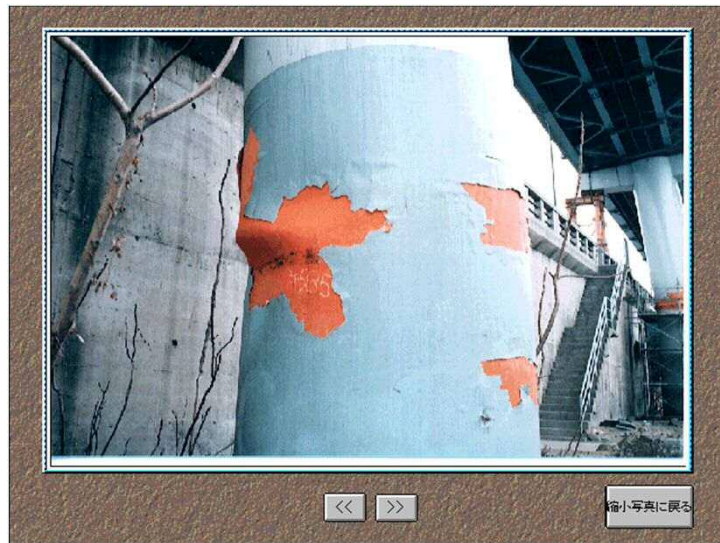


鋼橋の損傷事例とメカニズム

依田 照彦
早稲田大学

平成26年1月15日
第26回鋼構造基礎講座

鋼橋の損傷事例とメカニズム



依田照彦

早稲田大学理工学術院創造理工学部社会環境工学科

目次

1.はじめに

2.被災した鋼製橋脚の数値シミュレーション(神戸地震)

①見えないところを見る技術

3.米国ミネソタ州I-35橋の崩壊メカニズム

②見にくいところを診る技術

4.沖縄辺野喜橋の落橋(構造解析シミュレーション)

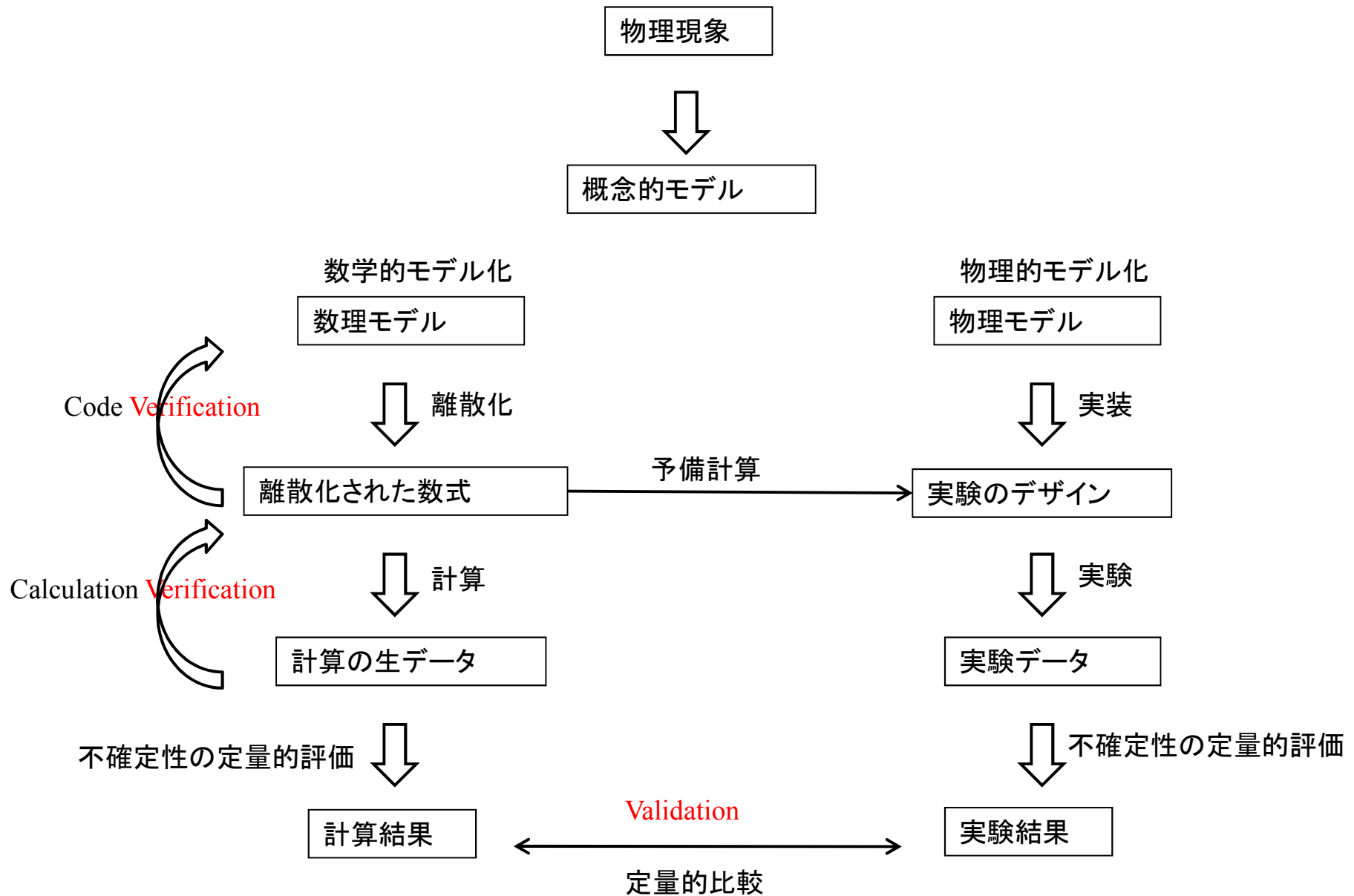
③見るべきところを観る技術

5.おわりに

1. はじめに

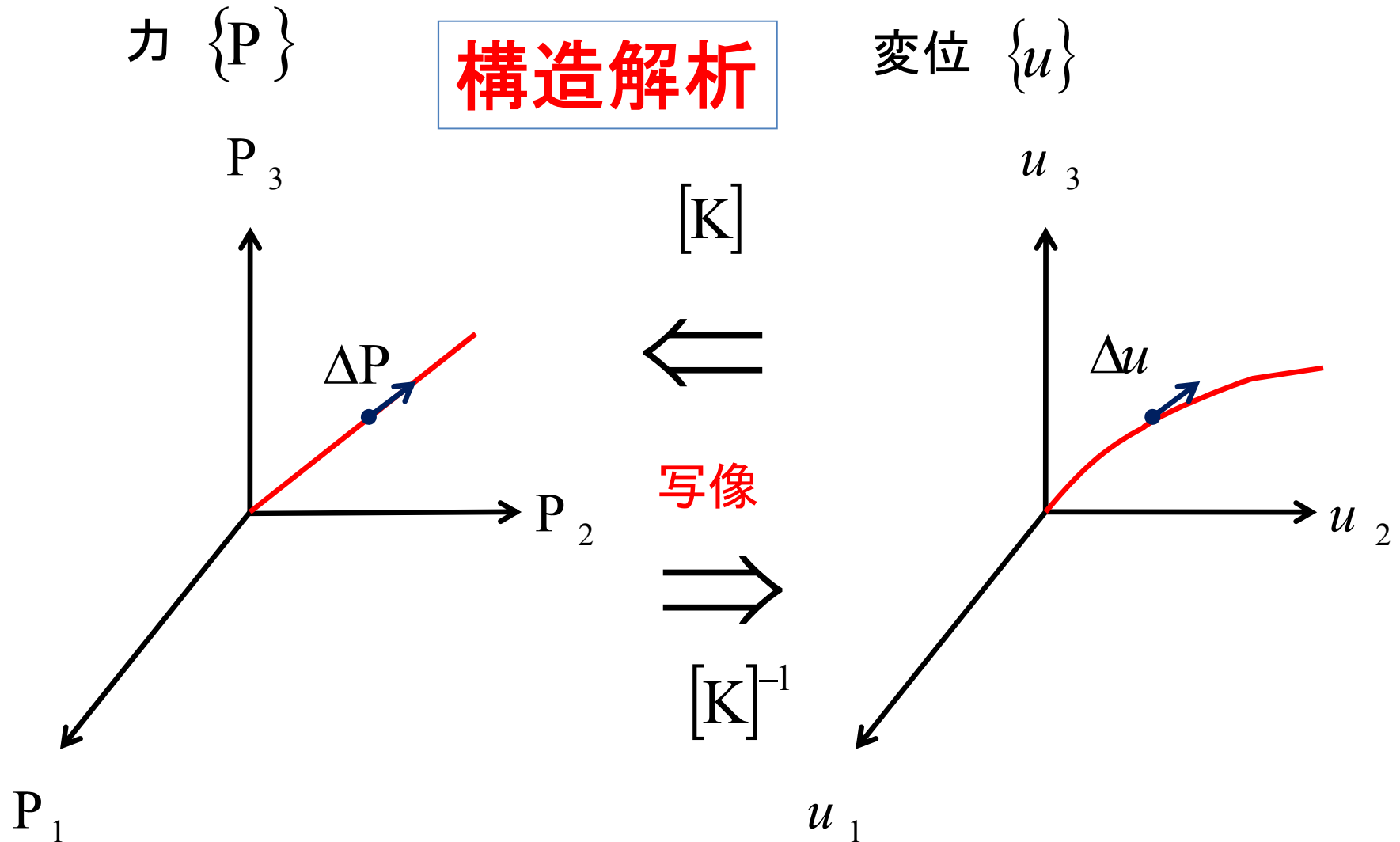
最近の損傷例

1. 疲労と破壊
2. 腐食と腹板のクラック
3. 衝突
4. 火災
5. 地震
6. 風



ASME V&V 10-2006の概要

構造解析



力－変位関係式: $\{P\} = [K]\{u\}$ (非線形関係)

増分型: $\{\Delta P\} = [K_T]\{\Delta u\}$ (線形関係)

1.はじめに

2.被災した鋼製橋脚の数値シミュレーション(神戸地震)

①見えないところを見る技術

3.米国ミネソタ州I-35橋の崩壊メカニズム

②見にくいところを診る技術

4.沖縄辺野喜橋の落橋(構造解析シミュレーション)

③見るべきところを観る技術

5.おわりに

2. 被災した鋼製橋脚の数値シミュレーション



土木学会 阪神・淡路大震災調査報告書、土木構造物の被害原因の分析(1999年8月)



縮小写真に戻
8

問題提起

- 神戸地震では、強い地震動（水平方向）あるいは衝撃的地震動（鉛直方向）があったとされる。
- 100 ヘルツ以上の振動成分は、加速度計では記録できない。
- したがって、衝撃的な地震動の存在は加速度計では確認できない。
- 構造物の被害に目を向けると、鋼製橋脚で座屈（象の脚座屈）しているものが数多く観察された。
- この象の脚座屈は、水平荷重でも鉛直荷重でも発生する。
- 実験すると、確かにどちらの荷重でも、象の脚座屈が発生した。
- その結果、実験でも、原因は特定できなかった。
- 土木学会では、数値シミュレーションで真相を解明することを委員会に託した。

被災した鋼製橋脚 : P-584

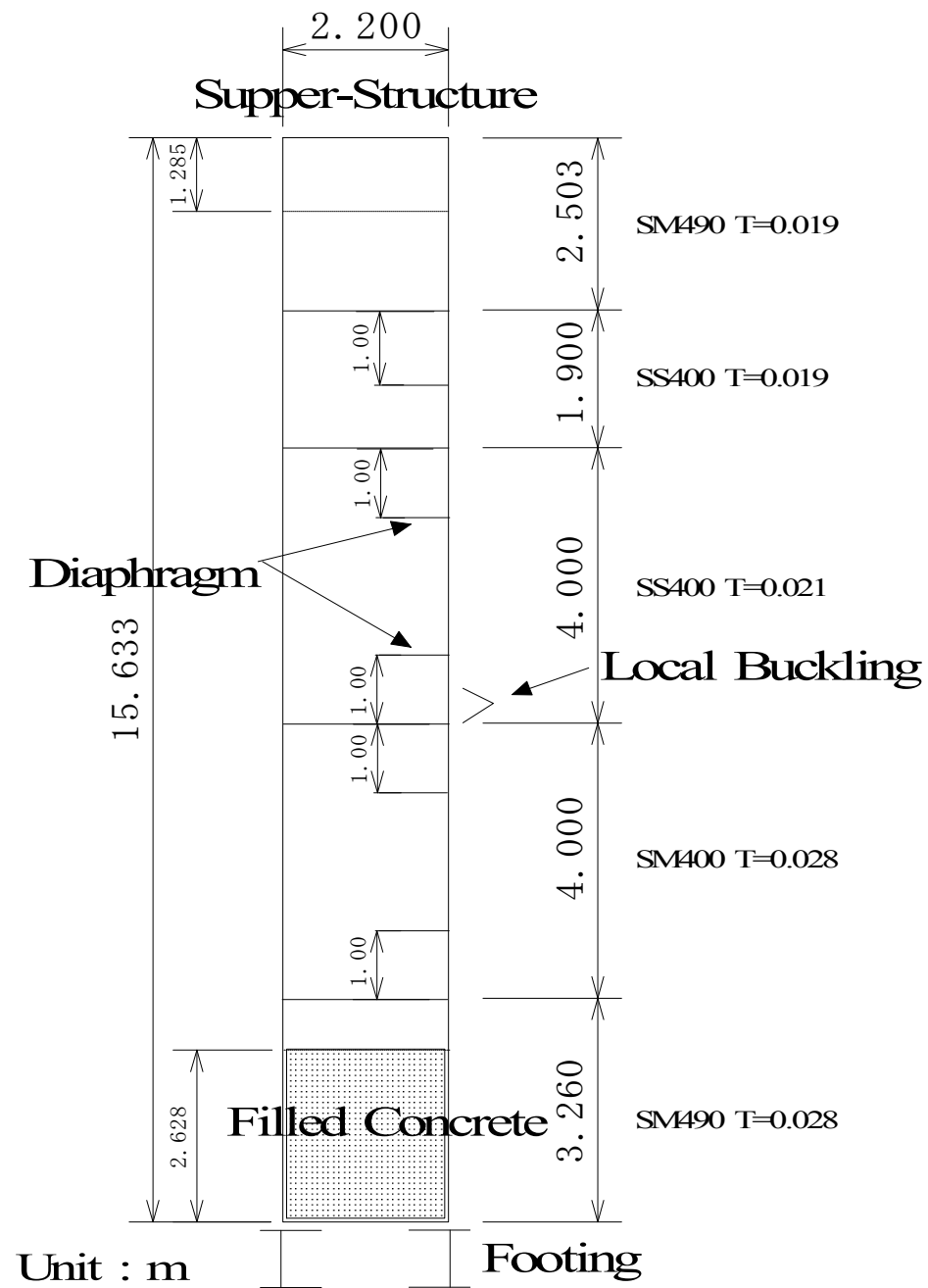


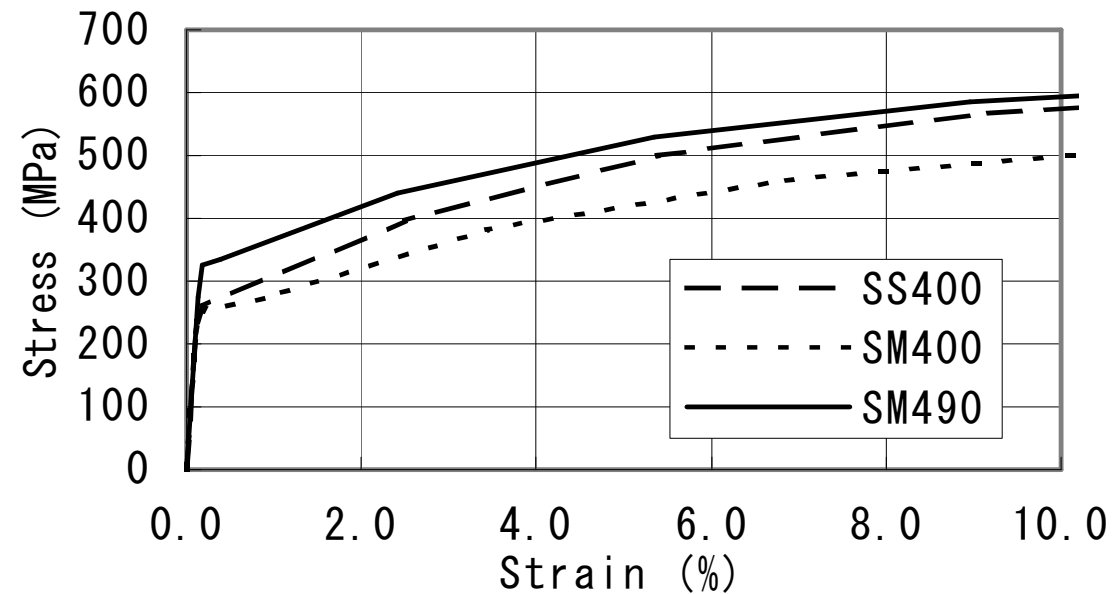
<<

>>

縮小写真に戻る

橋脚の形状





鋼材の応力-ひずみ関係

材料定数

Material Grade	SS400	SM400	SM490
Young's ratio	206 (GPa)	206 (GPa)	206 (GPa)
Yield stress	235 (MPa)	235 (MPa)	326 (MPa)
Density	7850 (kg/m ³)	7850 (kg/m ³)	7850 (kg/m ³)
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3
Thickness	19(mm)&21(mm)	28(mm)	19(mm)&28(mm)

入力波形

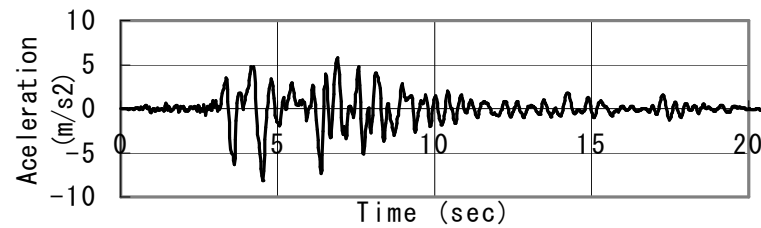


Figure 6. Observed acceleration : JMA Kobe.

