

(149) 地震時損傷度指標のRC橋への適用性

鹿島建設技術研究所 正員○一宮 利通
鹿島建設技術研究所 正員 竹田 哲夫
鹿島建設技術研究所 正員 山野辺慎一

I はじめに

一般に、RC構造物の損傷度を示す指標は部材の損傷度を示す指標（部材損傷度指標）と構造物としての損傷度を示す指標（構造物損傷度指標）に大別できる。コンクリート橋梁では、従来、不静定次数が小さい構造のものが多かったが、近年、PC斜張橋など不静定次数が高く、複雑な構造が多くなってきている。これらの構造物においては、ある部材が被害を受けても、構造物全体の安全性に与える影響は小さい場合があり、補修が必要かどうか、速度または重量制限が必要かどうか、または、構造物が将来起こり得る地震に対して安全かどうかを判断するために構造物としての損傷度を評価する必要がある。

本研究では、構造物損傷度指標として、Cakmakによって提案された、固有周期の変化から求められる最大軟化率（Maximum Softening）を例にとり、そのRC橋に対する適用性について検討した。最大軟化率と実被害の関係は、構造形式によって異なると考えられるので、構造物ごとにキャリブレーションする必要がある。しかし、1971年に道路橋耐震設計指針が設定されて以降に設計された不静定次数の高いコンクリート橋の場合、重大な被害例はほとんどないので、実被害によって最大軟化率をキャリブレーションすることはできない。そこで、構造物損傷度指標と構造物の被害レベルの関係は、入力地震動の大きさをパラメータにした弾塑性地震応答解析を行って調べることにした。ここでは、宮城県沖地震で被害を受けたRC高架橋を例にとり、以下の手順で検討を行った。

- 1) Meyerらの提案した部材損傷度指標の土木構造物への適用性を調べる。
- 2) Meyerらの部材損傷度指標から構造物の被害レベルを推定し、最大軟化率との対応関係を調べる。

RC高架橋の弾塑性地震応答解析には、米国プリンストン大学で開発された2次元フレーム弾塑性地震応答解析プログラム（SARCF）を用いた。

II 部材損傷度指標

部材損傷度指標として、Meyerらの提案した、次式で表されるような部材の持つエネルギー吸収能力に対する実際に吸収したエネルギーの割合で表される指標¹⁾を用いた。

$$D = \sum \left(\alpha_{i+} \frac{n_{i+}}{N_{i+}} + \alpha_{i-} \frac{n_{i-}}{N_{i-}} \right) \quad (1)$$

- ここに、 N_{i+} : 変形レベル*i*で破壊に至る繰り返し数
 n_{i+} : 変形レベル*i*における実際の繰り返し数
 α_i : 荷重履歴の影響を修正する係数
+/- : 加力方向

この指標は建築構造物を対象とした部材実験でキャリブレーションされており、指標と損傷状況の間に次のような関係がある。0～0.2は微小なひび割れ発生（軽微な損傷）、0.2～0.5は比較的大きなひび割れ発生（補修可能）、0.5～1.0はコンクリートの剥離（補修不能）、1.0以上はコンクリート破壊（ヒンジを形成）に、それぞれ対応している。

しかし、一般に、土木構造物と建築構造物とは、鉄筋比・軸力などが異なり、この指標をそのまま適用できるとは限らない。そこで、まず、橋脚を対象とした既往の部材実験のシミュレーション解析を行い、損傷状況とMeyerらの指標を比較することによって、この指標の土木構造物に対する適用性を検討することとした。

建設省土木研究所による橋脚を対象としたRC部材の静的繰返し載荷試験²⁾では、実験条件、結果などが詳細に報告されているので、そのうちの3ケースを選んでシミュレーション解析を行った。同試験で用いられた供試体の諸元は図1および表1のとおりであり、軸方向鉄筋が降伏する変位 δ 、を基準として、 δ 、 2δ 、 3δ 、…と、それぞれ10回ずつ、変位制御で交番載荷されている。

