

公益社団法人 土木学会
地震工学委員会・耐震基準小委員会
被害分析WG 活動報告書
および補足資料

2024年5月7日

被害分析WGは、過去の地震を含む構造物被害について、現在の耐震技術・知識・知見を踏まえた被害分析を行うため、2017年に地震工学委員会耐震基準小委員会に設置された。危機耐性は2011年東北地方太平洋沖地震を契機に提案された新しい概念であり、その考え方、また対策について各所で議論されているところであるが、危機耐性は耐震設計における安全性照査を超える事象に対する配慮であることを考えると、被害を受けた構造物を改めて分析し、危機耐性的配慮やその効果を読み取ることが有効である。本WGでは、危機耐性の観点から過去の構造物被害を分析することで、危機耐性を耐震設計法に組み込むための基礎資料を整理することを目標とした。

本WGは実質2020年までの活動であったが、その活動報告のため、2022年まで活動が延長されていたものの、報告をまとめるに至らなかった。本報告は、2020年までのWG活動に加え、WG長の責任のもと、2024年の地震被害による事例を追加し、また補足資料を加えて整理したものである。以下に、WG活動と補足資料の位置づけを示す。

1章 過去の地震における落橋の分析

2016年熊本地震までの被害橋梁の抽出はWG活動として実施。シナリオの分析等は補足資料として追加。

2章 落橋を防止する対策

基本WG活動によるものであるが、2024年能登半島地震を踏まえた追記は補足資料。

3章 耐震性能を考慮した構造デザイン思想

WG活動によるもの。

4章 鈍感性の観点による落橋防止対策の整理

WG活動によるものに図4、図7を追加。

5章 落橋防止対策のその先へ（性能と機能との関連）

補足資料として追加。

参考資料

補足資料として追加。

2024年5月
耐震基準小委員会 被害分析WG主査
高橋良和

土木学会地震工学委員会・耐震基準小委員会 被害分析WG・委員名簿

(所属は2020年までの活動当時)

WG 主査：

高橋良和（京都大学）

委員：

今井隆（ビービーエム／ゴム支承協会技術委員長）

篠原聖二（阪神高速道路）

橋本隆雄（国土舘大学）

服部匡洋（阪神高速道路技術センター）

廣瀬彰則（エイト日本技術開発）

1. 過去の地震における落橋の分析

1891（明治24）年濃尾地震から2024（令和6）年能登半島地震まで、橋桁が落下する損傷（落橋）が数多くの橋梁で発生している。これらの落橋事例として、土研資料第4158号¹⁾（以降、土研資料と呼ぶ）に掲載されている事例に加え、以降に発生した地震における落橋事例を追加した。橋梁名・落下径間・構造形式・墜落原因をまとめたのが表1である。

土研資料は、過去の地震における落橋の分析による橋の桁落下シナリオの検討を行い、落橋防止システムに要求される性能に関する考察を行うための資料である。ここでは、桁落下の被災シナリオとして、以下の5つを設定し、これによって分類されている。図1にシナリオA～Dの例を示す。

シナリオA：下部構造が倒壊

シナリオB：下部構造が大変位

シナリオC：上部構造の橋軸方向への変位

シナリオD：上部構造の橋軸直角方向への変位

シナリオE：津波による上部構造の流失（漂流船舶の衝突による橋脚の崩壊を含む）



シナリオA：下部構造が倒壊した例



シナリオB：下部構造が大変位した例



シナリオC：桁が橋軸方向へ変位した例



シナリオD：桁が直角方向に変位した例

図1 桁落下シナリオに基づく被災例（土研資料第4158号より抜粋）

表 1 (1) 1891 年濃尾地震以降の墜落事例とその原因 (土研資料第 4158 号より抜粋)

表-1 (1) 過去の被害地震による桁落下事例と被災シナリオ

地震名	橋梁名	落下径間 / 径間数	構造形式	被害形式	シナリオ	資料頁番号	参考文献
1891年濃尾地震	枇杷島橋	不明	木橋 (詳細は不明)	地盤変状による下部構造崩壊	A	12-13	3), 4), 5)
	豊国橋	1/3	3径間鋼トラス橋, 斜角20°	下部構造の変位により1径間分の桁落下	B	14-15	6), 7)
1923年関東地震	酒匂橋	33/33	33径間RCT桁橋	橋脚の破壊により落橋	A	16-17	6), 7)
	早川橋	1/6	6径間RCT桁橋	上部構造の変位, あるいは橋脚変位	C	18-19	6), 7)
	神戸橋	2/2	2径間RCT桁橋	橋脚の破壊により落橋	A	20-21	6)
	谷戸橋	1/1	単径間平行弦アラビア橋	橋台の破壊により落橋	A	22-23	6), 7)
	木賀橋	不明	木造類杖橋	斜面崩落による橋脚破壊	A	24-25	6), 7)
	渡川橋	6/8	8径間鋼ワーレントラス橋	地盤変状による橋脚移動	B	26-27	8), 9), 10)
1946年南海地震	厄除橋	4/5	5径間ハウ型木トラス橋	津波によって遡上した船の衝突	E	28-33	10)
	会津橋, 他11橋	(12)/(12)	単純桁橋 (木, 鋼, RC造) 等	津波による橋脚の折損 (漂流船舶の衝突)	E	34-35	8), 9), 10)
1948年福井地震	中角橋	11/14	14径間鋼鉸桁橋	上部構造の変位により桁落下	A	36-37	7), 11), 12), 13)
	長屋橋	4/8	8径間鋼I桁橋	下部構造の沈下, 変位により上部構造沈下	A	38-39	7), 11), 12)
	港橋	7/7	7径間木造土橋	橋脚の破壊により落橋	A	40-41	11), 12)
	布施田橋	53/75	75径間木造土橋	下部構造の破壊により落橋	A	42-43	11), 12)
	板垣橋	8/13	13径間RCT桁橋	下部構造傾斜により桁落下	A	44-45	11), 12)
	弁天橋	3/6	6径間RCT桁橋	下部構造の転倒により落橋	A	46-47	11), 12)
	船橋	30/30	30径間木造土橋	下部構造の崩壊により落橋	A	48-49	11), 12)
	響橋	3/3	6径間トラス橋 (3径間分架設済み)	上部構造の変位により桁落下	C	50-51	14)
	昭和大橋	5/12	12径間単純鋼鉸桁橋	1径間は振動応答により桁落下 それ以外の桁は液状化による地盤の変位によ り落下	B, C	52-53	7), 15), 16), 17), 18)
	新潟県東跨線橋	1/16	単径間活荷重合成単純鉸桁橋 + (8+7) 径間アラビア桁橋	液状化による地盤の変位により落橋	B	54-55	15), 16), 17), 18)
1978年宮城県沖地震	松浜橋	1/14	14径間鋼ワーレントラス橋 (架設中)	支保工の倒壊により可動側から落橋	A	56-57	16), 17)
	品ノ木橋	不明	不明	橋脚の沈下による落橋	A?	58-59	15)
1983年日本海中部地震	錦桜橋	1/9	9径間ゲルバー鉸桁橋	上部構造の振動変位による落下	C	60-61	19), 20)
	月出橋	3/5	4径間木橋 + 単径間RC床版桁橋	津波によって遡上した船の衝突	E	62-63	21)

表 1 (2) 1891年濃尾地震以降の墜落事例とその原因 (土研資料第4158号より抜粋)

表-1 (2) 過去の被害地震による桁落下事例と被災シナリオ

地震名	橋梁名	落下径間 / 径間数	構造形式	被害形式	シナリオ	資料頁番号	参考文献
1995年兵庫県南部地震	門戸高架橋	1/19 斜角40°	19径間単純桁橋 (PC桁, 鋼1桁)	斜橋の回転による桁落下	D	64-65	23)
	岩屋高架橋	15/46	3径間連続PC桁橋3連 + 単純合成鋼箱桁橋 + 単純合成鋼桁橋 + 3径間連続PC桁橋4連 (上下線分離)	鋼製橋脚の局部座屈、角部われによる崩壊 RC橋脚の破壊による落橋	A	66-69	22), 23), 26), 27), 28)
	瓦木西高架橋	2/3	3径間連続RC中空床版橋, 斜角52°	斜橋の回転と橋脚損傷による桁落下	A, (D)	70-71	23)
	甲子園高潮町西	2/2	鋼単純桁橋	RC橋脚の主鉄筋段落し部の破壊による倒壊	A	72-73	25)
	浜脇町札場	2/4	4径間鋼単純桁橋	桁振動・衝突による桁落下	C	74-75	25)
	市庭町建石交差点	2/2	単純合成鋼箱桁橋 + 単純合成鋼桁橋	鋼製橋脚の座屈による崩壊	A	76-77	22), 23)
	東灘区深江本町	18/18	18径間PCガルバー桁橋 (ピルツ橋)	RC橋脚の主鉄筋段落し部の破壊による倒壊	A	78-79	22), 23), 24), 25)
	中央区波止場町	2/2	2径間単純合成鋼桁橋	RC橋脚の主鉄筋段落し部の破壊による倒壊	A	80-81	22), 25)
	湊川ランプ橋東入G3	1/2	2径間連続曲線鋼箱桁橋	曲線橋の回転と橋脚損傷による桁落下	A, (D)	82-83	22), 25)
	湊川ランプ橋西出G4	1/2	2径間連続曲線鋼箱桁橋	曲線橋の回転と橋脚損傷による桁落下	A, (D)	84-85	22), 25)
2000年鳥取県西部地震	西宮港大橋77ローナ橋	1/2	ニールローナ橋 + 単純鋼箱桁橋	桁間の振動位相差と地盤流動化による桁落下	(B), C	86-87	18), 23), 29)
	新港第4突堤 ボートターミナル77	2/8	単純鋼箱桁橋2連 (フルバナー桁) + 2径間77m 鋼箱桁橋, 二層式曲線橋, 斜角あり	斜橋の回転と上下部構造の大変位で桁落下	(C), D	88-89	30)
2008年 岩手・宮城内陸地震	原田橋	1/1	単径間 斜角あり	橋台の破壊により落橋	A	90-91	31), 32)
	祭時大橋	3/3	3径間連続非合成鋼桁橋	地山の崩壊による大変位と橋脚崩壊による 落橋	A	92-93	33), 34)
1994年 米国・ノースリッジ地震	I5/S14イタナエンジ橋	3/10	10径間RC箱桁橋, 曲線橋	RC橋脚のせん断破壊による倒壊	A	94-95	33), 34)
	Gavin Canyon橋	2/5	PC箱桁橋 + (2+2)RC箱桁橋, 斜角66°	振動位相差による大変位でヒンジ部で落下	C	96-97	35), 36), 37)
1999年 トルコ・コジャエリ地震	Arifiye橋	4/4	4径間単純PC橋, 斜角70°	断層による橋脚移動	B	98-99	38), 39)
	長庚橋	2/13	13径間PC単純5主桁橋	支承の破壊と桁の移動	C	100-101	38)
	卑豊橋	3/13	13径間RC単純桁橋	断層による地盤の隆起による橋脚の転倒	A	102-103	38)
	烏溪橋 (旧橋)	2/18	18径間PC単純5主桁橋	断層による橋脚移動	B	104-105	38)
2004年スタトウ沖大地震	石園橋 (多数)	2/3 (多数)	3径間RC単純1桁橋, 斜角55°~85° 単純桁橋	断層による橋脚移動 津波による流失	B E	106-111	40)
	百花大橋	4/9	(2+3+4)連続PCスラブ橋	橋脚の倒壊による落橋	A	112-113	41)
2008年中国・四川地震	廟子坪橋	1/18	2径間連続PCT桁+3径間連続PCラマ橋 +(5+4+4)径間連続PCT桁	下部構造の変位と上部構造の応答による 桁落下	(B), C	114-115	42)
	小魚洞橋	3/4	4径間連続方柱ラーメン橋	下部構造の破壊により落橋	A	116-117	42)
	井田坝大橋	2/2	2径間RCアーチ橋	下部構造の破壊により落橋	A	118-119	43)
	紅東大橋	不明	RCアーチ橋 (径間数不明)	下部構造の破壊により落橋	A	120-121	43)
	迎春橋	1/1	無補剛石造アーチ橋	下部構造の破壊により落橋	A	122-123	43)

