

目標性能指標としての損傷度指標と残留変位の関係

三上 卓¹・家村浩和²

¹正会員 博士(工学) 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ(〒305-8516 茨城県つくば市1番地6)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

1. はじめに

近年、各種構造物の設計基準等において採用され始めている性能照査型設計では、構造物に対する要求性能とそれを具体的に実現するための目標性能指標が明確に規定されなければならない。構造物が地震後に保有すべき性能は、地震の発生頻度や重要度などを考慮して決定されるべきである¹⁾。SEAOのVision2000²⁾では、地震荷重と構造物ごとに、まず目標性能(Performance Objective)を設定し、これを満足するように設計を進めるのが、性能設計法(Performance Based Design)であると定義している。さらに設計が目標性能を満足するかどうかを立証するために、許容される基準の定量化が必要であるとしている¹⁾。

著者ら³⁾は、性能照査型設計に用いる目標性能を、地震時の構造物の損傷度を数値的に表現する損傷度指標を用いて表現し、構造物の目標性能に対応する損傷度指標の目標値を設定した。そして、その目標値を満たす降伏強度と塑性率を算定し、目標性能に対応する損傷度指標の目標値に応じた必要降伏強度・応答塑性率スペクトルの作成を行い、損傷度指標が性能照査型設計法の目標性能指標として有効であることを確認した。

1995年の兵庫県南部地震では、鉄道橋の被害に関しては、設計上の耐震性能(靱性)の大きなものほど損傷が小さいことが示されているが、道路橋では、桁と橋脚の間に支承が介在すること、単柱式橋脚では外観から判断された損傷度とは無関係に大きな残留傾斜が発生したことなどから、橋脚の耐震性能だけでその損傷を説明するのは困難であるとの指摘があった⁵⁾。地震での被災及びその後の研究成果を踏まえて、現在の道路橋示方書では、地震後に橋脚に生じる残留変位に対する照査が導入されている⁵⁾。著者らの研究^{3), 6)}では、損傷度指標を用いた耐震性能と残留変位塑性率に何らかの関係が存在すること

を示す結果が得られた。

本論文では、著者らの研究³⁾で目標性能指標として採用した損傷度指標と残留変位との関係を明らかにすることを目的とした。最初に、目標性能を損傷度指標を用いて表現し、構造物の目標性能に対応する損傷度指標の目標値を設定する。そして、その目標性能を満たす残留変位塑性率を1自由度系弾塑性応答解析により算定する。さらに、兵庫県南部地震で被害を受けた橋脚を対象として、その損傷度と残留変位の関係について調査・検討し、残留変位に関する損傷度指標の提案を行う。

2. 残留変位塑性率スペクトル

最初に、構造物の目標性能に対応する損傷度指標の目標値を満たす降伏強度・最大変位(塑性率)といった構造特性値を算定した際の、残留変位スペクトルの作成を行い、目標耐震性能と残留変位の関係について検討した。

(1) 損傷度指標の定義

地震による構造物の損傷度については、以前より、様々な研究がなされてきた。中でもParkとAng⁷⁾等によって、地震による構造物の損傷度を定量的に表すことを目的とした指標が提案されてきた。著者らは、既往の研究^{3), 6)}では、式(1)の損傷度指標 DI ⁸⁾を用いた。

$$DI = \frac{\mu_d - 1}{\mu_u - 1} + \beta \cdot \frac{\mu_h}{\mu_u} \quad (1)$$

ここで、 μ_d 、 μ_u 、 μ_h は、それぞれ、応答塑性率、終局変位靱性率、エネルギー靱性率である。また、 β は部材の断面特性等に依存した正の係数であり、ここでは、 $\beta = 0.15$ を用いた。

なお、式(1)の損傷度指標 DI の値と構造物の損傷

表-1 損傷状態と損傷度指標の関係

損傷状態	損傷度指標の値	構造物の外観
無損傷	0.08	ひびわれなし
使用可能		中程度のひびわれ
修復可能	0.18	かぶりコンクリートの剥離
修復不可能	0.36	鉄筋剥き出し
崩壊	0.60	せん断耐力・軸耐力の損失

