

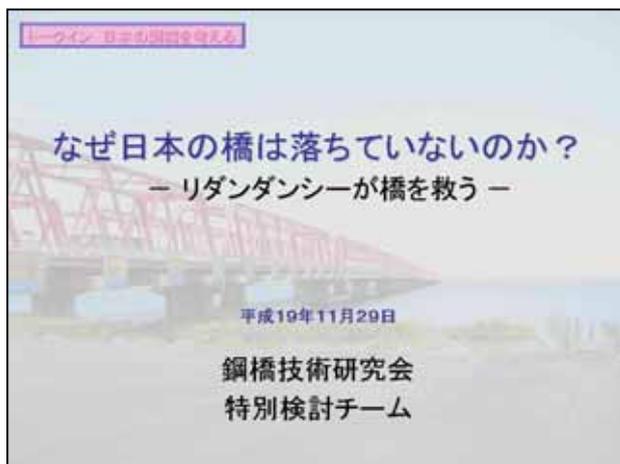
( 7 ). 「なぜ日本の橋は落ちていないのか? リダンダンシーが橋を救う」

鋼橋技術研究会特別検討チーム

リーダー 埼玉大学大学院理工学研究科 准教授 奥井 義昭  
(株)総合技術コンサルタント 明石 直光  
大日本コンサルタント(株) 平山 博  
(株)宮地鐵工所 永谷 秀樹  
川田工業(株) 宮森 雅之  
伊藤忠テクノソリューションズ(株) 小幡 泰弘  
伊藤忠テクノソリューションズ(株) 安田 昌宏  
(株)サクラダ 松田 岳憲  
(株)横河ブリッジ 石井 博典  
( : 発表者)

( 司会 )

それでは発表の最後になりますが、鋼橋技術研究会、特別検討チームからでございます。ここでちょっと私からこの特別検討チームの紹介をさせていただきます。鋼橋技術研究会でこのトークインの企画をした当初から、我々も技術的な何か情報発信ができないか、何か提案ができないか、というようなことを考えてまいりました。日ごろは鋼橋が好きな人間が設計とか、架設とか、そういう部会で活動を行っているんですが、今日のこの場には間に合わないということがありまして、研究会の中の設計部会、その部会長である埼玉大学の奥井先生をリーダーにして、8名の精鋭、中にはコンサルタント、橋梁メーカー、それから電算会社の中から8名の精鋭を募り、10月上旬より今日までの約2ヶ月間、勉強、検討してまいりました。扱ったものは、日本のトラス橋の2タイプ、代表なものとして、これをいじくり回してやろうとやっけてまいりました。



タイトルは、お手元のとおりに『なぜ日本の橋は落ちていないのか リダンダンシーが橋を救う』ということでございます。幸いにして日本の橋は落橋、亀裂は起こったけど橋は落ちてないということでございます。ただこの事実が、必然なのか、はたまたラッキーなだけの偶然なのか。ここら辺のところを今日の発表と共に皆さんと考えていきたいと思ひます。

それでは発表は特別チームを代表いたしまして、株式会社宮地鐵工所の永谷さんと、後半部分は株式会社サクラダの松田さん両名をお願いいたします。よろしくお願ひいたします。

(特別チーム：永谷)

ただいま、ご紹介いただきました、特別検討チームの永谷と申します。『なぜ日本の橋は落ちていないのか？ - リダンダンシーが橋を救う -』と題して発表させていただきます。

**特別検討チーム構成**

リーダー 奥井 義昭 埼玉大学大学院理工学研究科 准教授

明石 直光 株式会社 総合技術コンサルタント  
 平山 博 大日本コンサルタント 株式会社  
 永谷 秀樹 株式会社 宮地鐵工所  
 宮森 雅之 川田工業 株式会社  
 小橋 泰弘 伊藤忠テクノソリューションズ 株式会社  
 安田 昌宏 伊藤忠テクノソリューションズ 株式会社  
 松田 岳憲 株式会社 サクラダ  
 石井 博典 株式会社 横河ブリッジ

オブザーバー 越後 滋 川田工業 株式会社  
 高田 和彦 株式会社 横河ブリッジ

今回の特別検討チームの構成は、埼玉大学の奥井先生をリーダーといたしまして、こちらの精鋭とご紹介頂きましたメンバーで検討させていただきました。なお、オブザーバーとして、鋼橋技術研究会の越後さんと高田さんにもご指導を頂きました。今までの発表者の方々とは少し毛色が違いますが、実務者レベルの検討結果として報告させて頂きたいと思っております。

**検討の目的**

アメリカ ミネソタ州の落橋事故

> 部材の損傷により全体が崩壊



国内の木曾川橋、本荘大橋

> 斜材が破断したものの、大きな災害は免れる



> 損傷位置、構造の冗長性などの違いが崩壊に影響していると推測される  
 > 損傷部材と構造全体の崩壊との関連性を定量的に検証する必要がある

> リダンダンシー解析、非線形FEM解析を実施  
 フラクチャー クリティカル メンバーおよび構造全体の崩壊に対する安全性の検証

> 落橋の防止、合理的な維持管理に対する提言

今回の検討の目的を説明いたします。ミネソタ州の落橋事故では橋が崩壊したのに対して、国内の木曾川、本荘大橋については斜材が破断したものの落橋のような大きな災害は起きなかったことから、損傷位置と構造の冗長性が橋の崩壊に影響していると推測いたしました。そこで、損傷部材位置と構造全体の崩壊との関連性を、定量的に検証する必要があると考えました。そのため、本検討では、リダンダンシー解析と非線形 FEM 解析を実施

いたしました。フラクチャークリティカルメンバー (FCM) の検証と、構造全体の崩壊に対する安全性の検討をいたしました。そして、その結果から落橋の防止、合理的な維持管理に対する提案を多少させて頂きました。

**検討対象および検討フロー**

単純下路トラス  
(1960年設計:設計活荷重TL-20)

**STEP-1 リダンダンシー解析**

- ・3次元弾性FEM解析
- ・構造全体の安全性を評価
- ・フラクチャー クリティカル メンバー(FCM)の検証

・格点部モデル化の影響検討  
 斜材結合条件→ピン結合  
 →剛結

3径間連続上路トラス  
(1980年設計:設計活荷重TT-43)

**STEP-3 全体非線形解析**

- ・3次元弾性FEM解析
- ・終局状態の検証
- ・リダンダンシー解析の確認

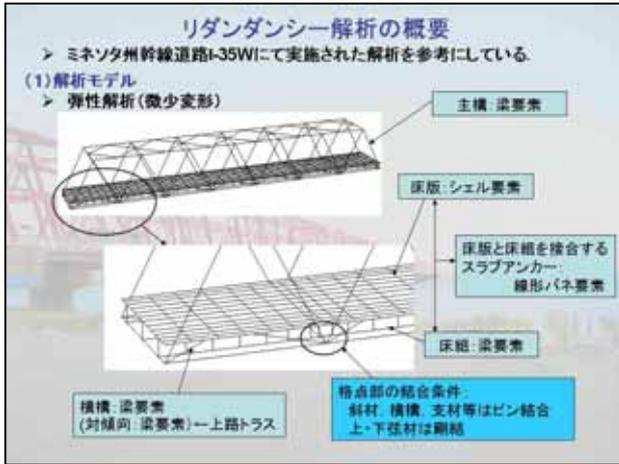
**STEP-2 格点部耐力検証**

- ・3次元弾性FEM解析
- ・格点部の安全性の確認

検討対象および検討フローについてご説明させていただきます。検討対象は、単純下路トラス (木曾川橋) と三径間連続上路トラスです。三径間連続上路トラスは 1980 年に TT43 に対応して設計されております。

まず、リダンダンシー解析を実施いたしました。こちらは、3次元弾性 F E M解析を用いて、構造全体の安全性を評価しております。さらに、そこからフラクチャークリティカルメンバー (FCM) の検証を行いました。なお、

