

3次元静的非線形解析による 鋼トラス橋の動的効果を考慮した リダンダンシー評価

Redundancy evaluation for the steel truss bridges
considering dynamic effect
by three dimensional static nonlinear analysis

構造強度学研究室

藤本 真明

2018 年 2 月 8 日

既往のリダンダンシー評価

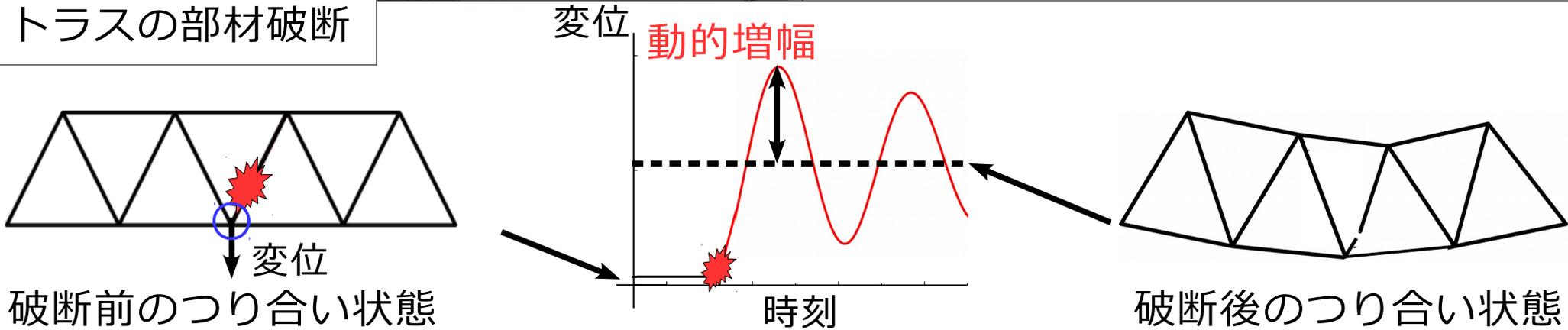
トラス橋の破断・崩落事故



- ・点検・補修の優先順位決定
- ・粘り強い橋梁の設計

▶ **リダンダンシー評価が重要**である

トラスの部材破断



これまでの解析手法

動的非線形解析

慣性力 振動： 計算コスト **大**

▶ 実務には非現実的

静的線形解析 + 動的増幅率

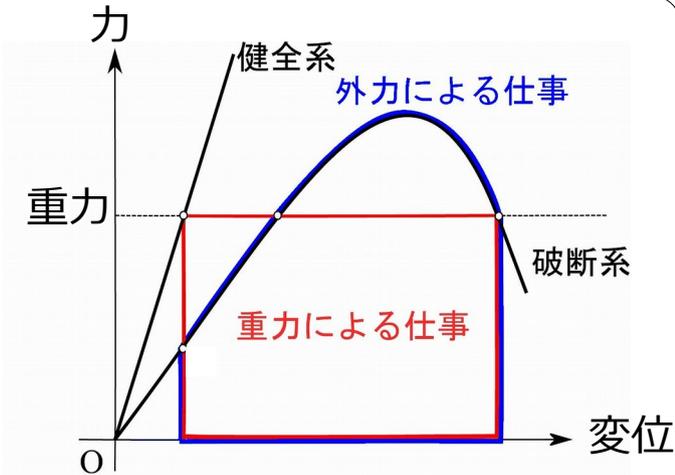
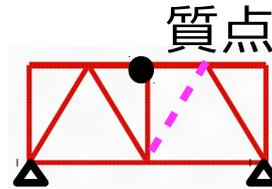
破断を想定する部材により
動的増幅率が異なる（後藤ら， 2009）

▶ 一律の動的増幅率は**不経済**となる

静的**非線形**解析 + **慣性力**
(後藤ら, 2015)

