

# 単純支持上路式鋼トラス橋の下弦材破断による崩壊過程

明石工業高等専門学校 三好 崇夫

## 1. はじめに

米国における I-35W 橋の崩壊事故、我が国では木曾川大橋、本荘大橋に見られたトラス橋斜材の破断事故以降、トラス橋のリダンダンシーに関する研究例が多く報告されている。それらの研究では、実用的なりダンダンシーの評価法<sup>1)</sup>、部材破断時の衝撃の影響<sup>2)</sup>などが明らかにされているものの、部材破断による崩壊過程については明確にされていない。そこで、本研究では、単純支持上路式鋼トラス橋の支間中央の下弦材に破断が生じた場合を想定し、崩壊に至るまでの変形挙動や破断部材の負担していた断面力の再分配挙動について明確することを目的とする。

## 2. 検討方法

検討対象は、図-1 に示すような、1997年に設計された支間長 160.4m、幅員 12m、支間中央部の主構高さ 14m を有する単純支持上路式鋼トラス橋である。部材破断時の衝撃による動的効果を考慮すべきであるが、本研究では、基礎的検討として、静的な弾塑性有限変位解析によって部材破断後の崩壊挙動を考察する。

### 2.1 解析モデル

本橋の解析モデルは、図-2 に示すように、RC 床版にシェル要素、ゴム支承にバネ要素、スラブアンカーと骨組中心線のずれを考慮するためにオフセット要素を用いた。また、骨組部材は基本的に薄肉閉断面はり要素を適用したが、開断面部材には St. Venant の弾性ねじり理論に従うはり要素を適用した。また、RC 床版は等方線形弾性体、ゴム支承も線形弾性体と仮定し、部材格点部は剛結合と仮定した。

### 2.2 破断想定部材

破断想定部材は、死活荷重状態で最大引張軸力を生ずることから、図-2 に示す支間中央部の車道直下の下弦材とした。

### 2.3 荷重条件

本研究では、部材破断後の弾塑性有限変位挙動を静的に追跡するため、死活荷重載荷後に、まず、破断想定部

材を消去し、破断部材端には破断部材が担っていた断面力を載荷して平衡状態を求め、次に破断部材の担っていた断面力を徐々に逆向きに解放する手法を用いた。活荷重は、道路橋示方書の L 荷重と群集荷重を、破断想定部材に最も不利となるように載荷した。なお、本検討では、部材破断時の衝撃の影響は一切考慮していない。

## 3. 解析結果と考察

### 3.1 崩壊までの変形挙動

本解析では、孤長増分 0.15 の孤長制御法によって、破断部材の断面力を徐々に解放した。解析結果として、図-2 に示す格点 A における Z 軸方向の解放力と変位の関係を図-3 に示す。これより、Z 軸方向の解放力が凡そ 14MN に至った時点でピーク点が現れ、その後、スナップバック型の除荷挙動を呈することが分かる。以下では、死活荷重載荷後を「部材破断前」、ピーク状態を「部材破断後」と称する。部材破断後の破断部近傍の変形状況を図-4(a)、破断部の下横構面の変形状況を図-4(b)、破断部直近の対傾構面の変形状況を図-4(c)に示す。これより、部材破断後には、下横構面は破断部材側に面内曲げ変形、対傾構面はせん断変形を呈し、対傾構の斜材には正弦波状の面外変位を生ずることが分かる。

### 3.2 断面力の再分配挙動

部材破断前後の破断部近傍の軸力分布をコンター図として図-5 に示す。なお、同図中、圧縮軸力は終局圧縮荷重  $P_u$  で、引張軸力は降伏軸力  $P_Y$  でそれぞれ無次元化し、正值は引張軸力、負値は圧縮軸力を表す。図-5 より、矢印①で示す下弦材では、部材破断によって、 $P/P_Y$  が 0.55 から 0.70 まで上昇しており、破断下弦材の担っていた軸力の反対側の下弦材への再分配挙動が確認できる。しかし、部材破断後においても、その大きさは 1.0 よりも小さく、未だ余耐力を有していると考えられる。一方、矢印②で示す下横構の  $P/P_Y$  は 1.0 を超えており、それらは破断下弦材から再分配される断面力を反対側の下弦材へ伝達するための主たる経路であることが分かる。また、矢印③で示す対傾構にも  $P/P_u$  が -1.0 を超える圧縮

