長周期地震動を考慮した PML 評価手法の開発

DEVELOPMENT OF PML EVALUATION METHOD CONSIDERING LONG PERIOD STRONG MOTION

恒川裕史 — * 1 大淵正博 — * 2
糸井達哉 — * 3 高田毅士 — * 4

Hiroshi TSUNEKAWA — * 1 Masahiro OOBUCHI — * 2
Tatsuya ITOI — * 3 Tsuyoshi TAKADA — * 4

キーワード：
地震リスク, 長周期地震動, 復旧費用, 地殻内地震, 海溝型地震

Keywords:
Seismic risk, Long period strong motion, Repair cost, Crustal earthquake, Plate boundary earthquake

Risks for long-period structures due to long-period strong motion has been a challenge since damages occurred during 2003 Tokachi-oki Earthquake. Although PML is widely used as a seismic performance index, conventional methods cannot be applied directly to those. A new PML evaluation method is proposed. Ground motions for inter- and intra-plate, and crustal earthquakes are predicted using attenuation equations of response spectrum and group delay time. 3D elasto-plastic response analyses are employed and earthquake loss is calculated based on ductility and cumulative plastic deformation ratio of each structural element. The proposed method is illustrated with examples in Osaka and Tokyo.

1. はじめに

PML(Probable Maximum Loss)は, 最大規模の地震が発生した時の建物の復旧費用の再調達価格(現時点で建設するのに必要な一般的な費用の総額)に対する比率で定義され, 建物の証券化の際の耐震性評価手法として一般に普及してきた。他の耐震性指標と異なり, 建物の性能が金額として定量化されるため事業への影響が明確で建築主やエンドユーザにもわかりやすく, 現在では証券化に限らず, 建物の取引や新築・耐震改修時の耐震性指標などにも利用されている。PMLは, 建物の性能を構造耐震指標 I_s や質点系動的解析により評価することが多い。筆者らは, 被害事例が少なく I_s などでの性能評価が難しい新しい構造形式や耐震性向上技術を適用した建物を対象に, 質点系モデルによる評価では不可能な, 制震ブレースの最適配置を検討する際などに必要な部位部材単位的设计へのフィードバックを可能とする三次元弾塑性地震応答解析を用いた PML 評価手法を構築してきた^{1),2)}。一方, 2003 年十勝沖地震で震源から 200km 離れた苫小牧で石油タンクが被害を受けたことから長周期地震動が注目を浴び, 同じように固有周期の長い超高層ビルや免震ビルなどへの被害が懸念されている。東日本大震災でも 700km 以上離れた大阪の超高層ビルで天井やエレベータなどの被害が生じている。著者らの研究を含めてこれまでの PML 評価法は, 最大加速度や最大速度などの地震動指標に基づいて評価が行われており, 長周期地震動はほとんど考慮されていなかった。例えば文献²⁾では地震ハザードステーション(J-SHIS)³⁾の地震ハザード解析に基づいて地動最大速度を求め, スペクトル形状は建設省告示第 1461 号のスペクトル(告示スペクトル)に, 継続時間および包絡関数は技術指針⁴⁾に基づいて設定しており, 長周期地震動は考慮していなかった。

筆者らは PML 評価に長周期地震動の影響を取り入れるため, 大き

な長周期地震動の生成が予想されている海溝型のシナリオ地震を対象に長周期地震動を考慮した地震リスク評価手法の検討を行ってきた⁵⁾。これらの検討を踏まえ, 更に同様に長周期地震動の生成が予想されている比較的大きな規模の地殻内地震を含めた地震ハザード解析を加えて, 長周期地震動を考慮した PML 評価手法を提案する。

2. 地震リスク評価方法

2.1 評価方法の概要

日本建築学会建築物の安全性評価ガイドライン小委員会による PML の定義を表 1 に示す⁶⁾。このうち, PML2 については損失(建物被害)と長周期地震動の地震動強さとの関係が明確ではないため, 本研究では損失で定義された PML1 と PML3 とを対象とする。

