

2015年2月13日

修士論文発表会

動的効果を考慮した 鋼トラス橋の耐荷力の数値的評価

Numerical Evaluation of Load Capacity of a Steel Truss
Bridge with Considering Dynamic Effect of Member Failure

アメリカ

2007年 ミネソタ州で
トラス橋の**崩落事故**

座屈

崩壊



日本

点検で斜材破断発見
崩落せず

破断

崩壊せず



2ケースの違い：リダンダンシー※の大きさの違い
リダンダンシーを適切に評価 → 落橋を防止

おそらく破断時にとっても大きな**衝撃**が作用

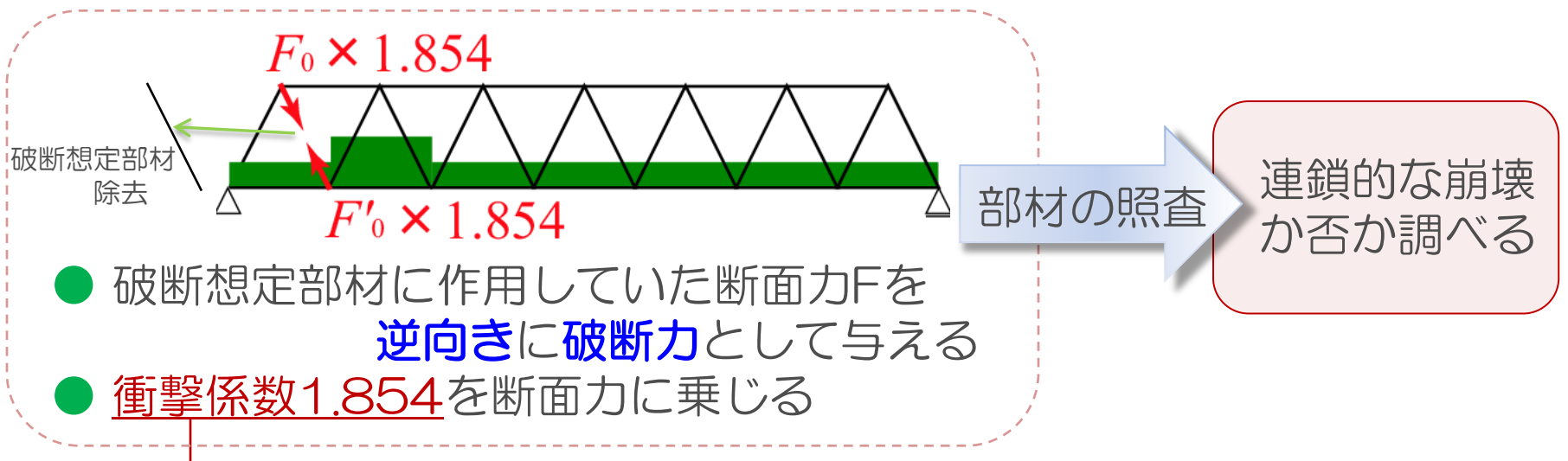


動的効果を考慮することが望ましい

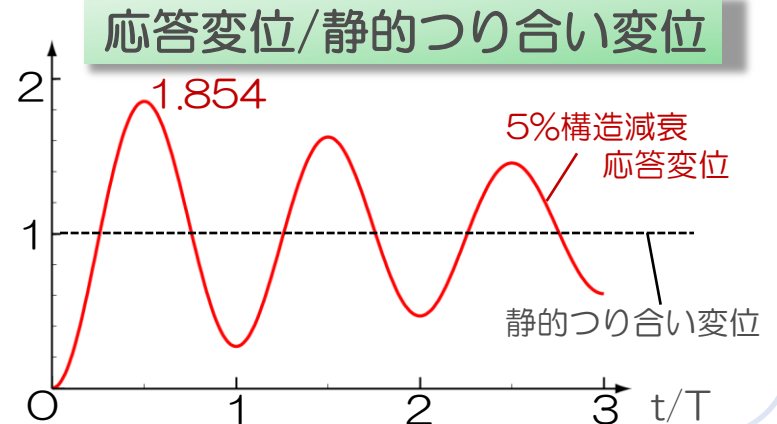
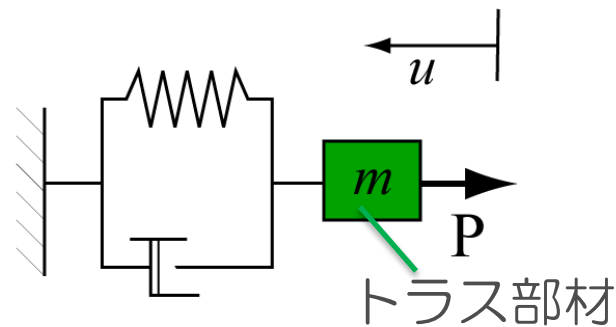
※橋梁の一部材が損傷したあとも荷重を受け持ち続ける能力

● 動的効果：静的解析において衝撃係数で考慮される

一般的な静的リダンダンシー解析



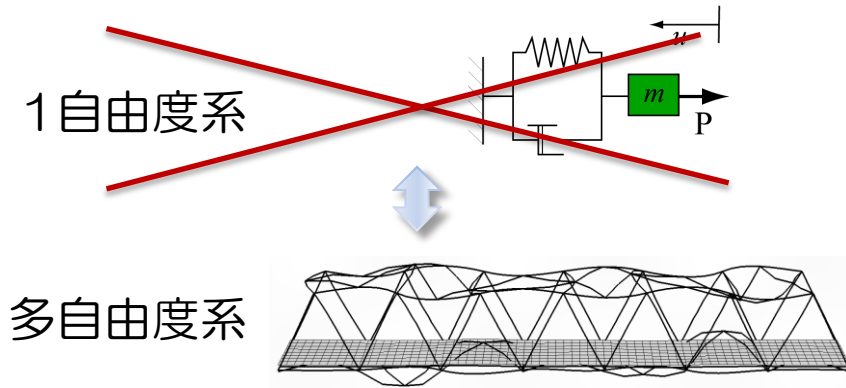
URS.Co : 部材破断を1自由度系振動モデルに近似



● 部材破断時の衝撃に焦点をあてる

① 新衝撃係数の算定

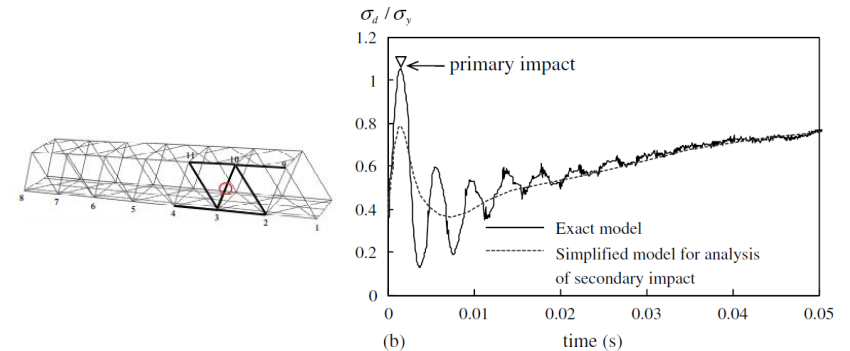
既往の衝撃係数1.854
なぜトラス橋に適用できるのか？



合理的な値 新衝撃係数の提案

② 動的非線形リダンダンシー解析

トラス橋の崩壊は非線形性が強い
動的線形解析では不十分

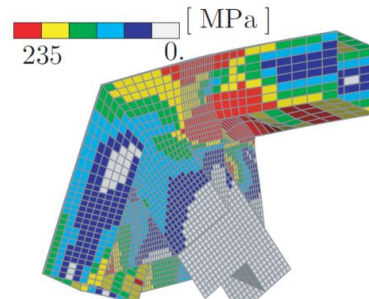


後藤ら(2010)