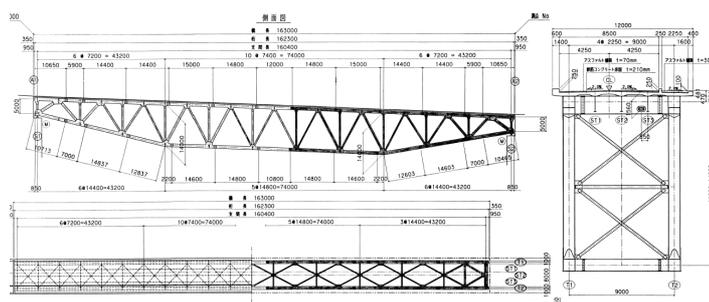


図-1 検討対象橋梁

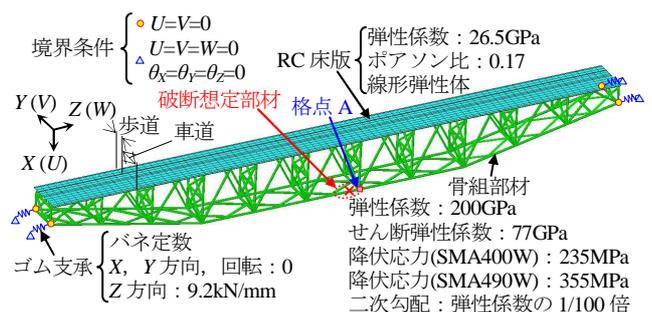


図-2 解析モデル

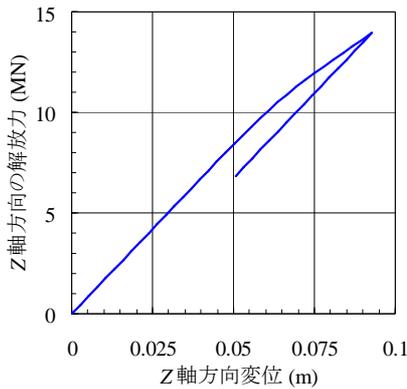


図-3 解放力と変位の関係

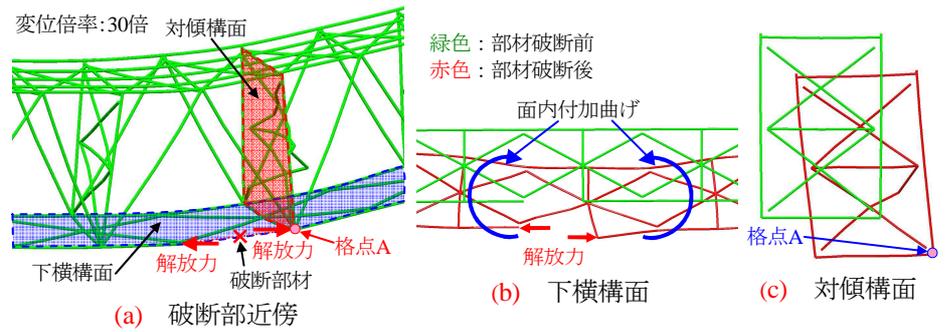


図-4 破断部材近傍の変形状況

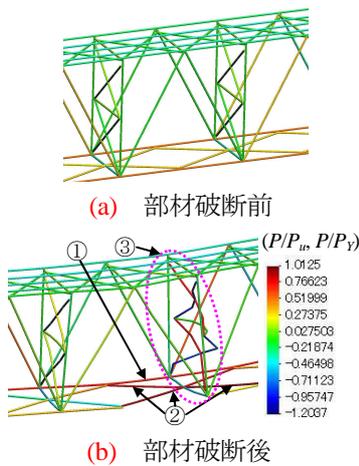
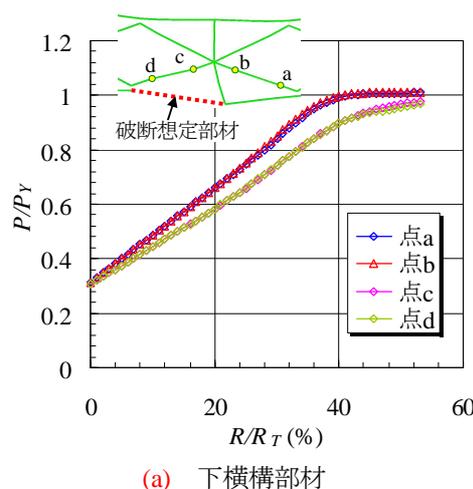
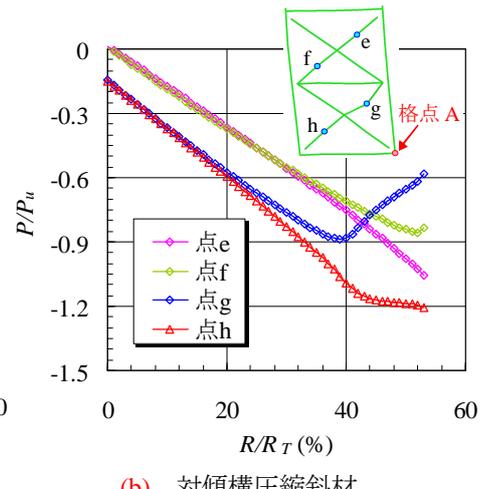


図-5 破断部近傍の軸力分布



(a) 下横構部材



(b) 対傾構圧縮斜材

図-6 軸力と断面力の再分配率の関係

状態の斜材が見受けられ、図-4(c)に示したように、対傾構面のせん断変形に伴う張力場の形成によって、厳しい圧縮作用下におかれ、それらの斜材は正弦波状の面外変位を生じたものと考えられる。

本研究では、破断部材の担っていた全断面力  $R_T$  のうち、再分配された断面力  $R$  の割合を再分配率  $R/R_T$  と称することにする。破断部近傍の下横構と対傾構について、軸力と  $R/R_T$  の関係を図-6 に示す。まず、図-6(a)より、下横構の点 a, b の軸力は、断面力の再分配につれて増加し、再分配率 40% で全断面降伏に至ることが分かる。一方で、点 c, d については、再分配率 53% においても全断面降伏に対して若干の余耐力を有していることが分かる。次に、図-6(b)より、対傾構では、下横構が最初に全断面降伏に至る再分配率 40% あたりから、点 g の軸力が反転するとともに、点 h の圧縮軸力の増加もほぼ頭打ちとなるが、橋梁全体はピーク状態に達していない。しかし、その後、再分配率 53% では、点 f の軸力が反転し、ピーク状態を迎えていることが分かる。

したがって、本橋の支間中央の下弦材に部材破断が生ずると、破断部材の担っていた断面力は、主に下横構によって反対側の下弦材に伝達される。その過程では、まず、下横構が全塑性状態に到達するものの、対傾構面のせん断抵抗が発揮されるため、直ちに崩壊には至らない。しかし、その後、対傾構面内の斜材が終局状態に至るこ

とによってせん断抵抗が低下すると、断面力の伝達経路が断たれ、崩壊に至ったものと考えられる。

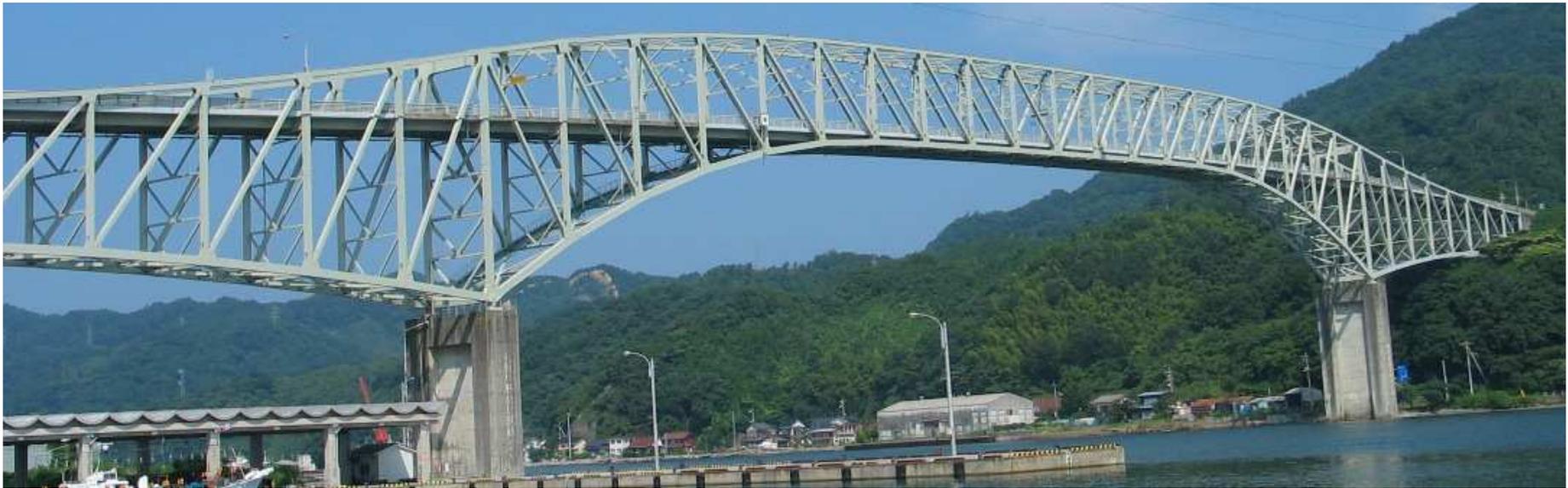
#### 4. まとめ

本研究では、単純支持上路式鋼トラス橋の支間中央の下弦材に、破断が生じた場合を想定して、崩壊に至るまでの変形挙動や破断部材の断面力の再分配挙動について明確にした。その結果、破断部材近傍の下横構や対傾構は、破断部材の断面力を反対側の下弦材に伝達する主要経路であるため、それらが終局状態に到達すれば、もう一方の主構面の下弦材に余耐力が残っていても、橋梁全体の崩壊に至ることを示した。

#### 【参考文献】

- 1) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 平山 博, 奥井義昭: 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, No.2, pp.410-425, 2009.
- 2) 本多一成, 後藤芳顯, 川西直樹: リダンダンシー解析における鋼トラス部材破断時の衝撃係数に関する一考察, 土木学会第 64 回年次学術講演会概要集, I-113, pp.225-226, 2009.

