

(111) コンクリート斜張橋の地震時挙動に関する解析的研究

大成建設 正会員 横山 正義 田中 茂義
岩野 政浩 ○丸山 昭義

1. まえがき

橋の耐震設計は、一般に振動特性が単純な構造系の場合には震度法ならびに修正震度法により行われることが多い。しかし、斜張橋のように不静定次数が高くスレンダーな構造物の耐震設計では、振動特性が十分に反映できる動的解析による耐震設計が必要とされる。通常、動的解析では弾性応答解析が広く用いられるが、最近の設計法は、大地震に対して構造物自体の損傷をある程度まで許し、塑性領域でのエネルギー吸収により構造物の崩壊を防ぐという限界状態設計法に移行しており、塑性領域での挙動を考慮できる弾塑性応答解析が必要となる。

そこで、本研究では卓越周期の異なる2種の地震波が入射した際の弾性応答解析ならびに弾塑性応答解析を行い、両者の比較ならびに安全性の照査を行った。

2. 解析モデルならびに入力地震動

解析対象とした斜張橋は、橋長174mのコンクリート斜張橋であり、これを2次元FEMモデルにモデル化した。モデル化に際しては主塔、橋脚、主桁はともに集中質点・梁要素とし、斜ケーブルはトラス要素としてその質量は主塔と主桁に分散させた(図-1、参照)。支持条件としては橋脚下端固定、主桁両端スライドとした。入力地震波は図-3に示す比較的短周期成分の卓越するEL Centro波、長周期成分の卓越する八戸波の2種類の波を用いた。本研究においては、最大級の地震を想定するものとして最大加速度を500galと設定し、橋脚下端より橋軸方向に入力した。

3. 非線形特性ならびに解析手法¹⁾

本検討では塑性化の性状を曲げモーメント-曲率関係(M-φ曲線)に基づき曲げ剛性の低下として取り扱った。このM-φ関係はRC断面計算から得られるコンクリートひび割れ時、鉄筋降伏時、終局時の3点を結ぶTrilinear直線でモデル化し(図-2、参照)、履歴特性としてはDegrading Trilinear Model²⁾(図-4、参照)を用いた。

弾塑性解析の基本式としては次式に示す増分型運動方程式を用いた。

$$M\Delta\ddot{U} + C\Delta\dot{U} + K^t\Delta U = \Delta R \quad (1)$$

ここで、M、C：質量及び減衰マトリックス

K^t ：時刻tからt+Δtまでの接線剛性マトリックス

ΔR：外力増分ベクトル

Δ \ddot{U} 、Δ \dot{U} 、ΔU：加速度、速度、変位増分ベクトル

式(1)の解はNewmarkのβ法(β=1/4)を用いて各時間ステップ毎に求め、不釣合い力の収束計算にはNewton法を用いて各時間ステップ毎に実施した。粘性減衰に相当する減衰定数は1次~40次まで一律、弾性解析で5%、弾塑性解析では2%とした。なお、弾塑性解析ではひび

