

非線形動的解析とプッシュオーバー解析による 長大吊橋RC主塔の耐震性検討

河藤千尋¹・運上茂樹²

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

本研究はRC主塔の長大吊橋への適用性の検討を目的に、非線形動的解析によるRC主塔の地震時挙動特性を検討するとともに、静的プッシュオーバー解析によるRC主塔の耐震性検討を行った。レベル2地震動を対象とした非線形動的解析によれば、主塔基部および上部において塑性化が生じる部材があること、水平梁においてはせん断力が厳しく、せん断耐力の向上策が必要であることが明らかとなった。またプッシュオーバー解析と非線形動的解析の比較により、プッシュオーバー解析の精度を高めるためには、作用させる慣性力の設定法の検討が必要となることが明らかとなった。

Key Words: Reinforced concrete tower, long span suspension bridge, nonlinear dynamic analysis, push-over analysis

1. はじめに

長大吊橋の建設においては、経済性で優れるとされているRC主塔の採用も考えられる。わが国の長大吊橋ではRC主塔の実績がなく、RC主塔の耐震性に関して地震時振動特性および限界状態の検討が必要である。このため、本文では、非線形動的解析と静的プッシュオーバー解析によりRC主塔の地震時挙動および耐力-変形特性の検討を行った結果を報告するものである。

2. 非線形動的解析

(1) 解析モデルおよび解析方法

解析対象としたRC主塔は非線形動的解析、プッシュオーバー解析ともに、中央支間長2300m程度の長大吊橋とし、高さ約290m、4段の水平梁を有するラーメン構造のRC主塔である¹⁾。解析対象としたRC主塔の一般図ならびにモデル図を図-1に示す。

本検討に用いたRC主塔の塔柱断面は主塔自重軽減のため中空の2室断面であり、設計基準強度 80N/mm^2 の高強度コンクリートと、SD490の高強度鉄筋が用いられている。なお、水平梁は施工性を考慮しPC構造としている。解析モデルは、はり骨組みモデルとした。材料非線形性、幾何学的非線形性を考慮し、高強度コンクリートの応力-ひずみ関係については文献²⁾で提案されて

いる式を用いた。また主ケーブルによる塔頂の橋軸方向に対する拘束効果は線形バネとしてモデル化するとともに、塔柱基部には線形の地盤バネを考慮した。減衰はRayleigh型減衰を仮定した。

入力地震動としては、道路橋示方書に規定されるレベル2タイプI地震動とした(以下、レベル2地震動と呼ぶ)。図-2に解析に用いた地震動の加速度応答スペクトルを示す。

(2) 解析結果

表-1に固有振動解析結果を示す。1次の固有周期は、橋軸方向に対して約2.7秒、橋軸直角方向に対して約3.7秒である。図-3はレベル2地震動による橋軸方向および橋軸直角方向解析から得られた損傷の進展箇所を示したものである。

図-3の橋軸方向の損傷進展箇所から、損傷箇所は塔柱に限られていることがわかる。また損傷箇所が第3水平梁および基礎水平梁から先行しているのは、第3水平梁付近は橋軸方向1次のモードの形状に従って曲げモーメント分布が大きくなる箇所である。一方橋軸直角方向に関しては、水平梁、特に塔柱の接合部付近に損傷が先行しているのがわかる。

図-4は橋軸直角方向におけるせん断力の地震応答結果を示したものである。橋軸直角方向に変形に伴う水平梁に生じるせん断力がせん断耐力を大きく超過している。本検討に用いたRC主塔の断面は常時の荷重に対して設

