

(4) 地盤の常時微動、発破振動、地震動特性に関する一考察

京大工学部 正員 山田善一 京大工学部 正員 家村浩和 京大工学部 正員 古川浩平
 京大工学部 中西伸二 京大大学院 学生員 坂本幸三

1. まえがき

国土の狭い我国では、近年、海岸を埋めたてたやわらかい地盤上に大規模な構造物が建設されることが多くなった。現在、すでに工事が着手されている本州四国連絡橋児島-坂出ルートも一部分、やわらかい地盤の香ノ州地区において高橋脚高架橋の建設が予定されている。このような地盤上の構造物に対しては耐震性に関する種々の配慮が必要となる。そのためにはその地域における地震動特性を熟知しなければならないのであるが、計測された数少ない過去の実地震記録から地震動特性を把握するには限りがある。それゆえ、ほかの方法により地震動特性を探る必要がある。本州四国連絡橋の建設にあたり、坂出側の海底では吊橋の基礎となるケーソンを設置するために発破が行われており、この発破振動を香ノ州地区の地盤上で計測することができる。本研究では、この香ノ州地区において、常時微動計測、発破振動計測を行ない、香ノ州地区で記録された実地震記録から各振動レベルによる振動特性を比較するとともにこの地盤の振動特性を推定した。さらに板たつき法による振動計測を行ないS波の伝播に関する解析を行なった。

2. 常時微動、発破振動、地震動特性

2.1 常時微動、発破振動計測

常時微動の計測に際して、香ノ州地区は数多くの工場が林立し、昼間は工場の機械の振動が直接伝播される可能性があるため、機械の大部分が停止している深夜を選んで計測を行なった。計測日時は昭和55年11月19日PM.11:00頃。計測地点としては、図-1に示した P_1, P_2, P_3 の3地点を選んだ。図-2はその変位計測記録の一部分であり、上から P_1, P_2, P_3 地点での計測波形を示す。発破振動に関しては、昭和55年3月15日、同年11月30日に行われた2回の発破を香ノ州地区にて計測した。計測の方法としてはいずれも発破振源を中心として放射線上に3つの計測点を設け、振動計測を行なった。しかし、工事進行のため余儀なく前者と後者の計測3地点を異なった場所に設置した。以後、前者の計測3地点を Q_1, Q_2, Q_3 、後者のそれを R_1, R_2, R_3 と呼ぶ。 Q_1 地点は最も海寄りで、 Q_2 は Q_1 地点から47.8m離れた地点にあり、 Q_3 は Q_2 地点からさらに45.5m離れた地点である。 R_1, R_2, R_3 も海寄りから順に位置し、 R_1 地点は常時微動計測に用いた P 地点と同一地点であり、 R_1-R_2 間は119.2m、 R_2-R_3 間は99.7mである。発破地点が異なるゆえ、発破薬量、発破地点-計測地点間の距離も異なる。前者の発破薬量は2700kg、発破地点- Q_1 地点間は約2100m、後者の発破薬量は360kg、発破地点- R_1 地点間は約800mである。図-3、図-4は2回の発破の加速度計測記録で、上から $Q_1, Q_2, Q_3, R_1, R_2, R_3$ 地点での計測波形を示す。図-5は昭和48年11月25日に観測された地下5mの実地震加速度記録である。上はN-S方向、下はE-W方向成分の記録波形である。図-2、図-3、図-4、図-5はいずれも振幅の最大が縦軸の最大となるように波形は拡大されている。

