

# DYMOを用いた動的解析例

## 単柱式鉄筋コンクリート橋脚の 動的耐震設計例

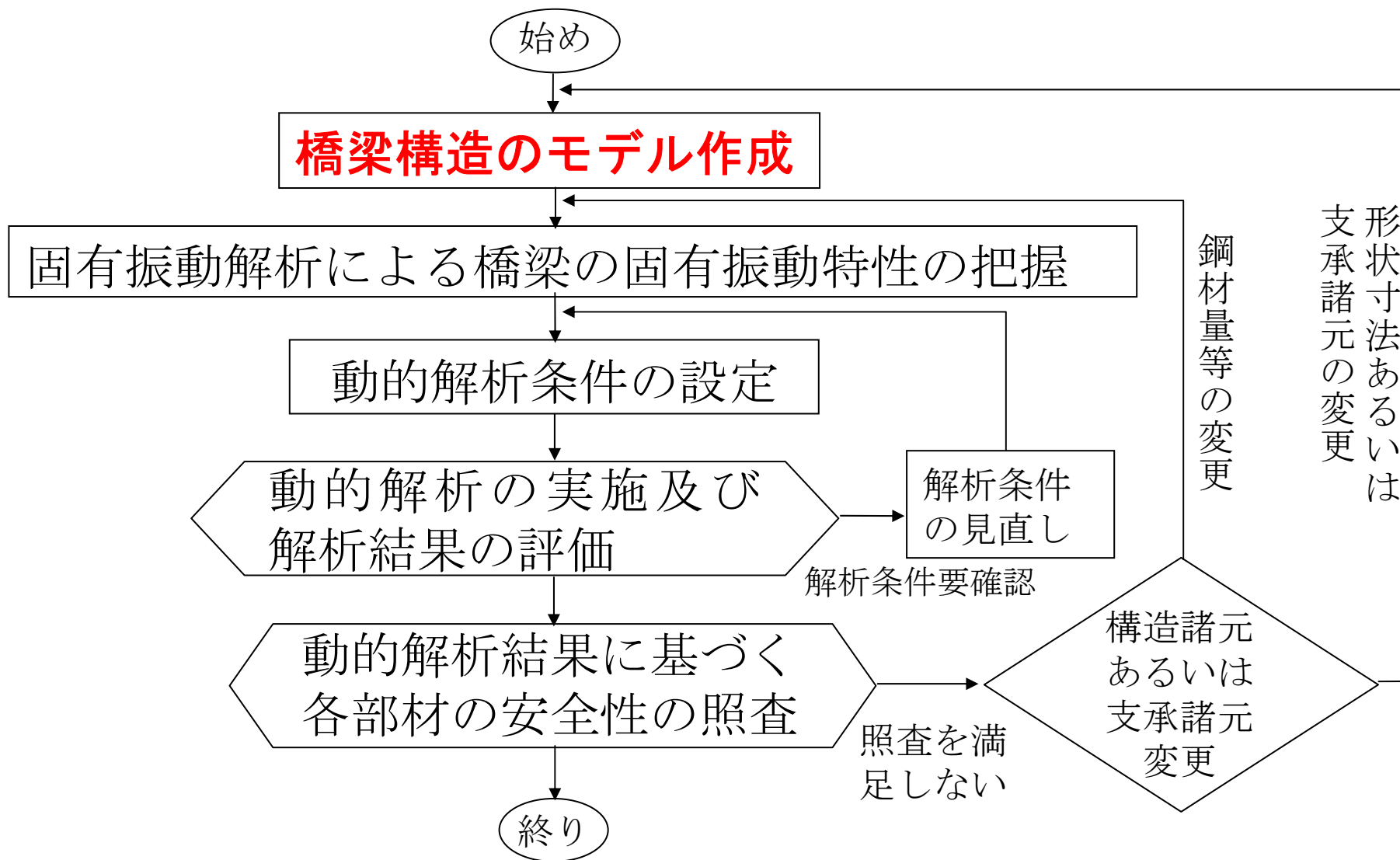


## 解説のポイント

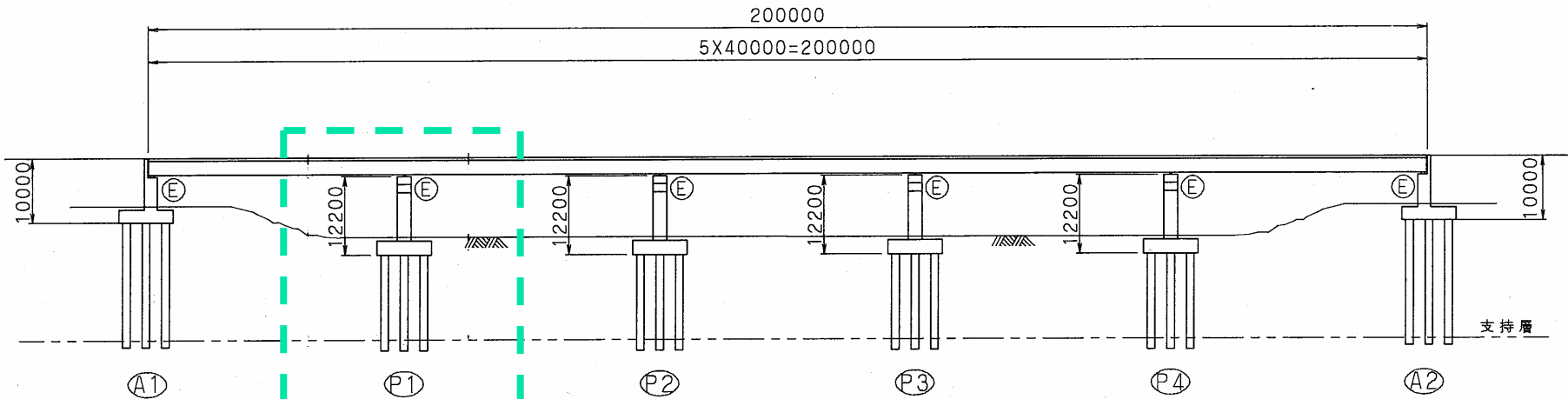
---

- ◆ DYMOを使った動的解析による耐震性能照査の流れ
- ◆ 構造のモデル化におけるポイント
- ◆ 固有振動解析
- ◆ 動的解析条件
- ◆ 動的解析結果(各種応答)の見方
- ◆ 安全性の照査

# 動的解析による耐震性能照査の流れ

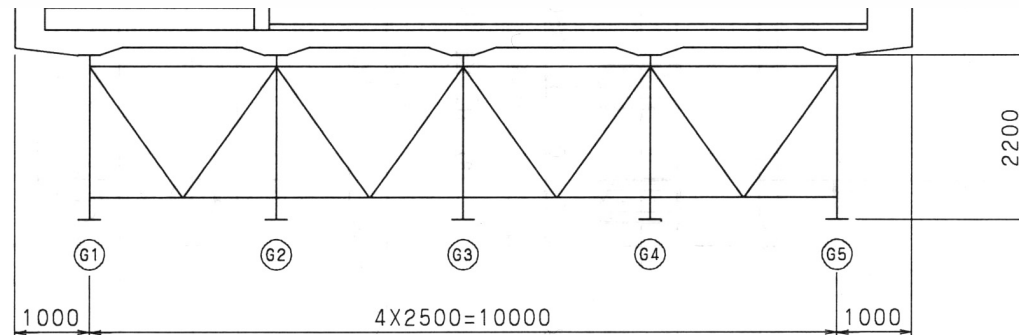


# 設計対象橋梁



(a) 側面図

E : 弾性支持



(b) 上部構造断面図

## 設計対象橋梁の条件

種別：B種の橋

形式：5径間連続鋼 I げた橋（橋長 200m）

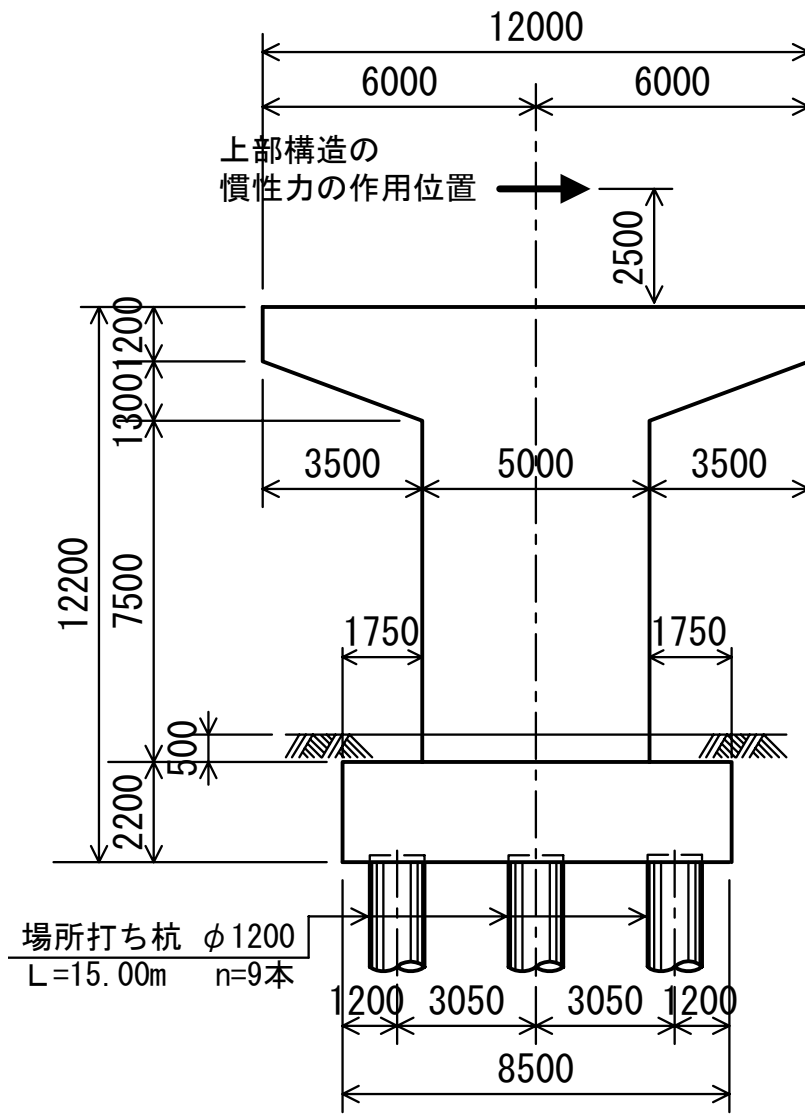
支承：地震時水平力分散構造（タイプBの弾性ゴム支承）

橋脚：鉄筋コンクリートT型橋脚

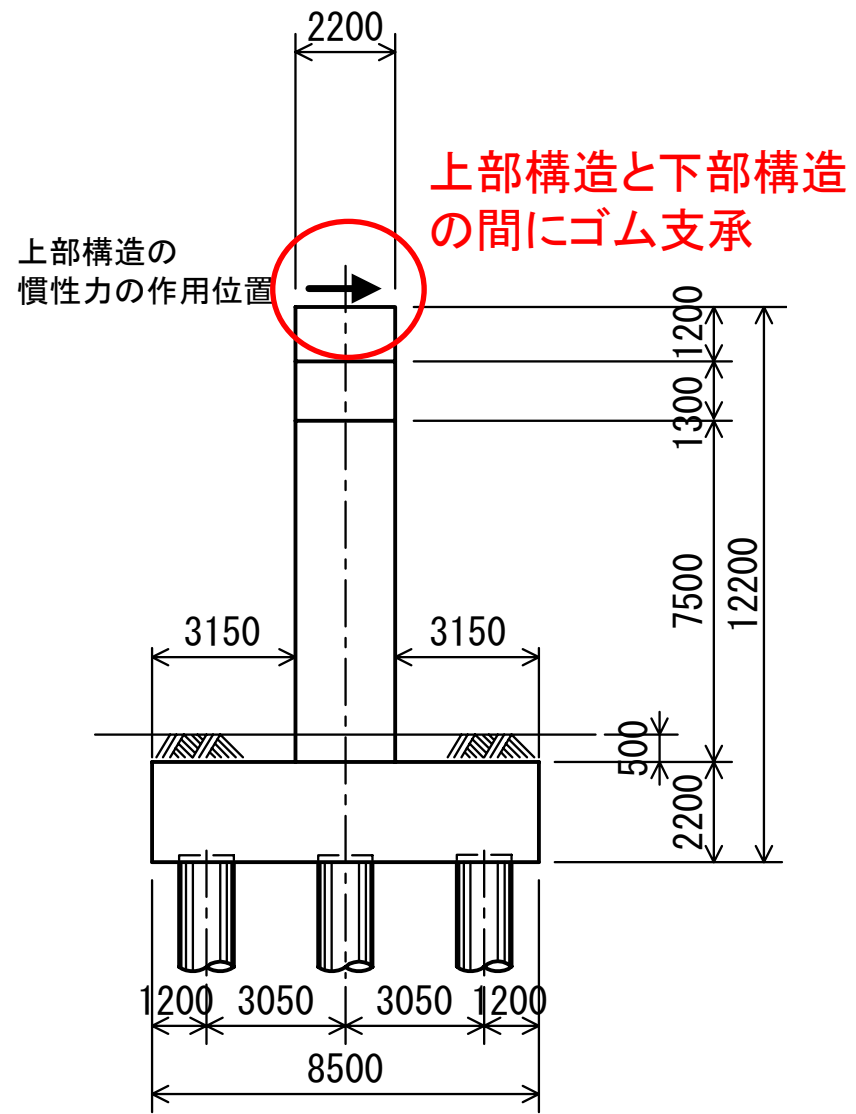
基礎：杭基礎／場所打ち杭（Ⅱ種地盤）

材料：コンクリート21N/mm<sup>2</sup>、鉄筋SD295

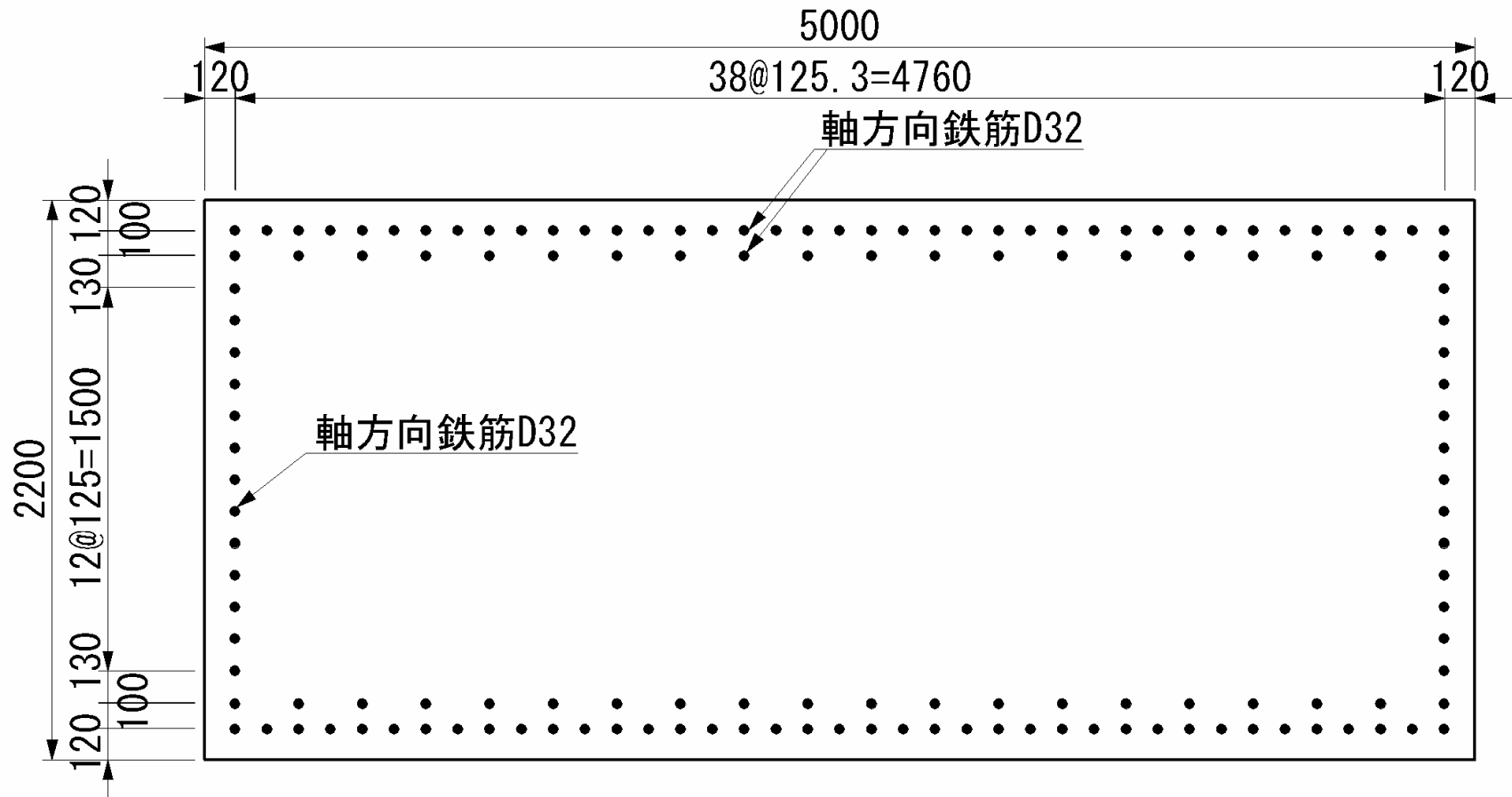
# 設計対象橋脚(P1橋脚)