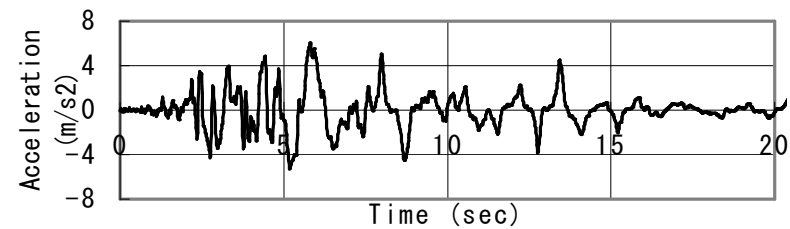


Figure 7. Observed acceleration : JR-Takatori Station.

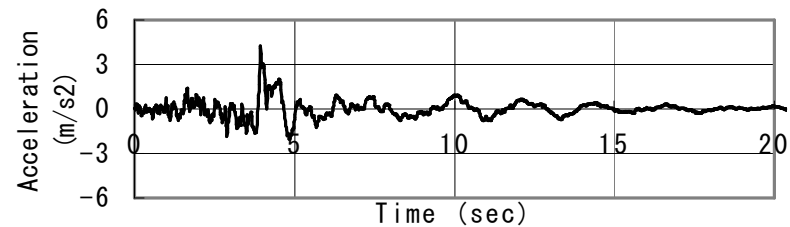


Figure 8. Observed acceleration : Higashi-Kobe Bridge.

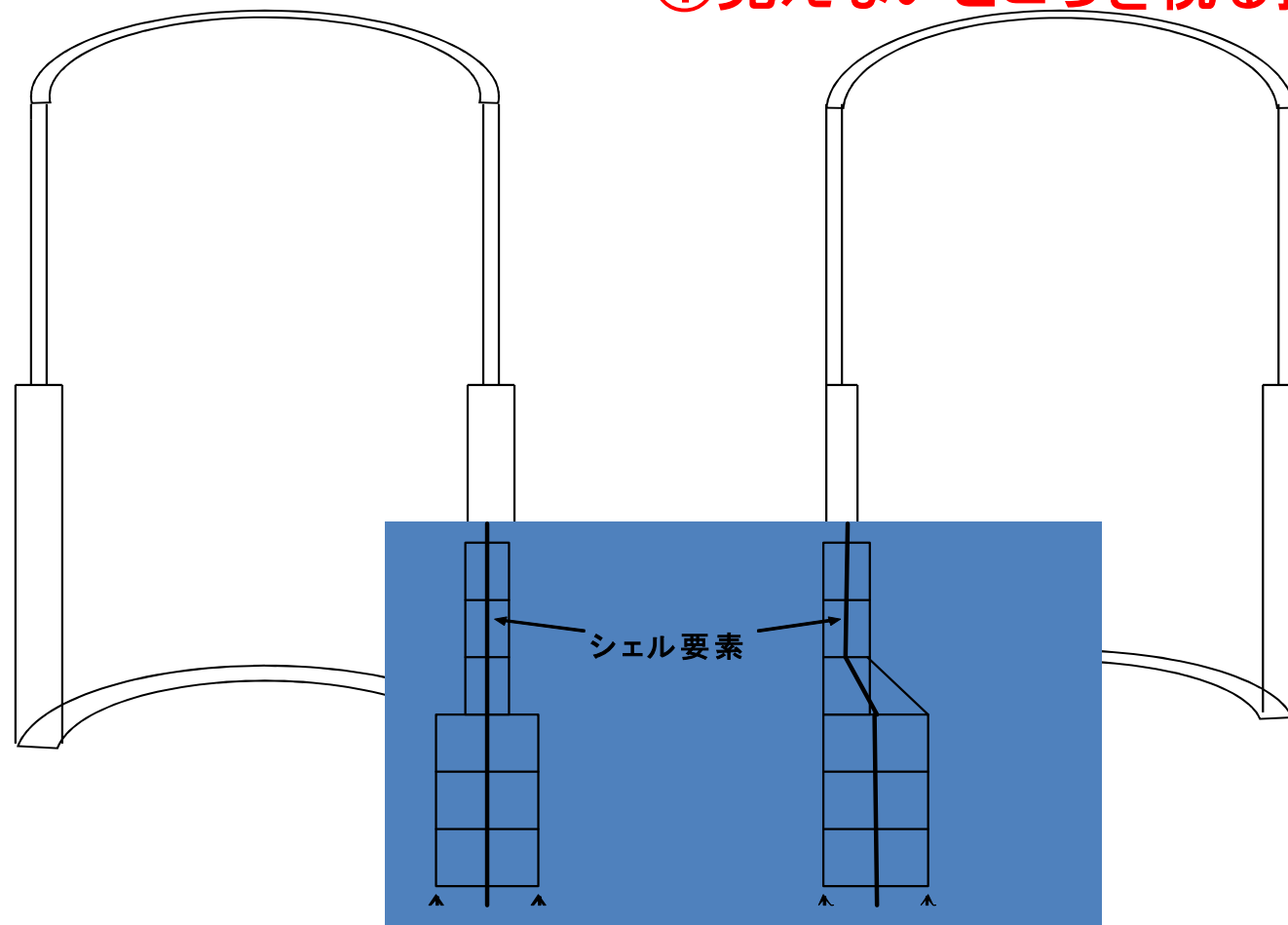
モデル化の重要性

(板厚が下から上に変化している)

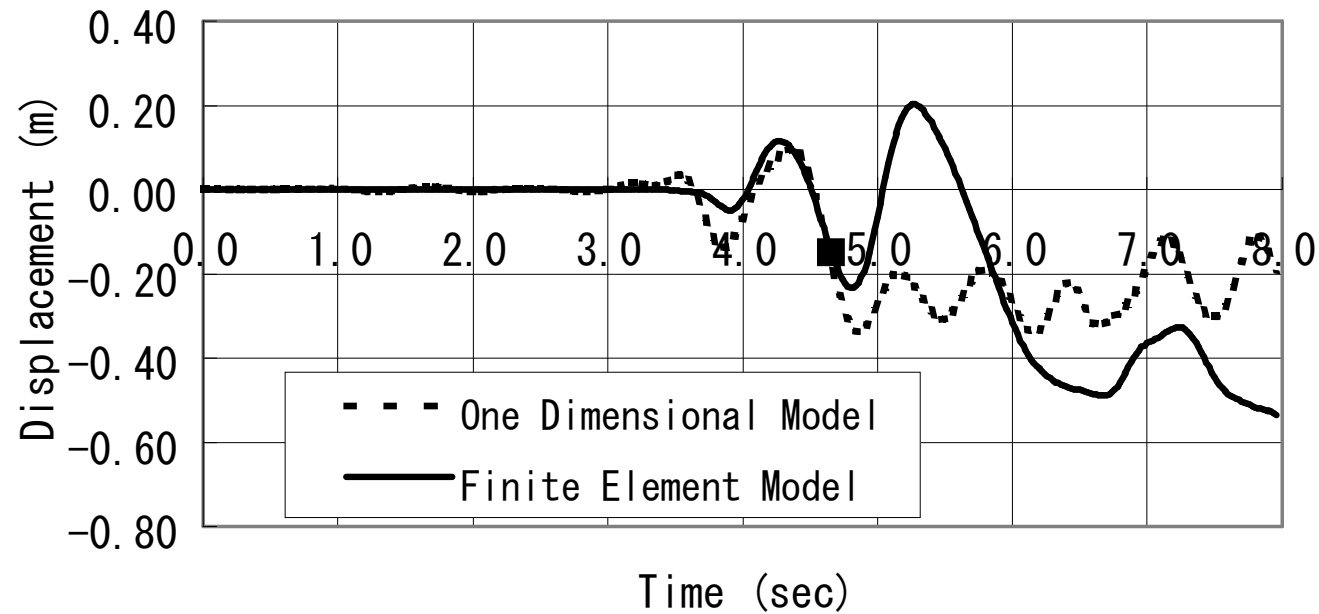
通常のシェル要素の接合

実際の鋼製橋脚の接合

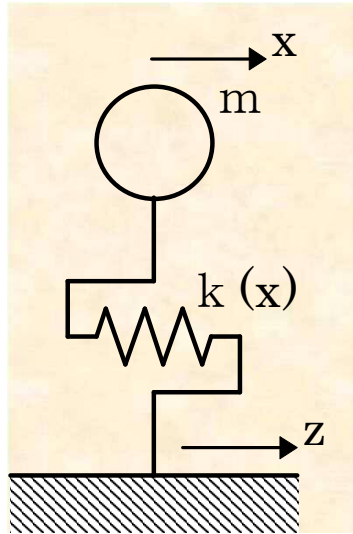
①見えないところを見る技術



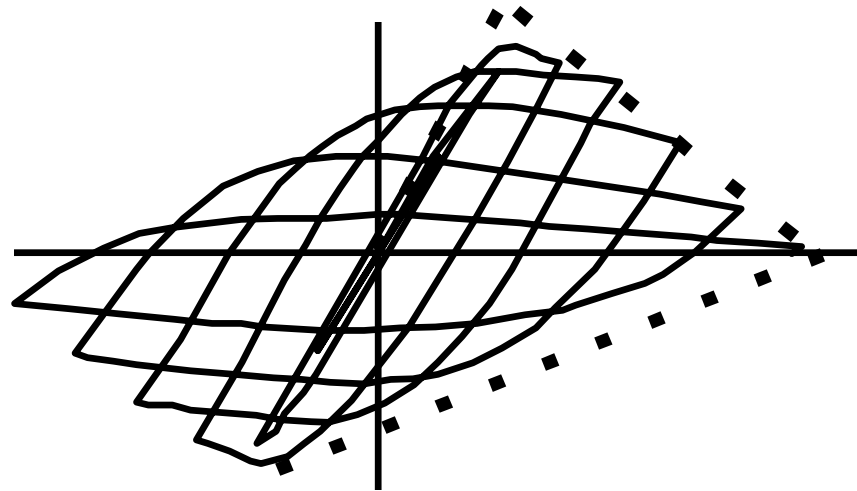
FEMの結果(一次元解析結果も)



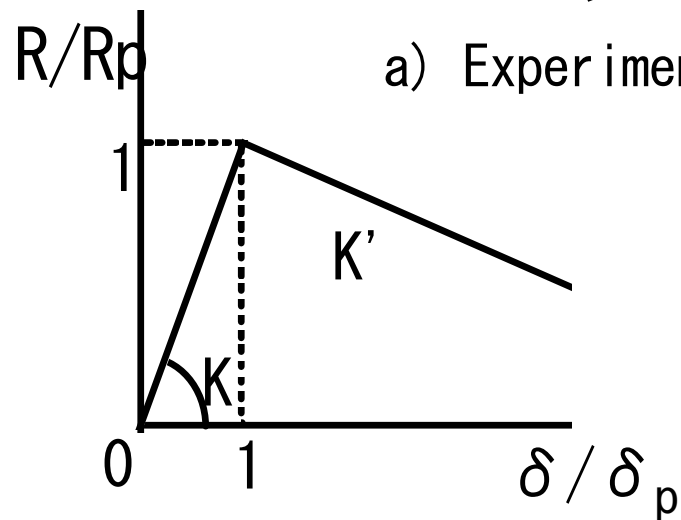
Time history of displacement (JMA Kobe)



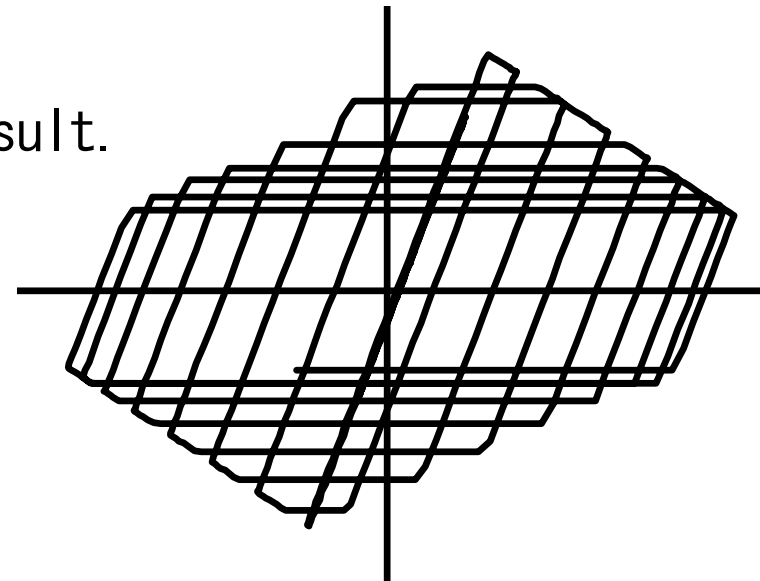
Spring-Mass Model



a) Experimental result.

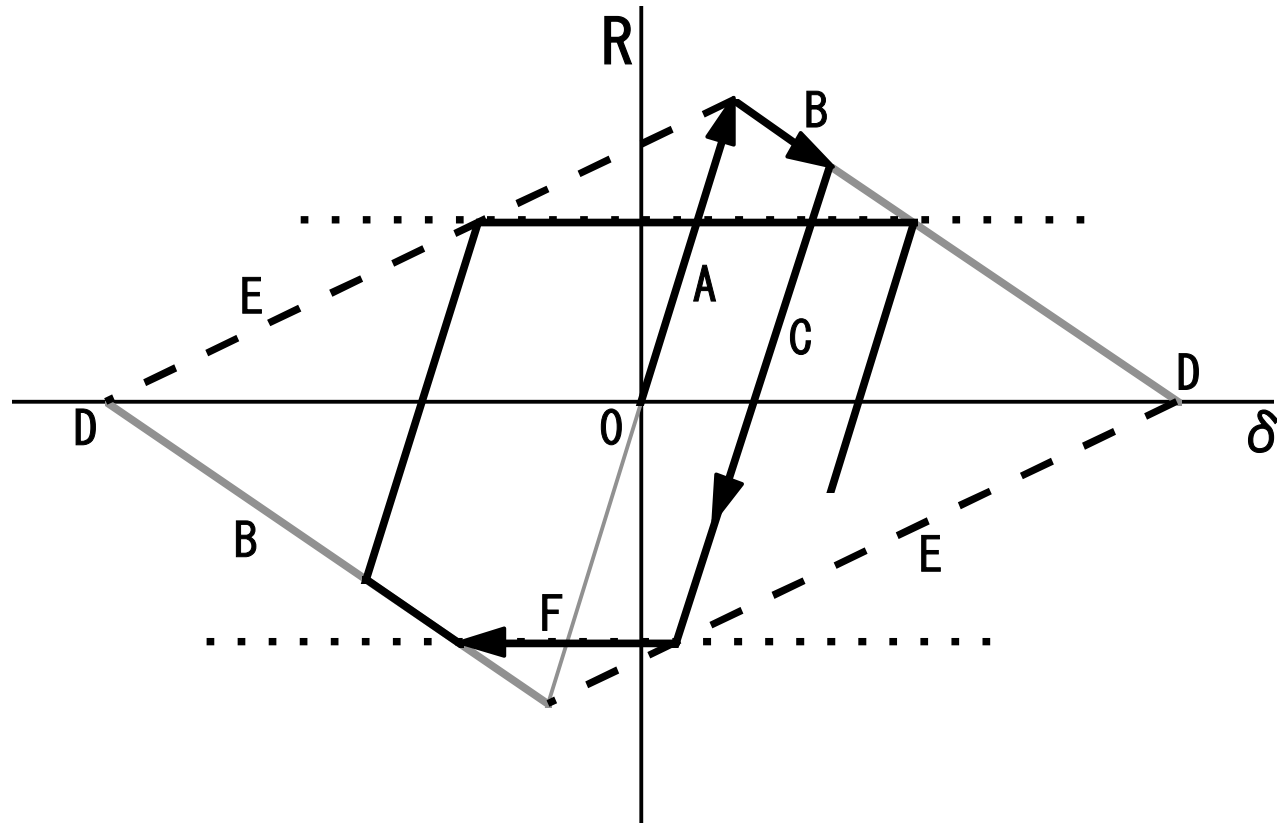


b) Skelton curve.



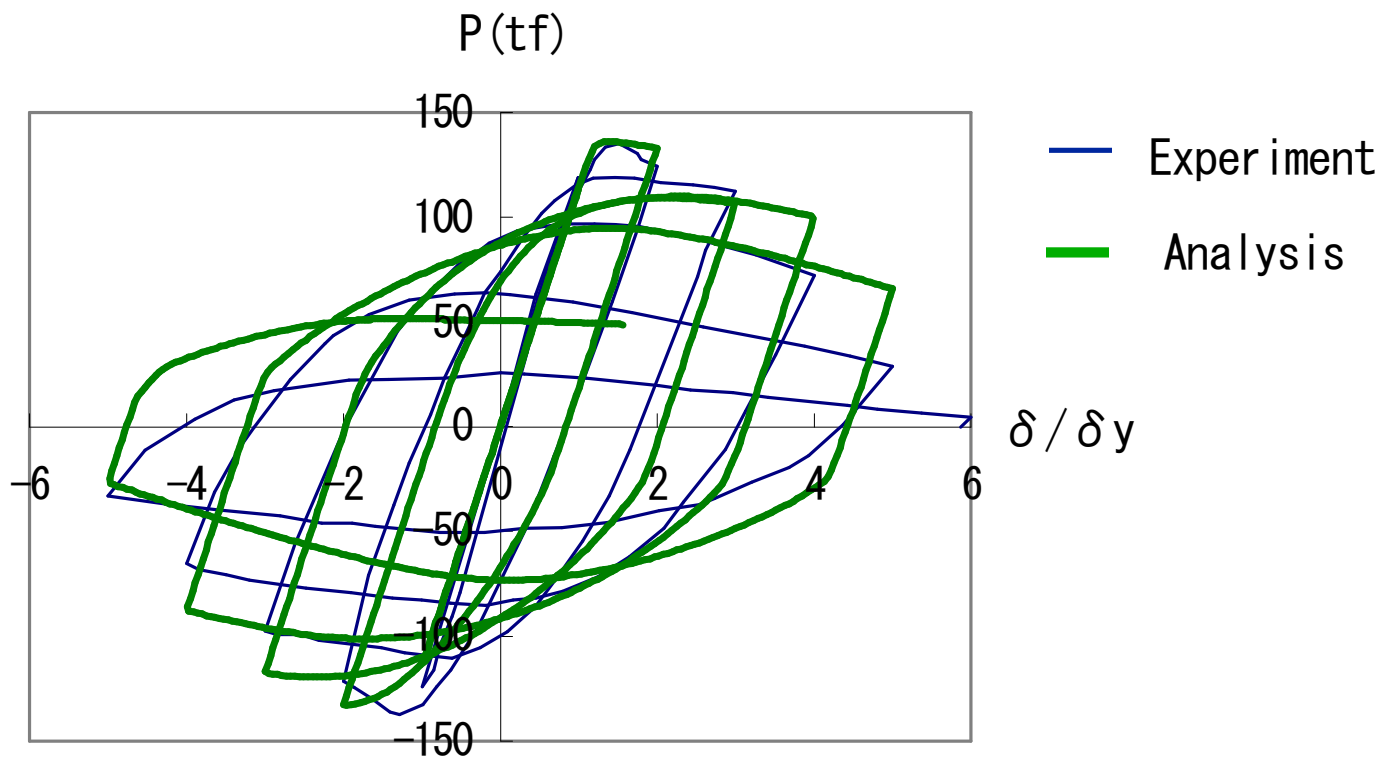
c) Analytical result.

