

機能分散による設計超過地震を受ける免制震橋の危機耐性向上に関する地震リスク評価

秋池 佑香¹・党 紀²・Bidha L. Joshi³・
石山 昌幸⁴・山崎 信宏⁴・染谷 優太⁴

¹ 学生会員 埼玉大学 大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

E-mail : y.akiike.703@ms.saitama-u.ac.jp

² 正会員 工博 埼玉大学助教 大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

E-mail : dangji@mail.saitama-u.ac.jp

³ Nonmember of JSCE, Graduate school of Saitama University, (255 Shimo-Ohkubo Sakura Dist. Saitama City)

⁴ 正会員 日本鑄造株式会社 エンジニアリング事業部 (〒210-9567 神奈川県川崎市川崎区白石町 2-1)

2011 年以降, 土木構造物の設計指針において「危機耐性」が提示されている. 本研究では, 機能分散を考慮した免制震橋を対象に, 従来の耐震橋と免震橋と比較して, 危機耐性の向上を定量的評価することを試みた. 漸増動的解析より, 機能分散の設計方針の通り, 安価で取り替えを施行し易い SPD が先行破壊することが判明された. また, 地震リスク評価を行い, 機能分散により免制震橋の損失コストは従来の約 1/2 に抑えられ, 道路交通ネットワークを考慮した損失も小さくなる. 機能分散することにより, 免震橋が経済的かつ早急な復旧が可能となり, 被害地域の復旧に貢献することが期待できる.

Key Words : Anti-Catastrophe, Function Separated Bridge, Seismic Response, Incremental Dynamic Analysis, Risk Assessment

1. はじめに

2011 年の東日本太平洋沖地震では, 想定外の強震動と大津波により, 土木構造物に大きな被害が生じた. これにより, 設計段階で想定した事象に対して土木構造物の安全性を保障できたとしても, 想定外の事象による被害を防ぐことができないことが明らかになった. しかし, 設計段階で耐用期間に生じうる全ての事象を把握することが困難であり, 必要以上の強度を要求するのが経済的に難しい.

以上の背景より, 設計段階で想定していなかった事象においても, 構造物が単体またはシステムとして破滅的な状況に陥らないような性質である危機耐性¹⁾の概念が提示されている. 本田ら²⁾, 土木学会地震工学委員会の議論をまとめ, 危機耐性では従来の 2 段階設計法に加え, 早期復旧による被災地域への貢献や, 社会ネットワークとしての機能の維持を必要としていることを提示している. ただし, 実装にはその度合いや経済的合理性を深く検討する必要がある, 具体的な工法や性能の定量的評価軸の開発などが求められている.

2016 年に党ら³⁾は危機耐性を考慮した構造システムとして, 機能分離の概念に基づき, 橋台部に適応した減衰機能持ちのゴム支承の代わりに, 従来のすべり支承とマックスウェルモデルのような直列ダンパーの組み合わせによる免制震機構をを提案した. この提案の特徴として, 修理交換し易い鋼製ダンパー (図表では SPD) の先行破壊により, 橋梁機能の早期復旧ができ, 比較的高価で交換が難しい積層ゴム支承 (図表では HDR) の破断リスクを抑制できることである. 地震応答解析により, 従来の耐震橋と免震橋を元に, 提案機構を加えた場合, 橋梁構造物の地震応答がさらに抑えられ, 耐震性能が大きく向上したことが明らかになったが, その危機耐性について他の橋梁モデルとの相違が不明であった.

本研究では, 機能分散を考慮した免制震橋を対象に, 危機耐性の定量的評価を試みる. 想定外地震を考慮した危機耐性を評価するために漸増動的解析³⁾ (IDA : Incremental Dynamic Analysis) を行い, 地震ハザードと構造脆弱性を用いて従来の構造系と比較した地震リスク評価を行う.

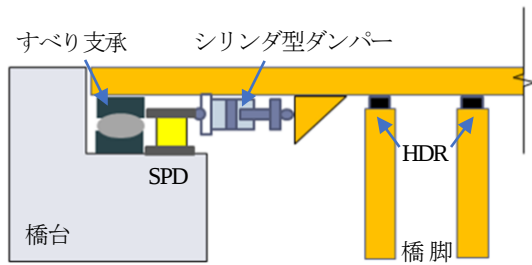


図-1 機能分散を考慮した免制震橋²⁾

表-1 常時および地震時の各デバイスの機能²⁾

	常時荷重	レベル I	レベル II
SPD		交換不要な損傷	地震エネルギー吸収
シリンダ型ダンパー	温度伸縮に追随		応答変位固定
HDR	鉛直支持	鉛直支持振動低減	鉛直支持振動低減
すべり支承	鉛直支持回転変位	鉛直支持	鉛直支持

