

◆特集：最近の地震災害と耐震技術◆

大地震時における道路橋の被災度推定手法

小林 寛* 運上茂樹**

1. はじめに

大地震発生直後においては、道路ネットワークの確保は避難や救助救援活動、緊急復旧活動において最重要課題とされている。道路ネットワークを構成する施設の中でも、被災時の復旧が容易ではない道路橋の被災度把握は最も重要な情報の1つである。しかしながら、現状では被災した橋梁の使用可否を的確に判断するためには専門家の目視判定によらざるを得ないところがあるため、被災が少しでもあれば一旦通行を制限し、その使用可否の判定後に道路啓開を行うのが一般的である。このため、大規模地震により広い地域で被災が多発した場合には、道路啓開に多大な時間を要することになる。大規模地震後の緊急道路ネットワークを早期に確立するためには、地震後直ちに被災が想定される橋梁を特定し、効率的な点検が実施できるようにする技術が有効と考えられる。

このような背景から、既往の震災データに基づき、大地震発生時に現地の地震計情報と各橋梁の基本的な諸元情報をもとに被災度を簡便に推定する手法について検討を行った。本文では推定手法を提案し、近年の被害地震に適用して提案手法の有効性を検証した結果について述べる。

2. 被災度推定手法

提案手法は、地震直後に入手できる情報として

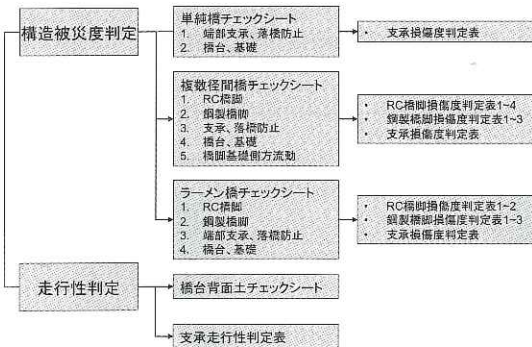


図-1 提案手法の全体構成

地震計からの情報をもとに橋梁の被災度を推定する手法である。図-1に提案手法の全体構成を示す。構造的な被災度を判定する被災度評価と走行性を判定する評価から構成し、それぞれチェックシートを用いて、構造特性に応じてより詳細な被災度推定を行う流れである。本手法では、特に大被害の抽出をポイントとした。

チェックシートはそれぞれ複数のフローから成り、必要に応じて判定表を用意している。図-2は、構造被災度の判定フローを示したものである。ここで、推定する被災度としては、大きくA、B、Cに分類したが、この定義は道路震災対策便覧¹⁾に従い以下の通りである。

- A：大被害…耐荷力の低下に著しい影響のある損傷を生じており、落橋等致命的な被害の可能性がある場合
- B：中被害…耐荷力の低下に影響のある損傷であり、余震や活荷重等による被害の進行がなければ、当面の利用が可能な場合

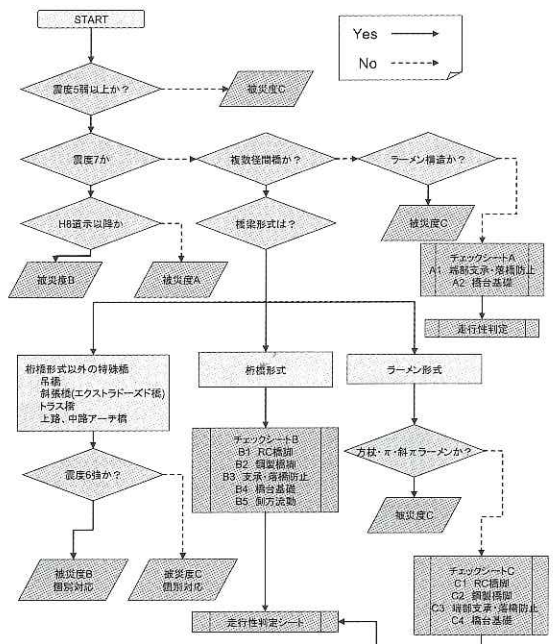


図-2 構造被災度の判定フロー

Development of Simplified Seismic Damage Assessment Method of Road Bridges Based on Past Damage Experiences

