

橋梁の非線形動的解析における Rayleigh 減衰の妥当性について

新日本技研（株） 正会員 宋波、笠原真紀子、竹名興英、正会員 高尾孝二

1. まえがき 橋梁の非線形動的解析では、他の減衰モデルに比べて計算時間が短い Rayleigh 減衰がよく用いられている。これは、減衰マトリックス $C = \alpha K + \beta M$ (K : 剛性マトリックス、 M : 質量マトリックス) と仮定する方法である。しかし、実際に解析してみると、大きな応答では、最大応答断面力の分布が不連続であったり、「道路橋示方書・同解説（以下、道示とよぶ） 耐震設計編 6 章動的解析による耐震性の照査」で示された方法（ここでは、ひずみエネルギー比例減衰とよぶ）と比較して、最大応答曲率がかなり違う場合がある。本報告は、実際の橋梁を Rayleigh 減衰及びひずみエネルギー比例減衰によって解析し、その結果を比較することによって、非線形動的解析における Rayleigh 減衰の妥当性について論じている。

2. 解析方法 解析する橋梁は、各地盤種別ごとに 1 橋とし、そのすべてが橋台部も含んで荷重分散ゴム支承を用いた 5 径間連続橋で、それぞれ橋脚の寸法がほとんど同じ橋梁を選定した（図 - 1）。橋台は地盤と一緒に動くとして、橋全体を橋軸方向に 2 次元モデル化し、その方向に地震波を入力した。橋脚柱は、曲げモーメント - 曲率の関係がコンクリートのひびわれ及び鉄筋の降伏を折れ点とする剛性低下型トリリニア武田型の非線形梁要素を用いた。要素分割長さは、塑性化しやすい柱基部の塑性ヒンジ長（道示）を 0.5m 間隔に、それより上は徐々に長くした。他は線形要素を用いた。構造要素の減衰定数を図 - 1 に示す。積分方法は Newmark - β 法 ($\beta=1/4$) で、積分時間間隔 Δt は 0.002sec とした。それで安定解を得られない場合は、 $\beta=1/3, 1/2$, $\Delta t=0.001sec, 0.0005sec$ の組み合わせで安定解を求めた。Rayleigh 減衰では、係数の設定が重要である。図 - 2 に示す方法 では、通常行われるように、低次の 2 つの卓越するモードを用いた。ただし、この種地盤の橋梁では、係数がマイナスとなったので設定することができなかった。方法は、高振動数での減衰定数があまり大きくなるように、最も卓越するモードと 10Hz 以上の刺激係数の大きいモードと結んだ。入力地震波は、土木研究所の作成した、地盤種別後ごとのタイプ およびタイプ の 3 波 (No.1, No.2, No.3)

