

構造特性の経年変化を考慮した耐震性能評価に関する基礎的研究

大阪産業大学 学生会員 Oイムデギョン

大阪産業大学 正会員 飯田 毅
鹿兒島大学 正会員 河野 健二

1. 緒言

日本の膨大な量の社会基盤施設は年月の経過とともに老朽化が進んできており、維持管理を行う上で構造物の耐用年数期間中に起こると考えられる損傷や劣化などに伴う耐震性能の評価法を確立することが極めて重要である。そこで本研究では、3自由度非線形系の振動モデルを用いて橋梁構造物を表し、構造材料特性の経年変化を考慮して非線形応答解析を実施するとともに、Park and Ang¹⁾の損傷指標Dを用いて、入力地震波の最大加速度を不確定量として扱い、モンテカルロシミュレーション(以下MCSと呼ぶ)より経年毎の損傷指標Dの累積確率分布を求め、構造物の損傷評価を行った。また、信頼性評価についてはMCSより得られた信頼性指標 β を用いて、材料特性の経年変化を考慮した構造物の耐震安全性について検討した。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

本研究で対象とした解析モデルは図1に示すように橋梁をイメージしており、橋脚(1, 2)、橋桁を下から要素1, 2, 3として、各要素の質量をそれぞれ102 KN/m/s²、減衰定数を2%と同一にし、構造物の1次の固有周期T₁が0.5秒, 0.8秒, 1.2秒の3種の構造物を対象とした。

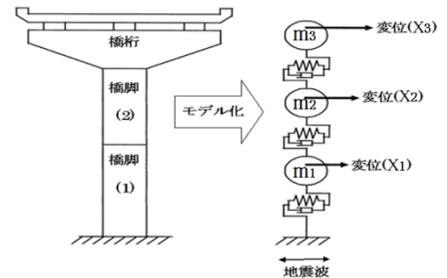


図1 解析モデル

2.2 構造物の非線形性の評価

構造物の非線形性についてBi-Linear型復元力モデルを用いて評価した。各要素は最大入力加速度200gal以上で非線形領域に入るように設定し、線形時と非線形時の剛性比を10:1として解析を行っている。

2.3 入力地震波動

本研究では、兵庫県南部地震において神戸海洋気象台地盤上で観測されたKobe-NS、JR西日本鷹取駅構内地盤上で観測されたTaka-NS、ポートアイランド内地盤上で観測されたPort-NSの3波形を用いた。これらの振動特性を明確にするため、最大加速度を600galに基準化した加速度応答スペクトルを図2に示す。

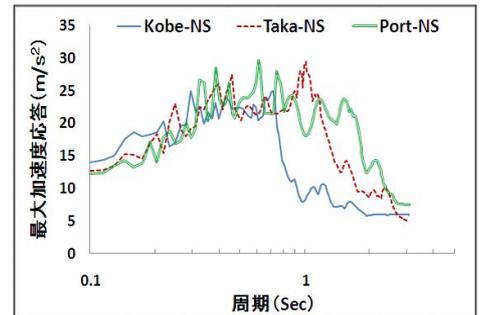


図2 加速度応答スペクトル

3. 材料特性の経年変化を考慮した損傷評価

3.1 材料特性の経年変化の設定

構造物の耐用年数を50年とし、50年後の降伏強度が指数関数に従って40%低減する状態での非線形地震応答について検討した。

3.2 材料特性の経年変化を考慮した時刻歴応答変位

一例として、構造物の1次固有周期T₁=1.2秒、最大入力加速度600galのPort-NSの場合について、橋脚部(要素1)における時刻歴応答変位を図3に示す。ここで、X/X_yとは変位Xを降伏変位X_yで除したものである。図3より、経年によって構造物の見掛けの剛性が落ちるため、応答変位倍率(X/X_y)、即ち、塑性率が増加し、構造物の等価固有周期が長くなることがわかる。