C：小被害…短期間には耐荷力の低下に影響のない場合

以下には、図-2に示した地震被災度判定の考え方、判定根拠について示す。

2.1 判定対象震度

まず、判定対象とする震度領域として、震度5弱以上を詳細に判定することとした。すなわち、震度4以下については被災度Cと判定することとした。これは、1995年兵庫県南部地震以前の地震^{2)~8)}を対象に被害報告のある橋梁について、震度分布図等から本震時の震度を調査した結果に基づいており、これによれば、震度4以下で被災した橋梁は報告されていない。

図-3は、体感震度から計測震度に切り替わった1996年4月以降の主要な被害地震^{9)~13)}について、被害報告のある橋梁の被災度を計測震度毎に整理したものである。これによれば、被災度Aは震度5弱以下のエリアには存在しないことが分かる。

これらのことから、震度4以下の地点については被災度Cとして分類することとし、以降の判定を行わないものとした。

一方、気象庁震度階は震度7の上が規定されておらず、震度7と判定された場合は地震力の上限がないことになり、実際にはかなりの不確実性を含むことになる。ここでは、平成7年兵庫県南部地震相当を震度7の代表例として捉えることとした。このため、平成8年以降の道路橋示方書（以下道示という）では、兵庫県南部地震相当の地震力を考慮して耐震設計されていることから、これを適用した橋については崩壊等致命的な損傷を受けず、被災度B以下に留まるものと想定した。一方、平成2年道示以前の橋梁については、崩壊に至らずとも致命的な損傷を受ける可能性もあり得ることから、これを被災度Aに分類することとした。

2.2 橋梁形式別の被災特性

次に、橋梁の構造形式に応じた被災度について分類を行った。

橋梁形式としては、まず複数径間か否かで判断

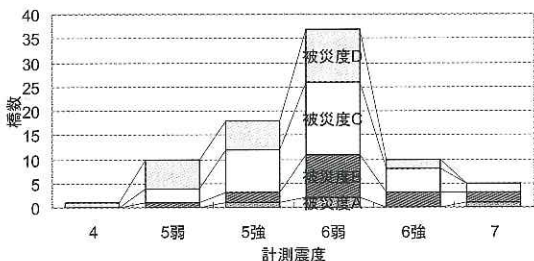


図-3 計測震度と橋梁被災度

を分けることとした。単径間の橋は地震時に振動しにくく構造的に明らかに致命的な被害を受けにくいこと、また落橋等の甚大な被災事例もほとんどないことから、相対的に被害を受けにくいと判断することができる。このため、このような橋については、端部の支承、落橋防止装置および橋台の躯体と基礎を対象に後述するチェックシートを用意した。

複数径間の橋としては、耐震性に差が生じると想定される桁橋形式、ラーメン形式、特殊橋梁（長大橋を含む）に分けて判定するものとした。

長大橋や特殊橋は、一般に道路橋示方書によらず、個別に設計されていると考えられるため、被災度の判定も個別対応が基本と考えられる。ここでは、兵庫県南部地震の際に震度6強の地域における長大橋においては、支承や上部構造に損傷が見られた事例もあることから、このような事例に基づいて震度6強の範囲に含まれるものは被災度Bとし、震度6弱以下については被災度Cと判定することとした。また、桁橋、ラーメン橋については、図-1に示したように、橋脚、支承・落橋防止、基礎について後述するチェックシートにより被災度を判定することとした。

2.3 RC橋脚の被災度判定

RC橋脚の被災度判定用のチェックシートを図-4に示す。RC橋脚については、一般に設計基準により耐震性に差があることが知られているため、ここでは、①昭和55年道示より古い基準を適用し

