

大阪平野を対象とした海溝型地震時の表面波による 橋梁構造物応答への影響評価

伊佐 政晃¹・鍛田 泰子²

¹正会員 工修 阪神高速道路株式会社 建設・更新事業本部（〒590-0075 堺市堺区南花田口町 2-3-20）

²正会員 博(工) 神戸大学准教授 大学院工学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1）

1. はじめに

盆地構造を持つサイトでは表面波が数秒から 10 秒程度に卓越するとされており、紀伊半島南東沖において 2004 年に発生した地震では、周期 6~7 秒程度の長周期の表面波が卓越し、大阪平野では長い継続時間を持つ長周期の地震動が観測された¹⁾。将来的に発生が危惧されている南海トラフ巨大地震時にも大阪平野内で長周期の表面波が励起することが予想され、表面波が構造物に何らかの影響を与えることが考えられる。表面波による被害事例として、例えば、2007 年新潟県中越沖地震の際には、震源から 225km 離れた関東のある地点では、卓越周期 7 秒前後の長周期の表面波が大きな後揺れとして到来しており、超高層ビルが共振を起こして大きく揺れ、停止したエレベータ内に人が閉じ込められるなどの影響が出た²⁾。このように、長周期の表面波は盆地内に留まり、揺れが平野外に逃げずに長時間継続するという性質を持つ。南海トラフ巨大地震による構造物応答を考える上で、大阪平野で励起する表面波の特性についての理解を深めることは重要である。

現在では、構造物の耐震設計や被害メカニズムの解明を目的に動的解析が盛んに行われているが、橋梁の地震応答解析を行う際には、橋長が短ければ、地震波の伝播速度を無視し、すべての橋脚に同一の地震動を入力することが多い。しかし、一方向に長く敷設された橋梁の軸方向に沿って地震波が伝播する場合であれば、表面波は実体波に比べて伝播速度が遅いために、伝播する距離が大きくなるにつれて表面波の位相のずれが生じる。そのため、各橋脚に同一の地震動が作用するとは限らない。支間長の長い橋梁で実体波の伝播による位相のずれとして、伝播のずれ分だけ入力波の開始時刻をずらして位相の影響を考慮した研究事例はあるが、表面波の伝播速度の違いを考慮した地震波を各橋脚に入力し、表面波が橋梁の動的応答に及ぼす影響について検討している事例は見当たらないのが現状である。

そこで、本研究では、大阪平野で観測された地震波を

実体波と表面波に波形分離を行い、大阪平野で励起する表面波の特性を分析する。その後、それぞれの伝播速度の差異に応じて作成した南海トラフ巨大地震と同規模の地震波を各橋脚に入力して橋梁に及ぼす表面波の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 大阪平野で励起する表面波の性質

(1) 周期特性

本研究で対象とする大阪平野は、北側を北摂山地、東側を生駒山地と金剛山地、南側を和泉山脈、西側を大阪湾に囲まれており、北東 - 南西方向に約 55km、北西 - 南西方向に約 28km のほぼ楕円形をなす低平地である。大阪平野は沖積低地が中心であり、周囲の山地は大阪平野の基盤をなす花崗岩類などから構成されている。さらに山地との間には大阪層群から成る、標高 200m 程度の丘陵地が発達し、段丘は上部洪積層で構成されている。また、大阪平野の地下には最大 3,000m にも及ぶ未固結堆積層が分布している³⁾。(独)防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS⁴⁾による大阪府全域の微地形区分と K-NET と KiK-net の観測点位置を図-1 に示す。

一般に、分散曲線の群速度が極小（エアリー相）となる波長で表面波が卓越するとされており、各観測点における Love 波と Rayleigh 波の基本モードの卓越周期をエアリー相に対応する周期として求める。群速度の算出は Haskell のマトリクス法による。また、各層の S 波速度と P 波速度、密度、層厚等の観測点毎の地盤構造について、K-NET では深さ 20m 以深の地質データが存在しない。20m 以深の地質データの補完方法として、(独)防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS の深部地盤データ⁵⁾を用いて、 $V_s=1,400\text{m/s}$ に至る層までを補完した。KiK-net に関しても $V_s=1,400\text{m/s}$ に達するまでに地質データが途切れている観測点があるため、これらには K-NET の観測点と同様の補完を施した。地質データの補完を施した観測点の最下層(基盤)は、 $V_s=3000\text{m/s}$ 、