正面図



側面図



帯鉄筋  
D19 ctc150

中間帯鉄筋の  
配置間隔は1m以内

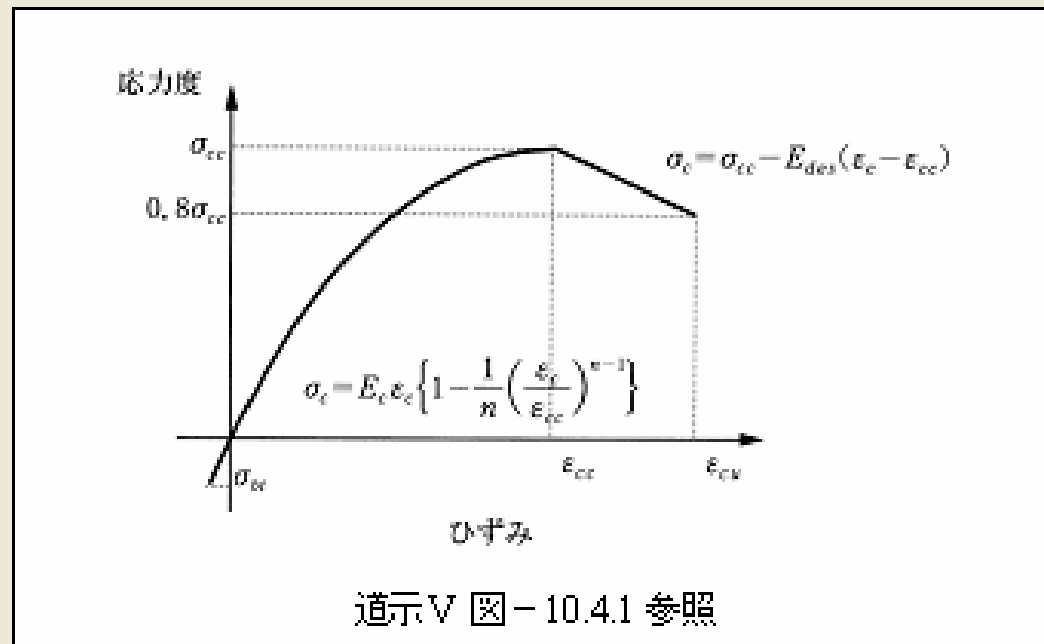
# 材料条件:コンクリートと鉄筋の基本条件

## 材料

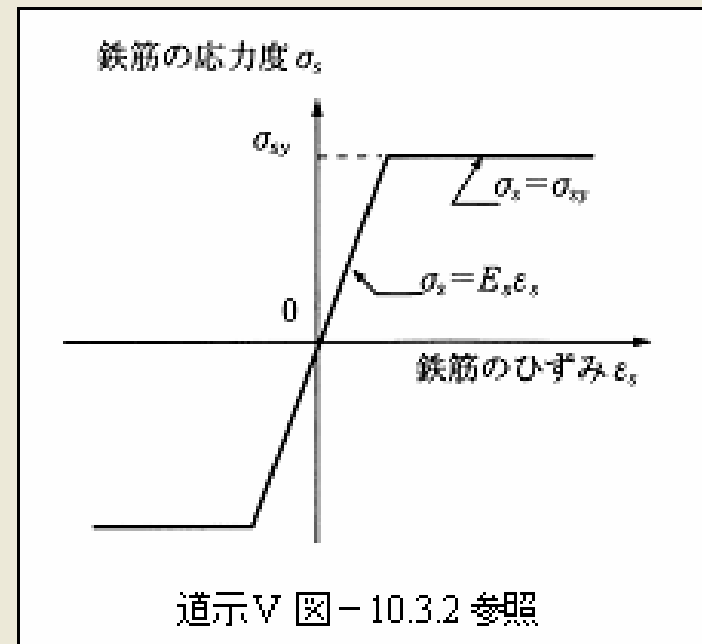
コンクリートの設計基準強度 $\sigma_{ck}$	21	[N/mm <sup>2</sup> ]
コンクリートのヤング係数 $E_c$	23500	[N/mm <sup>2</sup> ]
コンクリートの負担できる 平均せん断応力度 $\tau_c$	0.33	[N/mm <sup>2</sup> ]
主鉄筋の降伏点 $\sigma_{sy}$	295	[N/mm <sup>2</sup> ]
横拘束筋の降伏点 $\sigma_{sy}$	295	[N/mm <sup>2</sup> ]
鉄筋コンクリート単位体積重量 $\gamma_c$	24.5	[kN/m <sup>3</sup> ]



■ コンクリートの応力度～ひずみ曲線



■ 鉄筋の応力度～ひずみ曲線



$$n = \frac{E_c \epsilon_{cc}}{E_c \epsilon_{cc} - \sigma_{cc}} \quad \text{道示V 式10.4.2 参照}$$

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} \quad \text{道示V 式10.4.5 参照}$$

# 材料特性

コンクリートの設計基準強度 $\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	21	24	27	30	40
コンクリートの負担できる平均せん断応力度 $\tau_o$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.33	0.35	0.36	0.37	0.41

道示V 表10.5.1 参照

# 構造モデル

- 弾性ゴム支承を有する地震時水平力分散構造の地震応答は、一般に、弾性ゴム支承が変形し、上部構造が並進振動する1次の振動モードが支配的となる。
- このため、当該橋脚が支持する上部構造部分の重量とこれを支持する弾性ゴム支承、橋脚、フーチングおよび基礎の地盤バネからなる解析モデルとする。

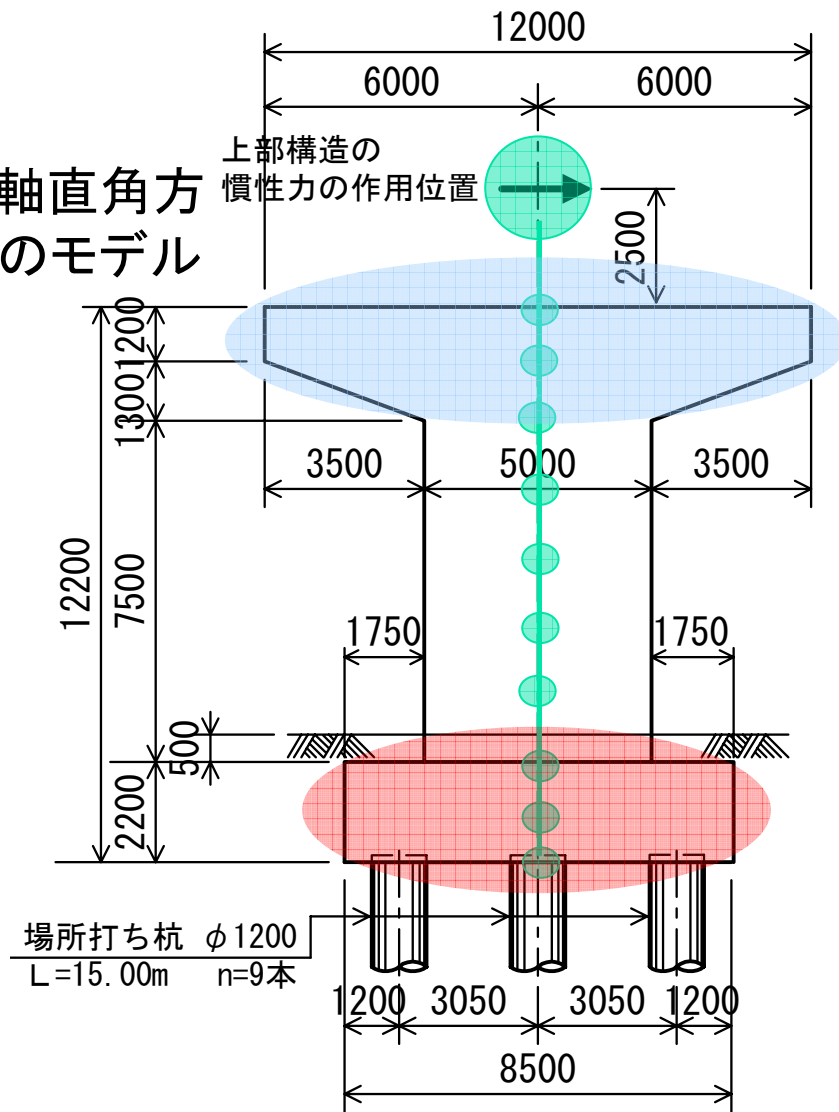
## 節点分割（その1）

- 橋脚の振動特性（特に曲げ振動モード）が再現できる程度の分割を設ける。
- 節点分割は断面変化位置だけでなく、橋の応答に影響を与える振動モードや、部材の非線形性を再現できるように行う。けた橋のように1次振動モードが支配的な場合は、節点分割は単純化できる。損傷が発生し非線形挙動が予測される部位については節点分割を細かくするのがよい。

# 対象橋脚

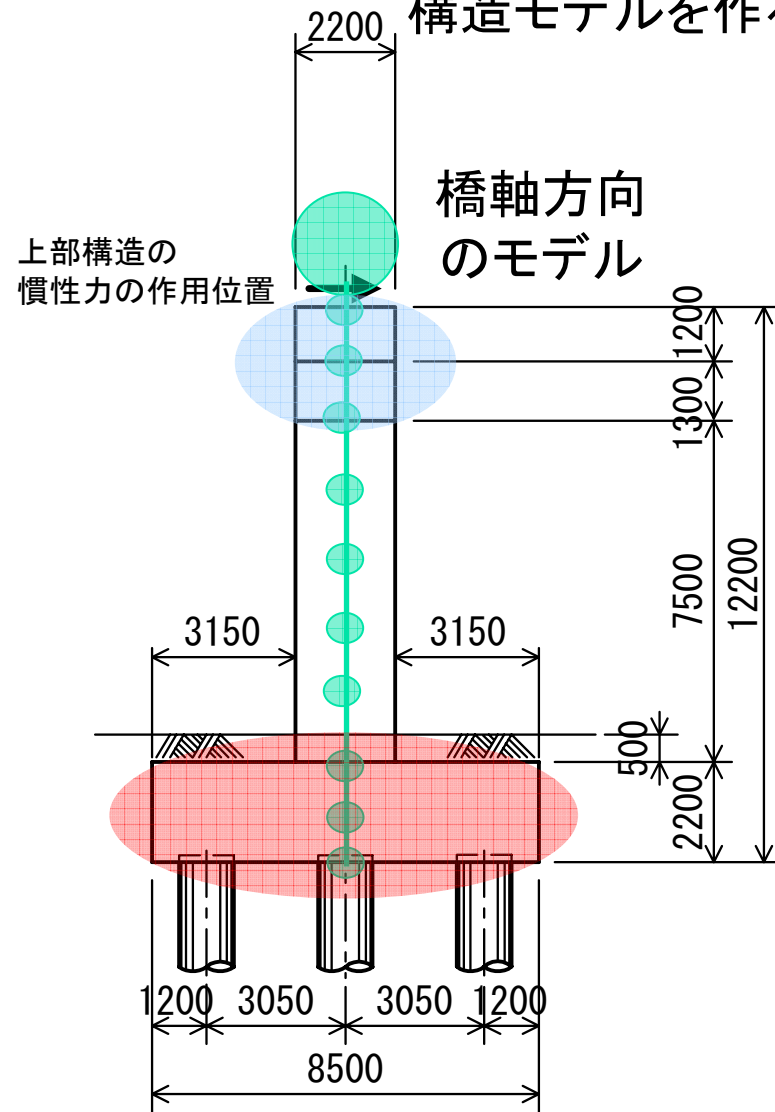
静的計算とほぼ同様な  
構造モデルを作る

橋軸直角方  
向のモデル



正面図

橋軸方向  
のモデル



側面図

## 節点分割（その2）

- 橋脚横はりやフーチングは橋脚躯体部より剛性が高くほぼ剛体振動すると考えられることから、それらの部材については最小の節点数でモデル化する。
- 本計算例では動的解析の流れを理解する事を主目的とし複雑なモデルは避け、簡単のため5分割としている（DYMOでは3～10分割を選ぶ）。

## 上部構造と支承のモデル

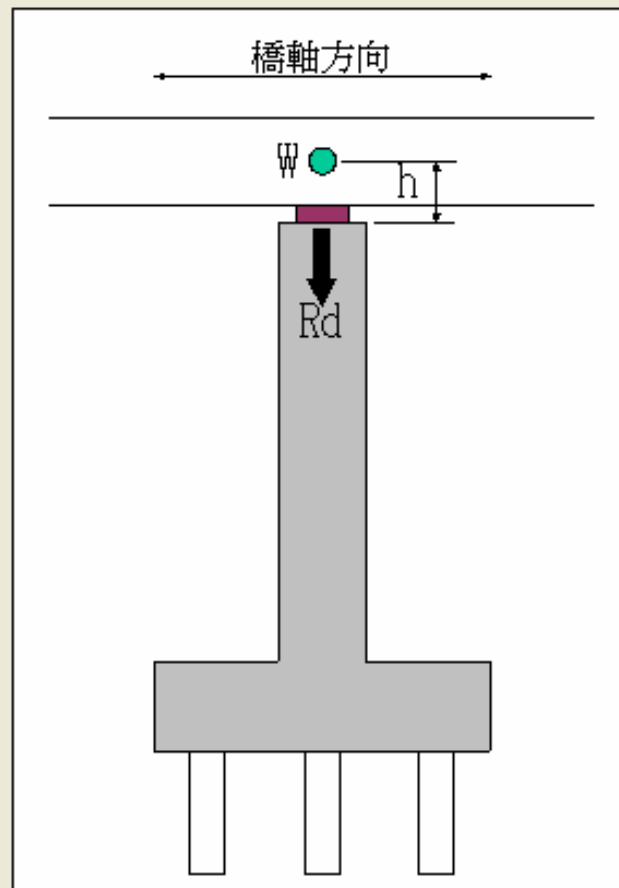
- 本橋の場合は上部構造が並進振動する振動が支配的となるため、上部構造は質点としてモデル化し、当該橋脚が支持する上部構造部分の重量を質点に与える。
- ゴム支承は、上部構造と橋脚間にせん断バネ部材でモデル化し、バネ定数はゴム支承の形状寸法より算出する。また、弾性ゴム支承の等価減衰定数は、一般的なものとして0.04としている。

## 上部構造

下部構造が支持する上部構造部分の死荷重反力  
(M~Φの計算に使用)  $R_d$   [kN]

地震時保有水平耐力法に用いる等価重量  
(上部構造節点の質量を計算)  $W$   [kN]

橋脚天端から上部構造の  
慣性力の作用位置までの距離  $h$   [m]



慣性力作用位置について

- 1) 直橋の橋軸方向の場合  
支承の底面
- 2) 直橋の橋軸直角方向の場合  
床版底面あるいは上部構造の重心位置
- 3) 斜橋の場合  
橋軸・橋軸直角方向とも上部構造の重心位置

道示V 図-解6.2.3 参照

# 上部構造

下部構造が支持する上部構造部分の死荷重反力 ( $M \sim \Phi$ の計算に使用)	$R_d$	<input type="text" value="4730"/>	[kN]
地震時保有水平耐力法に用いる等価重量 (上部構造節点の質量を計算)	$W$	<input type="text" value="4730"/>	[kN]
橋脚天端から上部構造の 慣性力の作用位置までの距離 $h$		<input type="text" value="0"/>	[m]