表 1 PML の定義

PML1	50 年間で超過確率 10%の損失を生じる地震による 90%非超過損失
PML2	50 年間で超過確率 10%の地震動強さによる 90%非超過損失
PML3	50 年間で超過確率 10%の損失

(1) 共通事項

長周期地震動の予測では断層モデルを設定し, 1 ケースもしくは数ケースの地震波を理論的手法もしくは半経験的手法で作成することが多い。しかしながら, こうした方法では設定された断層から生ずる地震波の不確定性を評価することができず, PML 評価には適合しない。このため, 本研究ではこうした評価が可能な経験的手法により地震波を生成した。海溝型地震および地殻内地震を対象に減衰 5%の疑似速度応答スペクトル pSv および群遅延時間⁷⁾ Tgr の平均および分散の経験式を作成する。本研究では, 海溝型地震の pSv につ

¹⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員
(〒270-1395 印西市大塚1-5-1)

²⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 研究員・博士(工学)

³⁾ 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 准教授・博士(工学)

⁴⁾ 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・工博

¹⁾ Chief Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corp.

²⁾ Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corp., Dr. Eng.

³⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

⁴⁾ Prof., Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

いては国土交通省対策試案⁸⁾の経験式に加えて大きなマグニチュードに対応するために森川⁹⁾の提案する M_w^2 項を加えた式(1)を、地殻内地震の pSv についてはマグニチュードに対する頭打ちの傾向が見られなかったため国土交通省対策試案に準拠した経験式(2)を用いた。 Tgr の平均および分散の経験式については、国土交通省対策試案の経験式(3), (4)を用いた。

$$\log_{10} pSv_p(T) = a_p(T)M_w + a_{p2}(T)M_w^2 + b_p(T)R - \log_{10}(R^{p_p(T)} + d_p(T)10^{0.5M_w}) + c_{pj}(T) + \varepsilon_p \quad (1)$$

$$\log_{10} pSv_c(T) = a_c(T)M_w + b_c(T)R - \log_{10}(R^{p_c(T)} + d_c(T)10^{0.5M_w}) + c_{cj}(T) + \varepsilon_c \quad (2)$$

$$Tgr_\mu(f) = A_\mu(f)M_o^{1/3} + B_\mu(f)X + C_{\mu j}(f) + \varepsilon_\mu \quad (3)$$

$$Tgr_\sigma(f) = A_\sigma(f)M_o^{1/3} + B_\sigma(f)X + C_{\sigma j}(f) + \varepsilon_\sigma \quad (4)$$

ただし、 M_w : モーメントマグニチュード、 R : 断層最短距離、 M_o : 地震モーメント、 X : 震源距離、 $a_p(T)$, $a_{p2}(T)$, $b_p(T)$, $c_{pj}(T)$, $d_p(T)$, $a_c(T)$, $b_c(T)$, $c_{cj}(T)$, $d_c(T)$, $A_\mu(f)$, $B_\mu(f)$, $C_{\mu j}(f)$, $A_\sigma(f)$, $B_\sigma(f)$, $C_{\sigma j}(f)$: 回帰パラメータ、 ε_p , ε_c , ε_μ , ε_σ : 平均0で正規分布に従うばらつきである。なお、式(3),(4)についても海溝型地震と地殻内地震とで回帰パラメータは異なるが、表記は簡略化している。K-NET, KiK-net, 気象庁87型電磁式強震計, 95型震度計, 関西地震観測研究協議会の観測記録を用い、海溝型地震の経験式は2011年東北地方太平洋沖地震を含む39地震の9,713記録に基づき、地殻内地震の経験式は1990年から2011年までの33地震の10,553記録に基づき作成した。地震動のばらつきは、ここで定義された経験式の標準誤差 ε_p , ε_c , ε_μ , ε_σ を用いて評価した。