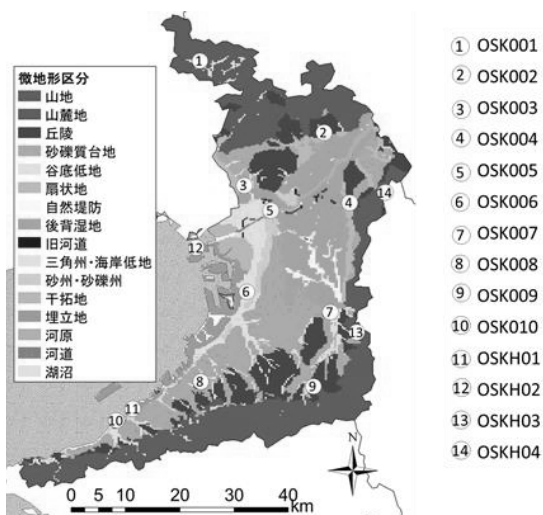


図-1 微地形区分と観測点位置

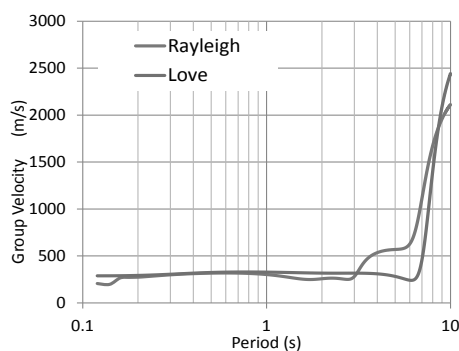


図-2 OSK006 の分散曲線

$V_p=4,500\text{m/s}$, $\rho=2.2\text{kN/m}^3$ とした。表面波の卓越周期の一例として、観測点 OSK006 の分散曲線を図-2 に示す。OSK006 では、Love 波は周期 6~7 秒に、Rayleigh 波は周期 3 秒付近に表面波の卓越周期を有することが分かる。他の観測点のエアリー相を確認したところ、OSK001, OSK009, OSKH03, OSKH04 などの山地や丘陵にある観測点では Love 波、Raleigh 波ともに明瞭なエアリー相が見られない。一方で、大阪平野内にある OSK003~OSK008 では明瞭なエアリー相が存在し、Love 波の卓越周期は 4~7 秒付近、Raleigh 波は 2~4 秒付近である。これは、宮腰ら⁶⁾が関西地震観測研究協議会の強震観測点を用いて行った結果とおおよそ調和的である。

(2) 地震波に含まれる実体波と表面波の比率の検証

2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分に紀伊半島南東 110km 沖の東南海・南海地震の想定震源域で発生した M7.4 の地震（以下、紀伊半島南東沖地震）と 2013 年 4 月 13 日 5 時 33 分に淡路島付近で発生した M6.3 の内陸活断層型地震（以下、淡路島地震）の 2 地震において得られた強震記録に対して波形分離を行い、地震波に含まれる実体波と表面波の比率について検証する。紀伊半島南東沖地震はプレート境界周辺のプレート内で発生した地震であるため、厳密には海溝型地震ではないが、震源域は近い

めに海溝型地震と類似した伝播機構を持つとして採用した。波形分離については、強震記録の EW 成分に対して非定常スペクトル解析手法⁷⁾を用いた。対象の観測点は大阪府下に設置されている K-NET の OSK001~OSK010, KiK-net の OSKH01~OSKH04 であるが、KiK-net の OSKH03 では両地震で強震記録が得られていないため除外した。

深度 10m 程度以深が岩盤であり、強固な地盤上にある観測点（OSK001, OSK009, OSKH04）では、表面波を判別することが困難であった。図-3 に紀伊半島南東沖地震の際の OSK001 における EW 成分の非定常スペクトル図と、あわせて OSK001 の Love 波の分散曲線を示す。分散曲線のエアリー相が見られる周期より、表面波の卓越周期が 0.2 秒以下であることがわかるが、この周期付近には実体波も含まれており、実体波と表面波を構成する周期帯の違いを利用して波形分離する手法では、このような場合は実体波と表面波の明確な波形分離ができない。また、このような岩盤サイトであっても、平野で励起した表面波が伝播することで周期 7 秒付近に非定常スペクトルのコンターが見られる例も報告されているが⁶⁾、OSK001 の非定常スペクトル図からはそのような特徴も見られない。OSK009, OSKH04 においても同様の傾向があるため、岩盤サイトに位置するこれらの観測点では波形分離を行わなかった。