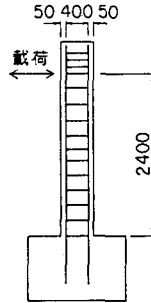


図-1 供試体

シミュレーション解析は、鉄筋の抜け出しの影響を除くために、解析で求めた δ 、を基準として、変位がその整数倍になるように変位制御で行った。解析で求めた部材損傷度指標と損傷状況の関係を図2に示す。鉄筋比が1.79%のP-4については、上記の建築構造物で確認された関係とほぼ一致しており、Meyerらの指標をそのまま適用できると考えられる。しかし、P-6、P-8については、鉄筋比が小さいほど、部材損傷度指標が大きい方に移行する傾向があり、別途、鉄筋比の影響を検討する必要があると思われる。

次に、宮城県沖地震(1978年6月)で被害を受けた東北新幹線高架橋に、Meyerらの部材損傷度指標を実際に適用してみた。この構造物を選んだ理由は、被害状況が詳しく報告されていること、各部材の鉄筋比は1.0~2.0%であるので、Meyerらの部材損傷度指標をそのまま適用できることなどである。今回、解析対象としたのは、高さ11.5m~14mの3径間および4径間RC2層ラーメン高架橋である。図3に、その一般図の一例を、表2に構造特性および地盤の状態を示す。

図3に示すように、実被害はほとんどが中層梁両端における軽微な曲げおよびせん断ひび割れのみであり、ひび割れ幅は0.2mm程度であった。主に橋軸直角方向の地震力に対する被害が多かったため、ここでは橋軸直角方向のモデルについて解析を行うこととした。モデル化に際し、地盤バネは、

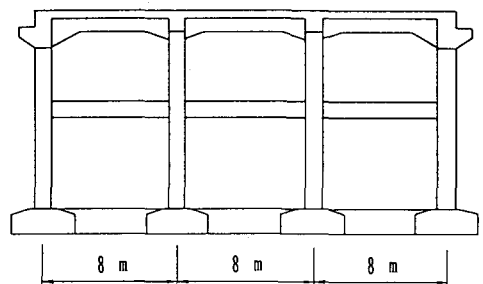
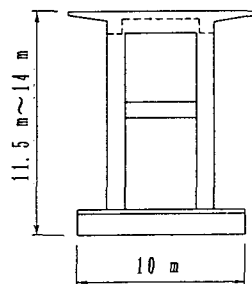


図-3 2層ラーメン高架橋

表1 供試体の諸元

項目	供試体	P-4	P-6	P-8
断面	(cm^2)	40×80	40×80	40×80
かぶり	(cm)	5	5	5
有効高さ	(cm)	240	240	240
せん断支間比		6.9	6.9	6.9
軸鉄方	材料	SD30	SD30	SD30
	直径(mm)	19	16	13
	鉄筋比(%)	1.79	0.87	0.48
帯鉄筋	材料	SR24	SR24	SR24
	直径(mm)	9	9	9
	鉄筋比(%)	0.08	0.08	0.08
コンクリート強度	(kg/cm^2)	290	290	290
	(MPa)	(28.4)	(28.4)	(28.4)
載荷回数	(回)	10	10	10

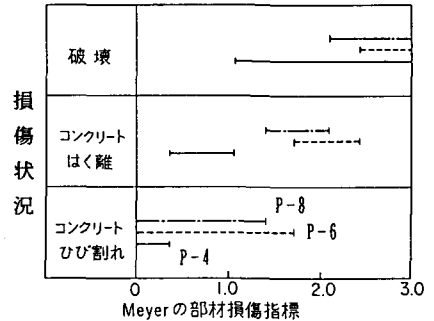


図-2 Meyerの部材損傷度指標と損傷状況

道路橋示方書 V

耐震設計編に示されている線形バネとしてモデル化した。入力地震動は、同地震時に基盤上で記録された地震波（開北橋橋軸

表2 構造物の諸元

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
径間数	3径間	4径間	4径間	3径間	4径間	4径間
高さ(m)	11.5	12.7	13.0	13.8	13.0	14.0
支持形式	直接基礎	直接基礎	直接基礎	直接基礎	RC杭基礎	RC杭基礎
被害概要	中層梁・柱 ひび割れ	中層梁 ひび割れ	中層梁 ひび割れ	中層梁 ひび割れ	中層梁 ひび割れ	中層梁 ひび割れ
地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種

