

名城大学ARCSECワークショップ 2010年5月14日

震源断層近傍における 鋼トラス橋の応答特性および進行性破壊

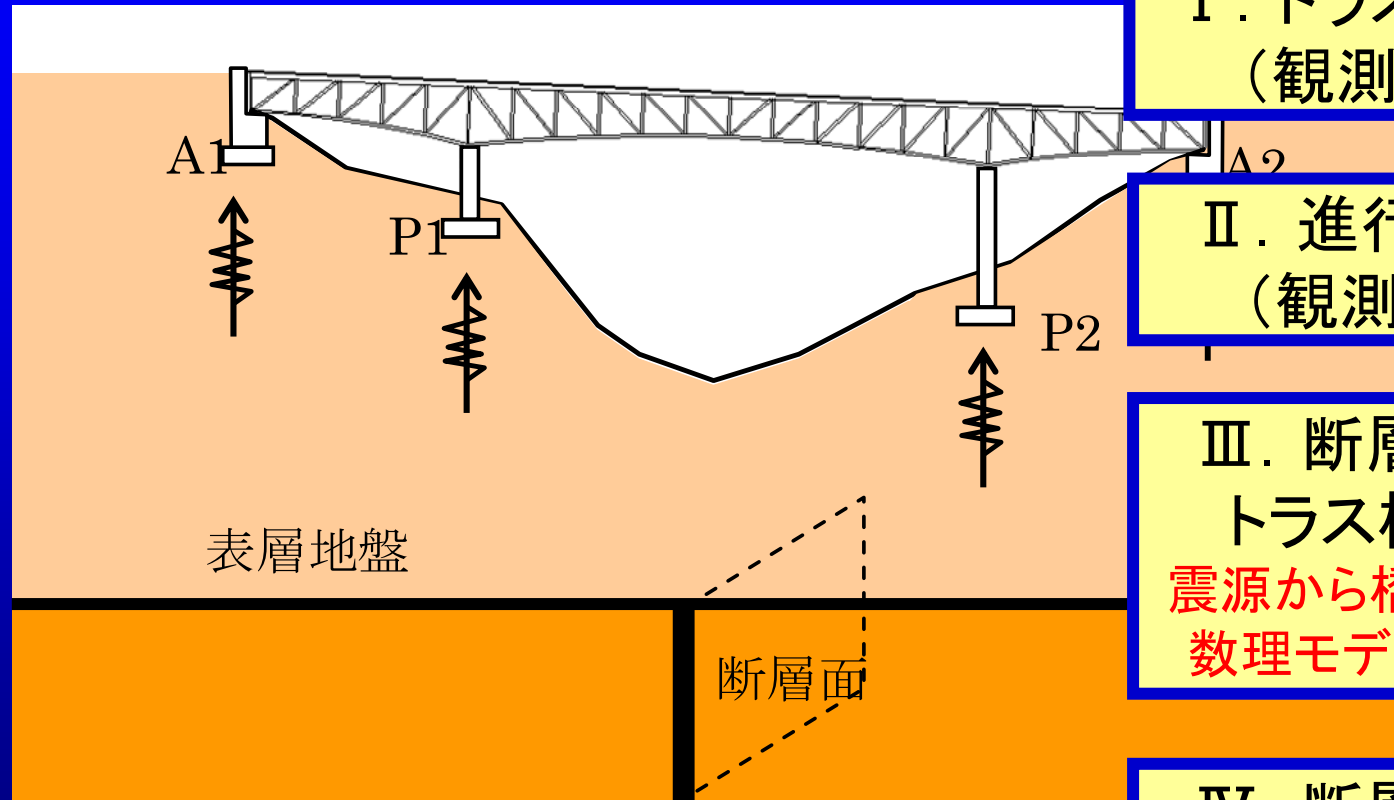
(株)地震工学研究開発センター 野中 哲也

研究課題 1 : 制震構造化等による土木・建築構造物 の新しい耐震性向上策/耐震補強法の開発

サブテーマ

- 1-1) 高機能制震ダンパーの開発研究.
- 1-2) 鋼構造物の低サイクル疲労による破壊現象の解明と照査法の開発.
- 1-3) 広域的な地震応答解析による鋼橋の耐震安全性照査システムの開発.
- 1-4) 大空間構造物の耐震安全性向上策および照査法の開発.
- 1-5) 膨張コンクリートと補強シートの併用によるRC部材の耐震補強評価システムの開発.
- 1-6) 震動台およびハイブリッド（オンライン）地震応答実験により数値解析結果の妥当性を検証し，制震構造の設計法を確立する.

内容



I. トラス橋の応答特性
(観測波形を使用)

II. 進行性破壊を考慮
(観測波形を使用)

III. 断層近傍における
トラス橋の応答特性
震源から橋梁までの一貫した
数理モデルによる応答解析

IV. 断層近傍における
トラス橋の応答特性
(進行性破壊を考慮)

I. トラス橋の応答特性 (観測波形を使用)

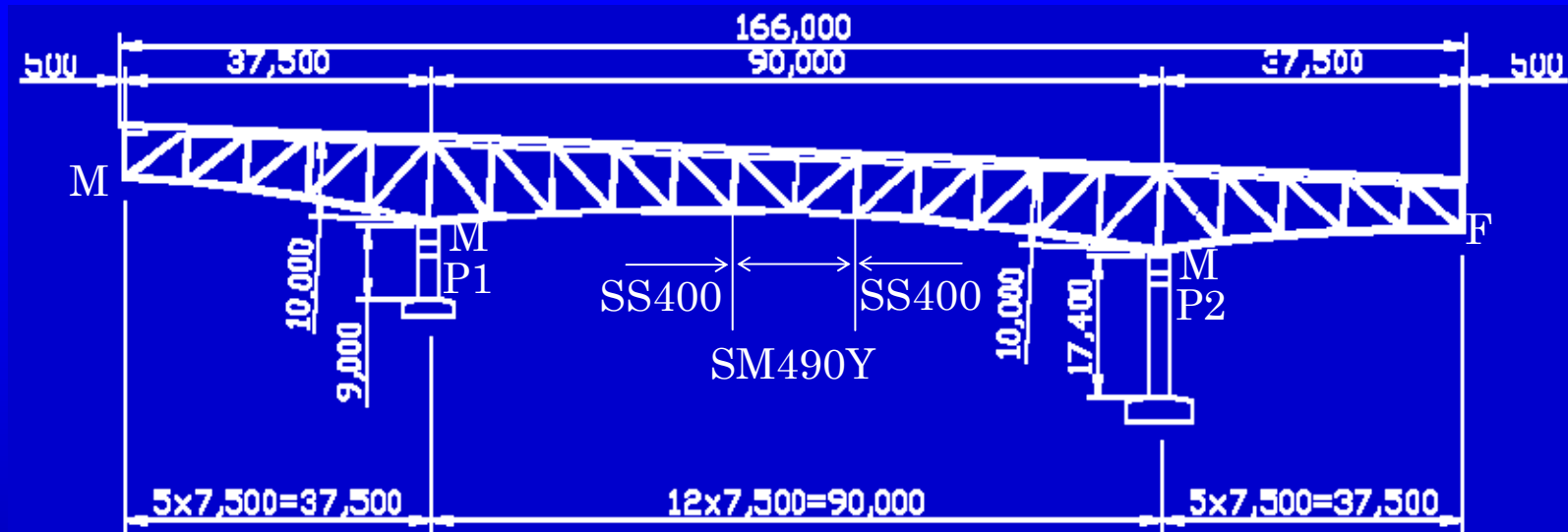
■上路式鋼トラス橋の特性

- 上部構造のほとんどの重量を占める床版の重心位置がトラス桁より上方へ離れている。
- 橋軸直角方向に地震動を作用させたときに、支点近辺に上揚力が発生し、橋梁全体がねじれる挙動を示す。



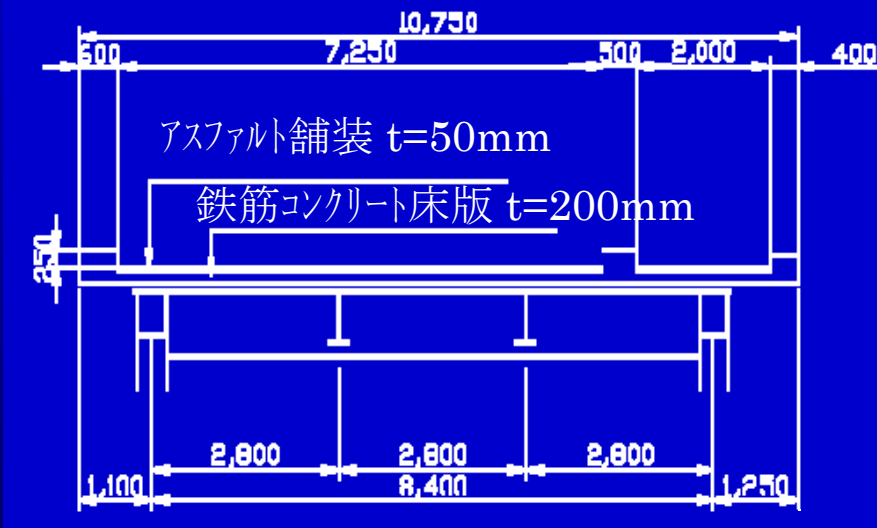
鋼トラス橋

■対象橋梁



側面図

(単位 : mm)



断面図

(単位 : mm)

設計条件

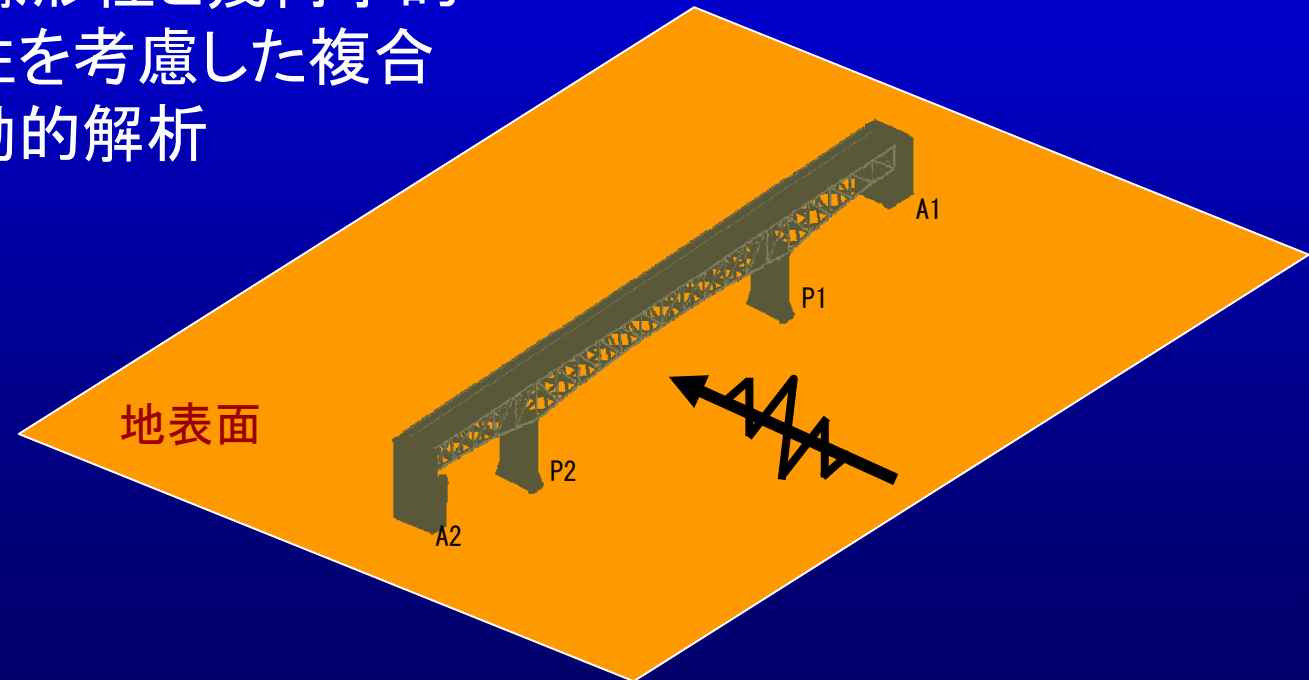
型式	三径間連続上路式トラス橋
橋長	166.0m
支間割	37.5m + 90.0m + 37.5m
全幅員	9.75m
地域別補正係数	0.85

■ 解析条件

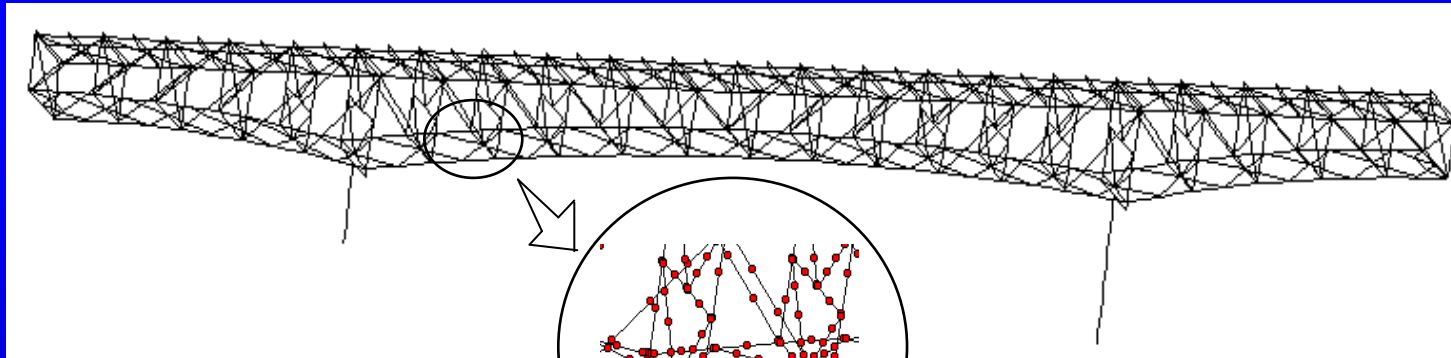
入力地震動: 兵庫県南部地震(M7.3)の神戸海洋の観測波形
(JMAのNS成分)

