

ケーブル腐食とケーブル振動を考慮した斜張橋モデルの大規模地震荷重下における動的応答解析

環境構造工学分野 8022804 秋山達哉

指導教員 後藤文彦 青木由香利

1 はじめに

吊り形式橋梁の橋梁ケーブルは多数の亜鉛めっき鋼線で構成されており、引張力を伝達する重要な部材である。しかし近年、吊形式橋梁のケーブル腐食が大き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で数多く存在している⁽¹⁾。これらの問題から、吊り形式橋梁のケーブル腐食に関する研究が進められている。中村ら⁽²⁾はケーブル腐食を考慮した斜張橋の終局強度に関する影響を、青木ら⁽³⁾はケーブルの応力-ひずみ関係を設定することでケーブルが破断する挙動を再現した動的解析によって、ケーブル腐食を考慮した斜張橋の連鎖崩壊過程の再現を試みている。これらの研究からケーブル腐食が橋梁全体に与える影響が大きいことを確認したが、依然として斜張橋についてのケーブル腐食に関する研究は少なく、ケーブル腐食が橋全体に及ぼす影響について、まだ明らかになっていない点も多いのが現状である。

上述の課題の中に地震の影響がまだ明らかになっていないという点がある。日本では地震が頻繁に発生し、巨大地震による橋梁の被害も数多く存在している。斜張橋について、ケーブル腐食時に地震が作用した事例もなく、そういった研究もまだ行われていない。そのため、ケーブル腐食が地震時に斜張橋全体にどういった影響を及ぼすかは明らかになっていない。

そこで本研究では、地震について注目し、斜張橋についてケーブル腐食が地震時にどのような影響を与えるのを明らかにするため、斜張橋モデルを対象に、地震に関して動的解析を行い、その応答を明らかにし、ケーブル腐食が斜張橋全体にどういった影響を与えるのかを

検討した。

2 斜張橋モデル

2.1 対象モデルの諸元

今回解析のためにデザインした斜張橋モデルを図 1 に示す。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、橋長は 540m である。

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 を用いており、ケーブルの引張強度は 1570MPa とした。ケーブルは左右 2 本の主塔から側径間にケーブルを 6 本ずつ（左：C1-C6）（右：C21-C26）、中央径間にケーブルを 7 本ずつ（左：C7-C13）（右：C14-C20）配置した。ケーブルの直径は配置位置により大きさを変えている。詳細を表 1 に示す。

2.2 数値解析モデル

主桁、主塔、ケーブルは全て梁要素でモデル化し、ファイバー分割している。主桁等の支点条件は図 1 に示す。

図 2 に数値解析モデルを示す。主桁は 2m につき 1 要素となるように部材軸方向に要素分割した。今回、ケーブルの振動を再現するため、2m につき 1 要素となるように要素分割をし、節点を設けた。ケーブルの両端部（桁部と主塔部の節点）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

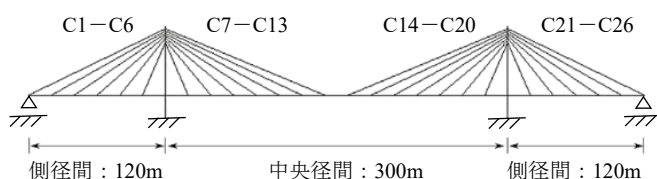
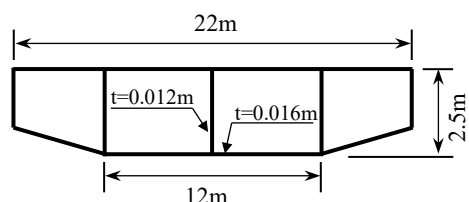


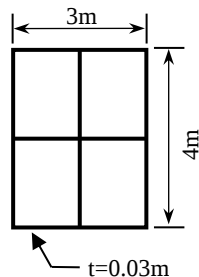
図 1 斜張橋モデル

表 1 ケーブルの直径

cable	C1	C2,C3	C4,C5	C6,C7	C8-C10	C11-C13
d(m)	0.150	0.127	0.125	0.085	0.121	0.124