表 1 (3) 1891 年濃尾地震以降の墜落事例とその原因 (本報告にて追加)

地震名	橋梁名	落下径間 / 径間数	構造形式	墜落原因	シナリオ
2011年 東北地方太平洋 沖地震	鹿行大橋	3/21	21径間単純合成鋼板 桁、パイルベント橋脚	橋脚の傾斜	D
	第一前田川 橋梁	3/3	RC I型4主桁3連	橋脚のせん断損傷	A
	気仙大橋	5/5	3+2径間連続鋼鈹桁橋	津波による流出	E
	小泉大橋	6/6	3径間連続鋼鈹桁 (2 連)	津波による流出、橋脚も流出	E
	新北上大橋	1/7	下路式鋼連続トラス橋 2+2+3径間	津波による流出	E
	(多数)	(多数)	単純桁	津波による流出	E
	阿蘇大橋	5/5	単純合成鈹桁、トラス ド逆ランガー、3径間 連続非合成鈹桁	地山の崩壊による橋脚崩壊	A
2016年熊本地震	府領第一橋	3/3	PC3径間連続中空床版、 ロッキング橋脚	変位制限構造の破壊と橋軸直角方向への移動	A,D
	田中橋	3/3	3径間連続RC T桁	地盤変状による下部構造崩壊	A
	戸下大橋	2/18	単純PCプレテンT桁、 単純PCプレテン中空 床版	地山の崩壊による橋脚倒壊	A
	鵜飼大橋	3/3	3径間単純PC桁、斜橋、 パイルベント橋脚	歩道橋部の墜落、変位拘束構造なし? 橋脚基礎の損傷	D
	酒見大橋	1/1	上部構造不明、斜橋、 パイルベント橋脚	拡幅歩道部の墜落、橋脚上部の損傷	A,D
2024年 能登半島地震					

表2 過去の被害地震による桁落下事例の被災シナリオと構造特性による
桁落下径間数の分類（国内のみ）

地震名	構造形式 橋梁名	両端橋台単純桁				複数径間単純桁				連続（連結）桁					備考
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	E	
2008年まで 国内小計		2	0	0	0	178	12 (3)	9 (2)	3	20	0	0	0 (4)	19	
2011年 東北地方太平洋 沖地震	鹿行大橋							3							
	第一前田川橋梁					3									
	気仙大橋													5	連続
	小泉大橋													6	連続
	新北上大橋													2	連続
	(多数)														多数
2016年 熊本地震	阿蘇大橋									4					
	府領第一橋									3					
	田中橋									3					
	戸下大橋									2					
2024年 能登半島地震	鵜飼大橋								3						
	酒見大橋					1(1)									
合計		2	0	0	0	182 (1)	12 (3)	9 (2)	6	32	0	0	0 (4)	多数	

()内は、複数の被害原因による落下径間数で、主たる被害原因に計上されていることを示す

表3 被災シナリオごとの落橋数と落下径間数

シナリオ	被害原因	橋数	径間数
A	下部構造が倒壊	29	216
B	下部構造が大変位	6	15
C	上部構造の橋軸方向への変位	7	11
D	上部構造の直角方向への変位	9	16
E	津波	多数	多数

表4 関東地震以降の我が国の被害地震による落橋事例と構造特性の関係(国内のみ)

地震	落橋数	構造特性(径間数)		
		両端に橋台を有する単純桁端	複数径間を有する単純桁橋	連続桁橋
1923年関東地震	6	(1)	2(35)	----
1946年南海地震	1	----	6	----
1948年福井地震	7	----	(116)	----
1955年二ツ井地震	1	----	3	----
1946年新潟地震	4	----	6(1)	----
1978年宮城県沖地震	1	----	1	----
1995年兵庫県南部地震	12	----	6(26)	4(17)
2000年鳥取県西部地震	1	(1)	----	----
2009年岩手・宮城内陸地震	1	----	----	(3)
2011年東北地方太平洋沖地震	5**	----	6	----
2016年熊本地震	4	----	----	12
2024年能登半島地震	2	----	4	----
合計	45橋	(2)	34(182)	16(20)

* シナリオB, C, Dによる落下径間数を示す。括弧内はシナリオAによる落下径間数を示す。

** 津波による単純桁橋の落橋は除外した

我が国における被災例としては、1948年の福井地震までは下部構造が倒壊したことを原因とする落橋が大多数を占めているが、これより後には上部構造や下部構造の大変位による落橋も生じている。1995年兵庫県南部地震では、下部構造の倒壊によるケースと上部構造や下部構造の大変位によるケースが同程度生じている。一方、2011年東北地方太平洋沖地震では、津波による流出が数多く発生した。2004年スマトラ沖大地震でも、津波による流出が数多く発生したが、これらの多くは単純桁橋であった。2011年東北地方太平洋沖地震では、単純桁橋以外でも、連続橋や耐震補強による落橋防止対策(変位制限装置、落橋防止ケーブル、ダンパー補強)などがなされた橋でも流出を免れなかったことが特徴的である。世界からみても強い地震動に対して設計している我が国における耐震対策が津波による流出を防げなかったことは、耐震対策と異なる津波対策が必要となることを意味している。これらを教訓として、2011年以降、橋梁の津波対策に関する研究が積極的に進められた。

表1の事例を構造形式と被災シナリオで分類し、径間数で整理したものが表2であり、被災シナリオごとの橋数と径間数にまとめた結果が表3である。これらによれば、桁落下の原因としては、下部構造の倒壊(シナリオA)が圧倒的に多い。次いで多いのが、津波を原因とするケースである。下部構造や上部構造の大変位に起因する落橋(シナリオB~D)はそれぞれ径間数にして全体の10%以下と多くはない。

表 4 は、我が国で地震により桁落下が生じた事例を構造形式ごとに整理した結果である。表 4 によれば、桁落下は複数径間を有する単純桁橋に多く生じている。ただし、200 を超える落下径間のうちの 90% 近くは、下部構造の倒壊が原因である。一方、近年の地震では、連続桁・連結桁形式の橋梁において、2008 年の岩手・宮城内陸地震において 1 橋、2016 年熊本地震では 4 橋が下部構造の倒壊で落橋しているが、これらは橋台・橋脚が設置された周辺地盤の崩壊が原因である。近年の耐震対策の進展により、単純な下部構造の倒壊による事例は減少傾向にあり、周辺地盤の崩壊による連続橋の桁落下が目立つようになってきたともいえる。

2. 落橋を防止する対策

1891(明治 24) 年濃尾地震から現在までの地震による墜落原因は主に液状化、主鉄筋段落とし部でのせん断破壊、鋼製橋脚の座屈、斜橋・曲線橋の回転、支承の破壊、ロッキング橋脚などの特殊橋梁の被災、地盤変状、損傷後の被災等が挙げられる。本章では、これらに起因する墜落を防止するための対策法の変遷および現状をまとめ、対策がなされていないものに対しては今後どのような方向で対策を考えていくべきかを述べる。

(a) 危機耐性と危機としての強震動

構造物の危機耐性を考えるにあたり、その危機として、想定と異なる強震動についてどのように考えられているかを整理する。

2012 (平成 24) 年に改定された鉄道構造物等設計標準・耐震設計編(以下、耐震標準)では、L2 地震動を“最大級の地震動”と定義しており、物理的に発生可能な最大の地震動ではなく、高度な工学的判断により設定することとしている。また、設計で考慮する L2 地震動を超える地震動の発生を否定していない。2011 (平成 23) 年東北地方太平洋沖地震以降は、想定を超えた地震に対してどう対応すべきか、ということが重要な関心事項になっており、耐震標準では、設計で考慮している限界状態を超える可能性を否定せず、このような不測の事態への「配慮」を求めている。これが危機耐性である⁷⁾。

また、作用した地震動がレベル 2 以下の場合でも、地滑り等、設計時に想定していなかった挙動が連動することで、結果としてレベル 2 地震動よりも多大な作用が構造物に生じる可能性も考えられる⁸⁾。

(b) 液状化による橋脚傾斜に対する対策

1964 (昭和 39) 年新潟地震までは、基礎構造物の沈下、移動、傾斜・転倒によって橋脚や橋台が倒壊した結果、墜落した例がほとんどであった。軟弱粘性土のすべりや、支持力不足のほか、当時はまだ知られていなかった液状化や流動化によって生じた被害である⁹⁾。

