

Pushover 解析で用いる地震荷重

株式会社 CRC 総合研究所北海道支店 正会員 本田 明成

北海学園大学工学研究科修士課程 ○学生会員 倉 真也

北海学園大学工学部土木工学科 フェロー 当麻 庄司

1. はじめに

Pushover 解析は、水平力を限界状態に達するまで作用させ破壊までのメカニズムを得る増分非線形静的解析である。Caltrans (カリフォルニア交通局) は、橋梁の保有耐力を求める手法として Pushover 解析を使用している¹⁾。日本においては、平成8年の道路橋示法書 V 耐震設計編の改定に伴いエネルギー一定則に基づく地震時保有水平耐力の照査が義務づけられた。しかしながら短周期構造物及びラーメン橋脚は、エネルギー一定則の適応性の問題が指摘されている^{2) 3)}。このような非標準的な橋の要求耐力算定は、非線形動的解析が必要となる為、簡易計算手法の研究が行われている⁴⁾。Pushover 解析は、非線形動的解析と変形履歴が異なる為、動的保有耐力算定手法として妥当性の検討が必要である⁵⁾。

本論文は、要求耐力の算定手法として Pushover 解析を利用した変位一定則に基づく 1 質点系での等価線形解析 (サブスティテュートアナリシス⁶⁾) を行い、Pushover 解析で得られた保有耐力と等価線形解析で得られた要求耐力に対して地震荷重による影響の調査を行ったものである。本論文で行った等価線形解析は、エネルギー一定則及び変位一定則に対して精度良く非線形動的解析の結果をシュミレートしていることが確認された。しかしながら用いる地震荷重によっては、誤差が大きくなることも確認された。

2. 解析モデル

解析モデルは、形状パラメータとして等橋脚ラーメン橋 ‘モデル 1’ と不等橋脚ラーメン橋 ‘モデル 2’ の 2 通りを設定した。図 1 及び図 2 には、検討で使用した解析モデル及び橋脚の非線形特性を示す。表 1 及び表 2 には、部材定数及び解析パラメータを示す。入力地震動は、社団法人日本道路協会発行の振幅調整波とした⁷⁾。固有周期は、桁の単位体積重量を変更することにより調整し 0.5, 1.0, 1.5 及び 2.0 秒に設定した。本論文で記載されている応答値は、全て 3 波の平均値としている。Pushover 解析は、幾何学的非線形特性を考慮して自重による崩壊限界状態を求めるものである。しかしながら本論文においては、RC 構造物を解析対象としており幾何学的非線形特性が小さいと仮定して考慮しなかった。

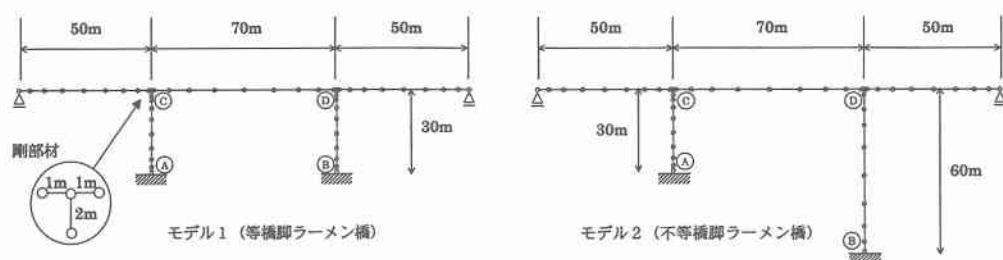


図 1 モデル図

On the Seismic loads for Pushover analysis

Akinari HONDA, Shinya KURA, and Shouji TOMA

表1 部材定数

部位	ヤング係数(t/m ²)	断面二次モーメント(m ⁴)	断面積(m ²)	単位重量(t/m ³)	減衰率(%)
橋脚	2.5×10 ⁶	40.0	20.0	2.5	2
桁	2.5×10 ⁶	20.0	10.0	固有周期で調節	5