# 支承条件

支承条件     弾性ゴム支承     免震支承     固定支承

弾性ゴム支承のとき入力

等価剛性     [kN/m]

等価減衰定数   

免震支承のとき入力

免震支承の降伏荷重  $Q_d$      [kN]

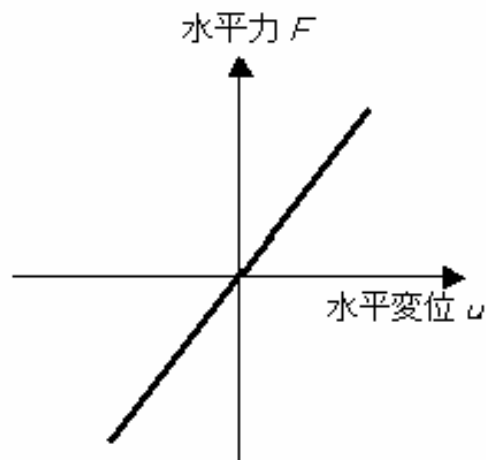
一次剛性     $K_1$      [kN/m]

二次剛性     $K_2$      [kN/m]

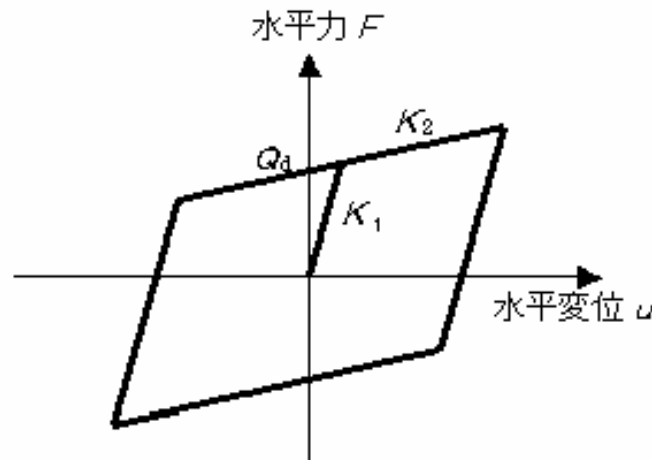
弾性ゴム支承・免震支承のとき入力

支承ゴム総厚  
(せん断ひずみに使用)     [m]

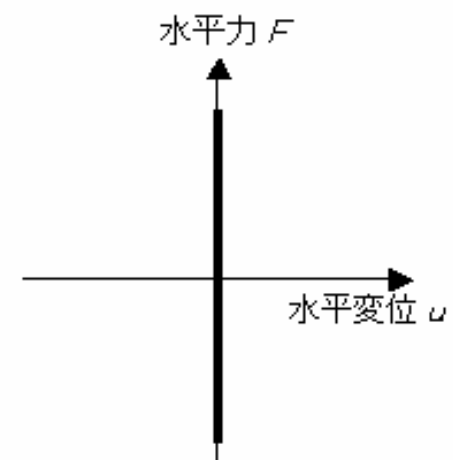
■ 弾性ゴム支承



■ 免震支承



■ 固定支承



# 支承条件

支承条件     弾性ゴム支承     免震支承     固定支承

弾性ゴム支承のとき入力

等価剛性     [kN/m]

等価減衰定数   

免震支承のとき入力

免震支承の降伏荷重  $Q_d$      [kN]

一次剛性     $K_1$      [kN/m]

二次剛性     $K_2$      [kN/m]

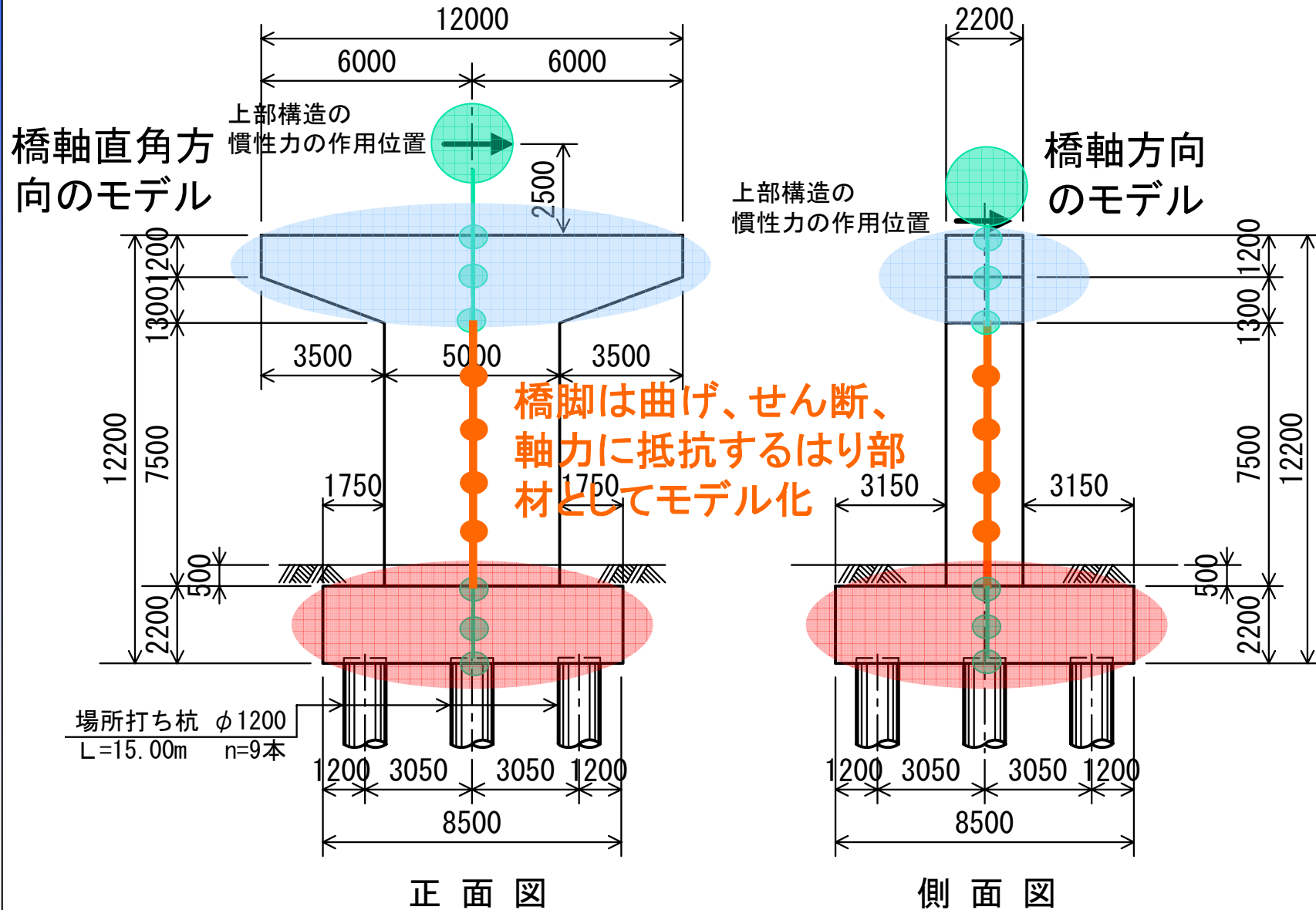
弾性ゴム支承・免震支承のとき入力

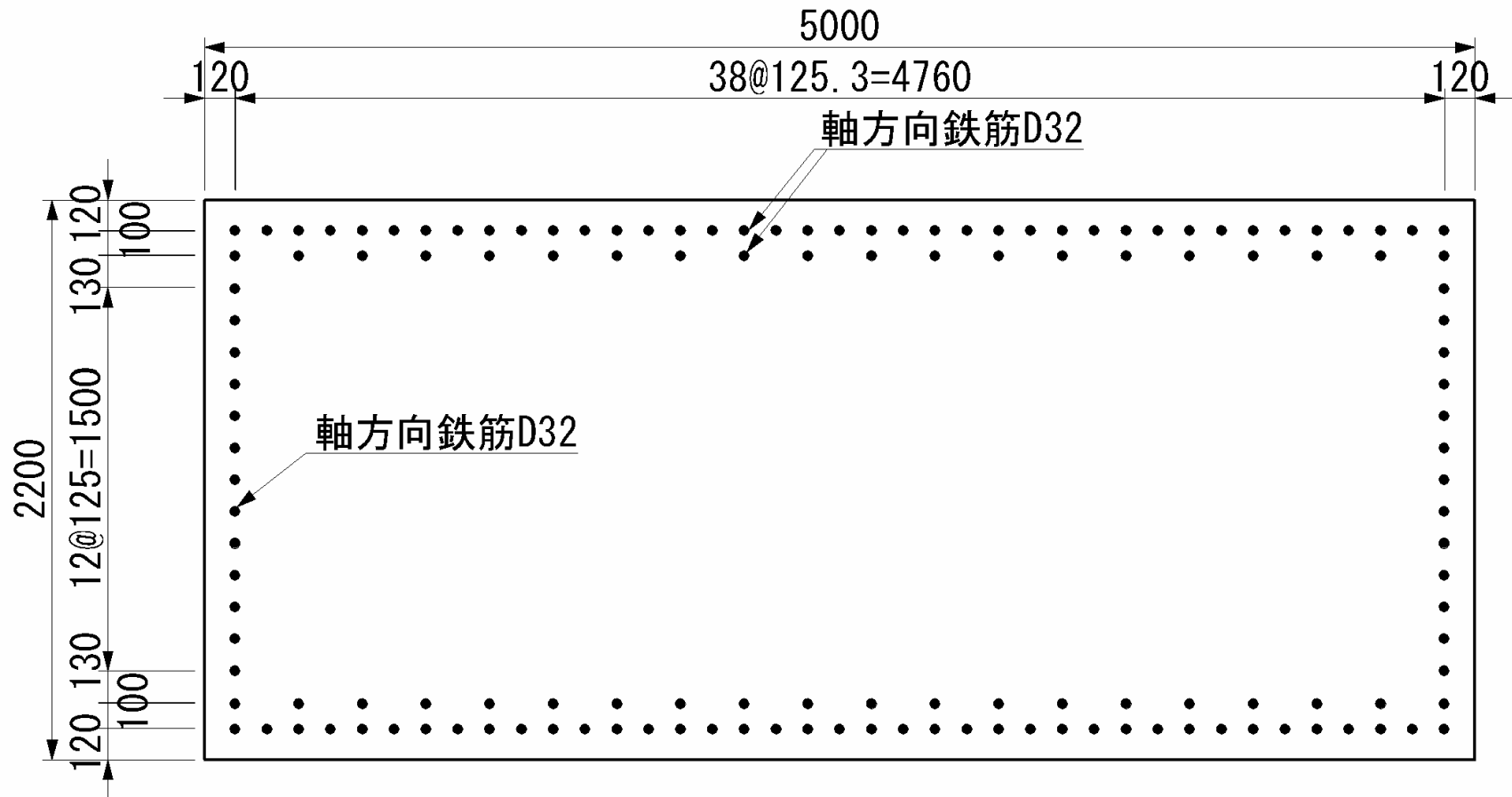
支承ゴム総厚  
(せん断ひずみに使用)     [m]

## 橋脚のモデル(その1)

- 橋脚は、曲げ、せん断、軸力に抵抗するはり部材としてモデル化する(静的計算と同様)。
- 橋脚柱部には非線形性を考慮するため、ひびわれ～降伏～終局からなるトリリニア型の骨格曲線を有するTakedaモデルや、主要動の応答がひびわれ後の剛性に支配されるとしてひびわれ点を省略したバイリニア型の骨格曲線(Takedaモデル)などが多く使用される。