2. 機能分散を考慮した免制震橋

機能分散を考慮した免制震橋とは、兜ら²⁾が提案した図-1の構造システムを示す。常時および地震時の各デバイスの機能を表-1にまとめる。常時では、桁の温度伸縮による水平変形がシリンダ型ダンパーの伸縮により吸収され、SPD や HDR の疲労問題を避ける。強震動が生じた場合、速度に依存するシリンダ型ダンパーの応答変位を固定することで鋼製ダンパーが塑性変形し、地震エネルギーを吸収する。SPD が破断した場合でも、鉛直支持をすべり支承が担うため、早期復旧が可能となり、SPD を先に損傷させることで、復旧時に比較的高価で交換が難しいHDRの破断リスクを抑制できる。

兜ら²⁾は図-2の従来構造系と比較した地震応答解析を行い、構造系全体の地震応答が抑えられたとともに、損傷がSPDに集中することを確認した。

3. 漸増動的解析 (IDA)

(1) 構造系の解析モデル

本研究では、機能分散を考慮した免制震橋の地震応答性能を従来の構造系と比較するため、構造系の解析モデルには兜ら²⁾が提案したの解析モデルを用い、詳細は図

-2 に示す。図-2(a)の耐震橋モデルは、鋼製橋脚と上部工が鋼製支承で剛結されたモデルとし、1 質点系とする。図-2(b)の免震橋モデルは、耐震橋モデルの下部構造と上部工の間にHDRを置いた3質点系とする。図-2(c)の機能分散を考慮した免制震橋モデルは、免震橋モデルの橋台側HDRをすべり支承および直列させたSPDとシリンダ型ダンパーに置き換え、3 質点系とする。なお、質量や剛性などの緒言も兜ら²⁾が解析時に用いた数値に準ずる。

(2) 非線形応答部材の復元力履歴モデル

各モデルの非線形応答部材は、SPD、HDR、鋼製橋脚、シリンダ型ダンパー、すべり支承の5種類である。ただし、橋台は常に弾性を保つとする。

SPDとHDRには、図-3および式(1)に示す1方向載荷時の修正Park-Wenモデル⁴⁾を用いる。このモデルは、Bouc-Wenモデル⁵⁾の非線形履歴減衰を表す成分をせん断ひずみ ε に依存させた2次関数 $(1 - \alpha)K_1 + \beta\varepsilon^2$ に置換したことで、エネルギー吸収量の増大や積層ゴム支承のハードニングを表現できる。

$$F(t) = \alpha K_1 \delta(t) + \{(1 - \alpha)K_1 + \beta\varepsilon^2\}Z \quad (1)$$