# 単純支持上路式鋼トラス橋の 下弦材破断による崩壊過程



明石工業高等専門学校 三好 崇夫

## 研究の背景

■ I-35W橋の崩壊事故，木曾川大橋，本荘大橋におけるトラス橋斜材の破断事故以降，トラス橋のリダンダンシーに関する研究が増加



■ 実用的なリダンダンシーの評価法  
■ 部材破断時の衝撃の影響  
等が明確にされている



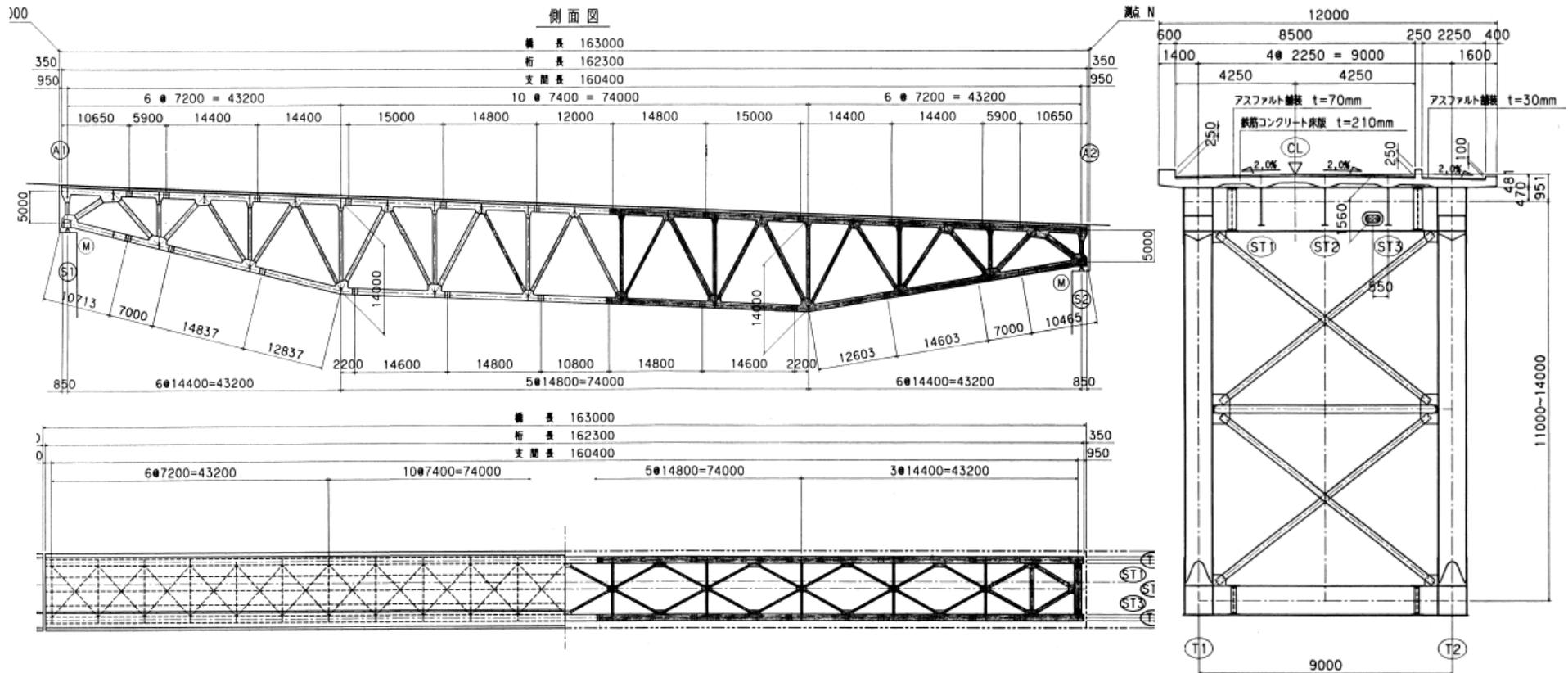
■ 部材破断による崩壊過程は明確にされていない。



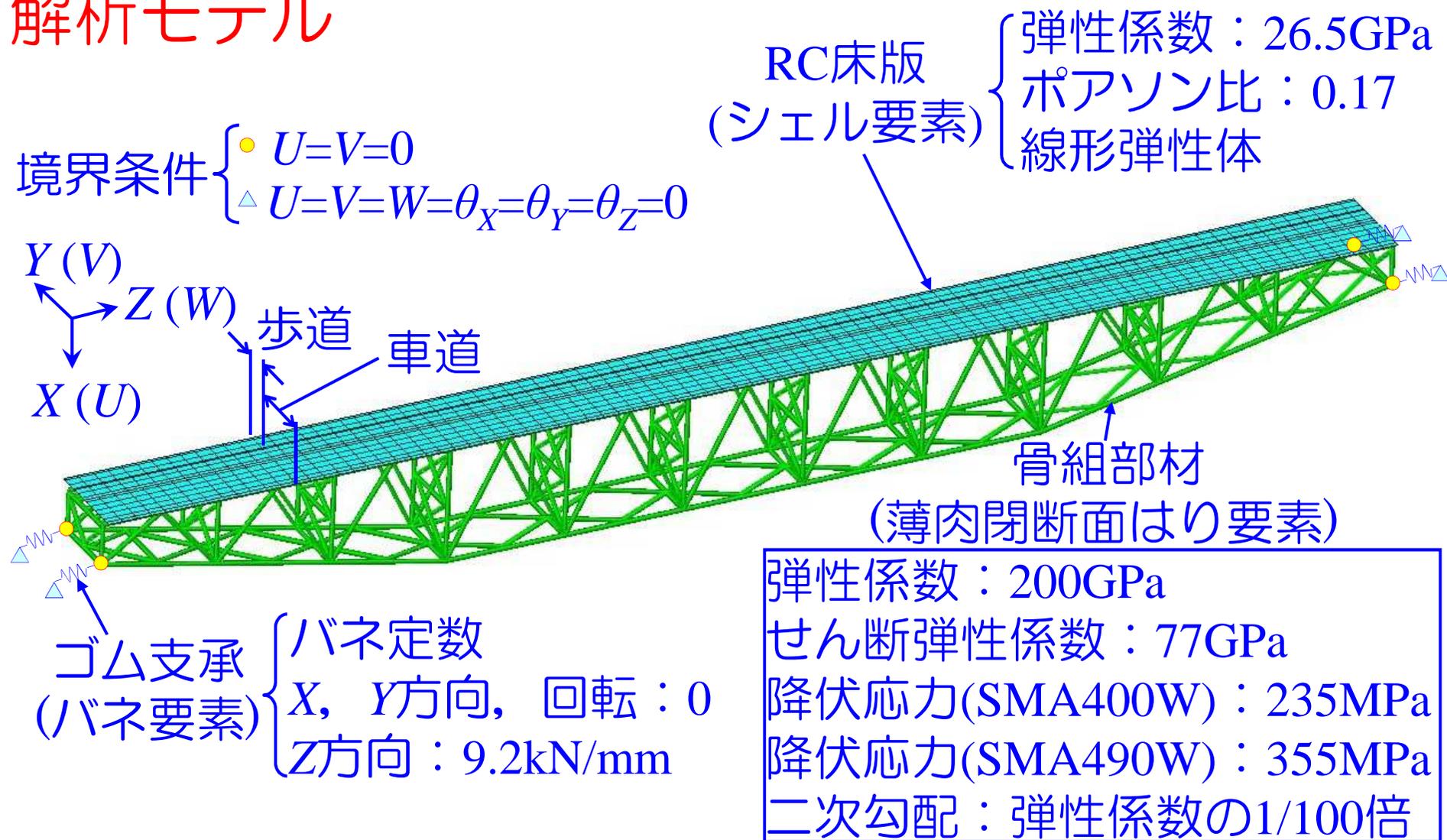
# 研究の目的

単純支持上路式鋼トラス橋の支間中央下弦材に破断が生じた場合を想定し、

