

MIDAS & CREATECセミナー2015

耐震設計と地震リスク －耐震性能を定量化する2つの指標－

東京都市大学:吉川弘道



後半：
土木施設の地震リスク評価
とNEL/PML評価
-道路橋RC橋脚のケーススタディ-

Introduction #1

- 土木構造物(橋梁、高架橋、地下構造物etc.)は、新設時に適用される耐震設計基準が制定され、長い歴史を持つ。震災毎に改訂を繰返し、今日に至っている。
- 現在では、欧米諸国同様、性能照査型耐震設計(Performance-based Seismic Design)が定着している。
- 土木は、道路橋示方書などの構造物別の基準書にて、建築は、建築基準法と関連ガイドラインにて具現化し、全く様相が異なる。
- 地震リスク評価は、商業建築物の不動産評価(エンジニアリングレポート)の一つとして我が国に導入されたが、構造物の耐震性評価にも有用な耐震技術となる。
- 著者らを中心に土木構造物に適用事例が展開されている。

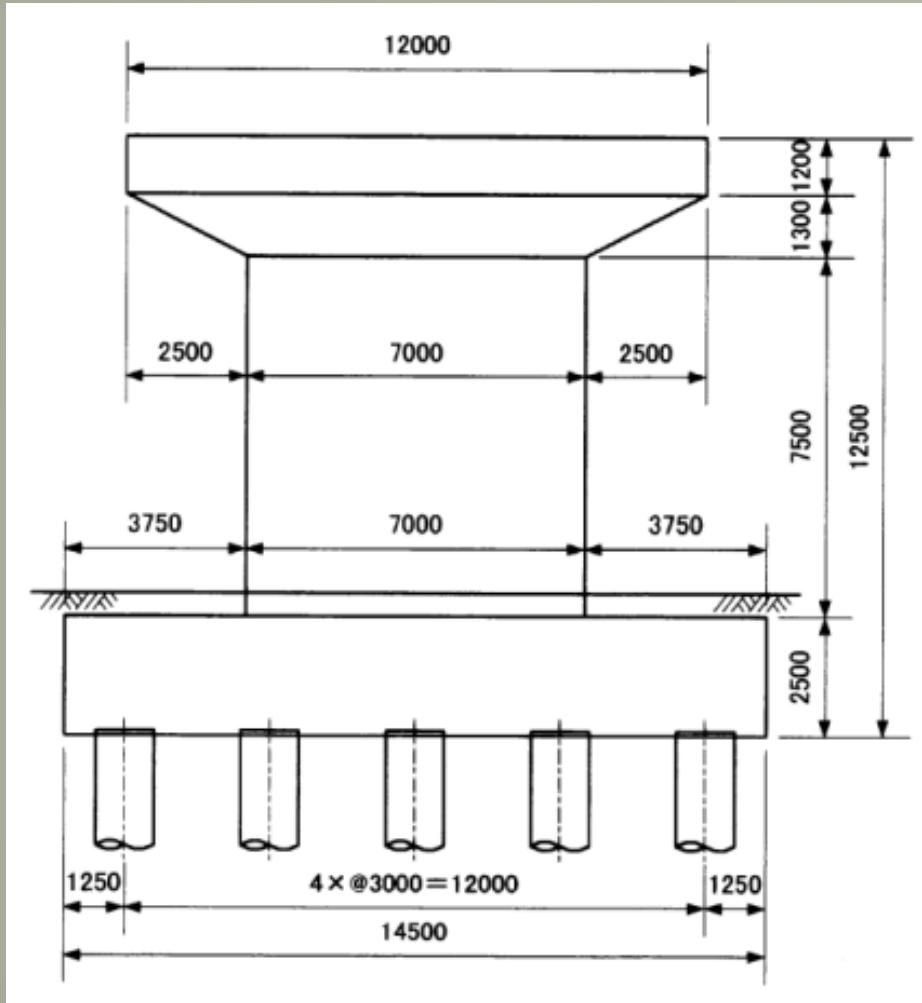
Introduction #2

- 地震リスクは、準拠基準書が異なる構造物、設計年度が異なる場合、耐震補強/無補強など、‘事情の異なる’多種多様の構造物群を統一的に評価することができる。
- 耐震設計と地震リスクを整理すると：
 - ・性能照査型耐震設計：‘規定された設計地震動に対して、所定の性能を評価する’
 - ・地震リスク評価：‘多かれ少なかれ被災することを前提に、被災規模を信頼性理論の基に算定する’
- 耐震設計と地震リスク評価は、要素技術（地震ハザード評価、構造物の韌性評価、etc.）が同一であり、土木構造物の耐震性評価の両輪（表裏の関係）をなすと言える。