α : 2次剛性比

K_1 : 初期剛性

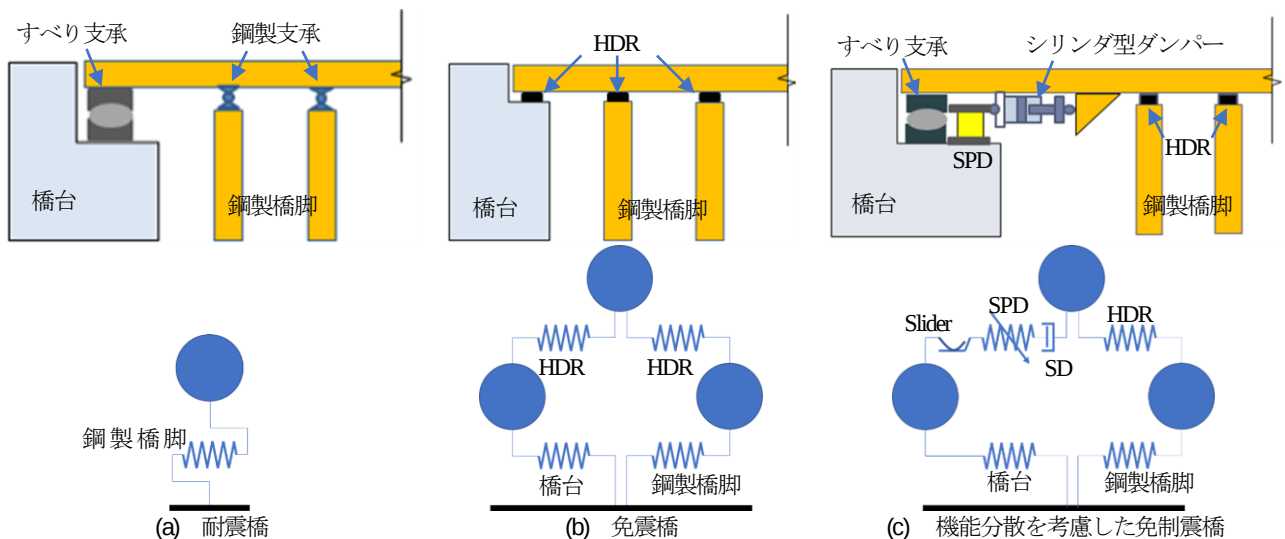


図-2 構造系のモデル化²⁾

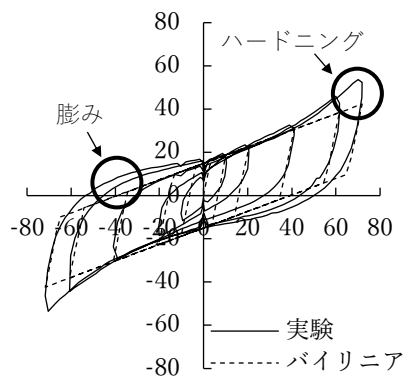
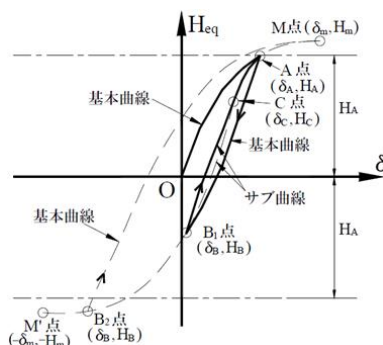
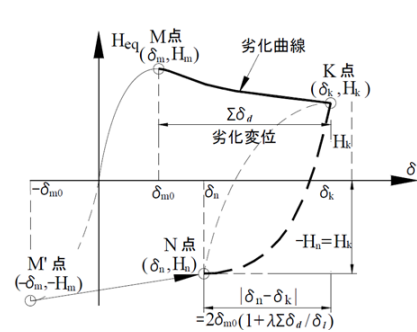


図-3 1方向荷重時修正の Park-Wen モデル⁴⁾



(a) 基本曲線とサブ曲線



(b) 劣化曲線

図-4 曲線近似復元力モデル⁶⁾

Z : 非線形履歴変位

β : 硬化係数

ε : せん断ひずみ

鋼製橋脚には、図-4の曲線近似復元力モデル⁶⁾を用いる。地震力を受けると図-4(a)の滑らかな基本曲線とサブ曲線を描き、最大荷重点に近づくとき図-4(b)の劣化曲線を描く。初期の剛性変化は小さく、劣化曲線が長くなるほど剛性低下が早くなる。

シリンダ型ダンパーの復元力履歴は、従来の実験⁷⁾より、ある速度以上の荷重であれば安定した復元力履歴を得られる事が判明している。本研究では、 $\alpha = 0.05$ とし、減衰定数は復元力履歴が安定したときにシリンダ型ダンパーの荷重がSPDの降伏荷重より小さくなるようにする。なお、すべり支承は摩擦係数0.05の摩擦スライダーとする。

(3) 漸増動的解析

本研究では、不確実性を考慮した損傷確率を求めるため、漸増動的解析³⁾ (IDA : Incremental Dynamic Analysis) を行う。IDAとは、入力地震動の倍率を終局限界まで漸増させながら、繰り返し非線形応答解析を行い、構造系の耐震性能を確率論的に評価する手法である。入力地震動に多様なスペクトル特性をもった地震動記録を多数用いることで、設計スペクトルに沿った模擬地震動などに

依らない、不確実性を考慮した耐震性評価ができ、設計地震動より大きい極大事象に近い条件で解析できる。

本研究では、実際に生じた地震波の加速度記録を100種類使用する。地震動記録はWeb上で公開されている防災科学技術研究所強震観測網⁹⁾ (K-NET)、気象庁強震観測⁹⁾およびPEER Ground Motion Database¹⁰⁾ (NGA-West2)の地震動観測波形データを用いる。構造物に被害を生じさせる強震動を入力地震動とすることを想定し、オリジナル地震動波形は以下の基準に基づいて選定する。

- PGAは300gal以上
- 各データベース内で最も計測震度が大きい記録から順に選定
- 震源に最も近い地点での観測記録を優先
- 日本国外の記録をNGA-West2から40種選定

地震動記録は1地点につき水平2方向で観測されているので、最大加速度が大きい方向の記録をその地点での観測記録とする。

非線形応答解析は減衰定数 $h = 0.05$ によるNewmark's Beta法($\beta = 1/6$)を用いる。固有円振動数を固有値解析で求め、レイリー減衰で減衰マトリックスを作成する。

入力地震動は、振幅を10kineずつ増加させ、漸増回数ごとに最大応答変位を記録する。各部材の終局限界は、橋脚の終局塑性率および支承部材の破断ひずみを用いて判定し、HDRとSPDの破断ひずみはそれぞれ許容値

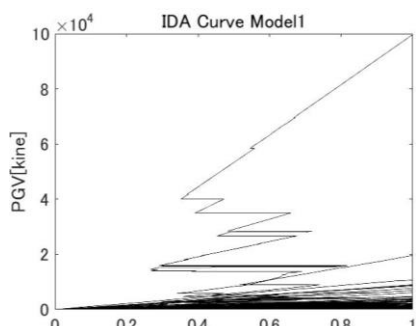
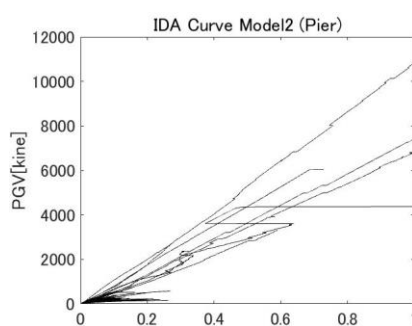
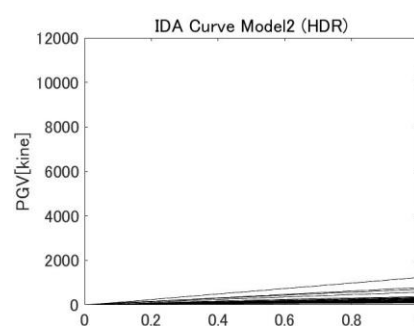