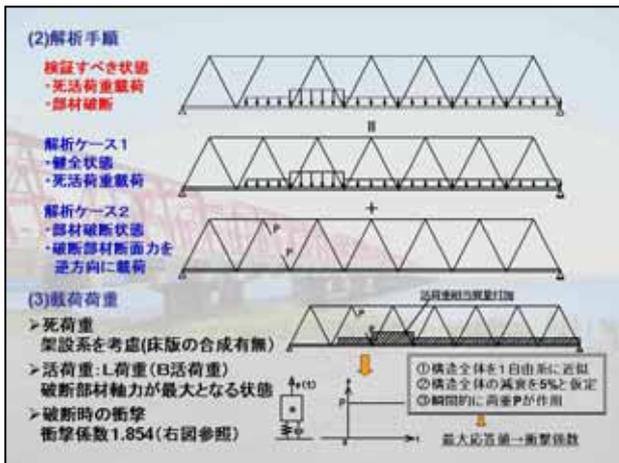
単純下路トラスでは、格点部のモデル化の解析結果への影響を検討するために、斜材の結合条件がピン結合、剛結合の2種類の場合について解析を実施しております。さらに、格点部の耐力検討を行っており、こちらは3次元弾塑性 FEM 解析を用いまして、単純下路トラスを対象として格点部の安全性を応力的に照査しております。最後に、三径間連続上路トラスを対象として3次元の弾塑性 FEM 解析を実施し、終局状態の検証とリダンダンシー解析結果の確認を行っております。



今までの説明に出ましたリダンダンシー解析ですが、こちらは日本であまり定着しておりません。そこで、今回実施したリダンダンシー解析の概要を説明させていただきます。ご存じの方もいらっしゃると思いますが、ミネソタ州の落橋したトラス橋においてリダンダンシー解析が実施されており、そちらを参考にしております。

解析モデルは図に示すように、主構と横構関係は梁要素、床版はシェル要素を用いてモデル化しております。

解析は弾性解析です。また、床組と床版を結合するスラブアンカーに関しては、既存の実験データから評価した線形バネ要素を用いてモデル化をしております。それから、解析での格点部の部材結合条件は、斜材、横構および支材等はピン結合、上下弦材は連続しているため剛結としております。図は単純下路トラスの解析モデルを示しておりますが、三径間連続上路トラスも同様の解析モデルを使用しております。



解析手順の概略を説明させていただきます。ある部材が破断した状態を解析的に再現するには、図に示す解析ケース1と解析ケース2の2つのモデルによる解析を実施し、その両者の結果を重ね合わせます。まず、健全な状態である解析ケース1において荷重を載荷し、破断する部材の発生断面力を算出します。つぎに、部材が破断した状態である解析ケース2において、破断した部材の両端に解析ケース1で算出された断面力を逆方向に開放するような形で載荷します。最後に、両解析による全部材の発生断面力の重ね合わせを行います。

載荷荷重は死荷重と活荷重とし、照査に用いる活荷重は明確な規定がないため、L 荷重の B 活荷重を載荷いたしました。また、特に部材が破断したときの衝撃を荷重として考慮しております。この衝撃荷重は、図に示すように橋梁全体を減衰 5% の 1 自由度の振動系に近似したモデルに衝

撃力を作用させた場合の最大応答値から求められた衝撃係数 1.854 を，解析ケース 2 の破断した状態の載荷荷重に乗じることにより考慮しております。

(4)部材照査

**作用軸力が引張の場合**

$$R = \left( \frac{P}{P_p} \right) + \left( \frac{M}{M_p} \right)_{op} + \left( \frac{M}{M_p} \right)_{cp}$$

注) 添字の op は面内，cp は面外を示す

P, M : 作用軸力, 作用曲げモーメント  
 P<sub>p</sub>, M<sub>p</sub> : 全塑性軸力, 全塑性曲げモーメント

**作用軸力が圧縮の場合**

$$R = \left( \frac{P}{P_c} \right) + \frac{1}{1 - (P/P_c)_{cp}} \cdot \left( \frac{M}{M_p} \right)_{cp} + \frac{1}{1 - (P/P_c)_{op}} \cdot \left( \frac{M}{M_p} \right)_{op}$$

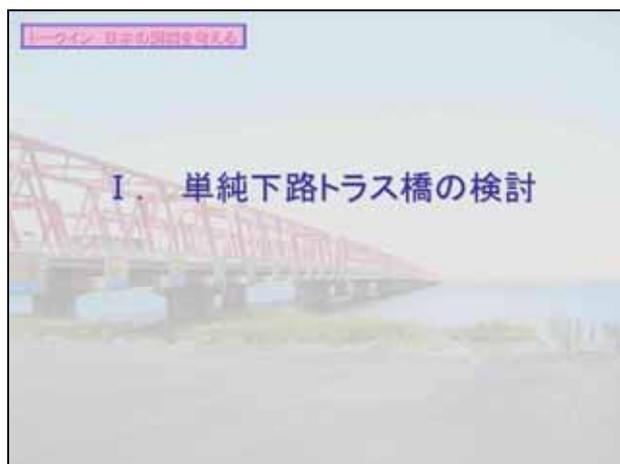
P, M : 作用軸力, 作用曲げモーメント  
 P<sub>c</sub> : 道示 3.2.11 に基づく，座屈を考慮した圧縮の終局強度  
 P<sub>p</sub> : オイラー座屈軸力  
 M<sub>p</sub> : 全塑性曲げモーメント

R > 1.0 で作用断面力が終局強度を超え，部材が破断すると判断

続きまして，リダンダンシー解析の部材の照査について説明いたします。部材の照査は図に示す 2 つの式より計算される R を用いて行っております。この R が 1.0 以上になった場合に作用断面力が終局強度を越えて部材が破断すると判断しております。

作用軸力が引張りの場合に関しては，作用断面力に対する抵抗力は全塑性軸力と全塑性曲モーメントを用いて図の上段の式で照査しております。また，作用軸力が圧縮の場合は，

図の下段の式を用いて軸力による付加曲モーメントを考慮して照査を行っており，軸圧縮強度に関しては道示の 3.2.1 に基づき算出し，抵抗曲げモーメントは全塑性曲モーメントです。この部材の照査は限界状態設計法を適用していると考えて頂いて結構です。

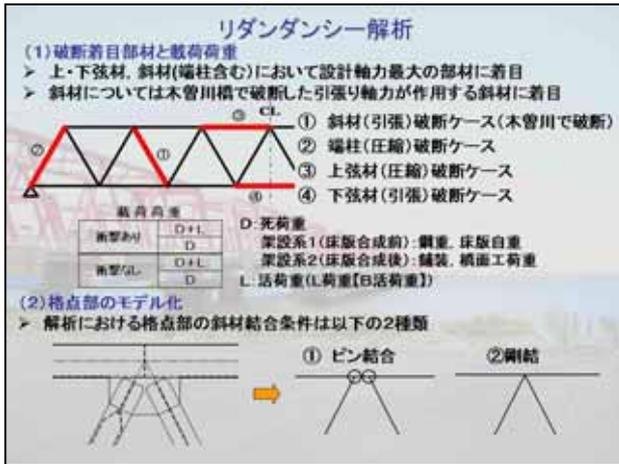


今までは解析全般に関する説明でしたが，次は，具体的に単純下路トラス（木曾川橋）の解析結果について説明をさせていただきます。

解析対象の木曾川橋は，先ほど説明がありましたが大スパンが 70m の単純トラスです。設計荷重は TL20 で，使用鋼材は SS41 と SM50 です。

解析対象橋梁(木曾川橋)

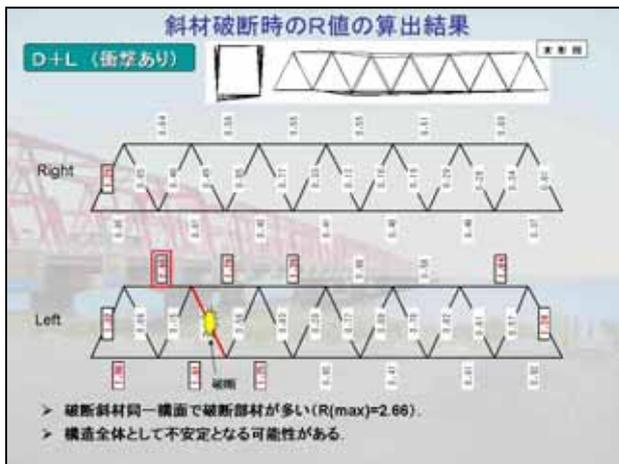
- > 設計年次: 1960年
- > 形式: 単純下路トラス
- > 支間長: 70.63m
- > 主橋高: 10.00m
- > 主橋間隔: 8.60m
- > 使用鋼材: SS41, SM50
- > 設計活荷重: TL-20



載荷荷重は、表に示すように、死荷重(D)と活荷重(L)と部材破断の衝撃を組合せた4ケースの荷重としております。また、格点部のモデル化における斜材の結合条件が、図に示すようにピン結合と剛結の2種類について解析を実施し、この結合条件の解析結果への影響についても検討しております。