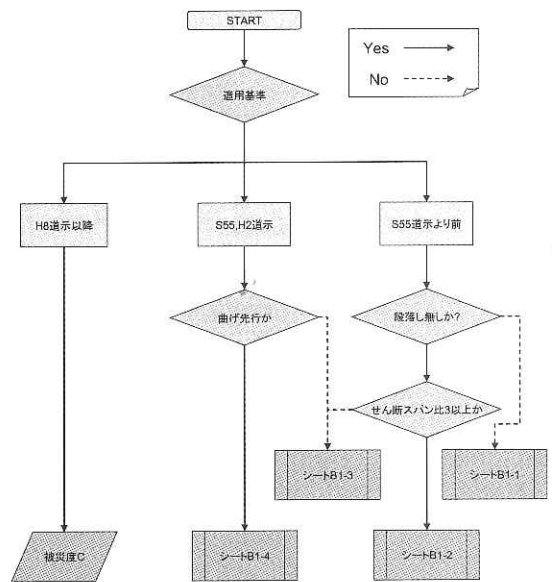


図-4 RC橋脚のチェックシート（複数径間橋）

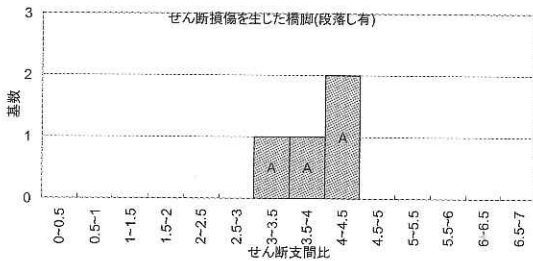
た橋脚、②昭和55年、平成2年道示を適用した橋脚、③平成8年道示以降の基準を適用した橋脚、の3段階に分類することとした。なお、③のRC橋脚は、兵庫県南部地震による地震力相当を考慮して設計されるので、震度6強以下の地震では軽微な損傷程度以下に留まると考えられるので被災度Cと判定することとした。

また、①、②については過去の被災事例に基づき、さらに次の4種類に分類し、それぞれ当該橋の地点におけるSI値によって被災度を判定することとした。すなわち、i) ①に該当する橋脚で段落しがある橋脚、ii) ①に該当するもののうち段落しが無く、かつ曲げ破壊先行と考えられる橋脚、iii) ①あるいは②に該当する橋脚で段落しが無く、かつせん断破壊先行と考えられる橋脚、iv) ②に該当する橋脚で曲げ破壊先行と考えられる橋脚、である。

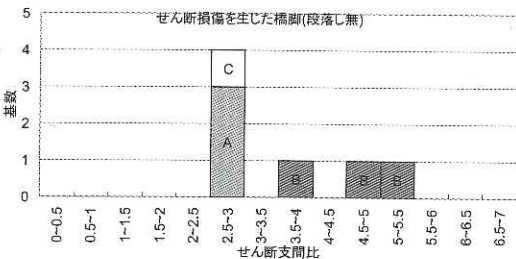
2.3.1 破壊モードの判定

まず、図-4に示したフローのうち、曲げ先行・せん断先行の破壊モード判定は以下のように行うこととした。

兵庫県南部地震で被災した阪神高速道路神戸線のRC単柱のうち、せん断破壊を生じたものをせん断支間比ごとに整理した結果を図-5に示す。これによれば、段落しのある橋脚はせん断支間比3~4.5、段落しない橋脚はせん断支間比2.5~3で被災度A(大被害)となっているものがあること分かる。これより、段落しのある橋脚については



(a) 階段しがある橋脚



(b) 階段しがない橋脚

図-5 せん断損傷を生じた橋脚の被災度とせん断支間比

見掛けのせん断支間比の1/2を実せん断支間比とし、また、段落しの無い橋脚については実せん断支間比が3以下のものについて、せん断破壊先行型として判定することとした。

2.3.2 昭和55年道示より古い基準を適用し段落しのある橋脚の被災度判定

阪神高速道路神戸線における昭和55年道示より古い基準で設計されたRC単柱のうち、段落しのある橋脚について、支承条件および損傷パターンごとに被災度とSI値の関係を整理した。ここで、被災度B以上の橋脚は可動・固定(FM)掛け違い橋脚のみであった。

