

PC ラーメン橋の動的非線形解析と被災度の推定

- ひずみによる被災度推定と損失率の評価 -

学生氏名 鎌田 麻美

指導教員 吉川 弘道

青戸 拡起

1. はじめに

近年日本では、兵庫県南部地震をはじめ、新潟中越地震、新潟中越沖地震などの大きな地震による被害が多く発生している。特に、兵庫県南部地震においては大きな被害をもたらし、多くの構造物が被災した。しかし、構造物の被災程度や継続使用可否などの判断は限られた人数の専門家の判定に頼らざるを得ないため、災害規模が大きく、広範囲であるほど多大な時間を要するのが現状である¹⁾。そこで本研究では、外観による判定手法を払拭するため数値解析による被災度推定表を作成した。また、さまざまな強震記録を用いて PC ラーメン橋の動的解析²⁾を行い、その被災度から橋梁の損失率の評価を行った。

2. 解析対象と解析モデル

解析対象は図-1 に示す、全長 166.8m、幅員 10.4m、柱高さ 28.0m の PC3 径間連続ラーメン箱げた橋³⁾とする。構造諸元は表-1 に示す。この橋梁の設計基準強度は 24N/mm^2 、鉄筋は SD345 を使用し、橋軸方向、橋軸直角方向の固有周期はそれぞれ 0.96s、1.15s である。

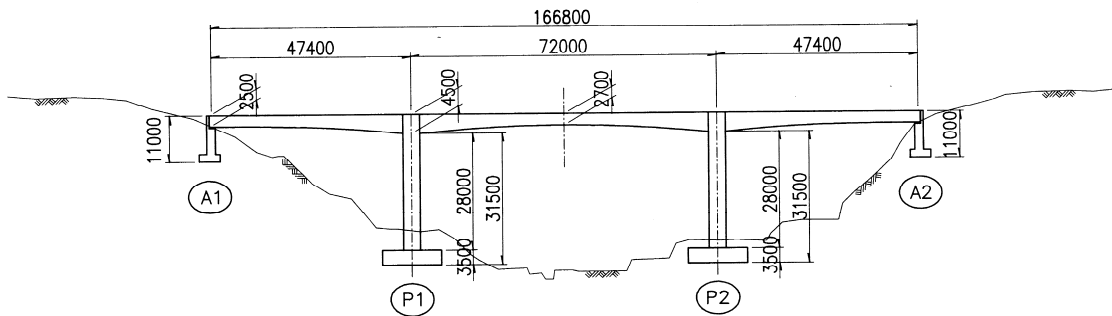


図-1 解析対象構造物

表-1 構造諸元

名称	PC3 径間連続ラーメン箱げた橋
重要度の区分	B 種の橋
地域区分	A 地域
耐震設計上の地盤区分	I 種地盤
地盤条件	N 値 50(軟岩)の支持層
活荷重	B 活荷重
橋脚	柱式橋脚(充実断面、段落とし無し)
橋台	逆 T 型橋台
基礎	直接基礎
柱高さ	28.0m
スパン	47.4m+72.0m+47.4m
幅員	全幅員 10.4m

解析時の骨組みモデルを図-2 に示す。節点数は 51，要素数は 50，そのうち非線形部材数(ファイバー要素数)は 14 である。橋脚の柱部分をファイバー要素，フーチングは弾性梁要素，橋脚上端部には剛体要素が用いている。