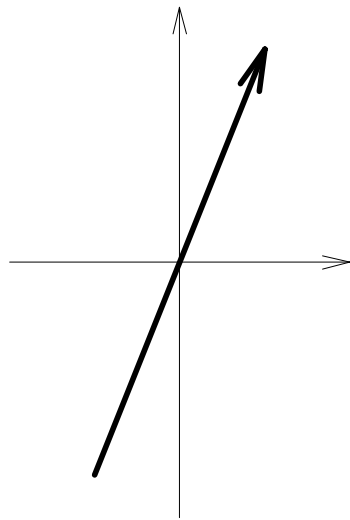
# 対象橋脚



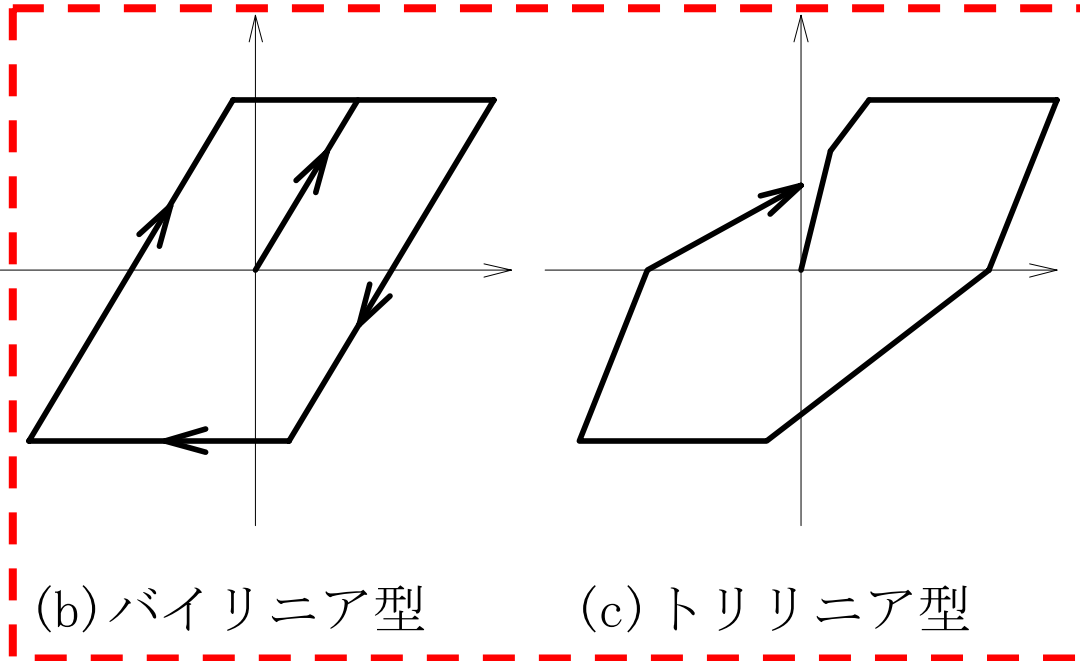


帯鉄筋  
D19 ctc150

中間帯鉄筋の  
配置間隔は1m以内



(a) 弾性

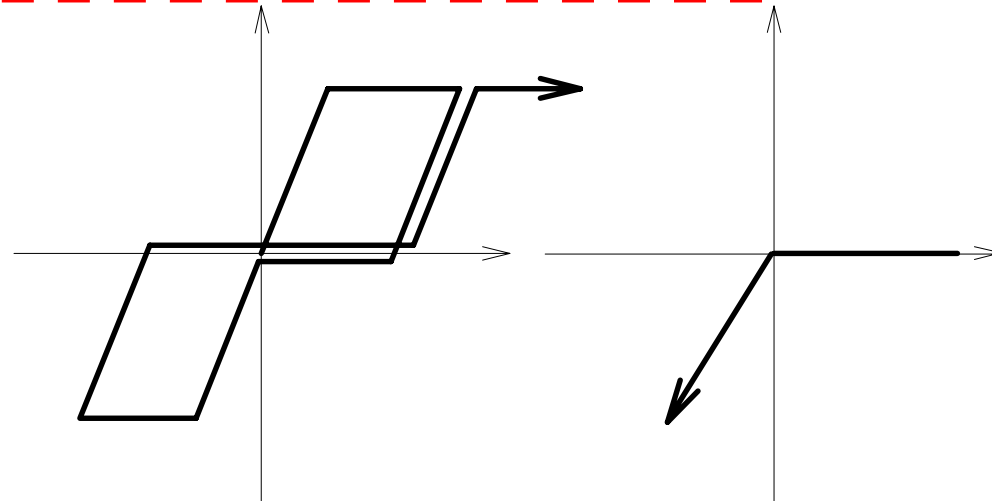


(b) バイリニア型

(c) トリリニア型

橋脚のモデル化に一般的に用いられる履歴特性

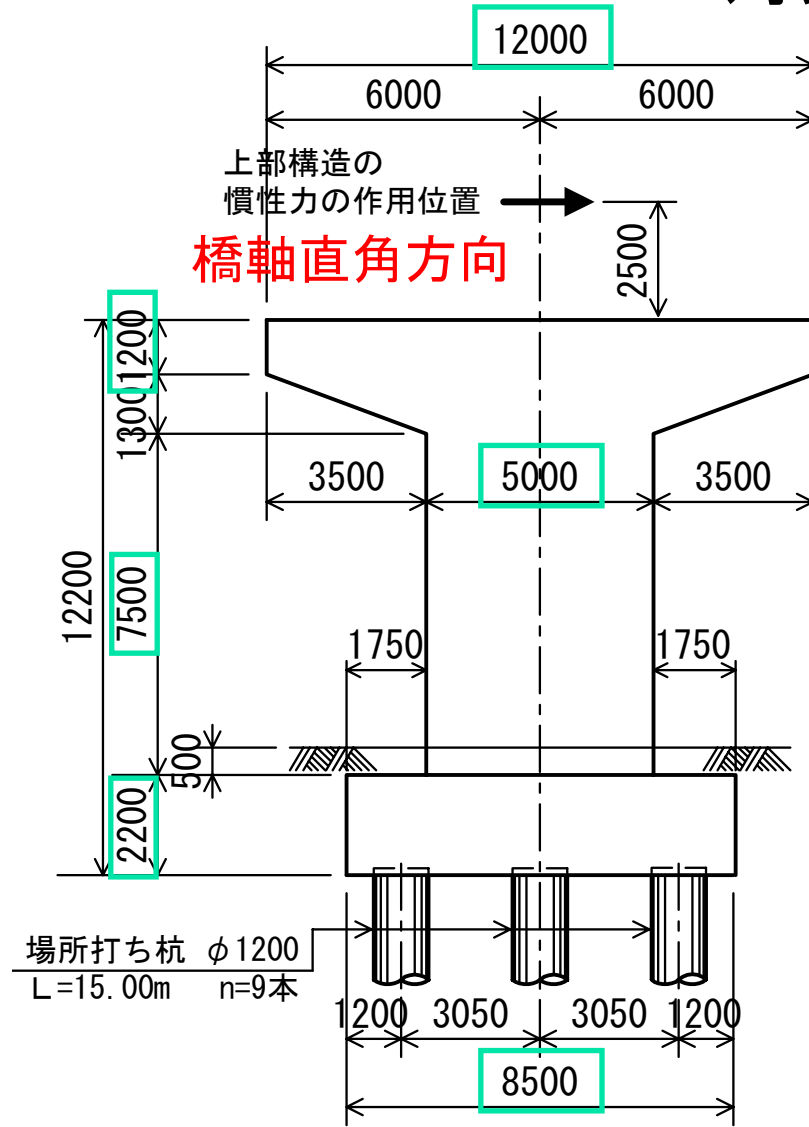
## 様々な履歴特性



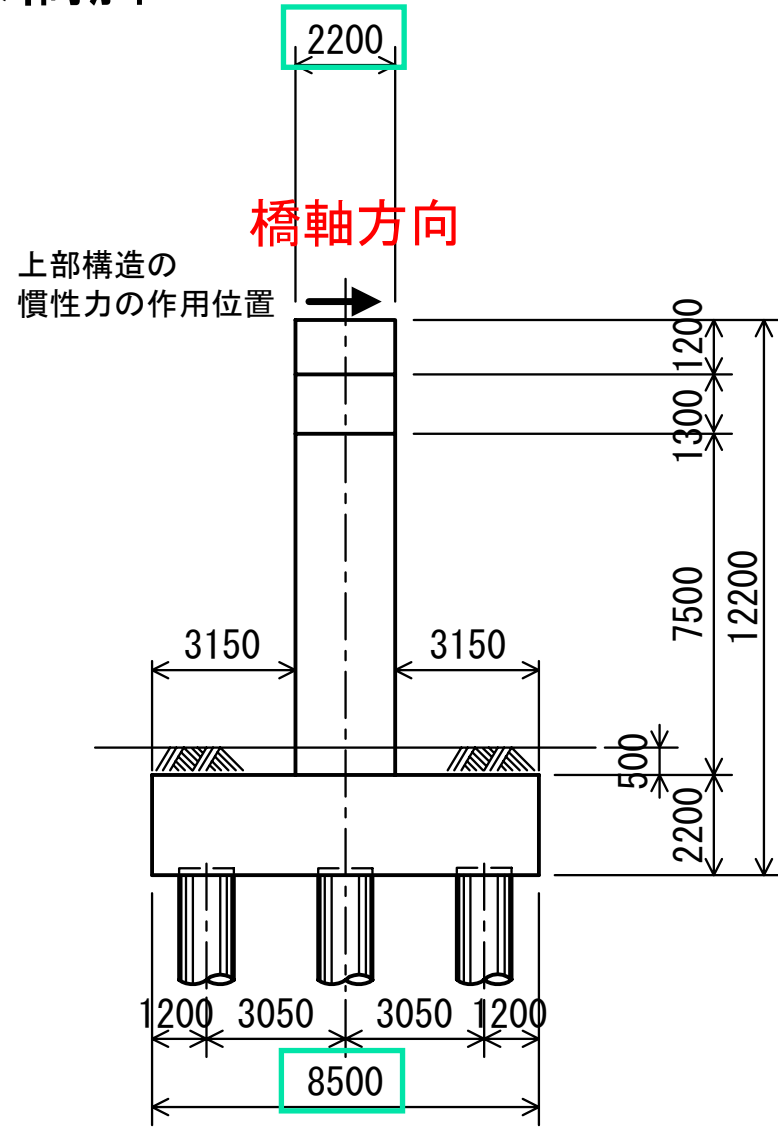
(d) スリップ型

(e) 引張もしくは圧縮型

# 対象橋脚



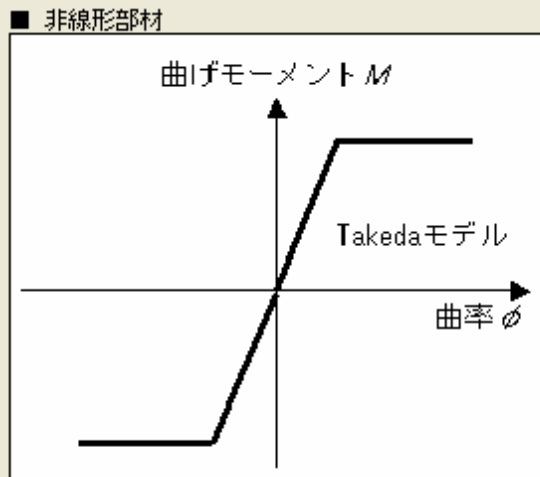
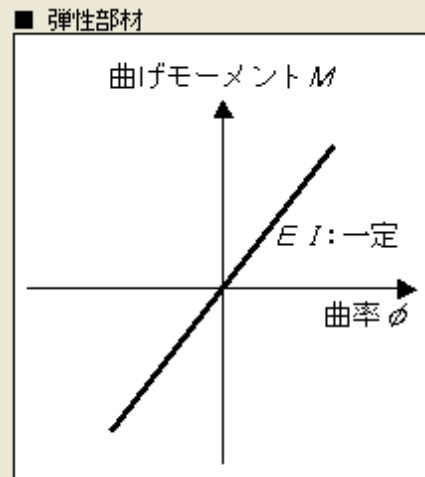
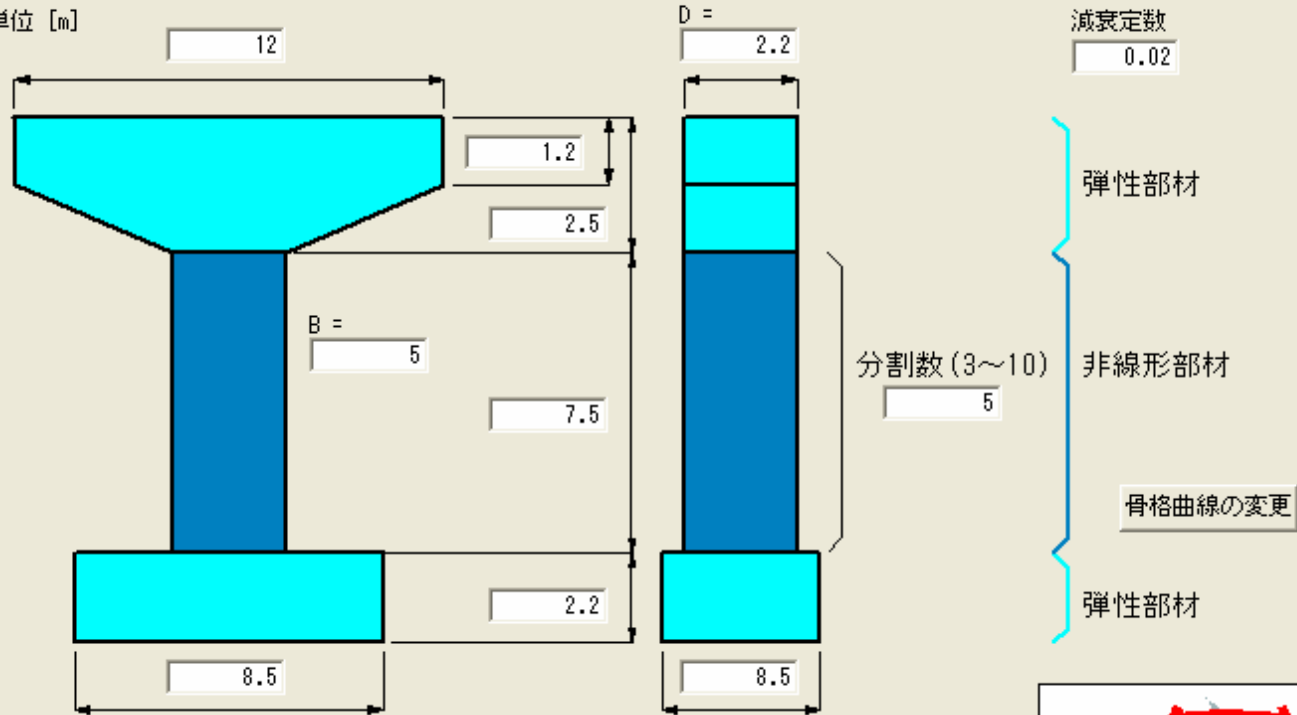
正面図



側面図

# 橋脚のモデル化(1)

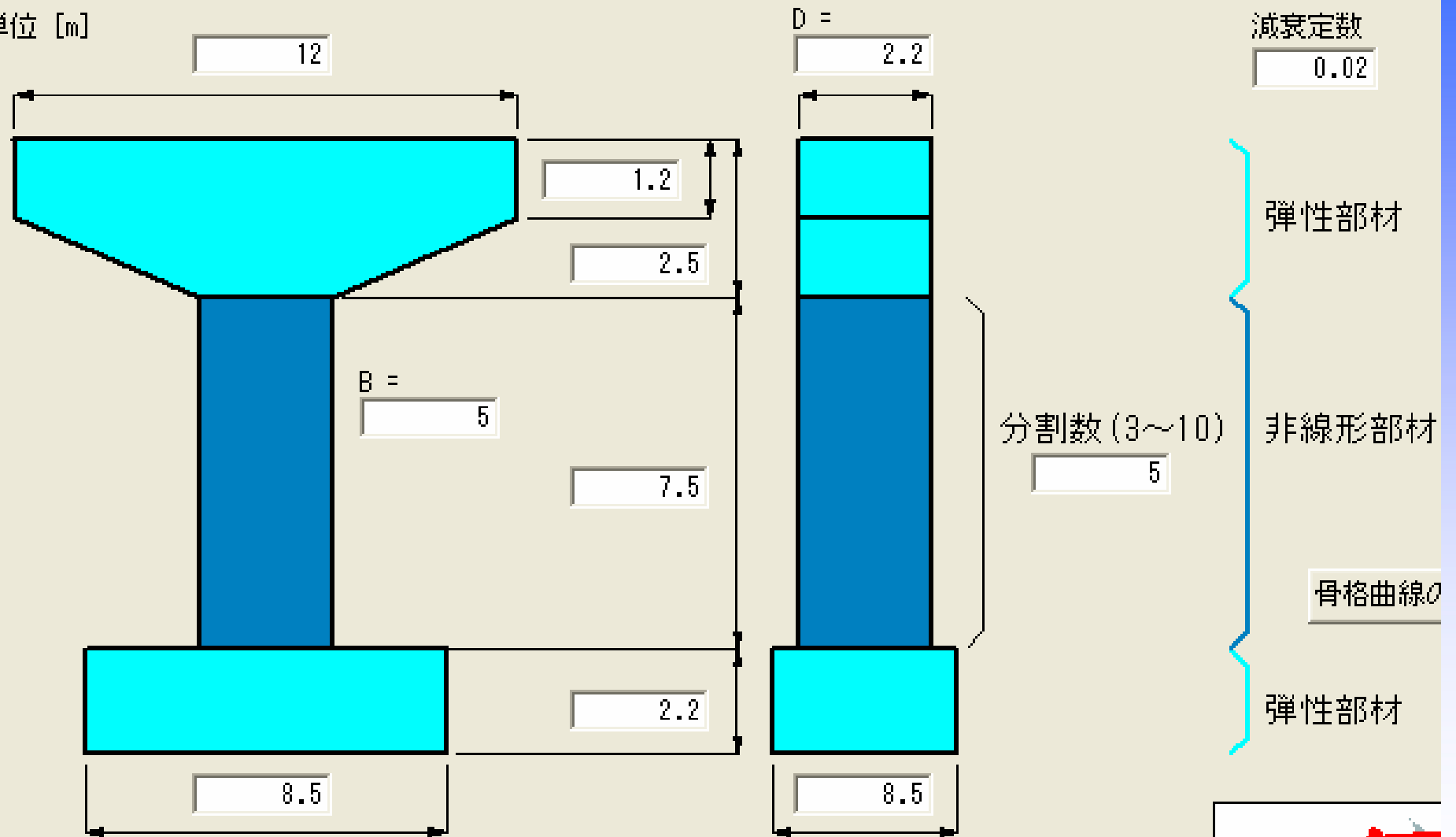
単位 [m]





# 橋脚のモデル化(1)

単位 [m]



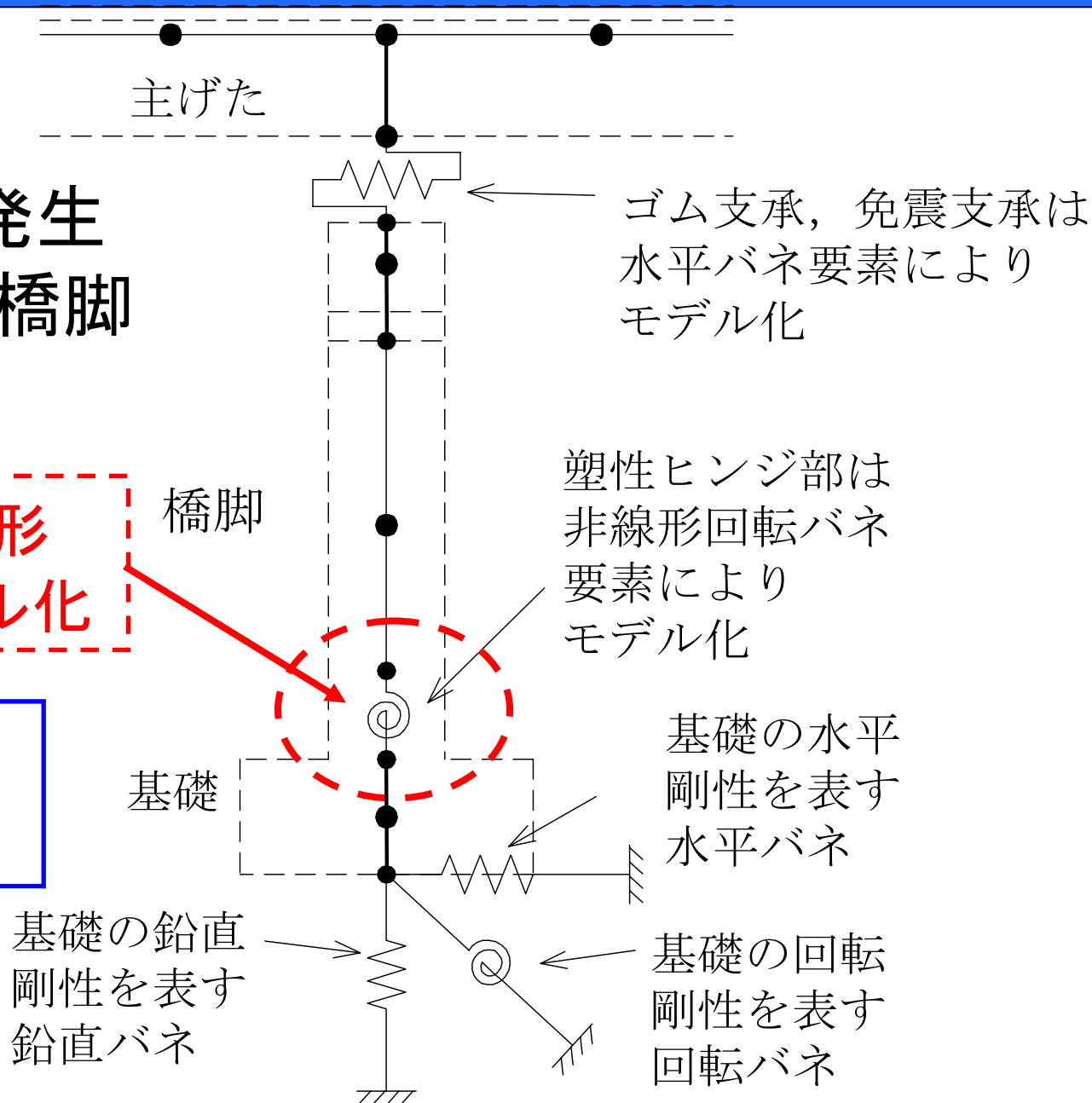
## 橋脚のモデル(その2)

