SDF による CFRP シートの耐震補強効果の評価

学生氏名　木村　祐介
指導教員　吉川　弘道

1.イベントツリー解析を用いた地震リスク評価

地震損失関数(seismic damage function, 略称：SDF)の推定に用いるイベントツリーは, P.G.A.α（地表面最大加速度：Gal）の地震動を発端事象とし, 破壊モードは曲げ破壊, 曲げせん断破壊, せん断破壊の3事象, 損傷レベルは6事象を設定する．（最終帰結は 9 つ, 図 1）．

破壊モード, 構造被害, 損傷レベルの各生起確率は対象建造物の物性値より信頼性理論に基づいて算出する．本論では SDF 推定法に用いる性能関数を次式で定義する．

破壊モード：$Z = V_y / V_{mu}$　(1)　　構造被害, 損傷レベル: $Z_K = \delta_R / \delta_K$　(2)

ただし, V_y:建造物の繰返し荷重作用に起因するせん断耐力劣化を考慮したせん断耐力, V_{mu}:建造物の曲げ耐力, δ_R:建造物の繰返し荷重作用に起因する応答変位量, δ_K:限界状態 K の変位量であり, V_y,δ_R は P.G.A.αに従属する変数である．さらに，これら4 つのパラメータは算定誤差を有するために確率変数となる．また，限界状態 K は 3 つの限界状態 Y:軸方向鉄筋降伏, M:最大荷重程度の維持, N:降伏荷重の維持の生起を想定する[1)]（図 2）．

以上よりイベントツリーの分岐点における各生起確率を算出し, 広義のリスクである最終帰結の生起確率 9 つは図 1に示す式より算出される．狭義のリスクである期待損失率 E[x]は, 任意の P.G.A.αに対して次式より算出される．

$$
\begin{aligned}
E[x] = &\ P(F_1)\left[P_s(F_1)x_1 + P_f(F_1)\sum_{k=2}^{4} P(x_k \mid F_1)x_k\right] \\
&+ P(F_2)\left[P_s(F_2)x_5 + P_f(F_2)\sum_{k=6}^{7} P(x_k \mid F_2)x_k\right] \\
&+ P(F_3)\left[P_s(F_3)x_8 + P_f(F_3)x_9\right]
\end{aligned}
\quad (3)
$$

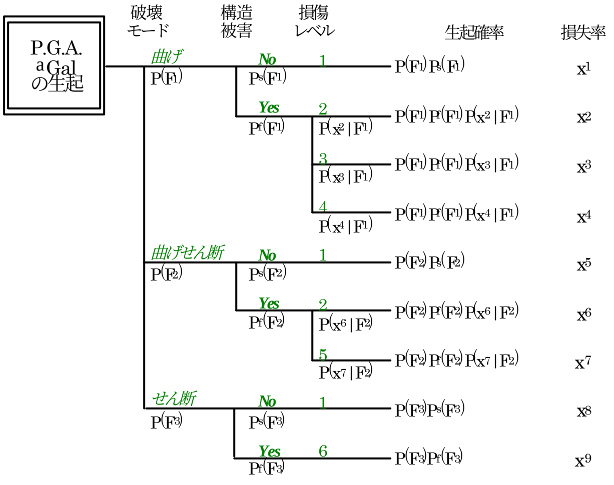


図 1　本論におけるイベントツリー

予想し得る全ての P.G.A.αに対して期待損失率 E[x]を算出し, SDF が推定される．

2.CFRP シートによる耐震補強

炭素繊維(carbon fiber reinforced plastic, 略称：CFRP)シートは高い引張強度を持ち，軽量で耐食性に優れ, 施工性に優れたシート状である．CFRP シートによる耐震補強工事は, 貼付け部位, 貼付け量, 貼付け方向等を変化させて3つの補強目的(靭性補強, 曲げ補強, せん断補強)に十分な補強効果を有した対応が可能である．

