

(123) 道路橋の耐震設計への限界状態設計法の適用に関する基礎的考察

—— 道路橋の地震被害と震後交通機能との関係 ——

建設省 土木研究所 正員 佐々木 康

建設省 土木研究所 正員 田村 敬一

日本技術開発(株) 正員 ○佐伯 光昭

1. 概要

土木構造物の設計には、欧米諸国にあっては安全性を合理的に評価しうる限界状態設計法が最近では主流になってきている。我が国では従来から許容応力度法による設計が行われているが、近年、鉄筋コンクリート構造物や鋼構造物に関する限界状態設計法の適用の研究が積極的に進められ、1986年には「昭和61年版コンクリート標準示方書」の中で同法の考え方が基本に規定された。このような動向に鑑み、道路橋についても限界状態設計法の採用を図ることが、重要な技術課題と考えられ、現在、上部工、下部工への具体的反映の方法に関する調査、検討が開始されている。

我が国の道路橋に限界状態設計法を適用する場合、特に留意すべき点は下部工の諸元が地震時で定まることである。即ち、地震時の限界状態を適切に設定した下部工の設計を行うことが必須となる。

本報告は、この地震時の限界状態を合理的に定める上での基礎資料とするため、既往の震害事例に着目して、それらの耐力の面から見た被害程度の分類を行うとともに、震後の交通機能についても阻害の程度を分類して、各対象橋梁毎に両者の関係を整理し、それらの要因を考察するものである。

2. 道路橋の限界状態設計法における耐震設計の概念

限界状態とは構造物または部材において荷重作用が危険側に大きく変化したり、構造物または部材の耐力が不足して当該構造物の本来の機能を全く失うか、その機能を果たす通常の使用状態における変形、ひび割れ等に関する制限を満足しないような状態として定義される¹⁾。一般に、前者は終局限界状態、後者が使用限界状態と呼称される。

耐震設計の目的は、地震の影響に対して当該構造物の安全性を確保することにある。地震の発生は確率的な事象と見なされ、地震の規模が大きくなるにつれて、その再現期間が長くなる。したがって、耐震設計を合理的に行うためには、当該構造物のライフタイムと地震の再現期間との関係を確率統計的に評価して設計地震動を定めることが必要である。この際、極めて稀にしか発生しない再現期間の長い大規模地震に対しても、損傷を生じさせない設計とすることは徒に構造物の巨大化を招くことになり、不経済となる。

このような問題を工学的に解決するため、地震の規模に応じて当該構造物の震後の機能に着目した耐震設計の目標水準を設定するという方針がアメリカ合衆国やニュージーランドの道路橋の耐震設計規定^{2), 3)}に取り入れられている。この基本的な概念は次のとおりである。

- ① 橋の耐用年数の間に数回程度発生しうる中規模の地震に対しては、弾性範囲内で抵抗し、万一被災が生じたとしても軽微な損傷に留め、通常交通機能は確保されなければならない。
- ② 橋の耐用年数に比べて再現期間の極めて長い大規模地震に対しては、被災の程度が甚大であっても落橋もしくは部分的な崩壊を生じさせてはならない。交通機能が低下したにせよ、応急復旧後に緊急車両が通行可能で、しかも本復旧が可能な状態が確保されなければならない。
- ③ 被災の箇所は、点検や診断を容易にするため肉眼で確認するとともに、復旧のために容易にアプローチが可能であることが望ましい。

この考え方は、いわば弾性設計と終局設計からなる二段階耐震設計の体系であり、上述した限界状態設計法における2つの限界状態、即ち使用限界状態と終局限界状態を想定した安全性の照査を行うものであるといえよう。図-1にこれらの関係を整理し、道路橋の耐震設計で考慮する限界状態と地震動の強さとの関連

をイメージした結果を示す。

3. 調査対象資料と整理方法

対象地震は道路橋の被害状況の資料が比較的質、量ともに充実している次の4つの地震——①新潟地震(1964, M=7.5)、②宮城県沖地震(1978, M=7.4)、③浦河沖地震(1982, M=7.1)、④日本海中部地震(1983, M=7.7)——とした。調査はこれらの震害調査報告書類^{4)~7)}に依ることとした。それらによれば、被害橋梁の数は上記各地震毎に155、160、114、26の合計445橋である。

具体的な整理はこれらの橋の中から、次の条件に適合するものを原則として抽出することとした。すなわち、(a) 完成年度が鋼道路橋示方書が制定された昭和31年以降であること、(b) 橋長15m以上であること、(c) 被害状況程度が図、写真などにより明確に記載されているもの、の3つである。

