

鋼斜張橋の耐震性能評価への一提案

沈 赤¹⁾, 矢部正明²⁾

工博 (株)長大 構造事業部 構造防災室 (〒305-0821 茨城県つくば市春日 3-22-6)
 博 (工) (株)長大 構造事業部 構造防災室 (〒305-0821 茨城県つくば市春日 3-22-6)

本論文は、鋼斜張橋を対象に、Pushover 解析と非線形動的解析を行い、Pushover 解析を行う際にどのような地震荷重を漸増載荷されれば非線形動的応答を静的解析によって再現できるかを検討したものである。さらに、Pushover 解析によって保有性能を求め、非線形動的解析によって要求性能を求めることにより、長大斜張橋の耐震性能を評価する方法の一例を示した。Pushover 解析における地震荷重の載荷方法として、動的解析より得られた最大応答加速度分布に質量を乗じて求めた慣性力分布を用いた場合、応答加速度分布を一様分布と仮定して解析モデルの質量分布を慣性力分布とした場合、主桁を橋軸方向に並進変位させた場合の3つの方法を対象とした。そして、3つの載荷方法より得られる Pushover 解析によって非線形動的解析結果を実用上十分な精度で再現できることを確認した。

Key words: Pushover analysis, Cable-stayed bridge, Seismic design, Nonlinear dynamic analysis

1. まえがき

兵庫県南部地震以後、道路橋の耐震設計は、許容応力度法を基本とする震度法から、対象とする構造系の非線形性を考慮した地震時保有耐力法へとその基本が移っていた。しかし、1980年代以後、繰返し載荷実験や振動台実験により動的耐力や変形性能の評価が進められてきた RC 橋脚や、兵庫県南部地震以後、精力的に正負繰返し載荷実験が進められてきた鋼製橋脚とは異なり、ラーメン橋やアチ橋および斜張橋等の長大橋梁に対する地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発にはまだいろいろな検討課題が残されている。このような状況下で長大橋梁の耐震設計は、Pushover 解析により求められた橋梁全体系としての耐力と変位の関係、塑性化の状況に基づいて耐震設計上許容できる損傷度を定め（保有性能の評価）、非線形動的解析より得られる応答値（要求性能の評価）が、その許容される損傷度以内に収まっているかを照査するという手順がとられることが多い。

耐震設計における Pushover 解析は、想定した地震荷重を対象とする構造物に漸増載荷させることにより、静的非線形応答から対象とする構造系の地震による損傷状況や塑性化の順番、崩壊モードを追跡する方法である^{1), 2)}。ラーメン系の構造では、高次振動モードの影響が小さい場合に Pushover 解析で求めた最大応答値が非線形動的解析結果を良い精度で近似することが報告されている^{3), 4), 5)}。しかし、長大橋梁に関する Pushover 解析の検討例はまだ少ない。本研究は、桁の橋軸方向支持形式を塔部2点固定方式とした鋼斜張橋を対象に、Pushover 解析における地震荷重をどのように載荷したら非線形動的応答を再現できるかを検討するとともに、Pushover 解析と非線形動的解析を用いた

耐震性能の評価結果について報告する。なお、斜張橋の耐震設計では、主塔の安全性を確保することが斜張橋全体系としての耐震性能を向上させることにつながるため、ここでは、橋軸方向から地震動が作用する場合の主塔の非線形応答に着目する。

2. 対象とした斜張橋と解析モデル

図-1 に対象とした鋼斜張橋を示す。側径間 70m、中央径間 200m、主塔高さ 70m で、主桁と主塔の橋軸方向支持形式は、塔部2点固定方式である。ケーブルの張り方は、ハブタイプである。鋼斜張橋のようなフレキシブルな橋梁では、材料の非線形性だけでなく、幾何学的な非線形性も無視できない。ここでは、Pushover 解析は、材料非線形と有限変位を考慮した弾塑性有限変位解析（汎用 FEM 解析コード ABAQUS）を行い、非線形動的解析は、死荷重によって斜張橋の各部材に生じる初期軸力による幾何剛性を考慮した弾塑性線形化有限変位解析によった。

図-2 は、Pushover 解析において考慮した各要素の非線形特性である。地震時に塑性化することが予想される主塔は、完全弾塑性型の応力-ひずみ関係を有するファイバーモデルによってモデル化した。ケーブルは、地震時に張力抜けが生じるので、図(2)に示すように圧縮には抵抗しない軸力部材（非抗圧部材）としてモデル化した。主桁は、線形のはり要素によってモデル化した。地盤は非線形性が最も強い材料であり、そのせん断剛性 G は、地盤に生じるせん断ひずみ γ の大きさによって大きく変化する。ここでは、図(3)に示すように、自由地盤の非線形動的解析結果に基づいて、地盤のせん断剛性 G が微小ひずみ時 ($\gamma_0 = 10^{-6}$) G_0 の約 50%

