

構造物の強震データを用いた 震源直上の地動のインバージョン解析

東京大学地震研究所 笠原 覚*

東京大学地震研究所 東原 紘道*

東京大学地震研究所 Kusnowidjaja M. *

兵庫県南部地震において、明石海峡は注目すべき地域である。ここに明石海峡大橋はその震源直上に位置する巨大構造物であり、その動的挙動は意味深い。本研究では神戸側主塔塔頂における橋軸方向の本震の強震記録をもとに、震源直上の明石海峡大橋の動的挙動を明らかにした。その結果、地震時の橋梁の挙動は基礎の振動に大きく影響されることがわかった。さらにその強震記録から震源直上の地盤動を推定することを行った。得られる地盤動は今後の直下型地震を考える上で有益なものとなりうる。

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震において、構造物に壊滅的な被害をもたらしたのは地震初期のゆっくりとした大きな波が主因であるといわれている。これはS波の到着直後であることから、震源近傍から発せられた波であるといえる。その震源についての研究が東大地震研の吉田・瀧瀬らによって行われている¹⁾。それによると、その波の源泉は明石海峡の直下であり、そこから巨大なエネルギーが放出されたことが明らかになっている。さらに京大防災研の梅田らは、余震分布等から明石海峡付近をブライトスポットと称して、その付近において大きな加速度が発生した可能性があることを示している²⁾。このように、明石海峡は非常に注目すべき地域である。

その震源直上に位置する明石海峡大橋(図-1)は、全長3910m、中央径間1990mの吊橋である。地震後のGPS観測により、本州側アンカレッジ(1A)・本州側主塔基礎(2P)がそれぞれ北東方向に約80cm、淡路側主塔基礎(3P)が西北西方向に約50cm、淡路側アンカレッジ(4A)が西南西方向に約50cm変位したことが確認されている³⁾。地震時の挙動は明らかにされていない。明石海峡大橋の兵庫県南部地震時における挙動を明らかにする

ことは、「震源直上の構造物の動的挙動」という点で工学的にも意味が深い。

風による振動を調査する目的で主塔の塔頂および塔腹部に設置しておいた速度計が、幸いにも兵庫県南部地震の本震を記録することができた。本州四国連絡橋公団もその強震記録を用い、文献3)で明石海峡大橋の主に上部構造の挙動について考察している。

本研究では、その兵庫県南部地震時の主塔における強震記録をもとに、基礎及び地盤を含めた連成系としての明石海峡大橋の動的挙動を明らかにする。さらに得られた強震記録より震源直上の地盤動を推定する。現在、神戸海洋気象台の強震記録が広く研究に用いられているが、これは真の意味での震源直上の記録ではない。本研究で得られる地盤動は、正

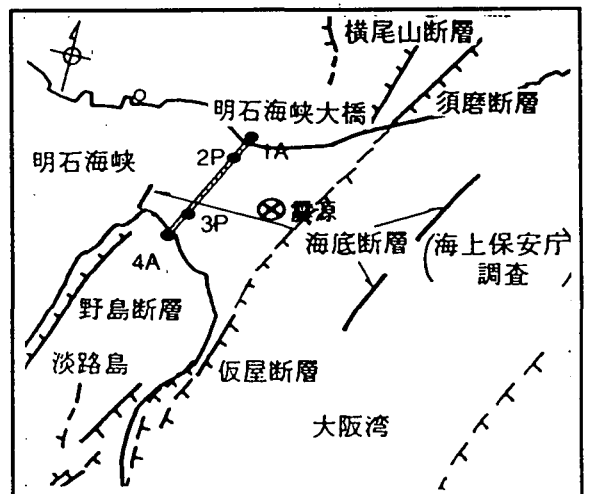


図-1 明石海峡大橋と震源³⁾

キーワード：兵庫県南部地震，明石海峡大橋，
震源直上の地盤動

*東京大学地震研究所，03-3812-2111

に震源直上の地盤動であり、今後の直下型地震を考える上で非常に有益なものとなりうる。

2. 明石海峡大橋の解析モデル

地震発生時における明石海峡大橋は、ケーブルを渡し終え、橋桁の架設にとりかかろうとしていた状態であった(図-2)。その解析モデルとして、地盤・基礎および上部構造からなる連成系を取り扱い(図-3)、さらに地盤と基礎の動的相互作用⁴⁾を考慮し、FEM(有限要素法)を用いて橋軸方向の解析を行った。ここに、ケーブルについては初期軸力を考慮した線形化有限変形法⁵⁾を用いた。

