

# 静的非線形解析により部材破断の衝撃を考慮した リダンダンシー評価手法の提案

Redundancy evaluation

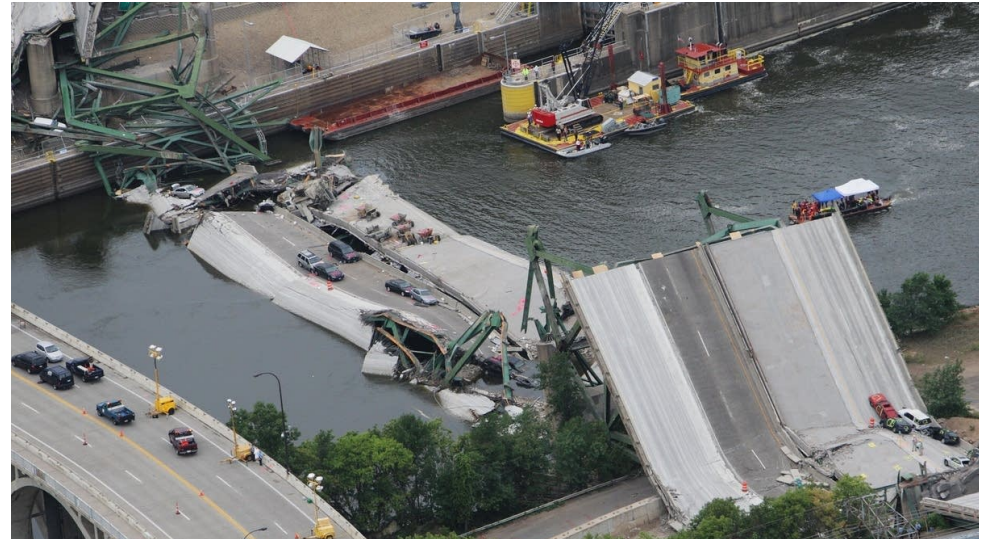
considering impact of member failure by static nonlinear analysis

構造強度学研究室

村田悠仁

2007年, アメリカ I-35W橋  
格点部のガセットプレートの  
損傷をきっかけに崩壊する事故  
死者13名, 負傷者145名

→ 損傷時の安全性  
= リダンダンシー  
を評価することが重要視



## リダンダンシー評価ガイドライン (2014) による評価手法

動的解析：衝撃などの動的効果を再現可能

計算コスト大, モデル化が難しい

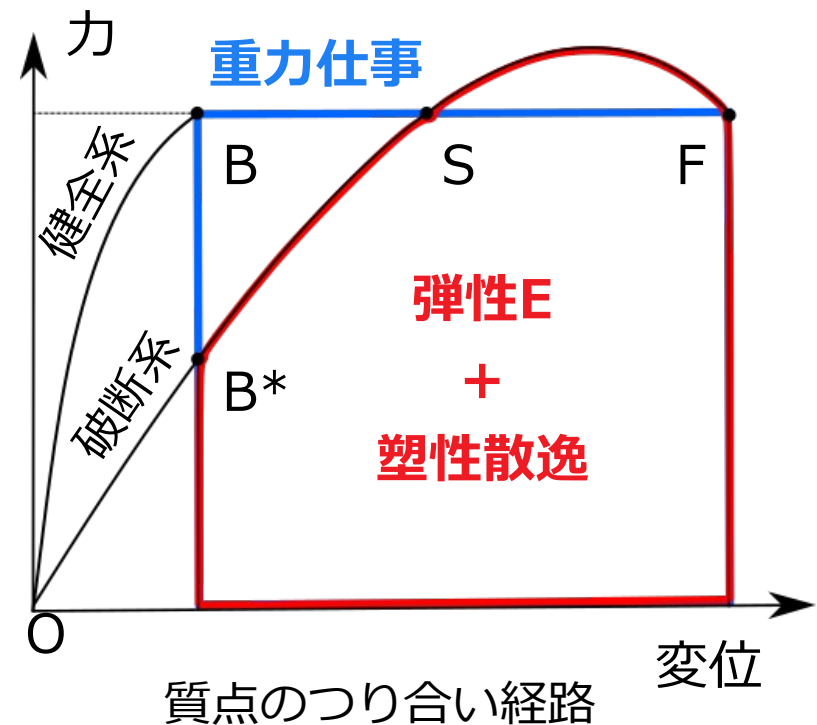
静的解析：動的効果を一律の動的増幅率 (1.854) で再現

過剰安全となる場合が多い (土木学会鋼構造委員会, 2014)

