

(44) 軟弱地盤と深い杭基礎における地震観測について

北大工学部 正真 芳村 仁 正真の中 辻 隆

1. まえがき

橋梁、トンネル、タンク、あるいは地下埋設物において、地盤とそれら構造物の相互作用を明らかにするために、強震観測が行われるとともに得られた実地震記録を用いた実証的な報告がこれまでにもいくつかなされている。しかしながら、軟弱な地盤に深い杭基礎を有する橋梁形式において、その周辺地盤と杭基礎の両方の地表および地中に地震計が設置されて強震観測が行われている例は少なく、耐震工学上有用となるデータの蓄積が未だ不十分であると思われる。

北海道東部厚岸湾に架かる厚岸大橋の近傍地盤およびその橋脚において、過去10年の間に観測された、マグニチュード5を越える地震記録のデジタル化を行ない、スペクトル特性あるいは地震動の主軸方向に関して以下のような結果を得た。

(1) 橋台および脚中のGL=11m地点においては、各地震時の地震特性の相違にも関わらず、これらのスペクトルには、橋梁の固有な振動と判断される周波数成分が常時卓越しているのが見られる。

(2) 加速度地震動から求めた主軸の方向が、地表およびGL=-25m地点等において、比較的狭い範囲内に分布し、しかもその方向が、大略ではあるが、この地方の地殻が蓄えているひずみエネルギーの主方向、あるいはこの地方に起こる地震おもつと言われるべきの方向にほぼ対応している。

2. 強震記録

厚岸大橋は、図-1に示すように、北海道東部の厚岸湾と厚岸湖に架かる橋長465.5mの5径間ガルバー型ワレントラス橋である(図-2)。周辺地盤はいわゆる軟弱地盤であり、約60m付近の支持基礎である泥岩層にいたるまで、N値の小さな砂層と粘土層とが数mごとの互層をなしている。

地震計は、図-2に示すように、大橋の南側の地盤とP-4橋脚に、地表(橋台)にはSMAC-E2型($f_0=20\text{Hz}$, $\beta=0.6$)、地中(脚中)には動圈型($f_0=7.5\text{Hz}$, $\beta=15$)の加速度計が、地盤では地表(A0), GL=25m(A-25), および-68m(A-68)地点に、橋脚では橋台(P0), GL=11m(P-11), および-47m(P-47)地点に設置されている。

解析は、昭和46年以来、17回の地震時に観測された地盤における39組の記録と橋脚における35組の記録を用いて行った。表-1は各地震の地震諸元であり、また図3はその時の震央分布を示している。

図-4は、地盤と橋脚の各深さ位置において記録された加速度波形の最大加速度値の度数分布である。表-1の地震の中には、ある深さ位置の地震計が作動しなかったために記録が得られなかったものも

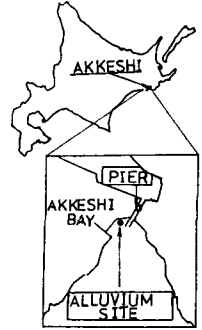


図-1 観測地

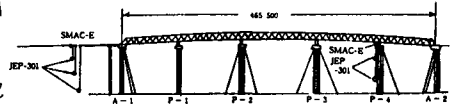


図-2 厚岸大橋と強震計の設置位置

	D A T E	Mag.	Epi. dis.	Depth
A	46.08.02	7.0	2.2/	60
B	47.03.26	6.1	1/1	50
C	47.05.11	5.8	4/9	60
D	47.09.08	5.0	7/5	60
E	48.06.17	7.4	9/0	40
F	48.06.17	5.7	5/3	40
G	48.06.24	7.1	1/5.5	30
H	49.09.20	5.5	4/4	50
I	49.11.09	6.5	2/5.8	1/30
P	52.08.14	4.8	5/8	50
J	53.05.24	5.5	5/9	70
K	53.06.14	5.0	4/4	40
L	53.12.06	7.7	2/5.4	100
Q	55.02.24	6.8	1/4.5	30
M	56.01.23	7.1	2/2.7	1/30
N	56.09.12	5.9	1/3.6	1/30
O	56.11.23	6.0	1/0.9	40

