

鉄道橋りょう・高架橋を対象とした冗長性の定量評価法の提案

鉄道総合技術研究所 正会員 ○和田 一範, 坂井 公俊
京都大学 正会員 高橋 良和

1. はじめに 2011 年の東北地方太平洋沖地震では M9.0 という巨大地震が発生し、耐震設計を上回る事象に対する課題を強く認識することとなった。これを受けて、鉄道構造物の耐震設計¹⁾では、「危機耐性」を耐震構造計画での配慮事項としている。また、近年、危機耐性の定量評価法²⁾が提案され、冗長性、ロバスト性などの 5 つの性能項目での評価法が提案されている。ただし、これは依然として概念的なものであり、設計実務を踏まえた評価法が確立されているとはいえない。

そこで、本稿では危機耐性の性能項目のひとつである「冗長性」に着目して、鉄道橋りょう・高架橋の冗長性の定量評価法の提案および試算を行う。

2. 冗長性指標 S の提案 冗長性は、部材などの繋がりに着目した「並列性」と、限界状態に対して余裕を持たせて設計するという「余裕度」との 2 つの観点がある³⁾。例えば、「崩壊変位が非常に大きくなるように設計された単柱橋脚（図 1 左）」は、余裕度の観点では冗長性が高いものの、ひとたび部材が消失したら、構造系として成立しなくなるため、並列性の観点では冗長性が低いといえる。一方、「崩壊変位はそれほど大きくない形で設計されたラーメン高架橋（図 1 右）」は、多数の部材で構成されることにより、部材の消失という事態に対して構造系が成立し続ける場合は、余裕度の観点では冗長性が高くないものの、並列性の観点では冗長性が高いといえる。このような観点を踏まえ本稿では、横軸に部材消失本数、縦軸に設計限界変位に対する崩壊変位の比（以下、変位比と表記）を取ったときの面積 S を冗長性指標と考える（図 2）。なお、本図の定義では「余裕度」と「並列性」を同一の重みとしているが、何かしらの根拠をもって両者に重みを設定することもできる。

3. 冗長性の実務的評価法

(1) 崩壊変位の簡易算定法 冗長性を評価するためには、崩壊変位を算定する必要がある。ここでは、鉄道橋りょう・高架橋が等価 1 自由度モデルで評価できる場合について、復元力と P- Δ 効果による付加外力が釣り合う状態を崩壊と定義し、崩壊変位の簡易評価を行う。

