

「ソフトコンピューターを用いた 最適設計の試み」

- － ヒューリスティックによる免震装置の
最適選択システム －

信州大学工学部

田守伸一郎

ヒューリスティックによる免震装置の 最適選択システム

目的

免震構造物の制約条件や設計条件を満足するような免震装置の選択・配置を得るシステムを開発する

背景

免震建物の設計における制約条件，設計条件

積層ゴム軸力（長期・短期），偏心率，応答変位，構造躯体の層せん断力

繰り返し応答計算

経験が必要

効果

- ・ 設計の省力化
免震建物の時刻歴応答計算繰り返ししなくてよい
- ・ 設計の自由度の拡大 平面・立面形状
経験が少なくても自由な形状の建物を設計できる

ソフトコンピューティングとは

- 複雑な非線形システムをそのまま取り扱うコンピュータ手法
 - ファジー理論: 不正確さ
 - ニューラルネットワーク: 学習
 - 確率的推論: 不確かさ
- 建築(構造・計画・設備)のあらゆる分野で実用化されている。
 - 構造: 構造計画, 形態生成, 制御, 最適化
 - 参考文献:
 - やさしくわかる建築・都市・環境のためのソフトコンピューティング, 日本建築学会, 2005

ヒューリスティックの手法

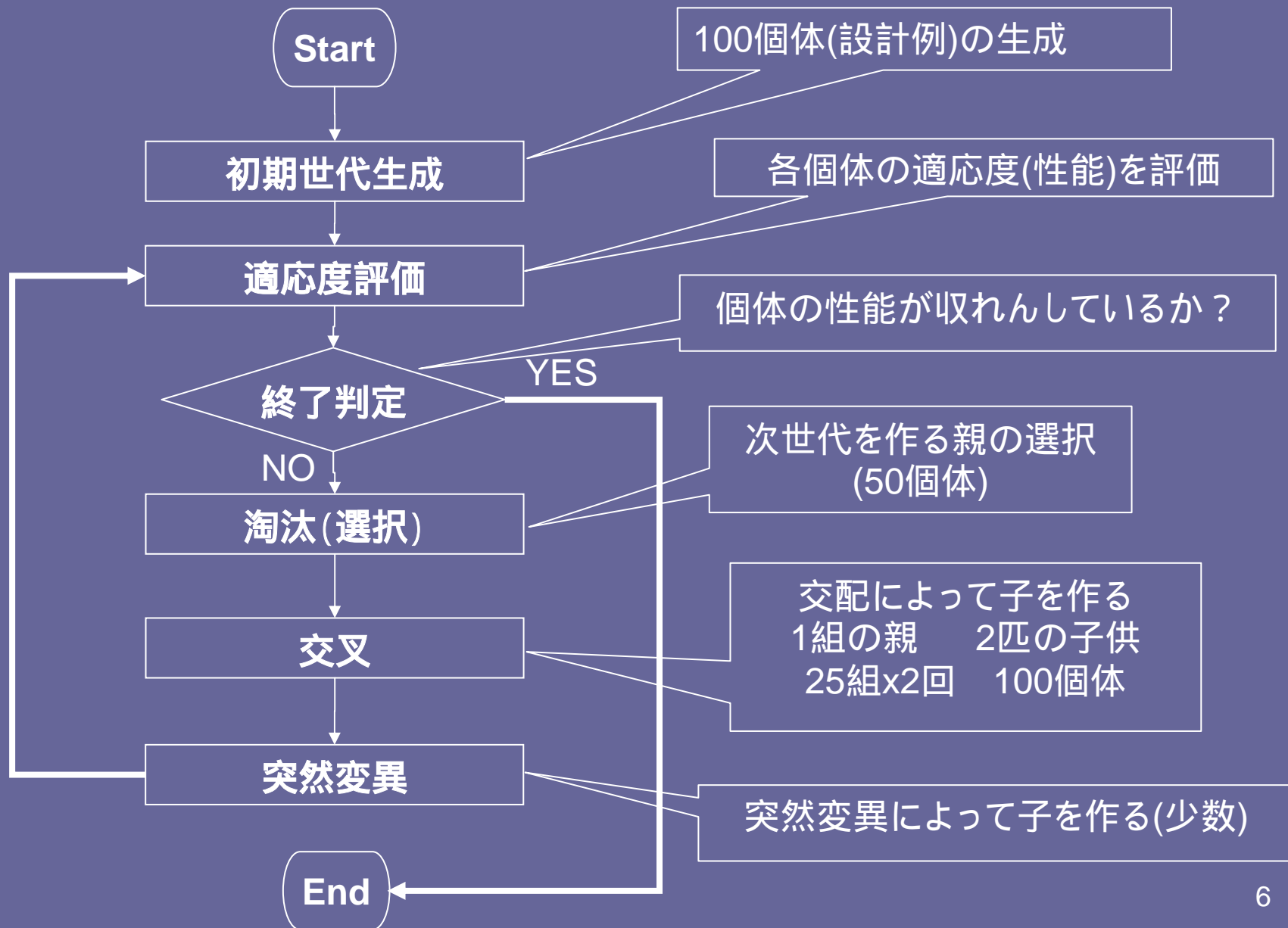
- 必ず正しい答えが導けるわけではないが、ある程度のレベルで正解に近い解を得ることが出来る方法
 - 遺伝的アルゴリズム(GA)
 - 生命の進化を模した方法
 - 性能のよい個体が生き残る
 - 焼き鈍し法(SA)
 - 突然変異の確率を操作する
 - タブー(TA)
 - 突然変異を操作する、性能が悪くなる変異を禁止(タブー)する

遺伝的アルゴリズムの特徴

GA: Genetic Algorithm

- 最適化問題を解く方法のひとつ
- 生物界で交配・突然変異によって親の特性を引き継ぎつつも、新しい性質を持った個体が生まれることを利用する。
- 交配・突然変異を繰り返し、よりよい性質を持った個体を作り出す。

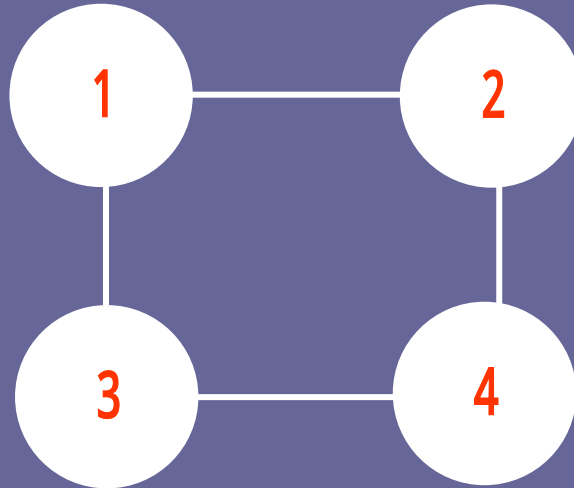
GAの流れ



GAの要素

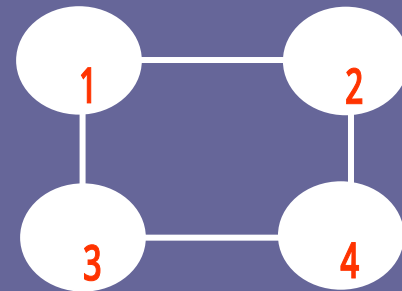
- 遺伝子の生成と「免震装置の配置計画」への割り当て
(1)(0)のビットで装置を表す

装置種別	遺伝子
600	00
700	01
800	10
900	11



装置位置	1	2	3	4
遺伝子	00	01	11	00
装置種別	600	700	900	600

GAの要素: 交叉



交叉位置(ランダムに定める)

遺伝子	1	1	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	900	700	600	800				
位置	1	2	3	4				

1	1	0	1	1	1	1	0
900	700	900	800				
1	2	3	4				

遺伝子	0	1	1	1	1	1	1	0
装置径 (mm)	700	900	900	800				
位置	1	2	3	4				

0	1	1	1	0	0	1	0
700	900	600	800				
1	2	3	4				

- 交叉位置はビットのどこでもよい
- 一点交叉, 二点交叉を適当に組み合わせる

- 1点交叉: 交叉点が一カ所
- 2点交叉: 交叉点が二カ所

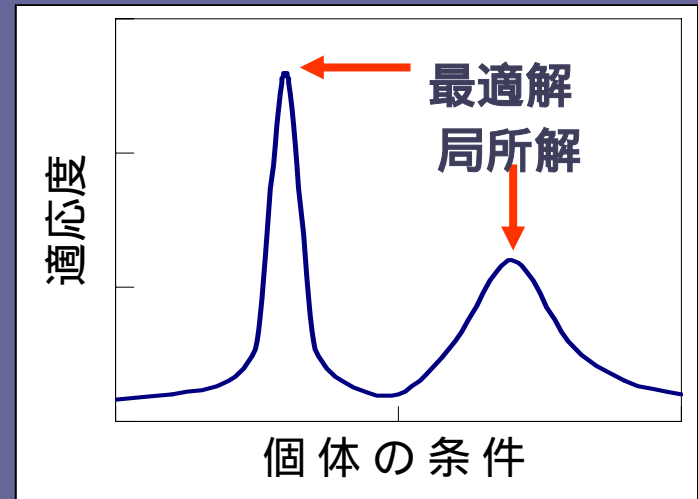
GAの要素：突然変異

遺伝子	1	1	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	900	700	600	800				
位置	1	2	3	4				