動的増幅率を用いずに崩壊を予測できる

- 死荷重を質点のみに与えた平面トラスで解析している
- 弾性除荷剛性による固有振動モードで慣性力を定義している

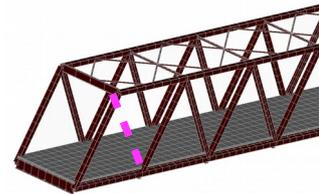


静的解析でありながら動的解析に近い精度で崩壊照査ができる

本研究

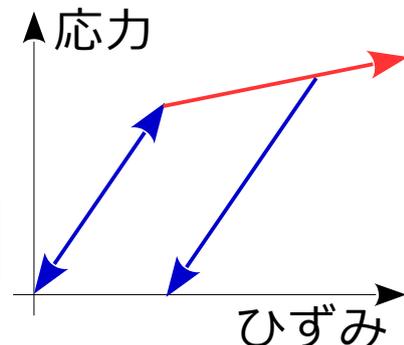
- より現実的なモデルで検証する必要がある

質点系に近似せず死荷重と活荷重を作用させた**立体**トラスを用いる



- 破断直後は**弾性除荷**と**塑性載荷**の両方が進行するため固有振動解析の剛性は一意には定められない

弾性除荷剛性に加え**塑性載荷の剛性**による固有振動解析を行う



木曽川大橋と同規模のトラス橋



木曽川大橋：斜材 破断するも崩壊せず

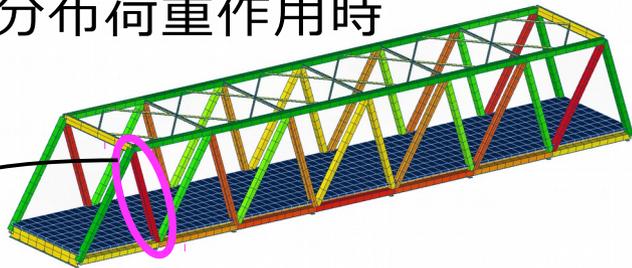
リダンダンシー = 耐荷能力の余裕 がどの程度あるのか？

活荷重倍率 a で評価する

破断想定部材の選定

軸力

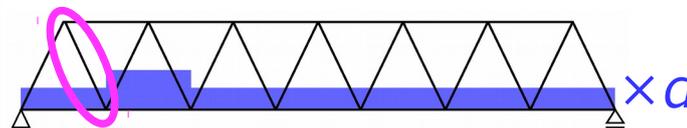
 圧縮 0 引張
 等分布荷重作用時



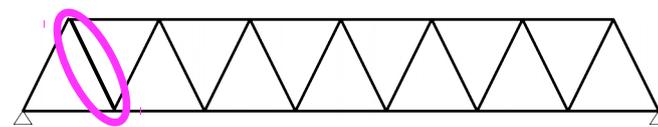
引張軸力最大
 破断時の衝撃も最大との報告あり
 → 破断した際に最も危険

破断想定部材を
 端から 2 番目の斜材に

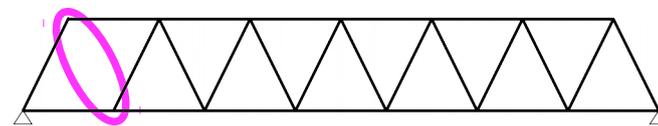
活荷重と 2 つのモデル



破断想定部材が
 危険になる
 载荷パターン

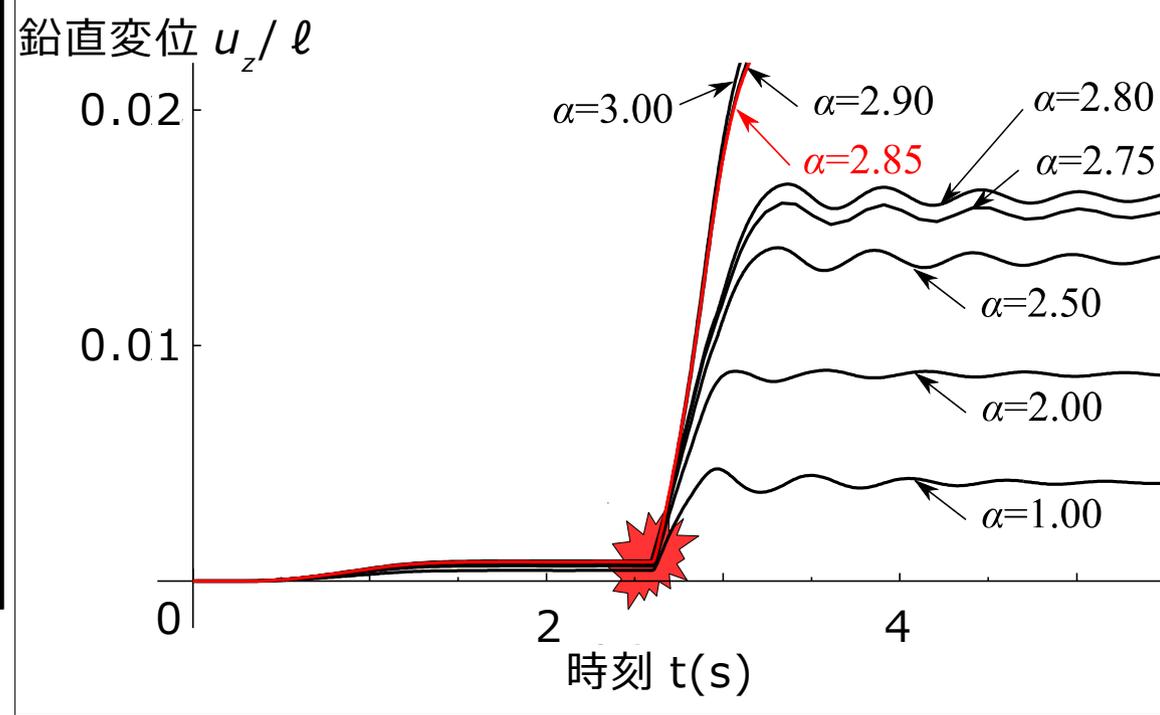
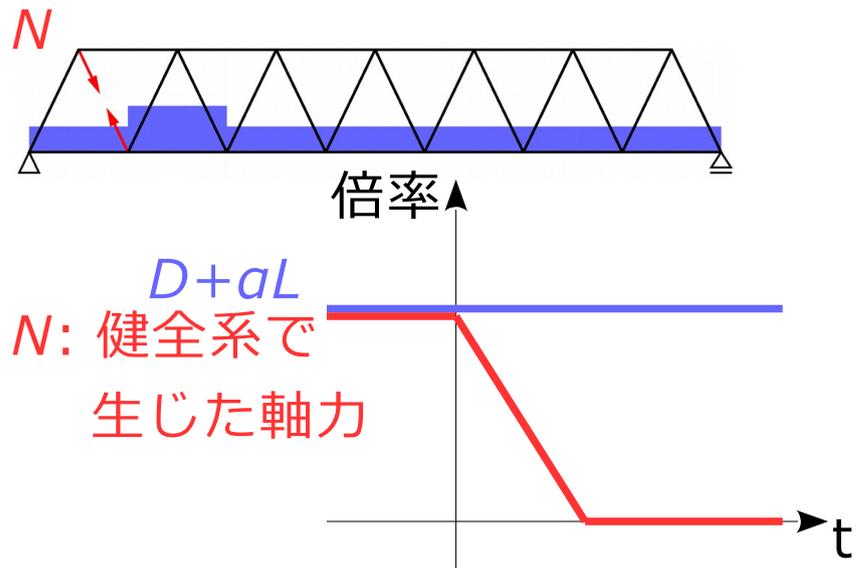


「健全系」
 破断を再現しないモデル



「破断系」
 破断想定部材を削除したモデル

破断による衝撃を再現



部材破断後の挙動

- $a \leq 2.80$ … 振動しながら新たなつり合い状態に収束した
- $a \geq 2.85$ … 鉛直変位が増加し続けた

$a=2.85$ を崩壊活荷重の参照解とする

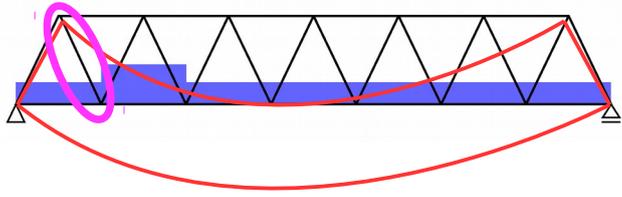
目標

静的非線形解析により $a \geq 2.85$ で崩壊するという判定をすること

静的非線形解析による解法 (1)

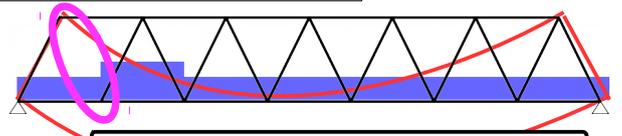
解析手順

つり合い状態 A



健全系
 $D+aL$ を与える

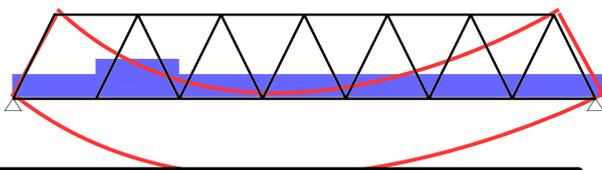
破断直後状態 B



破断想定部材を
削除する

不釣り合い力発生

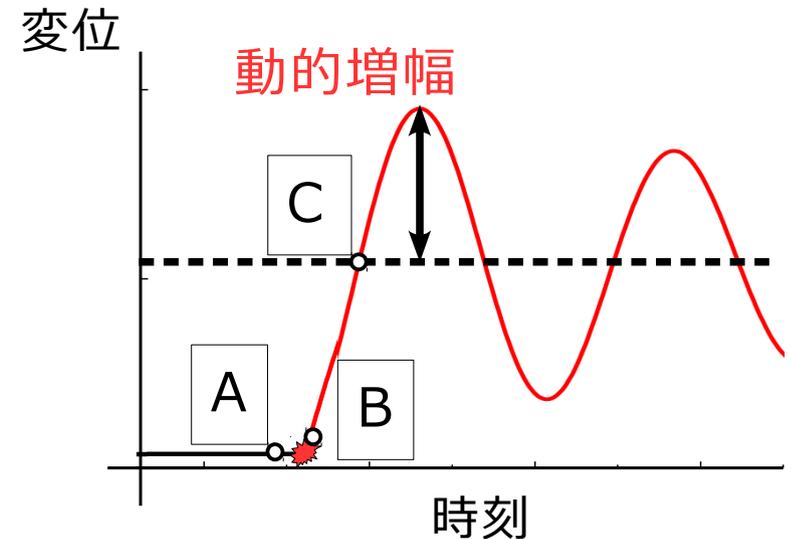
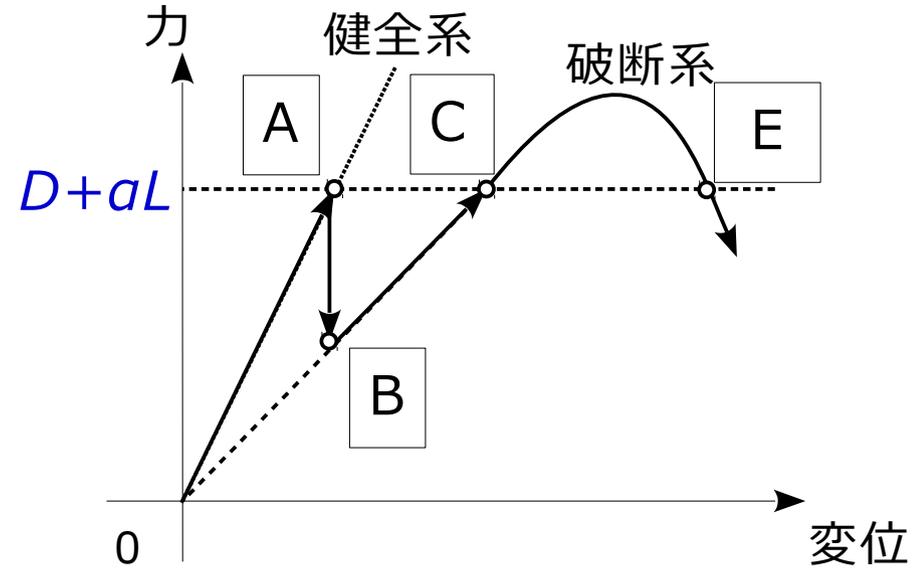
破断後の静的釣り合い状態 C ~



