

部材特性のばらつきを考慮したゴム支承の劣化 に対するケーブルの設置対策効果の検討

栗野 翔太¹・五十嵐 晃²

¹ 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻修士課程（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail: kurino.shota.34z@st.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学防災研究所 教授（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

近年、橋梁のゴム支承に経年劣化に伴う損傷が確認されている。劣化に伴う性能低下や、性能の個体差および地震動規模などの不確実性を考慮すれば、ゴム支承の劣化により大地震に対する橋梁の安全性の低下が懸念される。ゴム支承の劣化に対する対策としては、部材性能のばらつきおよび地震動の不確実性を前提とした上で、橋梁の安全性を確保できるものが求められると考えられる。

本研究では、L2 地震動およびさらに大レベルの地震動に対するゴム支承が劣化した既設橋梁の安全性を確保する対策手法として、変位拘束ケーブル設置の効果を検討した。ゴム支承とケーブルの性能のばらつきを考慮した漸増動的解析にパラメータの選定や対策の有無による比較を行ったところ、桁変位の低減、ゴム支承と橋脚の限界状態発生抑制、桁変位および橋脚応答の変動係数低減の効果が期待できる結果が得られた。

Key Words: aged rubber bearing, cable, incremental dynamic analysis, Monte Carlo simulation

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震以降、長周期化や水平力分散によって橋梁の免震化を図るゴム支承が広く用いられている。しかし近年、経年劣化に伴うゴム支承の損傷が観察されている。外見の目視のみでは劣化したゴム支承の残存性能の定量的評価は困難であり、さらに性能の個体差があることから、実支承を取り出し試験を行う以外の方法では性能の把握が難しい。そのため、現状では劣化支承に対する効果的な対策方法が確立されておらず、経過観察中のものが多い。

劣化ゴム支承に対する性能確認試験¹⁾によると、経年劣化により「剛性の増加」、「減衰性能の低下」、「破断ひずみの低下」等の性能変化が生じ、また、それらの性能変化が橋梁の耐震性能に影響を与えることが検証²⁾されている。小野寺ら³⁾は免震支承の経年劣化に伴う力学的特性の変化および地震動特性が、免震支承—RC 橋脚系の地震応答に及ぼす影響を検討した。党ら⁴⁾は劣化ゴム支承の変形性能の確率分布推定を行い、変形能のばらつきを踏まえた橋梁構造の耐震性能を確率論的に評価した。

東北地方太平洋沖地震で破断したゴム支承に対する性

能試験⁵⁾によれば、ゴム支承は劣化しても L2 地震時の耐力は有している。しかし、部材の個体差を考慮すれば L2 地震動対策としての性能を満足しない個体も存在する可能性は否定できない。そのため、劣化ゴム支承の性能低下に対する対策を考える上では、その性能の個体差を考慮する必要がある。

一方、近年では南海トラフ地震のような、耐震設計で考えられる L2 地震動より強い地震動（以下、設計を超える地震動という）に対する危機耐性を確保し、そのような地震動が発生しても橋梁が安全性を失わない配慮の重要性が高まっている。劣化ゴム支承を用いた既設橋梁は、ゴム支承の性能低下に伴う応答増大やゴム支承の破断が発生しやすくなることにより、大地震時の落橋等の事象が生じる高いリスクを有している。ゴム支承の劣化に対する対策としては、L2 地震動に対する性能を満足させるだけではなく、設計を超える地震動を含む幅広いレベルの地震動に対して橋の安全性が確保できるものが求められていると考えられる。また、以前の設計基準で設計された橋梁の中には、現行の設計基準では既存不適格となるゴム支承も依然として存在する。こうしたゴム支承の地震時性能を検討する上でも、そうした対策の検討は有効であると考えられる。

本研究では、L2 地震動に対するゴム支承に劣化が生じた既設橋梁の耐震性能および設計を超える地震動に対する危機耐性を確保するための対策手法として、塑性化を許容する変位拘束ケーブル設置の効果を検討した。ゴム支承の劣化に伴う桁応答の増大やゴム支承破断による落橋等の事象を防止するため、桁変位拘束ケーブルの付加による対策に着目した。通常用いられている落橋防止ケーブルは、弾性域での挙動が仮定されるが、本研究では変位拘束ケーブルの塑性化を許容しており、設計時の必要ケーブル長や設置スペースの縮小による設計の優位性の向上を意図している。ここでは、ゴム支承と変位拘束ケーブルの性能のばらつきを考慮し、漸増動的解析⁹⁾に基づきゴム支承の劣化に対する変位拘束ケーブル設置対策の有効性を評価した。

2. 部材の特性

(1) ゴム支承の劣化

林ら¹⁰⁾は、17 年間供用され「ゴムのきれつ」および「鉛突出」等の損傷が見られた LRB（鉛プラグ入り積層ゴム支承）を対象に性能確認試験を行い、劣化により「剛性の増加」、「減衰性能の低下」、「破断ひずみの低下」等の性能変化が生じることを示した。剛性増加の主な要因は劣化に伴うゴムの硬化であり、橋梁の短周期化による応答増大が懸念される一方で、桁変位抑制の効果もあると考えられる。減衰性能低下の主な要因は鉛プラグの劣化および突出による鉛減少であると考えられ、また、破断ひずみ低下はゴム支承の変形性能の低下を意味する。これらの性能低下は、大地震時の橋脚や桁の応答増大につながる可能性がある。