事例解析：内容と要点

- 対象：最も一般的な道路橋脚（RC単柱式橋脚）
- 断面性能の異なる6橋脚の設計：
現行道路橋示方書：満足する3橋脚、満足しない3橋脚
- 地震リスク評価の実施：地点／東京都
地震リスク曲線、NEL, PMLの算出
- 道路橋示方書に従う耐震性能と地震リスク評価の整合性の検討

対象構造物：T型RC橋脚



橋脚の種類：

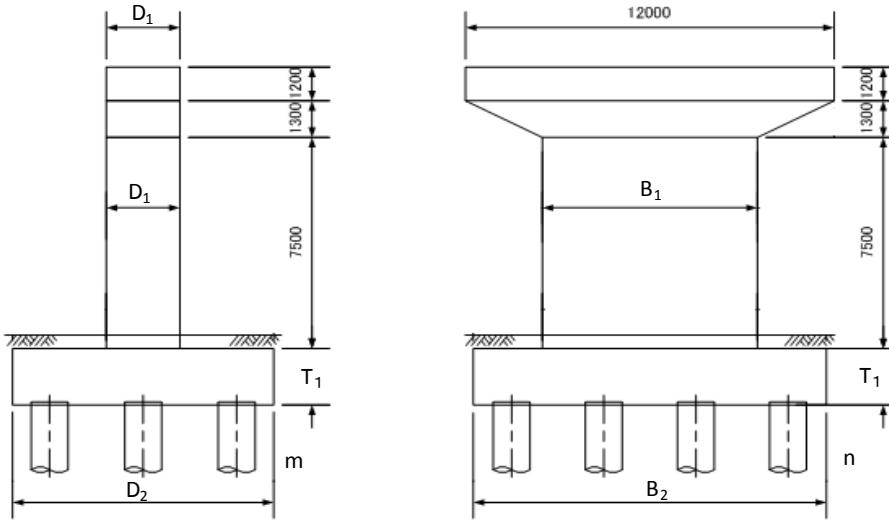
**P019, P043, P072, P097,
P141, P184**

(数字3ヶタ: 設計降伏震度)

耐震性能:P097の場合

- ・等価重量: 9.828 MN,
- ・初期剛性: 286.4 MN/m
- ・等価固有周期: 0.92 sec,
- ・設計降伏震度: 0.97
- ・降伏変位/終局変位:
 橋脚単独系: 29mm / 355mm
 支承-橋脚系: 186
 mm / 533mm

