

## ケーブル式落橋防止構造の最適設計に関する一考察

横河ブリッジホールディングス 正会員 ○結城 洋一  
九州大学 正会員 玉井 宏樹 学生会員 路 馳 フェロー会員 園田 佳巨

### 1. はじめに

落橋防止構造（以下、落防と呼ぶ。写真-1）は落橋防止システムを構成する要素の一つであり、地震動により支承部が破壊した際に、上部構造が下部構造頂部から逸脱することを防止する機能を求められる。現行の設計荷重は、死荷重反力の1.5倍または下部構造の橋軸方向耐力によって画一的に定められる<sup>1)</sup>。また、衝撃力の緩和のために緩衝材が設けられるが、その緩衝効果は設計荷重には反映されていない。一方で、実際に落防が作動する際には作動速度に応じた動的な荷重を受けることは明らかであり、本来は橋梁の特徴や作動状況を踏まえた動的な荷重による落防の設計が望ましいと考えられるが、設計者の負担の増加や計算コストの増大などの課題を有する。本論では、緩衝材の効果を考慮した落防の動的な設計を効率的に行う方法について検討した。



写真-1 落橋防止構造の例

### 2. 提案する設計方法の概要

提案する設計方法の流れを図-1に示す。本手法では、対象橋梁の動的な挙動を考慮するため、全橋モデルの地震応答解析から適切な落防の構成部材を選定することを基本方針とした。このとき、ケーブルや緩衝ゴムなどの適切な組み合わせを効率良く求めるために遺伝的アルゴリズムを併用した。遺伝的アルゴリズムは生物の進化過程を人工的に模擬し、最適な解を得ることを目的として開発された手法であり、簡単なアルゴリズムによって最適解から大きく外れない準最適解を比較的短時間で求められることから、本対象のような計算コストが高くなる最適化問題に適していると考えた。なお、本検討では目的関数として、以下の2つを定義した。一つは、橋脚の倒れを最小とすることで橋梁全体が構造的に不安定となり落橋のリスクが高まることを低減させる目的関数 G1（式-1）、もう一つは、設置工事における施工性や経済性にも配慮し、ケーブルの最大反力を最小とする目的関数 G2（式-2）である。目的関数 G1 では非常に大きな剛性のケーブルが選択され実際の作用荷重からかけ離れることを防ぐため、ケーブル降伏応力と発生応力の比率に応じた重みを目的関数から求まる評価値に乗じて淘汰、繁殖の操作に反映させ、極端な部材構成とならないよう配慮した。さらに、落防が作動する状況を想定する必要があるため、事前に検討を実施し、解析モデルの初期条件として、①橋脚の基部が損傷しピンとして挙動する状態、②全ての固定支承が破壊し可動となる状態を仮定した。

$$G1 = \max\{\phi_{\max}(1), \dots, \phi_{\max}(i), \dots, \phi_{\max}(n)\} \rightarrow \min \quad (\text{式-1})$$

$$G2 = \max\{T_{\max}(1), \dots, T_{\max}(i), \dots, T_{\max}(n)\} \rightarrow \min \quad (\text{式-2})$$

ここに、 $\phi_{\max}(i)$  : i 番目の橋脚の倒れ量の最大 ( $\phi = u/H$ )、 $u$  : 橋脚天端の変位、 $H$  : 橋脚高さ、 $T_{\max}(i)$  : i 番目のケーブルの最大軸力