ゴム支承の種類や支承の劣化損傷形態には複数の種別があるが、本研究では性能確認試験¹¹⁾で対象とした劣化 LRB に対する対策を検討する。

(2) 変位拘束ケーブル

変位拘束ケーブルは、引張に対する抵抗力により大地震時の桁変位を制限する制震部材であり、耐震補強対策として採用された例がある。

ゴム支承の劣化に対する対策としての変位拘束ケーブルの適用には、以下の効果を期待している。

- ① ケーブルの変位拘束機能によりゴム支承の応答を小さくする。劣化ゴム支承の性能低下の一つとして破断ひずみの低下があり、桁の変位拘束により L2 地震時のゴム支承の破断を抑制することができる。同時に、設計を超える地震時にゴム支承が仮に破断したとしても、残存するケーブルの変位拘束効果により、桁の過大変位を抑制し落橋等の

事態を防ぐことができる。

- ② ゴム支承の性能のばらつきに伴う応答の変動を低減する。降伏耐力等のケーブルの部材性能を決定するパラメータの変動は、ゴム支承のパラメータの変動よりも小さいことが期待できるため、ゴム支承の劣化に伴う特性のばらつきによる応答の変動を低減できる可能性がある。これは、応答予測計算の精度の観点で望ましいと考えられる。
- ③ 対策の実現可能性が高い。劣化支承に対する有効な対策として新品支承への取替が考えられるが、ケーブル部材の設置工法の方がゴム支承の取替工事よりも経済的となれば、実現可能性が高くなると考えられる。また、工事の簡便性から通行止めなどによる時間損失等の社会的損失も小さいと考えられる。

本解析では、上記のうち①、②に着目し、変位拘束ケーブルの設置が期待される効果を発揮するかどうかを検証する。

3. 解析モデル

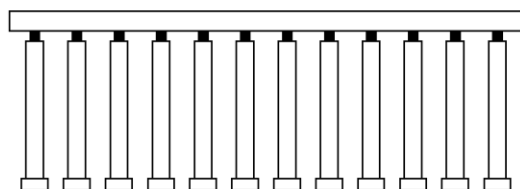
(1) 対象橋梁

対象橋梁は図-1 (a)に示す 11 径間連続桁橋であり、上部構造を支持している各橋脚上のゴム支承（LRB）が劣化対策の対象である。なお、上部構造は鋼鈑桁、下部工は単柱橋脚を仮定し、橋脚 1 本あたり 5 基のゴム支承が設置されているものとする。

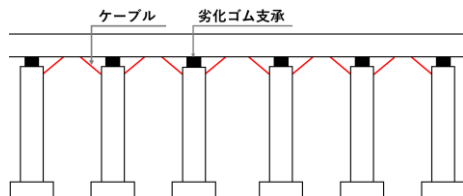
ケーブルを耐震補強対策として用いた例¹²⁾では、ケーブルを橋台および橋脚上の RC 定着壁に固定し、下部工の耐震補強が行われている。ここでは、ケーブルを図-1 (b)に示すように桁と橋脚を連結する形で各橋脚の橋軸方向両側に設置し、桁変位の拘束を行う。

なお、問題の単純化のため、初期のケーブルのプレストレスやサグは考慮せず、定着効率およびケーブルの応力伝達効率は 100%と仮定する。また、設置するケーブルの長さおよび本数は、全ての橋脚で同一とする。

ゴム支承、ケーブル、橋脚の各部材がそれぞれ同一の復元力特性を有し同一の挙動を示すものとして自由度を集約し、上部構造と橋脚天端の橋軸方向変位を 2 つの自由度とする 2 自由度系でモデル化した。



(a) 11 径間連続桁橋



(b) ケーブル設置イメージ

図-1 対象橋梁

(2) ゴム支承のモデル化

大地震時の挙動に着目するため、大変形時にゴム支承に生じるハードニングおよび破断を考慮したトリリニアモデルを用いた。なお、破断後にはゴム支承の水平方向の復元力がゼロになると仮定した。

力学試験結果⁹⁾を参考に設定した各パラメータの値を表-1に示す。なお、「桁落差」とは図-2のように「ゴム支承破断後に桁側のゴムと橋脚側のゴムが接しなくなり、上部工が支承による支持を失った状態」であり、ゴム支承破断後の過大变位により生じ得る状況として定義したものである。ゴム支承の破断後に橋軸方向のゴム支承の断面寸法に相当する上部構造の相対変位が生じたときに発生するものとした。

ゴム支承の性能のばらつきを考慮し、各パラメータの変動の確率分布を設定した。表-2に文献⁹⁾を参考に設定した変動係数を示す。なお、文献⁹⁾のデータには劣化、新品の区別がないため、劣化支承と新品支承で同一の変動係数の値を設定した。また、ハードニングひずみの変動は設定していない。

各パラメータがそれぞれ、表-1、表-2に記載した中央値と変動係数を持つ正規分布に従って確率的に変動するものとした。

表-1 LRB モデルのパラメータ (中央値)

	劣化支承	新品支承
初期剛性[kN/mm]	25.7	38.0
2次剛性比	0.0729	0.0400
3次剛性比	0.228	0.0826
切片荷重[kN]	40.8	78.5
ハードニングひずみ[%]	174	187
破断ひずみ[%]	274	329
「桁落差」発生ひずみ[%]	500	500
等価剛性[kN/mm]	2.23	2.06
等価減衰定数	0.066	0.137

表-2 LRB モデルのパラメータの変動係数

	劣化支承	新品支承
初期剛性	0.07	0.07
2次剛性	0.07	0.07
3次剛性	0.07	0.07
降伏荷重	0.18	0.18
破断ひずみ	0.11	0.11