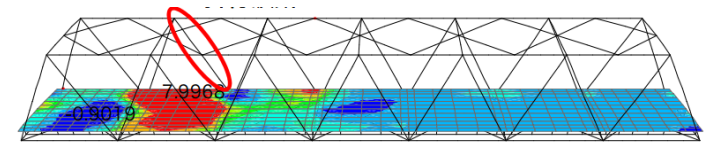
動的非線形有限要素解析

③ 格点部の変形&床版の非線形性を考慮

静解析では、
格点部&床版のモデル化
はリダンダンシーに影響する



構造強度学研究室(2012)



永谷ら(2009)

動的解析でも検討

解析対象：木曽川大橋

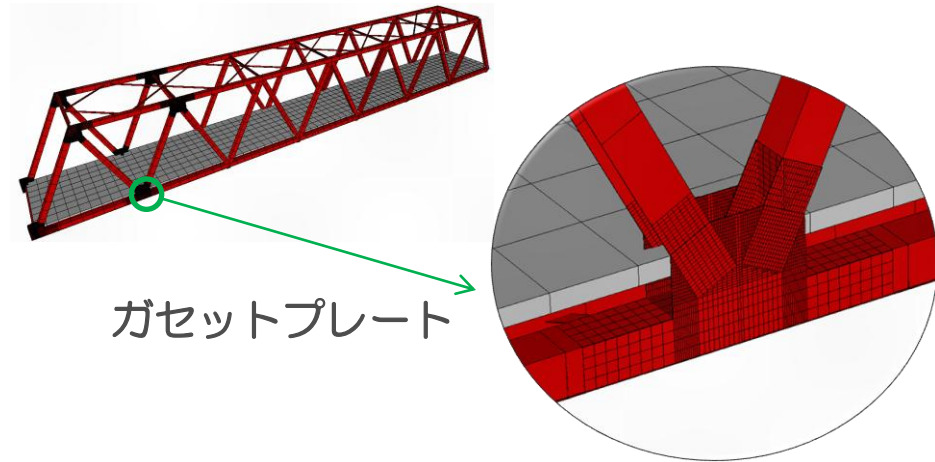
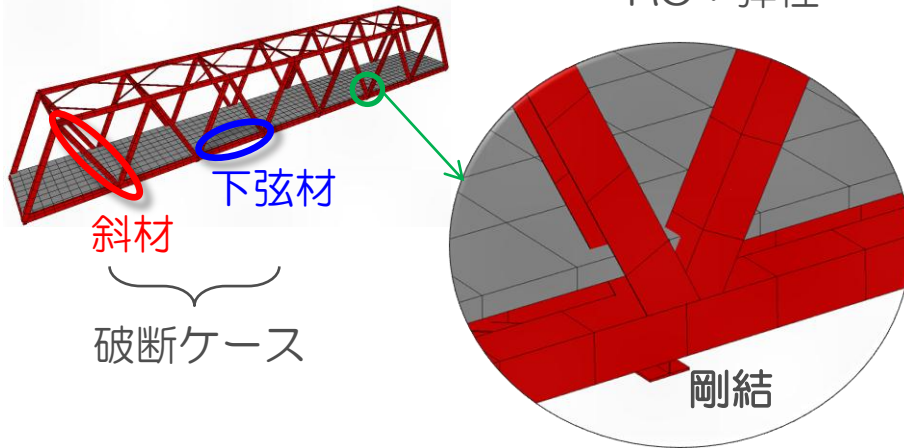
4/13