- 崩壊に至るまでの変形挙動
- 破断部材の負担していた断面力の再分配挙動を弾塑性有限変位解析によって明確化



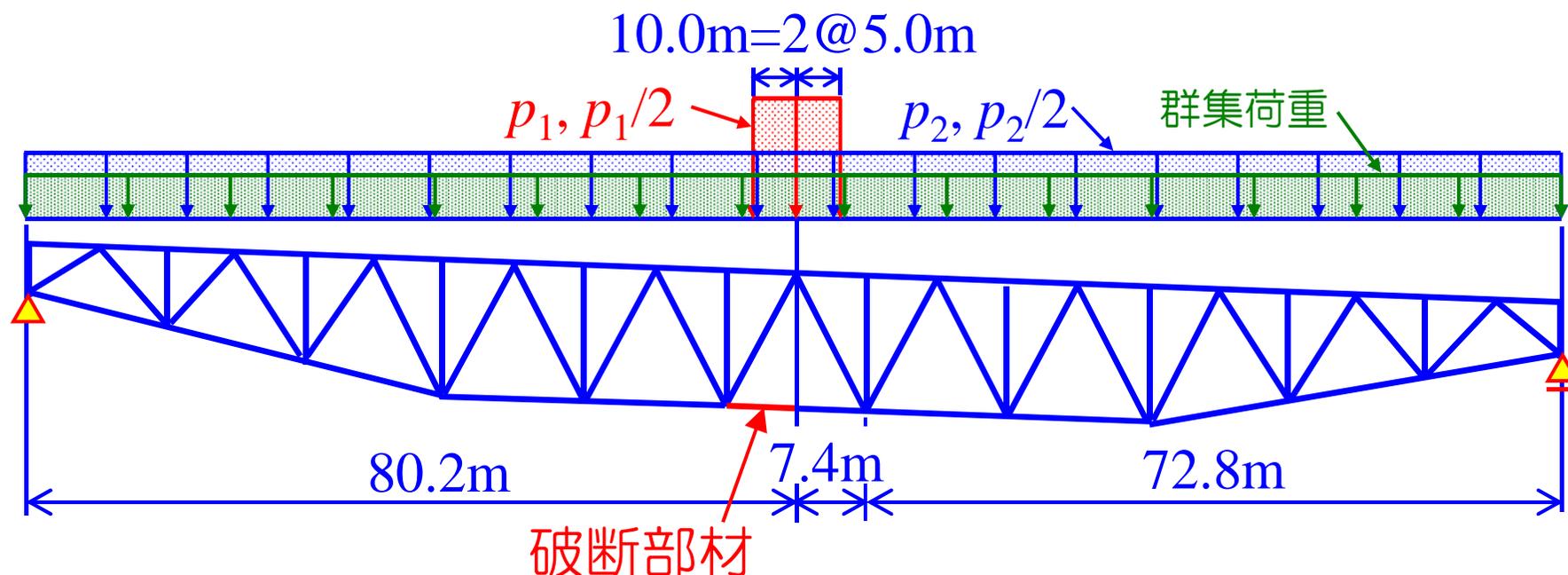
# 解析モデル



- 部材破断時の動的効果は無視
- 部材格点部は剛結合を仮定

# 荷重条件1

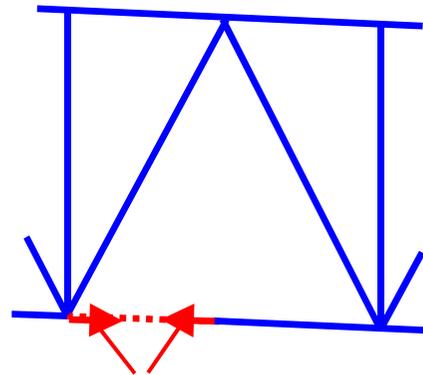
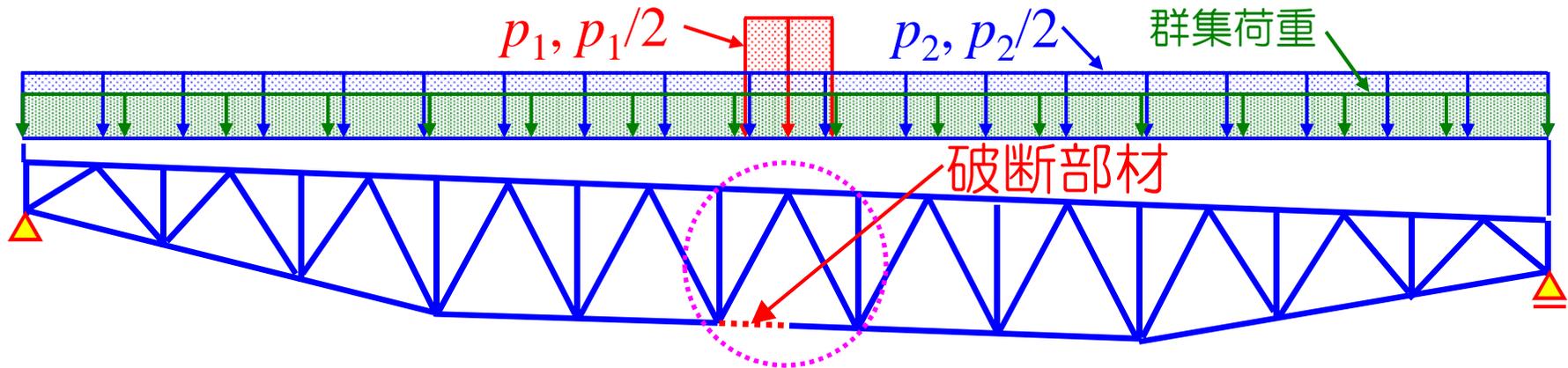
## Step1：死活荷重載荷



- 活荷重は道路橋示方書のL荷重と群集荷重を破断想定部材に最も不利となるように載荷
- RC床版の死荷重は分布質量
- 鋼部材の死荷重は集中質量に重力加速度を乗じて載荷