履歴曲線の計算手順



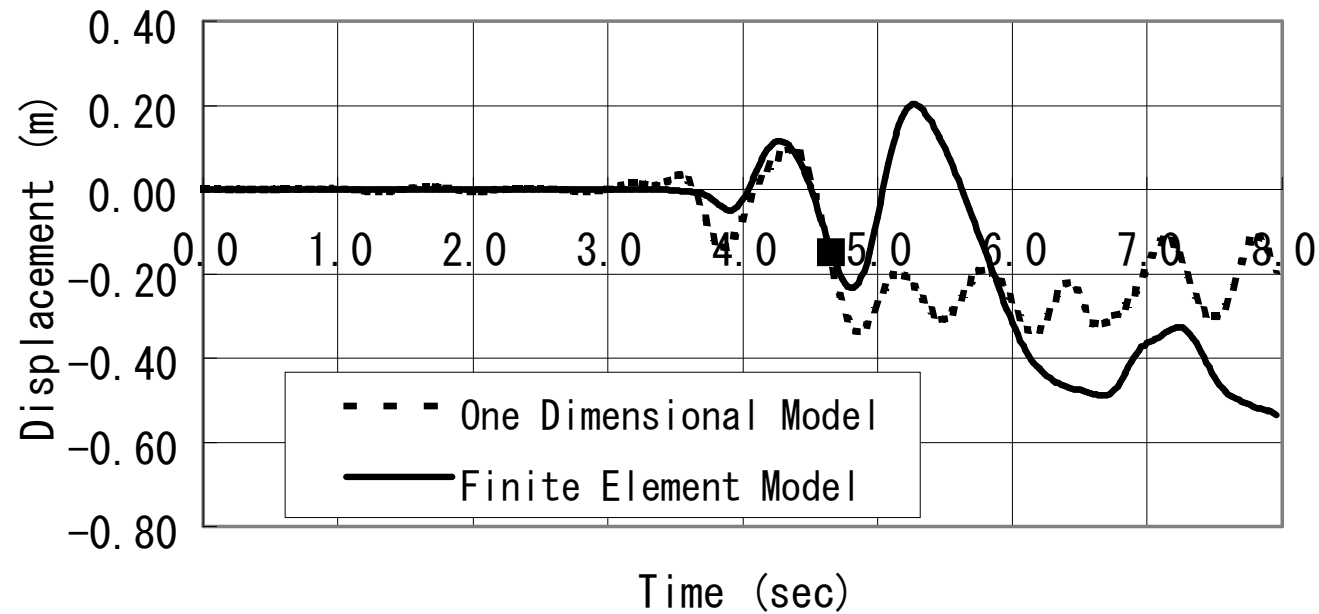
Hysteretic algorithm(Bi-linear model).

数値解析結果(繰り返し挙動)



荷重—変位関係

FEM解析との比較



Time history of displacement (JMA Kobe)

まとめ：数値シミュレーションで分かったこと

- 1) モデル化が非常に重要であること。
- 2) 応力-ひずみ関係はできるだけ正確に表現すること。
→→①理論的研究
- 3) 数値計算には特殊なテクニックが必要であること。
→→②数値解析的研究
- 4) 動的非線形解析では、質量効果、寸法効果、形状効果が重要な役割を果たすこと。
→→③実験的研究、④実構造物での検証

①見えないところを見る技術

1.はじめに

2.被災した鋼製橋脚の数値シミュレーション(神戸地震)

①見えないところを視る技術

3.米国ミネソタ州I-35橋の崩壊メカニズム

②見にくいところを診る技術

4.沖縄辺野喜橋の落橋(構造解析シミュレーション)

③見るべきところを観る技術

5.おわりに

3. 米国ミネソタ州I-35橋の崩壊メカニズム



(出典: MN/DOT)



ミネアポリス I-35W

(出典: MN/DOT)

橋梁崩落事故の概要

- 場所：米ミネソタ州ミネアポリス ミシシッピ川に架かる橋梁
- 日時：2007年8月1日午後6時5分（日本時間2日午前8時5分）
- 橋梁崩落時の状況：
 - 崩落したトラス橋部分の長さ：324m
 - 被害車両：転落した車50台以上
 - 橋の上に取り残された車10台以上（スクールバス含む）
 - 崩落前の状況：橋梁の補修作業中で車線規制あり
- 死傷者数等：死者数13人（8月23日確定）

対象鋼トラス橋の諸元

供用年:1967年

橋長:581.3m

支間長:中央径間長139.0m、側径間長81.0m

構造:鋼上路トラス橋(3径間)、

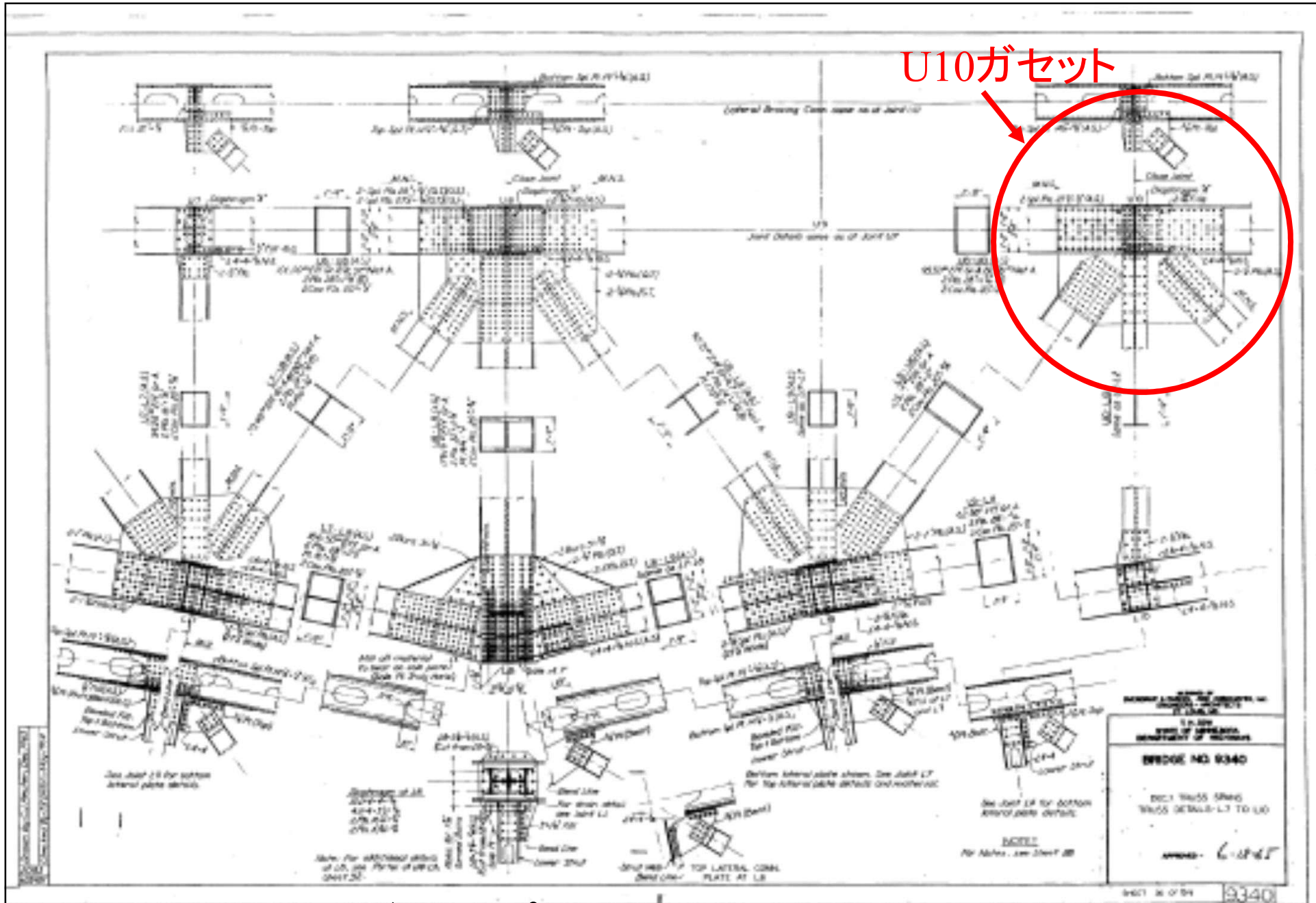
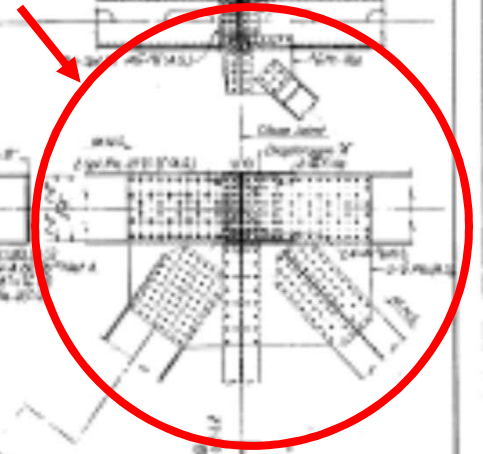
桁下高:19.5m

幅員:34.5m

車線数:8車線(6車線+加減速車線)

交通量:約14万台／日

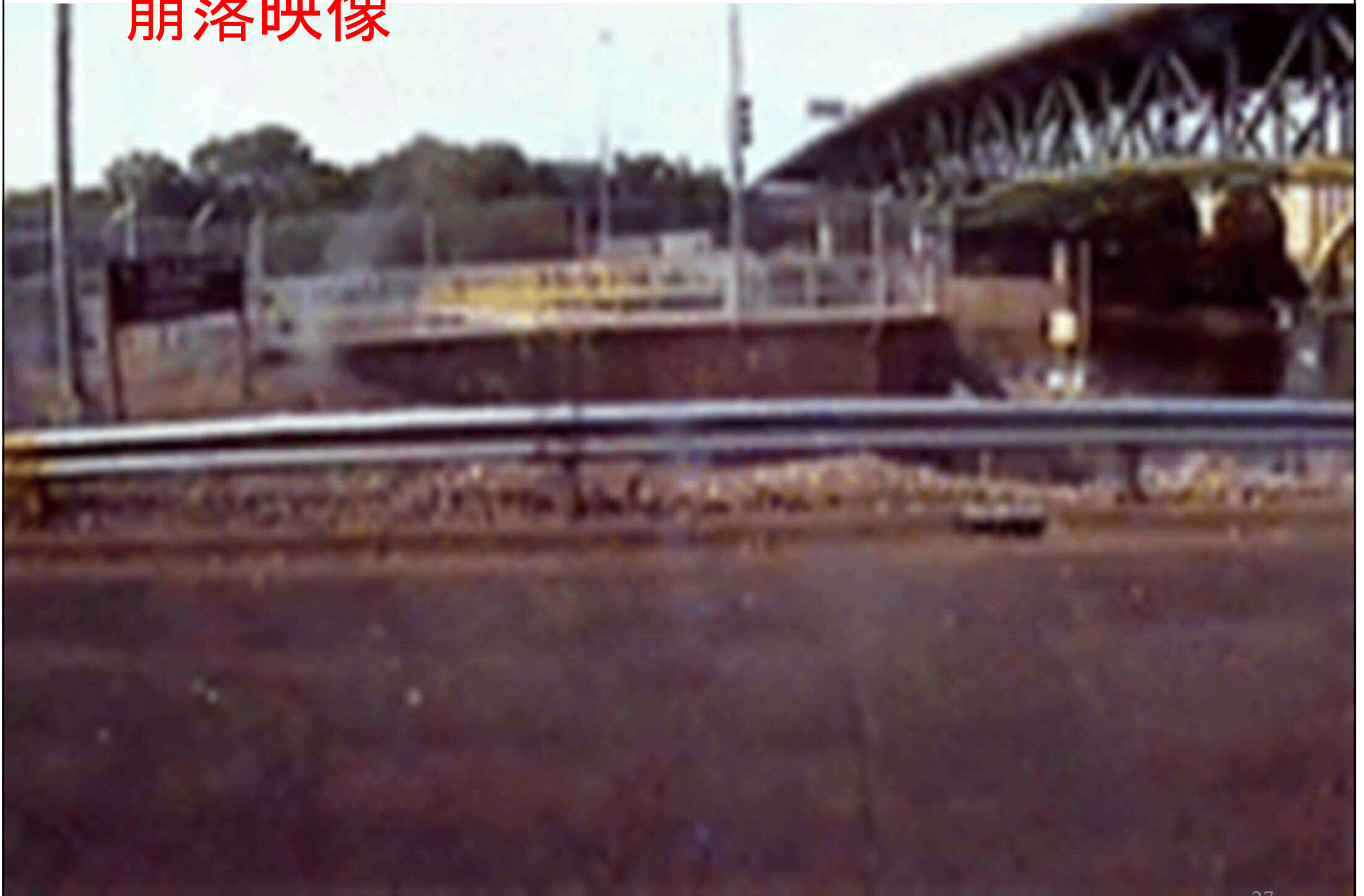
U10ガゼット



橋梁ガゼットプレート構造図 (L7-L10)

(出典: MN/DOT) 26

崩落映像



崩壊メカニズム解析

崩壊解析の仮定: 最初の損傷は一箇所から

解析は3段階:

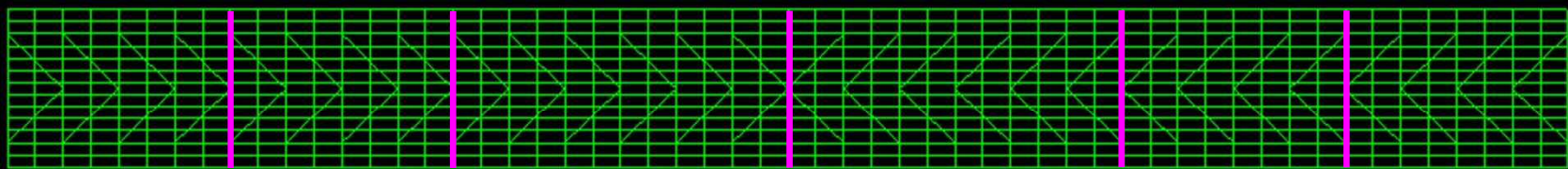
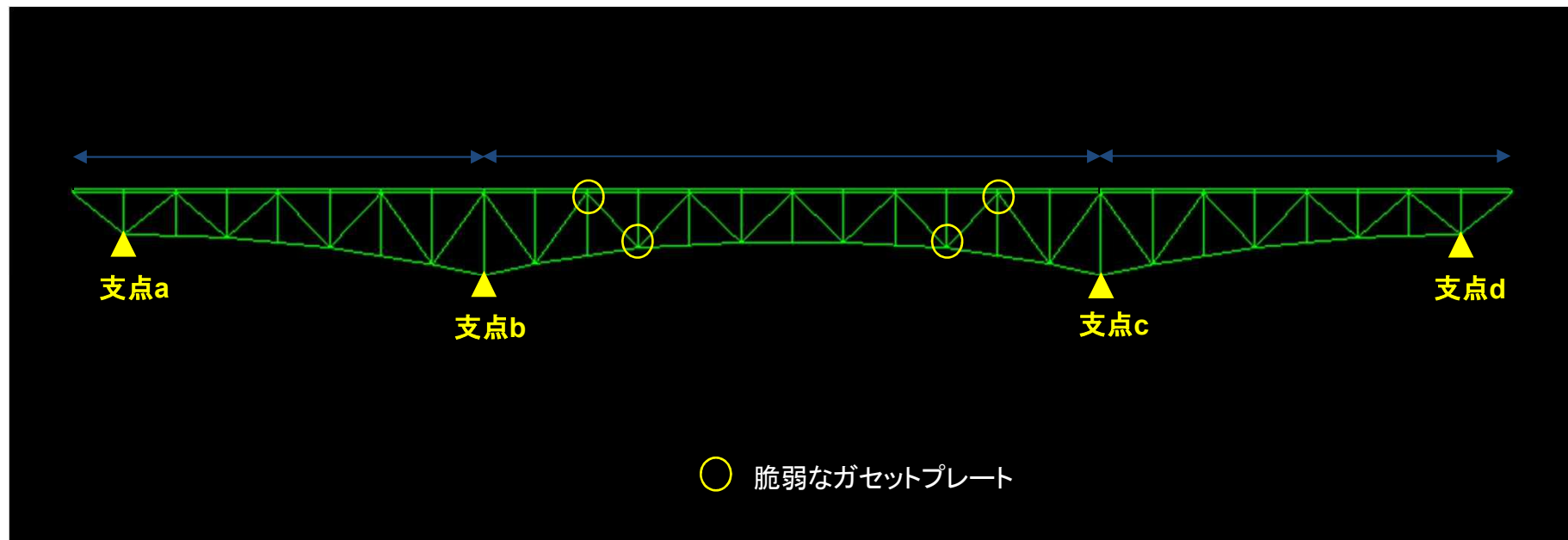
1. 橋梁の全体崩壊メカニズムの解析(線形) :Global
2. 橋梁の局部損傷の解析(非線形) :Local
3. 局部損傷による全体崩壊メカニズム(非線形) :Glocal

1. 橋梁の全体崩壊メカニズムの解析 (線形解析)

