

# 水中発破の衝撃圧を受ける海底鋼管の 挙動に関する研究（第3報）

## 実験結果の解析と考察

和田 満 勉\*

海底鋼管の挙動に関する研究の第3報は、第1、2報で行った挙動研究の結果の解析と考察である。本報告は鋼管が許容できる歪の値を、衝撃圧（ピーク）×時定数をパラメータとして評価した。鋼管の破壊は軸方向の曲げによる歪と考え、その値をもって許容値とすることとし、薬量を算出すべきであると決定した。許容歪は $2,000\mu$ であり、その力積は $0.032\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ 、但しせん孔発破で、十分な条件が満足されれば、 $0.0641\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ である。この関係に薬量と距離を与えると、

$$I (\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2) = 0.04846 W^{0.637} / R^{0.91}$$

式を得る。

この式から鋼管が水中衝撃圧を受ける場合の許容力積に対応する許容薬量と、距離が算出される。これが設計に採用されることが望ましい。本工事もこの結果無事に完了した。

### 1. 緒言

発破衝撃波圧を受ける海底鋼管の挙動に関する研究として、その発破設計および模型による実験を重ねた。特に、実際施工に近い状況で実験を行い鋼管の歪測定、圧力の最大値、等を確認した。最後のこの報告は、これらの値を解析し、鋼管が許容できる歪の値（衝撃圧（ピーク）×時定数）をパラメータとして評価し、実施工時にあって安全に確実な作業を完遂させることを目標としたものである。

### 2. 実験結果の解析

#### 2.1 衝撃波の解析

水中吊し発破の実験は前後16回行われたが、実際に得られたデータは9回で、25点の測定であった。

一般の水中吊し発破による衝撃圧は(1)式で示される。

$$P = K(\sqrt[3]{W}/R)^n \quad (1)$$

ここに

$P$  : ピーク圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$W$  : 爆薬量 ( $\text{kg}$ )

$R$  : 爆薬中心からの距離 ( $\text{m}$ )

$K, n$  : 定数

であるが、まづ、従来の実験で得られた  $K, n$  の値の検討を試みる<sup>1)</sup>。本四公団が実施した実験工事<sup>2)</sup>で、

昭和55年1月14日受理

\*大成建設(株)土木部

〒160-41 東京都新宿区西新宿 1-25-1

水槽中で10~40gの薬量を用いた実験では次の(2)式が得られた。

$$P = 463(\sqrt[3]{W}/R)^{1.16} \quad (2)$$

また大三島で行われた実験<sup>2)</sup>でGX-1ダイナマイトを使用した薬量100g-1800gの吊し発破では、(3)式を得ている。

$$P = 490(\sqrt[3]{W}/R)^{1.13} \quad (3)$$

今回の実験では、同時に起爆した3爆心のピーク圧および薬量と距離などを整理して、(4)式が得られた。

$$P = 340(\sqrt[3]{W}/R)^{1.11} \quad (4)$$

これは集中装薬でのデータによるものであるが、トランジエント・レコーダの特性による誤差のため値が低目となった。段発間隔を25msecとしたため、波動が25msec間隔で受圧検知されるので、レコーダの記録時間を長くしなければならず、レコーダの時間分解能を悪くしたためと判断した。段発発破の測定では、この点を注意する必要があることが判った。

また3爆心では、特に薬量が分散されているためおこる時間のずれが生じ、距離 $R$ として圧力計からの最短距離をとったことによる影響や、さらに、爆源からの距離が近すぎることに影響等も問題となるものと考えられる。

パイプからの反射波がこのピーク圧に影響すると仮定すれば、パイプに対し直角方向の波が最大になると思われる<sup>3)</sup>。特にピーク圧については、ビックアップ