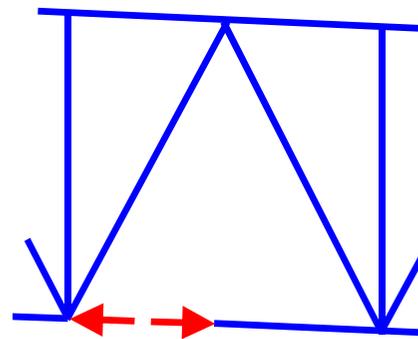
## 荷重条件2

Step2：破断想定部材を消去し，破断部材端には破断部材が担っていた断面力を载荷して平衡状態を算定

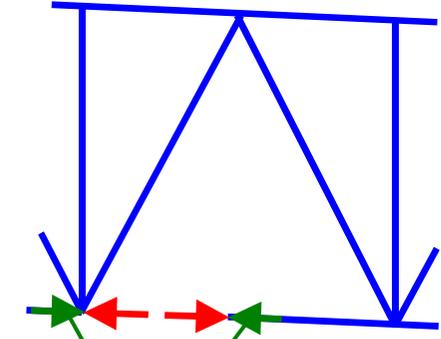


破断想定部材の断面力

Step2-1 破断想定部材の断面力の算定



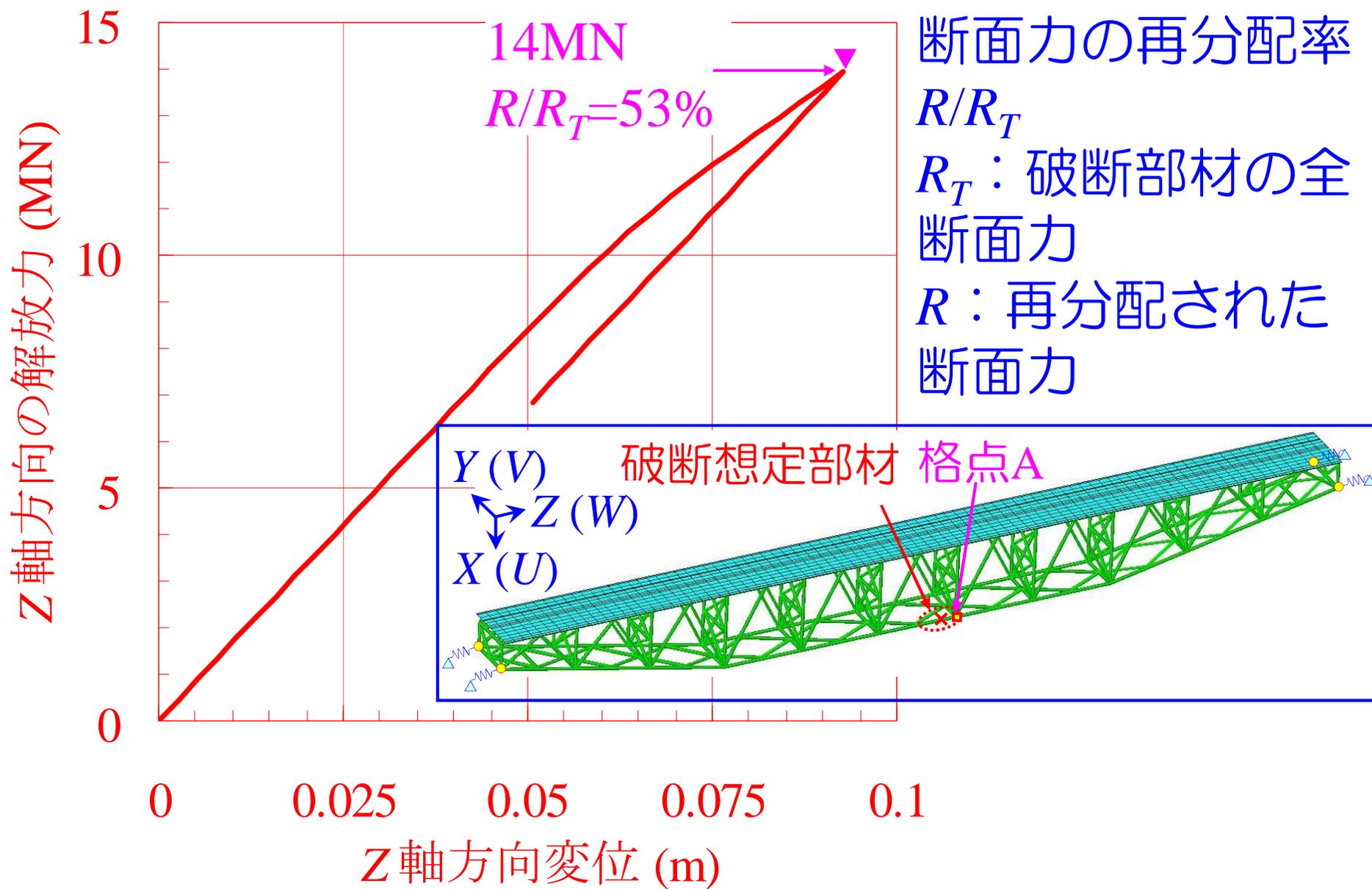
Step2-2 破断想定部材を消去し，逆向きの断面力を载荷



解放する断面力

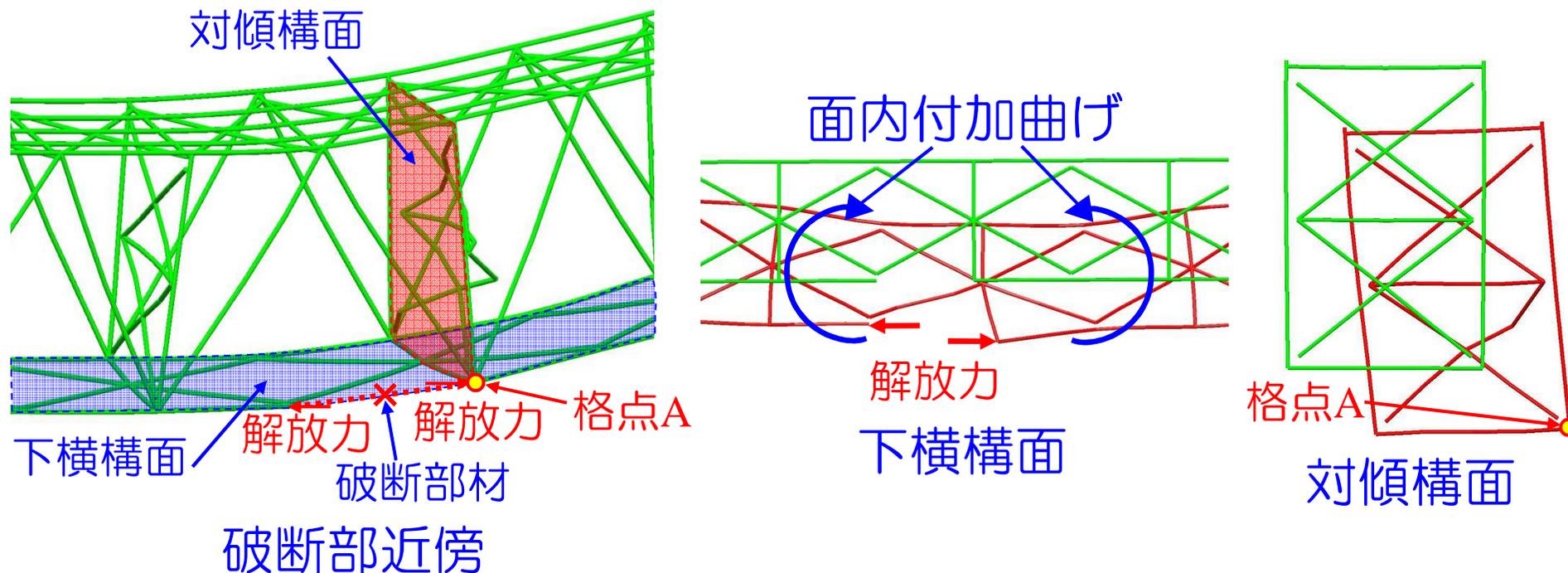
Step3 破断部材の担っていた断面力を徐々に解放

# 崩壊までの変形挙動1



# 崩壊までの変形挙動2

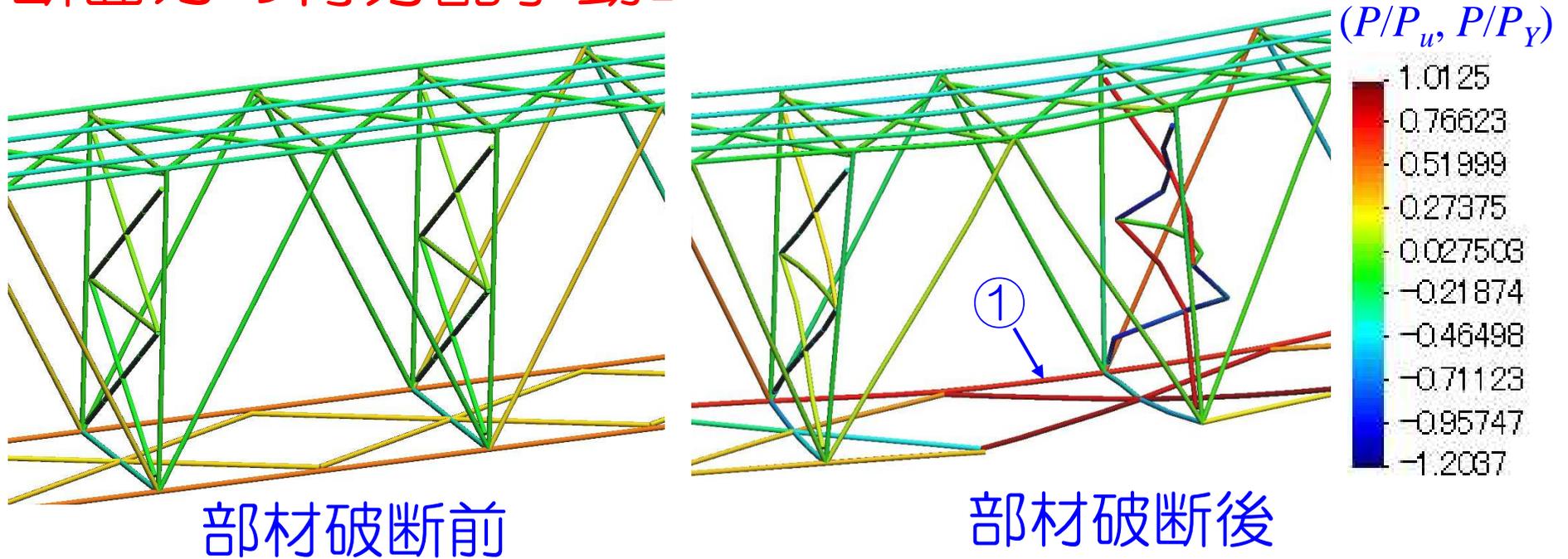
- 部材破断前：死活荷重載荷直後
- 部材破断後：極限状態



部材破断後の破断部近傍の変形状態（変位倍率50倍）

- 下横構面：破断部材側に面内曲げ変形
- 対傾構面：せん断変形と斜材に正弦波状の面外変形

# 断面力の再分配挙動1



$P$  : 正值は引張, 負値は圧縮