Fracture Critical Member

FEMの汎用コードDIANA(梁要素のみ)を用いて、鋼トラス橋の崩壊過程を線形解析によりシミュレーションする。

解析モデル・境界条件



鋼トラスの線形崩壊メカニズム解析

第一段階：FCMに注目

- ① 自重解析
- ② 崩壊にまで至る引張部材の特定
- ③ 崩壊メカニズムの解析

線形崩壊メカニズム解析の手順

① 自重解析により引張力を受ける部材を特定する。



② ①で特定した引張部材のうち、1部材が欠損したと仮定し、1部材を欠損させ自重解析を行なう。



③ ②の結果、他の部材に生じる応力が降伏応力に達すれば、さらにその部材が欠損したと仮定し解析を続ける。



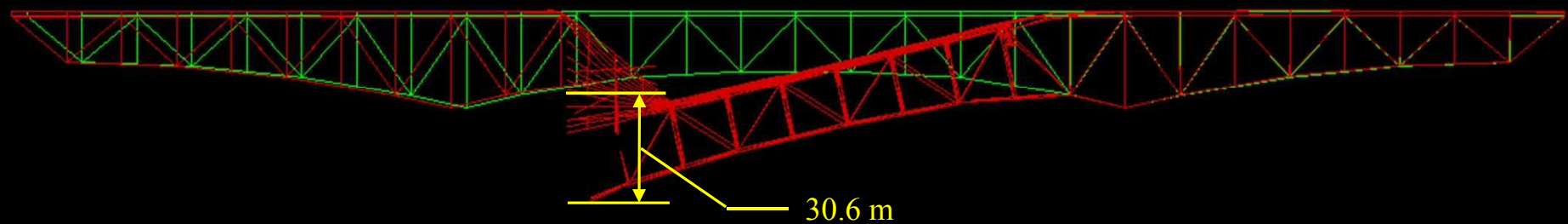
④ ③のプロセスを、降伏応力が発生する部材がなくなるまで繰り返す。

ただし、ここでは降伏応力を**345N/mm²**として線形静的解析を行い、脆弱な格点部近傍における降伏応力は**200 N/mm²**としている。

崩壊メカニズム：引張部材の損傷が出発点

応力・変形図

変形図（倍率0.8倍）





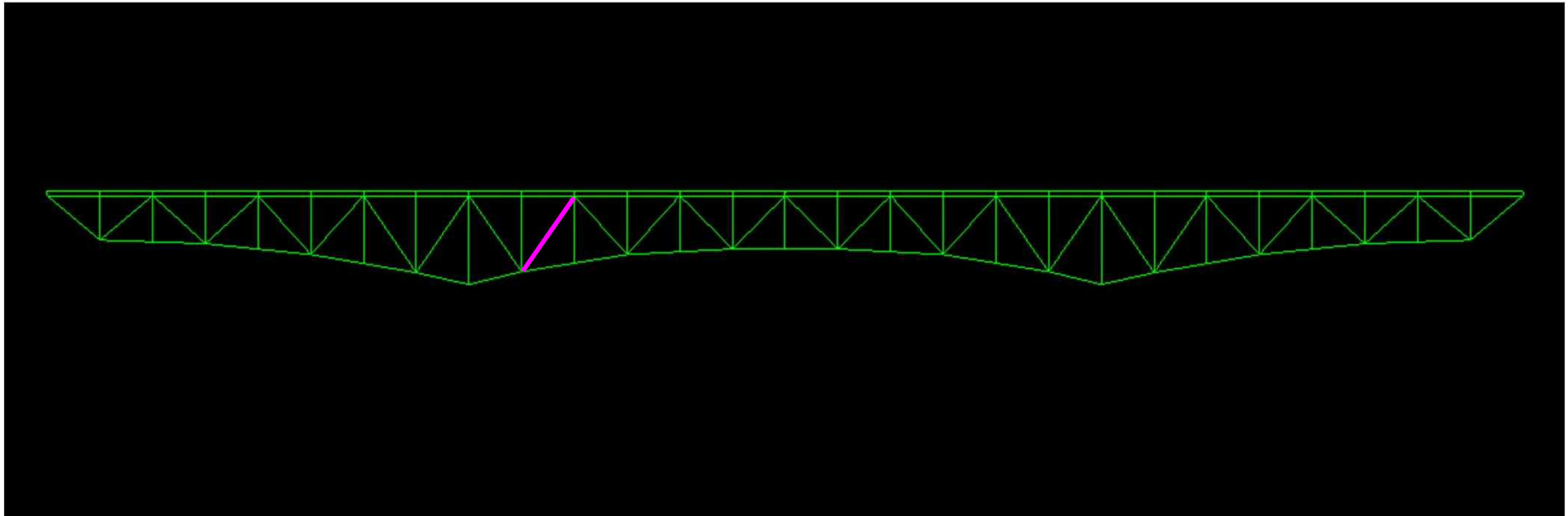
ガセットプレートの変形

②見にくいところを診る技術

(出典: MN/DOT)

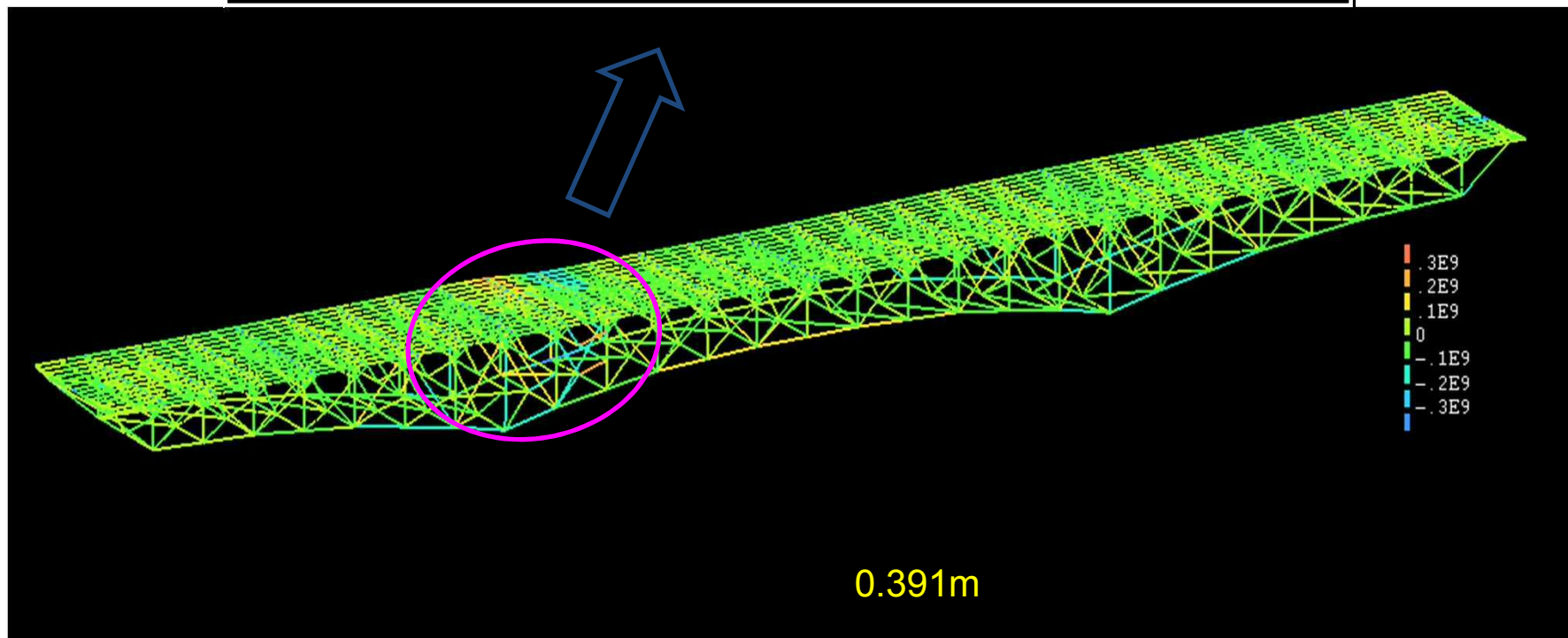
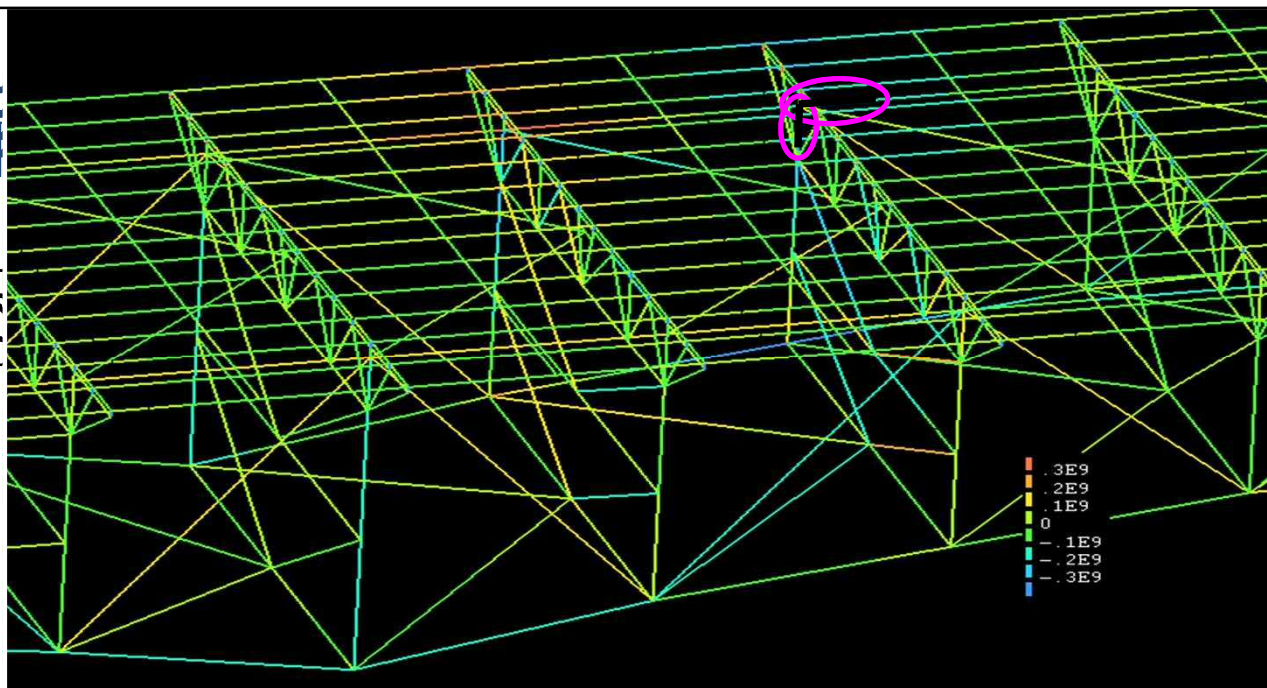
崩壊メカニズム：圧縮材の損傷を出発点

CASE 2 圧縮材(斜材)を欠損させる



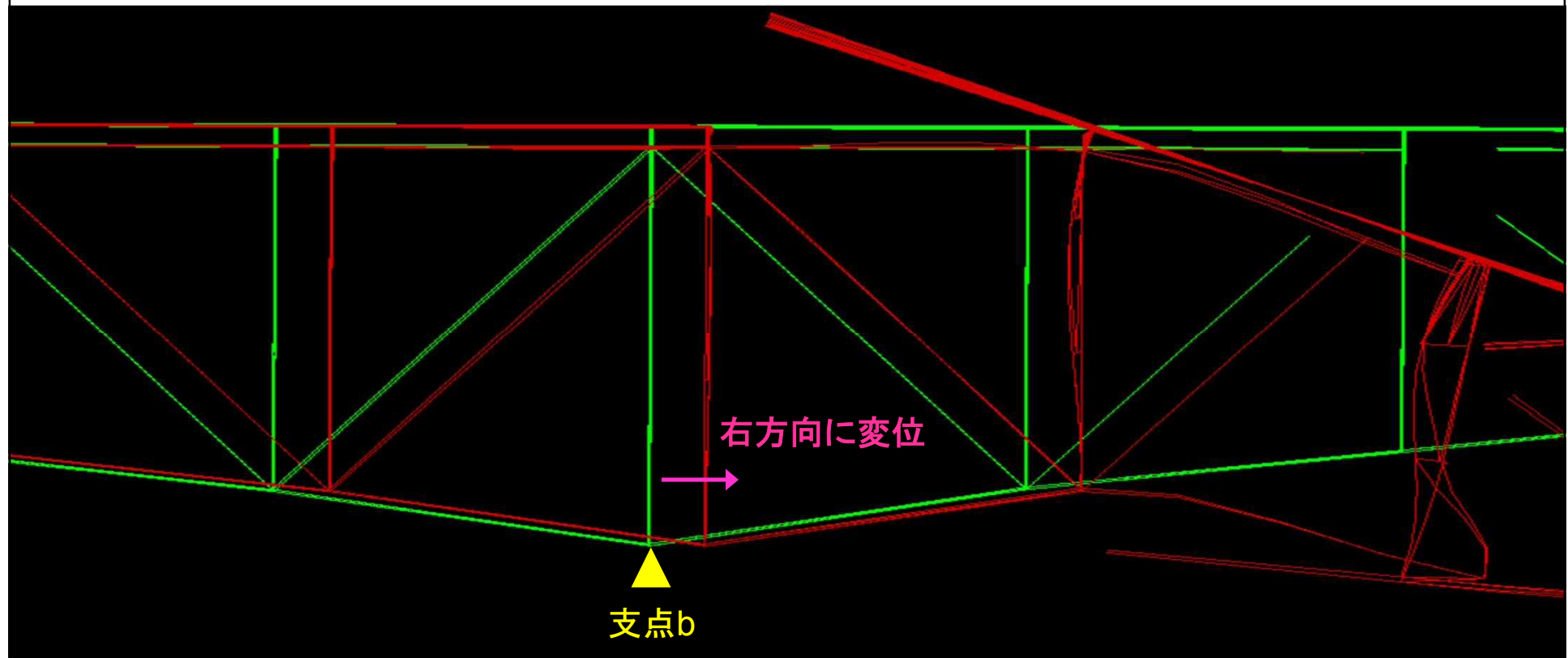
解

応力・変



崩壊メカニズム：南側の側径間の川方向への移動

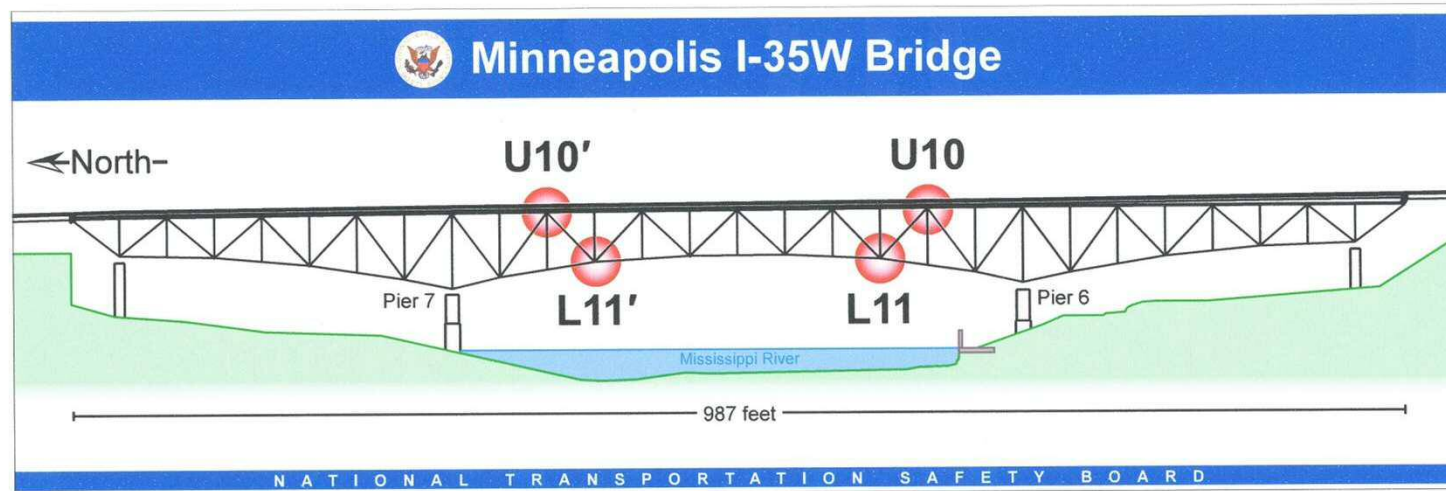
応力・変形図



線形崩壊メカニズム解析の結果

線形解析の結果によれば、圧縮部材が損傷した可能性が大きい。したがって、圧縮部材の結合部であるガセットプレートに注目する。

過小な板厚のガセットプレートの存在

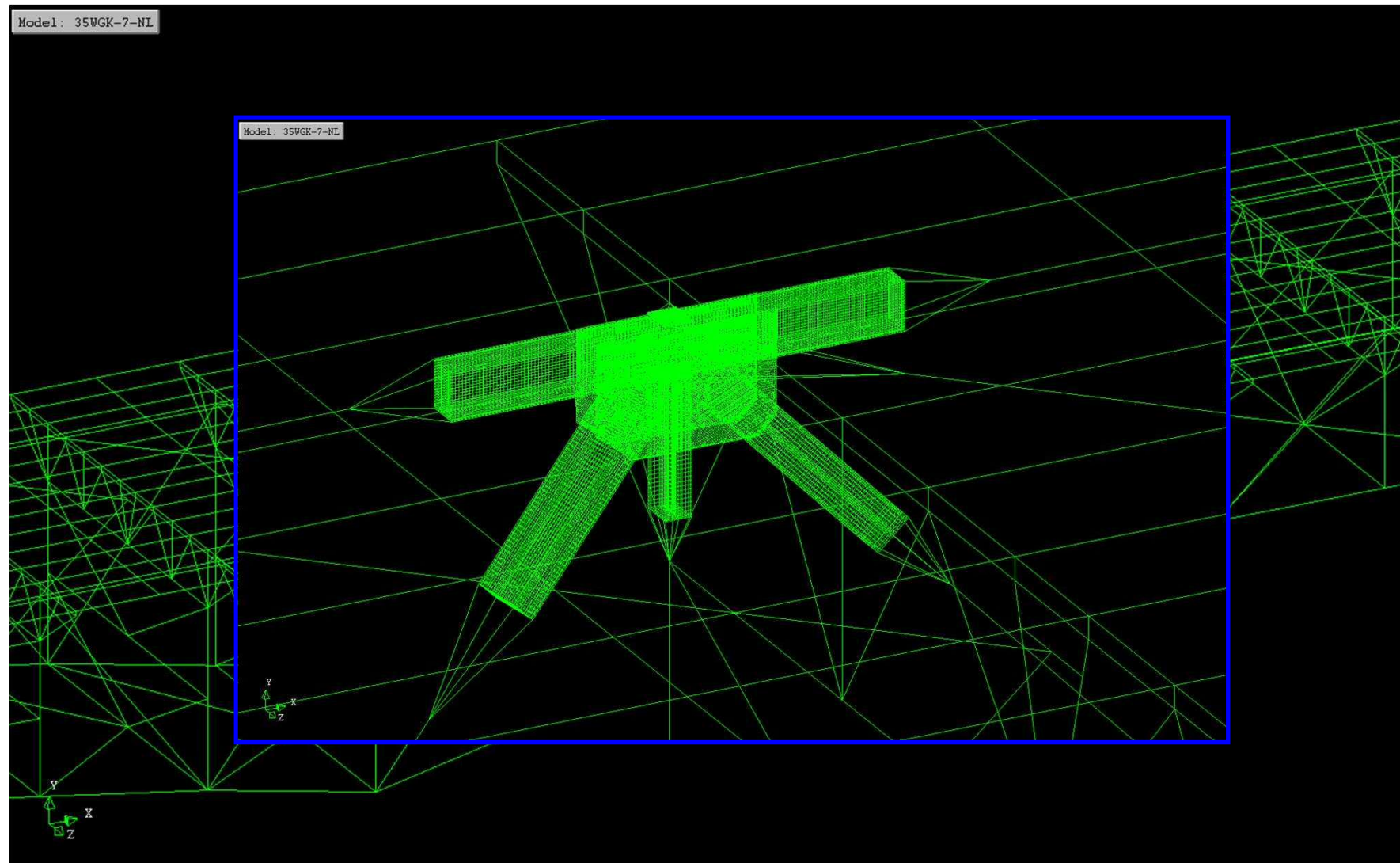


2. 橋梁の局部損傷の解析(非線形解析)