これから、リダンダンシー解析結果についてご説明いたします。

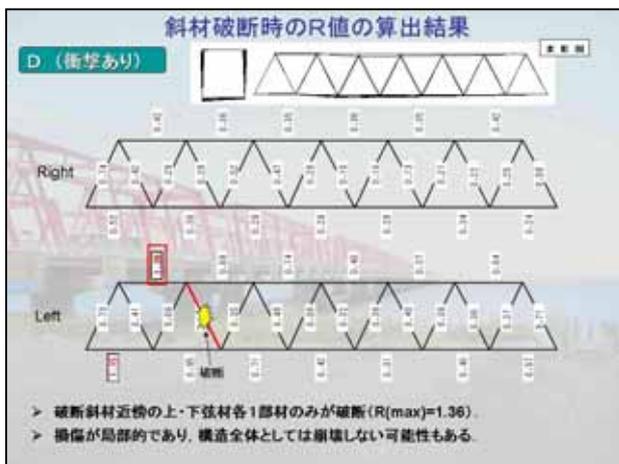
破断を想定した部材(破断着目部材)は、上下弦および斜材の設計軸力が最大となる部材といたしました。さらに、斜材は、木曽川橋で実際に破断した引張り軸力が作用する斜材を破断着目部材として追加しております。結果として、図に示す ~ の4部材を破断着目部材として、ダンダンシー解析を実施しました。



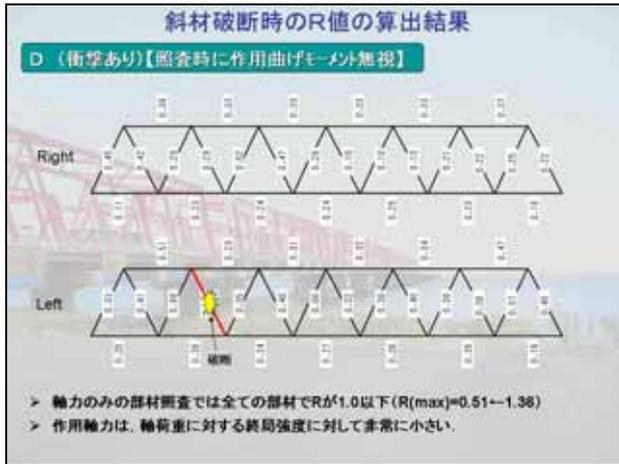
まず、リダンダンシー解析における部材の照査結果を報告させていただきます。

この図は、木曽川で実際に破断した斜材破断時のリダンダンシー解析におけるRの算出結果と変形図を示しております。これは、死荷重(D) + 活荷重(L)で部材破断の衝撃ありの載荷荷重が最大となる解析ケースです。破断した斜材近傍の幾つかの部材でRは1.0を越えており、最大のRは2.66となっております。したがって、この状態であれば、構造

全体が不安定になる可能性があると考えられます。

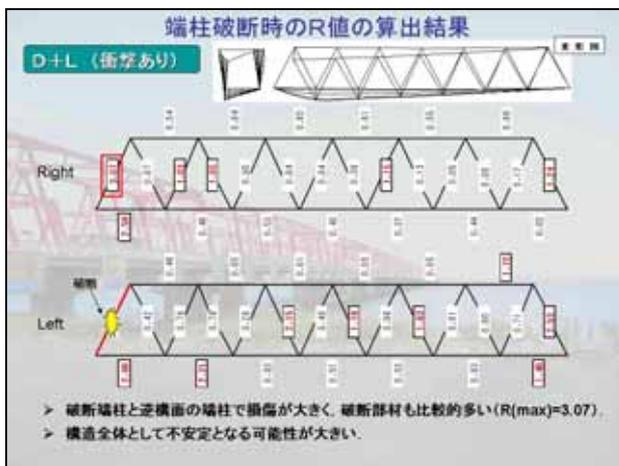


続いて、同じ斜材破断ケースで、載荷荷重が死荷重のみで衝撃ありの場合の解析結果を図に示しております。この場合、Rが1.0を超える部材は破断した斜材の近傍の2部材に留まり、Rの最大値は1.36と小さく、損傷が局部的であり、構造全体としては崩壊しない可能性があると考えられます。

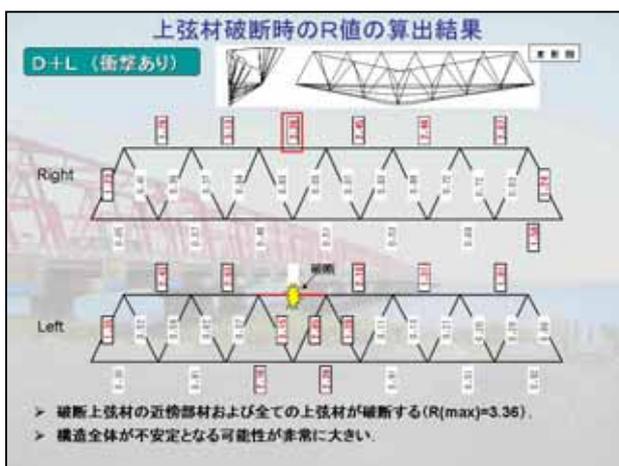


今までの説明した部材の照査では、作用曲モーメントと作用軸力を用いて照査を行っておりました。この図は、前述の解析ケースにおいて作用軸力のみで作用曲げモーメントを無視した照査結果を示しております。

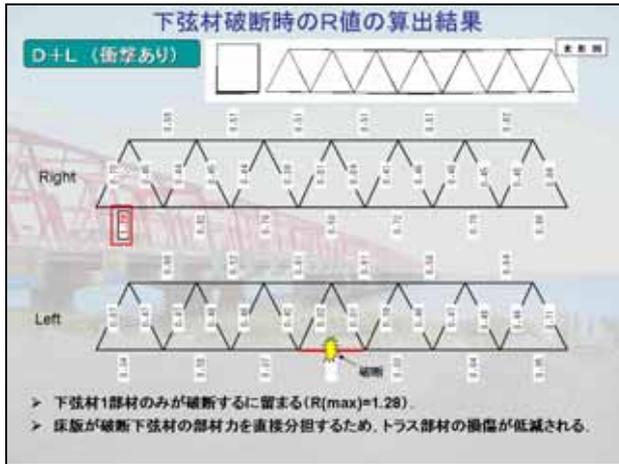
この場合、Rの最大値は0.51と作用曲げモーメントを考慮した場合に比べ非常に小さくなり、この斜材破断により各部材に非常に大きな曲げモーメントが作用することが分かります。



次に、端柱破断時のRの算出結果を図に示しております。載荷荷重は死荷重(D)+活荷重(L)で部材破断の衝撃ありです。この場合、破断した端柱と反対構面の端柱でRの最大値が3.07となっており、先ほど斜材破断ケースに比べ非常に多くの部材でRが1.0を越えております。よって、この照査結果から構造全体として、不安定になる可能性が高いと考えられます。

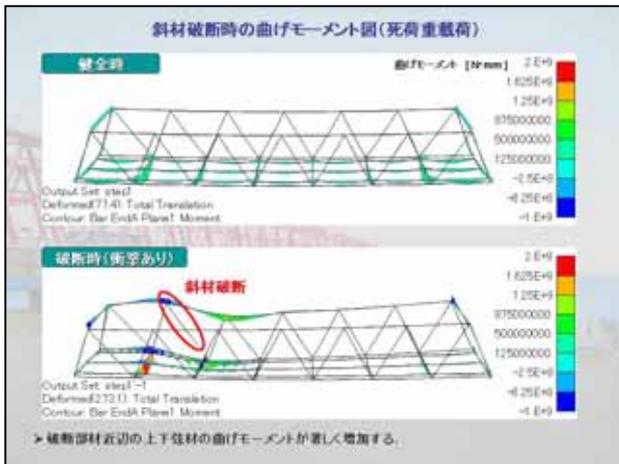
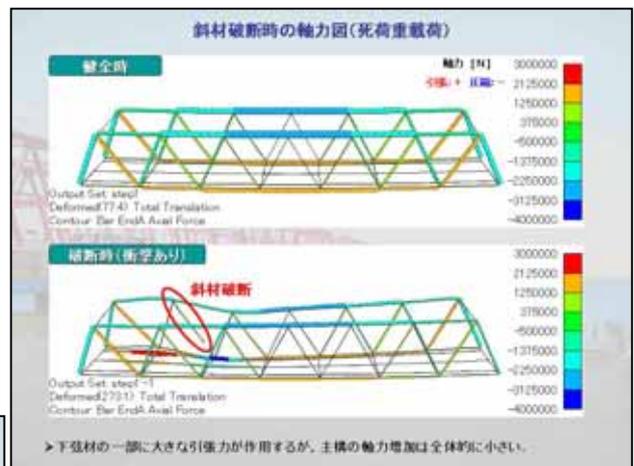