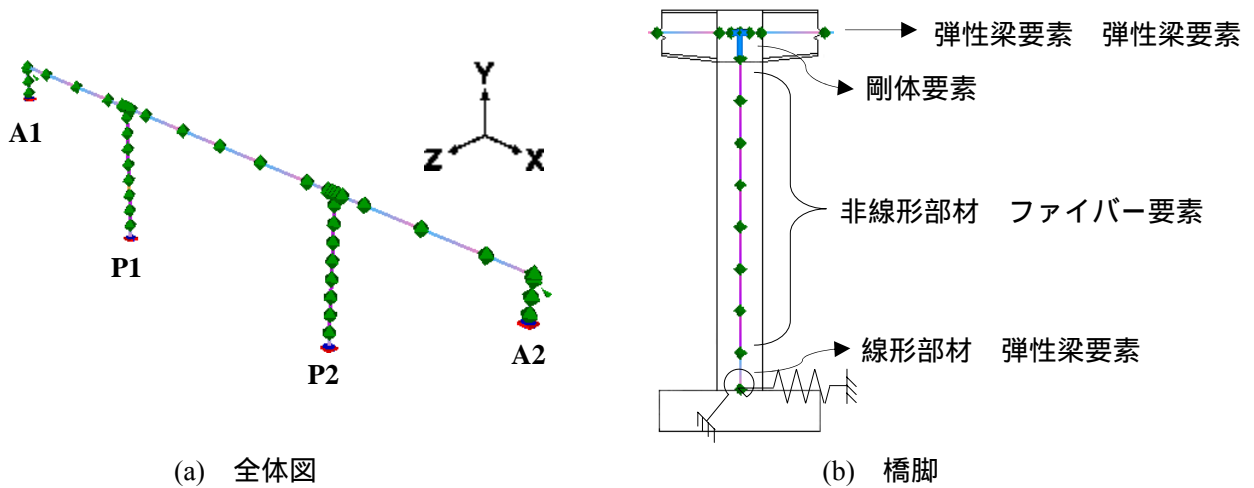


図-2 骨組みモデル

3. 被災度推定表の作成

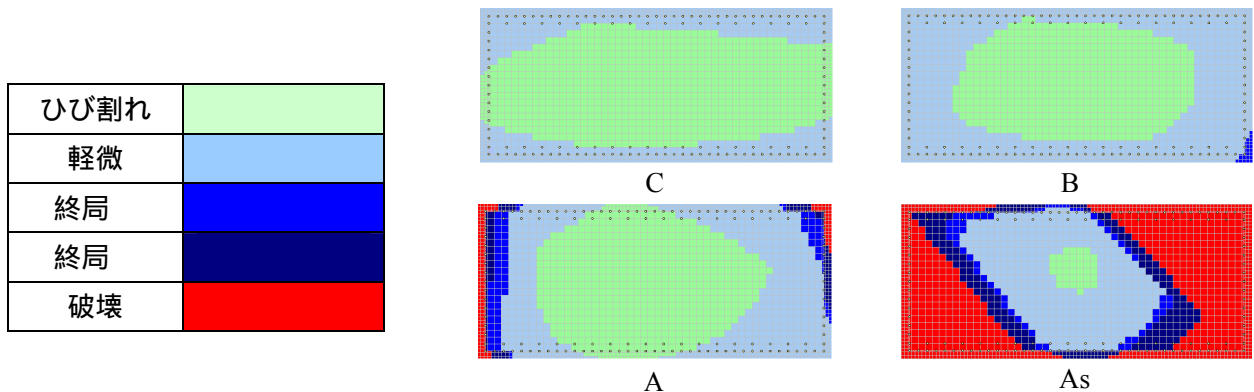
震災対策便覧を基に，鉄筋，コアコンクリート，カバーコンクリートそれぞれの損傷状態と最大圧縮ひずみの関係を整理すると，次のようになる。

- 鉄筋降伏後は被災度ランク C 以上
- カバーコンクリート終局後は被災度ランク B 以上
- コアコンクリート終局後は被災度ランク A 以上
- コアコンクリートが破壊に至ったものは被災度ランク As

これらを最大ひずみによって表し，表-2 に示す被災度推定表を作成した。各被災度の断面損傷図例を，図-3 に挙げる。

表-2 最大圧縮ひずみによる被災度推定

被災度	D (無被害)	C (小被害)	B (中被害)	A (大被害)	As (倒壊)
鉄筋 ϵ_s (引張)	ϵ_s ϵ_y	$\epsilon_s > \epsilon_y$			
コンクリート ϵ'_c (圧縮)	ϵ'_c ϵ'_{cc}		$\epsilon'_{cc} < \epsilon'_c$ ϵ'_{cu}		$\epsilon'_{cu} < \epsilon'_c$
着目箇所	カバーコンクリート			コアコンクリート	



(a) 損傷状態ごとの色分け

(b) 断面損傷図

図-3 被災度別断面損傷図例

4. 動的非線形解析結果の被災度推定と損失率の評価

(1) 解析に用いる地震動

解析には気象庁震度階 6 弱 (計測震度 5.5) 以上の 8 種の地震, 計 31 箇所における K-NET 強震記録⁴⁾を用いた。加速度波形の例を図-4 に示す。この波形は新潟県中越地震の小千谷で記録された波形で, 最大 1501.9gal で, 震度 7 の記録である。図-5 のように橋梁の橋軸方向と EW 方向が一致する角度を 0 度とし, 橋梁を時計回りに 10 度刻みで回転させ, 1 観測点につき 19 ケースの解析を行った。