地震動の作用方向: 橋軸直角方向

解析法: 材料非線形性と幾何学的
非線形性を考慮した複合
非線形動的解析

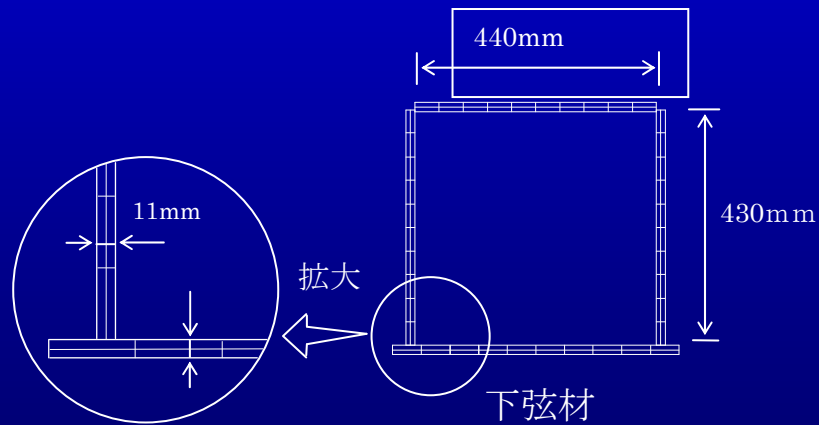


■ 解析モデル

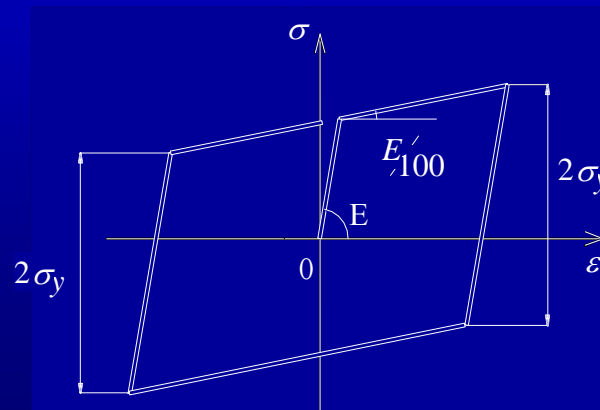


3次元骨組モデル

節点数 : 1670
部材数 : 2180

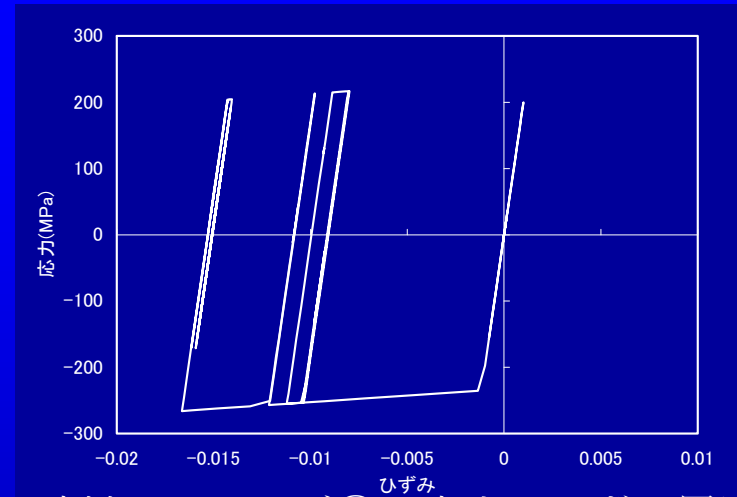
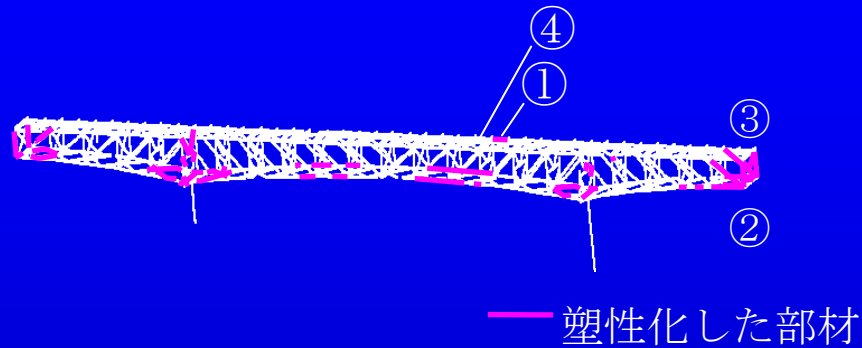


下弦材の代表的な断面のファイバー要素分割

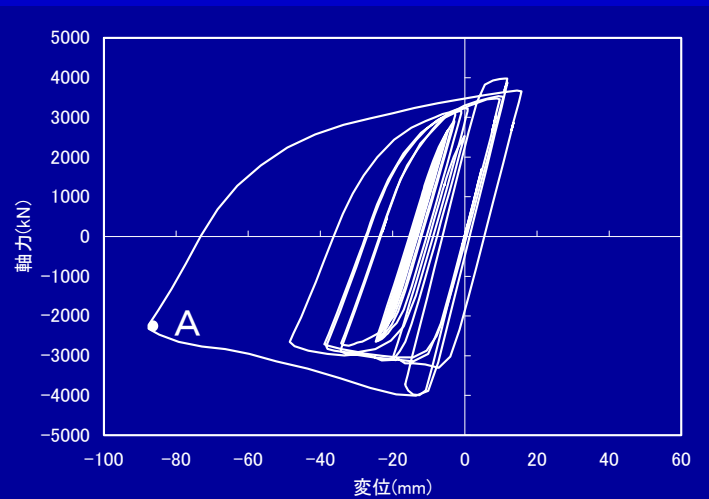


鋼材の材料構成則

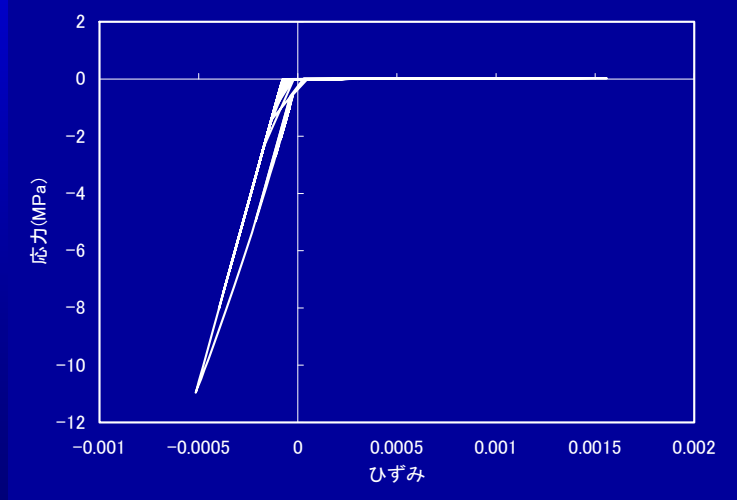
■ 観測波形による橋軸直角方向の応答



下弦材下フランジ②の応力-ひずみ履歴

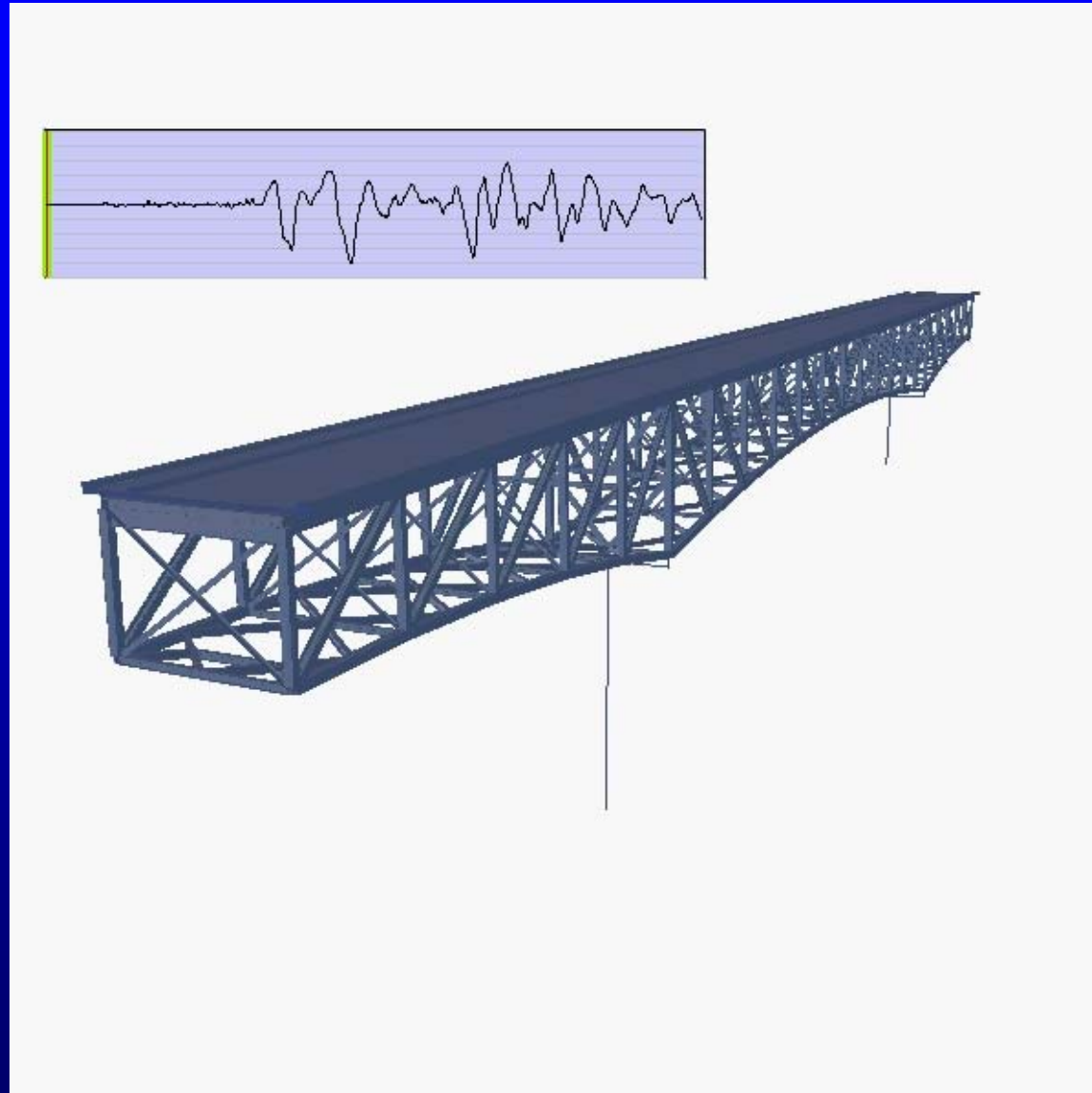


斜材③の軸力-変位履歴



床版コンクリート④の応力-ひずみ履歴

変形アニメーション(変形表示倍率:5倍)



Ⅱ. 進行性破壊を考慮 (観測波形を使用)

■背景

●耐震検討や耐震補強において、損傷箇所や程度だけでなく、損傷順番も重要。

→そのため、入力地震動を徐々に大きくして、数回の解析で損傷の順番を予測する方法が一般的？

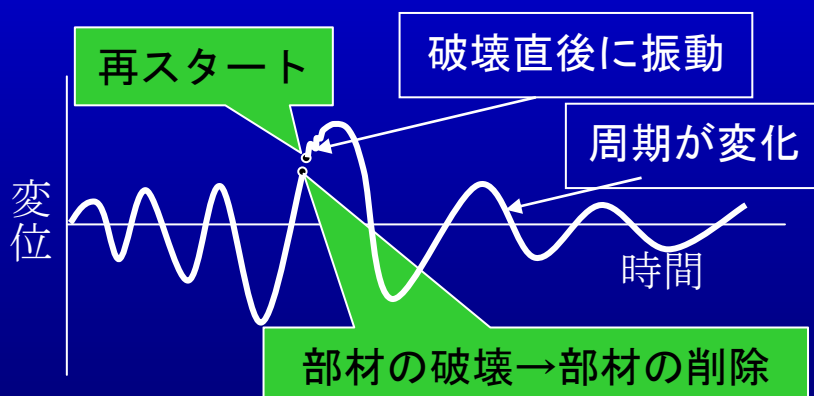
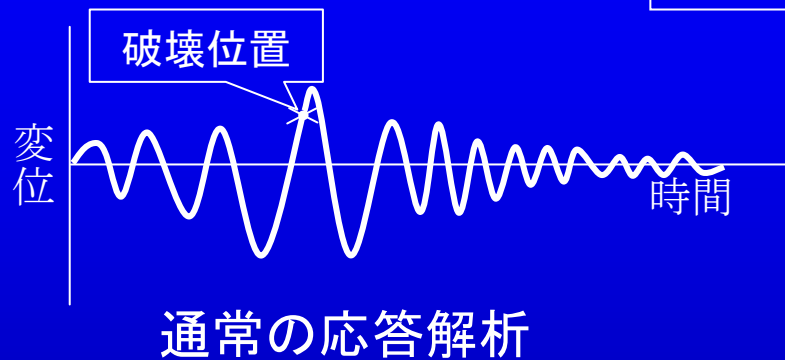
●想定外の大規模地震が発生したときに、橋梁の崩壊や崩壊に至るまでの破壊メカニズムを求める必要がある。

●ミネソタ州ミネアポリスのトラス橋の崩壊事故など

●これまでの耐震設計や研究では、構成部材の破壊で、構造全体の破壊としている。

すなわち「部材の破壊＝構造全体の破壊」

応答履歴の比較 (イメージ)