一方、大阪平野内に位置する OSK002~OSK008, OSK0010 と沿岸部に位置する OSKH01, OSKH02 で観測された強震記録について波形分離を行った。遠方の震源である紀伊半島南東沖地震と内陸活断層型の淡路島地震を用いた実体波と表面波の最大振幅の比率の検証結果を図-4 に示す。図の縦軸は表面波の最大変位を実体波の最大変位で除した値、横軸は表面波の最大加速度を実体波の最大加速度で除した値である。また、観測点直下の地盤と変位比率の関係を知るために OSK002~OSK008, OSK010 の地盤を沖積層、洪積層として分類した。OSKH01 は臨海地、OSKH02 は埋立地である。最大加速度の比較では、両地震共にいずれの観測点においても実体波が支配的となるため 1 以下となる。一方、最大変位の比較では、紀伊半島南東沖地震では沖積層上にある観測点で表面波の最大変位が実体波の 2.6 倍に達している。淡路島地震では埋立地が最も表面波の変位比率が大きく、その値は 2.4 倍程度であり、次いで沖積層、洪積層の順に変位比率が大きい。淡路島地震と比較して、紀伊半島南東沖地震の方が、最大加速度、最大変位共に実体波に対する表面波の比率が大きくなっている。図-5 に紀伊半島南東沖地震の際に OSK006, OSK007 で観測された強震記録の波形分離例を示す。OSK006 は表面波の最大変位が実体波の最大変位の 2.6 倍となり、最も変位比率が大きかった。OSK007 は、表面波の最大変位が実体波の

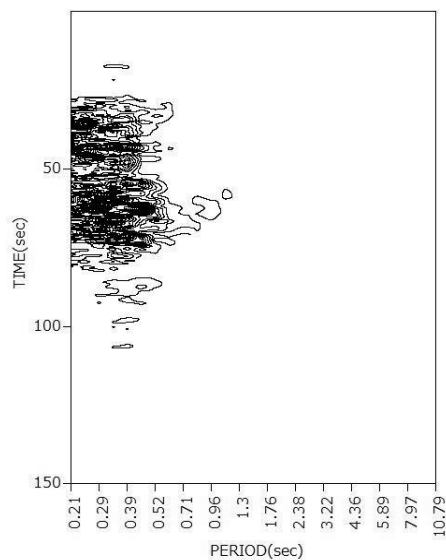


図-3 OSK001 における非定常スペクトル図
(EW 成分) と Love 波分散曲線

それよりも小さいが、主要動以降は表面波が支配的となることが分かる。

以上から、地震動の震源特性、震源距離、観測点直下の地盤構造など様々な要因が関係するため、実体波に対する表面波の変位比率は明確に定量評価できないが、およそ表面波の変位は実体波と同程度、もしくは上回る可能性が高いといえる。これは、他の地震における表面波の検討からも指摘されている^{7),8)}。また、2 地震の比較からその変位比率はおおよそ 1.0~2.5 倍程度で、海溝型地震では内陸型地震よりも実体波に対する表面波の比率は大きくなることが示された。今後、発生が危惧される海溝型の南海トラフ巨大地震時には大阪平野で表面波を多分に含む地震動が励起する可能性が示唆される。

3. 南海トラフ想定地震動規模の地震動

後述で検討する橋梁の地震応答において、多点入力によって地震応答解析を行うために橋脚地点ごとに表面波の伝播を考慮した地震動を準備する必要があるが、本研究で用いる解析ソフト DYNAS2E⁹⁾は複数の節点に異なる加速度を入力する場合、基準加速度を設定し、それに対