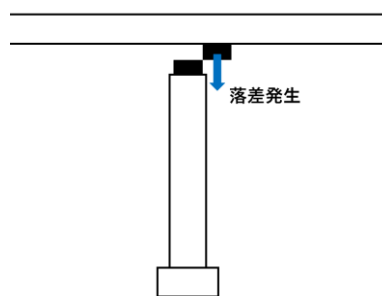


図-2 「桁落差」概念図

(3) 変位拘束ケーブルのモデル化

用いるケーブルは外径 12.7mm の PC 鋼より線とした。塑性変形時の実際の挙動を表現できるモデルとして、実験結果¹⁰⁾を参考に、図-3に示す 5 種類の剛性を持つペンタリニアモデルを作成した。各点のひずみと応力の値は表-3に示す通りである。ひずみが点 E に達し、破断が生じた後は一切復元力を持たなくなると仮定した。

ケーブルの性能のばらつきを考慮し、各点のひずみと応力の値に変動を設定した。表-4に、文献¹⁰⁾を参考に設定した変動係数を示す。表-2に示したゴム支承のパラメータの変動係数が 0.1 前後の値であるのに対し、ケーブルはそれを大きく下回っており、性能のばらつきが小さいことが確認できる。

なお、破断時応力のデータは記載されていないため、点 E の応力を点 D の 0.9 倍、分散を点 D と同じ値と仮定している。

ゴム支承と同様に、ケーブルの各パラメータがそれぞれ、表-3、4に記載した中央値と変動を持つ正規分布に従い確率的に変動すると仮定した。

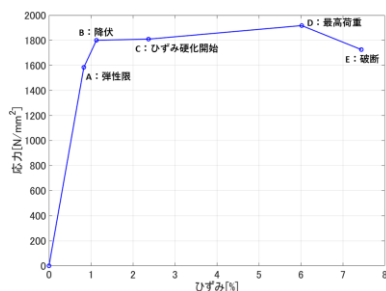


図-3 ケーブル1本の応力-ひずみ関係

表-3 ケーブル1本のパラメータ (中央値)

点	ひずみ[%]	応力[N/mm ²]
A (弾性限)	0.83	1584
B (降伏)	1.13	1800
C (ひずみ硬化開始)	2.37	1809
D (最高荷重)	6.02	1917
E (破断)	7.44	1725.3

表-4 ケーブル1本のパラメータの変動係数

点	ひずみ	応力
A (弾性限)	0.0434	0.0289
B (降伏)	0.0265	0.00672
C (ひずみ硬化開始)	0.0671	0.00647
D (最高荷重)	0.000714	0.00522
E (破断)	0.0390	0.00580

(4) 橋脚のモデル化

橋脚の水平復元力モデルには、非線形の Clough-パイリニアモデルを用いた。文献⁹⁾を参考にして設定した橋脚の諸元を表-5に示す。2次剛性比を0.05、除荷剛性算定用定数を0.2と設定した。

本解析では橋脚の性能のばらつきは考慮していない。ゴム支承の性能の変化およびばらつきに対して変位拘束ケーブルが与える影響に着目するため、ゴム支承とケーブルにのみ変動を考慮した。

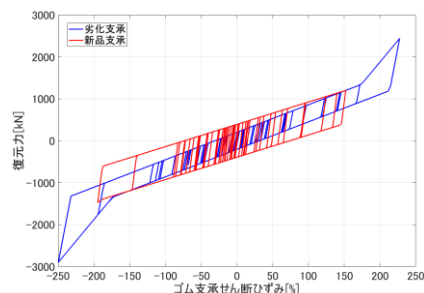
表-5 橋脚1本あたりの諸元

質量[ton]	415.8
初期剛性[kN/mm]	56.2
降伏耐力[kN]	2813
終局耐力[kN]	3953
許容塑性率	8.08
終局塑性率	11.6

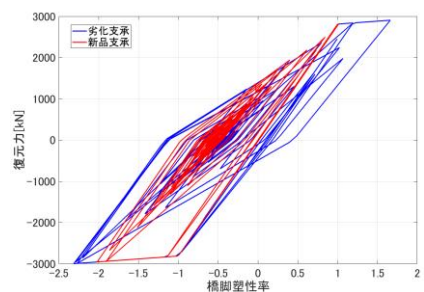
(5) ゴム支承の劣化が応答に与える影響

図-4は道路橋示方書¹⁰⁾のレベル2-タイプII-II種地盤条件の地震動波形(II-II-3)を入力したときのゴム支承5基分および橋脚の履歴復元力応答である。なお、

ゴム支承のパラメータ値には中央値を用いている。ゴム支承せん断ひずみ、橋脚塑性率ともに「劣化支承」のケースで応答が増大しており、ゴム支承の減衰性能の低下が影響していると考えられる。図-4(a)で「劣化支承」のケースで履歴ループが細くなっており、劣化に伴う減衰性能の低下が確認できる。



(a) ゴム支承せん断ひずみ



(b) 橋脚塑性率

図-4 II-II-3入力時の応答

4. 非線形動的解析

(1) 漸増動的解析 (IDA)

解析手法として漸増動的解析 (IDA) を用いた。漸増動的解析とは、入力地震動の振幅を漸増させて時刻歴応答解析を行い、入力的大小と応答の関係を評価する手法である。

ここでは、IDA 曲線と fragility curves を作成し、変位拘束ケーブルの対策効果を検討する。

IDA 曲線とは、入力振幅と着目する部材の最大応答値の関係を表すグラフである。振幅の小さい入力波から順次、時刻歴応答解析により各部材の最大応答値を求め、横軸を最大応答値、縦軸を振幅としてプロットする。L2 地震動および設計を超える地震動に対応する入力振幅における部材の最大応答値を比較することで、ケーブル付加による応答低減効果を評価する。

fragility curves は、入力振幅と各部材の応答が限界状態を超過する確率の関係を表すグラフである。ゴム支承破断や橋脚終局など各部材における限界状態に達す