新潟地震から 7 年後の 1971 (昭和 46) 年、液状化しやすい地盤の判定法と落橋防止構造を取り入れた基準がまとめられたが、これは液状化に対する世界初の規定であった。落橋防止対策の内容としては可動支承部における移動制限装置と桁かかり長の確保、また落橋防止構造(桁間連結装置)の導入が規定された¹⁰⁾。

この規定以降、順次、液状化の判定法や液状化の度合いに応じた地盤ばねの評価方法が改良され、基礎構造物の設計法・施工法が大きく改善されることによって液状化による墜落は確実に減少していった。1964 (昭和 39) 年より後の地震では、落橋原因に液状化を含む事例は西宮港大橋アプローチ橋のみである。

(c) 脆性的な橋脚破壊に対する対策

主鉄筋段落とし部でのせん断破壊に対する対策

基礎構造物が大きく改善され、液状化などの被害が減ってきた結果、水平力が橋脚に伝達されるようになり、橋脚の破壊が深刻になってきた。兵庫県南部地震では主鉄筋段落とし部でせん断破壊が生じ、大きな被害が生じた^{11), 12)}。

1990（平成2）年に地震時保有耐力法（残留変位の制約のもとで変形性能に富んだ構造物を造ろうとする）が導入されたことからわかるように、当時の耐震設計においても、ねばりのある曲げ破壊を誘導して構造物の靱性によってエネルギーを吸収し、せん断破壊に対して十分な余裕を持たせることが重要だと認識されつつあった¹³⁾。しかし、実際に架設済みの橋梁に関してはせん断破壊を防ぐための帯鉄筋の量が圧倒的に不足していた。兵庫県南部地震以降、コアコンクリートの横拘束や主鉄筋の座屈拘束のために必要な帯鉄筋量は、それまでの3倍以上となっている^{14), 15)}。また、橋梁についても耐力や変形性能を高めるためRC巻き立てなどの耐震補強が順次行われている。この耐震補強の成果は熊本地震で確認されており、耐震補強された橋梁では、損傷が限定的なものとなっている。それに対し、耐震補強未実施の場合では、橋脚基部の段落とし部に損傷がみられた¹⁶⁾。

鋼製橋脚の座屈に対する対策

1995（平成7）年兵庫県南部地震では他にも鋼製橋脚の座屈によって上部構造が沈下し、実質的に墜落した被害が発生した。水平方向の地震力によって橋脚に曲げモーメントが作用し、これによって交互に引張力と圧縮力を受けた結果、鋼板が降伏し座屈が生じた。この時代の設計では、鋼板の座屈を防止するためには鋼板が薄すぎたといえる。

具体的な対策としては矩形断面であれば角部に補強材を高力ボルトで取り付ける方法、円形断面であれば母材板厚の1/2程度の隙間を空けて鋼板を巻きたてる補強法が、それぞれ耐力を上げずに変形能を向上させるのに有効である。アンカー部の耐力が十分である場合はどちらもコンクリートを充填するのがよい¹⁷⁾。

兵庫県南部地震以降、これらの対策が講じられたこともあり、鋼製橋脚の座屈による墜落被害は生じていない。

(d) 支承の破壊に対する対策

上部工が下部工から墜落する際には支承が壊れていることが多い。支承はもともと小さい構造で大きな構造を支えているため水平力が集中すると破壊されやすいが、兵庫県南部地震において、地震動の強かった地域ではほとんどすべての金属支承が被害を受けた¹¹⁾。

これを受けて兵庫県南部地震以降の対策としては、積層ゴム支承などの免震支承の推奨と落橋防止システムの大幅な見直しがなされた。

積層ゴム系支承は長周期化とエネルギー吸収能力を有し、地震の揺れを大きく軽減す

るために有効な比較的新しい耐震技術であるが、東日本大震災及び熊本地震において破断したものがいくつか見られた。これは、積層ゴム系支承は引張力の作用下において、耐力や変形性能が小さくなってしまふことが原因であった⁹⁾。そのため水平方向だけでなく上下方向にも大きく、複雑な揺れ方をする橋において積層ゴム支承を設置する際には、十分な検討が必要であるといえる。

また、支承が破壊されると、墜落せずとも余震などによる墜落の可能性が非常に高くなる。加えて、支承は上下部構造の間にあり、簡単に復旧することができない。そのため、避難や消火活動、緊急物資が求められる地震直後にこそ橋が重要だという現実を考慮すると、壊れにくい支承を開発することが大事である。

しかし、支承は損傷しやすい構造であるため、損傷することを前提とした対策も必要となる。我が国では、1971（昭和46）年に初めて落橋防止対策の規定がなされ¹⁰⁾、そして1995（平成7）年の兵庫県南部地震における内陸直下型地震による都市高架橋の甚大な被害を受けて、1996（平成8）年改定の道路橋示方書V耐震設計編¹⁵⁾で落橋防止システムに作用する水平力はレベル1地震動の1.5倍から3倍に強化された。熊本地震ではロッキング橋脚を有する府領第一橋以外では支承の破壊による墜落は発生しておらず¹⁶⁾、落橋防止システムの設置効果はあったことが確認できた。しかし、墜落には至っていないものの設計時の想定と異なる事象により、本来の落橋防止構造の機能を果たすことが出来なかった事例がいくつかあった。例えば、南阿蘇橋では、耐震補強のために設置された変位制限構造が下部構造との接続部で損傷し、当該変位制限構造に取り付けられていた制震ダンパーが機能しない状態に至った¹⁸⁾。今後、現状の落橋防止システムの構造詳細について再考していくべきである。

(e) 斜橋・曲線橋の回転に対する対策

斜橋・曲線橋の回転による墜落は1995（平成7）年阪神・淡路大震災で3ケース見られるとともに、主要因かは判明していないものの2024（令和6）年能登半島地震でも斜橋（歩道部）の墜落が発生した。斜橋の端部が橋台や隣の桁と衝突したとき、衝突による反力が斜橋を回転させる向きに作用することが原因であり、橋軸直角方向へ橋桁が移動してしまう。

1971（昭和46）年に初めて落橋防止構造が耐震技術の中に取り入れられたが、いずれも橋軸方向に対する対策であった¹⁰⁾。1978（昭和53）年宮城県地震における錦桜橋の墜落を踏まえてさらに落橋防止構造に関する規定は改定されたが、同様に橋軸方向を強く意識していたものであった¹⁹⁾。橋軸直角方向は十分に桁かかり長があり、墜落可能性は比較的低いと考えられていたため後回しにされたのだった。

1990（平成2）年の道路橋示方書V耐震設計編¹⁴⁾で初めて桁かかり長の解説に斜橋の例が取り上げられ、橋軸直角方向の振動に留意すべきであることが示唆された。また、阪神淡路大震災での被害を受けて、橋軸直角方向の変位制限構造の重要性が認識され、

それに応じて規定も変化してきた。

2016（平成 28）年熊本地震では木山川橋や扇の坂橋など横変位拘束構造が破壊されつつも、墜落には至らなかった斜橋がいくつか見られた^{16), 20)}。そもそも設計上の想定と異なる事象に対するフェールセーフであることから、設計地震力より大きな作用とはいえ、挙動が不定、あるいはせん断破壊のように機能を急激に失う状態になることについて、議論が必要である。

(f) ロッキング橋脚およびパイルベント橋脚に対する対策

兵庫県南部地震及び熊本地震でロッキング橋脚を有する構造が墜落した。ロッキング橋脚は、単独では自立できず、変位が生じると不安定状態となる特殊な構造（上下端ピボット支承によるヒンジ構造）であり、支承部や横変位拘束構造等の部分的な破壊が墜落・倒壊等の致命的な被害につながる可能性が高い。そのため、兵庫県南部地震以降早急に対策がなされるべきであったにも関わらず、再度ロッキング橋脚の被害が発生してしまったことは深く反省すべき点である。今後の方針としてはロッキング機構が採用された橋梁をなくすため、RC 橋脚巻き立てによる壁化と支承の剛結化や、対象がピボット支承の場合には、逸脱防止構造を設置するなどの対策が行われている。

また、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2024 年能登半島地震など、近年の地震でも、パイルベント橋脚を有する橋梁で、下部構造の傾斜や損傷により桁の墜落が発生している。パイルベント橋脚は不静定構造とはいえ、建設年次の古い橋梁に多いため、柱自体の耐力や接合部、また基礎地盤部に弱点は否めないため、耐震対策が急務である。

(g) 地形変動に対する対策

耐震補強等によって他の原因による墜落が減少してきたため、兵庫県南部地震より後の墜落原因の 5 割近くが地形変動となっている。構造以外からのアプローチも含めるのであれば、地盤調査などにより斜面崩壊の有無・規模・範囲を特定することにより事前に防ぐ方法はあったが、構造的な対策は、熊本地震以前まではなかった。

しかし、熊本地震でこの地形変動に対する対策の大きなヒントが得られた。阿蘇大橋と戸下大橋の 2 橋が斜面崩壊により墜落に至った一方、阿蘇大橋近辺で戸下大橋と同じ路線にある阿蘇長陽大橋は斜面変状の影響により橋台の沈下が生じたが、橋本体は自立し、大きな損傷を生じなかった（図 2）²¹⁾。この橋は張り出し施工によって架設されたラーメン橋であり、橋台による支持を失っても自立していた。



図2 阿蘇長陽大橋の橋台部被害と片持ち梁となった桁

今後、地形変動の可能性が考えられる地点での架設の際は、地盤調査による斜面崩壊の規模の推定をもとに、橋脚・橋台の消失が直接墜落につながらない構造形式及び施工方法を選定すること、下部構造の設置位置、形式・形状を選定することが重要である。橋脚・橋台の消失が直接墜落につながらない構造形式の充実が望まれる。

(h) 損傷後の被災に対する対策

宮城県沖地震の錦桜橋や熊本地震の府領第一橋では、支承及び落橋防止構造に損傷を受け、修復される前に被災したことで墜落に至った。これらの被害は、支承及び落橋防止システムが地震時あるいは地震後にどのような性能を有するべきか、大きな課題を突き付けた。

