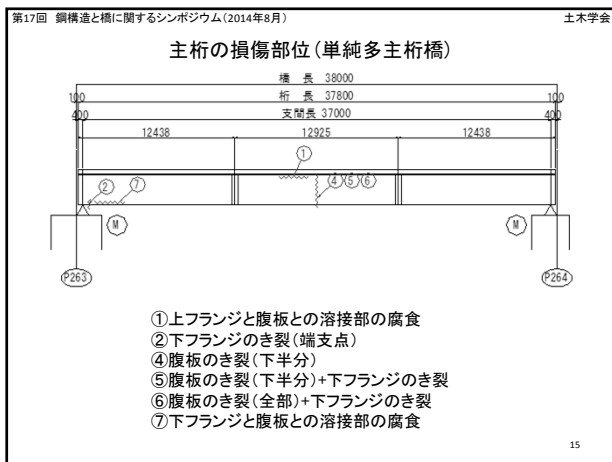
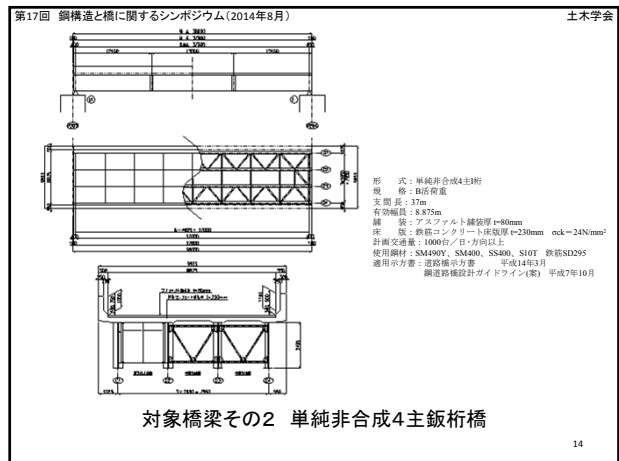
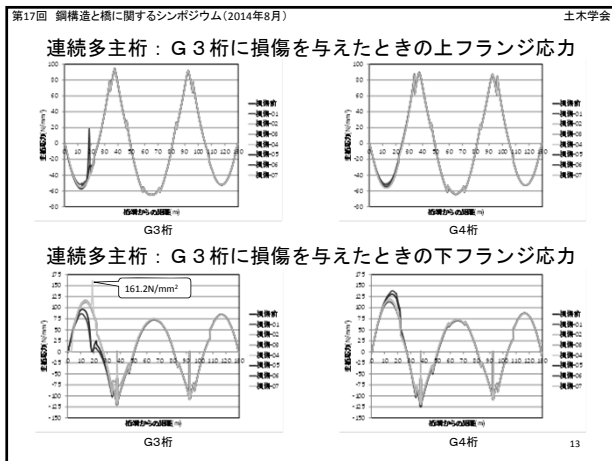
第17回 鋼構造と橋に関するシンポジウム(2014年8月) 土木学会

