

地震により損傷した橋梁の部材耐力に関する実態分析

佐藤 京¹・寺澤 貴裕²・秋本 光雄¹・葛西 聡⁴

¹正会員（国研）土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

²正会員 修（工）（国研）土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

³正会員（国研）土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

⁴正会員 修（工）（国研）土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

1. はじめに

平成29年11月に道路橋示方書の改訂版が発行された。発行された示方書では、要求された限界状態を超えないような耐荷性能を満足するように設計を行うことが規定されている。しかし、照査を行う地震動を超える作用（以下、超過作用）に対しては、構造上の配慮事項の記述はあるものの対処法については設計者に委ねられている。

地域防災計画において救助、復興等の基盤をなす重要な機能が道路橋には求められており、要求された限界状態を保持できない損傷を与える超過作用に対しても緊急輸送道路網の橋においては、致命的な損傷を回避する必要がある。超過作用に対しては、想定された損傷に留め、早期回復を図るための損傷の誘導・制御といった設計を実現することが今後求められると考える。

ここでは、損傷を誘導・制御する合理的な設計方法に関する基礎検討として、道路橋示方書により設計された橋梁の被災事例を基に、構造物の耐力階層化の可能性について被災実態の分析を行う。

2. 橋梁の地震被害

気象庁が地震観測を開始して以降、発生した大規模地震を対象に、道路橋の被害に関する調査結果が整理された報告書、記録誌、論文等¹⁾⁻¹³⁾などを基に被害情報を収集した。標準設計による構造物の耐力階層化の可能性を確認することに着目し、通行止や交通規制を伴う比較的大きな損傷を支承部および近傍上下部構造、橋脚部で受けた橋梁の資料より、橋梁概要、適用示方書、作用地震動、損傷箇所およびそ

の程度を整理した。なお、作用地震動については、近郊の表層地盤の地震動記録を用いた。ここにおける近郊とした条件は、橋梁までの震央距離が100kmを超えない場合は、概ね10km以内の観測点、100kmを超える場合は、概ね5km以内の観測点とした。近郊に観測点がないものについては、震央距離と地震規模により距離減衰式から算定する推定値としている。なお、推定値は、平成2年道路橋示方書・同解説書V耐震設計編の資料編に示された距離減衰式より算定される値に超過確率を考慮した割増1.7を乗じた距離減衰式の最大加速度を適用した。兵庫県南部地震の橋梁被害は、1橋を除き神戸海洋気象台、JR鷹取駅と東神戸大橋の記録を被災橋梁の地盤種別に合わせて記した。

(1) 損傷記録

損傷記録として収集した資料は、表-1に示す地震に関するもので、被災橋梁全数500橋の内、調査目的に合致した76橋を対象に被害の情報を収集した。

表-1 調査対象地震と被害橋梁数および調査対象

地震名	被災 橋梁数	対象 橋梁数
新潟地震	93	6
1968 年十勝沖地震	5	3
1978 年宮城県沖地震	127	14
昭和 57 年(1982 年)浦河沖地震	34	1
昭和 58 年(1983 年)日本海中部地震	84	3
平成 5 年(1993 年)釧路沖地震	87	5
平成 5 年(1993 年)北海道南西沖地震	17	3
平成 6 年(1994 年)北海道東方沖地震	31	1
平成 6 年(1994 年)三陸はるか沖地震	13	5
平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震		13
平成 15 年(2003 年)十勝沖地震	3	3
平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震	6	3
平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震		16