上弦材破断時のRの算出結果を図に示しております。載荷荷重は死荷重(D)+活荷重(L)で衝撃ありです。この場合、破断した上弦材の近傍の部材と全上弦材でRが1.0を越えており、全体的に非常に大きな損傷を受けることになり、構造全体が不安定になるという可能性が非常に高いと判断できます。



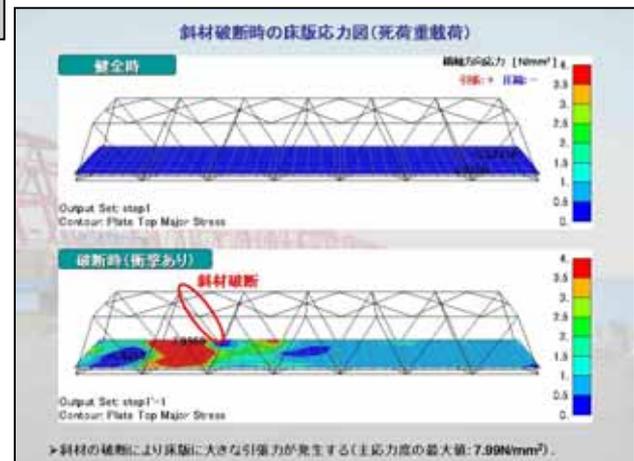
最後に、下弦材破断時のRの算出結果を図に示します。この中央の下弦材が破断した場合には、Rが1.0を越える部材は1箇所のみとなります。解析結果が非対称なのは、支承条件が固定と可動と異なることの影響です。今回の解析では床版もモデル化しており、床版が破断時の下弦材の部材力を直接負担するため、全体的に部材の損傷が大きく低減されていると考えられます。

次に健全時と部材破断時の発生断面力の比較について説明します。ここでは、全解析を代表して斜材破断時における死荷重載荷の解析結果を選定して説明いたします。図に示しますように、作用軸力は斜材破断による大きな変動はございません。



一方、作用曲げモーメントについてはこの図に示しますように、破断した斜材の近傍の上下弦材に非常に大きな付加曲げモーメントが発生いたします。

また、今回の解析では詳細に着目していませんが、床版の主応力度分布を図に示しております。床版には約  $8\text{N/mm}^2$  の非常に大きな引張応力度が発生しております。今後、床版の耐力評価については検討課題といたします。



単径間下路トラス橋のリダンダンシー解析結果  
(部材破断後にR>1.0となった部材数)

		照査時に軸力・曲げモーメントを考慮				照査時に軸力・曲げモーメントを無視			
		①上弦材 破断	②下弦材 破断	③上弦材 破断	④下弦材 破断	①上弦材 破断	②下弦材 破断	③上弦材 破断	④下弦材 破断
衝撃あり	D+L	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0
	0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0
衝撃なし	D+L	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0
	0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0

まとめとして、全てのリダンダンシー解析における部材の照査結果を一覧表も用いて説明いたします。

表の数値は、R が 1.0 を超え破断すると判断される部材数を示しております。

載荷荷重が死荷重 (D) + 活荷重 (L) で衝撃ありの場合は、全ての着目部材破断ケースにおいて非常に多くの部材で R が 1.0 を超える結果となっております。したがって、この載荷荷重は構造の安全性に対して多少過大に

評価するのではないかと考えられます。

また、上弦材が破断した場合には、全ての載荷ケースにおいて R が 1.0 を超える部材があり、R の最大値も比較的大きいことから、非常に危険な部材破断ケースであると思われれます。

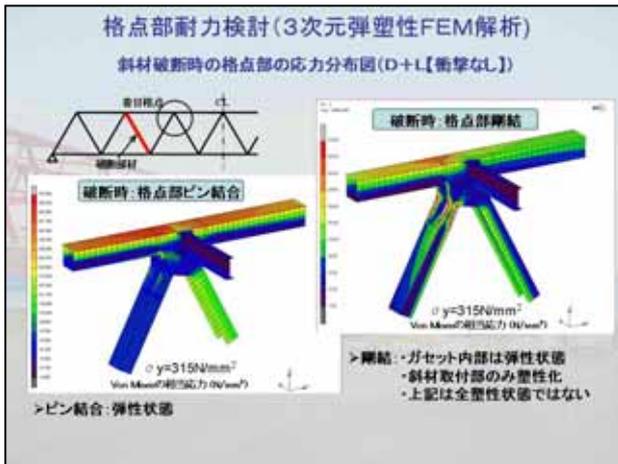
一方、斜材が破断した場合には、載荷荷重が死荷重で衝撃なしであれば R が 1.0 を超える部材はありません。さらに、載荷荷重が死荷重 (D) + 活荷重 (L) で衝撃なしの場合でも、R が 1.0 を超える部材数が比較的少ないという結果が得られています。

なお、参考として作用軸力のみで照査した場合の結果の一覧も示しております。この結果より、作用軸力のみで照査すれば全体的に終局状態となる部材数は少なくなるため、今回適用した作用軸力と作用曲げモーメントを用いた部材の照査方法が最も安全側の照査方法ではないかと考えております。

単径間下路トラス橋のリダンダンシー解析結果  
(部材破断後にR>1.0となった部材数)

		①上弦材 破断		②下弦材 破断		③上弦材 破断		④下弦材 破断	
		ピン結 モデル	剛結 モデル	ピン結 モデル	剛結 モデル	ピン結 モデル	剛結 モデル	ピン結 モデル	剛結 モデル
衝撃あり	Y	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0
	0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0
衝撃なし	Y	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0
	0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0	R<1.0

続いて、格点部のモデル化の影響をこちらの表でご説明させていただきます。こちらで斜材の結合条件をピン結と剛結に場合の結果を比較してみると、斜材を剛結にすることにより、上下弦材の終局状態となる部材数は減少しますが、斜材の分担曲げモーメントが増加するため斜材の終局状態となる部材数が増加します。結果として、全体的に終局状態となる部材数が変化します。この結果から、リダンダンシー解析における斜材のモデル化の影響は無視できないことが考察されます。



次に、格点部の弾塑性 FEM 解析による耐力検討結果を説明いたします。

リダンダンシー解析において構造が不安定となると想定された斜材破断時の載荷荷重が死荷重(D) + 活荷重(L)で衝撃なしのケースに着目しています。着目格点は作用断面力が最大となっている破断した斜材のすぐ隣の格点です。この解析では、着目格点部のみを切り出し、シェル要素で詳細にモデル化し、部材の端部にリダンダンシー解析により算出

された断面力を荷重として載荷しております。図にミーゼスの相当応力の分布を示します。

リダンダンシー解析で斜材の結合条件がピン結合としたケースの断面力を用いた場合には、格点部は弾性状態であり、十分な耐力を有していることがわかりました。一方、結合条件を剛結としたケースの断面力を用いた場合には、ガセット自体は弾性状態ですが、斜材の断面形状が箱型から I 型に絞っている部分において、若干塑性化しております。ただし、これは断面の一部分の塑性化で、全塑性状態には至っておらずまだ耐力を有していると考えられます。したがって、リダンダンシー解析で構造全体が不安定と判断される状態においても、格点部の耐力が不足することはないと判断しております。



こちら図は、格点部の結合条件が剛結で斜材に塑性化が生じた場合の相当塑性ひずみを示しております。塑性ひずみの最大値は7%以下ですので、破断することはないと判断されます。また、塑性化による変形の増大により、斜材の結合条件は剛結からピン結合には移行し、回転変形性能は、保持していると考えられます。ただし、この格点部の変形性能に関しては、今後詳細な検討が必要であると

**単径間下路トラス橋検討のまとめ**

**リダンダンシー解析結果より**

- 設計軸力が大きな支点部の端柱(斜材)、支間中央の上弦材が破断した場合には、多くの部材でリダンダンシー解析のR値が1.0を超えるため、重要なフラクチャークリティカルメンバー(FCM)と考えられる。
- 比較的設計軸力が小さい斜材は、R値が1.0を超える部材は少なく、死荷重のみの載荷では他に破断する部材はなかった。  
→木曽川橋に大きな被害が生じなかった理由と考えられる。
- L荷重載荷に加え破断の衝撃値(1.854)を考慮したリダンダンシー解析では、他の載荷状態に比べR値が大きく、部材破断を過大評価する可能性がある。照査荷重については今後の検討課題と考えられる。
- 格点部のモデル化(結合条件)のリダンダンシー解析結果に対する影響は無視できない。
- 床版と合成された下弦材破断時のR値が小さいことから、床版は構造全体の安定に大きく寄与している。床版の照査方法とモデル化も検討課題。