図-5 耐震橋の橋脚の IDA 曲線



(a) 橋脚



(b) HDR (最大確率のみ)

図-6 免震橋の IDA 曲線

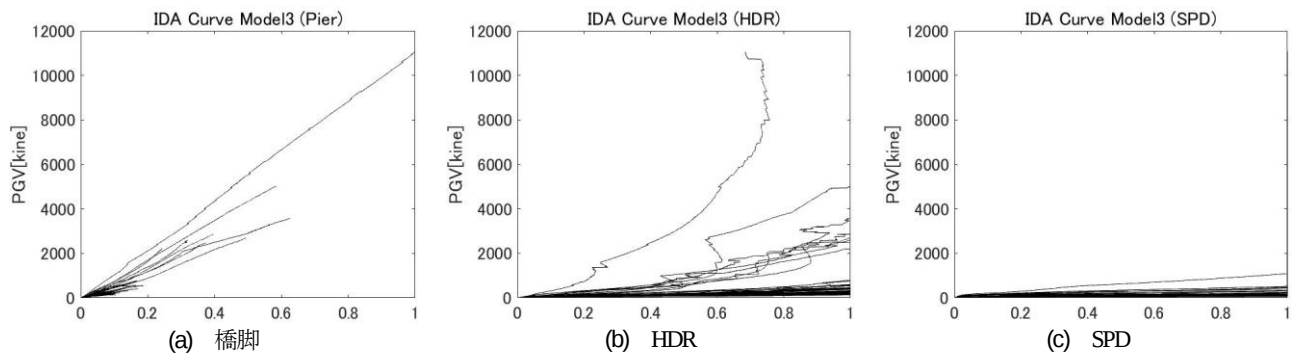
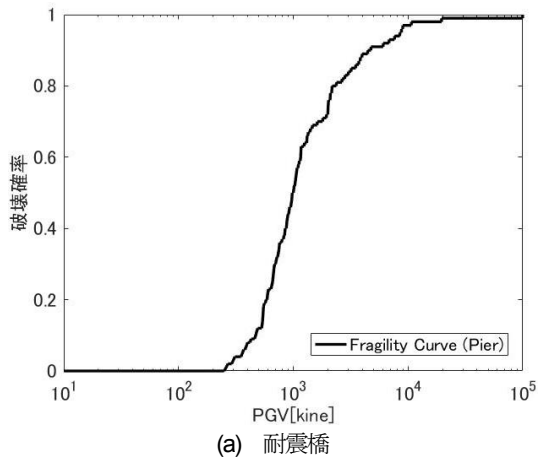
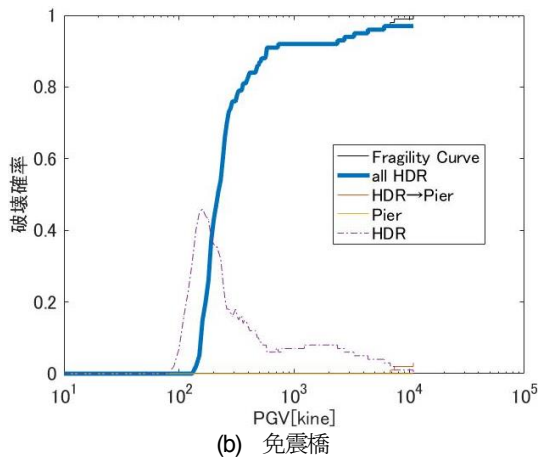


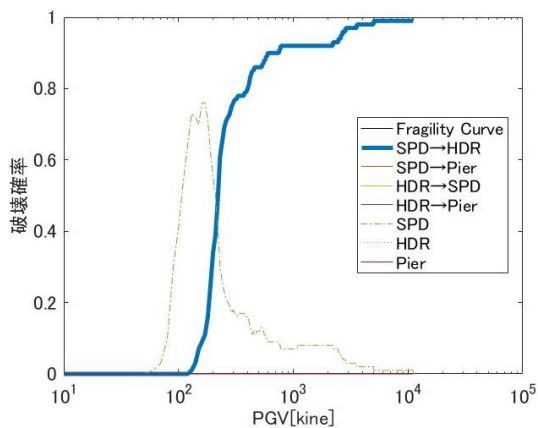
図-7 機能分散を考慮した免震震橋の IDA 曲線



(a) 耐震橋



(b) 免震橋



(c) 機能分散を考慮した免震震橋

図-8 各橋梁モデルの fragility カurve

250%と変形能 30%とする。構造系全体の終局状態は、橋脚が破壊した場合、または、橋脚および橋台の支承部材が全て破断した場合とし、構造系全体の終局状態に達する前に一方の支承部材が破断した場合は、その復元力を 0 とみなして応答解析を続ける。構造系全体の終局状態に達した場合、次の入力地震波に切り替え、前記と同様に解析する。図-5 から図-7 に、各入力地震波に対する終局状態への進行割合と漸増 PGV の関係を表す IDA 曲線を示す。