突然変異

遺伝子	1	0	0	1	0	1	1	0
装置径 (mm)	800	700	700	800				
位置	1	2	3	4				

- ある遺伝子の0,1を強制的に入れ替える。
- 親の世代に無かった特性を持つ個体を作り出せる可能性がある。
- 局所解から脱出し,探索範囲を広げられる。



GAの要素：選択・淘汰

- 次世代の親となる個体を選ぶ

- エリート選択

- 適応度の高い個体を残す。探索能力に優れているが、探索が局所解に陥る場合がある。

- ルーレット選択

- 適応度に比例した確率で子孫を残す方法

- ランク選択

- 適応度によって各個体をランクづけし、あらかじめ各ランクに対する確率で子孫を残す。

GAの要素：選択・淘汰

- ルーレット選択
 - 適応度に比例した確率で子孫を残す方法

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}$$

P_i : i 番目の個体を選ぶ確率

f_i : i 番目の個体の適応度

GAの要素：選択・淘汰

- ランク選択

- 各個体はその適応度ごとにランキングされている。
- 選択確率は、ランクに依存する。
- 適応度の高い順に個体を並べ、いくつかのグループ分けをしてランキングしてもよい。

ランク	個体 #	適応度(0 ~ 3)	選択確率
1	1	2.5以上	0.329
2	3	2.5未満 ~ 1.2	0.276
3	4	1.2未満 ~ 1.0	0.158
4	2	1.0未満 ~ 0.8	0.132
5	5	0.8未満	0.105

GAのポイント

- 選択と突然変異の設定方法がGAの効率にとって重要。
- エリート選択だけでは局所解に陥りやすい。
- 突然変異する個体の割合を増やしすぎると、ランダムに条件を選んでいるのと同じになってしまうので、最適解を得るために膨大な計算をすることになる。
- 適応度の高い個体を残しつつ、探索範囲をできるだけ広く保った方がよい。

GAの免震構造物への適用

免震装置の組み合わせ

- 積層ゴム + 履歴系ダンパー
 - RB, LRB, HRB, 鋼棒ダンパー, 鉛ダンパー
- 積層ゴム支承 + 粘性系ダンパー
 - オイルダンパー
- 滑り支承 + 積層ゴム支承
 - RB, LRB, SL

構造形式

- 基礎免震：
 - 上部構造を剛体と見なせる
- 上部構造の剛性が低い基礎免震, 中間層免震
 - 多質点系による解析

これまでの解析対象

特定の設計条件への適応

- 免震装置のコストを評価
- 水平動・上下動による変動軸力を評価
- 建物外周に剛性の高い装置を配置し、ねじりを抑制する。
- 上部構造の層間変位を評価

適応度(性能値)の評価

評価項目と評価式の設定

「免震層に対して」

- 長期軸力
 - 偏心率
 - 免震層の降伏層せん断力係数
 - 固有周期
 - 減衰定数
 - 応答変位
 - コスト
- : 必須条件

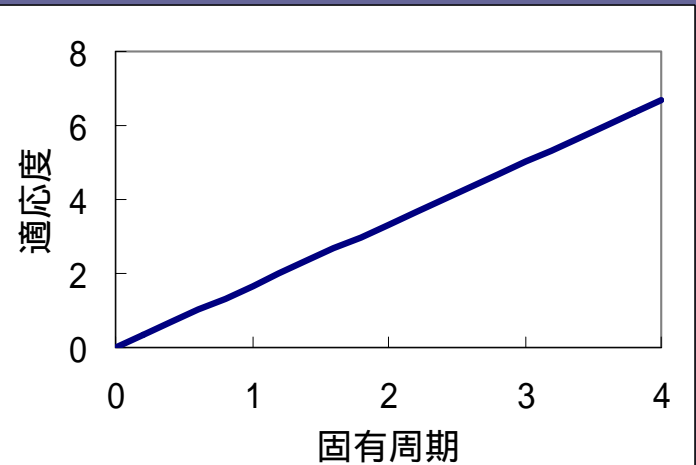
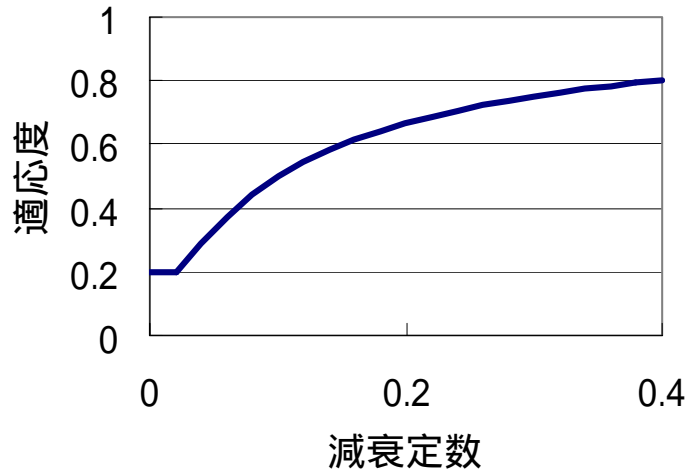
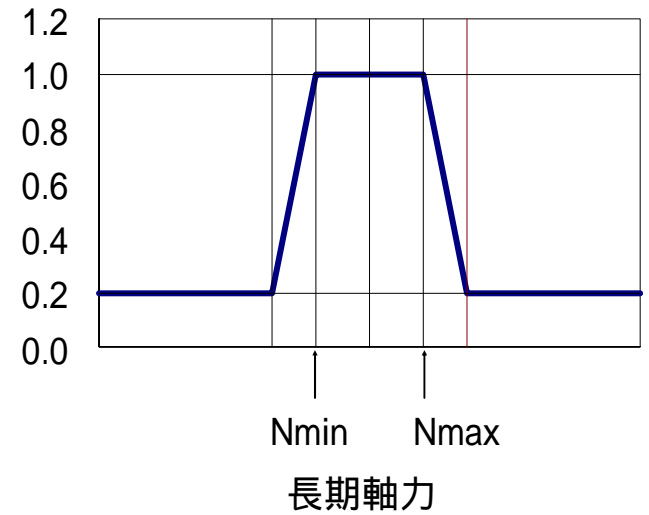
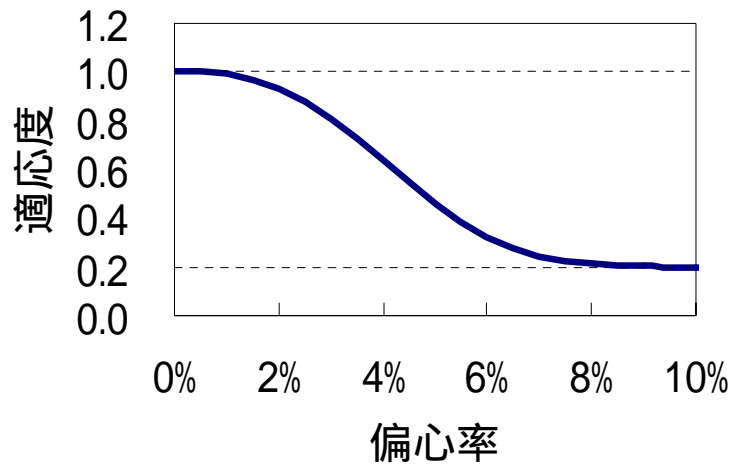
「構造躯体に対して」

- 応答加速度
- せん断変形角
- 層せん断力係数

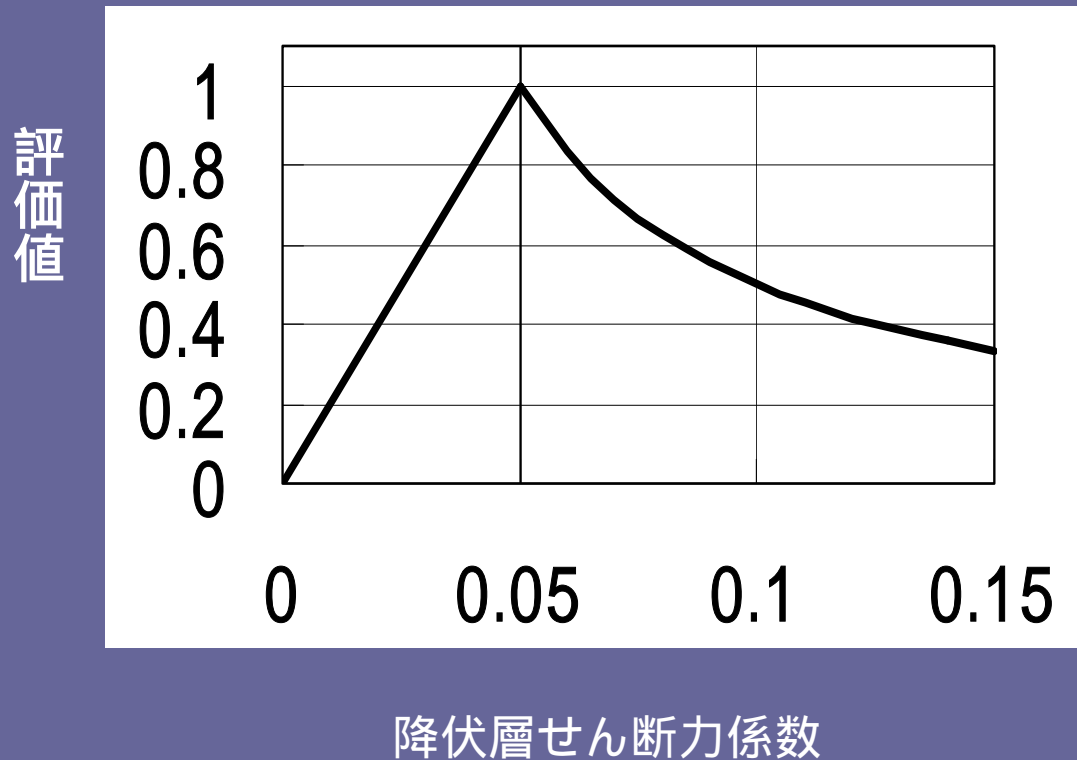
$$\text{適応度} = \prod_{i=1}^N \text{評価項目}(i)$$

