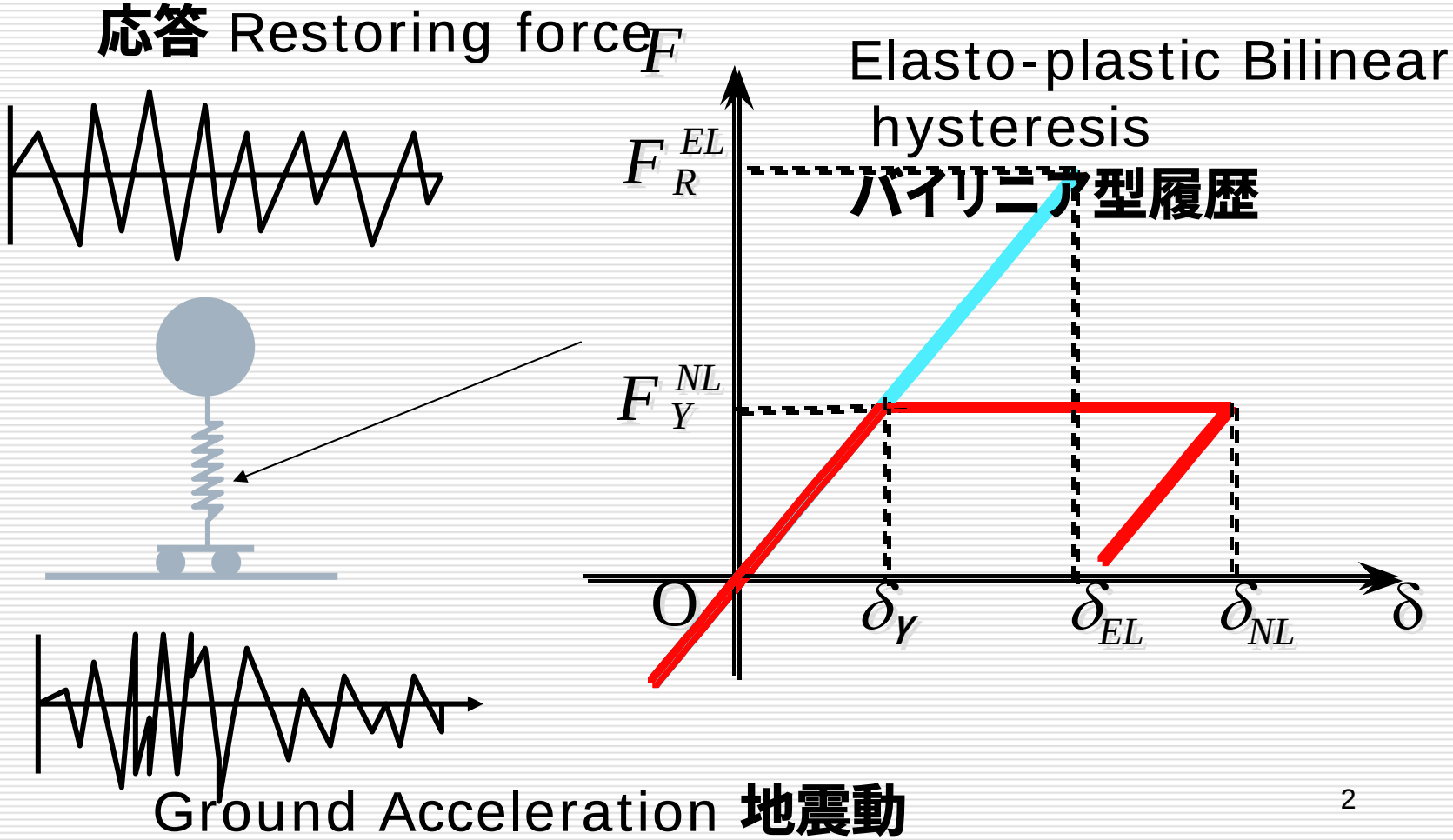
Seismic Design of Urban Infrastructures
都市施設の耐震設計

(4-2) Engineering Characteristics of Ground Motion and Design Ground Motions
(4-2) 地震動の工学的性質と設計地震動

Kazuhiko Kawashima
Department of Civil Engineering
Tokyo institute of Technology
東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻
川島一彦

4.4 Nonlinear Response of Structures
4．4　構造物の非線形応答

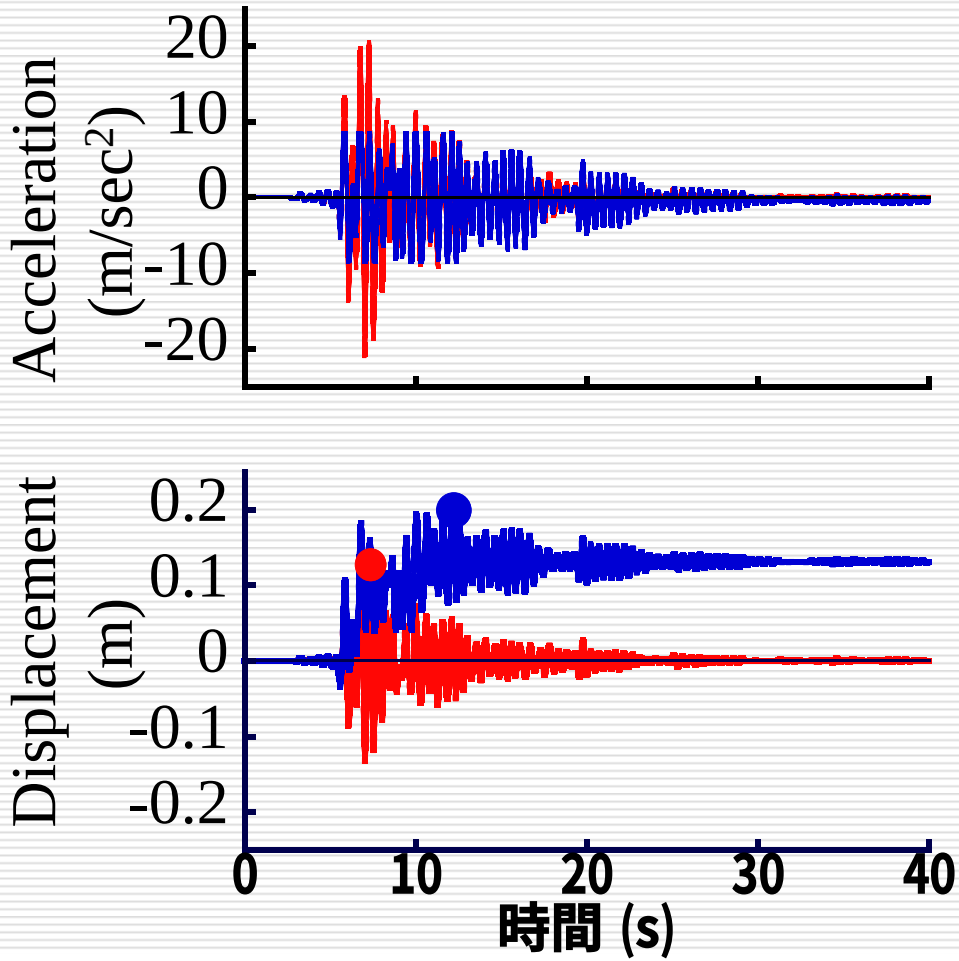
1) Nonlinear Response

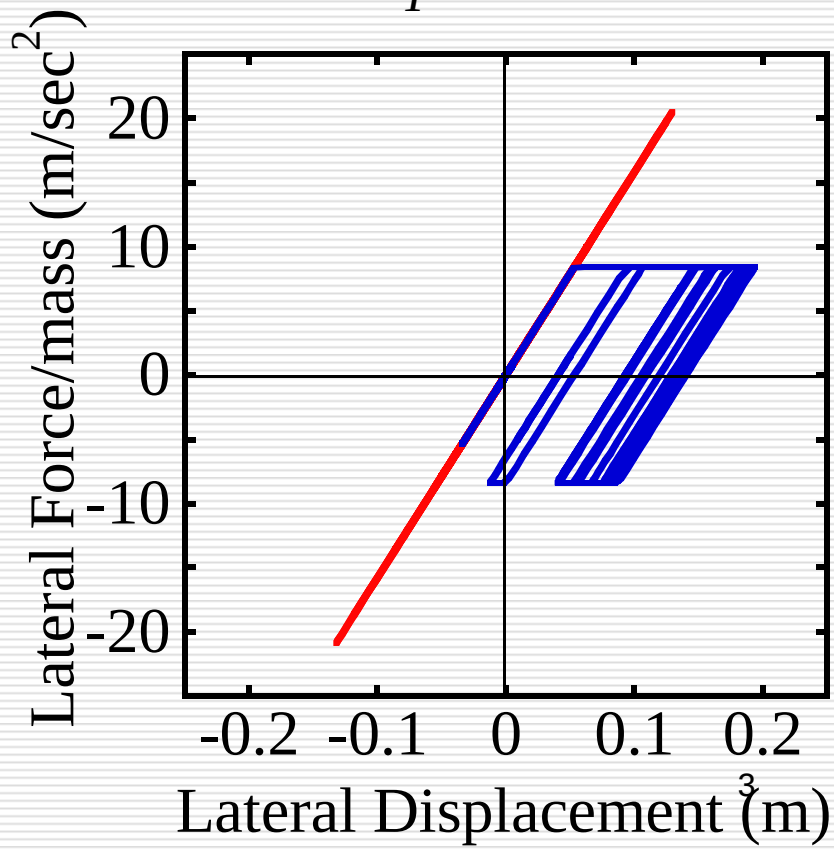


Example of Linear & Nonlinear Response of a SDOF System with the Natural Period of 0.5s.