図-6に段落しがあるFM掛け違い橋脚における被災度とSI値の関係を示す。ここでは全96基中4基がせん断破壊、他は曲げ破壊あるいは曲げせん断破壊であった。これよりSI値70~75を超えたところで大被害を受けたものが最も多くなっていることがわかる。ただし、兵庫県南部地震においては阪神高速道路神戸線の全ての地点でSI値が70を超えていたとされていることから、度数分布の形状を考慮して、SI値60以上で被害度Aと判定することとした。表-1は、このように判断して定めた判定シートである。

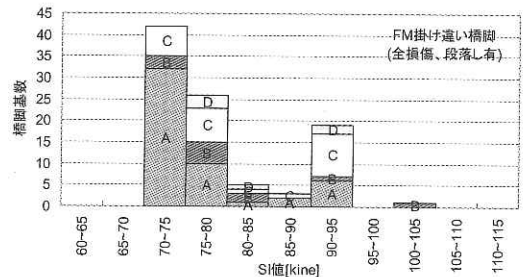


図-6 段落し有りの橋脚の損傷度とSI値 (FM掛け違い橋脚)

表-1 RC橋脚の被災度判定シート (昭和55年より古い基準・段落し有り)

支持条件	柱種類(方向)	被災度A	被災度B	被災度C
F/M 掛け違い	単柱(橋軸、橋直)	SI ≥ 60	60 > SI ≥ 45	45 > SI
	ラーメン・壁(橋軸)	SI ≥ 80	80 > SI ≥ 45	45 > SI
中間支点F FF掛け違い	単柱(橋軸、橋直)	SI ≥ 60	60 > SI ≥ 45	45 > SI
	ラーメン・壁(橋軸)	SI ≥ 80	80 > SI ≥ 45	45 > SI
中間支点M MM掛け違い	単柱(橋軸、橋直)	SI ≥ 60	60 > SI ≥ 45	45 > SI
	ラーメン・壁(橋軸、橋直)	SI ≥ 80	80 > SI ≥ 45	45 > SI
ゴム支承	単柱(橋軸、橋直)	SI ≥ 60	60 > SI ≥ 45	45 > SI
	ラーメン・壁(橋軸、橋直)	SI ≥ 80	80 > SI ≥ 45	45 > SI

2.3.3 昭和55年道示より古い基準を適用し段落しのない橋脚の被災度判定

阪神高速道路神戸線における昭和55年道示より古い基準で設計されたRC単柱のうち、段落しが無く、曲げ損傷および曲げせん断損傷を生じた橋脚について、支承条件ごとに被災度とSI値の関係を図-7に示す。これより昭和55年道示より古い基準で設計され、段落しが無いRC単柱はSI値80～85の範囲で大被害を受けたものが最も多い。そこで、前項と同じく度数分布の形状から、SI値70以上で大被害と判定することとした。表-2は、このようにして設定した判定シートを示したものである。

2.3.4 昭和55年道示より古い段落しの無いせん断破壊先行型橋脚および昭和55年、平成2年道示を適用したせん断破壊先行型橋脚の被災度判定

阪神高速道路神戸線における昭和55年道示より古い基準で設計されたRC単柱のうち、段落しが無くせん断破壊を起こした橋脚について、被災度とSI値の関係を整理した。その結果対象となった橋脚は5基有り、その内訳はSI値75～85で被災度Bが2基、85以上で被災度Aが2基、Cが1基で

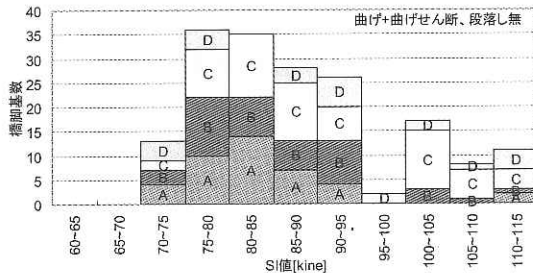


図-7 段落とし無橋脚の損傷度とSI値 (曲げ・曲げせん断損傷)

表-2 SI値による被災度判定シート (S55より古い基準・段落とし無し)