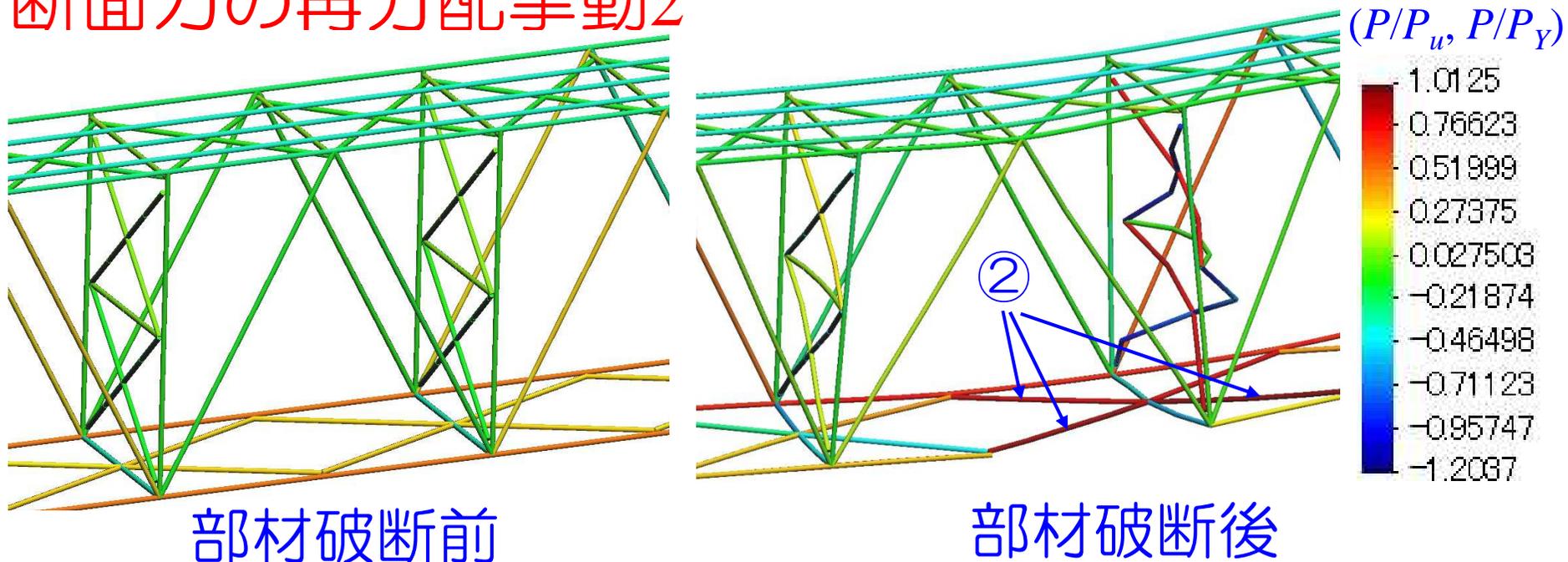
$P_Y$  : 降伏軸力,  $P_u$  : 道示の終局圧縮荷重

破断部近傍の軸力分布

矢印①の下弦材

- 部材破断によって,  $P/P_Y$ が0.55から0.70まで上昇
- 部材破断後の $P/P_Y$ は1.0よりも小さく, 余耐力有

# 断面力の再分配挙動2



$P$  : 正值は引張, 負値は圧縮

$P_Y$  : 降伏軸力,  $P_u$  : 道示の終局圧縮荷重

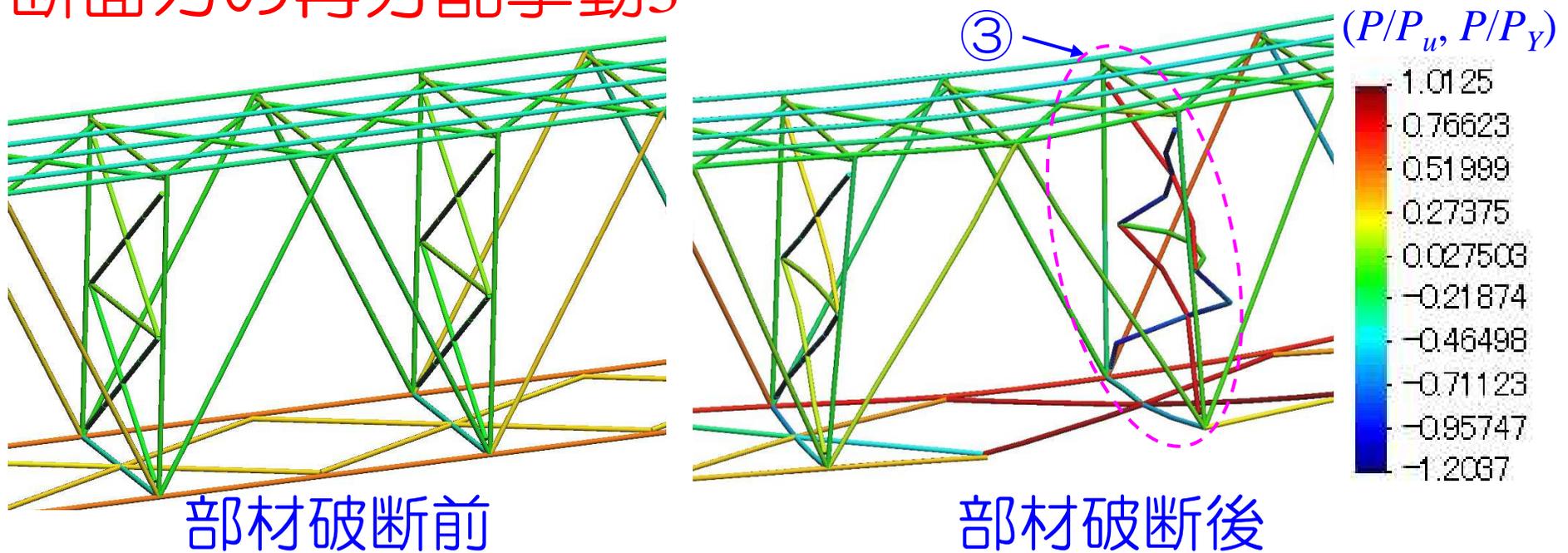
破断部近傍の軸力分布

矢印②の下横構

■  $P/P_Y$ は1.0を超過

■ 破断下弦材の断面力を反対側の下弦材へ伝達するための主たる経路

# 断面力の再分配挙動3



$P$  : 正值は引張, 負値は圧縮

$P_Y$  : 降伏軸力,  $P_u$  : 道示の終局圧縮荷重

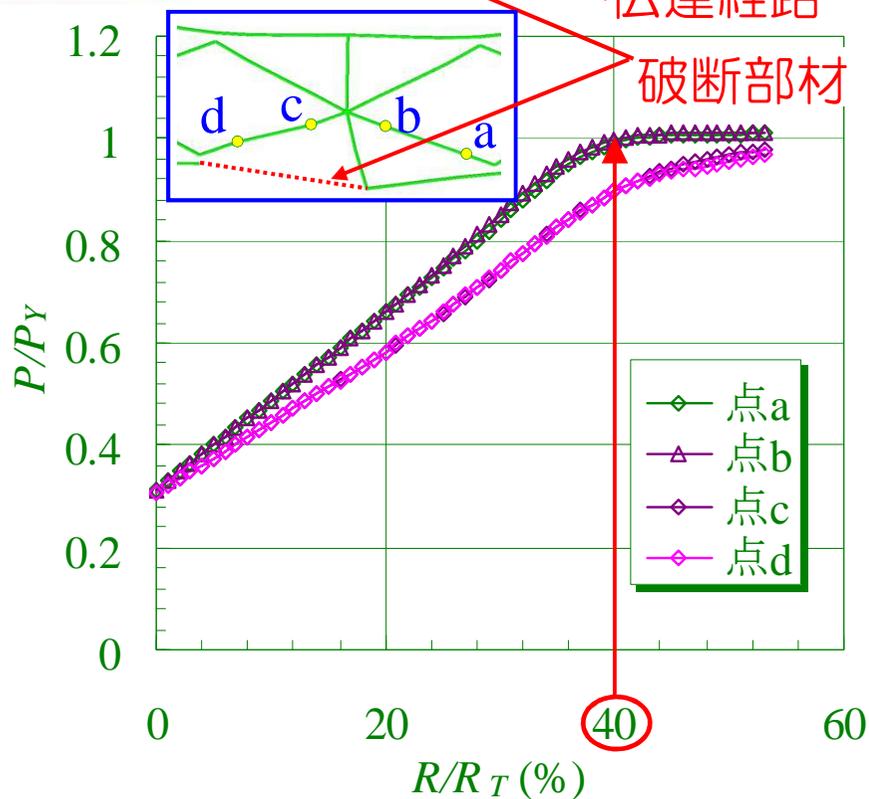
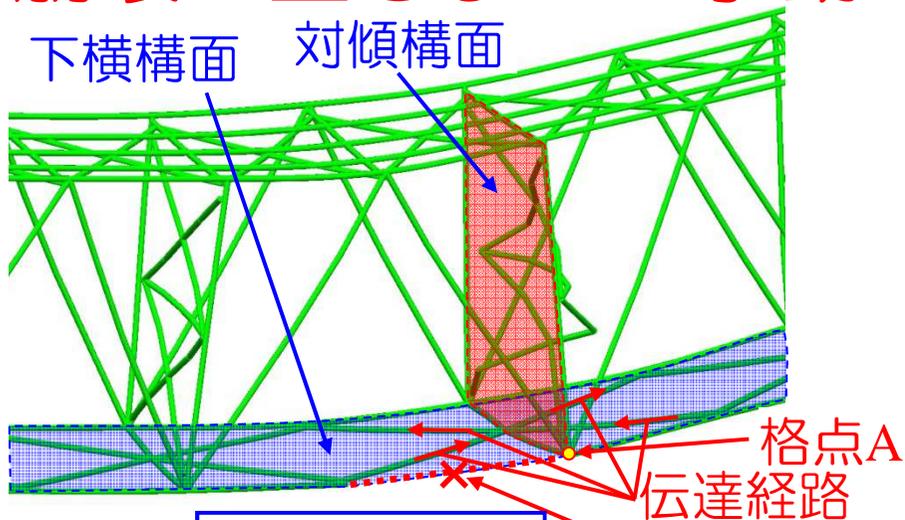
破断部近傍の軸力分布

