



海底発破に伴う地盤振動の性状

後藤英一*, 山下理雄**, 川上 純***

本州四国連絡橋の児島～坂出ルートの南北備讃瀬戸大橋建設工事において行われた海底発破時に地盤振動の計測を行い、その振動性状について検討した。発破の薬量は360～3000kgであり、爆源からの距離は22～2750mである。

地盤振動の最大振幅は、陸上発破の場合と同程度であった。また、軟らかい地盤上での振幅は、岩盤上の振幅の2～3倍と大きくなっていた。

しかし陸上発破の場合と異なり、岸壁近くの地盤においては、海中を伝播してきたwater-waveが再び地盤に入射する高振動数の波動が存在することが分かった。したがって、高周波振動を嫌う機器や設備がある場合、十分な注意が必要である。

1. はじめに

航路の浚渫や海中構造物の基礎工事における硬質岩盤の海底掘削では、海底発破が行われる場合が多い。この際大きな問題となるのが周知のように水中衝撃圧と地盤振動である。

陸上発破から発生する地盤振動の振動性状や最大振幅については、多くの研究¹⁾があり、発破振動の予測がある程度可能となっている。しかし、海底発破の場合は、発破地点の上部に海水があり水圧が加わっていること、また地盤振動の伝播経路上にも海水がある等の点で陸上発破の場合と異なっている。

筆者等は、本州四国連絡橋の児島～坂出ルートの南北備讃瀬戸大橋建設工事において行われた海底発破時に地盤振動の計測を行い、その最大振幅と振動性状について検討した。以下のその結果について報告する。

2. 海底発破および地盤振動計測の概要

1) 発破位置

南北備讃瀬戸大橋建設工事では、3P, 4A, 5P, 6

1992年9月7日受理

*大成建設株式会社技術本部

〒169 東京都新宿区 3—25—1

TEL 03-5386-7511

FAX 03-5386-7576

**本州四国連絡橋公団企画開発部

〒105 東京都港区虎ノ門5-1-5虎ノ門45森ビル

TEL 03-3434-7281

FAX 03-3578-9298

***大成建設株式会社技術研究所

〒245 横浜市中区戸塚区名瀬町 344—1

TEL 045-812-1211

FAX 045-812-1247

Pおよび7Aにおいて橋台基礎掘削のための海底発破工事が行われた。この海底発破に伴って発生する地盤振動の周囲への影響が懸念されたため、計測を行いながら工事を進めていく方法をとった²⁾。ここでは筆者等が計測を行った3P, 4A, 5Pおよび6P発破に伴って発生する地盤振動を取り扱う。

発破位置及び地盤振動の計測位置をFig. 1に示す。発破方式は、全発破が終了した後に掘削を行ったので、すべて一自由面発破となっている。海底地盤は風化花崗岩から成っているが、6Pの北側は岩盤が露出しているのに対して、南側の番の州では沖積層が10～15m程度の厚さで分布している。

3P, 4A, 5P地点の発破時には、S6, S11～S13で計測を行った。また、6P発破時には約500m離れた番の州に石油製油所があり、その諸施設への影響が懸念されたため、この測定点の他にS1～S5においても計測を行った。S11～S13の北側の測定点は岩盤上の測点であるが、S1～S6の測点は軟らかい沖積層上の測点である。Table 1に示すように発破の薬量は360～3000kgであり、また爆源からの距離は22～2750mと広範囲に及んでいる。

2) 計測方法

地盤振動の測点は、すべて動電コイル型の3成分速度計を用いた。S1～S6およびS11ではSM-335(東京測振社製)を、S-12, S-13にはHS-1-LP-3D(Geo Space社製)を用いた。SM-335の振動数特性は1.4～120Hzで平坦であり、HS-1-LP-3Dは4.5～100Hzで平坦である。速度計の感度方向は、発破から遠ざかる水平方向をR、発破に向かって右向きの水平方向をT、鉛直上方向をVとした。