(i) 対策のまとめ

現状、対策が有効に働き被害が大幅に減少した落橋原因は液状化、桁落下による橋脚傾斜、主鉄筋段落とし部でのせん断破壊、鋼製橋脚の座屈である。支承の破壊や斜橋・曲線橋の回転に対して落橋防止システムは、一定の効果を発揮し落橋は防止しているものの早期の復旧が困難である被害を生じており、復旧性の観点からみると改善が必要である。優先的に対策・改善が行われるべきものはロッキング橋脚など特殊橋梁、損傷後の被災であり、対策の考案が望まれるものは地盤変状についてである。耐震技術の進歩とともに被害原因は移り代わってきていると言える。対策の傾向としては、設計法の改善による部材性能の向上や支承周りに落橋防止構造などを付け加えるなどの対策がほとんどであり、主構造形式での対策があまりみられない。地形変動への対策の一例として紹介した阿蘇長陽大橋のように、橋脚が喪失することに対して主構造形式で墜落を免れるような新構造が考案され、構造形式選定選択肢が増えることが望まれる。

3. 耐震性能を考慮した構造デザイン思想

1) 剛構造

1923（大正 12）年関東大震災において、アメリカ式の鉄骨造である郵船ビルが大きな変形のために仕上げ材や設備配管が壊滅的な打撃を受けたのに対し、耐震壁が内部に組み込まれているばかりでなく、鉄骨を鉄筋コンクリートで被覆した日本興業銀行は関東大震災に耐えた。

大きな変形が発生する鉄骨造やアメリカ型の地震を考慮しない構築物の破壊を教訓に、柱・梁を剛に緊結すると同時に耐震壁や筋違を用いて構造物の強度を高め、変形をできるだけ抑える剛構造の信頼が高まった。一方、真島健三郎は構造に十分な変形性能を与える柔構造の有用性を主張し、柔剛論争と呼ばれる論争も繰り広げられた。共に「地震の周期と建物の固有周期を離す」ことを目標にしていたが、当時は佐野利器・武藤清らによる剛構造派の主張が広く受け入れられ、大震災の翌年、「市街地建築物法」が改正され、佐野利器博士が 1914 年に提唱した「震度法」に基づく日本初の「耐震規定」が誕生した。

2) 柔構造

関東大震災当時、武藤清は「関東大震災の地震の周期は 1 秒程度であると言われていたが、主要動の後半には周期 2、3 秒程度の波があり、柔構造で設計をすればその波と共振を起し危険である。」と主張していたが、昭和 40 年代頃には強震計による記録が数多く得られるようになり、その周期特性も分析可能となっており、武藤が設計を担当した 1968（昭和 43）年に竣工した霞が関ビルディング（36 階建・高さ 147m）は、柔構造の思想による日本初の超高層ビルであった。科学技術・地震観測の進展が新しい構造デザイン思想を実現した事例とも言える。

免震構造は、積層ゴム支承により構築物の固有周期を地震動の卓越周期より長くするとともに、エネルギー吸収性能を付与することにより過大な変位を押さえようとする技術であり、その技術開発は 1980 年代より進められていたが、阪神・淡路大震災により免震構造の効果が確認された事例があったことなどから、その採用が進められるようになった。

制震構造とは、地震応答を制御するような性質を建築物に与えることであり、小堀ら²⁴⁾が制震構造を提唱した際、条件として次の 4 つを挙げた。①地震動のエネルギー伝達経路自体を遮断する。②地震のもつ振動数帯から制震系の固有振動数帯を isolate する。③非線形特性を与えて非定常非共振系とする。④エネルギー吸収機構を利用する。現在の免震構造の究極の姿は上記①であるが可能ではないため、振動系の長周期化を図り一次共振をかかずという意味で②に依存し、④を援用している。柔構造は固い地盤に基礎を置く構築物を念頭においているという意味で、比較的短周期成分の帯域を含む地震動を想定しているが、制震構造は、地震動そのものが極めて不明確で分からないとい

う前提に立ち、そのために地震応答をコントロールするという性質を構造物に積極的に与えることを目的としている。

3) 鈍構造

現在の耐震工学は、耐震・免震・制震という技術を核とする体系を築き上げ、発展してきた。それぞれの体系の枠内で積み重ねてこられた検討により、それぞれの分野のその知識は深まってきた一方で、その枠組みが壁となり、分野間の交流が阻害されてきたことも事実である。科学史家である Kuhn は、科学の飛躍的な進展は、時代の背景とともに、既存の体系の枠組みからはみ出した新しい発想・発見によるものであることを指摘し、これを新しいパラダイムの形成と呼んだ²⁵⁾。耐震工学において、大震災が新しいパラダイムの形成の要因となることは少なくない。1923 年関東大震災を期に確立した震度法や剛構造、1995 年阪神大震災を期にその利用が進んだ免制震構造（柔構造）が挙げられるが、2011 年東日本大震災を期に生まれるパラダイムとして、高橋^{26), 27), 29)}は地震作用に鈍感な構造（鈍構造）の形成による既存枠組みの再構築を提案している。鈍構造とは、地震作用の不確定性を認識した上で、その特性が想定と異なったとしても、構造物が提供する機能の損失に対して鈍感な構造と定義している。これは機能の一時的な損失は許容しているということと、不確定性にかかわらず、構造物の地震時挙動が定性的に確定的であること（せん断破壊しないことや落橋防止システムが破壊しないなど）を本質としている。

鈍構造を実現するための方法論として、材料／構造制御技術／構造形態／構造計画・設計からの観点に分類し、その特徴を整理している。①材料からのアプローチとは、外力の不確定幅を圧倒する性能を保有させるため、材料技術による超弾性構造を目指す方法と、自己修復型材料などにより損傷しても機能を失うほどの大事にいたらないことを目指す方法などがある。②構造制御技術からのアプローチは、免制震技術による方法、③構造形態からのアプローチとは、横向き・繰り返し・動的などの地震荷重に対する構造的骨格を考えることにより、新しい構造形態を生み出すことによる方法である。そして、④構造計画・設計からのアプローチは、旧来と同じ技術を用いたとしても、計画・設計で設定する計画理念・設計目標（性能）の設定によって、鈍構造を目指そうというものである。その性能指標の例として、「入力卓越振動数が変動しても応答の特性の変動が小さくなること」を応答改善効果として提案し、構造物の振動特性をうまく不均質にすることで、その系の全体の応答は小さくなる場合があり、その効果は、自由度を上げることにより、高次モードが励起しやすくなることで、より顕著にみられることを解析的に示している²⁸⁾。

4. 鈍感性の観点による落橋防止対策の整理

(a) 鈍感性 (Robustness)

Robustness とは、一般的には、ある系が応力や環境の変化といった外乱の影響によって変化することを阻止する内的な仕組み、または性質と定義され、日本語では頑健性、あるいはロバスト性とそのまま訳されることが多い。しかしながら、頑健性という訳語では、単に頑丈である、健全であるというシステムそのものに対する性質しか説明しておらず、外乱の変化にどう反応するかを記述するには不十分であると考えられる。ここでは Robustness を鈍感性と訳し、用いることにする。

例えば、建築構造設計の分野では、鈍感性は図 3 のような、冗長性とフェールセーフとの関係性の中で、2 つに分類されている²⁹⁾。図 3 の左の部分は、部材耐力などに余裕を持たせた構造がロバストであることを意味し、同様に、図 3 の中央部分は、部材を並列的に配置することで、ある部材の破壊が構造全体の崩壊に至らないような構造がロバストであることを意味している。しかし、そもそも想定外の地震に対して部材耐力を際限なく高めていくのが難しいことを受けて、危機耐性の概念が提唱されていることを考慮すると、余裕度向上を分類の中にも含めるのはふさわしくないとと言える。

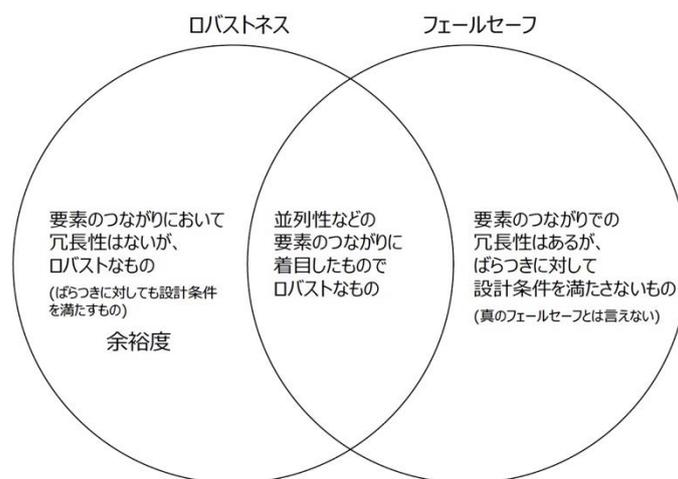


図 3 冗長性とロバスト性及びフェールセーフの関係の一例

一方、生命科学の分野では北野・竹内により、動的システムにおける鈍感性の振る舞いが紹介され(図 4)³⁰⁾、飛行機の制御システムを参考に、鈍感性を向上させるための方法が、システム制御・耐故障性向上・モジュール化・デカップリングの 4 つに分類されている³¹⁾。このうち、耐故障性向上はシステムの一部に故障が生じて他の要素がバックアップをすることで、全体として必要な機能を損なわないということの意味し、図 3 の中央部分に相当する。