【骨組モデル】

鋼材：弾塑性
RC：弾性

【詳細モデル】



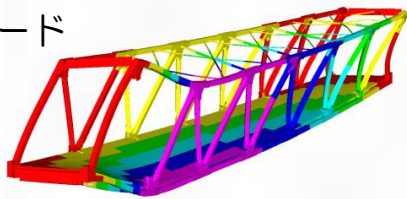
剛結：格点部の破壊は生じない

板要素により格点部の変形を考慮

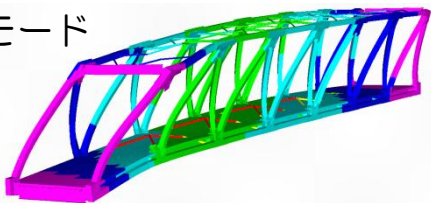
Rayleigh減衰

5%減衰比を仮定

1次モード

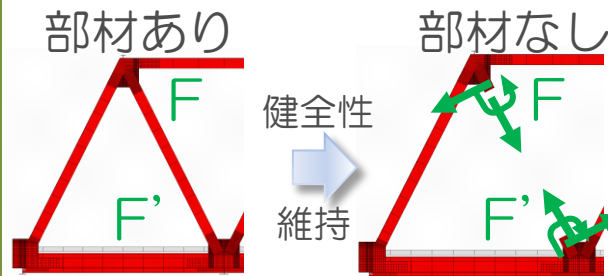


2次モード



部材破断の再現方法

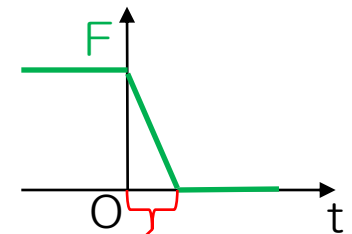
部材なし健全モデルを作成



破断想定部材の断面力Fを
同じ向きに与える

断面力開放

$$F(t) = F \left(1 - \frac{t}{T_f} \right)$$



Fを0.01秒でゼロへ

● **新衝撃係数**：幾何学および材料非線形性を考慮



手順① 静的非線形解析

漸増载荷

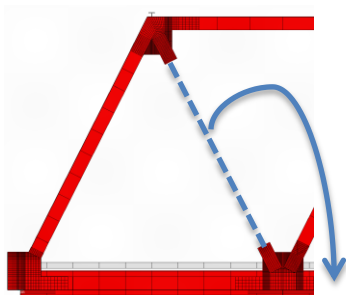
$$D + f \times L$$

D : 死荷重

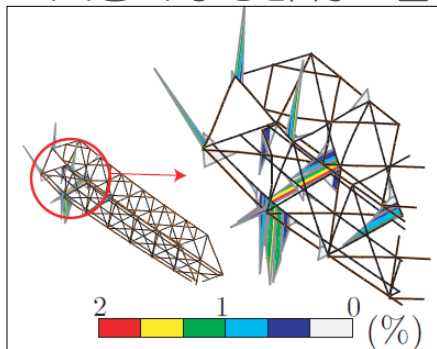
f : 荷重パラメータ

L : 活荷重

①破断想定部材を除去, 漸増载荷



②相当塑性ひずみが大きくなる部材に着目

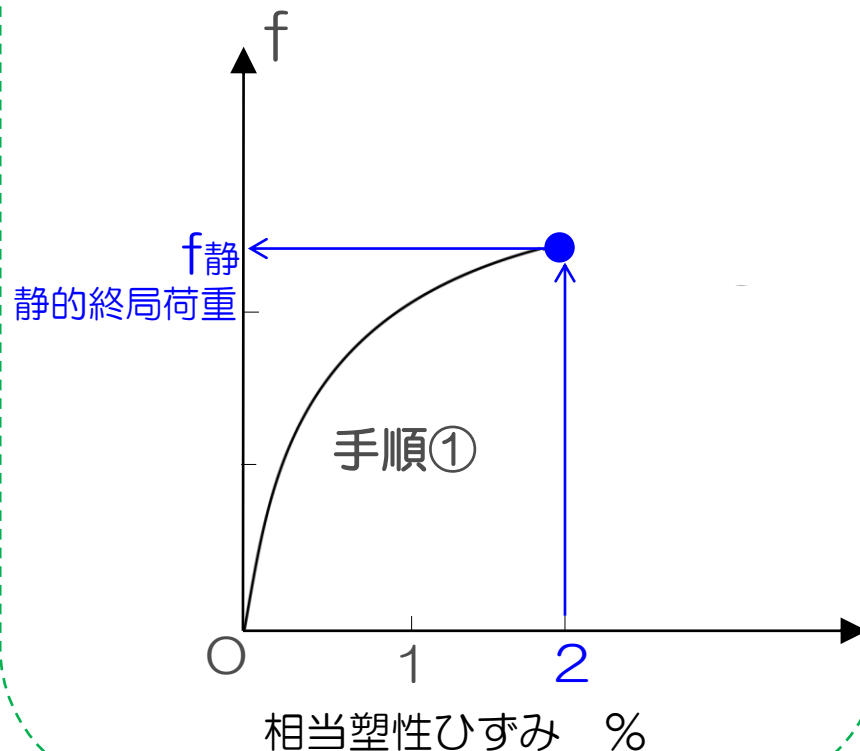


相当塑性ひずみ2%
部材の終局基準

このときのf

f_静 : 静的終局荷重

(例) 斜材
荷重パラメータf-相当塑性ひずみ関係



● **新衝撃係数**：幾何学および材料非線形性を考慮

① 静的解析

② 動的解析

③ 静的解析

新衝撃係数算定

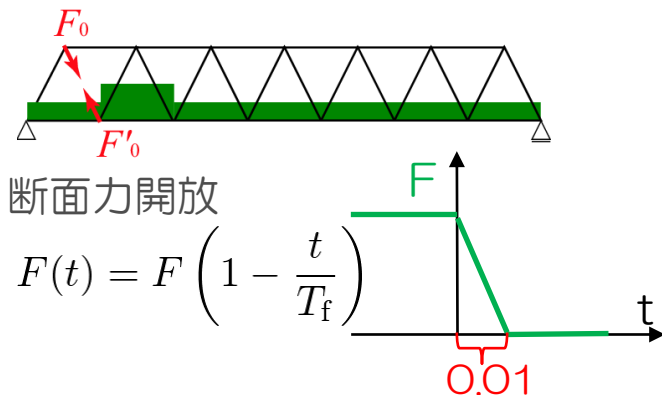
手順② 動的非線形解析

永続載荷

$$D + f_{静} \times L$$

陰解法
時間積分間隔