その結果、新潟地震：8橋、宮城県沖地震：32橋、浦河沖地震：13橋、日本海中部地震：11橋の合計64橋を整理の対象とすることとなった。

耐荷力に着目した橋全体としての被災程度の種類は、上部工、橋脚、基礎工といった橋の各部位毎に生じた損傷の程度について整理を行なって、それらを総合するとともに復旧工の全体的な規模を勘案し、表-1に示す方法により、総合評価を行うこととした。

震後交通機能については、応急復旧に到るまでの状況により表-2に示す内容により分類することとした。

このようにして調査した結果は、橋梁諸元、被災形態および程度、架橋地点の地盤種別G、C、および地震動最大加速度の推定値 A_{max} などと併せて整理台帳としてとりまとめた。

4. 整理結果および考察

耐荷力から見た橋梁の被災の分類と震後交通機能との関係をマトリックスとし

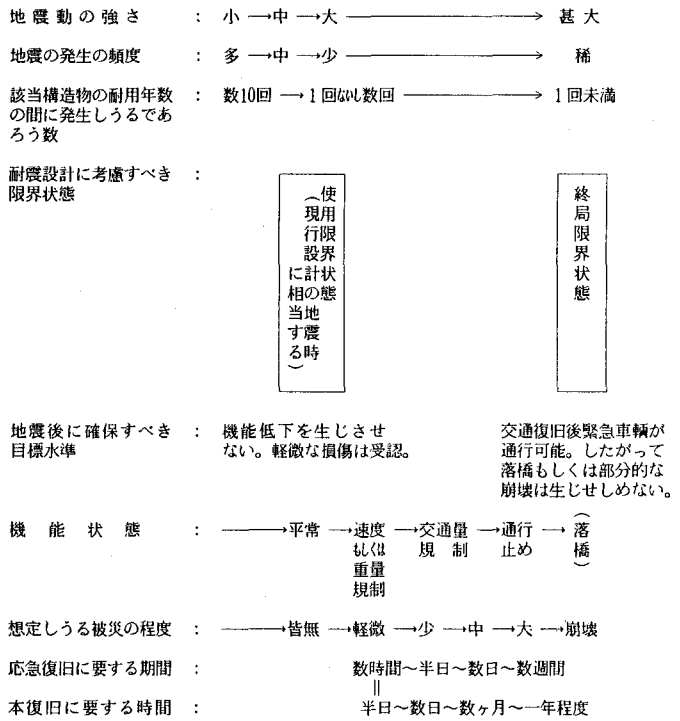


図-1 地震時における限界状態の想定と被災の程度および震後復旧との相互関係のイメージ

表-1 総合評価の被害程度の種類

被害程度	被害の概要	損傷規模	被害程度
1	耐荷力の低下に著しい影響のある損傷	甚大	落橋など新規架設が必要な橋全体にわたる損傷
2	耐荷力の低下に影響のある損傷	大	架替えの必要がある損傷、橋脚、主桁など主要部材の大規模補強が必要な損傷
3	耐荷力の低下には影響のない損傷	中	支承部等の部材取替え、比較的規模の大きい補修が必要な損傷
4	軽微な損傷	小	ヘアクラック等の部分的、小規模な補修が必要な損傷
5	被害なし	—	なし

表-2 交通機能の変状程度の種類

地震後の交通能力 ^{*1}		
被害度	制限状況	
I	交通不能	*1 地震直後のものを対象にし、取付道路の変状によるものも含む。 *2 重量制限と速度制限が併用された場合はⅡ. 重量制限とした。
Ⅱ	重量制限 ^{**2*3}	
Ⅲ	速度制限	*3 軽車両、歩行者のみ通行可および片側通行を含む。
Ⅳ	制限なし	

て整理した結果を表-3に示す。表-4は震後交通機能と変状原因の関係を対象地震毎にとりまとめた結果を示す。これらの表中には周辺地盤が液状化し、その影響を受けたものと考えられる橋を枠で囲んで示した。

これらの整理結果から次の点が指摘される。

① 表-3から耐荷力に問題がある場合、震後の交通機能が低下する傾向にあることが認められる。なお、耐荷力に影響がない場合でも交通不能となる事例があるが、これについては橋台背面盛土が原地盤の液状化により大幅に沈下変状が生じたためである。

