論文　地震に伴う構造物の振動特性変化が地震リスクに及ぼす影響評価

久保　大樹[1]・坂井　公俊[2]

[1]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　鉄道地震工学研究センター　地震応答制御

（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail: kubo.hiroki.38@rtri.or.jp

[2]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　鉄道地震工学研究センター　地震応答制御
E-mail: kimitoshi.sakai.36@rtri.or.jp (Corresponding Author)

地震によって損傷した構造物の補修優先度の判定や運行再開判断への活用を目的として，損傷に伴う構造物の振動特性の変化が地震による損傷の発生リスクに与える影響を解析的に検討した．具体的には，多数の時刻歴波形を用いた動的解析を実施することで，構造物本体の損傷の発生確率と車両の走行性に関するリスクを評価するとともに，構造物の振動特性が変化した条件においても同様の検討を実施し，両者の比較を行った．その結果，今回対象とした地盤条件，構造物条件においては，構造物の固有周期の増大に伴い，損傷の発生リスクは増大する一方で，車両の走行性に与える影響は小さいという結果が得られた．

Key Words: *seismic risk, vibration properties, seismic damage of structure, running safety, railway viaduct*

1. はじめに

地震に対する鉄道の安全性向上は，依然として重要な課題である．耐震設計技術の高度化や既設構造物に対する耐震補強といった地震前の対策は元より，地震後の早期運行再開に対する社会からの要請もますます強くなっている．ここで，地震により土木構造物に損傷が発生した場合の補修の優先順位付けや運行再開の判断は，過去の地震等の経験に基づいて行われる場合が多いと考えられる．しかし，将来的な生産年齢人口の減少や技術伝承等の課題，大規模地震発生後の機能回復のさらなる効率化等を考えると，経験に基づく判断を何らかの定量的な指標に置き換えて評価できることが望ましい．この時に，リスクベースでの議論は定量化する際の一つの指標になり得ると考えられる．

リスクによる評価という観点では，確率論的地震危険度解析や津波の発生確率評価など，作用の観点での評価が以前から活発に行われている[例えば 1)]．また筆者らは地震危険度解析の結果に基づいて，確率を有する多数の時刻歴波形（生起確率付地震動群）を評価する手法を提案[2)]しており，これを用いた多数の動的解析を行うことで構造物損傷等の発生確率を把握することも可能となってる．この手順に従って構造物の損傷等の発生確率を地震発生前後の状態において評価し比較することで，地震後の的確かつ迅速な対応を行う際の有用な情報になることが期待される．

そこで本検討では，一般的な鉄道 RC ラーメン高架橋を対象に多数の動的解析を実施することで，地震前後の状態を仮定した条件における構造物損傷等の発生リスクを評価するとともに，地震による損傷がリスクの変化に与える影響について考察を行う．

2. 検討の条件

(1) 地震リスクの整理，検討の手順

本検討では，一般的な形状を有する RC ラーメン高架橋を対象とした多数の動的解析を行うことで，損傷に伴う構造物の振動特性の変化が地震リスクの変化に与える影響を定量的に評価する．本検討における地震リスクは，構造物の損傷の発生確率と車両の走行性に関するリスクの 2 つを取り扱う．構造物の損傷は，地震に伴う応答変位から評価[3)]する．また車両の走行性については，構造物天端位置の絶対速度最大値との相関が高いことが示さ

れている [4]ため，これを指標として用いる．車両の走行性については構造物間の角折れ・目違いの影響も大きいが，本検討ではこの影響は無視することとする．また，地震の発生リスクは評価を行う期間によって変化するが，今回は一般的な構造物の設計耐用期間である 100 年間を指標として評価を行う．

この条件において，まず健全な状態での構造物の損傷，車両の走行性に関するリスクを評価する．続いて大規模地震の発生に伴って構造物に損傷が発生した場合を想定し，構造物の振動特性が変化した条件でリスクを算定する．これを健全な状態でのリスクと比較することで，損傷に伴う構造物の振動特性の変化が地震リスクの変化に与える影響を確認する．