静的には
 $D+aL$ のみ作用

動的には慣性力も作用

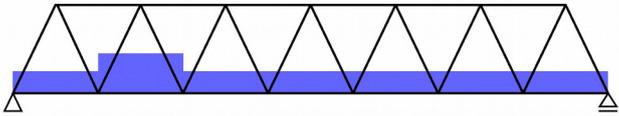
▶ 慣性力は固有振動解析により定義する



静的非線形解析による解法 (1)

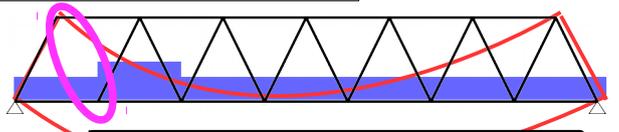
解析手順

つり合い状態 A



健全系
 $D+aL$ を与える

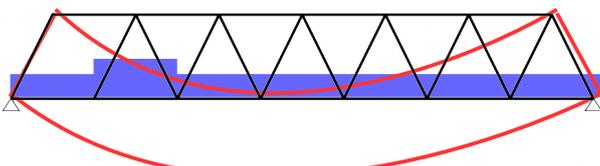
破断直後状態 B



不釣り合い力発生

破断想定部材を
削除する

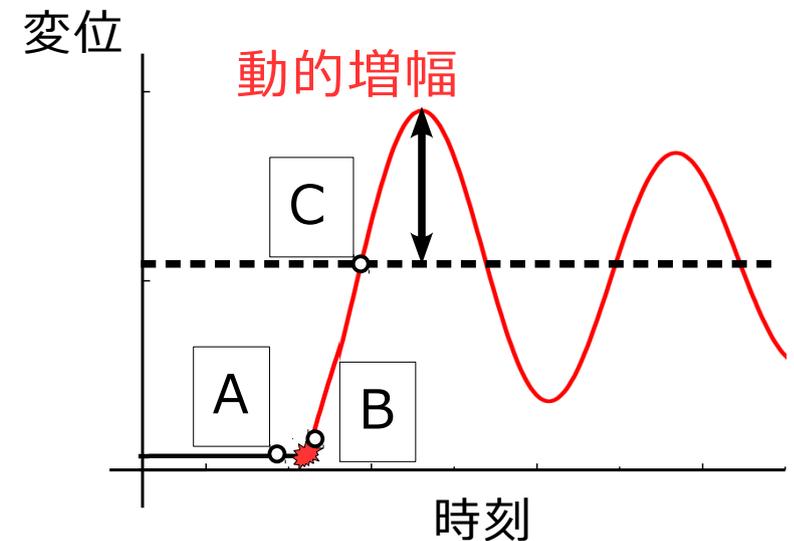
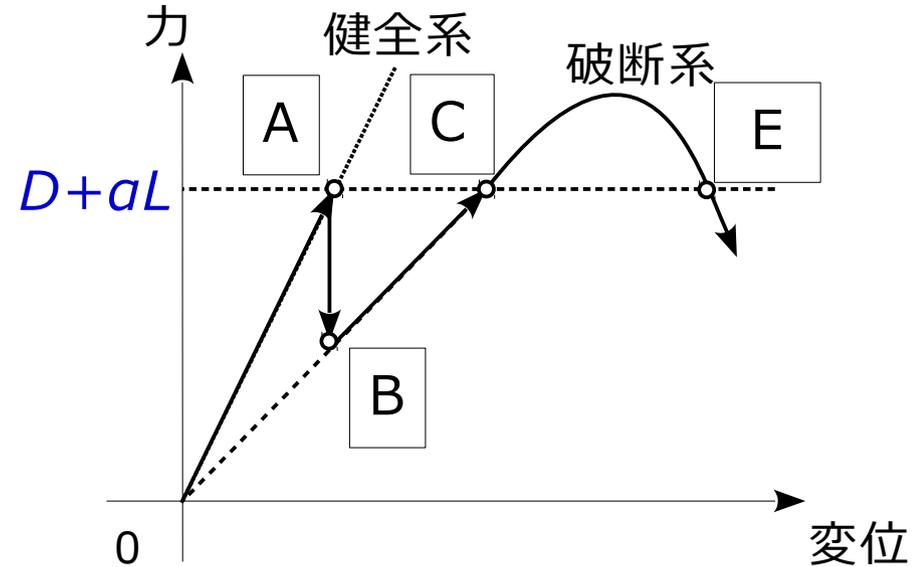
破断後の静的釣り合い状態 C ~



静的には
 $D+aL$ のみ作用

動的には慣性力も作用

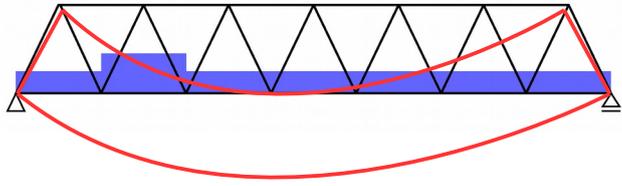
▶ 慣性力は固有振動解析により定義する



静的非線形解析による解法 (1)

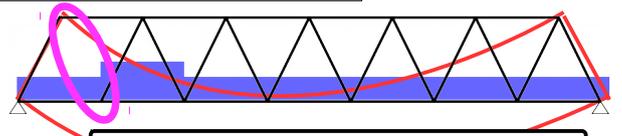
解析手順

つり合い状態 A



健全系
 $D+aL$ を与える

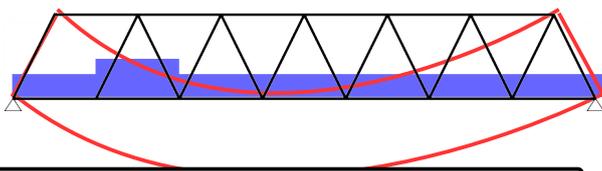
破断直後状態 B



破断想定部材を
削除する

不釣り合い力発生

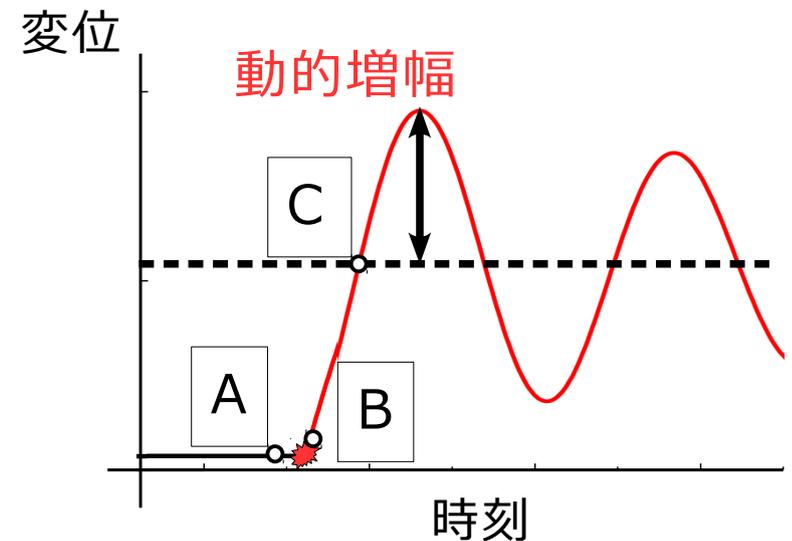
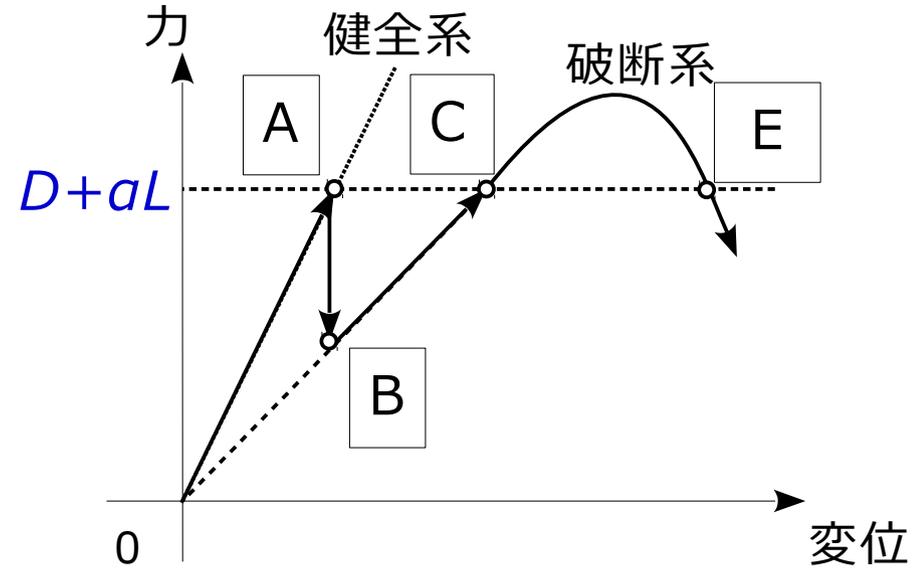
破断後の静的釣り合い状態 C ~



