# ケーブル腐食を考慮した斜張橋における静的・動的連鎖崩壊解析

## 1. はじめに

我が国では、1960年に最初の斜張橋が建設されて以降、多数の斜張橋が建設されてきた.しかし近年、吊り 形式橋梁におけるケーブル腐食が深刻な問題となって おり、ケーブルを構成する亜鉛めっき鋼線が腐食・破断 する事例が国内外を問わず報告されている<sup>1)</sup>.

また,2019年10月台湾北東部にて生じた台湾南方澳 大橋の落橋事故は,連鎖崩壊の典型的な事例である<sup>2)</sup>. 腐食によりスパン中央部の1本のケーブルが破断した 後,他のケーブルが次々と破断し,アーチリブが崩壊し て落橋に至るという,いわゆる連鎖崩壊が発生した.こ うした連鎖崩壊の問題は,主に建築物において長年研 究されてきたが,橋梁を対象とした連鎖崩壊に関する 研究は一部の研究者の間でしか行われていない.また, 吊り形式橋梁におけるケーブルの腐食・破断に対する 予防的維持管理が必要不可欠であるが,依然として効 果的な対策が確立されていないのが現状である.

そこで本研究では、ケーブルの応力ひずみ関係にて 破断ひずみに到達後、応力を除荷する手法によりケー ブルの連鎖破断挙動を再現する新たな動的解析手法を 提案し、斜張橋においてケーブルが破断した際の動的 応答について検討する.また、ケーブル腐食を応力ひず み関係の降伏応力および破断ひずみを低減させること によってモデル化し、ケーブル腐食を考慮した場合の 崩壊挙動について検討した.さらにケーブルが破断し た際の動的増幅率や荷重再分配率についての評価を行 い、本手法の優位性や斜張橋においてケーブルが破断 した際の連鎖崩壊挙動に関する考察を行う.

# 2. 斜張橋モデル

#### **2.1** 対象橋梁の諸元

検討の対象とする斜張橋モデルは、1面吊り3径間連 続鋼斜張橋(道路橋)を対象とした.中央径間長を300m とし、主桁断面は鋼製箱桁断面とした.総幅員は22.0m, 上下各2車線の道路橋、ウェブ高さは3.0m,

床板は鋼床版を想定した. 主塔の断面は鋼製箱桁断面 とした. 主桁の鋼種はSM400(降伏応力235MPa),主塔 はSM490(降伏応力315MPa)である. ケーブルには, ST1570を用い,ケーブルを構成する鋼線の引張強度は



環境構造工学分野 8021807 角田 晴輝 指導教員 後藤文彦 青木由香利

1570MPaとした. 側径間に7本のケーブル (C1-C7), 主径間の左半分に7本のケーブル (C8-C14)のケーブ ルを配置した. 主径間の右半分 (C15-C21)および右径 間 (C22-C28)は,左右対称のケーブルを配置した.

#### 2.2 数値解析モデル

斜張橋の数値解析モデルを図1に示す. 主桁, 主 塔, ケーブルすべてはり要素でモデル化した. 主桁は両 端および主塔横梁部で鉛直方向に支持されるが, 橋軸 方向には自由とした. 主塔は, 下端で固定支持した.

主塔主桁,主塔はファイバー要素に分割し,鋼板は 板厚方向に4分割,幅方向に8分割した.また,主桁 は、1mにつき1要素となるように部材軸方向に要素分 割し、ケーブルはすべて1本1要素とする.ケーブル の両端部はピン結合となるように設定している.実際 のケーブルでは多数の鋼線を平行に束ねるあるいはよ り合わせているが、解析上は円形断面の鋼棒でモデル 化した.その際、ケーブルを構成する鋼線の断面積と鋼 棒モデルの断面積は一致させた.材料の応力ひずみ関 係は、鋼板はバイリニア、ケーブルはトリリニアとした (図3).本研究の解析には、汎用 FEM 解析ソフトウェ ア Marc Mentat 2021.4 を用いた.