支持条件	柱種類 (方向)	被災度A	被災度B	被災度C
F/M 掛け違い	単柱 (橋軸、橋直)	SI ≥ 70	70>SI ≥ 45	45>SI
	ラーメン・壁 (橋軸)			
	ラーメン・壁 (橋直)	SI ≥ 80	80>SI ≥ 45	45>SI
中間支点F FF掛け違い	単柱 (橋軸、橋直)	SI ≥ 70	70>SI ≥ 45	45>SI
	ラーメン・壁 (橋軸)			
	ラーメン・壁 (橋直)	SI ≥ 80	80>SI ≥ 45	45>SI
中間支点M MM掛け違い	単柱 (橋軸、橋直)	SI ≥ 70	70>SI ≥ 45	45>SI
	ラーメン・壁 (橋軸、橋直)	SI ≥ 80	80>SI ≥ 45	45>SI
ゴム支承	単柱 (橋軸、橋直)	SI ≥ 70	70>SI ≥ 45	45>SI
	ラーメン・壁 (橋軸、橋直)	SI ≥ 80	80>SI ≥ 45	45>SI

あった。そこで、SI値70以上を被災度Aと判定することとした。昭和55年～平成2年道示適用のせん断破壊先行型橋脚については、これより前の橋脚よりも耐震性が相対的に高いと考えられるが、被災事例が無いため、ここでは判定基準は同一とすることとした。判定シートは表-2と同様である。

2.3.5 昭和55年～平成2年道示を適用した曲げ破壊先行型橋脚の被災度判定

昭和55年～平成2年道示を適用した曲げ破壊先行型の橋脚については大被害を生じた被災事例が無いため、ここでは、暫定的に表-2と同一の判定シートを用いることとした。

2.3.6 被災度Bランク以下の判定

兵庫県南部地震は地震動の規模が非常に大きく、阪神高速道路神戸線の被災地域では全てSI値が70を超えていたため、被災度Bランク以下について、被災データに基づく判定値の設定が難しい。そこで、兵庫県南部地震以降の地震による被害事例をもとに被災度BランクとCランクの判定値の設定を試みた。

対象とした地震は、2003宮城県北部地震、2003十勝沖地震、2004新潟県中越地震で、対象橋梁数は48橋である。これらについて、被災報告書や現地調査写真等から道路震災対策便覧を参考にして橋脚の被災度を判定した。SI値は、各地震の断層モデルから距離減衰式を用いて算出した。

この比較をまとめた結果を図-8に示す。SI値30以上で被災度C (宮城県北部地震における小野橋)、55以上になると被災度Bの橋梁が見られる。小野橋では、支承が破壊して上部構造が橋軸方向に大きく変位した。橋脚にもひびわれが生じていたが、このような被害を見てみると、局所的に地震動が大きく作用したことも想定される。推定したSI値が適切かどうか判定し難いため、ここでは小野橋近傍のSI値はより大きかったものと判断し、RC橋脚についてはSI値45以下を被災度

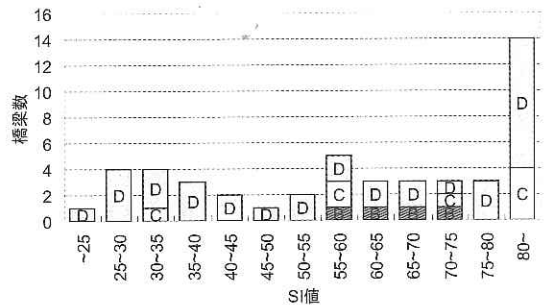


図-8 近年の地震による橋脚の被災度とSI値関係の分布 (48橋分)

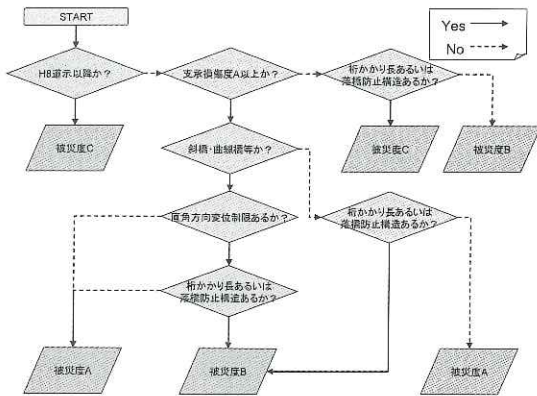


図-9 支・落橋防止の被災度判定フロー

Cと判定することとした。

2.4 鋼製橋脚の被災度判定

紙面の制約の関係で詳細はここには示さないが、鋼製橋脚についてもRC橋脚と同様に適用基準により分類し、阪神高速道路神戸線の被災データをもとにSI値と被災度の関係を設定した。