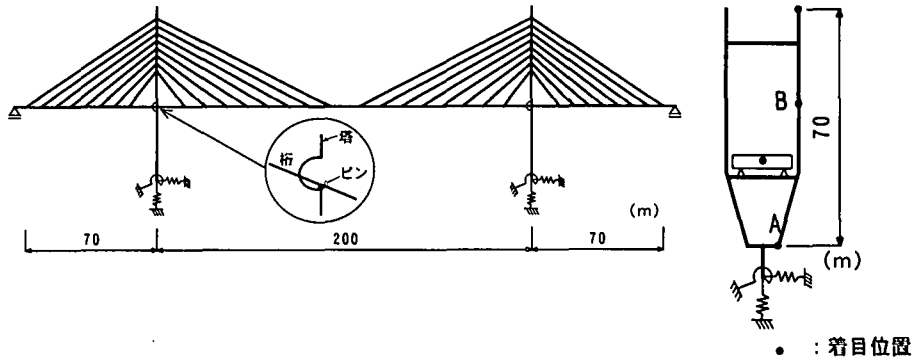


図-1 対象とした斜張橋

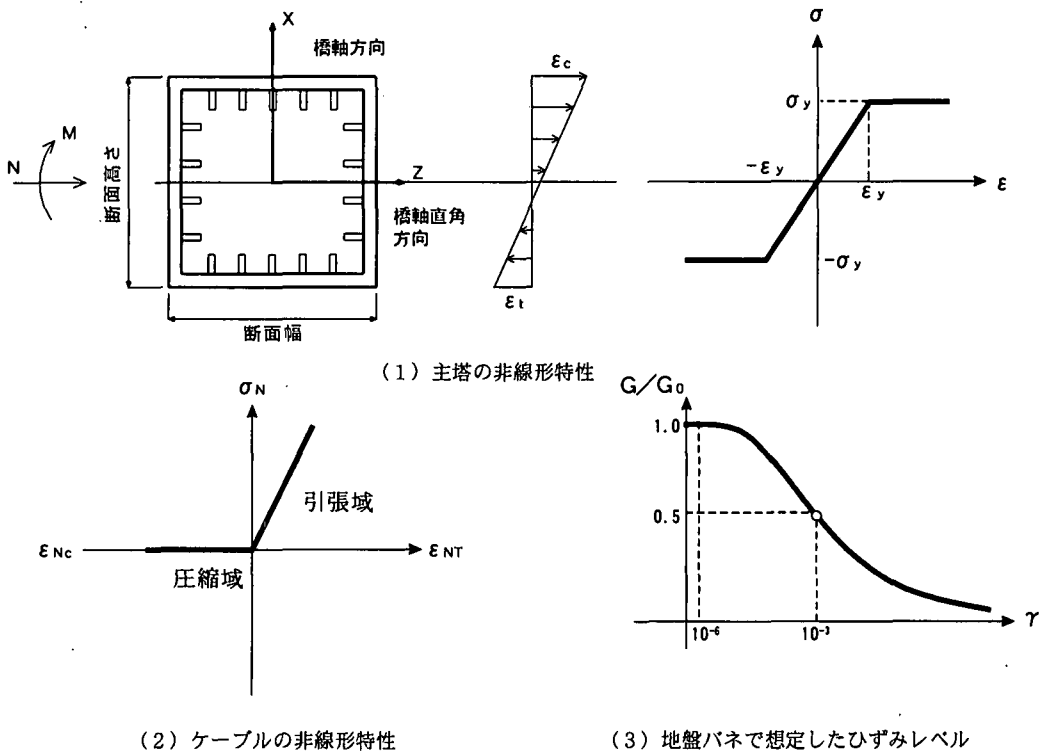


図-2 Pushover 解析に用いる要素の非線形特性

に低下したときの地盤バネを等価線形バネとしてモデル化した。

非線形動的解析では、主塔を完全弾塑性型の応力-ひずみ関係より求めた曲げモーメント M ~ 曲率 ϕ 関係を有する非線形はり要素によってモデル化したことと、有限変位の影響を線形化有限変位理論によって近似した点以外は、Pushover 解析と同じである。図-1 に示す鋼斜張橋に橋軸方向から地震動が作用する場合に、主塔に作用する軸力の変動量は小さいと予想されるので、曲げモーメント M ~ 曲率 ϕ 関係は、死荷重によって主塔の各断面に作用する軸力を用いて算出した。減衰定数は、鋼部材よりなる主塔、主桁では 2%、ケーブルでは 1%、地盤バネでは 20% とし、ひずみエネルギー比減衰法によりモード減衰定数を求め、それと減衰マトリックスによ