矢印③の対傾構斜材

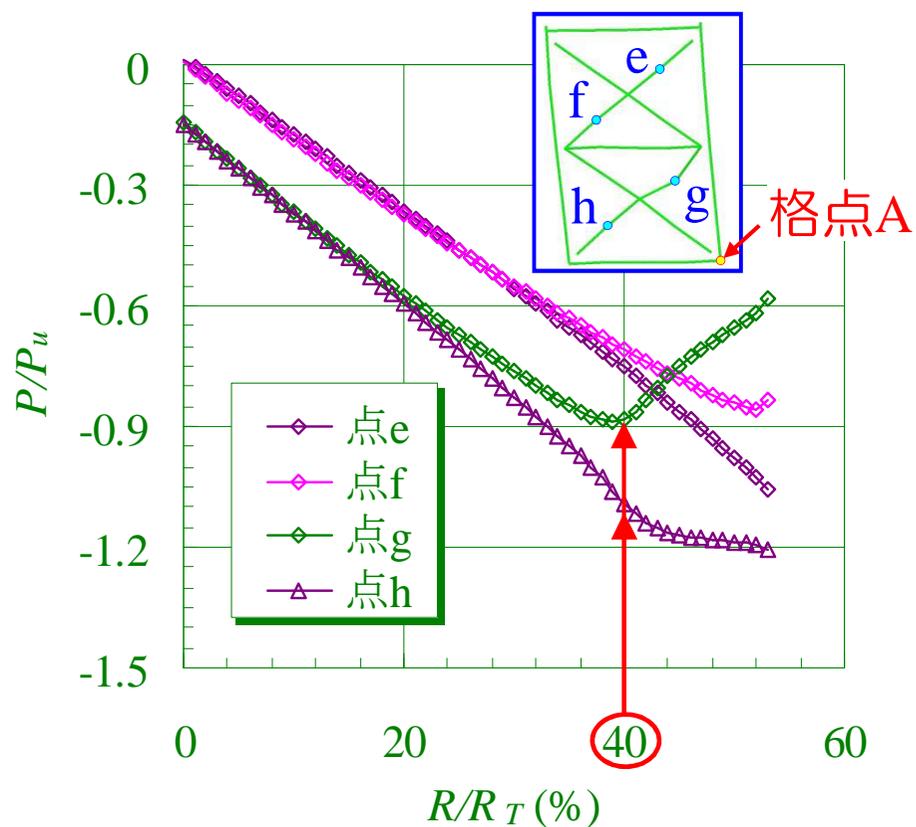
■  $P/P_u$ が-1.0を超える圧縮状態の斜材有

■ 対傾構面のせん断変形に伴う張力場の形成によって、正弦波状の面外変位を発生

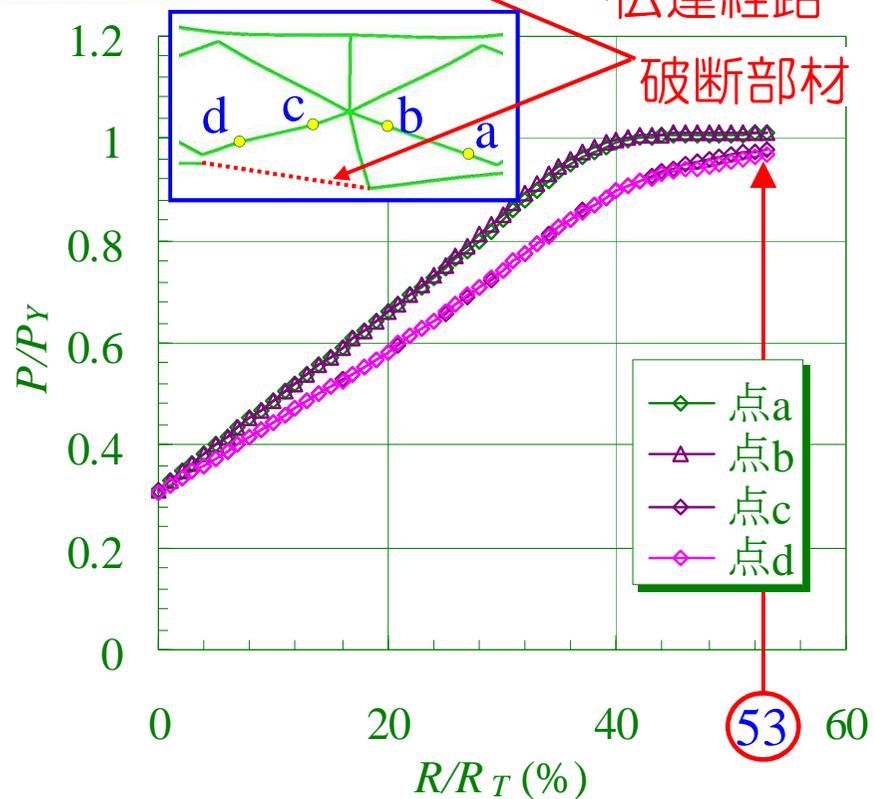
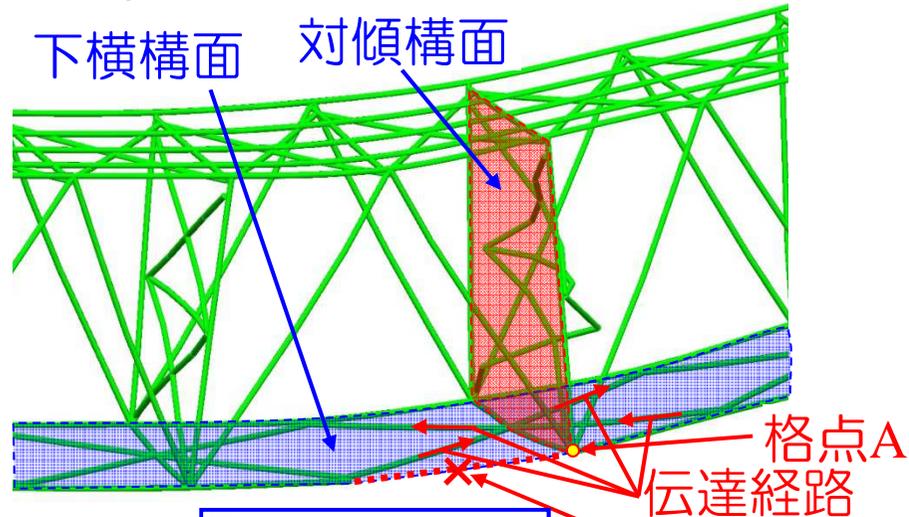
# 崩壊に至るまでの挙動1