No.1がNo.4よりも反射波の影響を強く受けると考えられる。第2報 Fig.7の(6)波形にこのことが顕著に現れている。A, B, C ないし, D, E, Fの3爆心による圧力波が夫々独立に到着したことがわかる。即ち第一波は鋭い立上りの波であり、これがパイプで反射して2つに分離し、一つは界面で反射波が引張となり<sup>4)</sup>、負圧となるものが生じ、その間に第2の波が夫々のピックアップPV1~PV4に到達する。同様な過程を繰返すが、ピックアップPV1ではその間の時間間隔がないために第2波が負圧とならない。すなわち、No.1のピックアップでは、2つの波が重複するため第2波の方が大きくなる。

ピックアップNo.2—No.4では、波の間隔が次第に長くなり、それにつれてパイプには負圧が発生する。

Table1は、実測値を測定し得なかった分について計算値を求め、まとめたものである。No.1~No.16ま

Table 1 Calculated value on blasting suspended in the water

		peak-pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	time const. (μ sec)	peak pressure × time condition (kg · sec/cm <sup>2</sup> )
No 2	P <sub>1</sub>	80	80	0.006
	P <sub>2</sub>	75	80	0.006
	P <sub>3</sub>	40	90	0.004
	P <sub>4</sub>	30	90	0.003
No 9	P <sub>1</sub>	270	85	0.023
	P <sub>2</sub>	—	—	—
	P <sub>3</sub>	50	95	0.015
	P <sub>4</sub>	65	90	0.015
No 10	P <sub>1</sub>	40	100	—
	P <sub>2</sub>	—	—	—
	P <sub>3</sub>	300	93	0.028
	P <sub>4</sub>	—	—	—
No 11	P <sub>1</sub>	75	100	—
	P <sub>2</sub>	55	105	0.018
	P <sub>3</sub>	45	110	—
	P <sub>4</sub>	—	—	—
No 12	P <sub>1</sub>	330	55	0.018
	P <sub>2</sub>	140	55	0.017
	P <sub>3</sub>	70	60	—
	P <sub>4</sub>	55	65	—
No 13	P <sub>1</sub>	55	65	0.009
	P <sub>2</sub>	28	70	—
	P <sub>3</sub>	28	75	—
	P <sub>4</sub>	—	—	—
No 14	P <sub>1</sub>	430	65	0.028
	P <sub>2</sub>	190	65	0.026
	P <sub>3</sub>	120	70	—
	P <sub>4</sub>	75	80	—
No 15	P <sub>1</sub>	75	80	0.013
	P <sub>2</sub>	80	85	—
	P <sub>3</sub>	35	90	—
	P <sub>4</sub>	—	—	—
No 16	P <sub>1</sub>	180	60	0.011
	P <sub>2</sub>	150	55	—
	P <sub>3</sub>	50	70	0.012
	P <sub>4</sub>	50	70	—
No 17	P <sub>1</sub>	28	75	0.006
	P <sub>2</sub>	28	75	—
	P <sub>3</sub>	18	80	—
	P <sub>4</sub>	—	—	0.004