(2) 対象構造物

対象構造物は2層RCラーメン高架橋（**図-1**）とした．

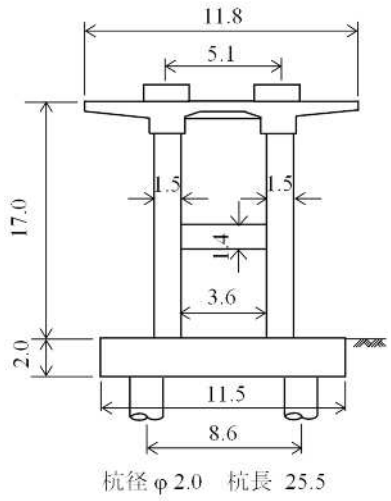


図-1　対象構造物の概略形状（単位 m）

表-1　地盤条件

上面深度 (m)	土質区分	平均 N値	単位体積重量 (kN/m^3)
0.00	粘性土	1	16
3.63	砂質土	5	18
5.68	砂質土	15	18
6.88	粘性土	3	17
8.73	砂質土	8	18
9.43	粘性土	4	17
12.53	砂質土	10	18
14.73	粘性土	7	19
18.73	砂質土	9	18
19.63	粘性土	8	19
20.73	砂礫土	39	18
23.10	砂礫土	42	18

構造物高さは 17.0m，杭は杭長 25.5m の場所打ち杭であり，柱断面は 1.5m×1.5m である．検討方向は線路直角方向を対象とする．当該地点の地盤条件を**表-1** に示すが，表層地盤の地盤の固有周期は T_g=0.83s であり，「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」[3]（以下，耐震標準）に示される G5 地盤に相当する．なお，本検討では地盤液状化の影響は考慮しない．

解析モデルは，梁要素とばね要素に質点を加えた質点系モデルによって構築することとし，初期剛性や非線形特性等は基本的に耐震標準に則って設定している．

この構造物の解析モデルを対象に，プッシュオーバー解析を実施することで基本的な特性を把握した．得られた荷重－変位曲線を**図-2** に示す．この図には各損傷状態に至る点も○印で示しているが，初降伏となる変位 δ_y（108mm），最大断面力の発生時点 δ_m（396mm），降伏耐力を維持できる最大変位 δ_n（453mm）が得られた．また，耐震標準に示される構造物全体系の折れ曲がり点の変位 δ_{eq} は 129mm で，これと原点を結ぶ剛性である等価固有周期は T_{eq}=1.02s であった．

(3) 入力地震動

入力地震動には，前章で述べた生起確率付地震動群を用いる．これは多数の時刻歴波形にそれぞれ発生確率が付与されているため，これらを用いた多数の動的解析を実施することで，構造物にある応答以上が発生する確率を算定することが可能である．

地震発生確率や各地震動レベルの地震諸元（地震規模や震源距離等）は地点によって異なるため，本検討では 8 地点（札幌，仙台，新潟，東京，名古屋，大阪，広島，福岡）を対象とした生起確率付地震動群 [5]を用いる．対象とした各地点の地震発生確率（期間 100 年）をまとめて**図-3** に示す．