すべての評価値のかけ算

評価値の例



免震層の降伏せん断力係数を評価する



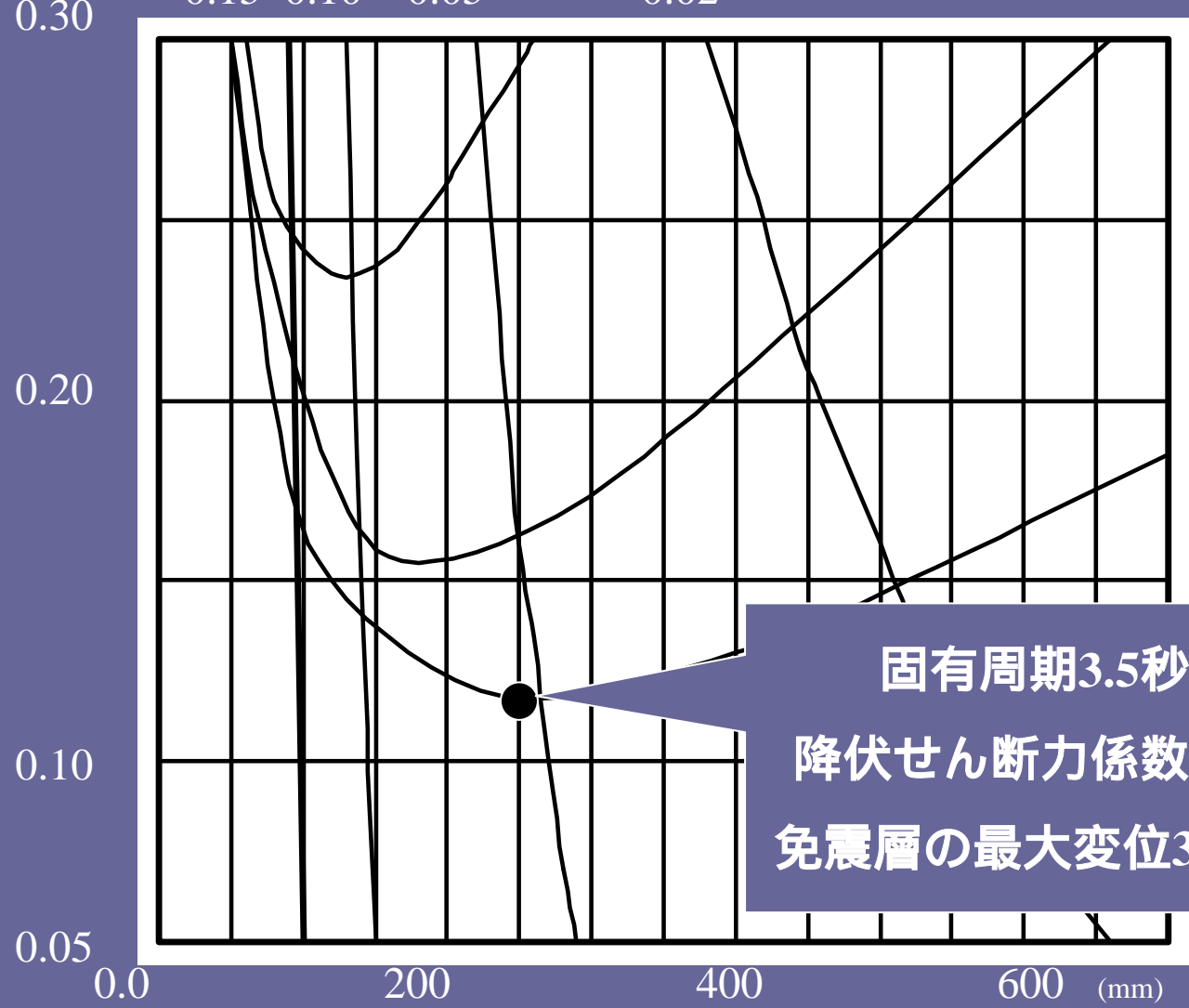
降伏せん断力係数

3.0秒

0.15 0.10 0.05 0.02

大
↑
ベースシア係数
↓
小

短
↑
固有周期
↓
長



固有周期3.5秒
 降伏せん断力係数0.05
 免震層の最大変位300mm

小 ← → 大

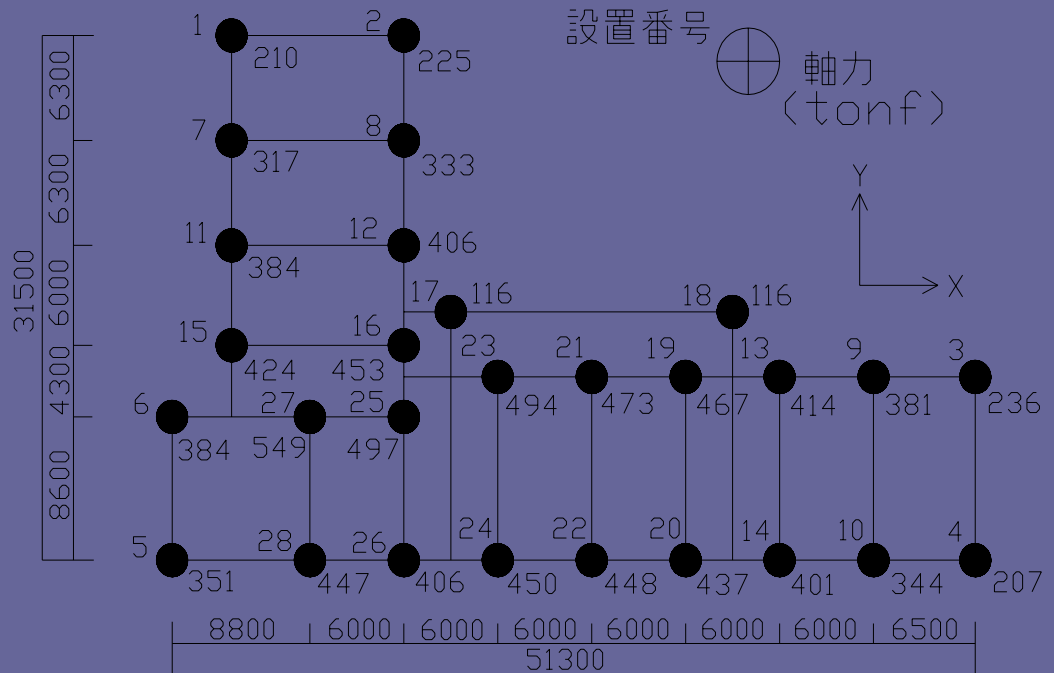
免震層の応答予測

設計例： 免震層の特性を評価した場合

- 9階建の鉄筋コンクリート造の共同住宅
- 6~9階の部分にセットバック
- 基礎固定時一次固有周期：X方向0.38秒、Y方向0.32秒
- LRB26個、RB2個

評価項目

- 長期軸力
- 偏心率
- 固有周期
- 免震層の層せん断力係数 (0.05)



解析結果

	せん断歪	実施例	解析結果
X方向 偏心率	200%	0.98%	0.77%
Y方向 偏心率	200%	0.82%	0.41%
固有周期 (秒)	200%	3.23	3.23
減衰定数 (%)	200%	19	20
最大変位 (時刻歴応答解析)		35.1cm (BCJ-L2)	31.4cm (BCJ-L2)

解析結果(装置配置)

位置	実施例	GA	位置	実施例	GA
1	LRB700	LRB700	15	LRB850	LRB800
2	LRB700	RB700	16	LRB850	LRB800
3	LRB700	RB700	17	RB600	RB600
4	LRB700	RB700	18	RB600	SL500
5	LRB800	RB800	19	LRB850	RB900
6	LRB800	LRB900	20	LRB850	LRB800
7	LRB800	SL800	21	LRB850	RB900
8	LRB800	RB800	22	LRB850	LRB850
9	LRB800	LRB850	23	LRB850	SL900
10	LRB850	SL800	24	LRB850	LRB900
11	LRB850	LRB850	25	LRB850	RB900
12	LRB850	LRB800	26	LRB850	LRB800
13	LRB800	LRB850	27	LRB850	LRB850
14	LRB850	LRB850	28	LRB850	LRB900