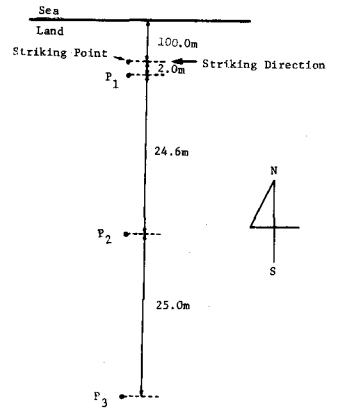


図-1 計測地点

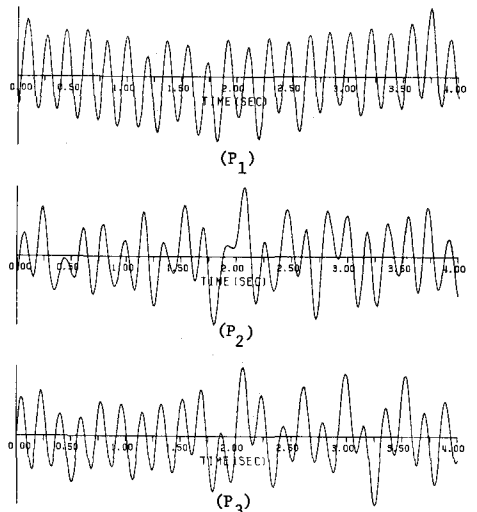


図-2 計測された常時微動

2.2 解析結果および考察

常時微動計測、発破振動計測記録および実地震動記録からは、FFT法を用いてパワースペクトルを作成し、卓越振動数の検出を行なった。図-6は図-2の常時微動の4秒間の計測データから求めたパワースペクトルである。発破振動では最初の2秒間のデータをカットし、次の20秒間の自由振動のデータを用いてパワースペクトルを算出した。図-7は図-3の計測データから、図-8は図-4の計測データから求めた結果である。図-9は図-5の実地震動記録の最初の10秒間から求めたパワースペクトルである。いずれも上から記録波形と対応している。

常時微動のパワースペクトル図-6を見ると、測定点によ、て若干の違いはあるが、55Hzが最も卓越し、ほかに22Hz、16Hz、37Hzの卓越振動数の存在も認められる。3月15日、11月30日の発破の自由振動部分から求めたパワースペクトル図-7、図-8を見ると、前者の発破と後者の発破とは計測地点、薬量、発破地点-計測地点間距離が異なるため多少の違いはあるが、16Hz、22Hz、3Hz、37Hz、42Hz、5Hz、7Hzといった振動数の卓越が認められる。これらの卓越振動数の中で16Hz、37Hzの卓越に関しては、図-9の実地震の卓越振動数と一致している。また本四公団が番州で記録された地震を解析した結果によれば、地震によ、ては16Hz、37Hz以外にも22Hz、30Hzの卓越振動数の存在が確認されている¹⁾。したが、て常時微動、発破振動により実地震時の卓越振動数のほとんどが検出できると言えよう。しかし地震動では16Hz、37Hz、発破振動、常時微動では55Hzが最も卓越し、この相異は無視できない。計測点付近は番州工業地帯などで工業用モーター、タービン等の周期的振動源は多くある。そうすると常時微動はもちろん発破振動における自由振動も周期的振動源の影響を受けているのではないかとへう疑念が生じる。それを解明するために発破前後の振動記録をペンオシロに描かせて調べた。その結果、発破前の振動は発破の自由振動と比較すればゼロとい、てさしつかえない。発破後の自由振動も時間を経るとゼロに減衰している。よ、て発破による自由振動の55Hzの卓越は周期的振動源によるのではなく、発破によ、て起こされた地盤の固有振動であることは明らかである。計測された常時微動の原波形図-5は変位測定とはい、いままごなされてきた各種の常時微動の研究で報告されている記録に比べてあまりにも周期的なので、この計測結果に対して他の条件をも考慮して検討した。本四公団が行な、た常

時微動計測結果によれば、卓越振動数は8Hzと15Hzとな、ており今回の計測の結果と異なる¹⁾。この測定は了ア共石坂製油所の敷地内で行なわれ、同工場の周期的振動源の影響を大きく受けていることが推定できる。

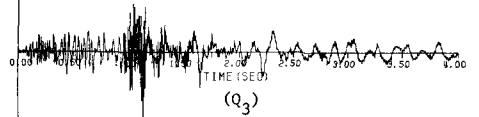
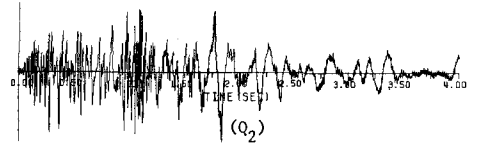
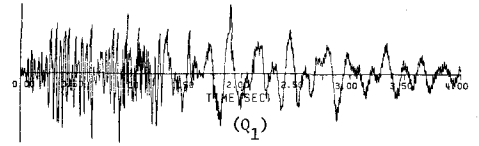


