

道路橋の耐震設計における上下地震動の影響について

Effect of Vertical Ground Motion in the Seismic Design of Highway Bridges

北海学園大学大学院工学研究科 ○学生員 村上健志 (Takeshi Murakami)
 北海学園大学工学部土木工学科 フェロー 当麻庄司 (Shouji Toma)

1. 概要

道路橋の耐震設計において動的解析を行なう際、地震波は橋軸方向と橋軸直角方向にそれぞれ別々に入力する。道路橋示方書V. 耐震設計編¹⁾ (以下「道示」と呼ぶ) では、上下方向の地震動については支承の設計を除いては原則として考慮しなくてもよいとなっている。また動的解析の時、使用する標準加速度応答スペクトルとしては、水平方向の地震波に対するものしか与えられていない。橋梁の耐震設計計算例が多く掲載されている「道路橋耐震設計に関する資料」²⁾ においても、上下方向の地震動は考慮していない。したがって、一般的には上下方向の地震波に対する照査は行なわれていないと言える。

しかし、阪神大震災の際、上下方向に大きな振動を感じたとする証言が多い^{3) 4)}。上下振動の影響に関する文献がいくつかあるが、上下動を考慮した設計法の確立が必要不可欠としている文献⁵⁾ もあれば、上下動の影響は軽微であるという文献⁶⁾ もあり、意見が分かれている。そこで上下動の影響に関する研究はまだ十分でないこともあり、本研究では3径間連続PCラーメン橋を例にとり、上下方向の地震波を考慮して動的解析を行なった場合、つまり水平方向と上下方向の地震波を同時に入力すると、どのような影響があるかを明らかにするものである。

2. 設計基準における上下地震動の取り扱い

道示では耐震設計上考慮すべき慣性力は次のように定められている。

震度法および地震時保有水平耐力法による耐震設計では、原則として直交する水平2方向の慣性力を考慮する。水平2方向の慣性力は別々に作用させるものとし、一般に橋軸方向および橋軸直角方向に作用させるものとする。上下方向の地震動が上下部構造の耐震性に与える影響は一般に小さいのでこれを考えなくてもよいが、常時死荷重により大きな偏心モーメントを受ける部材などで、上下方向の影響を検討することが望ましい場合には、道示(V耐震設計編) 6章に規定する動的解析により照査するのがよい。また、上下方向の慣性力は、これが大きな影響を与える支承部の設計においては考慮することとなっている。

CALTRANS (カリフォルニア州交通局) では、普通の橋で標準橋に対しては、上下方向と水平方向荷重を組み合わせた解析は不用であるとなっている。非標準橋や重要な橋に対しては、上下方向の解析および設計はケースバイケースで行なう。なお、重要な橋とは、通れなくなると重大な経済的損失が生じる橋である。また非標準橋と

は、単純でない骨組みであったり、土質が軟弱土であったりする橋のことである。

3. 3径間PCラーメン橋の解析

3. 1. 解析対象構造物

解析の対象とした構造物は、「道路橋耐震設計に関する資料」²⁾ の3径間PCラーメン橋の耐震設計例で使用している構造物と同じものを使用した(図-1)。構造物の概要を以下に示す。また、解析モデルを図-2に示す。