表-1 解析に用いた地震記録



図-3 震央分布(記号は表-1に対応)

あり、度数分布図の各深さ位置における度数合計は異なっている。地盤地中記録においてはその多くが、特に GL-68 m 地点においては、そのほとんどが、最大加速度値が 10 gal 以下となっている。各深さ位置における最大加速度値は、A0 (136 gal, E), A-25 (43 gal; C), A-68 (24 gal; C), P0 (59 gal, G), P-11 (45 gal; L), P-47 (31 gal; C) であり、それらはすべて橋軸直角方向で記録されている。(カッコ内の記号は表-1 に対応)

3. 解析結果

周波数特性 図-7 は、表-1 の中で地表および地中の記録がすべて揃っている代表的な地震として、53.12.6 (L) の記録を選び、地盤と橋梁の各深さ位置におけるフーリエスペクトルを例示したものである。

図-5 は、図-7 と同様求めた、各地震記録のフーリエスペクトル図における卓越周波数の度数分布を表したものである。なお、卓越がいくつかの周波数成分で見られる時には、主観的に判断によりその計数をを行った。その特徴として、

(1) 一般的に地盤ではいくつかの周波数成分で卓越する事が多いのに対して、橋脚では特定の周波数成分で卓越している場合が多い。

(2) 橋脚においては、各地震時の地震特性の相違にも拘わらず、常時 1.8~2.0 Hz 成分に強い卓越が見られる。この傾向は橋軸直角方向の P0 記録において非常に顕著であり、橋梁上部構造の固有振動の反映であると推察される。しかしながら、当地で観測された最も強い地震の 1 つである 48.6.17 の阪神半島沖地震 (E) の時には、図-6 に見るように、P0 の記録には、地盤の振動によると思われる周波数成分での卓越が強く現われている。

(3) 地盤においては、その地中記録では、卓越周波数のばらつきは大きいですが、地表記録では、比較的低下周波数成分で卓越する場合が多い。これは、主に、泥岩層の支持基盤を有する当該地盤内における S 波の重複反射によると思われる。(8)

(4) 基盤 (A-68) における 3~4 Hz 成分の卓越は、地中の A-25 や脚中の P-47 の地点でもその影響が見られるが、地表に近づくにつれその影響度は小さくなる。これも (3) 同様の理由によると判断される。

相関特性 図-8 は、地盤および橋脚において、それぞれ地表(橋台)と地中(脚中)との相互相関係数を求め、その最大値を度数分布表示したものである。

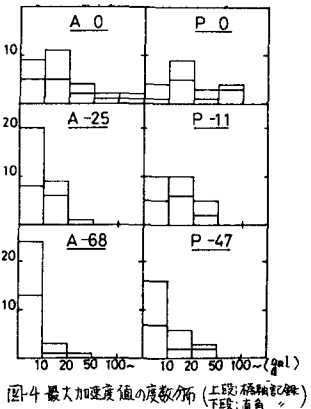
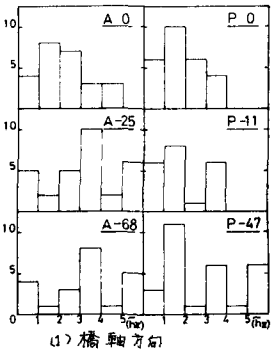
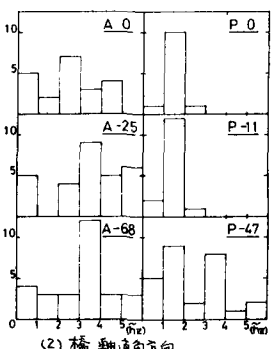