本研究では、分類数が多いこと、鈍感性を向上させる方法という観点で分類されていること、危機耐性の概念と矛盾しないことを理由に、生命科学の分野での分類を採用し

た。以下では、鈍感性向上の4つの方法について簡単に説明する（図5参照）。

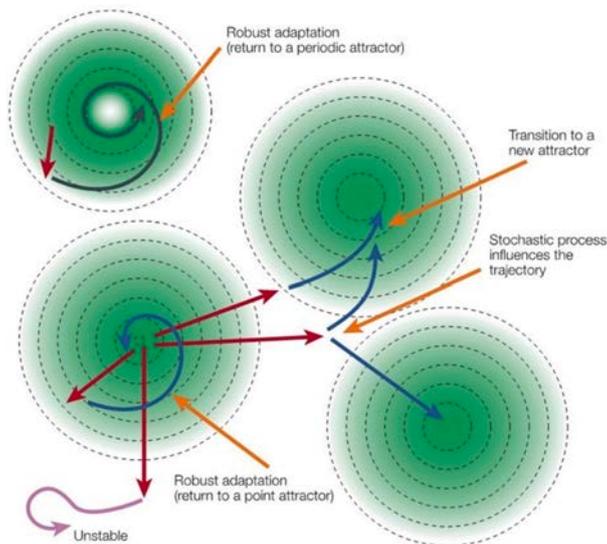


図4 システムにおける Robustness の振る舞い³⁰⁾

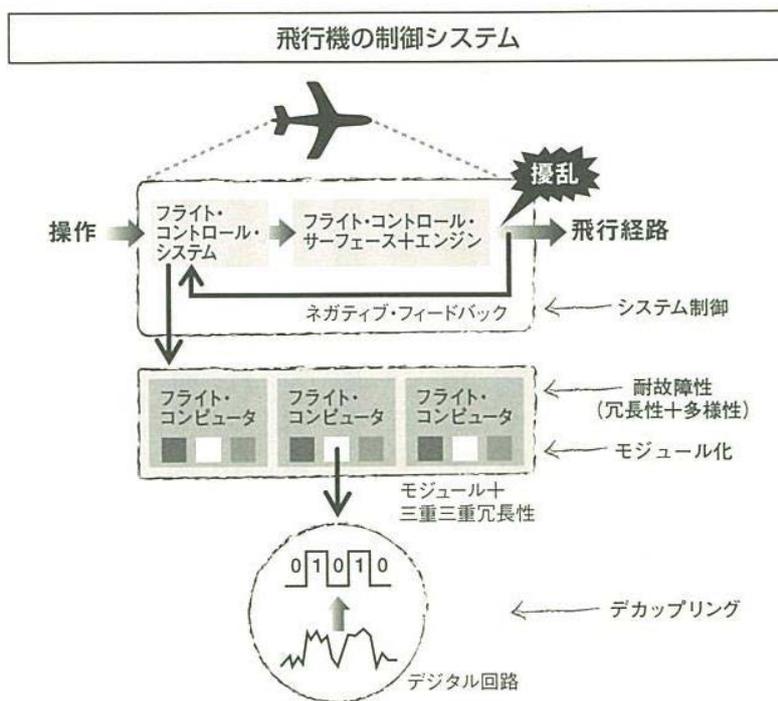


図5 飛行機の制御システムを例とした鈍感性の各要素³¹⁾

- システム制御の具体的な方法としてはフィードバック制御の中でも特にネガティブフィードバックによる制御が挙げられる。システムの状態と望まれる状態との差を、入力にフィードバックして、その差を修正する手法である。航空機では、飛行

経路を維持し、擾乱によるずれを修正するため、誤差の方向に対して反対方向に制御して元の経路へ戻るようにコンピュータ制御がなされている。

- 耐故障性機構は、1つの要素が機能しなくなることによりシステム全体が機能しなくなることがないような機構であり、冗長性と多様性から構成されている。同じような要素が沢山あり、それらがお互いにバックアップする場合に冗長性があると言う。また、全く違う構造をもった異種な要素がバックアップする場合に多様性があると言う。航空機ではバックアップのためにコンピュータが3つあるが同じ働きをする予備があるという意味では冗長性があると言う。一方、これらのコンピュータは異なる設計で作られており、三台とも同じ故障を起こす危険を回避しているという意味では多様性があると言う。
- モジュール化とは、どこかが故障したときにそれが全体に波及するのではなく、ある区分だけで被害が食い止められるような構造にすることを指す。航空機の場合はフライトコントロールコンピュータ3台は、3台とも同じ場所には置かれぬ。これにより火災がある部屋で生じたとしても、ほかのコンピュータに影響が出ないように配慮されている。
- デカップリングとは、システムの機能に直接関係がある状態から、物理的なノイズやいろいろな変動などにさらされるレベルを出来るだけ切り離すことである。例えば、電圧は物理的なノイズにさらされ、微小に値が変化するが、デジタル信号に直す際にはノイズは無視して、0と1のみで情報が表されるようになっている。つまりノイズが機能に影響を及ぼさないような配慮がなされている。

(b) 鈍感性の観点からみる橋梁の落橋対策

先に取り上げた耐墜落性を向上させるための対策についてロバストネスの観点から再整理する(図6)。

システム制御の対策だと考えられる対策は制震技術であり、特にアクティブ制震・セミアクティブ制震が対応する。構造物や地面に取り付けたセンサにより地震力を感知し、コンピュータで計算した最適な制御力をアクチュエータで構造物に与え、揺れを抑えるためである。

耐故障性向上の対策だと考えられる対策の1つは落橋防止システムである。支承が破壊された時のバックアップとして、墜落を防ぐために働くからである。内外不静定の向上も、ある部材が破壊されたとしても、冗長部材があることにより墜落を防ぐため、耐故障性向上の対策である。ガセットプレートの強化も部材の破壊に対して墜落を防ぐため、耐故障性向上の対策である。これらの対策により冗長性が向上するが、これらを組み合わせて、墜落を防ぐメカニズムを多様にするすることで、1つの原因で墜落に至る可能性を大きく減らすことができる。冗長な部材を増やすだけでなく、異なる工法を用いて部分的破損に対する安全度を高める多様性の観点による耐故障性向上策は重要である。

モジュール化の1つと考えられるのは、帯鉄筋量の増加及び主鉄筋段落とし部の位置を高くすることである。橋脚にせん断破壊が起きるのを防ぎ、曲げ破壊を誘導することで損傷位置を塑性ヒンジ部に限定するためである。また支承をヒューズとして捉え、上部構造に被害が及ばないように設計することもモジュール化だと言える。つまり、部材の非線形挙動を積極的に利用することは、接続する部材に降伏力以上の力を伝達しないという意味で、モジュール化であると言えるが、設計であらかじめ支承ヒューズ機構として考慮しておかないと、単なる支承の破壊に過ぎないことに注意が必要である。

デカップリングと考えられる対策の1つは免震支承である。もともと地盤の揺れから構造物を切り離そうという概念から生まれた対策であり、構造物の固有周期を地震動の卓越周期から離し、共振をさけているためデカップリングと考えられる。帯鉄筋量の増加および主鉄筋段落とし部の位置を高くするもしくはなくすこともデカップリングとみなせる。橋脚基部に曲げ破壊を誘導し、エネルギー吸収と長周期化により地震の揺れを低減し、機能に影響を及ぼさないように図られるためである。

また、危機耐性の役割は、不安定化させないために、積極的に次善の安定領域に移行するようなポジティブフィードバックと見ることもできる³²⁾ (図7)。

鈍感性向上の4つの異なる観点で分類を行うことで、土木橋梁分野において新たな考えが生まれる可能性を期待する。

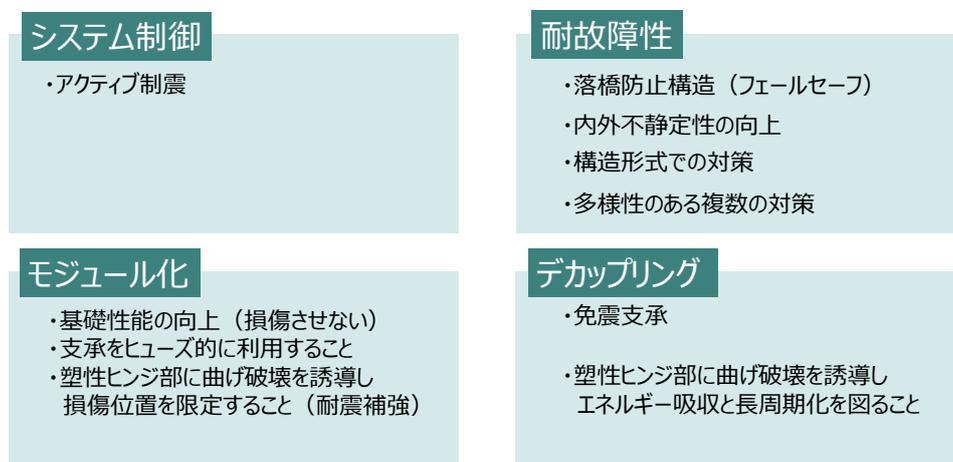


図6 墜落原因に対する対策をロバストネス（鈍感性）を高めるための4要素に分類

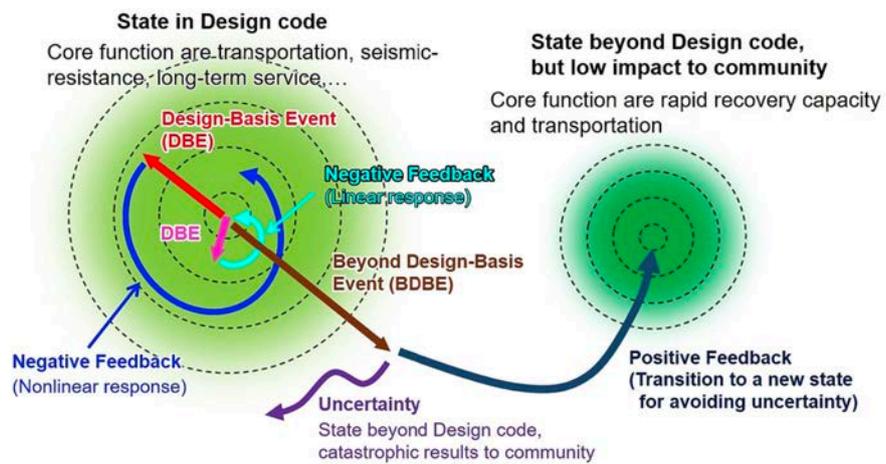


図7 危機耐性設計のコンセプト³²⁾

5. 落橋防止対策のその先へ（性能と機能との関連）

(a) 越境しあうインフラガバナンス

気候変動により災害発生メカニズムが変化するとともに、人口減少や少子高齢化などにより社会も変化し、ウェルビーイングの解釈も時代と共に変化する中で、インフラストラクチャー（インフラ）に対する要請も変化しつつある。デジタル化など最新の技術革新の成果を採り入れたインフラの整備・更新戦略は、国土、都市・地域社会の再生・発展の先導役を果たす。日本学術会議土木工学・建築学委員会インフラ高度化分科会は、インフラの価値を高め、高度化するために推進すべき見解「越境しあうインフラガバナンス」を发出している³³⁾。ここでは、「国民の安全と安心の確保」に加え、「ウェルビーイングを実現できる社会の構築」をアウトカムとして現在のインフラを俯瞰すると、インフラの計画論と設計論、各種マネジメント論の間などに、深刻なギャップが存在していることを指摘し、インフラ管理への多くの利害関係者の参加や計画論と設計論のシームレス化が進む中で、様々なインフラが提供する機能は相互補完的であることを踏まえ、自律分散型インフラのシステム（System of Systems）を対象として、個別インフラの境界を互いに越境しあうことが求められるとともに、ウェルビーイングの観点から導出されるサービスに関する議論と、科学技術的検討の結果として導出される性能に関する議論を包摂する検討が必要となることを指摘している。