## 後藤ら（2015）

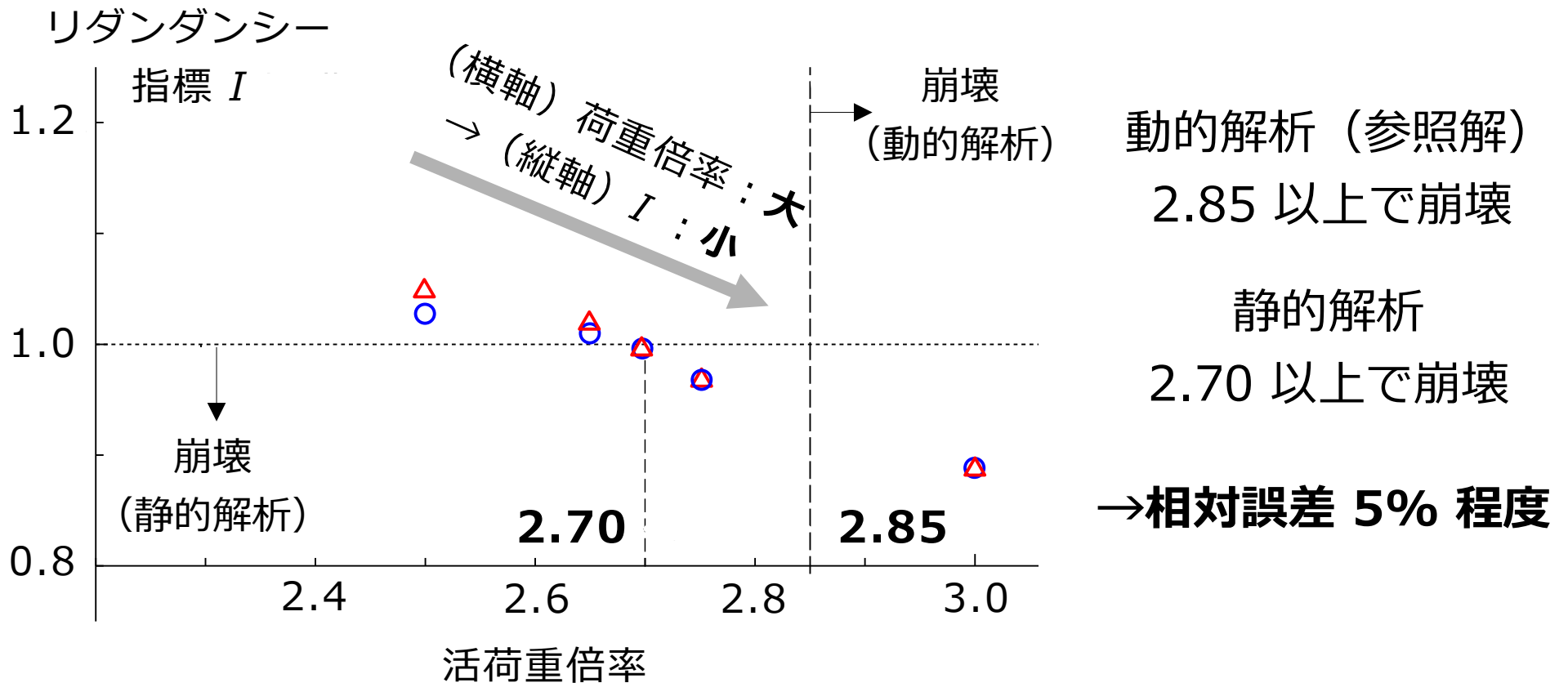
- ・ 質点に近似した2次元トラスの健全系（= 損傷なし）と破断系（= 損傷あり）
- ・ つり合い経路を求め、荷重倍率ごとにリダンダンシー指標  $I$  を算出
- ・ 静的解析でも動的解析に近い精度でリダンダンシーを評価する手法を提案

1. 健全系に荷重を作用させる (O-B)
2. 破断系にBと同じ変形を与える (O-B\*)
3. 破断系に荷重を作用させる (B\*-S)
4. 質点の固有振動モード方向の慣性力を作用させ、崩壊状態まで計算する (S-F)
5. 質点の**重力仕事**と**弾性E + 塑性散逸**  
 $I = E_A / W_G$   $I > 1$  : 安全,  $I < 1$  : 崩壊