表-2 平成7年(1995年)兵庫県南部地震より前の被災橋梁概要

発生年	地震名	地震規模 気象庁	都道府県	路線	示方書 (年)	震央 距離 (km)	地盤種別 (推定)	損傷部：●	
								橋脚	支承部
1964	新潟地震	7.5	新潟県	一般地方道	S31	50	Ⅲ種	●	●
			新潟県	市道	S31	50	Ⅲ種	●	●
			新潟県	市道	S31	50	Ⅲ種		●
			新潟県	村道	S31	37	Ⅱ種		●
			山形県	主要地方道	S31	77	Ⅱ種		●
			福島県	国道49号	S14	106	Ⅱ種	●	
1968	1968年十勝沖地震	7.9	北海道	国道235号	S14	243	Ⅱ種		●
			北海道	国道235号	S14	233	Ⅱ種		●
			北海道	主要地方道	S31	252	Ⅱ種		●
1978	1978年宮城県沖地震	7.4	宮城県	国道4号	S31	111	Ⅱ種	●	
			宮城県	国道45号	S31	85	Ⅱ種		●
			宮城県	国道45号	S39	84	Ⅲ種		●
			宮城県	国道346号	S14	101	Ⅱ種		●
			宮城県	主要地方道	T15	99	Ⅰ種		●
			宮城県	一般地方道	S46	91	Ⅱ種		●
			宮城県	主要地方道	T15	98	Ⅱ種		●
			宮城県	主要地方道	T15	115	Ⅰ種	●	
			宮城県	主要地方道	S39	107	Ⅲ種	●	●
			宮城県	国道4号	S46	116	Ⅱ種	●	
			宮城県	国道6号	T15	113	Ⅲ種	●	●
			宮城県	国道45号	T15	93	Ⅲ種		●
			宮城県	国道45号	S46	85	Ⅱ種		●
			福島県	一般地方道	S31	150	Ⅱ種		●
1982	昭和57年(1982年)浦河沖地震	7.1	北海道	国道235号	S39	35	Ⅲ種	●	●
1983	昭和58年(1983年)日本海中部地震	7.7	秋田県	国道101号	S31	82	Ⅱ種		●
			秋田県	主要地方道	S46	88	Ⅲ種		●
			秋田県	一般地方道	S31	96	Ⅲ種		●
1993	平成5年(1993年)釧路沖地震	7.8	北海道	国道240号	S31	39	Ⅱ種	●	
			北海道	道道	不明	55	Ⅰ種	●	
			北海道	道道	S39	43	Ⅱ種	●	
			北海道	道道	S39	80	Ⅱ種	●	
			北海道	国道336号	S55	65	Ⅲ種		●
1993	平成5年(1993年)北海道南西沖地震	7.8	北海道	町道	S39	126	Ⅱ種	●	
			北海道	町道	S39	166	Ⅱ種	●	
			北海道	町道	S31	158	Ⅱ種	●	
1994	平成6年(1994年)北海道東方沖地震	8.1	北海道	国道334号	S46	216	Ⅰ種		●
1994	平成6年(1994年)三陸はるか沖地震	7.6	青森県	臨港道路	S46	246	Ⅲ種		●
			青森県	臨港道路	S46	248	Ⅲ種		●
			青森県	臨港道路	S55	249	Ⅲ種		●
			青森県	県道	S14	256	Ⅱ種		●
			青森県	市道	S14	249	Ⅲ種	●	●

なお、平成7年(1995年)兵庫県南部地震および平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震での被災橋梁は、広範囲に渡って、収集した資料からは被害橋梁全数を正確に把握出来ないと考え空白としている。対象の被災橋梁の概要は、表-2に示す平成7年(1995年)兵庫県南部地震より前（以後、H7前被災橋梁）の41橋梁、表-3に示す平成7年(1995年)兵庫県南部地震以降（以後、H7以後被災橋梁）の35橋梁の合計76橋梁である。H7を境に区分したのは、調査した地震動レベルを簡便に分けるためである。

まず、H7前被災橋梁を対象として、設計震度に重力加速度を乗じた加速度相当値（以後、設計震度相当応答加速度）と作用地震動の比較により、被災した橋梁の加速度レベルを確認する。

図-1において、昭和46年より前の指針、昭和46年の示方書、昭和55年の示方書で、地盤種別毎に判例を示し、設計震度相当加速度との関係を示している。対角線を含みそれより上方にプロットされたものは、設計震度相当加速度を上回った作用地震動を受けて被災したと考えられるケースで、対角線より下方は、設計震度相当加速度を下回ったと考えられるが被災した橋梁である。S55道示では、全てが設計レベル以上の作用力により被災した結果である。それ以外では、地盤種別によらず設計レベルを下回ったと考えられるレベルにおいても被災している。