対象構造物：T型RC橋脚



※表-1に示すnとmは、それぞれの方向における杭本数を示し、上図の場合n=4, m=3であり総杭本数はn×m=12本となる。

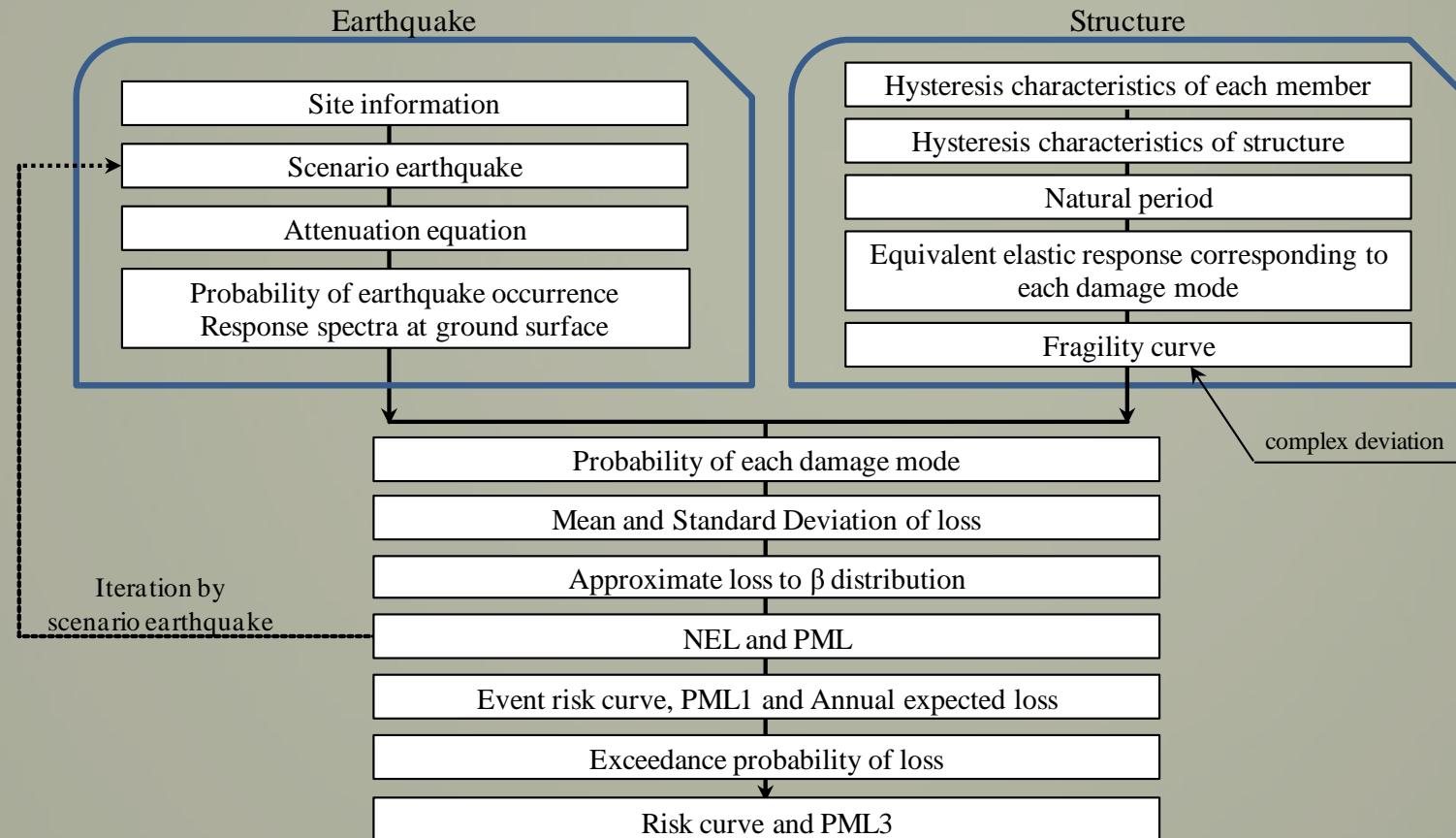
- ・片側歩道(3m)を有する2車線の非合成RC床版を有する5径間連続鋼I桁橋、支間長は40m
- ・降伏震度6種×地盤種別2種を想定
(降伏震度0.2～1.2、地盤種Ⅰ種・Ⅱ種)
- ・橋脚頂部に積層ゴム
- ・鉄筋の許容応力度に降伏強度を用いた許容応力度法により橋脚断面を想定
- ・橋脚の脚部に塑性ヒンジが生じるまで、基礎の降伏、ゴム支承の破断は生じない

橋脚名	P019		P043		P072		P097		P141		P184	
設計水平震度	0.2		0.4		0.6		0.8		1.0		1.2	
B ₁ (mm)	7,000		7,000		7,000		7,000		7,000		7,000	
D ₁ (mm)	2,000		2,400		2,800		3,500		4,200		5,000	
軸方向鉄筋比 (%)	0.26%		0.59%		0.83%		0.76%		0.83%		0.82%	
地盤種	第Ⅰ種	第Ⅱ種	第Ⅰ種	第Ⅱ種	第Ⅰ種	第Ⅱ種	第Ⅰ種	第Ⅱ種	第Ⅰ種	第Ⅱ種	第Ⅰ種	第Ⅱ種
B ₂ (mm)	9,000	9,000	9,000	11,500	12,500	11,500	12,500	14,500	12,500	17,500	13,500	22,000
D ₂ (mm)	4,500	8,000	8,000	8,500	12,500	11,500	12,500	12,000	12,500	14,500	13,500	22,000
t ₁ (mm)	1,500	2,000	2,000	2,000	2,500	2,500	2,500	2,500	2,800	2,800	3,500	4,500
n(本)	—	5	—	4	—	4	—	5	—	6	—	6
m(本)	—	3	—	3	—	4	—	4	—	5	—	6

T型RC橋脚：フランジリティ特性：4つの被害形態

damage classification	damage index
no damage	$0 \leq \delta_{\max} \leq \delta_{y0}$
minor damage	$\delta_{y0} < \delta_{\max} \leq 3\delta_{y0} = \delta_{y0} + \frac{2}{3}(\delta_u - \delta_{y0})$
major damage	$\delta_{y0} + \frac{2}{3}(\delta_u - \delta_{y0}) < \delta_{\max} \leq 5\delta_{y0} = \delta_{y0} + \frac{4}{3}(\delta_u - \delta_{y0})$
near collapse	$\delta_{y0} + \frac{4}{3}(\delta_u - \delta_{y0}) < \delta_{\max} \leq \delta_{y0} + \frac{6}{3}(\delta_u - \delta_{y0})$