対象となる各地震に対する損失率の評価手順を図1に示す。継続時間の長い長周期地震動による損傷を考慮する場合、層単位のモデル化である質点系動的解析では疲労による損傷を精度良く評価することは難しい。このため、部材レベルのモデル化を行った三次元応答解析により損失率評価を行った。復旧費用は大きく分けて層間変形角による崩壊評価と各部材および部位の応答値に基づく積算復旧費用により式(5)に基づき評価する。

図1 損失率算出手順

$$R = \max \left(f_a \left(\max \theta_i \right) \cdot g, R_s + R_i + R_e + R_f \right) \quad (5)$$

ただし、 f_a : 崩壊損傷度関数、 θ_i : i 階の層間変形角、 g : 再調達価格、 R_s : 躯体復旧費用、 R_i : 内装復旧費用、 R_e : 外装復旧費用、 R_f : 設備復旧費用である。積算復旧費用の算出は文献²⁾に加えて、文献⁵⁾と同様式(6)に従い長周期地震動による疲労の影響を考慮した部材の累積塑性変形倍率による評価を加味して実施した。なお、適用例では損傷クライテリア、被害関数についてもこれらの文献に従った。

$$R_{si} = \left(1 - (1 - f_D(d_i)) (1 - f_p(p_i)) \right) g_{si} \quad (6)$$

ただし、 f_D , f_p : 最大塑性率および累積塑性変形倍率による損傷度関数、 d_i : 部材 i の最大塑性率、 p_i : 部材 i の累積塑性変形倍率、 g_{si} : 部材 i の被害関数である。

(2) PML1 の算定手順

- 1) 損失率もしくは地震動指標（減衰 5%の pSv ）の中央値の超過確率に基づくイベントツリーを作成し、「50 年間での超過確率 10%の損失を生じる地震」を特定する。超過確率は式(7)に従い計算し、地震を損失率の大きい順に並べた時に i 番目の地震の発生確率を P_i として、超過確率が初めて 0.1 を超える地震 E_k を該当する地震とする。
- 2) 選択した地震を対象に経験式の標準誤差に基づいてばらつきを考慮し、 pSv および群遅延時間を用いて 1,000 組の水平二方向地震波を生成する。
- 3) 地震 E_k に対して生成した地震波を用いた損傷度評価を実施し、損失率を $loss$ として式(8)に示す通り 90%非超過損失を PML1 として算出する。

$$1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_i) \geq 0.1 \quad (7)$$

$$P(loss < PML1|E_k) = 0.9 \quad (8)$$

(3) PML3 の算定手順

- 1) 対象となる地震すべてに対してそれぞれ pSv および群遅延時間の経験式を用いて各式の標準誤差に基づくばらつきを考慮した 1,000 組ずつの水平二方向地震波を生成する。
- 2) 生成した地震波を用いた損傷度評価を実施し、算出した損失率に基づき式(9)に従い、50 年間での超過確率 10%の損失を算出する。ただし、 n : 1 地震あたりの地震波数である。

$$1 - \prod_i \left(1 - P_i \frac{\text{count}(loss > PML3|E_i)}{n} \right) = 0.1 \quad (9)$$

2.2 領域震源の評価の効率化

PML3 の算定において、震源断層を特定できる海溝型地震や活断層に発生する地震では評価しなければならない地震は限定されているが、震源断層を特定しにくい地震では位置や規模において地震発生に不確定性が大きく、評価しなければならない地震の数が極端に多くなる。例えば関東地方で地震リスクに大きな影響を及ぼす南関東で発生する M7 程度の地震は、J-SHIS では地震種別（フィリピン海プレート上面、フィリピン海プレート内、太平洋プレート上面）で 3 種類、マグニチュード M で 6 種類、地震種別や M で異なるが位置で 17~106 種類を組合せた合計で 1,000 ケース近い地震を評価する必要がある。これらにつきそれぞれ 1,000 波の地震波を生成して評価するのは現実的ではない。そこで、本研究では発生確率が与えられている M ごとに 6 ケースに分け、それぞれ地震種別、位置(距離)、地震動のばらつきをパラメータとしたモンテカルロシミュレーション(MCS)を LHS(Latin Hypercube Sampling)により行うこととした。具体的には、以下の手順で地震波を生成した。