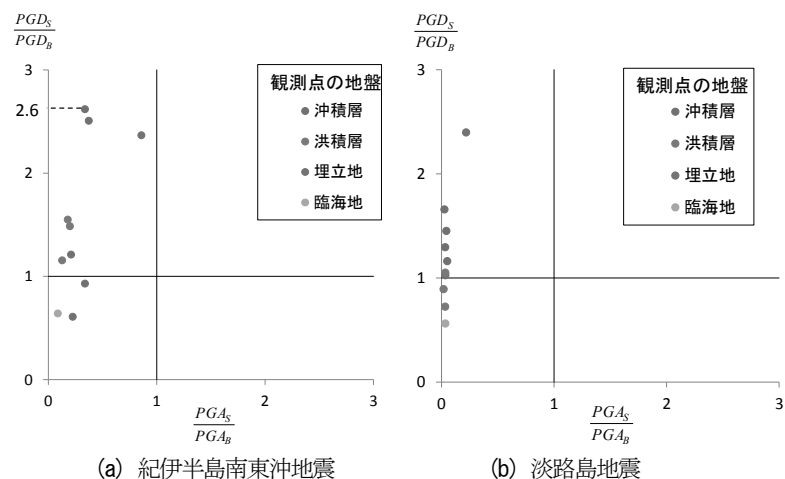


図-4 実体波と表面波の加速度、変位最大振幅比率

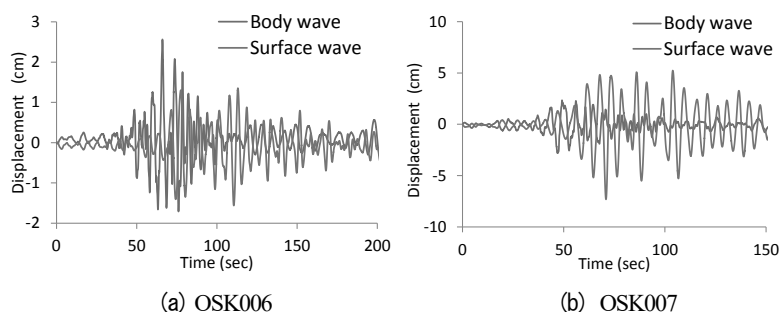


図-5 紀伊半島南東沖地震における実体波と表面波の変位時刻歴比較

する相対変位を入力することになる。ここでは、その基準加速度の作成方法について述べる。

基準加速度は紀伊半島南東沖地震の際に OSK006 で観測された強震記録を加工して作成する。観測波形を図-6 に示す。当該強震記録を選定した理由として、過去に発生した 1944 年東南海地震 (M7.9: 最大震度 6) や 1946 年南海地震 (M8.0: 最大震度 5) の活動周辺に震源を持ち、さらに近い将来に発生が危惧される南海トラフ巨大地震で予測される震源と近い距離にあることから、南海トラフ巨大地震と伝播経路特性を近似できると考えられるためである。しかし、観測記録の地震の規模が大きいため、南海トラフ巨大地震を想定した橋梁の動的解析の入力地震動としては適さない。そこで、内閣府が公表している工学的基盤における南海トラフ巨大地震の想定地震動に対して吉田¹⁰⁾による等価線形化手法に基づく一次元地盤の地震応答解析プログラム(DYNEQ)を用いて地表での加速度応答を求め、その応答と同規模になるように紀伊半島南東沖地震動を加工して基準加速度とする。図-7 は等価線形解析により求めた地表での南海トラフ巨大地震の想定地震動である。PGA は 393.1 cm/s^2 である。