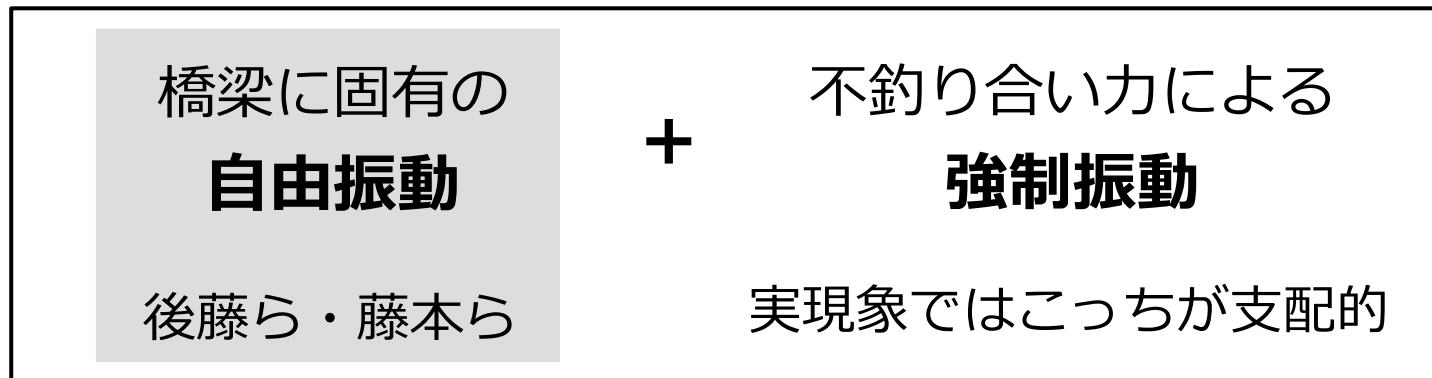


## 藤本ら (2018)

- ・ 質点近似しない3次元トラスに拡張
- ・ 参照解 (動的解析) に対し5%程度の誤差でリダンダンシーを評価
- ・ **載荷剛性**と**除荷剛性**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



部材破断によって橋梁のつり合い状態が移行する際の振動



## 本研究の目的

部材破断前後の変位差を用いて慣性力をモデル化

→不釣り合い力による強制振動の影響を考慮

- 健全系に死+活荷重を作用させる (O-B)
- 破断系に死+活荷重を作用させる (O-S)  
破断系の重心変位がBの重心変位と等しくなった状態=B\*
- 系全体に**慣性力**を作用させ、崩壊状態まで計算する (S-F)