・上部構造

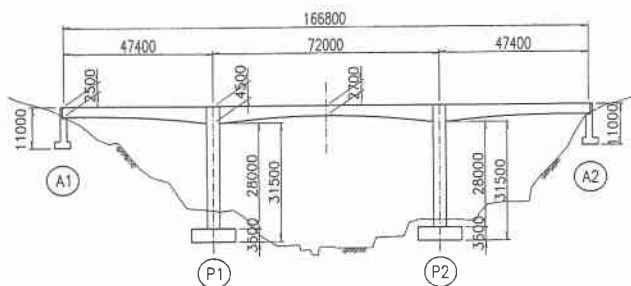
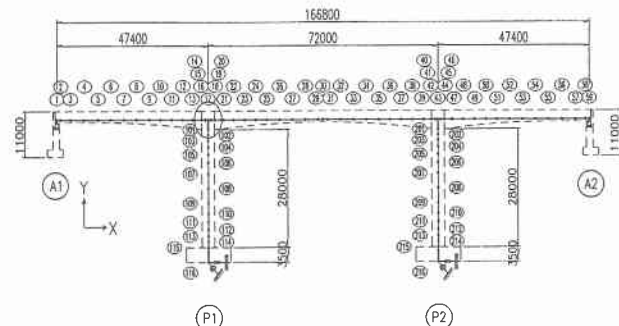
形式: PC 3径間連続ラーメン箱げた橋
 支間割: 47.400m+72.000m+47.400m
 幅員: 全幅員 10.400m
 活荷重: B活荷重
 支承の種類: 可動型ゴム支承(橋台上)

・下部構造

橋脚: 柱式橋脚
 橋台: 逆T式橋台
 基礎: 直接基礎
 地盤種別: I 種地盤

3. 2. 解析条件

解析モデルは上部構造は線形はり要素、橋脚は非線形

図-1 解析構造物²⁾図-2 解析モデル²⁾

はり要素でモデル化し、橋脚上下端に塑性ヒンジを表す非線形回転バネを考慮した。橋脚の非線形履歴モデルは剛性劣化型トリリニアモデル（武田モデル）を用いた。減衰は上部構造 3%，下部構造 2%，基礎構造 10%として固有値解析を行い、Rayleigh 減衰を使用した。数値積分手法は Newmark β 法（ $\beta=0.25$ ）とし、数値積分間隔は $\Delta t=0.002$ 秒とした。なお、部材の断面性能を含めたこれらの解析条件はすべて文献 2 と同じである。同資料には、解析モデルは橋軸方向のモデルと橋軸直角方向のモデルがあるが、橋軸直角方向に上下動を考慮するためには、3次元でモデル化して解析する必要がある、非常に複雑となる。したがって、ここでは橋軸方向の解析のみとした。

入力地震波としては、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測地震波を使用した。地震波の時間間隔は 0.02 秒である。解析に当っては、この地震波を表 1 に示す 5 つのケースで入力した。ケース 1、2 は水平方向のみの入力、ケース 3 は鉛直方向のみの入力、ケース 4、5 は水平方向と鉛直方向を入力した。また、水平方向の地震波は橋脚基部である節点 116 と 216 の 2 点、鉛直方向の地震波は橋台基部の節点 1、59、および橋脚基部の節点 116、216 の 4 点から入力している（図 2 参照）。

解析ソフトは立体骨組構造物動的解析プログラムの D Y N A 2 E（（株）CRC 総合研究所）を使用した。

3. 3. 振動モード

この構造物の 1 次から 4 次までの振動モード図を図 3 に示す。1 次モードと 3 次モードは橋軸方向、2 次モードと 4 次モードは上下方向の振動に対して寄与してい