次に、紀伊半島南東沖地震動と南海トラフ巨大地震の地表面での想定地震動のパワースペクトルの比較を図-8

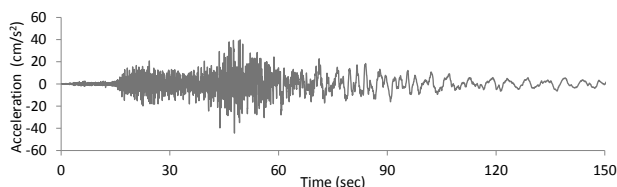


図-6 OSK006 の紀伊半島南東沖地震観測波

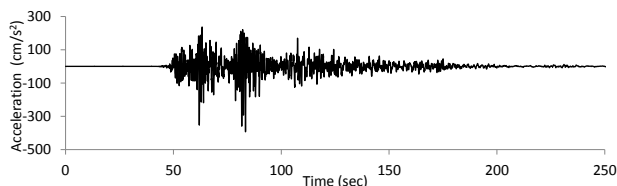


図-7 OSK006 の南海トラフ巨大地震動（地表波推定）

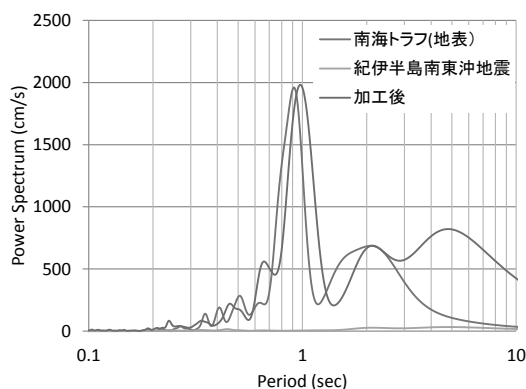
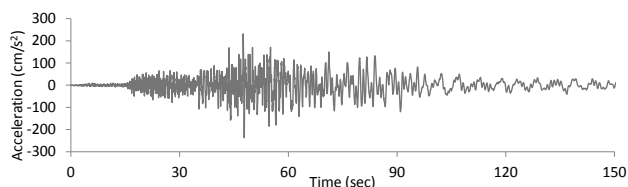


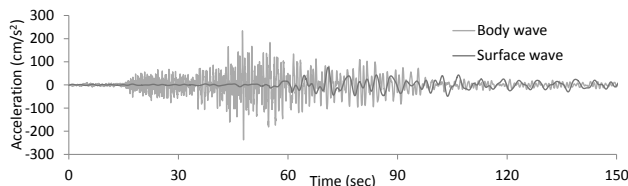
図-8 パワースペクトル比較

に示す。紀伊半島南東沖地震動のパワースペクトルが明らかに小さいので、南海トラフ巨大地震による周期毎のパワーと同規模となるように加工した。加工後の両者のパワースペクトルを図-8 に重ねて示す。周期3秒より長周期では加工後の地震波のパワーが南海トラフ巨大地震の想定地震動よりも大きくなっているが、これは表面波を多く含む地震波を再現するためである。このときの(1) 加速度時刻歴、(2) 実体波と表面波の加速度振幅の比較、(3) 両者の変位の比較を図-9 に示す。実体波の最大加速度は 235.8cm/s^2 、表面波の最大加速度は 74.7cm/s^2 、実体波の最大変位は 14.2cm 、表面波の最大変位は 36.8cm であり、その最大変位の比率は2.58倍である。上述したように、地震動の震源特性、震源距離、地盤構造によって実体波に対する表面波の変位比率は変化するが、概ね1.0～2.5倍程度の変位比率となることを確認している。そのため、加工した地震動の変位比率が2.58倍であることは、表面波の影響を安全側に評価しているという意味では妥当であると考えられる。したがって、OSK006 で観測された紀伊半島南東沖地震動を南海トラフ巨大地震の地表面での想定地震動のパワースペクトルで基準化した波形(図-9 (1))を基準加速度とする。

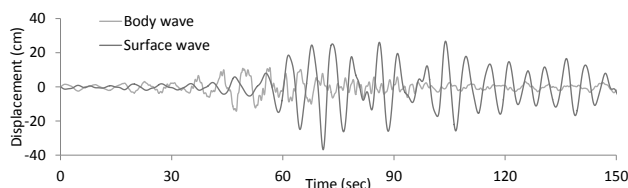
次に、基準加速度の表面波が OSK006 の Love 波の分散曲線(図-2)にしたがって伝播するとき、2点間の最