次に損傷部別の損傷橋梁の割合を図-2に示す。設計値と比較し、小さい作用地震動で被災した橋梁の結果を左側に、大きい作用地震動で被災した橋梁の

表-3 平成7年(1995年)兵庫県南部地震以降の被災橋梁概要

発生年	地震名	地震規模 気象庁	都道府県	路線	示方書 (年)	震央 距離 (km)	地盤種別 (推定)	損傷部：●	
								橋脚	支承部
1995	平成7年(1995年)兵庫県南部地震	7.3	兵庫県	阪高神戸線	S46	33	Ⅱ種	●	
			兵庫県	阪高神戸線	S31	16	Ⅱ種	●	
			兵庫県	阪高神戸線	S31	27	Ⅱ種	●	
			兵庫県	阪高湾岸線	S55	31	Ⅲ種		●
			兵庫県	市道	S55	31	Ⅲ種		●
			兵庫県	阪高神戸線	S31	24	Ⅱ種		●
			兵庫県	阪高神戸線	S31	13	Ⅱ種		●
			兵庫県	阪高神戸線	S31	18	Ⅱ種		●
			兵庫県	阪高神戸線	S31	32	Ⅱ種		●
			兵庫県	中国自動車道	S46	38	Ⅰ種	●	
			兵庫県	阪高神戸線	S31	29	Ⅱ種	●	
			兵庫県	阪高神戸線	S31	16	Ⅱ種	●	
2003	平成15年(2003年)十勝沖地震	8.0	北海道	国道336号	S55	109	Ⅲ種		●
			北海道	国道242号	S29	139	Ⅲ種		●
			北海道	国道336号	S47	96	Ⅲ種		●
2004	平成16年(2004年)新潟県中越地震	6.8	新潟県	国道17号	S46	6	Ⅱ種	●	●
			新潟県	国道8号	S55	22	Ⅱ種	●	
			新潟県	関越自動車道	S46	5	Ⅰ種	●	●
2011	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震	9.0	宮城県	国道45号	S31	144	Ⅱ種		●
			宮城県	国道45号	S46	144	Ⅱ種		●
			宮城県	三陸自動車道	H2	154	Ⅰ種		●
			福島県	国道6号	S39	225	Ⅱ種		●
			岩手県	県道	S46	196	Ⅰ種	●	●
			岩手県	国道343号	S39	183	Ⅱ種	●	●
			宮城県	国道398号	S31	159	Ⅱ種		●
			福島県	国道289号	S39	227	Ⅱ種		●
			宮城県	主要地方道	S39	150	Ⅱ種	●	
			宮城県	主要地方道	S31	169	Ⅱ種	●	●
			茨城県	東水戸道路	H8	282	Ⅲ種		●
			宮城県	仙台北部道路	H8	167	Ⅲ種		●
			宮城県	仙台東部道路	H8	166	Ⅱ種		●
			福島県	国道4号	三プロ	213	Ⅱ種		●
			福島県	国道4号	H14補強	234	Ⅱ種		●
			宮城県	国道342号	H14補強	15	Ⅱ種		●