## 2.3 常時設計荷重

3次元の斜張橋モデルを作成し,常時設計荷重により 生ずる断面力を構造解析により求めた.常時設計荷重 を図4に示す.

橋軸方向単位長さあたりの死荷重(D)は、鋼桁重量 (69.7kN/m),地覆・高欄(24.5kN/m),アスファルト 舗装(28.4kN/m)である.また、端支点の負反力を抑制 するため、側径間にはカウンターウエイト(CW,60kN/m) を載荷した.死荷重作用時に主桁および主塔の曲げモ ーメントが平滑化かつ最小になるようにケーブル・プ レストレス(Pr)を導入した.活荷重(L)は道路橋示 方書のB活荷重を準用することとし、スパン中央部に主 載荷荷重を載荷することとした.すなわち、集中荷重pi

(10kN/m<sup>2</sup>) を長さ10mおよび幅員5.5m に作用させる. ただし,その他の部分は5.0kN/m<sup>2</sup>とする. さらに,分布 荷重  $p_2$  (3.0kN/m<sup>2</sup>) を幅員5.5mに作用させる. ただし, その他の部分は1.5 kN/m<sup>2</sup>とする. なお,集中荷重はス パン中央に,等分布荷重は全径間に載荷した.

主桁のスパン中央は正の曲げモーメントが支配的で ある.主塔の基部においては圧縮軸力と曲げモーメン トが発生する.これに伴う曲げ応力と軸圧縮応力をそ れぞれの許容応力で除した値を足し合わせた照査値が 1.0以下となることを確認した.



#### 3. 解析手法

本解析では、ニューマーク β 法を用いた時刻歴応答 解析を実施し、ケーブル破断による連鎖崩壊挙動の再 現を試みた.減衰定数は h=0.0032、全体の解析時間は 300s とし、タイムステップは 0.01s とした.



ケーブルの破断挙動を再現した方法を以下に示す. はじめに,解析モデルから破断させるケーブル要素を 事前に取り除く.破断モデルのケーブル端部の節点 に、初期ケーブル張力を載荷する.この状態は、ケー ブルプレストレスによる引張張力が載荷されている状 態を再現している.続いて、載荷したケーブル張力を  $\Delta t s$  でゼロとする.ここで図6にケーブル破断時間 ( $\Delta t$ )を変化させたときの主桁中央部の鉛直変位時刻歴 を示している.この図より、 $\Delta t$  が3s,5sのときは破断 時に生じる衝撃力が小さくなっている.一方で $\Delta t$  を 小さくすると、衝撃力が十分発揮されることがわかっ た. $\Delta t=0.0.1$ 以下については、ほとんど応答に変化が 見られなかったため、本研究では $\Delta t = 0.01s$  として解析 した.載荷したケーブル張力を $\Delta t = 0.01s$  でゼロとする ことによって、ケーブルが瞬間的に破断する挙動を再 現した(図5(b)).



### 3.2 ケーブル腐食のモデル化

ケーブルを構成する健全な鋼線の伸びは 4.0%を有するが, 腐食により鋼線の伸びが低下することが知られている.中村 ら<sup>1)</sup>によれば,腐食した亜鉛めっき鋼線の伸びは,健全鋼線 の半分程度まで低下する.さらに,鋼線を束ねたケーブルで は鋼線間の接触や両端のソケット部の影響のため,腐食ケー ブルの伸びはさらに低下する.

三田村ら<sup>3</sup>は、腐食した平行線ストランドの引張試験 を実施し、腐食ケーブルの伸びが健全時の1/4 程度まで 低下することを報告した.これらを考慮し本研究では、 ケーブル構成則の降伏応力および破断ひずみを低下させる ことにより、ケーブル腐食をモデル化した.ケーブル健全時 および腐食時の応力ひずみ関係を図7に示す.腐食時の降 伏応力は健全時の破断強度40%、すなわち628MPaとし、 破断ひずみは0.008となるように設定した.