- 1) 地震種別ごとの断層位置から断層最短距離と震源距離を算出し、M ごとに断層最短距離の累積分布関数を設定。震源距離は断層中心と観測点との距離として算出。

- 2) 断層最短距離と震源距離との線形回帰式を設定
- 3) Mごとに、地震種別、上記で設定した分布関数に従う断層最短距離、 pSv の経験式の標準誤差に基づくばらつきをパラメータに、LHSによるMCSを行い地震波を生成。震源距離は回帰式により断層最短距離から計算。

2.3 質点系動的解析と組合せた効率化

本研究では三次元応答解析による損傷評価を行うが、特にPML3の算定では膨大なケースの応答解析を行わなければならない、対象とする地震が多い場合は実用的でない。そこで、図2に示す簡便法を検討した。簡便法でも損傷評価は部材レベルで行うが、主な応答解析は質点系で行い、プッシュオーバー解析(POA)で求めた層間変形角～部材塑性率関係を用いて質点系解析の層間変形角から部材塑性率を推定して損傷評価を行う。この場合、POAにより得た当該関係式は動的解析とは異なることが知られており、これを補正するために追加三次元動的解析を行う¹⁰⁾。層間変形角と部材塑性率の関係を式(10)に従いモデル化する。部材塑性率は1以上を対象とする。ただし、梁を考えた場合、対応する層は最大で上下2層あるため、部材塑性率は上と下の層別々に回帰した関係式(l :下層, u :上層)を用い、式(11)に従い算出する。

図2 質点系動的解析を加えた損傷度評価の手順

$$\eta = a + b\theta + \varepsilon, \quad \varepsilon = N(0, \sigma_\varepsilon) \quad (10)$$

$$\tilde{\eta} = (a_l + b_l\theta_l + a_u + b_u\theta_u)/2 \quad (11)$$

但し、 η : 梁の部材塑性率、 θ : 層間変形角、 a, b : 定数、 ε : 誤差である。POAから得られる式(10)の係数 a, b を平均 μ_a, μ_b 、分散 σ_a^2, σ_b^2 を既知とした事前分布とし、 σ_ε を既知としてベイズ推定を行う。事前分布を正規分布とすると共役分布の関係から事後確率は式(12)となる。追加三次元解析で得られた η に対して $P(a, b | \eta)$ が最大となる a, b を求め式(10)を修正する。 $\tilde{\eta}$ は式(10)による部材塑性率の推定値である。部材累積塑性変形倍率は式(13)に従い、推定した部材塑性率と層の最大塑性率 η および累積塑性変形倍率 ξ から計算する。

$$P(a, b | \eta) \propto \prod \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\eta - \hat{\eta}}{\sigma_\varepsilon} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$\frac{1}{2\pi\sigma_a\sigma_b} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{a - \mu_a}{\sigma_a} \right)^2 + \left(\frac{b - \mu_b}{\sigma_b} \right)^2 \right\} \right] \quad (13)$$

$$\xi = \frac{\tilde{\eta} - 1}{\eta - 1}, \xi$$

三次元動的解析を全ケース行わず質点系で置き換えることで、追加の三次元解析とベイズ推定にかかる時間を考慮しても大幅な効率化を期待できる。適用例では層間変形角～部材塑性率による推定とベイズ推定による推定精度の向上を検証する。

3. 適用例

3.1 建物モデルと検討地点

検討建物は鉄骨造とし、文献¹¹⁾のS30を参考に図3に示す建物を設定した。S30はX方向のみ設計されていたため、Y方向はX方向と同等となるように部材を設定した。検討地点は、大阪は関震協の福島、東京は気象庁のE4E(大手町)とし、同じ仕様の建物を2つの地点で評価して長周期地震動リスクの特徴を比較した。