る減衰効果が整合するように、Rayleigh 型減衰マトリックスの係数を定めた。入力地震動は、道路橋示方書に規定される地震時保有水平耐力法に用いる標準加速度波形 II-III-1 である。この加速度波形を、基礎上面位置より地盤バネを介して橋軸方向に入力した。

3. 斜張橋の固有振動特性

表-1 は、対象とした斜張橋の固有振動特性を示したものである。図-3 は、1 次 ~ 3 次の固有振動モード形を示したものである。1 次固有振動モードは、主桁が鉛直方向にたわみ変形する固有振動モードであり、橋軸方向のモード寄与率が 0 となるため、橋軸方向から作用する地震動に対しては応答しない。2 次固有振動モードと 3 次固有振動モードは、主桁が

鉛直方向にたわみ変形しながら橋軸方向に並進変位し、それに伴い、主塔が橋軸方向に変形するモードである。

図-4は、道路橋示方書V耐震設計編に規定される地震時保有水平耐力法に用いるタイプII地震動のⅢ種地盤上における標準加速度応答スペクトルを用いて応答スペクトル解析を行い、主要な着目量の各固有振動モードに対する応答値（各次応答値）の2乗和平方根によって求めた最大応答値に対する比率を示したものである。図には、橋軸方向から作用する地震動に対して大きな応答を示す2次、3次と5次の固有振動モードに対する各次応答値のみを示してある。図より、主桁と塔頂の水平変位、主塔基部の曲げモーメントは、2次と3次の固有振動モードによってその地震応答が決まっていることがわかる。主桁側径間中央の鉛直変位は、3次固有振動モードの応答値は小さいが、5次固有振動モードの

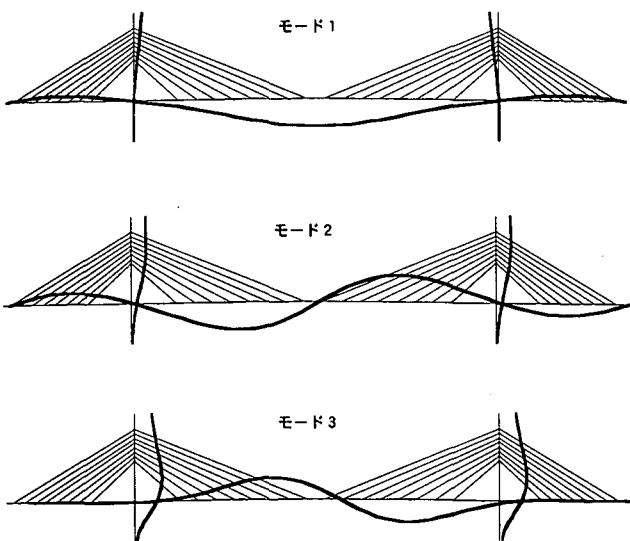


図-3 対象斜張橋の固有振動モード形

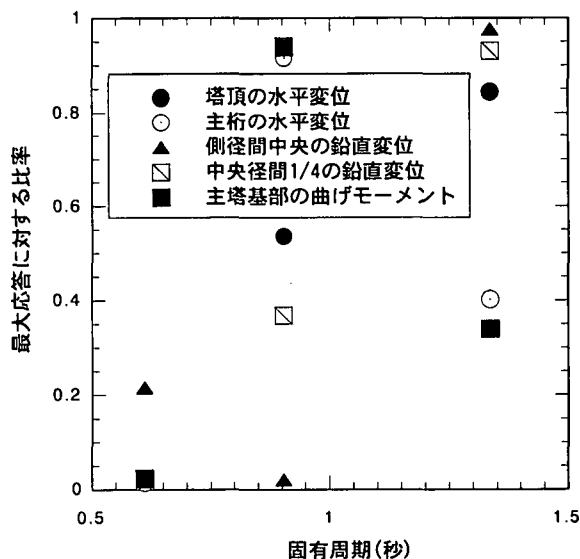


図-4 着目した応答率と固有周期の関係

応答値は最大応答値の約20%と大きい。これより、主桁側径間の鉛直方向の応答には、高次の固有振動モードの影響が大きいことがわかる

表-1 対象斜張橋の固有振動特性

固有振動モード	固有周期	モード減衰	モード寄与率		一般化質量比		
			DX	DY	主桁	主塔	ケーブル
1	2.06	1.4%	0.00	15.18	0.971	0.012	0.017
2	1.33	2.0%	12.22	0.00	0.927	0.055	0.017
3	0.90	4.4%	28.71	0.00	0.880	0.104	0.017
4	0.77	1.6%	0.00	-5.03	0.975	0.012	0.013
5	0.61	1.7%	-4.62	0.01	0.983	0.004	0.013

