

吊り材を有するタイドアーチ橋における腐食による ケーブル破断に起因した連鎖崩壊の動的応答解析

環境構造工学分野 8022809 君島 真美
指導教員 青木 由香利

1. はじめに

2019 年 10 月に生じた台湾の南方澳大橋の落橋事故は、ケーブル腐食の危険性を示す事例である。アーチ分岐部付近のケーブルが破断した後、他のケーブルが次々と破断し、主桁およびアーチリブが崩壊して落橋に至るという連鎖崩壊が発生した¹⁾。

近年は、ケーブルの腐食についての研究が進められている²⁾。これらの研究ではケーブルに腐食が生じた際に、本来ケーブルに期待される引張力や破断までの伸びが低下することが報告されている。

また、動的解析を用いた連鎖崩壊解析は斜張橋や吊り橋では実施されているが、タイドアーチ橋に適用した事例はない。そこで本研究では、吊り材を有するタイドアーチ橋に対してケーブル腐食を考慮し、連鎖崩壊発生メカニズムを動的応答解析により数値解析的に再現することを目的とした。この解析では、ケーブルの腐食を考慮するとともに、既往研究によって提案された連鎖崩壊解析手法³⁾を用い、設計した橋梁において特定のケーブルが破断したときに他のケーブルが次々と破断し、最終的には橋梁全体が崩壊する連鎖崩壊の再現を試みる。比較のため、形状、ケーブル位置の異なる 3 つのアーチ橋を設計し、それらの違いによる連鎖崩壊への影響を検討する。

2. 検討モデル

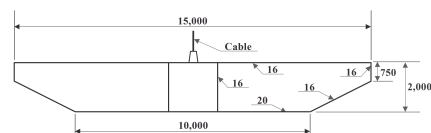
本研究では、主桁、アーチリブ、ケーブルをはり要素でモデル化した。両側に歩道を有する上下各 1 車線の道路橋を想定し、全幅員を 15m とした。

構造諸元は全ての橋梁モデルで同一とし、主桁間部は、スパン 140m、アーチライズ 27.4m とした。主桁は図-1(a) に示すように、全幅員 15m 高さ 2m の鋼製 1 箱桁とし、材質は SM400 とした。

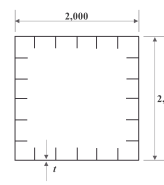
アーチリブは図-1(b) に示すように、鋼製の正方

形箱断面（幅 2.0m、高さ 2.0m）とした。板厚は中央アーチリブ 18mm、分岐アーチリブ 26mm、横梁 22mm とそれぞれ設定し、材質は SM490Y とした。

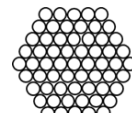
吊り材としてのケーブルは図-1(c) に示すように、平行線ストランドを想定し、断面積は 2390mm^2 とする。ただし、解析では平行線ストランドを丸鋼棒に置換し、直径を 55mm ($A=2376\text{mm}^2$) とした。材質は ST1570 を採用した。なお、本研究では簡易的にすべてのケーブルは同一断面とした。



(a) 主桁断面図



(b) アーチリブ断面図



(c) ケーブル断面図

図-1 断面図

検討モデル 1

検討モデル 1 は、図-2 に示すような、スパン中央に単弦アーチリブおよび端部で 2 本のアーチリブに分岐する独特な構造を有したタイドアーチ橋モデルを設計して解析に用いる。この橋は実際に落橋した南方澳大橋に着想を得て設計した。アーチリブは両端で分岐アーチリブに分かれ、端部は横梁に連結している。13 本のケーブルが一面吊りで桁に対して放射状に配置されている。

