

海底オーバーバーデン発破に起因する振動の 予測とその実測結果について

佐々宏一*, 伊藤一郎*, 長坂 進**

海底にある厚さ 20~25m の堆積層を貫いて穿孔し、その下の花崗岩を無自由面状態で発破するという非常に特殊な海底オーバーバーデン発破に起因する地盤振動の大きさ、およびその時間的変化状態を、電子計算機による発破シミュレーションの結果より推定した。この報告では、このシミュレーションの方法および結果を示すとともに、これと、上記の特殊発破に起因する地盤振動の実測結果とを対比して論じた。

1. 緒言

近年、国土開発等のために、既設構造物の近傍で発破作業を実施せねばならない場合がしばしばある。このような場合には発破作業の計画に際して、発破振動の大きさを予測し、その大きさが構造物等に被害を与えないような大きさとなるような発破を計画するか、または、被害が発生する可能性があるかと予測されたならば、それに対して十分な対策をたてたのちに発破を実施する等の配慮が必要である。

発破振動の大きさは発破法や地盤条件などによってかなり変化するが、陸上の通常の発破の場合には、過去に実施された類似した条件での発破に起因する振動の実測データがあれば実験式等を用いてある程度の推定は可能であり、さらに、現場で小薬量の試験発破が実施できる場合には、その試験発破に起因する振動を測定すれば、その現場で薬量の多い発破を実施した場合に発生する振動の予測は可能である。しかし、非常に特殊な条件の発破であり、さらに事前に小薬量の試験発破が実施できないという制約がある場合には、従来の実験式を用いて発破振動の大きさを推定することは困難である。

本州四国連絡橋公団が香川県坂出市の番ノ州工業地帯沖で実施する計画をたてた海底穿孔発破は、日本で最初のオーバーバーデン発破と呼ばれる特殊な海底穿孔無自由面発破であり、さらに、事前に小薬量の試験

発破が実施できないという制約があった。その上、この現場は発破地点よりほぼ 400m 離れた埋立地に石油精製工場があるという非常に困難な条件の現場である。したがって、発破振動の予測は非常に重要であるにもかかわらず、その予測はかなり困難であるという状況であった。

そこで今回は、電子計算機を用いて上記の特殊発破のシミュレーションを実施し、発破振動を予測した。この報告では、今回実施したシミュレーションの結果および本州四国連絡橋公団が、シミュレーションの結果を参考にして実施した試験発破の際に発生した地盤振動の実測結果、ならびにその両者を対比した結果を示すことにする。

2. 現場の状況

発破振動の予測計算を実施し、さらにその値と実測値とを対比した現場は、本州四国連絡橋児島一坂出ルートに計画されている南備讃瀬戸大橋の最も坂出寄りのアンカー基礎部 (7A) であり、その位置は Fig. 1 に示すように、番ノ州埋立地の北側の岸壁よりほぼ 250m 北へ出た海底である。なお、Fig. 1 には、7A 地点で試験発破を実施した際にその振動を測定した測点の位置も示してある。さらに、Fig. 2 はこの区域の計画ルート沿いの断面図を示したものである。Fig. 2 に示すように、この地区は海底に厚さが 20~30m の砂と粘土の互層からなる堆積層があり、その下に基盤となる花崗岩があるという地質となっており、7A のアンカー基礎面としては -50m の位置 (花崗岩) が計画されている。-50m の位置の岩盤面を出すため

昭和52年3月11日受理 第5回岩の力学国内シンポジウムで発表
*京都大学工学部資源工学教室 〒606 京都市左京区吉田本町
**本州四国連絡橋公団坂出工事事務所 〒762 坂出市京町3-9-8

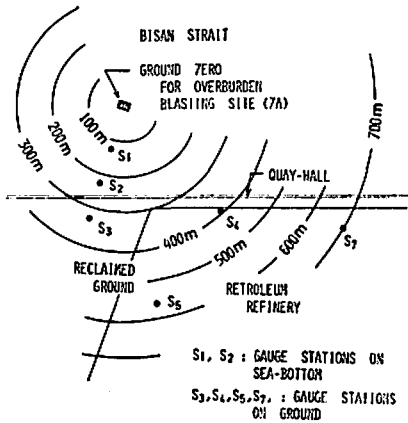


Fig. 1 Blasting site and gauge stations.