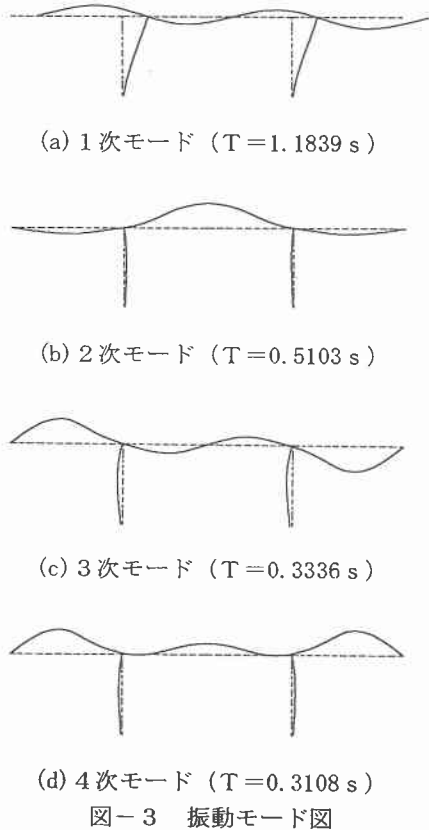


表 1 地震波入力ケース

ケース	水平方向	上下方向
1	N-S 成分	
2	E-W 成分	
3		U-D 成分
4	N-S 成分	U-D 成分
5	E-W 成分	U-D 成分

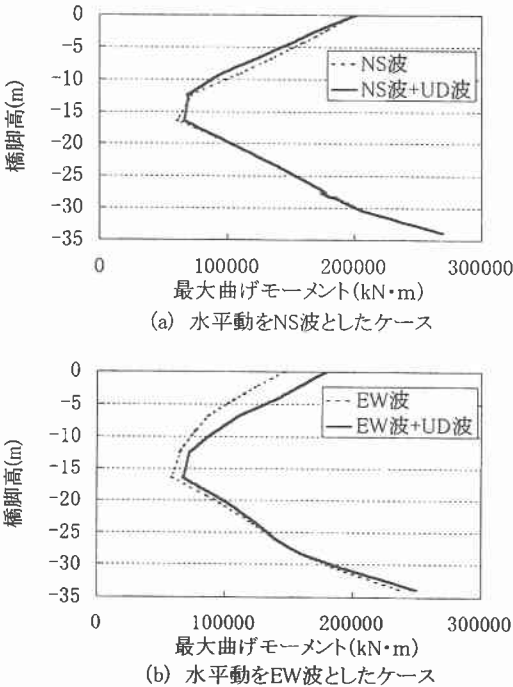
る。また、鉛直方向に対しては 2 次モードよりも 4 次モードの方が影響が大きい。Rayleigh 減衰を決めるに当っては 1 次モードと 3 次モードを用いた。

3. 4. 上下動の影響に対する解析結果

3. 4. 1. 橋脚の断面力への影響

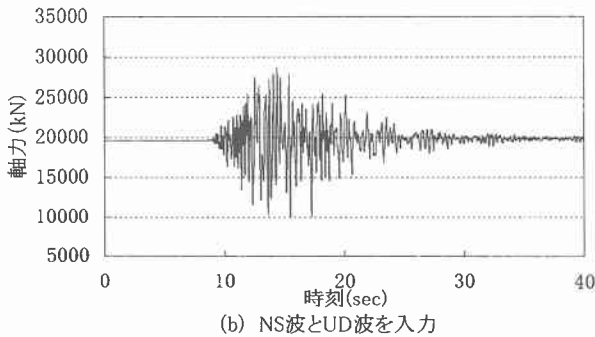
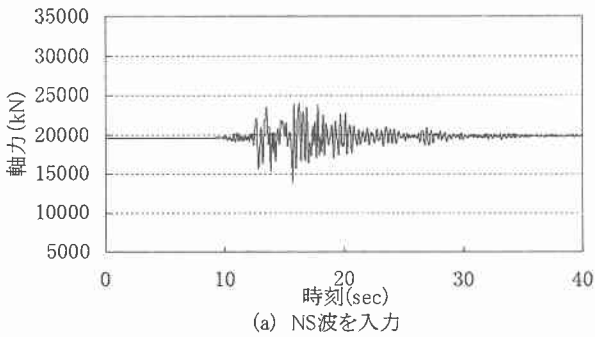
図 4 に P 1 橋脚の最大曲げモーメントの違いを示す。最大曲げモーメントの比較では、水平成分に NS 成分の地震波を使用した場合（図 4 (a)）、上下方向の地震波の影響は非常に小さい。また、水平成分に EW 成分の地震波を使用した場合（図 4 (b)）、橋脚最上部では上下方向の地震波を考慮すると 20% くらい大きな曲げモーメントが生じた。これは、地震波の最大加速度が NS 成分は 817.8gal、EW 成分は 617.1gal と EW 成分の加速度が NS 成分の加速度より小さいため、その分上下方向の地震波（最大加速度 332.2gal）の影響が効いてきたためだと思われる。したがって、NS 成分と EW 成分の最大曲げモーメント値の比較では当然 NS 成分の時の方が大きい。橋脚下部では上下方向の地震波を考慮しても、最大曲げモーメントはほとんど変わらなかった。