		peak-pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	time const. (μ sec)	peak pressure × time condition (kg · sec/cm <sup>2</sup> )
No 14	P <sub>1</sub>	510	75	0.039
	P <sub>2</sub>	110	80	—
	P <sub>3</sub>	220	75	0.035
	P <sub>4</sub>	80	90	—
No 15	P <sub>1</sub>	80	90	—
	P <sub>2</sub>	60	90	0.017
	P <sub>3</sub>	40	100	—
	P <sub>4</sub>	40	100	—
No 16	P <sub>1</sub>	35	105	0.011
	P <sub>2</sub>	30	110	—
	P <sub>3</sub>	—	—	—
	P <sub>4</sub>	—	—	—
No 17	P <sub>1</sub>	550	85	0.047
	P <sub>2</sub>	250	78	—
	P <sub>3</sub>	160	85	0.042
	P <sub>4</sub>	95	95	—
No 18	P <sub>1</sub>	95	95	—
	P <sub>2</sub>	65	100	0.021
	P <sub>3</sub>	48	110	—
	P <sub>4</sub>	40	110	0.013
No 19	P <sub>1</sub>	30	120	—
	P <sub>2</sub>	—	—	—
	P <sub>3</sub>	—	—	—
	P <sub>4</sub>	850	160	0.085
No 20	P <sub>1</sub>	65	140	—
	P <sub>2</sub>	55	145	—
	P <sub>3</sub>	45	150	—
	P <sub>4</sub>	—	—	0.024
No 21	P <sub>1</sub>	130	210	0.027
	P <sub>2</sub>	100	220	0.022
	P <sub>3</sub>	120	215	0.026
	P <sub>4</sub>	90	220	0.020
No 22	P <sub>1</sub>	100	190	0.019
	P <sub>2</sub>	150	155	0.023
	P <sub>3</sub>	85	195	0.012
	P <sub>4</sub>	125	160	0.020
No 23	P <sub>1</sub>	95	190	0.018
	P <sub>2</sub>	145	155	0.022
	P <sub>3</sub>	75	200	0.015
	P <sub>4</sub>	80	175	0.014
No 24	P <sub>1</sub>	—	—	0.084
	P <sub>2</sub>	—	—	—
	P <sub>3</sub>	—	—	0.079
	P <sub>4</sub>	—	—	0.056
No 25	P <sub>1</sub>	—	—	0.163
	P <sub>2</sub>	—	—	0.164
	P <sub>3</sub>	—	—	0.154
	P <sub>4</sub>	—	—	0.112
No 26	P <sub>4</sub>	—	—	— non fire
No 27	P <sub>4</sub>	150	280	0.042
No 28	P <sub>2</sub>	300	150	0.045
	P <sub>3</sub>	300	150	0.045
	P <sub>4</sub>	150	160	0.024
No 29	P <sub>2</sub>	300	150	0.045
	P <sub>3</sub>	300	150	0.045
	P <sub>4</sub>	150	160	0.024
No 30	P <sub>2</sub>	300	150	0.045
	P <sub>3</sub>	300	150	0.045
	P <sub>4</sub>	150	160	0.024
No 31	P <sub>4</sub>	90	120	0.011

では水中吊し発破、No.17以下は削孔発破の場合の値である。

力積(インパルス)を求めるために、Kirkwood-Betheの理論による(5)式を使用した。

$$I [\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2] = 0.199W^{1/3}(W^{1/3}/R)^{1.05} \cdot [\text{kg}^{1/3}(\text{kg}^{1/3}/\text{m})]^{1.05} \quad (5)$$

また流動エネルギーは  $t=6.7\theta$  として、R. H. Cole<sup>1)</sup>により(6)式を求めた。

$$E_f (\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2) = 0.1068W^{1/3}(W^{1/3}/R)^{2.12} \cdot [\text{kg}^{1/3} \cdot (\text{kg}^{1/3}/\text{m})]^{1.05} \quad (6)$$

実測値と計算による力積のバランスは Fig. 1 に示す通りである。

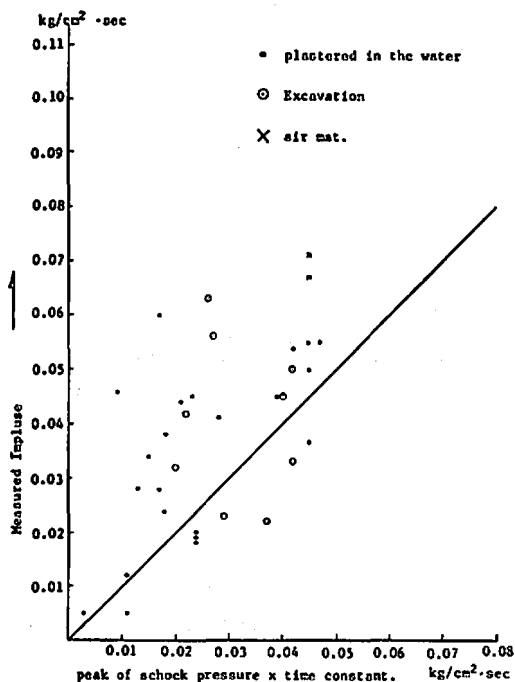
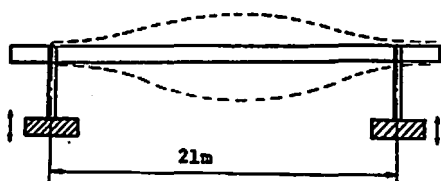