(4) フラジリティカーブによる評価

IDA より得られたデータを用いて各部材が破壊する順序別に確率を算出し、地震動強さと破壊確率の関係を表す fragility カurve を図-8 に示す。定義より各モデルで生じる破壊順序の組み合わせは図-8(a) から順に 1, 3, 5 通りあり、実線で表している。

図-8(b) の免震橋モデルでは、3 通りのうち 2 通りの終局状態を確認した。そのうち HDR が破断した後に橋脚が破壊したのが数例であり、9 割以上が橋脚と橋台の HDR が破断する終局状態になった。免震装置を有しない図-8(a) の耐震橋モデルと比較すると、HDR が橋脚より低い PGV で破断して終局状態になる傾向があり、免震装置の耐力が構造系全体の耐力に影響することがわかる。

一方、図-8(c) の機能分散を考慮した免震震橋モデルでは、5 通りのうち 2 通りの終局状態を確認し、SPD が破断した後に橋脚が破壊した 1 例以外は、SPD が破断した後に橋脚上部の HDR が破断する終局状態になった。免震橋モデルと同様、耐震橋モデルより低い PGV で終局状態になる傾向がみられるが、機能分散を考慮した免震震橋の設計指針である SPD を先行破壊させることが、入力地震動の位相特性の不確実性を考慮した IDA においても確認できた。SPD が安価で施工が容易なことを踏まえると、構造系破壊時の損失コストを免震橋より抑えられ、経済的かつ早急な復旧が期待できる。

4. 地震リスク評価

安価で施工が容易な SPD が損失コスト抑制にどれほど

貢献するのかを評価するため、損傷発生確率や損傷コストを用いて地震リスク評価を行う。地震リスク評価では、地震による被害を貨幣価値によって定量的に把握することが重要であり、過去にも貨幣価値を用いた検討¹¹⁾¹²⁾がなされている。本研究では、地震リスクを損失や復旧のために生じるコストの期待値と定義し、式(2)に示す。

$$Risk = C_0 + \sum_i P^i (C_R^i + C_T^i + C_L^i) \quad (2)$$

C_0 : 初期費用
 i : 終局状態
 P : 地震時損傷発生確率
 C_R : 復旧費用
 C_T : 走行時間損失
 C_L : 人的被害損失

(1) 橋梁部材の損傷度別要求性能ランク

機能分散を考慮した免制震橋の構造要素である SPD, HDR, 橋脚を損傷度ごとに要求性能をランク分けし、復旧費用を設定する。交通可能となる復旧日数や発生するコストは道路震災対策便覧¹³⁾や過去の研究など¹¹⁾¹²⁾を参考に設定し、表-2 から表-4 に示す。

(2) 地震時損傷発生確率

地震時損傷発生確率とは、地震動による損傷が構造物に発生する確率であり、地震発生確率と要求性能ランク別損傷発生確率をともに考慮する必要がある。本研究では、地震ハザードステーション¹⁴⁾ (J-SHIS) で公開されている東京都周辺の地表面最大加速度を指数近似し、得られた図-9 のハザードカーブを地震発生確率とする。指数分布であるため、地震発生確率はポアソン過程に一致する。要求性能ランクごとの損傷発生確率と PGV の関係は、IDA により得られたデータから算出できる。式(3)の通り、IDA の漸増 PGV ごとに地震発生確率と損傷確率

表-2 鋼製橋脚の要求性能ランク

ランク	損傷度	日数	費用 [万円]	最大応答 変位
0	損傷なし	0	0	$0 \sim \delta_y$
1	塑性変形	5	150	$\delta_y \sim \delta_m$
2	座屈	30	2200	$\delta_m \sim \delta_l$
3	完全圧壊	90	4580	$\delta_l \sim$

表-3 HDR の要求性能ランク

ランク	損傷度	復旧 日数	費用 [万円]	ひずみ [%]
0	損傷なし	0	0	$0 \sim 175$
1	残留ひずみ	15	300	$175 \sim 250$
2	破断	30	600	$250 \sim$

表-4 SPD の要求性能ランク

ランク	損傷度	復旧 日数	費用 [万円]	変形能 [%]
0	軽微な損傷	0	0	$0 \sim 30$
1	変形・破断	0	300	$30 \sim$

を乗じ、その総和を地震時損傷発生確率とする。

$$P = \sum_{n=1}^{N_{PGV}} P_n^{50} \times (P_n^{DI} - P_{n-1}^{DI}) \quad (3)$$

P^{50} : 50年超過確率
 P^{DI} : 損傷発生確率
 N_{PGV} : IDAの漸増回数

(3) 損失コストの算定

道路交通ネットワークを考慮した社会的損失として、走行時間損失と人的被害損失を定義する。

走行時間損失は、橋梁の損傷による通行止めから復旧までに生じる損失である。走行時間損失コストは、費用便益分析マニュアル¹⁵⁾を参照し、式(4)のように、損傷前後の区間距離と旅行速度から算出した旅行時間の増分よ