**格点部耐力検討より**

- 一部の部材が破断しても、格点部に構造全体の崩壊に繋がるような損傷は生じなかった。
- 格点部には塑性ヒンジが発生するため、リダンダンシーを評価するためには、応力評価のみでは不十分であり、変形性能評価が今後の課題。

最後に、単径間下路トラスの検討結果のまとめを説明させていただきます。

まず、リダンダンシー解析より、

設計軸力が大きな支点部の端柱および支間中央の上弦材が破断した場合には、多くの部材でRが1.0を越えます。したがって、これらの破断した部材は、重要なフラクチャークリティカルメンバーであると考えられます。

一方、実際に木曽川橋で破断した比較的

設計軸力の小さな斜材が破断した場合には、Rが1.0を越える部材数は少なく、死荷重のみで衝撃なしの場合ではRが1.0を超える部材はありませんでした。この結果から、実際に木曽川橋において斜材が破断したにもかかわらず大きな被害に至らなかったことが説明できると考えております。

活荷重のL荷重載荷に加え、部材破断の衝撃1.854を考慮したリダンダンシー解析結果では、他の載荷状態に比べRが非常に大きくなり、部材破断を過大に評価する可能性があると考えております。したがって、リダンダンシー解析の照査に用いる載荷荷重については、今後の検討課題と考えられます。

また、格点部のモデル化に関しては、リダンダンシー解析結果に対する影響は無視できないと結論づけております。

床版合成された下弦材の破断時の解析結果におけるR値は非常に小さくなっておりました。したがって、床版は構造全体の安定に大きく寄与していると考えられます。よって、床版の照査方法とモデル化も今後の検討課題であると考えております。

次に、格点部の耐力解析より、

一部の部材が破断しても、格点部に構造全体の崩壊につながるような損傷は生じてなかったことが確認できました。

また、格点部の斜材断面形状が変化する部分に塑性ヒンジが発生するため、リダンダンシーを評価するためには、応力評価のみでは不十分と考えられ、変形性能評価が今後の課題であるの結論が今回得られました。

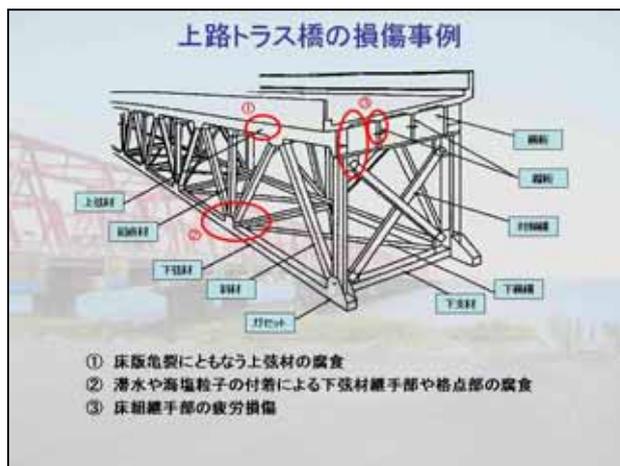
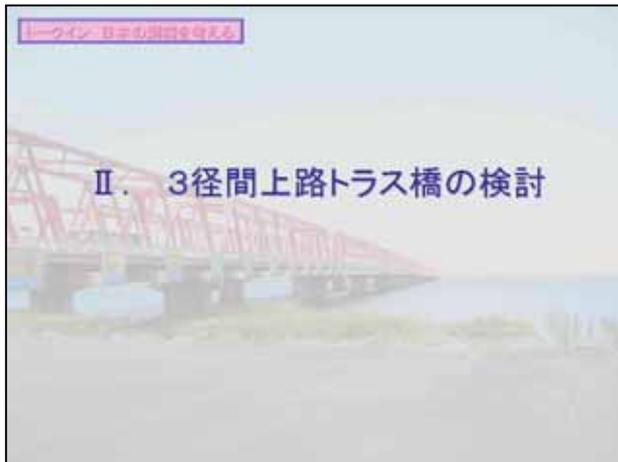


以上で永谷の発表終わらせていただきまして、引き続き松田の方から三径間連続上路トラス発表して頂きます。

(特別チーム：松田)

後半部分を担当します，サクラダの松田と申します．よろしくお願いいたします．

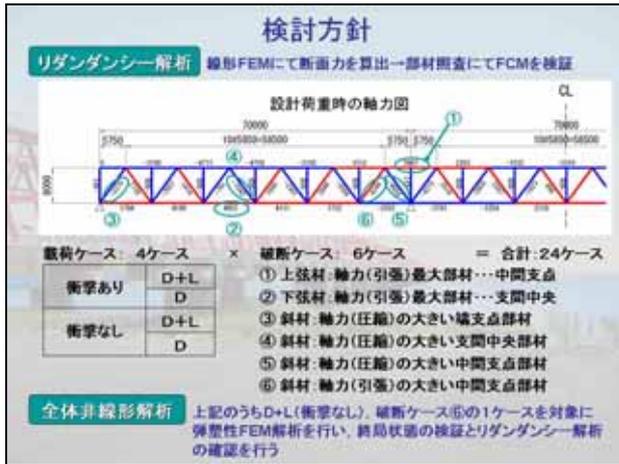
では，三径間上路トラス橋の検討について報告します．



上路トラス橋の損傷事例は，一般に，床版亀裂にともなう上弦材の腐食や，滞水や海塩粒子の付着による下弦材継手部や格点部の腐食，あるいは床組継手部の疲労損傷，といったことが想定されます．こうした実際に起こりうる損傷と橋全体の安全性との関係については，後ほど今回の検討結果を踏まえてコメントしたいと思います．



解析対象としては，ここに示すように支間70mの設計活荷重 TT-43 考慮の上路トラスとします．これは旧 JH の標準図集にあるものを参考にしており，設計年次は 1980 年と，前半の単径間トラスよりも比較的新しい近代的なトラスを対象としました．



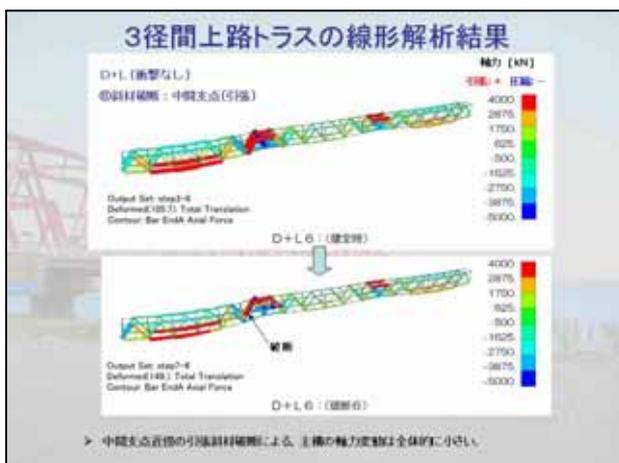
検討は、まず、リダンダンシー解析として、線形解析にて算出した断面力を基に部材照査を行い、破断する部材がフラクチャリティカルメンバー(FCM)かどうかを検証します。

載荷ケースは、部材破断の影響として衝撃係数 1.854 を考慮した場合(衝撃あり)としない場合(衝撃なし)の各々について、(死荷重+活荷重)と(死荷重のみ)を行い、計 4 ケースとしました。

破断する部材は、2 主構のうちの 1 主構の 1 部材のみとします。破断ケースは、図に示すように、設計荷重時の軸力を元に、引張軸力が 5667kN と最も大きい中間支点部の上弦材(図の ①の部材)を破断させた場合、下弦材のうち引張軸力が 4952kN と最も大きい ②の支間中央部材を破断させた場合、そして斜材については、端支点部の軸力の大きい(圧縮 3378kN)図の ③を破断させた場合、支間中央部の軸力の大きい(圧縮 1042kN) ④の斜材を破断させた場合、中間支点部の圧縮軸力の大きい(4859kN) ⑤の斜材を破断させた場合と、中間支点部の引張軸力の大きい(4244kN) ⑥の斜材を破断させた場合の 6 ケースとしました。

したがって載荷 4 ケースと破断 6 ケースの組合せで、合計 24 ケースのリダンダンシー解析を行いました。これとは別に健全状態の線形 FEM 解析も行いました。