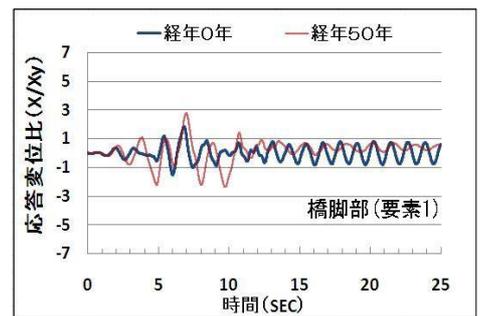


図3 経年を考慮した時刻歴応答変位

3.3 Park and Ang の損傷指標 D¹⁾

Park and Angは多くの実験結果を統計処理し、繰返し荷重を受けるRC構造物の崩壊に対する照査基準として損傷指標D(以下Dと呼ぶ)を用いることを提案した。Dは構造物の損傷を代表とする塑性率と履歴吸収エネルギーの線形結合として定義されており、次式によって与えられる。

$$D = \frac{x_{max}}{x_u} + \frac{\beta}{Q_y x_u} \int dE \quad (1) \quad \text{ここで、} x_{max} : \text{最大変位、} x_u : \text{終局変位、} \int dE : \text{履歴吸収エネルギー}$$

$$Q_y : \text{降伏強度} \quad \beta : \text{正の係数 0.15 (既往の研究}^2) \text{を参考)}$$

キーワード：耐震性能、非線形応答解析、経年変化、損傷指標、信頼性指標、耐震性評価

連絡先：〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1 大阪産業大学 TEL 072-(875)-3001

3.4 材料特性の経年変化を考慮した損傷評価

損傷指標 D は損傷度と実際の構造物の損傷との関係を示し、本解析での耐震性評価に関しては、現行の道路橋の耐震設計に関する目標性能を用い、 $0.2 \leq D < 0.4$ の範囲を耐震性能 2(修復可能な損傷)、 $0.4 \leq D < 0.6$ の範囲を耐震性能 3(修復が難しい損傷)に対応するものとして検討する。ここで一例とし、最大入力加速度 600gal、Port-NS での橋脚部(要素 1)における結果について図 4、図 5 に示す。図 4 より、経年の増加に伴い損傷指標 D も増加している。図 5 の MCS500 回による累積確率分布より、固有周期 $T_1=0.5$ 秒の場合(図 5(a))、損傷指標 D が初年度から既に 0.6 を上回る範囲に分布し、耐震性能 3 を満足できない状態にある。固有周期 $T_1=1.2$ 秒の場合(図 5(b))、初年度及び経年 25 年では D が 0.3 から 0.6 までの範囲に分布し、耐震性能 3 に属している。50 年後では D が 0.6 を上回る範囲に分布するため耐震性能 3 を満足できず、修復が難しい大きな損傷が予想される。この結果より、 $T_1=1.2$ 秒の構造物の D は、 $T_1=0.5$ 秒のそれより経年による増加が少ないことがわかる。これは、Port-NS 地震波の卓越周期(図 2)と構造物の等価固有周期との関係によるものと考えられる。

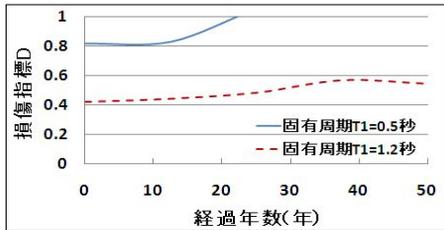
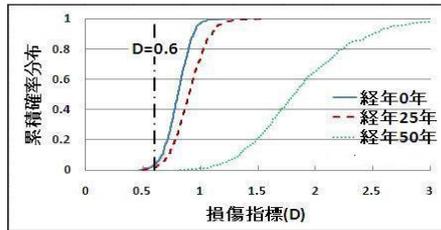
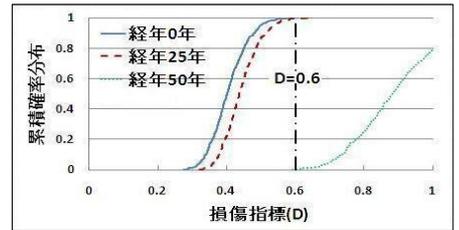