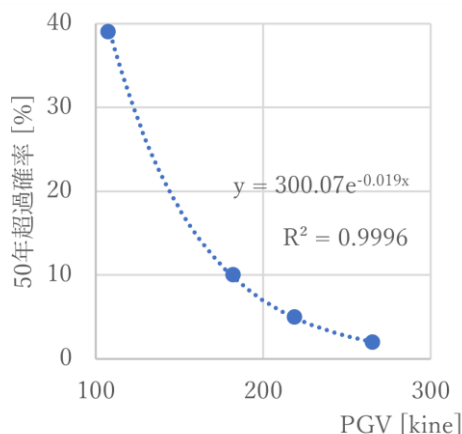


図-9 東京都周辺の50年超過確率¹⁴⁾



(a) 橋梁使用のルート



(b) 橋梁不使用のルート

図-10 対象区間の交通ルート (Google map に加筆)

り算出する。

$$C_u = Q \times \Delta T \times \alpha_T \quad (4)$$

Q : 交通量[台/day]
 ΔT : 旅行時間の増分[min]
 α_T : 時間価値原単価[円/(min・台)]

対象区間は党ら²⁾が地震応答解析の際に参考にした山あげ大橋を通過する区間とし、旅行速度などのデータは道路交通センサス¹⁰⁾から引用する。対象区間の交通ルートを図-10に示す。交通量には一般国道における12h平均の数値を、橋梁不使用時の旅行速度は迂回ルートの混雑時平均の数値を用いた。表-5と表-6に算定結果を示す。

人的被害損失は、橋梁の倒壊に交通車両などが巻き込まれた場合の損失である。地震動継続時間は1分間と仮定し、倒壊または全支承部材破壊時に橋脚座屈が生じた場合で対象区間上にいた人々は全員死亡と設定した。交通量は同様に道路交通センサス¹⁰⁾から引用し、人身損失額は交通事故減少便益の原単価の算出方法¹⁷⁾から引用した。表-7に算定結果を示す。

(4) 地震リスクの算定

各構造要素の要求性能ランクの組み合わせごとに地震リスクを算出した結果を表-8から表-10に示す。この算定では、対象橋梁が緩やかな斜橋であり、支承部材が全

表-5 通行止めによる時間損失¹⁰⁾

	橋梁利用 迂回	
距離[km]	13	2.2
旅行速度[km/h]	50	33.6
旅行時間[min]	2	6
時間損失[min]	0	4

表-6 走行時間損失の算定¹⁵⁾¹⁶⁾

	普通車	大型車
交通量[台/day]	9122.4	1411.6
時間価値原単価	40.1	64.18
走行時間損失[千円]	1463.2	362.4
合計[千円]	1825.6	

表-7 地震動1分間あたりの人的損失¹⁶⁾¹⁷⁾

項目	普通車	大型車
交通量[台/min]	6.335	0.980
平均乗車率[人/台]	1.3	13.6
人身損失額[百万円/人]	245.7	
人的損失額[百万円/人/min]	2046.0	3273.7
合計[百万円]	5319.7	

て破断した場合に落橋する可能性を否定できないため、橋脚の要求性能ランク2に人的被害損失が算入している。

耐震橋や免震橋と比較するため、図-11に地震リスクの比較、図-12に発生損失コストの比較を示す。図-11より、免震橋の発生損失コストが6245万円であるのに対し、機能分散を考慮した免制震橋の発生損失コストは3077万円と免震橋の約1/2に抑えられた。地震リスクを算定した表より、機能分散を考慮した免制震橋は従来の橋梁系と比較すると、橋脚の要求性能ランクが上がってもその損傷発生確率が他の橋梁系より低下していくので、地震リスクも低くなる傾向になった。また、図-12より、免震橋の復旧費用と走行時間損失は他の橋梁モデルより大きく、経済的および迅速な復旧が難しいことが分かる。機能分散を考慮した免制震橋は走行時間損失と人的被害損失が最も小さく、復旧費用を考慮しても免震橋より小さな損失となる。

表-8 耐震橋の地震リスク評価[百万円]

Rank Pier	復旧 日数	損失コスト			P^i	Risk
		C_R^i	C_T^i	C_L^i		
0	0	0	0	0	0.13	0
1	5	8	9	0	0.75	12.5
2	30	110	55	5320	0.12	662.5
3	90	229	164	5320	0	4.0

合計 678.92

表-9 免震橋の地震リスク評価[百万円]