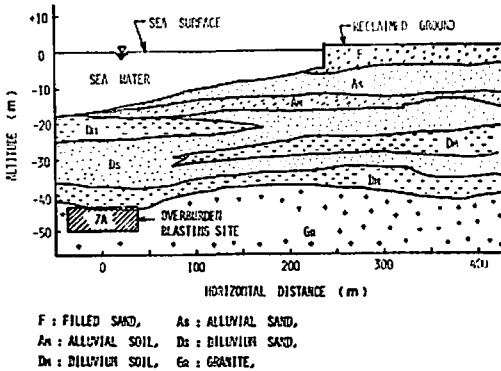


Fig. 2 Geological section along the line from the blasting site (7A) to the point of interest.

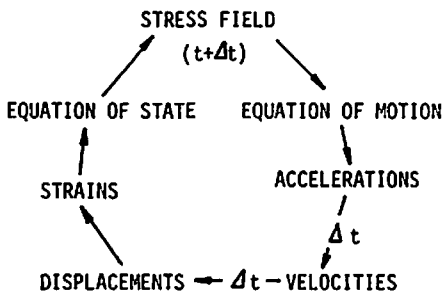


Fig. 3 Feedback loop for stress wave.

の発破は、花崗岩の上にある堆積層をあらかじめ掘さくし、しかるのち、花崗岩に穿孔し発破するという発破工法ではなく、堆積層はそのままにしておき、堆積層の上に自揚式作業台 (SEP) を設置して堆積層をつらぬいてその下の花崗岩に穿孔し、花崗岩部に装薬して無自由面状態で発破し、掘さく作業に先だてて岩石を破碎しておくという特殊発破工法 (オーバーバーデ

ン発破工法) である。

3. 発破振動を予測するためのシミュレーション

3.1 シミュレーションの方法

発破シミュレーションを行うために用いた計算機プログラムは、米国において地下核爆発にともなう現象のシミュレーション等¹²⁾に用いられた TENSOR コード¹³⁾とほぼ同じ考え方のもとに筆者らが製作した DAYS-2 コードであって、計算方法の概念は、Fig. 3 に示すように、ある時間 ($t=t_0$) に地盤内に存在している応力場にラグランジュ座標系で示された運動方程式を適用し、これを差分近似を用いて解いて $t=t_0$ 時間に対応するモデル内の各点 (ラグランジュ座標の交点) の変位加速度を求め、これを Δt なる微小な時間増分で 2 回積分することにより $t=t_0 + \Delta t$ 時間における各点の変位を求め、ついで、ラグランジュ座標で囲まれている要素内のひずみをそれを取り囲んでいる 4 つの交点の変位より求め、そのひずみに材料の状態方程式を適用して $t=t_0 + \Delta t$ 時間に対応する材料内の応力状態を算出するというように、Fig. 3 に示したループを、モデル内の各点について Δt なる時間増分で回すことによって、応力波の伝播にともなう動的応力を算出するという方法である。