コストを評価した最適配置計画

- ・コストは安くなっているか
- ・免震層に求められる性能を満たしているか

評価方法2

適応度 = 偏心率

× 長期軸力

× 固有周期

× 免震層降伏せん断力係数

使用免震装置

LRB、HRB、RB・鉛ダンパー・鋼棒ダンパー



比較

評価方法2c

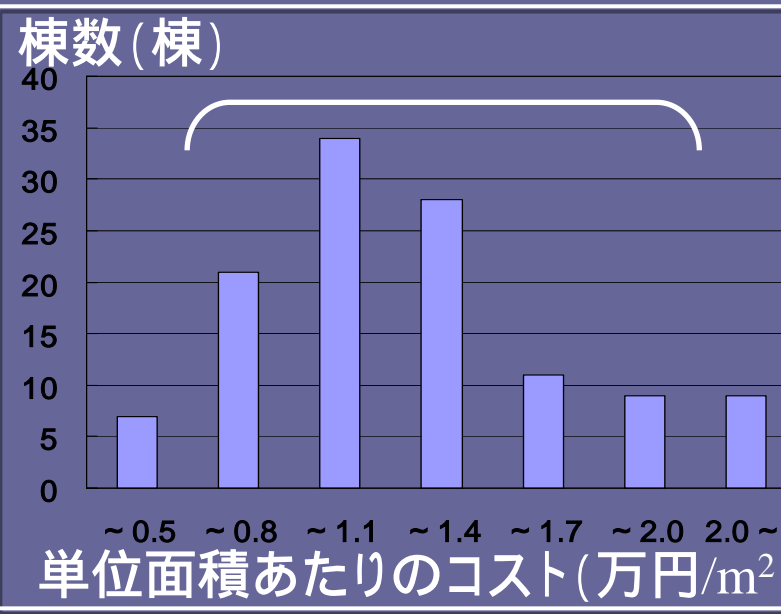
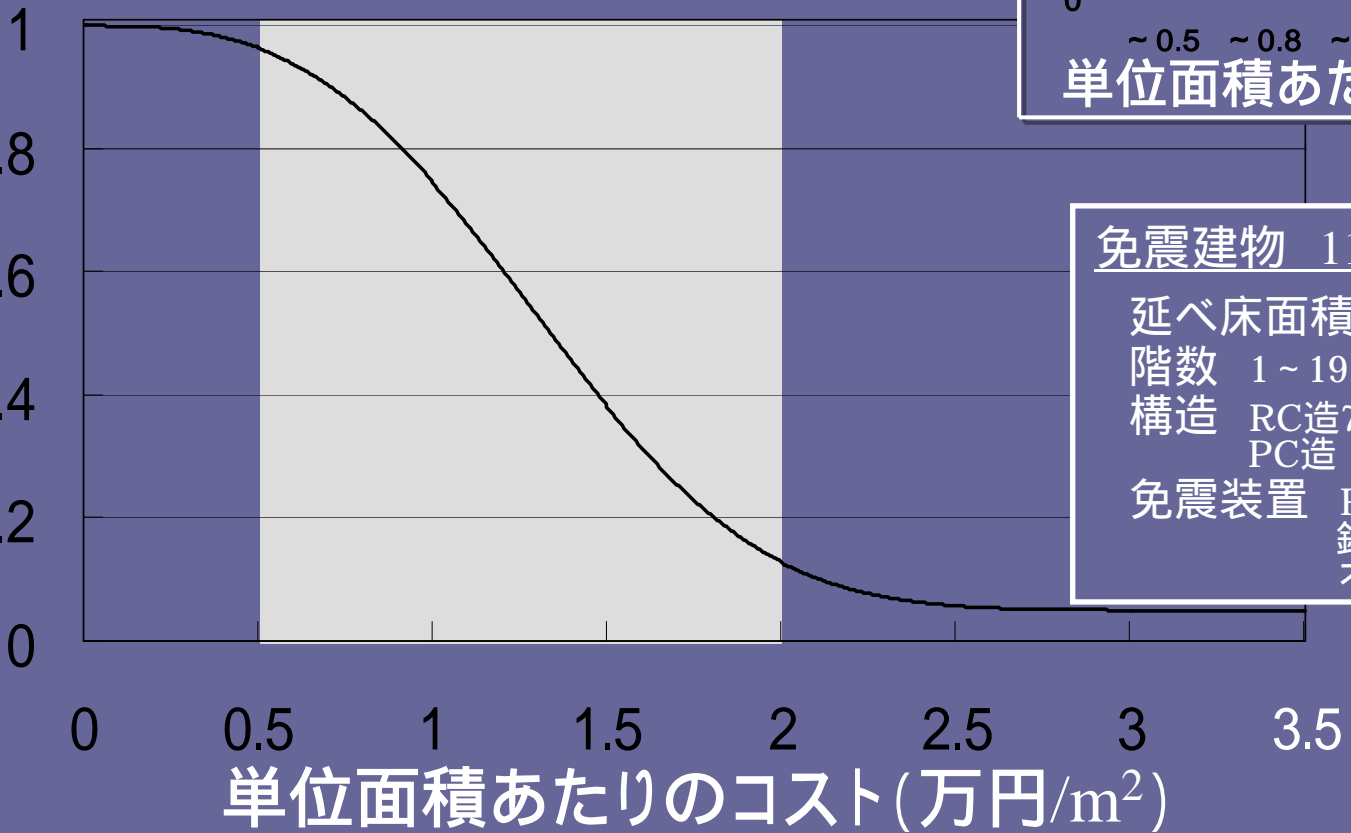
適応度 = 評価方法2

× コスト

コスト評価値

コストが安くなれば
評価値が高くなる

評価値



免震建物 119棟(1998~2001)