社会におけるウェルビーイングの観点から導出されるインフラサービスに関する議論と自然科学・技術的検討の結果として導出されるインフラ構造性能に関する議論は、機能という定性的概念でゆるやかに接続しながらも分断されており、設計論と計画論のオーバーラップが拡大する現在、両者を包摂する議論、共通言語が必要である。設計論における構造性能（Structural Performance）と計画論におけるサービス水準などの業績（Performance）は、ともに定量的なパフォーマンスであるため、構造性能を構造的インフラ性能、サービス水準を社会的インフラ性能と定義し、これらを統合した「インフラ性能」という概念は、従来の計画論と設計論の間のギャップを埋めるインターフェース（共通言語）になる可能性がある。図8は、計画論における各要素間の関係性を明示したものである。ここでは、インフラの有形財として「施設」を、インフラの無形財として「機能」を配置させている。そして、「人間活動」がインフラを利用し、そのサービスを楽しむという関係性を図示している。ここで、「施設」と「機能」をインフラ性能という定量的概念で結ぶことで、構造性能とサービスを関係させ、設計論と計画論の議論を連携させることが可能となる（図9）。

東日本大震災を教訓に、耐震工学者が「想定と異なる災害が生じて、社会が壊滅的な状況に陥らないための構造設計上の配慮」をインフラ施設に求める機能として危機耐性と名付けて提案しているが、これは構造性能水準と社会へのサービス水準を結びつけようとする試みの一つともいえる。しかしながら現状では、定量化できる構造性能化する

るための知見が限られていることに加え、これと非常時におけるサービス水準とが関連づけられていない課題がある。構造的インフラ性能と社会的インフラ性能を相関づけるためには、自然科学・技術的検討と社会科学的検討の間のギャップを越える必要があり、『社会的問題を解決するための課題を科学的手法により発見するという学術分野を「社会的期待発見研究」と定めて、「知の統合」として推進すべきである。』という日本学術会議の提言³⁴⁾における課題と同様に取り組みねばならない。

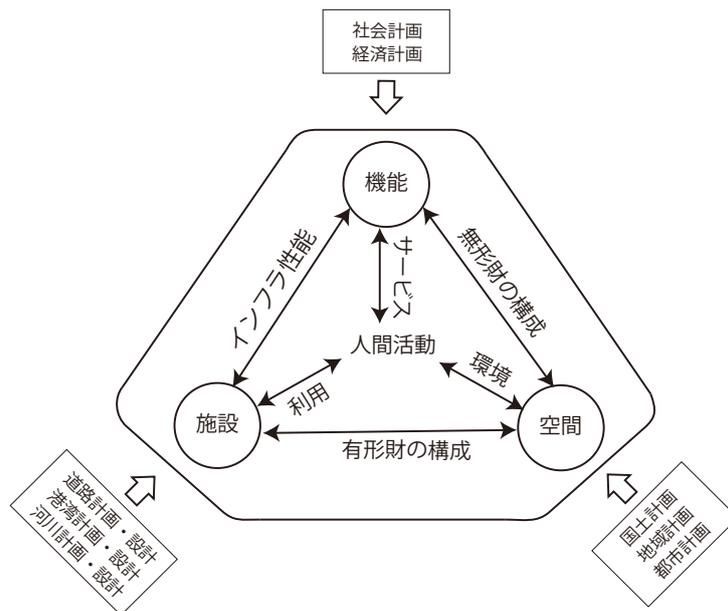


図 8 人間活動に関わるインフラと各要素におけるインターフェース³¹⁾

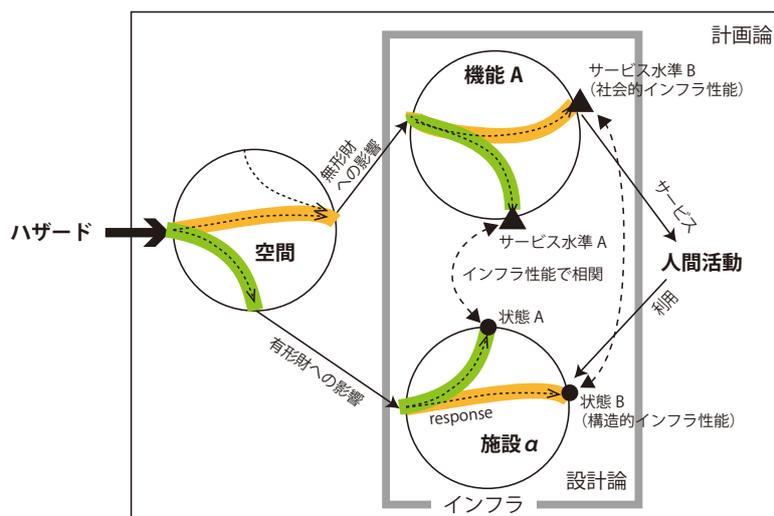


図 9 インフラ性能の導入による計画論と設計論の包摂³¹⁾

(b) 2024年能登半島地震の教訓

能登半島地震の被災現場では、範囲が広いため耐震対策があまり進んでいなかった土構造物（盛り土、切り土など）での被害が目立つ。これまでは、道路ネットワークの弱点部となる橋梁など道路構造物の耐震対策を重要視し、土構造物は早期復旧が可能と考えられ、橋梁ほど対策が進んでいなかった。対策自体も自然が相手で難しい。こうした課題が顕在化してしまった。

道路構造物の耐震対策は橋脚が中心だった。一方、橋台やアプローチ部といった橋梁と道路の境界の構造物は、橋脚ほど耐震対策の議論が進んでいなかった。橋脚や橋梁自体が耐震化されたため、アプローチ部の被害が目立つようになってきた。実際に能登の被災地でもこのような傾向が出ている。調査した範囲内だが、橋脚自体が破損したのは烏川大橋（石川県珠洲市）くらいで、橋梁躯体に大きな損傷がない橋が多い。しかしアプローチ部で段差が発生し、通行不能になってしまった。

地震動自体は阪神・淡路大震災に匹敵する強烈なもので、対策された構造物でも被害を受けるレベルである。橋脚が損傷した橋梁も、壊滅的な破壊を起こさず、設計想定通りだったと言えるが、道路網は土砂崩れ、路盤崩壊によって寸断された。

非常時でもインフラのサービスレベルをどう維持するかが問われている。キーワードは「つなぐ」。例えば道路構造物の場合、橋梁の耐震性などの「性能」と、交通といった「機能」をどうつなげていくかが重要である。構造物の対策だけが効果を発揮しても、ネットワーク全体が機能しなくては意味がない。道路構造、道路計画の二つの専門分野をどうつなげ、連携させていくかを考えていかなければいけない。

道路だけでなく、他のインフラともつなげていかなければならない。さまざまなインフラ間でどんなガバナンスを構築していくかが今後重要になる。

道路網全体を考えるには専門分野が接続し、境界をなくしていく努力が必要だと強く感じている。道路をネットワークとして改めて捉え直し、土工と橋梁などさまざまな分野を総合的につないでいかななくてはならない。部位部材、材料で分かれている分野と異なり、耐震工学は作用でつながっている分野であるからこそ、他の各分野をつなげる横串になり得る分野である。道路サービスにとって最も致命的な被害となる落橋の事例が少なくなってきたからこそ、道路の構造性能と道路サービスとの関連を構築するとともに、構造・地盤・計画分野の協働を積極的に進めるステージにあることを強く意識しなければならない。

参考文献

- 1) 過去の大規模地震における落橋事例とその分析、土木研究所資料第 4158 号、2009.
- 2) 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料第 814 号、土木研究所資料第 4295 号、2014.
- 3) JR 東日本:SED -STRUCTURAL ENGINEERING DATA-, 東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物, No. 37, 2011.
- 4) 平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料第 967 号、土木研究所資料第 4359 号、2017.
- 5) 森伸一郎：令和 6 年能登半島地震緊急現地調査速報会資料、2024/01/17
- 6) 西岡英俊、渡邊健治、山栗祐樹：志賀町酒見地区道路橋幅部落橋被害、2024/1/9
- 7) 室野剛隆：危機耐性の向上-想定を超える巨大地震への対応-, 鉄道技研報告, Vol. 30, No5, pp. 1-4, 2016.
- 8) 高橋良和, 秋山充良, 片岡正次郎, 本田利器：国内外の道路橋の設計指針に見られる「危機耐性」の分析, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No4, pp. I821-I830, 2016.
- 9) 川嶋一彦：地震との戦い なぜ橋は地震に弱かったのか, 鹿島出版会, 2014.
- 10) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針, 1972.
- 11) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 1 土木構造物の被害（橋梁）, 1996.
- 12) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて, 震災復旧工事誌, 1997
- 13) 岡村甫, 前川宏一, 小沢一雅, 大内雅博：コンクリート橋脚の被害の特徴 pp11-19. 土木学会阪神淡路大震災特集, 1995.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編, 1990.
- 15) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編, 1996.
- 16) 日本橋梁建設協会：熊本地震橋梁被害調査報告書, pp61. 2016.
- 17) 池田学, 小野潔, 豊岡亮洋：鋼製橋脚の耐震補強事例, 第 12 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp. 61-72, 2009.
- 18) 土木研究所:平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告, 土研資料, 4359, pp225-337, 2017.
- 19) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編, 1980.
- 20) 高橋良和：2016 年熊本地震における木山川橋の被害分析, 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. 169-176, 2016.
- 21) 国土技術政策総合研究所：熊本地震による道路構造物の被害と復旧への技術的支援, 2016
- 22) 土木学会編, 大正 12 年関東大地震震害調査報告書, 1926, 1927
- 23) 井上豊：免震建築物の地震応答観測記録(その 6) ビルディングレター 1995. 4 より