(1) 加工後の加速度時刻歴



(2) 実体波と表面波の加速度時刻歴



(3) 実体波と表面波の変位時刻歴

図-9 加工後の基準加速度時刻歴と実体波・表面波

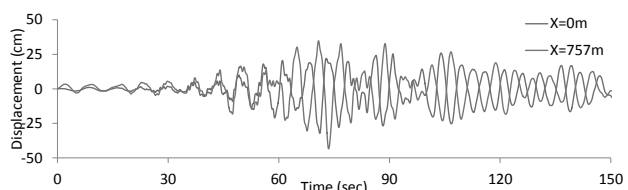


図-10 距離757m離れた地点での変位時刻歴

大相対変位が生じる距離について検討した。図-10 は、相対変位が 64.0cm と最大相対変位を示す距離が 757m 離れた地点における地震動の変位時刻歴を示す。基準加速度を積分して得た変位時刻歴(赤線)と比較すると、 757m 地点で半波長ずれることが分かる。そこで、入力波が橋梁の両端で半波長ずれる程度の橋長であれば、表面波の伝播による影響が現われると考え、 757m よりやや全長が大きい橋梁をモデル化し、表面波の伝播を考慮した地震応答解析を行う。

4. 表面波伝播を考慮した地震応答解析

(1) 解析概要

地震応答解析の汎用ソフトである DYNAS2E⁹⁾を使用した多点入力による解析を行う。解析対象は、都市部に供用される一般的な連続桁橋の高速道路とし、3 径間連続桁橋を X 方向に連続して繋ぎ合わせてモデル化する。支間長 $35.7\text{m}+35.0\text{m}+35.7\text{m}$ の計 106.4m を1つの連続桁橋とし、橋梁の両端で入力波の波長が半波長以上ずれるようにするため、8 つの連続桁橋を繋ぎ合わせて全長

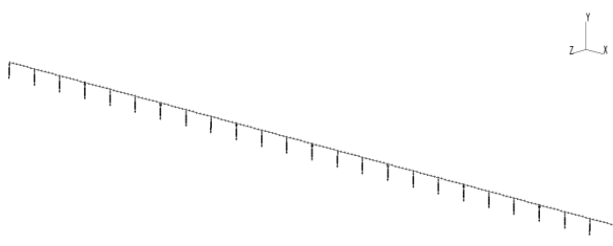


図-11 解析モデル

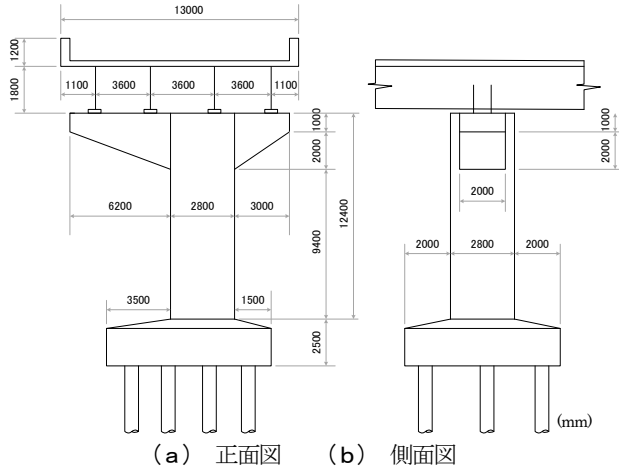


図-12 上下部構造概要

表-1 解析ケース

解析ケース	入力地震動	入力方法	解析	応答解法	減衰種類
Case1	基準加速度	一様入力	線形	直接積分法	ひずみエネルギー比例型
Case2	基準加速度+相対変位	多点入力	線形	直接積分法	ひずみエネルギー比例型

851.2mの連続桁橋をモデル化した(図-11)。上部構造は主桁数4本の鋼I桁とRC床板を一体化した合成桁、下部構造はRC橋脚であり、それぞれ線形のはり要素でモデル化した。上下部構造の概要を図-12に示す。橋脚はP1からP25の25脚あるが、すべて同一の構造諸元を与えた。地盤及び基礎については、フーチング底面に橋軸直角方向対して地盤ばねを与え、ばね値はOSK006観測地点の速度構造と単位体積重量 γ と動的ポアソン比(0.5)を用いて、道路橋示方書¹¹⁾より算出した。なお、P1～P25橋脚は同一の速度構造をもつ地盤上に位置すると仮定し、すべての橋脚に対する地盤ばねは同一の値を使用した。質量は各節点に集中重量として与えた。支承構造については、拘束条件の有無でモデル化しており、橋軸直角方向の拘束条件を固定としている。固有値解析の結果、橋軸直角方向における支配的なモードは1次モードで、その固有周期は0.23秒である。