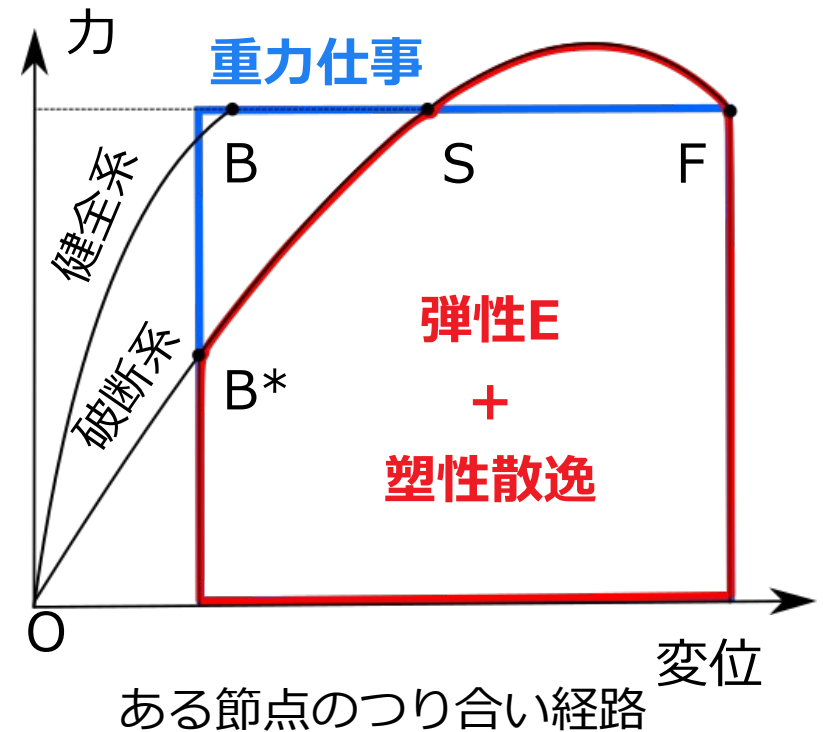
手法 1	手法 2	従来手法
B*-S 変位差	B-S 変位差	固有モード

- 節点の**重力仕事**と**弾性E + 塑性散逸**を比較

$$I = E_A / W_G$$

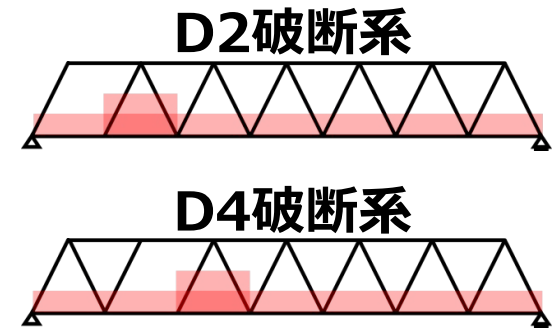
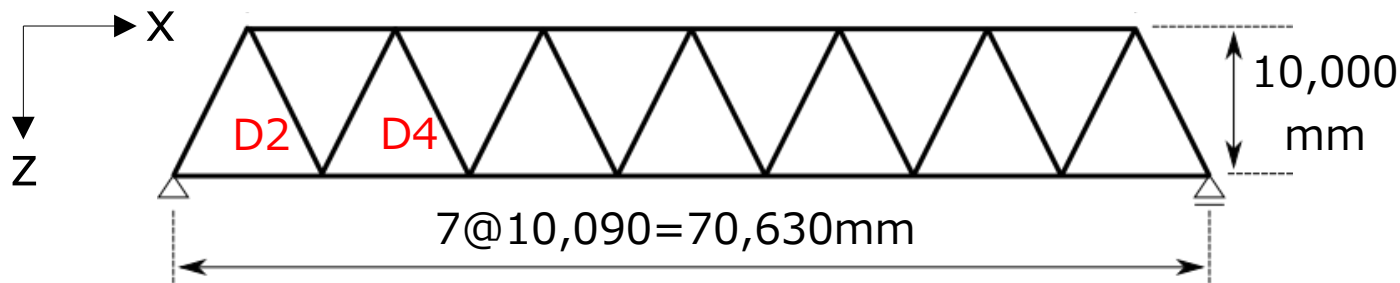
$I > 1$  : 安全 (リダンダンシーあり)

$I < 1$  : 崩壊 (リダンダンシーなし)

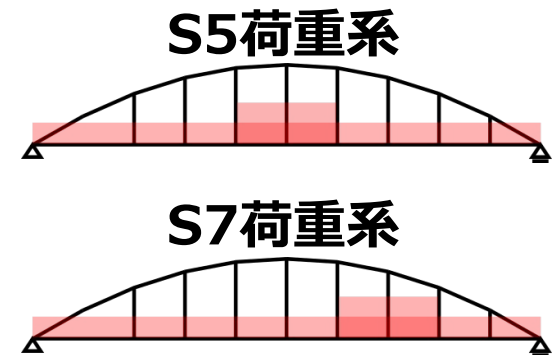
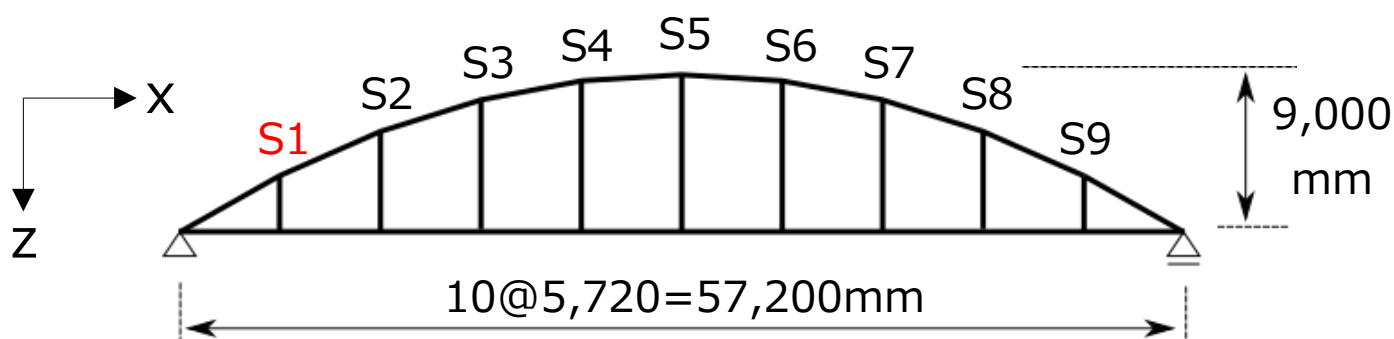