(a) 主桁断面



(b) 主塔断面

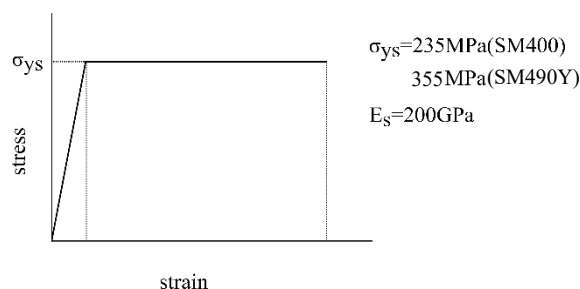
図 2 数値解析モデル

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。鋼板は板厚方向に 4 分割、幅方向は 1 辺が 4 分割となるようにしている。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 に各材料の応力-ひずみ関係を示す。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。

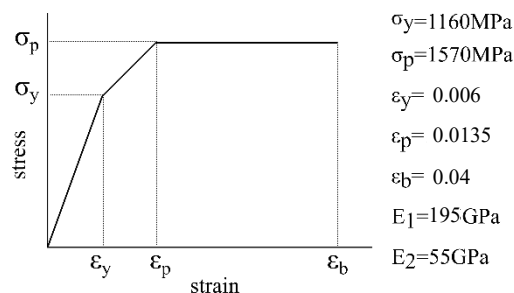
2.3 常時設計荷重

作成した 3D 斜張橋モデルを対象に、常時設計荷重により対象モデルに生じ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。常時設計荷重として与えた荷重を以下に示す。死荷重 (D) を与えるため、重力加速度 (9.8m/s^2) をモデル橋に与えた。鋼部材の密度は $7850(\text{kg/m}^3)$ とした。桁部分には鋼桁、地覆・高欄およびアスファルト舗装を考慮して $17506.6 (\text{kg/m}^3)$ の密度を与えた。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, 80kN/m) を载荷した。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と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[5]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载荷することとした。すなわち、集中荷重 p_1 (10kN/m^2) を長さ 10m および幅員 5m に作用させる。ただし、その他の部分は 5.0kN/m^2 とする。さらに分布荷重 p_2 (3.0kN/m^2) を幅員 5.5m に作用させる。ただし、その他の部分は 1.5kN/m^2 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作用させた。ケーブルの自重は、ケーブルに密度 (7850kg/m^3) を与え、重力加速度 (9.8m/s^2) を要素に载荷させることで再現した。