2.5 支・落橋防止の被災度判定

支・落橋防止用の被災度判定フローを図-9に示す。支・落橋防止については平成8年道示から耐震性が強化されているため、これ以降の基準を適用したものについては被災度Cと判定し、他については支承本体の損傷度、橋梁の条件、落橋防止システムの充実度を勘案して被災度を判定することとした。

支承本体の損傷度は過去の被災データをもとに当該地点のSI値から損傷度Aになるものを判定することとした。支承形式毎に損傷度Aと判定する判定値を表-3に示す。

2.6 橋台、基礎の被災度判定および橋脚基礎側方流動による被災度判定

橋台、基礎の被災度判定フローを図-10に示す。橋台については鳥取西部地震の際に石積橋台を有する橋が震度5で落橋した事例があるため、コンクリート造以外の橋台は被災度Aとした。基礎に

表-3 支承損傷度をAとする判定表

支承形式	損傷度A
ロッカー支承	SI ≥ 40
線支承	SI ≥ 60
一本ローラー支承	SI ≥ 40
複数ローラー支承	SI ≥ 40
ピン支承	SI ≥ 40
ピボット支承	SI ≥ 40
BP支承	SI ≥ 60
ゴム支承	SI ≥ 85

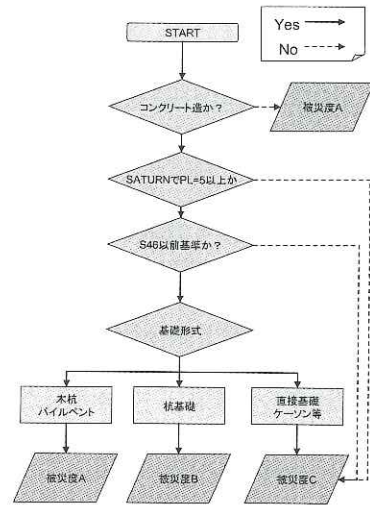


図-10 橋台・基礎の被災度判定フロー

については液状化の恐れがあり、かつ液状化を考慮した耐震設計がされていないものについて、被災事例から基礎形式によって判定することとした。

また、地盤の側方流動の影響を受け、かつ側方流動が生じる可能性があり、かつ側方流動を考慮した耐震設計がなされていないものについて、前項と同様に過去の被災事例から基礎形式によって判定することとした。

3. 実被害地震による提案手法の検証

3.1 検証方法

2004年新潟県中越地震(28橋)、2003年十勝沖地震(5橋)、宮城県北部地震(12橋)、宮城県沖の地震(5月26日発生:5橋)を対象とし、本手法の妥当性を検証した。

調査報告書等に示された損傷概要および現地調査写真より道路震災対策便覧を参照して実被害A~Dにランク付けすると同時に、各橋を提案手法に基づいて被災度判定し、実被害と推定被害の一致度を検討した。ここで、SI値の算定は各地震の断層モデルから距離減衰式を用いて算定したものをを用いた。

3.2 検証結果

実被害と推定被害の比較結果を表-4に示す。全

表-4 支承損傷度をAとする判定表

橋梁数	実被害					
	A	B	C	D	計	
推定被害	A	2	9	8	4	23
	B	0	3	4	3	10
	C	1	1	6	9	17
	計	3	13	18	16	50

体的に推定被害の方が実被害に比べて厳しく判定されていることがわかる。なお、本手法が実被害より被災度を低めに判定したのも2橋見られた。これについては後述する。

表-4によれば、本手法による判定結果と実被害が一致したものは被災度Aで2橋(9%)、被災度Bで3橋(30%)、被災度Cで6橋(35%)であり、全体の22%であった。これに1ランク安全側に判定したものを加えると本手法による判定結果A、B、Cについて、それぞれ、11橋(48%)、7橋(70%)、15橋(88%)となり、全体の的中率は66%となる。