延べ床面積 1000m²~70000m²

階数 1~19階建て

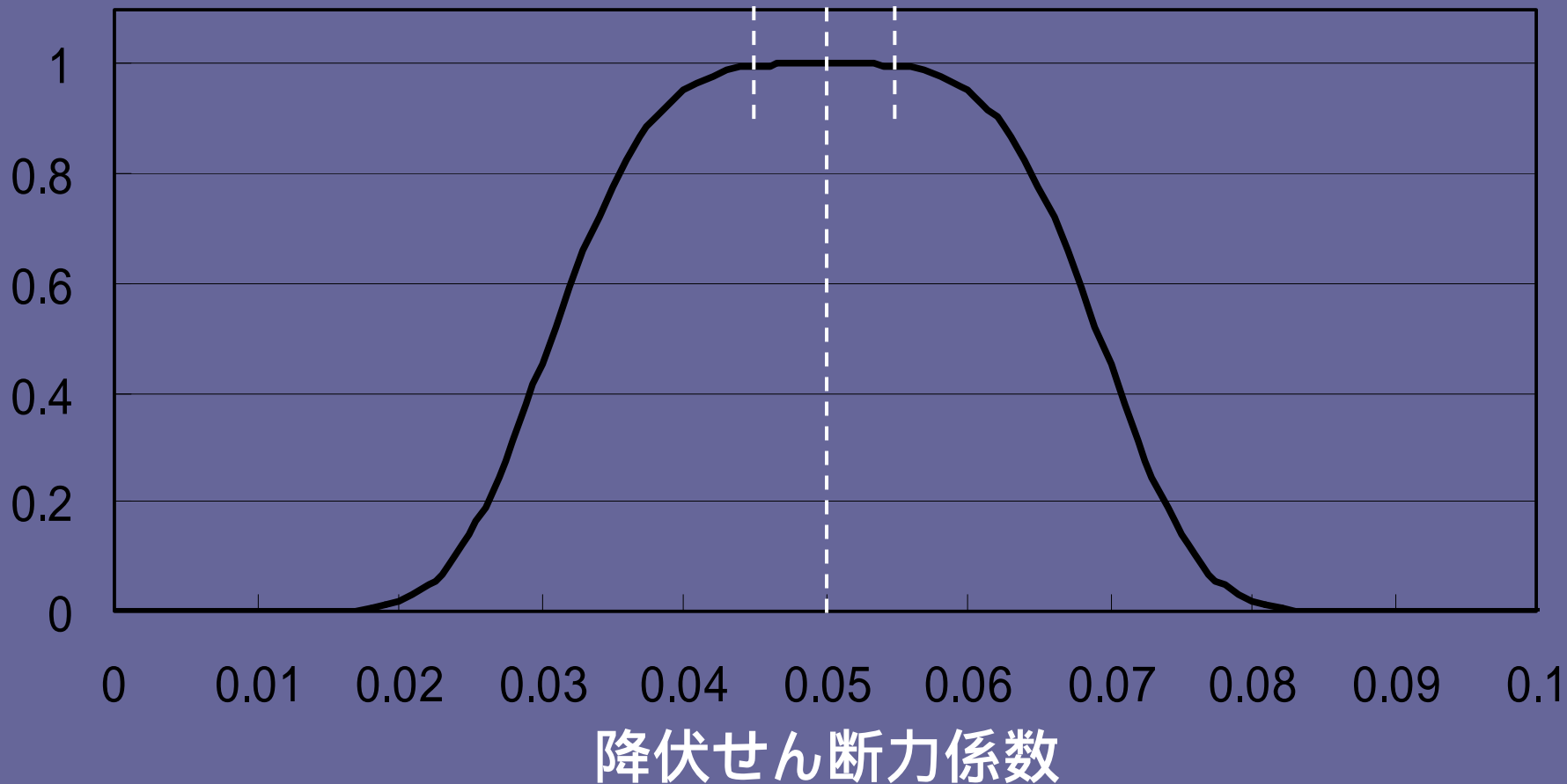
構造 RC造79棟 SRC造23棟 S造15棟
PC造 2棟

免震装置 RB,LRB,HRB,SL
鉛ダンパー、鋼棒ダンパー
オイルダンパー

降伏せん断力係数評価値

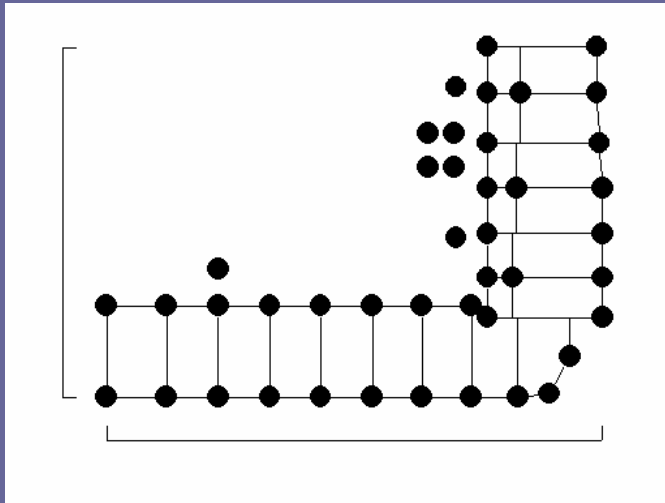
設定値の+10%の範囲で評価値は1.0

評価値



解析例

48000



68000

15階、RC造、共同住宅、10～15階セットバック

800～1000 RB 43基

鋼棒D38基、鉛D25基

	RB・D	LRB		HRB		RB・D	
	実施例	評価方法					
		2	2c	2	2c	2	2c
偏心率X方向 (%)		0.06	0.07	0.02	0.17	0.06	0.15
偏心率Y方向 (%)		0.10	0.19	0.00	0.04	0.16	0.20
固有周期 (秒)	3.49	3.50	3.60	3.50	3.72	3.45	3.50
減衰定数 (%)	17	17.6	17.7	15.1	15.1	17.2	15.7
降伏せん断力係数	0.040	0.047	0.044	0.051	0.045	0.045	0.043
最大応答変位 (mm)	379	372	388	378	394	367	380
コスト (百万円)	168.9	160.0	149.8	157.9	141.3	160.2	150.0

使用免震装置		LRB		HRB		RB + ダンパー		
	せん断歪	実施例	評価方法					
			2	2c	2	2c	2	2c
免震装置直径		免震装置個数						
600								
650								
700			3			1	6	6
750			2	5	2	3		
800		15	2	1	4		3	3
850			1	5	1	3	6	6
900		9	9	6	2	7	8	8
950			6	1			13	11
1000		15	8	24	5	10	5	8
1100		4	9	1	18	18	2	1
1200			3		11	1		
1300								
鋼棒ダンパー		38					43	45
鉛ダンパー		25					16	0

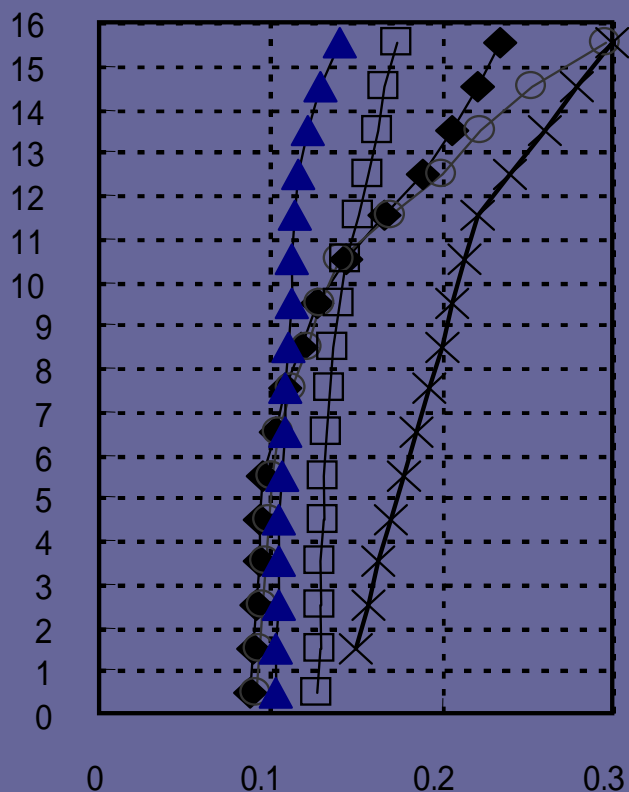
時刻歴心答解析結果

(Y方向)

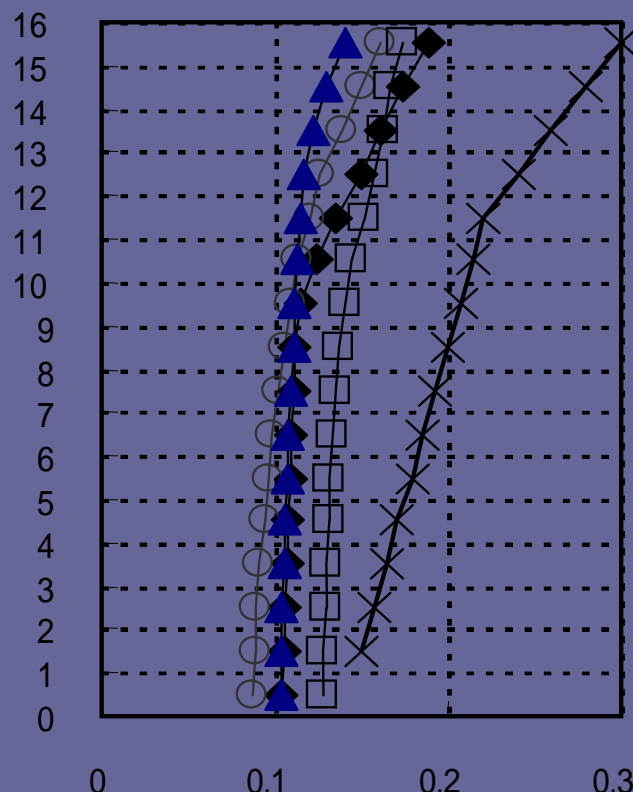


縦軸：階数

横軸：層せん断力係数



実施例



評価方法2c(HRB)