この結果を見ると，地域の地震活動度によって発生確率は大きく異なっている．例えば，大阪における最大加

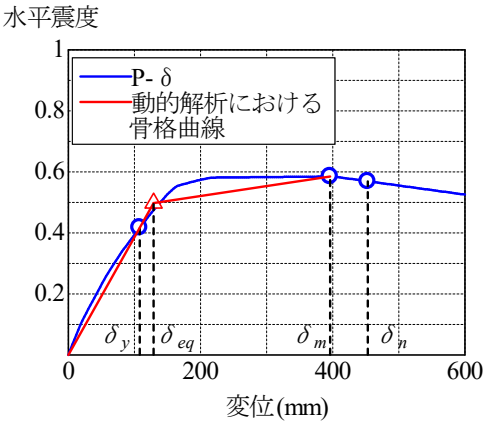


図-2　荷重－変位曲線

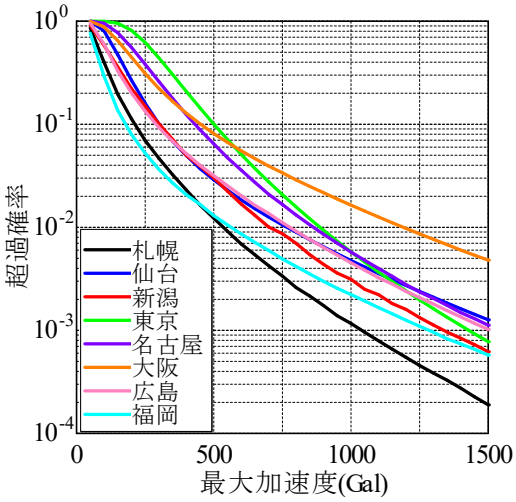


図-3　各地点の地震発生確率（期間 100 年）

速度 1,000gal の地震発生確率は札幌の約 10 倍となっている等，耐震標準における地域別係数と調和的な傾向となっていることが分かる．

(4)　構造物の地震応答値の算定方法

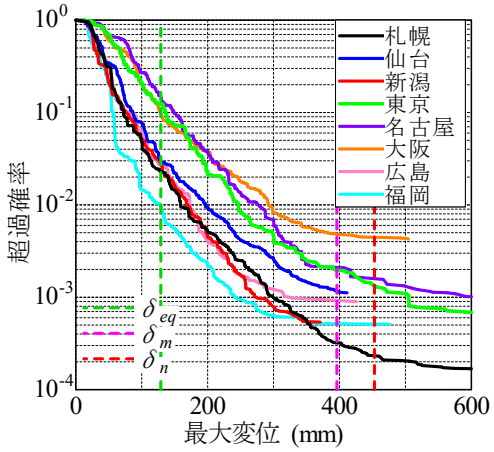
構造物の地震応答値は，プッシュオーバー解析を行ったモデルをそのまま用いるのではなく，構造物全体を等価な 1 自由度系に置換したモデルによる動的非線形解析[6]とする．このときの非線形特性等は，耐震標準に従って骨格をバイリニア，履歴曲線を Clough モデル（α=0.10, β=0.2）で設定し，減衰定数は 0.1 とした．この 1 自由度モデルに多数の生起確率付地震動群を入力することで，各応答値に至る確率を評価する．

3.　構造物の地震リスクの評価

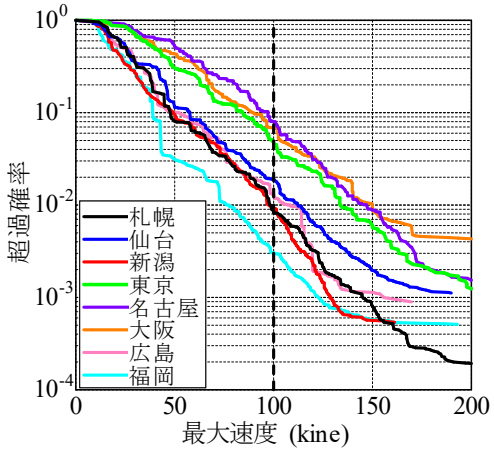
(1)　健全な状態での地震リスクの算定

前章で述べた地震動の条件，構造物の条件を考慮した非線形動的解析を実施した．得られた構造物の応答変位，天端位置の絶対速度応答と発生確率の関係を**図-4** にまとめて示す．この図には，プッシュ・オーバー解析で求めた各損傷状態に至る変位 δ_{eq}，δ_m，δ_n，既往の検討により提案されている走行安全限界に達する速度 100kine をそれぞれ縦破線で示している．