表2 解析パラメータ

解析コード	立体骨組み構造物の動的解析プログラム DYNA2E Version 5.8
時間積分	newmark-β法 (β=1/6 γ=1/2) Δt (線形: 0.005 秒、非線形: 0.002 秒)
非弾性構成式	修正武田モデル 剛性低減パラメータ=0.4
減衰評価法	歪みエネルギー比例減衰 (有効質量比 95%までの固有モードに考慮)
固有値解析	Householder 法

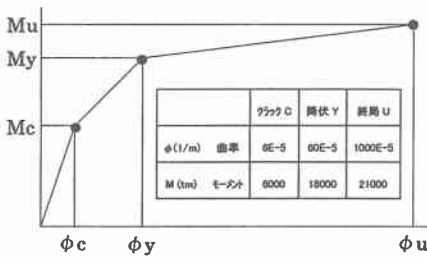


図2 橋脚のモーメント曲率関係

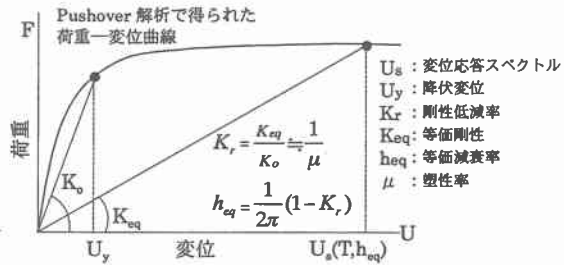


図3 等価剛性及び等価減衰率

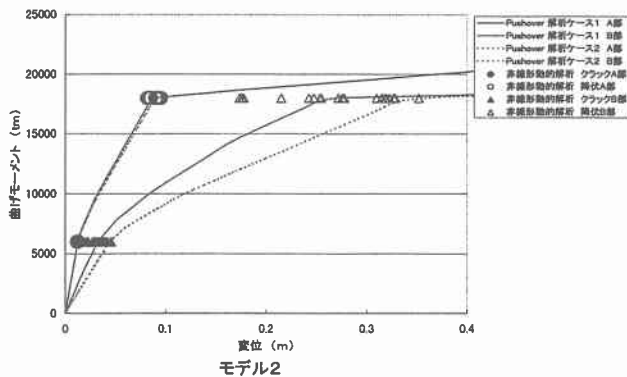
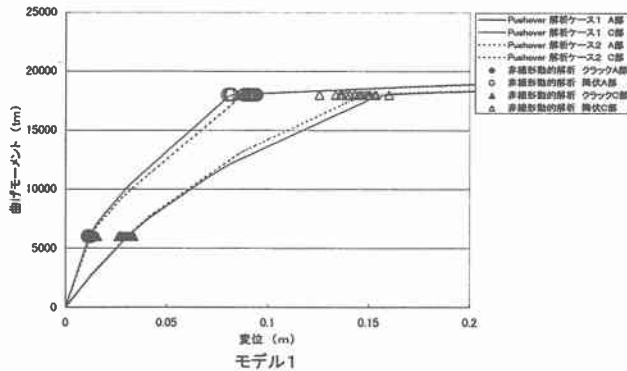


図4 クラック耐力及び降伏耐力の比較 (ラーメンモデル)