4. 斜張橋の非線形応答

図-1に示した斜張橋に対して非線形動的解析を行った。標準加速度波形Ⅱ-Ⅲ-1を入力地震動とした場合、主塔基部に塑性化が生じた。図-5は、主塔基部断面の曲げモーメントM-曲率φ関係の応答履歴を示したものである。図には、主塔基部が初期降伏に達した時(①)、主桁の橋軸方向水平変位と主塔基部の曲げモーメントが最大時(time=7.44秒) (②)、側径間中央と中央径間1/4点の鉛直方向変位(③)、塔頂と図-1に示す主塔のB点の水平変位(④)がそれぞれ最大応答に達した時点を●で示してある。図-6は、主塔基部曲げモーメント、主桁と主塔頂部および主塔B点の水平変位、側径間中央と中央径間1/4の鉛直変位の応答波形を示したものである。図には、各着目量が最大応答に達する5秒~15秒の10秒間を示してある。主塔基部の初期降伏とは、主塔基部断面圧縮側の最外縁に生ずる応力度が降伏応力度 σ_y に達した時である。主塔基部が7.36秒に初期降伏に達した後の8/100秒後の7.44秒に主桁に生じる橋軸方向水平変位と主塔基部に生じる曲げモーメントが最大応答値に達してい

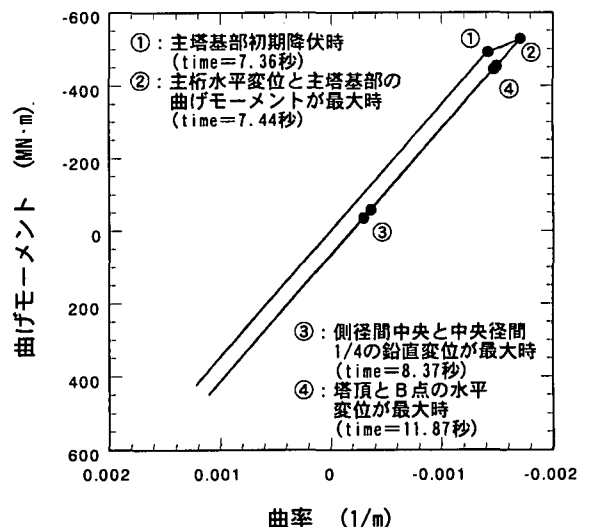
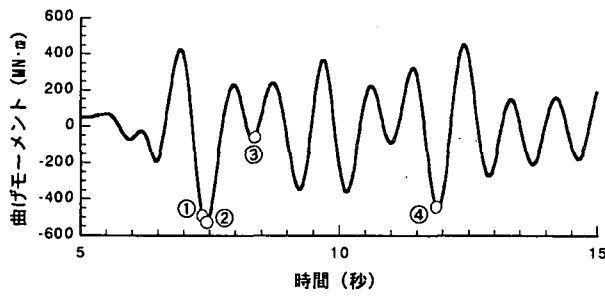
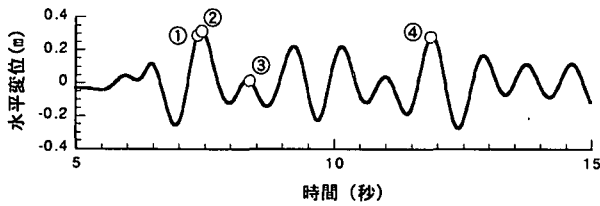