どれくらいの活荷重倍率  $k$  の時崩壊するのか？ → 動的解析と比較  
3種類の慣性力を用いて精度を比較

- 木曽川大橋と同規模の3次元のトラス橋
- 引張軸力が大きく橋梁全体系への影響が大きい斜材D2
- 木曽川大橋で実際に破断した位置の斜材D4 → 破断部材

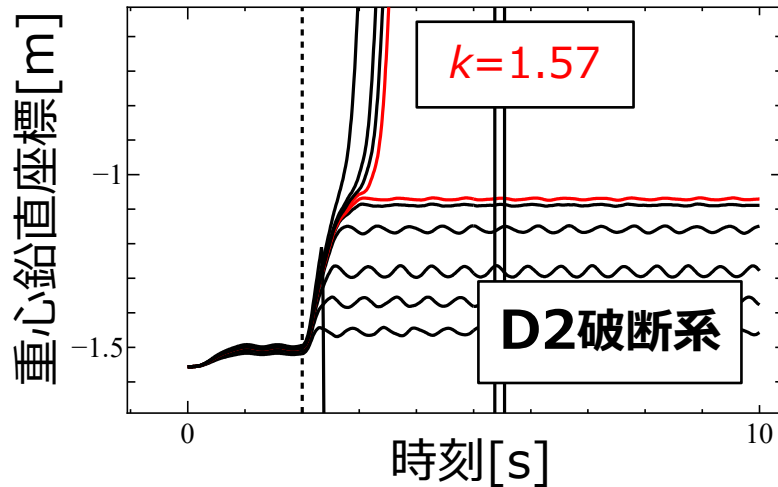
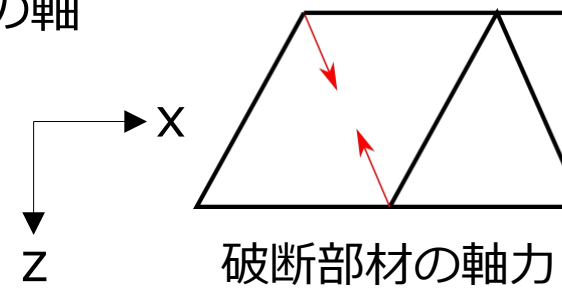


- 旧子飼橋と同規模の3次元のランガー橋
- 耐荷力が小さくなる破断位置と活荷重の载荷パターンの検証 (齊木ら, 2016)
- 支点付近の吊材, 活荷重から離れた吊材の破断: 耐荷力小
- スパン中央に活荷重: 耐荷力小 → 破断部材S1, 活荷重を2パターン