3. 保有耐力

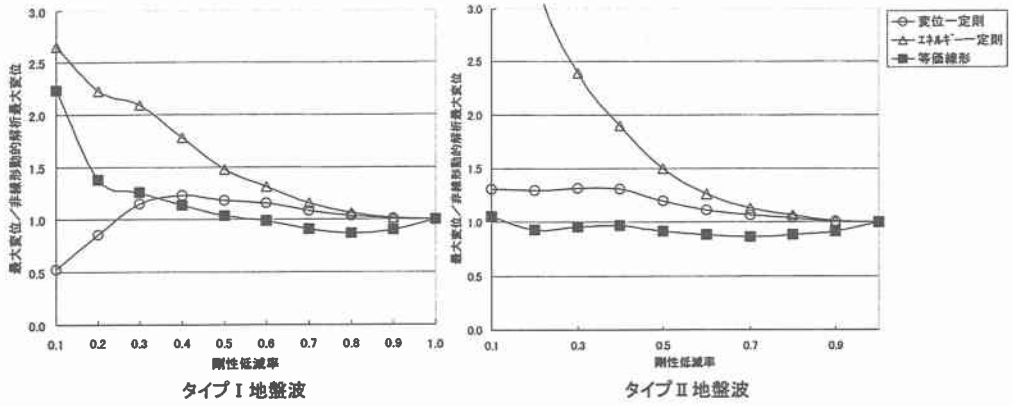
ここでは、Pushover 解析による保有耐力の算定に関して述べる。Pushover 解析で用いる荷重ケースは、重量分布に対応する慣性力をモデル全体に与えた‘ケース 1’と桁に集中荷重を与えた‘ケース 2’の 2 通りを設定した。図 4 は、Pushover 解析と非線形動的解析のクラック耐力及び降伏耐力の比較と、荷重ケースによる比較を示したものである。非線形動的解析との比較においては、先行する塑性ヒンジ（モデル 1：A 部、モデル 2：A 部）は良い精度で一致し、後続の塑性ヒンジ（モデル 1：C 部、モデル 2：B 部）は大きなバラツキがあることが確認された。この違いは、応答の過程で両者の変形モードに差異が生じたこと、あるいはヒステリシス曲線の原点移動によるものと推定される。荷重ケースの比較においては、モデル 1 において大きな違いは考察されなかったが、モデル 2 において荷重ケース 1 と 2 で大きな違いが考察されケース 1 の条件が安全側の設定となることが確認できた。Pushover 解析で保有耐力を求める場合は、有効質量比が大きな固有モード等支配的な動的変形状を表現できるように荷重条件を定める必要性が確認された。非線形動的解析で得られた要求耐力との比較を行う場合は、ヒステリシス曲線の原点移動（残留変位）による影響を考慮する必要性が確認された。

4. 要求耐力

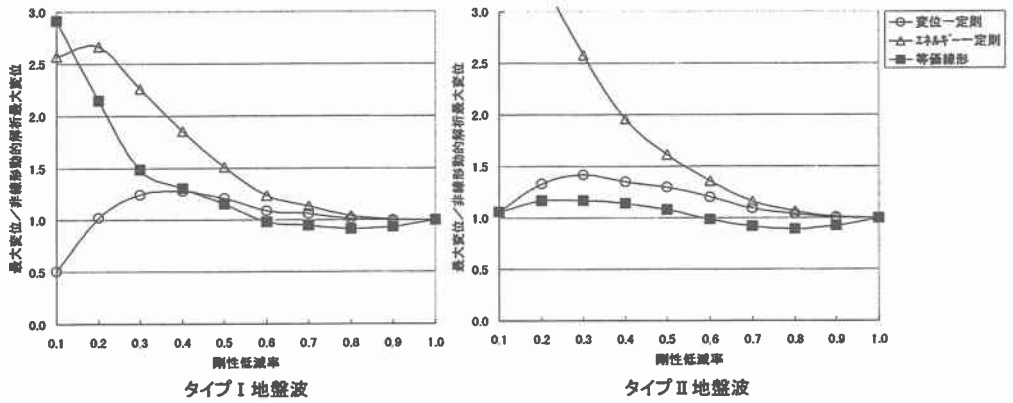
本論文で行った等価線形解析は、変位一定則に基づき固有周期の長周期化による変位増大と、履歴減衰による変位減少の影響を Pushover 解析により得られる荷重—変位曲線に従い、1 質点系での等価線形解析により収束させたものである。等価剛性は、変位応答スペクトルと荷重—変位曲線の交点と原点とを結ぶ割線剛性とした。履歴減衰は、完全弾塑性モデルを想定し剛性低減率（剛性低減率の逆数は、塑性率）の関数としての等価減衰率⁸⁾として与えた。図 3 には、等価剛性及び等価減衰率について示す。以下に本手法の計算手順を示す。