### 3. 試設計

本手法を用いて試設計を行った例を紹介する。対象とする橋梁は3径間鋼単純I桁（図-2）とし、桁およ

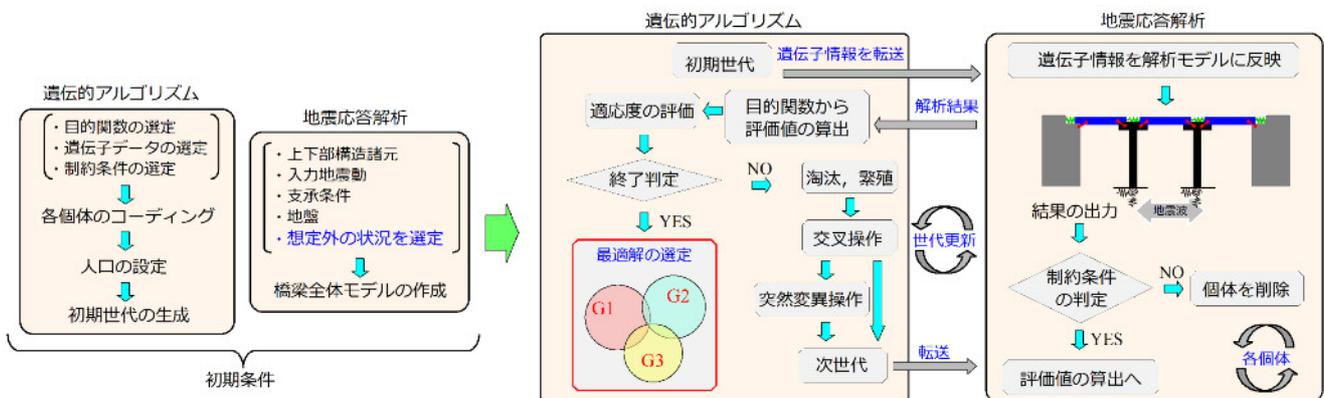


図-1 提案する設計方法の流れ

キーワード 落橋防止構造, 動的解析, 最適設計, 遺伝的アルゴリズム, 緩衝材  
連絡先 〒261-0002 千葉県千葉市美浜区新港 88 TEL043-247-8411