図3 建物モデル

表2 建物概要

	S30
構造種別	S造
架構形式	純ラーメン構造
延床面積(m ²)	36,864
階数	30階
高さ(m)	121.5
固有周期(s)	3.67(x), 3.95(y)

図4 南海トラフの地震断層

表3 南海トラフ地震のMw

	Mw
南海	8.4
東南海	8.1(8.25)
東海	8
南海東南海	8.5
東南海東海	8.4
南海東南海東海	8.5

3.2 地震断層

地震断層はJ-SHISの2012年(モデル1)に従って設定した。大阪と東京で共通の地震は図4に示す南海トラフの地震で、その他に両地点の100km圏内の主要な地殻内地震と、東京では大正型関東地震および南関東で発生するM7程度の地震を対象とした。表3に南海トラフ各地震のモーメントマグニチュードMwを示す。東南海東海連動地震の東南海地震については、全体のMwに合う様に東南海地震のMwを括弧内の値に調整した。

3.3 大阪の場合のPML評価

(1) 各地震の減衰5%の pSv

大阪における南海トラフ各地震の pSv 中央値を図5に示す。東海・東南海・南海の三連動地震が最も大きく建物固有周期の4秒で80cm/s弱、その次が東南海・南海連動地震となった。図6に大阪周辺の地殻内地震を示す。これらの地震の pSv 中央値を図7に示す。同じMw、距離で比較すると海溝型より地殻内の方が pSv が大きく、最大が上町断層(F008001)で、周期4秒で170cm/s弱であった。従来評価²⁾では全国一律告示スペクトルで約80cm/s(継続時間120秒)であるが、本研究では T_{gr} による継続時間と塑性率・累積塑性変形倍率による評価を含め現実的地域特性の影響を考慮することができる。

(2) PML1における地震の選択

PML1では、表1に示すように「50年間での超過確率10%の損失を

図5 南海トラフの各地震の減衰 5%pSv 中央値 (大阪)

図6 大阪周辺の地殻内地震

図7 大阪周辺の地殻内地震の減衰 5%pSv 中央値

生じる地震」を選択する必要がある。図8は損失率中央値の超過確率を示すイベントツリーである。上町断層による損失が突出して大きく、次に中央構造線や京都西山断層と活断層による地震が続く、5つ目に東海東南海南海のいわゆる三連動地震となっている。本来はこのように損失率で超過確率 10%の地震を選ぶが、実用的には地震動で選ぶことが多い。その場合の地震動指標は通常、最大加速度や最大速度であるが、長周期地震動が超高層建物に与える影響を論じる場合、これらの指標は必ずしも適切ではない。図9は、建物の1次固有周期の pSv でイベントツリーを描いたものである。両者を比較すると、超過確率 10%付近で損失率がほぼ等しい中央構造線と京都西山断層の順番が入れ替わっている以外には違いがない。指標としてはこの他にエネルギースペクトルが考えられるが、この例の条件では、50年で10%の地震を選ぶ地震動指標として建物1次固有周期の pSv を用いることが適切であると判断できる。これに対し、司・翠川¹²⁾で計算した最大速度によるイベントツリーでは、上町断層の次には南海トラフの地震群が並び、まったく異なる結果となった。

(3) PML 算定結果

イベントツリーの評価で50年に10%の地震が三連動地震となったため、三連動地震の損失率のヒストグラムを作成し、非超過確率 90%の損失率を求めた結果を図10に示す。この結果、PML1は7.2%となった。次にすべてのサンプルの損失率を大きい順に並べ、超過確率を算定した結果を図11に示す。この結果、PML3は7.3%となった。

図8 大阪の損失率中央値のイベントツリー

図9 建物1次固有周期 pSv (5%) 中央値のイベントツリー (大阪)

図10 50年10%の地震の損失率分布と PML1 (大阪)

図11 損失率の超過確率分布と PML3 (大阪)