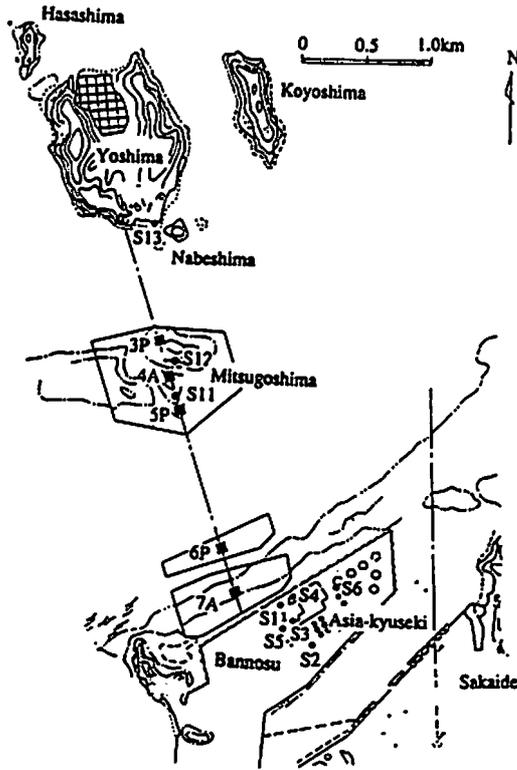


Fig. 1 Under water blasting areas and ground vibration measuring points (S1~S6, S11~S13)

Table 1 Blasting and measurement condition

| blasting point | 3P | 4A | 5P | 6P |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| water depth (m) | 0~4 | 0~8 | 21~27 | 31~35 |
| charge weight (kg) | 700~3000 | 700~3000 | 480~2016 | 360~1080 |
| distance (m) | 22~2330 | 168~2070 | 470~1760 | 584~2750 |
| number of measurements | 7 | 6 | 6 | 21 |
| number of measurement points | 3 | 3 | 3 | 9 |

3. 発破振動の最大速度振幅

1) 3P~6P工事時の発破振動実験式

発破振動の最大振幅値は、発破の薬量、震源からの距離、地盤の条件、発破条件等の種々の要因により影響される。これらの要因のうち最も影響の大きいものは、発破の薬量と震源からの距離である。ここでは、地盤振動の最大速度振幅と薬量と距離との関係について検討する。

通常、最大速度振幅 A (cm/s) は、発破点からの距離 D (m)、薬量 W (kg) を用いて以下の形で整理される場合が多い。

$$A = K \cdot W^m \cdot D^n \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 K は定数、 m は薬量指数、 n は距離減衰指数である。上式を用いて測定された全データの重回帰分析を行った結果を Fig. 2 および Table 2 に示す。なお、岩盤上で測定されたデータと沖積層上で測定されたデータとは、明らかに異なっているので、別々に取り扱った。 V_{max} 、 R_{max} 、 T_{max} は、それぞれ、 V 方向、 R 方向、 T 方向の最大速度振幅である。

Table 2 に示すように、薬量指数 m は 0.42~0.78 であり、距離減衰指数 n は -1.69~-2.31 であった。なお、

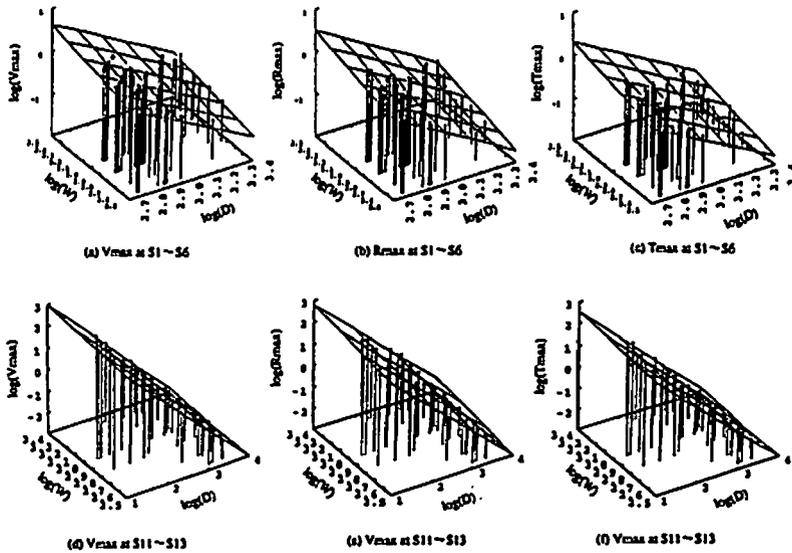


Fig. 2 Multiple regression analysis of maximum amplitude, charge weight and distance

Table 2 Result of multiple regression analysis using equation (1)

| Component | at rock surface | | | at soil surface | | |
|-----------|-----------------|------|-------|-----------------|------|-------|
| | K | m | n | K | m | n |
| Vmax | 1900 | 0.47 | -1.89 | 46670 | 0.53 | -2.18 |
| Rmax | 64 | 0.78 | -1.69 | 43550 | 0.60 | -2.31 |
| Tmax | 773 | 0.42 | -1.76 | 5150 | 0.55 | -1.99 |