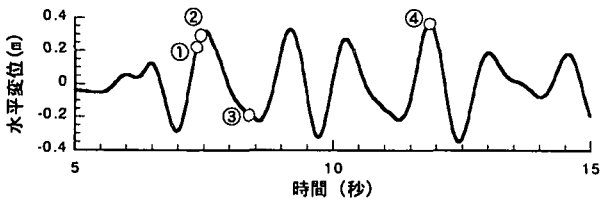
図-5 主塔基部断面の曲げモーメントM-曲率φ応答



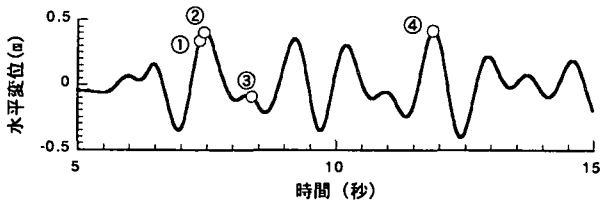
(1) 主塔基部曲げモーメント



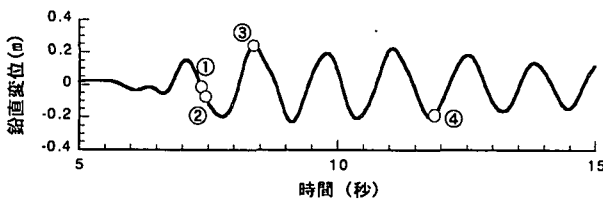
(2) 主桁の橋軸方向水平変位



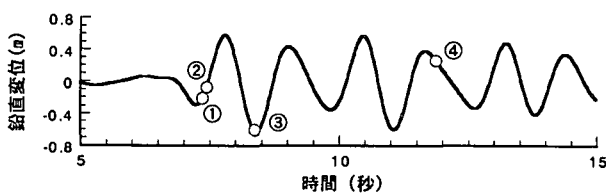
(3) 主塔頂部の橋軸方向水平変位



(4) 主塔 B 点の橋軸方向水平変位



(5) 側径間中央の鉛直変位



(6) 中央径間 1/4 の鉛直変位

図-6 対象とした斜張橋の応答波形

ることから、主桁が橋軸方向に並進運動することにより、主塔基部に大きな曲げモーメントが生じていることがわかる。これは、図-4 に示した応答スペクトル法による各次応答値（線形応答）とも整合している。しかし、主桁に生じる鉛直方向変位は、主桁に生じる橋軸方向水平変位が最大応答値に達した後の 0.93 秒後に最大応答値に達し、さらに、塔頂と主塔 B 点（図-1 に参照）に生じる橋軸方向水平変位は、その 3.5 秒後に最大応答値に達している。これより、主桁の鉛直変位や主桁位置より上方にある主塔各部の応答には、主桁が橋軸方向に並進運動することによる影響だけでなく、主桁が鉛直方向に変形すること、その変形がケーブルを介して主塔に伝わることをの影響がその地震応答に寄与していると考えられる。

以上より、主桁の橋軸方向支持形式として塔部 2 点固定方式を採用した鋼斜張橋の非線形応答を Pushover 解析によって再現する場合、主塔基部の曲げモーメントや主桁の橋軸方向水平変位は、斜張橋の橋軸方向に作用する慣性力を考慮するだけで良いが、主桁の鉛直方向変位や鉛直面内曲げモーメントおよび主桁位置より上方にある主塔各部の応答を Pushover 解析で再現するためには、鉛直方向の慣性力の影響も考慮しなければならないことがわかる。このことは、図-4 に示した主桁の鉛直方向変位の線形地震応答と同様な傾向にある。

5. Pushover 解析に用いる地震荷重の載荷方法

橋軸方向に地震動が作用することにより塑性化が生じた主塔基部の非線形応答を Pushover 解析によって再現するために、3つの地震荷重の載荷方法を検討した。

図-7 は、Pushover 解析における地震荷重の載荷方法を示

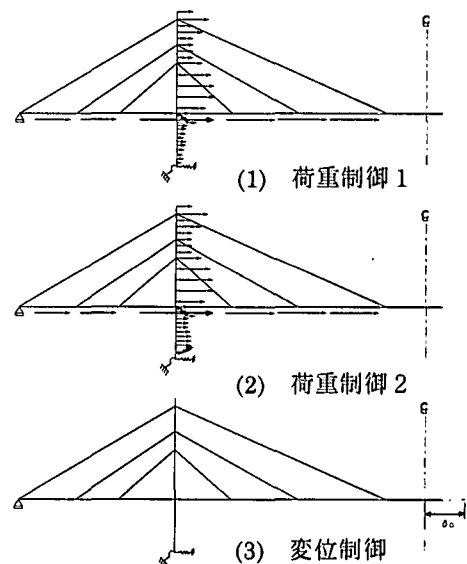


図-7 Pushover 解析に用いる地震荷重の載荷方法

したものである。荷重制御1は、前述した非線形動的解析より得られた最大応答加速度分布に質量を乗じて求めた慣性力分布を漸増载荷させた場合である。荷重制御2は、応答加速度分布を一様と仮定して動的解析モデルの質量分布を慣性力分布とみなして漸増载荷させた場合である。前述したように、ここで対象とした斜張橋の橋軸方向に地震動が作用した場合の主塔基部の地震応答は、主桁が橋軸方向へ並進変位することの影響が大きいため、主桁を橋軸方向に変位させれば地震時の応答を再現できるのではという観点から主桁を橋軸方向に変位させたものが変位制御である。荷重制御1と荷重制御2は、動的解析より得られる応答加速度分布が一様ならば、両者は等しくなる。

6. 地震荷重の載荷方法が非線形応答の再現性に与える影響

図-8は、主塔基部が初期降伏に達するときの主塔の水平変位分布を示したものである。図中には、非線形動的解析より得られた最大応答分布も示してある。図より、荷重制御1と荷重制御2の分布は良く近似しており、主塔に荷重を作用させていない変位制御では、荷重制御1,2よりも最下段ケーブル定着部から主桁位置にかけて変位が他の2つ方法よりも大きくなっている。Pushover解析と非線形動的解析を比較すると、両者の変位分布の形状は良く近似していることがわかる。これは、図-5に示したように非線形動的解析では主塔基部が初期降伏に達した後、塑性変形がわずかに進んだ後に地震動が反転したため、主塔基部の損傷が初期降伏をわずかに超える程度の損傷に留まっているからである。