(4) 簡便法におけるベイズ推定による精度向上の検証

PML1で選択された三連動地震を例に2.3節で示した簡便法でのベイズ推定による部材塑性率推定精度向上の効果を式(14)に示す最大塑性率による躯体損失率で検証した。ベイズ推定の効果のみを議論するため、三次元解析の層間変形角を用いて推定を行った。

$$loss = \frac{1}{C} \sum_i c_s \int_0^{\eta_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \ln \eta_0}{\beta} \right)^2 \right] dx \quad (14)$$

ただし、 C : 躯体の再調達価格 (44 億円), c_s : 部材の補修単価 (60 万円/本), η_0 : 補修 fragility 関数の限界最大塑性率中央値 (2.5), β : 対数標準偏差 (0.4) である。結果を図 12 に示す。横軸が三次元解析による損失率, 縦軸が層間変形角からの推定値である。POA 時の層間変形角～部材塑性率関係のみにより推定した損失率 (灰色) に比べ 10 ケースの追加三次元動的解析によるベイズ推定で補正した場合 (黒) の方の誤差が小さくなっており, RMS で 0.07% 向上していることが確認できる。

3.4 東京の場合の PML 評価

(1) 各地震の減衰 5% pSv

図 13 に各地震の pSv 中央値を, 図 14 に大正型関東地震の断層を示す。 pSv 中央値は大正型関東地震が最も大きく, 周期 4 秒では 40cm/s 弱となった。

図 15 に南関東 M7 地震の PML1 の算定に用いるマグニチュード, 地震種別, 位置別の pSv 中央値を示す。図 16 に PML3 の計算効率化のための断層最短距離の分布の例を示す。Mw6.7～6.9 用の地震種別ごとの最短距離分布を示した。これにより, 1,000 ケース×1,000 波の解析を 6 ケース×1,000 波に削減することができる。東京周辺の地殻内地震の断層を図 17 に, それら地震の pSv 中央値を図 18 に示す。立川断層 (F003401) が最も大きく 45cm/s であった。図 13 と図 18 とを比較すると, 周期 6～7 秒のピークでは海溝型地震の pSv の方が

図 12 簡便法ベイズ推定の精度向上効果

図 14 大正型関東地震の断層

図 15 南関東 M7 各地震の減衰 5%pSv 中央値 (PML1)

図 16 南関東 M7 地震の最短距離分布例 (PML3)

図 17 東京周辺の地殻内地震

図 18 東京周辺の地殻内地震の減衰 5%pSv 中央値

大きい, 周期 4 秒では地殻内地震の方が大きくなっている。

(2) PML1 における地震の選択

大阪での検討で, 50 年に 10% の地震の選択には建物 1 次固有周期の pSv を用いることができることがわかった。図 19 に東京の建物 1 次固有周期の pSv 中央値のイベントツリーを示す。この図から, 50 年に 10% の地震が神縄・国府津-松田断層帯であることがわかる。また, 東海東南海地震の東南海領域の Mw を調整した結果, わずかだが三連動地震よりこの地震の pSv の方が大きくなった。三連動より二

連動が大きいのはやはり不自然で、これは国土交通省対策試案による地震波生成と J-SHIS の震源設定との整合性の問題と思われる。

(3) PML 算定結果

前節で選択した 50 年に 10% の地震である神縄・国府津-松田断層帯 (F003601) の損失率分布と、それに基づく 90% 非超過損失を図 20 に示す。PML1 は、2.4% となった。次にすべてのサンプルの損失率を大きい順に並べ、超過確率を算定した結果を図 21 に示す。この結果、PML3 は 1.7% となった。両者を X 方向の最大層間変形角で比較すると、PML1 は 1/124, PML3 は 1/253 であった。

図 19 建物 1 次固有周期減衰 5%pSv 中央値のイベントツリー (東京)

図 20 50 年 10% の地震の損失率分布と PML1 (東京)

図 21 損失率の超過確率分布と PML3 (東京)