直角方向成分) から、重複反射理論 (SHAKE) に基づき推定した。基盤入力波としては、記録波形をそのまま用いた。

解析結果の一例を示すと、Meyer らの部材損傷度指標は中層梁で約0.1 であり、他の部材では0 であった。0.1 は微小なひび割れ発生、0 は無被害に対応しているので、実被害と解析結果は損傷位置および損傷程度ともによく一致しているといえる。被害レベルの小さい範囲ではあるが、Meyerらの部材損傷度指標がRC高架橋にも適用できることが分かった。

Ⅲ 構造物損傷度指標

Cakmakにより提案された最大軟化率 (Maximum Softening) ³⁾ は構造物が被害を受けて剛性が低下すると構造物の固有周期が增大することに着目したものであり、次式で表わされる。

$$\delta_M = 1 - \frac{T_{0(\text{initial})}}{T_{0(\text{max})}} \quad (2)$$

ここに、 δ_M : 最大軟化率

$T_{0(\text{initial})}$: 損傷していない構造物の固有周期

$T_{0(\text{max})}$: 地震時における構造物の最大固有周期

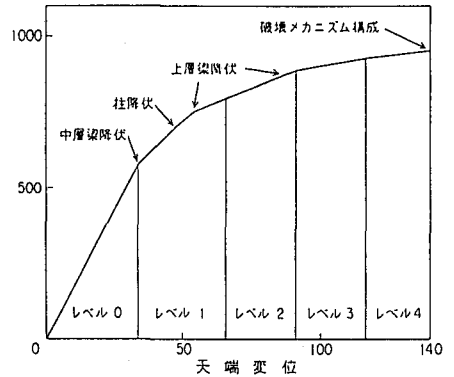


図-4 P-δ曲線と被害レベル

橋梁の形式や規模によっては、コンクリート表面から損傷状況を調べることは容易ではない。しかし、固有周期は、地震計を設置することによって簡単に測定することができ、また、解析からも求めることができるので、構造物の損傷度を求める手段として最も適当であると思われる。

構造物全体としての被害レベルを考えると、どの部材がどの程度構造物の安定性に寄与しているか、すなわち、ある部材が損傷した場合構造物の安定性がどの程度失われるかを定量的に表さなければならない。ここでは、構造物のエネルギー吸収能力に対する吸収したエネルギーの割合に着目して構造物全体の被害レベルを定義することとした。構造物の被害レベルを定義するために、まず、RC高架橋に地震時慣性力を静的に加えたときのP-δ曲線（加速度と天端変位の関係）を求めた。その一例として、No. 1の場合を図4に示す。次に、この曲線を弾性域と塑性域に分け、塑性域は吸収エネルギーに着目して、それぞれの囲む面積が等しくなるように、さらに4つの領域に分割した。それぞれの領域をδの小さい方から順にレベル0～4と定めた。

構造物が崩壊に至るまでの部材損傷度と最大軟化率の関係を調べるために、推定した地震動を機械的に数段階に増幅したものを入力して、6つの高架橋の弾塑性解析を行った。図5に、No. 1の場合について、最大地盤加速度とそれぞれの部材のMeyer らの部材損傷度指標と最大軟化率を示す。ただし、部材損傷度指標はそれぞれの部材の両端の指標のうち大きい方を示している。最大地盤加速度が大きくなるに従って、各部材