- | | |
|--|---------|
| ① Pushover 解析によりシステムの荷重—変位曲線を求める。 | ＜保有耐力 |
| ② 構造減衰と固有周期に対応する変位応答スペクトルを求める。 | ＜変位一定則 |
| ③ 上記の変位に対応し剛性低減率 K_r を求める。 | ＜等価剛性 |
| ④ 剛性低減率により等価減衰率 h_{eq} を求める | ＜等価減衰 |
| ⑤ 更新された等価減衰率と等価剛性に基づく固有周期に対応する変位応答スペクトルを求める。 | |
| ⑥ ③～⑤の処理を繰り返し収束変位を求める。 | ＜等価線形解析 |
| ⑦ ⑥で得られた変位を要求変位とする。 | ＜要求変位 |
| ⑧ ⑦で得られた要求変位を用いて Pushover 解析により要求耐力を求める。 | ＜要求耐力 |

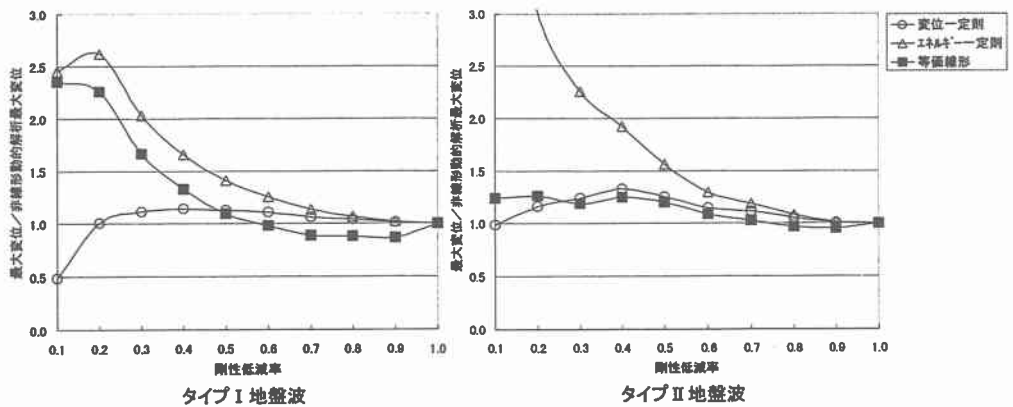
図 5 は、本手法の妥当性の確認として 1 質点系モデルを用いてパラメータ解析を行った結果を示したものである。解析手法は、ラーメンモデルと同様に時間積分を newmark-β 法により行い積分刻みを 0.005 秒とした。減衰は、レイリー減衰として与えた。等価線形解析の収束判定は、応答変位の変動が 0.01m 以下になる場合とした。初期の剛性低減率（上記解析手順③の最初のループでの K_r ）は 0.1 より 1.0 まで 0.1 刻みとしプロットしている。固有周期は、質点の質量を調整し 0.5 秒より 2.0 秒まで 0.1 秒刻みに計算を行い平均化しプロットしている。等価線形解析は、エネルギー一定則及び変位一定則と比較して非線形動的解析の応答値を良くシュミレートしていることが確認された。特にタイプⅡ地震波に対しては、かなりの精度が得られていることが確認できる。しかしながら地盤種別Ⅱ、ⅢにおけるタイプⅠ地震波では、剛性低減率の低い場合（塑性率の大きい）に応答値を過大評価する傾向があることが考察された。このような長周期成分の加速度応答スペクトルが大きい地震波に対しては、本手法の適応性の問題が確認された。エネルギー一定則は、タイプⅡ地震波の剛性低減率の低い領域で変位を過大評価している傾向が見られ、また変位一定則はタイプⅠ地震波の剛性低減率の低い領域において変位を過小評価する傾向が見られた。