また破断ひずみ到達後,応力をゼロ(ゼロに非常に近い値とする)と設定し、これを全てのケーブルに適用させることで、1本目のケーブルを破断させた後、他のケ ーブルが連鎖的に破断する挙動を再現した.



#### 3.3 応力除荷法

本手法は、応力ひずみ関係にて破断ひずみ到達後、応 力をゼロとすることによりケーブルの連鎖破断挙動を 再現した.よって本手法を応力除荷法と呼ぶ.本解析手 法の利点は、ケーブルが破断した後の連鎖崩壊挙動を 一度の解析で再現でき、静的解析と比べてより実挙動 に近い連鎖崩壊挙動を再現可能である点である.連鎖 崩壊解析の解析手順を以下に示す(図8).

STEP1: 図8(a)に示すような,ケーブル破断前のモデ ルを初期モデルとする.初期モデルに対し,設計荷重 (Pr+D+CW+L)を載荷する(図8(b)).一度に荷重を載荷 するとモデル橋が振動するため,解析時間200sかけ て載荷する.この解析結果から,C1のケーブル張力の 時刻歴を取得する(図8(c)).

STEP2:続いて,橋梁モデルから対象ケーブル(例:C1) を取り除き,このモデルを破断モデルと呼ぶ(図8(d)). ここで,図8(f)に示すようにSTEP1で取得したケーブ ル張力(図8(c))が時刻250sにゼロとなるように設定 し,ケーブル定着部の節点(主桁および主塔部)に作用 させる.これと同時に設計荷重を破断モデルに載荷す る.これにより1本目のケーブルが時刻250sで破断し たことを再現する.またケーブル健全時および腐食時 の応力ひずみ関係をそれぞれ適用させ(図8(g)),1本 ケーブルを破断させた後,他のケーブルや橋梁全体の 動的挙動を解析する. 本研究では,斜張橋モデルが終局に至った時点(部材断 面が全断面降伏に至った時点)で,橋全体が崩壊したと する.

### 4. 解析結果

#### 4.1 健全モデルにおける C1 破断時の動的応答

図7に示す健全時の応力ひずみ関係をすべてのケー ブルに適用させた場合の解析を行う.これを健全モデ ルと呼ぶ.ここではC1(アンカーケーブル)を時刻 250sで破断させた場合の動的応答について検討した.

C1 が 250s で破断すると、それに伴い動的な衝撃力 が発生し、他のケーブルに応力が分配される.しかし C1 が 1 本破断しても、他のケーブルは破断ひずみに 到達することなく、全体崩壊にも至らなかった. ま た、ケーブルを2本同時(C1-C2) に破断させた場合も 同様の結果となった.





図 8 連鎖崩壊解析手法(例:C1 破断時)

#### 4.2 腐食モデルにおける C1, C14 破断時の動的応答



図 10 C1 破断時の連鎖崩壊過程 (Scale factor:5x)

ここでは、図7に示す腐食時の応力ひずみ関係をす べてのケーブルに適用させた場合の解析を行う.これ を腐食モデルと呼ぶ.健全モデルと同様にC1を破断さ せた場合の動的応答について検討した.

C1 が破断した場合の連鎖崩壊過程を以下に示す(図 10).腐食モデルにおいて,C1 を破断させると(図 10(b)), C3,C4,C2,C5,C6,C7 の順で破断ひずみに到達し(図 10(c)),左径間側すべてのケーブルが破断した直後に, C4 付近の主桁断面に塑性ヒンジが形成され崩壊に至る (図 10(d))という連鎖崩壊挙動を生じることがわかった.