図-9は、地盤バネに生じる水平反力の総和と、主桁位置と主塔の中で最も変形が大きくなるB点(図-1参照)の水平

変位の関係をそれぞれ示したものである。図中には、最大荷重点付近までの解析結果を示してある。図に示すように、3つの地震荷重の載荷方法から得られた荷重-変位関係がほぼ等しいことがわかる。また、何れの地震荷重の載荷方法によっても、主塔基部が最初に降伏し、その後、主塔の中で最も変形が大きくなるB点が降伏に達している。2箇所塑性化が生じた後、斜張橋の水平変位が急速に増加して塔頂部が約1mの変位に達したところで、橋梁全体系としての最大水平耐力に達した後、耐力が低下している。後述するように、対象とした斜張橋に耐震設計上許容される損傷は、主塔の2箇所に塑性化が生じる前の状態に留める必要がある。

図には、荷重制御1において幾何学的非線形の影響を無視した場合の解析結果も示してある。幾何学的非線形の影響

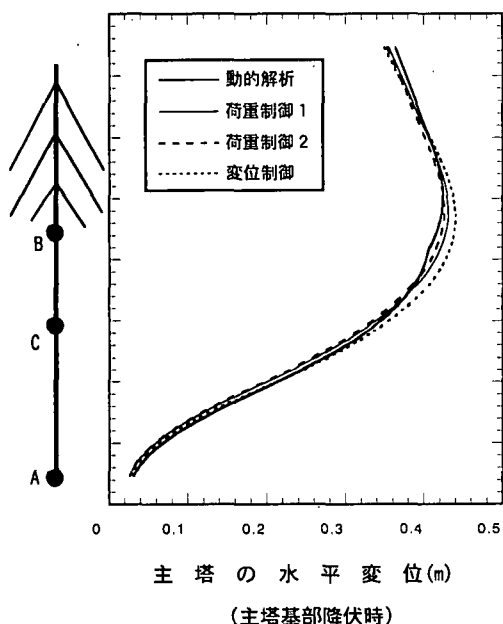
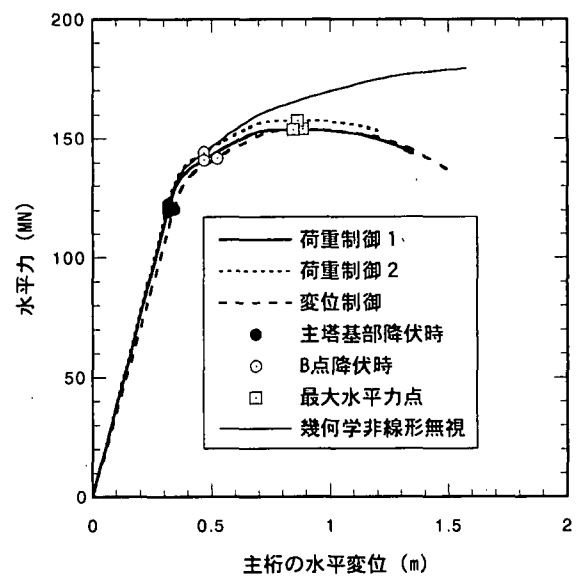


図-8 主塔の水平変位分布の比較

図-9 水平力と水平変位の関係

響を無視しているので、主塔の2箇所が降伏に達した後も水平力の上昇が続いており、最大水平力は幾何学的非線形の影響を考慮した時に比べて約11%大きく得られている。このように、幾何学的非線形の影響を無視すると斜張橋全体としての水平耐力や限界状態を過大評価することがわかる。

荷重制御1と変位制御を比較すると、主塔基部降伏時、B点降伏時および荷重最大時の水平力はほぼ等しいが、変位制御による主桁の水平変位がやや大きく得られている。その差はB点が降伏時に最も大きく、約11%である。また、荷重制御1と荷重制御2を比較すると、質量分布に基づいた荷重制御2による水平力が荷重制御1よりも少し大きい点を除けば、それぞれのイベントにおける変位は等しい。

図-10は、荷重制御1による水平力と主桁位置の水平変位の関係と、非線形動的解析の応答履歴を比較したものである。動的解析の水平力は、各質点位置の応答加速度に質量を乗じた慣性力の和を表したもので、主塔基部位置における水平方向地盤パネのパネ反力に相当する。主塔基部が降伏に達した時点における水平力を比較すると、Pushover解析では1.27MN、動的解析では1.36MNと、動的解析の方が約7%大きく得られている。動的解析では、慣性力に釣り合うのは減衰力と復元力であり、この減衰力の影響によって、主塔基部が降伏に達する時の水平力がPushover解析よりも動的解析の方が大きくなっている。この点を除けば、Pushover解析より得られる水平力と水平変位の関係は、非線形動的解析より得られる応答履歴の包絡線を良く再現していると言える。このように、Pushover解析によって、斜張橋の地震時の変形や損傷過程を求める場合には、動的解析より得られる最大応答加速度に質量を乗じて求めた慣性力分布に基づいた荷重制御1を用いれば、実用上十分な精度で非線形動的解析結果を再現できることがわ

