

鉄道 RC ラーメン高架橋の地震損失関数の算出と地震リスク評価

東急建設(株) 正会員 ○野口 聡
東急建設(株) 正会員 服部 尚道
武蔵工業大学 正会員 吉川 弘道

1. 地震リスク評価フロー

地震リスク評価は図-1 に示す 5 つの Phase で行われる。Phase I で地震ハザード, Phase II, III で地震損失関数を求め, Phase IV で地震リスクを算出する。著者らは鉄道 RC ラーメン高架橋を対象とした地震脆弱性評価と地震リスク評価を行ってきた。地震ハザードは商用ソフトで得られるものとし, 本論では Phase II, III, IV を中心に報告する。

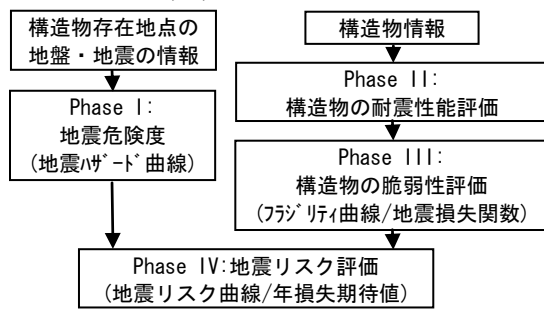


図-1 地震リスク評価の手順

2. 耐震性能評価 (Phase II)

プッシュオーバー解析で荷重変位関係を求め, バイリニアで近似し, エネルギー一定則を仮定して式(1)により構造物の弾塑性応答変位 δ_{resp} を求める。

$$\delta_{resp} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_Y} \right)^2 + 1 \right\} \delta_Y \quad (1)$$

ここに, α_E : 弾性応答加速度, δ_{resp} : 応答変位
 $\alpha_Y (= P_Y/m)$: 降伏加速度, δ_Y : 降伏変位

本論では, α_E 算定の際, 基盤最大加速度と構造物応答加速度の関係には神田らの式(式(2))を使用した。

$$\alpha_E = 19.44 \alpha^{0.6523} \quad (2)$$

ここに, α : 基盤最大加速度, α_E : 構造物応答加速度

3. 脆弱性評価と地震損失評価 (Phase III)

Phase III より構造物の損傷シナリオを決定し, 各損傷状態発生確率を求め, 最大加速度毎に損失期待値を算定する。

構造物応答変位平均値 δ_{resp} , 限界状態時の変位 δ_i とするとき, δ_{resp} の限界状態発生確率 $F_i(\delta_{resp})$ は式(3)のとおり。

$$F_i(\delta_{resp}) = \int_0^{\delta_{resp}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln z - \ln \delta_i}{\sigma_x} \right)^2 \right] dz \quad (3)$$

ここに $\sigma_x^2 = \ln \{ (1 + \nu_i^2)(1 + \nu_R^2) \}$ ν_i, ν_R : δ_i, δ_{resp} の変動係数

応答変位 δ_{resp} は入力加速度の関数, 限界状態発生確率(フラジリティ曲線)は最大加速度の条件付発生確率 $F_i(\alpha)$ である。各限界状態間(損傷レベル)発生確率 $P(c_i|\alpha)$ は式(4)となる。

$$P(c_i|\alpha) = F_{i-1}(\alpha) - F_i(\alpha) \quad (4)$$

$$\text{ただし, } \sum_{i=1}^{n+1} P(c_i|\alpha) = 1, F_0(\alpha) = 1, F_{n+1}(\alpha) = 0$$

i : 損傷イベント番号 ($i: 1, 2, \dots, n+1$)

図-2 に応答変位とフラジリティ曲線の関係を例示する。図中の損傷イベント, 損傷レベルは構造系全体の損傷度で, 図-3 の部材の損傷イベント, 損傷レベルに対応する。