表-2 耐震性能に対応する損傷度指標の限界値

	想定地震動	
	L1地震動	L2地震動
耐震性能Ⅰ	0.00	
耐震性能Ⅱ		0.36
耐震性能Ⅲ		0.60

状態および構造物の被害の外観は様々な研究者によって、実在する鉄筋コンクリート構造物の地震後の損傷状況を測定して、表-1 のように提案されている。

(2) 耐震性能と損傷度指標

目標耐震性能は次の3段階^{3), 10)}に設定する。

- ① 耐震性能Ⅰ：弾性限界
- ② 耐震性能Ⅱ：修復可能限界
- ③ 耐震性能Ⅲ：崩壊しない限界

文献3)と同様に、表-1 の関係と要求耐震性能を対応させ、損傷度指標 DI の限界値と耐震性能の関係を表-2 のように設定した。

(3) 解析手法

本研究では Bilinear 型復元力特性を有する1自由度系モデルに対する弾塑性エネルギー応答解析を行った。その際、減衰比 $h=0.05$ 、終局変位靱性率 $\mu_h=5$ とし、固有周期 T は0.1秒～5.0秒の範囲を対数軸上に29等分した30通りの値を用いた。時刻歴応答解析終了後、式(1)の損傷度指標 DI を算定し、 DI が目標値となるように解析を繰り返した。

入力地震動は、地盤条件をⅠ種地盤と想定し、L1地震動として時刻歴応答解析用標準波形Ⅰ、L2地震動のTypeⅠ地震動として宮城県沖地震・開北橋記録LG成分、TypeⅡ地震動として兵庫県南部地震・神戸海洋気象台記録NS成分を用いた。

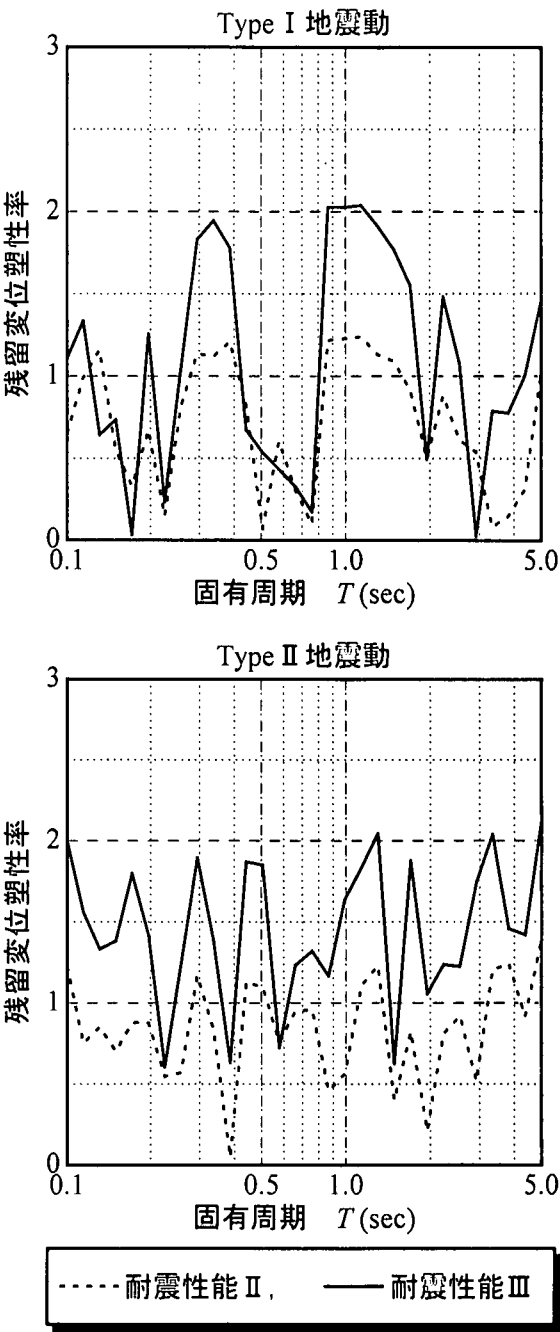


図-1 損傷度指標の限界値を満たす残留変位塑性率スペクトル(終局変位靱性率 $\mu_h=7$)

(4) 解析結果

図-1は、各耐震性能に対応する残留変位塑性率スペクトルを示したものである。耐震性能Ⅱは修復可能限界を意味しており、地震後に補修を必要とするが、早期に機能回復できる¹⁰⁾ということから、この残留変位塑性率が目標性能に用いる重要な限界値となると考えられる。同図より、ほとんどの周期帯でTypeⅠおよびTypeⅡ地震動ともに、耐震性能Ⅱでは最大の残留変位塑性率が1、耐震性能Ⅲでは最大で2の値を示している。なお、これらの値は損傷度の目標値を満たしている。弾性周期により、残留変位塑性率がかなり異なっているが、これは入力地震動に