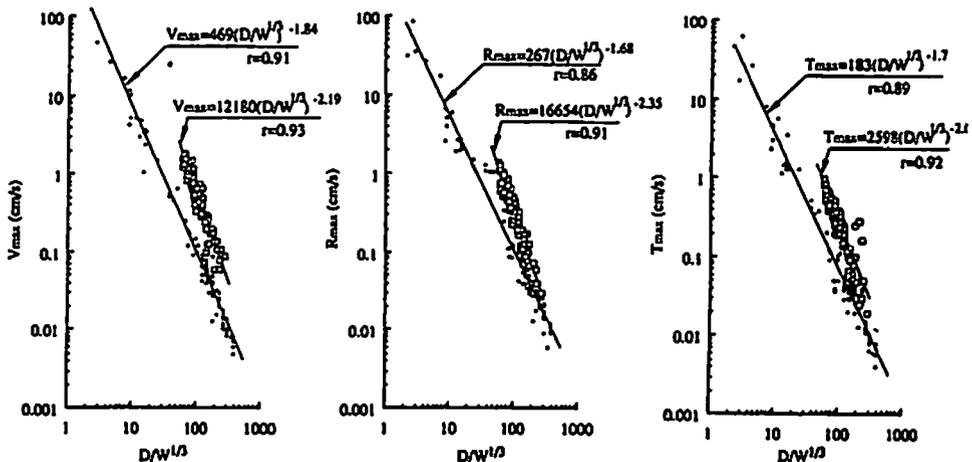


Fig. 3 Relation between reduced distance ($D/W^{1/3}$) and maximum velocity amplitude (●: measured at rock surface, □: measured at soil surface)

各振動方向のうちV方向がほぼ最大となっていた。

以上はmとnを独立に求めたが、通常は換算距離と呼ばれる $D/W^{1/3}$ を使用して最大速度振幅を整理する場合が多い。これは、幾何学的相似則が成立してい

ば、速度振幅は換算距離の関数となることを利用したものである。Fig. 3に換算距離と各成分の最大速度振幅に関係を示す。この図から分かるように、各測定値はほぼ直線に乗っており、換算距離を使用しても実用

上は問題がないものと考えられる。

なお、Fig. 3の●印は発破地点より北側の岩盤上で測定されたデータであり、□印は発破地点より南側の沖積層を伝播し、沖積層上で測定されたデータである。沖積層上での測点の方が岩盤上の測点より最大速度振幅が大きくなる傾向がみられる。

2) 他の発破振動推定式との比較

発破振動の実験式としては、最大変位振幅あるいは最大速度振幅に関して求められたものがある。そのうち、最大速度振幅に関する代表的なものとして以下のものがある³⁾。①の旭化成社式および②の日本化薬社式は陸上発破での実験式であり、③の大三島実験式は海底発破のものである。

①旭化成社式

$$A = k \cdot W^{2/3} \cdot D^{-n} \dots\dots\dots (2)$$

- n : 発破地点が岩質のとき n=2.0
- 発破地点が粘土質のとき n=2.5~3
- k : 芯抜き発破のとき k=5~10
- ベンチ発破のとき k=2~5
- 30m < D < 1500m, 10kg < W < 3000kg

②日本化薬社式

$$A = k \cdot W^{3/4} \cdot D^{-2} \dots\dots\dots (3)$$

- k : 岩盤中の発破の時 k=600
- 5 < D < 3000m, 0.2kg < W < 4000kg

③大三島実験式

$$A = 770 \cdot W^{3/4} \cdot D^{-2/4} \dots\dots\dots (4)$$

- 経路中には軟質層あり
- 10m < D < 440m, 18kg < W < 141kg

以上の実験式と今回得られた実験式とを比較する。これらの式は、薬量指数と距離減衰指数がそれぞれ異なっているのでそのまま比較することはできない。そこで、薬量を100kgおよび1000kgの場合についての比較を行った。なお、①の旭化成社式では、発破地点が岩盤の場合の値を採用した。また、今回得られた実験式のうち、最も振幅の大きいV方向の実験式と比較した。Fig. 4 (a)が薬量W=100kgの場合であり、Fig. 4 (b)が薬量W=1000kgの場合について比較したものである。