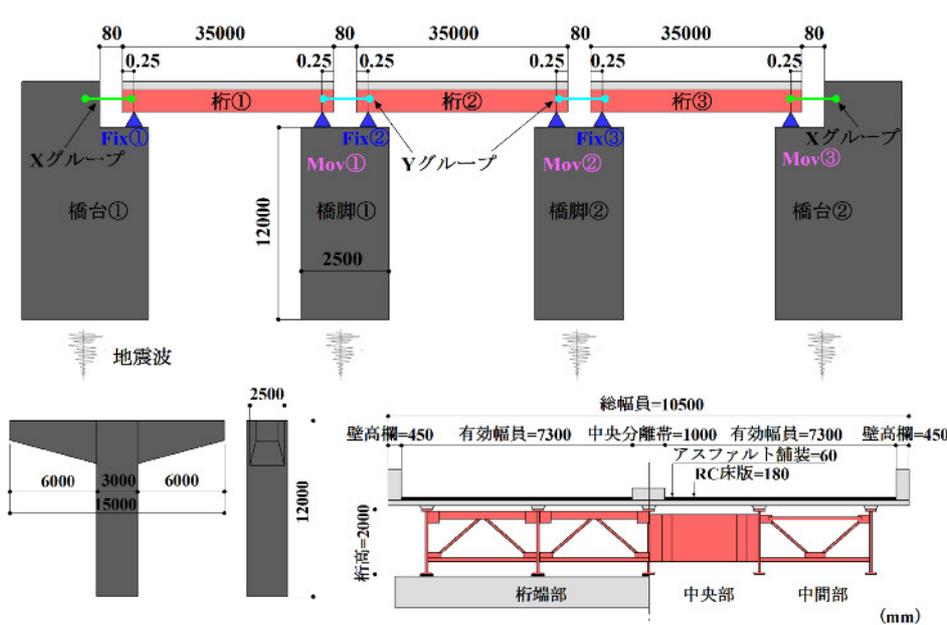


図-2 対象橋梁

表-1 試設計結果

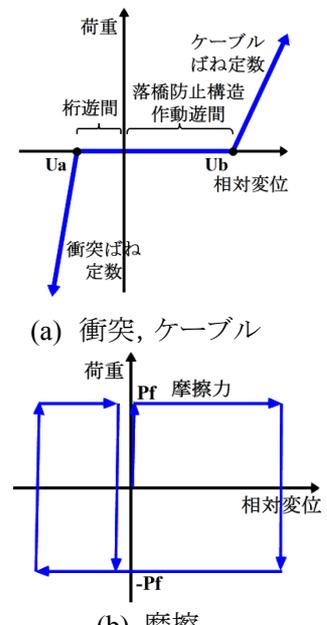


図-3 ばねモデル

(a)目的関数 G1

順位	Xグループ	Yグループ					橋脚の最大倒れ量
		ケーブル		緩衝ゴム			
		タイプ	$\sigma/\sigma_y$	硬度 (度)	厚さ (mm)	断面積 (mm) <sup>2</sup>	
1	全ての落防が未作動 ↓ 従来設計 1000kN タイプを選択	1800kN	0.92	45	50	400*400	0.033
2		1800kN	0.99	55	50	400*400	0.033
3		2700kN	0.86	55	50	500*500	0.030
4		<b>1900kN</b>	<b>0.86</b>	<b>55</b>	<b>50</b>	<b>300*300</b>	<b>0.032</b>
5		2700kN	0.93	55	40	500*500	0.037
6		2300kN	0.91	55	50	450*450	0.037
7		2300kN	0.99	55	50	500*500	0.038
8		2700kN	0.92	65	50	500*500	0.038
9		1800kN	0.96	45	50	450*450	0.038
10		1900kN	0.95	55	50	400*400	0.038

(b)目的関数 G2

順位	Xグループ	Yグループ					最大ケーブル軸力 (kN)
		ケーブル		緩衝ゴム			
		タイプ	$\sigma/\sigma_y$	硬度 (度)	厚さ (mm)	断面積 (mm) <sup>2</sup>	
1	全ての落防が未作動 ↓ 従来設計 1000kN タイプを選択	1800kN	0.85	45	50	300*300	1316
2		1800kN	0.90	55	50	300*300	1389
3		1800kN	0.92	65	50	300*300	1419
4		<b>1900kN</b>	<b>0.86</b>	<b>55</b>	<b>50</b>	<b>300*300</b>	<b>1425</b>
5		1800kN	0.93	55	50	350*350	1444
6		1900kN	0.89	55	50	350*350	1474
7		2300kN	0.76	55	50	300*300	1474
8		2700kN	0.66	55	50	300*300	1536
9		1800kN	0.99	55	50	400*400	1539
10		3200kN	0.57	65	50	250*250	1544

び橋脚を梁要素、桁衝突および落防 (図-3 (a))、支承、上下部構造の摩擦 (図-3 (b))、基礎についてはばね要素でモデル化した。落橋防止構造の作動遊間は実橋を調査した結果から  $0.3Se$  ( $Se$ :桁かかり長) とした。緩衝ゴムのばね定数は硬度、断面積、厚さ、拘束条件によって定式化された値を用いた<sup>2)</sup>。さらに、準最適解を算出するにあたっては対象橋梁の対称性を考慮し、橋台-桁間を X グループ、桁-脚間を Y グループとした。遺伝子データは落防の重要な構成要素であるケーブルと緩衝ゴムの諸元とし、ケーブル (長さ 2m) は 180kN タイプ~4600kN タイプ、緩衝ゴムは受圧面積  $\square 100\text{mm} \sim \square 550\text{mm}$ 、厚さ 20mm~50mm、硬度  $45^\circ \sim 65^\circ$  とした。時刻歴応答解析時の直接時間積分法にはニューマーク  $\beta$  法を用い、時間刻みは 0.001 秒とした。試設計の結果として、適応度の高い順に 10 位までのケーブルと緩衝ゴムの組み合わせを並べた結果を表-1 に示す。目的関数 G1, G2 とも作動した落防は Y グループのみであり、2つの目的関数で共通する落防の組み合わせが上位から 4 番目の解として得られた。このとき、順位 1 位と 4 位との間で評価値の差は数%程度であることから、2つの目的関数で共通するケーブルタイプ 1900kN、緩衝ゴムの硬度 55 度、厚さ 50mm、断面積  $\square 300\text{mm}$  の組み合わせを最適解として採用することが望ましいと考えられる。なお、従来設計では 1000kN タイプのケーブルが選択されることから、様々な仮定をもとに行われた一事例ではあるが、動的作用を考慮することで緩衝ゴムの緩衝効果を期待しても従来設計より大きな落防が必要となる場合があることが分かった。

4. まとめ

本検討では、動的な挙動と緩衝材を考慮した落防の設計方法を提案した。試設計を行った結果、現行設計とは異なる耐力タイプの落防が選択される可能性があることを示した。今後、想定する落防の作動要件や橋梁条件を変更した試設計を行い、実務設計に適用できるよう検討を重ねる必要があると考える。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012. 3
- 2) ChiLu 他：A STUDY ON IMPACT COMPRESSIVE PROPERTIES OF CUSHION RUBBER FOR CABLE BRIDGE RESTRAINTERS, 4<sup>th</sup> International Conference on Protective Structures, 2016. 8