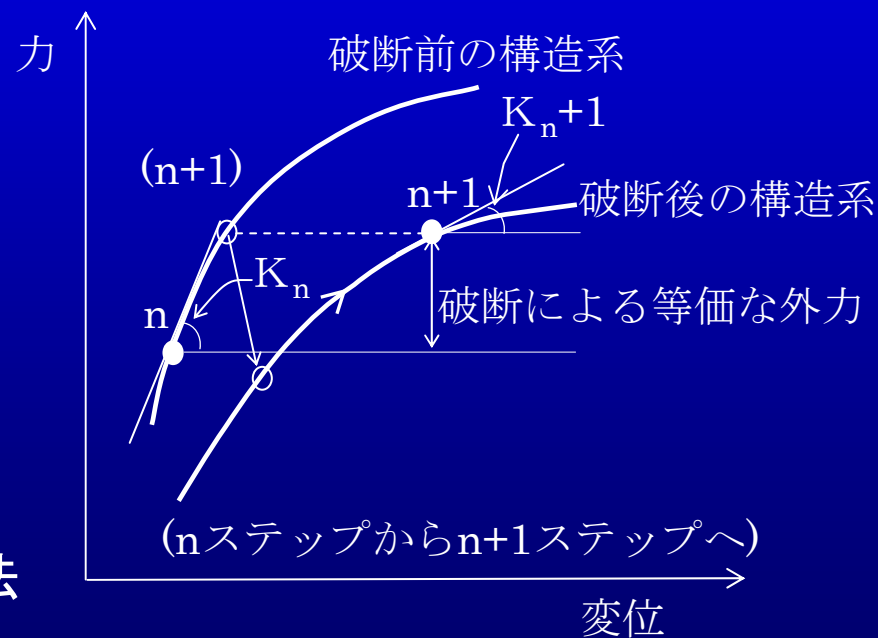


破壊を考慮した応答解析および処理方法

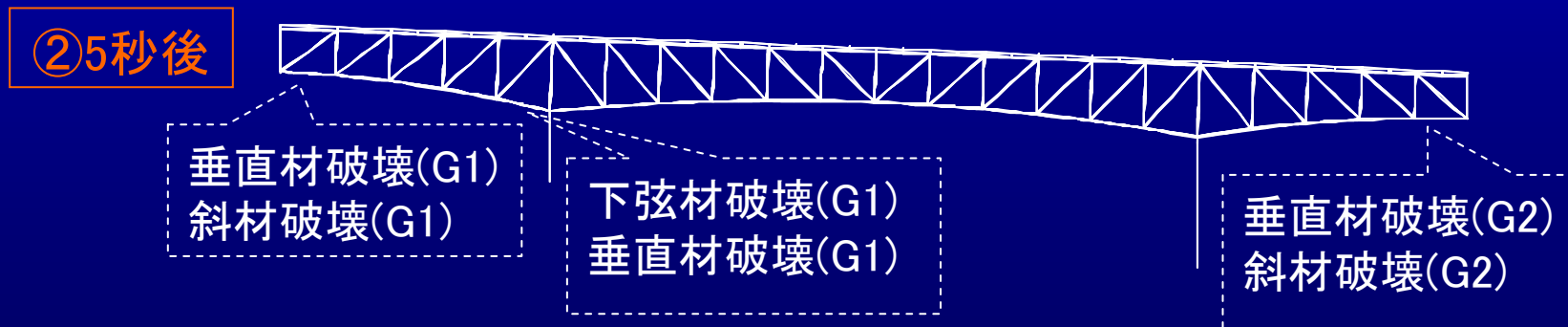
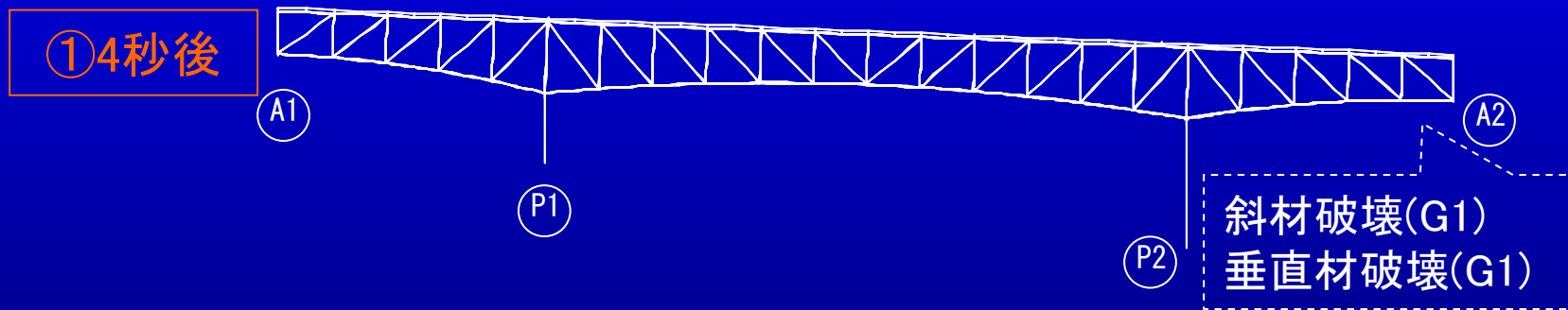
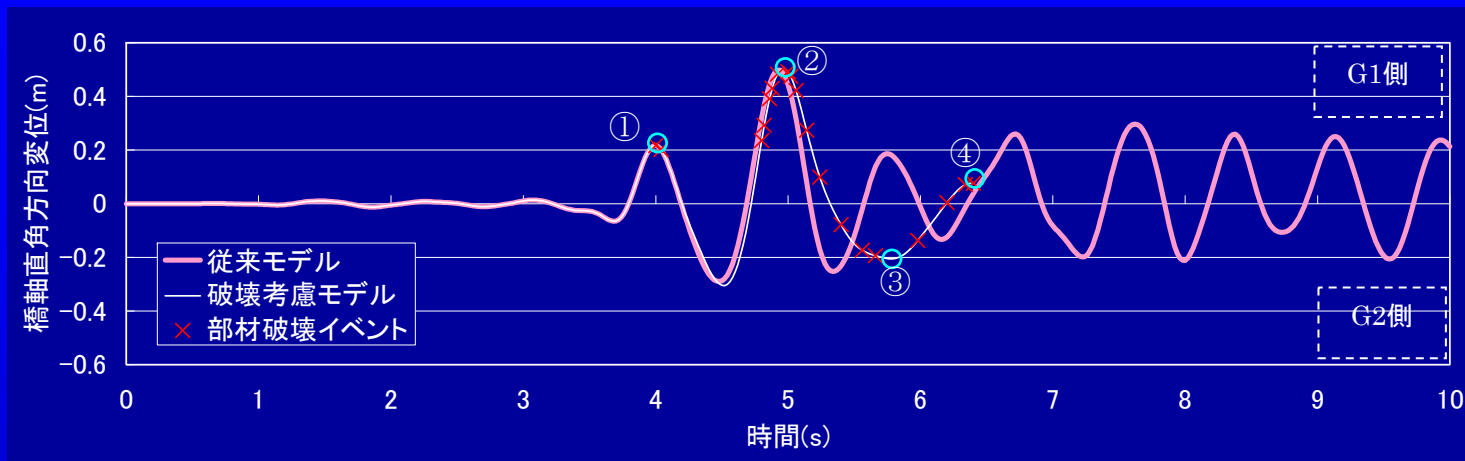
破壊を考慮した解析とは、

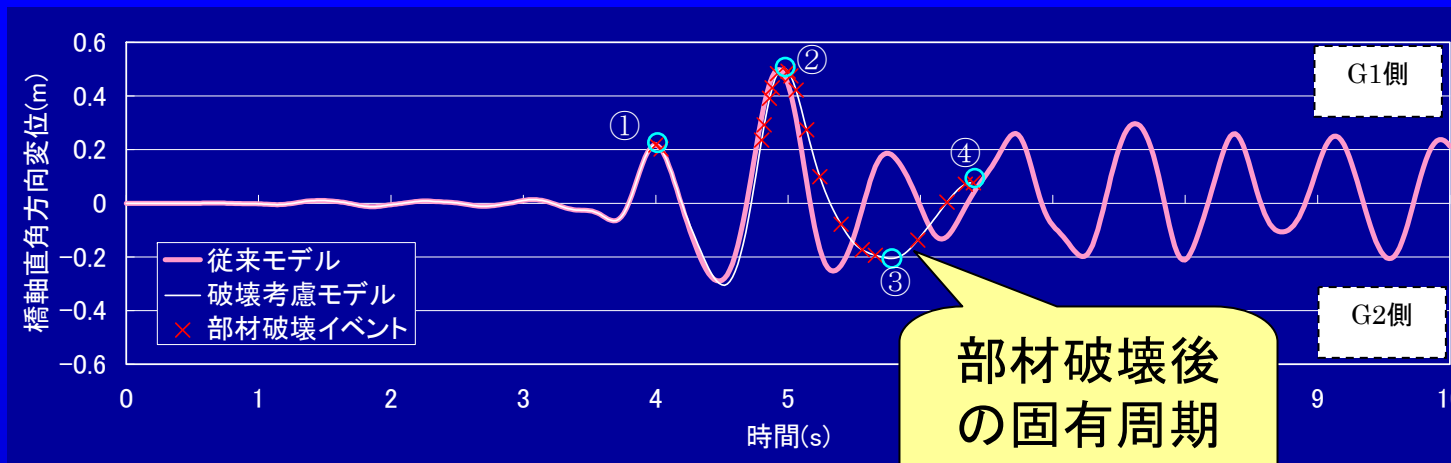
- 部材破壊後に固有周期が変化
- 部材破壊後に発生する衝撃的な荷重

部材破断による 構造系の変化(イメージ)



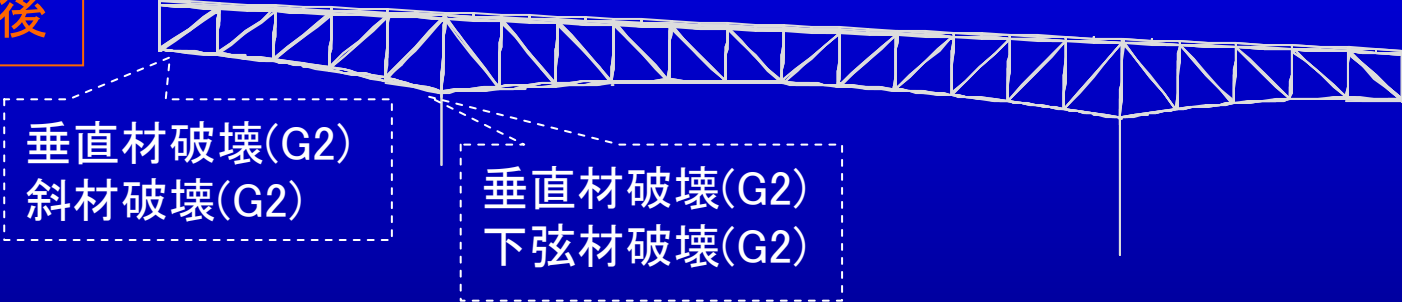
本橋梁の応答解析結果（従来法との比較）



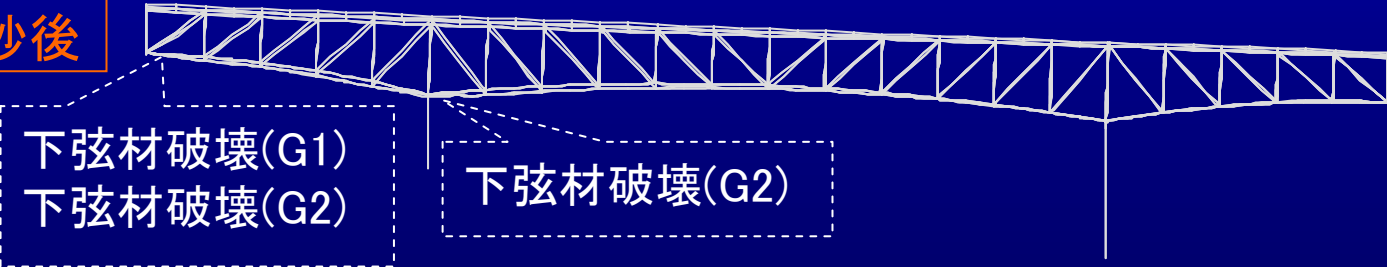


部材破壊後の固有周期の変化

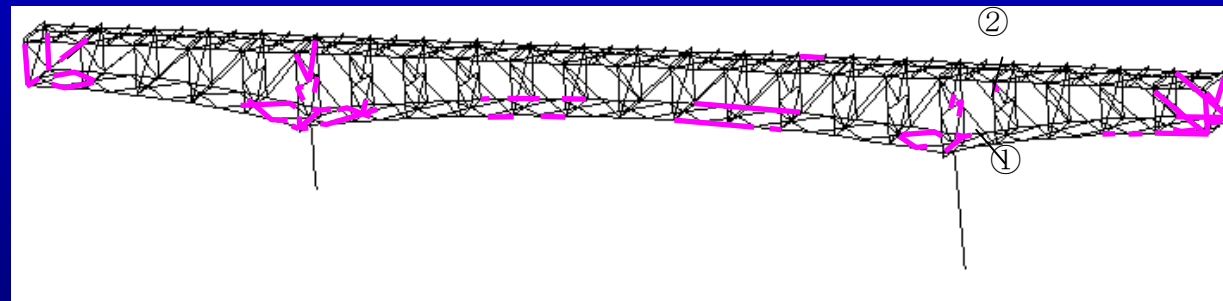
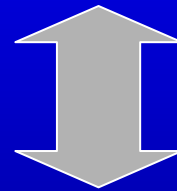
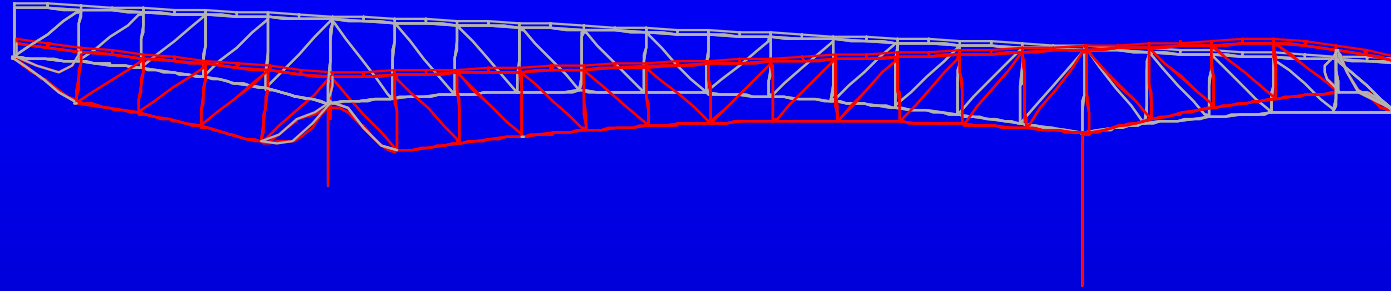
③6秒後



④6.5秒後



本解析の崩壊形状（変形表示倍率：1倍）



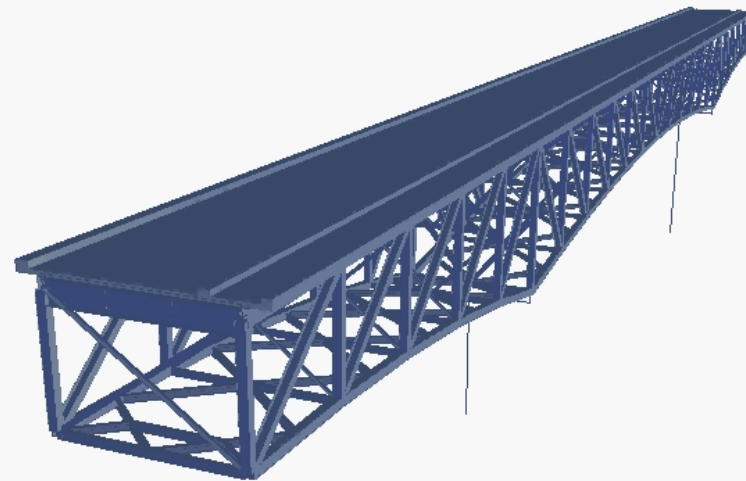
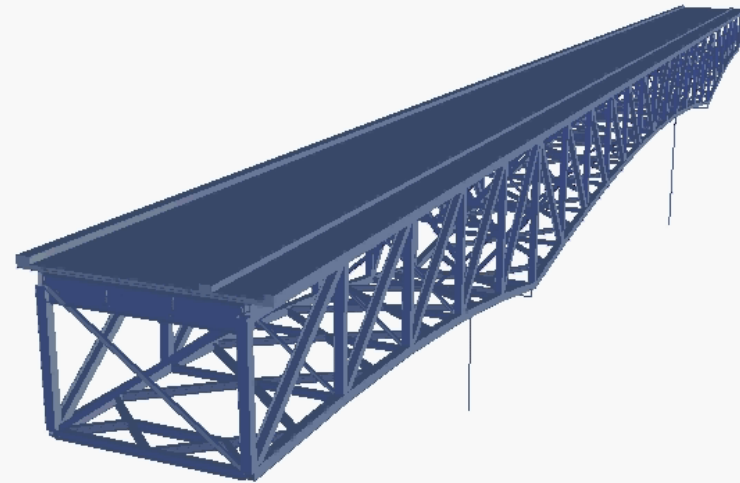
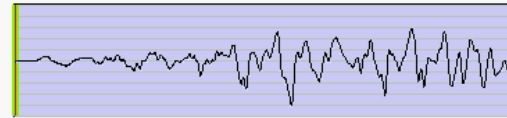
— 塑性化した部材

通常の応答解析

変形アニメーション (変形表示倍率:5倍)

通常の動的解析
(従来法)

進行性破壊を考慮
した動的解析)



Ⅲ. 断層近傍における トラス橋の応答特性

**震源から橋梁までの一貫した
数理モデルによる応答解析**

■背景

近年、大地震時の断層変位による橋梁等の被害が報告され、断層変位が橋梁に与える影響等に関する研究が進められている。

通常の実務や研究：観測記録波形をもとに耐震検討を実施。しかし、直下型地震の記録は、海洋型と比べ非常に少なく、限られた観測波形での検討となる。

→理論的方法を重視した研究の蓄積が不可欠

震源断層破壊—地盤応答—構造物応答という一連の物理現象を理論的に一貫して捉えて構造物の地震時挙動を解明することが重要。

■通常の解析法

通常耐震設計では、観測波形を振幅調整した波形をもって橋梁モデルに対して橋軸方向および橋軸直角方向別々に、位相差なし(一様加震)として作用させる動的解析を実施している。

入力は、標準波形の加速度波形データが一般的

■本提案の解析法

入力は

- シナリオ地震情報
- 対象橋梁と震源の位置関係

※入力波形ではない

入力

・震源断層から橋梁までのモデル(断層モデル+地盤モデル+橋梁モデルの一貫した解析モデル)

・橋梁モデルの橋脚、橋台下端に各地震動を作用させる**全体系解析**を実施

※本解析では、橋梁に対して方向を決め、入力波形を作用させていない。橋脚や橋台下端で求まって3成分の波形をそのまま作用していることになる。

本解析における地震動

●地震動の大きさ

土木学会「第三次提言」がレベル2地震として提案している伏在断層の場合の下限値M6.5とした。

●地震動の作用する条件(検討ケース)

山間部における典型的な横ずれ断層とし、もっとも簡単な地盤モデルとした。

検討ケースは、地震の規模を一定にして、地震動の特性を決定する要因の中で重要な対象橋梁と断層の位置関係および断層上端の深さに着目し、この2つのパラメータの組合せとした。

●地震動作成法

運動学的断層モデルと水平成層地盤の剛性マトリックス（剛性マトリックス法）により、断層永久変位を含む地震動波形を合成した。

この方法は、実際に発生した地震（1966年パークフィールド地震）の波形（世界で初めて断層直上での地震動が観測された地震で記録された波形）で検証されている理論的評価法である。

断層パラメータ (M6.5の横ずれ断層)