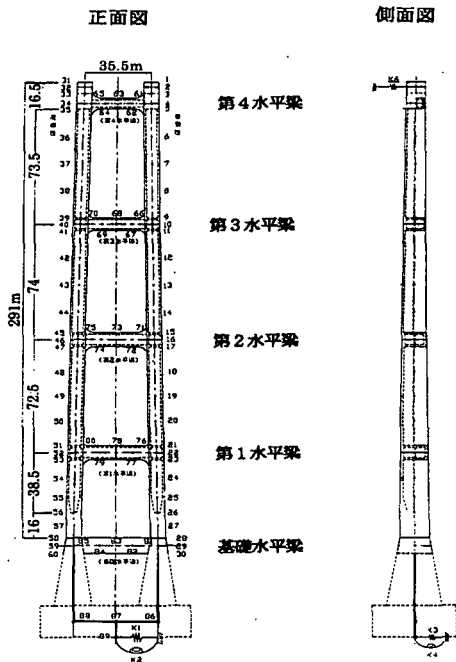


図-1 RC主塔一般図およびモデル図

表-1 固有振動数およびモード形

橋軸方向			橋軸直角方向		
1次	2次	3次	1次	2次	3次
2.691s	1.488s	1.343s	3.719s	1.094s	0.626s

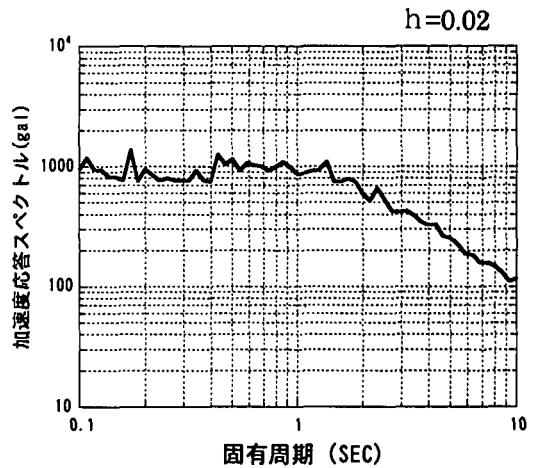


図-2 加速度応答スペクトル
(道路橋示方書レベル2タイプI)

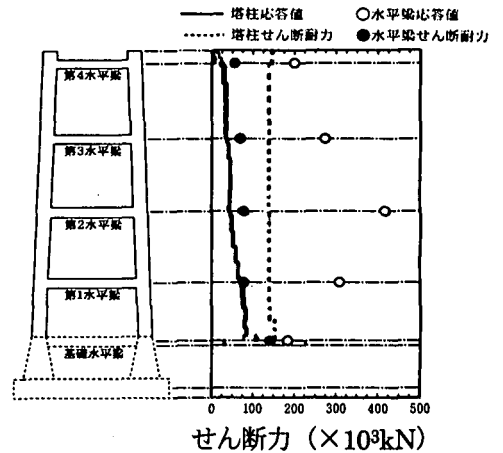


図-4 せん断力の分布 (橋軸直角方向)