地震リスク評価のフロー： 左上/地震ハザード VS. 右上/構造特性



地震イベントリスク曲線： 縦軸：超過確率、横軸：正規化再調達価格

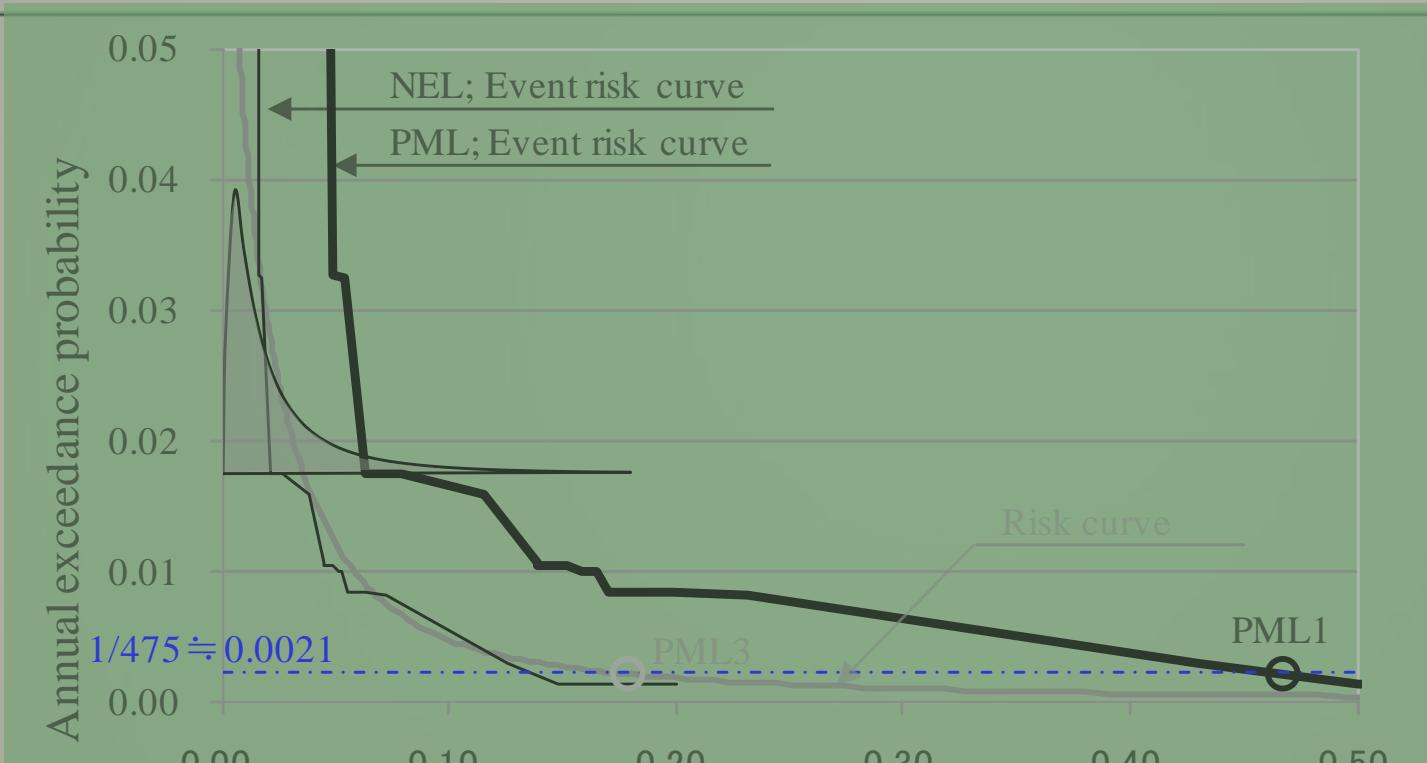
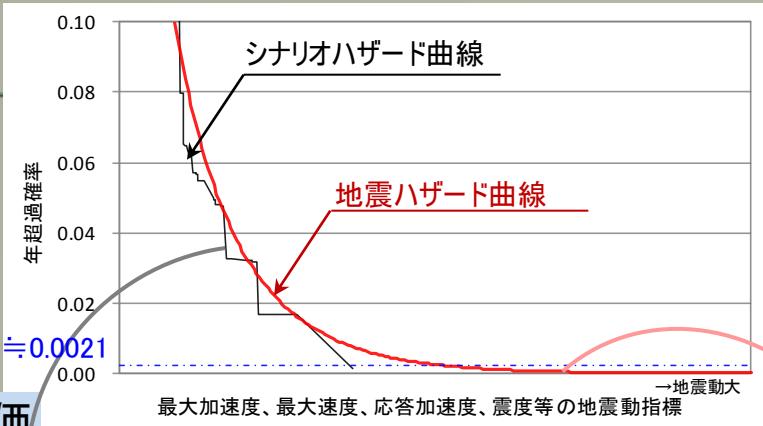