図-4 最大加速度値の度数分布 (上段:橋脚記録、下段:地盤記録)



(1) 橋軸方向



(2) 橋軸直角方向

図-5 卓越周波数の度数分布

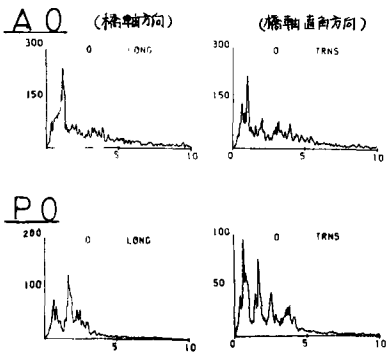


図-6 阪神半島沖地震のフーリエスペクトル

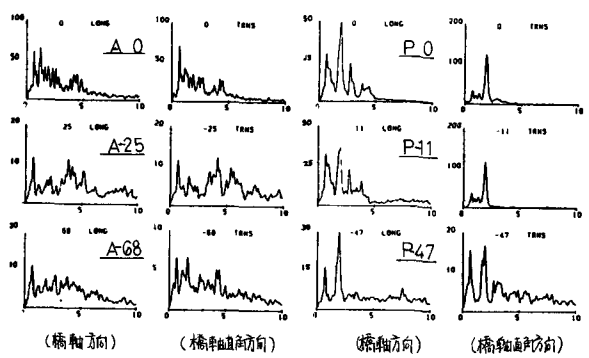


図-7 地盤と橋脚におけるフーリエスペクトル (53.12.6 記録)

橋軸方向と橋軸直角方向によつて、あるいは各深さ位置によつて、相互相関係数が最大となる波群が必ずしも一致していない事もあるので単純な比較は出来ないが、地盤での相関係数がA0とA-25, A0とA-68ともに、その多くが0.5未満であるのに対し、P0とP-11での係数が、特にその直角方向の記録において大きな値をとっている。最大はLの0.89である。

主軸方向分布

地震動の主軸に関しては、これまでにもいくつかの研究がなされてきているが、主軸の方向を観測地と震央あるいはすべり域と結ぶ方向と関連づけている報告が多い。⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁷⁾

図-9は地盤と橋脚で得られた記録を用いて、それぞれの高さ位置における最大および中間主軸の水平面内の方向分布を示したものである。但し、表-1中の記録には、特に橋脚の記録においては、上下動成分が記録されていないものが多いが、既往の研究と同様に、ここでも三成分から求めた最大と中間の主軸の方向が、ほぼ水平面に近い向きを持つことが確認されたので、水平二成分だけから求めた主軸も最大および中間主軸と表現した。また、統計解析の手法に依り、全エネルギーに対する各主軸方向のエネルギーの比を寄与率 (proportion) と表わした。

地盤のA0やA-25地点においては、とくに1つの例外を除いて、比較的狭い範囲内に最大主軸方向が分布し、しかも最大主軸と中間主軸とがA0とA-25とでは反転している。

一方、橋脚においては、P-11に同様の傾向が見られるが、P0では、その範囲がかなり広がったものとなっている。また、最大主軸の方向はP0, P-11ともにA-25と同じ方向を示すものが多いが、その方向が中間主軸となっているものもP0で2/12, P-11で3/12となっている。

図-10と図-11はそれぞれ文献(3)から引用したものであるが、図-10は、三角測量の結果から求められたこの地方の地殻に蓄えられてい

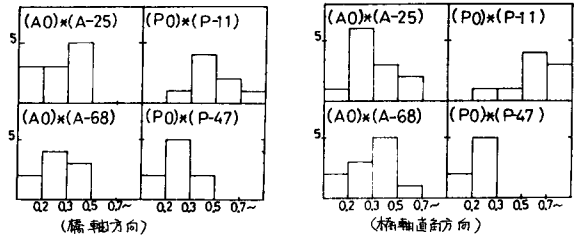


図-8 地盤と橋脚における相互相関係数の度数分布 (橋軸-相関係数)