る応答値を設定し、各入力振幅においてその値を超過した確率を縦軸に取り、横軸に入力振幅を取ったグラフを作成する。例えば、設計を超える地震動に対応する入力振幅における限界状態発生確率に着目することで、変位拘束ケーブル付加による耐震性能の向上効果を評価できる。

(2) 解析条件

地震動の強さを表す指標としては PGA や PGV、SI 値などがあるが、ここでは PGA を用いて入力地震動の振幅を定義した。入力地震動は道路橋示方書のレベル 2 タイプ II－II 種地盤条件の 3 波を用いた。

数値積分法は Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用い、積分間隔は 0.01 秒とした。減衰はレイリー減衰を仮定し、各部材の減衰定数として橋脚には 2%、免震支承とケーブルには 0%を設定した。

ここでは変位拘束ケーブルの設置パラメータを 3 ケース考え、表-6 に示す計 5 ケースの解析を行った。「○m ○本」とは、橋脚 1 本の片側に設置されている変位拘束ケーブルの長さと本数を示しており、全ての橋脚の橋軸方向の両側に対称に同数設置される。なお、各ケーブルが破断ひずみ 7.44%に達したときの変位をゴム支承せん断ひずみに換算すると、3m のケーブルでは 318%、7m のケーブルでは 744%、11m のケーブルでは 1169%に相当する。

各パラメータ値の 1 つの組み合わせを 1 セットとして、表-1～4 に示した中央値と変動を持つ正規乱数を用いて 1000 セット作成し、モンテカルロシミュレーションを行った。1 種類の入力地震動につき 1000 セットのパラメータの組み合わせに対する解析を行い、得られる計 3000 個の応答を用いて検討を行った。

解析では橋脚 1 本の挙動に着目し、橋脚に設置されているゴム支承 5 基および全てのケーブルは、それぞれの部材で性能が同一であると仮定した。例えば、5 基のゴム支承はそれぞれ同一の破断ひずみや剛性を有するものとした。

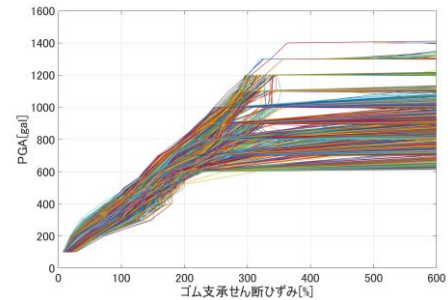
表-6 解析ケース

ケース名	ゴム支承	ケーブル
「3m 3 本」	劣化	3m を 3 本設置
「7m 7 本」	劣化	7m を 7 本設置
「11m 11 本」	劣化	11m を 11 本設置
「劣化支承のみ」	劣化	—
「新品支承のみ」	新品	—

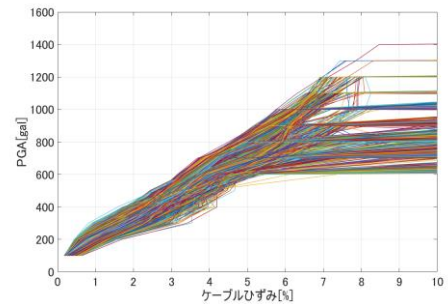
5. 解析結果

(1) IDA 曲線

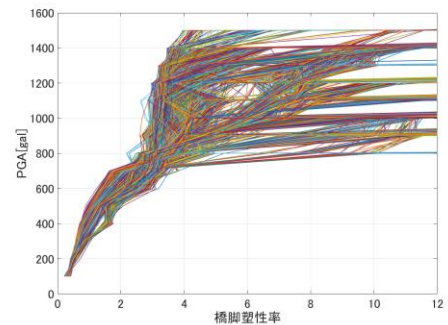
3 種類の入力地震動と 1000 セットの部材パラメータに対するゴム支承せん断ひずみ、ケーブルひずみ、橋脚塑性率の IDA 曲線を図-5 に示す。ここでは「3m 3 本」のケースの結果を例として掲載している。入力地震動および部材特性のばらつきにより、各 PGA における応答値には変動が見られる。



(a) ギュム支承せん断ひずみ



(b) ケーブルひずみ



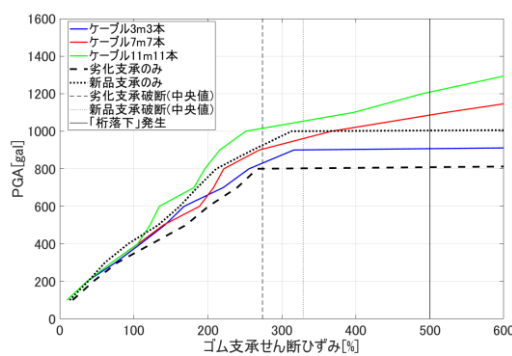
(c) 橋脚塑性率

図-5 IDA 曲線（「3m 3 本」のケース）

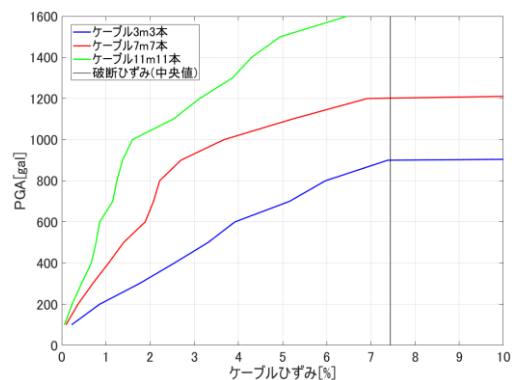
ゴム支承せん断ひずみについて、600 gal から 1400 gal の範囲で応答が急増するケースが含まれている。これは、ゴム支承とケーブルの両方に破断が生じたケースであると考えられ、上部構造の変位に抵抗する復元力が失われ、過大変位が生じることが原因である。また、この状況が発生する PGA に差異があるが、これは破断ひずみのば