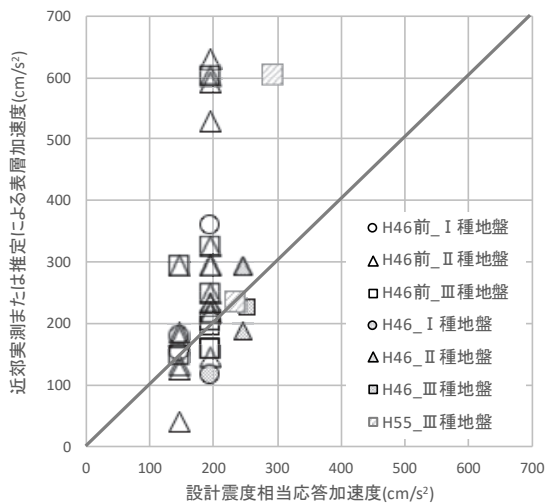


図-1 被災橋梁の設計震度と作用加速度比較

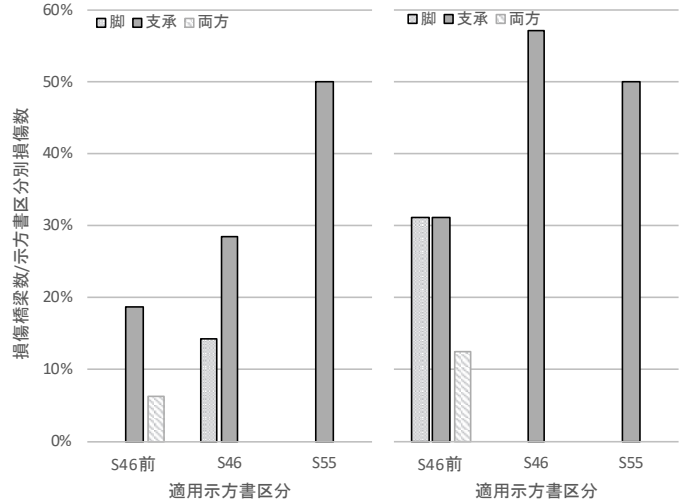


図-2 損傷部別の損傷橋梁数/示方書区分別損傷橋梁数

(左；作用地震動が設計値より小，右；作用地震動が設計値より大)

結果を右側に示している。損傷橋梁の割合は、適用示方書で区分毎の損傷数に対する損傷部別の損傷橋梁数を算出したものである。損傷部は、橋脚、支承部、橋脚と支承部の両方の3区分で整理した。全て

の損傷ケースが、設計値に対する作用地震動の大小に関わらず確認され、作用地震動が設計値より低い場合でも橋脚の損傷が誘発されたことが過去の設計指針および示方書で設計した構造物に生じていたこ

表-4 H7 以後被災橋梁における被災概要

地震動のタイプ	タイプI 代表地震 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震 平成 15 年(2003 年)十勝沖地震	タイプII 代表地震 平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震 平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震
昭和 55 年道示より前	橋脚段落し位置の損傷 支承本体、沓座モルタルの損傷 支承取付部主桁の損傷	橋脚段落し位置の損傷 支承本体、沓座モルタルの損傷 支承取付部主桁の損傷
昭和 55 年道示以降	支承本体、沓座モルタルの損傷 上部構造の損傷	橋脚段落し位置の損傷 支承本体、沓座モルタルの損傷 支承取付部主桁の損傷
H8 以降（補強含む）	積層ゴム支承、免震支承のゴム破断 変位制限構造、取付部の損傷 トラス下弦材の損傷	積層ゴム支承の破断（地盤変位の影響含む）

とが確認できる。昭和46年以前の指針を適用した橋梁では、橋脚の損傷が確認されているが、昭和55年の示方書を適用した橋梁においては、作用地震動の大小に関わらず、支承損傷のみとなり、設計条件等の改定により損傷が軽微な傾向へと移行していると思われる。

表-4には、H7以後被災橋梁における被災概要を適用示方書を3区分に分け整理した。レベル2地震動のタイプによらず、昭和55年示方書より前では、橋脚の段落とし位置での損傷が生じた。それ以降でも段落としがある場合においては、橋脚の損傷は段落とし部で生じ、それ以外では橋脚の損傷は報告されていない。橋梁の損傷の多くは、支承本体、沓座モルタル、支承取付部主桁で発生していることが確認できる。H8以降の特徴としては、応答挙動か地盤変状によるものか明確ではないが、ゴム支承の破断が確認された。