この結果を見ると，東京・名古屋・大阪の 3 都市では，他の地域と比べて相対的に大きな変位・速度が発生する確率が高いことが分かる．これらの都市は，地震の発生確率（**図-3**）においても全体的に振幅レベルの大きな地震の発生確率が高くなっており，地域の地震活動度の大小に対応した結果であることが分かる．この結果からも耐震標準に示される地域別係数の有効性が確認できる．



(a)　構造物の応答変位



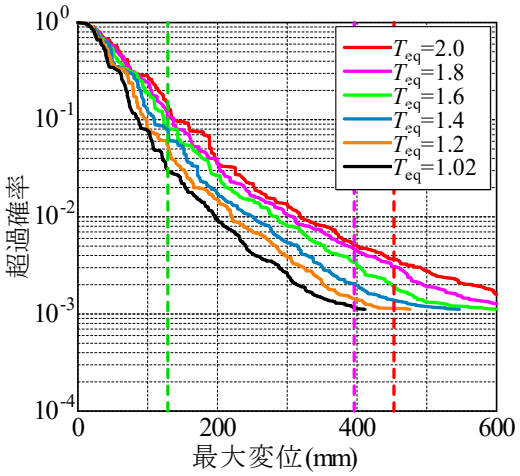
(b)　構造物天端の絶対速度

図-4　健全な状態における地震リスク

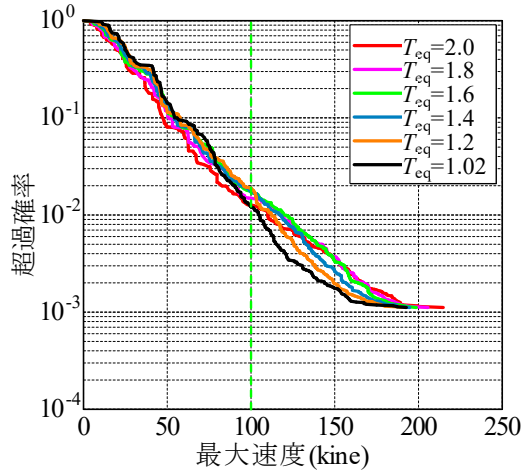
(2)　損傷を想定した状態での地震リスクの算定（代表地点での検討）

続いて，地震によって構造物が損傷した状態を想定した検討を行う．この時には，損傷によって構造物の等価固有周期が長くなるものの，それ以外の特性は変化しないという仮定の下で検討を行う．本節では，8 地点の中で中間的な地震発生確率となっている仙台地点での検討を行う．構造物の等価固有周期 T_{eq} は，1.2s, 1.4s, …, 2.0s と 0.2s 刻みで設定し，それぞれの状態において前節と同様の動的解析を実施することで，地震リスクの評価を行った．最終的に得られた構造物の応答変位，天端位置の絶対速度応答と超過確率の関係をまとめて**図-5** に示す．

まず**図-5** (a)の応答変位の結果を見ると，等価固有周期の増大に伴って，各損傷状態に至る変位の発生確率も増大していることが分かる．例えば健全な状態において δ_m を上回る応答が発生する確率は 1.16×10^{-3} であったのに対し，T_{eq}=1.6s とした条件における δ_m の超過確率は 3.42×10^{-3} となっており，両者の地震リスクには 3 倍程度の