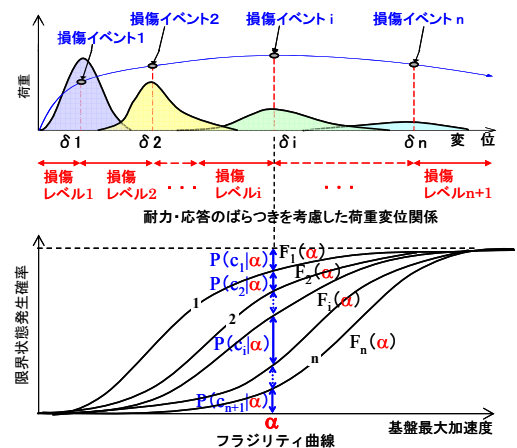


図-2 応答変位とフラジリティ曲線

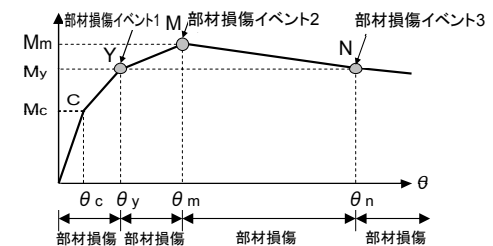


図-3 部材損傷イベントと部材損傷レベル

地震の最大加速度と構造損傷レベルの確率, 損失額, 各損傷レベル発生確率 $P(c_i|\alpha)$ と損失額 c_i との関係より式(5), 式(6)で損失額の期待値 c_m と分散 σ_c^2 を算定する。

$$c_m = \sum_{i=1}^n c_i P(c_i|\alpha) \quad (5), \quad \sigma_c^2 = \sum_{i=1}^n (c_i - c_m)^2 P(c_i|\alpha) \quad (6)$$

地震損失関数は損失期待値と基盤最大加速度との関係である。基盤最大加速度 α を式(1)で応答加速度 α_E に変換し, エネルギー一定則(式(2))で応答塑性変位 δ_{resp} を求める。 δ_{resp}

キーワード RC ラーメン高架橋, 地震リスク, 耐震性能評価, 損傷イベント, 地震損失関数

連絡先 〒150-8340 東京都渋谷区渋谷 1-16-14 東急建設(株) 土木技術部 TEL 03-5466-5194

に対応する損失額 c_i を算定し、損傷イベントツリーで損失期待値 $c_{NEL}(=c_m)$ を算定する。 fragility 曲線の基盤最大加速度 α と損傷レベル c_{NEL} の関係が地震損失関数である。

4. 地震リスク評価 (Phase V)

年間損失額期待値は年発生確率密度(年超過確率の加速度微分)と損失関数の積の加速度積分であり、地震ハザード曲線と地震損失関数等から算出する対象構造物の年間損失額の指標となる。また、損失額 c の超過確率は式(7)となり、図-4 の様に表現できる。

$$R(c|\alpha) = \int_c^{c_{max}} f(x|\alpha) dx \quad (7)$$

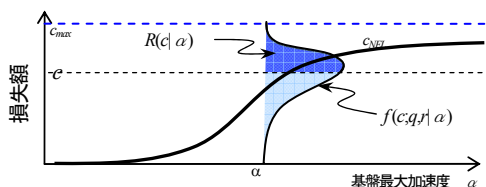


図-4 損失額の確率密度関数と超過確率

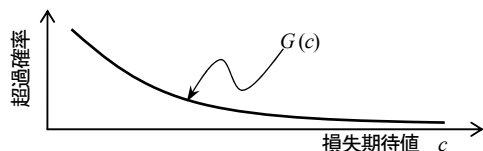


図-5 地震リスク曲線

損失額条件付確率および地震年発生確率密度関数(地震ハザードの加速度微分)から地震リスク曲線(式(8))を得る。

$$G(c) = \int_0^{\infty} p_A(\alpha) \cdot R(c|\alpha) d\alpha \quad (8)$$

地震リスク曲線は最大加速度 α の関数でなく、図-5 のとおり損失期待値の超過確率の関数であるのが特徴といえる。

5. 鉄道 RC ラーメン高架橋の地震リスク評価例

RC 標準準拠計算例高架橋の柱基部(ただし固定基礎)2 種(平成 4 年標準準拠を No.1, 平成 16 年標準準拠を No.2 とする)を対象に鉄道 RC 高架橋の地震リスク評価を行った。

No.1 高架橋の直角方向の構造損傷イベント解析結果を、図-6 (a)に、 fragility 曲線を図-6 (b)に、地震損失関数を図-6 (c)に、損失期待値密度曲線を図-6 (d)に、渋谷区の地震ハザードにて算出した地震リスク曲線を図-6 (e)に示す。