これより「炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針」[2)]に準拠し補強部材耐力, 靭性を推定した．補強目的はせん断補強, 靭性補強とする．CFRP シートの設計引張強度：f_{CFud} と使用枚数：ωを補強パラメータとして, x 軸：f_{CFud}, y 軸：ω, z 軸：耐震補強効果率を座標に定めた後, 効果率を推定した．ただし，効果率は，耐震補強後の部材耐力, 靭性に無補強の部材耐力, 靭性を除したものより算出される．図 3 に CFRP シートによるせん断，靭性それぞれにおける耐震補強効果の一例を示した．

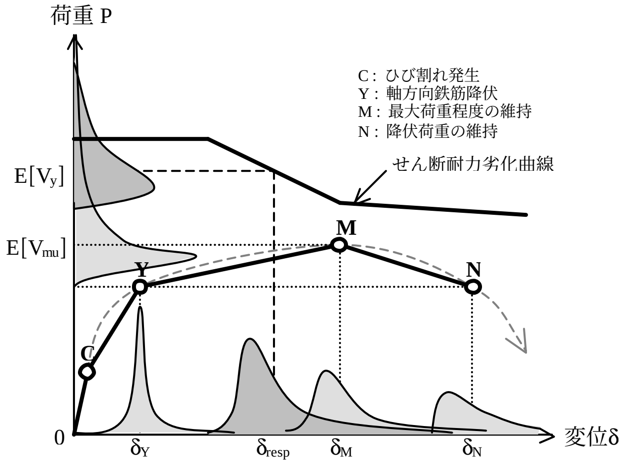


図 2　P -δ関数での分岐点の生起確率算出法

3.補強部材耐力，靭性の算定法

柱部材の設計補強せん断耐力 V_{CFyd} は，補強工事を施す前の設計せん断耐力 $V_{yd}(=V_{cd}+V_{sd})$ に CFRP シート負担分を加算した次式より算出される．

$$V_{CFyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{CFd} \quad (4)$$

V_{cd} :せん断補強鋼材を用いないときの設計せん断耐力，V_{sd} :せん断補強鋼材によるの設計せん断耐力，V_{CFd} :CFRP シートによるの設計せん断耐力である．V_{cd},V_{sd} の算出式は「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)」[3]に基づく．また V_{CFd} は次式より算出される．

$$V_{CFd} = \frac{K A_{CF} f_{CFud}(\sin\theta_{CF} + \cos\theta_{CF})}{S_{CF}} \frac{z}{\gamma_{bCF}} \quad (5)$$

K :CFRP シートの補正係数，A_{CF} :角度 θ_{CF} で配置される CFRP シートの単位幅当り断面積，θ_{CF} :CFRP シートが部材軸となす角度，S_{CF} :CFRP シートの単位幅，z :圧縮応力の合力位置から引鋼材の図心位置までの距離，γ_{bCF} :部材係数であり，一般には K=0.8, z=d/1.15(d :有効高さ), γ_{bCF}=1.15 と代替される．A_{CF} は繊維目付け量 w を CFRP シートの比重 ρ(一般に 1.8)と S_{CF} で除して求められる単位枚数当りの厚さ t_{CF} より算出される．一方，柱部材の設計補強靭性率 μ_{CFud} は次式より算出される．