Fig. 1 Relation between impulse and peak pressure x time constant

## 2.2 パイプの振動解析

水中発破試験の歪波形から、鋼管に生ずる振動特性<sup>3)4)</sup>は次の3つに分けられる。

(1) 鋼管の振動周期が0.35~0.4sec即ち2.5~2.9サイクルの振動で、パイプが単純梁として挙動する。



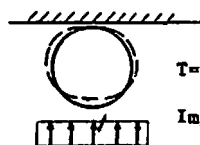
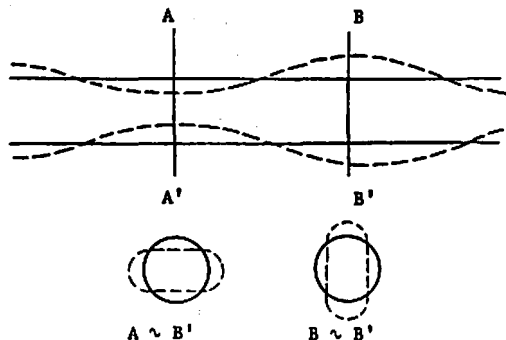
計算では0.24~0.30秒程度で実測値とは多少異なる。これは支持点の撓性、移動、および水の質量によるものと考えられる。

(2) 振動周期が0.040sec(25サイクル)のもの。



これは単純梁の3次モードで、1次モードの約1/9となっている、薬量が増加するとなくなる。

(3) パイプの振動周期が0.020秒(50サイクル)のもの。円周方向には曲げ軸方向に波状となる。後述する計算では、軸方向の影響はないものとする。



$T=0.026$  In the case shown in left figure cycle time is 0.026 second.  
Impulse

歪測定写真を目で判断したところでは、この他にも種々の波形が現れている。

測定された歪振幅に関して問題となる振動は、(1)、(2)よりも(3)の場合であると判断された。

## 2.3 発破による鋼管応力度の算定<sup>3)5)</sup>

水中発破で発生する圧力波には1次圧力波と2次圧力波があるが、夫々その特性を持ち構造物に影響をあたえる。1次波は水中衝撃波であり、2次波パルプパルスであるが、その<sup>5)6)</sup>継続時間は2次波が長く、圧力は1次波が高い。

パイプの解析では前項の(3)のモデルのリング断面が危険側なので、この解析を行うことにする。

## 2.3 解析方法

リングを線形多自由度系構造ととらえ Model-Analysis を採用し解析を行う。

モデルの運動方程式は次式である。

$$[M][\ddot{u}] + [c][\dot{u}] + [K][u] = [F] \quad (7)$$

ここに  $[M]$ : 質量マトリックス

$[c]$ : 粘性抵抗マトリックス

$[k]$ : 剛性マトリックス

[u]: 変位ベクトル

[F]: 外力ベクトル

非減衰自由振動

$$[M][\ddot{u}] + [k][u] = 0 \text{ を解くと}$$

固有関数 ( $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_i, \dots, \phi_n$ ) および固有値 ( $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_i^2, \dots, \omega_n^2$ ) を得る。 $\omega_i$  は  $i$  次の固有円振動数であり、 $\phi_i$  は  $\omega_i$  に対する振動モードを表す  $n \times 1$  のベクトルである。モーダルマトリックス  $\phi (n \times n)$  を次に定義すると

$$\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_i, \dots, \phi_n] \quad (8)$$