静的には
 $D+aL$ のみ作用

動的には慣性力も作用

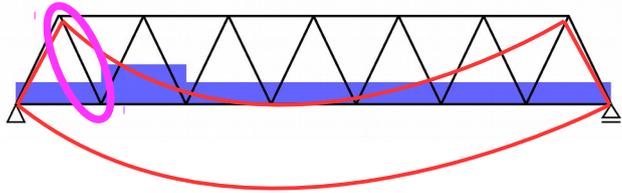
▶ 慣性力は固有振動解析により定義する



静的非線形解析による解法 (1)

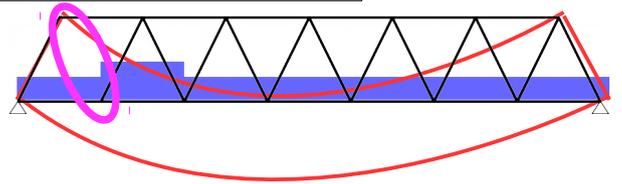
解析手順

つり合い状態 A



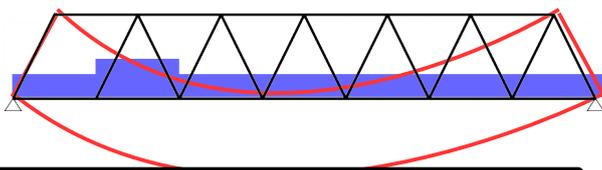
健全系
 $D+aL$ を与える

破断直後状態 B



破断想定部材を
削除する

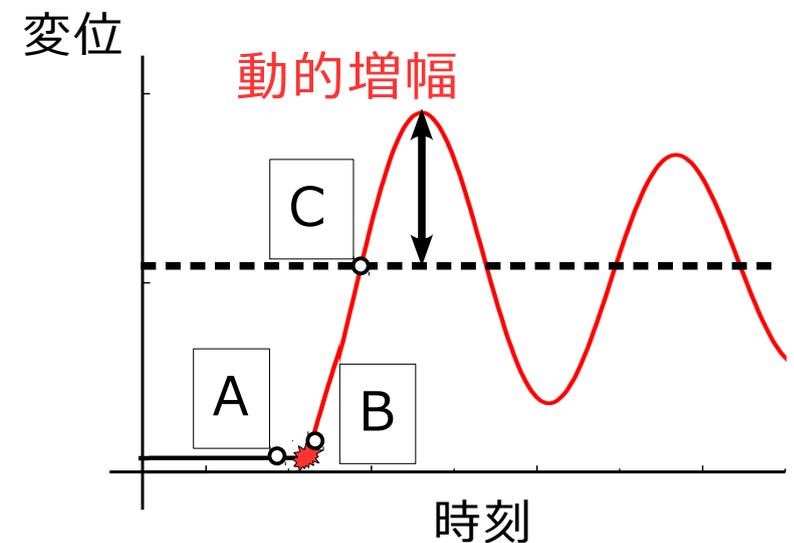
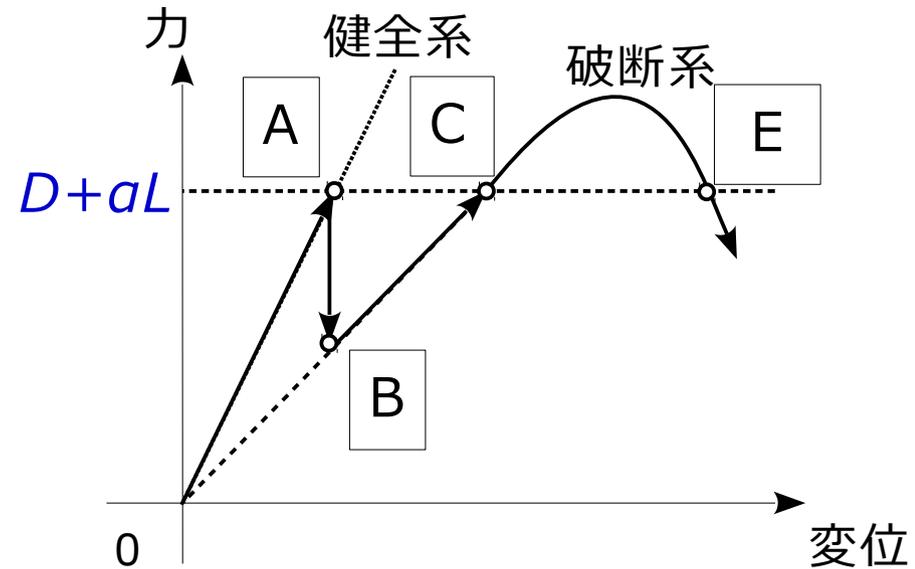
破断後の静的つり合い状態 C ~



静的には
 $D+aL$ のみ作用

動的には慣性力も作用

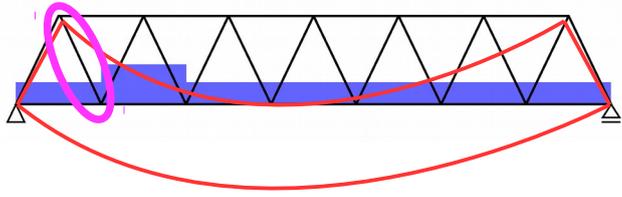
▶ 慣性力は固有振動解析により定義する



静的非線形解析による解法 (1)

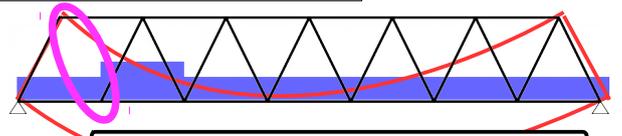
解析手順

つり合い状態 A



健全系
 $D+aL$ を与える

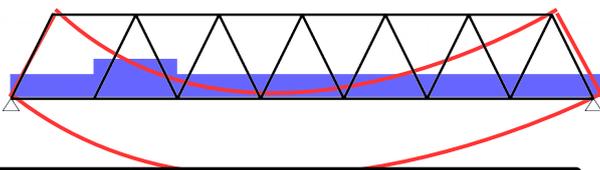
破断直後状態 B



破断想定部材を
削除する

不釣り合い力発生

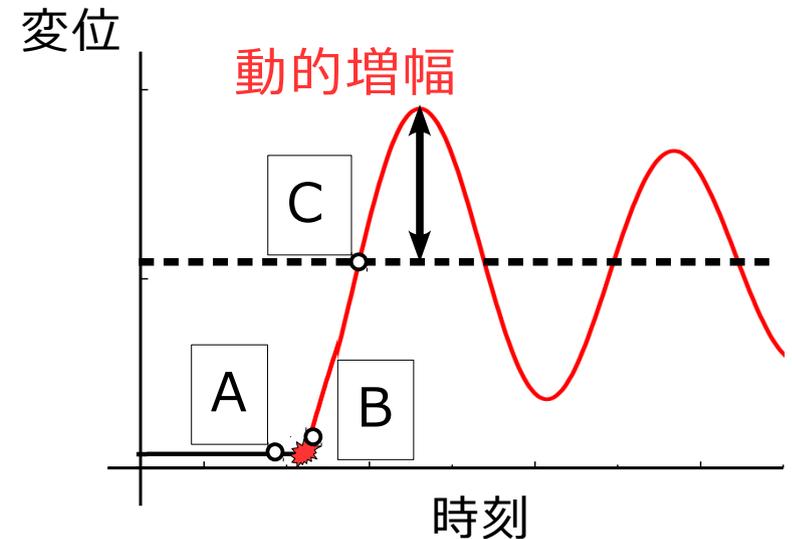
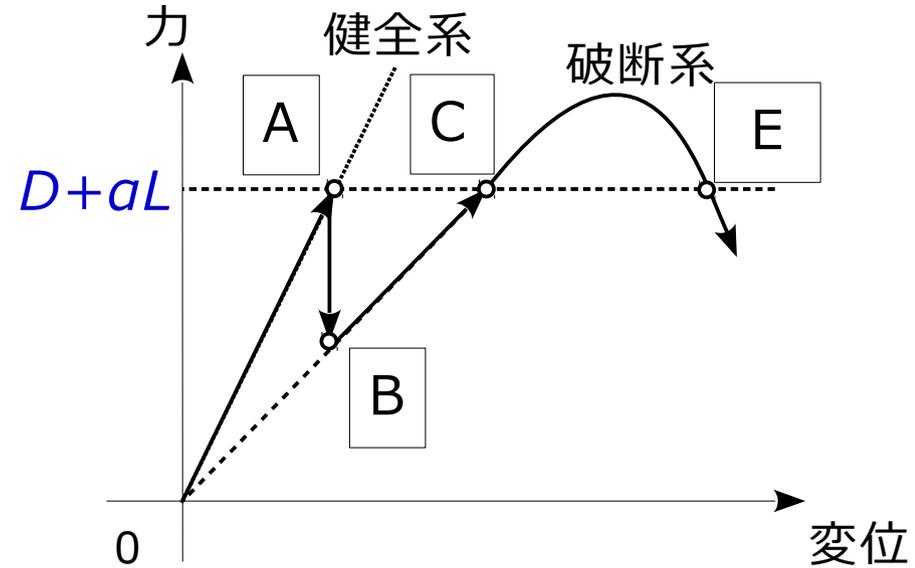
破断後の静的釣り合い状態 C ~