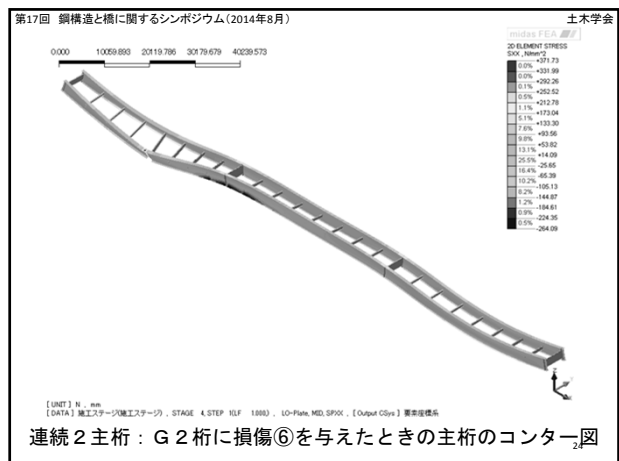
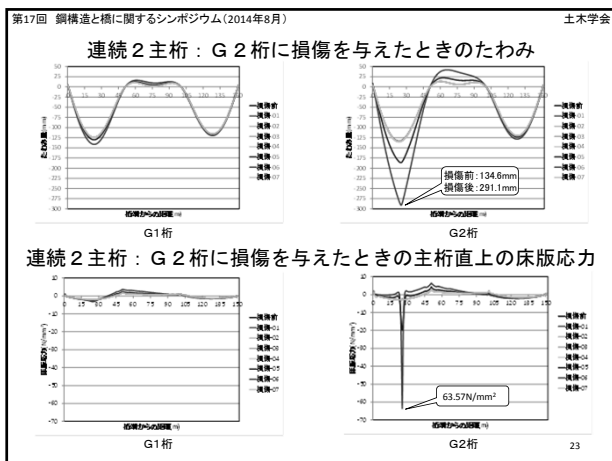
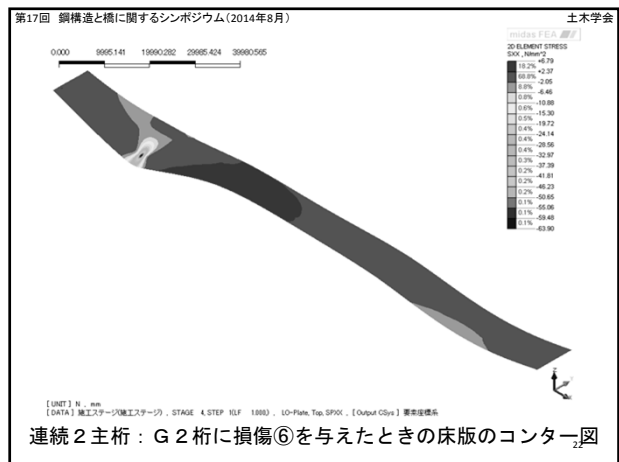
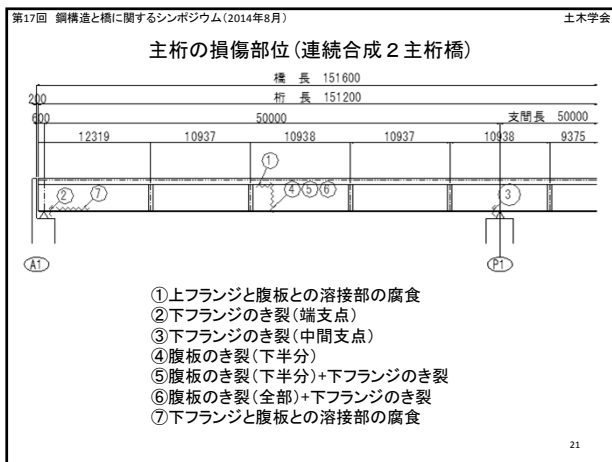
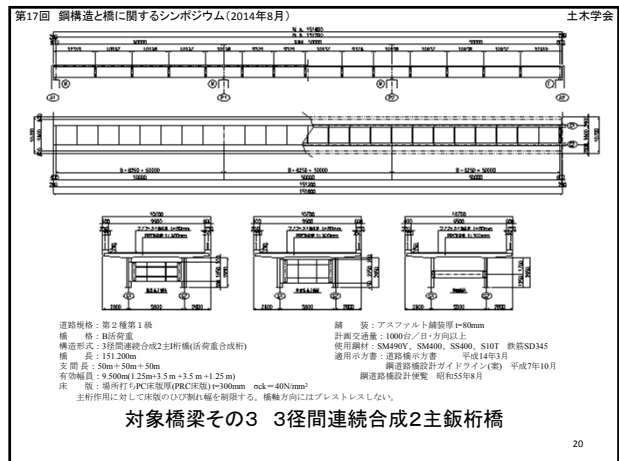
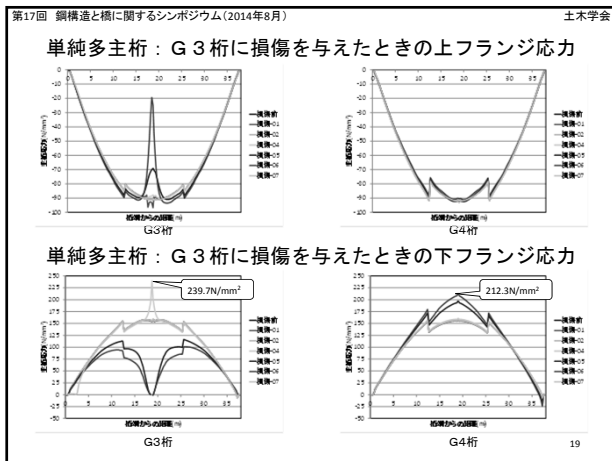