Fig. 1: Seismic event risk curves and integrated risk curves

地震リスク曲線と3つのPML：日本建築学会

地震ハザード評価



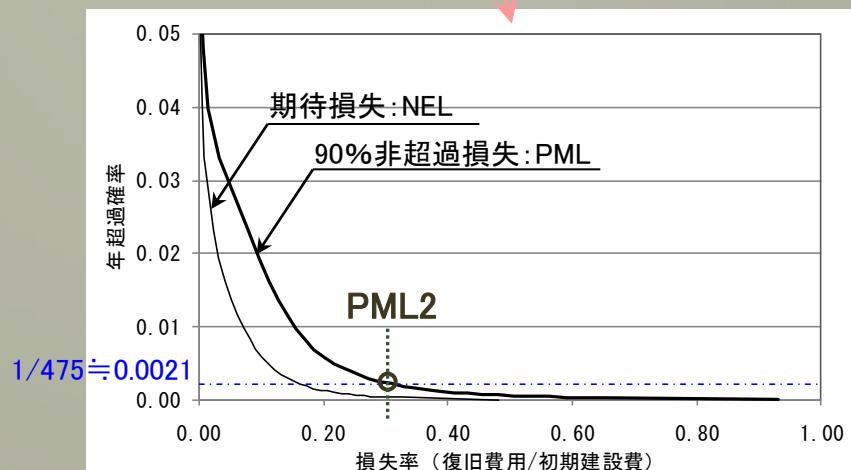
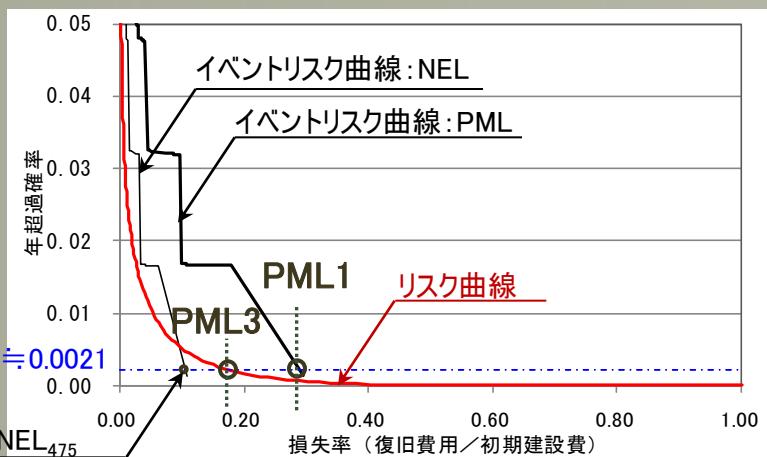
シナリオハザード曲線を基に評価

地震ハザード曲線

$$G_X(x) = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - P_i \int_x^\infty f_X(x|i) dx \right)$$

P_i : シナリオ地震 i の発生確率
 $f_X(x|i)$: シナリオ地震 i の地震動強さ確率密度関数

地震ハザード曲線を基に評価

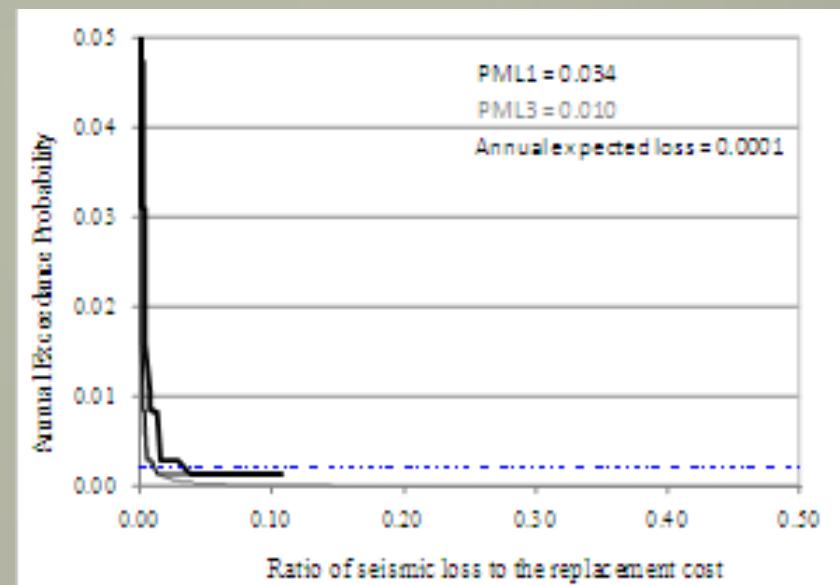
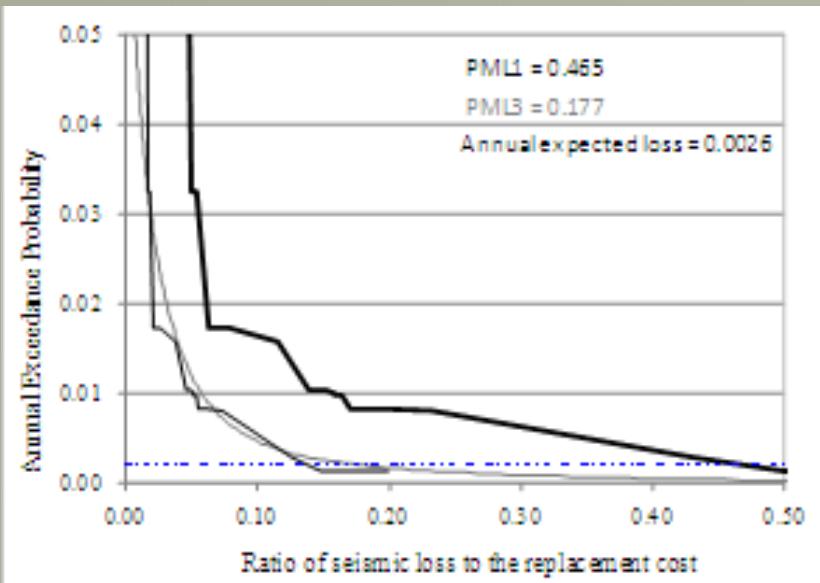