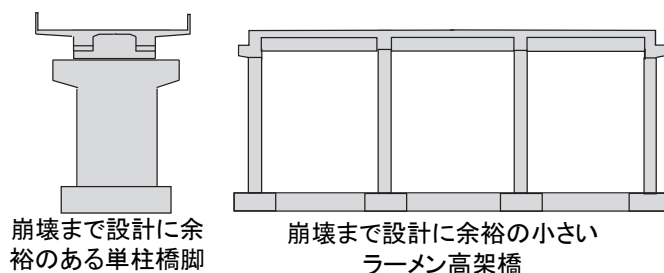


図 1 余裕度と並列性の観点からの構造物イメージ

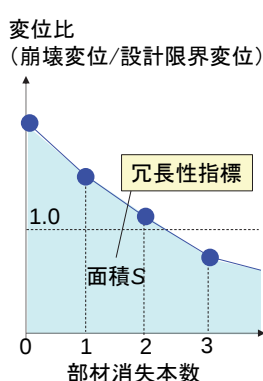


図 2 冗長性指標

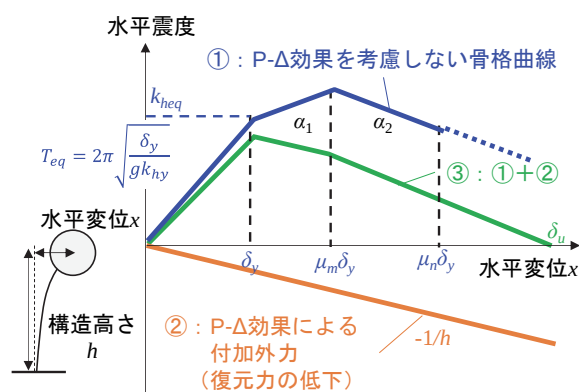


図 3 P- Δ 効果と崩壊変位のイメージ

本モデルにおいて、P- Δ 効果による付加外力は $1/h$ (h : 構造高さ) で表現できるため、①: P- Δ 効果を考慮しない通常の骨格曲線、②: P- Δ 効果による付加外力（復元力の低下）、と③: ①と②の総和の関係は図 3 のようになる。図中の T_{eq} は等価固有周期、 k_{hy} 、 δ_y は降伏震度および降伏変位、 μ_m は最大耐力点のじん性率、 μ_n は設計限界点のじん性率、 α_1 、 α_2 は初期剛性に対する各折れ点の剛性低下率、 g は重力加速度である。このとき、設計限界変位 δ_n に対する崩壊変位 δ_u で定義される変位比は次式で算定できる。

$$\frac{\delta_u}{\delta_n} = \frac{(1 - \alpha_1) + (\alpha_1 - \alpha_2)\mu_m}{\left(\frac{gT_{eq}^2}{4\pi^2 h} - \alpha_2\right)\mu_n} \quad (1)$$

次に、部材本数 N 本の構造物で部材が i 本消失したときの崩壊変位の変化を推定する。ここでは、部材本数が減少した分だけ水平剛性が減少すること、部材消失した分の荷重分担が均等に行われると仮定する。この場合、等価固有周期 T_{eq} は $\sqrt{1 - i/N}$ 倍されるが、各折れ点変位は不変である。これと式(1)を踏まえると、部材が i 本減少したときの崩壊変位の変化率 δ_{uri} は次式で表される。

キーワード 鉄道橋りょう・高架橋、危機耐性、冗長性、定量評価法

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所 TEL042-573-7336

$$\delta_{uri} = \frac{gT_{eq}^2 - 4\pi^2 h \alpha_2}{\frac{gT_{eq}^2}{(1-i/N)} - 4\pi^2 h \alpha_2} \tag{2}$$

(2) 冗長性の実務的評価の手順 以上を踏まえて冗長性の実務的評価法として下記 Step を提案する (図 4) .

- ・ Step1 : 構造物のプッシュ・オーバー解析を行い、骨格曲線および設計限界変位 δ_n を算定する (図 3①) .
- ・ Step2 : P- Δ 効果による復元力の低下を傾き $1/h$ の直線 (図 3②) と考え、Step1 の骨格曲線を補正して崩壊変位 δ_u を算定する (図 3③) .
- ・ Step3 : Step2 および式(2)を基に、消失する部材本数 i ごとの崩壊変位を算定する.
- ・ Step4 : 部材消失本数と変位比の関係を図 2 のように図示し、冗長性指標 S を算定する.

ここで、Step1 は通常の鉄道橋りょう・高架橋の耐震設計¹⁾でも実施する作業であること、Step2~4 は比較的簡単な演算であることから、上記作業は現在の耐震設計実務の範疇で実施可能と考えられる.

4. 具体的な構造物を想定した冗長性指標 S の試算 表 1 に示す 3 構造物について冗長性指標 S を試算する. なお、各構造物の振動特性 (T_{eq} , k_{hy}) やじん性率 (μ_m , μ_n) は同一とする (表 2) . まず、Step1 として通常の骨格曲線および設計限界変位 δ_n を算定する (図 5 の①) . 次に、Step2 として P- Δ 効果による付加外力を考慮し (図 5 の②) , 崩壊変位 δ_u を算定する (図 5 の①+②) . 最後に、Step3, Step4 として、部材本数ごとに変位比を算定し (図 6) , 冗長性指標 S を算定する (図 7) . その結果、同じ振動特性・じん性率であれば構造高さが高いほど、部材本数が多いほど、冗長性が大きくなることがわかった. また、Case1 に対する Case2, Case3 の冗長性指標 S の違いを見ると、構造高さよりも部材本数の方が、冗長性を高めるのに有効であることもわかる. このように提案手法を用いることで、構造物間の冗長性の定量的な比較が可能となる.