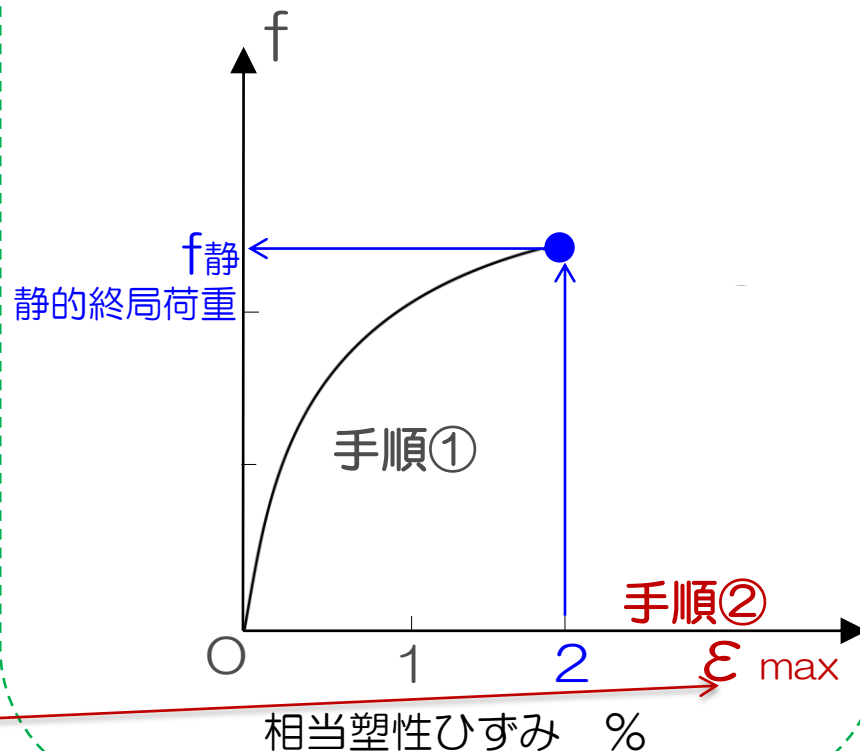
$$\Delta t = 0.001s$$



破断

モデル内に発生した
最大相当塑性ひずみ ϵ_{max} を求める

(例) 斜材
荷重パラメータf-相当塑性ひずみ関係



● **新衝撃係数**：幾何学および材料非線形性を考慮

① 静的解析

② 動的解析

③ 静的解析

新衝撃係数算定

手順③ 静的非線形解析

漸増载荷

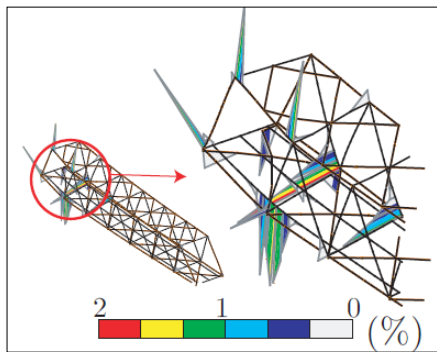
D : 死荷重

f : 荷重パラメータ

$D + f \times L$

L : 活荷重

手順①を延長させ、 ϵ_{max} までさらに漸増载荷させる

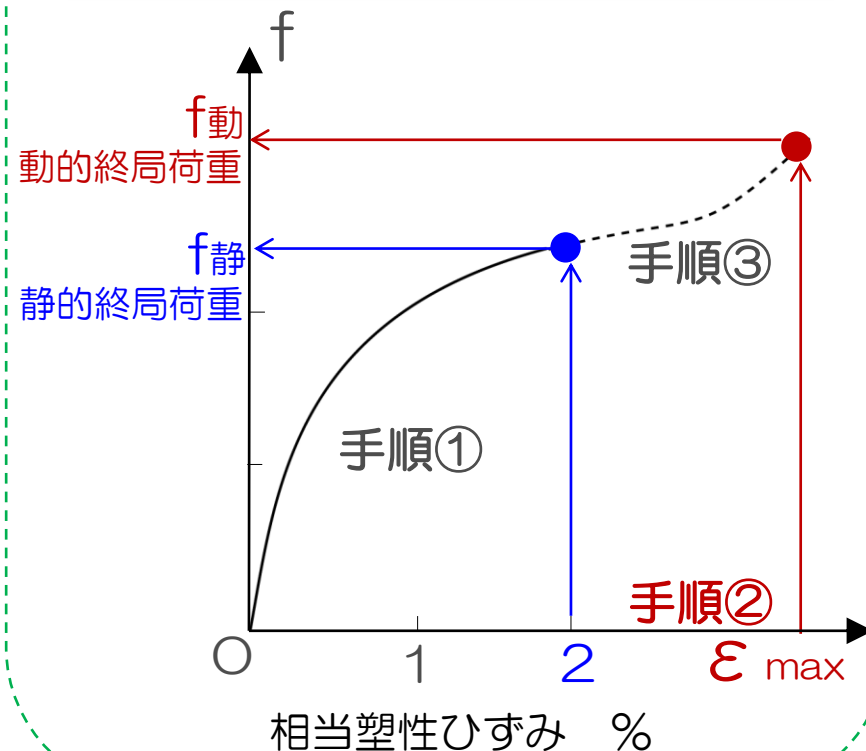


動的解析で得られた
相当塑性ひずみ ϵ_{max}

このときのf

$f_{動}$: 動的終局荷重

(例) 斜材
荷重パラメータf-相当塑性ひずみ関係



● **新衝撃係数**：幾何学および材料非線形性を考慮

① 静的解析

② 動的解析

③ 静的解析

新衝撃係数算定

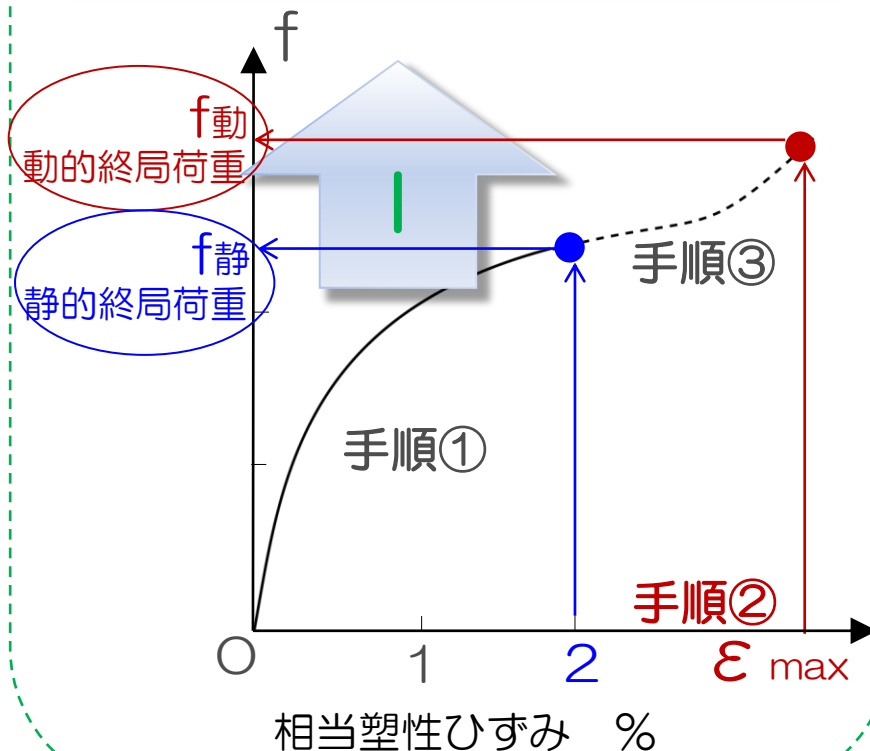
新衝撃係数算定

● 静的非線形解析で得られた
終局荷重の倍率

$$\beta = \frac{f_{\text{動}} : \text{動的終局荷重}}{f_{\text{静}} : \text{静的終局荷重}}$$

※ 同部材位置で算定

(例) 斜材
荷重パラメータ f -相当塑性ひずみ関係



解析結果

1 斜材破断時の衝撃係数

⇒ 骨組モデル

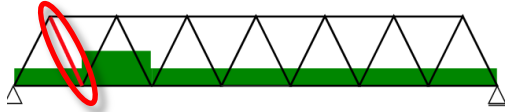
⇒ 詳細モデル

2 下弦材破断時の衝撃係数

⇒ 骨組モデル

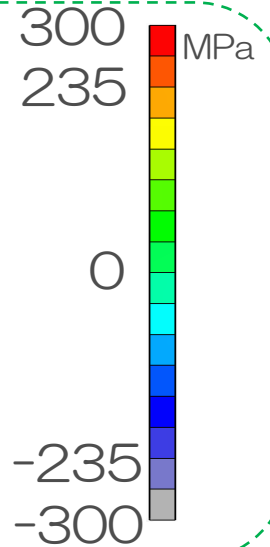
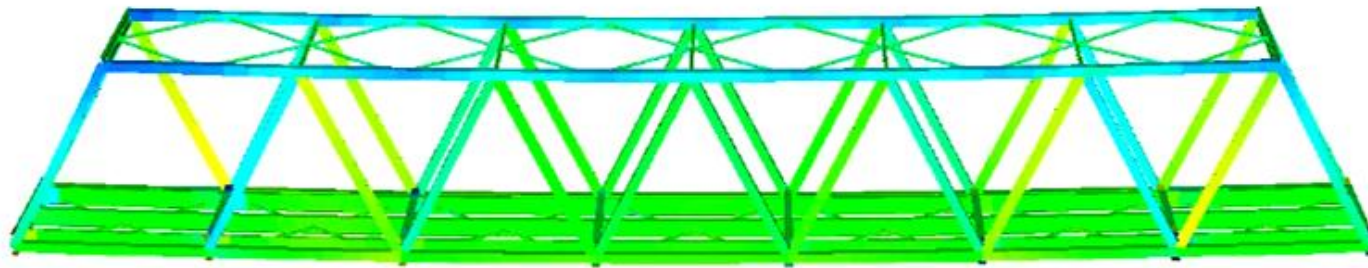
⇒ 詳細モデル

