

既設長大橋の非線形時刻歴応答解析

水 上 善 晴

日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室（〒194東京都町田市忠生1-4-1）

1. まえがき

平成7年の兵庫県南部地震による被災の経験から設計上考慮すべき地震動として内陸直下型の地震が追加され、また、設計法では橋梁構造の全体系として変形性能を高めて耐震性を向上させるため、地震時保有水平耐力法による設計の考え方が、鉄筋コンクリート橋脚以外にも導入されるとともに、地震時の挙動が複雑な構造系に対しては、震度法や地震時保有水平耐力法といった静的解析のみならず動的解析を行いその結果を設計に反映させることが望ましいとされている。

日本道路公団（以下「JH」という）が管理する橋梁のうち、新基準に示される耐震性能を満足しないものについては、原則として耐震補強を行うこととなる。JHでは、平成7年度から緊急的に橋脚の補強や落橋防止システムの設置などの耐震補強工事を実施するとともに、並行して、鉄筋コンクリート橋脚の様々な補強工法に関してその補強効果の確認実験と評価を行い、また、より効果的な落橋防止システムの構造についての検討を行い、随時耐震補強設計・工事に反映させている。

しかしながら、一般的な橋・高架橋への各構造部位に対する耐震補強については、多くの検討がなされている一方で、橋梁の全体構造系、特に長大橋梁の構造全体系に対する耐震性能の評価についての検討は十分には行われていないのが現状である。

このような状況を踏まえて、今後の既設コンクリート長大橋の耐震補強設計に関する基礎資料を得るために、大地震時の設計法が示された平成2年の道路橋示方書以前の規準によって設計された既設のコンクリート長大橋梁を対象として、非線形時刻歴応答解析を行い、その結果を用いて、その耐震性の評価を行った。さらに、解析手法、解析モデル、入力地震動などに着目し、構造全体系の耐震性を評価す

るうえでの解析手法の妥当性を検討した。また、非線形動的解析結果から評価した、予測される損傷箇所、既設コンクリート長大橋の耐震性能を評価する際の問題点、着目点の抽出を行ったものである。

ここでは、解析手法に関する事項は概説に留め、抽出された、既設コンクリート長大橋の耐震性能を評価する際の問題点、着目点を主として述べる。

2. 対象橋梁

JHが管理するコンクリート長大橋のうち、一般的と考えられる形式を抽出した。（表-1）

表-1 対象橋梁

抽出した橋梁形式	
A橋	R C固定アーチ橋
B橋	P C 5径間連続ラーメン箱桁橋
C橋	P C 5径間連続箱桁

以下に、各橋梁形式ごとに述べる。

3. R C固定アーチ橋

対象橋梁を図-1に示す。本橋梁は、橋長351.0m、アーチ支間235.0mのR C固定アーチ橋である。地盤は、軟質化した非常に複雑な土層構成を呈しており、起点側と終点側のアーチアバット部の地盤構成が大きく異なること等から、橋梁全体系の地震時の挙動が複雑となる特徴を持つ。

検討橋梁の規模は以下のとおりである。

橋長：351.0m

支間：53.0+245.0+53.0m（アーチ支間235.0m）

適用示方書：昭和55年

（1）非線形動的解析

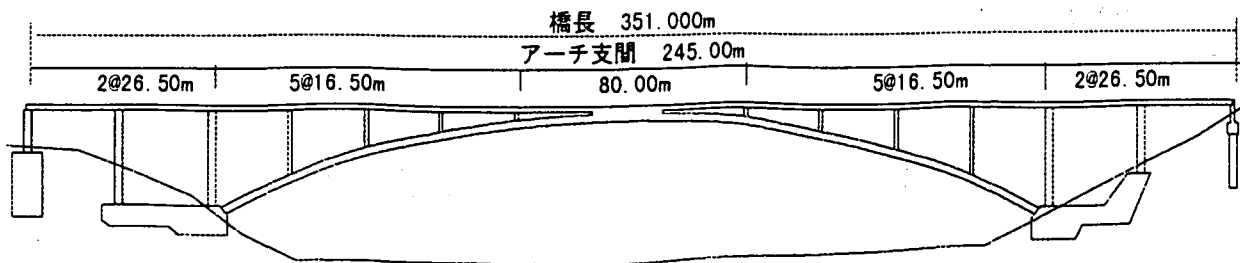


図-1 RC固定アーチ橋

a) 解析方法

直接積分法(Newmark- β 法)