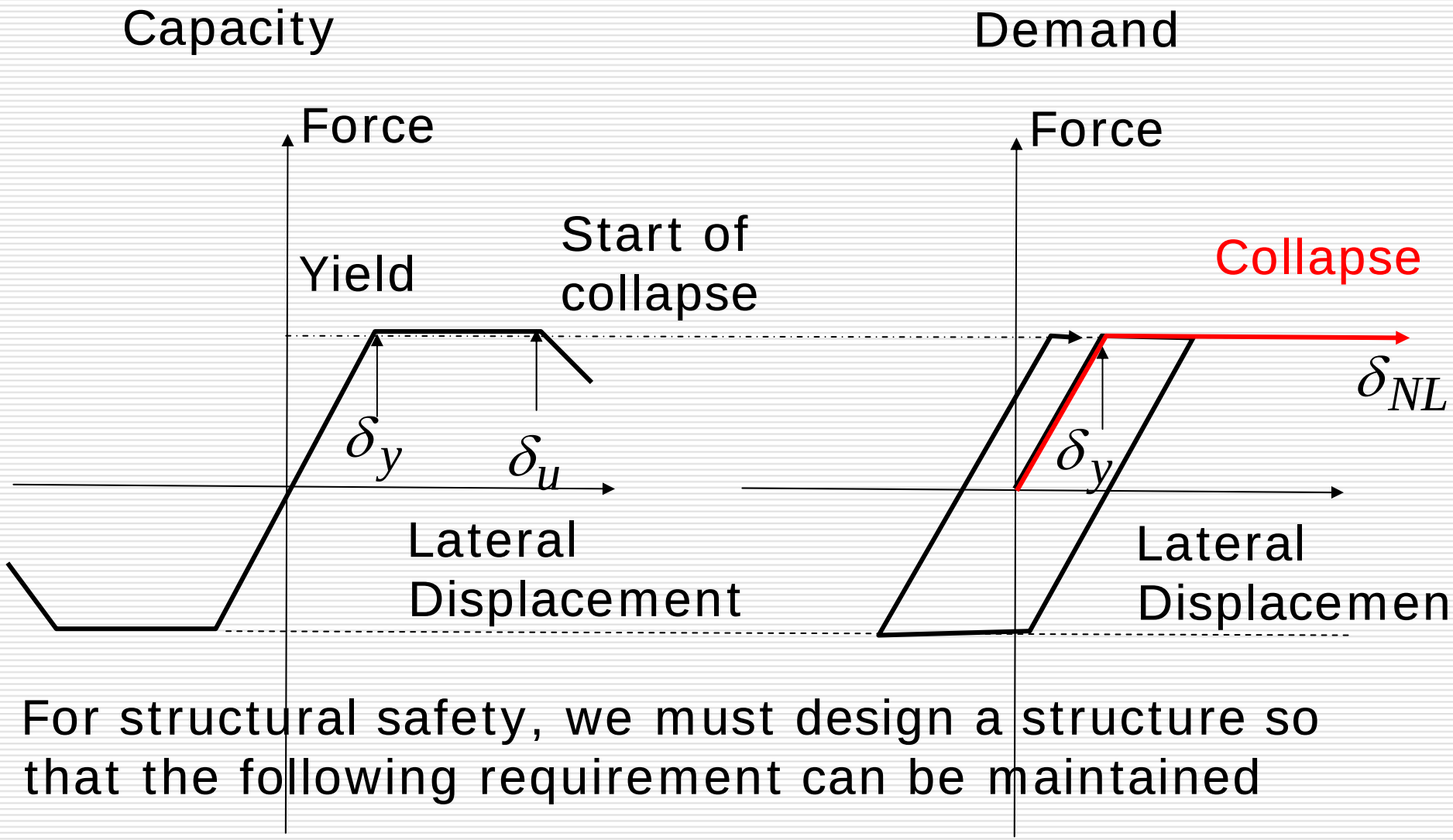
Target ductility factor(目標応答じん性率) = 4,
Yield displacement (降伏変位) = 53.3mm

$$R_\mu = \frac{F_R^{EL}}{F_Y^{NL}} = 2.16$$





2) Demand and Capacity ディマンドとキャパシティ



For structural safety, we must design a structure so that the following requirement can be maintained

Capacity > Demand

2) Demand and Capacity (2)

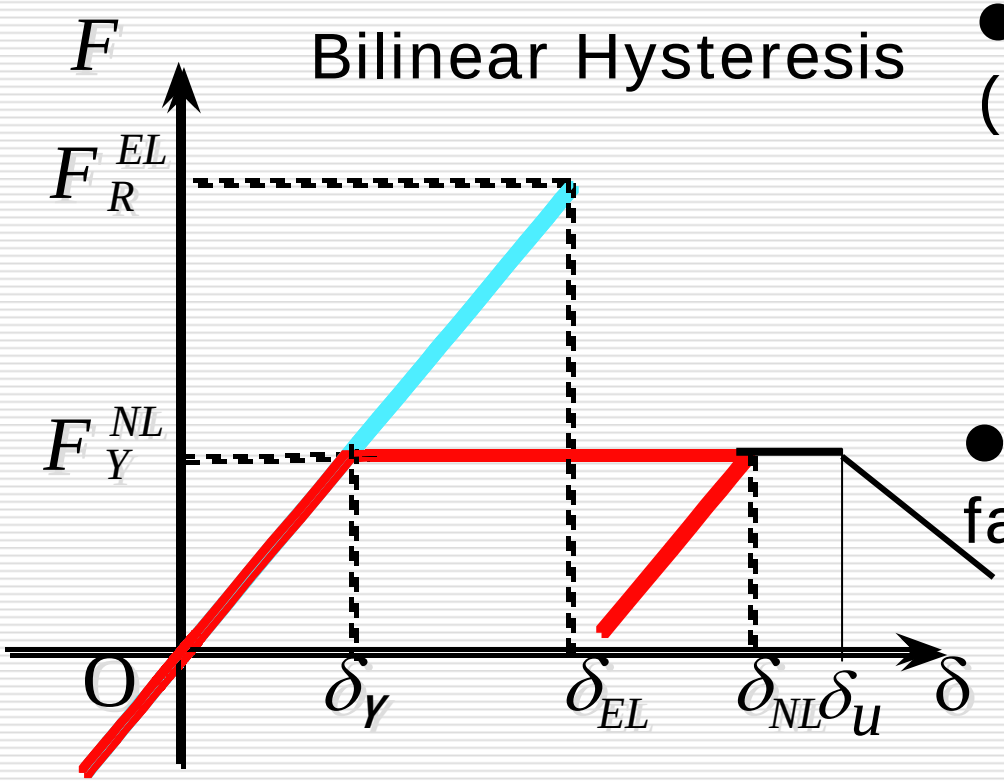
- Demand is the responses (force, strain, displacement) which occurs in a structure
- Capacity is the force, strain or displacement for which the structure is stable.
- For structural safety, we must design a structure so that the following requirement can be maintained

$$u_C > u_D$$

$$\mu_C > \mu_D$$

Capacity > Demand

3) じん性率の定義 Definition of Ductility Factors



●Ductility capacity (Capacity)

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

●Response ductility factor (Demand)

$$\mu = \frac{\delta_{NL}}{\delta_y}$$

δ_y ：**降伏変位** (yield displacement)

δ_u ：**終局変位** (Ultimate displacement (capacity))

δ_{NL} ：**最大応答変位** (Max. nonlinear response displacemer

4) Target Ductility Factor 目標じん性率

- Target ductility factor is a response ductility factor (**応答じん性率**) which is accepted to occur in design

- Target ductility factor is determined based on the ductility capacity (**キャパシティーとしてのじん性率**) .

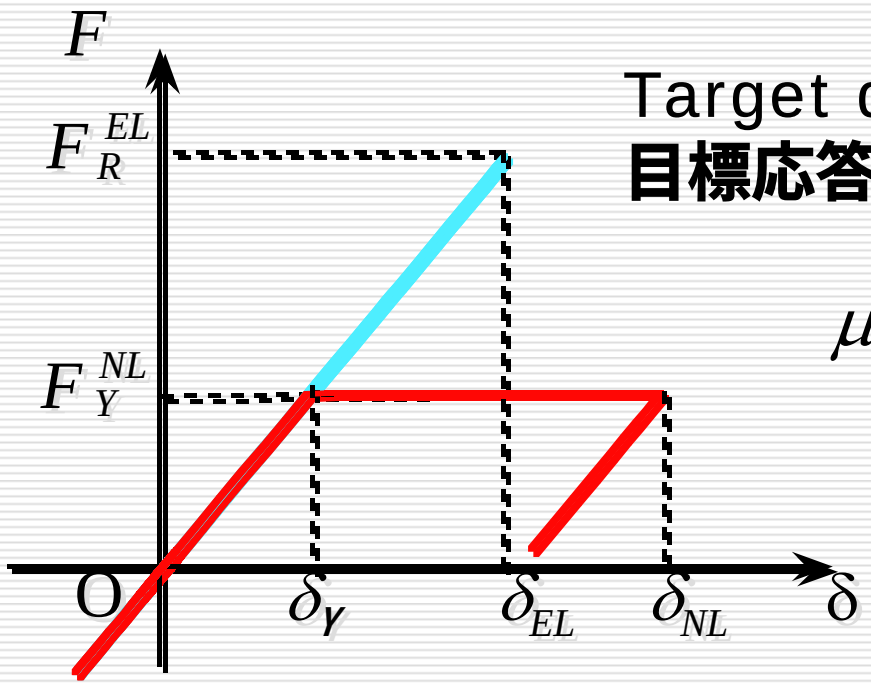
- If response ductility factor is less than the target ductility factor, the structure must exhibits expected performance

- If response ductility factor is larger than the target ductility factor, the structure does not exhibit expected performance.

5) Force Reduction Factor
5) 荷重低減係数

(1) Definition

$$R_{\mu}(T,\mu_T,\xi_{EL},\xi_{NL}) = \frac{F_R{}^{EL}(T,\xi_{EL})}{F_R{}^{NL}(T,\mu_T,\xi_{NL})}$$



Target ductility factor
目標応答じん性率

$$\mu_T = \frac{\delta_{NL}}{\delta_Y}$$

(2) How the force reduction factor is used?
荷重低減係数はどのように使用されるか？

The force demand (inertia force) in a linear elastic system can be easily assessed based on response acceleration spectrum S_A by

線形構造物であれば、構造物に作用する慣性力は，加速度応答スペクトルS_Aを用いることにより、容易に次のように推定できる。

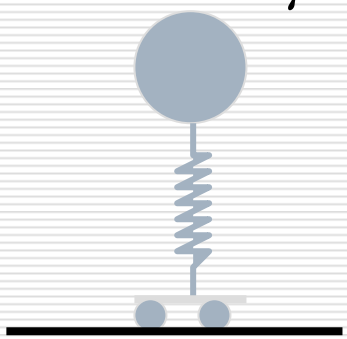
$$F_R^{EL} \approx m \cdot S_A(T, \xi)$$

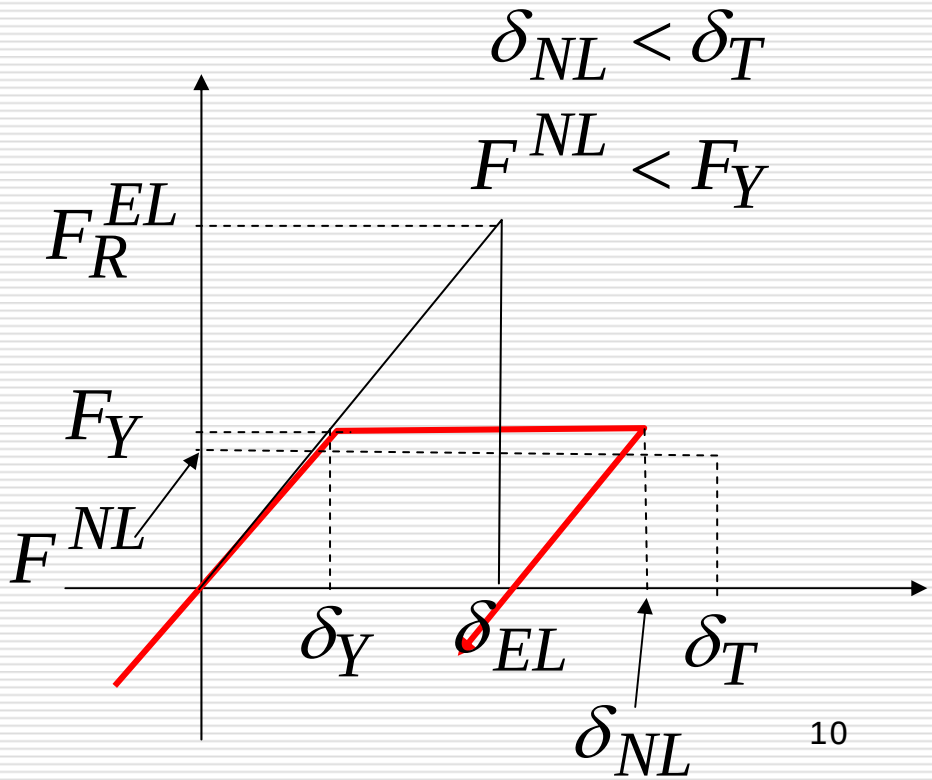
Yield strength of a perfect elastomeric bilinear structure F_Y has to be set larger than the restoring force demand F^{NL} so that ductility demand can be smaller than the target ductility factor