格点部(U10)の詳細なモデル化

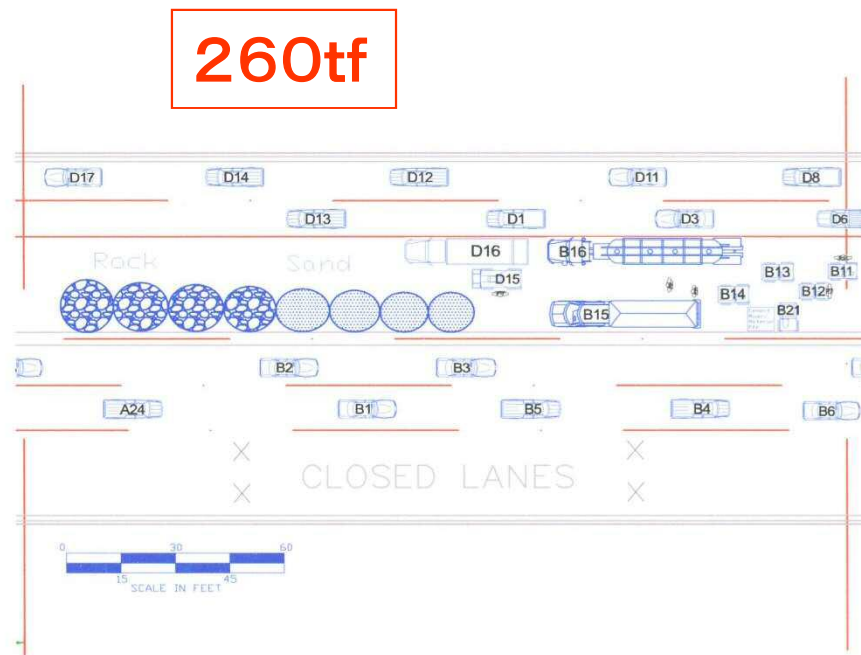
崩壊の起点であると考えられている格点部(U10)のガッセットプレートおよび近傍の部材を詳細にモデル化し、DIANA(シェル要素、梁要素、バネ要素)を用いて非線形解析を行う。

格点部(U10)のモデル化



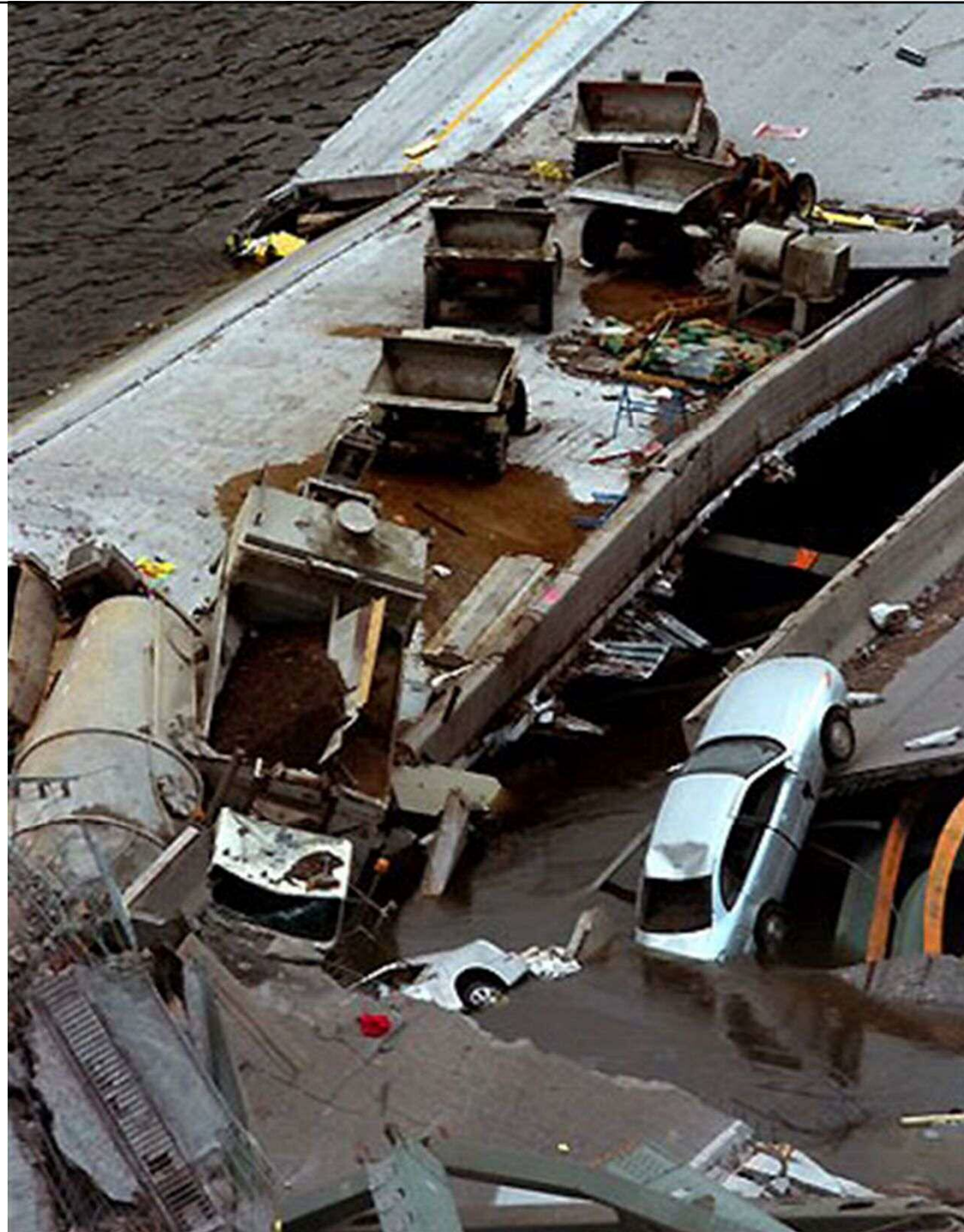
工事荷重の載荷

Figure 1d - Scale Diagram of Pre-Collapse Bridge (Zoom 3 of 6)

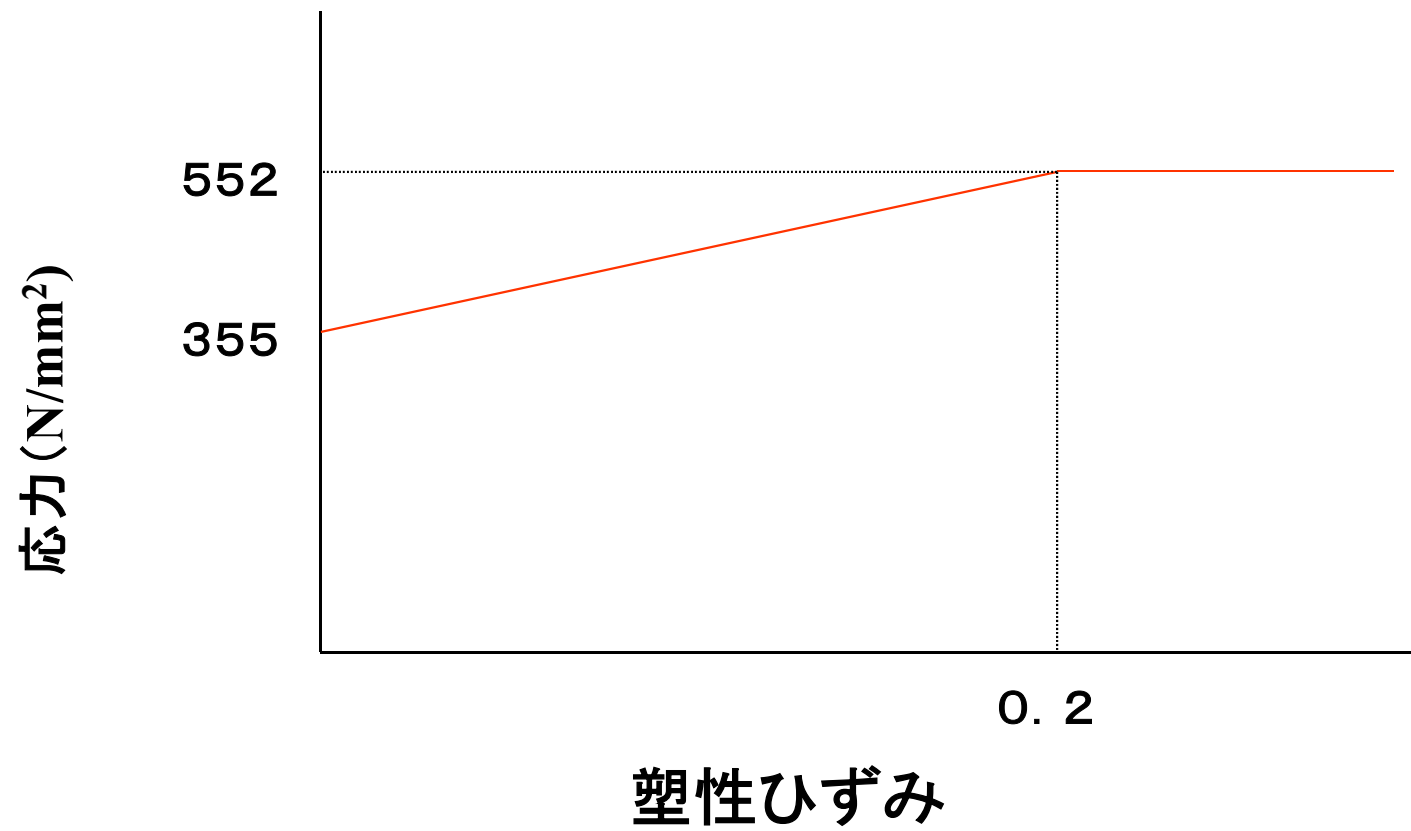


補修工事中の
事故であった

(出典: MN/DOT)



鋼材の構成則

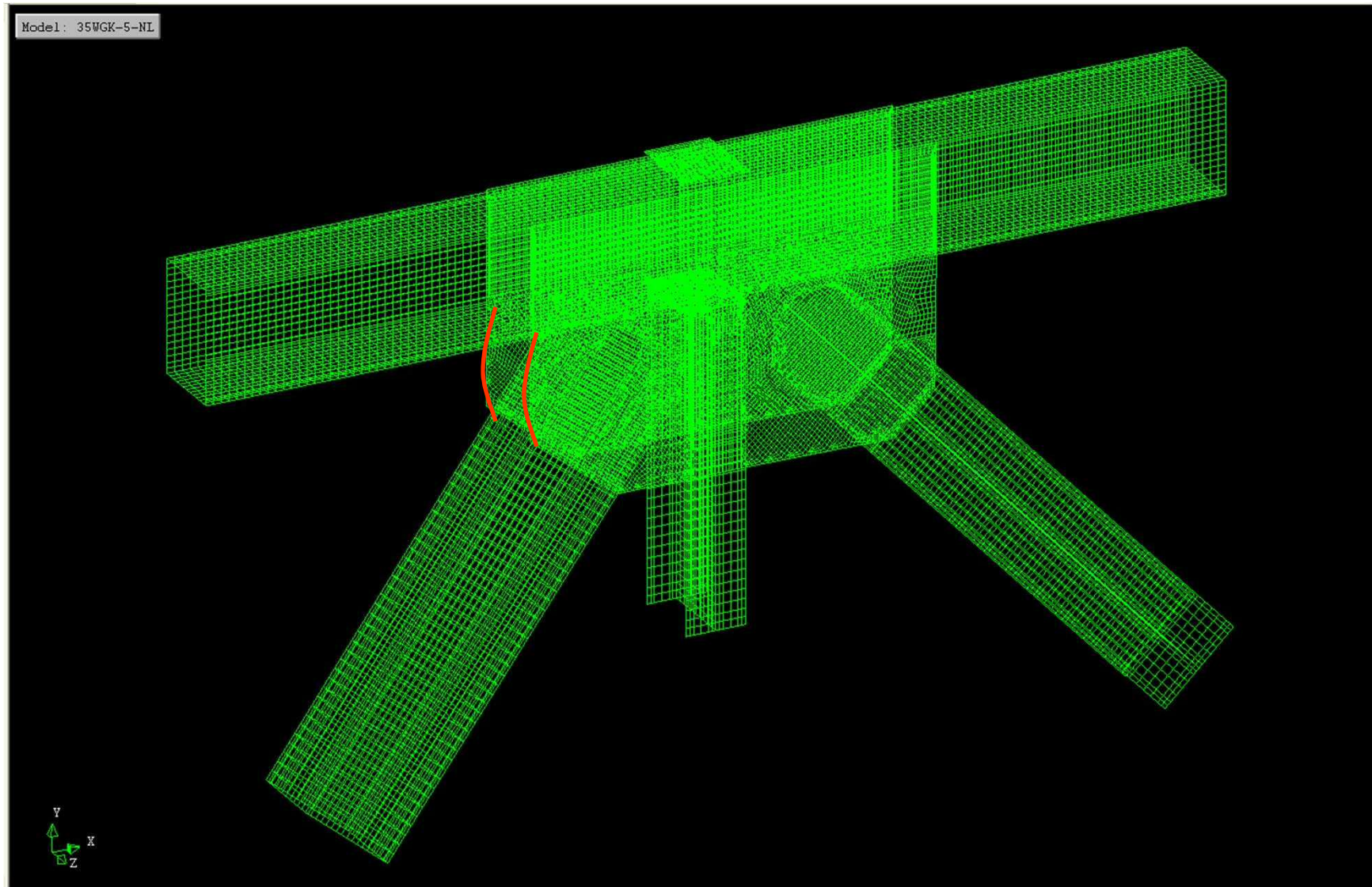




ガセットプレートの変形

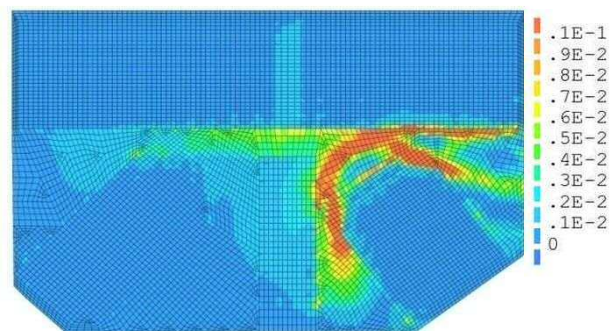
(出典:MN/DOT)

ガセットプレートのモデル化（初期の曲げ変形あり）

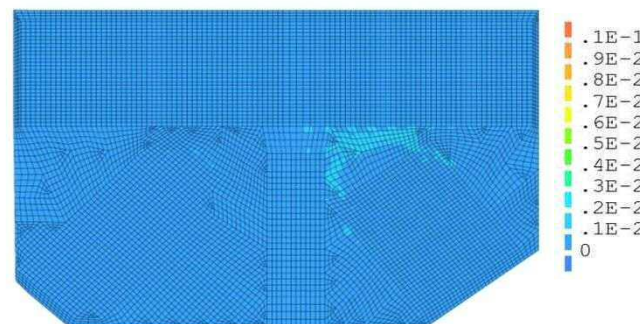


U10格点部の応力状態の評価

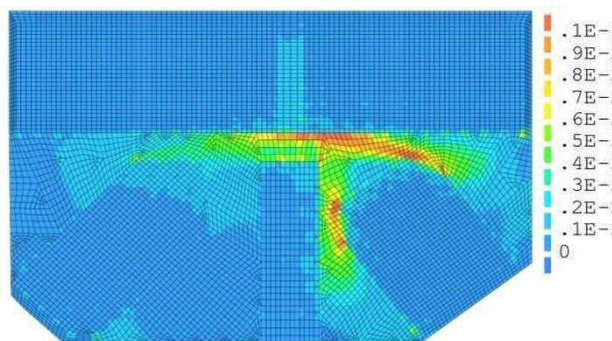
解析結果



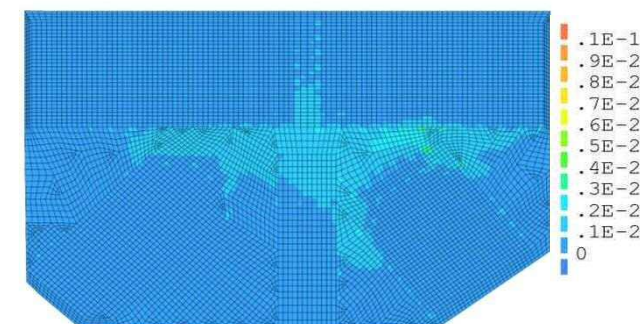
CASE-1 (実際の条件)



CASE-3 (板厚2倍)



CASE-2 (面外変形なし)