3 RC床版を弾塑性体とした衝撃係数



衝撃係数 $I = 1.37$ (URS $I = 1.854$)

軸方向応力分布



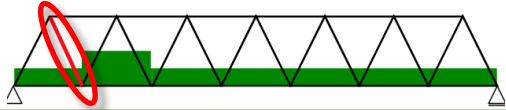
破断周辺部材の上弦材，下弦材，反対側斜材では
降伏応力235MPaを大きく上回る

時間経過

一次モードで弾性振動，静的つり合い位置へ



どの部材がどれほど損傷？相当塑性ひずみ分布へ

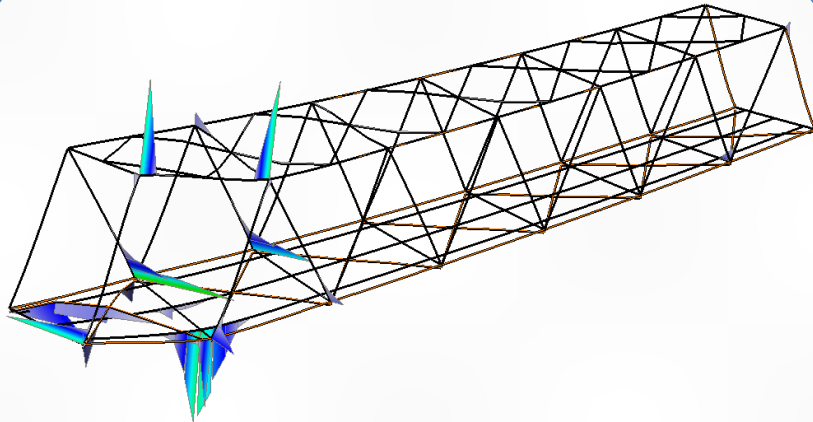


衝撃係数 $I = 1.37$

(URS $I = 1.854$)

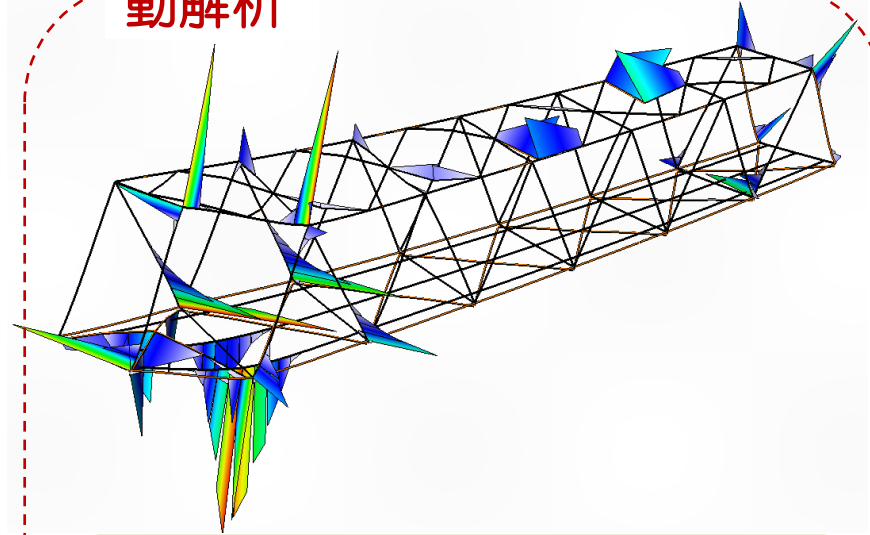
相当塑性ひずみ分布 $D+f_{静}(=1.1) \times L$ 载荷

静解析



終局：反対側斜材

動解析



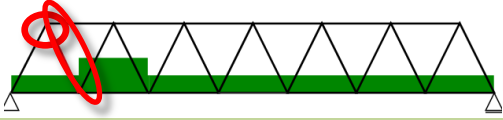
終局：上弦材, 下弦材,
反対側斜材



- 大きな曲げが作用し塑性ヒンジがいくつも形成
- 広範囲に塑性化

○ 静解析だけでは予測できない終局状態となる

J2
終局



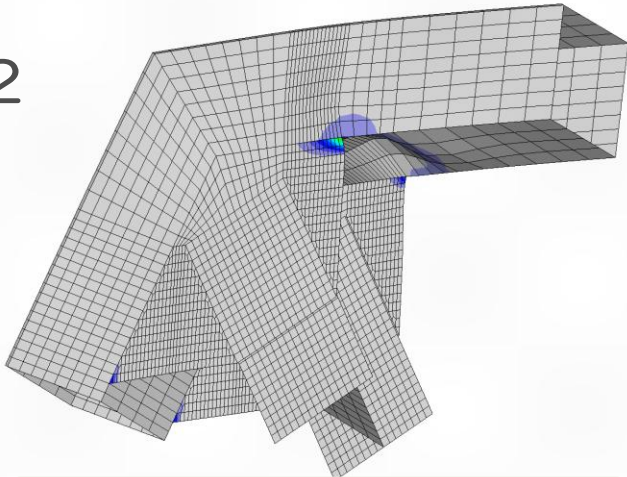
衝撃係数 $I = 1.27$

(URS $I = 1.854$)