検討モデル 2

検討モデル 2 は、図-3 に示すような単弦アーチ橋モデルを設計して解析に用いる。13 本のケーブルが一面吊りで桁に対して垂直に配置されている。

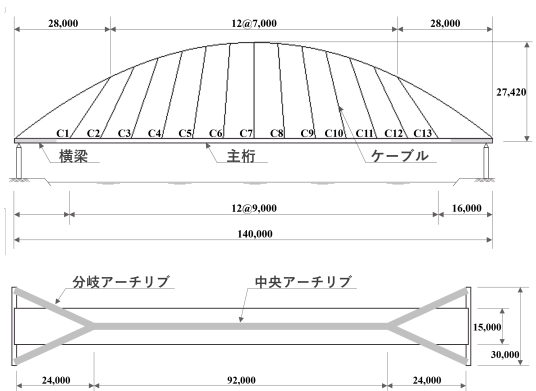


図-2 検討モデル 1 全体図

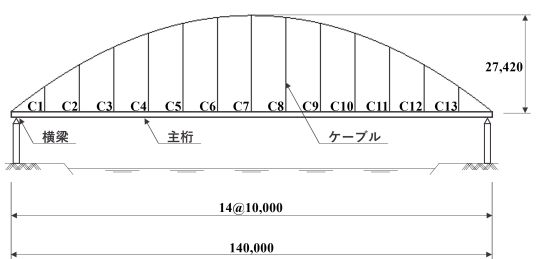


図-3 検討モデル 2 全体図

検討モデル 3

検討モデル 3 は、図-4 に示すような単弦アーチ橋モデルを設計して解析に用いる。13 本のケーブルが一面吊りで桁に対して放射状に配置されている。

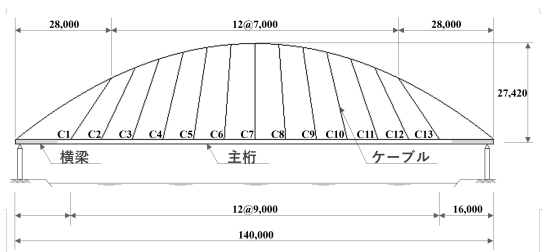


図-4 検討モデル 3 全体図

次に本研究のタイドアーチ橋モデルの設計に用いた設計荷重を以下に記す⁴⁾。橋軸方向あたりの死荷重 (D) は、主桁部は、鋼桁重量 (61.3kN/m)、アスファルト舗装 (11.0kN/m)、RC 床版 (4.9kN/m)、地覆 (24.5kN/m) である。アーチリブは、中央アーチリブに鋼重 14.3kN/m 、分岐アーチリブに鋼重 20.6kN/m 、横梁に鋼重 17.5kN/m をそれぞれ載荷した。死荷重載荷時の曲げモーメントを平滑化するようにケーブルにプレストレス (Pr) を載荷した。活荷重 (L) は道路示方書の B 活荷重⁴⁾を参考とし、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 ($p1$) を (10kN/m^2) 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^2 とし、衝撃係数 (i) も考慮した^{?)}。さらに、自動車の等分布荷重 $p2(3.5\text{kN/m}^2)$ を幅員 5.5m に作用させる。ただし、その他の部分は 1.75kN/m^2 とした。加えて、歩行者の荷重として $p2$ に 3.0kN/m^2 を幅員 2m に歩行者道路が両側にあることとして作用させる。

断面照査は許容応力度法⁴⁾に基づいて行い、主桁中央部の引張側 (下縁側)、アーチ分岐部の圧縮側 (上縁側)、ケーブルはそれぞれの最大張力のいずれも照査値が 1 以下となることを確認した。解析は、汎用 FEM 解析ソフトウェア Marc Mentat 2021.4 を用いた。

3. 数値解析手法

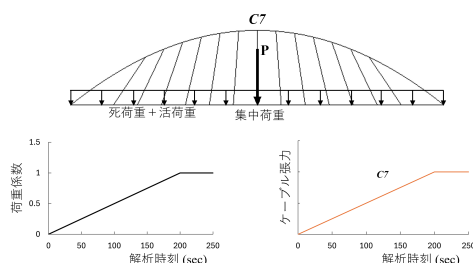
(1) 連鎖崩壊解析手法

本解析では、最初に選んだケーブルを 1 本破断させた際に発生する衝撃荷重により、他のケーブルも破断ひずみに到達することで連鎖的に破断し、最終的に橋梁全体が崩壊するかを動的解析により検討した。本研究では、減衰定数を 0.5% として橋梁全体に適用した。