本研究は、表面波成分が橋梁に及ぼす影響を評価することに着目している。そこで、表-1に示す2つの解析ケースを検討する。Case1は表面波の伝播による影響を考慮しないケースであり、3.で作成した基準加速度を各橋

脚に一様入力する。Case2では、表面波の伝播を考慮するケースであり、P1橋脚の基盤に基準加速度を入力し、P2～P25の各橋脚に対しては、基準加速度の実体波成分はそのままに、表面波成分は表面波伝播による位相ずれを考慮したものを合成した入力波を準備し、その入力波と基準加速度の相対変位を基準加速度に加えて入力波とした多点入力を行う。なお、本研究では水平方向に振動するLove波を多く含む地震波が橋軸方向に沿って伝播する場合に表面波が橋梁に与える影響を検討するため、両ケースにおいて加振方向は橋軸直角方向のみとした。また、解析結果は橋脚基部における曲げモーメントに着目して考察を行う。実体波のレベルからすれば地盤や橋梁の非線形特性を考慮してモデル化することも可能であるが、構造物の挙動が複雑になり表面波の影響を解釈するのが難しくなるため、ここでは弾性応答するものとして設定した。

(2) Case1とCase2の曲げモーメントの比較

図-13に、P5、P15、P20、P25橋脚の曲げモーメントの時刻歴図のケース比較を示す。両ケースのどの橋脚の曲げモーメントの時刻歴においても最大曲げモーメントは47.9sで記録されており、この時間は実体波の加速度振幅が最大となる時間付近であるため、表面波伝播の考慮の有無に関わらず最大曲げモーメントは実体波により与えられると考えられる。一方、Case2の表面波が優位となる観測時間60s以降は、橋脚によって応答に変化が見られる。例えば、P5橋脚では、表面波の伝播により観測時間90s以降の応答が若干程度減少しており、P15からP25橋脚では、応答が増加した。このように、表面波が伝播することにより、表面波の出現時間帯で各橋脚の基部における曲げモーメントの増減が確認できた。しかし、その増減は最大曲げモーメントと比較して小さいので、表面波が橋梁に与える影響は大きいとは言えない。

Case2で橋脚ごとに曲げモーメントの応答に変化が見られる原因としては、実体波と伝播を考慮した表面波を足し合わせるときに、それぞれの波の位相が半波長ずれば振幅は相殺され、位相が合えば増幅することで入力地震波の振幅が大小するためである。

慣性力が主となる橋梁構造物にとって、表面波による2点間の相対変位が64.0cm与えられようとも基本的には実体波による応答が支配的となるため、表面波の影響はそれほど大きく無いことが確認できた。本研究では、短周期の橋梁を対象としたが、変位の影響の出やすい長周期の橋梁や地中構造物であれば、表面波による相対変位の影響が出やすいと考えられ、これらについては今後の検討課題である。