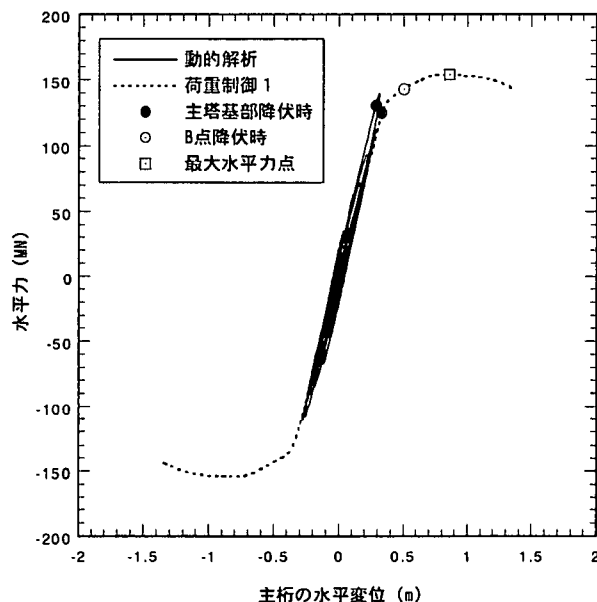


図-10 動的非線形解析とPushover解析の比較

かる。しかし、図-9に示したように質量分布に基づいた荷重制御2や変位制御によっても、実用上遜色のない解析結果が得られていることがわかる。荷重制御1による場合は、動的解析より得られた応答加速度分布が必要となるため、逐次断面修正が行われる設計の初期段階では、荷重制御2や変位制御の方が、実用性が高いと言える。

7. 斜張橋の耐震性能の評価

図-9より、主塔基部が降伏に達した後、主塔B点が降伏に達すると主塔の水平変位が急激に大きくなることから、対象とした斜張橋に要求される耐震性能（許容できる損傷）は、降伏を主塔基部の一箇所に限定し、主塔B点が降伏に達するまでには十分な余裕を有している程度の損傷にとどめることが必要となる。図-10に示したように、非線形動的解析では主塔基部が降伏した直後に最大応答に達しており、主塔B点の降伏にはまだ十分な余裕を残していることがわかる。図-10は斜張橋全体系としての非線形応答に着目したものであるが、未知の地震動に対して斜張橋が崩壊を免れるためには、想定した地震動によって塑性化が生じた断面の塑性変形が終局状態における塑性変形よりも十分小さいことも必要となる。鋼箱形断面の終局時の塑性変形を検討した研究は幾つかあるが^{(6), (7), (8)}、ここでは宇佐美らによって提案された終局ひずみの計算式⁽⁸⁾に着目する。ここでは、対象とした主塔基部断面の座屈パラメータ（幅厚比パラメータ R_p 、細長比パラメータ λ 、および軸力比）に基づいて宇佐美らの提案式⁽⁸⁾によって終局ひずみを求めると $12.8\varepsilon_y$ となる。図-11は、鋼材の応力-ひずみ関係を、図-2に示した完全弾塑性型から降伏後に1%のひずみ硬化を考慮した応力-ひずみ関係に変更し、荷重制御2によってPushover解析を行った際に得られ