また図 11 より, 主桁中央部は 250s で C1 が破断した 後, しばらく振動した後, 255s 付近で鉛直変位が急増 している. 次に図 12 に C2~C7 のひずみの時刻歴応答 (時刻 254.4s~255.0s)を示す. これより C3,C4 が 254.56s に破断ひずみに達し破断し, その後 C2 と C5 が 254.71s に破断した. その後, C6,C7 も破断する (C6:254.77s, C7:254.99s). さらに図 13 に C4 付近の主桁断面の上縁・ 下縁・中立軸付近における応力の時刻歴応答を示す. こ れより, 左径間側のケーブルが全て破断ひずみに達し た時刻 254.8 付近で主桁断面が中立軸を境に引張, 圧縮 降伏し塑性ヒンジが形成され, 橋全体が崩壊した.

続いて, Cl4 (センターケーブル) を意図的に破断さ せた場合の応答について検討した.

C1を破断させた場合と同様に,250s で C14 を破断 させた後,主桁が振動し255s あたりで変位が急増する. その間,254.48s に C12,続いて C13,C11 が破断ひずみ に達し,破断した.さらに C10~C8 が破断した.中央 径間左側のすべてのケーブルが破断ひずみに達した時 刻で,C12 付近の主桁断面が中立軸を境に引張,圧縮降 伏し塑性ヒンジが形成され,橋全体が崩壊した.





図14 斜張橋モデルのケーブル配置図

破断ケーブル	崩壊	塑性ヒンジ形成箇所
C1	0	
C2	0	
C3	0	
C4	0	0
C5	0	塑性ヒンジ (C4 付近)
C6	0	
C7	×	—
C8	×	-
C9	×	-
C10	0	
C11	0	御歴まれ
C12	0	型性L99 (C12付近)
C13	0	0
C14	0	-

表1 ケーブル破断箇所ごとの応答

C1およびC14以外のケーブルを破断させた場合の応 答について検討する.

得られた結果を表 1 にまとめた.ケーブルの腐食を 考慮し, C2~C6 を 1 本ずつ破断させてそれぞれ解析す ると C1 と同様の連鎖崩壊挙動に至ることがわかった. すなわち,破断ケーブル付近のケーブルから順次破断 ひずみに到達し,連鎖的に破断することで,左径間側の 主桁のたわみが大きくなった.このとき C4 付近の主桁 断面が中立軸を境に,圧縮および引張降伏し,塑性ヒン ジが形成され,全体崩壊に至った.

一方で, C7,C8,C9 を1本破断させても,全体崩壊に は至らないことがわかった.これらは主塔付近のケー ブルであり,他のケーブルに比べ設計段階で初期張力 が小さい.そのため,破断しても他のケーブルへ分配さ れる張力は限定的であり,橋梁が連鎖崩壊するには至 らなかったと考えられる.

次に C10~C13 を破断させると, C14 を破断させた場 合と同様の連鎖崩壊挙動を示すことがわかった. すな わち C10-C13 が破断した際は,破断ケーブル付近のケ ーブルから,破断ひずみに順次達していき, C12 付近の 主桁断面に塑性ヒンジが形成され崩壊に至った.

## 5. 動的増幅率と荷重再分配率

ケーブルの破断は、衝撃荷重を生じさせる動的な挙 動であり、ケーブルが担っていた張力が分配され、隣接 するケーブルに大きな応力を発生させる.そこで、ケー ブルが破断した際の動的増幅率および荷重再分配率に ついて検討し、連鎖崩壊挙動について考察した.

本研究では,動的増幅率を DAF (Dynamic Amplificat ion Factor),荷重再分配率を LRR (Load Redistribution Rate)で表す. DAF および LRR を式(1), (2) によって 求める.

$$DAF = \frac{T_d - T_i}{T_s - T_i} \tag{1}$$

$$LRR = \frac{T_s}{T_i} \tag{2}$$

ここで、Tiは図15(a)に示す初期モデルすなわちケー ブル破断前モデルの静的応答値、Tsは破断ケーブルを 除いた構造系の静的応答値(図15(b))、そしてTdは図15 (b)に示すようなケーブル破断モデルの動的応答値をそ れぞれ示している.