I 種地盤



II 種地盤



III 種地盤

図5 剛性低減率による要求耐力の推移 (一質点系モデル)

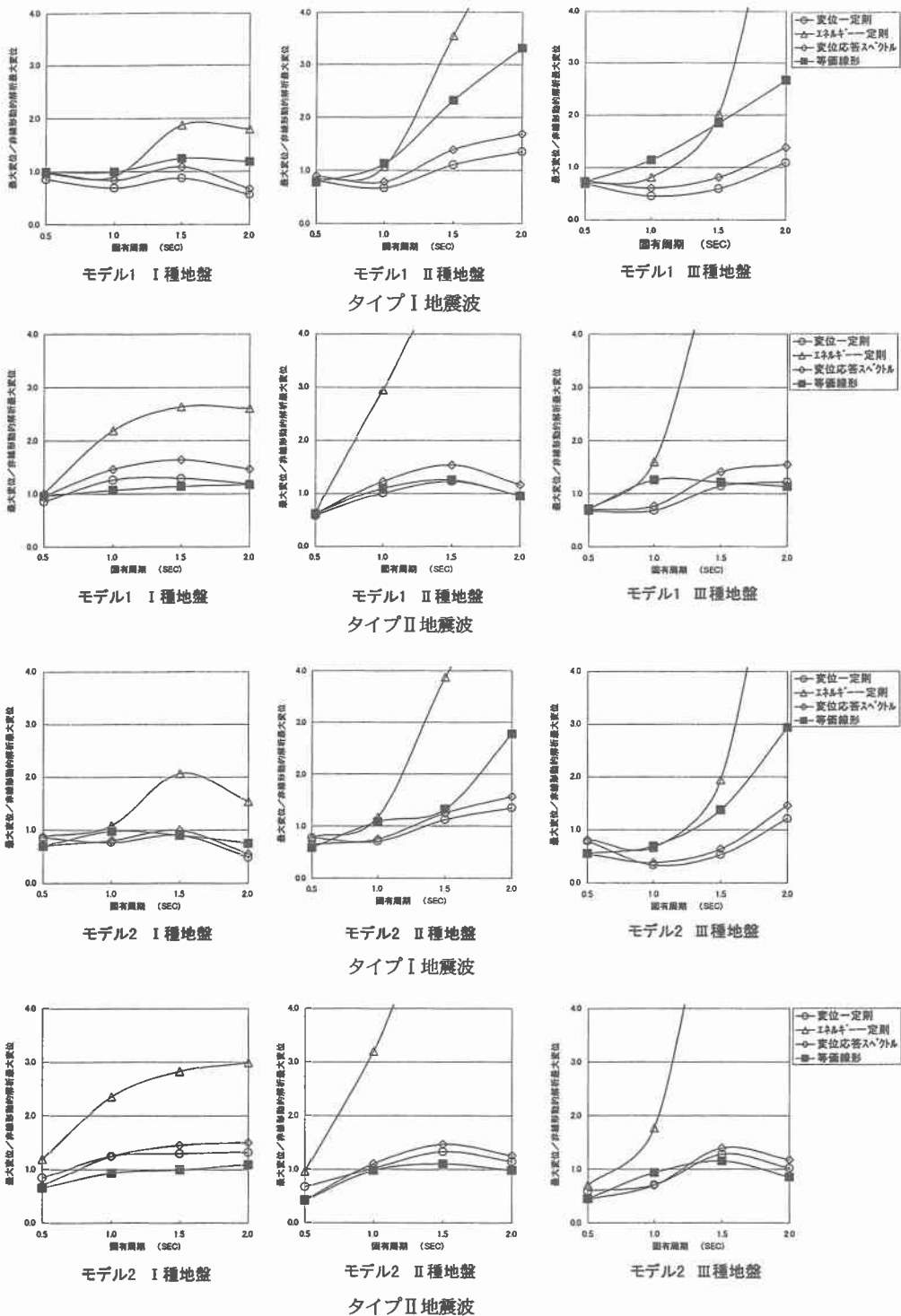


図6 固有周期による要求耐力の推移（ラーメンモデル）

図6には、モデル1とモデル2の各固有周期における非線形動的解析、変位一定則（線形動的解析）、線形動的解析から得られるエネルギー一定則による変位、変位応答スペクトル、及び等価線形解析結果の比較を示す。変位一定則の解析結果は、特にⅢ種地盤の地震波の短周期において応答を過小評価する傾向が考察された。このことは、変位一定則に基づく等価線形解析の基本的な精度に影響を与えるが、この影響を本手法ではかなり補正していることが確認できる。等価線形解析の結果は、エネルギー一定則及び変位一定則（線形動的解析）と比較して非線形動的解析と良く一致している。しかしながら地盤種別Ⅱ、ⅢにおけるタイプⅠ地震波においては、長周期側（剛性低減率が低い＝塑性率が大きい）において1質点系モデルと同様に変位を過大評価することが確認できた。また線形動的解析の結果と変位応答スペクトルが良く一致することも確認でき1質点系モデルを用いている本手法の有効性の確認がなされた。本手法で用いた等価減衰率は、完全弾塑性モデルを想定し定めており Pushover 解析で得られる荷重－変位曲線と厳密には一致しない。今後精度を改善する為には、等価減衰率の検討が必要である。

5 結語

Pushover 解析による保有耐力の算定は、先行する塑性ヒンジにおいて非線形動的解析の応答を精度良く表現できることが確認できた。本来保有耐力の算定においては、荷重（地震波）の特性による影響を考慮せず一義的に決定されるべきと考えられる。しかしながら後続の塑性ヒンジにおける保有耐力は、非線形動的解析の結果と大きな違いが確認された。Pushover 解析により崩壊限界状態までの耐力を得る為には、地震波の特性を考慮する必要性が確認できた。

要求耐力算定の為に用いた等価線形解析は、非線形動的解析の応答値を良くシュミレートしており応答変位の概略値算定方法として十分な精度が得られている。本手法は、機械的な操作による簡易的な計算方法であり、今後履歴減衰評価法及び加速度スペクトル長周期成分の取扱いを改善すれば、設計技術者の労力の軽減として有効な計算手法になると思われる。