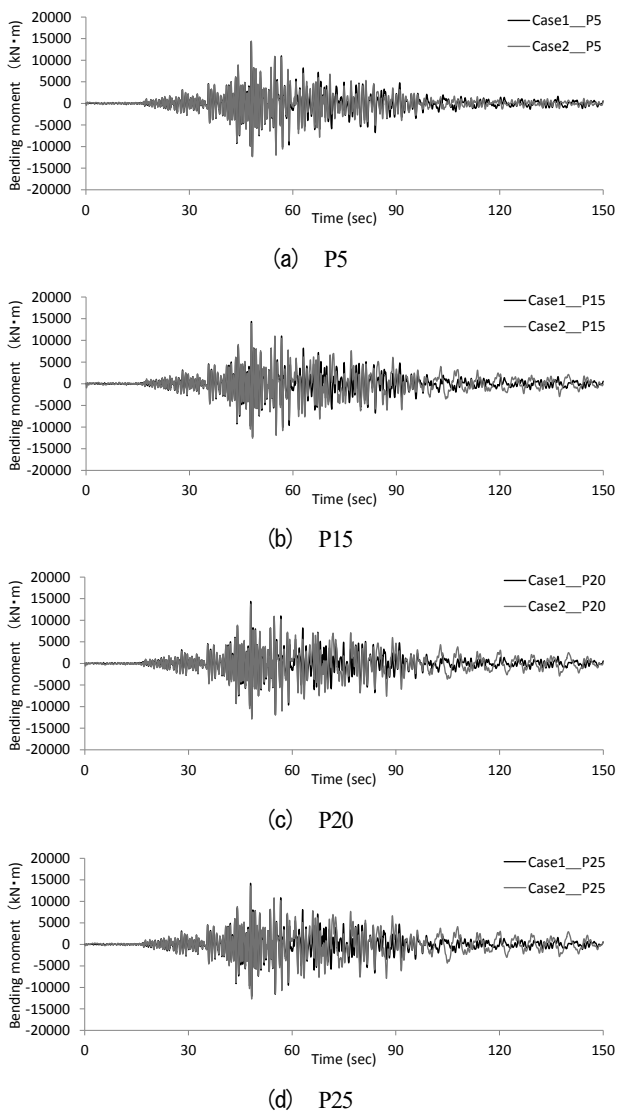


図-13 各橋脚の基部における曲げモーメントの時刻歴（橋軸直角方向）

5. 結論

本研究は、大阪平野で観測された地震動を実体波と表面波に波形分離を行い、大阪平野で励起する表面波の特性を理解し、さらに、伝播速度の差異に応じて橋脚毎に作成した南海トラフ巨大地震と同規模の入力地震動を連続桁橋に与えて動的解析を行うことで表面波成分が橋梁に及ぼす影響を評価した。本研究は以下のようにまとめられる。

- 1) 本研究で対象とした大阪平野のうち、沖積層が厚く堆積した平野部では海溝型地震により顕著な表面波が確認できた。
- 2) 紀伊半島南東沖地震と淡路島地震を用いた変位比率の比較から、大阪平野内の観測点では、表面波の変位は実体波の変位と同程度か、それを上回る可能性が高く、このとき実体波の変位最大値に対する表面波の最大変位比率はおよそ1.0~2.5倍であった。また、

紀伊半島南東沖地震では淡路島地震よりも実体波に対する表面波の比率は大きくなることが示された。

- 3) 南海トラフ巨大地震の想定地震動に対して表面波伝播による連続桁橋の応答の差異について応答解析で検討したところ、各橋脚基部の最大曲げモーメントは、表面波伝播の考慮の有無に関わらず実体波の応答が支配的になることがわかった。表面波の応答は実体波による応答よりも小さいが、表面波の出現時間帯で応答が増減することが確認できた。

謝辞

本研究の遂行にあたり、(独)防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの強震記録を利用させて頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 赤澤隆士：大阪平野における2004年紀伊半島南東沖の地震の長周期地震動特性，日本地震学会講演予稿，pp.253, 2005.
- 2) 吉村孝志，武村俊介，早川俊彦：2007年新潟県中越沖地震(M6.8)による首都圏の長周期地震動，Journal of Geography, 116(3/4)，pp.576-587, 2007.
- 3) 橋爪紳也：「水都」大阪物語[再生への歴史文化的考察]，藤原書店，2011
- 4) 若松加寿江，松岡昌志：全国統一基準による地形・地盤分類250mメッシュマップの構築とその利用，地震工学会誌，No.18，pp.35-38, 2013.
- 5) 藤原広行，河合伸一，青井真，森川信之，先名重樹，工藤暢章，大井昌弘，はる憲生，早川譲，遠山信彦，松山尚典，岩本鋼司，鈴木晴彦，劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料 第337号，2009
- 6) 宮腰研，大西良広，赤澤隆士，堀家正則：大阪堆積盆地モデルに基づいた表面波の卓越周期に関する検討，北海道大学地球物理学研究報告，69，pp.41-50, 2006.
- 7) 神山眞：地盤の強震動特性とその予測に関する研究，東北大学学位論文，1985.
- 8) 中村晋，吉田望：地盤材料の非線形性および非定常スペクトル特性を考慮した強震動の表面波波形分離に関する提案，地震工学研究発表会講演概要，18号，pp.37-40, 1985
- 9) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社：DYNA2E.
- 10) 吉田望：DYNEQ A computer program for DYNAMIC response analysis of level ground by EQUIVALENT linear method，東北学院大学工学部，2008. <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>
- 11) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012.