3.2 現場近傍の地盤の波動の伝播にともなう減衰特性

現場近傍の地盤の状況は Fig. 2 に示したように、埋土、堆積層、花崗岩から成っており、いずれも海水で飽和している。発破振動をシミュレーションによって予測するためには地盤を構成している各地層内を波動が伝播した場合に、その振幅が伝播とともにどのように減衰するかを知る必要がある。そこで現場近くの番ノ州埋立地において、地盤を構成している各層内の波動の伝播にともなう減衰特性の測定を行った。測定は、まず、長さ 30m の垂直孔 6 本を 10m 間隔で穿孔し、その両端の孔を発振孔とし、その孔内の深さ 9m, 19m, および 30m の位置で 100g のペントライトを爆発させ、その爆轟衝撃によって地盤内へ投射された波動の振幅を、中央部の 4 本の受振孔内の発振点と同一深度の位置に埋め込んであるピックアップを用いて測定し、上記の深度の位置にある地層内の波動の振幅の伝播にともなう減衰状態を測定した。なお、この場所の深さ 9m の位置は沖積層砂質土、19m の位置は洪積層砂質土、30m の位置は花崗岩であった。この測定によって、波動の伝播にともなう減衰は、沖積層砂質土内では、 $A = K_1 \cdot r^{-1.3}$ (1) 洪積層砂質土内では、 $A = K_2 \cdot r^{-1.7}$ (2) 花崗岩層内では、 $A = K_3 \cdot r^{-2.1}$ (3) なる式で近似しうることが明らかとなった。ここに、

Table 1 Characteristics of the materials in the model shown in Fig. 4

Symbol	Material	Density g/cm ³	Young's Modulus kg/cm ²	Poisson's ratio	P-wave velocity m/s	S-wave velocity m/s
1	Granite CH	2.55	3.8×10 ⁵	0.24	4150	2430
2	Granite CM	2.48	2.4×10 ⁵	0.36	3990	1870
3	Granite CL	2.30	1.3×10 ⁵	0.40	3450	1410
4A	Sandy soil	2.10	7.0×10 ⁴	0.479	1660	332
4B	Fill sand	2.05	1.2×10 ⁴	0.497	1790	138
5B	Clay (2)	1.80	2.1×10 ³	0.493	1670	196
5C	Clay (1)	1.80	3.4×10 ³	0.489	1700	249
6	Sea water	1.00	—	0.50	1500	0

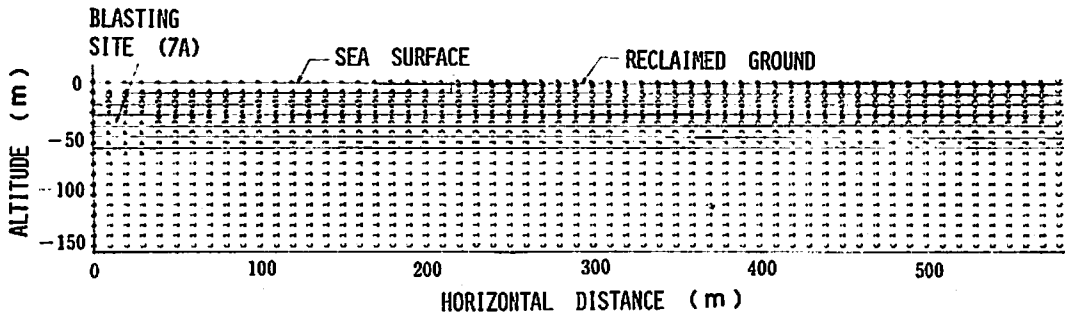


Fig. 4 DAYS-2 model zoning for the computation of ground motion at petroleum refinery on reclaimed ground.

A は波動の振動速度振幅, r は爆源からの距離, K_1 , K_2 , K_3 は定数である。

この測定で各層内の波動の伝播特性が明らかとなったので、この結果と別に実施した地質調査の結果等を用いて、シミュレーションモデルを構成する各要素の諸特性を求め、シミュレーションモデル内の各層内の波動の減衰状態が上記の実測結果と一致するようにした。

3.3 シミュレーションモデルと条件

Fig. 2 に示した地質調査結果を参考にして、7A地点で発破を実施した場合に、番ノ州埋立地に発生する発破振動を予測するためのシミュレーションモデルを作成した。Fig. 4 は、モデルを構成している要素の特性を記号(数字を含む)で代表させて、それぞれの要素がある位置に印字することによってモデルの状態を示した図である。なお、図に示した記号と要素の特性との関係は Table 1 に示してある。ただし、Fig. 4 においてモデルの境界にCが印字されている境界は連続境界と考えられる境界であって、この境界では波動は反射せず、境界にある材料がこの境界以遠に無限に続いているとみなしうる境界であり、記号 F が印字されている境界は自由面、S が印字されている境界