構造物の応答じん性率が目標応答じん性率よりも小さくなるようにするためには、構造物の降伏強度は以下の値以上で無ければない

F^{NL}: Anticipated nonlinear restoring force (demand)

$$F^{NL} = \frac{F_R^{EL}}{R_\mu}$$

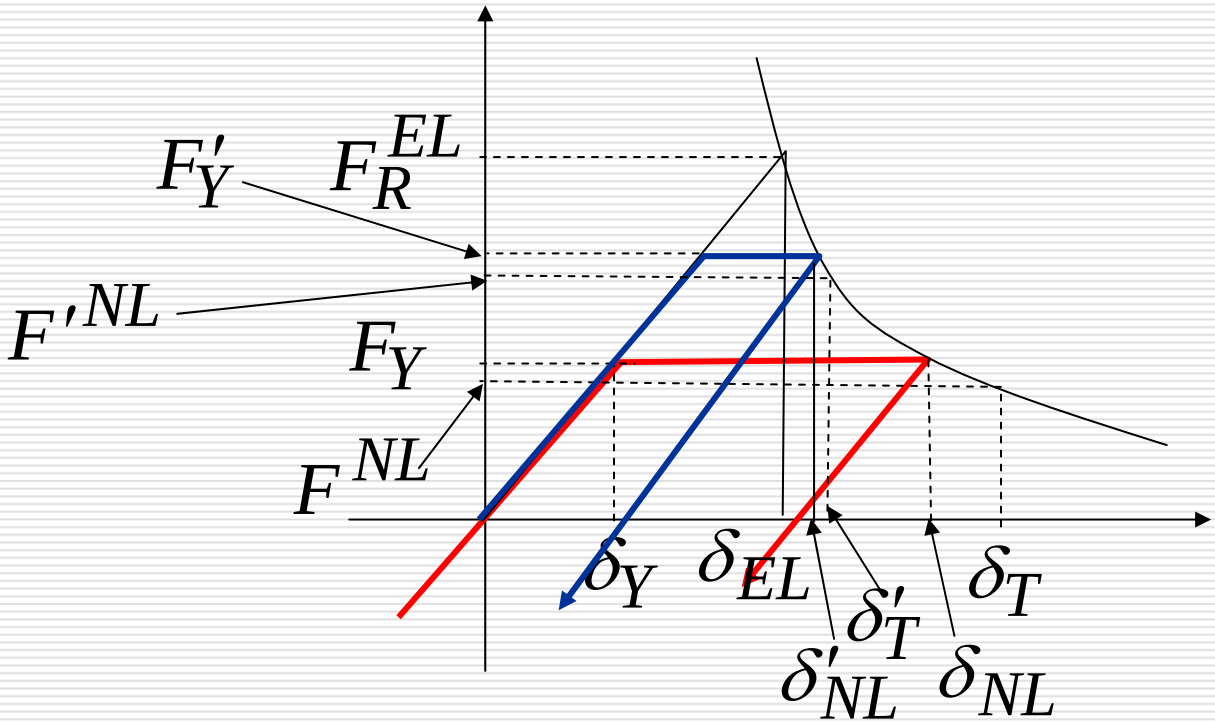




(3) Trade-off of Strength and ductility capacity
トレードオフの関係にある強度とじん性率

- If the ductility capacity is small, we have to set the target ductility capacity to be bsmall.

- This results in larger lateral force demand F'_{NL}, thus we have to set larger yield strength F'_Y



(4) Force Reduction Factor is called different names
いろいろな呼び名で呼ばれる荷重低減係数

$$R_{\mu}(T,\mu_T,\xi_{EL},\xi_{NL}) = \frac{F_R^{EL}(T,\xi_{EL})}{F_R^{NL}(T,\mu_T,\xi_{NL})}$$

- ✓ **荷重低減係数** (Force reduction factor)
- ✓ **応答修正係数** (Response modification factor)
- ✓ q-factor
- ✓ R-factor
- ✓ ..

(5) In spite of the importance of the force reduction factor, limited research has been focused on F_R

荷重低減係数は静的耐震設計で最も重要であるが、その割にこれに対する既往の研究は多いわけではない

$$R_\mu(T,\mu_T,\xi_{EL},\xi_{NL}) = \frac{F_R{}^{EL}(T,\xi_{EL})}{F_R{}^{NL}(T,\mu_T,\xi_{NL})}$$

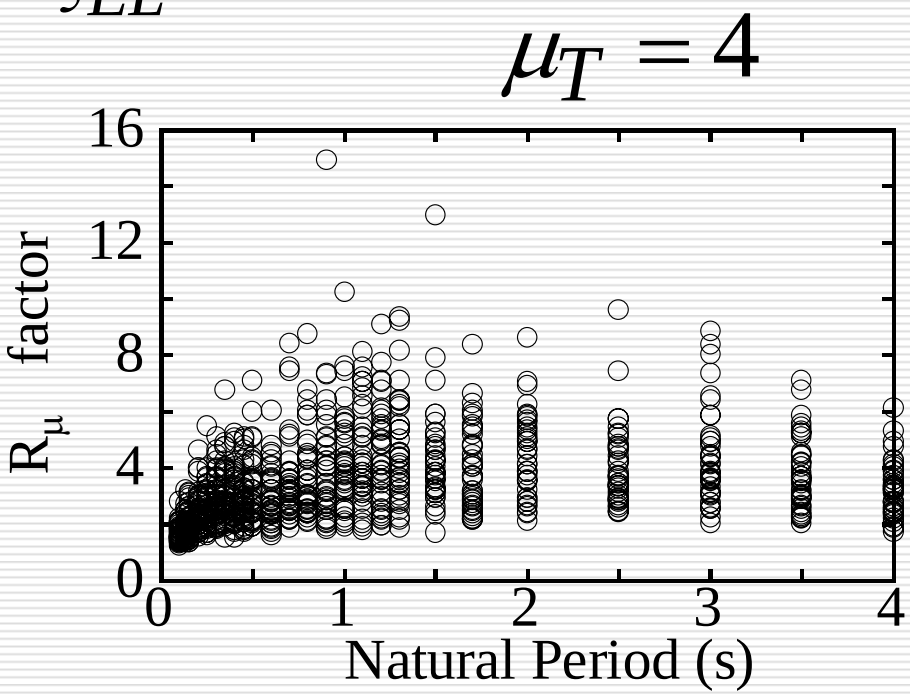
- Newmark & Hall (1973)
- Nassar & Krawinkler (1991)
- Miranda & Bertero (1994)
- Watanabe & Kawashima (2002)

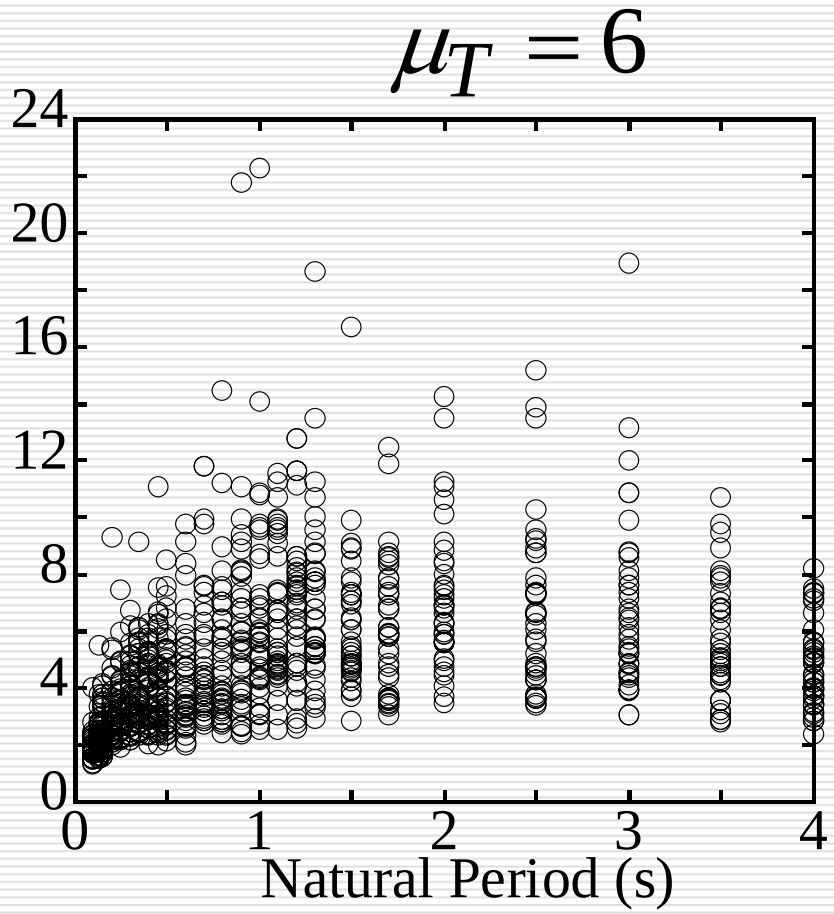
(6) 我が国で観測された70成分の地震動に対して荷重低減係数を計算すると、・・・