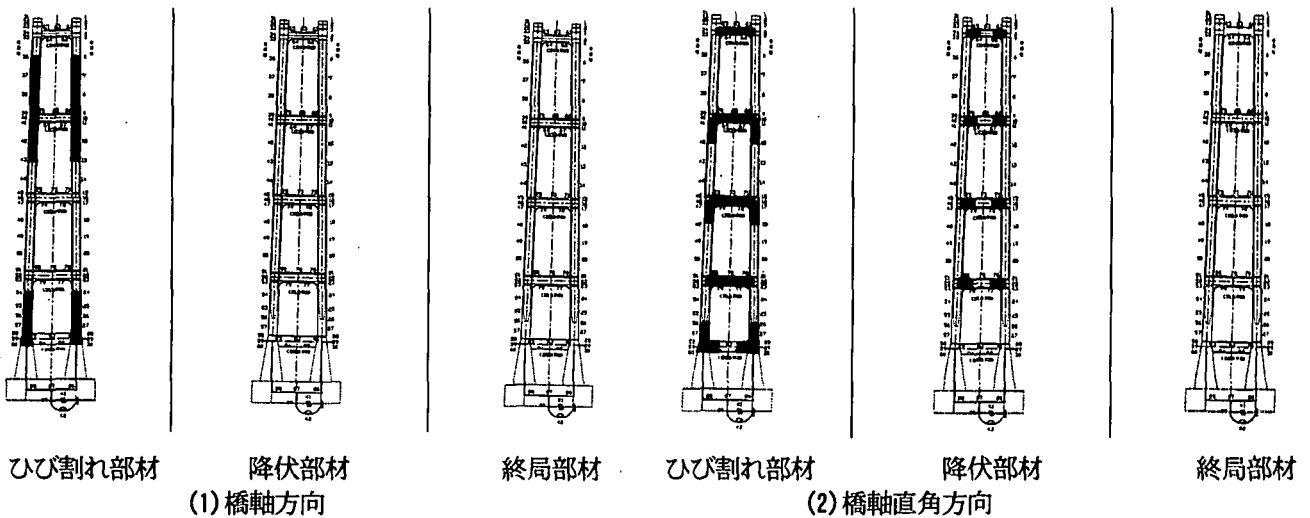


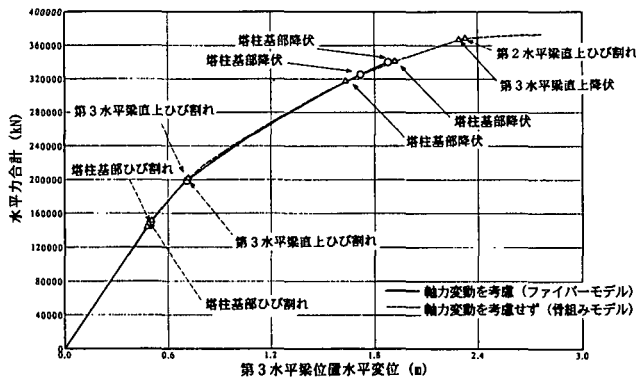
図-3 曲げ損傷の進展箇所

計したものとなっており、耐震設計を行った断面ではないが、解析から水平梁のせん断耐力の向上が必要であることがわかった。

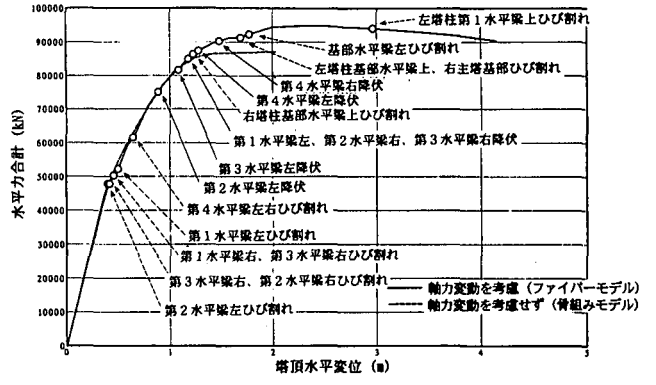
3. プッシュオーバー解析

(1) 解析モデルおよび解析方法

解析対象としたRC主塔は、前述の非線形動的解析と同じものとした。解析モデルには、塔柱の軸力変動を考

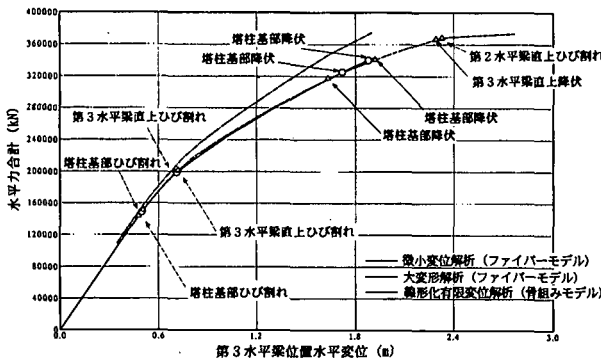


(1) 橋軸方向

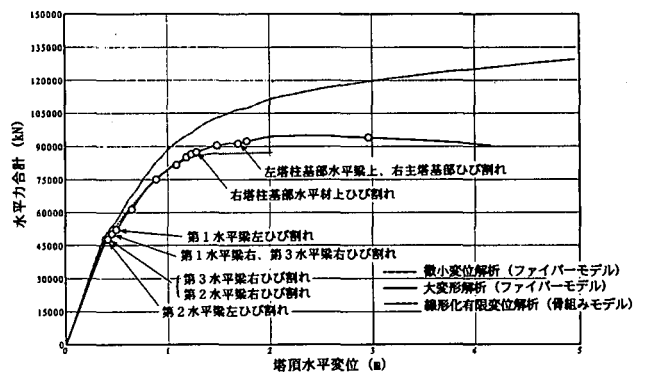


(2) 橋軸直角方向

図-5 プッシュオーバー解析結果 (軸力変動が荷重-変位特性に及ぼす影響)



(1) 橋軸方向



(2) 橋軸直角方向

図-6 プッシュオーバー解析結果 (軸力変動が荷重-変位特性に及ぼす影響)

慮するために、材料非線形を考慮したファイバーモデルを用いた。コンクリート断面はフランジ 10 分割、ウェブ 40 分割とし、鉄筋、PC 鋼材はそれぞれの断面の中心位置に配置した。なお、比較のため軸力変動を無視した解析を行ったが、この場合には、材料非線形性を M- ϕ モデルに反映させたはり骨組モデルを用いた。また主ケーブルによる塔頂の橋軸方向に対する拘束効果は線形パネとしてモデル化するとともに、塔柱基部には線形の地盤パネを考慮した。