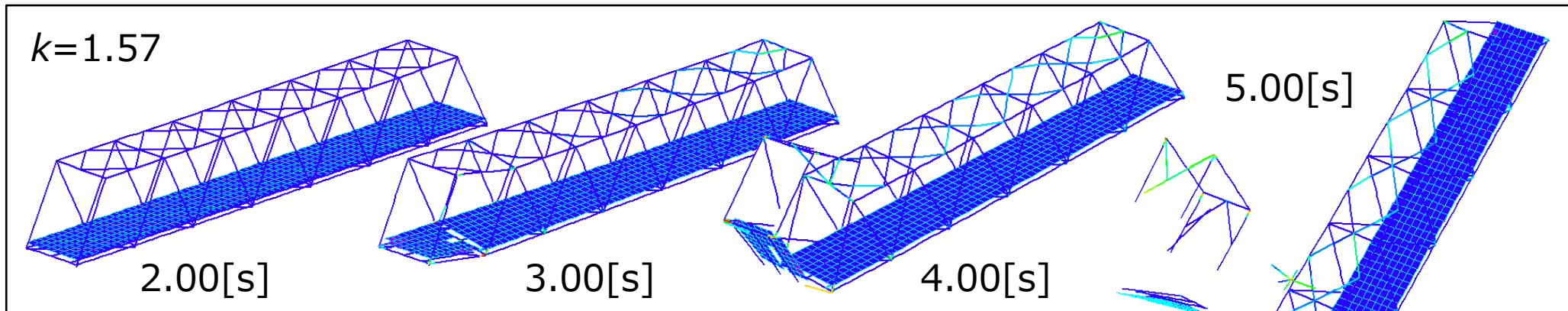
# 動的解析（参照解）

1. 健全系に死+活荷重を作用させた際の破断部材の軸力を求める
2. 破断系に死+活荷重と軸力を作用させる
3. 0.01s の間に軸力をゼロにする



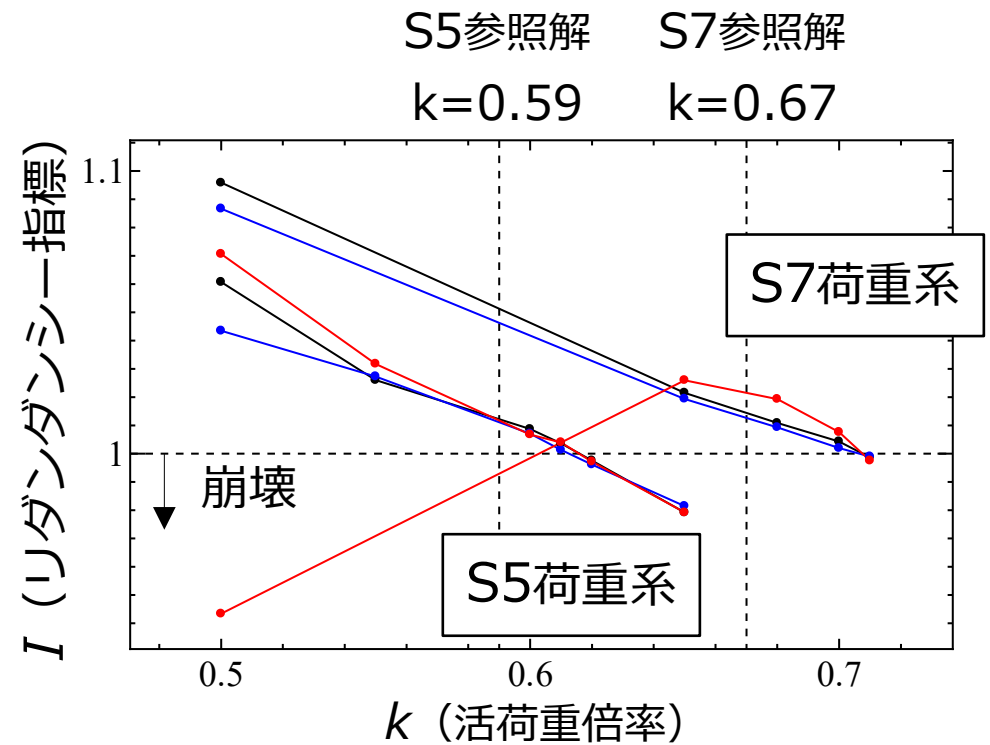
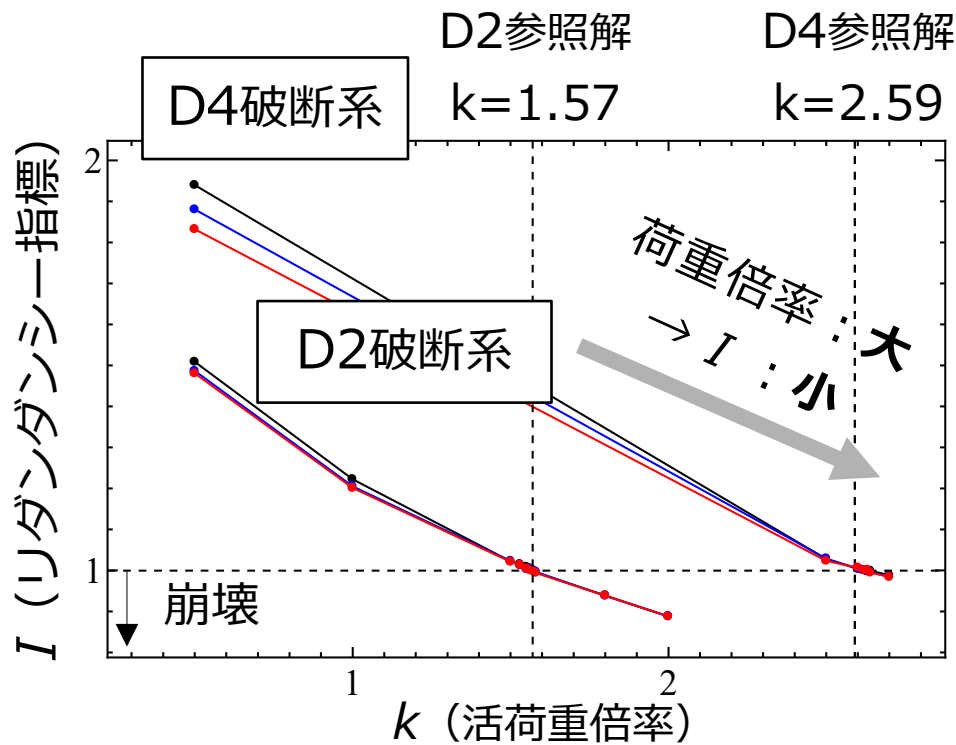
- $k \leq 1.56$  : 重心が一定値付近を振動 = 崩壊せず
  - $k \geq 1.57$  : 重心の Z 座標が増加し続ける = 崩壊
- **最小崩壊活荷重倍率は  $k=1.57$**