Rank		復旧 日数	損失コスト			P^i	Risk
HDR	Pier		C_R^i	C_T^i	C_L^i		
0	0	0	0	0	0	0.43	0
1	1	5	8	9	0	0.16	2.6
	2	30	110	55	0	0.01	1.5
	3	90	229	164	5320	0	0
	0	15	42	27	0	0.16	11.0
2	1	20	50	37	0	0.06	5.0
	2	45	152	82	0	0	0.8
	3	105	271	192	5320	0	0
	0	30	84	55	0	0.13	18.2
3	1	35	92	64	0	0.05	7.5
	2	60	194	110	5320	0	15.8
	3	120	313	219	5320	0	0

合計 62.45

i : 終局状態
 P : 地震時損傷発生確率
 C_R : 復旧費用
 C_T : 走行時間損失
 C_L : 人的被害損失

表-10 機能分散を考慮した免制震橋の
地震リスク評価[百万円]

Rank			復旧 日数	損失コスト			P^i	Risk
SPD	HDR	Pier		C_R^i	C_T^i	C_L^i		
0	0	0	0	0	0	0	0.27	0
1	0	1	5	8	9	0	0.05	0.9
		2	30	110	55	0	0	0
		3	90	229	164	5320	0	0
	1	0	15	42	27	0	0.04	2.8
		1	20	50	37	0	0.01	0.7
		2	45	152	82	0	0	0
		3	105	271	192	5320	0	0
	2	0	30	84	55	0	0.02	2.4
		1	35	92	64	0	0	0.5
		2	60	194	110	0	0	0
		3	120	313	219	5320	0	0
	0	0	0	20	0	0	0.42	8.4
		1	5	28	9	0	0.08	3.1
		2	30	130	55	0	0	0
		3	90	249	164	5320	0	0
		1	15	62	27	0	0.06	5.6
		1	20	70	37	0	0.01	1.3
		2	45	172	82	0	0	0
		3	105	291	192	5320	0	0
		2	30	104	55	0	0.03	4.3
		1	35	112	64	0	0.01	0.9
		2	60	214	110	5320	0	0
		3	120	333	219	5320	0	0

合計 30.77

i : 終局状態
 P : 地震時損傷発生確率
 C_R : 復旧費用
 C_T : 走行時間損失
 C_L : 人的被害損失

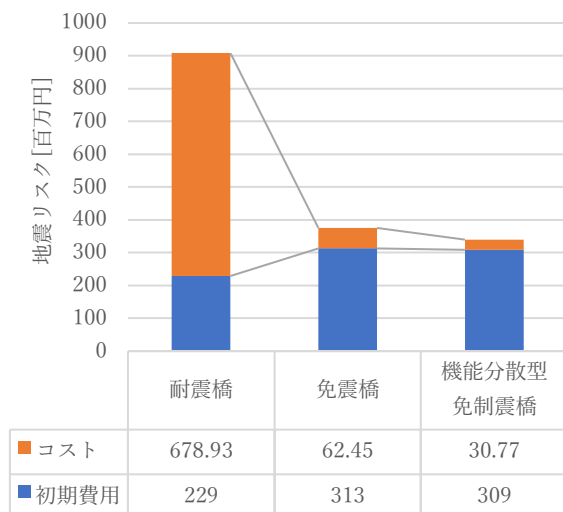


図-11 地震リスクの比較

まとめ

本研究では、機能分散を考慮した免制震橋²⁾を対象とし、漸増動的解析（IDA）と地震リスク評価による危機耐性の定量的評価を試みた。以下に要点を示す。

- 入力地震動の位相特性の不確定性を考慮した IDA においても、機能分散を考慮した免制震橋の設計指針である、先に橋台側の SPD が破断して橋脚側の HDR が破断する終局状態が確認できた。
- 地震リスク評価より、機能分散を考慮した免制震橋の発生損失コストは免震橋の約 1/2 に抑えられ、最も地震リスクが低くなった。
- 機能分散を考慮した免制震橋は安価で施工が容易な支承部材の組合せにより経済的かつ早急な復旧が可能となり、損失を抑えることで被害地域の復旧に貢献する。

機能分散を考慮した免制震橋は耐震性能および復旧の貢献度を考慮すれば、危機耐性を考慮しているといえる。しかし、本研究では構造系の地震応答モデルや発生する損失の算定に仮定を用いたため、実際の破壊的状況を考慮できたとは言い難い。特に、シリンダ型ダンパーの復元力履歴は、従来の実験⁷⁾を参考としたため、実際の強震動下においてシリンダ型ダンパーが機能分散を考慮した免制震橋の設計指針のとおり挙動するか不明な点がある。危機耐性にかなう構造システムにするためには更なる研究が必要である。

謝辞：本解析には、防災科学技術研究所強震観測網（K-NET）、気象庁強震観測および PEER Ground Motion Database（NGA-West2）による地震動観測波形データを利用しました。また、地震リスク評価では国土交通省による統計調査資料などを利用しました。ここに記して深く御礼申し上げます。