② 震後の交通機能については表-4に示すように、全体の約15%、9橋づつが交通不能および重量制限、残り70%のうちほとんどが制限無し(42橋)であった。交通不能となった原因は落橋3橋と浦河沖地震の際の静内橋での橋脚大破の1例を除いて原地盤の液状化による橋台背面盛土の沈下変状によるものである。

③ 表-3に示した橋の中で各部位の損傷の相互関係もしくは波及のパターンが資料により比較的良く判明しているものは、昭和大橋、八千代橋、万代橋などでありいずれも原地盤の液状化の影響を受けたものである。一例として八千代橋の状況を図-2¹²⁾に示すが液状化に伴う地震の塑性的な流動の発生が橋台取付部盛土～原地盤の永久変形を招き、それが橋台躯体や基礎の変状を生ぜしめ、支承を介して上部工から橋脚に強制変位を与えて、最悪の場合には落橋に到るといった機構が考えられる。また、東跨線橋の被災は地盤全体の液状化に伴い発生した永久変形の影響を大きく受けているものと推察される。なお、五明光橋については取付盛土の変状により交通不能になった

表-3 耐荷力および交通機能の被害程度別橋梁一覧

	I (交通不能)	II (重量制限)	III (速度制限)	IV (制限なし)
1 耐荷力の低下に著しい影響のある損傷	昭和大橋 東跨線橋 八乙女橋 錦坂橋*	八千代橋	—	— 5(4)
2 耐荷力の低下に影響のある損傷	静内橋	万代橋 羽黒橋 天王橋 伊達橋 新山田橋 小須戸橋 橋の瀬橋 龍馬橋	阿上大橋 志田橋 柳津大橋	(新)松浜橋* 他2橋 15(10)
3 耐荷力の低下には影響のない損傷	男鹿大橋* 五明光橋 大島橋	—	咲梅橋	泰平橋 鳴沢橋 富栄橋 他7橋 14(6)
4 軽微な損傷	十三瀬大橋*	—	—	天和田橋 他25橋 27(2)
5 被害なし	—	—	—	賀張橋 他2橋 3(0)
橋梁数内訳	9(8)	9(6)	4(1)	42(5)

*印は架橋地点および周辺地盤に液状化現象がみられた橋梁を、()内の数字はその橋梁数を示す。
*1 取付部沈下、*2 架設中、*3 修復中

表-4 被災橋梁の交通機能の変状程度および変状の要因

交通能力の変状程度	震 災 名 称			
	新潟地震	宮城県沖地震	浦河沖地震	日本海中部地震
I (交通不能)	昭和大橋(落橋) 東跨線橋(落橋)	総持橋(落橋) 八乙女橋 (橋台取付部の沈下)	静内橋 (橋脚大破)	男鹿大橋(取付部沈下) 十三瀬大橋 (取付部沈下) 天和田橋(取付部沈下) 五明光橋 (取付部沈下)
II (重量制限)	八千代橋 (取付部沈下、橋脚、折損) 小須戸橋 (橋脚、橋台の沈下) 万代橋 (取付部、橋台の沈下)	天王橋(橋脚折損) 朝ノ瀬橋(路面亀裂) 伊達橋 (管破損、下弦材破損、路面亀裂)	—	静内橋(橋台折損) 新山田橋 (橋台橋脚折損) 羽黒橋 (橋台抗部折損)
III (速度制限)	—	阿上大橋(橋台沈下) 志田橋(橋脚躯体折損) 柳津大橋 (支承部、橋台部)	咲梅橋 (支承破損、折腹落)	—
IV (制限なし)	(新)松浜橋 泰平橋 他1橋	天和田橋 他23橋	富栄橋 他10橋	賀張橋 他3橋
橋梁数	8(7)	32(3)	13(2)	11(8)

*印は、架橋地点または周辺地盤に液状化現象がみられた橋梁を、() 数値はその橋梁数を示す。
*片側通行は片側2車線に含む。

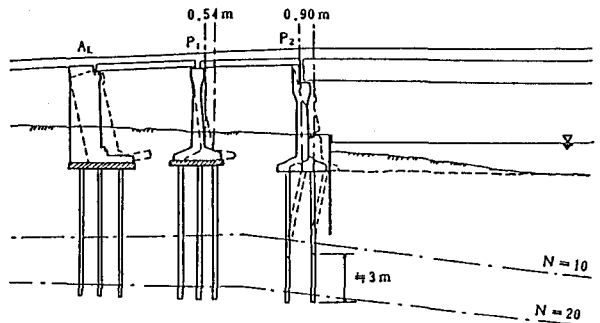


図-2 八千代橋 A1橋台付近の被災状況の概要¹²⁾

が、耐荷力には影響のない損傷に留まった。このことは図-3¹⁰⁾に示すように橋台がパイロント構造で、背面盛土は橋台と分離したL形擁壁によって支持されているため、原地盤に液状化が大規模に生じたにも拘らず、盛土～原地盤が橋軸直角方向に流動し橋台には直接その影響が及ばなかったものによるものと考えられる。

