

ケーブル腐食を考慮した斜張橋における連鎖崩壊解析

秋田大学大学院 ○学生会員 角田 晴輝
 秋田大学大学院 正会員 青木 由香利
 秋田大学大学院 正会員 後藤 文彦
 東海大学 正会員 中村 俊一

1. はじめに

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垂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¹⁾。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²⁾。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ふ、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³⁾。

そこで本研究では、ケーブルの腐食が進行した斜張橋において、ケーブルが破断した後、他のケーブルが次々と破断し、やがて橋全体が崩壊するという連鎖崩壊挙動を動的解析により再現することを試みる。また、一連の解析により、斜張橋におけるケーブルが破断した際の動的挙動について理解を深め、崩壊を考慮した設計法を開発するための基礎研究とすることを目的としている。

2. 対象とする斜張橋モデル

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。主塔は2本柱で構成され、そ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)とし、ケーブルには、ST1570を用い、引張強度は1570MPaとした。

主桁、主塔、ケーブルすべては要素でモデル化した。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。

3. 常時設計荷重

常時設計荷重により生ずる断面力を線形弾性解析により求めた。常時設計荷重として与えた荷重を以下に示す。

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ェイト (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) は道路橋設計方書の 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⁴⁾。

4. ケーブル腐食のモデル化

三田村らは、腐食したPWSの引張試験を実施し、腐食ケーブルの破断強度が健全時の50%程度、伸びが1/4程度まで低下することを報告した⁵⁾。そこで本研究では、ケーブル腐食を応力ひずみ関係のパラメータを変えることによってモデル化した。

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。

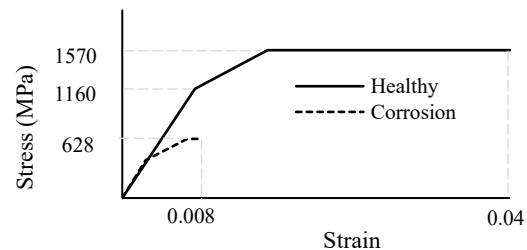


図1 ケーブル腐食時の応力ひずみ関係

5. ケーブル破断時の動的応答

5.1 解析手法

時刻歴応答解析により、ケーブル破断による連鎖崩壊挙動の再現を試みた。本手法は、変位や応力履歴を踏襲し、且つケーブル要素が破断ひずみ到達後、自動的に張力がゼロとなることでケーブル破断を再現できることが利点である。この手法を用いることで崩壊挙動を一度の解析で行えることも利点として挙げられる。

解法はニューマークβ法とし、減衰定数は $h=0.0032$ 、全体の解析時間は300s、タイムステップは0.01sとした。

連鎖崩壊解析の手順を以下に示す。

STEP1: 初期状態(ケーブル破断前)モデルに設計荷重を解析時間200sかけて載荷し、破断するケーブル張力の時刻歴応答結果を得る。

STEP2: 続いて、破断ケーブルを取り除いたモデルを作成し、破断するケーブル定着点(主桁および主塔)にケーブル軸力を作用させ、250sでケーブル張力が0となるように設定する。

STEP3: 解析を実行し、斜張橋モデルが終局に至った時点(部材が全断面降伏に至った時点)で、橋全体が崩壊したとする。

5.2 解析結果

表 1 ケーブル破断シナリオ

Name	Loss of cable	Corrosion	1 st yield stress (MPa)	2 nd yield stress (MPa)	Breakage strain
Scenairo-1	C1	-	1160	1570	0.04
Scenairo-2	C1	○	464	628	0.008
Scenario-3	C14	○	464	628	0.008