地震モーメント M_0	[N·m]	1.04×10^{18}
立ち上がり時間 t	[S]	0.4
断層の長 L	[Km]	10.1
断層の幅 W	[Km]	5.1
断層破壊速度 V_r	[Km/s]	2.52
断層の走行方向 ϕ	[°]	0.0
断層面の傾斜角 δ	[°]	90.0
すべり方向 λ	[°]	0.0

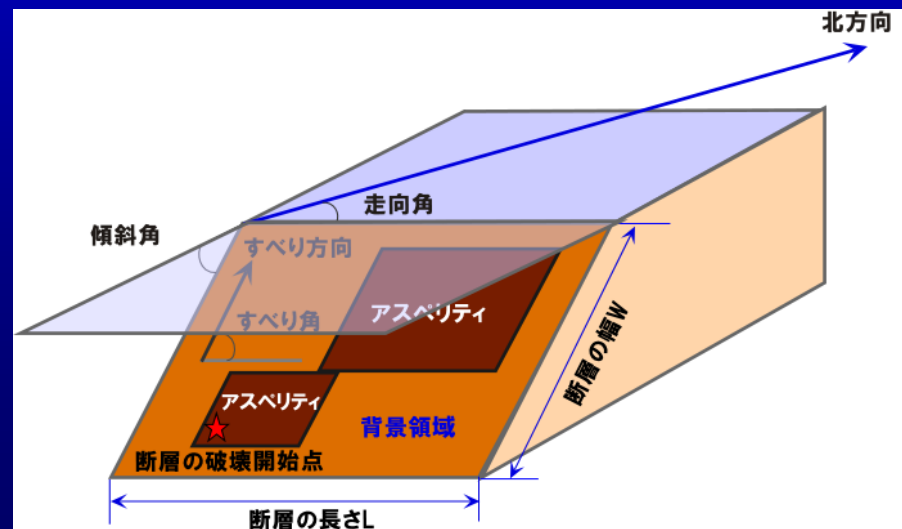
例えば、横ずれ断層から
逆断層へ変更する場合:

断層の走行方向 $\phi = 90^\circ$

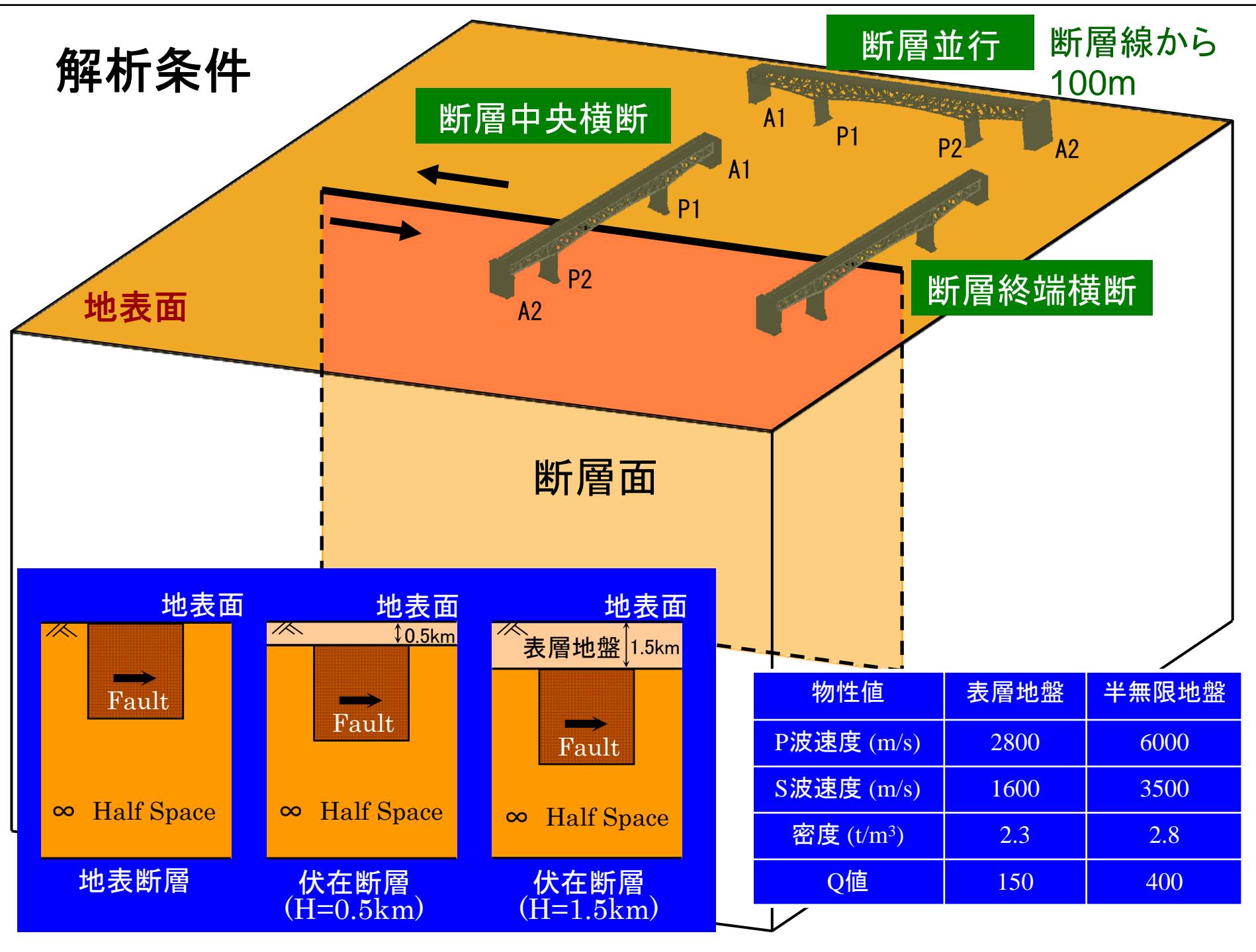
断層面の傾斜角 $\delta = 45^\circ$

すべり方向 $\lambda = 90^\circ$

入力の変更は、入力
波形データの変更で
はなく、断層パラメータ
の変更である。



解析条件



断層並行

断層線から
100m

断層中央横断

地表面

断層終端横断

断层面

地表面

地表面

地表面

Fault

Fault

Fault

∞ Half Space

∞ Half Space

∞ Half Space

地表断層

伏在断層
(H=0.5km)

伏在断層
(H=1.5km)

0.5km

表層地盤
1.5km

物性値

表層地盤

半無限地盤

P波速度 (m/s)

2800

6000

S波速度 (m/s)

1600

3500

密度 (t/m³)

2.3

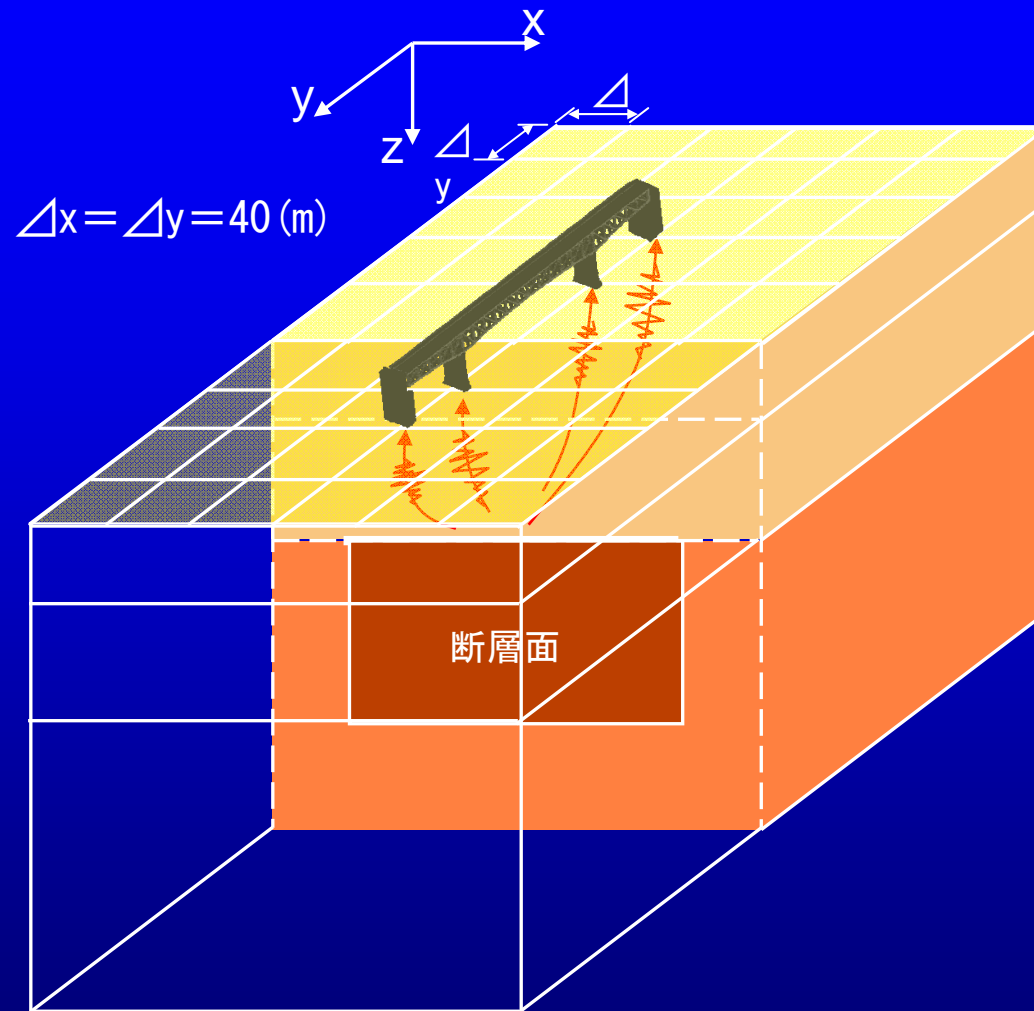
2.8

Q値

150

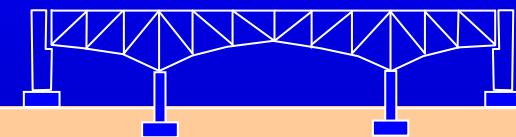
400

本解析のモデル化(イメージ)



T_s, T_g, T_b の値は？

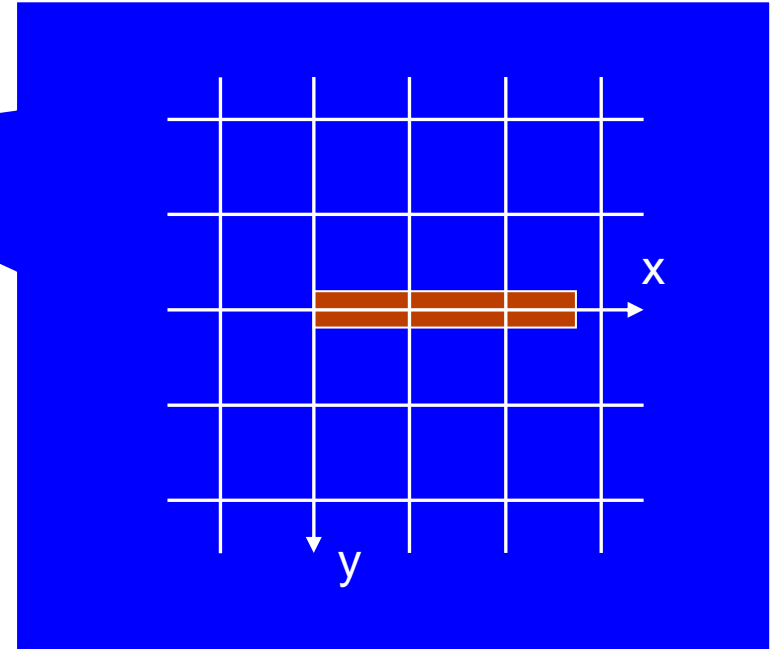
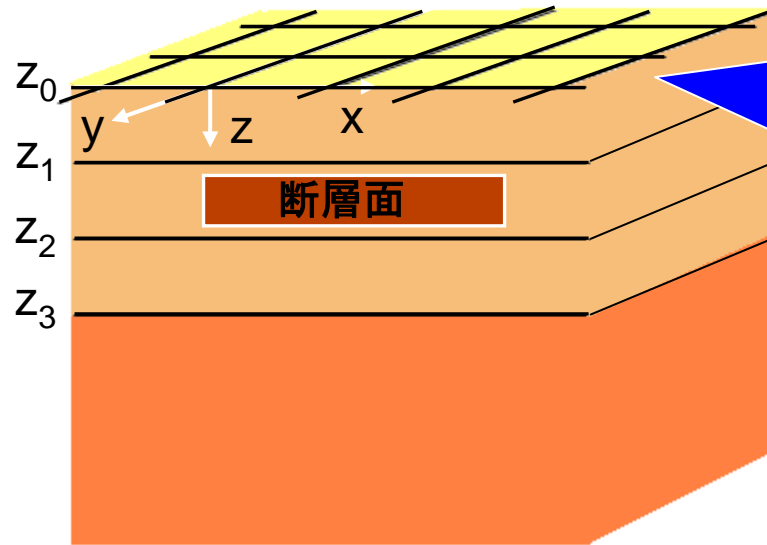
建造物の周期 T_b



表層地盤 (周期 T_g)

断層面
合成される波形
の周期 T_s

剛性マトリックス法



$$\begin{pmatrix} 0 \\ q_s(z_1) \\ q_s(z_2) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11}^{(1)} & K_{12}^{(1)} & 0 & 0 \\ K_{21}^{(1)} & K_{22}^{(1)} + K_{11}^{(2)} & K_{12}^{(2)} & 0 \\ 0 & K_{21}^{(2)} & K_{22}^{(2)} + K_{11}^{(3)} & K_{12}^{(3)} \\ 0 & 0 & K_{21}^{(3)} & K_{22}^{(3)} + K_{Half} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u(z_0) \\ u(z_1) \\ u(z_2) \\ u(z_3) \end{pmatrix}$$

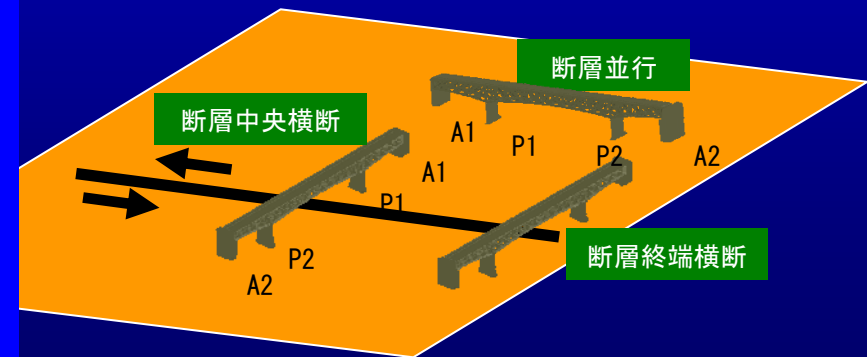
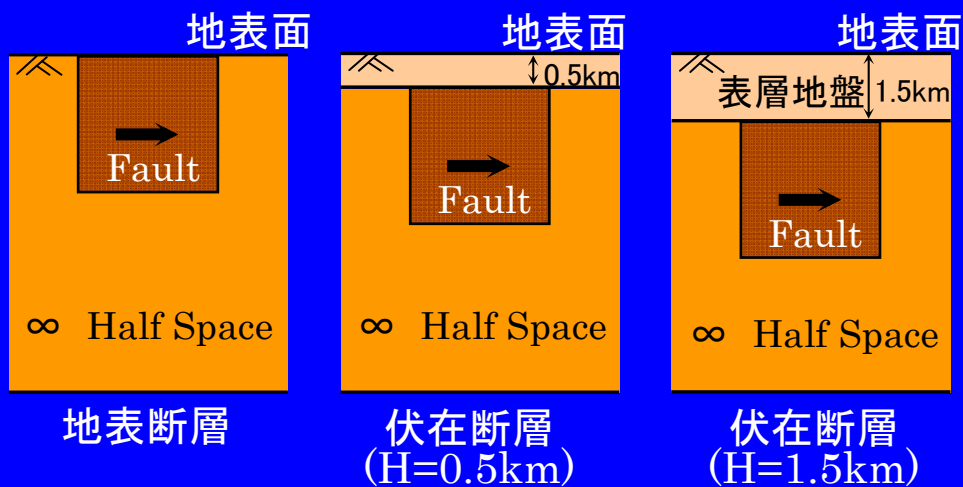
外力項(断層)