平均的地盤

$\xi_{NL} = 0.02$

$\xi_{EL} = 0.05$



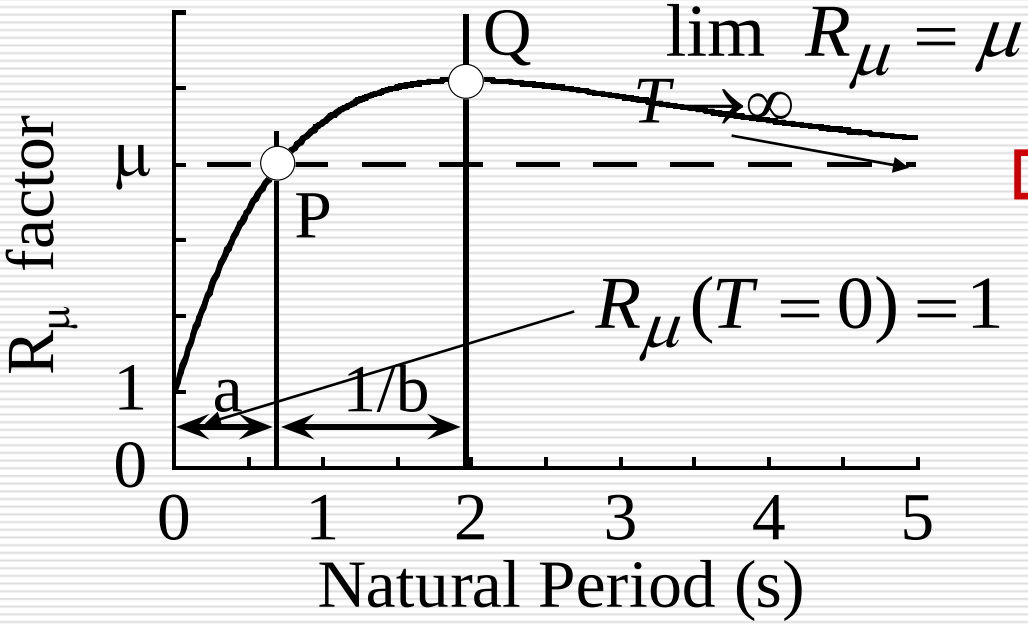


渡邊･川島による荷重低減係数

$$R_\mu = (\mu - 1)\cdot\Psi(T) + 1$$

ここで,

$$\Psi(T) = \frac{T-a}{ae^{bT}} + 1$$



- The coefficient a represents the period where $R_\mu = \mu$
- Coefficient $a+1/b$ represents the period where FRF takes the maximum value.
- **この経験式は他の提案式に比較して、パラメータの物理的意味が明確で、式も簡単である**

渡邊、川島：荷重低減係数の特性に関する研究、土木学会論文集、682/I-56、115-128、2001

荷重低減係数の推定式

$$R_\mu = (\mu - 1) \cdot \Psi(T) + 1$$

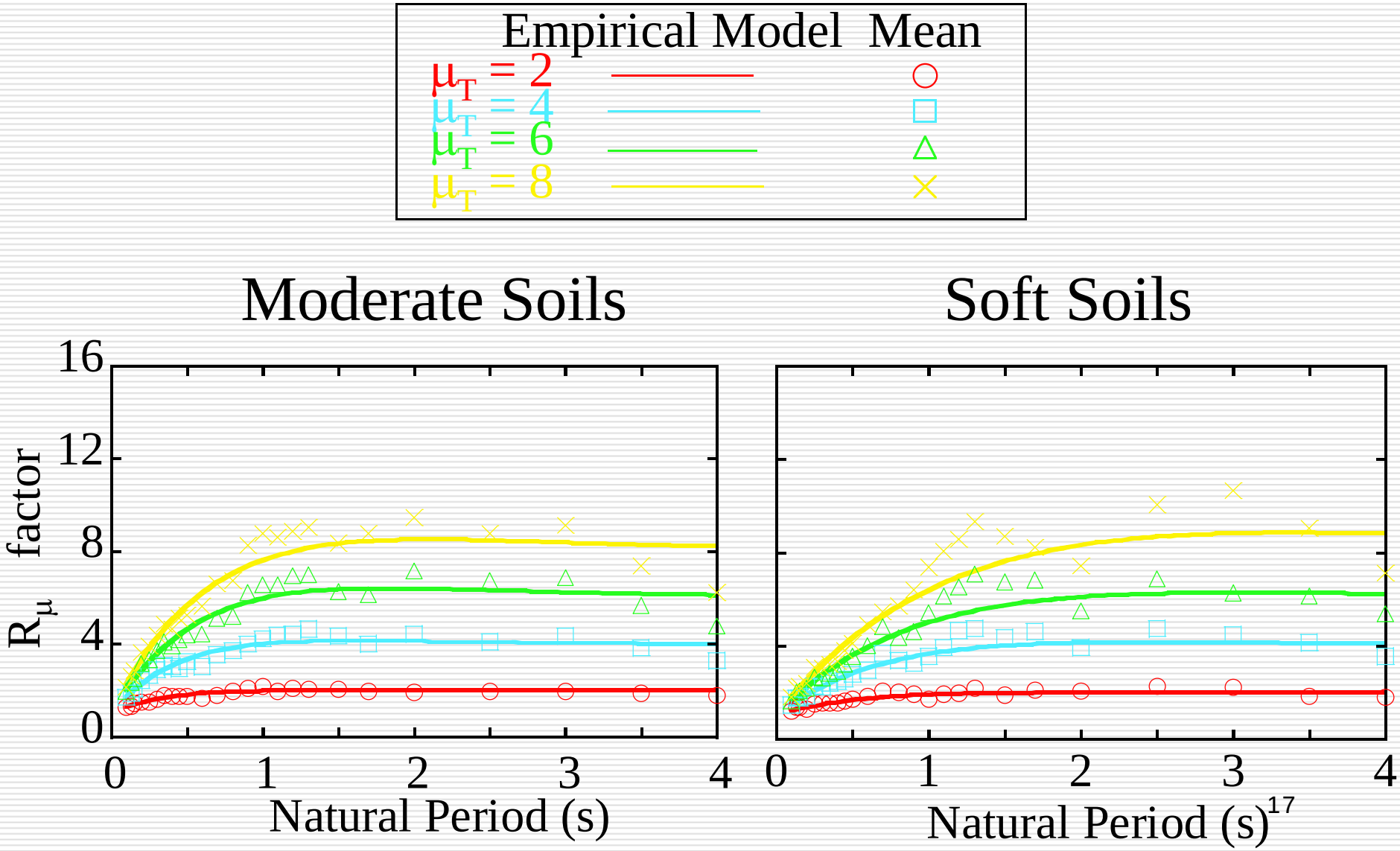
$$\Psi(T) = \frac{T - a}{ae^{bT}} + 1$$

$$\xi_{NL} = 0.02$$

$$\xi_{EL} = 0.05$$

μ	a			b		
	Type-I	Type-II	Type-III	Type-I	Type-II	Type-III
2	0.226	0.344	0.521	4.14	1.94	1.34
4	0.778	0.572	0.976	3.50	1.35	0.994
6	0.981	0.725	1.23	2.93	1.15	0.757
8	1.23	0.807	1.28	2.57	0.983	0.569