次に、全体非線形解析として、上記 24 ケースのうち、D+L(衝撃なし)の破断ケース ⑤の 1 ケースを対象に、弾塑性 FEM 解析を行い、終局状態の検証とリダンダンシー解析の確認を行いました。

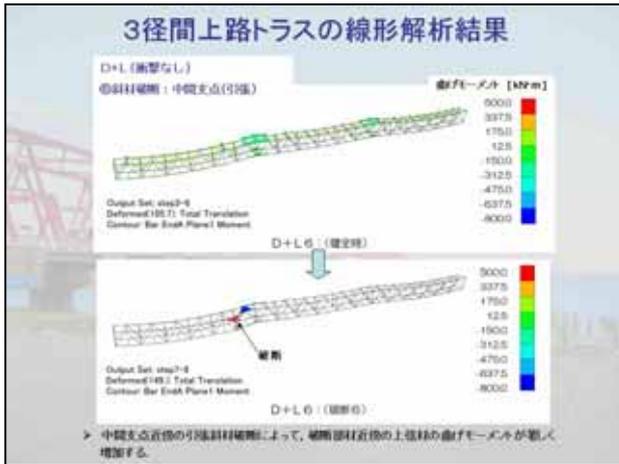


線形解析結果の一例を紹介します。

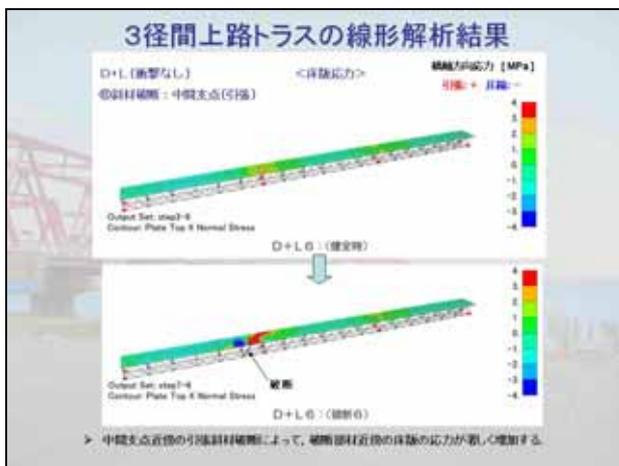
紹介するケースは、後ほど紹介する非線形解析と合わせたものとし、D+L(衝撃なし)の破断ケース (中間支点部の引張斜材破断時)とします。

上段が健全時、下段が破断時です。

ここに示すように、破断による主構の軸力変動は、全体的に小さいものとなっています。

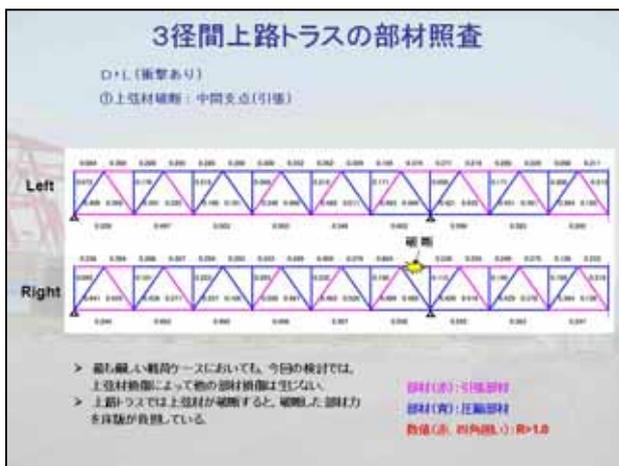


次に曲げモーメントですが、破断部材近くの上弦材において、曲げモーメントが著しく増加していることがわかるかと思えます。



次に、床版応力です。応力は、橋軸方向応力を示しています。上弦材の曲げモーメント同様、破断部材近くの床版の応力が著しく増加しています。

線形解析では、床版はどこまでも荷重を負担してしまいますので、このあたりの終局状態の検証は、あとで報告する非線形解析結果にて行います。

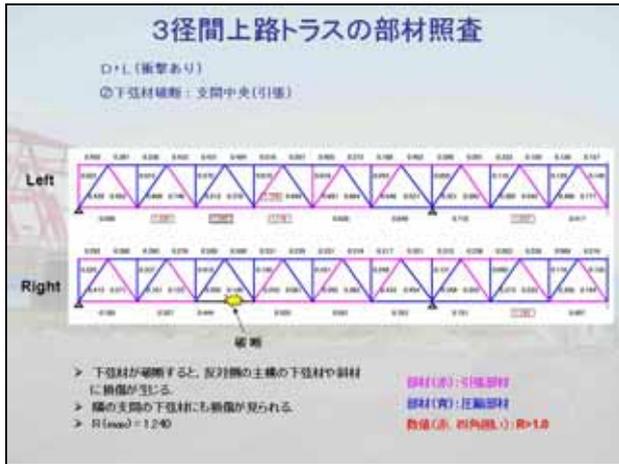


ここで紹介する部材照査結果は、傾向がよくわかるように、最も厳しい荷重ケースである D+L(衝撃あり)とします。

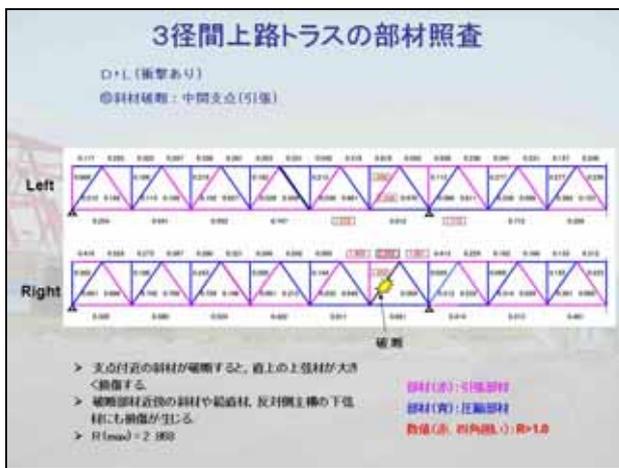
図に示す数値は、先に述べた R 値であり、R が 1.0 を超えると作用断面力が終局強度を超え、部材が損傷するものと判断します。

まず、上弦材が破断した場合の部材照査結果を示します。今回の検討では、最も厳しい荷重ケースにおいても、上弦材破断によって他の部材損傷は生じない結果となりました。

上路トラスでは上弦材が破断すると、破断した部材力を床版や床組が負担しているため、このような結果となったものと考えられます。



次に、支間中央の下弦材が破断した場合です。下弦材が破断すると、反対主構の下弦材や斜材に損傷が生じる結果となりました。隣の支間の下弦材にも損傷が見られます。したがってこの荷重ケースでは、下弦材はFCMとなり、破断すると橋全体が崩壊にいたる可能性があると言えます。Rの最大値は1.240でした。



次は、中間支点付近の引張斜材が破断した場合です。支点付近の斜材が破断すると、直上の上弦材のR値が2.868と大きく損傷する結果となりました。破断部材近傍の斜材や鉛直材、反対側主構の下弦材にも損傷が生じます。以上より、支点付近の斜材はFCMとなり、破断すると橋全体の安全性が失われると考えられます。

### 3径間上路トラスのリダダンシー解析結果 (部材破断後にR>1.0となった部材数)

	上路桁破断ケース		下弦桁破断ケース		斜材破断ケース				
	中間支点(引張)	支間中央(引張)	中間支点(引張)	支間中央(引張)	中間支点(引張)	支間中央(引張)	中間支点(引張)	支間中央(引張)	中間支点(引張)
衝撃あり	D+L	0	0	0	0	0	0	0	0
	D	0	0	0	0	0	0	0	0
	地震	0	0	0	0	0	0	0	0
	合計	0	0	0	0	0	0	0	0
衝撃なし	D+L	0	0	0	0	0	0	0	0
	D	0	0	0	0	0	0	0	0
	地震	0	0	0	0	0	0	0	0
	合計	0	0	0	0	0	0	0	0

上路トラスの全ケースのリダダンシー解析結果をまとめるとこの表のようになります。この表では、各破断ケースにおいて一つの部材が破断した後にRが1.0を超えた部材数を整理しています。四角囲いした赤字の部材数は引張の損傷部材数、青字は圧縮を示しています。各ケースの左肩の数値はRの最大値を示します。

破断ケースでみると、 の上弦材が破断した場合や、 と の支間中央部の下弦材と斜材が破断した場合は、ほとんどの荷重ケースで他の部材損傷にはいたらない結果となりました。