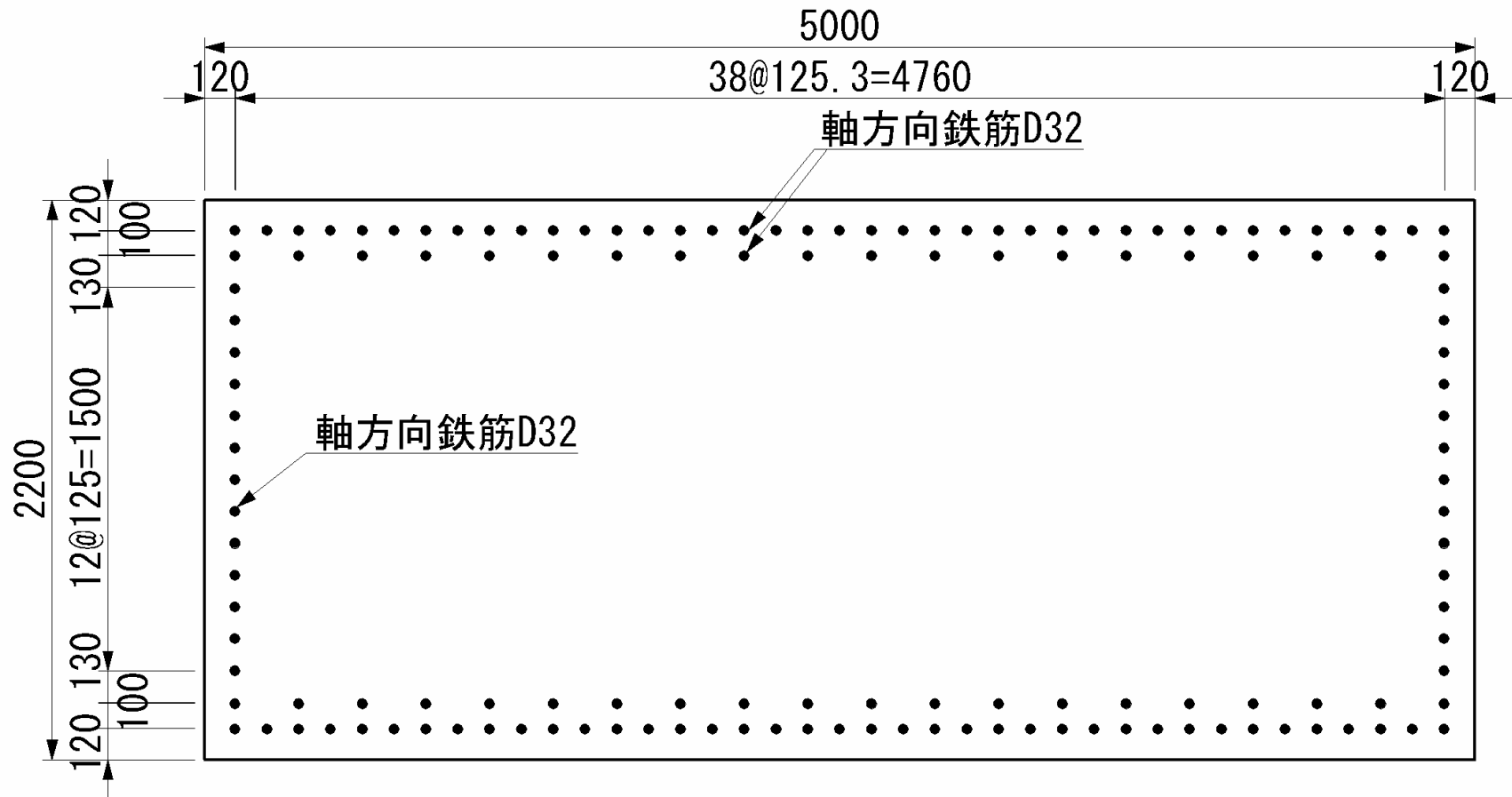
- 橋脚の基部など塑性ヒンジ区間が明確な場合は、塑性ヒンジ区間を非線形回転バネ要素でモデル化する方法が用いられる。本事例の場合には基部に塑性ヒンジが生じることが明確であるが、動的解析によって各部材要素がどのような非線形挙動をするかを見ることができるよう、橋脚の全ての要素に曲げモーメント～曲率関係を見込むモデル化を行っている。
- 橋脚はり部やフーチング部は、橋脚柱部に比較して耐力が大きいため弾性体としてモデル化する。

# 塑性ヒンジの発生 箇所が明確な橋脚 の解析モデル

橋脚基部は非線形  
回転バネでモデル化

DYMOでは非線形はり  
要素(曲げモーメント~  
曲率を採用)





帯鉄筋  
D19 ctc150

中間帯鉄筋の  
配置間隔は1m以内

## 橋脚のモデル化 (2)

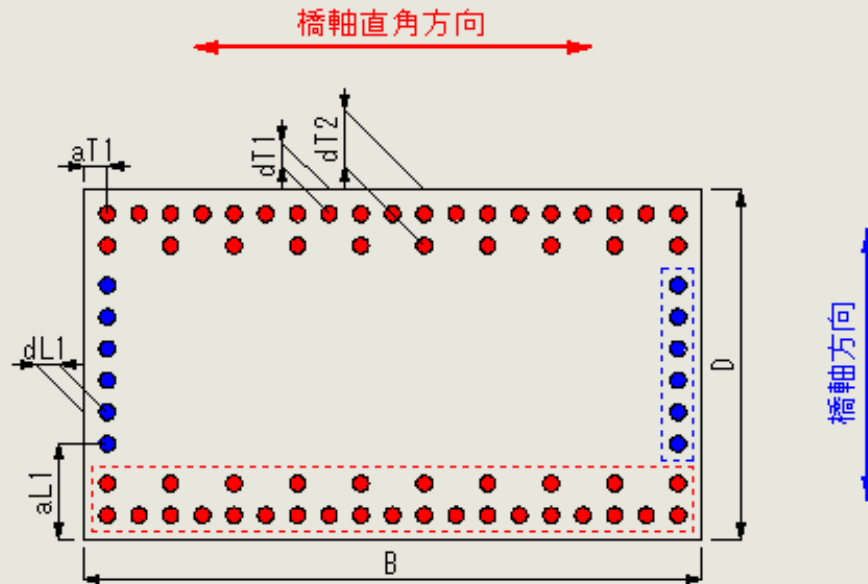
モデル図  実寸図

全体表示

拡大

縮小

更新



の部分だけ入力してください

● 橋軸直角方向に配置する軸方向鉄筋 段数

段	dT [mm]	1辺の本数	鉄筋径	aT [mm]
1	120	39	D32	120
2	220	20	D32	120

● 橋軸方向に配置する軸方向鉄筋 段数

段	dL [mm]	1辺の本数	鉄筋径	aL [mm]
1	120	13	D32	350

横拘束筋

間隔 s  [mm]

有効長 d  [mm]

1本あたりの断面積 Ah  [mm<sup>2</sup>]

■ 横拘束筋、帯鉄筋データの設定について...

帯鉄筋

間隔 a  [mm]

断面積 Aw  [mm<sup>2</sup>]

● 橋軸直角方向に配置する軸方向鉄筋 段数

段	dT [mm]	1辺の本数	鉄筋径	aT [mm]
1	120	39	D32	120
2	220	20	D32	120

横拘束筋

間隔  $s$   [mm]  
有効長  $d$   [mm]  
1本あたりの断面積  $A_h$   [mm<sup>2</sup>]

● 橋軸方向に配置する軸方向鉄筋 段数

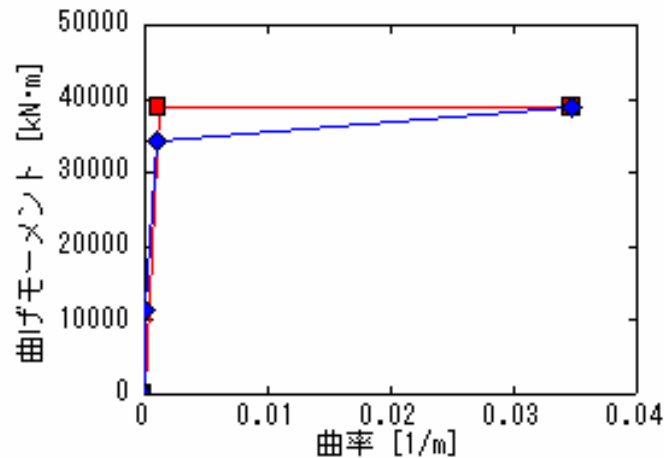
段	dL [mm]	1辺の本数	鉄筋径	aL [mm]
1	120	13	D32	350

帯鉄筋

間隔  $a$   [mm]  
断面積  $A_w$   [mm<sup>2</sup>]

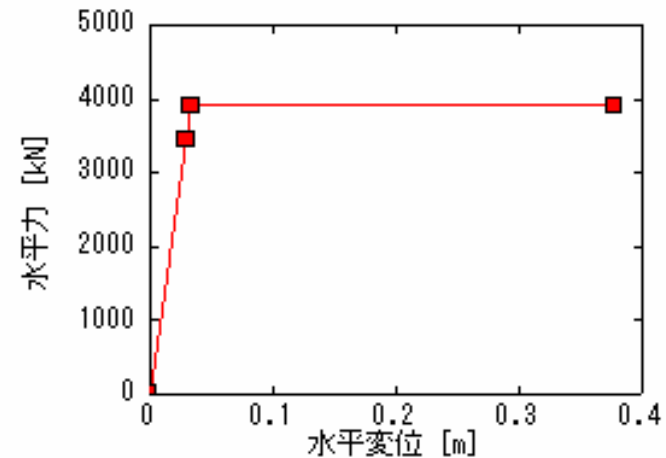
# 橋脚の非線形特性

【M~φ曲線 タイプII】



	ひびわれ	初降伏	降伏	終局
M [kN・m]	11383	34334	38923	38923
φ [1/m]	0.00009332	0.00104105	0.00118018	0.03473866

【P~δ曲線 タイプII】



	初降伏	降伏	終局
P [kN]	3449	3909	3909
δ [m]	0.0299	0.0339	0.3776

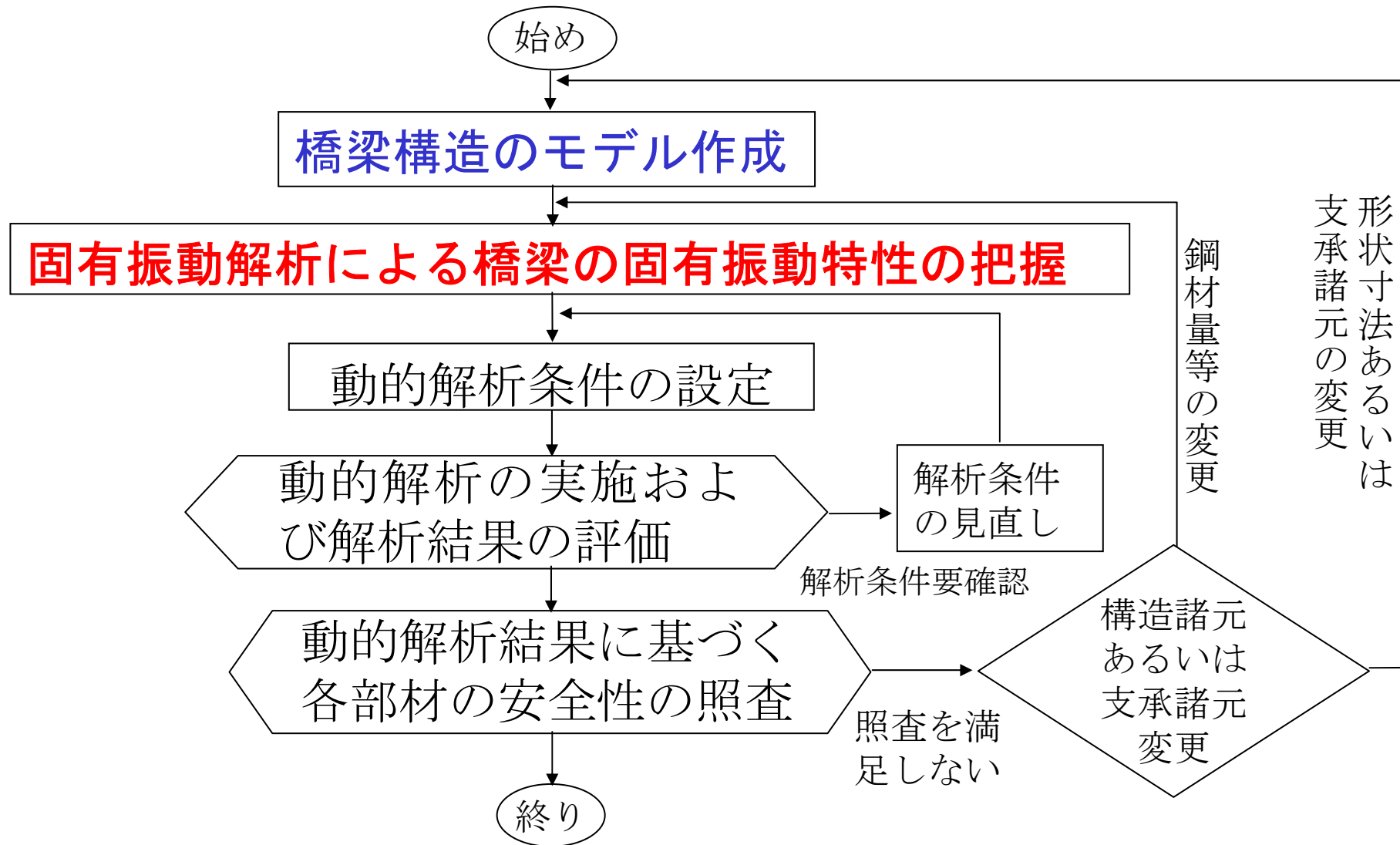
- 橋脚断面諸元から非線形特性(曲げモーメント~曲率)が柱高さ方向の各断面で求まる
- 各断面の非線形特性を柱高さ方向に積分して橋脚の荷重~変位特性が求まる

## 基礎および地盤

- キャパシティデザインに基づき、基礎は、橋脚躯体の終局水平耐力を用いて基礎の降伏に達しないように設計する。
- 地盤も含めた基礎の履歴挙動は複雑であるが、本解析ではフーチング底面位置における線形のバネ(水平、鉛直、回転成分)としてモデル化する。