[u] =  $\phi$ [q] とすると、 $n$  自由度系構造の運動方程式は [q] の要素  $q_i$  に関する  $n$  個の独立な方程式に分けられ、(9)式となる。

一質点系に衝撃力 ( $t=0$  で初期速度  $v_{0i}$ ) が作用したときの振動は、外力ベクトル (F) が座標の関数と時間の関数の積で  $[F] = [f] \times g(t)$  とすれば(10)式となる

$$\ddot{q}_i + 2\beta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \sum_{j=1}^n \phi_i(j) f_j / \sum_{j=1}^n \phi_i^2(j) M_j \times g(t) \quad (9)$$

$$q_i = v_{0i} / \omega_i \sqrt{1 - \beta_i^2} \times e^{\beta_i \omega_i t} \sin \omega_{hi} \sqrt{1 - \beta_i^2} t \quad (10)$$

応答変位ベクトルは [u] =  $\phi$ (q) なので、刻々の変位  $u_j$  は、 $u_j = \sum_{i=1}^n \phi_i(j) q_i \text{ max}$  となる。

$u_j \text{ max}$  は  $q_i \text{ max}$  の時刻と同時ではない。そこで  $u_j \text{ max}$  は次式で近似することになる。

$$u_j \text{ max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\phi_i(j) q_i \text{ max})^2} \quad (11)$$

即ち、リング断面に衝撃力が作用すると、リングの  $j$  点に生ずる最大変位は  $u_j \text{ max}$  となる。

ここで  $\phi_i(j)$  は  $i$  次の振動モードにおける  $j$  番目の質点の相対変位であり、 $q_i \text{ max}$  は  $i$  次振動の応答の最大値である。 $f_i$  はリングに作用する力の各質点分力である。

以上からリングに生ずる断面力は夫々(12)(13)(14)となる。

曲げモーメント

$$M_j \text{ max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\phi_i^M(j) q_i \text{ max})^2} \quad (12)$$

せん断力

$$Q_j \text{ max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\phi_i^Q(j) q_i \text{ max})^2} \quad (13)$$

軸力

$$N_j \text{ max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\phi_i^N(j) q_i \text{ max})^2} \quad (14)$$

ここで、 $\phi_i^M$ 、 $\phi_i^Q$ 、 $\phi_i^N$  は  $i$  次の振動モードを構造変位として入れて算出した断面力モードである。

### 2.3.2 計算条件

(a) 使用パイプが26Bなので、このリング断面は  $A = 0.127 \times 10^{-1} (\text{m}^2)$

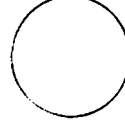
$$I = 0.171 \times 10^{-6} (\text{m}^4)$$

$$E = 2.1 \times 10^7 (\text{Ton/m}^2)$$

の梁部材と見なすことができる。

(b) 拘束は完全固定とし、荷重は単位面積単位時間あたり 1ton の力がリングに衝撃的に作用する。力の分布は矩形分布とする。

拘束...完全固定



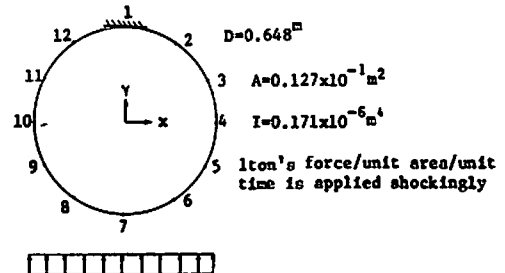
rectangular distribution



(c) 減衰定数は 0 とする。

### 2.3.3 計算結果

① 最大変位は、Fig. 2 の節点 4 および 10 に示される  $x$  方向で、最大変位は 0.928cm、 $y$  方向の最大変位は  $y$  で 1.96cm となる。



Nodal point	Max. displacement to x direction [cm]	Max. displacement to y direction [cm]
1	0.0	0.0
2	0.132	0.50
3	0.682	1.05
4	0.928	1.11
5	0.539	1.22
6	0.079	1.67
7	0.0	1.96
8	-0.079	1.67
9	-0.539	1.22
10	-0.928	1.11
11	-0.682	1.05
12	-0.132	0.50

Fig.2 Nodal point and max displacement

② 最大断面力は

Table 2 に示すごとく軸力の最大が節点 4-5.

