

神戸大学工学部

学生員 ○川辺 直人

神戸大学大学院工学研究科

正会員 橋本 国太郎

1. 研究背景および目的 斜張橋について近年、コンピュータによる構造解析やシミュレーション技術などの進歩により長大化の傾向がみられている。一方、斜張橋を含むケーブル系橋梁において、国内外でケーブル損傷の事例が報告されており、部材損傷が発生した橋梁の機能を維持続けられるように冗長性、リダンダンシーを持たせることが必要であり、その評価を行う必要がある。ところが、冗長性評価について鋼トラスに関しては多数行われている一方で、斜張橋や吊り橋などに関してはほとんど行われていない。そこで本研究では、斜張橋に着目し、ケーブルが瞬間的に破断したときの力学的挙動、応力再分配挙動などを過去に同一モデルにおいて行われた静的解析結果と本研究内で行った動的解析結果の比較・検討を行い、最終的には斜張橋の構造冗長性を評価することを目的とする。

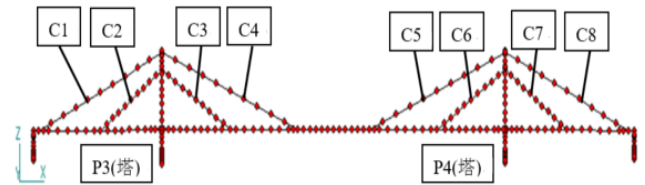


図-1 解析対象モデル 塔・ケーブル番号

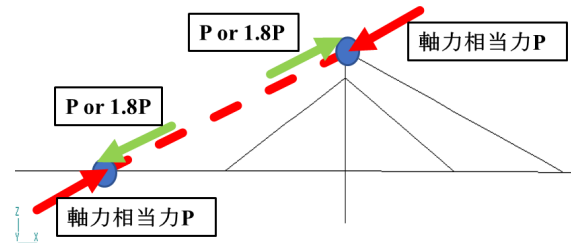


図-2 削除ケーブル位置イメージ図

2. 解析モデルおよび解析手法 汎用有限要素解析コード Sean FEM を用いて、図-1 に示すような橋長 378.07 m、中央径間 216 m を有し、ケーブル構造はファン形式をなす三径間連続斜張橋を解析モデルとし、ケーブルを C1～C8 と呼び解析モデル内の 2 つの塔は P3 および P4 とする。主桁要素は 90 分割、ケーブル要素は 10 分割とする。考慮する動的効果については、C5～C8 ケーブルのいずれか一本が突発的に破断したときの影響について検討する。

表-1 採用した減衰定数および固有周波数

	1 次設定モード次数		2 次設定モード次数	
	1 次減衰定数	1 次固有周波数	2 次減衰定数	2 次固有周波数
C5	1 次モード		8 次モード	
	0.00915	0.376	0.01771	0.650
C6	1 次モード		4 次モード	
	0.00719	0.482	0.009957	0.7587
C7	4 次モード		10 次モード	
	0.00997	0.7199	0.00997	1.117
C8	1 次モード		7 次モード	
	0.009208	0.3422	0.00324	1.007

静的解析の解析手法について、衝撃係数を考慮する CASE-1 と考慮しない CASE-2 にわけ、それぞれ 2STEP を設ける。STEP1 は同じであるが、STEP2 において、

CASE-1 では突発的なケーブル削除による動的効果による増分を衝撃係数 0.8 により定義して、1.8P（＝軸力抜け相当 P＋動的効果 0.8P）を載荷している。削除ケーブル位置における載荷のイメージを図-2 に示す。

- (1) STEP1：主桁に死荷重、活荷重、残存ケーブルに軸力、削除ケーブルに軸力相当力 P を載荷。
- (2) STEP2：削除ケーブル位置に STEP1 と反対方向に 1.8P（CASE-1）または 1.0P（CASE-2）を載荷。

動的解析の解析手法について、まず、減衰値を定義するために固有値解析を行う。

固有値解析は質量データ、死荷重、活荷重を入力し、各モデルでケーブルを削除した不安定な構造で行う。解析結果から特定方向からの励振力に対する振れやすさを示す量である刺激係数が鉛直方向に強いモードを 2 つ選択することで、質量比例減衰と合成比例減衰の組み合わせであるレーリー減衰を設定する。各モデルで定義した減衰定数、固有周波数について表-1 に示す。

動的解析において静的解析と同様に 2STEP であり、STEP1 は静的解析と同様、STEP2 においては動的荷重 P を 0.01 s で载荷完了させることで瞬間的な軸力抜けを再現する。载荷時間を 0.01 s より短くしても現れる動的効果の違いは微小であることを確認できている。また、解析時間は 0 s~50 s とし、解析ステップ間隔 $\Delta t=0.01$ s とした。解析終了時間については 50 s である程度振動が収束する時間であること、 Δt についても、これより短くしても解析結果に大きく違いが無いことを確認している。