解析は静的なプッシュオーバー解析とし、橋軸方向および橋軸直角方向の 2 方向の解析をそれぞれ行った。解析では、大変形解析、線形化有限変位解析、および微小変位解析の 3 つについて行った。プッシュオーバー解析に用いる載荷荷重としては、表-1 に示す 1 次の固有振動モードの形状に比例させた慣性力を漸増させた。

(2) 解析結果

図-5 は、塔柱の軸力変動が荷重-変位特性に及ぼす影響を示したものである。解析モデルとしては軸力変動考慮ではファイバーモデルを、軸力変動考慮なしでは骨組みモデルを用いたものである。また両解析ともに大変形解析である。橋軸方向による解析では塔柱基部降伏後、最

大耐力に達する前に解が収束しなくなったため、解析が可能となった段階までを示している。

橋軸直角方向に対する解析では、水平耐力が最大となった以降も耐力の低下は緩やかであり、本 RC 主塔は良好な耐荷力特性を有していることがわかる。また、ひび割れおよび降伏は第 2 水平梁→第 3 水平梁→第 1 水平梁→第 4 水平梁の順番に生じており、最大耐力時点でも主塔基部は降伏に至っていない。損傷モードとしては、橋軸方向では塔柱が主塔基部および第 3 水平梁位置で降伏し、水平力が低下し始める。橋軸直角方向に関しては、全ての水平梁に降伏が生じると耐力が低下し始める。なお、この時主塔基部は降伏に至っていないことがわかる。

軸力変動については、橋軸方向の解析においては塔柱の軸力変動がほとんど無いため、影響は見られない。橋軸直角方向に対する解析では、水平梁が降伏するまでは、両者の差はほとんど無い。しかし最大耐力については軸力変動を考慮しない場合には、考慮した場合に比べ 8% ほど小さく評価された。