# 動的解析による耐震性能照査の流れ

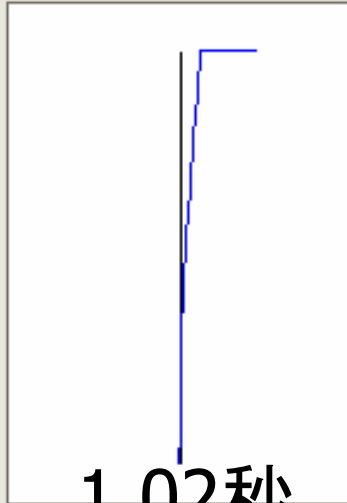


## 固有振動解析

- 固有振動解析を行うことにより、固有周期（逆数が固有振動数）、固有振動モードの他に、刺激係数や有効質量などといった構造物の振動特性に関する指標を振動次数ごとに算出できる。
- ここで、刺激係数（各々の振動次数が全体の振動を刺激する割合）や有効質量（振動に影響する質量の割合）は地震時にどの次数の振動モードが支配的となるかを判断する指標となる。

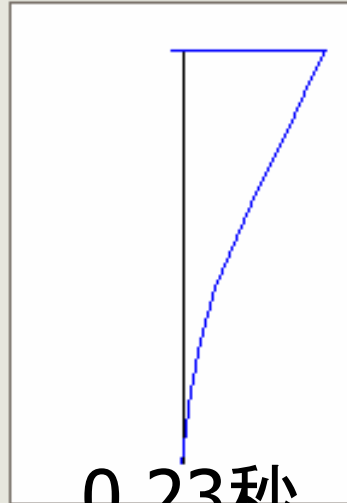
# 解析結果

【1次】



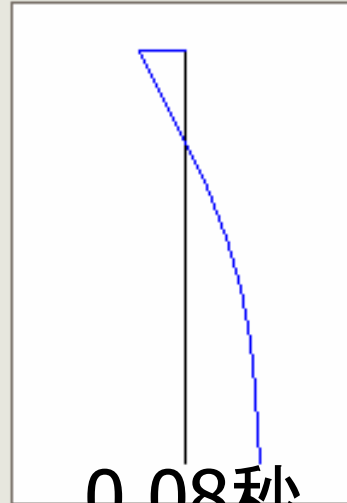
1.02秒

【2次】



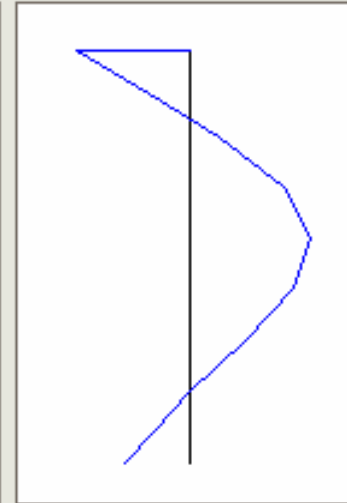
0.23秒

【3次】

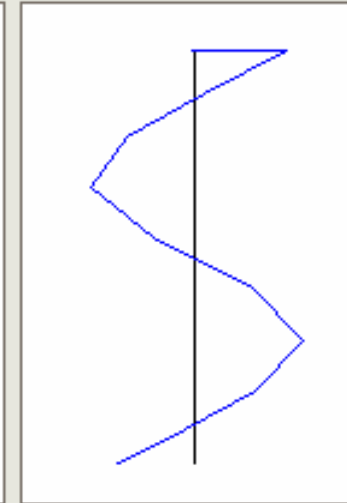


0.08秒

【4次】



【5次】



次数	固有周期 [sec]	固有振動数 [Hz]	刺激係数
1	1.02	0.98	24.07974
2	0.23	4.36	13.87559
3	0.08	12.70	21.74316
4	0.04	27.47	-1.30665
5	0.02	65.07	0.18299
6	0.01	126.36	-0.07767
7	0.00	234.65	-0.01880
8	0.00	374.17	0.00569
9	0.00	490.78	0.00220
10	0.00	786.97	-0.00002
11	0.00	3309.48	0.00116

1次モード: ゴム支承 / 桁並進

2次モード: 橋脚曲げ変形

3次モード: 基礎並進

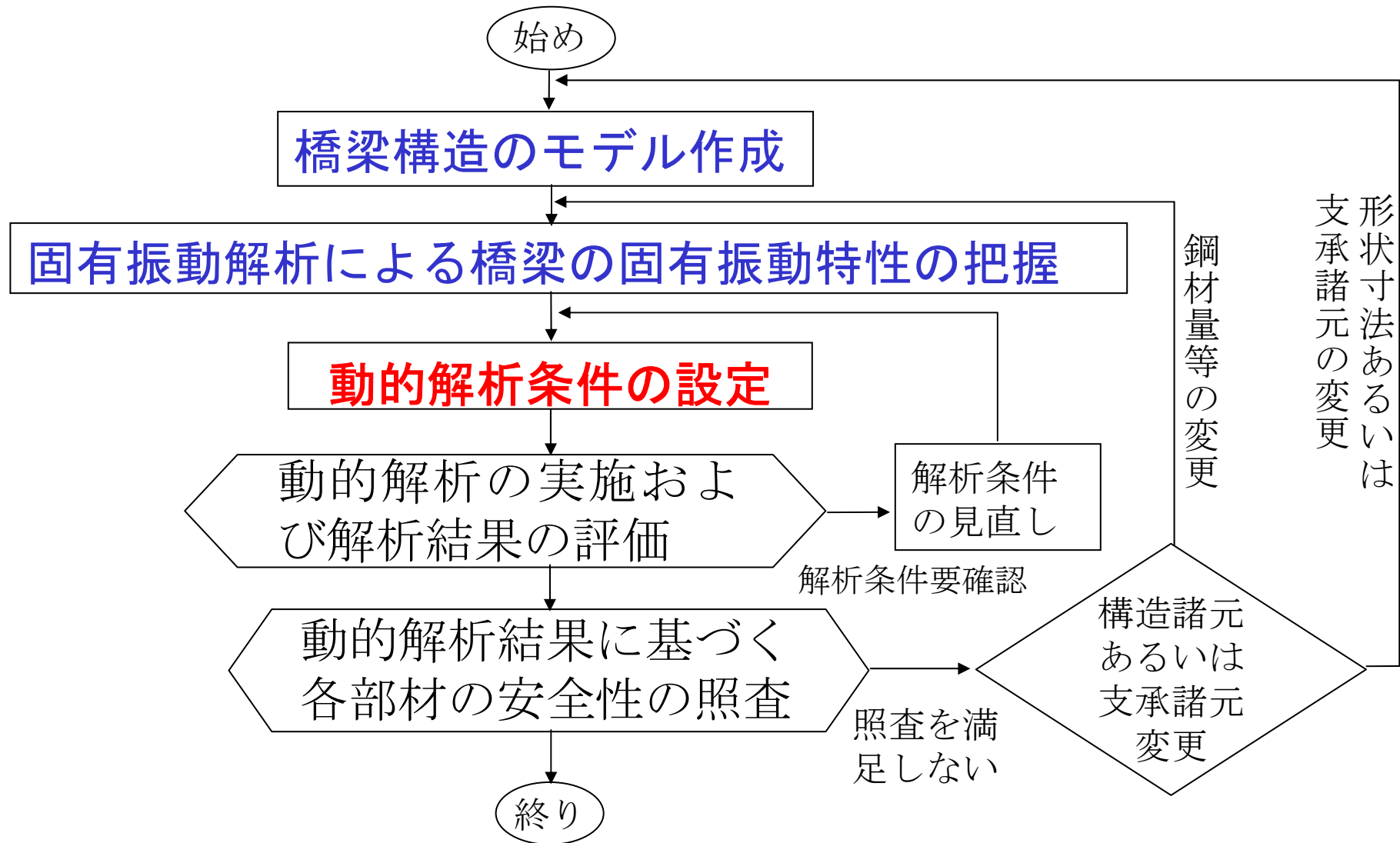
一般的な橋梁の固有周期  
0.5秒 ~ 1.5秒

次数	固有周期 [sec]	固有振動数 [Hz]	刺激係数
1	1.02	0.98	24.07974
2	0.23	4.36	13.87559
3	0.08	12.70	21.74316
4	0.04	27.47	-1.30665
5	0.02	65.07	0.18299
6	0.01	126.36	-0.07767
7	0.00	234.65	-0.01880
8	0.00	374.17	0.00569
9	0.00	490.78	0.00220
10	0.00	786.97	-0.00002
11	0.00	3309.48	0.00116

# 固有振動解析のチェックポイント

- 固有値（固有モードと固有振動数）が得られない場合（計算が途中で止まる、エラー終了する）は、構造モデルが適切に構成されていない（部材がつながっていない）、剛性や重量情報が抜けているなどの可能性がある
- 固有振動解析の結果で、一次モードの固有周期が長大橋のように数秒～10数秒となっている場合は、部材剛性（支承ばね、橋脚剛性、基礎ばねなど）の値が異常に小さい（柔らかい）可能性がある
- 逆に一次モードの固有周期が0.1秒より短いなど異常な短周期となっている場合は、部材剛性が硬いかどこかの節点が不必要に拘束されている可能性がある

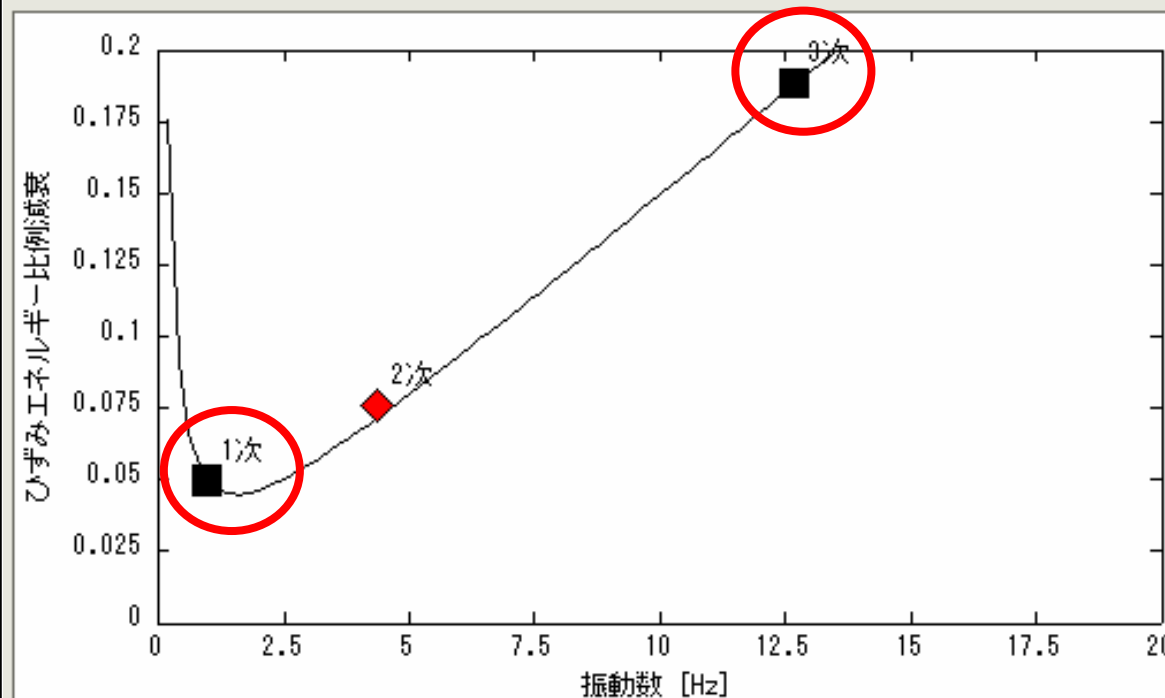
# 動的解析による耐震性能照査の流れ



# 減衰モデル

- 減衰定数の設定方法にはいろいろな方法があるが、ここでは減衰マトリックスを構造モデルの質量マトリックス  $[M]$  と剛性マトリックス  $[K]$  に比例する Rayleigh 減衰 ( $[C] = \alpha [M] + \beta [K]$ ) として与えた(道路橋示方書に解説されている方法のひとつ)。
- 本橋の主要な2つの振動モードに対するモード減衰定数から係数  $\alpha$ 、 $\beta$  を設定した。なお、ここでは各部材の材料減衰定数を、橋脚では2%、ゴム支承では4%、基礎では20%としている。
- 主要な振動モードは、構造モデルの振動特性に応じて選定するのが合理的。

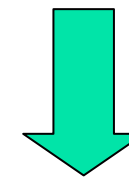
## 減衰の設定



$\alpha =$  0.433867  $\beta =$  0.004659

次数	固有周期 [sec]	固有振動数 [Hz]	刺激係数	ひずみエネルギー比例減衰定数	選択
1	1.02	0.98	24.07974	0.04952	<input checked="" type="checkbox"/>
2	0.23	4.36	13.87559	0.07603	<input type="checkbox"/>
3	0.08	12.70	21.74316	0.18861	<input checked="" type="checkbox"/>
4	0.04	27.47	-1.30665	0.08788	<input type="checkbox"/>
5	0.02	65.07	0.18299	0.06697	<input type="checkbox"/>
6	0.01	126.36	-0.07767	0.02902	<input type="checkbox"/>
7	0.00	234.65	-0.01880	0.02119	<input type="checkbox"/>
8	0.00	374.17	0.00569	0.02023	<input type="checkbox"/>

ここでの事例では、  
主要モードの1次～3  
次のモード減衰(ひず  
みエネルギー比例減衰定  
数)を考慮した減衰～  
振動数特性を設定



左記減衰ラインは、1  
次モードと3次モード  
を通る双曲線



## 解析手法(積分方法)

- 動的解析には、一般的に用いられることの多い Newmark  $\beta$  法 ( $\beta = 0.25$ あるいは $1/4$ として表記される)による時刻歴応答解析法を適用する。
- 線形解析の積分時間間隔としては、0.01秒程度を用いる場合が一般的であるが、橋脚の履歴特性に非線形性を考慮する非線形解析では、一般に積分時間間隔は0.002秒(1/500秒)程度以下とする場合が多い(0.01秒では剛性の変化時点を捉えられずに解析精度が悪くなる場合がある)。

地震動タイプ	地盤種別	地震波形数	地震名	最大加速度
タイプⅠ	Ⅰ種	3波形	1978宮城県沖、 1993北海道南西沖	319gal、320gal、323gal
	Ⅱ種	3波形	1968日向灘沖、 1994北海道東方沖	363gal、385gal、365gal
	Ⅲ種	3波形	1983日本海中部、 1994北海道東方沖	433gal、424gal、439gal

地震動タイプ	地盤種別	地震波形数	地震名	最大加速度
タイプⅡ	Ⅰ種	3波形	1995兵庫県南部地震	812gal、766gal、780gal
	Ⅱ種	3波形	1995兵庫県南部地震	687gal、687gal、736gal
	Ⅲ種	3波形	1995兵庫県南部地震	591gal、557gal、619gal

# 入力地震動の選定

地震動

選択されている地震動

道路橋示方書V参考資料に示されている地震動

変更...