実際の明石海峡大橋の諸元および地盤の特性値(表-1)をもとに、単位地盤動(地中深いところ)に対する2P塔頂での橋軸方向のフーリエスペクトルの絶対値を求めたのが図-4である。ここにおいて、震源の深さに対して明石海峡大橋の大きさは小さいと考え、入力地震波は、1A・2P・3Pおよび4Aに等しい大きさで位相差は0としている。なお構造物の減衰はヒステリシス減衰とし、その値を

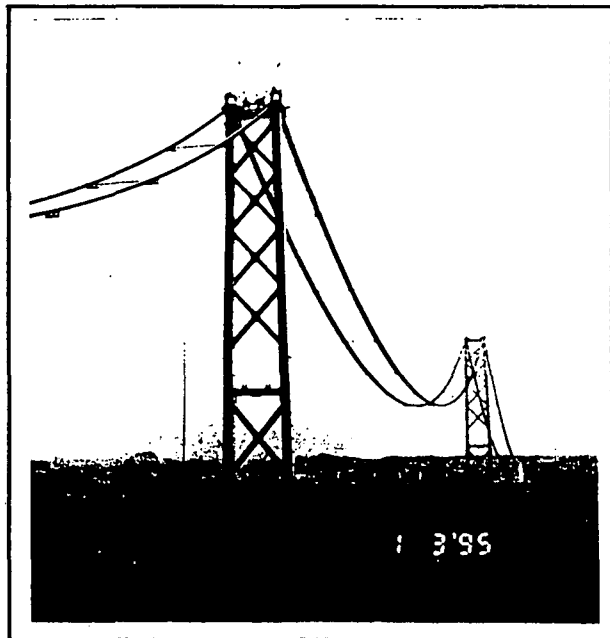


図-2 地震後の明石海峡大橋
(手前が淡路島側)

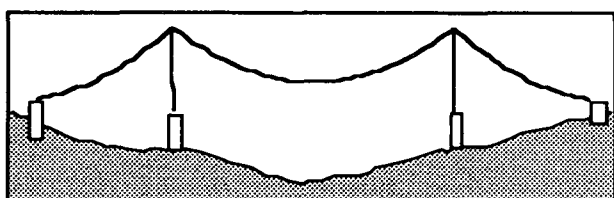


図-3 明石海峡大橋の解析モデル

表-1 各基礎の地盤の特性値

	支持基礎	せん断弾性係数	密度	ポアソン比
1 A	神戸層	83000 (tf/m ²)	2.25 (t/m ³)	0.33
2 P	明石層	44400 (tf/m ²)	2.15 (t/m ³)	0.33
3 P	神戸層	51200 (tf/m ²)	2.27 (t/m ³)	0.33
4 A	花崗岩	235000 (tf/m ²)	2.40 (t/m ³)	0.33

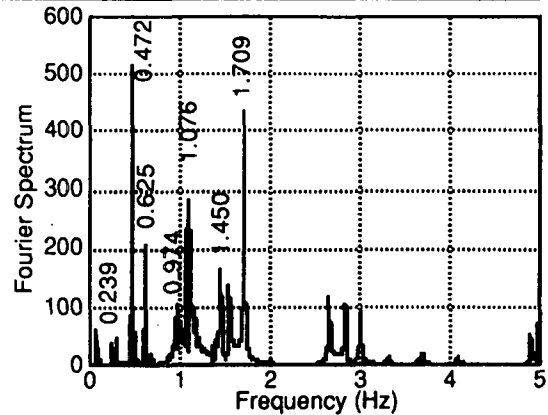


図-4 2P塔頂での橋軸方向のフーリエスペクトル

0.05%とした。図-4において0.6(Hz)以下のピークは、減衰が非常に小さく鋭いピークとなる。0.8~1.8(Hz)および2.6~3.2(Hz)のピークは、基礎の固有振動により励起されたものである。つまり、0.97(Hz)付近は1A、2.8(Hz)付近は4Aによって励起されており、2P塔頂の応答は2P基礎だけでなく他の基礎の影響も受けることがわかる。ここで2P基礎の諸元を表-2に示し、この2P基礎のみをモデル化して単位地盤動(地中深いところ)を与えたときの水平お

表-2 2Pの緒元

質量	1.124 × 10 ⁹ (t)
回転慣性	1.252 × 10 ⁶ (t/m ²)
底面の半径	40.0(m)
高さ	70.0(m)

