

地震時における RC 橋脚の損傷度定量化に関する基礎的研究

長岡工業高等専門学校専攻科 学生会員 大塚 洋一
 長岡工業高等専門学校 正会員 井林 康

1. はじめに

本研究では，最大変形量や地震応答時の消費エネルギー等に基づいて提案されている，数々の RC 構造物の損傷程度を定量的に表す損傷指標を用いて，対象構造物に実地震波を入力，および正負交番載荷した場合についての算定を行い，それらの損傷指標がどのような特性を持ち，RC 構造物の損傷程度の定量化に関してどの程度有効であるかの比較検討を行った．

2. 解析手法

2.1 解析対象構造物

解析対象構造物は，「昭和 55 年道路橋示方書」，「平成 2 年道路橋示方書」，「平成 8 年道路橋示方書」によって新設されたもの，もしくは補強設計を行った補強前後による道路橋の鉄筋コンクリート単柱橋脚 18 例，および，「建設省土木研究所報告 190 号（平成 5 年）」に記されている実験供試体 1 例である．

2.2 地震応答解析手法および実地震波

地震応答解析モデルは，1 質点系モデルと Newmark の法を用いた逐次積分法を用いて応答解析を行い，履歴法則は Degrading Tri-linear モデル，減衰定数は 0.02，応力解析の時間刻みは 1/500 秒として計算を行った．また，解析に用いた実地震波は Imperial Valley，宮城県沖，十勝沖，釧路沖，北海道南西沖，兵庫県南部の 6 地震で記録された計 20 加速度波形で，それらの最大加速度は 192～817gal である．

2.3 正負交番載荷による損傷度の算定

正負交番載荷による解析では，橋脚のモデル化，履歴法則，減衰定数，材料特性，および橋脚躯体の分割数は，2.2 の地震応答解析手法と同様である．また，載荷方法は降伏変位を基準とした変位制御によって載荷を行った．載荷パターンは表-1 に示した，9 つの載荷パターンである．

2.4 損傷指標

本研究では，次式で示される塑性率 μ ，剛性劣化率 DR ，累積塑性率 NCD ，標準化した累積消費エネルギー量 E_n ，Park ら¹⁾が提案した損傷指標 D の 5 つ

表-1 交番載荷の載荷パターン

載荷パターン		載荷パターン		載荷パターン		載荷パターン		載荷パターン	
変位	n	変位	n	変位	n	変位	n	変位	n
0.5 _y	1	1.0 _y	1	1.0 _y	1	1.0	1	0.5 _y	1
1.0 _y	1	2.0 _y	2	2.0 _y	2	2.0	2	1.0 _y ずつ変位増	
0.5 _y ずつ変位増		4.0 _y	2	3.0 _y	3	4.0 _y	4	10 _y	1
		6.0 _y	3	4.0 _y	4	6.0 _y	6	1.0 _y ずつ変位減	
9.5 _y	1	8.0 _y	3	5.0 _y	5	8.0 _y	8	1.5 _y	1
10 _y	1	10 _y	3						

・ y : 降伏変位 ・ n : 載荷回数
 ・ 載荷パターン ~ : 載荷パターン ~ の載荷順序を入れ換えたもの

の損傷指標を用いて損傷程度の算定を行った²⁾．

$$\mu = \frac{\delta_M}{\delta_y} \tag{1}$$

$$DR = \frac{K_0}{K_r} \tag{2}$$

$$NCD = \frac{\sum |\delta_0|}{\delta_y} \tag{3}$$

$$E_n = \int_0^t \frac{P(\tau)\delta(d\tau)}{P_y\delta_y/2} \tag{4}$$

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y\delta_u} \int dE \tag{5}$$

$$\beta = (-0.447 + 0.073 \frac{l}{d} + 0.24n_0 + 0.314p_t) \cdot 0.7^{p_w}$$

ここで， δ_M : 最大応答変形， Q_y : 降伏耐力(計算値)， y : 降伏変形， l/d : せん断スパン比， δ_0 : 塑性変位， n_0 : 軸力比， δ_u : 単調載荷の終局変位， p_t : 主鉄筋比[%]， p_w : 帯鉄筋比， K_0 : 初期剛性， K_r : 最大変形時の割線剛性， dE : 消費エネルギーの増分である．

3. 解析結果

3.1 地震入力を行った場合の損傷指標間の相関について

表-2 は，地震応答解析によって求められた，各損傷指標間の相関を求めたものである．これより，実地震波を入力した場合， NCD と E_n ， μ と DR ，および μ と E_n の間にはそれぞれ高い相関が見られた．すなわち， μ ， DR ， NCD ， E_n の 4 者相互間に高い相関が見られたこととなる． NCD と E_n ， μ と DR において相関が高いことについては，Banan ら³⁾による既往の研究結果と同様の結果である．しかし， μ と E_n に

キーワード RC 橋脚，損傷指標，被害程度，地震応答解析，正負交番載荷

連絡先 〒940-8532 長岡市西片貝町 888 番地 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 TEL0258-32-9271