らつきやケーブル残存の有無などが影響しており、これらの部材の破断の有無は橋脚の応答にも影響すると考えられる。変位拘束ケーブルを付加したケースのうち特に「3m 3 本」のケースではゴム支承破断時の変位とケーブル破断時の変位の差が小さいため、両方に破断が発生するケースが多くなると考えられる。

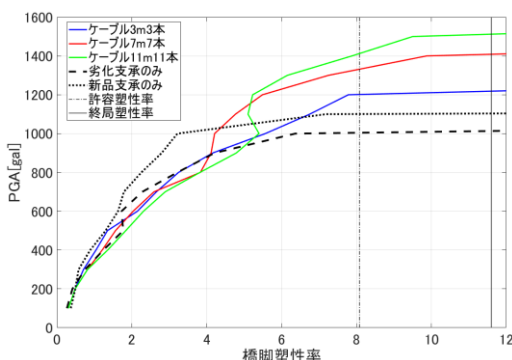
また、各 PGA における 3000 個の応答の中央値をプロットしたものを平均 IDA 曲線と定義し、図-6 にゴム支承せん断ひずみ、ケーブルひずみ、橋脚塑性率の平均 IDA 曲線を示す。各 PGA において、地震動と部材パラメータの組み合わせにより前述のように応答が極端に大きくなるケースが含まれることがあり、その影響を取り除くために、算術平均ではなく中央値を採用した。



(a) ゴム支承せん断ひずみ



(b) ケーブルひずみ



(c) 橋脚塑性率

図-6 平均 IDA 曲線

a) ゴム支承せん断ひずみ

入力地震動 3 波の PGA を参考に、L2 地震動の基準振幅として 700 gal 付近に着目すると、「劣化支承のみ」のケースで最も応答が大きく、変位拘束ケーブルの付加により応答が低減されていることが確認できる。特に「11m 11 本」のケースで応答低減効果が大きい。これは図-6 (b)に示すようにケーブル長が長いほどケーブルの塑性変形が小さく、弾性的な変位拘束の効果が大きくなることによるものと考えられる。

さらに大きな PGA の範囲では、変位拘束ケーブルの付加により「桁落差」の発生が抑制されていることが確認できる。「劣化支承のみ」のケースでは 900 gal でゴム支承の破断が発生し、さらに「桁落差」に至るが、「7m 7 本」および「11m 11 本」のケースではゴム支承破断ひずみを超えても「桁落差」発生には至らず、ゴム支承破断後におけるケーブルによる過大变位抑制効果が確認できる。「3m 3 本」のケースでこの効果が見られないのは、ケーブルの破断時変位が劣化ゴム支承と大差なく、ゴム支承とともに破断しやすいことによるものと考えられる。このことから、ゴム支承破断後の過大变位抑制効果を期待するのであれば、ケーブルの破断時変位をゴム支承より十分大きくする必要があると言える。

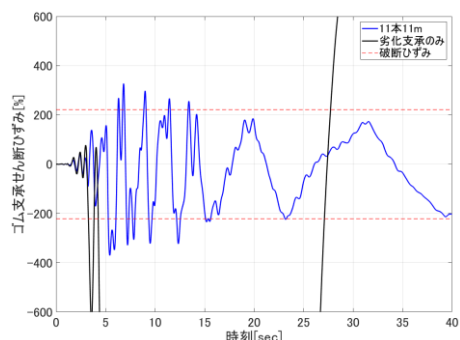
b) 橋脚塑性率

700 gal 付近では、「新品支承のみ」のケースで最も応答が小さく、変位拘束ケーブルの付加により「劣化支承のみ」のケースより応答が増大していることが確認できる。これはケーブル付加により上部構造から橋脚に作用する荷重が増大したためであり、特に「11m 11 本」のケースで橋脚塑性率が大きくなるのは、本数増加に伴いケーブル全体の持つ復元力が大きくなるためであると考えられる。なお、各部材の初期剛性を用いて求めた橋梁全体の 1 次固有周期は、「劣化支承のみ」のケースで 0.828 秒、「11m 11 本」のケースで 0.820 秒であることから、変位拘束ケーブルの付加による短周期化の影響は小さいものと考えられる。

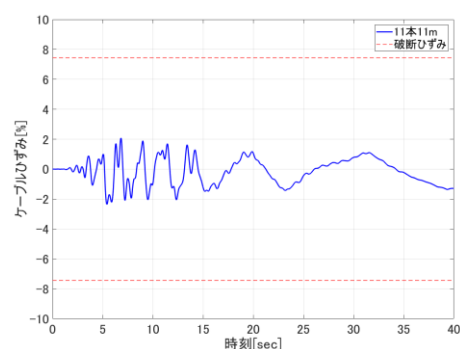
ケーブル張力により橋脚への負担は増大するものの、本解析での設定では橋脚の応答塑性率は 4 を下回る程度であり、許容値を十分に満たす範囲に収まる結果となっている。

さらに大きな PGA の範囲では、変位拘束ケーブルの付加により橋脚が終局状態を迎える可能性を低減できることが確認できる。「劣化支承のみ」のケースでは 1100 gal で終局状態を迎える一方で、「11m 11 本」のケースでは 1600 gal まで終局状態に達していない。これは、ゴム支承破断後にもケーブルが破断していない状況では、橋脚の弾塑性地震応答が低減する効果が得られることを示すと考えられる。図-7 に 1300 gal における応答時刻歴