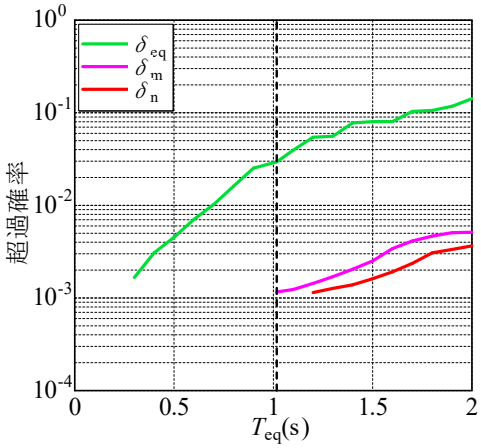


(a)　構造物の応答変位

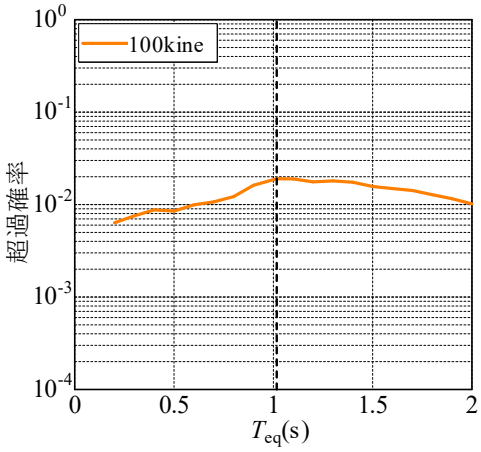


(b)　構造物天端の絶対速度

図-5　等価固有周期を変化させた場合の地震リスク



(a)　各損傷が発生する変位とその超過確率



(b)　走行安全限界に達する速度その超過確率

図-6　固有周期の変化に伴う地震リスクの変化（仙台）

変化が見られる．

その一方で，**図-5** (b)の最大速度-超過確率の関係を見ると，構造物の等価固有周期の変化に伴う応答の超過確率の変化は比較的小さいことが分かる．例えば T_{eq}=1.6s とした条件における速度 100kine の超過確率は，地震前の構造物（T_{eq}=1.02s）における超過確率の 0.8 倍程度となっており，地震による損傷に伴って構造物の等価固有周期が増大したとしても，走行性という観点での構造物応答のリスクはそれほど変わらない結果が得られた．

(3)　振動特性の変化に伴う地震リスクの変化

構造物の振動特性の変化が各損傷状態に至るリスクに与える影響を定量的に確認するため，構造物の等価固有周期 T_{eq} を短くした条件も含めて網羅的な動的解析を実施するとともに，各状態を超過する確率を算定した．前節と同様に仙台地点を対象として得られた，等価固有周期と損傷に至る変位（δ_{eq}, δ_m, δ_n），安全限界に達する速度（100kine）の超過確率の関係をまとめて**図-6** 示す．

これによって得られる傾向は基本的に前節と同様であるが，まず構造物の応答変位の観点（**図-6** (a)）では，等価固有周期の増大に伴い超過確率が一様に増大していることが分かる．その一方で，構造物天端の応答速度 100kine を超過する確率は，等価固有周期 T_{eq}=1.0s 付近における確率が最大となっているとともに，周期の変化に伴うリスクの変化は小さい．具体的には今回検討を行った周期 0.2s～2.0s の範囲におけるリスク変化の倍率は最大約 3 倍となっており，例えば δ_{eq} を対象とした場合のリスク変化の倍率約 94 倍と比較して相対的に小さな値となっている．そのため，構造物の等価固有周期の変化が構造物の応答速度の発生確率に与える影響はそれほど大きくないと考えられる．

(4)　全国 8 地点を対象とした検討

前節と同様の計算，評価を今回対象とした 8 地点に対して実施した結果を**図-7** に示す．まず**図-7** (a)~(c)に示した構造物の応答変位という観点での結果を見ると，全て

の地域において構造物の等価固有周期 T_{eq} の増大とともに応答の超過確率が増大する結果が得られた．そのため，同一の降伏震度を有する構造物が，地震に伴う損傷によって長周期化した場合には，その構造物が有する損傷の発生リスクが増大する可能性があると言える．