使用する地震動・時間きざみ

0.01

時間分割数

5

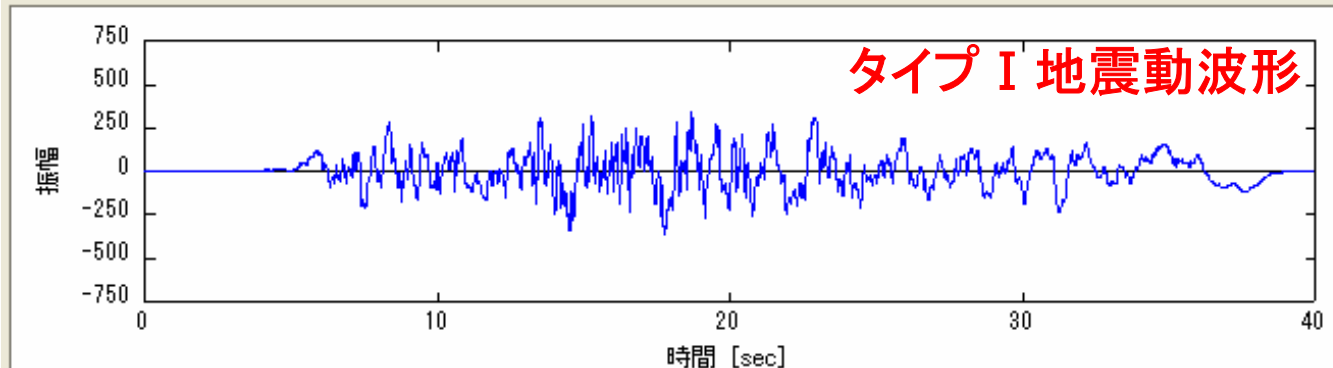
計算時間間隔

0.002 [sec]

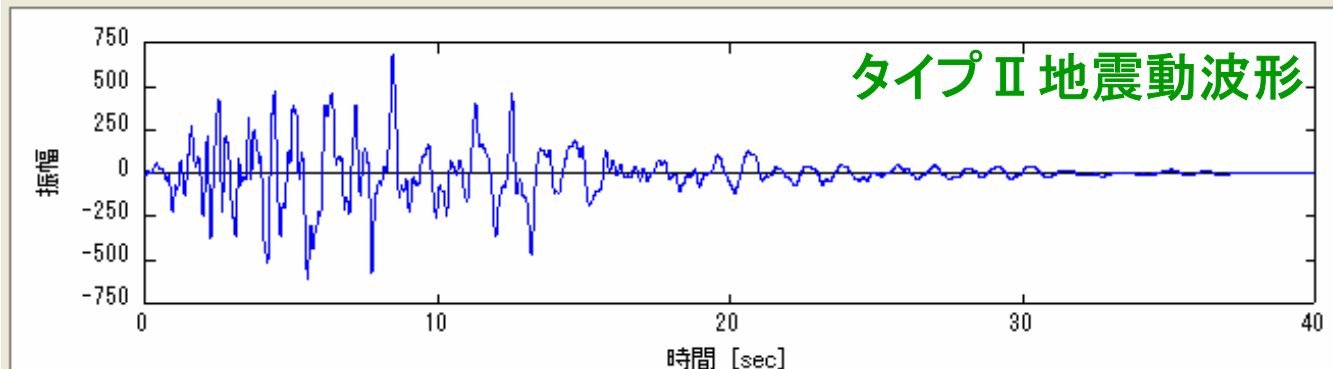
■入力可能な地震波形

No.	種別	名称	規格	加速度	振幅	時間	単位
1	+M	道路橋示方書V参考資料に示されている地震動	1-1-1	0.2	250	40	m/s <sup>2</sup>
		道路橋示方書V参考資料に示されている地震動	1-1-2	0.2	250	40	m/s <sup>2</sup>
		道路橋示方書V参考資料に示されている地震動	1-1-3	0.2	250	40	m/s <sup>2</sup>
		道路橋示方書V参考資料に示されている地震動	1-1-4	0.2	250	40	m/s <sup>2</sup>
2	+M	道路橋示方書V参考資料に示されている地震動	2-1-1	0.2	250	40	m/s <sup>2</sup>
		道路橋示方書V参考資料に示されている地震動	2-1-2	0.2	250	40	m/s <sup>2</sup>
		道路橋示方書V参考資料に示されている地震動	2-1-3	0.2	250	40	m/s <sup>2</sup>
		道路橋示方書V参考資料に示されている地震動	2-1-4	0.2	250	40	m/s <sup>2</sup>

【タイプI波形名称：タイプI-地盤II-1】



【タイプII波形名称：タイプII-地盤II-1】



タイプI地震動波形



主要動が長く、長周期側での振幅が大きい地震動特性を持つ

タイプII地震動波形



主要動は短く、特に短周期側での振幅が大きい地震動特性を持つ

# 入力地震動の選定

地震動

選択されている地震動

道路橋示方書V参考資料に示されている地震動

変更...

使用する地震動・時間きざみ

0.01

時間分割数

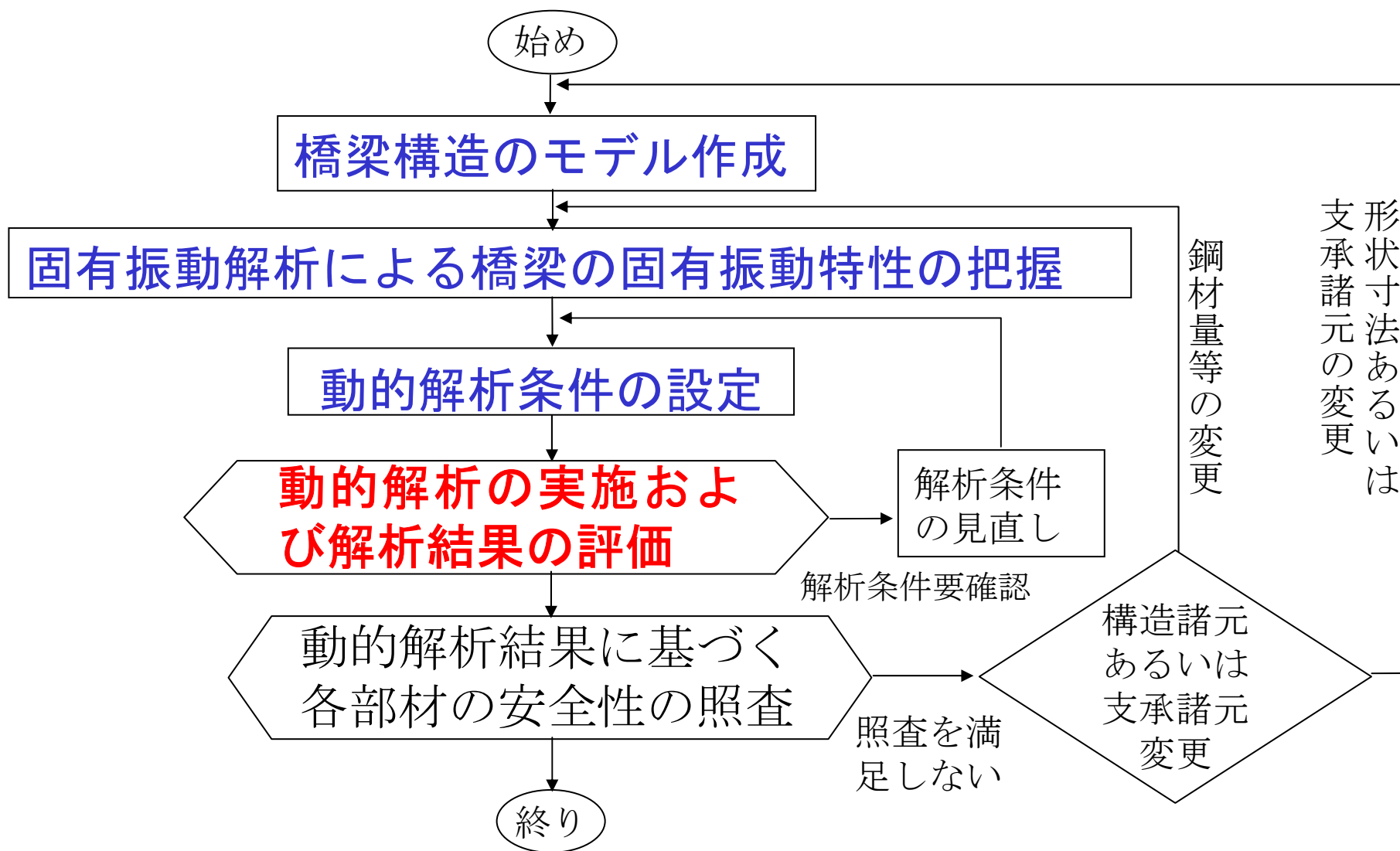
5

計算時間間隔

0.002 [sec]

**地震波形の単位や方向のチェック**

# 動的解析による耐震性能照査の流れ



# 応答計算アニメーション

DYMOによる実際の計算例の紹介  
橋軸方向の変位応答

## アニメで見る上部構造と橋脚の振動

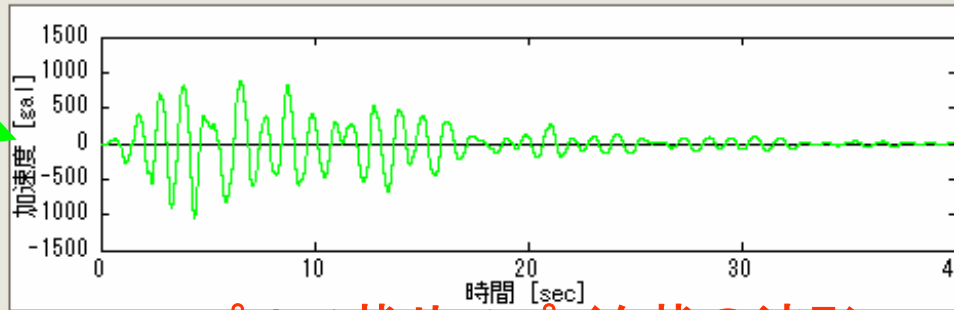
- ◆ 上部構造を表す青い球体と橋脚は同じような動き方をしている
- ◆ 青い球体が相対的に大きく振動しており、ゆっくり動いているように見える