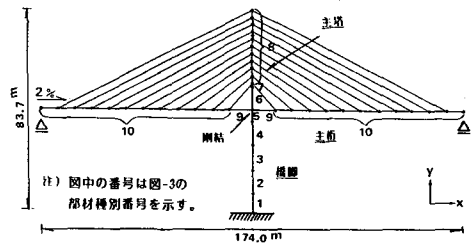


図-1 解析モデル

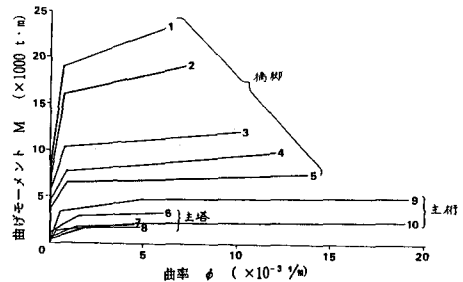
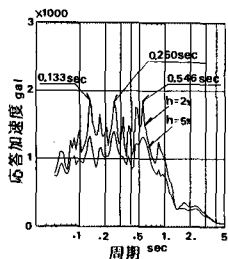
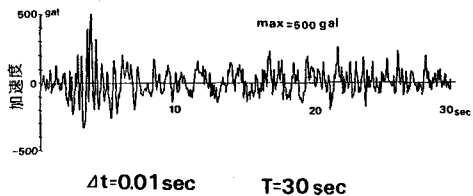
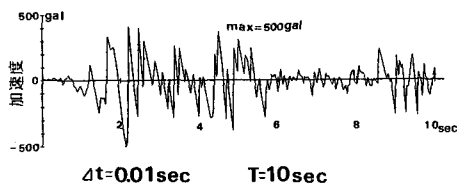
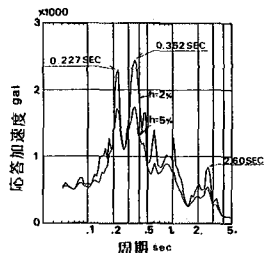


図-2 曲げモーメント-曲率関係



a) EL Centro NS (1940)



b) 八戸 NS (1968)

図-3 入力加速度および加速度応答スペクトル ($\alpha_{MAX} = 500gal$)

割れモーメントを越えると先に述べた履歴特性により履歴減衰が考慮される。

解析にあたっては、当社で開発した弾塑性骨組解析プログラム「TDAP」を用いた。

4. 検討内容

本検討は、大地震時の弾塑性挙動の把握を目的とし、弾性解析結果と弾塑性解析結果の比較を中心に検討を行う。

5. 解析結果

モデルの固有値解析を行った結果、刺激係数の大きい振動モードの固有周期を表-1に示す。また、図-5にモード図を示す。本斜張橋の1次固有周期は2.6秒であり、今回用いた八戸波の長周期域の卓越周期とはほぼ一致する。このような比較的長周期成分が卓越した地震波が入射した際構造物は共振し大きな応答が生じるものと予想される。EL Centro 波に対しては、4次モード以上の振動が卓越するものと考えられる。

以下に、EL Centro 波、八戸波入力による弾性解析と弾塑性解析の結果について述べる。

図-6に主桁と主塔の結合部における応答変位の時刻歴波形を示す。弾性解析では両地震波とも構造系の1次モードに相当する周期2.6秒の振動が卓越しているのに対し、弾塑性解析の結果はEL Centro 波の場合で3.6秒、八戸波の場合で4.4秒の振動が顕著となっている。これは塑性化の進展に伴う曲げ剛性の低下により、1次モードの固有周期が長周期化したためである。また、固有周期の長周期化に伴い応答倍率が低下するため、八戸波入力の場合には弾塑性解析の最大応答変位値が弾性解析結果よりも小さくなっている。

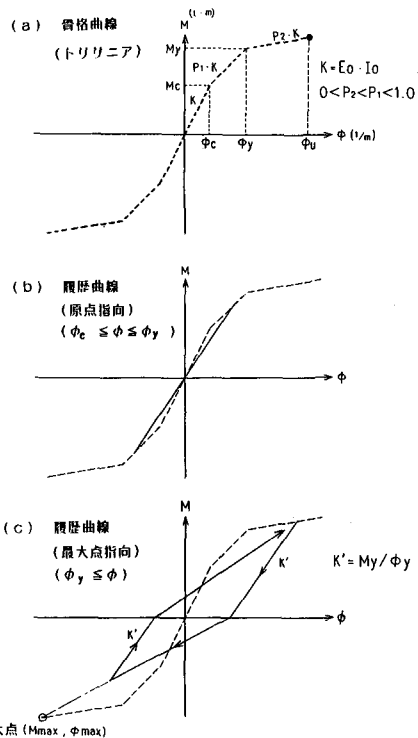


図-4 履歴特性 (Degrading Trilinear Model)

図-7に橋脚下端の曲げモーメントの時刻歴波形を示す。同図より橋脚の曲げモーメント波形は図-6の応答変位波形と同様に1次振動成分が卓越している。

図-8に最大応答加速度分布を示す。弾塑性解析による最大応答加速度値は、両地震波とも部分的に弾性解析を上回る結果となっている。これは、塑性化の進展時に局所的に高次の振動モードが発生したためと考えられる。EL Centro 波、八戸波入力による両解析の最大応答加速度値は入力加速度500galの概略2倍となっている。