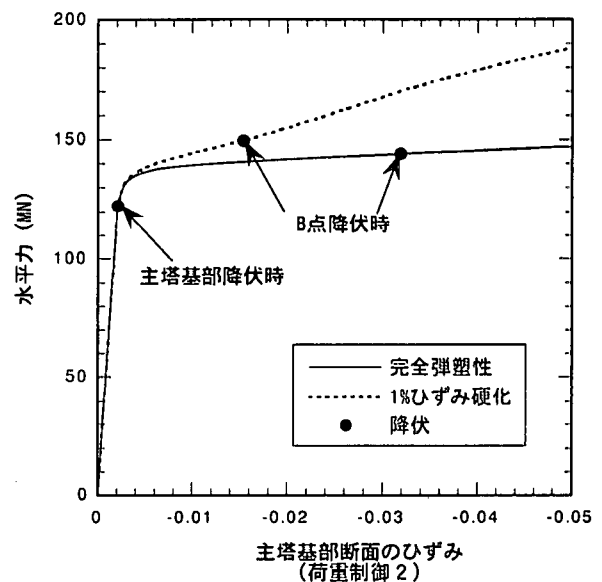


図-11 水平力と主塔基部断面のひずみの関係

た水平力と主塔基部断面のひずみの関係を示したものである。主塔基部が降伏に達した後、主塔 B 点が降伏に達するまでの間に、主塔基部に生じるひずみは完全弾塑性型の応力-ひずみ関係では $14.5 \epsilon_y$ 、1%のひずみ硬化を考慮した応力-ひずみ関係では $7.0 \epsilon_y$ となる。実際には、多くの鋼材の引張試験より得られる応力-ひずみ関係には、ひずみ硬化が存在することが広く知られている。ひずみ硬化を考慮した応力-ひずみ関係より得られる主塔 B 点が降伏に達した時の主塔基部断面のひずみ $7.0 \epsilon_y$ は、宇佐美らの提案式によって求めた限界ひずみ $12.8 \epsilon_y$ に比較して十分小さいことがわかる。これより、ここで対象とした斜張橋では、降伏を主塔基部の一箇所に限定し、主塔 B 点が降伏に達するまでは十分な余裕を有している程度の損傷にとどめることができれば、斜張橋全体系としての水平力-水平変位関係だけでなく、局所的な塑性変形も小さくできることがわかる。

8. あとがき

橋軸方向に主桁を塔部で 2 点固定した鋼斜張橋を対象に、Pushover 解析と非線形動的解析を行い、Pushover 解析における地震荷重の載荷方法を検討した。ここでの検討結果を以下に示す。

- 1) 図-7 に示した荷重制御 1、2 および変位制御の 3 つの載荷方法を用いた Pushover 解析は、非線形動的応答を実用上十分な精度で再現できることがわかった。
- 2) Pushover 解析によって斜張橋の耐震性能を評価する場合の地震荷重の載荷方法は、動的解析より得られる応答加速度分布によらなくとも荷重制御 2 や変位制御でも、実用上十分な精度で解が得られることが確認された。
- 3) 主塔基部断面のフランジ外縁が降伏に達する程度の損傷では幾何学的非線形の影響は小さいが、最大水平力付近では幾何学的非線形の影響を無視すると、最大水平力を約 11% 過大評価することがわかった。

今後は、主桁と主塔の橋軸方向の支持形式が異なる斜張

橋においてもここでの検討と同様な結果になるかを検討する必要がある。

謝辞

塑性化した断面の塑性変形に対する照査法には、名古屋大学大学院教授宇佐美先生より貴重な御意見をいただきました。ここに記して感謝の意を示す。

参考文献

- 1) Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, Inc., 1996
- 2) Krawinkler, H. and Seneviratna, G. D. P. K.: Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, Engineering Structures, Vol.20, No.4-6, pp452-464, 1998
- 3) 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 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp49-56, 1999
- 4) 宇根寛, 川島一彦, 庄司学: プッシュオーバーアナリシスによるラーメン橋の解析, 構造工学論文集, 1999
- 5) 矢部正明, 川島一彦: 杭基礎の地震応答特性とプッシュオーバーアナリシスによる解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp91-109, 1999.4
- 6) 運上茂樹, 寺山徹: 鋼製橋脚の終局変位の算定方法に関する検討, 第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp99-106, 1999
- 7) 深谷茂広, 小野潔, 沈赤, 村越潤, 西川和廣: 矩形断面鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果を基にした曲げモーメント-曲率関係の検討, 構造工学論文集投稿中, 2000 年 3 月
- 8) 葛漢彬, 鄭沂, 宇佐美勉: Pushover 解析による薄肉土木鋼構造物の耐震性能の統一評価法, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp805-808, 1999

(1999 年 11 月 19 日受付)

A PROPOSAL FOR THE SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF STEEL CABLE-STAYED BRIDGE

Chi SHEN, Masaaki YABE

In the present paper, pushover analysis and the nonlinear dynamic analysis are carried out to investigate the seismic performance of the steel cable-stayed bridge and the effect of the earthquake loading method in the pushover analysis. Moreover, an example to evaluate the seismic performance of the steel cable-stayed bridge is shown according to its seismic capacity obtained from pushover analysis and the seismic demand obtained from the nonlinear dynamic analysis.

How to decide the earthquake load is one of the important problems in pushover analysis. On account of vibration behavior of the steel cable-stayed bridge, three earthquake loading methods used in pushover analysis are introduced in this paper, which

are distribution of the inertia force response, mass distribution of the analysis model and the forced girder displacement control. From the comparison between the pushover analysis results and the nonlinear dynamic analysis results, it is confirmed that in any case of the earthquake loading method described above, the seismic performance of the steel cable-stayed bridge can be simulated through pushover analysis accurately. Therefore, the proposed earthquake loading methods are useful to evaluate the seismic performance of steel cable-stayed bridge in practice.