表-2 地震入力による損傷指標間の相関係数

	μ	DR	NCD	E_n	D
μ		0.980	0.951	0.965	0.702
DR	0.980		0.927	0.945	0.631
NCD	0.951	0.927		0.990	0.682
E_n	0.965	0.945	0.990		0.673
D	0.702	0.631	0.682	0.673	

表-3 交番载荷における損傷指標間の相関係数の比較

	交番 ~	相関係数	交番 ~	相関係数	地震入力	相関係数
1	$NCD - E_n$	0.893	$\mu - NCD$	0.858	$NCD - E_n$	0.990
2	$\mu - E_n$	0.881	$\mu - DR$	0.654	$\mu - DR$	0.980
3	$\mu - NCD$	0.860	$DR - NCD$	0.562	$\mu - E_n$	0.965
4	$\mu - DR$	0.713	$NCD - E_n$	0.526	$\mu - NCD$	0.951
5	$DR - NCD$	0.679	$\mu - E_n$	0.459	$E_n - DR$	0.945

・交番 ~ : 交番载荷における ~ それぞれの载荷パターン
 ・交番 ~ : 交番载荷における ~ それぞれの载荷パターン

については Banon らの既往の研究によれば、0.68 とやや低めの相関であるが、本研究において地震波を入力した場合には、0.965 と高い相関となり、異なった結果となった。これは、Banon らの研究では実験室での交番载荷を行っているのに対し、本研究では地震波を入力して解析を行っており、この場合、最大加速度付近の 1 つの大きな加速度入力が構造物の損傷に支配的であるためではないかと考えられる。

3.2 交番载荷による損傷指標間の相関について

表-3 は、正負交番载荷の解析を行った場合の载荷パターン ~ および ~ について、各損傷指標間の相関を求め、その上位 5 つを示したものである。比較のために表-2 より、地震波を入力した場合の結果を記入してある。徐々に変位増加させた载荷パターン ~ の場合 NCD と E_n の相関係数が 0.893 と、10 通りある損傷指標間の相関のうち一番高く、次いで相関の高い μ と E_n および μ と NCD でも、やや低い相関ではあるが、いずれも地震波を入力した場合と類似の傾向を示した。

また、大きな変位から徐々に変位を減少させた、载荷パターン ~ の場合には、 μ と NCD の相関が 0.858 とやや高めの相関を示し、地震波を入力した場合と似た高い相関を示したが、他の相関に関しては、それほど高い値とはならなかった。

全体として、地震波を入力した場合の相関と似た傾向のものもあったが、载荷パターンによって大きく構造物の挙動が異なり、各損傷指標の値に大きなばらつきが生じているため、交番载荷実験が地震時の構造物の損傷度を再現可能であるかは、今回の解析結果からは一概に言えないのではないかと考えられる。

3.3 正負交番载荷における構造物被害程度と Park らの提案した損傷指標 D との関係の検証

载荷パターン の場合、本解析で求めた 7_y における D の値は 9.2 であった。「土木研究所報告」の実験結果によれば、「 7_y から 8_y にかけて基部コンクリートの亀裂幅が急激に大きくなり、20~30cm の範囲でかぶりコンクリートの剥離が生じた」と記してある。この記述によれば、Park らの言う「中程度の被害」であり、損傷度 D は 0.2~0.4 となる。

また、载荷パターン の場合では、 6.5_y において、本解析で求めた 2 本の供試体の損傷度 D はそれぞれ、5.2 と 5.5 であった。実験結果によると、「 6.5_y 载荷終了時にかぶりコンクリートの大きな剥離と主鉄筋の面外座屈を生じている」と記してある。この記述によれば、Park らの言う「大被害」であり、損傷度 D は 0.4~1.0 となる。

以上の 3 供試体の結果より、载荷パターン と载荷パターン とともに、 D の値が Park らの言う被害程度に対応した D に比べて大きな値を示し、一致するものではなかった。これは交番载荷の場合、繰り返しの影響が強いために、損傷度 D の 2 項目の消費エネルギーの項が非常に支配的であるためと考えられる。

4. まとめ

本研究で解析を行った 5 つの損傷指標のうち、対象構造物に実地震波を入力した場合、 NCD と E_n 、 μ と DR 、および μ と E_n の間、すなわち、 μ 、 DR 、 NCD 、 E_n の 4 者相互間に高い相関が見られた。また、正負交番载荷でも同様に損傷度の算定を行ったところ、载荷パターンや载荷履歴によって構造物の挙動が大きく異なり、今回の解析のみで交番载荷が地震時の構造物の損傷度を再現に適応可能であるかの判断は難しい。また、Park らの提案した損傷指標 D は、交番载荷において、構造物の被害を表す指標としては、それほど適しているわけではないと考えられる。

5. 参考文献

- 1) Park, Y.-J. and Ang, A.H.S. : Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.111, No4, pp.722-739, April.1985.
- 2) 中埜良昭 : RC 構造物の損傷度評価に関する近年の研究 . コンクリート工学, Vol.29, No.5, 1991.5.
- 3) Banon, H. and Veneziano, D. : Seismic safety of reinforced concrete members and structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, ASCE, Vol.10, pp179-193, 1982.