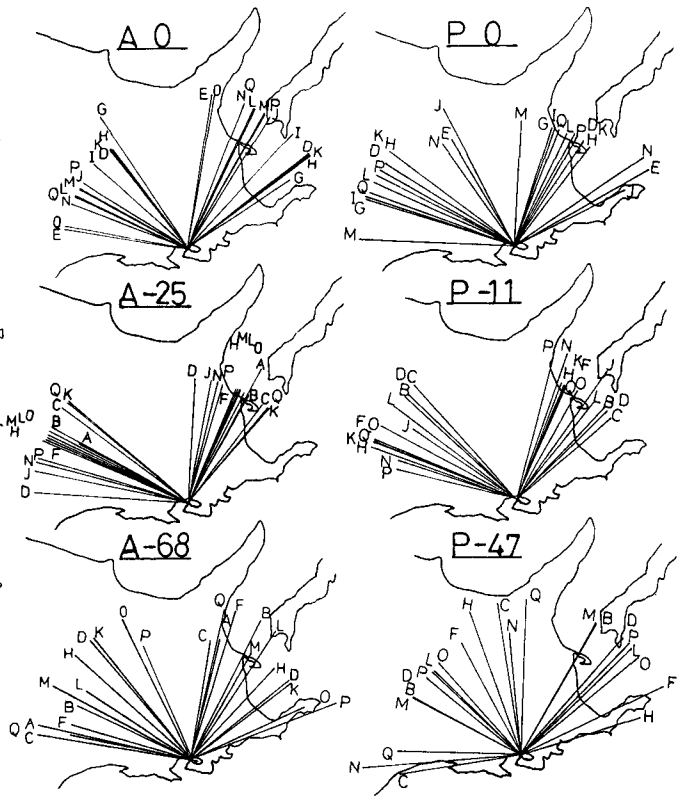
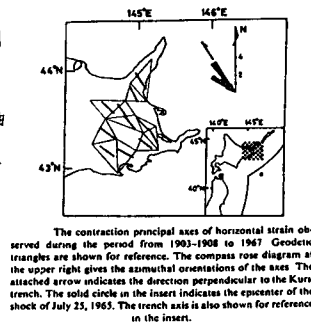


図-9 地盤と橋脚の各高さ位置における主軸方向の分布 (長軸-最大主軸, 短軸-中間主軸)



The contraction principal axes of horizontal strain observed during the period from 1903-1908 to 1967. Geodetic triangles are shown for reference. The compass rose diagram at the upper right gives the azimuthal orientations of the axes. The attached arrow indicates the direction perpendicular to the Kuril trench. The solid circle in the inset indicates the epicenter of the shock of July 25, 1965. The trench axis is also shown for reference in the inset.

図-10 北海道東部の主ひびき方向 (文献(3)より引用)

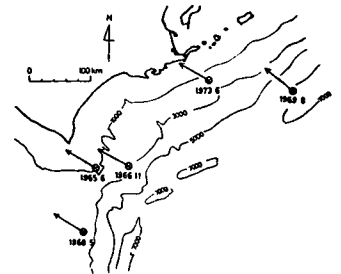


図-11 北海道東部で起きた地震のすべり方向 (文献(3)より引用)

るみずみの方方向を示したものであり、図-11は、この地方で過去に起きた地震のすべりの方向を示しており、「すべりの方向が大体N60°W」である事を表わしている。

図-9のA0、A-25、P0 あるいはP-11の地点における主軸の方向が、図-10の主みずみ方向、あるいは図-11のすべりの方向にほぼ対応していることは興味深い結果である。