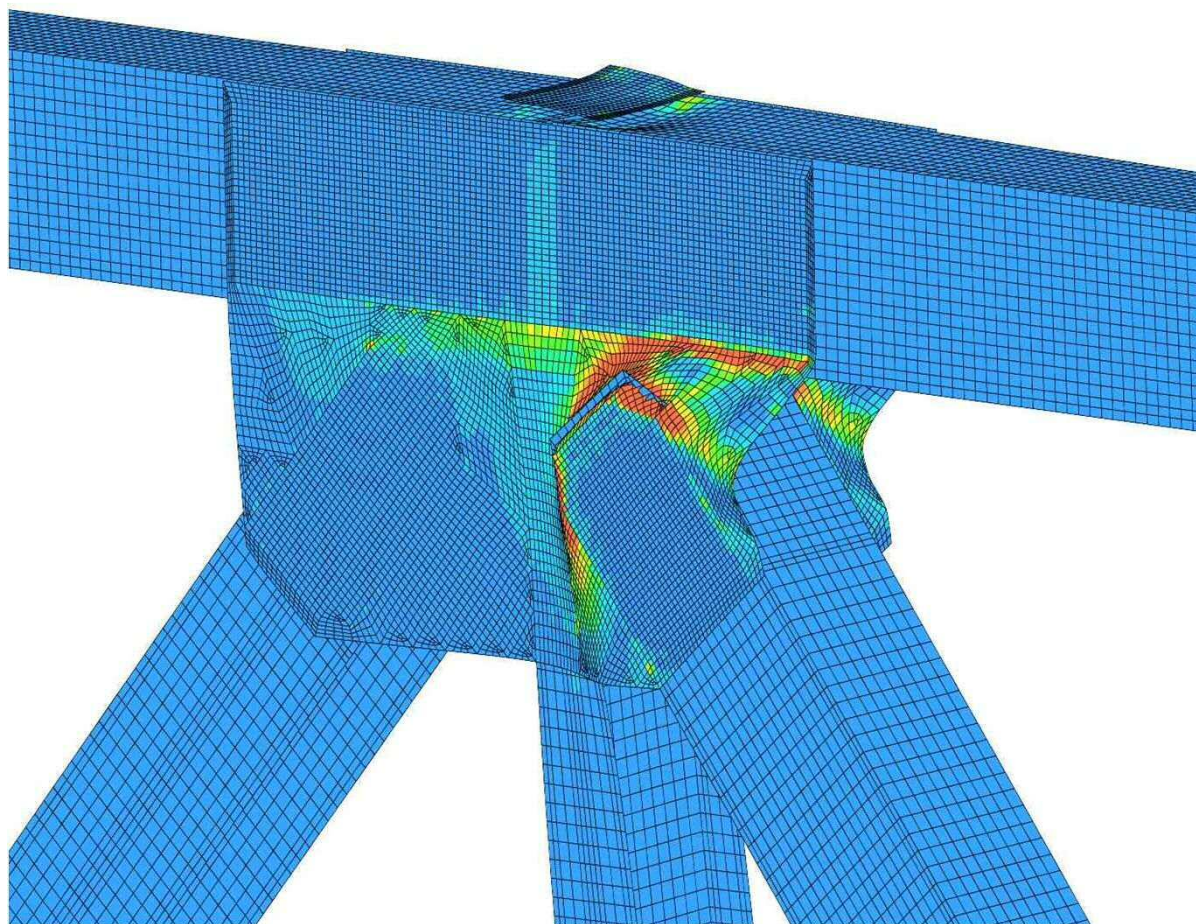


CASE-4 (工事荷重なし)

相当塑性ひずみの最大値(西側表面のひずみ)

	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
相当塑性 ひずみ(%)	9.1	3.1	0.39	0.68

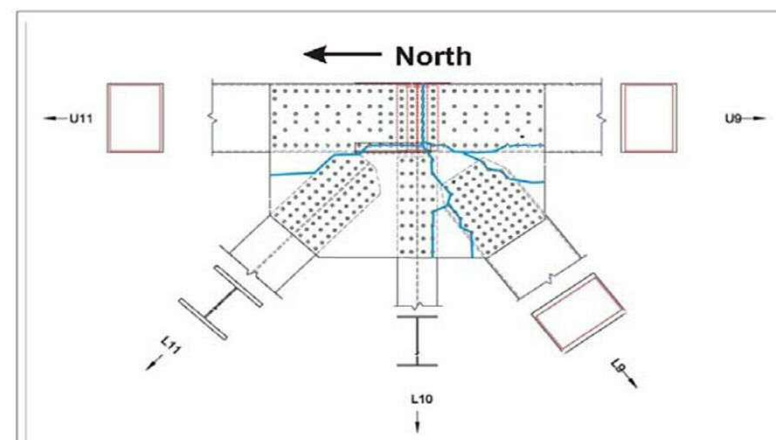
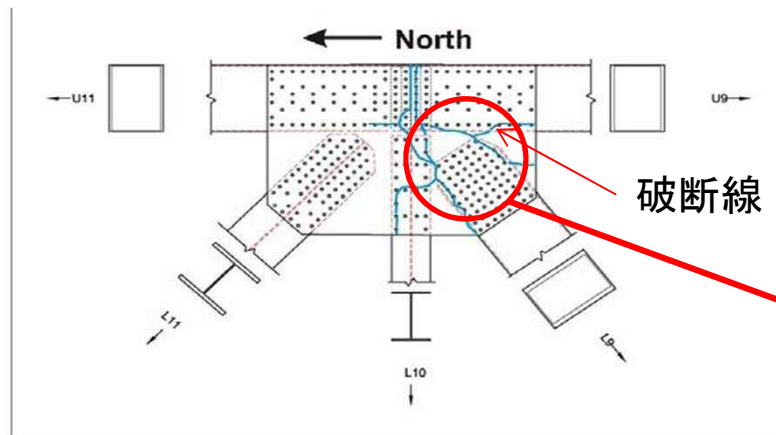
解析結果



ガセットプレートの変形(5倍)

ガセツプレート破断

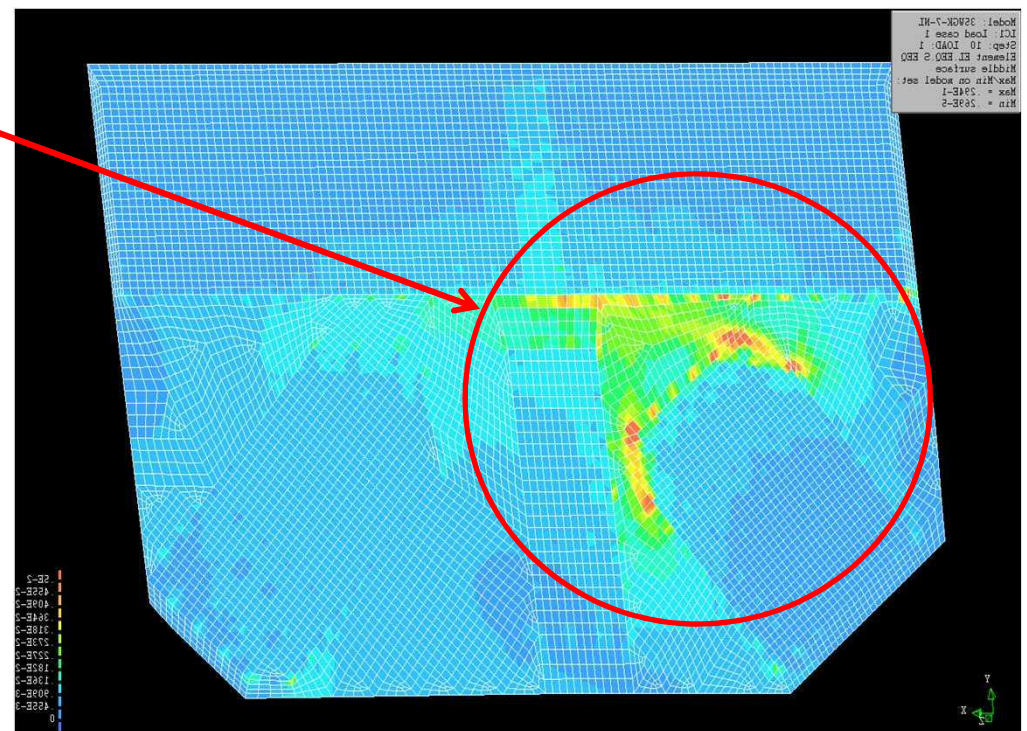
(出典:NTSBの最終報告書)



ガセツプレートのひずみ

(解析結果: 赤いところがひずみ大きい)

(自重+工事荷重+初期面外変形)のとき



局所損傷解析(非線形解析)の結果

西側U10のガセットプレートの損傷が崩壊の起点である可能性が非常に高い。

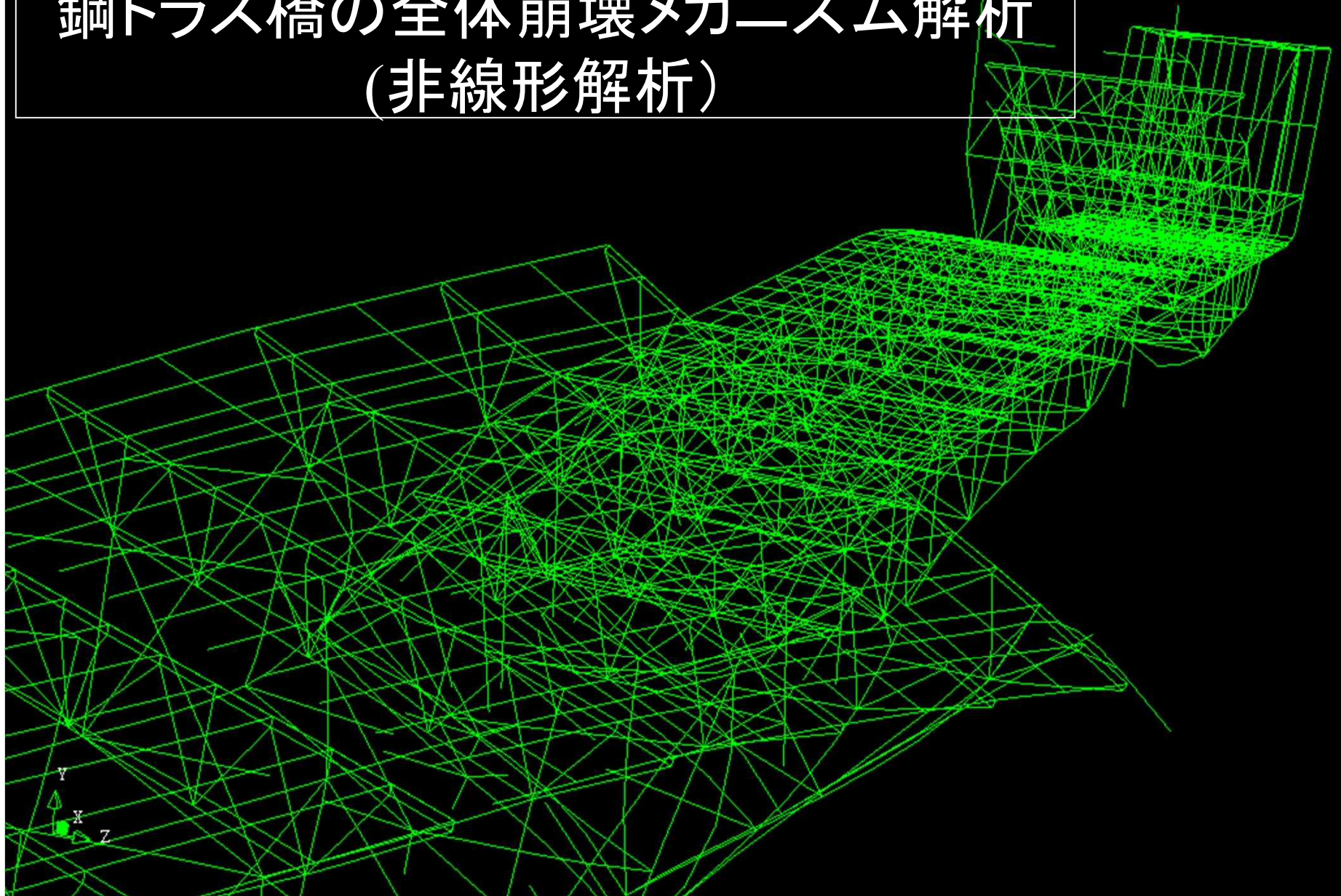
仮定した条件の下では、相当塑性ひずみは一部で破断のレベルに達している可能性が非常に高い。

3. 局部損傷による全体崩壊メカニズム (非線形解析)

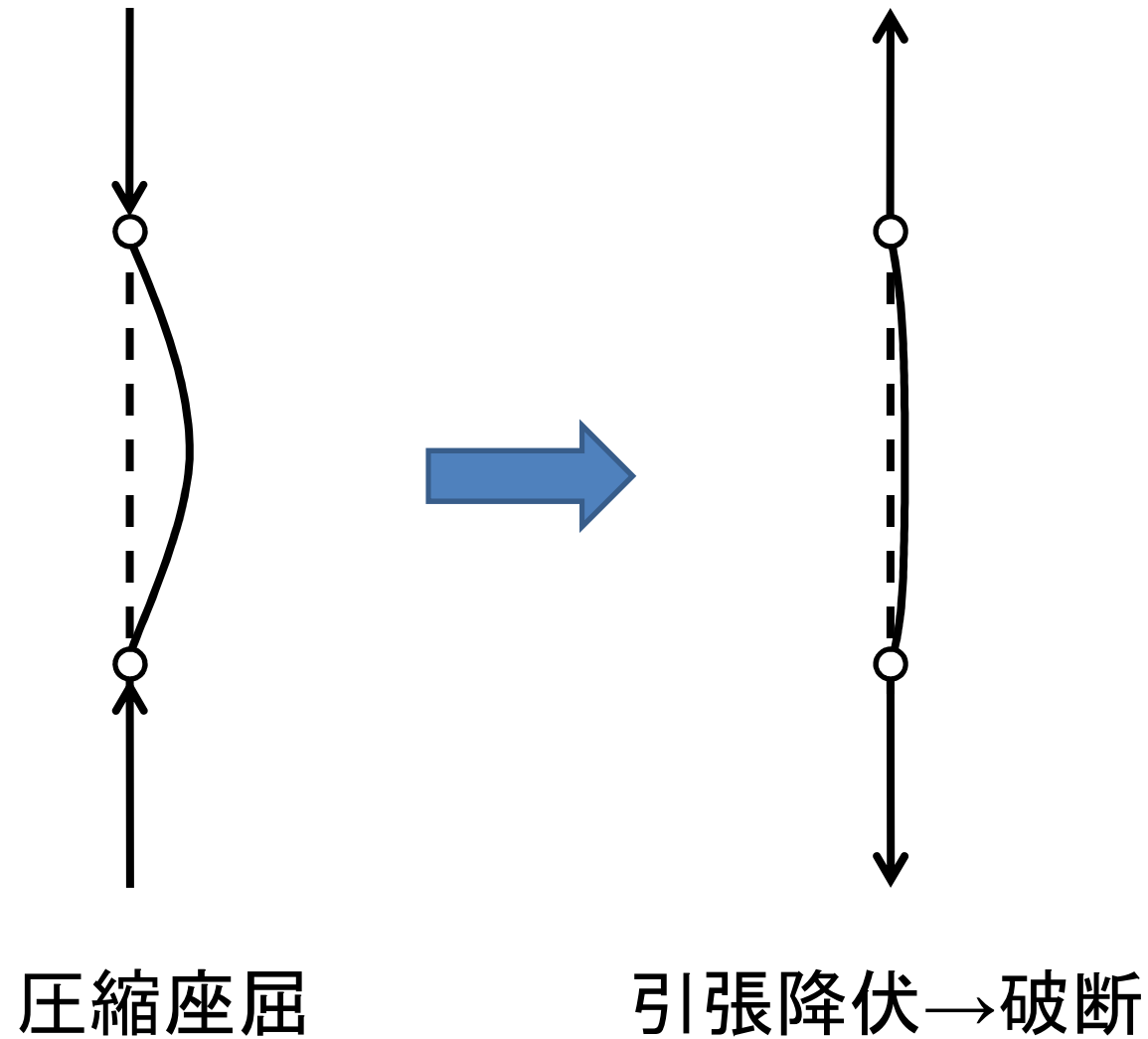
鋼トラス橋の全体崩壊メカニズム

FEMの汎用コードDIANA(梁要素)を用いて、鋼トラス橋の崩壊過程を非線形解析によりシミュレーションする。

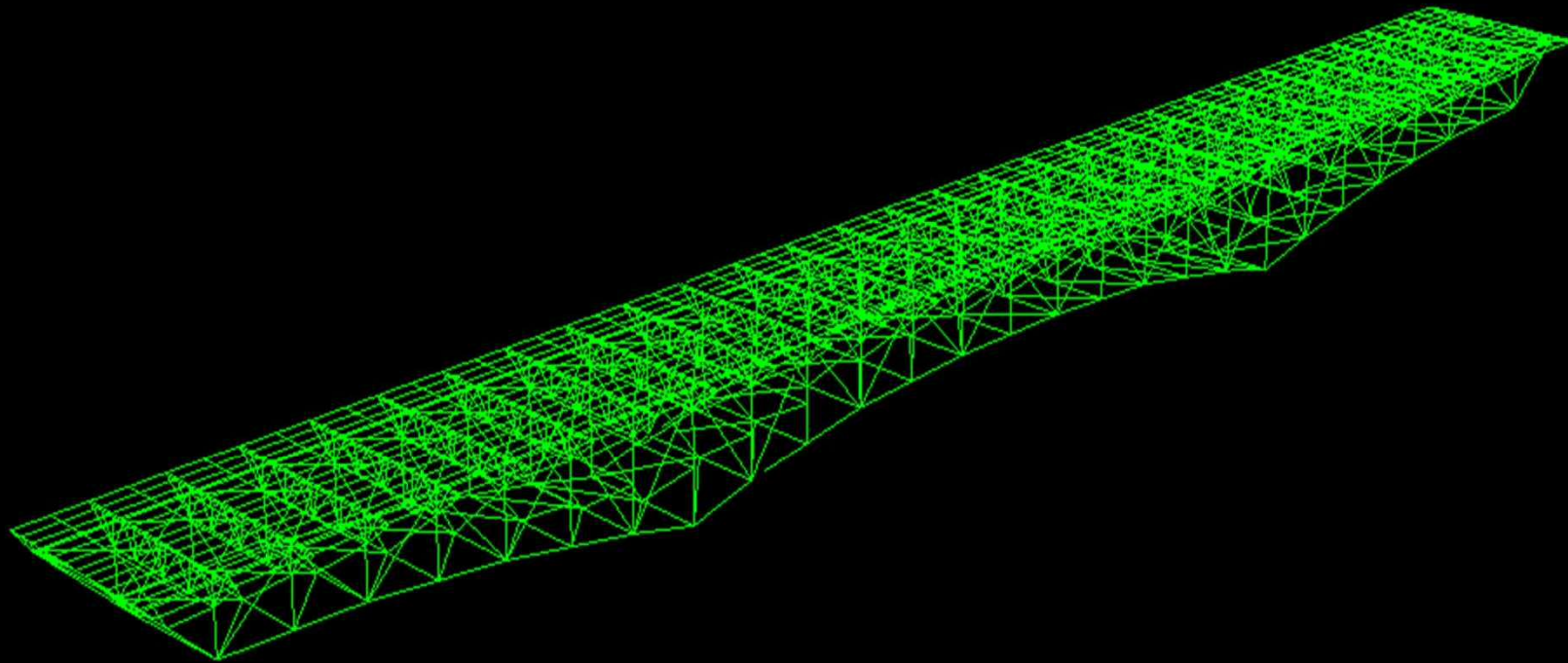
鋼トラス橋の全体崩壊メカニズム解析 (非線形解析)