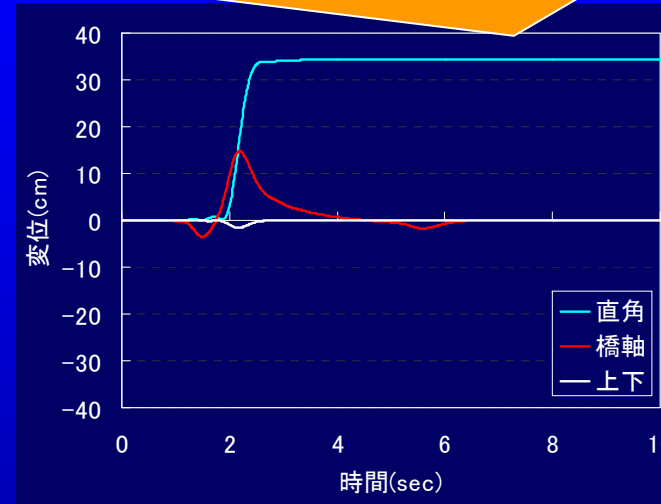
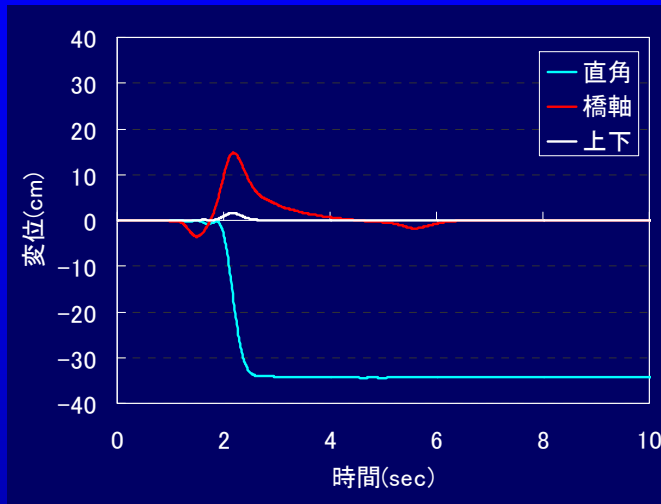
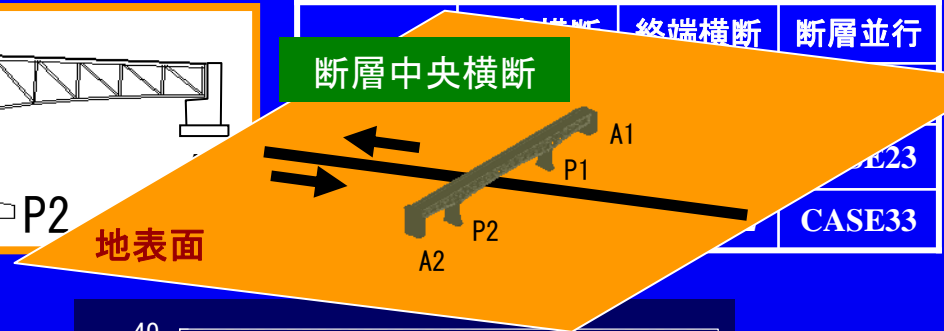
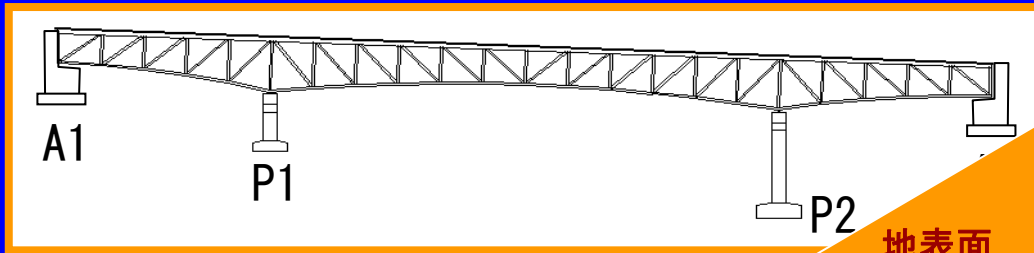
各層の地盤パラメータにより決まる

各層の変位

検討ケース一覧

	断層中央 横断①	断層終端 横断②	断層 並行③
地表断層	CASE11	CASE12	CASE13
伏在断層 (0.5km表層)	CASE21	CASE22	CASE23
伏在断層 (1.5km表層)	CASE31	CASE32	CASE33

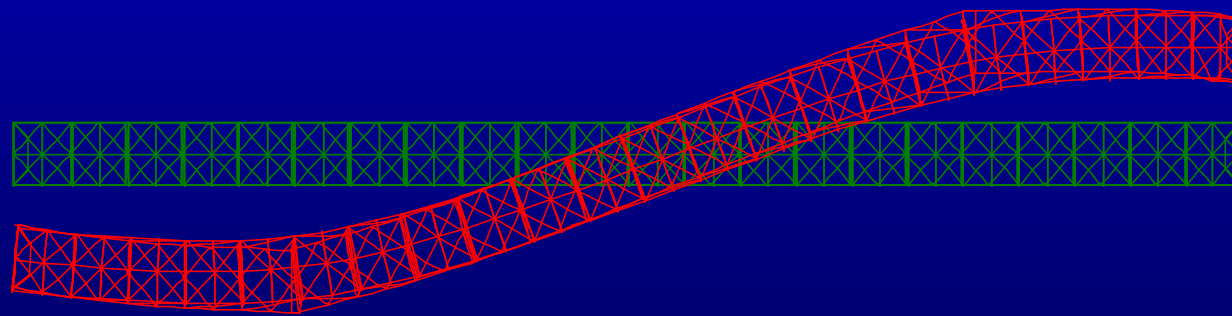




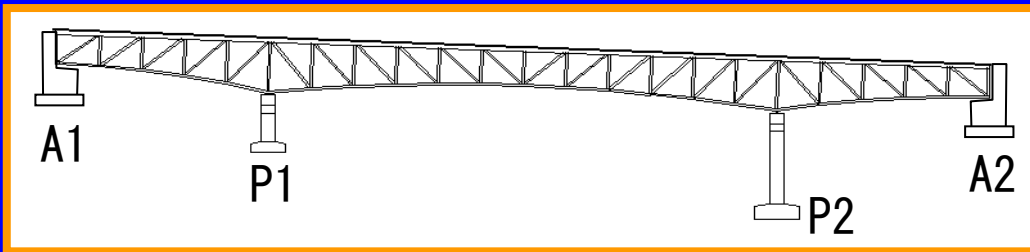
P1

地震動変位波形

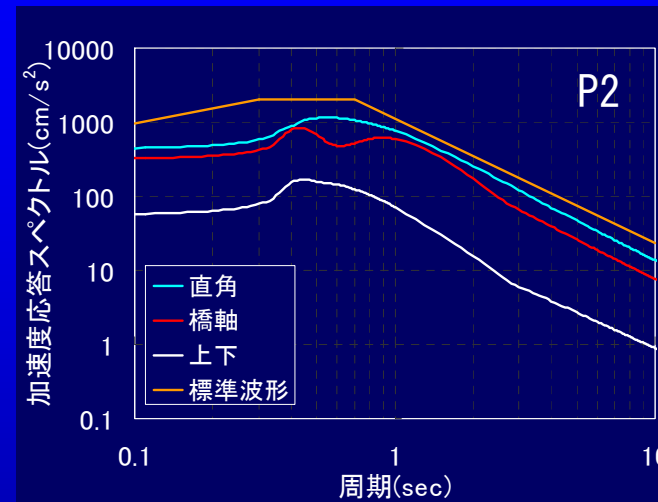
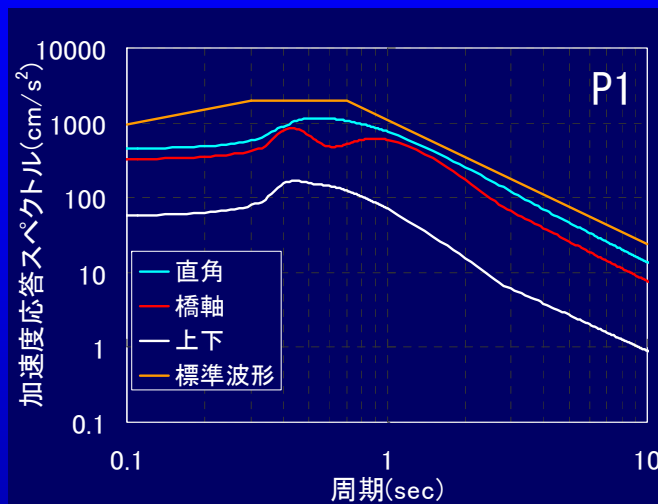
P2



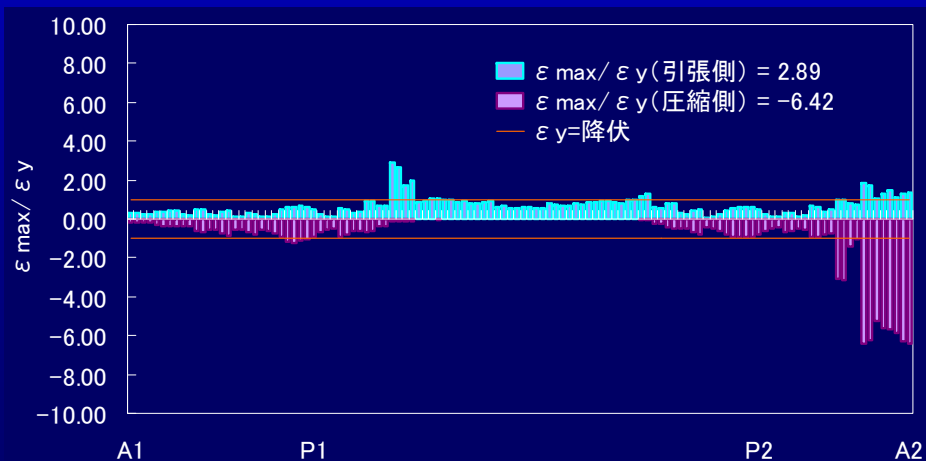
最大変位時の変形モード（表示変形倍率50倍）



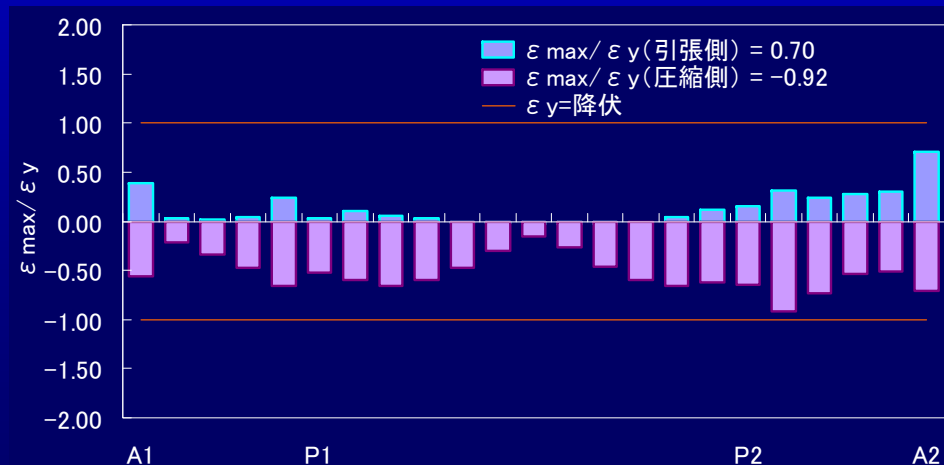
	中央横断	終端横断	断層並行
地表	CASE11	CASE12	CASE13
伏在0.5km	CASE21	CASE22	CASE23
伏在1.5km	CASE31	CASE32	CASE33



加速度応答スペクトル (5%減衰)



下弦材の最大ひずみ一覧



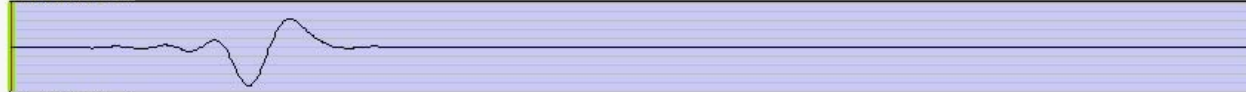
垂直材の最大ひずみ一覧

変形アニメーション(変形表示倍率:10倍)CASE11

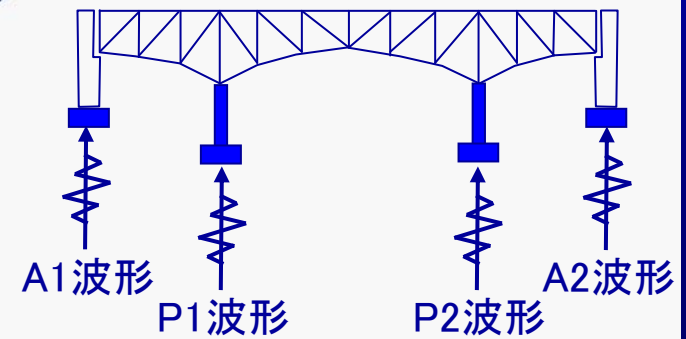
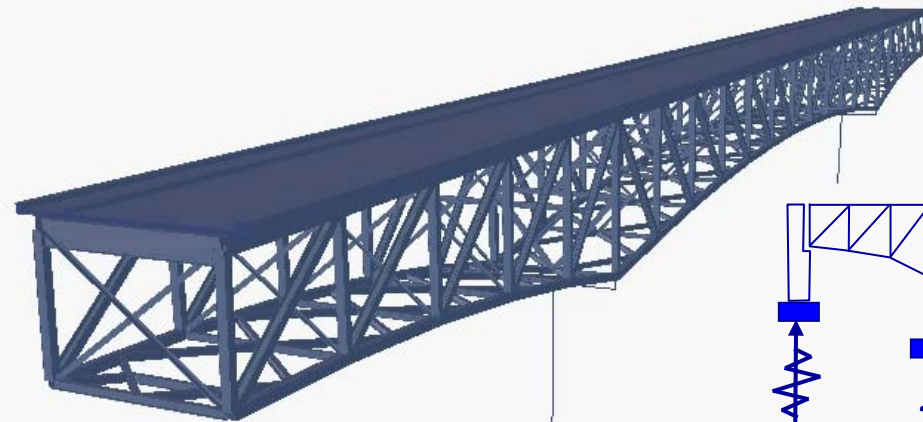
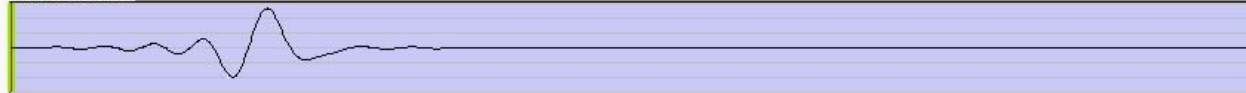
中央横断(LL)



中央横断(TT)

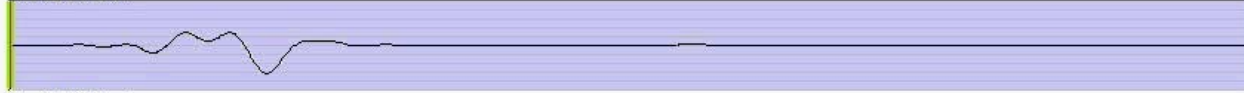


中央横断(UD)