3 ケーブル腐食の再現



(a) 鋼材の応力-ひずみ関係



(b) ケーブルの応力-ひずみ

図 3 材料の応力-ひずみ関係

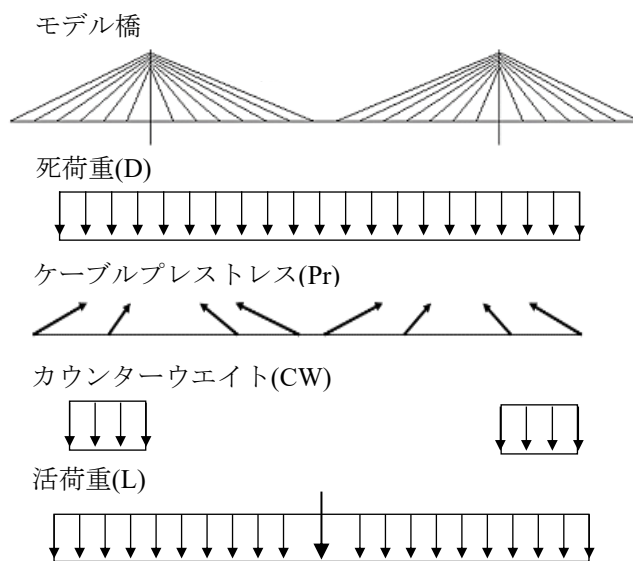


図 4 常時設計荷重

ケーブルを構成する亜鉛めっき鋼線は、健全時に 4.0% の伸びを有する。しかし、亜鉛めっき鋼線は腐食により鋼線の伸びが低下することが知られている。中村らによれば、腐食した亜鉛めっき鋼線の伸びは、健全時の半分程度まで低下する⁽⁴⁾。さらに、鋼線を束ねたケーブルでは鋼線間の接触による摩擦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⁽⁵⁾。

そこでこれらを踏まえ、ケーブルの応力-ひずみ関係における降伏応力および破断ひずみを減少させること

によりケーブル腐食をモデル化した。破断ひずみの減少に伴い、降伏応力も減少させている。ケーブル健全時および腐食時の応力ひずみ関係を図 5 に示す。

腐食時の降伏応力の減少率は 50%とした。破断強度 785MPa、破断ひずみは 0.007 とした。

実際の斜張橋のケーブルでは、多数のケーブルの一部に孔食等が発生し、弱点部となっている。しかし本研究では、全てのケーブルが平均的に同様の腐食を受けているものとし、全ケーブルに断面積の減少が生じている極端な状態を想定している。また今回、腐食はケーブルのみ、すなわち定着部やソケット部の腐食は考慮していない。

4 地震応答解析手法

本研究では作成した 3D 斜張橋モデルを対象に、ケーブル腐食を考慮して時刻歴応答解析を行い、モデル橋の応答を動的解析的に検討した。解析にはニューマーク β 法を用いており、係数 β 、 γ はそれぞれ $\beta=0.25$ 、 $\gamma=0.5$ とした。減衰定数は 0.005 をモデル全体に適用した。全体の解析時間は 280 秒、タイムステップは 0.01 秒とした。

本解析では、兵庫県神戸市中央区山手にて観測された兵庫県南部地震の加速度を変位に変換し、支点部（主桁両端および橋脚の基部）に強制変位として与えることで地震を再現した。最初に急激な荷重载荷によって、モデル橋が振動するのを防ぐために、設計荷重（D+L+CW+Pr）を十分長い時間をかけて载荷し、定常状態をしばらく保ちモデル橋が安定していることを確認する。今回、設計荷重を 200 秒かけて载荷し、50 秒かけて安定状態を確認した。その後、30 秒間の地震波を強制変位として与えた。地震波は橋軸に対して鉛直方向、直角方向、橋軸方向の 3 方向別々に与え、3 種類それぞれについて、モデル橋の応答を確認する。ケーブル健全時および腐食時の解析を行い、ケーブル腐食の

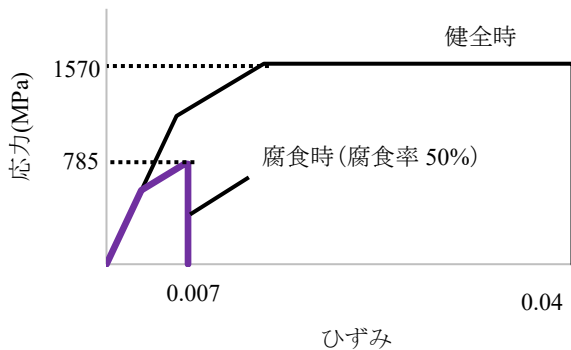


図 5 ケーブル腐食時の応力-ひずみ関係

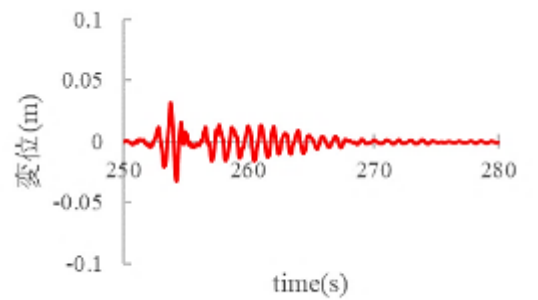
影響を検討する。鉛直方向には実際の兵庫県南部地震の鉛直方向のデータ（図 6(a)）、直角方向および橋軸方向には実際の兵庫県南部地震の南北方向のデータ（図 6(b)）を使用した。