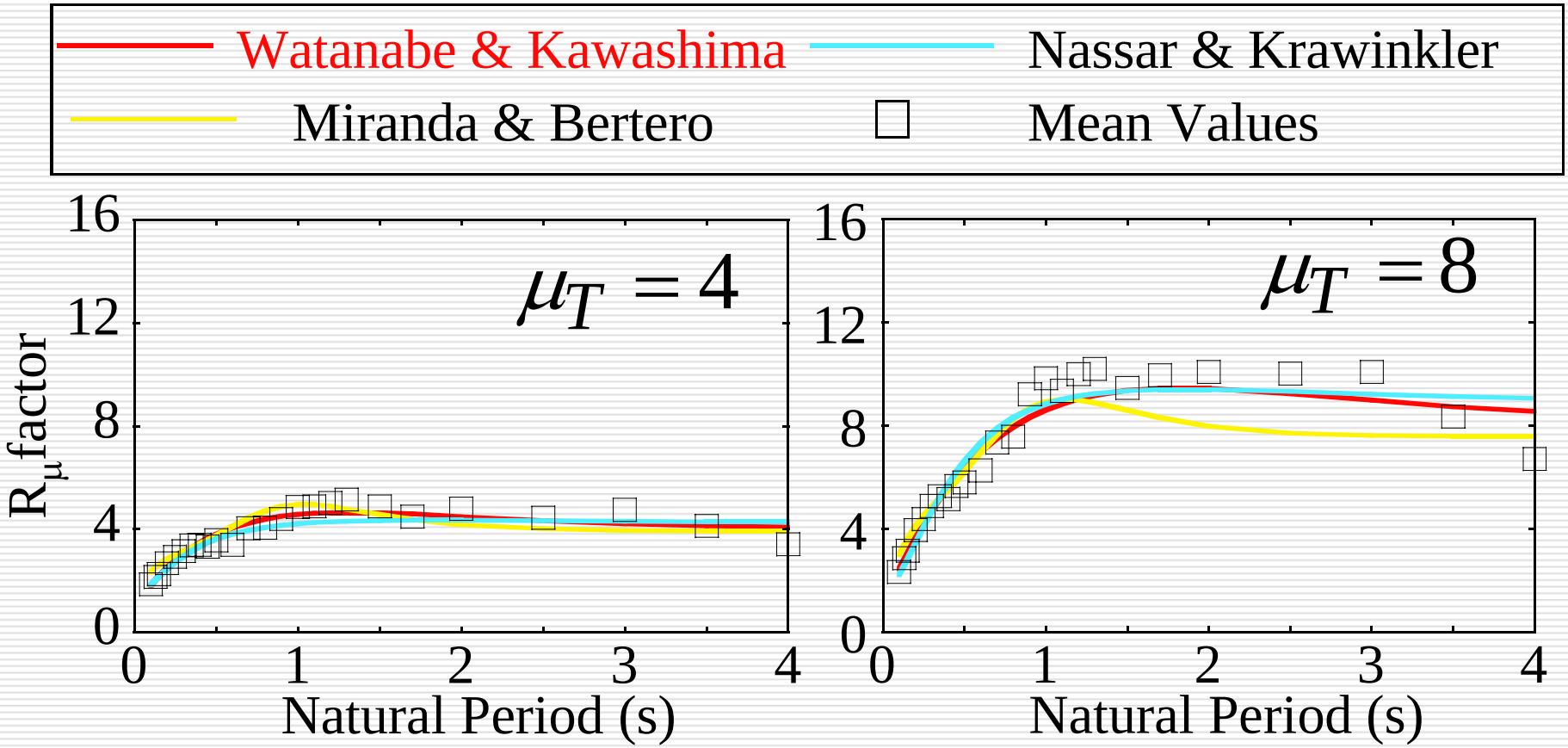
推定式に基づく荷重低減係数



既往の研究と比較すると、・・・

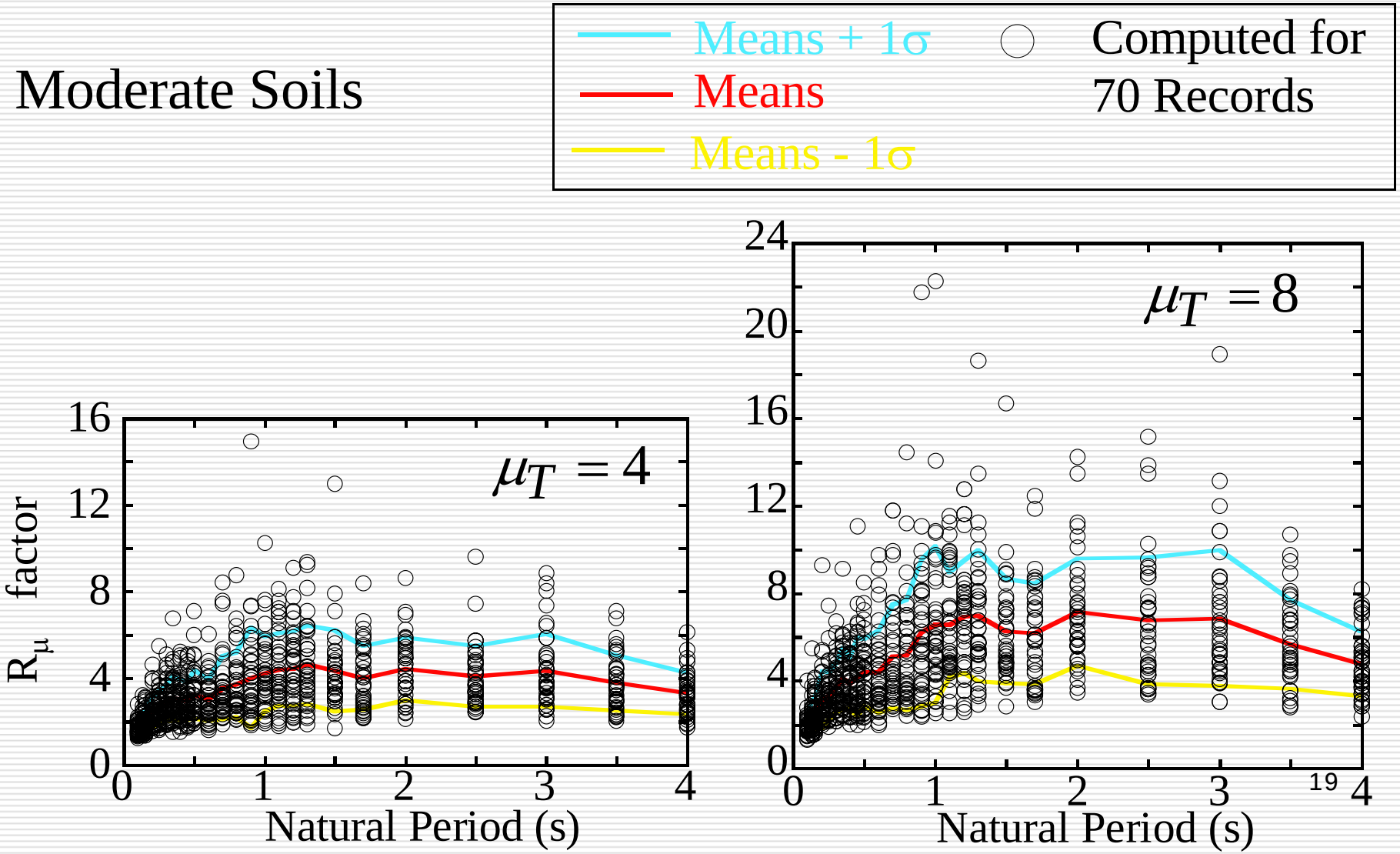
$$\xi_{NL} = \xi_{EL} = 0.05$$

Moderate Soft Sites



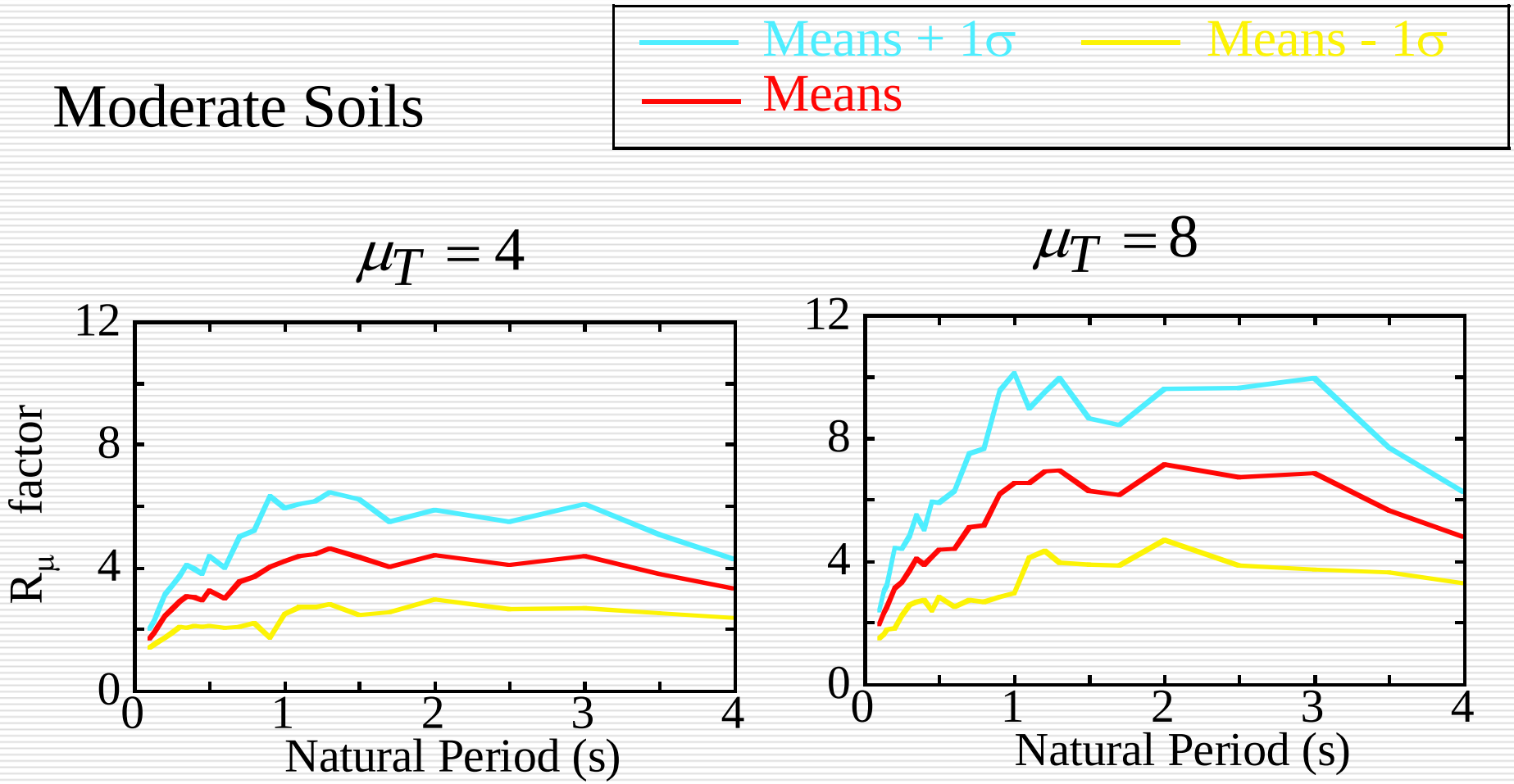
地震動によって大きなばらつきのある荷重低減係数

Moderate Soils



地震動によって大きなばらつきのある荷重低減係数

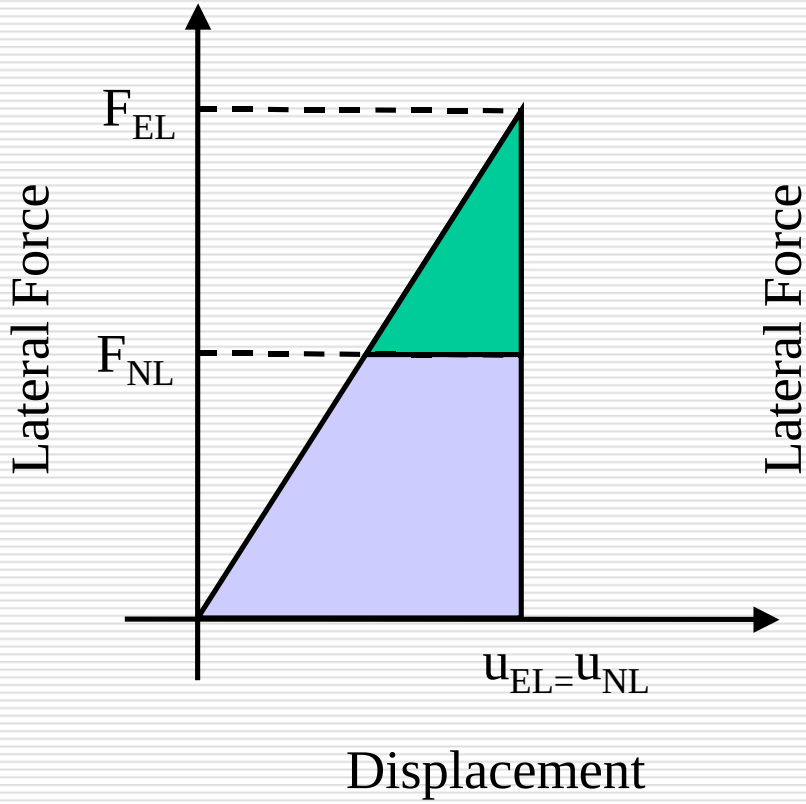
Moderate Soils



(7) Approximate assess of force reduction factor
荷重低減係数の概略推定法

変位一定則

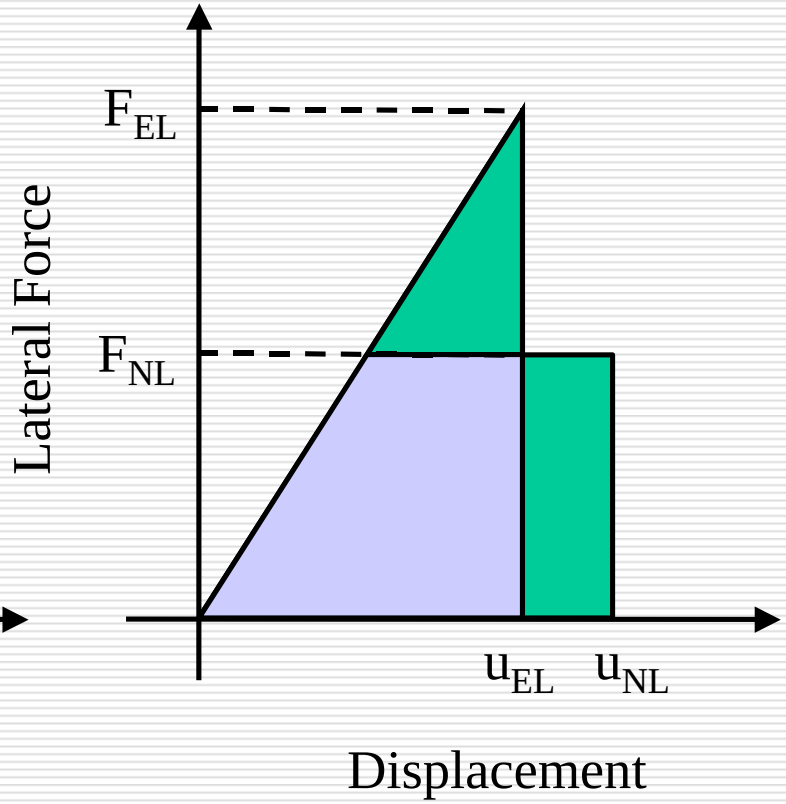
Equal Displacement Assumption



$$R_\mu = \mu$$

エネルギー一定則

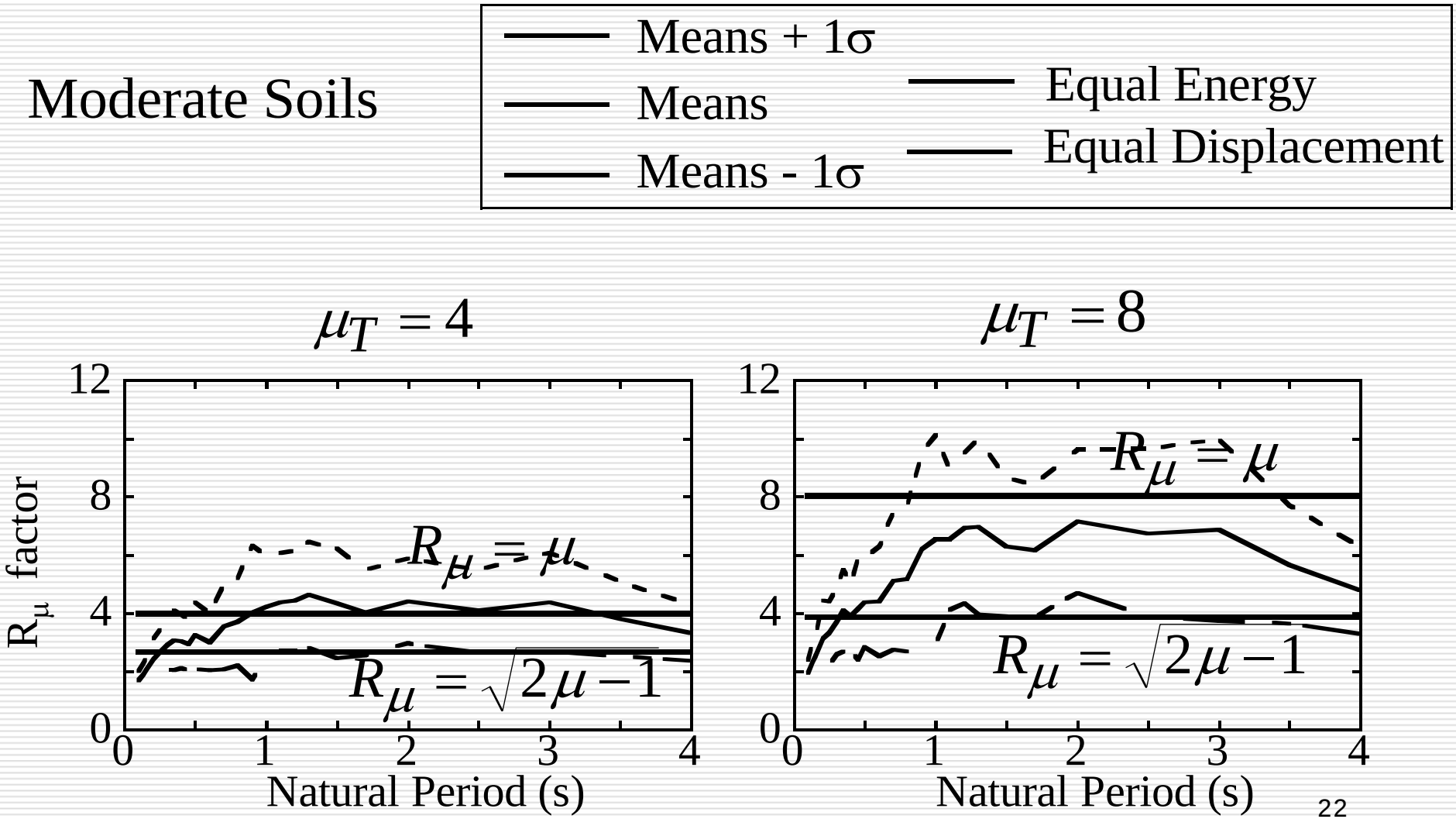
Equal Energy Assumption



$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1}$$

変位一定則とエネルギー一定則の適用性

Moderate Soils



荷重低減係数のばらつきをどこで考慮する？

●荷重低減係数の評価の際に考慮する。

●最終的にディマンドを求める際、あるいは、照査の最終段階のどこかに評価する。

●その他、考慮しておくべきこと

✓荷重低減係数のばらつきは非常に大きい

✓多くは完全弾塑性型履歴に対して求めらている。その他の履歴曲線を仮定した荷重低減係数は少ない。

✓2方向地震力を考慮していないものが大勢

✓断層近傍地震動に対する配慮が不十分ではないか?

✓荷重ベース耐震設計では、荷重低減係数は極めて重要であるにもかかわらず、まだ問題を多数抱えている。

4．5　設計スペクトルと近い特性を有する時刻歴波形

1）必要性

●現在、地震応答スペクトル法が動的解析としては使用される頻度が下がってきた。これは、構造物の非線形性を考慮するためには、時刻歴動的解析法しか使用できないためである。

●しかし、時刻歴動的解析では、応答スペクトルの形で与えられた設計スペクトルを入力とすることはできないため、設計応答スペクトルに近いスペクトル特性を持った地震波形が必要とされる。

2) スペクトルフィティングの方法

●スペクトルフィッティングの方法には各種のものがあるが基本的には

✓任意に波形を合成する。一般には、振幅や位相の振動数依存性を何らかの方法で与える場合が多い。

✓既往の強震記録を修正する。

3）道路橋示方書に示されている方法

●既往の強震記録を設計応答スペクトルにフィットするように、振動数領域で修正する。