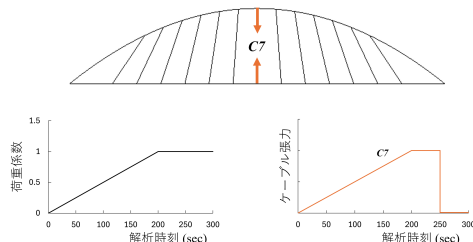
STEP1: ケーブル破断のない健全モデルに対して、図-5(a) に示すように、対象モデルに設計荷重 ($D + L + Pr$) と集中荷重 (P) を十分に長い時間かけて荷重係数が 1 になるまで載荷する。本研究では 200 秒間かけて載荷した。その後、その状態で 50 秒間解析を続け、モデル橋が定常状態であることを確認する。この解析より、ケーブルについて、張力の時刻歴応答値を得る。図-5(a) では、C7 が最初に破断すると想定している。

STEP2: 健全モデルから最初に破断させるケーブル要素のみを取り除いたモデルに対して設計荷重を載荷する (図-5(b))。最初に破断させるケーブル (本図では C7) は STEP1 の解析によって得たケーブル張力を主桁およびアーチリブの接点に引張力として作用させ、解析時間 250 秒で瞬間的に 0 になるように設定し、破断による衝撃力を再現した。

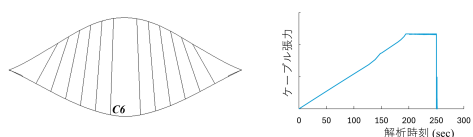
最初のケーブル破断後，荷重は衝撃的に他のケーブルに再分配される．図-5(c) に示すように，その他のケーブルは破断ひずみに達した時点で自動的に張力を失うように設定している．そのため，ケーブルが破断すると残ったケーブルは急激に張力が増加し，破断ひずみに達した時点で破断する．この現象が繰り返され，1 本目の破断から順次破断する連鎖崩壊を再現した．本研究では，タイドアーチ橋モデルの主桁もしくはアーチ部材のいずれかの断面が全塑性の状態になった時点で，橋全体が崩壊したと定義する．これ以降，1 本目のケーブルが破断した時刻を解析時刻 $t=0$ として結果を示す．



(a) 破断時までの荷重载荷とケーブル (C7) 張力



(b) 破断時以降の荷重载荷とケーブル (C7) 張力



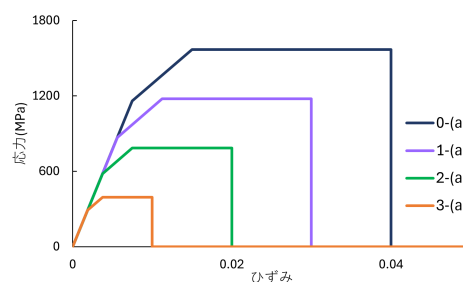
(c) 当初破断以降のその他ケーブル張力

図-5 連鎖崩壊解析手法

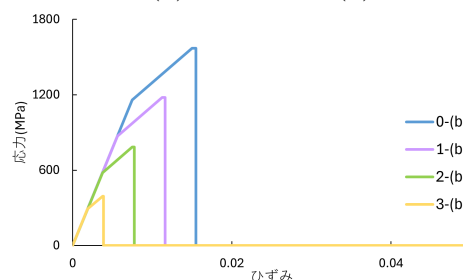
(2) ケーブル腐食再現方法

ケーブルを構成する垂鉛めっき鋼線は，腐食の進展により孔食が生じ，素線の有効断面積が減少するとともに，破断伸びが低下することがわかっている²⁾．以上のことから，本研究では 8 つの腐食レベルに応じた応力-ひずみ関係を想定した (図-6)．腐食レベル 0 は健全時であり，腐食レベル 1, 2, 3 は