5. 解析結果

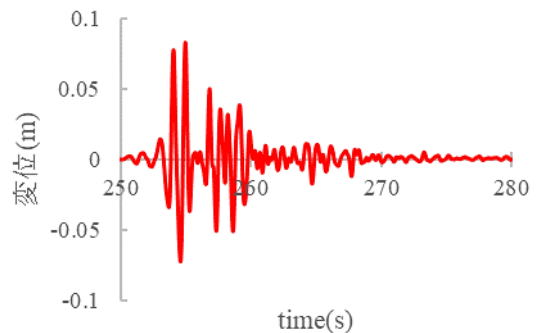
5.1 橋軸鉛直方向

橋軸に対して鉛直方向に地震波を入力し、動的解析を行った。健全時、腐食時についてそれぞれ解析を行い、結果を比較する。

図 7 に解析結果を示す。主桁スパン中央部の鉛直方向変位（図 7(a)）はモデルが安定状態になっているときの値を基準値としている。健全時は地震が作用してから 5s ほどして主桁が約 0.2m 上下運動している。腐食時は地震が作用してから 5 秒ほどして主桁が上下運動し、その後鉛直方向に変位が増加している。主塔頂点の橋軸方向変位（図 7(b)）を見てみると、腐食時は地震が作用してから 5 秒ほどして急激に増加している。腐食時の各ケーブルのひずみ（図 7(c)）に関しても、ほとんどのケーブルが塑性化している。このことから橋軸鉛直方向の地震応答について、ケーブル腐食の影響によって、ケーブルが塑性化し、主塔も大きく傾いてしまうことが確認できた。