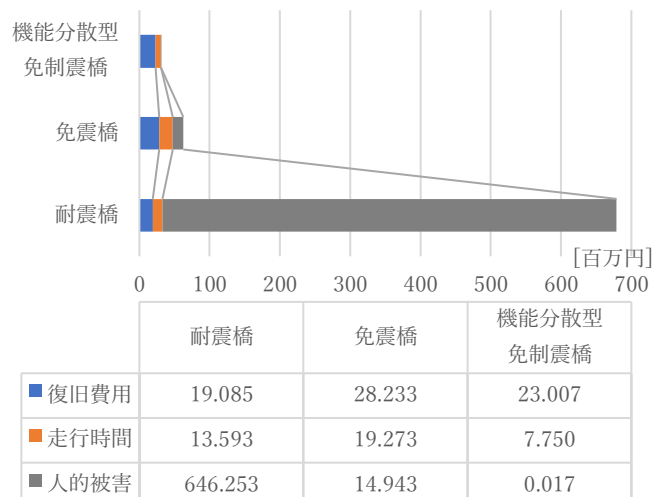


図-12 発生損失コストの比較

参考文献

- 1) 本田利器, 秋山充良, 片岡正次郎, 高橋良和, 野津厚, 室野剛隆: 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系—試案構築にむけての考察—, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4 (地震工学論文集第 35 巻), pp.I_459-I_472, 土木学会, 2016.
- 2) 党紀, 金井寛裕, Bidha L. Joshi: 危機耐性と経年劣化を考慮した機能分離型免制震橋, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震性能に関するシンポジウム講演論文集, pp.45-52, 2016.7.
- 3) Dimitrios Vamvatsikos, C. Allin Cornell: Incremental dynamic analysis, Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.31/I.3, pp.491-514, 2002.3.
- 4) 党紀, 五十嵐晃, 村越雄太: 高減衰ゴム支承の水平 2 方向・大ひずみ変形時の挙動を表現した 2 方向復元力モデルの開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.1, p.250-262, 2016.
- 5) Y.J.Park, Y.K.Wen, A.H-S.Ang: Random vibration of hysteretic systems under bidirectional ground motions, Earthquake engineering structural dynamics, Vol.14, No.4, pp.543-557, 1986.
- 6) 党紀, 青木徹彦: 鋼製橋脚の曲線近似復元力履歴モデルおよび実験検証, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2 (応用力学論文集 Vol.15), I_495-I_504, 2012.
- 7) 水野千里, 青木徹彦, 鈴木森晶: 微小粉体とオイルを混合したビンガムダンパーの耐震性能実験, 愛知工業大学研究報告, 第 43 号, pp.123-124, 2008.
- 8) 防災科学技術研究所 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.
- 9) 気象庁 | 強震観測結果, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>.
- 10) PEER Ground Motion Database, <http://ngawest2.berkeley.edu/>.
- 11) 庄司学, 藤野陽三, 阿部雅人: 高架道路橋システムにおける地震時損傷配分の最適化の試み, 土木学会論文集, No.563/I.39, pp.79-94, 1997.4.
- 12) 林訓裕, 五十嵐晃, 党紀, 足立幸郎: LRB の経年劣化を考慮した地震リスクに基づく道路橋の耐震性能評価, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.419-426, 2016.7.
- 13) 日本道路協会: 道路震災対策便覧, 震災復旧編, pp.77-83, 1988.2.
- 14) 地震ハザードステーション (J-SHIS), <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>.
- 15) 国土交通省道路局都市・地域整備局: 費用便益分析マニュアル, 2008.11.
- 16) 国土交通省道路局: 平成 22 年度道路交通センサス, 2011.
- 17) 国土交通省道路局: 交通事故減少便益の原単価の算出方法, 第 4 回道路事業の評価方法に関する検討委員会, 参考資料 2, 2008.

(2017.?? 受付)

RISK MITIGATION EFFECT OF FUNCTION SEPARATED BRIDGES UNDER DESIGN LIMITATION EXCEEDED EARTHQUAKES

Yuka AKIIKE, Ji Dang, Bidha L. Joshi,
Masayuki ISHIYAMA, Nobuhiro YAMAZAKI, and Yuta SOMEYA

This paper proposes a quantitative evaluation of structural systems considered Anti-Catastrophe.

In recent years, Earthquakes and according disasters are considered as wakeup call to earthquake engineers to consider the probability of the earthquakes exceeding design limitation and the corresponding structural damage. So, Anti-Catastrophe (Honda, 2017) have been discussed and Function Separated Bridge, using multiple energy dissipation and isolation devices to separate the risk from damage of critical member, is introduced by Ji Dang.

This study targets Function Separated Bridge and adopts Incremental Dynamic Analysis (IDA) and earthquake risk assessment. According to IDA, the main destruction scenario of the Function Separated Bridges is that SPD of the abutment break before HDR of the piers break. According to earthquake risk assessment, the risk of Function Separated Bridges is the half of the traditional isolated bridge.

In this study, it was found that Function Separated Bridges is economically and quickly restored by a combination of inexpensive and easy-to-install bearings considering the earthquake risk, and it contributes to restoration of the damaged area by suppressing loss.