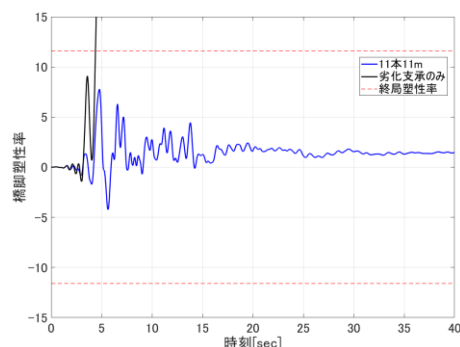
の一例を示す。「劣化支承のみ」のケースではゴム支承の破断が生じた後、主に橋脚自身の地震応答により橋脚は終局を迎える。その一方で「11m11本」のケースでは、同様にゴム支承の破断が生じるものの、残存するケーブルが橋脚に作用する地震力と逆方向の抵抗力を生じることにより、橋脚の応答を抑えていることが確認できる。



(a) ゴム支承せん断ひずみ



(b) ケーブルひずみ



(c) 橋脚塑性率

図-7 応答時刻歴の一例 (1300 gal)

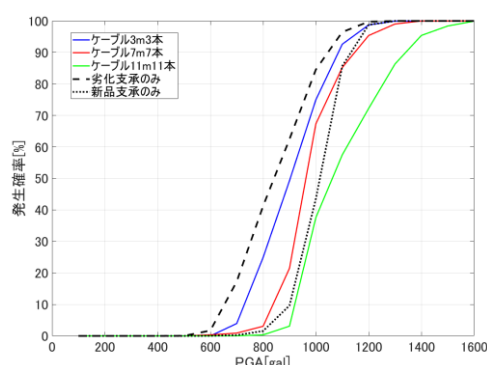
図-6(c)より、ケーブル設置ケースのうち「11m11本」のケースで最も橋脚の終局状態の抑制効果が大きく現れていることが確認できるが、これはケーブル長が長く設計を超える地震時にもケーブルが残存しやすいことや、本数が多いためケーブル全体の抵抗力が大きくなることの結果と考えられる。

以上の結果より、変位拘束ケーブルは、L2 地震時に上部構造の変位応答を低減し、さらに設計を超える地震時にはゴム支承破断後の過大变位を抑制し、さらに橋脚

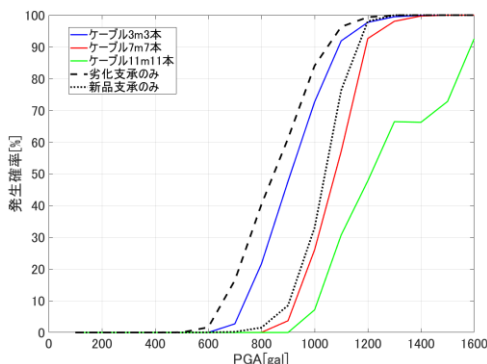
の終局状態を迎える可能性を低減する効果を持つことが分かった。L2 地震時に対する橋脚塑性率がやや増大する可能性を許容する必要があるが、本解析で対象とした橋梁の場合、変位拘束ケーブルの付加により橋脚塑性率が許容値を超えない結果となっており、本対策は適用可能であると考えられる。

(2) フラジリティカーブ

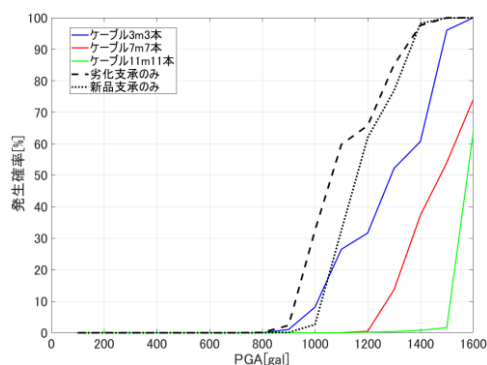
ゴム支承せん断ひずみが破断ひずみに達した状態、「桁落差」発生ひずみに達した状態、橋脚塑性率が終局塑性率に達した状態のそれぞれについて、フラジリティカーブを作成した。各 PGA において限界状態を超えたケース数の全体数に対する割合をプロットしたものを、図-8に示す。



(a) ゴム支承破断



(b) 「桁落差」



(c) 橋脚終局

図-8 フラジリティカーブ

ゴム支承と橋脚ともにケーブル付加により限界状態に至る危険度が低減されていることが確認できる。ゴム支承のみのケースでは、ゴム支承が破断した後に「桁落差」が発生しやすいのに対し、ケーブルを付加したケースではゴム支承破断後の「桁落差」発生が抑制されている。特に「11m11本」のケースでその効果が大きく、また、橋脚が終局状態に至る危険度も最も低減できていることから、検討したケーブルのパラメータ設定の中では「11m11本」のケースが最適であると言え、ケーブルの本数と長さを大きくするほど効果的な傾向が見られる。