図-3 3月15日の発破振動

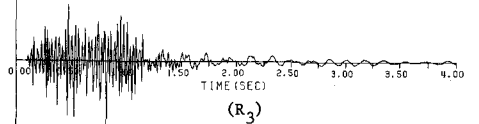
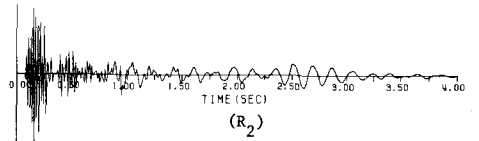
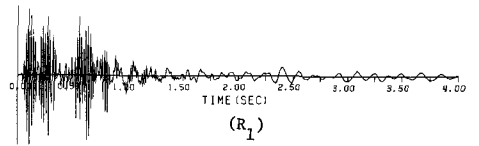


図-4 11月30日の発破振動

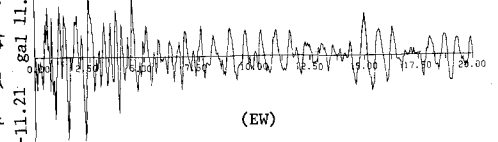
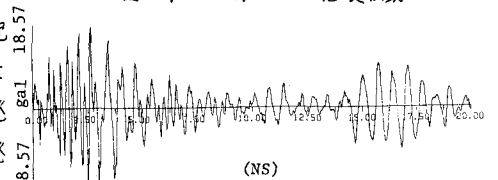


図-5 実地震記録

これに対し、今回の計測地点は同工場境界より約400m離れているため、アジア共石坂出製油所の振動源の直接の影響は小さく8Hzの振動に近い5.5Hzの地盤の振動が強く惹起されたものであろう。

地震動においては16Hz、37Hzが最も卓越し、発破振動、常時微動においては5.5Hzが最も卓越している。このことは振動を誘発するメカニズムが決定的に異なるためであろう。

地震は基盤が全体としてゆすられるため、地盤の最も低次の振動が惹起されやすい。それに対して発破振動は点振動源であり、常時微動もアジア共石坂出製油所の機械振動という点振動源である。このように振動源が大きく異なっているため、最も卓越する振動数は異なるが、3種のひずみレベルをもった振動において、ほとんど同じ卓越振動数成分を有していることが認められる。