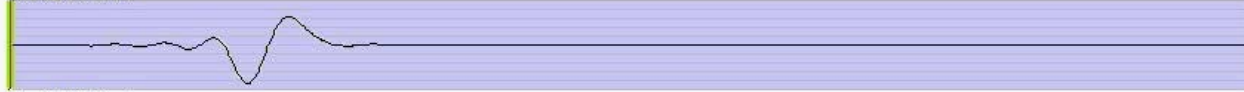


変形アニメーション(変形表示倍率:10倍)CASE11'

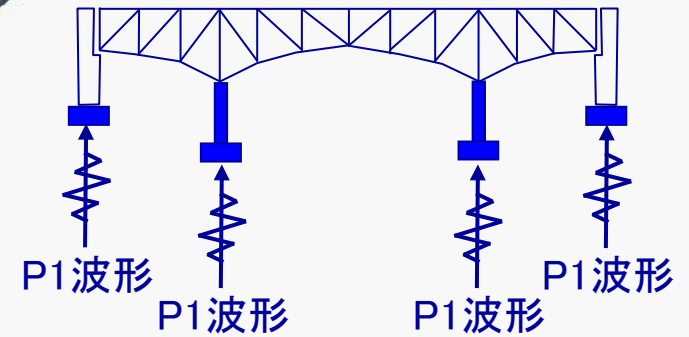
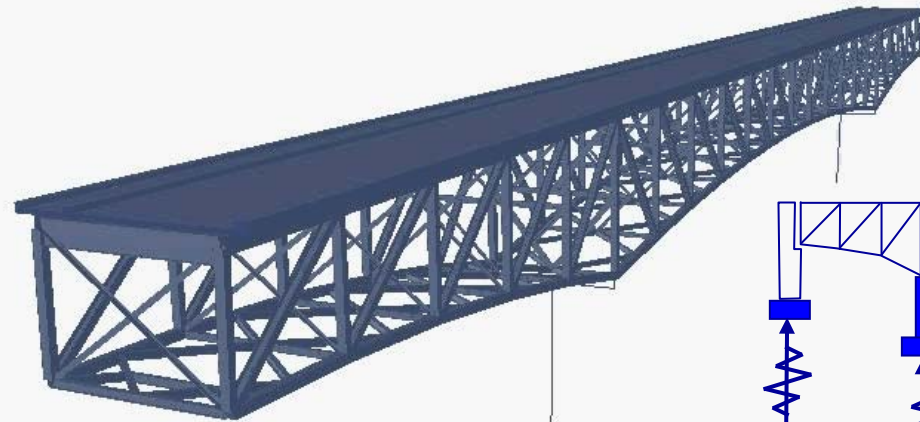
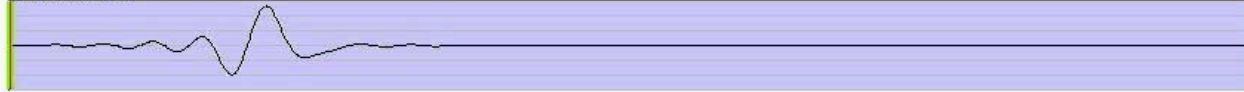
中央横断(LL)



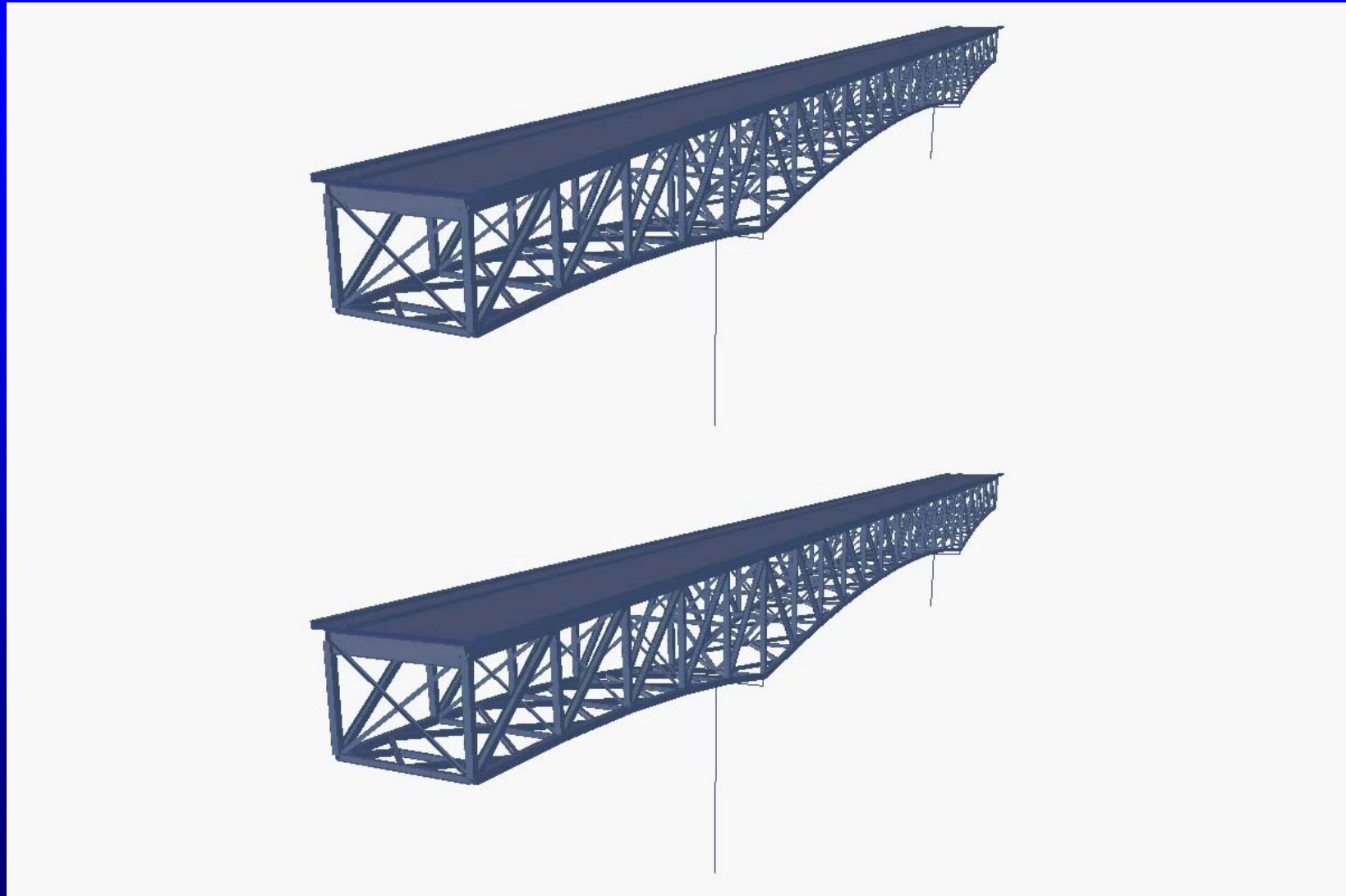
中央横断(TT)



中央横断(UU)

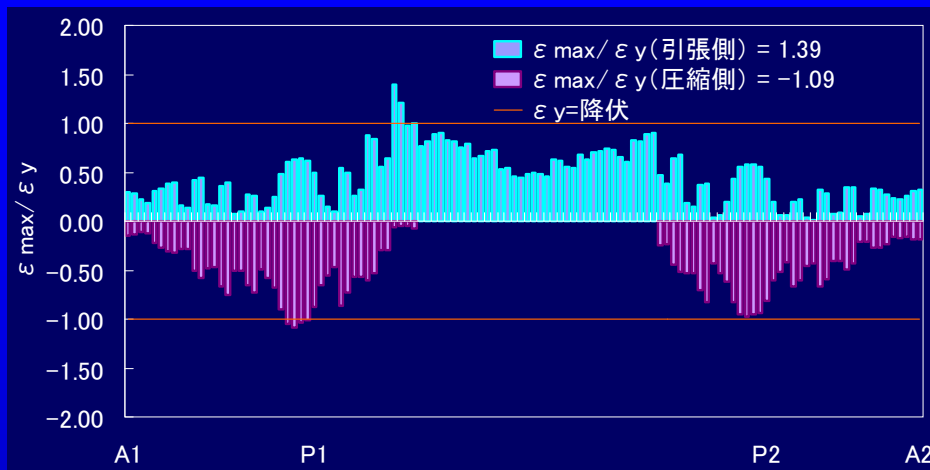


CASE11とCASE11'の比較(変形表示倍率:10倍)



この差は主に断層永久変位の差

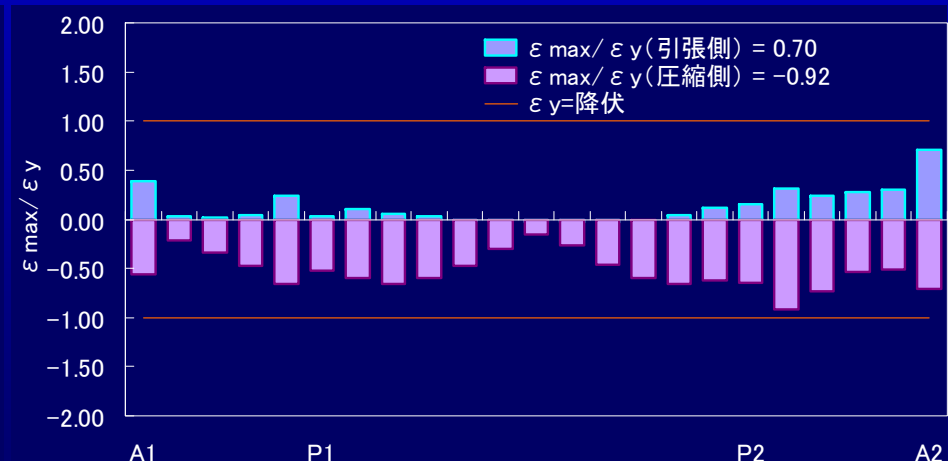
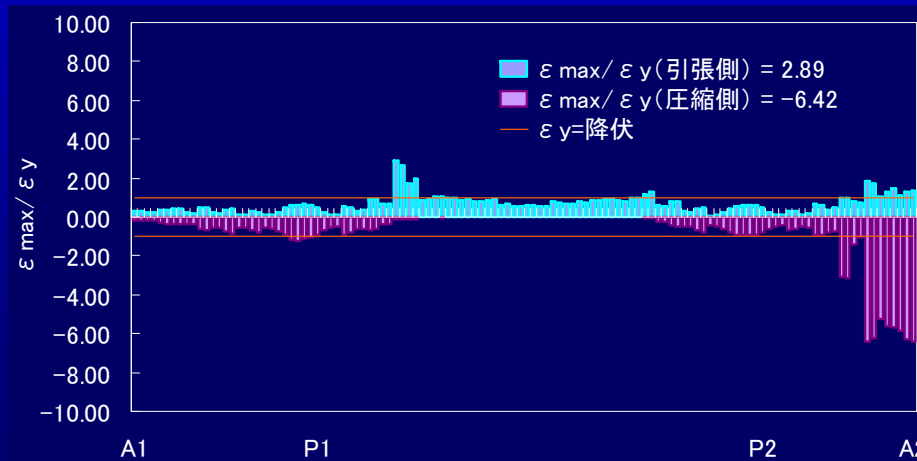
強制変位の静的解析



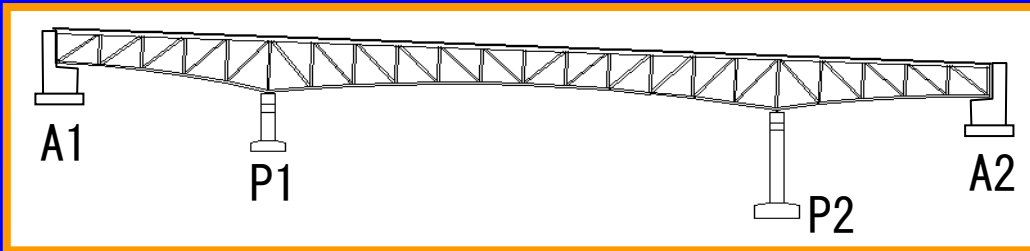
下弦材の最大ひずみ一覧



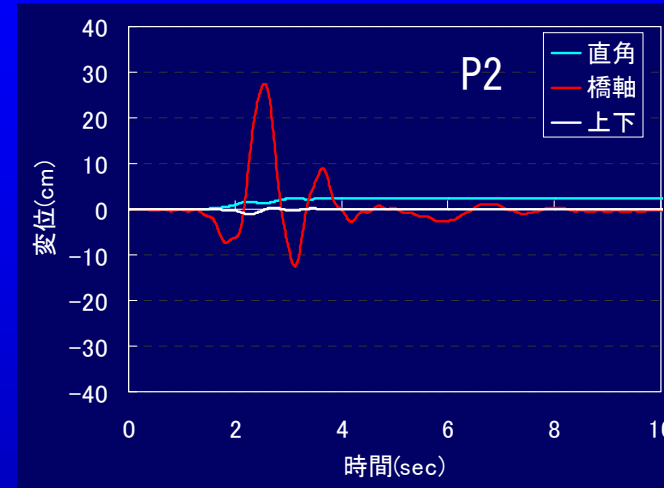
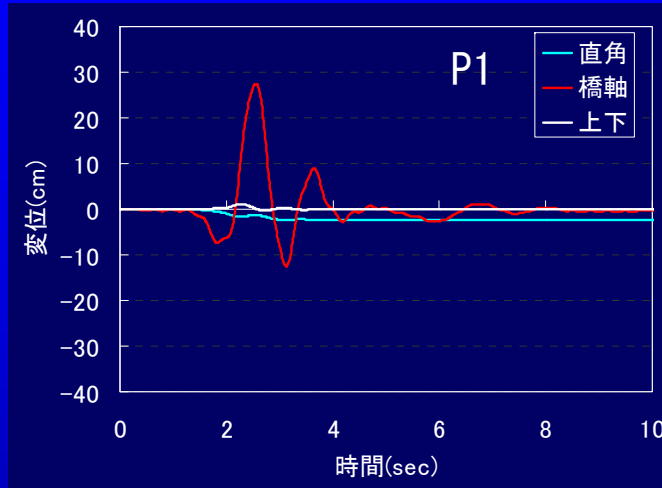
垂直材の最大ひずみ一覧



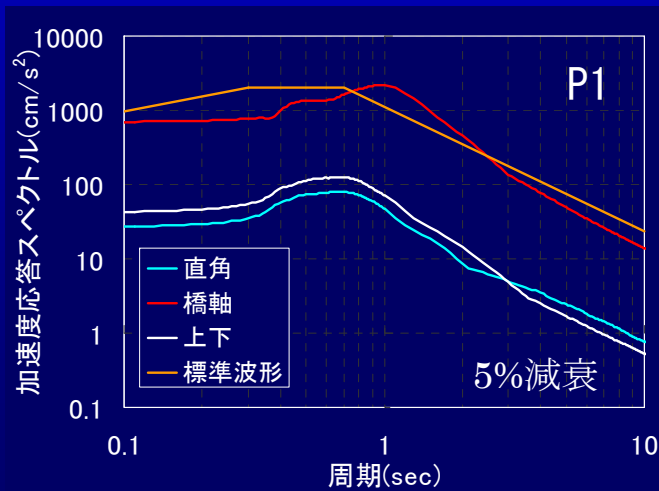
前述の動的解析の結果



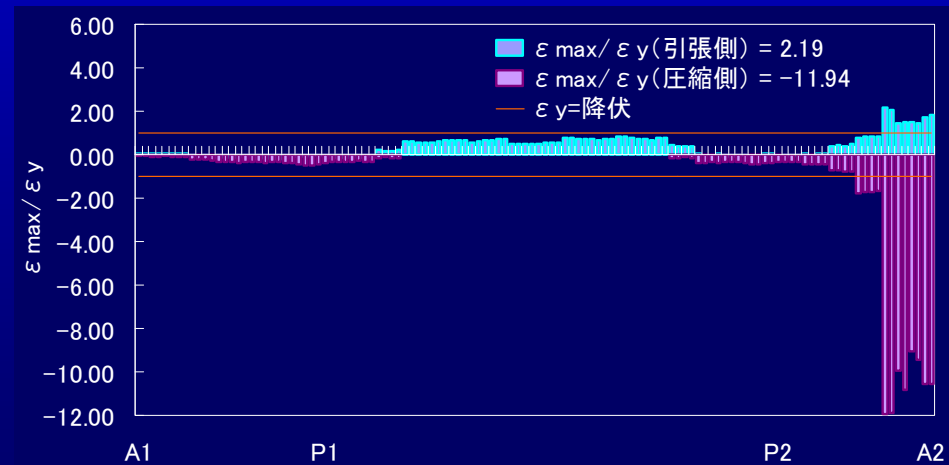
	中央横断	終端横断	断層並行
地表	CASE11	CASE12	CASE13
伏在0.5km	CASE21	CASE22	CASE23
伏在1.5km	CASE31	CASE32	CASE33