$$\text{リスク曲線 } G_c(c) = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - P_i \int_c^\infty f_c(c|i) dc \right)$$

P_i : シナリオ地震 i の発生確率

$f_c(c|i)$: シナリオ地震 i による復旧費用の確率密度関数

地震イベントリスク曲線： P019:設計震度0.19, P072:設計震度0.72



★ P019: 降伏震度=0.19
PML1=0.465, PML3=0.177

★ P072: 降伏震度=0.72
PML1=0.034, PML3=0.010

Rc橋脚（設計震度の異なる6橋脚） に対する地震リスク指標値と耐震設 計との比較

地震リスク指標値: PML 予想最大損失

性能照査型耐震設計: CAPACITY-DEMAND RATIO

地震リスク指標の算出： 地震イベントリスク曲線からPML評価

PML: Probable Maximum Loss 予想最大損失

PML1: 50年間での超過確率0%の損失を
生じる地震動による10%非超過確率

PML3: 50年間での超過確率0%の損失

*PML*値：損失額再調達価格

道路橋小力音・地震時保有耐力耐 力法

レベル2 / タイプⅡ 地震動に対して実施

Capacity 地震時保有耐力 P_U

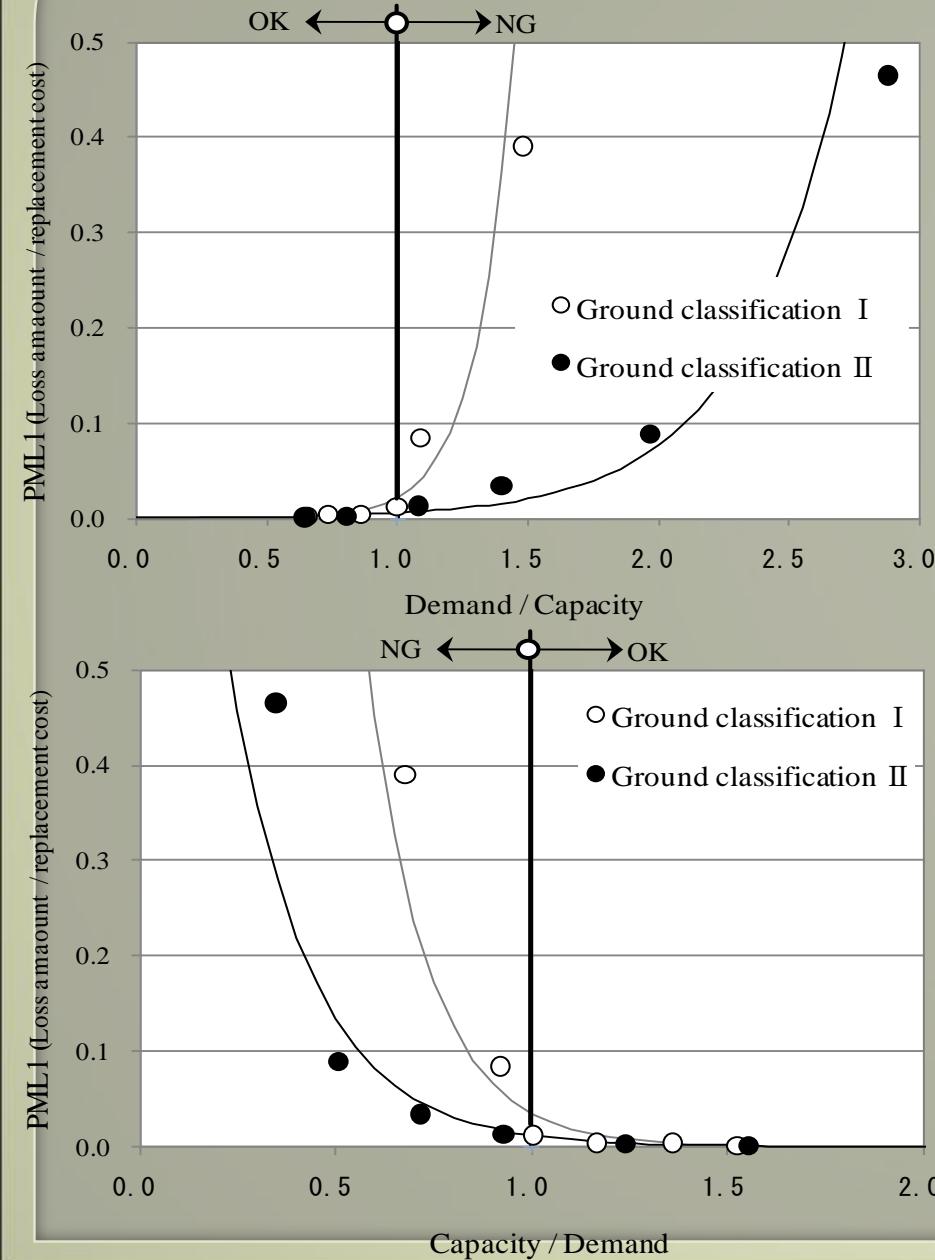
Demand 地震荷重: $k_{hc} \times W$

Capacity – Demand Ratio の算定

$$\frac{\text{Capacity}}{\text{Demand}} \geq 1.0: OK$$