は垂直方向には移動することができるが、水平方向には移動が拘束されている境界、すなわち移動境界(Slide)であることを意味している。また、記号 P が印字してある要素は、後述するように、小さいモデルを用いて求めた爆源近傍の応力状態が入力される要素である。なお、シミュレーションは爆源の中心を通る鉛直線を軸とする軸対称問題とし、密度が 1.6g/cm³、爆速が 7,000m/s の GX-1 ダイナマイト 360 kg を海面下 50m の位置で斉発で起爆した場合について実施した。

さて、爆轟衝撃にともなう現象のシミュレーションを行う場合には、爆源から計算を始めなければならない。この場合、爆薬の爆轟圧が入力データとなるから爆薬の大きさをラグランジュ座標で区切られる要素の大きさ、および、採用すべき時間増分 Δt の値が規定される。一方、DAYS-2 コードを用いて効率よく計算できる要素の数は約 3,000 以下である。上記の2つの制限があるため、今回実施したシミュレーションは、大きさの異なる3種のモデルを使用して行った。すなわち、まず、大きさが 4.3cm×20cm の要素を用いて 5m×1.6m の大きさのモデルを作り、爆薬のごく近傍に発生する応力状態を計算し、ついで、この計

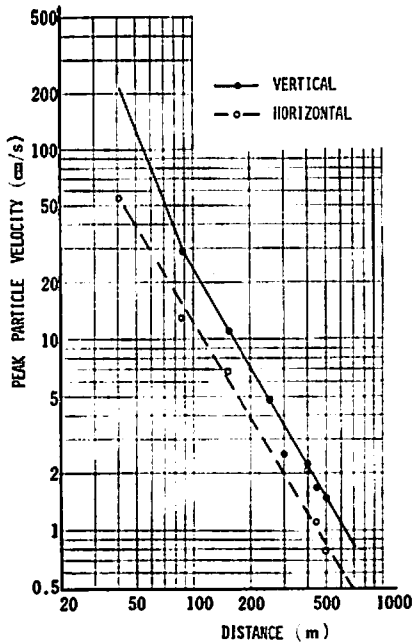


Fig. 5 Peak particle velocity computed by a DAYS-2 code vs. distance from the shot point for the blasting of 360 kg GX-1 dynamite at 7A.

算結果を大きさが50cm×50cmの要素を用いた16m×20mの大きさのモデルの入力として破壊圏外部の応力状態を計算し、さらに、この計算結果を用いてFig. 4に示した160m×580mの大きさのモデルの入力データを作成し、それを用いて番ノ州埋立地の振動を予測するシミュレーションを行った。この詳細に関しては前報を参照していただきたい。⁵⁾

3.4 シミュレーションの結果

得られた結果の一例として、Fig. 5は7A地点で

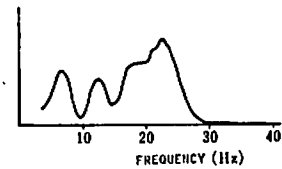


Fig. 7 Spectral amplitude of the computed particle velocity shown in Fig. 6

薬量が360kgの斉発発破を実施した場合に、番ノ州方向に発生する発破振動の最高値と発破中心からの距離との関係を示したものであり、Fig. 6は爆源から300mの位置の番ノ州埋立地に発生する地盤振動の垂直成分の時間的な変化状態を示したものである。さらに、Fig. 7はFig. 6に示した振動波形の周波数分析結果である。上記のシミュレーションは7A地点で昭和50年2月に実施された試験発破に先だって、昭和49年に実施した。