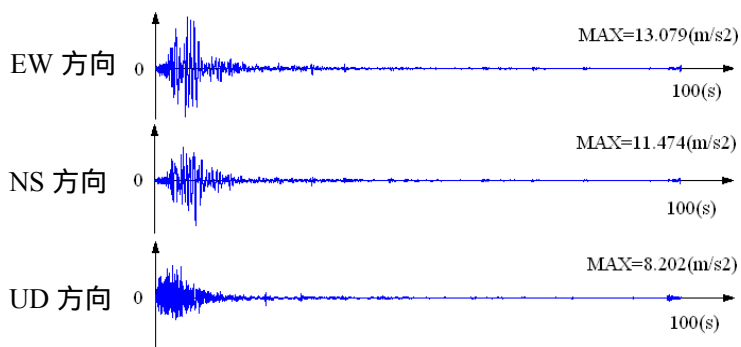


図-4 新潟県中越地震の小千谷で観測された加速度波形

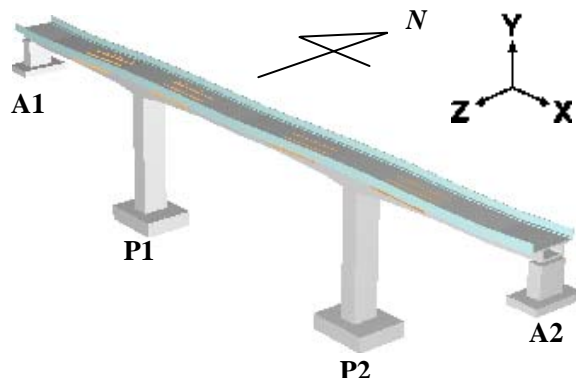
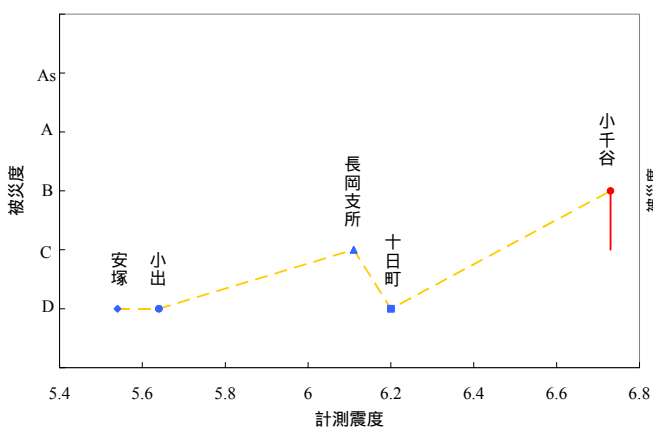


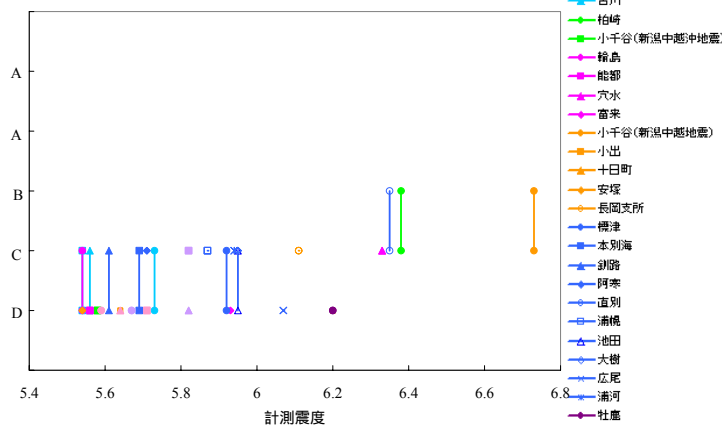
図-5 橋梁角度 0 度時

(2) 被災度推定と計測震度

橋脚 P1 の基部に着目し, 表-2 に基づいて被災度推定を行った。例として, 新潟県中越地震の強震記録を用いた解析結果より推定した被災度と計測震度の関係を図-6 に示す。