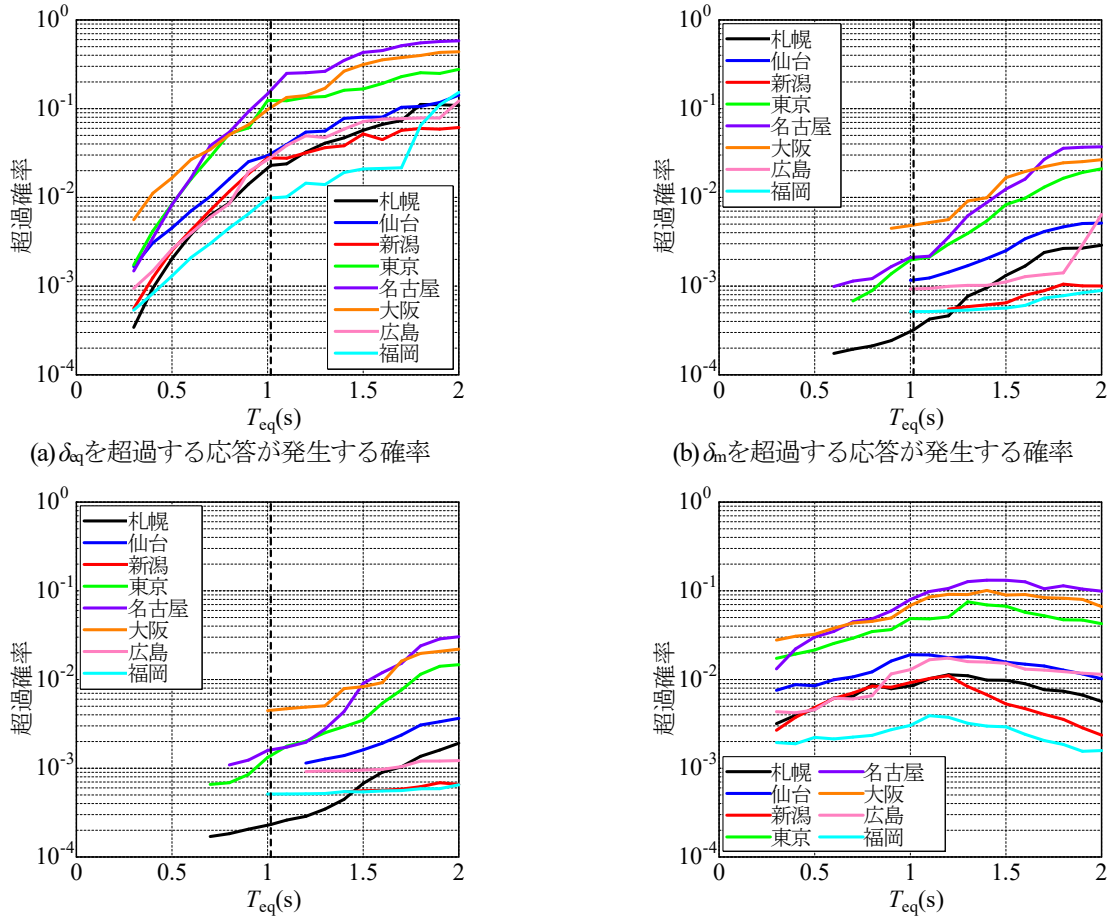
その一方で，構造物天端の速度応答が 100kine を超過する確率（**図-7** (d)）を見ると，仙台以外の地域においても等価固有周期 T_{eq} の増大に伴う発生確率の大きな変化は見られない．そのため，地震によって構造物が損傷して等価固有周期が長くなった状態においても，走行安全性のリスクという観点では，それほど影響はないと考えられる．

4. まとめ

本検討では，大規模地震発生後の機能回復のさらなる効率化に資する情報を得るために，地震に伴う構造物の地震リスクの変化に関する基礎的な検討を行った．具体的には，一般的なRCラーメン高架橋を対象として健全な状態における地震リスクを評価するとともに，地震に伴う損傷によって構造物が長周期化するという仮定の下での地震リスクを評価し，両者の比較を行った．