この他、損傷発生部位と耐荷力にもとづく被災程度との関係から、落橋もしくは大規模な破壊を呈した橋は宮城県沖地震の際の錦桜

橋を除いて地盤の液状化の影響を受けたものであること、被災程度が大規模な破壊、局部的な破壊および耐荷力に影響のない損傷のランクまでは橋脚、上部工の割合が多いが、軽微な損傷では相対的に橋台および支承部の被災の割合が増加していることが判明した。なお、液状化発生の影響が小さいか、発生しない場合の橋梁の耐荷力に係わる被災は橋脚躯体および上部工に多く生じている。

5. まとめ

以上、一連の調査の結果を示したが、それらの成果は次のように要約される。

- ① 道路橋の被害の程度および震後の交通機能の状況は液状化の発生の程度に大きく影響される。
- ② 図-1に示した、2つの限界状態——使用限界および終局限界状態——としては耐荷力と震後交通機能のマトリックスを示した表-3を参照して使用限界状態は、同表中の2-IIと3-IIIとの間の境界、終局限界状態は同じく1-Iと2-IIとの間とすることが一つの案として考えられよう。いずれにせよ原地盤の液状化の発生が橋台部分の被災に大きく影響を与えるので、合理的な液状化対策の検討を含めた設計計算手法の設定を図ることが必要である。

今後の課題としては、上述した被災形態、震後交通機能の低下の度合いと作用した地震荷重および設計震度との関連を詰めるとともに、実際の被災事例および損傷を生じなかった事例に対する逆解析により、その原因の究明を図り、設計計算法の精度を検討することが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 伊藤学, 尾坂芳夫, 設計論, 土木工学体系15, 彰国社, 1980, 2) American Association of State Highway And Transportation Officials, GUIDE SPECIFICATIONS FOR SEISMIC DESIGN OF HIGHWAY BRIDGES, 1983, 3) H. E. Chapman: The New Zealand Philosophy and Design Loading, Proc. of Japan-New Zealand Workshop on Base Isolation of Highway Bridge, Nov. 9, 1987, 4) 建設省土木研究所, 新潟地震調査報告, 土木研究所報告 125号, 昭和40年6月, 5) 建設省土木研究所, 日本技術開発株式会社, 地震被害軽減対策の費用効果に関する調査報告書, 昭和58年1月, 6) 宮城県土木部道路建設課, 1987年6月宮城県沖地震による橋梁震害調査報告書, 昭和53年10月, 7) 建設省土木研究所, 1978年6月宮城県沖地震災害調査報告書, 土木研究所報告 159号, 昭和58年3月, 8) 勸国土開発技術センター, 1982年3月浦河沖による橋梁震害調査報告書, 昭和57年9月, 9) 北海道総務部防災消防課, 昭和57年浦河沖地震災害記録, 昭和58年3月, 10) 建設省土木研究所, 1983年日本海中部地震災害調査報告, 土木研究所報告 165号, 昭和60年3月, 11) 土木学会, 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 昭和61年10月, 12) K. Kawashima, K. Shimizu, S. Mori, M. Takagi, N. Suzuki and S. Nakamura, ANALYTICAL STUDIES ON DAMAGE TO BRIDGES AND FOUNDATION PILES CAUSED BY LIQUEFACTION-INDUCED PERMANENT GROUND DISPLACEMENT, PROCEEDINGS, First Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities November 1988, Tokyo, Japan

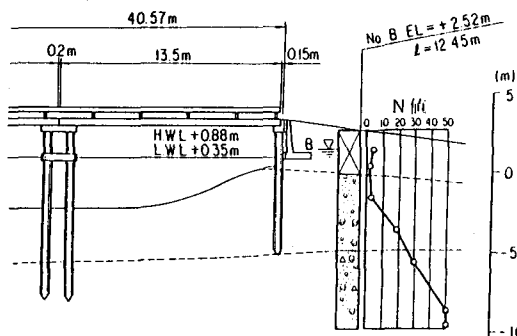


図-3 五明光橋 橋台付近の構造概要¹⁰⁾