(a) 新潟県中越地震



(b) 全観測点

図-6 計測震度と推定被災度

図-6(a)は, 新潟県中越地震の 5 箇所の記録によるものである。新潟県中越地震の小千谷では, 入力角度によって被災度が C~B に変化している。図-6(b)は, 同図 a) を含む, 全 31 箇所の強震記録による結果である。同図より, この橋梁の被災度の最高は B, 最低は D であることが確認できる。特に, 計測震度が 6.35 以上であった観測点のみ, B の被災度が表れた。

(3) 損失率の評価

この結果を用いて, 新潟県中越地震 (観測点: 小千谷) による PC ラーメン橋の損失率を求めた。各被災度の橋脚 1 本あたりの損失額⁵⁾と最高額を 100%とした時の橋梁全体の損失率を表-3 のように設定する。

被災度 D は無被害であるため復旧費用はかからない。被災度 A, As は橋脚が破壊, 倒壊しているため, 他の被災度と比べて莫大な費用がかかることになる。また, 被災度 A と As は橋脚 1 本あたりの損失額は同じだが, 橋梁全体では As の方が大きくなっている。これは, 橋脚の被災度が A の場合は上部構造を再利用できるが, As の場合は橋梁全てを再構築するものとしているためである。

以上より、各被災度の発生頻度 n_i と損失率 c_i から、ある地震における 1 観測点の損失率の期待値 NEL と標準偏差は表-4 のように表される。

表-4 をもとに、PC ラーメン橋に新潟県中越地震（観測点：小千谷）の地震動を作用させた時の損失期待値 NEL と被災度のばらつきを示す標準偏差を表-5 に示す。

表-3 被災度別損失率

被災度	D	C	B	A	As
橋脚 1 本あたりの損失額(万円)	0	96	666	1209	
橋梁の損失率 c_i (%)	0	2	10	20	100

表-4 観測点別期待値 NEL と標準偏差

被災度	頻度 n_i	確率 p_i	損失率 c_i	$p_i \cdot c_i$	標準偏差 c
D	n_1	n_1/N	c_1	$n_1/N \cdot c_1$	$\sigma_c = \sqrt{\sum_{i=1}^5 p_i \times (c_m - c_i)^2}$
C	n_2	n_2/N	c_2	$n_2/N \cdot c_2$	
B	n_3	n_3/N	c_3	$n_3/N \cdot c_3$	
A	n_4	n_4/N	c_4	$n_4/N \cdot c_4$	
As	n_5	n_5/N	c_5	$n_5/N \cdot c_5$	
	N	1		$c_m (NEL)$	

表-5 小千谷（新潟県中越地震）の期待値 NEL と標準偏差

被災度	頻度 n_i	確率 p_i	損失率 c_i (%)	$p_i \cdot c_i$	標準偏差 c
D	0	0	0	0	$\sigma_c=0.0377$
C	12	0.667	2	0.0133	
B	6	0.333	10	0.0333	
A	0	0	20	0	
As	0	0	100	0	
	18	1		0.0467 (NEL)	

この橋梁の平均損失率 c_{NEL} と標準偏差 c は、新潟県中越地震では $c_{NEL} = 1.33\%$ 、 $c = 0.754\%$ 、全地震では $c_{NEL} = 1.08\%$ 、 $c = 0.468\%$ 、であった。

期待値 NEL を用いれば、さまざまな構造物、ならびに地点や地震に対し、地震による損失を定量的に比較することが容易となる。なお、期待値 NEL に、被災度 As 時にかかる損失額 (= 再構築費用) を乗じることにより、地震による損失を「損失額」で表すこともできる。

5. まとめ

地震や観測点はもちろんのこと、地震動の作用方向によって橋の揺れ方は様々であるため、地震動が小さくても損失率が小さいとは一概には言えない。よって、地震動の大きさだけで損失率の比較を行うことは確定的に難しい。本研究では各観測点の被災度の発生頻度を基に被災度別の発生確率を算出し、観測点ごとの期待値 NEL を求めた。これによって、地震や観測点による比較を確率的かつ定量的に行うことが出来る。

【参考文献】

- 1) 社団法人 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の震災復旧・耐震補強技術と事例, 1998.8
- 2) 株式会社 FORUM8：UC-win/F-RAME(3D) Ver.3
- 3) 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 - PC ラーメン橋・RC アーチ橋・PC 斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計計算例 - 平成 10 年 1 月
- 4) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク Kyoshin Net：http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/
- 5) 石井輝尚：RC 単柱橋脚の地震損失の算定と地震リスクによる耐震性評価，武蔵工業大学修士論文，2008.3