上部構造を多質点系として取り扱った例

・免震層の偏心率

偏心率を小さくする

・免震装置が負担する長期軸力

長期軸力を負担可能範囲内に収める

・免震層の降伏せん断力係数

降伏せん断力係数を設定値
に近づける

・上,下部構造の 層間変形角

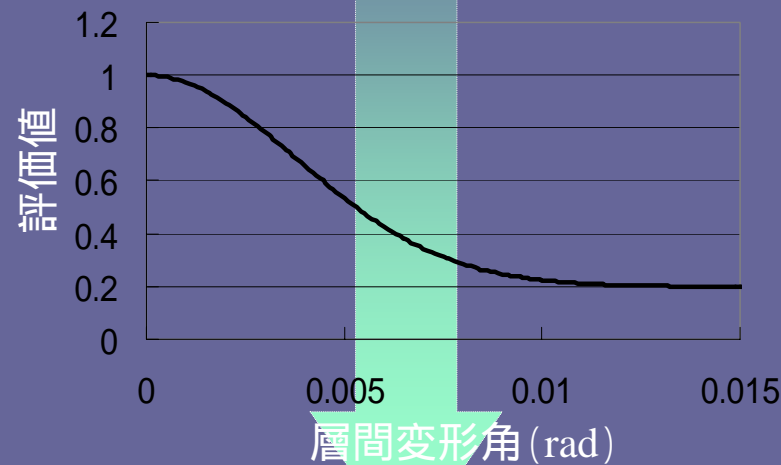
層間変形角を小さくする

・免震構造物
の固有周期

固有周期を設定
値に近づける

・免震層の
最大変位

最大変位を
設定値に近づける



評価方法1

評価方法2

評価方法3

各評価項目

評価値

適応度

中間層免震の場合解析例

解析に使用する免震装置

RB, LRB, オイルダンパー

入力地震動

告示波, El Centro波, Taft波, Hachinohe波

平面図

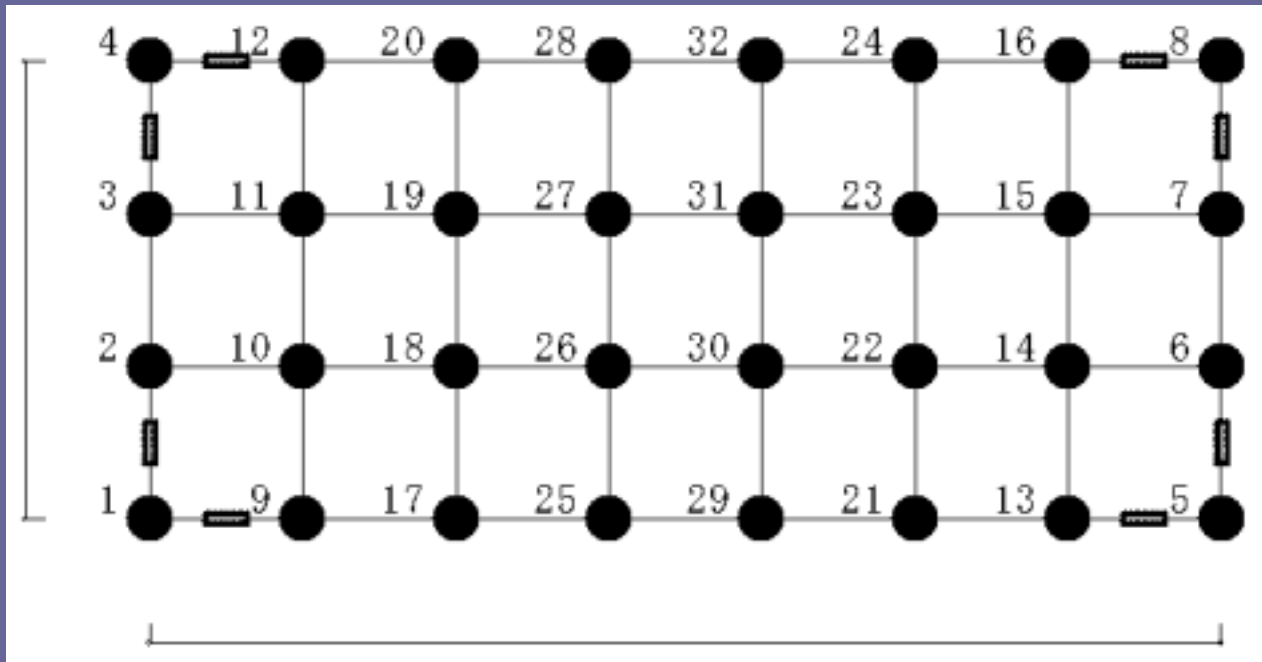
免震装置
設置番号



オイルダンパー
設置可能箇所

パー

32900



単位mm

36300

地上8階、地下2階建	免震層位置	上部構造1次固有周期	使用免震装置
SRC造	3階部分	X方向 : 0.616(s) Y方向 : 0.572(s)	RB,LRB,オイルダンパー
百貨店, 駅施設, 飲食店			30

解析結果

【評価方法2】

偏心率

長期軸力

降伏せん断力係数

最大変位

	せん断歪(%)	実施例		告示波		El Centro波		Taft波		Hachinohe波	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
偏心率(%)	100	1.80	0.10	0.08	0.01	0.11	0.13	0.16	0.10	0.16	0.12
固有周期(秒)	100	3.05	3.11	2.83	2.89	2.66	2.73	2.72	2.78	2.75	2.82
減衰定数(%)	100	42.9		17.85		18.85		18.32		17.16	
降伏せん断力係数		0.026		0.038		0.044		0.042		0.039	
最大変位 (cm)		-		21	26	21	26	18	21	31	32
RB基数		12		14		18		13		14	
LRB基数		20		18		14		19		16	
オイルダンパー基数		X4 Y4		0		0		0		0	

【評価方法3】

偏心率

長期軸力

層間変形角

	せん断歪(%)	実施例		告示波		El Centro波		Taft波		Hachinohe波	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
偏心率(%)	100	1.80	0.10	0.01	0.89	0.18	0.72	0.02	0.90	0.08	0.42
固有周期(秒)	100	3.05	3.11	3.09	3.14	3.05	3.11	3.13	3.18	3.13	3.10
減衰定数(%)	100	42.9		27.55		28.96		27.64		29.51	
降伏せん断力係数		0.026		0.025		0.027		0.024		0.028	
最大変位 (cm)		-		17	20	18	23	19	20	19	22
RB基数		12		21		19		21		18	
LRB基数		20		11		13		12		14	
オイルダンパー基数		X4 Y4		X4 Y4		X4 Y4		X4 Y4		X4 Y3	

時刻歴応答値の比較

- ◇ 実施例
- ▲ 評価方法2
- 評価方法3
- 弾性限耐力

告示波

El Centro 波

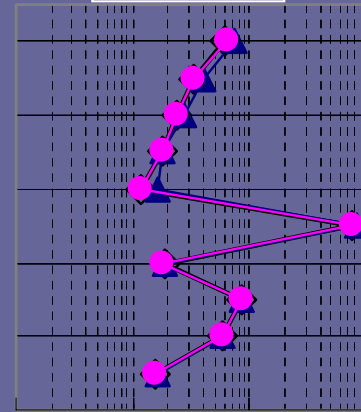
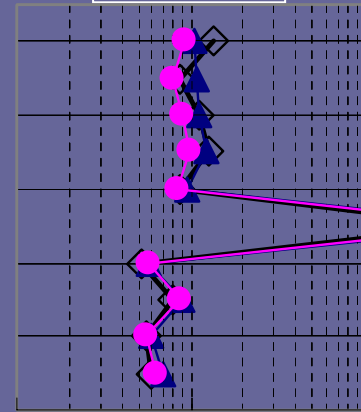
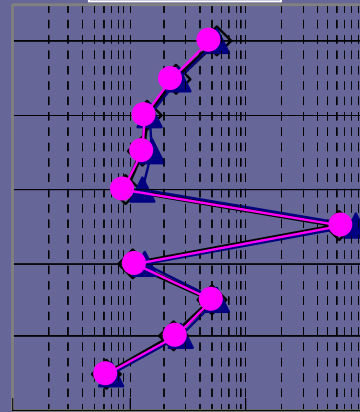
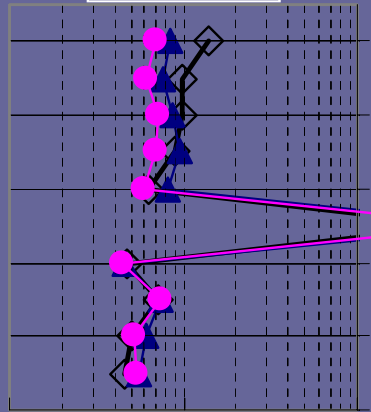
階

X方向

Y方向

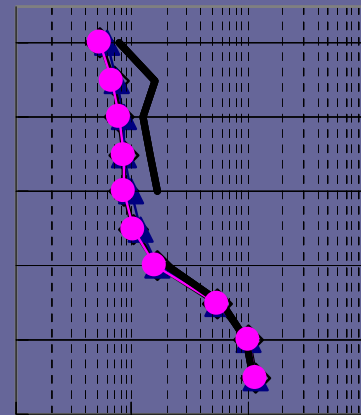
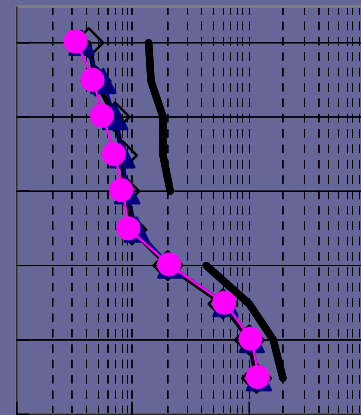
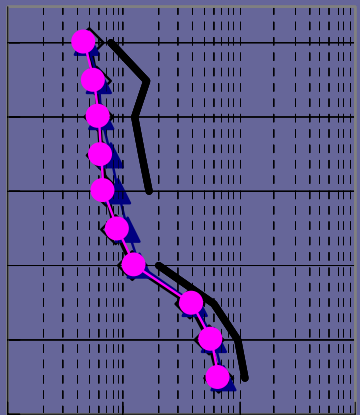
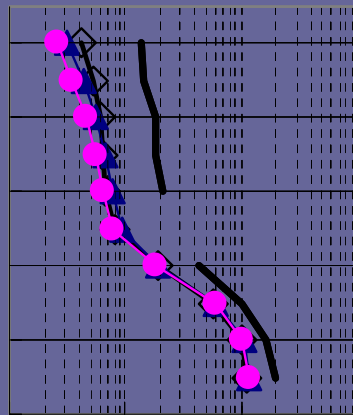
X方向

Y方向



階

層間変形角 (rad)



1.E+03 1.E+04 1.E+05 1.E+06 1.E+03 1.E+04 1.E+05 1.E+06 1.E+03 1.E+04 1.E+05 1.E+06 1.E+03 1.E+04 1.E+05 1.E+06

層せん断力 (kN)