図 5 に地震波を入力した時の要素 101（P 1 橋脚上部）の軸力の時刻歴応答を示す。NS 波のみを入力した時は、橋脚最上部（橋脚高さ 2.394m の位置）で 13609kN ～ 23777kN（圧縮）の間で変動しているのに対して、NS

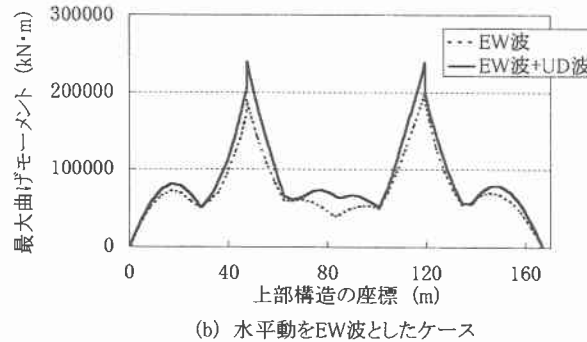
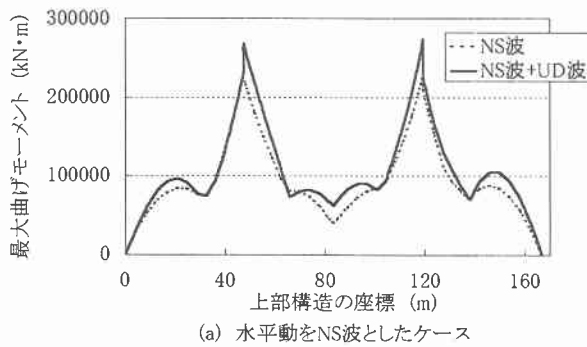


波とUD波を入力した時は、9840～28285kN（圧縮）の間で変動している。また、図では示していないが、橋脚下部（橋脚高さ－30.394m の位置）ではNS波のみを入力した時は29152～41059kN（圧縮）の間で変動しているのに対して、NS波とUD波を入力した時は、15615～50454kN（圧縮）の間で変動していて、橋脚最上部より鉛直動の影響が大きくなっている。