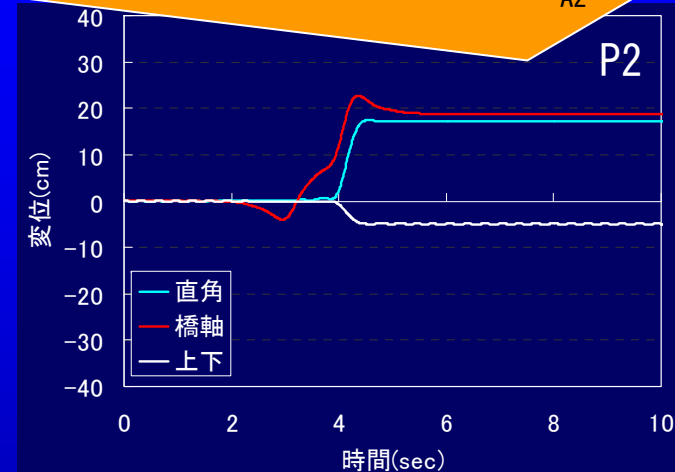
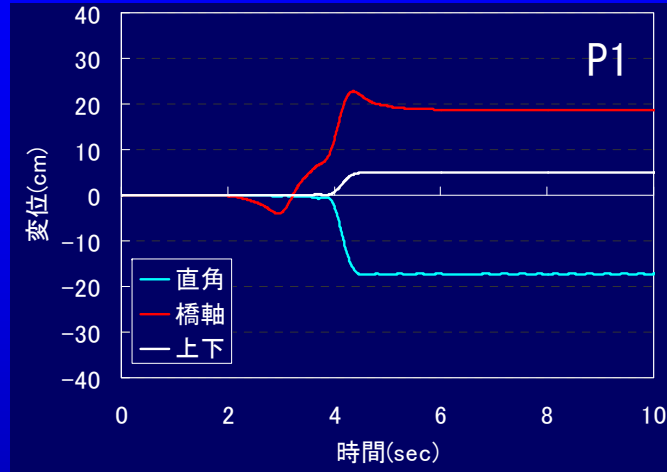
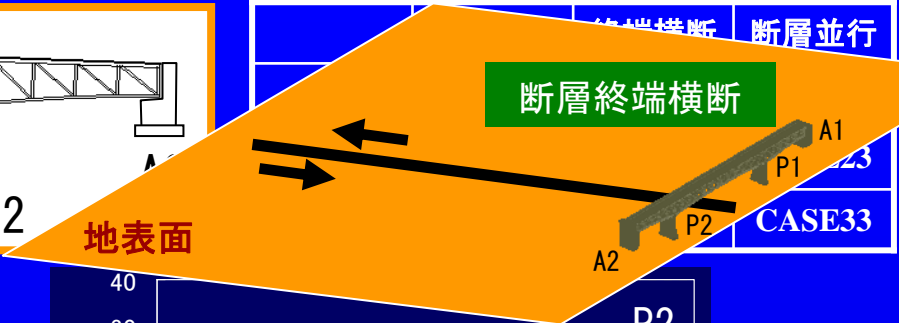
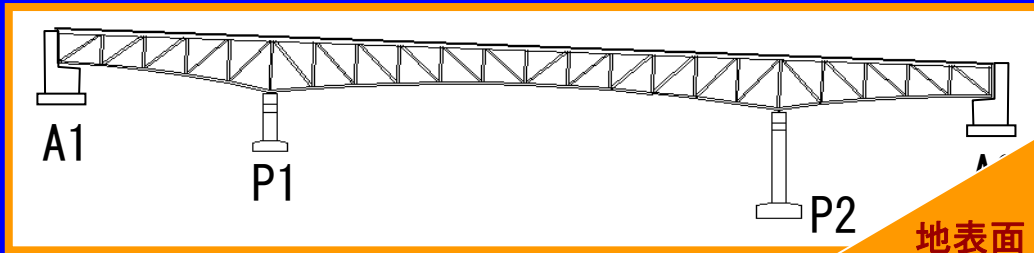
地震動変位波形



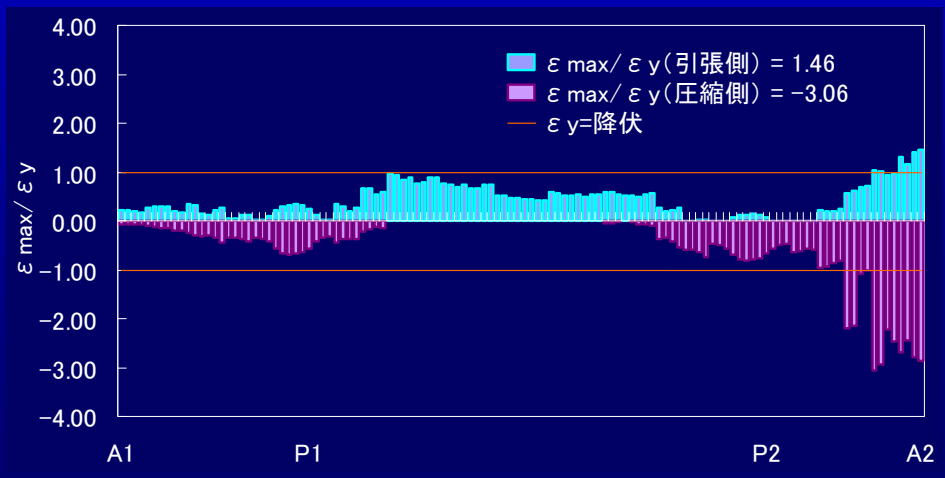
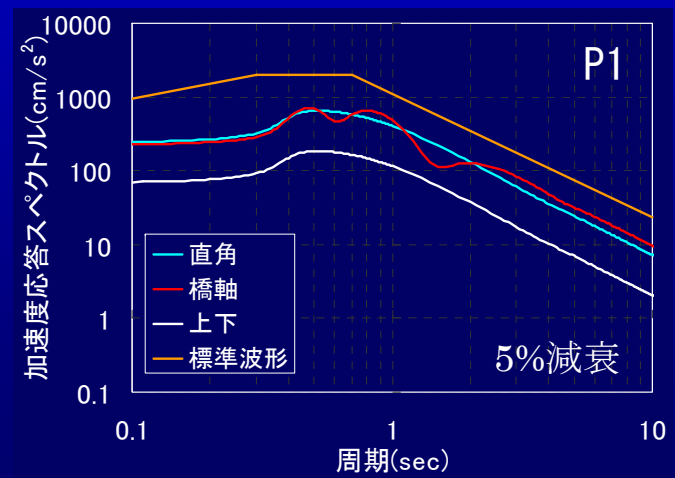
加速度応答スペクトル



下弦材の最大ひずみ一覧

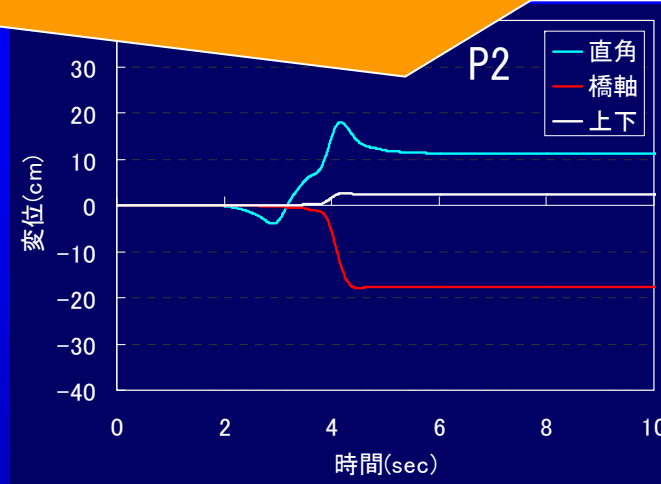
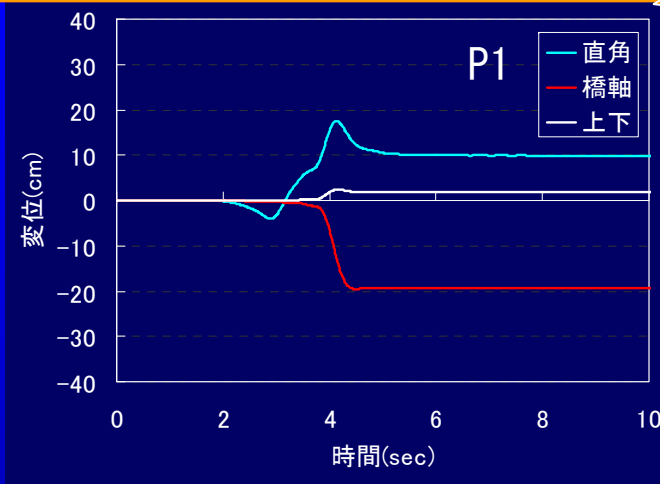
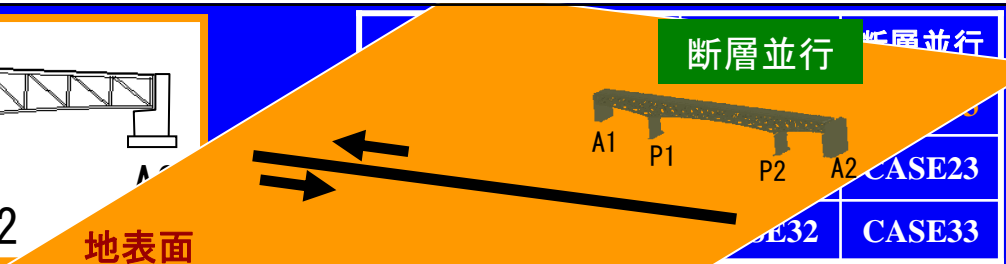
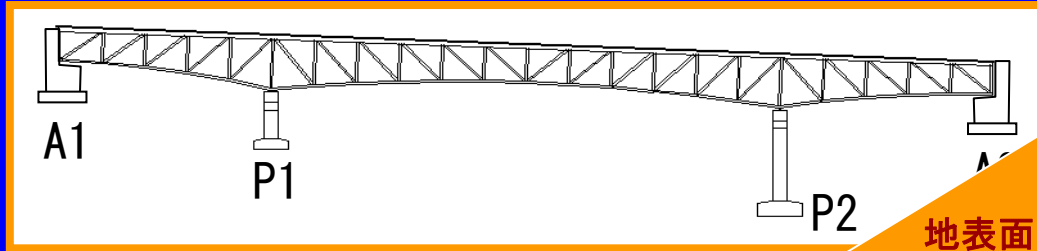


地震動変位波形

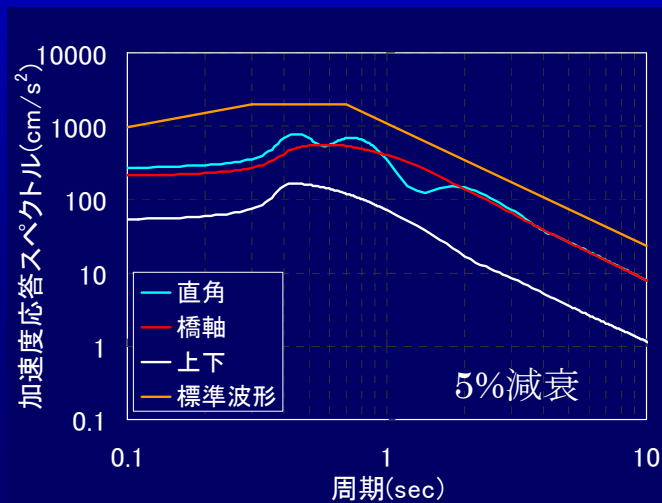


加速度応答スペクトル

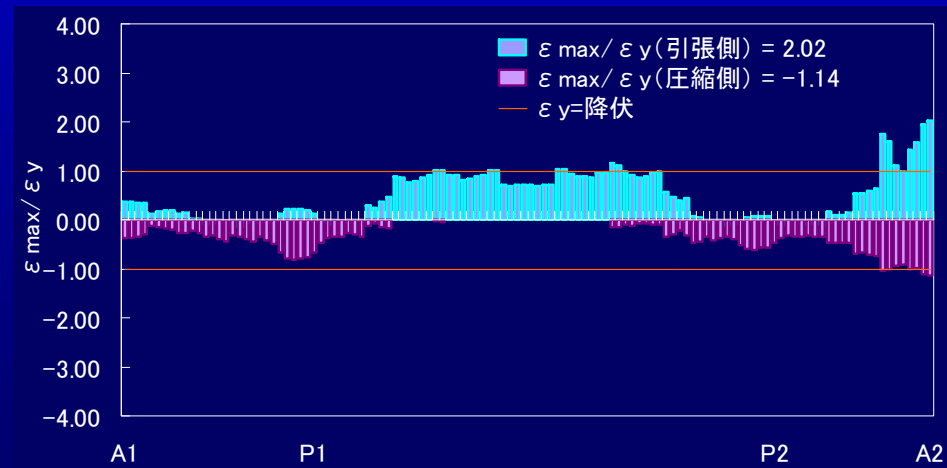
下弦材の最大ひずみ一覧



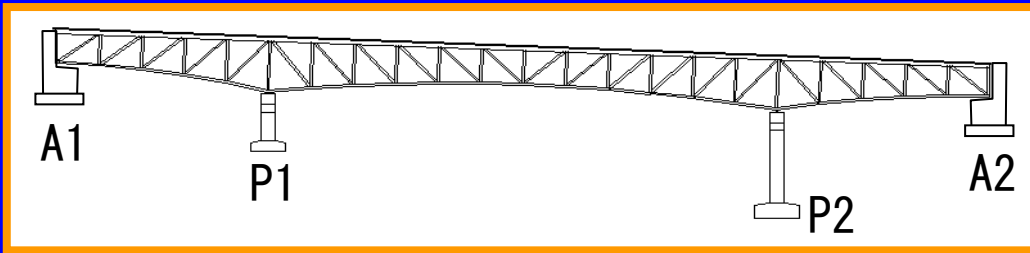
地震動変位波形



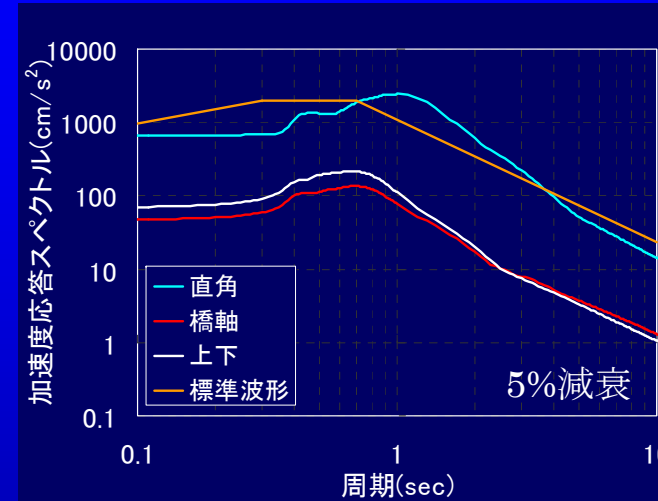
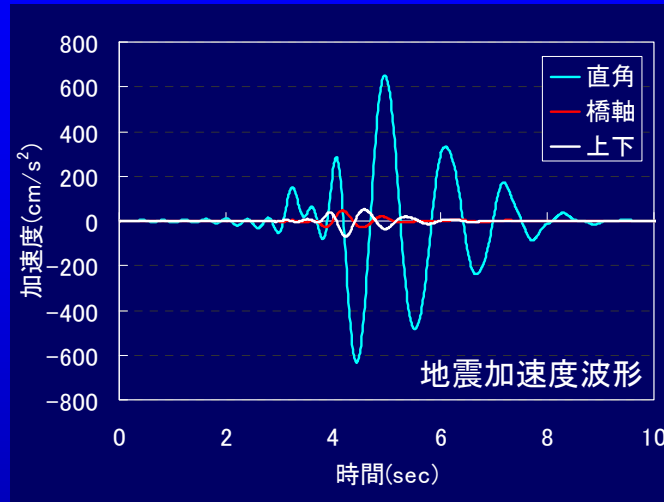
加速度応答スペクトル