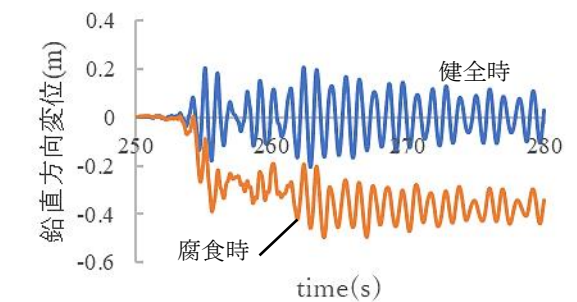


(a) 鉛直方向

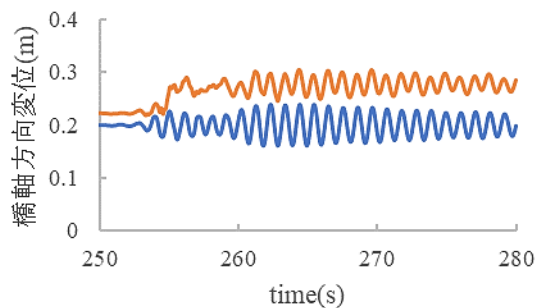


(b) 橋軸直角方向，橋軸方向

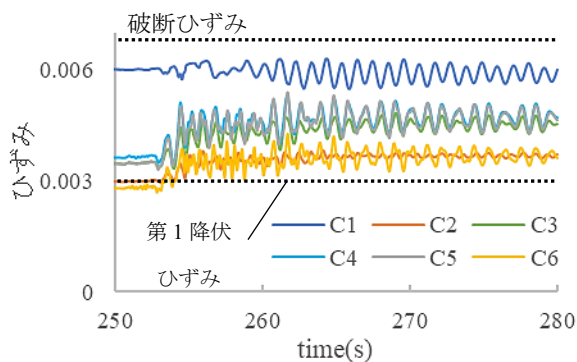
図 6 入力地震波



(a) 主桁スパン中央部・鉛直方向変位

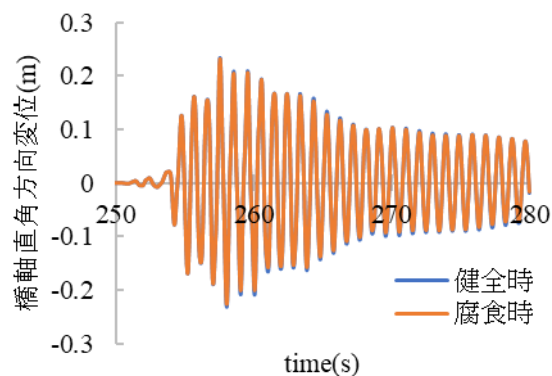


(b) 主塔頂点・橋軸方向変位

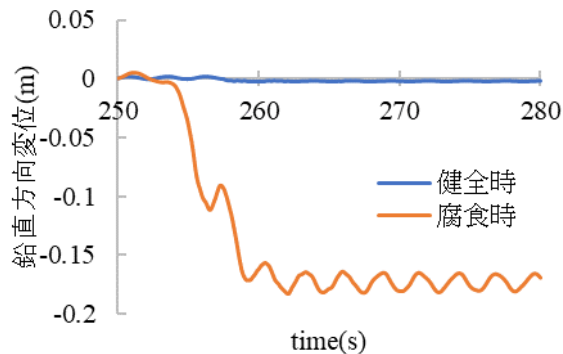


(d) 腐食時の側径間ケーブルのひずみ

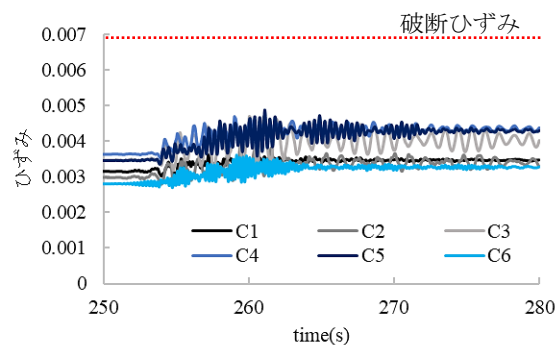
図 7 橋軸鉛直方向・解析結果



(a) 主桁スパン中央部・直角方向変位



(b) 主桁スパン中央部・鉛直方向変位



(c) 腐食時の側径間ケーブルひずみ

図 8 橋軸直角方向・解析結果

5.2 橋軸直角方向

橋軸に対して直角方向に地震波を入力し、動的解析を行った。健全時、腐食時についてそれぞれ解析を行い、結果を比較する。

図 8 に解析結果を示す。主桁スパン中央部の橋軸直角方向変位 (図 8(a)) について、健全時と腐食時では直角方向変位はおおよそ一致することがわかった。しかし、腐食時は桁が鉛直方向にたわんだのち、橋軸直角方向に振動していた (図 8(b))。そこで腐食時の側径間の各ケーブルのひずみ (図 8(c)) を見ると、ほとんどのケーブルが塑性化しており、ケーブル腐食の影響を確認した。橋軸直角方向の地震応答について、腐食はモデル橋の応答に影響を与えることが確認できた。

5.3 橋軸方向

橋軸方向に地震波を入力し、健全時、腐食時についてそれぞれ解析を行った。健全時の場合、各ケーブルのひずみは破断ひずみに到達することはなかった。しかし、腐食時は時刻 257.17 秒で C22 中央部付近のひずみが破断ひずみに到達した (図 9)。主塔頂点の橋軸方向変位 (図 10) を見ると、257.17 秒付近で中央に大きく傾いている。C22 は設計荷重段階での初期張力も大きいいため、地震による揺れによってケーブルが引っ張られ、ひずみが増加し破断ひずみに到達したと考える。その後、破断ひずみに到達した要素が塑性化したため、解析上で永遠に伸び続ける挙動を示してしまい、計算不可能とな