図-6 は大変形解析、微小変位解析 (線形解析)、線形化有限変位解析の 3 つの解析方法による荷重-変位関係を比較したものである。解析モデルは微小変位解析と大

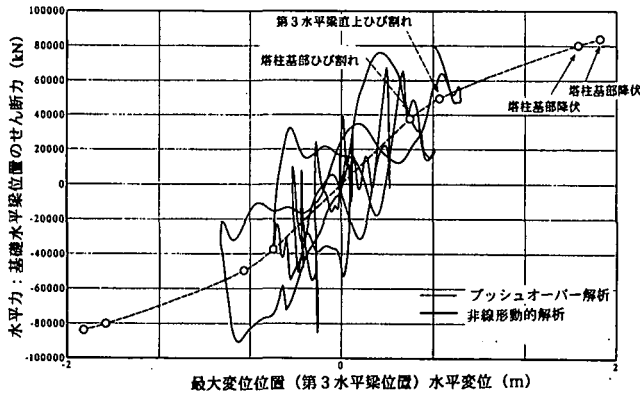


図-7 プッシュオーバー解析と非線形動的解析との履歴曲線の比較

変形解析がファイバーモデルで軸力変動を考慮，線形化有限変位解析が骨組みモデルで軸力一定としている。これによると，橋軸，橋軸直角方向ともに微小変位解析結果が3者の中で大きな値を算出している。橋軸直角方向の微小変位解析結果は大変形解析における最大水平耐力時において約20%大きな値となった。

4. プッシュオーバー解析と非線形動的解析の比較

プッシュオーバー解析結果と非線形動的解析とを比較して，プッシュオーバー解析の荷重載荷方法について検討した。

図-7にプッシュオーバー解析結果とレベル2地震動の橋軸方向の非線形動的解析結果を重ね合わせたものを示す。縦軸は水平震度を表す量として基礎水平梁位置のせん断力とし，横軸の変形量は橋軸方向での変形量が最大となる第3水平梁位置とした。

解析結果は図-7に示すように，動的解析結果はプッシュオーバー解析の傾向はとらえているものの，その軌跡は大きく異なる。

これは，プッシュオーバー解析で設定した地震荷重が実際の地震動を再現できていないためと考えられる。RC主塔の地震応答は1次振動モードが卓越しているものと考え，プッシュオーバー解析の静的荷重として用いたが，高次の振動モードの影響を考慮していないために，非線形動的解析とプッシュオーバー解析との間で差が生じたものと考えられる。

このため，今回対象とした多層のラーメン構造となるようなRC主塔におけるプッシュオーバー解析では，高次のモードの影響が大きいため，載荷地震荷重（慣性力分布）の設定にあたっては，着目位置ごとに異なった荷重を載荷するなどの工夫が必要であると思われる。

5. まとめ

RC主塔の耐震性の検討に関して非線形動的解析とプッシュオーバー解析を行い，以下の結論を得た。

(1) 非線形動的解析においては，RC主塔に発生する損傷進展の箇所の変化，広がり把握できた。また橋軸直角方向の解析において水平梁のせん断力が厳しい条件となることが明らかとなった。

(2) プッシュオーバー解析において，橋軸方向に関しては，主塔基部および第3水平梁位置で降伏し，水平耐力が低下し始める。橋軸直角方向に関しては，全ての水平梁に降伏が生じると耐力が低下し始める。なお，この時に主塔基部は降伏に至っていない。

(3) プッシュオーバー解析，橋軸直角方向の解析で塔柱に軸力変動がある場合，これを考慮した解析を行わないと最大水平耐力は約8%小さく評価された。

(4) プッシュオーバー解析で幾何学的非線形を無視した解析では，最大水平耐力は約20%大きい値が算出された。

(5) 非線形動的解析とプッシュオーバー解析との比較においては，両者の一致の程度は悪かった。これは，プッシュオーバー解析に用いる地震荷重分布を1次の固有モード形の相似形とし，高次のモードの影響を見込まなかったためと考えられる。今回対象としたような多層のラーメン構造のプッシュオーバー解析においては，地震荷重の設定方法の検討が必要である。

参考文献

- 1) 林昌弘，運上茂樹：長大吊橋のRC主塔の耐震性検討，土木学会第55回年次学術講演会講演集，平成12年9月
- 2) (財)国土開発技術センター：平成4年度高強度鉄筋分科会報告書，平成5年3月