- 24) 小堀鐸二・南井良一郎：制震系の解析（制震構造に関する研究1），日本建築学会論文報告集，Vol. 66，1960. 10.
- 25) Kuhn, T., *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, 1962. (中山茂訳：科学革命の構造，みすず書房，1971)
- 26) 高橋良和：パラダイムシフトとしての鈍構造の提案と橋梁構造システムへの提案，第14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. 29-32，2011.
- 27) 高橋良和・山崎伸介・野呂直以：支承部特性を変化させることによる鈍構造実現に向けた基礎的検討，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. 283-286，2012.
- 28) 高橋良和・日高拳：不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略としての鈍構造の提案とその適用事例に関する一考察，土木学会論文集 A1，Vol. 70，No. 4，pp. I_535-I_544，2014.
- 29) 日本建築学会：建築構造設計における冗長性とロバスト性，pp. 1-10，2013.
- 30) 北野宏明，竹内薫：したたかな生命 pp36-73，ダイヤモンド社，2007.
- 31) Kitano H. Biological Robustness. *Nat Rev Genet* 2004;5:826-37. <https://doi.org/10.1038/nrg1471>.
- 32) Keita Uemura, Kento Goto, Shinya Yamamoto, Yoshikazu Takahashi : Development of reinforced concrete column with embedded concrete hinge and lateral restraints for Anti-Catastrophe oriented design, *Engineering Structures*, No. 296, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116903>.
- 33) 日本学術会議 土木工学・建築学委員会インフラ高度化分科会：越境しあうインフラガバナンスを実現するために、2023. 9. 26.
- 34) 日本学術会議 社会のための学術としての「知の統合」推進委員会、提言「社会のための学術としての「知の統合」—その具現に向けて—」、2011. 8. 19.

参考資料 過去の大規模な地震による落橋事例集

本資料は、土研資料第 4158 号「過去の大規模地震における落橋事例とその分析」以降に発生した地震による落橋事例（表 1(3)）の橋の詳細なデータ、被災状況をまとめたものである。被災状況の考察については、参考文献に示される内容をそのまま示すことを基本とした。

橋梁名	鹿行大橋
地震名	2011年東北地方太平洋沖地震
路線・地域	国道354号
構造形式	鋼単純合成鈹桁(21連)
橋長・支間長・幅員	橋長404.63m 支間長18.693m×4+18.80m×5+18.69m×3+18.80m×9+
支承形式	不明
橋脚及び基礎形式	パイルベント、基礎形式:鋼管杭(斜杭)
地盤	不明
竣工年度	1968(昭和43)年竣工
適用示方書・設計水平震度	S39鋼道路橋設計示方書
落橋防止構造	不明
被災形式	橋脚の傾斜(橋軸直角方向)
被災状況	

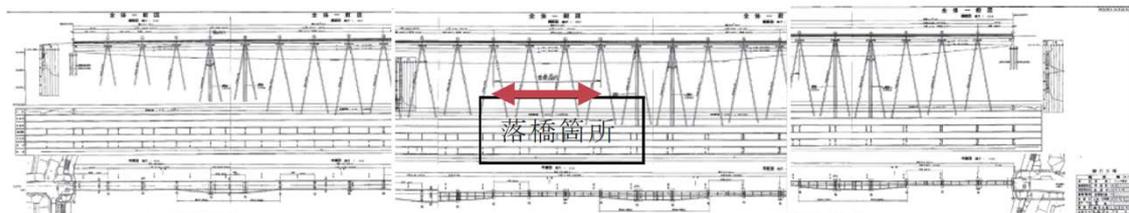
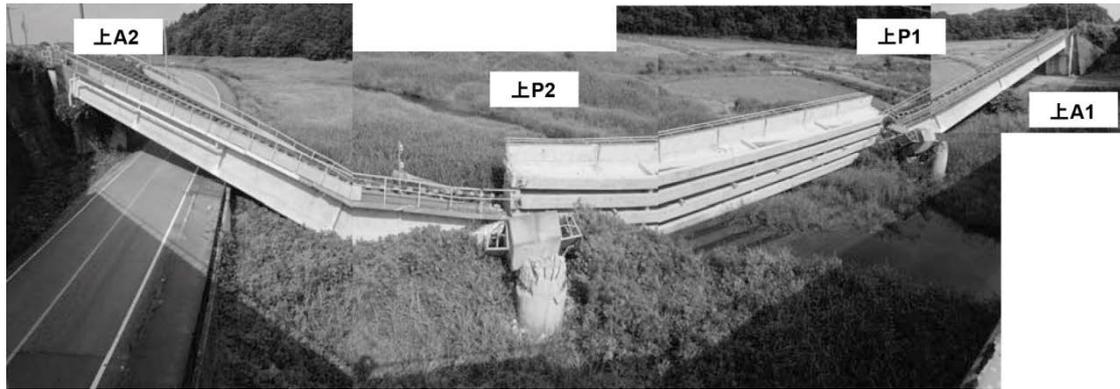


図-3.18.3.1 側面図(鹿行大橋、全体図)



主な参考文献

- 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告、国総研資料第814号、土研資料第4295号、2014.12

橋梁名	第一前田川橋梁（鉄道橋）
地震名	2011年東北地方太平洋沖地震
路線・地域	常盤線大野・双葉間
構造形式	RCI形4主桁3連
橋長・支間長・幅員	橋長96m 支間長31.3m×3
支承形式	不明
橋脚及び基礎形式	基礎形式：杭基礎
地盤	不明
竣工年度	不明
適用示方書・設計水平震度	不明
落橋防止構造	不明
被災形式	橋脚のせん断破壊による倒壊
被災状況	
主な参考文献	

橋梁名	気仙大橋
地震名	2011年東北地方太平洋沖地震
路線・地域	国道45号
構造形式	3径間連続鋼鈹桁+2径間連続鋼版桁
橋長・支間長・幅員	橋長181.5m (35.97m×3+35.97m×2)
支承形式	ゴム支承、ダンパー
橋脚及び基礎形式	控え壁式橋台、RC壁式橋脚、鋼杭基礎
地盤	不明
竣工年度	1982(昭和57)年竣工・供用
適用示方書・設計水平震度	S55道路橋示方書・同解説
落橋防止構造	コンクリートブロック+緩衝ゴム
被災形式	津波による上部工流出(ゴム支承・ダンパー破断)
被災状況	

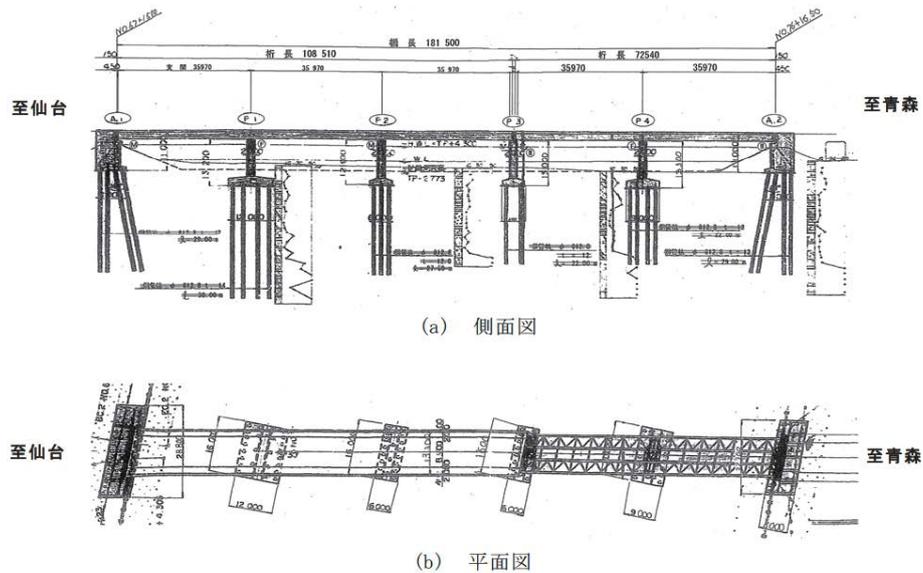


図-3.4.22.1(1) 橋梁一般図(気仙大橋)



写真-3.4.22.3 橋の流出状況の空中写真
(東北地方整備局より、平成22年3月19日撮影)



写真-3.4.22.6 流出した上部構造の状況



写真-3.4.22.11 A2 橋台沓座面の状況



写真-3.4.22.12 A2 橋台下流側支承の損傷状況



写真-3.4.22.29 P4 橋脚のダンパー
(左：下流側、右：上流側)



写真-3.4.22.30 P3 橋脚のダンパー
(左：下流側、右：上流側)



写真-3.4.22.31 P2 橋脚のダンパー
(左：下流側、右：上流側)



写真-3.4.22.32 P1 橋脚のダンパー
(左：下流側、右：上流側)

主な参考文献

- 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告、国総研資料第 814 号、土研資料第 4295 号、2014.12

橋梁名	小泉大橋
地震名	2011年東北地方太平洋沖地震
路線・地域	国道45号
構造形式	3径間連続鋼鈹桁(2連)
橋長・支間長・幅員	橋長182.1m(30.1m×3+30.1m×3)
支承形式	BP支承、ダンパー
橋脚及び基礎形式	逆T式橋台、小判型RC張出し式橋脚、鋼管杭基礎
地盤	不明
竣工年度	1975(昭和50)年竣工・供用
適用示方書・設計水平震度	S48道路橋示方書・同解説
落橋防止構造	不明
被災形式	津波による上部工、橋脚流出(ダンパー破断)
被災状況	