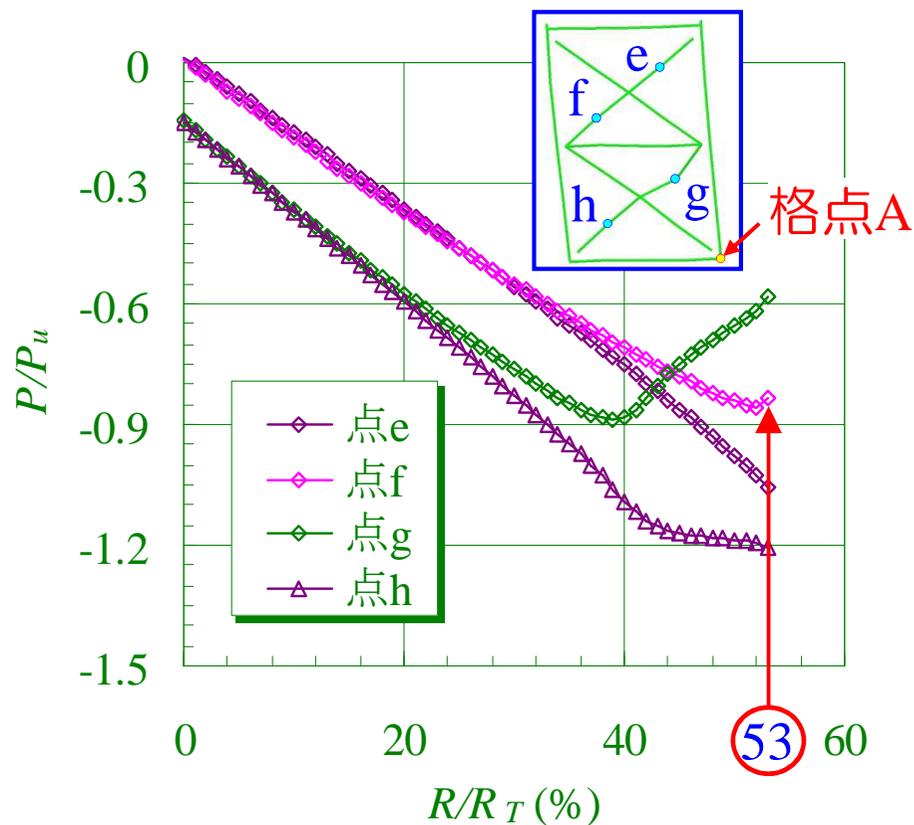
①  $R/R_T=40\%$  で下横構(点a, b)が全塑性状態に到達, 対傾構圧縮斜材の点gの軸力が反転, 点hの圧縮軸力の増加もほぼ頭打ち



# 崩壊に至るまでの挙動2



②  $R/R_T=53\%$ において，対傾構圧縮斜材の点fの軸力が反転しピーク状態に到達（下横構の点c，dの軸力は全断面降伏に対して若干の余耐力有）

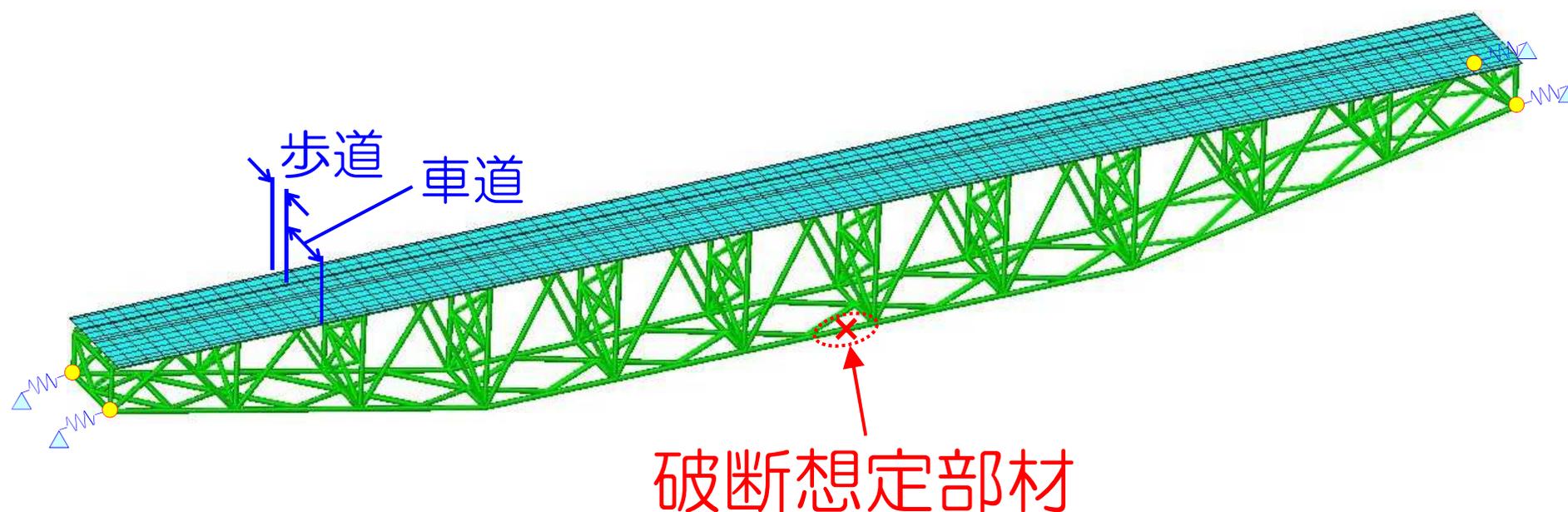


## まとめ

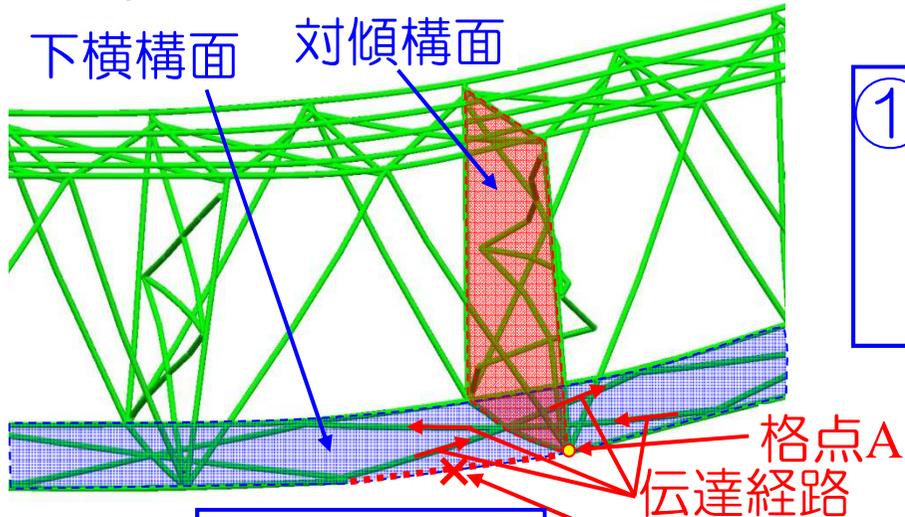
- 本橋の支間中央の下弦材に部材破断が生ずると、まず下横構が全塑性状態に到達する
- その後も対傾構面のせん断抵抗が発揮されるため、直ちに崩壊には至らない
- 最終的に、対傾構面内の斜材が終局状態に至ることによってせん断抵抗が低下すると、断面力の伝達経路が断たれ、崩壊に至る
- 破断部材近傍の下横構や対傾構が終局状態に到達すれば、もう一方の主構面の下弦材に余耐力が残っていても、橋梁全体の崩壊に至る

# 破断想定部材

- 死活荷重状態で最大引張軸力が発生するため、支間中央の車道直下の下弦材を破断想定部材に選定



# 崩壊に至るまでの挙動1



① 破断部材の担っていた断面力が、主に下横構を通じて反対側の下弦材に伝達