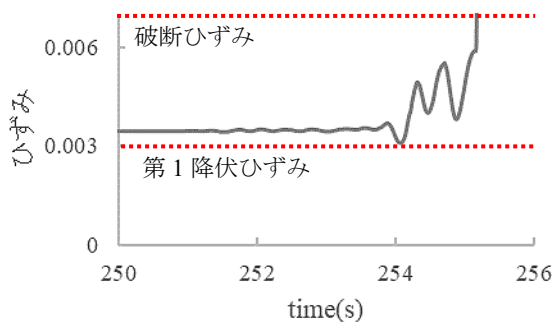


図 9 腐食時の C22 のひずみ

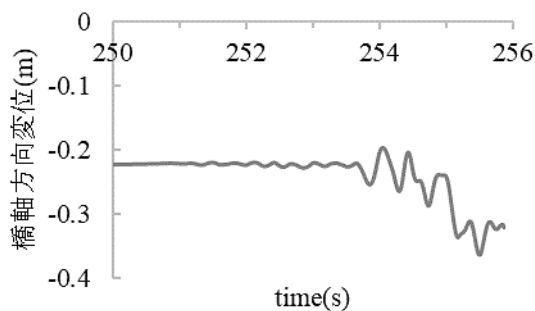


図 10 腐食時の主塔頂点の橋軸方向変位

り解析が終了してしまっただけで、そのため、ケーブル破断後のモデル橋全体の応答は確認できなかった。

6 応力踏襲法による地震応答解析

上述の問題から、ケーブル破断後の橋梁モデル全体の応答を明らかにするために解析を実施した。

6.1 解析手法

以下に本解析の解析手法を示す (図 11)。

Step1 : ケーブルが破断するまで同様の地震応答解析を

行う。ケーブルが破断し、解析が終了した時の、破断ケーブルの張力履歴を取得する。

Step2 : Step1 のモデルの設計荷重や境界条件はそのままとして、橋梁モデルから step1 で破断したケーブル要素を全て削除する。このモデルに先ほどの解析によって得た張力をケーブル定着部 (主桁部、主塔部) に引張力として載荷し、地震応答解析を実施する。

Step3 : 解析が、別のケーブル破断により終了したら step1 と step2 を繰り返す。これを地震波の作用が終了するあるいはモデル橋が崩壊するまで繰り返す。

6.2 解析結果

1 回目の解析で C22 が 255.17 秒で破断した後、2 回目の解析で C4 が 255.66 秒で破断した。その後 255.76 秒で C3, C5 とほぼ同時に破断し、255.84 秒で C6, C23 と同時に破断した。255.94 秒で C21, C24, C2 とほぼ同時に破断し、最後に 256.06 秒で両側径間のアンカーケーブル (C1, C26) が破断し、256.21 秒で主桁 C3 付近部に塑性ヒンジが形成され、モデル橋は崩壊した。ケーブル腐食時のモデル橋の崩壊過程を図 11 に、主桁 C3 付近部の応力履歴を図 12 に示す。

ケーブル腐食時、橋軸方向に地震が作用したことでケーブルが 1 本破断し、地震による荷重とケーブル破断による衝撃によって、隣接ケーブルが次々と連鎖的に破断していき、最終的にモデル橋が崩壊した。序盤に