相当塑性ひずみ分布 格点部 $D+f_{静}(=0.58) \times L$ 載荷

静解析

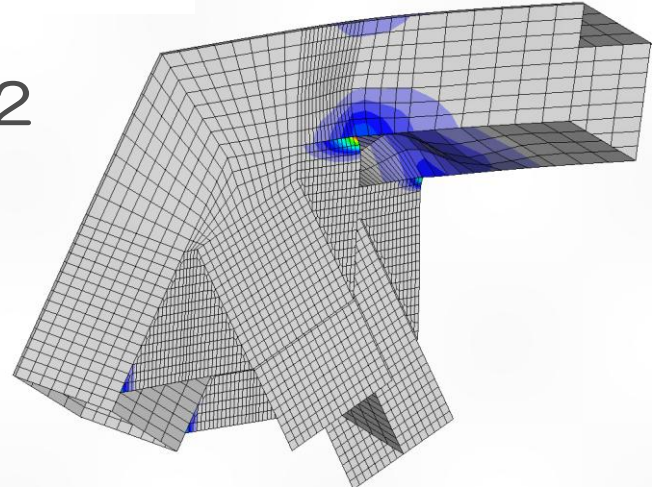
J2



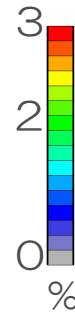
曲げにより
局部座屈し、終局

動解析

J2



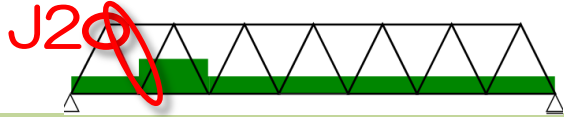
曲げが増大し
上フランジまで塑性化



- 破断部材の格点部が変形することで、動的効果によって増大した曲げを受け持ち、大きく損傷を受けた



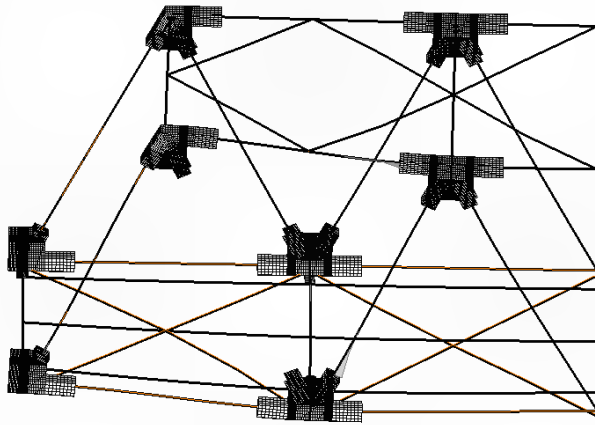
格点部以外のトラス部材はどのような動的効果を受けたのか



衝撃係数 $I = 1.27$ (URS $I = 1.854$)

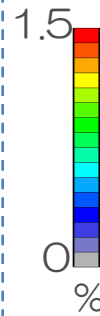
相当塑性ひずみ分布 トラス部材 $D+f_{静}(=0.58) \times L$ 載荷

静解析

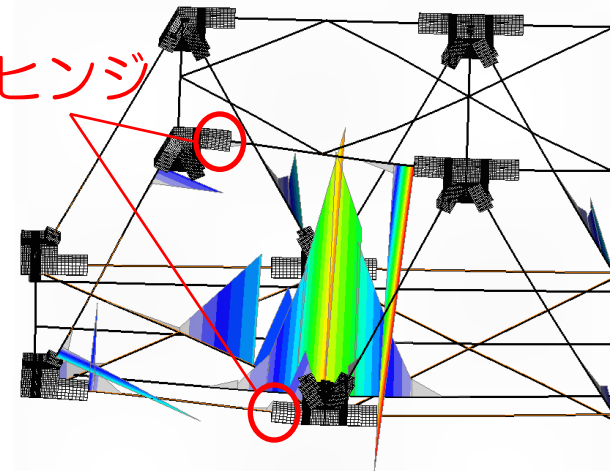


トラス部材は、弾性域

動解析



塑性ヒンジ



動的効果による曲げが伝達

- トラス部材にも大きな相当塑性ひずみが発生した
- 格点部が塑性ヒンジ → トラス部材には曲げは作用していない

- 格点部が健全ならば、その隣接するトラス部材も終局状態となることがわかった

解析結果

1 斜材破断時の衝撃係数

⇒ 骨組モデル

⇒ 詳細モデル

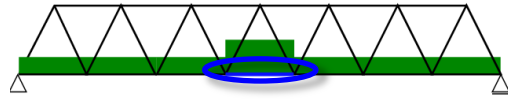
2 下弦材破断時の衝撃係数

⇒ 骨組モデル

⇒ 詳細モデル

3 RC床版を弾塑性体とした衝撃係数

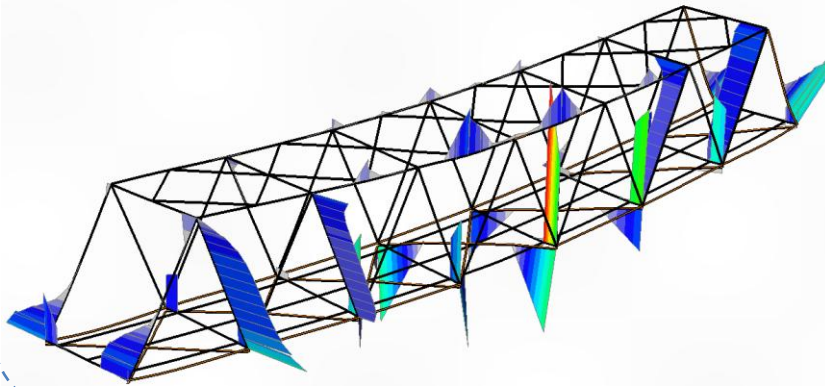
下弦材破断時 骨組モデルの衝撃係数 10/13



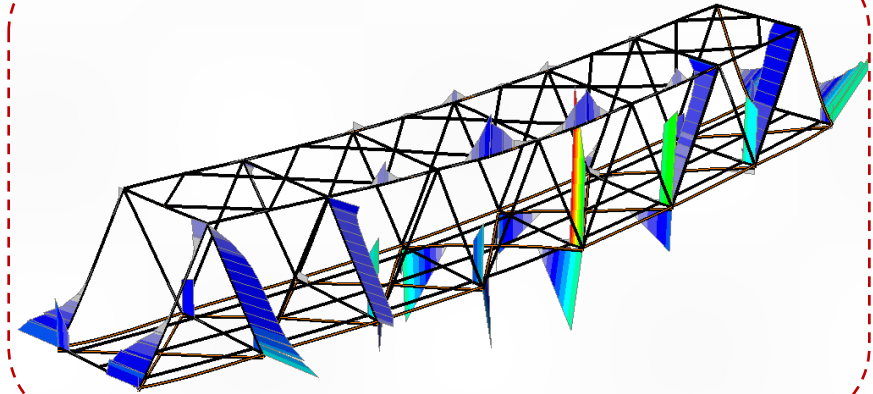
衝撃係数 $I = 1.03$ とても小さい! (URS $I = 1.854$)

相当塑性ひずみ分布 $D+f_{静}(=4.0) \times L$ 載荷

静解析

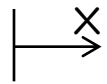


動解析

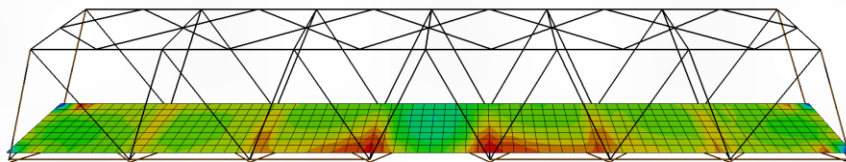


● 横桁が鉛直軸周りの曲げで終局 & 動的効果がみられない

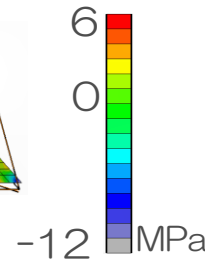
荷重伝達能力の大きな床版が主に下弦材軸力を受け持った



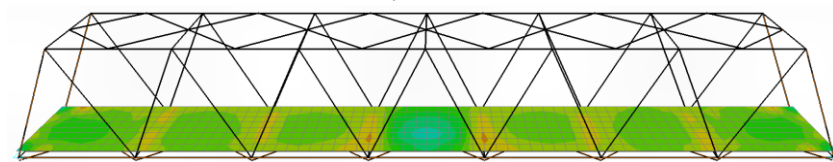
【破断時】



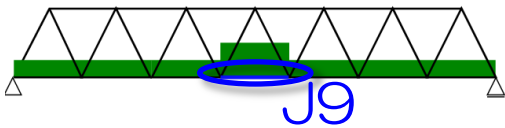
σ_{xx} 分布



【健全時】



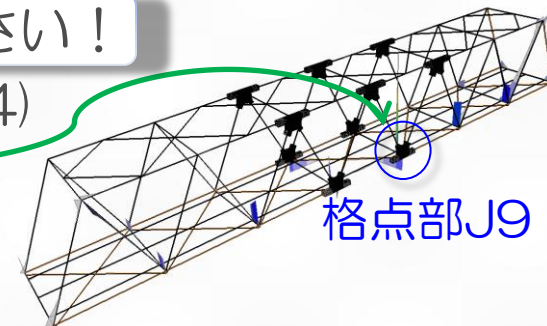
○ 下弦材破断時の衝撃は無視できるほど小さい



衝撃係数 $I = 1.03$ とても小さい!