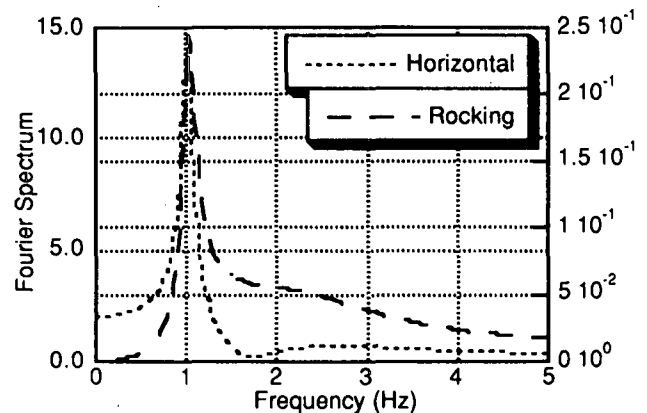


図-5 2P基礎のみをモデル化した時のフーリエスペクトル

よびロッキング振動のスペクトルを図-5に示す。この図から、図-4における1.5(Hz)付近の3つのピークは基礎のロッキング運動により励起されたものであるということがわかる。さらに1.709(Hz)が大きくなるのは、2P主塔のみをモデル化した時の3次モード付近にあたるためと考えられる。

一方で、上部構造のみのモデルで固有値解析を行い、上記のスペクトルと対応させ、おのおののピークについて振動モードを決定した。次にいくつかのピークに対する振動モードを図-6に示す。

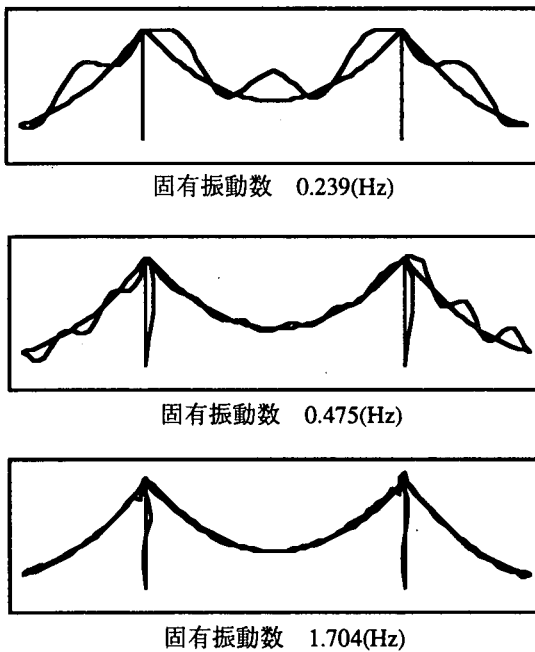


図-6 モード形の一部

3. 地震時における明石海峡大橋の動的挙動

図-7に、兵庫県南部地震時における2P塔頂での橋軸方向の速度記録を示す³⁾。橋軸方向については、地震計は主塔の東側塔頂と西側塔頂にそれぞれ設置されていた。この図は、その2つの記録の平均をとったものである。図-7における時刻0の正確な時刻は判明しないが、構造物に壊滅的な被害を与えた波は2P塔頂においても図の約30秒からの数秒に観測されている。塔頂での最大応答速度は70(cm/sec)と、大きな地盤動があったことを示す。これを微分して加速度にすると約350(cm/sec²)の大きさになる。