それに比べ、端支点、中間支点とも支点部の斜材が破断した場合は、 になります。逆にほとんどの荷重ケースで他の部材の損傷を引き起こすにいたっています。したがって、上下弦材よりも支点部の斜材を破断するほうが危険であるというように考えることができます。

また、荷重ケースでみると、表の最上段のもっとも厳しい荷重ケース：D+L(衝撃あり)では、ほぼすべての破断ケースで、複数の部材損傷を招く結果となっています。一方、表の最下段の、衝

撃を考慮しない死荷重のみの载荷ケースでは、ほぼすべての破断ケースで、破断部材以外の部材は損傷しない結果となりました。中段の载荷2ケースでは、支点部の斜材が破断した場合のみ他の部材が損傷するという同様の傾向となっています。

次に報告する全体非線形解析では、一般的な载荷ケースとして D+L(衝撃なし)を選定し、中間支点部の引張斜材が破断した場合を対象としました。これは、D+L(衝撃なし)のなかで  $R_{max}$  が最も大きいケースとなっています。

### 3径間上路トラスの全体系非線形解析による検討

**目的**

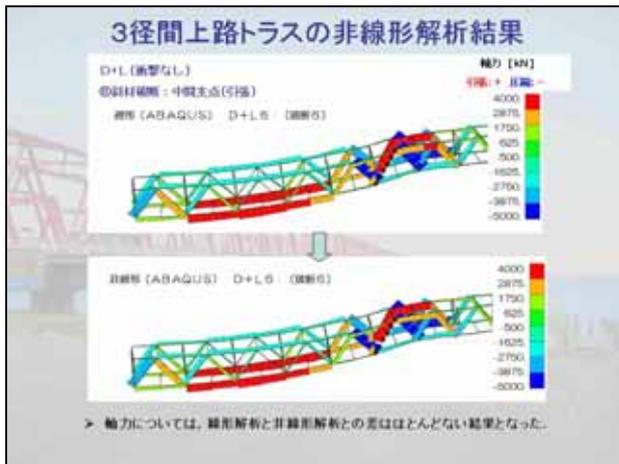
- 全体系弾塑性FEM解析による再配分の影響を確認
- 終局状態の検証
- リダンダンシー解析の確認

**非線形弾塑性解析モデル**

- 上下弦材、斜材、鉛直材、横構、床版はビーム要素
- 床版はソリッド要素(板厚方向に4分割)
- スラブアンカーは、『スラブアンカーの静的ずれ耐力特性に関する実験的研究(橋田・平城ら)』に示される荷重変位曲線を使用
- 幾何学的非線形性を考慮
- 初期形状としてキャンバーを考慮
- 床版合成後の後死荷重として舗装、壁高欄を考慮

全体非線形解析による検討は、弾塑性解析による再配分の影響を確認し、終局状態の検証とリダンダンシー解析の確認を目的に行いました。

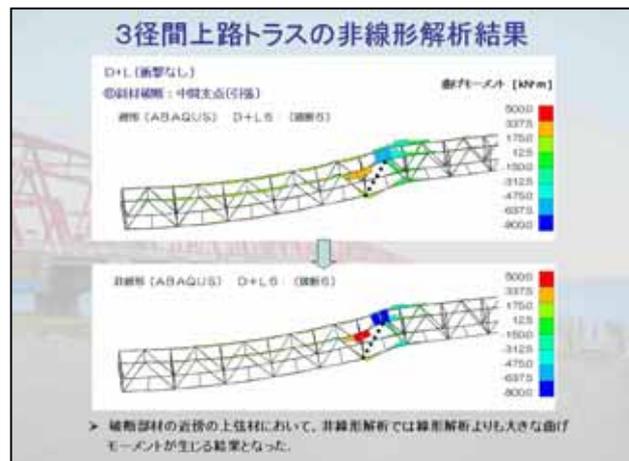
弾塑性解析モデルは、弾性解析と同様に、床版以外の部材はビーム要素としましたが、床版はシェル要素からソリッド要素に変更しています。スラブアンカーも非線形要素としています。幾何学的非線形性を考慮し、初期形状としてキャンバーも考慮してあります。

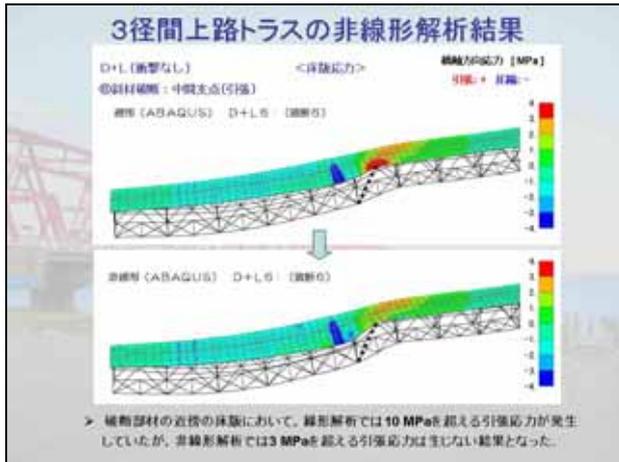


非線形解析の結果です。

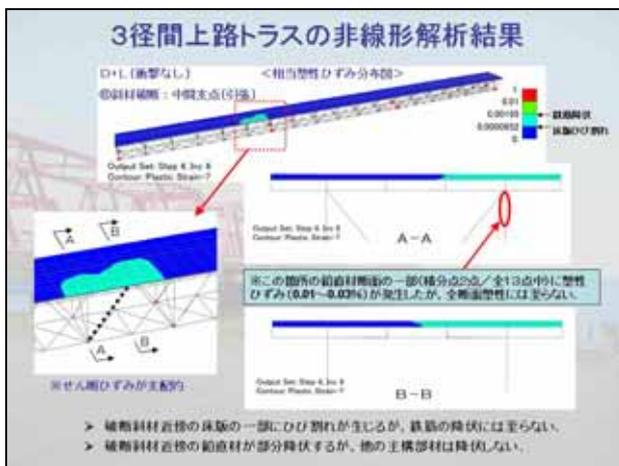
軸力については、ここに示しますように、線形と非線形との差はほとんどない結果となりました。

次に曲げモーメントですが、破断部材近くの上弦材において、非線形では線形よりも1.5倍程度大きな曲げモーメントが生じる結果となりました。





逆に床版については、線形解析では 10MPa を超える引張応力が発生していたのですが、非線形では 3MPa を超えるような引張応力は生じない結果となりました。



終局状態を確認するために、ひずみにて塑性化の範囲についても確認をしています。床版の相当塑性ひずみ分布図でみますと、破断した斜材近くの床版の一部にひび割れを生じるひずみが発生していますが、鉄筋降伏には至っていないということがわかります。

鋼主部材の塑性化範囲は、ごく一部に留まっており、A-A 断面に示すように破断した斜材近くの鉛直材の一部に塑性ひずみが生じましたが、それも断面のごく一部であり、全断面塑性には至っていません。他の主部材には塑性ひずみは発生しませんでした。

また、活荷重や、部材破断時の衝撃の影響を考慮するか否かによって評価結果が大きく変わることがわかりました。検討にあたっては注意を要するものと考えられます。

### 3径間上路トラスのまとめ

#### リダンダンシー解析結果より

- > 上下弦材よりも、支点付近の斜材が破断する方が断面力や変形が大きく、橋全体の安定性を失う危険が大きい。→ 支点付近の斜材を重点管理
- > 破断時の衝撃を考慮しない死荷重のみのケースでは、ほぼすべての破断ケースで構造安定性が損なわれない結果となった。→ 活荷重、破断の影響は要検討
- > 破断部材とは反対の主構や隣の支間の部材にも影響が大きい。
- > 上路トラスでは上弦材が破断すると、破断した部材力を床組が負担しており、今回の弾性解析結果では橋全体の安定性は損なわれない結果となった。→ 床版危惧にともなう上弦材の腐食に対しては、床版剛性が失われるような場合は注意が必要である。

#### 全体非線形解析結果より

- > 上路トラスの弾塑性解析では、弾性解析と比較して、床版の負担が減り、上弦材の負担が増えることがわかった。
- > 今回の検討ケースの場合は、弾塑性解析により全断面塑性とはならないことが確認できた。→ 床版の耐力が橋全体の安全性に与える影響は大きい。リダンダンシー解析における床版のモデル化や調査方法は今後さらに検討が必要である。