(URS $I = 1.854$)

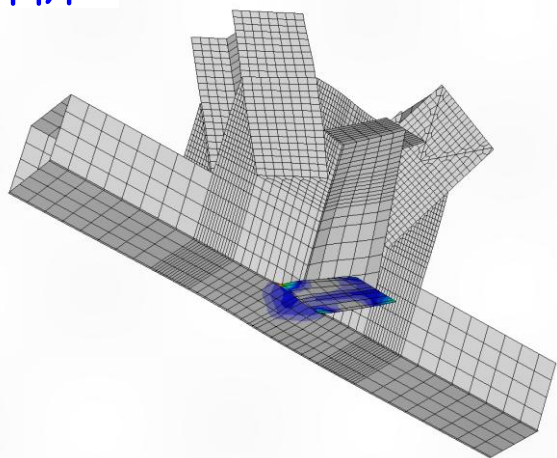
終局した部材：骨組モデルと同様の横桁
その横桁に接続された格点部J9の損傷は？



相当塑性ひずみ分布 格点部J9 $D+f_{静}(=3.80) \times L$ 载荷

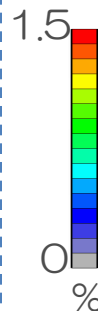
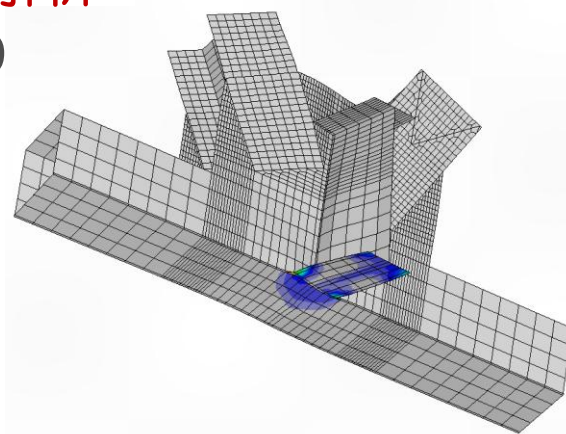
静解析

J9



動解析

J9



● 連結する格点部J9は、静的非線形解析とほぼ一致



骨組モデル同様に、格点部の変形を考慮しても
荷重を再分配する経路として床版が機能していたことが要因

解析結果

1 斜材破断時の衝撃係数

⇒ 骨組モデル

⇒ 詳細モデル

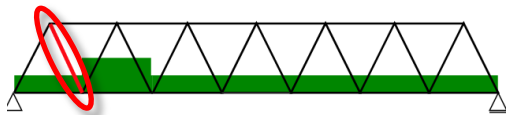
2 下弦材破断時の衝撃係数

⇒ 骨組モデル

⇒ 詳細モデル

3 RC床版を弾塑性体とした衝撃係数

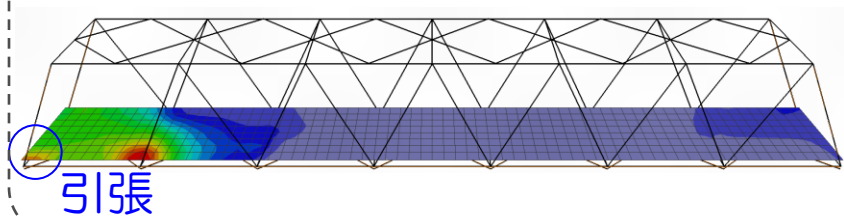
床版を弾塑性体としたときの衝撃係数 12/13



弾塑性性： Drucker-Pragerの降伏条件
粘着力12.58MPa, 摩擦角10°

RC床版 相当応力分布 (斜材破断 $f_{静} = 1.1$)

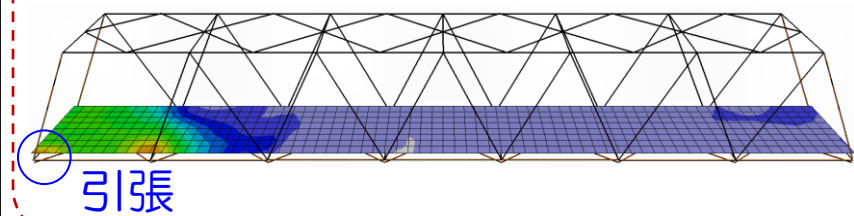
【床版：弾性】



30



【床版：弾塑性性】



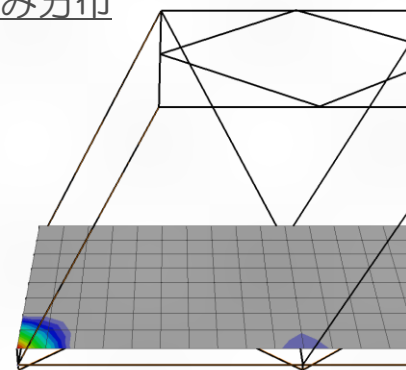
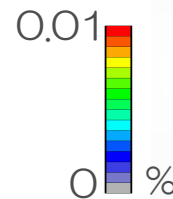
- 弾性体では荷重を過度に負担
- 引張応力 > 3MPa 床版はひび割れ損傷