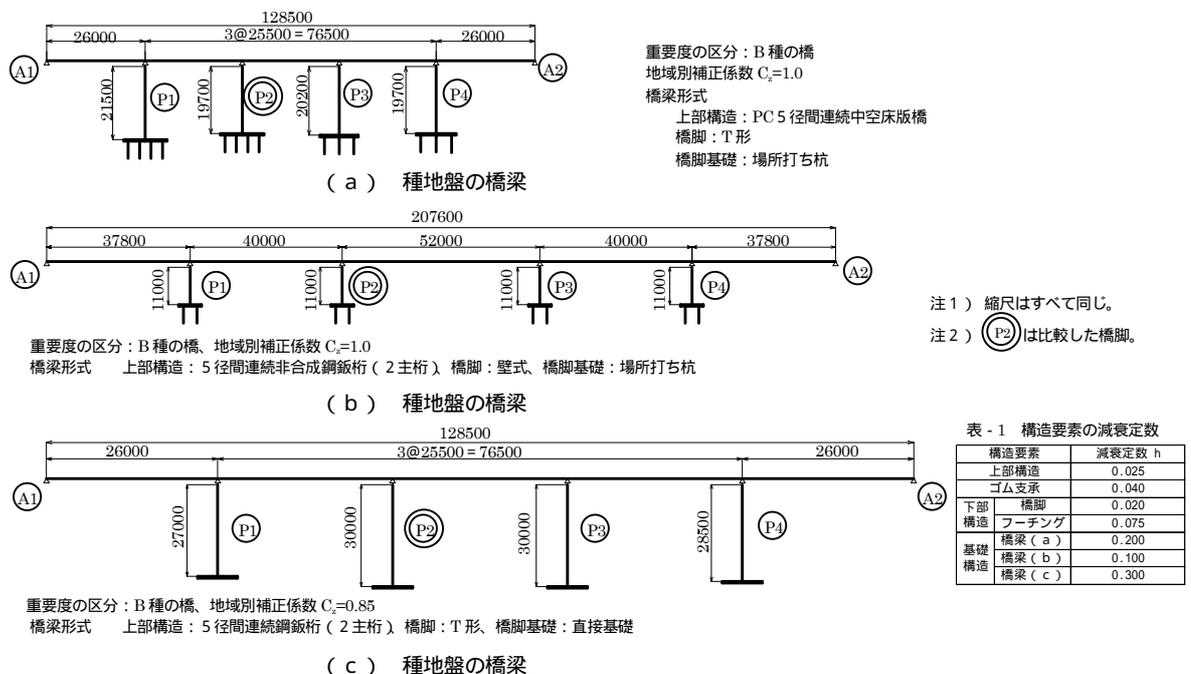


図 - 1 解析対象橋梁

Keyword: 非線形動的解析, ひずみエネルギー比例減衰, レーリー減衰, 地震時保有水平耐力法, 橋梁

を用い、これらの波にいろいろな倍率を乗じた波を入力して、最大応答曲率を弾性範囲から許容曲率 α $\{ = y_0 + (u - y_0) / \alpha, u : \text{終局曲率}, \alpha : 3 (\text{タイプ}), 1.5 (\text{タイプ}) \}$ 付近まで変化させた。各橋梁に入力した地震波は、種地盤の橋梁では両タイプを、及び種地盤の橋梁では、それぞれ、支配的なタイプ及びタイプである。