参考文献

- 1) 本田明成, 当麻庄司, Lian Duan, 倉真也: Caltrans (カルフォルニア交通局) における道路橋の耐震設計について, 第2回鋼構造の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.93-98, 1998.11.
- 2) 大塚久哲, 山本智弘, 松田泰治: 最大および残留変位推定におけるエネルギーおよび変位一定則の適用性, 第1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, pp.45-48, 1998.1.
- 3) 中島章典, 小野寺理: 鋼製門形ラーメン橋脚の大地震時弾塑性挙動と耐震設計法におけるエネルギー一定則の適用性について, 第2回鋼構造の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.135-142, 1998.11.
- 4) 宇佐美勉, 鄭沂, 葛漢彬: Pushover 解析と等価1自由度モデルによる鋼製ラーメン橋脚の耐震照査法, 第2回鋼構造の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.49-56, 1998.11.
- 5) 土木学会地震工学委員会・地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会: 橋梁の耐震設計法に関する講習会, pp.43-60, 1998.9.
- 6) M.J.N.Priestley, F.Seible, and G.M.Calvi: Seismic Design and Retrofit of Bridges, Wiley Interscience, 1996, 川島一彦監訳: 橋梁の耐震設計と耐震補強, 技報堂, 1998
- 7) 社団法人日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 丸善, pp.10-3, 1998.3
- 8) 土木学会: 動的解析と耐震設計第2巻、動的解析の方法, 技報堂, pp.82-88, 1995