静的には
 $D+aL$ のみ作用

動的には慣性力も作用

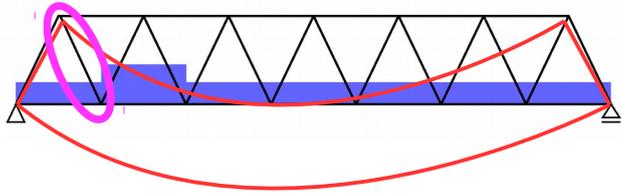
▶ 慣性力は固有振動解析により定義する



静的非線形解析による解法 (1)

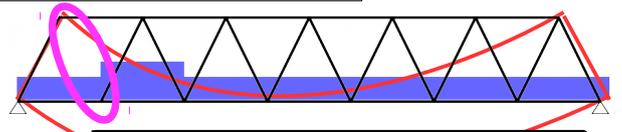
解析手順

つり合い状態 A



健全系
 $D+aL$ を与える

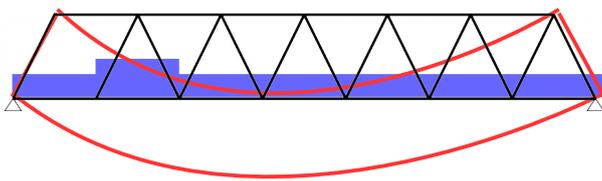
破断直後状態 B



不釣り合い力発生

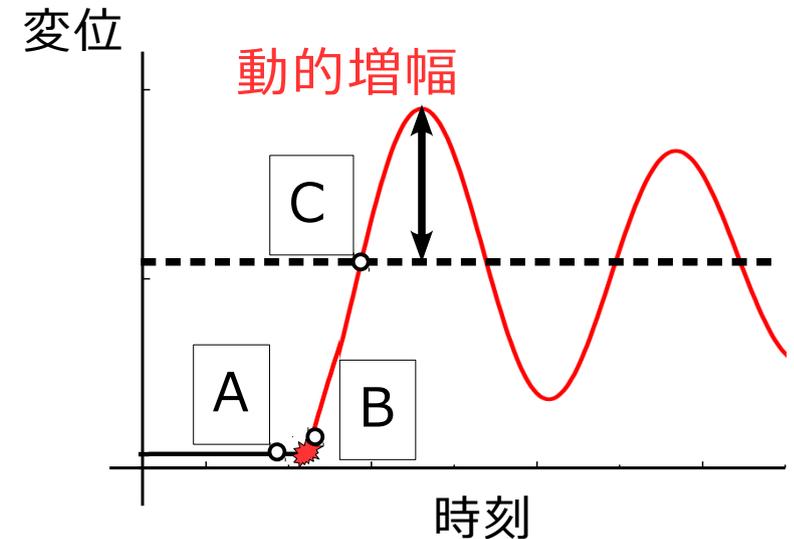
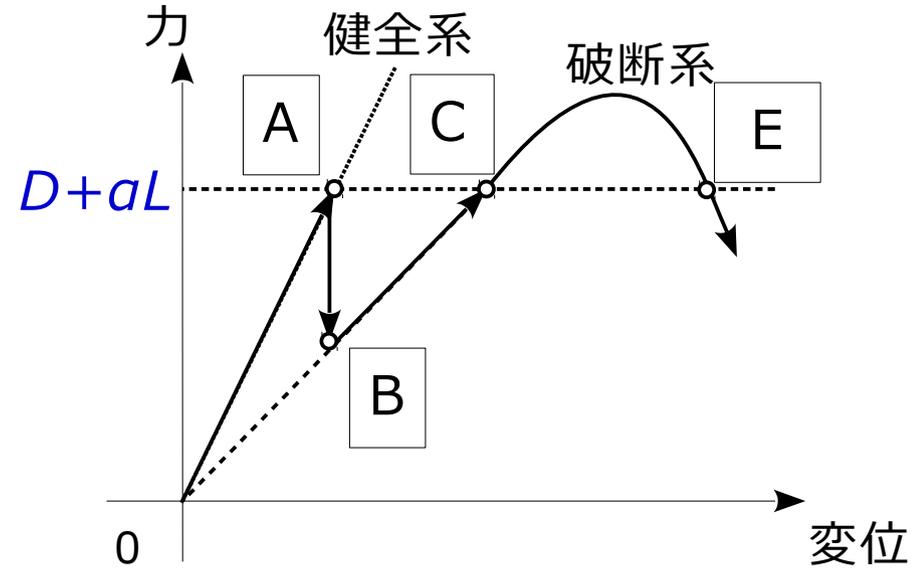
破断想定部材を
削除する

破断後の静的釣り合い状態 C ~



静的には
 $D+aL$ のみ作用

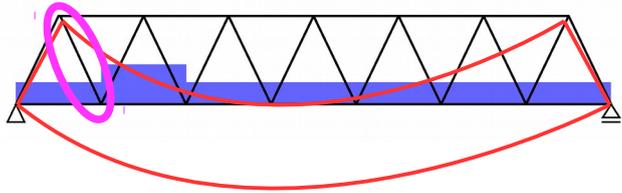
▶ 慣性力 は固有振動解析により定義する



静的非線形解析による解法 (1)