応力ひずみがそれぞれ 25%，50%，75% に減少するとした．また，図-6(b) は，応力ひずみの減少に加えて第 2 降伏応力に達した時点から少しだけ離れた位置に設定することで，(a) の設定よりも「ケーブルがすぐ切れる」状態にした．本研究では，ケーブル要素が破断ひずみに達した時点で張力を失うように設定しているので，図-6 に示すように，破断ひずみ到達後は応力が 0 になる．



(a) 腐食レベル (a)



(b) 腐食レベル (b)

図-6 応力ひずみ関係

(3) 解析パラメーター

本研究では，腐食度レベル，最初に破断させるケーブル (C7, C11)，荷重パターンの 3 つを組み合わせ，本橋梁モデルに関する連鎖崩壊発生の可能性について検討する．荷重パターンについては，図-7 に示す以下 4 つのパターンとする．図-7(a)(b) は，渋滞時を考慮した等分布荷重 p_2 を全体に，大型車両 ($P=245\text{kN}$) を考慮した集中荷重をセンターケーブル (C7) と，C11 ケーブル付近に载荷した．

4. 解析結果

表-1 に連鎖崩壊が発生したケースを示す．タイドアーチ橋においても，ケーブル腐食がない場合や腐食度が小さい場合では，1 本目のケーブルが破断しても連鎖的に崩壊することはなかった．

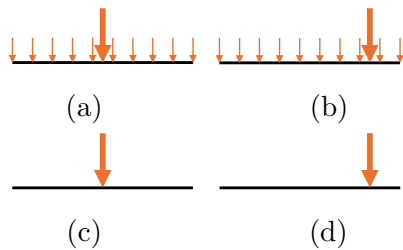


図-7 活荷重パターン

表-1 連鎖崩壊が発生したケース

解析 ケース	検討 モデル	腐食 レベル	破断 ケーブル	荷重 パターン
1	1	2-(b)	11	b
2	1	3-(a)	7	c
3	1	3-(a)	11	d
4	2	2-(b)	7	a
5	2	2-(b)	11	b
6	3	2-(b)	11	b
7	3	3-(a)	7	c
8	3	3-(a)	11	d

(1) 解析結果，検討モデル 1

検討モデル 1 では腐食度 50% の時と 75% の時で連鎖崩壊が発生した．本節では，ケース 3(腐食度 75%，破断ひずみ 0.01，破断ケーブル C11 のとき)について結果を述べる．図-8 に橋梁全体の各時刻における変形図を示す．C11 破断直後， $t=0.26$ ごろに C10 が破断ひずみに到達する．その後 C9,8,12,7 の順に破断ひずみに到達，その直後に C6 が破断ひずみに達すると，橋梁右側の変形が大きくなり，左右非対称の形状になっていく．このケースでは全てのケーブルが張力を失っていき，最終的には図の丸で示した部分(アーチ分岐部)が折れ曲がって塑性ヒンジが形成された．

各ケーブルのひずみの時刻歴応答を図-9 に示す．破断ひずみを 0.01 と設定しており，C11 破断後は隣接するケーブルから順に破断していく．C10,9,8,12 がほぼ同時に，C7,6,13,5 がほぼ同時に，最終的には全てのケーブルが破断ひずみに達し，張力を失った．

実際の南方澳大橋の落橋事故において，荷重はタンクローリーのみが C11 を通過しており，ケーブルの腐食度も残存していた有効断面積から判断する

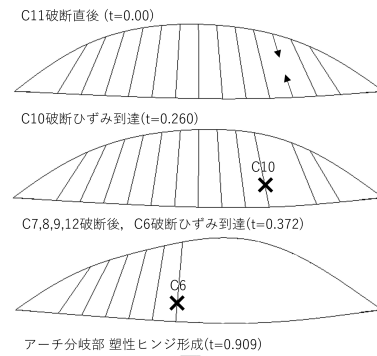


図-8 橋梁全体の各時刻における変形図

と腐食レベル 3 程度であり，ケース 3 の条件と類似している．さらに連鎖崩壊過程メカニズムも共通点が多かった¹⁾．このことは，提案している連鎖崩壊解析，腐食の設定方法などの有効性を示している．