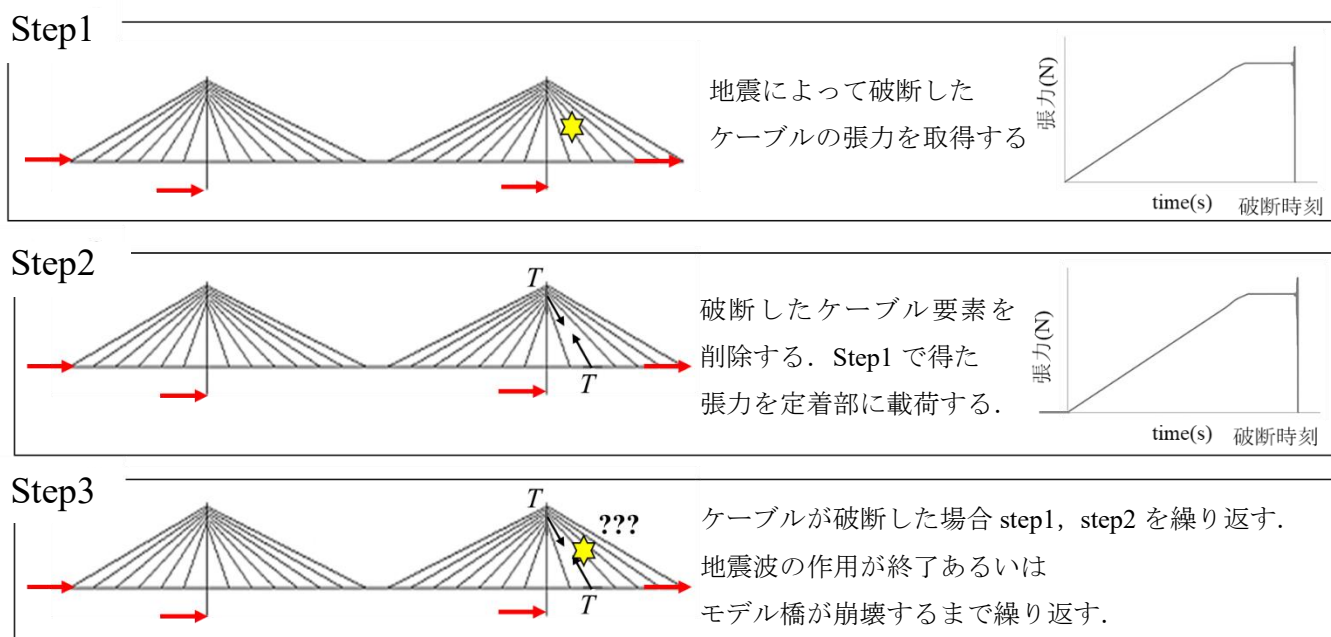


図 11 応力踏襲法・解析手法

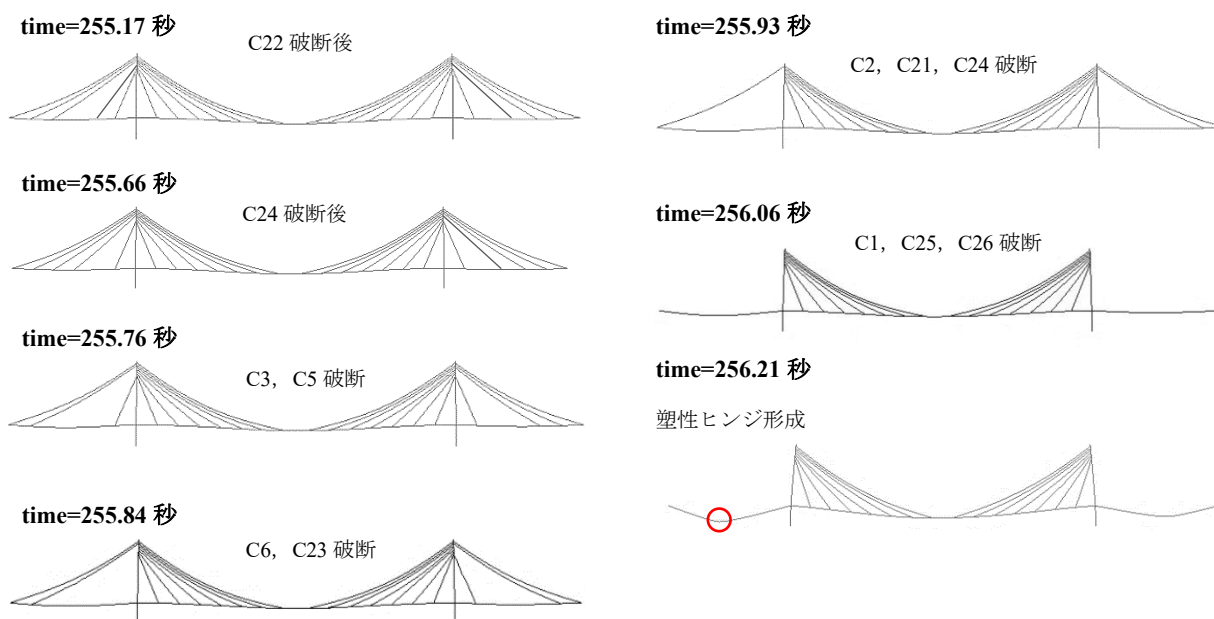


図 12 ケーブル腐食時のモデル橋の崩壊過程（橋軸方向地震作用時）

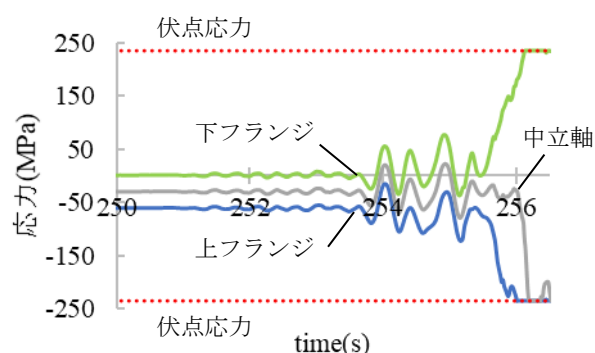


図 13 主桁 C3 付近部・応力履歴

破断するケーブルは地震による主塔頂点の変位と密接な関係があり、主塔が揺れることでケーブルに引張が生じ破断すると考える。しかし、ケーブルが徐々に破断していくと、ケーブル破断による衝撃によって隣接ケーブルが次々と破断していったと考える。

7 まとめ

今回、ケーブル腐食を破断ひずみの減少によって再現し、腐食を考慮した斜張橋を対象に地震を作用させ、動的解析を行った。以下に本研究によって得た知見を示す。

- 1) ケーブルを要素分割し、重量を考慮することでケーブルの振動をある程度再現することができた。
- 2) 地震作用時、ケーブル腐食の影響は橋梁全体の応答に影響を与える。
- 3) ケーブル腐食時に橋軸方向に地震が作用した場合、ケーブルは破断ひずみに到達する。

- 4) ケーブル腐食時に地震によってケーブルが破断した後、隣接ケーブルが次々と破断し、最終的にモデル橋は崩壊した。

今後の課題として、ケーブルのモデル化のさらなる検討、異なる斜張橋形式や異なる地震波での解析的検討が挙げられる。

参考文献

- (1) Shunichi Nakamura, Kazuhiro Miyachi: Ultimate Strength and Chain-Reaction Failure of Hangers in Tied-Arch Bridges, *SEI, No.1*, 136-146, 2020.2.
- (2) 中村俊一, 青木由香利: ケーブル腐食を考慮した斜張橋の終局強度および疲労寿命, 構造工学論文集 構造工学論文集A, Vol 67A (0), 1-13, 2021.
- (3) Y.Aoki, H.Tsunoda, H.Gotou, T.Akiyama, S.Nakamura, "Dynamic chain reaction analysis of cable-stayed bridge by sudden loss of stays considering cable corrosion.", *Proceedings in IALCCE2023 international conference, Milano, Italy, 2023.*
- (4) Shuichi Nakamura, and Keita Suzumura: Hydrogen Embrittlement and Corrosion Fatigue of Corroded Bridge Wires. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp.269-277, 2009.
- (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.