(1) 地震時の挙動について

まず最初に、明石海峡の直下で放出されたエネルギー

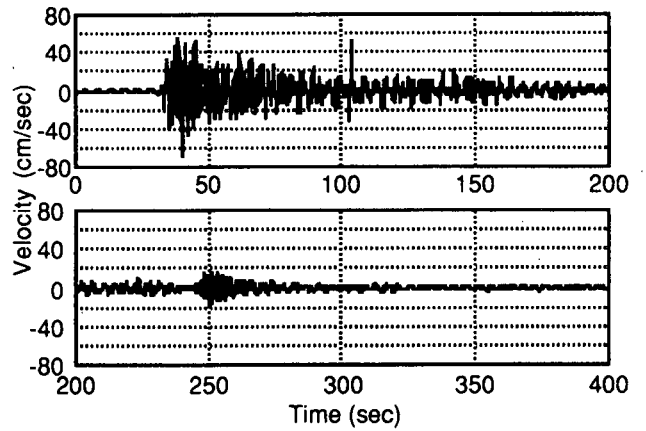


図-7 2P塔頂での橋軸方向の速度記録

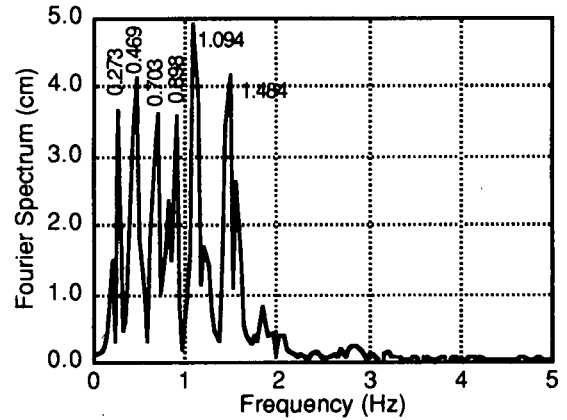


図-8 速度記録のフーリエスペクトル (30.0-55.6sec)

ギーの直接の影響を受けている図-7の30.0秒からの約25秒間の速度記録のフーリエスペクトルを図-8に示す。図-4には見られないピークもあり、地盤動の影響を大きく受けていることがわかるが、すべてのピークは地盤動により、ある固有モードが励起されたと考えられる。その1例として、図-8の0.898(Hz)のピークは固有振動数に起因するものであると考えられる。その固有振動モードを図-9に示す。また、今回のモデルで用いた地盤の特性値からは以下のことが言える。1.0~1.2(Hz)のピークについては、2Pもしくは3Pの基礎の水平振動により励起されたと考えられる。また1.2~1.6(Hz)のピークは2P基礎のロッキング振動の影響であり、2.9(Hz)付近の鈍いピークは4Aの水平振動の影響と考えられる。しかし、0.6~1.0(Hz)および1.8~2.0(Hz)のピークは鈍いため基礎の影響とも考えられるが、現段階

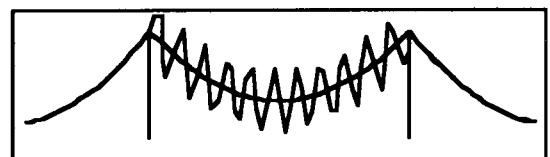


図-9 固有振動数0.898(Hz)の時の振動モード

では、直接地盤動により励起されたと考える。なお、解析に用いた地盤の特性値は現実の値とは大きく異なることも考えられ、これについては今後基礎の常時微動観測を行い、決定する必要がある。

次に上記のサンプリング開始時間から10秒程度経過した図-7の41秒からの約25秒間の記録のフーリエスペクトルを図-10に示す。今回の地震において断層の破壊時間は約10秒間であることが明らかになっており、この時間帯では地震の影響は小さくなっていると考えられる。図-8と比較すると0.8~1.2(Hz)のピークが小さく、地盤動の影響が弱まり基礎の振動が小さくなったことがわかる。以上より、地震時における構造物の挙動は、地盤動が直接に伝わる基礎の振動に大きく影響されるといえる。

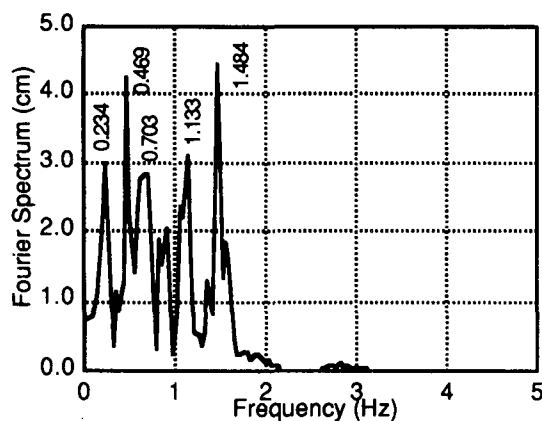


図-10 10秒程度経過したときのフーリエスペクトル

(2) 自由振動について

構造減衰は小さいため、非常に長い自由振動が継続している。図-11に140.0~165.5秒の記録のフーリエスペクトルを示す。卓越したピークのうち2つは上述の固有モードに相当する。この区間においては基礎の振動の影響は非常に小さくなっている。