5. おわりに 危機耐性の性能項目のひとつである「冗

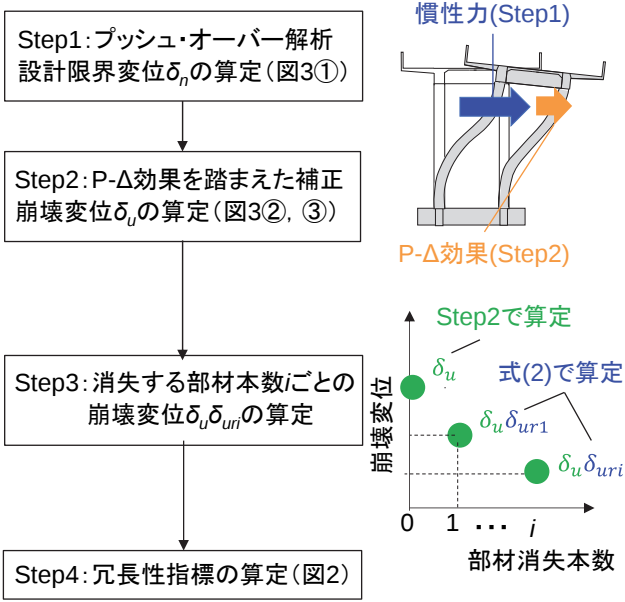


図 4 冗長性の実務的評価法の手順

長性」に着目して、鉄道橋りょう・高架橋の冗長性の定量評価法の提案および試算を行った. 今後は、骨組モデルを用いた詳細な解析を行うことで、提案手法の有効性を確認する.

参考文献 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善出版, 2012. 2) 室野剛隆, 田中浩平, 齊藤正人, 坂井公俊, 豊岡亮洋: 鉄道構造物の耐震設計における危機耐性の定量評価法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.3, pp.336-349, 2019. 3) 日本建築学会: 建築構造設計における冗長性とロバスト性, 丸善出版, 2013.

表 1 試算ケース一覧

Case	構造高さ(m)	部材本数
1	5	1 (橋脚)
2	10	1 (橋脚)
3	10	3 (2 径間ラーメン)

表 2 各ケースに共通する特性

$T_{eq}(s)$	k_{hy}	μ_m	μ_n
0.5	0.4	3	8

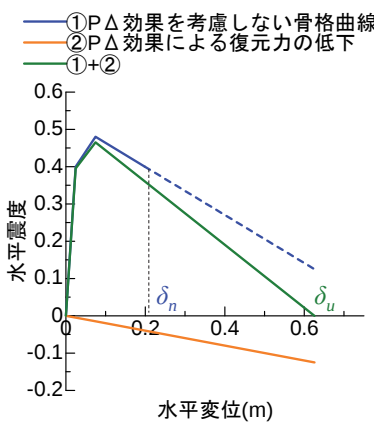


図 5 崩壊変位の算定例 (Case1)

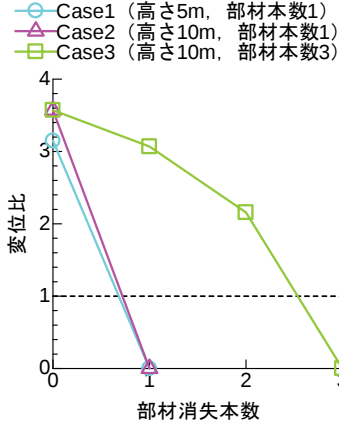


図 6 部材本数ごとの変位比の算定

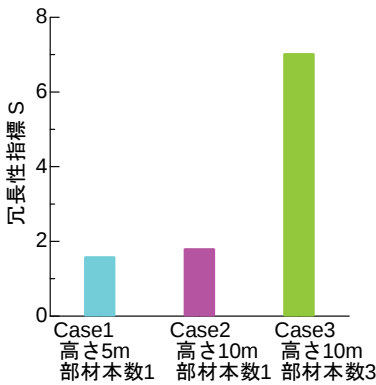


図 7 冗長性指標 S の試算結果