3. 解析結果 リダンダンシー評価を行うために各断面力を求めた。主桁下フランジに発生する応力を求め比較したものを図-3 に示す。横軸が主桁の要素番号、縦軸が発生応力（引張を正）に対応している。動的解析結果は各要素の取りうる最小値および最大値を出力した。主に引張を受ける部材は降伏応力と、圧縮を受ける部材は道路橋示方書を参考に式(1)、式(2)を用いて算出した座屈応力と比較した。また、座屈・降伏応力を越えた要素数を比較したものを表-2 に示す。

$$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.0 \quad (R_R \leq 0.5)$$

$$\sigma_{cr}/\sigma_y = 1.5 - R_R \quad (0.5 < R_R \leq 1.0) \quad (1)$$

$$\sigma_{cr}/\sigma_y = 0.5/R_R^2 \quad (1.0 < R_R)$$

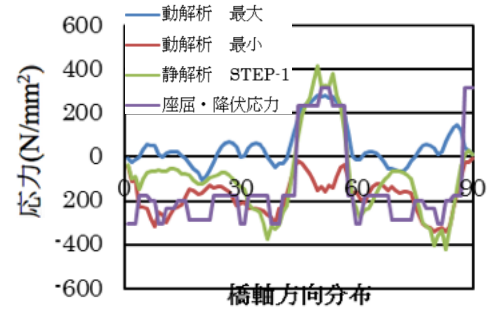
$$R_R = \frac{t}{b} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k_R}} \quad (2)$$

b: 補剛板の全幅 (mm), t: 板厚 (mm), σ_{cr} : 鋼材の座屈応力 (N/mm²), σ_y : 鋼材の降伏点 (N/mm²)

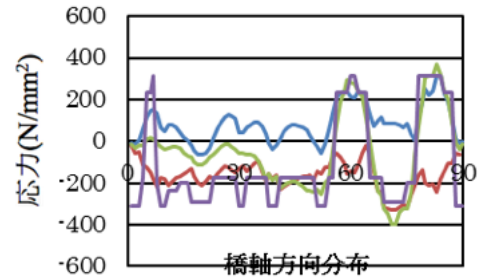
E: ヤング係数 (N/mm²), μ : ポアソン比, k_R : 座屈係数 ($=4n^2$), n: 補剛材で区切られるパネル数

全体的に静的解析、動的解析の応答結果は似ており、降伏・座屈要素数に大きな差は認められないが、C5 および C8 削除モデルの座屈要素数に関しては動的解析の方が少し多めに表れている。これは削除ケーブル位置から離れた範囲で、動的解析結果の応答値が大きく表れる傾向がみられるためである。この動的解析の応答値が大きく表れる傾向は主桁断面力のせん断力や曲げモーメントに関してもみられた。

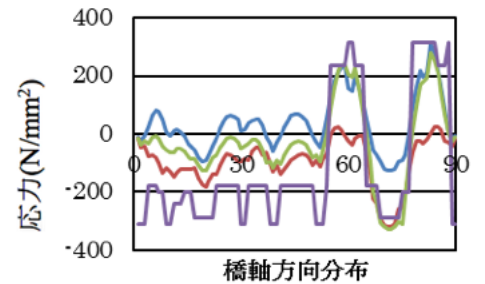
4. 結論 主桁下フランジの発生応力の比較によりリダンダンシー評価を行うと削除ケーブル位置近く、応答値が大きな範囲では衝撃係数を加味した静的解析結果はそれなりの精度を保てていると考えられるが、それらから離れた範囲では差異が大きく、動的解析モデルでは特に圧縮側で大きい応力を示す傾向があり、主桁部の座屈は橋梁全体に致命的な影響を及ぼすことが想定されるため無視できないと考えられる。ただし、この主桁下フランジの座屈・降伏要素数で斜張橋のリダンダンシーを評価できているとは言えず、簡易的な検討にとどまっており、今後はその評価法の検討を行う必要がある。



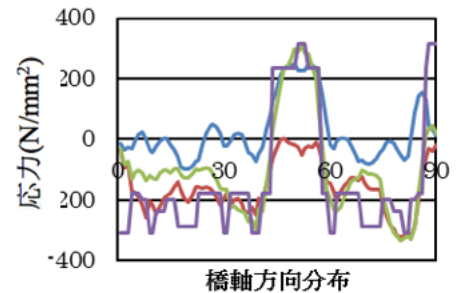
(a)C5 ケーブル削除



(b)C6 ケーブル削除



(c)C7 ケーブル削除



(d)C8 ケーブル削除

図-3 各モデルの主桁下フランジ応力分布

表-2 各モデルの降伏・座屈要素数 (多い方を灰色背景)

削除ケーブル	降伏要素数		座屈要素数	
	静的解析	動的解析	静的解析	動的解析
C5	10	9	25	31
C6	7	12	22	20
C7	2	8	10	9
C8	6	9	20	25