3. 損傷部の傾向分析

笛木、庄司¹⁴⁾が行った阪神高速3号神戸線の橋脚の被災状況に対する傾向分析としてイベントツリー解析(以下、ETA)を参考に橋脚、支承部に生じる損傷傾向の分析を兵庫県南部地震、東北地方太平洋沖地震に対して実施した。

(1) 平成7年(1995年)兵庫県南部地震

笛木らが整理したデータを用いて、損傷が橋脚、支承部、橋脚と支承部の両方が損傷した橋脚基数を集計した。

図-3には、支承部の損傷区分毎の橋脚基数の集計結果と支承部の損傷度別の橋脚基数に対する小被害より大きい損傷基数の割合を損傷率として整理した。支承部の損傷数は、損傷度によらず概ね同じ基数となっている。損傷度Dの支承の場合、橋脚の損傷率が高く、損傷度Cになると橋脚の損傷率が低下

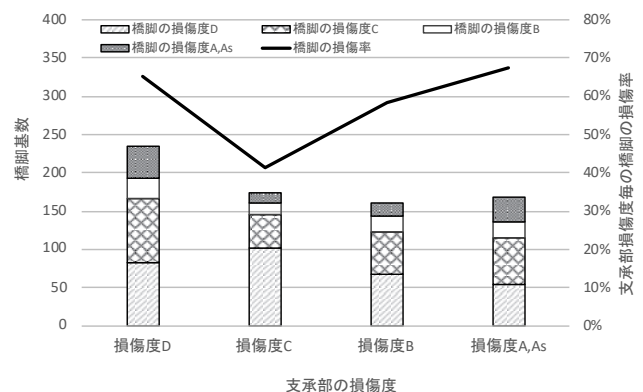


図-3 支承部損傷度毎の橋脚の損傷度数と橋脚損傷率
(平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震)

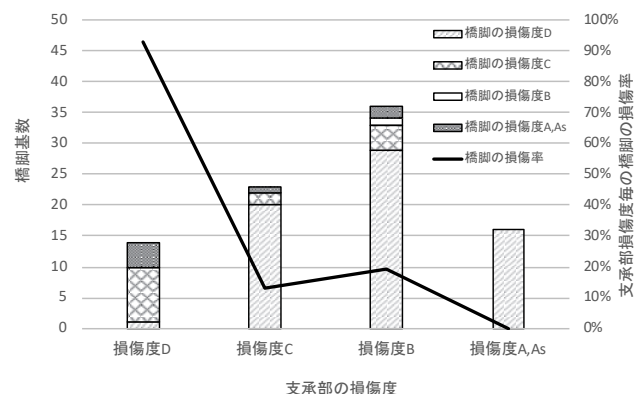


図-4 支承部損傷度毎の橋脚の損傷度数と橋脚損傷率
(平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震:全データ)

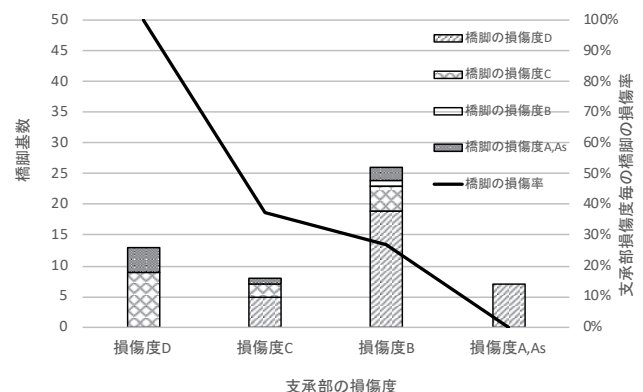


図-5 支承部損傷度毎の橋脚の損傷度数と橋脚損傷率
(平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震:耐震補強未対策)