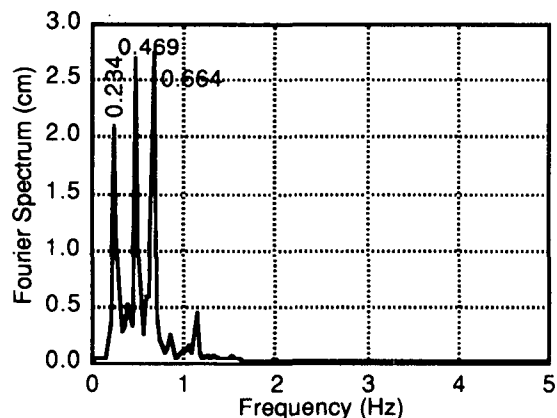


図-11 自由振動時の2P塔頂でのフーリエスペクトル

(3) 余震について

図-7の約245秒から性質の異なる波が現れているが、これは神戸で震度4を記録した最初の余震の影響である。この区間のスペクトルを図-12に示す。1.094(Hz)および1.484(Hz)は2P基礎の振動により励起されたと考えられ、地震時における構造物の挙動が基礎に大きく依存していることがわかる。

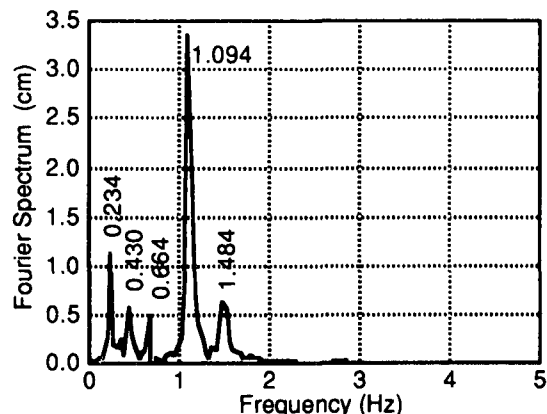


図-12 余震時の2P塔頂での応答

(4) ねじれについて

2P塔頂では東側および西側にそれぞれ橋軸方向の地震計を設置していた。ここではその2つの記録の差をとり、主塔のねじれについて考察する。図-13に東側と西側の速度記録の差を示す。この図から主塔にねじれ運動があったことがわかる。さらに図の30秒からの約25秒間のフーリエスペクトルを図

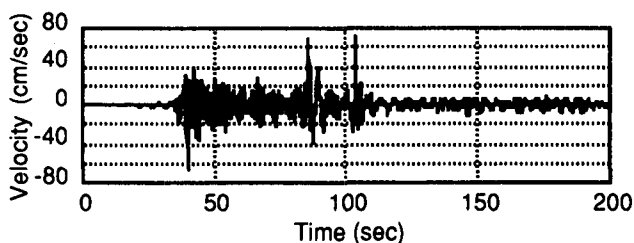


図-13 2P塔頂でのねじれ成分

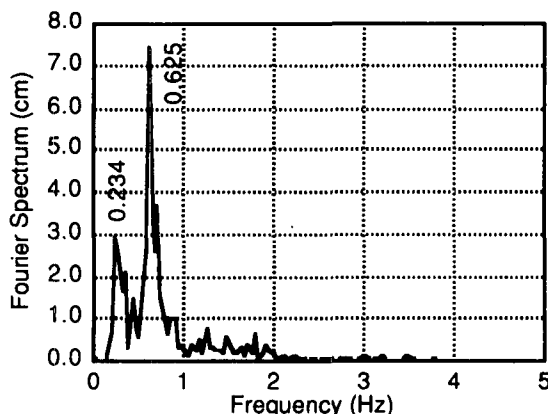


図-14 ねじれ成分のフーリエスペクトル

—14に示す。0.625(Hz)にピークがあり、これは図—8には現れないピークである。このピークは後続の記録にも現れることから、主塔のねじれの固有振動数であると考えられる。

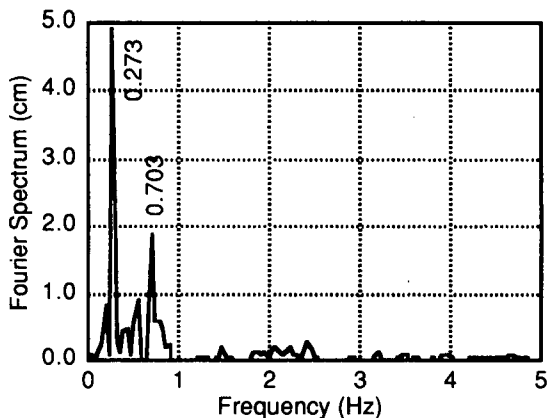
4. 地盤動の推定

地盤動から塔頂の応答を求める伝達関数が決定すれば、塔頂の強震記録から地盤動を求めることができる。しかし、伝達関数を正確に知るためには、構造物のモデル(減衰も含める)を適切に設定し、さらに正確な地盤の特性値を知ることが必要である。一般にそれらの作業は困難を伴うため、地盤動を正しく求めることは非常に難しい。ここでは地盤動を求めるために文献6)の手法を改良し、それを今回のモデルに適用した。