●位相特性は地震動波形の全体的形状を表すために重要であるため、オリジナルの記録から変化させず、振幅特性だけを振動数領域で変化させる。

●イテレーションを行い、順次、目標応答スペクトルにフィッティングさせる。

荒川直士、川島一彦、相沢　興（１９８４）、応答スペクトル特性を調整した時刻歴地震応答解析用入力地震動波形、土木技術資料、26-7、pp. 46-51

4) 振動数領域における地震応答スペクトルのフィッティング法

1) 目標応答スペクトル $S_A(f,\xi)$ を決定

2) 目標応答スペクトル $S_A(f,\xi)$ と近い応答スペクトル特性を有する加速度記録 $a_m(t)$ を選定する

3) $a_m(t)$ の応答スペクトル $\tilde{S}_A(f,\xi)$ を算出

4) $\tilde{S}_A(f,\xi)$ と $S_A(f,\xi)$ の一致度が、目標とするレベルを $\varepsilon(f)$ 満足するかをチェック

$$\frac{S_A(f,\xi)}{\tilde{S}_A(f,\xi)} < \varepsilon(f) \qquad (1)$$

5) もし、式(1)が満足されれば、$a_m(t)$ を動的解析入力とする。

6) もし、式(1)が満足されない場合には、a_m のフーリエ係数を計算する

$$C_k = \frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1} a_m \exp\left(-i\frac{2\pi km}{N}\right) \quad k = 1,2,\cdots\cdots \qquad (2)$$

7) 修正フーリエ係数を求める

$$C_k{}' = C_k \frac{S_A(f)}{\tilde{S}_A(f)} \qquad (3)$$

8) フーリエ逆変換によって修正した波形a'_m を求める

$$a'_m = \sum_{k=0}^{N-1} C_k{}' \exp\left(i\frac{2\pi km}{N}\right) \qquad (4)$$

9) 3)に行く。

5）この手法を用いる際のオリジナル記録の選定法

●どのような波形からも、この手法を使って目標応答スペクトルにフィッティングすることは可能

●しかし、実測記録は、これがどの地震によって生じ、記録地点での被害がどのようであったかという情報を有している。

●したがって、この記録を入力した構造物の動的解析では、解析によって求められた当該構造物の損傷度と、記録地点での実際の他の構造物の被害を総合して推定される当該構造物の被害度を比較し、当該構造物の耐震性が目標とする耐震性を確保できるかという点を検討できることに意味がある。

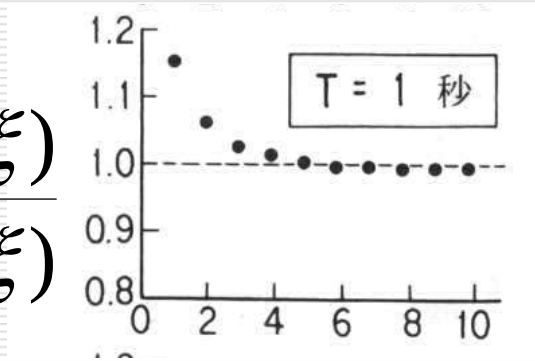
●このためには、スペクトルフィッティングするオリジナル記録は、以下の2条件を満足するものでなければならない。

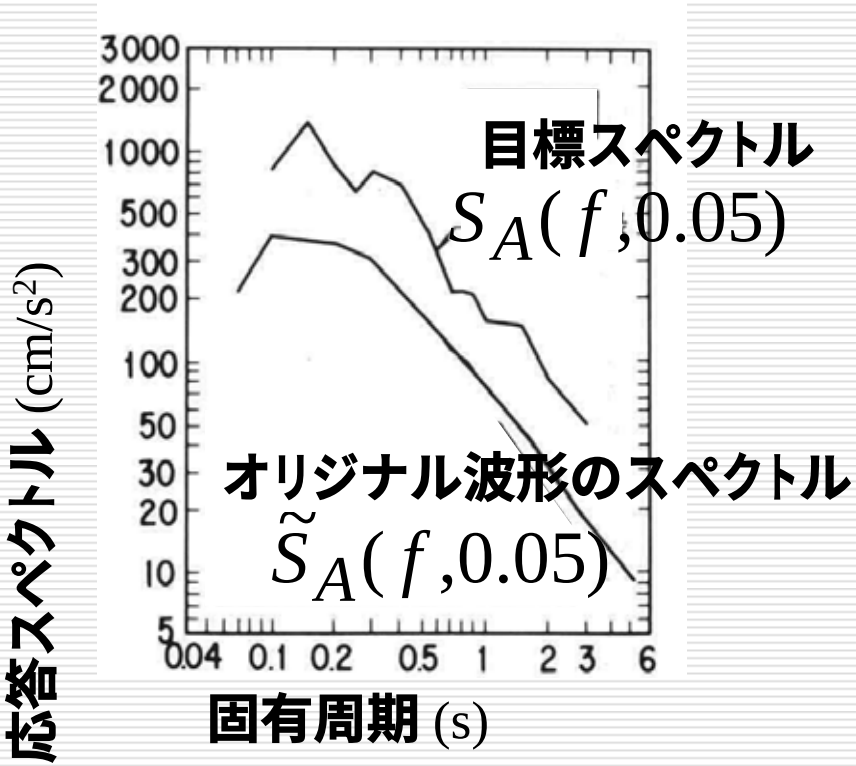
✓オリジナル記録は、当該構造物の耐震性を検討するに足る地震規模、距離、地盤条件に該当するものであること