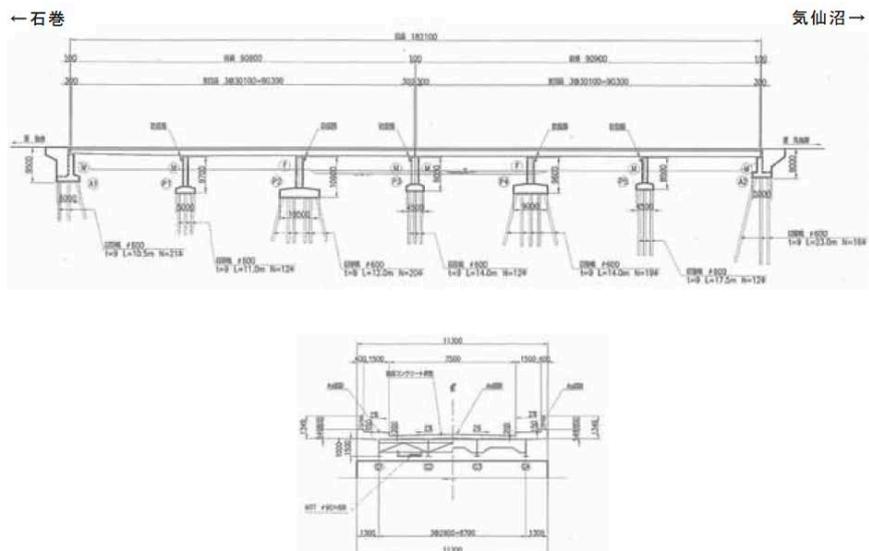


図-3.4.23.1 小泉大橋側面図(上)及び断面図(下)



写真-3.4.23.2 小泉大橋及び外尾川橋周辺の航空写真
(国土交通省東北地方整備局提供、2011年3月19日(地震発生から8日後)撮影)



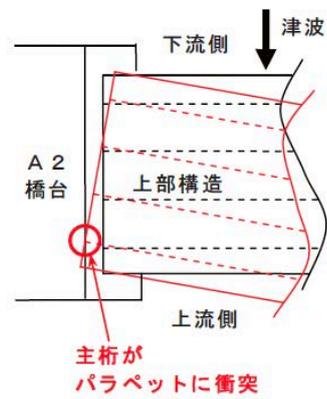
写真-3.4.23.4 流出した上部構造の状況



写真-3.4.23.5 P3橋脚の流出した位置



写真-3.4.23.11 A2橋台パラペットの損傷状況



主な参考文献

- 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告、国総研資料第 814 号、土研資料第 4295 号、2014.12

橋梁名	新北上大橋
地震名	2011年東北地方太平洋沖地震
路線・地域	国道398号
構造形式	下路式鋼連続トラス橋(2径間+2径間+3径間)
橋長・支間長・幅員	橋長565.69m
支承形式	鋼製支承
橋脚及び基礎形式	逆T式橋台, 小判型RC壁式橋脚、鋼管杭・鋼管矢板井筒基礎
地盤	不明
竣工年度	1976(昭和51)年竣工・供用
適用示方書・設計水平震度	S48道路橋示方書・同解説
落橋防止構造	変位制限構造、落橋防止ケーブル
被災形式	津波による上部工流出
被災状況	

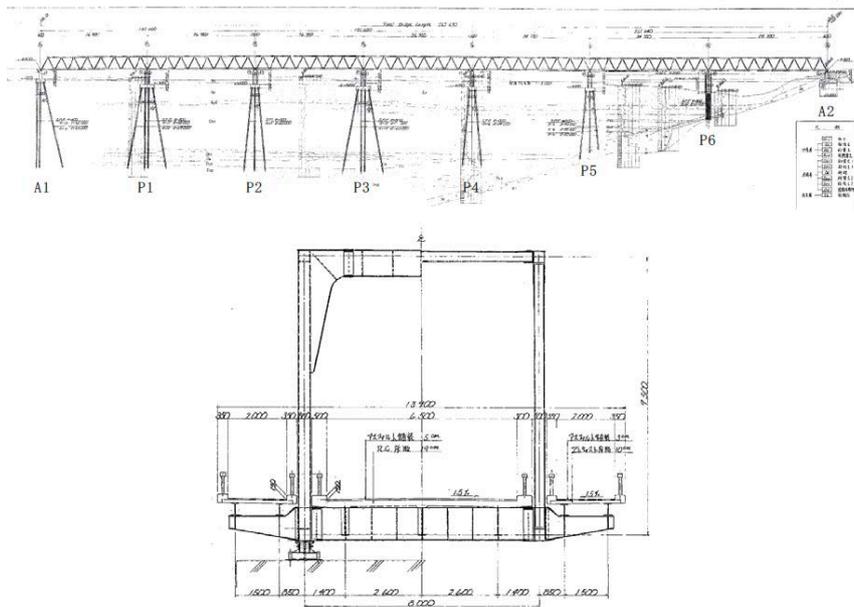


図-3.21.4.1 橋梁一般図(新北上大橋)



写真-3.21.4.2 新北上大橋(A1橋台上流側より上部構造の流出を確認)



写真-3.21.4.3 新北上大橋(A2橋台上流側より)



写真-3.21.4.1 A1～P2 間上部構造が流出した橋の状況



写真-3.21.4.12 A1 橋台の支承部と変位制限構造の損傷状況



写真-3.21.4.13 P1 橋脚の損傷状況 (P2 橋脚側より)



写真-3.21.4.14 P1 橋脚の損傷状況 (P2 橋脚側より)

主な参考文献

- 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告、国総研資料第 814 号、土研資料第 4295 号、2014.12

橋梁名	阿蘇大橋
地震名	2016年熊本地震
路線・地域	国道325号
構造形式	単純合成鈹桁, トラスト逆ランガー, 3径間連続非合成鈹桁の5径間
橋長・支間長・幅員	橋長 205.96m 主径間 132.2m 幅員 8.8m
支承形式	不明
橋脚及び基礎形式	逆T式橋台, RC壁式橋脚 基礎: 杭基礎, 直接基礎
地盤	不明
竣工年度	1970年
適用示方書・設計水平震度	S39 鋼道路橋設計示方書
落橋防止構造	鋼製ブロックによる縁端拡張, ダンパー, 落橋防止ケーブル
被災形式	地山の崩壊による橋脚崩壊による落橋
被災状況	



主な参考文献

- ・ 土木研究所:平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告,土研資料,4359,pp.2017.

橋梁名	府領第一橋
地震名	2016年熊本地震
路線・地域	熊本県道 小川嘉島線
構造形式	PC3 径間連続中空床版
橋長・支間長・幅員	橋長 61.286m 支間長：14.9m + 22.95m + 22.6m
支承形式	ピボット支承
橋脚及び基礎形式	"A1：逆T式橋台，P1：壁式橋脚，P2：壁式橋脚，A2：逆T式橋台，P1・P2 橋脚はピボット沓を有するロッキング橋脚杭基礎（A1：RC 杭，P1:RC 杭，P2：PC 杭，A2:PC 杭）"
地盤	不明
竣工年度	1974年
適用示方書・設計水平震度	S47 道路橋示方書・同解説
落橋防止構造	変位制限構造，縁端拡幅工，
被災形式	変位制限構造の破壊と橋軸直角方向の移動による桁落下
被災状況	



主な参考文献

- ・ 土木研究所:平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告,土研資料,4359,pp.2017.

橋梁名	田中橋
地震名	2016年熊本地震
路線・地域	益城町道
構造形式	3径間連続RCT桁
橋長・支間長・幅員	橋長28.1m
支承形式	不明
橋脚及び基礎形式	重力式石積み橋台, RC壁式橋脚 直接基礎
地盤	不明
竣工年度	1930年(昭和5年)竣工・供用
適用示方書・設計水平震度	不明
落橋防止構造	不明
被災形式	地盤変状による下部構造崩壊
被災状況	



主な参考文献

- ・ 土木研究所:平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告,土研資料,4359,pp,2017.

橋梁名	戸下大橋
地震名	2016年熊本地震
路線・地域	益城町道
構造形式	2径間単純PCプレテンT桁+単純PCプレテン床版+単純PCプレテンT桁+単純PCプレテン中空床版+12径間単純PCプレテンT桁(※片栈橋区間を除く)
橋長・支間長・幅員	橋長380.8m(片栈橋45m, 橋305m, 片栈橋30.8m)
支承形式	不明
橋脚及び基礎形式	ハンマー式橋台, RC円柱式橋脚 深礎基礎
地盤	不明
竣工年度	1993年(平成5年)竣工
適用示方書・設計水平震度	H2 道路橋示方書・同解説
落橋防止構造	不明
被災形式	地山の崩壊による橋脚倒壊による落橋
被災状況	



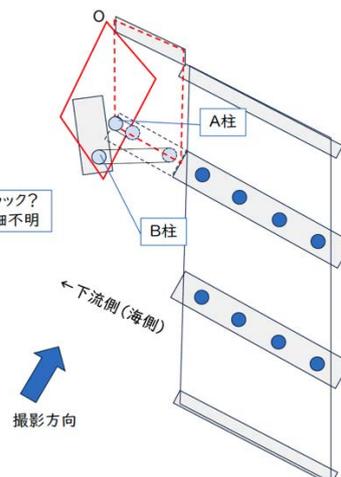
主な参考文献

- ・ 土木研究所:平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告,土研資料,4359,pp,2017.

橋梁名	鵜飼大橋
地震名	2024年能登半島地震
路線・地域	珠洲市道
構造形式	3径間単純PC桁、斜橋
橋長・支間長・幅員	橋長 54m
支承形式	鋼製支承（車道部）・ゴムパッド（歩道部）
橋脚及び基礎形式	パイルベント橋脚
地盤	不明
竣工年度	1960年（昭和35年）竣工
適用示方書・設計水平震度	不明
落橋防止構造	車道部変位拘束構造、歩道部なし
被災形式	橋脚基礎の損傷による歩道部落橋
被災状況	
主な参考文献	
	<ul style="list-style-type: none"> 森伸一郎：令和6年能登半島地震緊急現地調査速報会資料、2024/01/17

橋梁名	酒見大橋
地震名	2024年能登半島地震
路線・地域	志賀町道
構造形式	上部構造不明、斜橋
橋長・支間長・幅員	橋長 35m
支承形式	不明
橋脚及び基礎形式	パイルベント橋脚
地盤	不明
竣工年度	1965年（昭和40年）竣工
適用示方書・設計水平震度	不明
落橋防止構造	不明
被災形式	橋脚上部損傷による歩道部落橋
被災状況	

志賀町 道路橋拡幅部の落橋被害



主な参考文献

- 西岡英俊、渡邊健治、山栗祐樹：志賀町酒見地区道路橋拡幅部落橋被害、2024/1/9