4. 発破振動の実測結果

本州四国連絡橋公団は昭和50年2月から3月にかけて上記の7A地点で4回の試験発破を実施した。このうちの2回は薬量180kgの斉発発破であり、他の2回は段当りの薬量が80kg、段間隔が約1秒の遅発発破である。なお、使用した爆薬はいずれもGX-1ダイナマイトである。この試験発破に起因する振動は、Fig. 1の平面図に $S_2 \sim S_7$ までの記号で示した各点で測定した。使用したピックアップは、測点 S_2 , S_5 , S_7 が固有振動数が4.5Hzの動電型振動速度計(Geospace GSC-11D)、 S_3 が国際機械振動のVP 9212型振動速度計(固有振動数1Hz)、 S_4 が固有振動数1Hzの明石製作所製V261型振動速度計、 S_6 が沖電機製WS3203型振動加速度計である。

測定結果の一例として、Fig. 8は7A地点で薬量

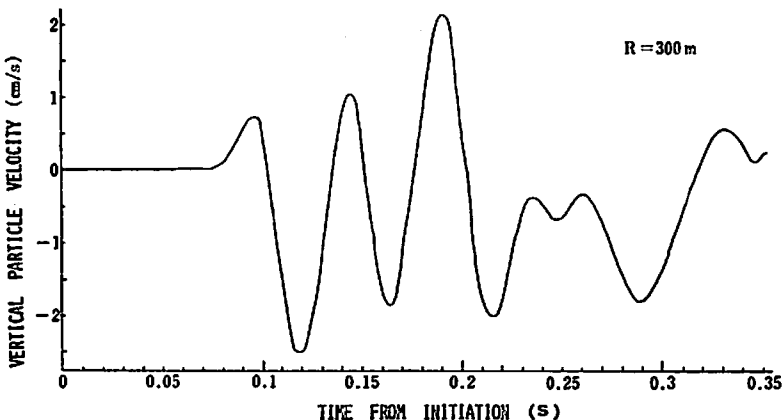


Fig. 6 Computed particle velocity on the ground at 300m from the shot point.

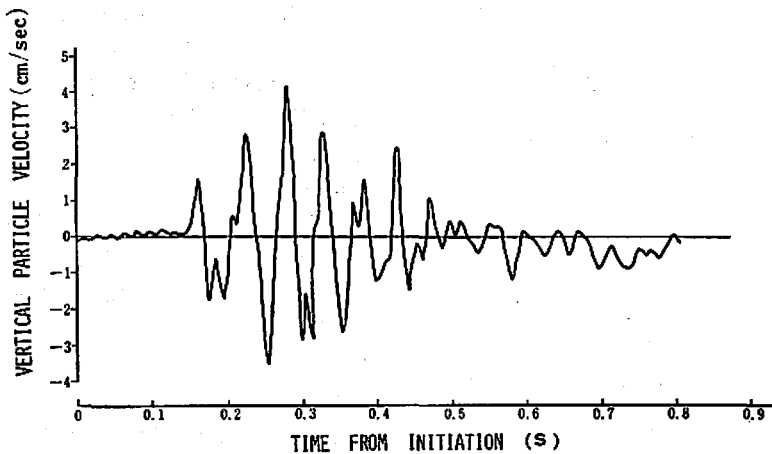


Fig. 8 Particle velocity record observed at 340m from the shot point for the blasting of 180kg GX-1 dynamite at 7A

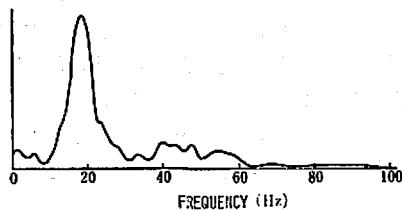


Fig. 9 Power spectrum of observed particle velocity shown in Fig.8.

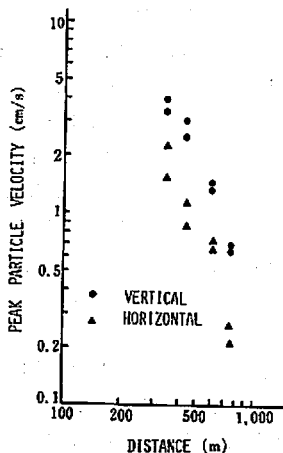


Fig. 10 Measured peak particle velocity vs. distance from the shot point.