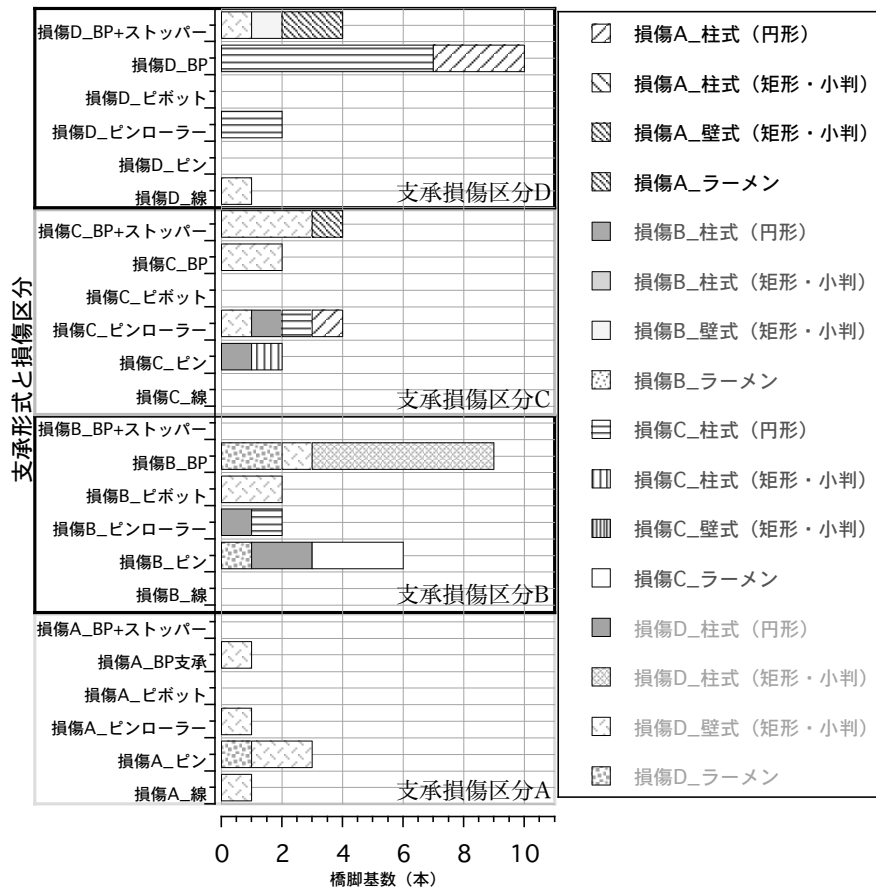


図-6 支承形式と橋脚形式による損傷度数の集計

する。これに対して、損傷度BやA、Asと支承が大きな損傷度である場合、橋脚の損傷率も高くなる。これは、橋脚の損傷が誘因となり支承の損傷が大きくなっていることが想定される。

(2) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震

ETAを実施したデータは、土木学会地震工学委員会が整理した資料¹⁵⁾である。全データを有効としたケースと耐震補強未対策の橋脚のみを対象としたケースを実施した。

全データを対象とした場合の結果を図-4に示す。損傷度Dの支承の場合は、橋脚に何らかの被害がほぼ生じている。これに対して、支承が損傷した場合は、橋脚の損傷率が低下し、負の相関となる。損傷度A、Asの場合、橋脚の損傷率が0%となり、調査対象としたデータにおいては、支承が大きな損傷を受けた場合は、橋脚の損傷を抑制できる可能性を示している結果である。図-5には、耐震補強未対策の橋脚のみを対象とした結果を示す。全データを有効とした図-4に示した結果と一致しており、支承の損傷度が高くなると橋脚の損傷率が低下する。支承の損傷度が中程度のケースでは、橋脚の損傷率が高

く、支承部と橋脚の両方が損傷するケースが未対策の場合は多いと思われる。

(3) 支承形式と橋脚形式に着目した傾向分析

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震のETAの結果より、橋脚の断面形状や支承の形式に着目してデータの集計を行い分析を行った。

対象は、橋脚基数が少ないものの橋梁概要のデータが多い平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震とした。対象の橋脚はRC製による円形、小判型、壁式とラーメンの4種類である。支承形式は、一般的な支承として、線、ピン、ピンローラー、ピボットとBPの5種類のほか、地震時固定形式となる粘性ストッパーが設置されているものが対象である。