b) 減衰定数

構造部材は歪みエネルギー比例減衰、地盤要素は複素剛性要素として地下離散減衰効果を考慮

c) 入力地震動

入力地震動は、東神戸大橋地中観測波(GL-33m)を基盤波に換算し、これを本橋の基盤に入射して、FEM二次元応答解析により求めた、地盤-基礎系の相互作用を考慮した有効入力動を用いた。

d) 解析モデル

橋軸、橋軸直角方向共にバネ質点系平面モデル。

e) 非線形部材

補剛桁及び桁部材は線形部材とし、柱、鉛直材及びアーチリング部材は、ひび割れ点、降伏点、終局点を有するトリリニアモデルとして非線形特性を考慮している。この際、コンクリートの応力-歪み曲線は、道路橋示方書に準じて横拘束筋の効果を見込む。

f) 基礎-地盤の取り扱い

柱下端はバネ支持とし、バネ定数及び減衰定数は基礎-地盤系の有限要素解析結果の動的復元力特性より設定した。

(2) 非線形動的解析結果

a) 大規模地震時挙動の傾向

アーチリブの剛度により変化するが、補剛桁と剛結された鉛直部材には、軸力引張の大きな断面力が発生し、耐力を大きく超える事が推測されるが、鉛直材間隔が比較的小さいため、緊急車両等の走行は可能であると思われる。

b) 推測される損傷箇所

補剛桁と剛結された鉛直材の断面力は、部材の耐力を大きく超えるため、損傷する可能性が高い。また、アーチリブの直角方向に関しては、せん断破壊先行型の破壊形態を示しており、じん性に乏しく粘りが不足している。

(3) 耐震性能の評価及び着目点・問題点の抽出

a) 橋梁全体系の耐震性能

検討ケースでは、アーチ橋を構成する主要な部材であるアーチリブ及び補剛桁の断面力は部材の耐力以内であること、端支点における桁の最大応答変位量は15cm程度と比較的小さく、アーチ橋全体系の落橋に至る損傷はない。また、アーチアバットの安定は、地盤のせん断破壊に対する照査を行った結果から問題とはならない。

b) 地震時挙動を把握する際の着目点・問題点

解析モデルを作成する場合には、補剛桁と鉛直材の結合条件に注意する必要がある。また、補剛桁とアーチリブの剛性比、死荷重時の初期断面力、軸力の変動を考慮して解析する必要がある。特にアーチリングは、軸力変動の影響を考慮しなければ実際の挙動及び損傷を評価することが出来ない。非線形性では、アーチリブと一部の鉛直材に剛結している補剛桁の非線形性を考慮するとともに、幾何学的非線形性を考慮する必要がある。

4. PC5径間連続ラーメン箱桁橋

対象橋梁を図-2に示す。本橋は、49.0m~51.0mの高橋脚を有する橋長593mのPC5径間連続ラーメン橋である。基礎はニューマチックケーソン及び大口径深礎杭の大規模で剛性の大きい基礎杭が用いられており、地震時の挙動はロッキング振動の卓越したものとなる。橋脚は、D51の太径鉄筋が6段配置され非常に曲げ耐力の大きな構造であり、せん断破壊先行型の破壊形態となる可能性がある。