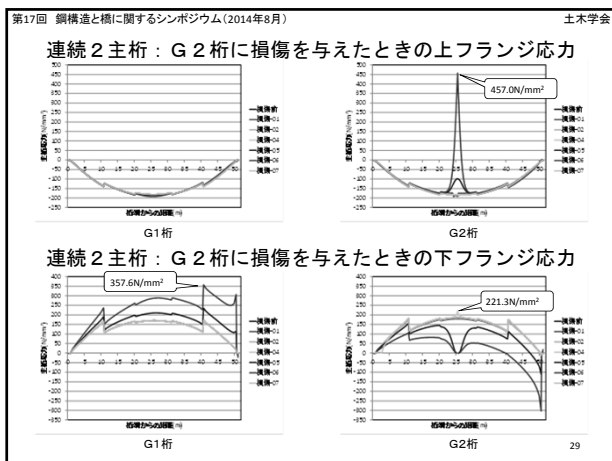
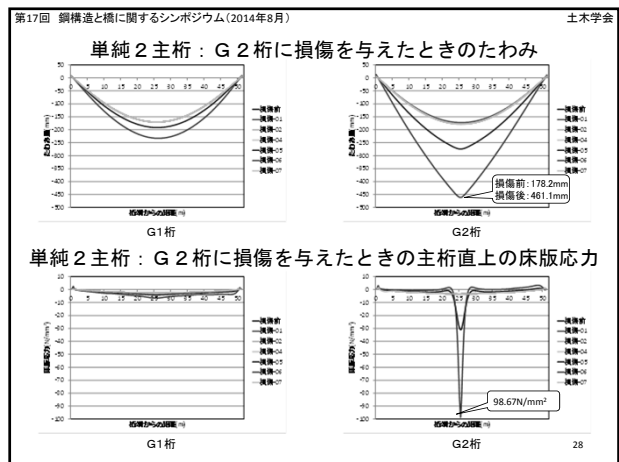
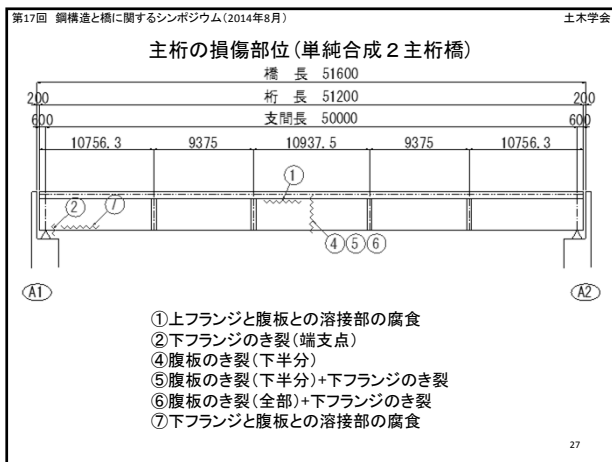
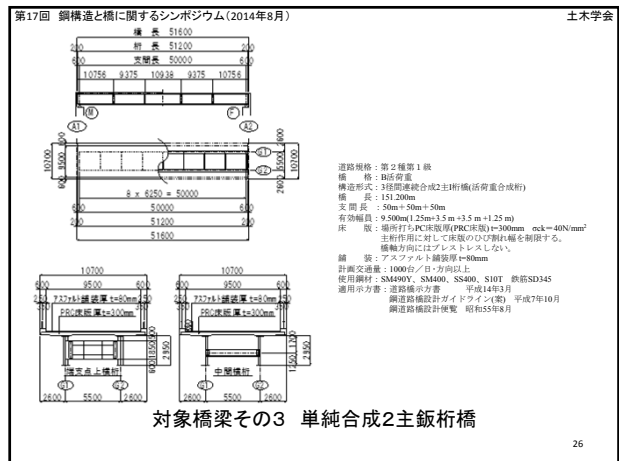
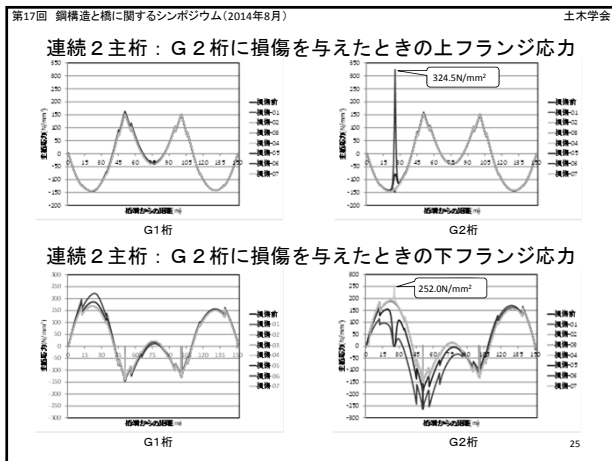
連続多主鈹: G 4 桁に損傷⑥を与えたときの床版のコンター図

6









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

まとめと今後の課題

- 多主桁橋は損傷後においても落橋に至る可能性は低い。
- 多主桁橋の内桁が損傷を受けた場合、外桁が損傷を受けた場合と比較して危険な状況にはなりにくい。
- 2主桁橋は、床版が局部的に機能しない恐れがあり鋼材は局部的に降伏応力度に達する可能性がある。
- 2主桁橋の単純桁は最も落橋の可能性が高い。
- 床版が作用力に対して十分抵抗できるような状態であれば、落橋に至るケースは少ないと言える。
- 床版を含む複数の損傷が同時に作用する場合、如何に評価すべきかが今後の課題である。

30