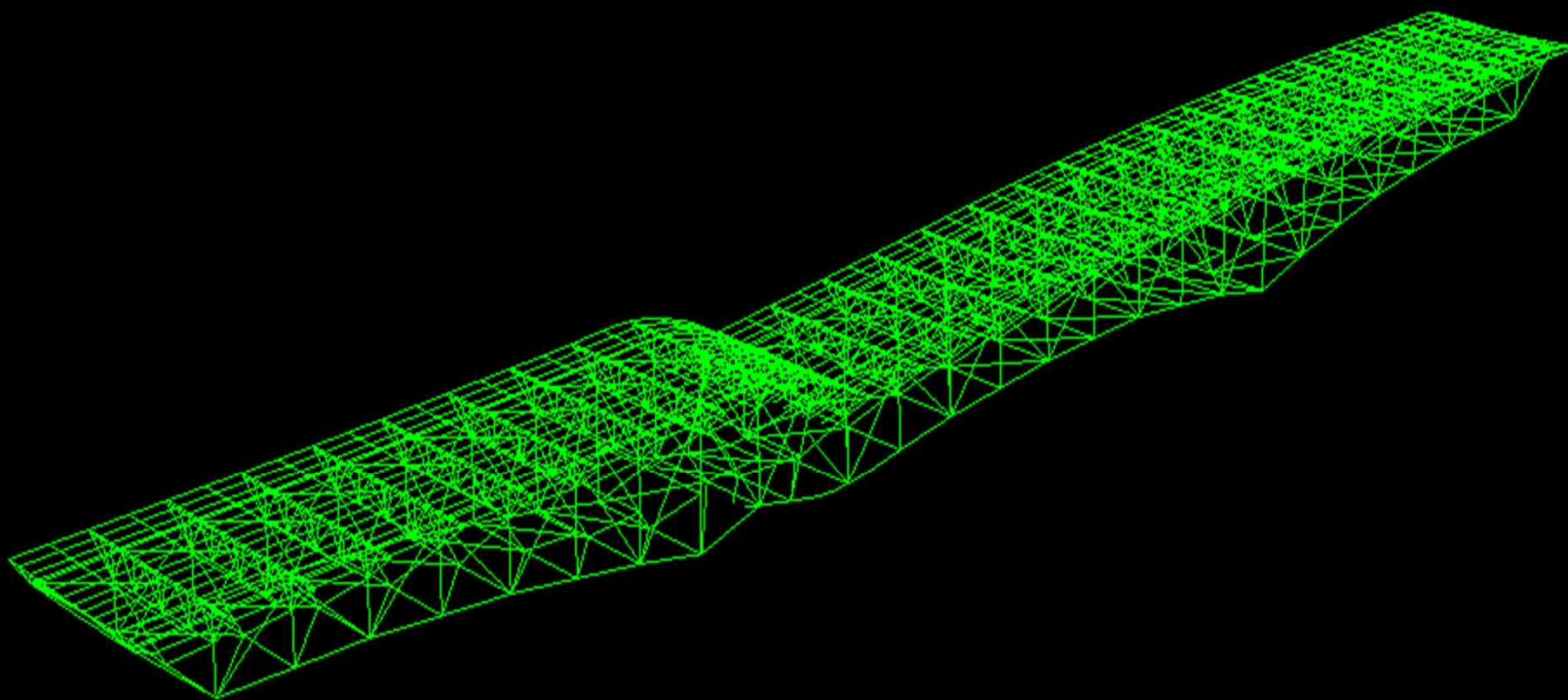
問題提起：崩落途中で座屈した部材の扱い



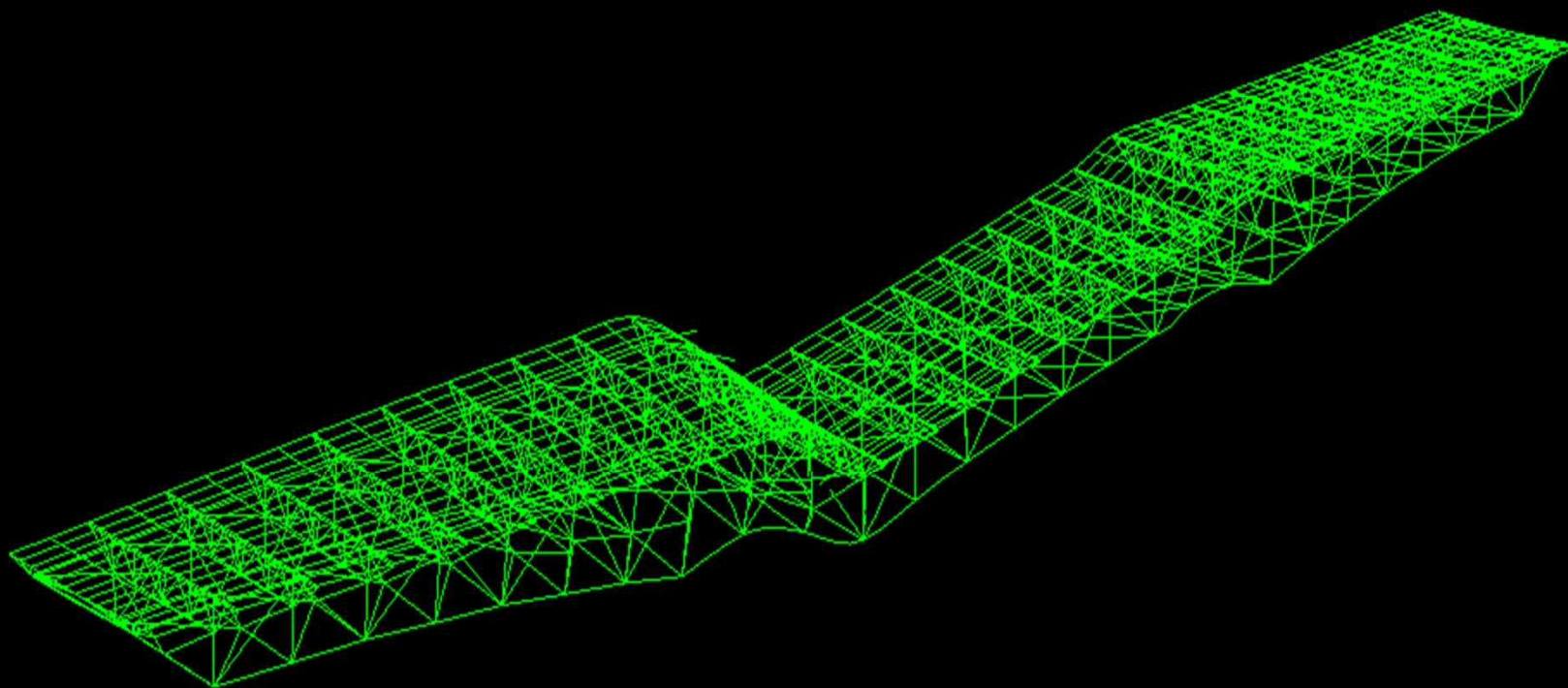
①崩落前の鋼トラス橋



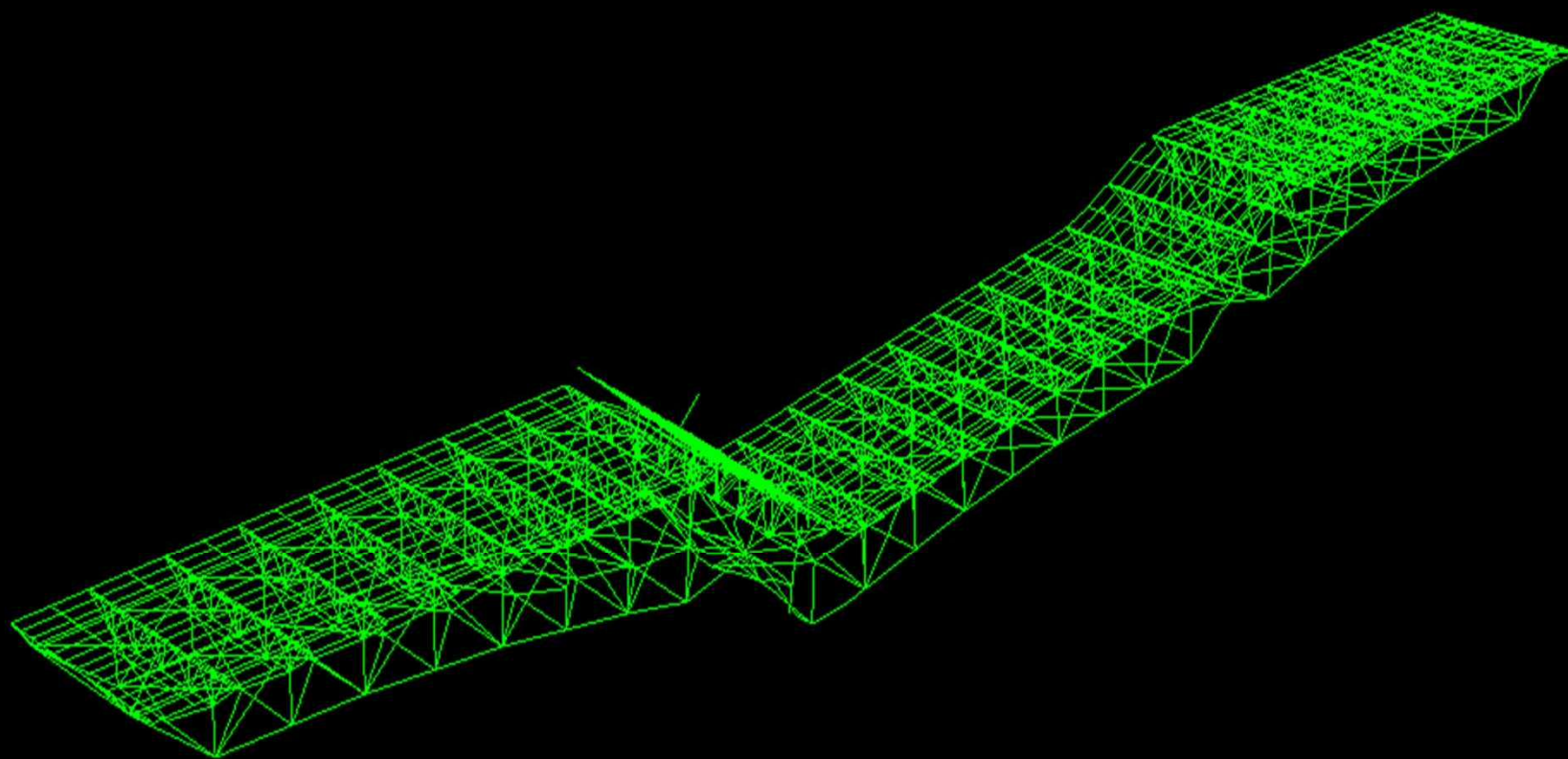
②中央径間南側の崩落開始



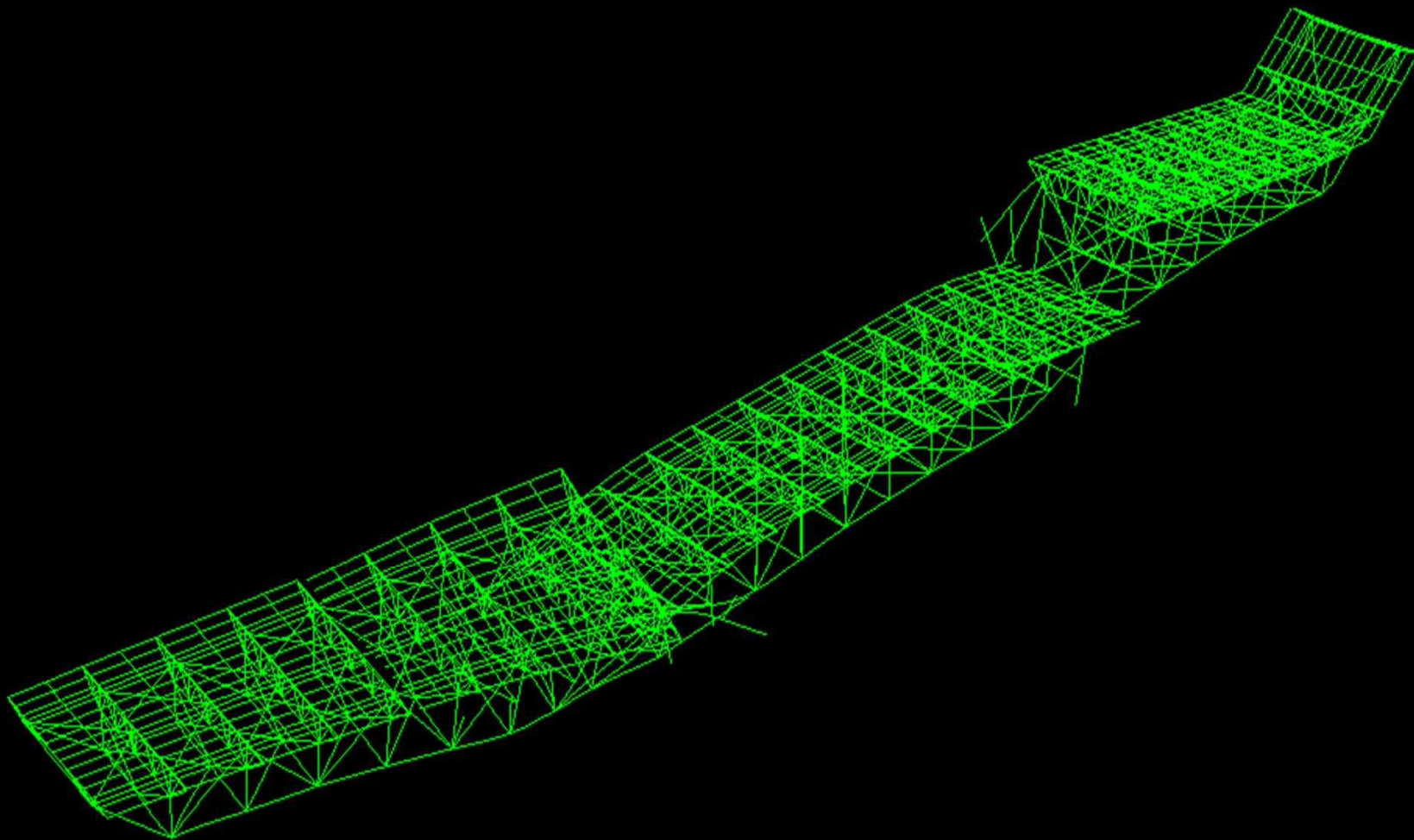
③中央径間北側での折れ曲がり開始



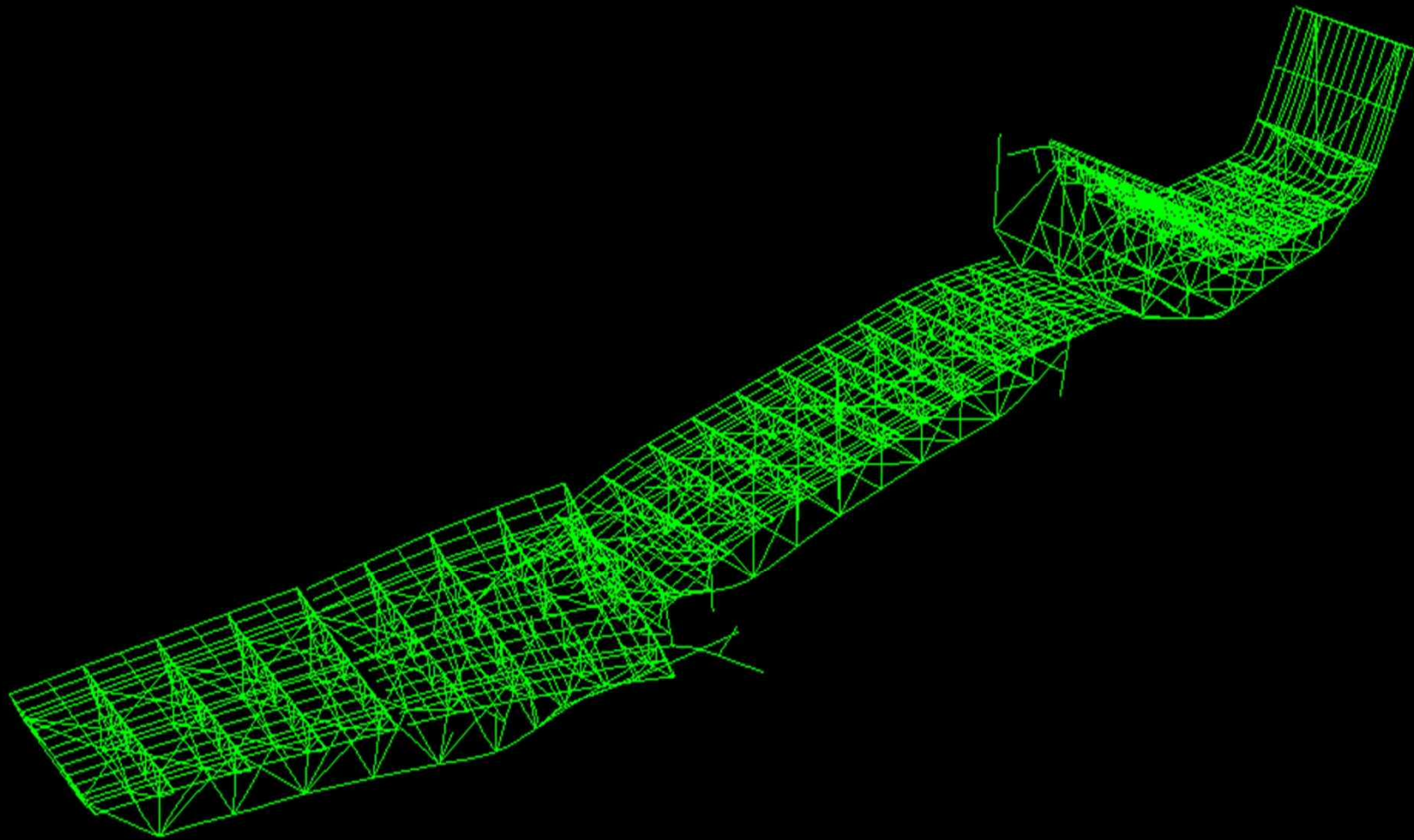
④中央径間の崩落



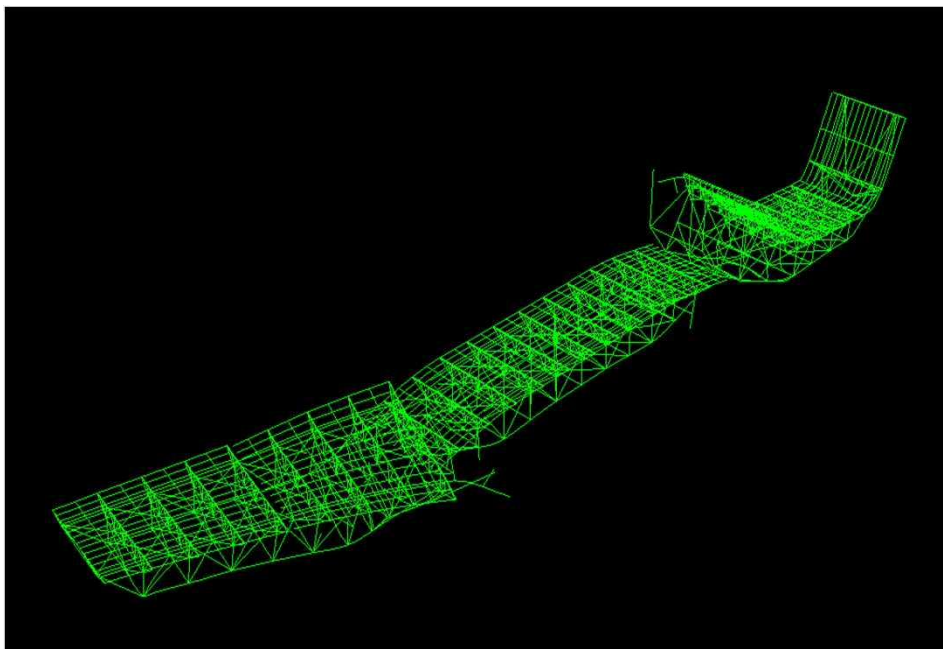
⑤南側の側径間の川方向への移動



⑥両側径間の崩壊と中央径間の崩落



崩壊メカニズム解析結果と航空写真との比較



崩壊メカニズム解析の結果

ケース	ガセットプレート の板厚	ガセットプレートの初期 曲がり変形	工事荷重	崩壊の可能性
ケース1	0.5インチ	有	有	大(I-35W)
ケース 2	0.5インチ	無	有	小
ケース 3	1.0インチ	有	有	小
ケース 4	0.5インチ	有	無	小
ケース 5	0.5インチ	有(ただし、補剛材付)	有	小

ガセットプレートの曲がり変形は影響大

まとめ：実状に近い解析モデルが大切

- 1) 崩壊メカニズム解析は、全体損傷解析と局部損傷解析を適切に組み合わせることにより可能となる。
- 2) 構造物のモデル化にあたっては、できるだけ実状に近い解析モデルを構築する必要がある。

②見にくいところを診る技術

1.はじめに

2.被災した鋼製橋脚の数値シミュレーション(神戸地震)

①見えないところを視る技術

3.米国ミネソタ州I-35橋の崩壊メカニズム

②見にくいところを診る技術

4.沖縄辺野喜橋の落橋(構造解析シミュレーション)

③見るべきところを観る技術

5.おわりに

4. 沖縄辺野喜橋の落橋



貝沼重信先生・下里哲弘先生の資料より引用



国頭村(1989)

鋺桁橋

SMA50A,B

SMA41A

横構:SS41?

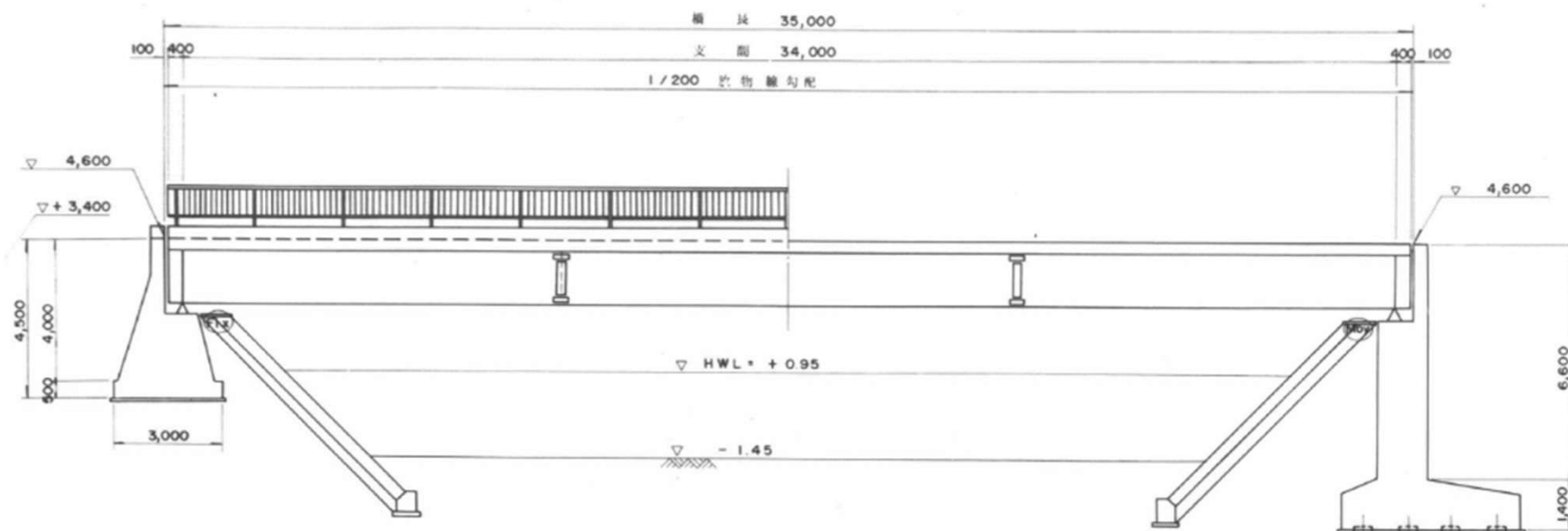
Copyright(C)2001 ALPS Mapping Co.,Ltd.

辺野喜橋



無塗装耐候性橋梁
鋼桁橋 3主桁

供用開始 1981/8
交通止め 2004/11(橋建協)
落橋 2009/7/15
経時観察 2005/6～落橋



土木研究所資料より引用

致命的損傷の要因

2008年3月



外桁内側, 内桁
飛来塩の付着・蓄積

外桁外側
降雨による洗浄効果

片面腐食



両面腐食



落橋した辺野喜橋(2009年7月)



山側外桁 北側