実施したデータは、土木学会地震工学委員会が整理した資料¹⁵⁾である。全データを有効としたケースと耐震補強未対策の橋脚のみを対象としたケースを実施した。

図-6に集計結果を示す。支承の損傷区分D（損傷なし）においては、橋脚損傷の基数が多く、特に柱式（円形）の橋脚の損傷が多い。調査内で最も多いBP支承を有する橋脚は22基あり、そのうち10基で支

承の損傷が生じた。支承の損傷区分が悪くなると橋脚の損傷が低減している傾向にある。支承形式別による橋脚損傷の発生やその損傷の大小については、本検討対象橋脚の中では明確な傾向は見られない。

4. まとめ

損傷を誘導・制御する合理的な設計方法に関する基礎検討として、道路橋示方書により設計された橋梁の被災事例を基に、構造物の耐力階層化の可能性について、新潟地震から平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震までの被害記録をもとに被災実態の分析を行った。

その結果、平成7年(1995年)兵庫県南部地震より前の地震被害においては、昭和46年より前の指針を適用した橋梁では、設計地震動よりも低い作用地震動で被災したと思われるケースが他より多く確認された。昭和46年および昭和55年の示方書を適用した橋梁では、支承の損傷が多いことが確認された。兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震を対象として行った損傷部の傾向分析では、支承と橋脚の損傷発生率やその大きさについて、支承と橋脚の損傷発生にトレードオフの関係が確認でき、超過作用に対する合理的な設計として、損傷の誘導や制御を設計照査として取り込める可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 科学技術庁国立防災科学技術センター監修: 新潟地震防災研究総合報告 昭和40年1月, 1965.
- 2) 北海道開発局土木試験所: 1968年十勝沖地震被害調査報告書, 土木試験所報告第49号 昭和43年12月, 1968.
- 3) 文部省科学研究費自然災害特別研究 (1) 報告, 1978年宮城県沖地震による被害の総合的調査研究, 昭和54年3月, 1979.
- 4) 社団法人日本道路協会 橋梁委員会・総括小委員会 宮城県沖地震道路橋被害調査分科会, 宮城県沖地震による道路橋の被害ならびに支承部の耐震性に関する調査報告書, 昭和55年3月, 社団法人日本道路協会, 1980.
- 5) 土木学会東北支部1978年宮城県沖地震調査委員会, 1978年宮城県沖地震調査報告書, 1980.4, 1980.
- 6) 建設省道路局, 建設省土木研究所, 北海道開発局, 静内橋地震災害調査報告書 (1982年浦河沖地震), 昭和57年12月, 1982.
- 7) 北海道開発局土木試験所, 浦河沖地震の直接的被害に関する特性調査業務報告書, 昭和58年2月, 1983.
- 8) 秋田県土木部, 昭和58年日本海中部地震-土木施設等災害記録-, 昭和59年5月, 1984.
- 9) 北海道開発土木研究所, 開発土木研究所報告第100号 1993年釧路沖地震被害調査報告, 平成5年9月, 1993.
- 10) 建設省土木研究所, 地震防災部耐震研究室, 釧路沖地震及び北海道南西沖地震によるRC橋脚主鉄筋段落し部の被害とその解析, 平成6年6月, 1994.
- 11) 北海道開発局開発土木研究所 構造部構造研究室, 平成6年北海道東方沖地震速報, 平成6年11月30日, 1994.
- 12) 三陸はるか沖地震災害調査委員会, 1994年三陸はるか沖地震災害調査報告書, 平成7年7月, 1995.
- 13) 北海道開発コンサルタント株式会社, 1995年兵庫県南部地震阪神大震災被害調査記録, 平成7年3月, 1995.
- 14) 笛木孝哲, 庄司学: 高架道路橋の地震時機能損失評価, 土木学会論文集, Vol.55A, pp449-459, 2009.
- 15) 土木学会地震工学委員会: 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告 (平成27年8月), 2015.