$$\frac{\text{Capacity}}{\text{Demand}} < 1.0: NG$$

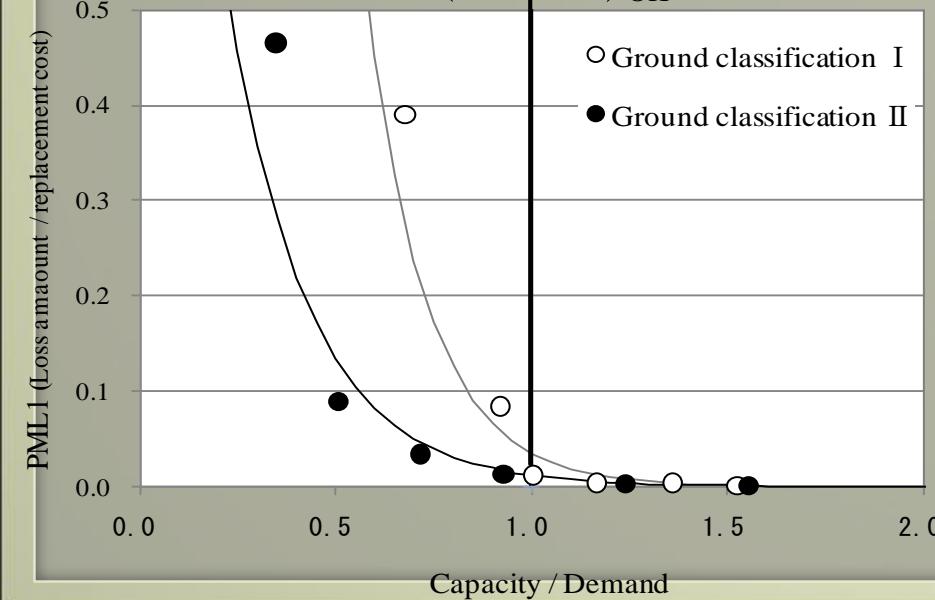
Demand-Capacity RatioとPML値との関係



Demand-Capacity Ratio:

上図 :

Demand/Capacity :
1.0以下⇒OK, 1.0以上⇒NG



下図 :

Capacity/Demand :
1.0以下⇒NG, 1.0以上⇒OK

道路橋示方書とPML値との関係

(下図：Capacity/Demandを使って)

- Capacity/Demandの増大とともにPMLが減少 ⇒ 当然の結果
- 示方書NG/OK前後でも、PMLは連続的に推移する
- 耐震強度の減少とともに、PMLは急激に上昇する。
 ⇒ 高リスク（低耐震強度）に対してPMLは敏感
- 国内の多数地点に実施すると、高地震域/低地震域が直接PMLに反映されるが、Capacity/Demand（道路橋示方書）は、鈍感/保守的である。 ⇒ 特に、現行の地域係数が連動していない。

道路橋示方書とPML値との関係

- 道路橋示方書 (Capacity/Demand Ratio) とリスク指標値 (PML)との比較は、どのような意味/意義があるか？
- 現行示方書の照査方法（不等号照査）：
「Capacity > Demand : OK」は見直しの必要はあるか？
- 現行の地域係数は、地震ハザード（例えばJ-SHIS）が反映されていない ⇒ どのように反映すべきか？

結論に代えて： 地震リスクと耐震設計と の縦糸/横糸方式

- 新設時:準拠示方書(道路橋示方書,鉄道標準etc.)に基づいて,性能照査型耐震設計を適用:
⇒ 現行の設計慣行を変えることはできない.