今回の北側測点の岩盤上での実験式は、日本化薬式および旭化成式とほぼ一致しており、岩盤上の測点(経路中にも軟質層がない)では海底発破による地盤振動は陸上発破の場合とほぼ同程度であると考えられる。また、南側測点の沖積層上での実験式は、やはり軟質層上での測定結果である大三島式に近くなっている。

陸上発破においても、発破地点および測定点の地質が軟らかい場合は、岩盤の場合に比べて振幅の距離減衰指数が大きくなり、また最大振幅自体は2~3倍大きくなると言われており、海底発破でも同様な傾向があると言える。

4. 海底発破から発生する振動の性状

Fig. 5は、5P地点発破時のS12とS5で測定された地盤振動波形である。海底発破ではS5での波形のように、測点によっては波動の後半の部分に通常の陸上発破では見られない高振動数成分が記録される場合があった。

Fig. 6は、筆者が測定した水中圧力の波形例であり、

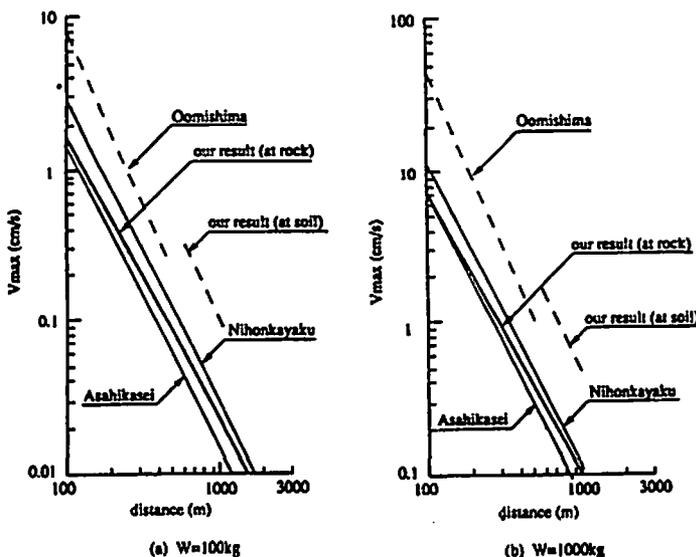


Fig. 4 Comparison of regression curves of amplitude

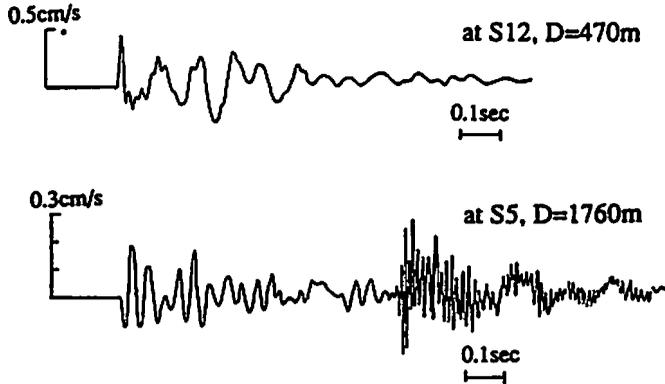


Fig. 5 Example of ground vibrations measured at S12 and S5

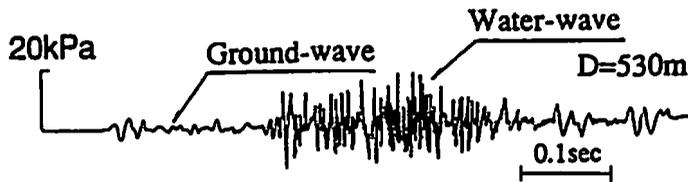


Fig. 6 Example of water pressure generated by underwater blasting

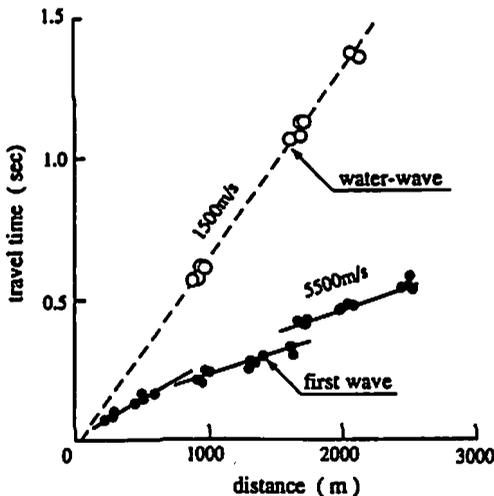


Fig. 7 Relation between travel time and distance

この波形にも地盤振動と同様に低振動数成分と高振動数成分が存在している。海底発破の場合、爆薬の爆発によって発生する応力波はまず地盤を伝播するが、発破による衝撃波や爆発ガスが海底に達すると新たな応力波を生じ海水中を伝播する。前者をGround-wave、後者をWater-waveと称しており⁴⁾、水中圧力波形には両者が記録される。したがって、地盤振動波形の高振動数成分は、海水中を伝播してきたWater-waveが岸壁において再び地盤に入射したものと考えられる。