# 応答加速度

タイプI    **タイプII**

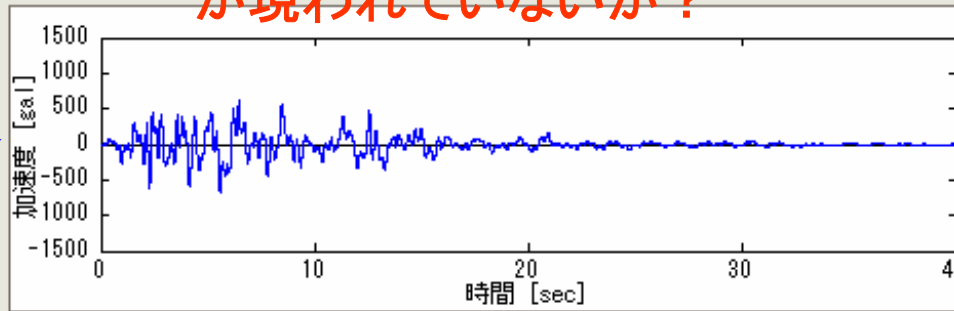
## タイプII地震動

【上部構造慣性力作用位置】

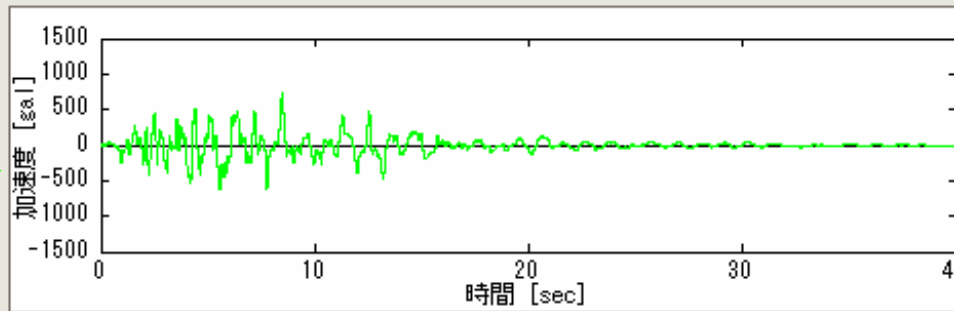


パルス状やスパイク状の波形  
が現われていないか？

【選択位置】



【基礎底面】



上部構造と下部構造で加速度波形の周期特性が明らかに異なる

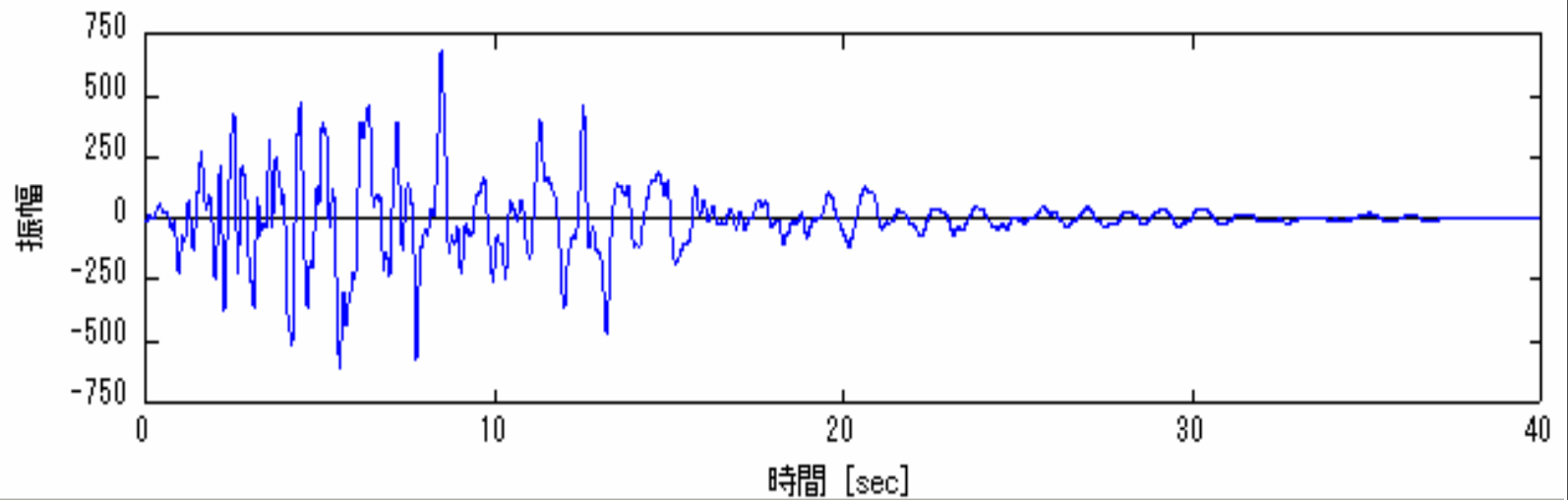


上部構造はゴム支承の影響で比較的長い周期成分を持つが、橋脚と基礎は短い周期成分が顕著に現われる



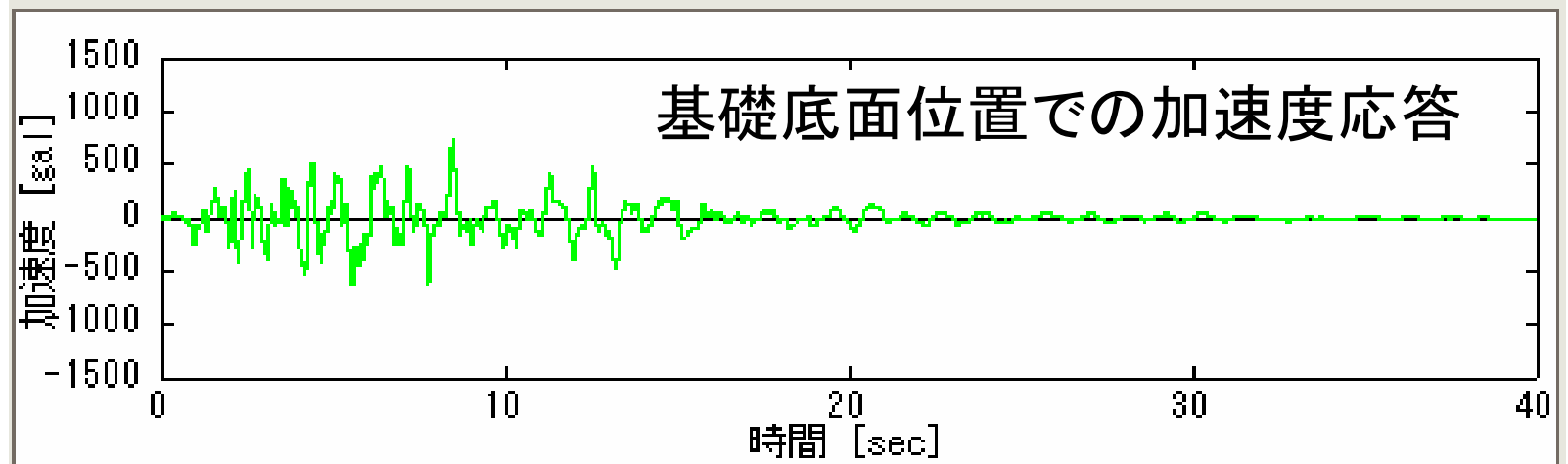
入力波

【タイプⅡ波形名称：タイプⅡ-地盤Ⅱ-1】



応答波

【基礎底面】

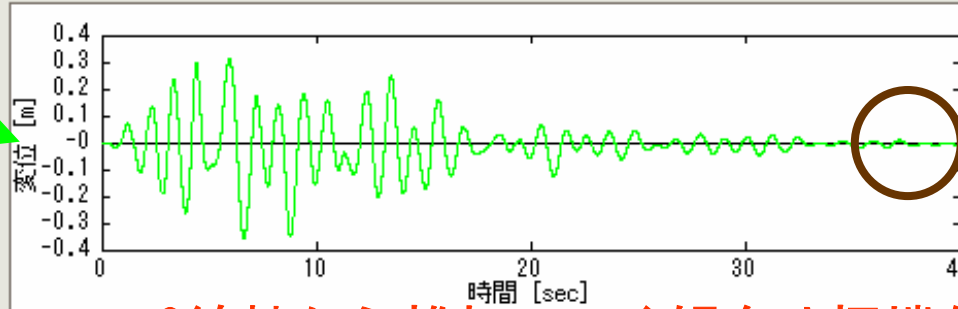


# 応答変位

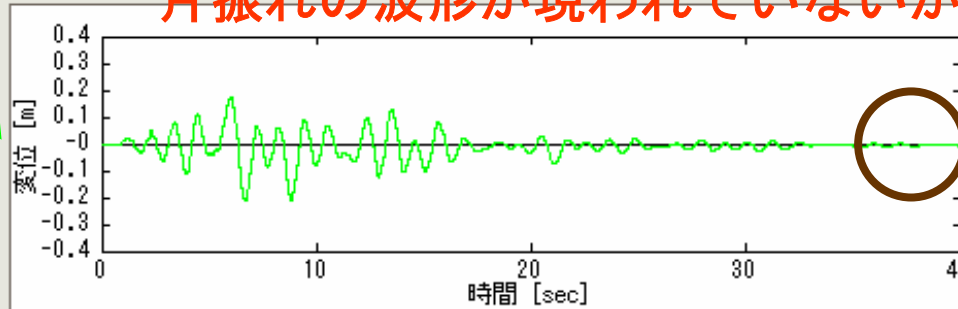
タイプ I    **タイプ II**

## タイプ II 地震動

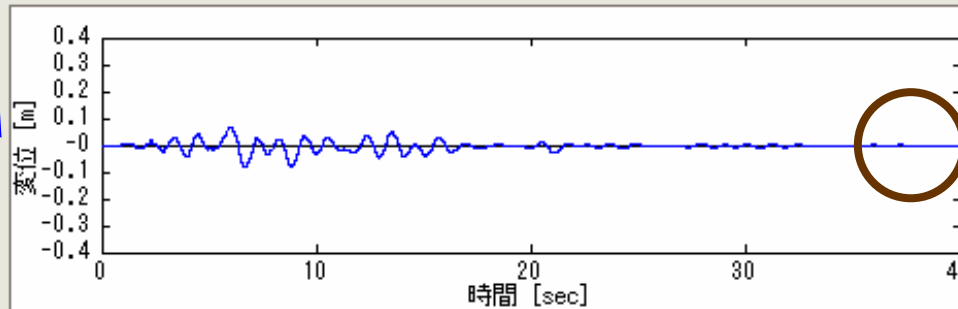
【上部構造慣性力作用位置】



【橋脚天端】



【選択位置】



0線軸から離れていく傾向や極端な片振れの波形が現われていないか？

全体に上部構造と同様な周期成分を持つ応答波形が現われる

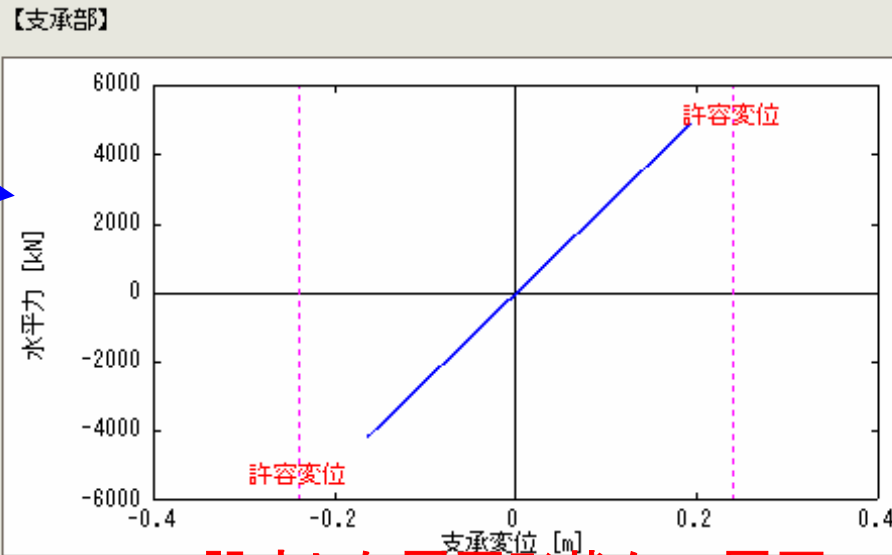
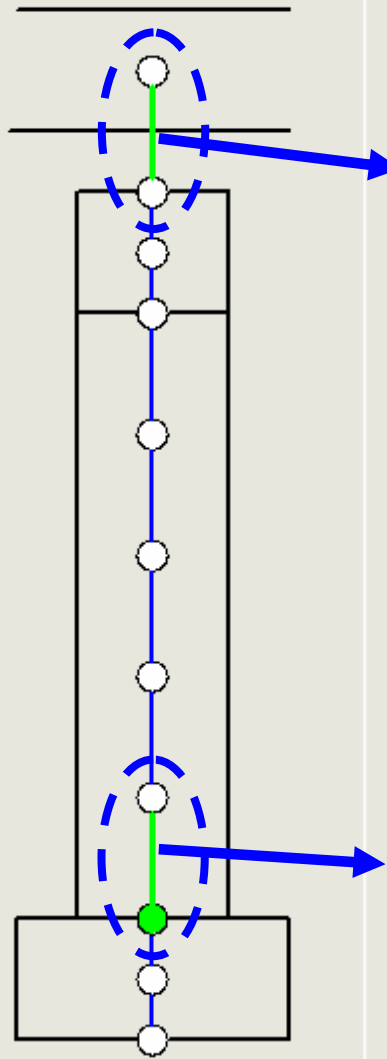


上部構造の応答が支配的となっており、ゴム支承の影響で上部構造の変位振幅が大きくなる

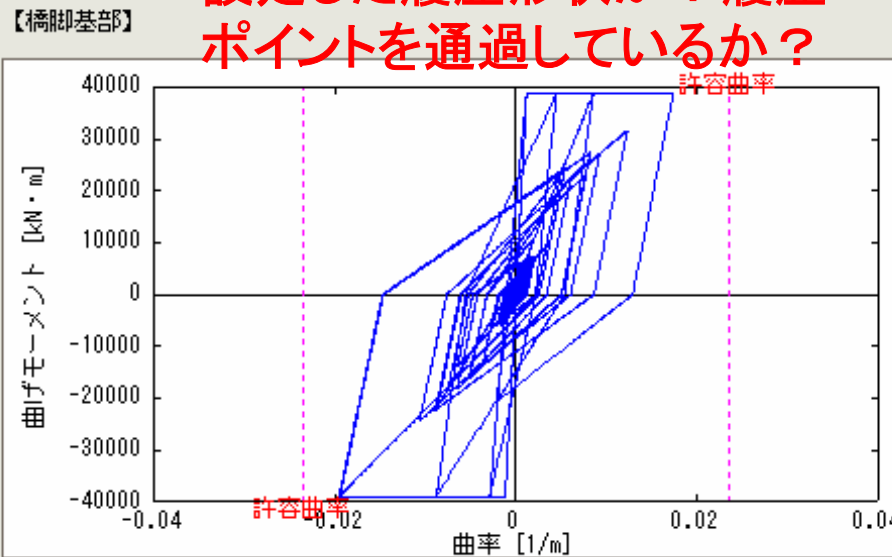
残留変位はほとんど見られない

# 応答履歴

タイプI    タイプII

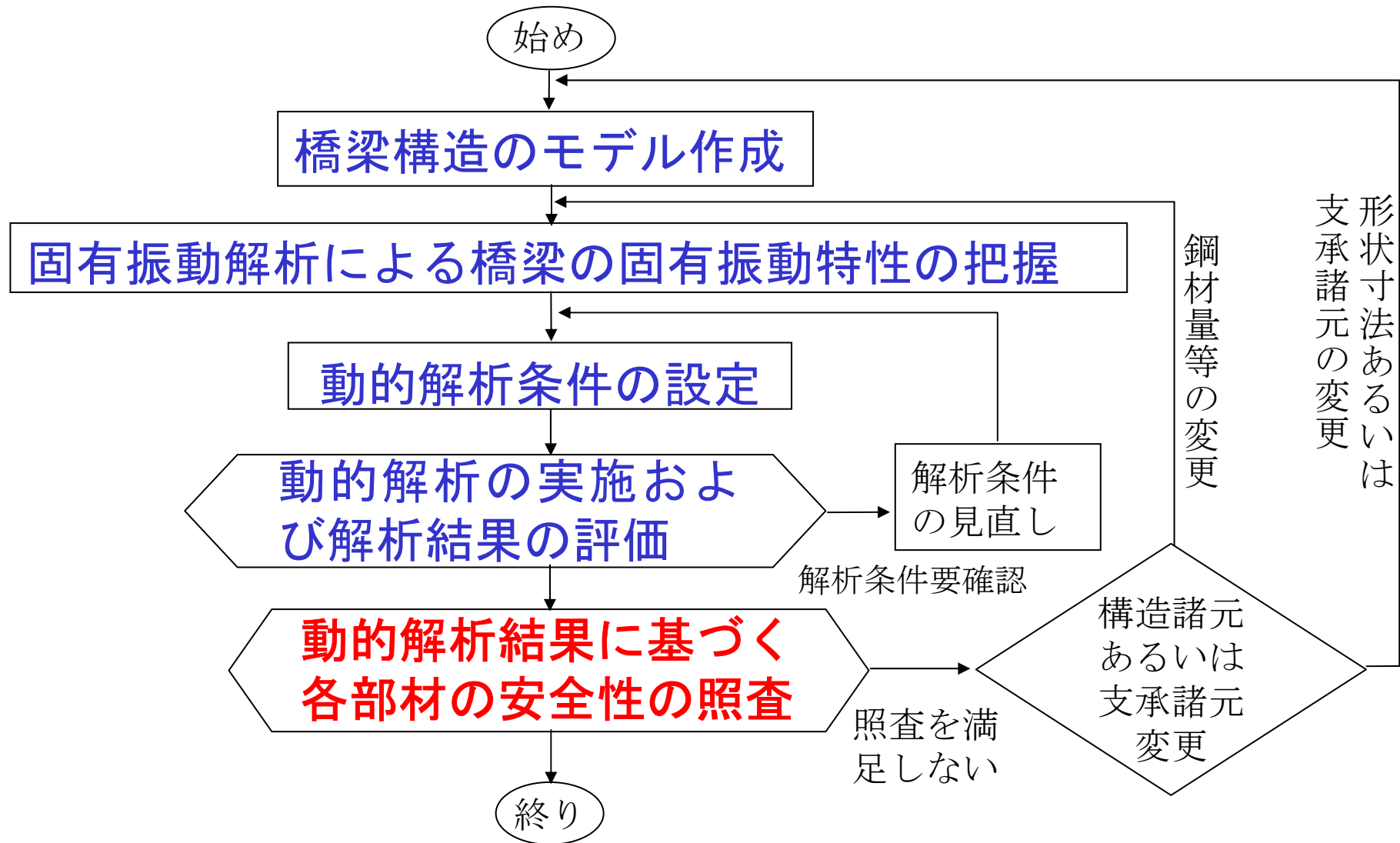


設定した履歴形状か？履歴  
ポイントを通過しているか？



- ◆ゴム支承は線形ばねのため、履歴を描かない
- ◆250%せん断ひずみ相当の水平変位の許容値を満足
- ◆橋脚基部では、降伏を越え部材が塑性ヒンジ化する
- ◆発生曲率は許容値を満足する

# 動的解析による耐震性能照査の流れ



タイプⅠ

タイプⅡ

	応答値	許容値	判定
橋脚の塑性率	5.70	7.76	OK
橋脚の残留変位	0.0956	0.1000	OK
橋脚のせん断力	3893	8828	OK
ゴム支承のせん断ひずみ	2.007	2.500	OK

## 【許容値】

**橋脚の塑性率** : ひび割れ進展後かぶりコンクリートが剥離する前の状態

**橋脚の残留変位** : 橋脚下端から上部構造の慣性力作用位置までの高さの1/100(地震後の鉛直荷重を維持可能。地震後の速やかな機能回復を目的)

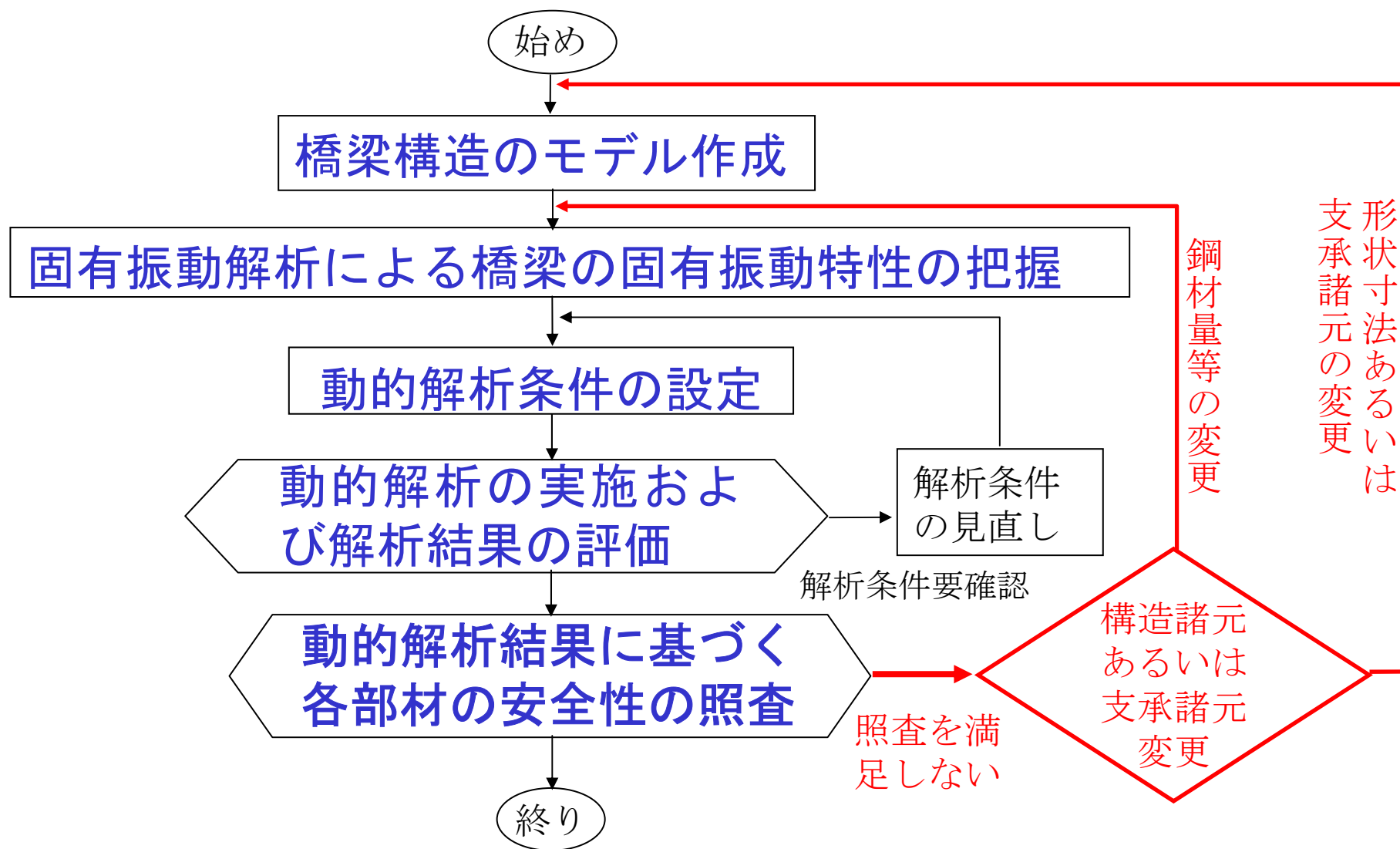
タイプ I    **タイプ II**

	応答値	許容値	判 定
橋脚の塑性率	5.70	7.76	OK
橋脚の残留変位	0.0956	0.1000	OK
橋脚のせん断力	3893	8828	OK
ゴム支承のせん断ひずみ	2.007	2.500	OK

**橋脚のせん断耐力** : 脆性破壊を避けるためのせん断耐力の確保(曲げ破壊となる設計が望ましい)

**ゴム支承せん断ひずみ** : ゴムの荷重～変位関係が線形領域で安定した特性を示す範囲(250%)

# 動的解析による耐震性能照査の流れ



ご静聴ありがとうございました。

DYMOを用いた動的解析例

単柱式鉄筋コンクリート橋脚の  
動的耐震設計例