検討橋梁の規模は以下のとおりである。

橋長：593.0m

支間：104.0+126.0+148.0+126.0+89.0m

適用示方書：昭和55年

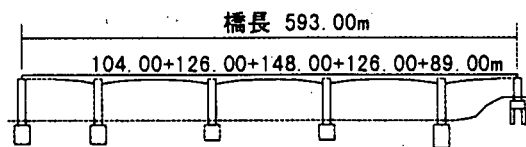


図-2 PC5径間連続ラーメン箱桁橋

(1) 非線形動的解析

a) 解析方法

直接積分法(Newmark- β 法)

b) 減衰定数

構造部材は歪みエネルギー比例減衰を考慮した。

c) 入力地震動

入力地震動はタイプⅠ及びタイプⅡを用いて解析を行っている。

d) 解析モデル

橋軸、橋軸直角方向共にバネ質点系平面モデルとした。ただし、直角方向モデルは端支点橋脚の剛性及び支承条件の相違が、応答値に大きく影響を与えるため、隣接橋脚までを同一モデルとした。

e) 非線形部材

主桁部材は線形部材としている。柱部材は、ひび割れ点、降伏点、終局点を有するトリリニアモデルとして非線形特性を考慮している。この際、コンクリートの応力-歪み曲線は、道路橋示方書に準じて横拘束筋の効果を見込む。また、支承条件は、可動支承である端支点の移動可能性を考慮した非線形性でモデル化を行っている。

f) 基礎-地盤の取り扱い

柱下端を固定とした。

(2) 非線形動的解析結果

a) 大規模地震時挙動の傾向

地震時保有水平耐力法の場合、可動支承(BP支承)と橋脚天端の相対変位量が支承の移動可動量を超えることにより、支承の損傷が発生する。また、ラーメン橋では、死荷重状態において柱の上下端に曲げモーメントが発生しているため、死荷重状態に大きな曲げモーメントが発生している場合には、地震保有水平耐力法では厳しくなる傾向にある。

(3) 耐震性能の評価及び着目点・問題点の抽出

a) 橋梁全体系の耐震性能

検討ケースでは、橋脚の応答断面力が僅かに保有耐力を下回る箇所が発生したが、橋梁全体系における耐力の極端な不足はなく、落橋に至るような大規

模な損傷は生じないため、全体系の耐震性能は確保されている。

b) 地震時挙動を把握する際の着目点・問題点

解析モデルを作成する場合には、支承部のモデル化に注意する必要がある。また、ラーメン橋は死荷重状態に橋脚に曲げモーメントが発生する構造形式であるため、この死荷重時の断面力の取り扱いに注意する必要がある。主桁の照査に際しては、主桁断面の弾性体、弾塑性体のモデル化、プレストレスによる影響、剛結による主桁の非線形性を考慮して解析する必要がある。

5. PC5径間連続箱桁橋

対象橋梁を図-3に示す。本橋梁は、地震時水平力をA2橋台1基で支持する、橋長487.5mのPC5径間連続箱桁橋である。また、橋脚構造は中空2室箱断面のSRC造であり、橋脚高76.0mの高橋脚である。検討橋梁の規模は以下のとおりである。

橋長：487.5m

支間：84.0+123.0+123.0+95.0+62.5m

適用示方書：昭和47年

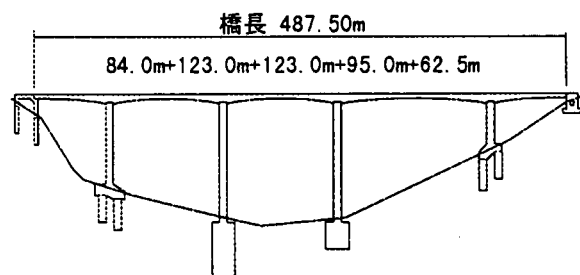


図-3 PC5径間連続箱桁橋

(1) 非線形動的解析

a) 解析方法

直接積分法(Newmark- β 法)