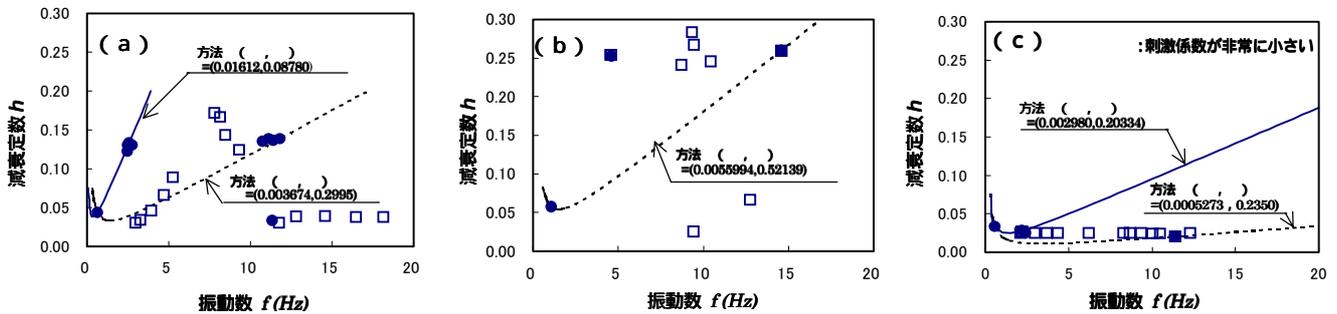


図 2 Rayleigh 減衰における係数の決定、(a): 種地盤の橋梁、(b): 種地盤の橋梁、(c): 種地盤の橋梁

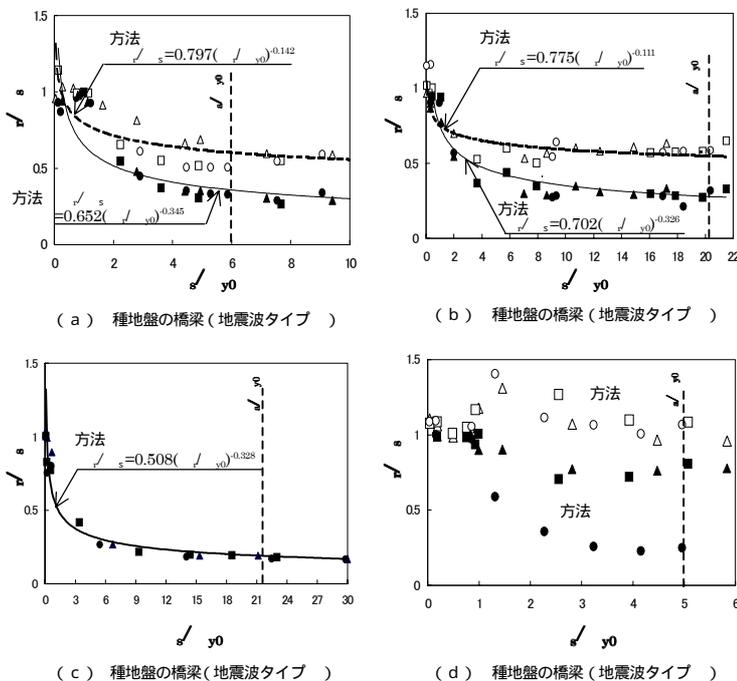


図 3 ひずみエネルギー比例減衰と Rayleigh の比較

ある。図 - 3 (d) の種地盤の橋梁は、方法では波の種類によってばらつきが大きく、 r_s / y_0 がかなり小さい場合があり、方法では比較的1に近い。

4. 結論 非線形動的解析の最大応答曲率は、ひずみエネルギー比例減衰に比べて Rayleigh 減衰の場合は、かなり小さい場合が多く、地震波の種類によってばらつきが大きい場合もある。これは、Rayleigh 減衰が構造全体の減衰特性を十分に反映していないためと考えられる。

5. あとがき われわれが用いている粘性減衰の仮定は、実際のメカニズムを表しているといえない。しかし、解析上の簡便さと、これに代わる合理的な減衰モデルが確立していない現在、それを用いざるえない。また、非線形動的解析について十分解明されていないことを考えると、安全側の値を用いるのが妥当である。したがって、われわれは、時間がかかってもひずみエネルギー比例減衰を用いている。最近、簡便照査を割愛して、動的解析によって直接合理的な断面を求める動きがあるが、減衰モデルだけでなく現在の非線形動的解析そのものについても、慎重な配慮が必要と考える。

3. 解析結果と比較 ひずみエネルギー比例減衰

および Rayleigh 減衰の条件で解析を行った。橋脚の安全性は、曲げモーメント、せん断力及び残留変位に関して照査を行うが、ここでは最も支配的な柱下端の最大応答曲率（曲げモーメント）について比較する。図 - 3 の横軸はひずみエネルギー減衰で求めた最大応答曲率 r_s を初降伏曲率 y_0 で除した値、縦軸は Rayleigh 減衰で求めた最大応答曲率 r_r を r_s で除した値である。図の三角は 1 の波、四角は 2 の波、丸は 3 の波である。図 - 3 (a) 及び (b) の、種地盤の橋梁は、両タイプの地震波とも同じ傾向で、 r_r / r_s は、 r_s が極めて小さい範囲ではほぼ 1 となるが、 r_s が増加するにしたがって急激に低下し、 α 付近では方法では約 0.3、方法では約 0.6 である。図 - 3 (c) の種地盤の橋梁も、同じ傾向であり、 α 付近では約 0.2 で

ある。