地盤のA-68や、橋脚のP-47地点において、その最大主軸方向の分布はよきまばらつきを示しているが、これを説明する理由は未だ不明である。

地盤のA0とA-25、A0とA-68、橋脚のP0とP-11、P0とP-47の間において、主軸同士の間角(最大が中間かいずれが近い軸同士の間角)の大きさを求めてみると、A-25(P-11)の方がA-68(P-47)よりA0(P0)との間角が小さく、A-25では7/10、P-11では6/8の割合で、±20°以下の間角となっているが、先に述べた周波数特性や相互相関係数とはちがって、P0とP-11の主軸方向分布の間には際立って相関は見られない。

図-12は、地盤と橋脚の各深さ位置において、最大主軸方向の全エネルギーの寄与率を、j地点で地震動が観測されている記録に対して求めたものである。同様に、図-13は、この寄与率の累積分布曲線

である。地盤においては、A-25m地点の最大主軸方向の全エネルギーの寄与率が大きくなっているが、これは、A-25m地点における地盤の震動特性が強い方向性を持っていることと互意味している。一方、橋脚においては、図-13の左側の図に見られるように、脚中の点jが、地盤と比較して方向性がやや弱いのに対し、天端では、地表よりも強い方向性が与えられている。これは、橋梁の上部構造の振動の方向性による影響と思われる。

4. あとがき

厚岸入橋の近傍地盤と橋脚で得られた強震記録を用いて、周波数特性や主軸方向の分布などについていくつかの基礎的な解析結果を報告したが、得られた結果の中には、その解釈に不明を残しているものがある。例えば、地盤における主軸方向の分布が、A0とA-25地点としては、反対になっているが、これは、データ不足による単なる偶然であるのか、はたまた、当該地盤内の震動特性が与える局地的効果であるのか、あるいは、地震のすべりの方向との対応が支持地盤内のA-68地点ではなく、A0やA-25であるのか何故か等の検討が今後に残されている。観測地が半島部であるので、ここで得られた主軸方向の傾向的な分布は、この半島部の地盤震動の現われであり、今回報告した主みずみ方向や震源におけるすべりの方向との対応は偶然であるとも考えられ、今後さらに主軸方向に与える震源や観測地盤の影響を究明していかなければならない。

最後に、本研究の実施にあたり、御討議下さいました美唄専修大学の金子孝吉先生と北大工学部佐々木康孝氏に深く感謝します。また、本研究は文部省科学研究費(奨励A)により行いました。記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 星谷他; 土木学会論文集, 第286号, 1977
- (2) 渡部; 昭和49年度建築研究所年報
- (3) 多田; 地震, 第27巻, 1974, 120-128
- (4) SHIMAZAKI; P. E. P. I., Vol. 6, 1972, 397~404
- (5) SHIMAZAKI; P. E. P. I., Vol. 8, 1974, 148~157
- (6) ABE; P. E. P. I., Vol. 7, 1973, 143~153
- (7) Kubo; E. E. R. C., 76-6, 1976
- (8) 芳村他; 6-th J. E. E. S., 1982, 281~288

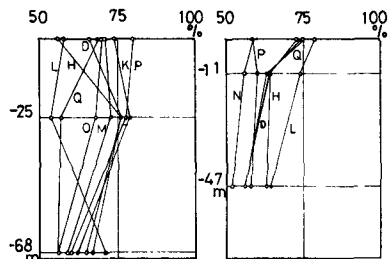


図-12 各深さ位置における最大主軸方向の寄与率

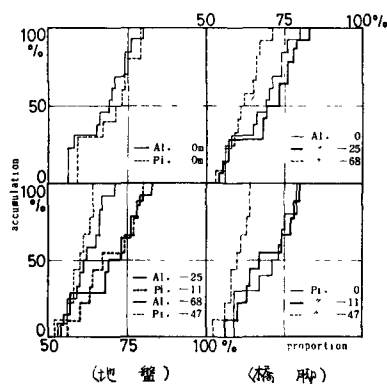


図-13 最大主軸方向の寄与率の累積分布(横軸-寄与率)