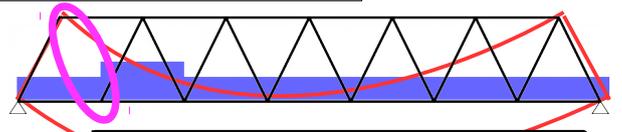
解析手順

つり合い状態 A



健全系
 $D+aL$ を与える

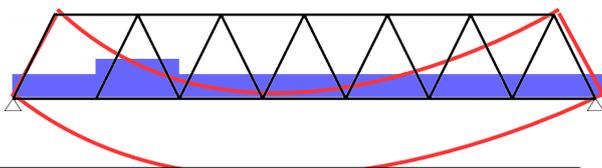
破断直後状態 B



破断想定部材を
削除する

不釣り合い力発生

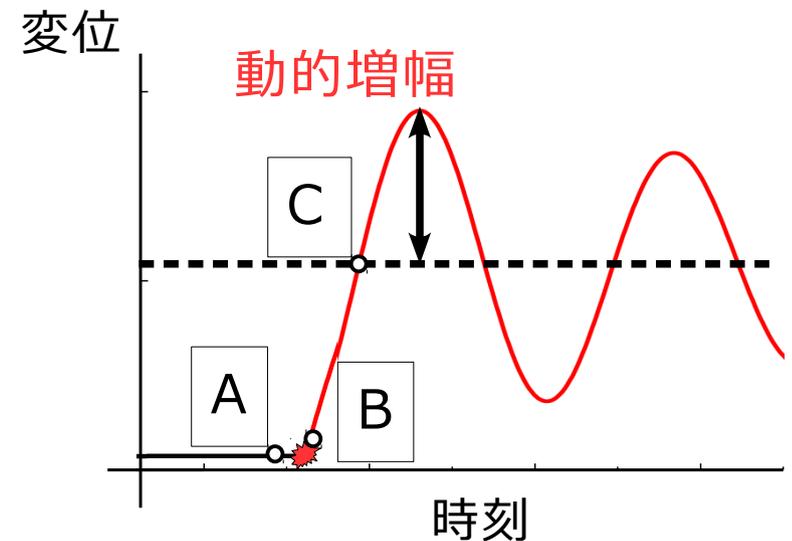
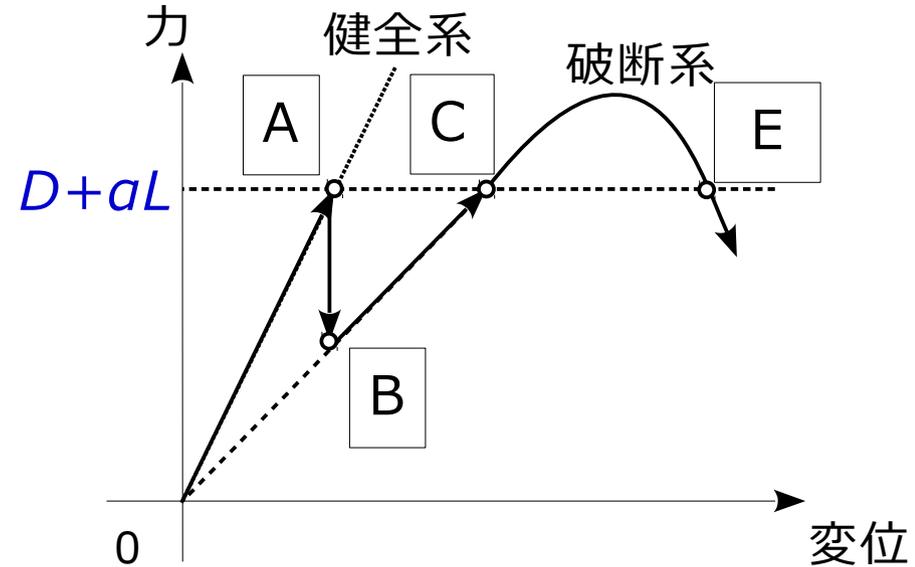
破断後の静的釣り合い状態 C ~



静的には
 $D+aL$ のみ作用

動的には慣性力も作用

▶ 慣性力は固有振動解析により定義する

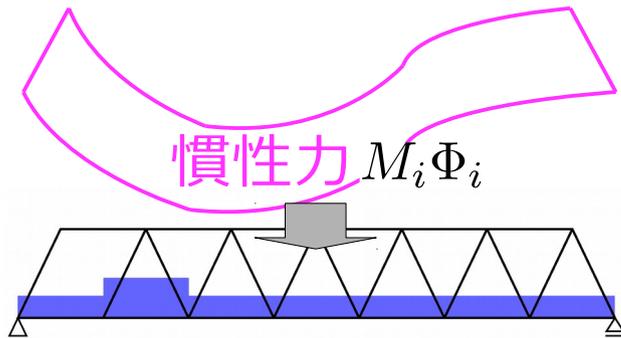


静的非線形解析による解法 (2)

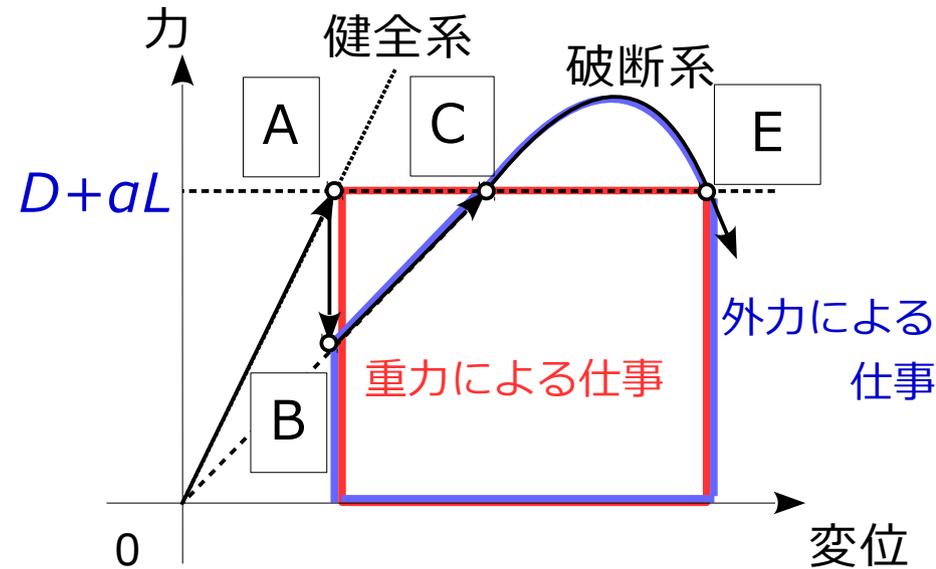
慣性力の定義

振動モードの
節点並進成分 : Φ_i

死荷重・活荷重
考慮の実質質量 : $M_i = \frac{(D + \alpha L)_i}{g}$



慣性力の鉛直成分が極大を超えて
0 となった状態を限界状態 E とする



A から E までの
位置エネルギーの変化分を
ひずみエネルギーと塑性仕事に
変換できれば
崩壊しないと考えられる

外力と重力による仕事を算定

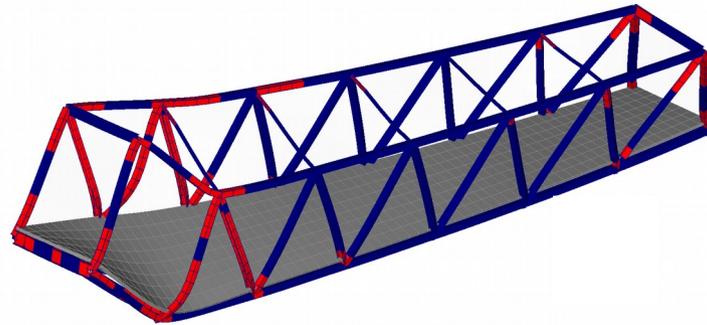
$\frac{\text{外力による仕事}}{\text{重力による仕事}} = \text{リダンダンシー指標 } I \geq 1$

なら崩壊しないと判断する

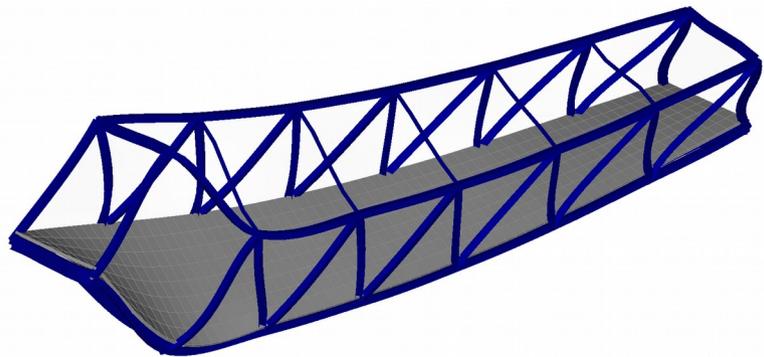
2通りの慣性力の定義

全ての部材を
弾性除荷の剛性で
固有振動解析…
「除荷剛性」

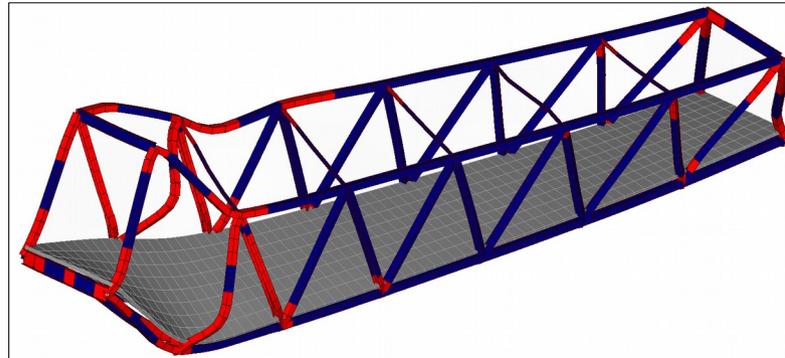
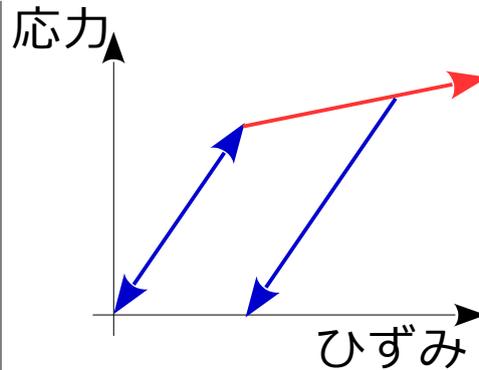
破断後の静的つり合い状態 C
における変形と塑性化領域