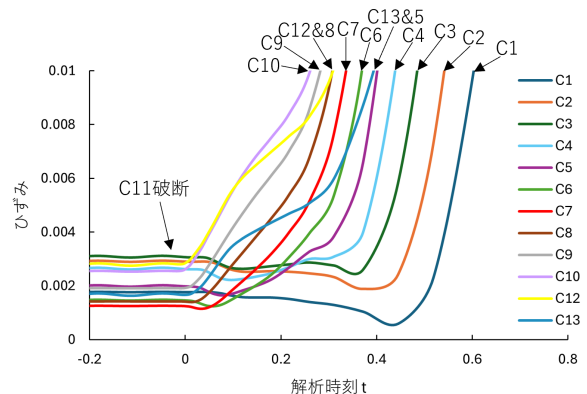


図-9 ケーブルひずみの時刻歴応答

図-10 にアーチ分岐部のひずみの時刻歴応答を示す．C11 破断直後から C5 から C13 までは破断する間は，ひずみに大きな変化は見られない．しかし，C5 まで破断したとき，上縁部分が圧縮側から引張側に変化している．そして，全ての場所でひずみに大きな変化が出始め，下縁部がまず圧縮側で塑性ひずみ 0.001723 に達し，その後中立軸と上縁がほぼ同時に塑性ひずみに達していた．これより，この場所に塑性ヒンジが形成されたことが確認できた．

(2) 解析結果，検討モデル 2

ケーブルが垂直につながっている検討モデル 2 では，腐食度 50% のケース 4,5 で連鎖崩壊が発生し

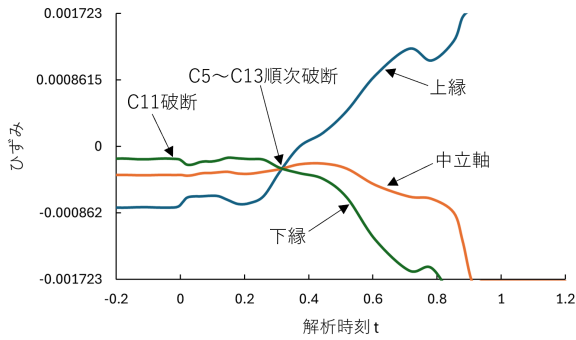


図-10 アーチ分岐部におけるひずみの時刻歴応答

た．本節では，ケース 5(腐食度 50%, 破断ひずみ 0.008, 破断ケーブル C11 のとき) について結果を述べる．図-11 に橋梁全体の各時刻における変形図を示す．C11 破断直後， $t=0.157$ に C12 が破断ひずみに到達する．その後 C13,10,9,8 の順に破断ひずみに到達，直後に C7 が破断ひずみに達すると，橋梁右側の変形が大きくなり，左右非対称の形状になっていく．このケースも全てのケーブルが張力を失い，最終的には主桁中央部が折れ曲がって塑性ヒンジが形成された．

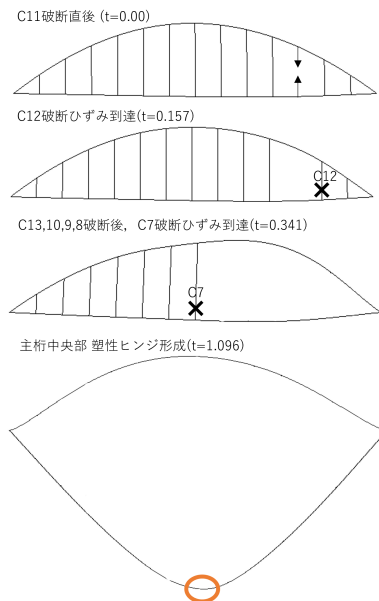


図-11 橋梁全体の各時刻における変形図

各ケーブルのひずみの時刻歴応答を図-12 に示す．破断ひずみを 0.008 と設定してあり，C11 破断後は隣接するケーブルから順に破断していく．C12,13,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1 と順に破断ひずみに達し，張力を失った．