以上をもって、三径間上路トラス橋のまとめを行います。

リダンダンシー解析結果からは、

上下弦材よりも、支点付近の斜材が破断する方が橋全体の安全性を失う危険が大きいということがわかりました。したがって支点付近の斜材を重点管理する必要があると考えられます。

また、活荷重や、部材破断時の衝撃の影響を考慮するか否かによって評価結果が大きく変わることがわかりました。検討にあたっては注意を要するものと考えられます。

破断部材とは反対の主構や隣の支間の部材にも影響が大きいことがわかりました。

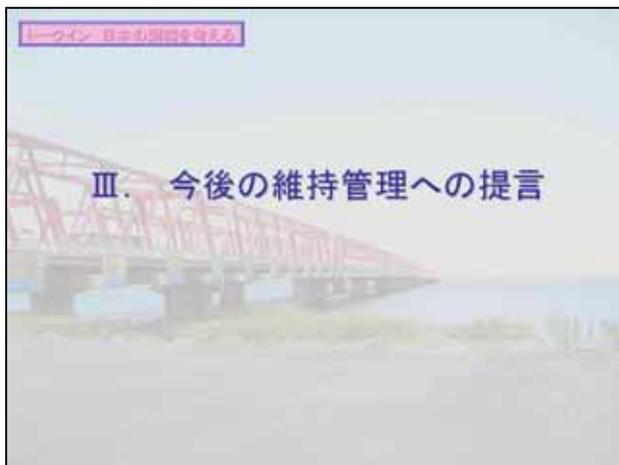
上路トラスでは上弦材が破断すると、破断した部材力を床組が負担しており、今回の弾性解

析結果では橋全体の安定性は損なわれない結果となりました。上路トラスのはじめに述べた実際の損傷事例に照らして考えますと、床版亀裂にともなう上弦材の腐食については、床版剛性が失われるような場合には注意が必要であると考えられます。また、床組継手部の疲労損傷を放置しておきますと、いざというときに床組が有していた冗長性が失われているということになりますので、きちんとメンテナンスしておくことが大切です。

全体非線形解析結果からは、

上路トラスの弾塑性解析では弾性解析と比較して、床版の負担が減り、上弦材の負担が増えることがわかりました。

今回の検討ケースでは、弾塑性解析で、全断面塑性とはならないことを確認しました。床版の耐力が橋全体の安全性に与える影響は大きく、リダンダンシー解析における床版のモデル化や照査方法は今後さらに検討が必要であると考えられます。



最後になりましたが、単径間下路トラスの検討結果も踏まえ、全体のまとめを行い、さらに鋼橋技術研究会として今後の維持管理への提言を行いたいと思います。

**全体のまとめ**

- 木曾川橋が崩壊を免れた理由は、破断した斜材の設計軸力が比較的小さく、フラクチャークリティカルメンバーではなかったことによるものと推定される。
- トラス橋では、支点付近の斜材(単純下路トラスでは端柱)が損傷すると、橋全体の崩壊につながる危険が高いことが確認できた。単純下路トラスでは、上弦材もクリティカルメンバーであると考えられる。
- 近代的な連続上路トラスでは、不静定次数が高いこともあり、単純トラス橋よりもリダンダンシーが高いことが確認できた。
- 床組の耐力が橋全体の安全性評価に与える影響は大きいことを確認できた。上路トラスの上弦材、下路トラスの下弦材が破断すると、破断した部材力を床組が負担しており、今回の弾性解析では全体の崩壊にはつながらない結果となった。しかし、床版にかなり大きな応力が生じているケースもあり、今後さらなる検討が必要であると考えられる。
- トラス橋では、格点部の性能が全体のリダンダンシーに与える影響が大きいことがわかった。格点の耐力・変形性能を十分に把握し、リダンダンシー解析においてどのようにモデル化するかが今後の課題である。
- 部材破断による衝撃の影響は非常に大きく、今回の検討の方法では過大評価の可能性があり、今後、評価方法の検討を要するものと考えられる。

全体のまとめとして、

木曾川橋が崩壊を免れた理由は、破断した斜材の設計軸力が比較的小さく、フラクチャークリティカルメンバーではなかったことによるものと推定されます。

トラス橋では、支点付近の斜材(単純下路トラスでは端柱)が損傷すると、橋全体の崩壊につながる危険が高いことが確認できました。単純下路トラスでは上弦材もクリティカルメンバーであると考えられます。

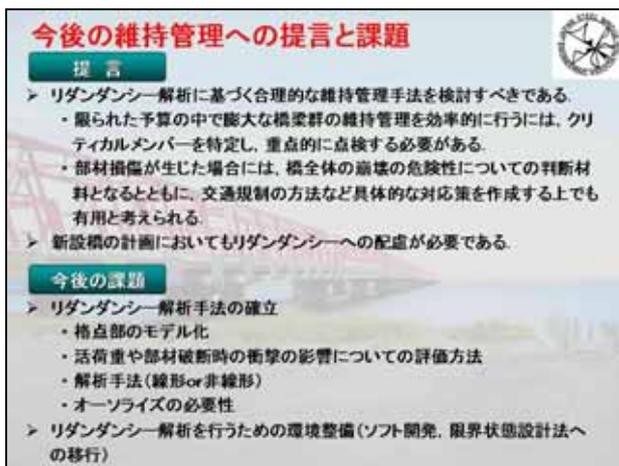
近代的な連続上路トラス橋では、不静定次数が高いこともあり、単純トラス橋よりもリダンダンシーが高いことが確認できました。

床組の耐力が橋全体の安全性評価に与える影響が大きいことが確認できました。上路トラスの上弦材、下路トラスの下弦材が破断すると、破断した部材力を床組が負担しており、今回

の弾性解析では全体の崩壊につながらない結果となりました。しかし、床版にかなり大きな応力が生じているケースもあり、今後さらなる検討が必要であると考えられます。

トラス橋では、格点部の性能が全体のリダンダンシーに与える影響が大きいことがわかりました。格点の耐力や変形性能を十分に把握して、リダンダンシー解析においてどのようにモデル化するかが今後の課題です。

部材破断による衝撃の影響は非常に大きく、係数 1.854 という今回の検討の方法では、過大評価の可能性もあると言えます。今後、評価方法の検討を要するものと考えられます。



**今後の維持管理への提言と課題**

**提言**

- リダンダンシー解析に基づく合理的な維持管理手法を検討すべきである。
  - 限られた予算の中で膨大な橋梁群の維持管理を効率的に行うには、クリティカルメンバーを特定し、重点的に点検する必要がある。
  - 部材損傷が生じた場合には、橋全体の崩壊の危険性についての判断材料となるとともに、交通規制の方法など具体的な対応策を作成する上でも有用と考えられる。
- 新設橋の計画においてもリダンダンシーへの配慮が必要である。

**今後の課題**

- リダンダンシー解析手法の確立
  - 格点部のモデル化
  - 活荷重や部材破断時の衝撃の影響についての評価方法
  - 解析手法(線形or非線形)
  - オーソライズの必要性
- リダンダンシー解析を行うための環境整備(ソフト開発、限界状態設計法への移行)

今後の維持管理への提言として、

リダンダンシー解析に基づく合理的な維持管理手法を検討するべきであると考えます。

国内の橋の多くは高度経済成長期の建設で、20年以内には半数近くの橋が更新期とされる築50年を超えます。安全性の確保はもとより、架け替え集中による財政負担を軽減するため、計画的な補修や、長寿命化に向けた取り組みが急務です。限られた予算の中で膨大な橋梁群の維持管理を行うには、クリティカルメン

バーを特定し、重点的に管理する必要があると考えます。

また、万一、部材損傷が生じた場合には、橋全体の崩壊の危険性についての判断材料となるとともに、活荷重の載荷検討などによる交通規制の方法といった、具体的な対応策を作成する上でも有用であると考えられます。

また、既設橋の検討に留まらず、新設橋の計画においてもリダンダンシーへの配慮が必要であると考えます。

今後の課題としては、

リダンダンシー解析手法を確立させていく必要があります。

具体的には、格点部のモデル化や、活荷重や部材破断時の衝撃の影響についての評価方法を確立する必要があると思います。解析手法については、新設橋設計時に適用する場合など設計実務者が扱うことや、広く使っていこうというふうに考えるのであれば、線形解析で検討できるのが望ましいのですが、やはり非線形解析まで行う必要があるかどうかも課題です。当然ですけれども、オーソライズしていく必要もあります。

また、リダンダンシー解析を行うための環境整備として、ソフト開発や、限界状態設計法への移行も必要であると考えられます。

以上で、報告を終わります。ご清聴いただきありがとうございました。