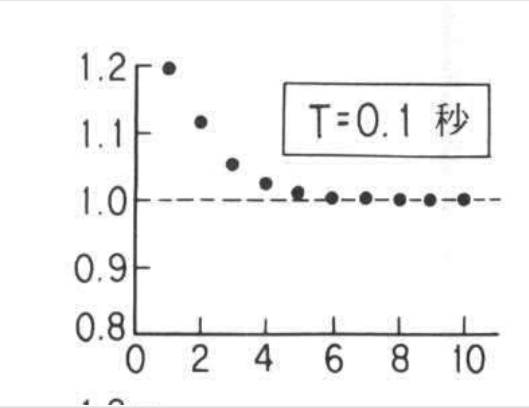
✓目標応答スペクトルと近い応答スペクトル特性を有していること。これは、応答スペクトル特性を修正する度合いをできるだけ少なくし、オリジナルの記録がその背後に有している情報をできるだけそのまま使用できるようにするためである。

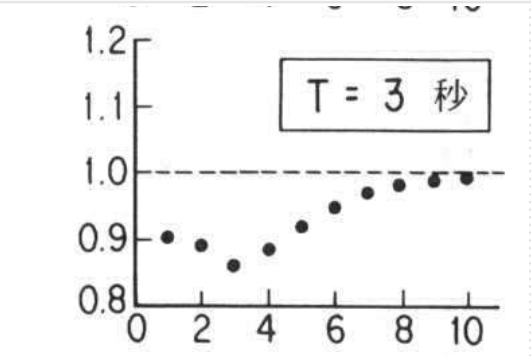
6) スペクトルフィッティングの例

$$\frac{S_A(f,\xi)}{\tilde{S}_A(f,\xi)}$$





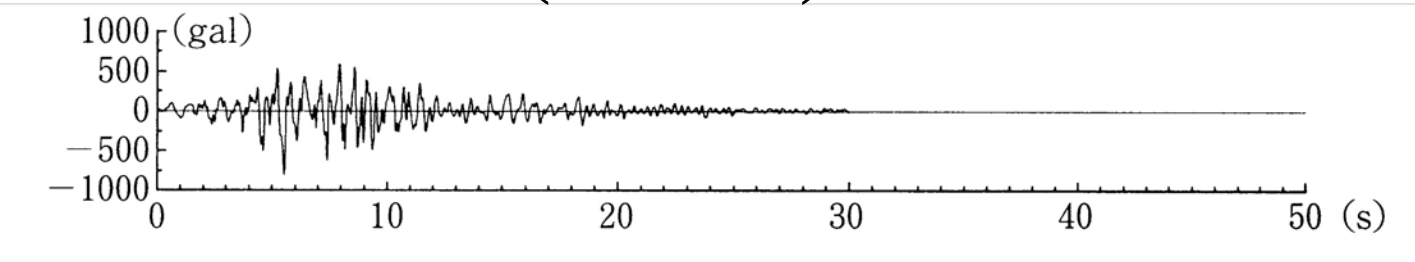




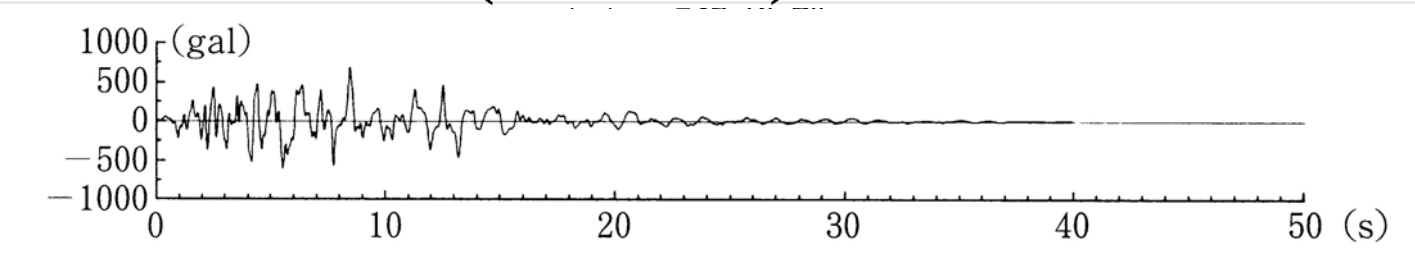
イテレーション回数

7) スペクトルフィッティングした波形例 (道路橋示方書)

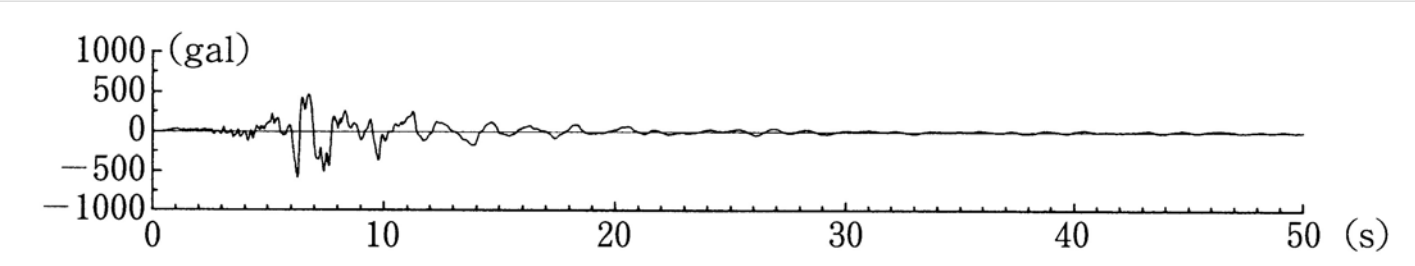
硬質地盤(I種地盤)



中程度 (II種地盤)



軟質地盤 (III種地盤)



8）スペクトルフィティングした波形の利用

●この方法で求めたフィッティング波形は、あくまでも線形地震応答スペクトルを近似するだけであり、非線形応答に対するフィティング効果があるわけではないことに注意しなければならない。

●スペクトルフィティングした波形を使用するようになってから、動的解析の利用が飛躍的に進んできた。これは、動的解析結果と地震時保有耐力法や震度法による解析結果に整合性が取れるようになったからである。

●動的解析では、少なくとの3種類の地震動に対する応答の平均値を用いて、解析結果の照査を行う。

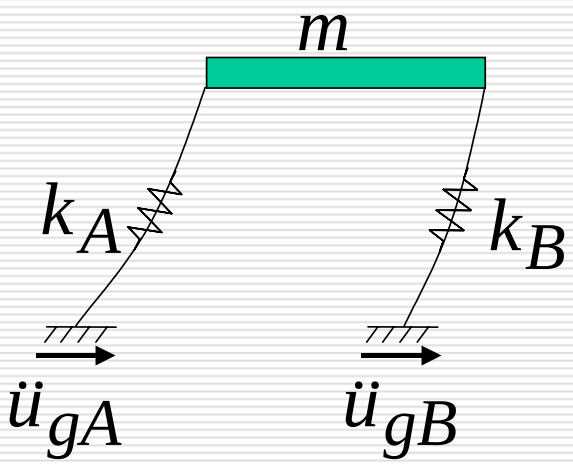
4．6　多点入力応答スペクトル

1) 多点入力とは？

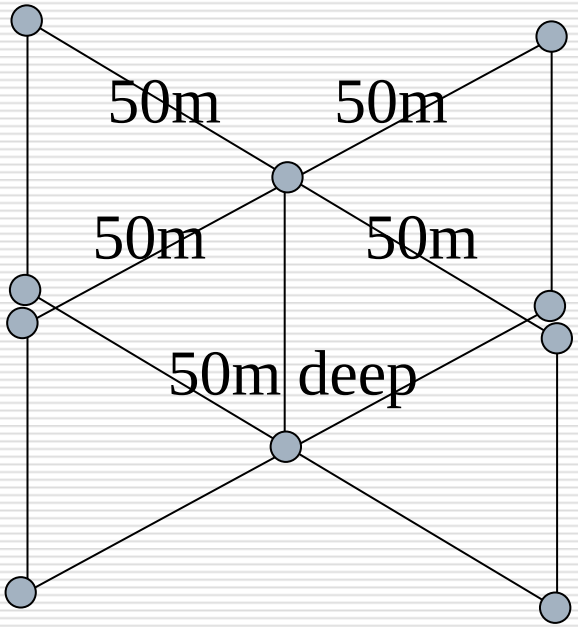
● 現在行われている動的解析では、構造物に一様な地震動が作用すると仮定される場合が多いが、実際には、構造物に作用する地震動は，場所毎に一様ではない。

●多点入力（非一様入力等、いろいろな表現が用いられる）の影響を最も簡単に表したのが、多点入力応答スペクトル

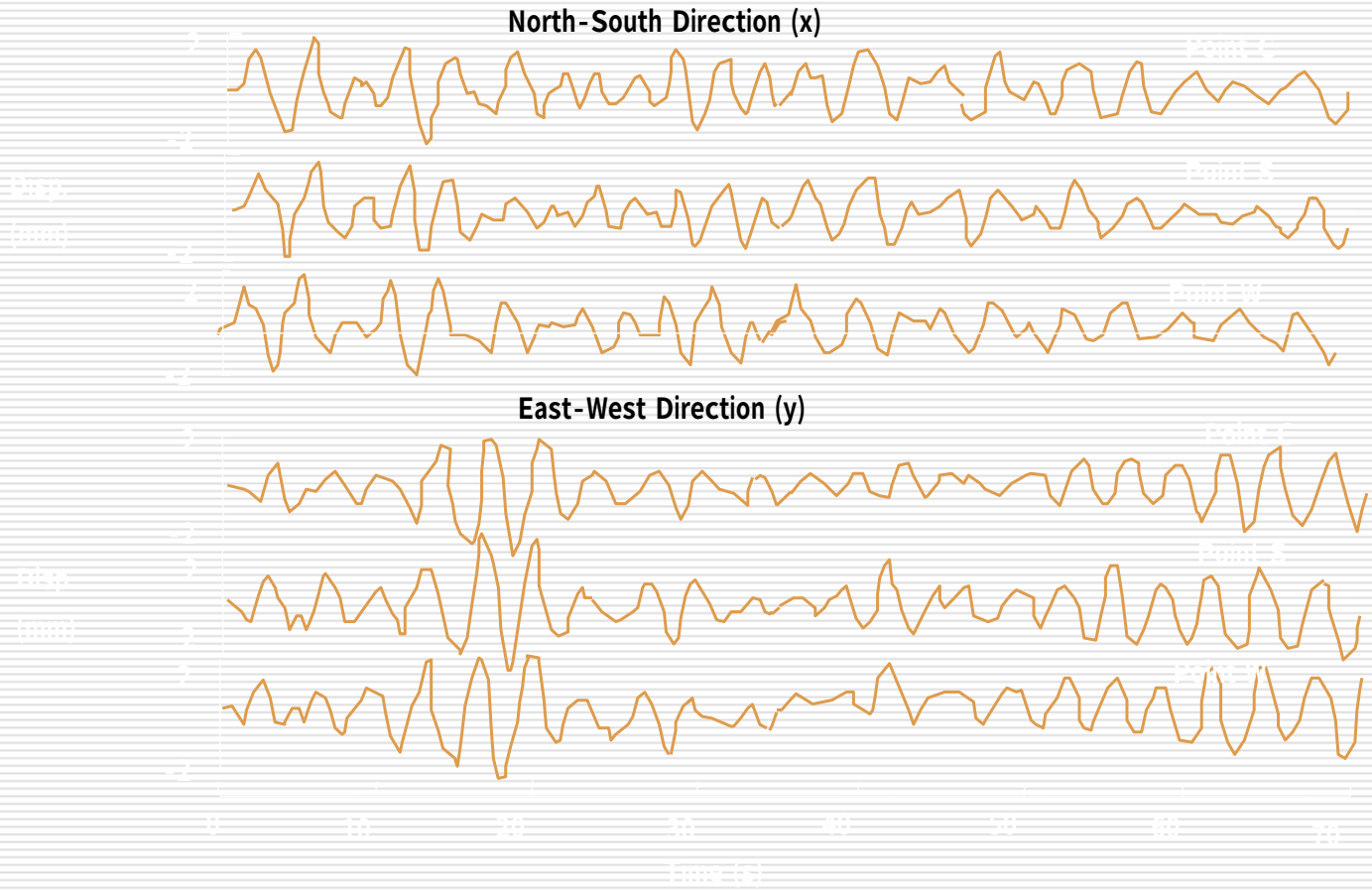
●2つのばねで支持された質点において、2つの支点に異なった入力地震動が作用すると仮定する。