図-13 に主桁中央部のひずみの時刻歴応答を示

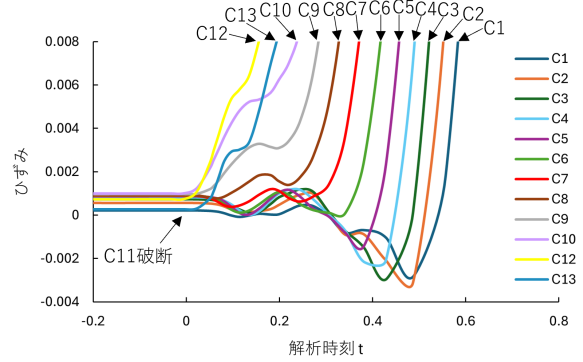


図-12 ケーブルひずみの時刻歴応答

す．C11 破断直後から C7 から C13 までは破断する間は，ひずみに大きな変化は見られない．しかし，C7 まで破断したとき，ひずみに大きな変化が出始め，上縁部が圧縮側で，下縁部が引張側でほぼ同時に塑性ひずみ 0.001723 に達し，その後中立軸が塑性ひずみに達していた．これより，この場所に塑性ヒンジが形成されたことが確認できた．

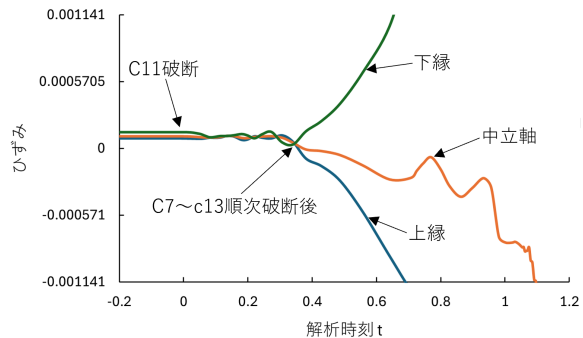


図-13 主桁中央部におけるひずみの時刻歴応答

(3) 解析結果，検討モデル 3

ケーブルは検討モデル 1 と同様に放射線状に，アーチは分岐のない単弦アーチである検討モデル 3 では腐食度 50% と 75% のケース 6～8 で連鎖崩壊が発生した．ケース 8(腐食度 75%, 破断ひずみ 0.01, 破断ケーブル C11 のとき) について結果を述べる．図-14 に橋梁全体の各時刻における変形図を示す．C11 破断直後， $t=0.288$ に C10 が破断ひずみに到達する．その後 C9,12,8 の順に破断ひずみに到達，その直後 $t=0.493$ のとき C7 と C13 が破断ひずみに達すると，橋梁右側の変形が大きくなり，左右非対称の形状になっていく．このケースでも全てのケーブルが張力を失っていき，最終的には主桁中央部が折れ曲がって塑性ヒンジが形成された．

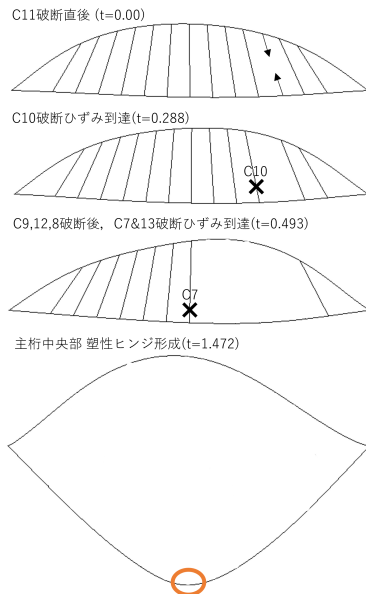


図-14 橋梁全体の各時刻における変形図

各ケーブルのひずみの時刻歴応答を図-15に示す。破断ひずみを 0.01 と設定しており，C11 破断後は隣接するケーブルから順に C10, 9, 12, 8, 7, 13, 6, 5, 4, 3, 2, 1 と破断ひずみに達し，張力を失った。