9-10 間で 866.69ton となり曲げモーメントは節点 1 で 1.861・m セン断力は 1-2, 12-1 間で 9.86ton が最大となる。

Table 2 Max cross sectional force

Result of calculation

Nodal point	Axial force (ton)	Bending moment (t. m)	Shearing force (ton)
1		1.861	
2	7.66	0.319	9.86
3	18.10	0.960	6.65
4	15.33	0.917	1.97
5	866.69	0.548	2.93
6	644.13	0.655	6.98
7	13.85	0.869	1.98
8	13.85	0.655	1.98
9	644.13	0.548	6.98
10	866.69	0.917	2.93
11	15.33	0.860	1.97
12	18.10	0.319	6.65
	7.66		9.86

### 2.3.4 計算結果の検討

水中発破によって発生する衝撃波を受けるパイプは、その軸力で抵抗する働きをすることが、計算結果より判った。最大軸力は節点 4~5, 9~10 間で 866.69ton となり、応力度になおすと断面積  $A=127\text{cm}^2$  なので  $6,820\text{kg/cm}^2$  となる。ここで曲げ応力は無視した。これは、1m 当り 1ton-sec の力積がリングに作用したときのリングに生ずる応力度である。

いま発破による衝撃圧の大きさと衝撃波の圧力継続時間が判れば、リングに生ずる最大応力度を算出することができる。最大応力度  $\sigma_{\max}$  は次式となる

$$\sigma_{\max} = k \times p \times t \quad (15)$$

ここに  $k=6,820(\text{kg/cm}^2/\text{ton} \cdot \text{sec}/\text{m}^2)$ ; 換算係数

$p$  = 衝撃圧 (ton/m<sup>2</sup>)

$t$  = 継続時間 (sec)

( $E=2.1 \times 10^7 \text{ton/m}^2$  とし動的ヤング率は考慮しない)

## 3. 鋼管の挙動と許容歪

### 3.1 最大歪の発生

鋼管に生ずる歪は、衝撃波圧が到達した時に、その円周方向に圧縮歪を生じ、そして軸方向には引張歪を生ずる。円周方向歪は衝撃波到達時に最大値を示した後、その波が合成されて振動するが、最大値を越さない。軸方向歪は引張り歪であるが、薬量に関係し、最大値が変る傾向にある<sup>5)6)</sup>。少量の薬量では最大値となるが、量が多くなると到達波の合成された振動によって、到達時よりも遅れて最大歪が発生する。円周方

向と軸方向ではその位相がお互に反転する。この関係を Fig. 3 に示した。

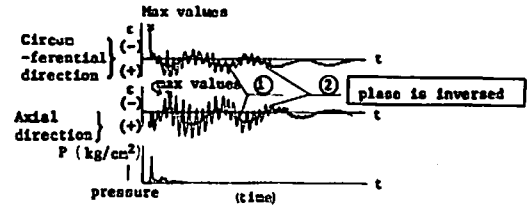


Fig. 3 Creation of max strain

計算および計測の結果得られた円周方向および軸方向の歪と衝撃圧ピーク ( $\text{kg/cm}^2$ ) × 時定数 (sec) の関係を Fig. 4 および 5 に示した。