鋼材には全く影響なし

衝撃係数！

どちらも1.37 一致！！

相当塑性ひずみ分布



損傷後も、床版は荷重を伝達 & 床版の損傷は動的効果に影響を与えない

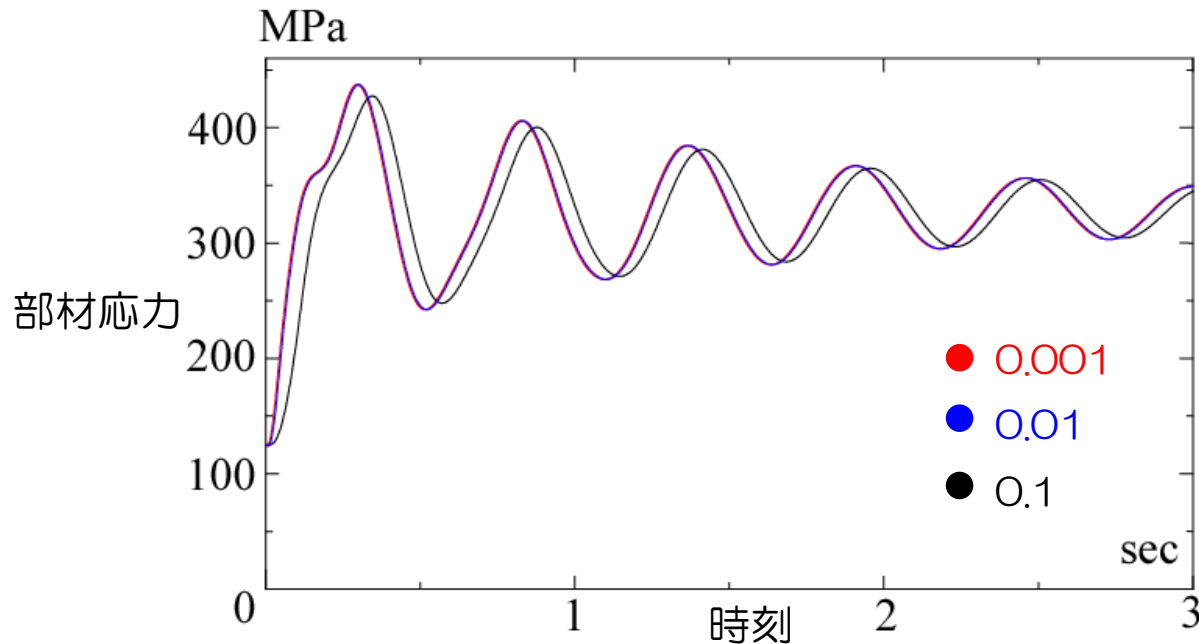
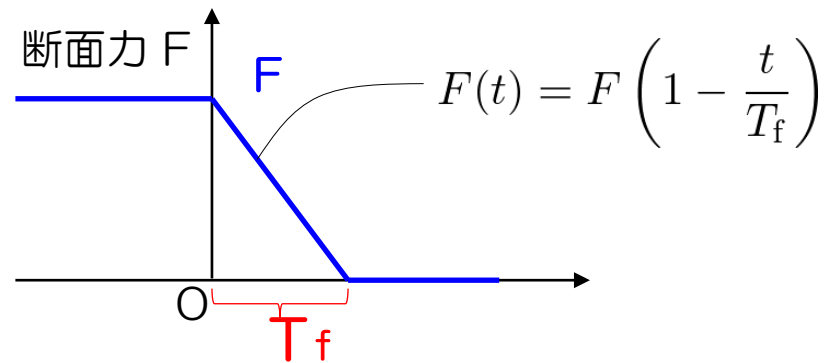
本研究で算出した衝撃係数 α のまとめ



	骨組モデル	詳細モデル
斜材破断	1.37	1.27
下弦材破断	1.03	1.03

- 本研究で、幾何学的大体および材料非線形性を考慮した部材破断時の新たな衝撃係数を提案した。
- 破断する部材に応じて、その動的効果は異なる。破断しても、荷重分配経路が機能すれば衝撃は小さいため。
- RC床版の損傷が比較的小さい場合（ひび割れ等）、それが衝撃におよぼす影響は無視できるほど小さい。

- 破断時間 T_f の検証
- 破断時間 T_f を変更して線形解析



計算時間+
結果の読み込み時間

3日以上

2日程度

10時間

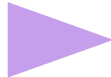


0.01 を採用した。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F$$

Rayleigh減衰 $C = \alpha M + \beta K$

i番目の固有モードにおける、減衰比と角振動数、 α と β の関係は


$$\zeta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right)$$

本研究では、一次と二次の固有モードを抽出。
よって、 α と β は以下のように決定できる。

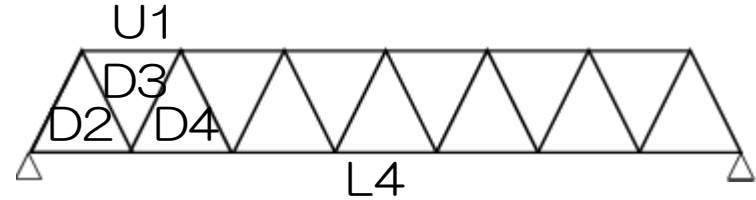
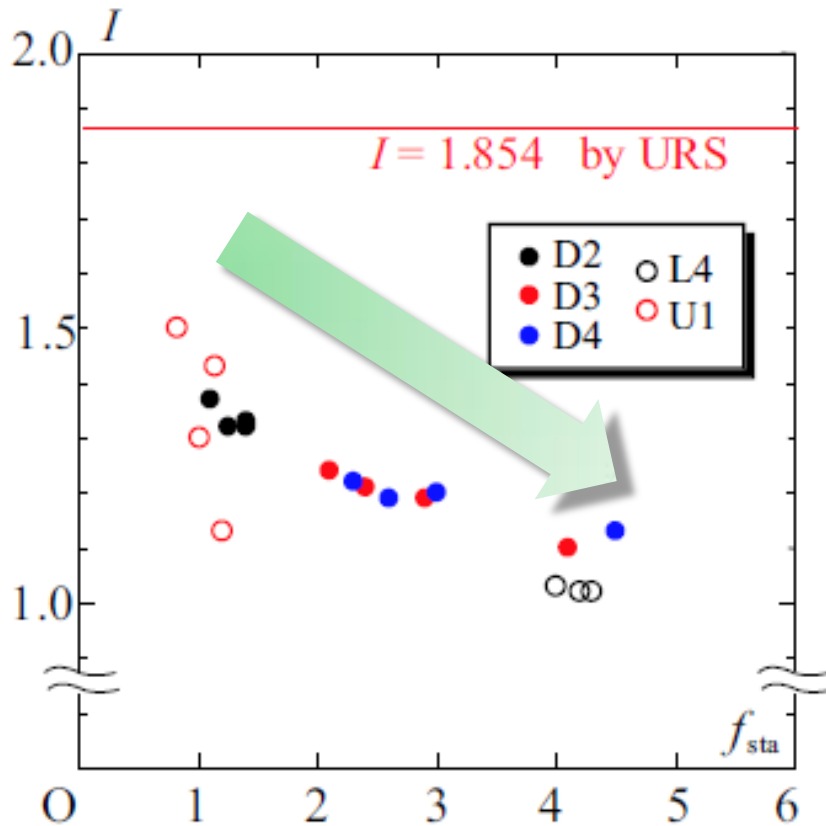
$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\zeta_1\omega_2 - \zeta_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

$$\beta = \frac{2(\zeta_2\omega_2 - \zeta_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

衝撃係数と静的終局荷重の関係

【骨組モデル】

4つの载荷パターン 20ケース



提案する衝撃係数

- 斜材D2 → 1.4
- 斜材D3&D4 → 1.2
- 上弦材U1 → 1.5
- 下弦材L4 → 1.0 (衝撃なし)