塑性化した要素を
塑性载荷の剛性で
固有振動解析…
「载荷剛性」



固有振動モード (除荷剛性)
固有振動数 1.837Hz



固有振動モード (载荷剛性)
固有振動数 0.747Hz

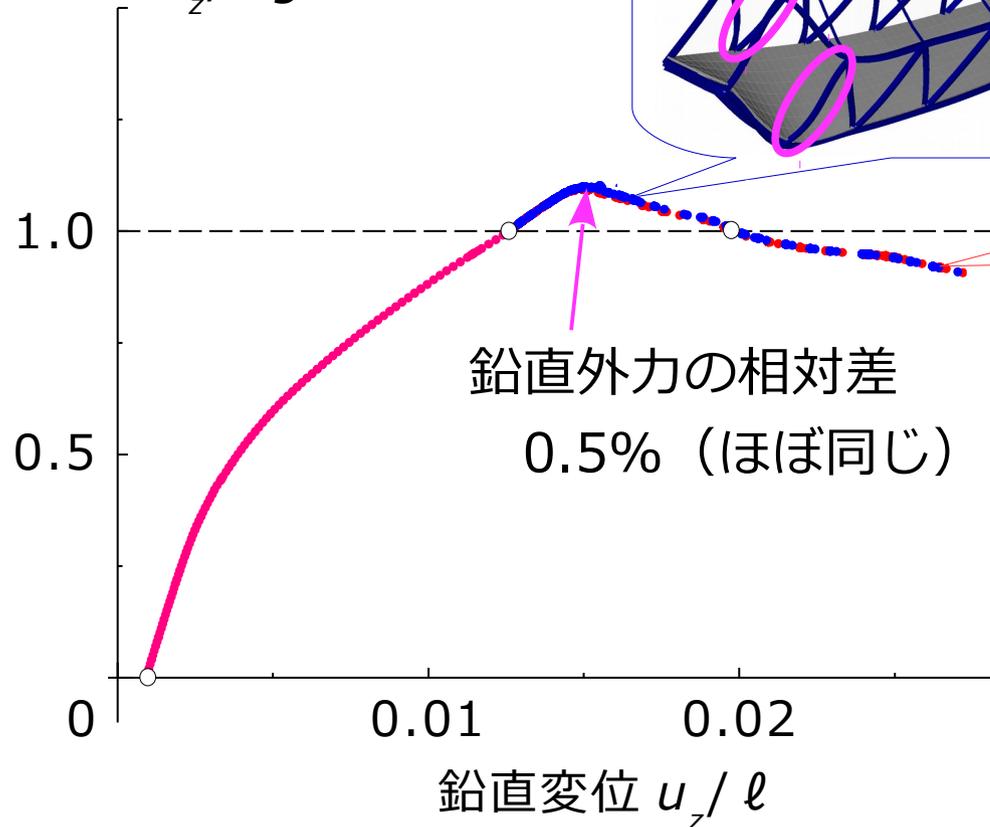
振動モードが違う！

慣性力を定義するための振動モードの違いが
リダンダンシー評価に影響するか検討する

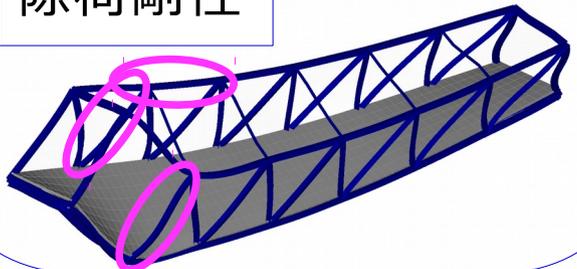
2通りの慣性力とつり合い経路

活荷重倍率 $a=3.00$ の場合

鉛直外力 f_z/Mg

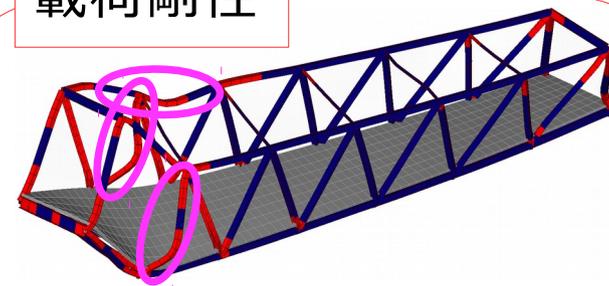


除荷剛性



固有振動モード

載荷剛性



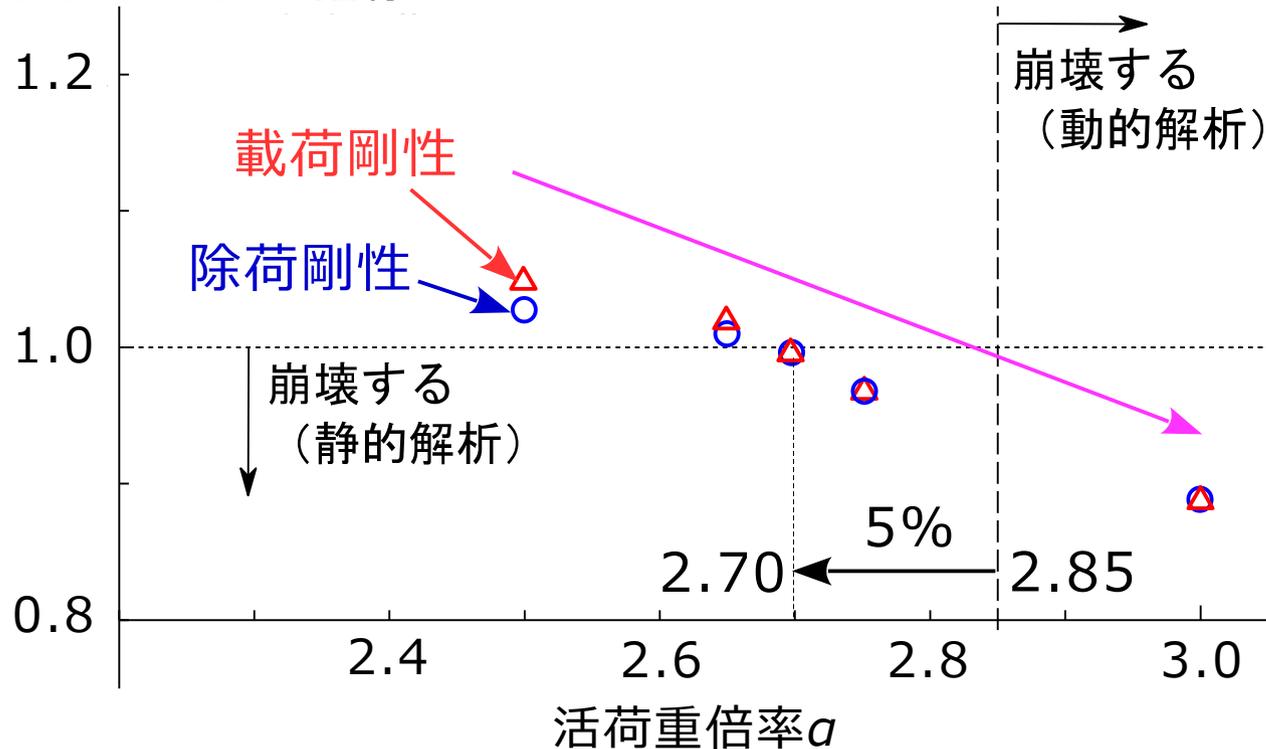
$M_i \Phi_i$: 節点 i における慣性力

$$M_i = \frac{(D + \alpha L)_i}{g}$$

Φ_i : 振動モードの節点並進成分

- ・ 振動モードが違う部材：塑性化した上弦材・斜材
- ・ 床版に作用する活荷重を考慮した慣性力定義
→ 上弦材・斜材には相対的に
小さい慣性力しか作用しなかった