の部材損傷度指標と最大軟化率は大きくなっている。

被害レベルは直接得ることはできないので、以下のようにして求めた。Meyerらの部材損傷度指標は、前節に述べたように、部材のエネルギー吸収能力に対する吸収エネルギーの割合である。そこで、破壊メカニズムを構成する6断面（上層梁の両端、中層梁の両端、柱の両下端）の部材損傷度指標の平均が、構造物のエネルギー吸収能力に対する吸収エネルギーの割合（すなわち構造物の被害レベル）に対応するものと考えた。それらの関係を示すと、表3のようになる。

6つの構造物の解析から得られた最大軟化率と被害レベルの関係を、構造物ごとに異なる記号で、図6に示す。

図6より、最大軟化率が大きくなるにつれて被害レベルが大きくなっており、両者はよい対応関係を示しているのが分かる。ただし、被害レベル3からレベル4までの間では最大軟化率はそれほど増加していない。これは、(2)式から分かるように、固有周期が大きくなるほど固有周期の変化に対する最大軟化率の変化が相対的に小さいためと考えられる。

以上のことから最大軟化率と構造物全体としての被害レベルとの間には、ほぼ対応関係があり、最大軟化率がRC橋の構造物損傷度指標として適用できるものと思われる。

IV おわりに

今後、最大軟化率を実用化するには、被害レベルの小さい範囲においての感度特性や地盤の塑性化の影響までを考慮した特性を調べる必要があると思われる。また、今回評価した被害は曲げによるもののみであったが、せん断による被害を定量的に評価する方法も考える必要があると思われる。

本研究は鹿島建設と米国プリンストン大学の共同研究のうち、Cakmak教授と行った研究の成果である。

最後に、貴重なご助言およびご助力をいただいた関係者の方々、特に、鉄道高架橋に関する資料を提供していただいた東日本旅客鉄道(株)東北工事事務所の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Chung, Y. S., Meyer, C. and Shinozuka, M. 'Automatic Seismic Design of Reinforced Concrete Building Frames', ACI Structural Journal, 1990
- 2) 川島、長谷川他、「RC橋脚の動的耐力に関する実験的研究－(その1) 昭和56年度～昭和58年度の検討結果－」、土木研究所資料、第2232号、昭和60年
- 3) DiPasquale, E. and Cakmak, A. S. 'On the Relation between Local and Global Damage Indices', NCEER-89-0034, 1989

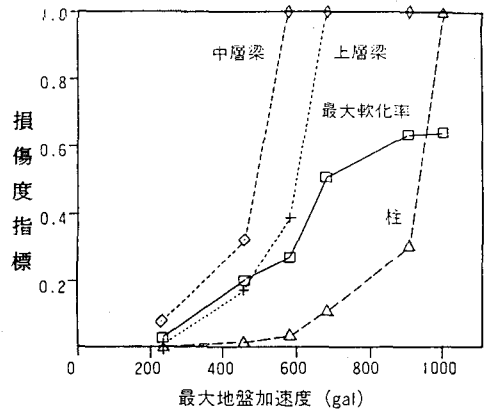


図-5 最大地盤加速度による損傷度指標の変化

表3 被害レベルと部材損傷度指標の平均

被害レベル	部材損傷度指標の平均
1	0.0 ~ 0.25
2	0.25 ~ 0.5
3	0.5 ~ 0.75
4	0.75 ~ 1.0

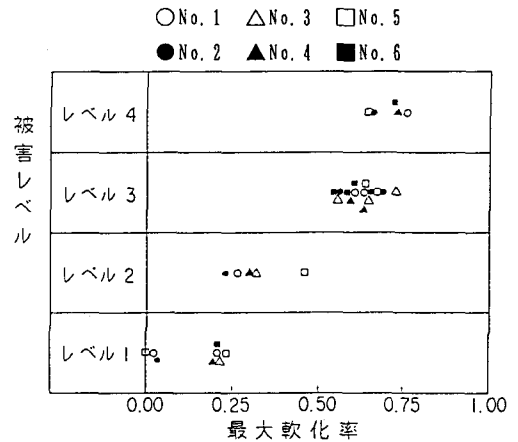


図-6 最大軟化率と被害レベルの関係