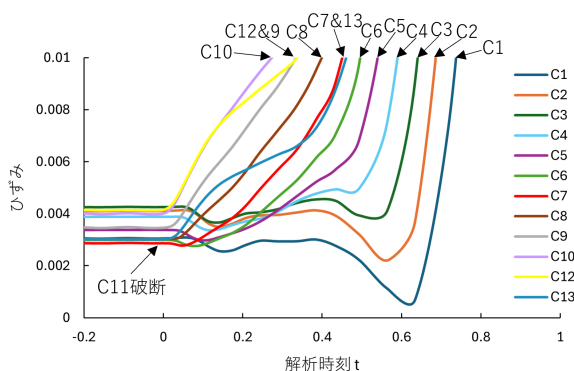


図-15 ケーブルひずみの時刻歴応答

図-16 に主桁中央部のひずみの時刻歴応答を示す。ケーブル破断が順次進行するため，ひずみは少しずつ増加し， $t=0.5$ ごろひずみに変化が始め， $t=0.9$ に上縁部が圧縮側で，下縁部が引張側でほぼ同時に塑性ひずみ 0.001141 に達し，その後中立軸が $t=1.472$ で塑性ひずみに達した。これより，この場所に塑性ヒンジが形成されたことが確認できた。

5. まとめ

3つのモデル橋を設計し，ケーブル腐食レベルに応じて連鎖崩壊を動的解析手法により再現した。本研究で以下の知見が得られた。

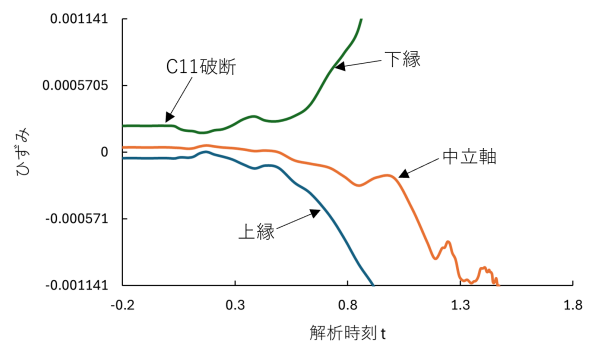


図-16 主桁中央部におけるひずみの時刻歴応答

- 1) 全てのモデルにおいて腐食度が 50%～75% まであがると連鎖崩壊が発生した。
- 2) ケーブルを主桁に対して垂直に配置すると，腐食レベル 2-(b) のとき橋梁全体が崩壊に至る。ケーブルが主桁に対して放射線状に配置するものは，前述の条件ではまだ崩壊には至らない。
- 3) 腐食は応力ひずみの減少に加え，伸びの減少を考慮すると，連鎖崩壊の可能性が高くなることがわかった。特に腐食レベル 2 のケースでは伸び減少の有無で，連鎖崩壊の発生状況に違いが生じた。このことより，伸びの減少はケーブル破断に大きな影響があることがわかった。
- 4) アーチ分岐部を有する橋梁では，分岐部に近いケーブルが破断すると，分岐部に塑性ヒンジが形成されるが確認できた。

以上のことから，提案した解析手法は妥当かつ有効であることが示され，ケーブル配置や橋梁形状の違いによる影響を確認することができた。一方，本解析手法を改良するための今後の課題として，ケーブル破断による衝撃力の算定精度，幾何学非線形の影響などの把握があげられる。

参考文献

- 1) 鎌田 将史, 鈴木 克弥, 白戸 真大, 岩崎 敏男, 台湾のアーチ橋“南方澳大橋”の崩落事故に関する TTSTB 最終報告書の概要紹介. 橋梁と基礎, 2022-4, pp.22-31, 2022
- 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, Vol.16, No.444, pp.97-106, 1992
- 3) 角田 晴輝: 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, 秋田大学修士論文, 2022
- 4) 社会法人 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 平成 14 年 3 月改定