RC ラーメン高架橋のような多ヒンジ構造物でも系全体の損傷イベントを扱うことで地震リスク評価が可能になる。

同一水平震度作用時年超過確率における損失額期待値の相違は、主に 2 種類の高架橋の設計水平震度の相違による。

6. 成果と将来の可能性

鉄道 RC ラーメン高架橋の地震リスク評価例を示した。これらの結果は対象構造物の耐震性向上や損失低減の検討上、重要かつ定量的な情報であり、大きな成果といえる。

同様に開削トンネル等の他の鉄道構造物に対しても地震

リスク評価を行うことで、鉄道路線全体の地震リスク評価が可能になる。最終的にはネットワーク分析を併用した鉄道路線全体での間接損失の算定も可能になると考える。

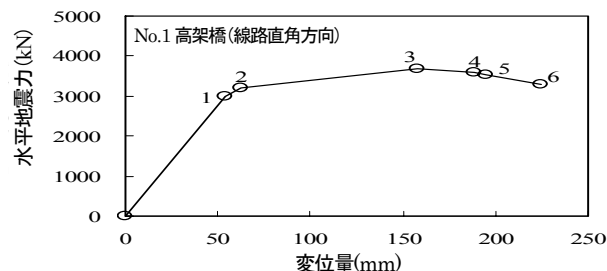


図-6 (a) 損傷イベント解析結果 (No.1 高架橋直角方向)

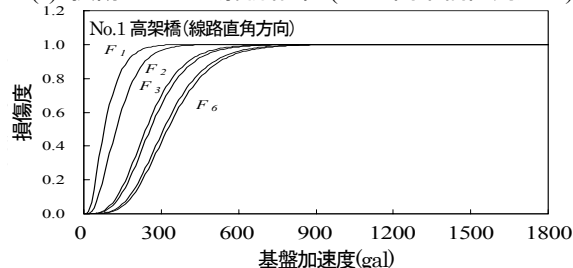


図-6 (b) フラジリティ曲線 (No.1 高架橋直角方向)

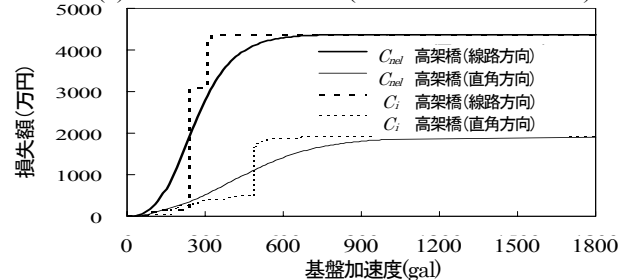


図-6 (c) 地震損失関数 C_{nel}

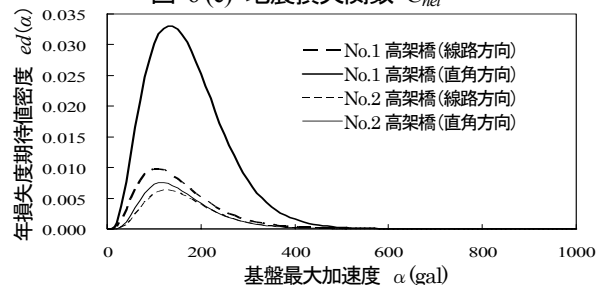


図-6 (d) 損失期待値密度曲線

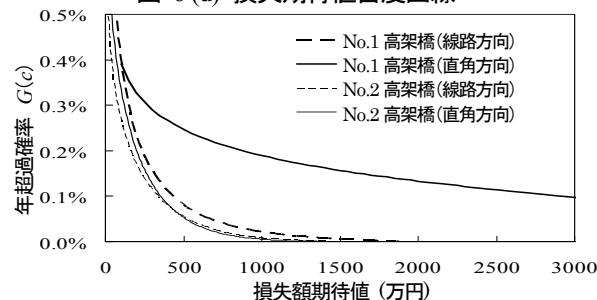


図-6 (e) 地震リスク曲線

参考文献

- 吉川弘道, 大滝健他: Seismic risk assessment and expected damage evaluation of railway viaduct, ICASP10, 2007.
- 吉川弘道, 中村孝明, 大滝健, 前田欣昌: 土木/建築施設の地震リスク評価とコンクリート構造物への適用, コンクリート工学, Vol.45, No.4, pp.16-22, 2007.4