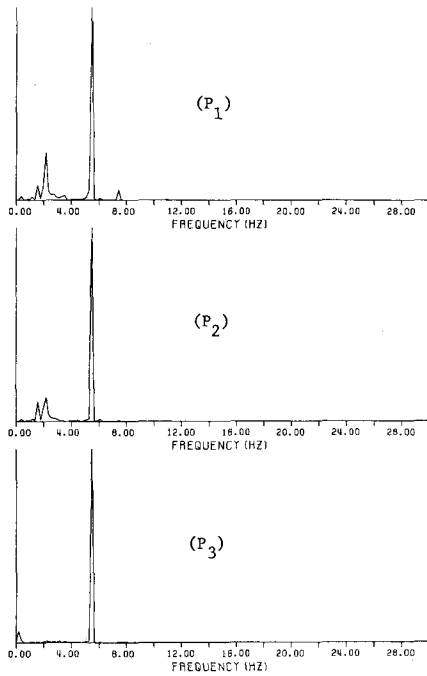


図-6 常時微動のパワースペクトル

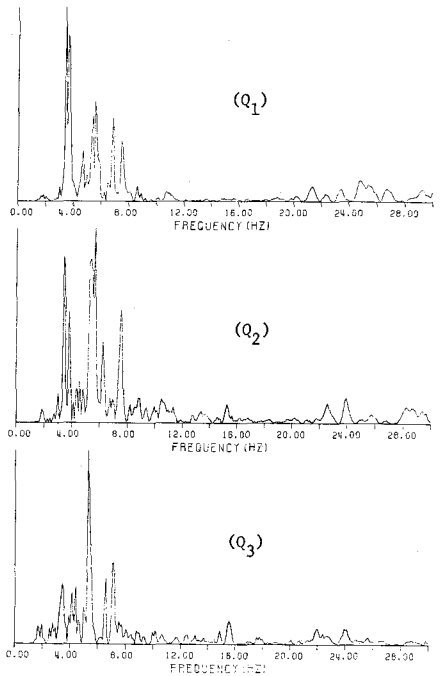


図-7 3月15日の発破振動のパワー

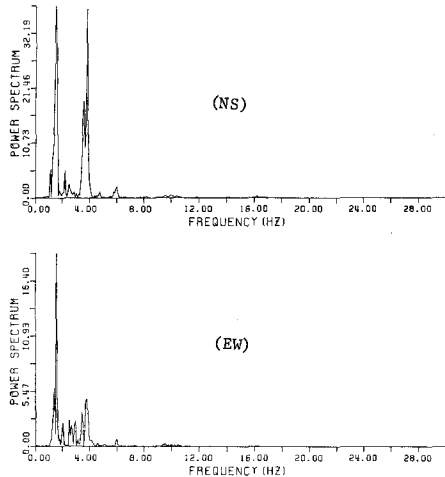


図-9 実地震動のパワースペクトル

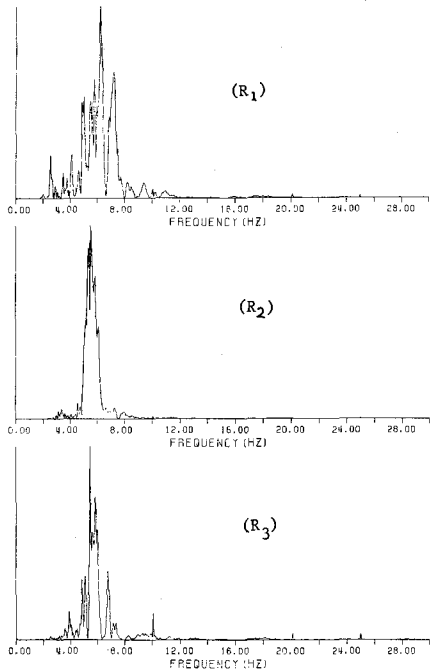


図-8 11月30日の発破振動のパワー

3. 板たたき法によるS波の伝播特性

3.1 板たたき法による地盤振動計測

昭和55年11月19日深夜、図-1に示すような打撃方向に垂直な一直線上に位置するR、R₁、R₂の3地点で4回の板たたきによる加速度計測を行なった。この計測点は常時微動の計測した地点と同じ地点であり、打撃地点-R地点間は2.0m、R-R₁間は246m、R-R₂間は250mである。また板の上の重量としては車を用いた。以後、R地点での記録を1ch(チャンネル)、R₁地点でのそれを2ch、R₂地点でのそれを3chと名づけることにする。

3.2 解析結果および考察

板たたき法はSH波を発生させる最良の方法であるが、エネルギー源が人力であるため、①SH波の到達距離が短かい②SH波の立ち上りに尖鋭さを欠く、などの欠点がある。①に対しては、人力で板をたたいたときのS波の到達距離は最大100m程度といわれているため、打撃地点と計測地点との最大間隔を約50mにとり、打撃地点から遠ざがるにつれてアンプの使用レンジを高めるといふことでほぼ解消される。しかし、使用レンジを高めるだけではSignalとNoiseとの大きさが同じ割合で大きくなり②は解消されない。S/N比を大きくするために今回の解析ではデータ処理の段階で50個の計測データの多重化を行った。図-10はチャンネルごとの多重結果である。これは振幅の最大が縦軸の最大となるように波形は拡大されている。この多重化により、S/N比は $\sqrt{50}$ 倍に向上しており、立ち上りの見やすさが加算前の1つ1つのデータに比べて約7倍には上がったといえる。