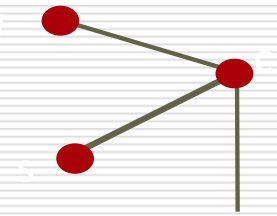


2) 土木研究所（つくば市）の高密度強震観測記録



Dispacements Computed from Measured Accelerations



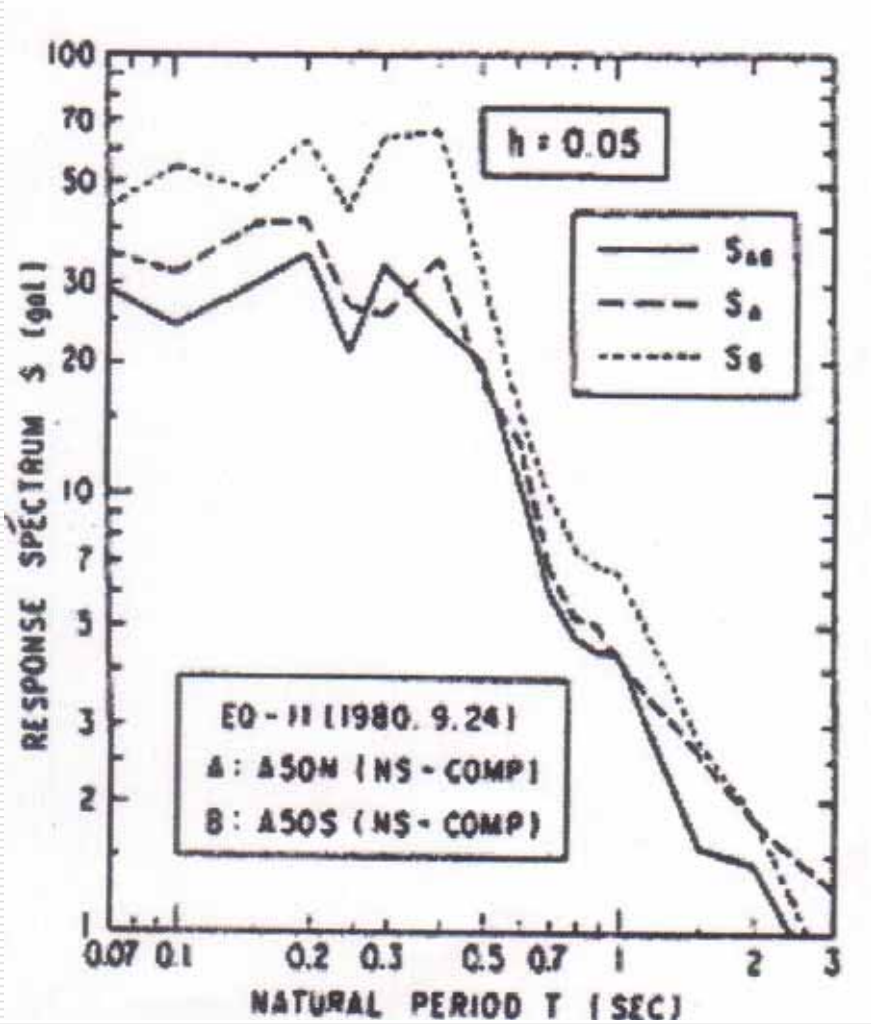


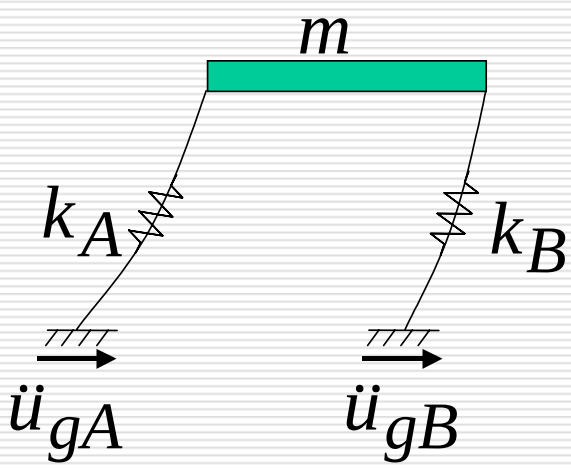
M6.7

Izu-peninsula

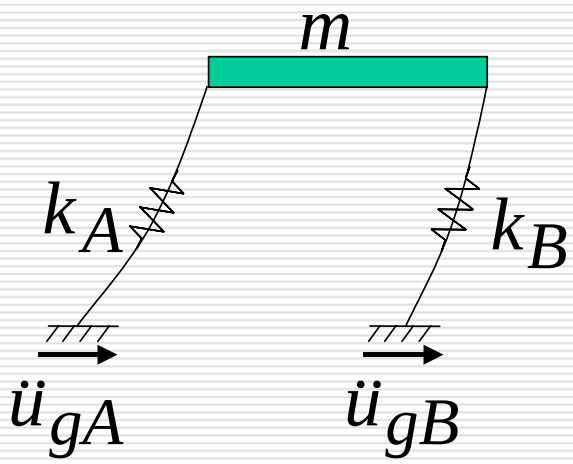
June 29, 1980

4) 高密度強震記録（土木研究所構内）に対する多点応答スペクトル

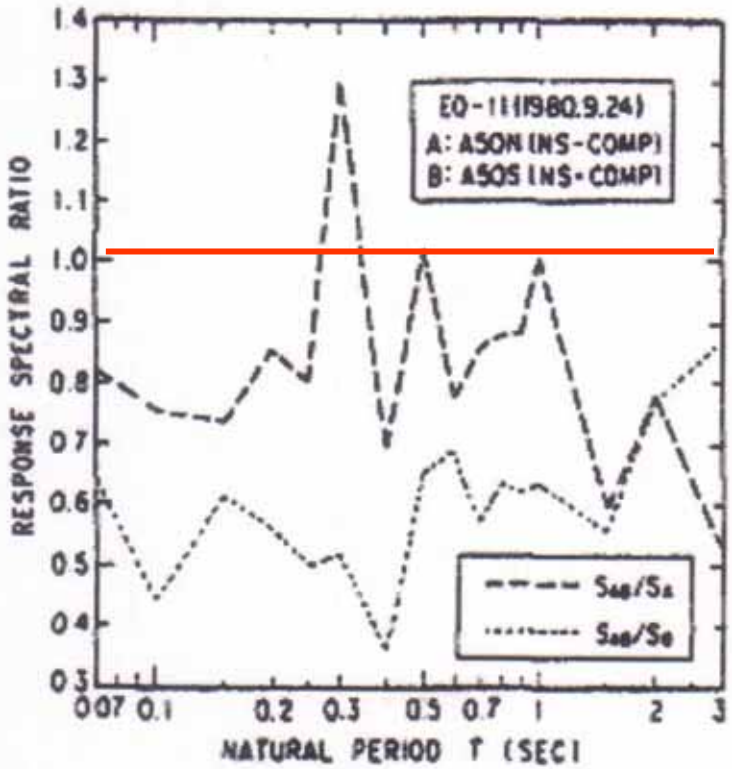


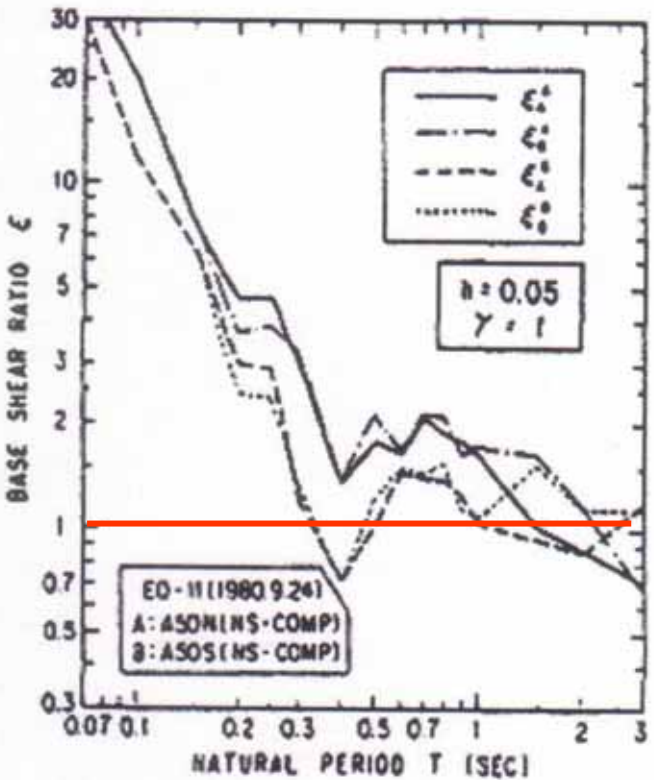


5) 加速度応答及びせん断力に及ぼす多点入力の効果の定量化



$$\frac{S^{AB}}{S^{A}} \quad \& \quad \frac{S^{AB}}{S^{B}} \qquad \frac{F_A^{AB}}{F_A^{A}}$$





6）多点応答スペクトルから見た多点入力の影響

●一様入力に比較し、多点入力を受ける場合には、一般に、桁の応答加速度は小さくなる

●しかし、一様入力に比較し、多点入力を受ける場合には、一般に、橋脚に作用するせん断力（や曲げモーメント）は大きくなる。この度合いは、構造物の固有周期が短いほど、顕著であり、固有周期が長くなると小さくなる。