$$\mu_{CFud} = 2.8 + 1.15 \frac{V_{CFyd}}{M_{CFud}} l_a \le 10 \quad (6)$$

M_{CFud} :柱部材の設計補強曲げ耐力，l_a :せん断スパンであり，μ_{CFud} は V_{CFyd} の増加に比例して増加する．

4.数値解析例

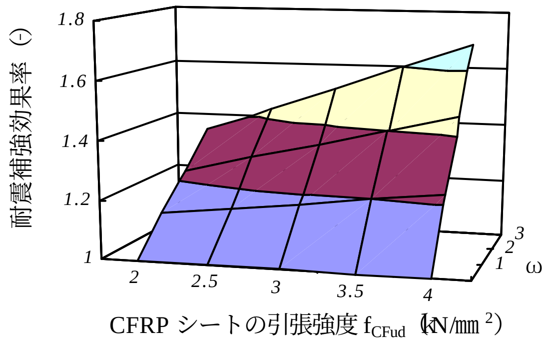
解析対象とする鉄筋コンクリート(RC)単柱式橋脚の力学特性を図 4 に示す．また，本論では損失率 x_k を $x_1 = x_5 = x_8 = 0$, $x_2 = x_6 = 0.008$, $x_3 = 0.033$, $x_4 = x_7 = x_9 = 1$ と仮定した．せん断耐力の劣化は，応答変位量に応じてコンクリート負担分 V_c が低下していくという考え方を適用した．以上より図 5 に示す SDF が得られた．使用枚数を増加させると期待損失率が下がっていき，使用枚数 1 枚の場合の効果が最も顕著である．P.G.A.が 600Gal の期待損失率をみると，無補強は 0.906，ω=1 は 0.436，ω=2 は 0.088，ω=3 は 0.017 となった．枚数を増加させる度に期待損失率の下げ幅が小さくなっていくことが確認できる．

【参考文献】

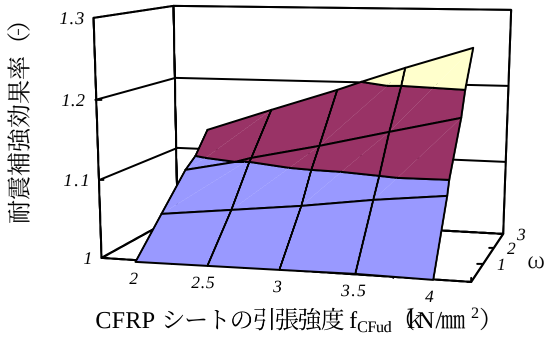
1）大井幸太：イベントツリー解析を用いた鉄筋コンクリート単柱式橋脚の地震リスク評価，第 57 回年次学術講演会 CD-ROM 版概要集 V-113，2002.9

2）鉄道総合研究所 :炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針 1996.7

3）鉄道総合技術研究所 :SI 単位版 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)，丸善株式会社, pp84-92, 1999.12



(a) せん断補強に対する効果



(b) 靭性補強に対する効果

図 3 耐震補強効果関数

表 1 部材寸法と物性値

有効高さ:d	2400mm
腹部の幅 :b_w	800mm
せん断スパン:l_a	8000mm
CFRPシートの単位幅 :S_{CF}	1000mm
繊維目付け量 :w	200 g/m^2
単位枚数当りの厚さ:t_{CF}	0.111mm
CFRPシートが部材角となす角 :?CF	90°
補強工事を施す前の設計せん断耐力 :V_{yd}	5635 kN
柱部材の設計補強曲げ耐力 :M_{CFud}	4000 kN

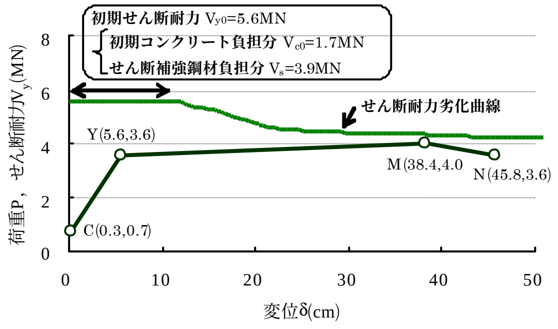


図 4 無補強 RC 単柱式橋脚力学特性

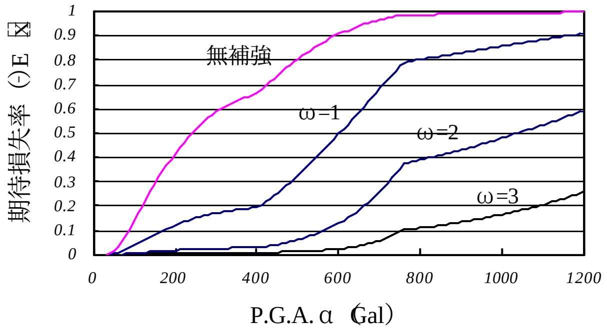


図 5 Seismic Damage Function