3.5 考察

長周期地震動を考慮した PML を東京と大阪で算定した結果、表 4 の評価結果が得られた。PML1, PML3 の両方で大阪が東京を上回る結果となった。また、大阪では PML1 と PML3 との差がほとんどないのに対して東京では PML1 の方が 1.4 倍の値となっている。文献 6) では PML1 > PML3 の傾向があるとされており、東京では同じ傾向となっているが、大阪では傾向が異なっている。図 8 と図 19 とを比較す

ると、図 8 では 50 年に 10% の損失率である三連動地震の損失率と近いところに南海トラフの地震群が位置し、それらが大きな確率で発生するため PML1 と PML3 とが接近したものと考えられる。東京では神縄・国府津-松田断層帯と南海トラフの地震の損失率は離れており、大阪のような効果が生じなかったと考えられる。PML1 と PML3 との関係は、こうした条件により影響を受けることがわかる。

表 4 PML 評価結果

	大阪	東京
PML1	7.2%	2.4%
PML3	7.3%	1.7%

4. まとめ

長周期地震動を考慮した PML 評価手法を提案し、大阪と東京の 2 地点で試算を行った。海溝型および地殻内地震の pSv および群遅延時間の経験式から地震波を生成し、長周期地震動により長時間続く揺れにより生ずる疲労破壊を考慮するため三次元的解析を用いた損傷度解析により部材、部位単位で損失を求め、PML1 および PML3 を算定した。また、多数の地震を対象とした解析を要する PML3 については、震源断層を特定しにくい地震の効率化と質点系動的解析と三次元的解析とを組み合わせた効率化を提案し、それぞれの効果を検証した。さらに、試算例では、PML1 算定での 50 年に 10% の地震を選択する際の地震動指標として本事例では pSv が適切であること、PML1 と PML3 との関係が東京と大阪の 2 地点で異なり、必ずしも PML1 > PML3 とはならないことを示した。

参考文献

- 1) 恒川裕史, 藤村勝, 佐藤吉之, 岡本 肇: 部材レベルの弾塑性応答解析を用いた地震予想最大損失率による RC 構造物の耐震性能評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.17, No.35, pp.37-42, 2011.2
- 2) 恒川裕史, 宇佐美徹, 中山信雄: 三次元弾塑性応答解析を用いた地震予想最大損失率に基づく性能設計の鋼構造物への適用, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.43, pp. 843-848, 2013.10
- 3) 地震動予測地図の工学利用-地震ハザードの共通情報基盤を目指して-, 防災科学技術研究所研究資料第 258 号, 2004.9
- 4) 設計入力地震動作成手法技術指針 (案), 建築研究所日本建築センター, 1992
- 5) 恒川裕史, 宇佐美徹: 応答スペクトルおよび群遅延時間の周期間の相関を考慮した長周期地震動に対する地震リスク評価に関する研究, JCOSSAR2011 論文集, pp. 79-82, 2011.10
- 6) 地震リスク評価とコミュニケーション, 日本建築学会, 2011
- 7) 和泉正哲, 勝倉裕: 地震動の位相情報に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, No. 327, pp. 20-28, 1983.5
- 8) 「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に関するご意見募集について, 国土交通省, 2010-12-21, http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000218.html
- 9) 森川信之, 藤原広行, 翠川三郎: マグニチュード 9 まで適用可能な距離減衰式の検討, 日本地震工学会大会梗概集, Vol. 8, pp. 264-265, 2011.11
- 10) 恒川裕史, 大淵正博, 糸井達哉, 高田毅士: 質点系モデルと三次元モデルを組合せた立体架構の部材塑性率に基づく地震リスク評価法の効率化手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.21-22, 2013.8
- 11) 長周期地震動対策に関する公開研究会, 日本建築学会, 2011
- 12) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会論文報告集, 第 523 号, pp.63-70, 1999.9

[2014 年 6 月 15 日原稿受理 2014 年 8 月 5 日採用決定]