(1) 振動数領域での地盤動

構造減衰の値として0.05%を用い、図—7の30秒からの約25秒間の地盤動を解析した。その振動数領域での地盤動を図—15に示す。0.7(Hz)付近に大きなピークがあり、構造物を崩壊させたゆっくりとした大きな波であると考えられる。また低振動数域の0.2(Hz)付近にも大きなピークが現れている。このピークの原因としては以下のことが考えられる。今回のモデルは減衰が非常に小さく、特に低振動数域においてはピークが鋭くなる傾向がある。そのため解析モデルの固有振動数と実際の固有振動数のわずかな誤差が影響したと考えられる。

さらに構造減衰の値を0% (減衰なし)、0.1%の場合を解析したが、0.05%のものとはほとんど変わらない結果が得られた。



図—15 地盤動のフーリエスペクトル

(2) 時間領域での地盤動

この振動数領域での地盤動をフーリエ逆変換して時間領域での地盤動を求めることができる。

本解析法の問題点として挙げられることは、地盤動を4つの基礎に等しい大きさで、さらにその位相差を考慮しないで入力している点である。しかし、実際には基礎を支える地盤の特性値は表—1に示したように、それぞれの基礎を支える地盤により大きく異なるため、それぞれの基礎に作用する地盤動も大きさだけでなく位相も異なることが当然予想される。正確な地盤動を求めるためには、これらを改良する必要がある。

5. まとめ

兵庫県南部地震時の明石海峡大橋の2P塔頂での橋軸方向の強震記録を用いて、地震時の連成系としての明石海峡大橋の挙動を考察した。その結果、地震時における橋の挙動は基礎の振動に大きく影響されたことが判明した。

次に、塔頂での強震記録から地盤動(地中深いところ)を推定した。得られた地盤動は100%正確な値ではないものの、さらにモデルの改良・基礎の常時微動観測などを行って、震源直上の地盤動を高い精度で求めることができる。

今回、主に解析の対象としたのは2P塔頂での橋軸方向の記録であるが、2P腹部・3P塔頂及び3P腹部においても兵庫県南部地震の本震を記録している。これらの記録を用いて、地盤動の位相差などを考慮し、それぞれの基礎に働く地盤動を求める必要がある。また橋軸直角方向についても強震記録があり、橋軸方向に比して約2倍の最大速度が記録されている。今後これらを用いてさらに解析を進める。

謝辞：本研究は本州四国連絡橋公団の協力で行いました。特に本社設計部設計第1課の鳥海様には多大なる協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) S. Yoshida, K. Koketsu, et al : Joint inversion of near- and far- field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake, *Journal of Physics of the Earth* (投稿中)
- 2) 梅田康弘他：1995年兵庫県南部地震のブライトスポット，地震学会講演予稿集，No.2-A78，1995
- 3) 本州四国連絡橋公団：兵庫県南部地震の明石海峡大橋への影響調査報告書，平成7年8月
- 4) 東原紘道：半無限弾性体上の円板の水平・ロッキング連成振動，土木学会論文集，pp293～300，第386号，1-8，1987年10月
- 5) 大月 哲：吊橋設計理論の数値解析に関する研究，学位請求論文（東京大学），
- 6) 笠原覚，東原紘道：構造物の1応答より地盤動を逆推定する手法，地震学会講演予稿集，No.2-C25，1995

Inversion Analysis of Ground Motion on the Top of Hypocenter Using Strong Motion Records of a Structure

Satoru Kasahara, Hiromichi Higashihara, Kusnowidjaja M.

The Akashi Kaikyo Bridge is a huge structure located just on the top of the hypocenter of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake. In this paper, the dynamic behavior of the Akashi Kaikyo Bridge was discussed using the strong motion record at the top of its northern tower (Kobe side). We found that the behaviors of the bridge under the earthquake is greatly influenced by its foundations. We calculated the ground motion on the top of the hypocenter using the record. The ground motion that we derived here will be useful for analysing near-field earthquakes.