同様に, D4破断系 S5荷重系 S7荷重系  
 **$k=2.59$     $k=0.59$     $k=0.67$**





# 静的解析の結果



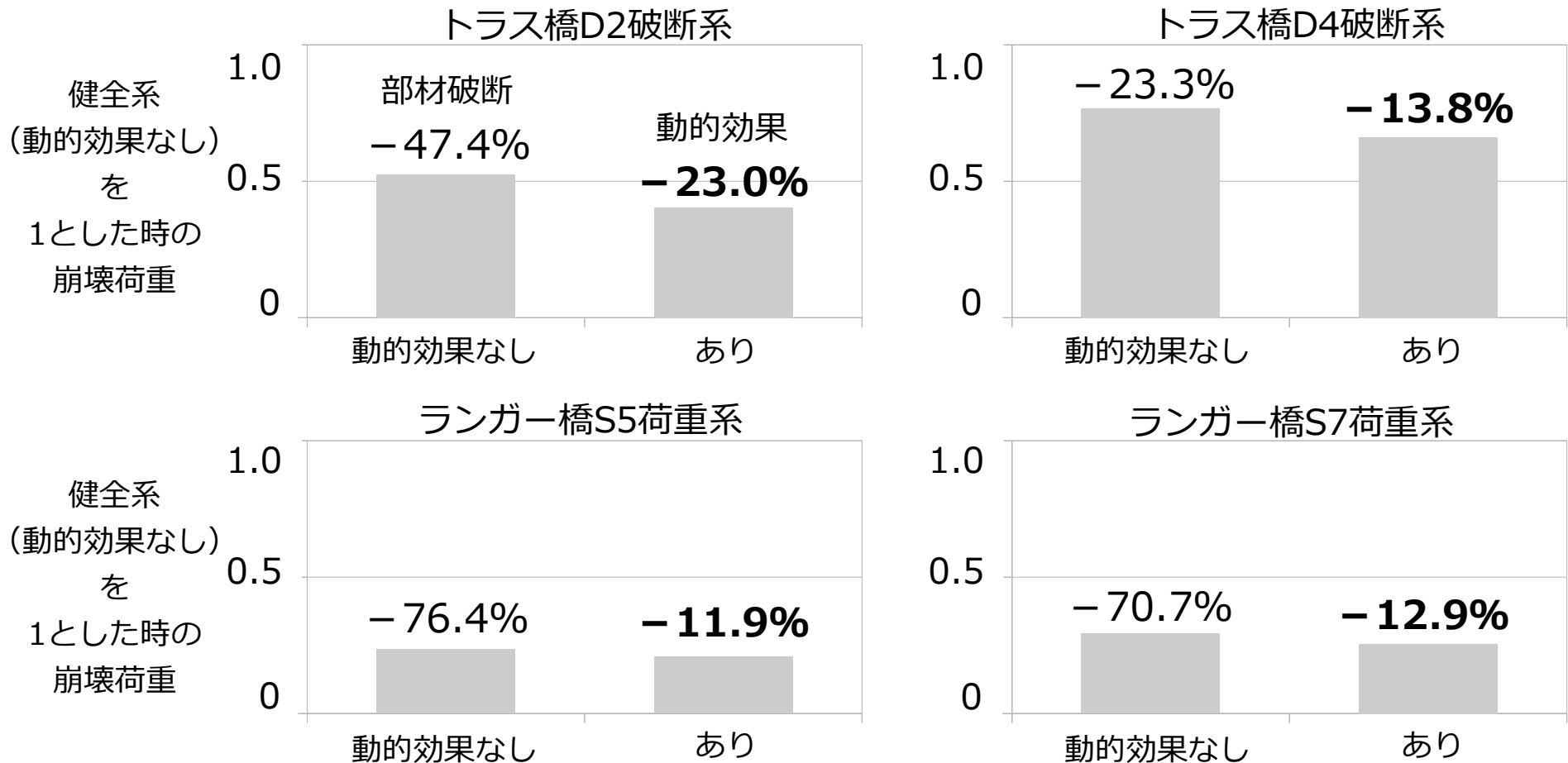
	D2破断系	D4破断系
手法1	1.58 (0.64%)	2.63 (1.54%)
手法2	1.58 (0.64%)	2.62 (1.16%)
従来手法	1.57 (0.00%)	2.64 (1.93%)

	S5荷重系	S7荷重系
手法1	0.62 (5.08%)	0.71 (5.97%)
手法2	0.62 (5.08%)	0.71 (5.97%)
従来手法	0.62 (5.08%)	0.71 (5.97%)