結論に代えて： 地震リスクと耐震設計と の縦糸/横糸方式

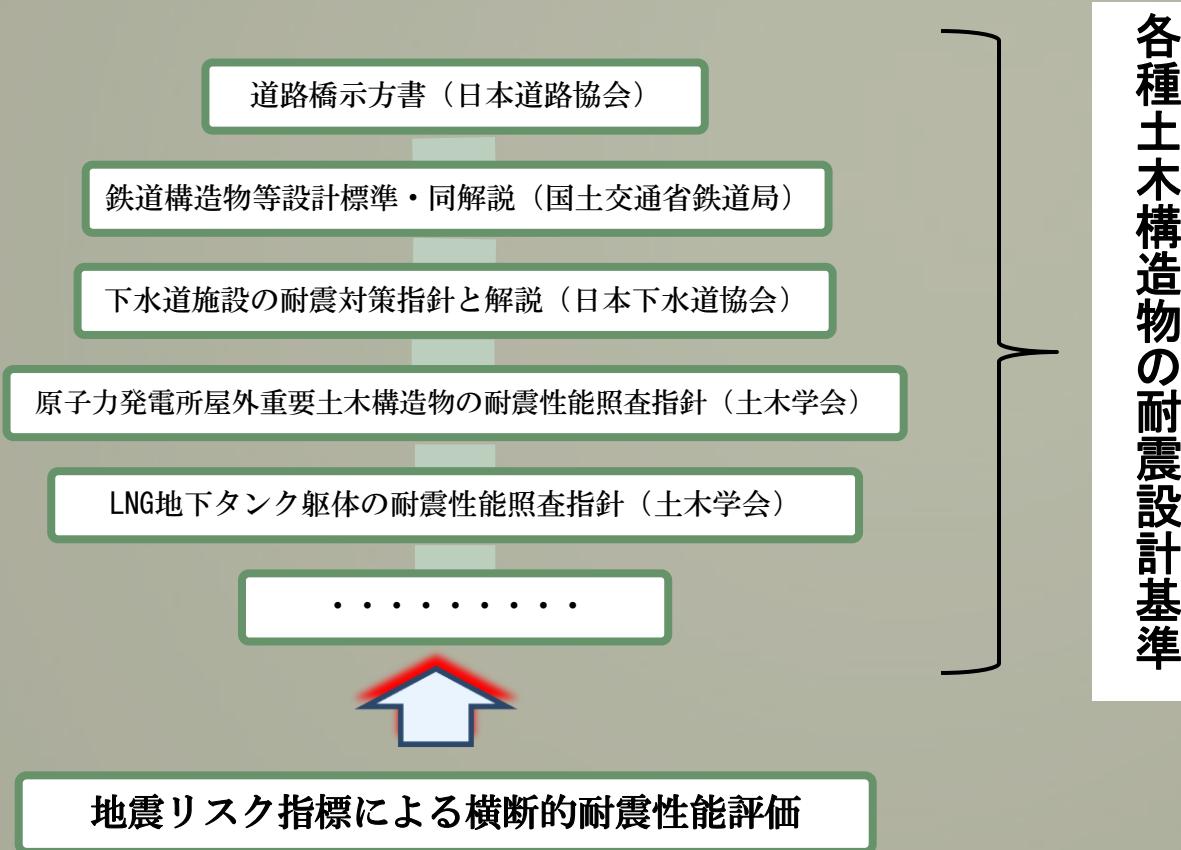
- 準拠基準書が異なる構造物、設計年度が異なる場合、耐震補強/無補強など、多種多様の構造物群を統一的に評価する必要がある。
⇒ 地震リスク評価手法が有力である。

結論に代えて： 地震リスクと耐震設計と の縦糸/横糸方式

- 結論として、各種土木構造物に対して、現行耐震設計法と地震リスク評価が、縦糸/横糸として機能する。
⇒ 「縦糸/横糸方式」

各種示方書とリスク値による‘縦糸/横糸方式’

社会基盤施設に対する現実的な提案！



日刊工業新聞(2012年2月22日掲載):
性能設計と地震リスク評価:防災減災技術を支えるソフト技術の両輪