以上のように橋脚の曲げモーメントに比べて、軸力は上下動の地震動の影響が大きかった。軸力の変動が大きいと、部材の曲げモーメントー曲率や曲げモーメントー



図－5 橋脚最上部の時刻歴応答軸力図



図－6 上部構造の最大曲げモーメント図

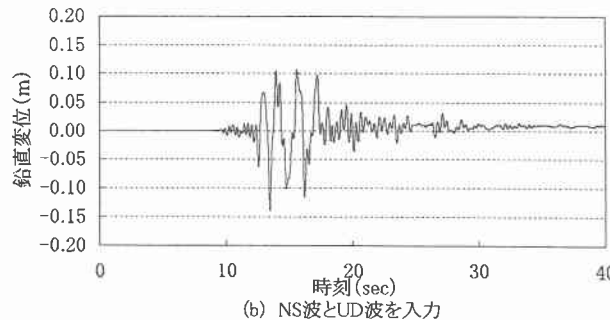
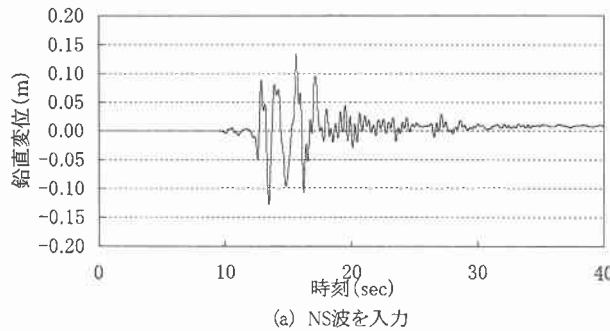
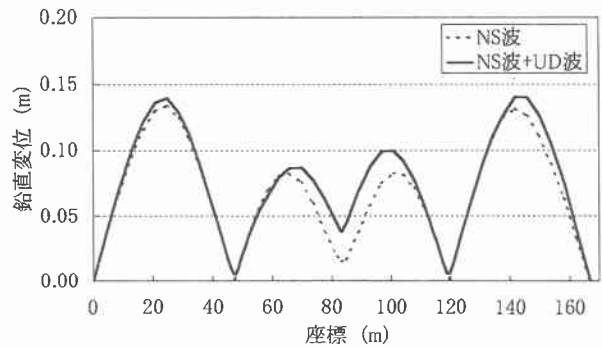
回転角の関係にも大きな影響がでてくるかもしれない。また、この軸力の変化により橋脚の破壊形態が変化する可能性もある。これらについてはさらに研究する必要がある。

3. 4. 2. 上部構造の断面力への影響

上部構造に対する上下方向の地震動の影響をみるために、図－6に上部構造の最大曲げモーメントの比較の図を示す。この図をみると、橋脚頂部（節点17と43付近）において上下方向の地震波を入力した場合、最大曲げモーメントが10%から20%大きくなった。その他の部分では違いは小さかった。橋脚のケースと同じく水平方向にEW成分の地震波を入力した場合の方が、上下方向の地震波の影響が若干大きな割合で影響がでていたが、絶対値は小さい。

3. 4. 3. 変位への影響

図－7に最大鉛直変位の比較の図を示す。また、解析の結果、鉛直方向の変位は側径間の中央部である節点8と52付近で大きな応答値がでていたので、節点8の時刻



図－8 鉛直変位の時刻歴応答変位図（節点8）

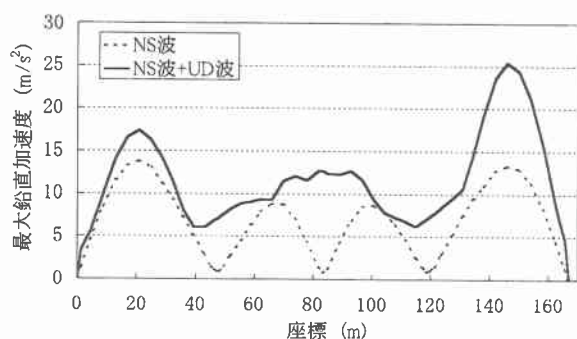
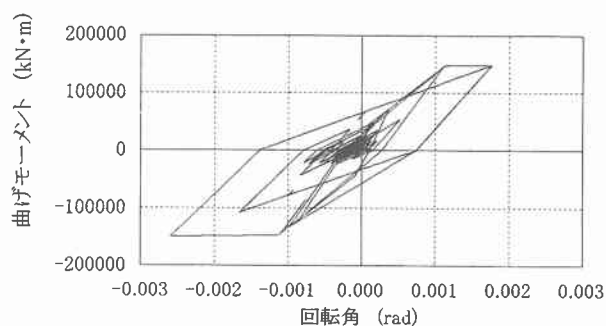
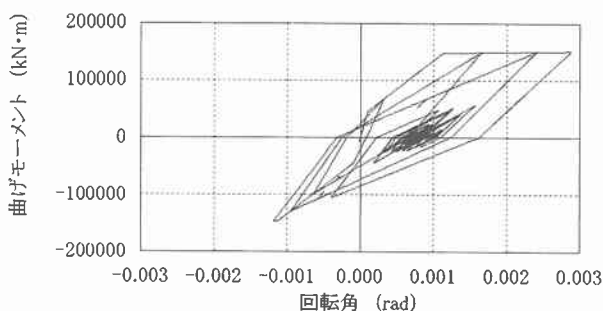