(3) 応答の変動係数

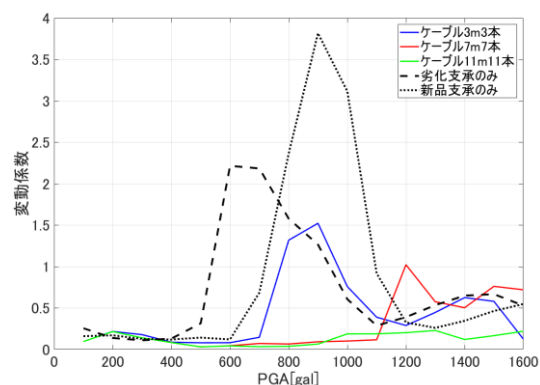
ゴム支承せん断ひずみと橋脚塑性率の変動係数をPGAごとにプロットした結果を図-9に示す。入力波形はⅡ-Ⅱ-3を用いた場合の結果を示している。ここでは、ゴム支承とケーブルの部材特性が応答に与える影響の傾向に着目した検討を行う。

a) ゴム支承せん断ひずみ

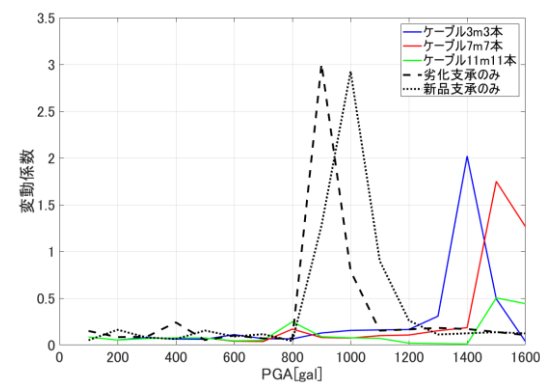
図-9 (a)で、「劣化支承のみ」のケースでは 600 gal、「新品支承のみ」のケースでは 800 gal でせん断ひずみ最大応答の変動係数が急増し、1を超えている。図-8 (a)においてゴム支承の破断が見られる地震動振幅と一致することから、ゴム支承が破断したケースと、破断していないケースが混在しているために変動係数が大きくなったと考えられる。変位拘束ケーブルを付加したケースで、変動係数が急増する地震動振幅がより大きなPGA側にシフトし、さらにピーク値も小さくなるのは、ケーブルによる変位拘束の効果のためゴム支承の破断が生じにくくなり、さらにゴム支承破断後の過大变位が抑制されるためであると考えられる。

耐震設計ではゴム支承の破断を許容しないことを前提とするため、ゴム支承が破断しない範囲での応答の変動係数が耐震性能に対応する。図-10に、100～900 galの範囲での各PGAにおける変動係数を示す。

図-10 (a)において、400 gal以上のPGAで変位拘束ケーブルの付加によりせん断ひずみ最大応答の変動係数が小さくなることを確認できる。これは、変位拘束ケーブルの付加により、ゴム支承とケーブルからなる復元力要素の剛性のばらつきが結果的に小さくなることが影響していると考えられる。すなわち、表-4に示すように、ケーブルのパラメータの変動係数はゴム支承と比較して小さく、さらにケーブル付加により復元力要素全体（ゴム支承＋ケーブル）の剛性の平均値が増大するため、平均値に対する相対的なばらつきが小さくなり、上部構造の応答変位のばらつきも低減する結果が得られたと考えられる。200 gal付近のPGAでは変位拘束ケーブルの付加により変動係数が大きくなるものの、L2地震動に対する

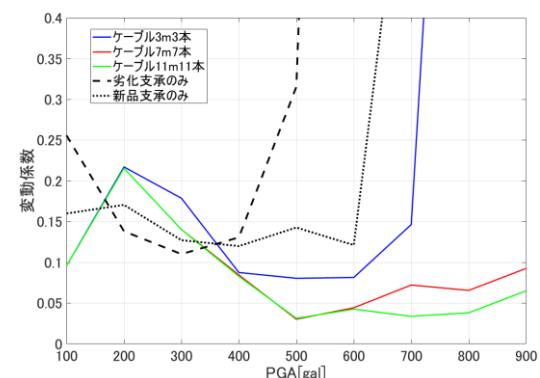


(a) ゴム支承せん断ひずみ

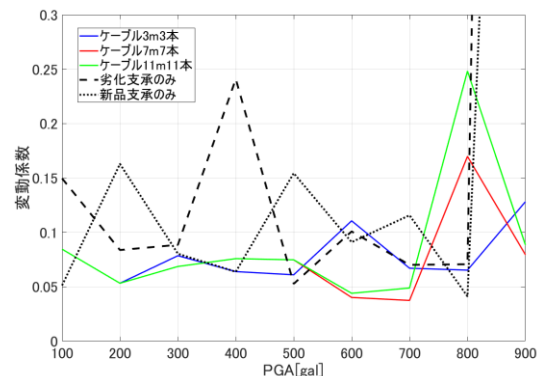


(b) 橋脚塑性率

図-9 応答の変動係数（～1600 gal）



(a) ゴム支承せん断ひずみ



(b) 橋脚塑性率

図-10 応答の変動係数（～900 gal）

耐震性能を考える上では影響は少ないと考えられる。

ケーブル長が短いケースで変動係数の低減効果が小さくなる傾向があるが、これはケーブル長が短いほどケーブルの塑性応答が卓越しやすいことが影響していると考えられる。前述のゴム支承破断による変動係数の急増のように、部材の状態変化が応答の変動係数を増大させる。そのため、応答の変動係数低減に着目する場合は、ケーブルを可能な限り弾性範囲内で挙動させる方が有利であると考えられる。

b) 橋脚塑性率

図-9 (b)において、ゴム支承せん断ひずみと同様に、橋脚が終局状態に至る地震動振幅で変動係数が急増している。

図-10 (b)においては、変位拘束ケーブルの付加により変動係数が低減する傾向が見られる。これは、復元力要素の剛性変動の低減に伴い、上部構造から橋脚に作用する荷重のばらつきも低減されたためであると考えられる。本解析では橋脚パラメータのばらつきは考慮していないため、「劣化支承のみ」と比較して変動係数が小さくなるのは、ケーブル付加による効果であると言える。