固有振動モードの
違いによる
つり合い経路の差が
小さかった

リダンダンシー指標 I 

除荷剛性と載荷剛性
傾向は同じ

- 活荷重倍率の増加に対して I は単調減少
- $a \geq 2.70$ で崩壊

- 参照解に対して 5% 程度の安全側 で崩壊に対する照査ができる

理由 粘性減衰 提案手法…考慮せず
参照解…考慮した

- 慣性力の定義の違いはリダンダンシー評価に
有意な影響を与えない

3次元トラスモデルで
活荷重の影響を考慮した慣性力を定義し
静的非線形解析による崩壊照査の方法を提案した

- 提案手法では
動的非線形解析による参照解に対して
5% 程度の安全側で崩壊照査ができる
- 除荷剛性と載荷剛性の固有振動モードの違いは
リダンダンシー評価に有意な影響を与えない
- 載荷剛性を用いた固有振動モードでは
塑性化した部分の振幅が相対的に大きくなる

部材が破断したとき，橋 + 自動車に加速度が生じ，
橋と自動車それぞれに慣性力が生じる．

活荷重 $L = m_2 g$ であるから， $m_1 + m_2 = \frac{m_1 g + L}{g} \equiv M$ として，
慣性力 Ma が生じると考える．

現実

慣性力 $m_2 a$

慣性力 $m_1 a$

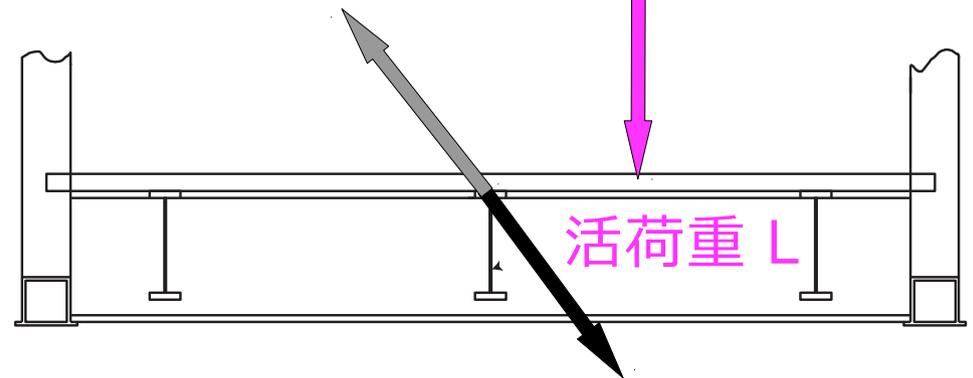


活荷重 L

加速度 a

本研究

慣性力 Ma



活荷重 L

加速度 a

つり合い式と変位増分の内積を取る.

$$\int_B^A \{-M\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{f} + M\mathbf{g}\} \cdot d\mathbf{u} = 0$$

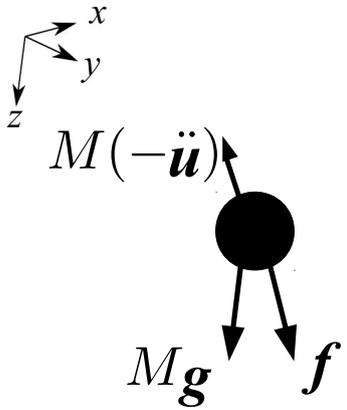
状態 B を健全系の静的つり合い状態とすれば...

$$-\frac{1}{2}M(\|\dot{\mathbf{u}}_A\|^2 - \|\dot{\mathbf{u}}_B\|^2) + \int_B^A \mathbf{f} \cdot d\mathbf{u} + Mg(u_{Az} - u_{Bz}) = 0$$

状態 A で速度が生じていないという条件

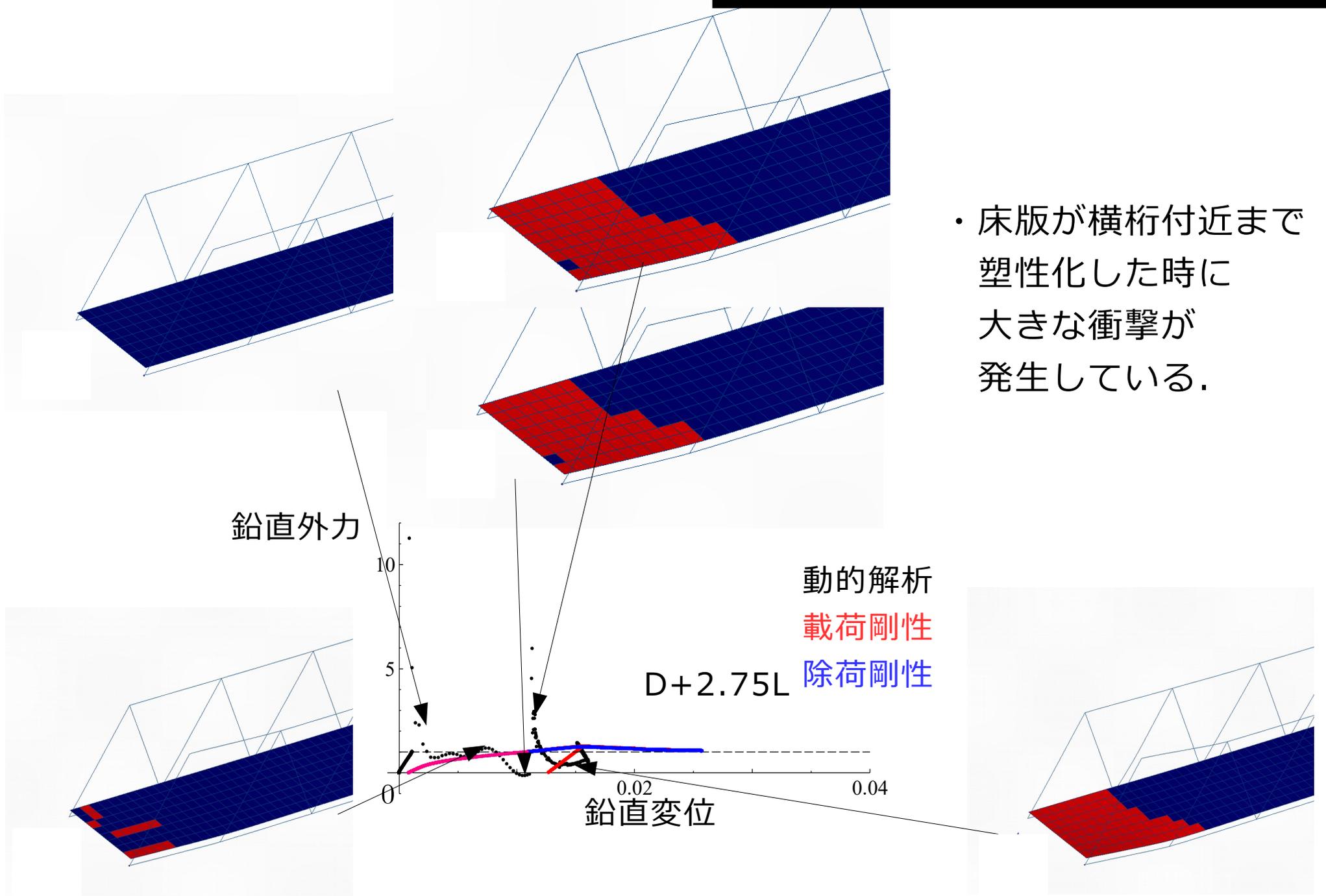
$$Mg(u_{Az} - u_{Bz}) \leq - \int_B^A \mathbf{f} \cdot d\mathbf{u}$$

$$-\mathbf{f} = M\mathbf{g} - M\ddot{\mathbf{u}} \equiv \mathbf{f}_{\text{Ext}}$$



床版の塑性化の進展

- 床版が横桁付近まで塑性化した時に大きな衝撃が発生している。



鉛直外力

動的解析
載荷剛性
除荷剛性

D+2.75L

鉛直変位