図-9 上部構造の最大鉛直加速度



(a) NS波を入力



(b) NS波とUD波を入力

図-10 M-θ 応答履歴曲線図

歴応答変位の比較を図-8に示す。節点8と52付近で大きな応答値が生じたのは、固有振動モードの1次モードが卓越しているため、側径間の中央部で大きな値が生じたものである(図-3参照)。図-8からNS波を入力したケースと、NS波とUD波を入力したケースを比較すると、少し波形図の形に違いはあるが、最大変位に大きな違いはなかった。また残留変位がわずかに生じている。

結論として上部構造の最大応答変位は、上下方向の地震動を考慮してもそれほど変化しなかった。

3. 4. 4. 加速度への影響

図-9に上部構造の鉛直方向最大加速度の比較図を示す。上下地震動を考慮すると鉛直方向の加速度は、かなり大きくなった。鉛直方向の最大応答加速度は、NS波のみを入力した時は 13.85 m/s^2 、NS波とUD波を入力した時は最大加速度が 25.41 m/s^2 となり、約80%の増加となっている。これらの鉛直加速度は重力加速度 9.8 m/s^2 を大きく上回っているので車が走行している時、車が浮く可能性がでてくる。しかし、大きな加速度が生じる時間は短く、これが大きな質量をもつ車が浮き上がるという現象につながるかどうかはさらに検討が必要である。

3. 4. 5. 塑性ヒンジの応答履歴性状への影響

図-10にP1橋脚上部にある塑性ヒンジのM-θ応答履歴曲線図を示す。水平方向にNS波を入力した場合に比べ上下地震動を考慮すると塑性ヒンジの回転角は正の方向に大きく移動した。一方、橋脚下部にも塑性ヒンジが生じているが、その時の回転角は反対に負の方向に移動している。

4. あとがき

3径間連続ラーメン橋について上下方向の地震動の影響を時刻歴応答解析により調査した。その結果、上下方向の地震波を考慮した場合、橋脚のせん断力、曲げモーメントなどはそれほど変わらなかったが、上部構造の鉛直方向の応答加速度や曲げモーメント、橋脚の軸力などが大きくなった。このように、水平方向の地震波のみを入力して解析することが、場合によっては十分ではないことがわかった。

ここでは神戸海洋気象台の地震波を用いたが、地震波の記録は激震地では大きなばらつきがある。特に上下振動ではその傾向が強く、記録された波が実際に構造物を破壊した地震波であるとの確認はない。本解析で用いた

上下振動の地震波よりはるかに大きな入力があった可能性も考えられる。

また、動的解析においては減衰のとり方が問題となるが、ここではRayleigh減衰を用いた。一方、ひずみエネルギー比例減衰を用いた解析も行なったが、ほぼ同じような結果が得られた。

今回の解析は一例にすぎないが、今後、上下方向の地震動を考慮した構造物の応答について、さらにいろいろな地震波を使用したり、構造物を解析して検討する必要があるだろう。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、本田明成氏((株)CRC総合研究所)から多くの助言を頂いたことに感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成8年12月。
- 2) 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成10年1月。
- 3) 園田恵一郎，小林治俊，永野圭：兵庫県南部地震一初期上下動の証言について，「大阪市立大学工学部紀要・震災特別号」別冊，1997年1月。
- 4) 当麻庄司，河村廣：阪神大震災の住居被害に関する芦屋市におけるアンケート調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，1999年9月。
- 5) 例えば，大野友則，喜多龍一郎，藤掛一典：軸方向衝撃力を受けるRC円柱試験体の圧縮破壊メカニズムに関する実験的研究，土木学会論文集 No. 584/I-42，1998年1月。
- 6) 例えば，鈴木猛康：1995年兵庫県南部地震による地下鉄駅部の被害シナリオ，土木学会第50回年次学術講演会，平成7年9月。