800 gal において、「7m7本」および「11m11本」のケースで変動係数が急増しているが、これはゴム支承のハードニングが生じるケースと生じないケースが混在することによる影響であると考えられる。すなわち、ハードニングが生じるケースで橋脚にかかる伝達力が急増するため、伝達力の変動増大に伴い応答塑性率のばらつきが大きくなったと考えられる。

6. まとめ

本研究では、ゴム支承の劣化に伴う橋梁の耐震性能低下に対する対策手法として、変位拘束ケーブルの設置効果を、ゴム支承とケーブルの性能のばらつきを考慮した漸増動的解析により検討した。

L2 地震に対応する入力地震動の PGA が 700 gal 付近の場合の応答に着目した場合、ケーブルの変位拘束効果により上部構造の変位応答が低減され、さらにゴム支承破断の発生を抑制できることが分かった。ただし、上部構造から伝達される荷重の増加に伴い橋脚塑性率が増大するため、橋脚への負担の増大を許容できる条件で適用が可能であると考えられる。

さらに大きなレベルの地震動においては、ゴム支承と橋脚の両者ともに、変位拘束ケーブルの付加により限界状態に至る危険度を低減できることが分かった。ゴム支承の破断発生後は、変位拘束ケーブルにより上部構造の過大变位を抑制することで桁の落下等の事象の可能性

が低減され、また、ゴム支承破断後に橋脚に作用する地震力に対する、残存するケーブルの抵抗力の効果により、橋脚が終局状態に達する危険度も低減できる。

ゴム支承と橋脚の応答の変動係数について、ゴム支承の破断が生じるまでの範囲に着目した場合、変位拘束ケーブルの付加により変動が小さくなる傾向が見られた。これは、ケーブルのパラメータの変動係数がゴム支承と比較して小さく、復元力要素全体（ゴム支承＋ケーブル）の剛性の平均値に対する相対的なばらつきが小さくなることが影響していると考えられる。

本解析で検討した変位拘束ケーブルのパラメータ設定では、各部材の応答値とその変動係数の低減および限界状態に至る危険度の低減の観点から「11m11本」のケースが最適であると考えられ、ケーブルの本数と長さを増加させるほど効果的な傾向が見られた。ただし、ケーブル長を過大に設定すれば設置スペースを占有するため実装に不利となる可能性があり、また、本数を過大にすると橋脚に作用する荷重が増大し橋脚への負担が過大になることが考えられる。

謝辞：本研究の実施に際して有益な助言および情報をいただいた、宇野裕恵博士（オイレス工業株式会社）および榊一平氏（神鋼鋼線工業株式会社）に謝意を表する。

参考文献

- 1) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，八ツ元仁，五十嵐晃，党紀，東出知大：経年劣化した鉛プラグ入り積層ゴム支承の残存性能に関する実験的検証，土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, 1_1032-1_1042, 2014.
- 2) 党紀，東出知大，五十嵐晃，足立幸郎，林訓裕：ゴム支承（LRB）の経年劣化が橋梁構造の耐震性能に及ぼす影響に関する解析的研究，土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, 1_713-1_724, 2015.
- 3) 小野寺周，松崎裕，鈴木基行：免震支承の経年劣化が免震支承－RC 橋脚系の地震応答に及ぼす影響，土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, 1_737-1_748, 2015.
- 4) 党紀，佐藤拓，五十嵐晃，林訓裕，足立幸郎：ベイズ確率推定と漸増動的解析（IDA）による経年劣化支承（リング沓）の耐震性能評価，土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4, 1_542-1_554, 2016.
- 5) 曾田信雄，山田金喜，木水隆夫，広瀬剛，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験，構造工学論文集，Vol.59A, pp.516-526, 2013.
- 6) D. Vamvatsikos and C. A. Cornell：Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, Issue 3, pp.491-514, 2002.
- 7) 橋本晃，中原晋，江崎守，板谷英克：PC 鋼材で耐震補強された名取 1 号橋における調査報告－PC&PA 工法による下部工の耐震補強－，プレストレストコンクリート，Vol.57, No.2, pp.92-97, 2015.
- 8) 林訓裕：長期間供用により経年劣化した道路橋免震

- ゴム支承の耐震性能評価に関する研究，京都大学学位論文，2016.
- 9) 足立幸郎：激振動下における免震橋梁構造の信頼性評価と限界状態設計法に関する研究，京都大学学位論文，2002.
- 10) 日本建築学会：コンクリート構造（PC，PRC）部材の靱性設計手法と耐震架構への応用，日本建築学会構造委員会，プレストレストコンクリート構造運営委員会，終局限界変形・変位小委員会，1997.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書耐震設計編V，2012.

EFFECTIVENESS ASSESSMENT OF RESTRAINING CABLE APPLICATION TO BRIDGES WITH DETERIORATED RUBBER BEARINGS CONSIDERING CHARACTERISTICS UNCERTAINTY

Shota KURINO and Akira IGARASHI

Recently, damage due to aging deterioration is observed in aged rubber bearings used in highway bridges. Effect of such deterioration of rubber bearings on the seismic safety of the bridges is of great concern considering uncertainty due to the individual difference of their performance and the level of earthquake ground motions. Countermeasures against the above problem are required to ensure that the safety of the bridge is not impaired on the premise of a range of variations in the involving factors.

In this study, the effectiveness of application of restraining cables to existing bridges with aged rubber bearings is assessed as a measure to ensure bridge safety against not only level 2 (MCE) earthquakes but also ground motions exceeding the design level. To assess its effectiveness, the Incremental Dynamic Analysis is conducted considering variation in the characteristics of the rubber bearings and cables. The analysis showed that the restraining cable application is effective in reducing the girder displacement, mitigating the possibility of the failure of the bearings and the piers, and reducing variations in the structural response.