b) 減衰定数

構造部材は歪みエネルギー比例減衰を考慮

c) 入力地震動

入力地震動はタイプⅠ及びタイプⅡを用いて解析を行っている。

d) 解析モデル

橋軸、橋軸直角方向共にバネ質点系平面モデルとした。

e) 非線形部材

主桁部材は線形部材としている。柱部材は、ひび割れ点、降伏点、終局点を有するトリリニアモデル

として非線形特性を考慮している。この際、コンクリートの応力-歪み曲線は、道路橋示方書に準じて横拘束筋の効果を見込む。また、支承条件は、移動可能量及び荷重作用方向を考慮した非線形形でモデル化している。

f) 基礎-地盤の取り扱い

柱下端を固定とした。

(2) 非線形動的解析結果

a) 大規模地震時挙動の傾向

地震時保有水平耐力法の場合、可動支承 (BP 支承) と橋脚天端の相対変位量が支承の移動可動量を超えることにより、支承の損傷が発生する。また、橋脚高さ、RC 造、SRC 造等の断面構成によるが、可動橋脚として設計された橋脚が地震時保有水平耐力法時に支承条件がピンとなったとしても耐力的には問題はないと考えられる。なお、桁の変位量を制御することにより各部材の耐力以下に抑えることが可能である。

(3) 耐震性能の評価及び着目点・問題点の抽出

a) 橋梁全体系の耐震性能

検討ケースでは、橋脚の応答断面力は部材の耐力以内であった。支承部は損傷を受けるが、橋脚が耐力を有しており、両端が橋台であるために桁の変位量が制御される等から落橋には至らない。このことから、橋梁全体系における耐震性能は確保されている。

b) 地震時挙動を把握する際の着目点・問題点

解析モデルを作成する場合には、支承部のモデル化に注意する必要がある。また、橋脚の地震時の挙動は支承条件の考え方によって、可動橋脚の挙動から固定橋脚の挙動に移行するため、橋脚の耐力判定等に注意する必要がある。主桁の照査に際しては、主桁断面の弾性体、弾塑性体のモデル化、プレストレスによる影響を考慮して解析する必要がある。

6. まとめ

(1) 橋梁全体系の耐震性の評価

一部の部材で耐力が不足する箇所が発生しているが、橋梁全体系においては極端な耐力不足は発生しておらず、落橋に至るような大規模な損傷は生じない。また、鋼製支承の損傷が生じることにより、桁

が橋台バラペットに衝突し橋台の損傷が発生するが橋脚等の主要部材は耐力を有していること、桁の変位量が制御されること等から、落橋に至るような大規模な損傷は発生せず、橋梁全体系における耐震性は確保されている。

(2) 地震時挙動を把握する際の着目点・問題点

これまでに抽出された、既設コンクリート長大橋における大規模地震時の挙動を把握するうえでの着目点及び問題点を整理すると表-2に示すように4つのグループに大別できる。

表-2 着目点及び問題点	
グループ	着目点及び問題点
I	軸力変動の影響
	死荷重時の断面力の影響
	プレストレス力の影響
II	支承部・伸縮装置部のモデル化
III	地盤-基礎系のモデル化
IV	橋脚構造・幾何学的非線形性

これらの着目点及び問題点のうち、グループ I に属する項目は、道路橋示方書に示されているとおり最近共通の認識が得られているものである。グループ IV に属する項目は、各橋梁固有のものであり、一般論に関わるものではない。グループ II に属する項目は、全体構造系を評価するうえで、各々の支承の特性を十分に考慮したモデル化及び解析を行う必要がある。グループ III に属する項目は、基本的には地盤材料の非線形性に関するもので、中～大歪み領域における地盤材料の性状が研究途上の段階である。この地盤材料の性状を把握することにより、より適切な大規模地震時の挙動が把握できると考えられ、適切な評価手法の確率が望まれるところである。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説
V 耐震設計編，1996, 12
- 2) 日本道路公団：長大橋の耐震性能評価に関する検討報告書，1997, 3