3手法とも、6%程度の誤差で最小崩壊活荷重倍率を推定できた

# 動的効果の大きさの比較

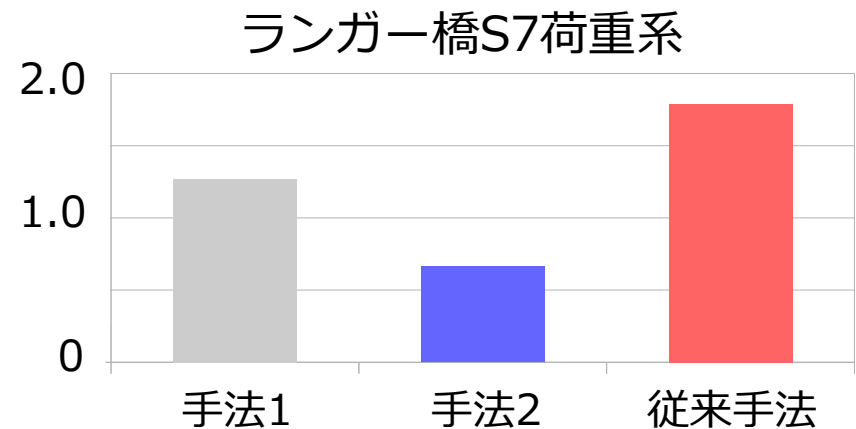
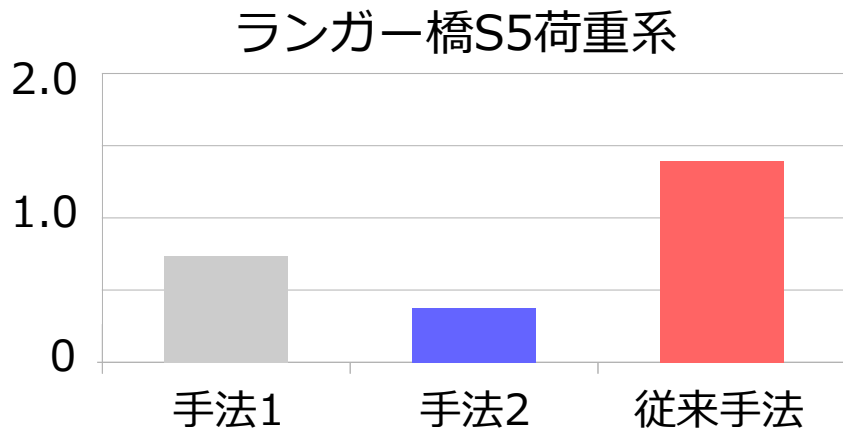
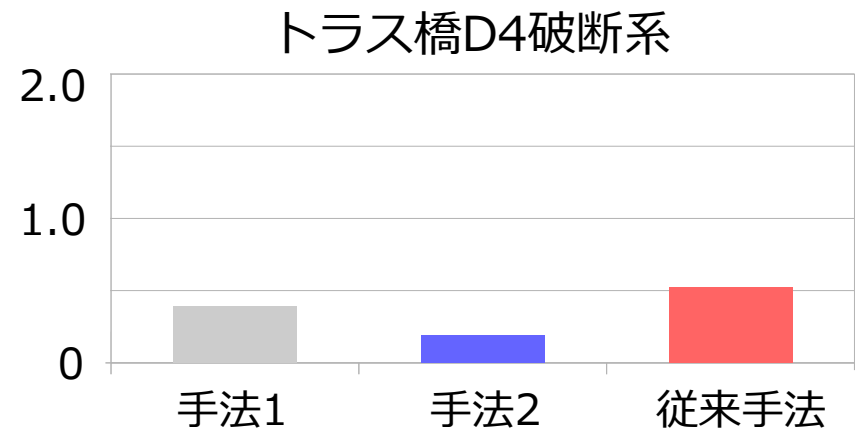
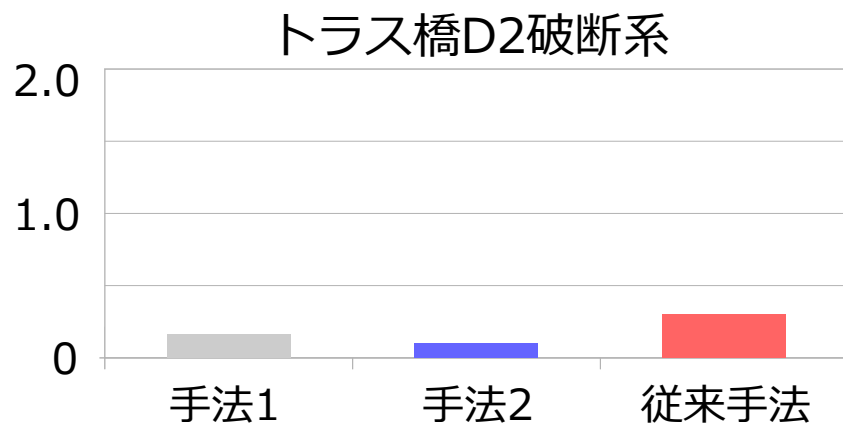
- ・ 死荷重  $D$  を載荷後, 活荷重  $kL$  を,  $k$  を漸増させつつ載荷
- ・ 荷重最大時の  $k$  = 動的効果を考慮しない場合の崩壊荷重を図示



橋梁形式, 破断部材, 荷重載荷パターンにより  
動的効果による耐荷力の減少の度合が異なる

# 3手法の慣性力の比較

- ・ 動的解析の破断直前と破断後（加速度ゼロとなった時刻）の変位差から慣性力を作成 → 参照解とする
- ・ 正規化慣性力ベクトルとの誤差L2ノルム（値が小さい = 参照解に近い）



**手法2が3手法の中で最も動的解析に近い慣性力**

- 変位差を用いて部材破断時の慣性力をモデル化することで、トラス橋に対しては 1~2%程度、ランガー橋に対しては 5~6%程度の精度で最小崩壊活荷重倍率が推定できた。
- トラス橋・ランガー橋ともに、健全系の死荷重・活荷重作用時と破断系の死荷重・活荷重作用時の変位差を用いる手法が、3手法の中で最も動的解析に近い慣性力荷重を得られた。
- 動的効果を考慮することで、考慮しない場合に比べ耐荷力は 11%~23%程度減少するが、橋梁形式・破断部材・荷重載荷パターンによって減少の程度が異なるため、動的効果を考慮してリダンダンシーを評価する必要がある。