その結果，今回対象とした地盤条件，構造物条件において，構造物の等価固有周期の増大に伴い大きな変位が発生するリスクは一様に増加する一方で，車両の走行安全性に関係のある構造物天端の絶対速度応答はそれほど変化しないことが分かった．

このような検討を繰り返すことで，地震後の鉄道が有するリスクの変化を定量的に評価，把握することが可能となり，これに基づいた各種意思決定の高度化等も期待される．ただし本検討では条件を単純化し多くの仮定を踏まえた計算，評価を行っているため，今後はこれら各要素を高度化したうえでの検討が必要になる．また，車両の走行性という観点で単一構造物の応答のみに着目したが，当然のように構造物の応答変位の増大によって角折れ・目違い量の増大も懸念されるため，最終的にはこれも含めた評価が必要になる．これらについては，今後さらに検討を行う予定である．



(a) δ_{eq}を超過する応答が発生する確率　(b) δ_mを超過する応答が発生する確率

(c) δ_nを超過する応答が発生する確率　(d) 100kineを超過する応答が発生する確率

図-7　固有周期の変化に伴う地震リスクの変化（地域ごとの比較）

REFERENCES

1) Cornell,C.A.:Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am.,Vol58, No.5, pp.1583-1606, 1968
2) 坂井公俊，室野剛隆：地震危険度解析に基づく生起確率付地震動群の作成方法，鉄道総研報告，Vol.24，No.5，May.2010. [Sakai, K. and Murono, Y.: Evaluation of earthquake ground motion equipped with probability of its occurrence based on the seismic hazard analysis, *RTRI REPORT*, Vol. 24, No. 5, May. 2010.]
3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計, 2012. [Railway Technical Research Institute: *Design Standards for Railway Structures and Commentary*, 2012.]
4) 室野剛隆，野上雄太，宮本岳史：簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案，土木学会論文集 A，Vol.66，No.3，535-546，2010. [Murono, Y. , Nogami, Y. , and Miyamoto, T.: Simple method to predict outline of seismic damages of railway structures and running vehicles, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A*, Vol. 166, Issue 3, pp. 535-546, 2010.]
5) 坂井公俊，室野剛隆，佐藤勉，澤田純男：トータルコストを照査指標とした土木構造物の合理的な耐震設計法の提案，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.2，248-264，2012. [Sakai, K. , Murono, Y. , Sato, T. and Sawada, S.: A New Seismic Design Method For Railway Structures Considering Total Cost , *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1(Structual Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 68, Issue 2, pp. 248-264, 2012.]
6) 室野剛隆，佐藤勉：構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用，地震工学論文集，Vol.29，520-528，2007. [Murono, Y. and Sato, T: Applicability Of Non-linear Respopnse Spectrum For Verification Of Seismic Performanse Of Structure, *Journal of Earthquake Engineering)*, Vol. 29, pp. 520-528, 2007.]

(Received March 31, 2023)
(Accepted June 9, 2023)

EVALUATION OF EFFECTS ON SEISMIC RISK DUE TO CHANGES IN VIBRATION CHARACTERISTICS OF STRUCTURES ACCOMPANIED BY EARTHQUAKES

Hiroki KUBO and Kimitoshi SAKAI

In this study, we analytically examined the effect on the risk of earthquake damage due to changes in the vibration characteristics of structures for the purpose of determining the repair priority of structures and utilization to decide the resumption of operation after an earthquake. In particular, the risk of damage to the structure and that of reaching the vehicle's running safety limit were evaluated by dynamic analysis using many time history waveforms. In addition, a similar study was conducted in the case where the equivalent natural period of the structure changed. As a result, it was found that the risk of damage to the structure increased as the equivalent natural period of the structure increased. On the other hand, it was confirmed that the effect on the risk of reaching the vehicle's running safety limit was small.