まとめ

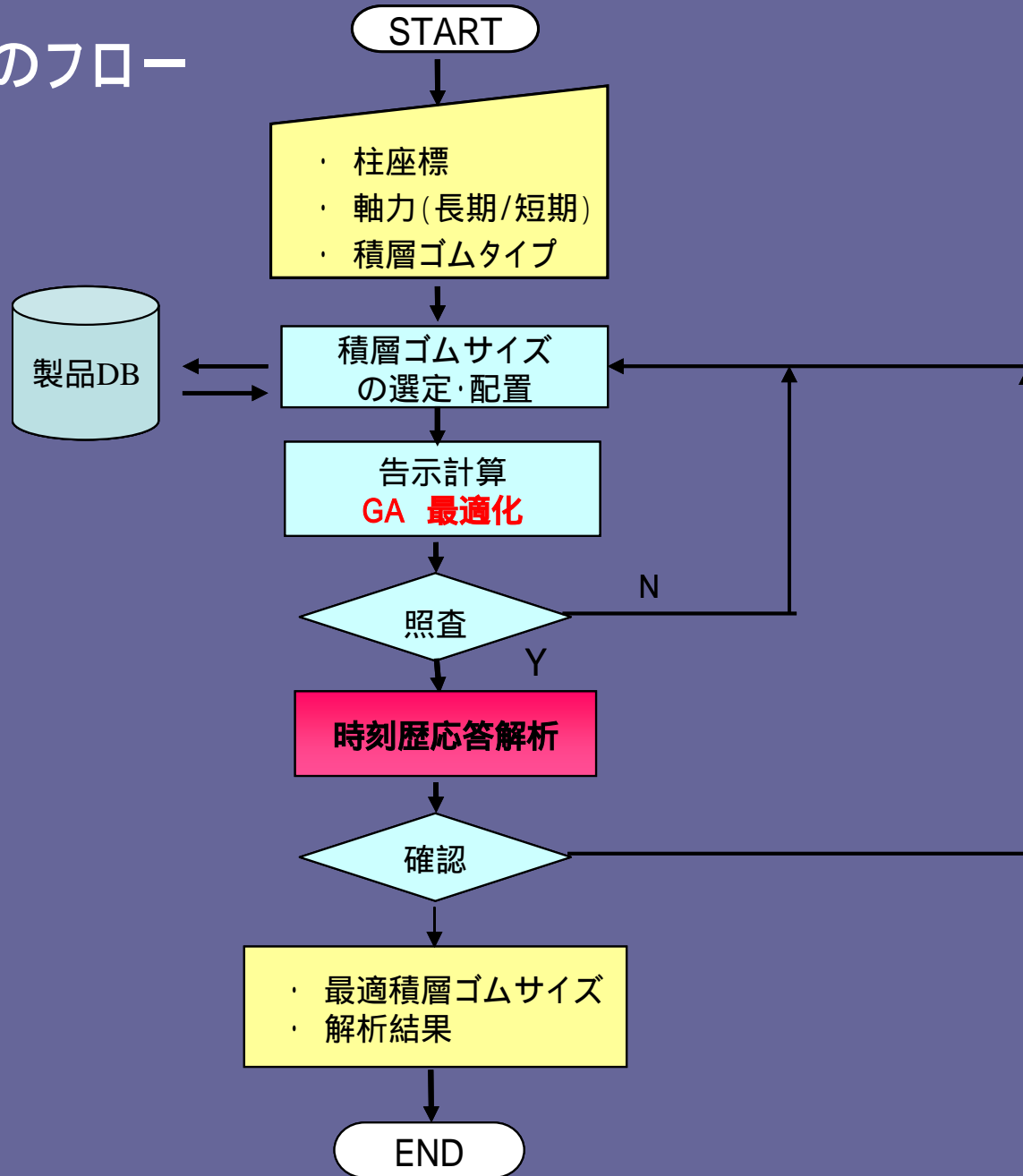
- 装置の選択のような問題(不連続量)に向けた手法である。
- 様々な設計条件を適応度(設計目標)に盛り込むことが可能である。
- 遺伝的アルゴリズムは局所探索能力があまり高くないため、探索範囲を保ちつつ、適応度の高い個体を残すことが重要となる。
- ヒューリスティックによる手法は目的関数が不連続で、微分不可能でも最適解を見つけることができる。
 - 焼き鈍し法(SA), タブー(TA)でも同様のシステムを構築した。
 - SA, TA(一個体での突然変異)ではGAに比べて計算回数は激減する。

免震部材の配置設計を支援ツール Layout Planning Assistance Program: LAP2

概要

- 作成: 室田伸夫(ブリヂストン), 山崎久雄(ユニオンシステム)
- 協力: 田守伸一郎(信州大)
- 設計条件の入力
 - 柱配置・軸力, 地盤条件, 上部構造物の剛性・減衰モデル
- 製品データベースから免震部材を抽出・自動配置
 - 最適化手法 遺伝的アルゴリズム
- 平成12年建設省告示第2009号 にもとづく応答解析
 - 免震告示による検証
- 時刻歴解析による検証
- プログラムはHPより入手可能: 無料
 - 「LAP2 ブリヂストン」で検索して下さい。

プログラムのフロー



組み合わせ(配置)の最適化

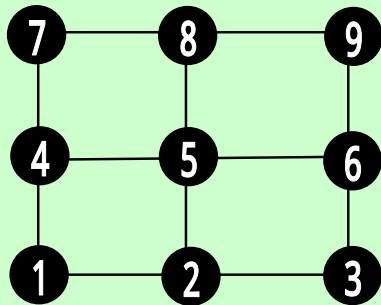
遺伝的アルゴリズムの応用 Genetic Algorithms (GA)

制約条件を満足しながら、応答値 min.にする。

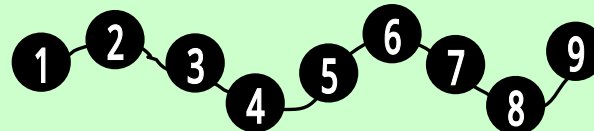
偏心率 < 0.03
せん断力分担率 > 0.04
接線周期 $T_f > 2.5$ 秒
免震ゴム面圧 $< \text{許容上限}$