実際に、地盤振動の初動とこの高振動数成分の初動の伝播時間と距離との関係はFig.7のようになっており、高振動数成分の伝播速度は約1500m/sと海水中の弾性波の伝播速度に近くなっていた。

また、Fig.5に示したS12地点の振動波形に高振動数成分が記録されていないのは、発破地点と測点S12の間に4A地点の岩礁があるため、Water-waveが直接入射しなかったためと考えられる。

このように、岸壁の近くの測点では、海底発破によって発生する地盤振動はWater-waveが再び地盤に入射した高振動数成分の波動が存在する点で陸上発破とは異なっている。Water-waveの振幅はほぼ距離の -1 乗に比例して減衰するため²⁾、遠距離ではこの波動が卓越してくる。しかし、この波動は高振動数成分であるため構造物や人体感覚に与える影響は少ないが、制御機器のリレーや精密機器に対しては悪影響を及ぼす可能性が高く、十分な注意が必要である。

6. まとめ

本州四国連絡橋・児島～坂出ルートの南北備設瀬戸大橋建設工事における海底発破工事において、海底発破に伴う地盤振動の計測を行った。そして、地盤振動の最大振幅およびその性状について検討を行った。

地盤振動の最大成分である上下方向の最大値 V_{max} について整理すると、

$$V_{max} = 1900 \cdot W^{0.47} \cdot D^{-1.69} \quad (\text{岩壁上の測点})$$

$$V_{\max} = 46670 \cdot W^{0.53} \cdot D^{-2.18} \text{ (沖積層上の測点)}$$

の実験式が得られ、陸上発破の実験式と同程度であることが分かった。

また、海底発破では、岸壁近くの地盤において、海中を伝播してきたwater-waveが再び地盤に入射する高振動数の波動が存在する場合があります、近傍に高周波振動を嫌う機器や設備がある場合は十分な注意が必要であることが分かった。

最後に工事・計測・研究を通じて御指導頂いた総合安全工学研究所の福山委員長をはじめとする各委員に対して厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 例えば、畑中元弘、建設工学研究所報告、3、(1962)
- 2) 南北備讃瀬戸大橋下部工中工区(その1)工事、大成建設㈱、㈱大林組、前田建設工業㈱、東亜建設工業㈱、共同企業体「南北備讃瀬戸大橋下部工中工区(その1)工事、発破影響計測結果報告書」、pp.1~87(1981)
- 3) 本州四国連絡橋公団、日本産業火薬会、「発破掘削法の検討報告書」、pp.22~24(1973)
- 4) C. L. Pekeris, "Theory of Propagation on Explosive Sound in Shallow Water", *Gelo. Soc., America Memoir*, 27, pp.1~117(1948)

Study on characteristics of ground vibrations generated by underwater blasting

by Eiichi GOTO*, Michio YAMASHITA**
and Jun KAWAKAMI***

Ground vibrations by underwater blasting were measured during construction of the Namboku-Bisanseito Bridge on the Honshu-Shikoku Route. Blasting charge used varied from 360 to 3000kg, while ground vibrations were monitored at different points with distances ranging between 22 and 2750m from the blasting area.

Maximum amplitudes of ground vibration were similar to those generated by inland blasting. Amplitudes of ground vibration measured on soft grounds were 2 to 3 times greater than those measured on rock surfaces.

Unlike inland blasting, ground vibration with a relatively high frequency was also observed in the vicinity of water front. This was probably because water-wave travelled through sea water and incidented ashore again, demonstrating that a great care has therefore to be taken in the arrangement of monitoring equipment when the instruments used are sensitive to high frequencies.

(*Technology Division Taisei Corporation, 3-25-1 Hyakunincho, Shinjuku, Tokyo, 169 Japan)

**Honshu-Shikoku Bridge Authority, Toranomom-45-Mori Bldg., 5-1-5 Toranomom, Minatoku, Tokyo, 105 Japan)

***Technology Research Center, Taisei Corporation, 344-1 Nasemachi, Tot-sukaku, Yokohama, 245 Japan)