180kg の斉発発破を実施した場合に、発破中心から 340m 離れた番ノ州埋立地上の測点 S_3 に発生した振動の垂直成分の時間的変化状態を示したものであり、Fig.9 はこの振動波形のパワースペクトルを示したものである。さらに Fig.10 は番ノ州埋立地内の測点に

発生した振動の最高値と発破中心からの距離との関係を示したものである。

5. シミュレーション結果と実測結果との対比

上記のように、シミュレーションを実施した発破条件は薬量 360kg の斉発発破であるが、今回実施した試験発破で斉発させた薬量が最も多いのは第1回および第2回発破の 180kg である。そこで、発破振動の大きさが薬量の 2/3 乗に比例するという従来の実測結果を用いて Fig.5 に示した計算結果より薬量が 180kg の場合の振動の最高値を求め、これと実測結果とを対比することにした。Fig.11 は振動の最高値およびその距離による減衰状況を、実測値と計算値の両者を対比して図示したものである。Fig.11 より、 S_3 (340m)、 S_4 (420m)、 S_5 (580m) 測点に発生した振動の大きさはシミュレーション結果のほぼ 2 倍、 S_7 (700m) 測点では 1~1.3 倍となっているが、振動の垂直成分の大きさは水平成分のほぼ 2 倍であるという結果はよく一致していることがわかる。さらに、振動最高値の距離による減衰状態も S_7 測点を除けばかなりよく一致している。

参考のために、従来の実測結果から求められている陸上で通常の発破を行った場合に発生する地盤振動の推定式を用いて、180kg の斉発発破を行った場合に爆源から 500m の位置に発生する振動の大きさを求め、今回の実測結果と対比してみることにする。発破振動の推定式としては

$$V = K_A \cdot \gamma^{-2} \cdot W^{2/3} \quad (4)$$

$$V = K_B \cdot \gamma^{-2} \cdot W^{3/4} \quad (5)$$

(4)、(5)式が一般的であるので、これを用いることにする⁶⁾。ここに、 V は変位速度最高値 (cm/s)、 γ は爆源からの距離 (m)、 W は段当りの薬量 (kg) で

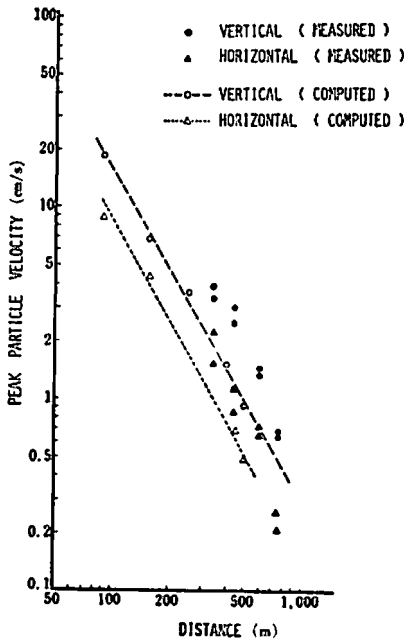


Fig. 11 Comparison of measured peak particle velocities against computed ones

あって、 K_A , K_B は発破条件によって決まる係数であって、通常、下記の値をとることが多い。

心抜発破のとき： $K_A=500\sim 1,000$, $K_B=450\sim 900$

ベンチ発破のとき： $K_A=200\sim 500$, $K_B=100\sim 300$

今回実施したような無自由面発破の場合の K_A , K_B の値は不明であるから、とりあえず、振動の大きい心抜発破の場合の K_A および K_B の値の上限である $K_A=1,000$, $K_B=900$ という値を用いて (4), (5) 式を用いて 500m の位置に発生する振動の最高値を求めると、0.13cm/s および 0.18cm/s という値が得られた。今回、500m 地点に発生した振動の大きさは、Fig.10 より、ほぼ 1.8cm/s であることがわかる。したがって、(4), (5) 式を用いて推定した値は実測値の 1/14, および 1/10 となっており、その差は非常に大きい。このことから考えても、7A 地点での発破にともなう振動の大きさを電子計算機によるシミュレーションで推定したことは非常に有効であったと考えることができる。