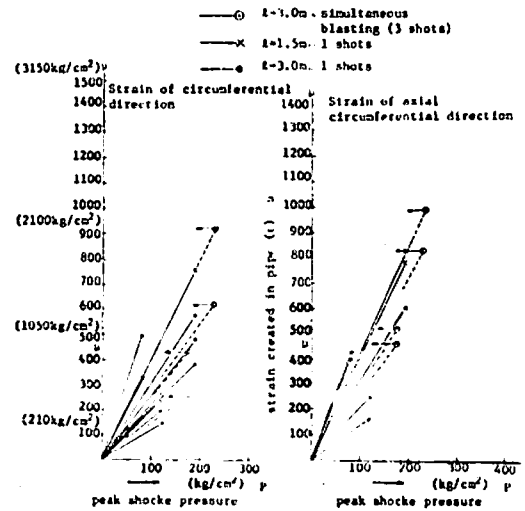


Fig. 4 Relation of shock pressure between peak pressure and strain created in pipe

鋼管の破壊に関係する歪には、パイプの振動性状波のタイプ(1)と(2)の合成による形状変化(2.2 参照)が影響することも考えられるが、(3)のタイプの円周方向の圧縮歪と軸方向の引張り歪の合成による剪断破壊が重要であろう。なお、パイプの最大歪は軸歪<sup>3)</sup>と考えてよい。

そのため、水中での発破作業では、歪が最大値を示した時に次段の発破による圧力波が到達しないようにしなければならない。(1)と(2)の波は単純波でその減衰が大きいので、歪としては到達時の圧力のみが問題である。歪波のピーク値の部分の形状は距離が近くなるほど鋭い。ただし、距離が長いと、その作用圧の面積が増大する。これは継続時間が増大するからである。