図-9に示す最大応答曲げモーメント分布において、EL Centro 波入力の場合には弾塑性解析の結果が弾性解析に比べ、主桁中央部、橋脚下部で弾性解析結果の約1/2に低下している。また、八戸波の結果においても同様に主桁中央部で約1/3、橋脚下部で約1/4に低下している。

弾塑性解析の曲げモーメントが著しく小さくなる理由は1次振動モードに相当する応答変位の低下と部材剛性の低下の相乗効果によるものである。一方、図-8の最大応答加速度は部材の局所的な高次振動を反映したためであり、部材の断面力の低下と矛盾するものではない。

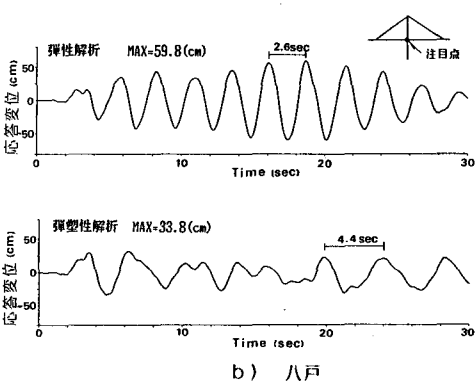
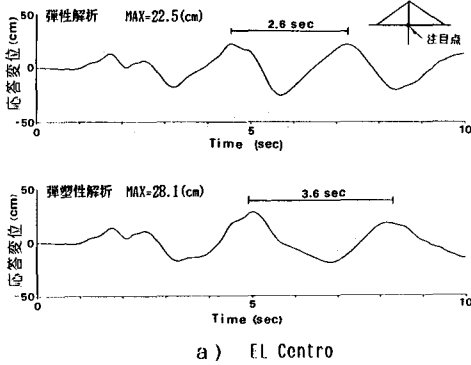


図-6 応答変位の時刻歴波形

表-1 主要固有周期一覧表

振動モード	1次	2次	4次	7次	10次
周期 (SEC)	2.62	1.42	0.58	0.30	0.20
制振係数	18.04	12.82	3.58	3.56	6.03
備考 (主桁) (主塔・橋脚)	非対称1次 1次	非対称1次	対称1次	非対称2次 2次	3次

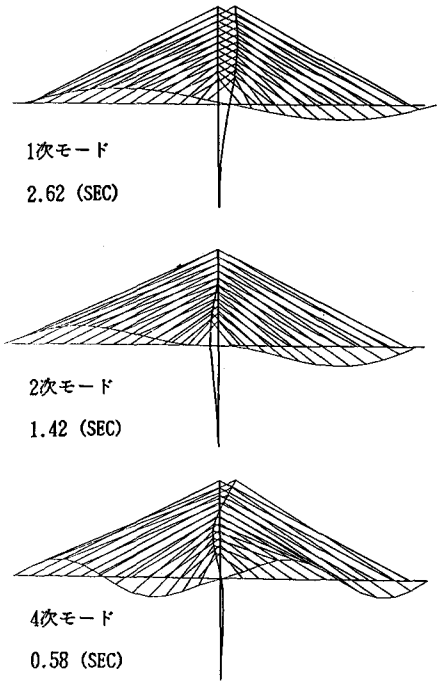


図-5 モード図

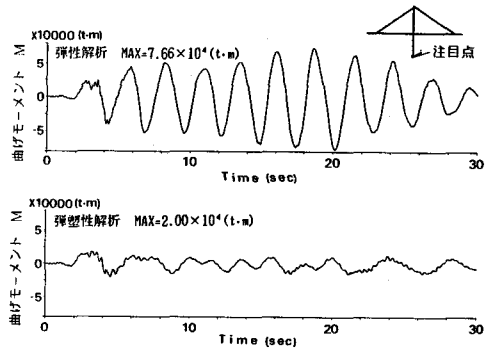


図-7 曲げモーメントの時刻歴波形(八戸波入力)