表-3 解析対象橋脚の被害調査リスト

橋脚番号	破壊モード	損傷度 ランク	残留変位 (m)
P-20	曲げせん断	D	0.0566
P-21	曲げせん断	C	0.0552
P-24	曲げ	D	0.0406
P-25	曲げ	D	0.0473
P-27	曲げ	D	0.0249
P-29	曲げ	D	0.0257
P-49	曲げせん断	C	0.0912
P-50	曲げせん断	C	0.0931
P-51	曲げ	C	0.0380
P-52	曲げ	D	0.0385
P-53	曲げ	B	0.1008
P-54	曲げせん断	A	0.1236
P-91	曲げせん断	B	0.0562
P-92	曲げ	D	0.0951
P-94	曲げ	D	0.1173

よる影響と考えられる。また、本解析では、復元力特性として Bilinear 型を使用しているが、Takeda 型のように戻り剛性の小さなモデルを使用する必要があると考えられる。

3. 損傷度指標と残留変位

ここでは、兵庫県南部地震で被害を受けた橋脚を対象とし、その損傷度と残留変位の関係について調査・検討した。

(1) 解析対象橋脚⁹⁾

本研究で解析対象とした橋脚は、名神高速道路よりやや西の地区に神 P-20, 神 P-21, 神 P-24, 神 P-25, 神 P-27, 神 P-29, 西宮出入口地区にある神 P-49～神 P-54, 芦屋出入口地区にある神 P-91, 神 P-92, 神 P-94 の計 15 橋脚であり、段落としのない高さがおおよそ 10～15m の単柱である。また、地盤種別はⅡ種である。

ここで解析対象とした橋脚の被害調査リスト(破壊モードと損傷度ランク, 残留変位)を表-3 に示す。

家村ら⁹⁾は、表-3 の橋脚地震被災後に測定された曲げ塑性残留変位から最大弾塑性応答変位を推定し、その結果から、橋脚の建設地点の線形最大応答加速度を算出した。この結果は、残留変位の性格から、作用地震力の評価の下限値を与えるものと考えられる。

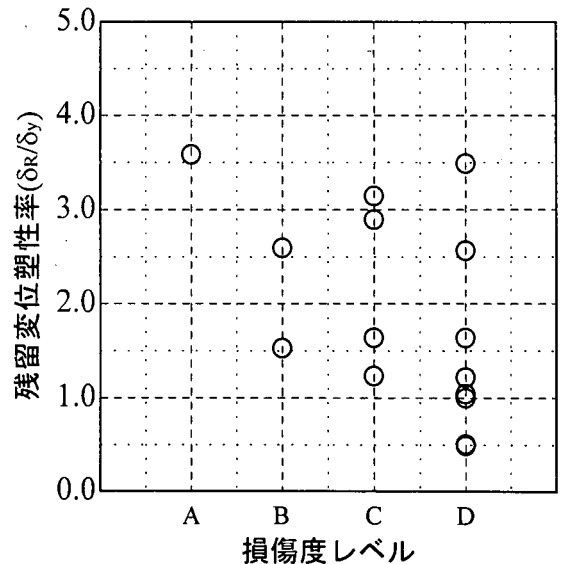


図-2 残留変位塑性率と損傷度レベル

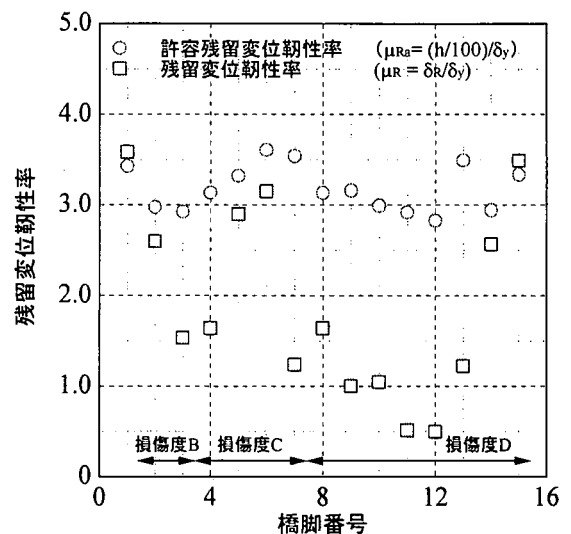


図-3 残留変位塑性率と許容残留変位塑性率

(2) 解析結果

図-2 は、残留変位塑性率と損傷度レベルの関係を示したものである。図より、いくつかの橋脚を除いて、損傷度レベルと残留変位塑性率にはなんらかの関係が見受けられる。

また、図-3 には、橋脚の残留変位塑性率と許容残留変位塑性率を示した。ここで、許容残留変位塑性率とは、道路橋示方書に規定されている残留変位 $\delta Ra^{5)}$ ($=h/100$, h : 橋脚高さ) を降伏変位 δy で除したものである。対象とした橋脚は橋脚高さが 10m～15m と限定されたものではあるが、許容残留変位塑性率 μRa は 3 であることから、 $\mu Ra=3$ が使用限界⁵⁾と考えられる。この図より、損傷度が高い橋脚ほど、許容残留変位塑性率と残留変位塑性率の差が小さい、もしくは、残留変位塑性率が上回っていることがわかる。損傷度 C で差の小さいものは、実際には橋脚の