} 制約条件

応答加速度、変位 が最小となる配置(組み合わせ)の探索

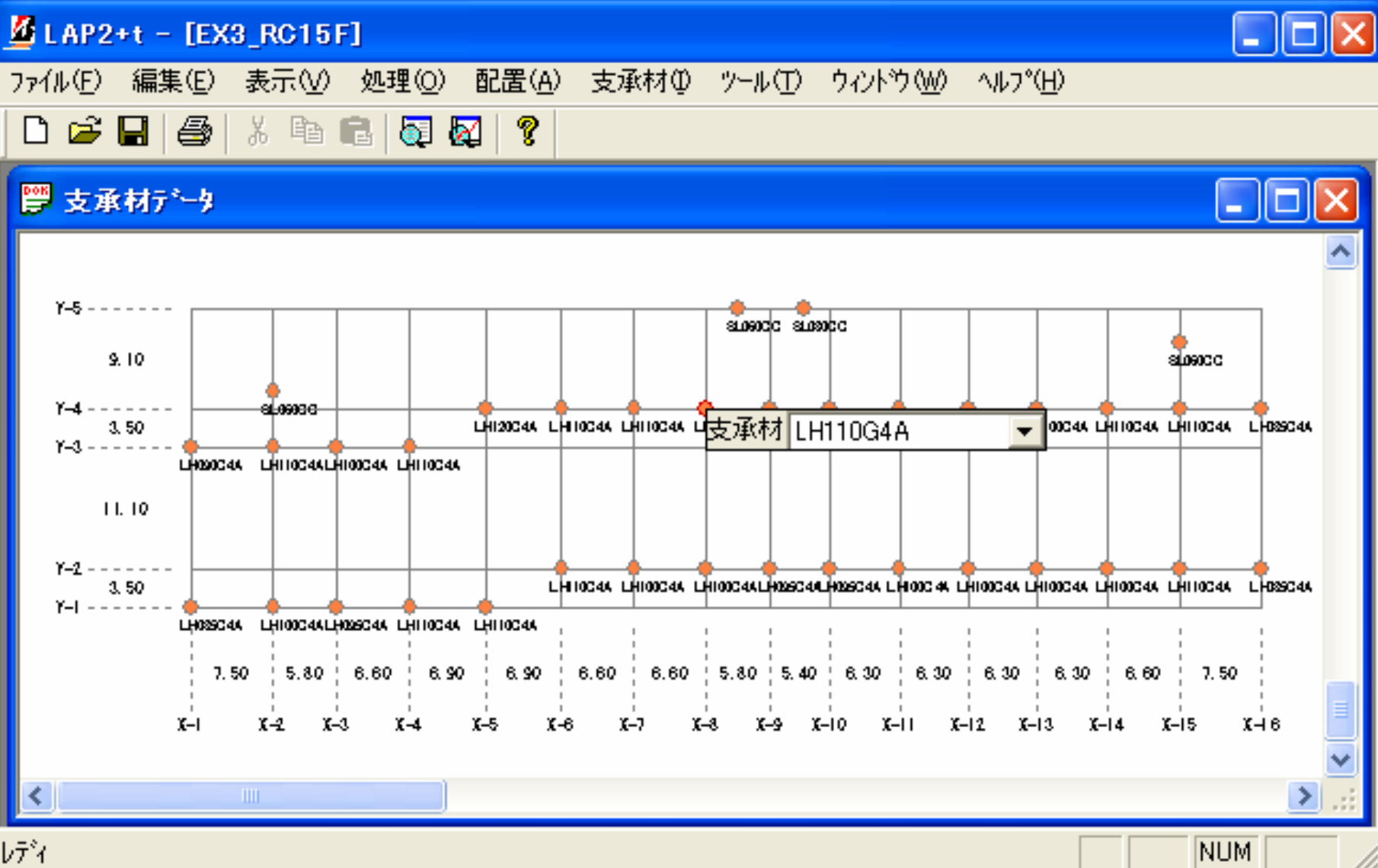


配置パターン



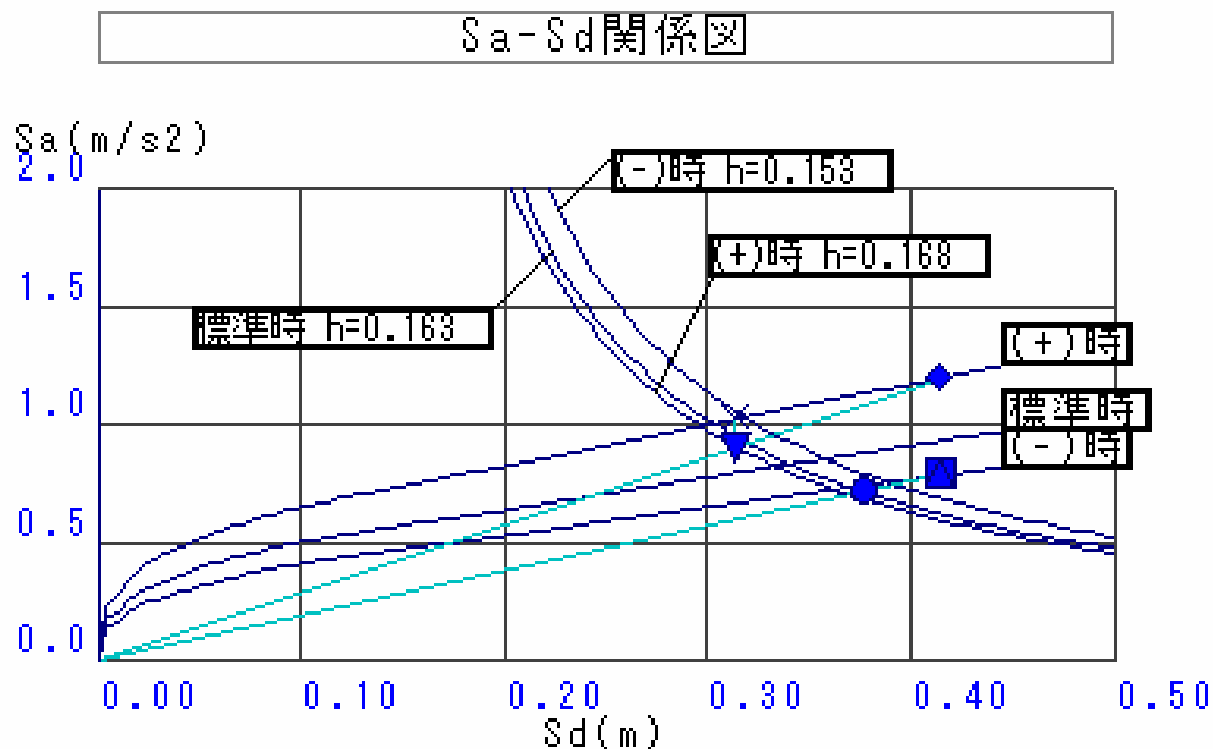
染色体

免震部材の初期設定



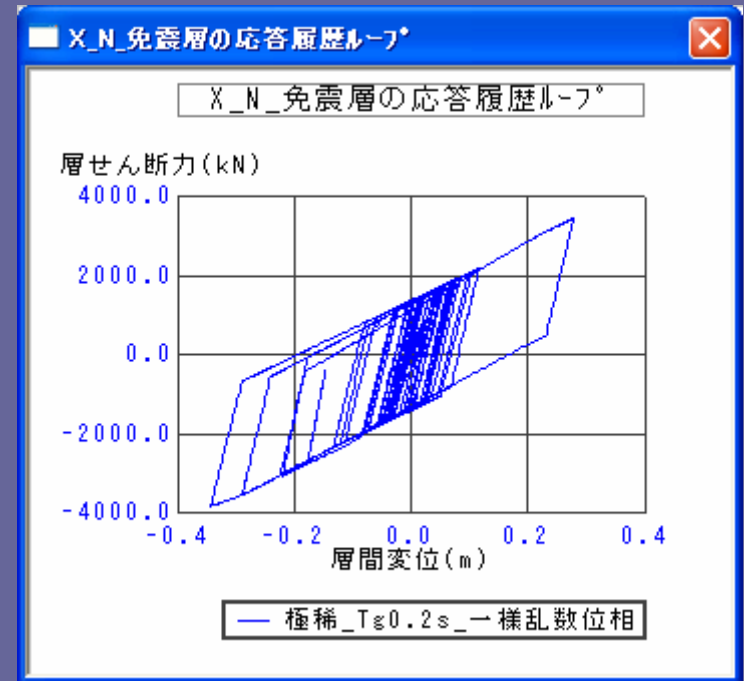
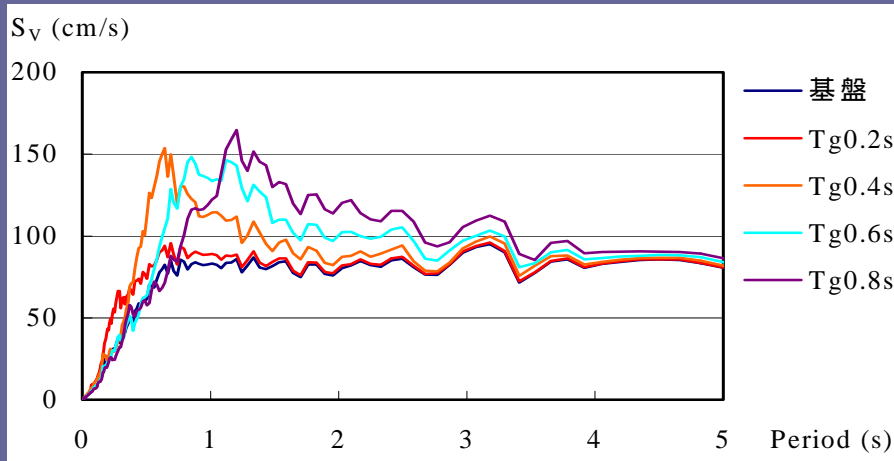
免震告示による検証

Sa-Sd関係図



- 設計限界値 [0.414m, 25376.5kN]
- 基準変位 [0.377m]
- ▲ 応答変位 [0.414m]
- ◆ (設計限界値) [0.414m, 38637.5kN]
- ▼ (基準変位) [0.314m]
- × 地震層せん断力 [33141.8kN]

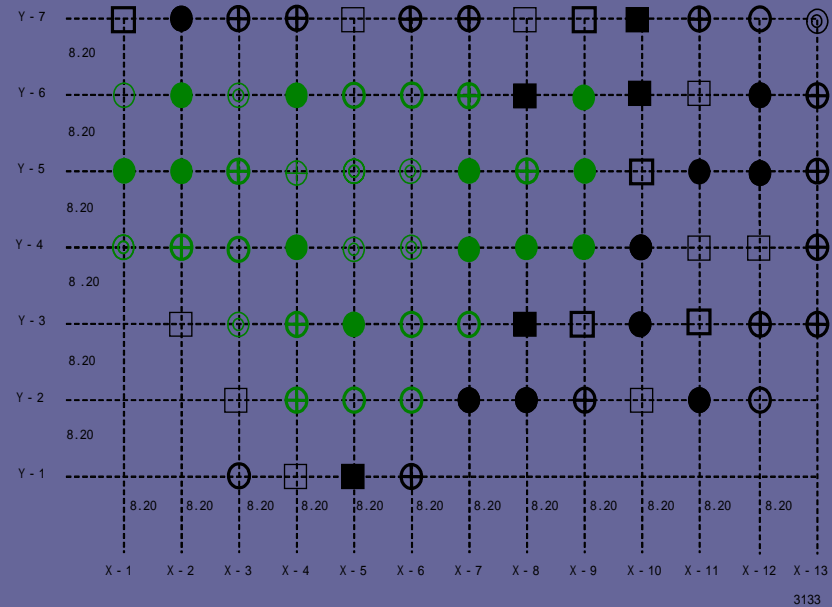
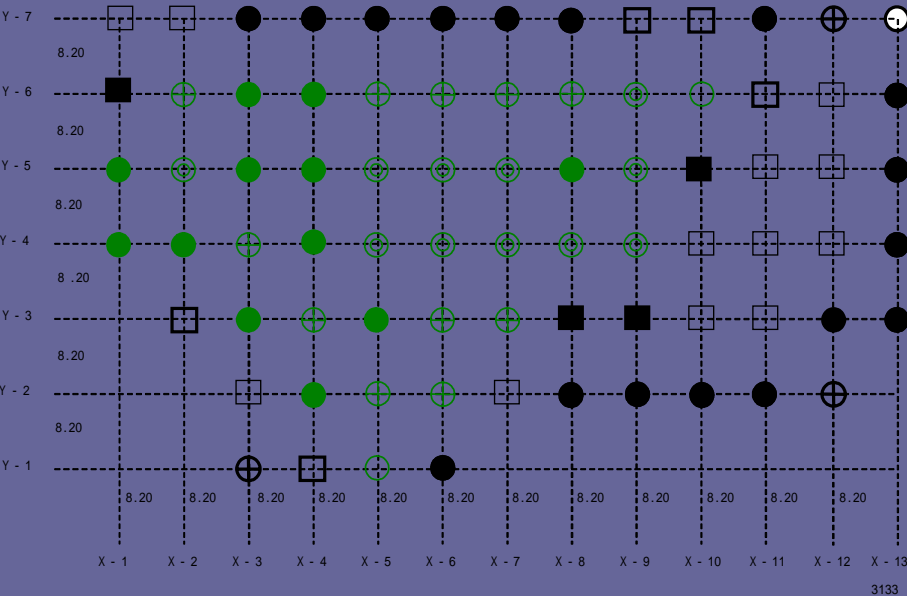
時刻歴応答解析例



搭載地震波(一部)の速度応答スペクトル図
告示の応答スペクトル
地盤の卓越周期 (0.2, 0.4, 0.6, 0.8秒)

免震層の水平方向荷重変位曲線図

最適設計による設計例



初期設定: 軸力の制限は満足する

最適配置後

(ゴム径 mm)

600	650	700	750	800	850
900	950	1000	1100	1200	

まとめ

- 免震部材選択システムは実用レベルに達している
 - 設計例:50
 - 実施設計例より特性は向上
- 免震部材の選択候補は特性を整理する
 - ゴム総厚,せん断剛性
 - 積層ゴム支承の種類を揃える
 - 天然ゴム系,鉛プラグ入り,高減衰積層ゴム系
- 今後の展開
 - 上部構造の設計を含めた自動化