図-10には最大応答曲げモーメントから算定した部材の最終塑性化状況図を示す。弾性解析結果では両地震波入力とも広範囲な部材において終局強度に相当する断面力が生じているが、弾塑性解析結果によれば、八戸波入力の場合で一部の部材で鉄筋降伏に相当する断面力が発生しているものの、ほとんどの部材において両地震波とも、ひび割れ程度におさまっている。これは弾塑性解析では部材の塑性化に伴い履歴減衰が考慮され振動エネルギーが吸収されること及び長周期化による応答倍率の低下によるものである。

6. まとめ

本検討では、大地震時におけるコンクリート斜張橋の安全性を照査することを目的として入力加速度500galの弾性応答解析と弾塑性応答解析を行った。入力加速度500galの弾性応答解析では、広範囲の部材で終局強度に相当する断面力が生じたが、弾塑性応答解析では、

- ① 部材の曲げ剛性の低下に伴う振動エネルギーの吸収
 - ② 低次振動周期の長周期化による応答値の低下
- を考慮したことにより一部の部材で鉄筋降伏、大部分の部材で軽微な損傷（ひびわれ）程度にとどまるという結果が得られた。

以上の考察により、本斜張橋のようなスレンダーなコンクリート構造物の耐震性評価には弾塑性解析を適用するのが合理的な方法であることが示された。

最後に、本検討を遂行するにあたり御指導頂いた京都大学山田善一教授、家村浩和助教授に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高部 昇他：PC斜張橋の弾塑性地震応答解析
橋梁と基礎 Vol.20 pp.7~12 (1986.11)
- 2) 梅村 魁：鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計・(続)
技報堂出版 (1982)

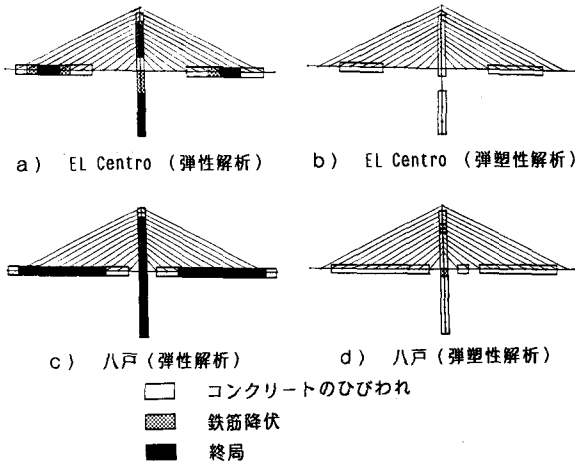


図-10 部材の塑性化状況図

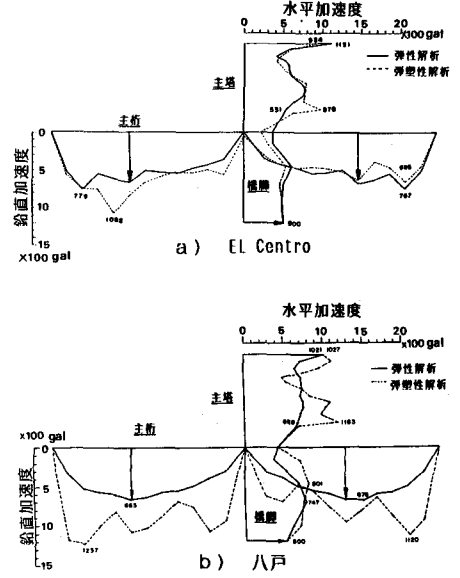


図-8 最大応答加速度分布図

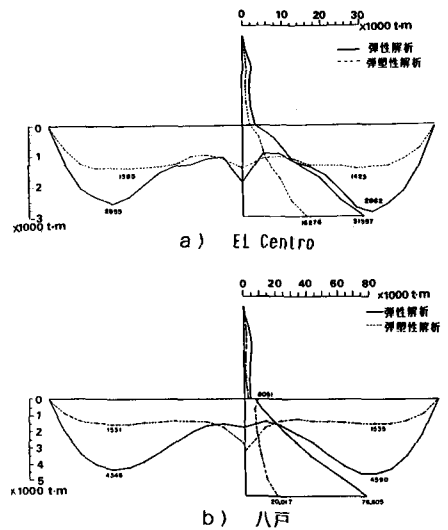


図-9 最大応答曲げモーメント分布図