図 4 経年による損傷指標 D の変化



(a)固有周期 $T_1=0.5$ 秒



(b)固有周期 $T_1=1.2$ 秒

図 5 損傷指標 D の累積確率分布

4. 材料特性の経年変化を考慮した信頼性評価

4.1 信頼性指標 β

不規則外力及びその外力を受ける構造物の強度及び変位は一般に確率量として表される。破壊確率に対応する安全性の尺度として信頼性指標 β があり、MCS を用いて式(2)より求められる。

$$\beta = \frac{\bar{M}}{\sigma_M} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2)$$

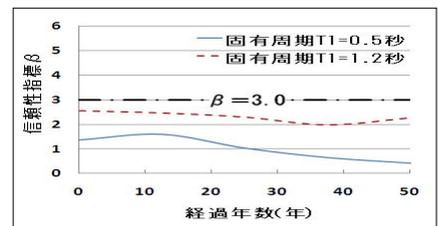
ここで、強度と荷重で評価する場合、
 R : 強度、 S : 荷重、 $M (=R-S)$: 破壊モードの性能関数
 \bar{M} : M の平均値、 σ_M : M の標準偏差

強度及び変位の R の標準偏差 σ_R は 10%の変動を考慮して $\sigma_R = 0.1 \bar{R}$ とし、荷重に関しては不確定量として地震最大加速度について変動係数 10%を用いて解析を行っている。

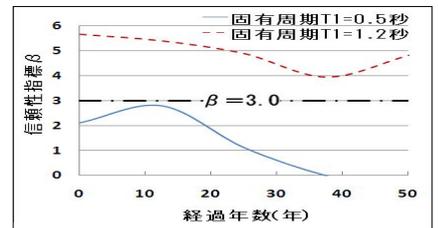
4.2 材料特性の経年変化を考慮した信頼性評価

一例として、最大入力加速度 600gal、Port-NS での橋脚部(要素 1)におけるケース 1、2 に関する信頼性指標 β を図 6 に示す。ここで、ケース 1 では、強度 \bar{R} : 降伏力 Q_y の 1.5 倍、荷重 S : 復元力 Q を、ケース 2 では、設計限界変位 \bar{R} : 降伏変位 X_y の 5 倍、 S : 応答変位を用いている。なお、信頼性指標 β が 3.0 以上あれば構造物は安全側にあると考える。

ケース 1 の場合(図 6(a))、 $T_1=0.5$ 秒では経年 25 年から β が 1.0 以下になり、耐震安全性が極めて低い。 $T_1=1.2$ 秒では初年度 $\beta \approx 2.5$ から経年により低下するが、経年 50 年でも $\beta \approx 2.0$ であり、耐震安全性を保っている。この結果は図 4、図 5 の損傷指標 D の傾向とほぼ対応している。ケース 2 の場合(図 6(b))、 $T_1=0.5$ 秒では経年 40 年を超えると β は 0 に相当し、設計上の崩壊状態にある。 $T_1=1.2$ 秒では経年とともに β が 3.0 以上であるため、十分な耐震安全性を有していると考えられる。



(a)ケース 1;復元力に対する評価



(b)ケース 2;変位に対する評価

図 6 経年を考慮した信頼性評価

5. 結言

本研究より以下の知見を得た。(1) 経年の増加とともに損傷指標 D は増加し、信頼性指標 β は低下するが、その程度は構造物の固有周期、入力地震波の振動特性などにより大きな影響を受けることがわかった。(2) 構造特性の経年変化を考慮した耐震性評価において、損傷指標 D と信頼性指標 β は有用な指標になると考えられる。しかしながら、その対応は必ずしもすべてのケースでとれた訳ではないので、今後、両面より考えた耐震性評価が必要と考えられる。

参考文献 : 1) Park, Y.-J, and Ang, A.H.-S. : Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.4, pp.722-739, 1985. 2) Y.Yamada et al : Random Response Analysis of A Nonlinear Soil-Suspension Bridge Pier, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.7, pp.31-47, 1979