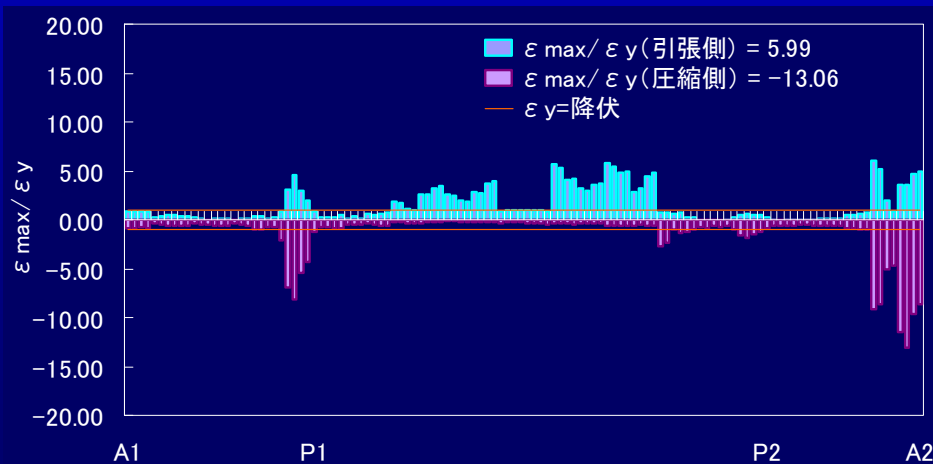
下弦材の最大ひずみ一覧



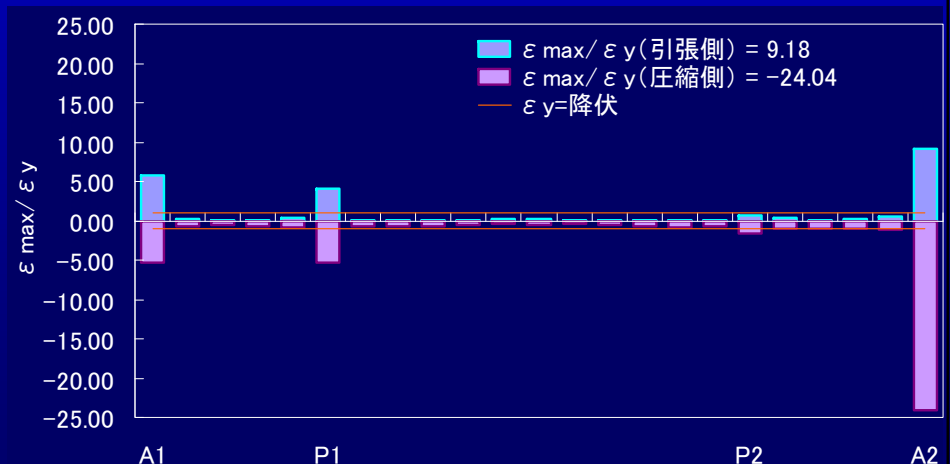
	中央横断	終端横断	断層並行
地表	CASE11	CASE12	CASE13
伏在0.5km	CASE21	CASE22	CASE23
伏在1.5km	CASE31	CASE32	CASE33



入力加速度波形 (P1)



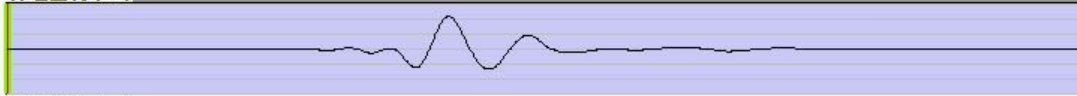
下弦材の最大ひずみ一覧



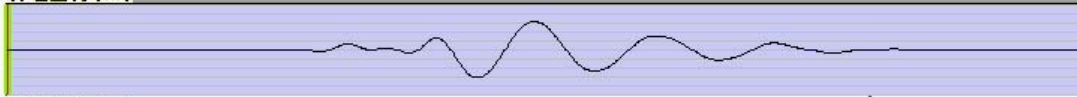
垂直材の最大ひずみ一覧

変形アニメーション(変形表示倍率:10倍)CASE23

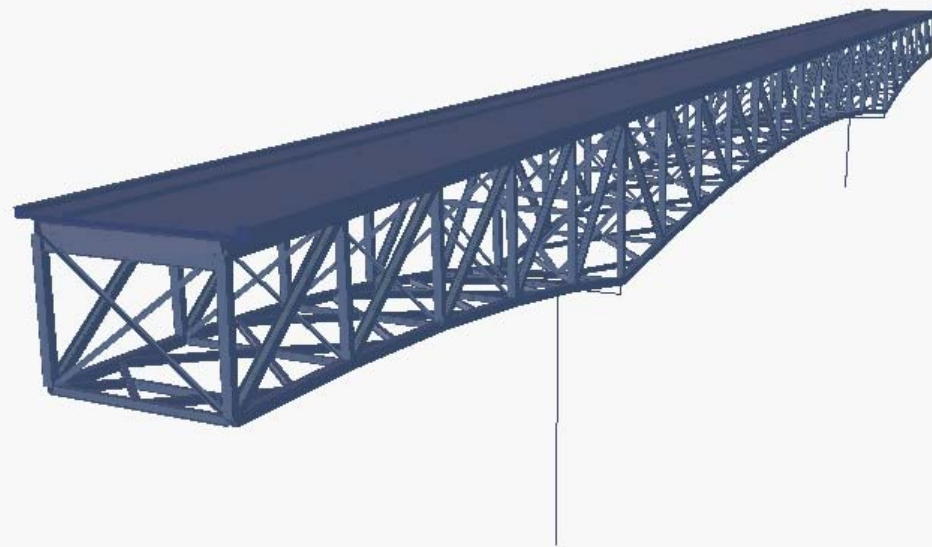
終端並行(LL)



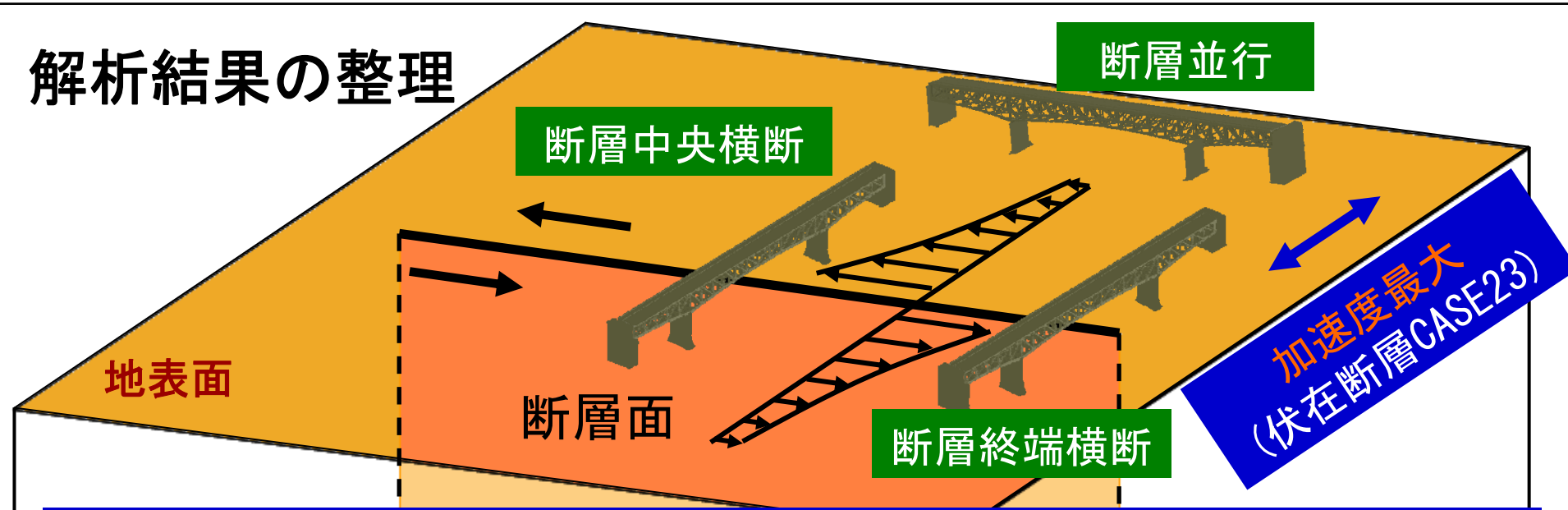
終端並行(TT)



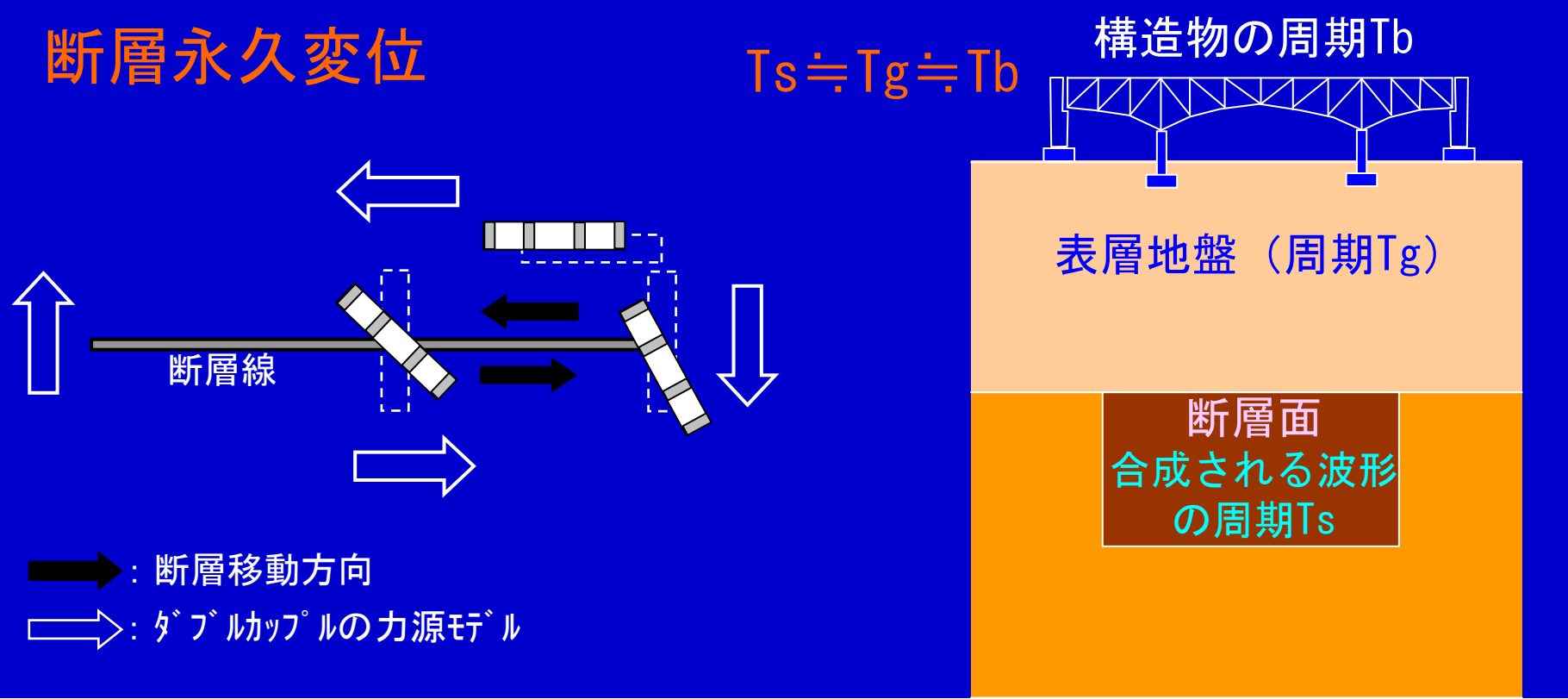
終端並行(UU)



解析結果の整理



断層永久変位

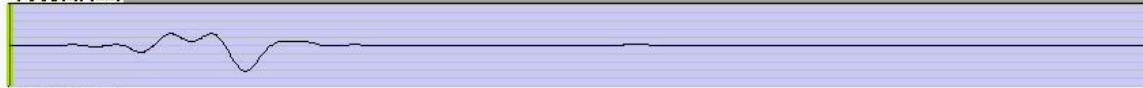


IV. 断層近傍における トラス橋の応答特性 (進行性破壊を考慮)

アニメーション

断層近傍におけるトラス橋(進行性破壊を考慮)

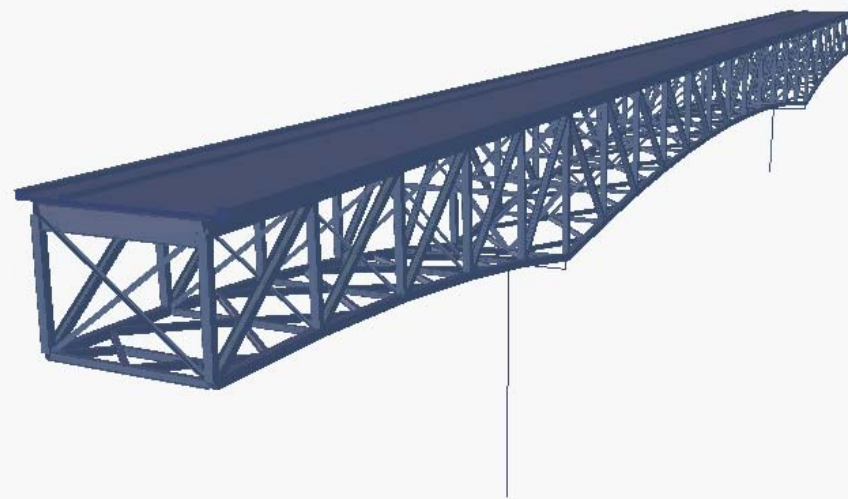
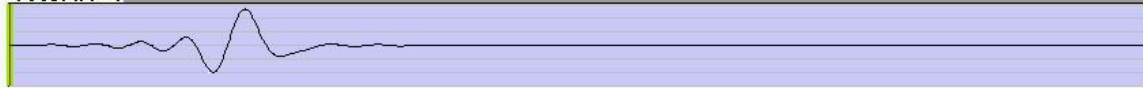
中央横断(LL)



中央横断(TT)



中央横断(UU)



一般的な動的と進行性破壊を考慮した動解

通常の動的解析
(従来法)

進行性破壊を考
慮した動的解析)

中央損断(TT)



最後に

予想される質問:この結果は合っているの？

いろいろな仮定のもとにして解析したものであり, 結果がその仮定の精度に依存し, 場合によっては実現象を反映していない可能性もあるが, ...

- 数多くの解析(全体系3次元シミュレーション)を実施し, 傾向をつかむことは重要.
- このシミュレーションの結果を, 技術者, 研究者が工学的な判断で活用すればよい.
- 研究(理論と実験), 解析ソフト, およびコンピュータの発展により, このようなシミュレーションができるようになってきた!