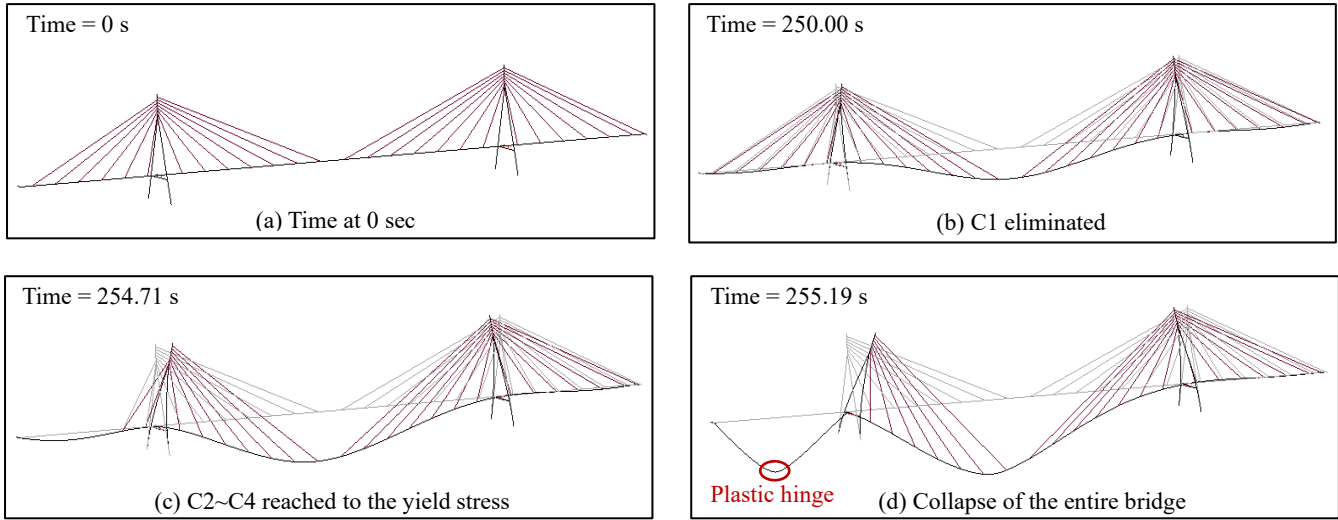


図 2 C1 破断時の連鎖崩壊過程 (Scale factor:10x)

ケーブルの腐食が進行した斜張橋モデルにおいて C1(アンカーケーブル)および C14(センターケーブル)が破断した場合の解析を行った。解析結果を以下に示す。また、ケーブル健全時の場合は、ケーブルが 1 本破断しても連鎖崩壊に至らないことを確認した。

(a) C1 が破断した場合

C1 破断時の連鎖崩壊過程を図 2 に示す。250s で C1 が破断し、251.03s に C3, 続いて C4,C2,C5 が第二降伏応力に達した (図 2 (b), (c))。そして、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)。C7 まで破断した後に、C4 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 2 (d))。

C1 が破断すると、発生する衝撃力により隣接するケーブルから順に応力が分配され、C3,C4,C2,C5 の順で破断し、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った。

(b) C14 が破断した場合

250s で C14 が破断し、254.48s に C12, 続いて C13,C11 が破断ひずみに達し、破断した。その後 C10~C8 が破断した。そして、C15,C16,C17 が第二降伏応力に達した。その後に、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、(上縁: 255.34s, 中立軸付近: 255.34s, 下縁: 255.23s) 橋全体が崩壊した。

C14 が破断すると、発生する衝撃力により隣接する C13,C12,C11 の順で応力が分配される。そして、C13,C11,C12 の順に第二降伏応力に達し、破断ひずみには、C12,C13,C11 の順で達し破断した。その後、C10~C8 までのケーブルも破断すると、C12 付近の主桁鉛直変位が急増し、塑性ヒンジが形成され崩壊に至った。

6. まとめ

斜張橋における連鎖崩壊挙動を時刻歴応答解析により再現することを試みた。斜張橋における特定のケーブルが破断し、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、いわゆる連鎖崩壊の再現に成功した。

またケーブルが腐食している際のアンカーケーブルおよびセンターケーブルが最初に破断した後の連鎖崩壊挙動について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) ケーブルが健全である場合には、ケーブル 1 本が破断しても、全体の崩壊には至らない。
- 2) ケーブルが腐食している場合 (破断ひずみ 0.008)、ケーブル 1 本が破断した際、連鎖的にケーブルが破断し、崩壊に至る、

参考文献

- 1) 鈴木恵太, 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.
- 2) Shunichi Nakamura, Kazuhiro Miyachi: Ultimate Strength and Chain-Reaction Failure of Hangers in Tied-ArchBridges, SEI, No.1, 136-146, 2020.2.
- 3) M.Wolff and U.Starossek,: Cable-loss analyses and collapse behavior of cable-stayed bridges, Structural Analysis and Steel Structures,p.8, 2010.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II鋼橋編, 2002.
- 5) 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.