さらにまた、シミュレーションで得られた波形と実測波形およびこれらの周波数分析結果を対比すること

によって、この両者がかなりよく一致していることがわかる。このように、振動の主要振動数も予測しうるということがシミュレーションの長所であり、この結果は石油精製工場内の構造物の安全性の検討に非常に有効であった。

6. 結 言

本州四国連絡橋公団は国内では最初の海底オーバーバーデン発破という特殊な発破を計画し、試験発破を実施したが、その実施に先だち、発破振動の大きさを電子計算機による発破シミュレーションによって推定した。

この報告では、発破シミュレーションの方法および結果、ならびに、実測結果を示すとともに、この両者を対比して検討した結果を示した。今回の検討によって、シミュレーションによって推定した振動の最高値は実測結果のほぼ 1/2 となっているが、波形的にはかなりよく一致していることが明らかとなった。なお、従来一般に用いられている発破振動の推定式を用いてこの発破による振動を推定した結果は実測値の 1/10~1/13 であった。このことから考えても、今回のシミュレーションによる推定は、発破計画の立案および試験発破の実施に際して、非常に有効であったと考えることができる。

文 献

- 1) J. T. Cherry : Computer Calculations of Explosion-produced Craters, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci., Vol.4, pp.1~22, 1967
- 2) J. T. Cherry and W.R.Hurdlow : Numerical Simulation of Seismic Disturbances, Geophysics, Vol. 31, No.1, pp. 33~49, 1966
- 3) G. Maenchen and S. Sack : The TENSOR CODE, Methods in Computational Physics, Vol.3, pp.181~210, Academic Press, 1964
- 4) 佐々宏一 : 電子計算機を用いる動的応力の解析方法 (TENSOR CODE) について, 水曜会誌, 17巻, 7号, 312~318頁, 1972
- 5) 佐々宏一, 伊藤一郎, 奈良平俊彦 : 海底穿孔発破に起因する水中圧力波の予測とその実測結果について, 工業火薬協会誌, 38巻, 2号, 91~99頁, 1977
- 6) 工業火薬協会編 : 発破ハンドブック, 335~337頁, 山海堂, 1976

Prediction of Ground Vibrations from Submarine Overburden Blasting and Results of Their Measurements

by Koichi Sassa*, Ichiro Ito*, Susumu Nagasaka**

In planning a blasting close to buildings, one must predict the magnitude of vibration caused by the blasting. The vibration from common types of blasting may be roughly predictable by using an experimental formula which has been derived from the previous measurements.

Honshu-Shikoku Bridge Authority planned a submarine overburden blasting. This type of blasting is an extremely special one, and this was the first trial in Japan. Therefore, the prediction of the vibration from this particular blasting by the conventional method was very difficult for the sake of its speciality. Then, in order to predict the ground vibration, a numerical simulation was performed. The computer program used for this simulation was a DAYS-2 Code which involves the finite difference approximation to the momentum equations.

According to the results of this simulation, Honshu-Shikoku Bridge Authority performed the submarine overburden blasting of this particular case in February, 1975. The ground vibrations were measured at several points. After the shots, comparison of the results of this simulation against the measured ones was performed. As the results, the amplitude of the ground vibration predicted from the simulation is about a half of the measured one, and the dominant frequency of the vibration agrees well. On the whole, it may be considered that the results of this numerical simulation are reasonable.

(*Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sakyo-ku, Kyoto, Japan.

**Sakaide Construction Office, Honshu-Shikoku Bridge Authority, 3-3-8 Kyomachi, Sakaide, Kagawa, Japan.)