DAF は図 16 に示す,動的応答値の最大値から初期値 を引いた値と,静的応答値から初期値を引いた値の比 であり,LRR は図 16 に示す静的応答値と初期値の比で ある.

健全モデルと腐食モデルにおいて C1 を破断させた 場合の,各ケーブルの応答値と DAF・LRR を算出し, 図 17 にまとめた.ケーブル健全時(図 17(a))において 1 本または 2 本同時に破断させた場合の DAF は約 1.8 となることがわかる.一方で,腐食を考慮し連鎖的にケ ーブルが破断した場合(図 17(b),(c))の DAF は最大で 6.3 程度となり,非常に大きな値が算出されることがわ かった.





(b) ケーブル破断モデル(静的・動的応答値)





💥 Ti (MN), Td (MN), Ts (MN)

(a) ケーブル健全時に C1-C2 同時に破断した場合



💥 Ti (MN), Td (MN), Ts (MN)

(b) ケーブル腐食時に C1 が破断した場合



💥 Ti (MN), Td (MN), Ts (MN)

(c) ケーブル腐食時に C1 に続き C2 が破断した場合

図17 ケーブル健全時および腐食時のDAF・LRR

#### 6. まとめ

ケーブルが連鎖的に破断する挙動をケーブル応力を 除荷する方法によって再現し、動的解析により橋梁全 体の連鎖崩壊挙動について検討した.さらに本研究で は、ケーブル腐食を応力ひずみ関係の降伏応力および 破断ひずみを低減させることによって再現した.本研 究で得られた結論は以下のとおりである.

- 本手法によって、ケーブル腐食が進行している斜張 橋の特定のケーブルを1本破断させた場合、他のケ ーブルが次々と連鎖的に破断し最終的には橋全体 が崩壊するという連鎖崩壊挙動を再現できること を確認した。
- 2) ケーブルが健全である場合には、ケーブルが2本同時に破断しても、全体崩壊には至らない.
- 3) ケーブル腐食を考慮した場合、C1を破断させると、 隣接する C3,C4,C2,C5 の順で破断ひずみに到達し、 左径間側のケーブルが全て破断した後、C4 付近の 主桁断面に中立軸を境に引張・圧縮降伏し塑性ヒン ジが形成され崩壊する.

さらに、ケーブル破断箇所をパラメータとして、ケー ブルを破断させた場合の連鎖崩壊挙動について検討し た.

4) C2~C6を1本破断させると、C1と同様の連鎖崩壊 挙動に至ることを確認し、最終的にはC4付近の主 桁断面に塑性ヒンジが形成されることがわかった. またC10~C13を1本破断させると、C12付近の主 桁断面に塑性ヒンジが形成された.一方で、C7~C9 が破断した場合は、塑性ヒンジは形成されず、連鎖 崩壊挙動は確認されなかった.

また動的増幅率(DAF) や荷重再分配率(LRR)につい ても検討し,以下の知見を得た.

5) ケーブル健全時に2本同時に破断した直後の隣接 するケーブル張力のDAFは1.8程度となるが、腐 食を考慮し連鎖的にケーブルが破断した直後の DAFは最大で約6.3となることがわかった。

本研究で得られた成果は、斜張橋の安全性の評価や 崩壊の対策、今後増加すると予想される老朽化した吊 り形式橋梁の維持管理・長寿命化に貢献すると思われ る.

## 参考文献

- 鈴村恵太,中村俊一,樽井敏三:腐食した亜鉛め っき鋼線の疲労特性,土木学会論文集,pp.614-622,2006.
- Shunichi Nakamura, Kazuhiro Miyachi: Ultimate Strength and Chain-Reaction Failure of Hangers in Tied-ArchBridges, *SEI*, *No.1*, 136-146, 2020.2.
- 三田村武,中井博,渡邊英一,杉井謙一:橋梁用 ケーブルの最近の話題と展望,土木学会論文 集, No. 444, VI-16, pp. 97-106, 1992.