③見るべきところを観る技術



山側外桁 北側



山側支承部 北側

2005年6月



2008年6月



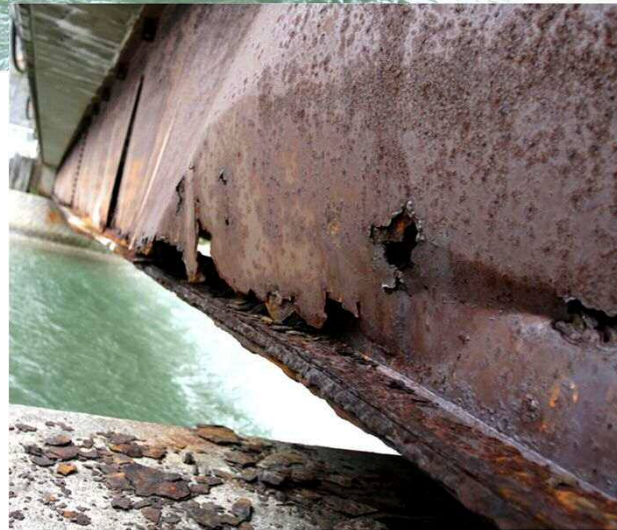
2009年6月



2008年8月

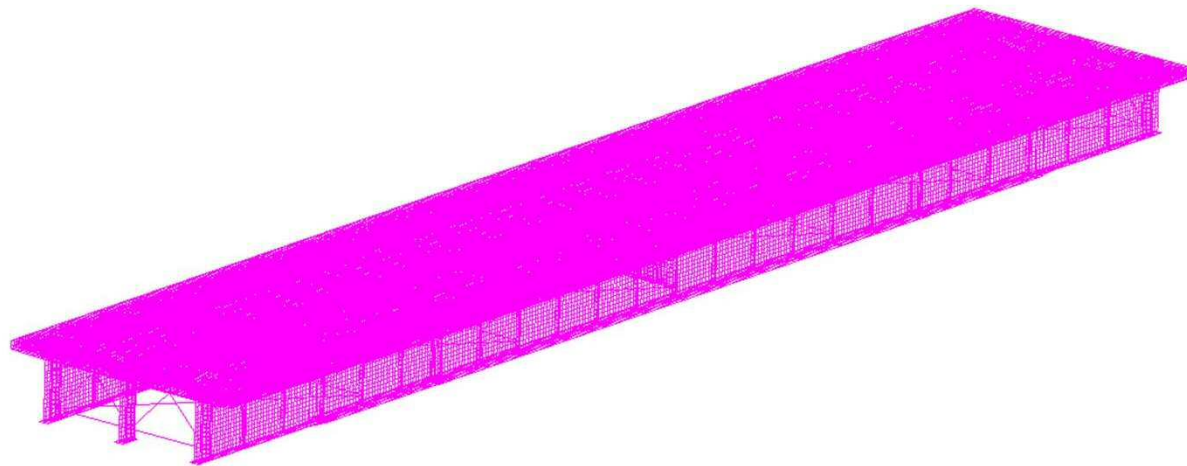


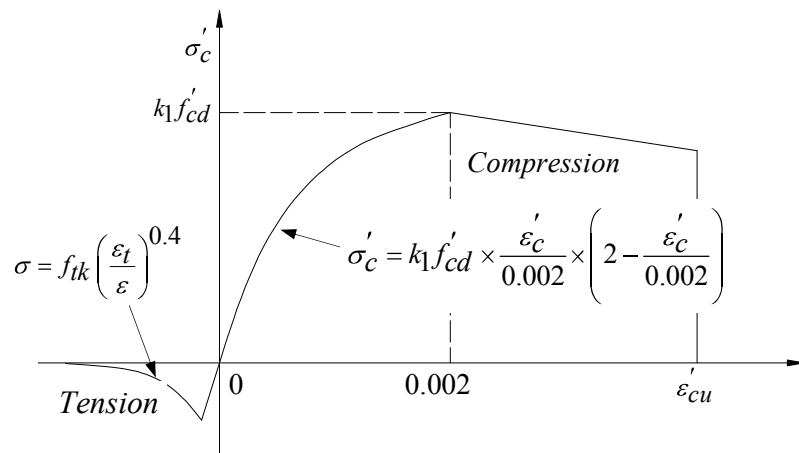
2008年11月



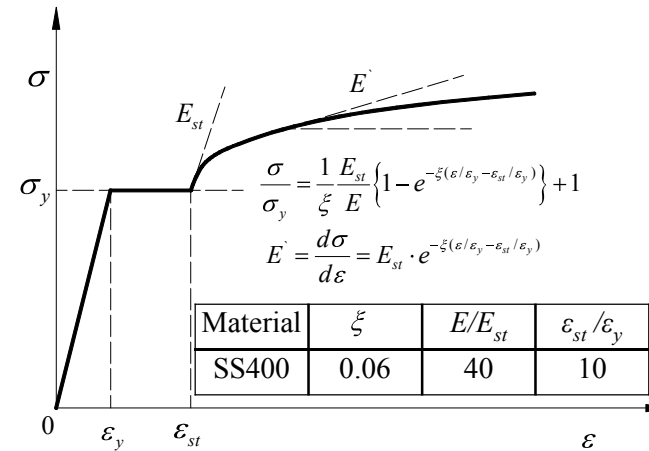


辺野喜橋のFEM解析モデル





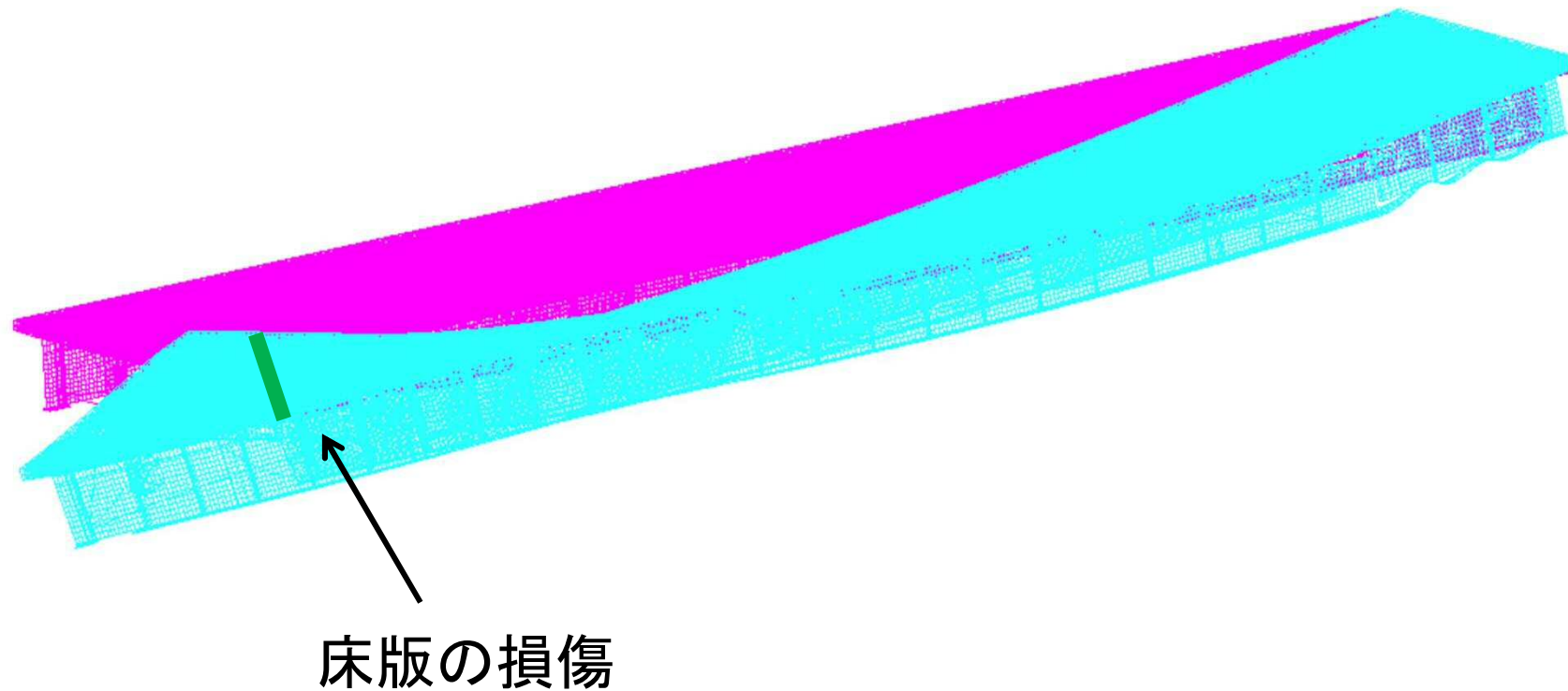
(a) コンクリートの応力 - ひずみ関係



(b) 鋼材の応力 - ひずみ関係

数値解析用の構成則

辺野喜橋の解析結果：床版の崩壊が最終状態



まとめ：腐食に弱い個所がある

- 1) 材料の構成則はできるだけ実状に近いものを使用することが望ましい。
- 2) 鋼材の腐食状態を厳密に解析に反映させることは難しい。
- 3) 構造物によっては構造的に弱い個所が限定される可能性がある。
- 4) 構造物の劣化現象を把握するための実用的なモニタリング方法の研究開発が必要である。

③見るべきところを観る技術

1.はじめに

2.被災した鋼製橋脚の数値シミュレーション(神戸地震)

①見えないところを見る技術

3.米国ミネソタ州I-35橋の崩壊メカニズム

②見にくいところを診る技術

4.沖縄辺野喜橋の落橋(構造解析シミュレーション)

③見るべきところを観る技術

5.おわりに

5.おわりに: 構造解析の要諦

- 1) モデル化を行う際には、常に実際に生じている物理現象に立ち返らなければならない。
- 2) 実験は適切に行われれば、実験供試体については真実を語るのに対し、理論やモデルはある種の仮定に基づいているので、真実とは限らない。
- 3) 構造解析(静力学問題の場合)で得られた結果が完全に正しいのは、**力の一致、変形の一致、ひずみの一致**が得られた場合のみである。
- 4) あらゆるモデルには、適用範囲があり、モデルの成り立ちをよく理解しておく必要がある。

大災害に対しては、あらゆる可能性を
考えるしかない
(人もインフラも何時までも若くはない)

巨大地震、大津波、大火災などの大災害に備えるには

- ・リダンダンシー(余裕性、代替性、多重性)
- ・ロバストネス(強靱性、したたかさ)
- ・レジリエンス(回復性、快復性、しなやかさ)
- ・フェイルセーフ(損傷許容性、信頼性、しぶとさ)
- ・セーブライフ(人命救助性、しなない・しなせない)

常時の競争、非常時の共創

ご清聴ありがとうございました。

(計算は、依田研究室の大学院生が担当)