本手法による判定結果よりも実被害の方が大きかった橋を取りこぼし橋梁とすると、今回の検証においては2003十勝沖地震における静川高架橋、宮城県北部地震における小野橋の2橋が該当する。

静川高架橋は、被害としては支承や変位制限装置の損傷が見られたが、SI値が26と算出されたことから推定被災度がCとなった。ただし、厚い堆積盆地上の勇払平野に位置しており、実際の振動は今回の距離減衰式から算出したものより大きかった可能性も考えられる。また、小野橋は、前述の被害を生じたが、SI値が32と算出され、推定被災度はCとなった。これらは局所的に大きく振動した可能性もあり、推定したSI値が実際の振動を表せていない可能性も想定される。

次に、本手法による判定結果よりも実被害の方が2ランク以上軽かった橋を空振りとする。本手法による判定でAと評価されながら実被害がDであるものが4橋見られるが、これらのうち2橋(新佐梨橋、四日町橋)は新潟県中越地震の調査橋梁、残り2橋(気仙大橋、笹の田大橋)は宮城県沖地震の調査橋梁であった。

新潟の2橋および気仙大橋は、架橋地点のSI値が70を超えたことから被災度Aと推定され、笹の田大橋はループ橋であるが橋軸直角方向の移動制限装置がないため被災度Aと判定された。これについては、地震動の強さと被災度の関係について、例えば、橋ごとに有する構造的な耐荷力や特殊条件もあることから、本提案手法で示した条件だけでは十分に評価できない点もあることを示していると考えられる。

4. おわりに

大地震時における道路橋被災度の簡易推定手法について提案するとともに、実際の地震に適用を試みた検証結果を示した。その結果、安全側の評価にはなるが、7割弱と概ね妥当な精度で被災度の予測が可能であることが分かった。

しかしながら、本手法は地震情報と比較的簡単な構造条件という限られたデータに基づいた統計的な判断によるものであり、今後も被災の経験を踏まえながら改良を続ける必要があるものと考えられる。例えば、昭和55年以降の新しい基準を適用した橋梁の被災事例はまだ少ないため、引き続きデータの蓄積を続けることにより精度を高めることが可能になると考えられる。さらに近年は地震計の配置密度が上がっており、正確なSI値の取得も可能となることから、これらを併せて予測精度も向上できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路震災対策便覧(震災復旧編)，2002.4
- 2) 新潟地震調査報告、土研報告第125号，1965.6
- 3) 1968年十勝沖地震災害調査報告、土研報告第141号，1971.6
- 4) 1978年宮城県沖地震災害調査報告、土研報告第159号，1983.3
- 5) 1983年日本海中部地震災害調査報告、土研報告第165号，1985.3
- 6) 平成5年(1993年)釧路沖地震災害調査報告、土研報告第193号，1994.2
- 7) 1993年北海道南西沖地震災害調査報告書、土研報告第194号，1994.7
- 8) 平成7年(1995年)兵庫県南部地震災害調査報告、土研報告第196号，1996.3
- 9) 平成12年(2000年)鳥取県西部地震緊急調査報告書、土研資料第3769号，2000.12
- 10) 平成15年5月26日宮城県沖の地震の被害に係わる現地調査報告書、土研資料第3914号，2003.9
- 11) 平成15年7月26日宮城県北部地震に係わる現地調査報告書、国総研資料第133号，2003.10
- 12) 平成15年(2003年)十勝沖地震被害に係わる現地調査報告書、国総研他，2004.3
- 13) 平成16年(2004年)新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要、国総研他，2005.1

小林 寛*



独立行政法人土木研究所
耐震研究グループ耐震チ
ーム主任研究員
Hiroshi KOBAYASHI

運上茂樹**



独立行政法人土木研究所
耐震研究グループ耐震チ
ーム首席研究員、工博
Dr. Shigeki UNJOH