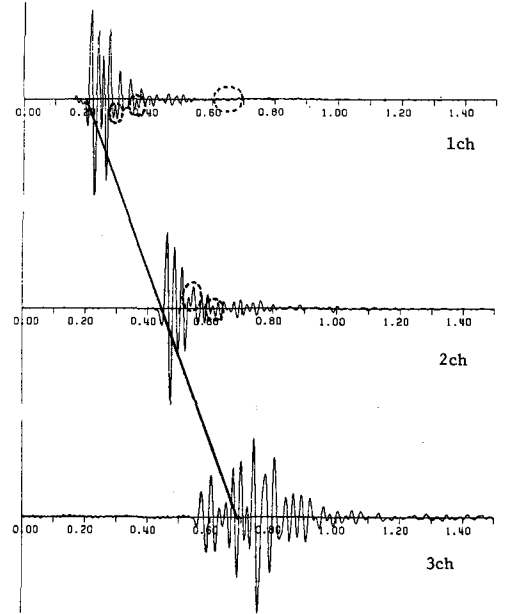


図-10 加算された板たたき計測波形

50個のデータを多重化した図-10を見ると、 $P_1 - P_2$ 間、 $P_2 - P_3$ 間の距離がほとんど同じであるのに、立ち上りの時間間隔が異なっているのに気付く。このことは、1chと2chの立ち上り部分を直線で結び延長しても3chの立ち上り部分に一致しないことから明らかである。 $P_1 - P_2$ 間が24.6mであるゆえ、1chと2chとの多重波形から表層のS波の伝播速度を求めると約100mとなる。この数値と本四公団報告書の番ノ州地区の地下構造およびS波速度の数値から図-11に示すようなあらゆる伝播経路を考へ、伝播時間を計算した。その結果を表-1に示す。が、Path 2'', 3''の伝播距離は100mを越えるためこれらの経路による伝播の可能性は少ない。そうすると、 P_3 地点に最初に到達する可能性のある波としては直接波のPath 3の伝播時間 t_3 より短かいPath 3', 3''の2つの経路で伝播される波が考えられる。 t_3' と t_3'' はほぼ等しく0.360秒で、これと P_1 地点までの伝播最小時間0.02秒との差をとると0.340秒になる。これは図-10における1chと3chとの立ち上りの時間間隔0.350秒にほぼ等しい。これより P_3 地点での計測波形の特異性がPath 3', Path 3''の屈折波によるものであることが解明された。なお、本研究は本州四国連絡橋公団第二建設局委託研究の一部である。

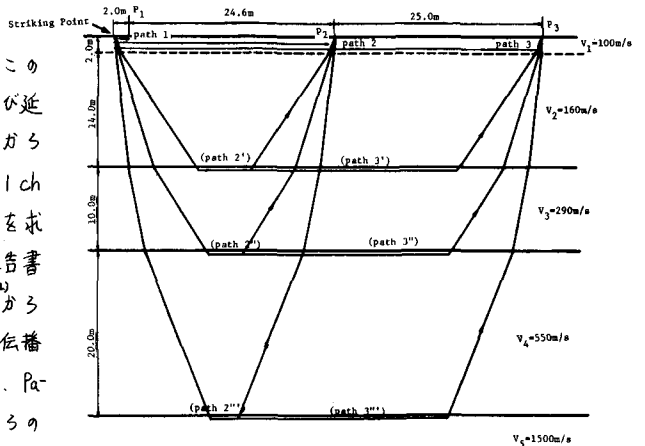


図-11 直接波、屈折波の伝播経路

propagation time of refracted wave

path 1	$t_1=0.020$ (sec)	path 3	$t_3=0.517$ (sec)
path 2	$t_2=0.267$	path 3'	$t_3'=0.361$
path 2'	$t_2'=0.275$	path 3''	$t_3''=0.360$
path 2''	$t_2''=0.314$	path 3'''	$t_3'''=0.384$
path 2'''	$t_2'''=0.367$		

表-1 直接波、屈折波の伝播時間

4. 参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団第二建設局 坂出工事事務所：7A発破影響計測結果報告書、昭和55年4月
- 2) 土木学会・本州四国連絡橋耐震地盤に関する調査研究小委員会：本州四国連絡橋の耐震地盤に関する調査研究報告書、昭和54年3月