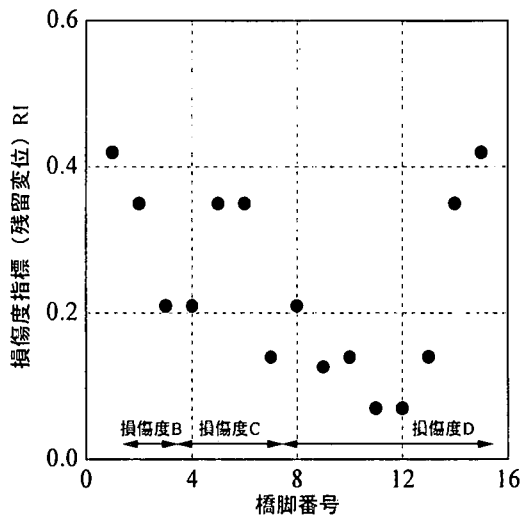


図-4 残留変位を用いた損傷度指標

傾斜が大きいので撤去されており、橋脚の損傷度を表す指標には、残留変位を用いる必要があると考えられる。

(3) 残留変位に関する損傷度指標

図-3 の解析結果より、構造物の残留変位に関する損傷度指標を式(2)のように考えることとした。

$$RI = \alpha_R \cdot \frac{\mu_R}{\mu_{Ra}} \quad (2)$$

ここで、道路橋示方書では許容残留変位 δ_{Ra} が使用限界を表しているおり、また、式(1)の損傷度指標と損傷状態の関係(表-1)から、 $\alpha=0.4$ とした。

図-4 に、表-3 の解析対象橋脚の残留変位に関する損傷度指標 RI を示す。損傷度 D の 2 橋脚を除くと、損傷度と残留変位に関する損傷度指標には相関関係が見られ、その関係は損傷度が大きいほど、損傷度指標も大きいという関係になっている。なお、損傷度 D の橋脚に関しても、そのうち 1 橋脚は傾斜が大きいことから撤去されている。

4. おわりに

本論文では、まず、損傷度指標の限界値を満たす残留変位塑性率スペクトルの作成を行った。さらに、被災した橋脚の損傷度と残留変位塑性率の関係を示し、残留変位に関する損傷度指標を提案した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 残留変位塑性率スペクトルから、機能回復可能な耐震性能Ⅱを満足するためには、残留変位は δ_y 以内、崩壊を防ぐ耐震性能Ⅲを満足するため

には、 $2 \times \delta_y$ 以内であることが必要であることが判った。

- 2) 実際に被災した橋脚の損傷度と残留変位塑性率には一定の関係が見受けられた。また、許容残留変位塑性率と残留変位塑性率による損傷度を用いることにより、橋脚の傾斜による撤去も考慮に入れることができると考えられる。
- 3) 本論文で提案した残留変位に関する損傷度指標は、橋脚の損傷度との相関が見られた。今後、橋脚の損傷度指標との関連性を検討することにより、新たな損傷度指標の提案が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 家村浩和：極限地震動に対する要求性能と設計法のあり方—耐震性能から先端技術を応用した免震・制震設計へ—，土木学会論文集，No.623/VI-43，pp.1-8，1999.6.
- 2) Structural Engineers Association of California: Vision 2000 (Performance Based Seismic Engineering of Buildings)，1995.
- 3) 家村浩和，三上卓：目標耐震性能に必要な降伏強度と塑性率のスペクトル，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.333-342，2001.10.
- 4) 阿部哲子，藤野陽三，阿部雅人：1995 年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と 2,3 の分析，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.181-199，1999.1.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，丸善，1996.12.
- 6) 三上卓，家村浩和：性能照査型設計のための損傷度指標，第 4 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.17-24，2000.12.
- 7) Park, Y.-J. and Ang, H.-S. : Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol.111, No.4, pp.722-739, April 1985.
- 8) Ghobarah, A. and Aly, N.M. : Seismic reliability assessment of existing reinforced concrete buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.2, No.4, pp.569-592, 1998.
- 9) 家村浩和，高橋良和，平手知：RC 道路高架橋の損傷度から推定した地震動強度に関する研究，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.83-86，1998.
- 10) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，丸善，1999.
- 11) 林秀侃，丸居保，幸左賢二，安田扶律，中田恒和：RC 橋脚の損傷度の評価解析，第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.265-272，1971.1.