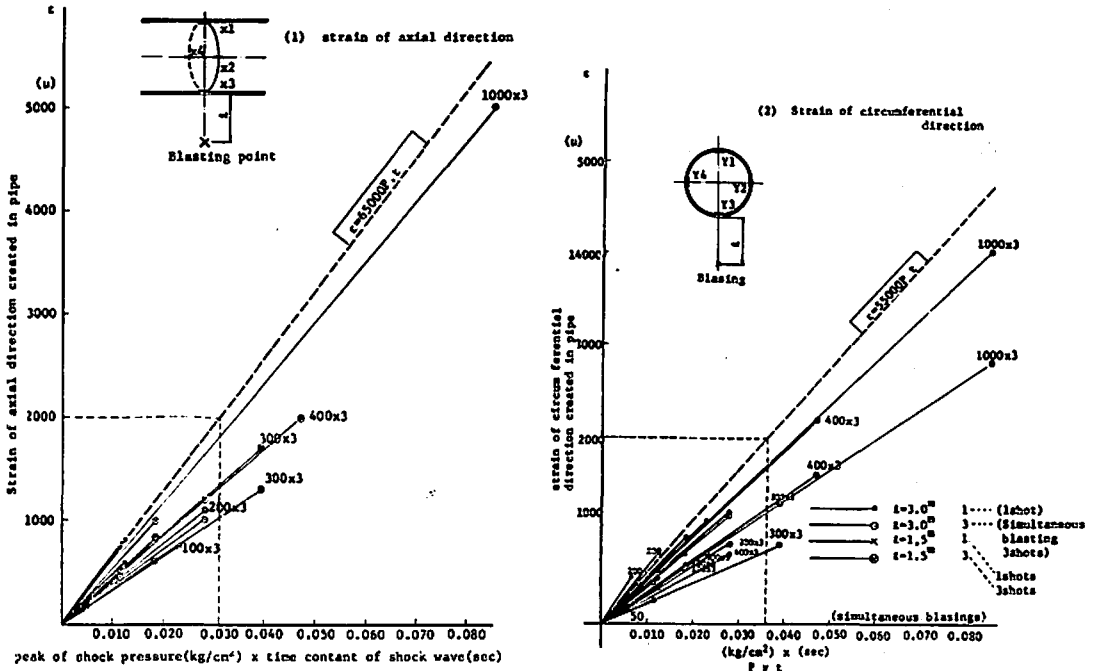


Fig.5 Relation between peak pressure x time constant and strain

鋼管の位置即ち水深が深くなれば、それだけパイプの変位が少くなるので、この点は有利に作用する。

### 3.2 許容歪

水中発破による結果から、その力積をパラメータとして26Bパイプの歪をプロットした図がFig.5であるが、それぞれの歪は(16)(17)式となる。

$$\text{円周方向歪} : \epsilon_c = 55000p \cdot t \quad (16)$$

$$\text{軸方向歪} : \epsilon_t = 65000p \cdot t \quad (17)$$

円周方向歪は最初に発生する衝撃波によるものであり、軸方向歪はその後に発生する水流、ガス球による二次的な圧力による合成波<sup>5)</sup>と考えられる。

両者共、同程度のレベルの歪であるが、最大値を経験する時間が異り、前者が1~3msec後者が20~50msecである。

ピーク圧が重複する可能性についていえば、前者が継続時間が短いので完全に重なることがないのに対して、後者は振動周期が長いので可能性が強いことになる。

破壊に関して、円周方向の座屈は円周方向歪の値で考えられるが、軸方向は曲げによる座屈が考えられる。この値が26Bパイプでは14,000μであるが、実験値では5,000μに達している。せん断による破壊が考えられるとすれば、引張り破壊の1/2程度の値なので、軸方向歪によると考えてよい。

そこで、26Bパイプについては軸方向歪のみを考慮すればよく、実験結果および溶接部の信頼性を考え、

その値をもって許容値とすることとして薬量を算出すべきであると決定した。

軸方向許容歪 2,000μ

力積 0.031kg/cm<sup>2</sup>sec

実際の工事は32Bパイプなので、本工事に必要なパイプの許容歪を決定する必要がある。次の要素が32Bパイプに影響を与えたと考えられる。即ち

- (1)  $F_1$ ……一般に発破点の距離が実験時の発破より長いのでパイプに作用する水流が多くなる………1.20とする。
- (2)  $F_2$ ……実際はパイプ径が大きくなるため作用水流が多くなる………1.23とする。
- (3)  $F_3$ ……実際は、小径のパイプと一体となり拘束されるので、剛性が大きい32Bパイプが負担を受ける………1.20とする。
- (4)  $F_4$ ……振動スパンが40~50mとなり得るので、実験のスパン21mに対し抗力は1/3~1/5となる。また、変位が3~5倍となり、さらに海底面との接触が感えられるので………0.50
- (5)  $F_5$ ……初期応力がパイプに考えられる………1.10
- (6)  $F_6$ ……エヤマットの効果は、ここでは期待しない………1.0
- (7)  $F_7$ ……せん孔発破効果は、最小抵抗線が2.5m以下で、しかもベンチ高さが最小抵抗線の2倍以上のときに限って減衰効果が考

られるので………0.50  
とし、それ以外のせん孔では1.00とする。  
以上のことから許容力積  $F$  は次の値となる。

$$F = \frac{0.331}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7}$$

$$= \frac{0.031}{1.20 \times 1.23 \times 1.20 \times 0.5 \times 1.1 \times 1.0}$$

$$= 0.032 \text{ kg/cm}^2 \text{ sec}$$

$F_7 = 0.5$  のときは  
 $F = 0.064 \text{ kg/cm}^2 \text{ sec}$  となる。

### 3.3 実験結果から求めた許容力積

海底鋼管の近くでの発破作業では、鋼管が受ける許容値が決まれば、安全な岩盤掘削ができる。実験から得られたパイプの挙動に対する許容力積は、すでにのべたごとく、 $0.032 \text{ kg/cm}^2 \text{ sec}$  とする。ただし、 $R \leq 2.5 \text{ m}$ ,  $h \geq 2R$  の場合に限り、許容力積を  $0.064 \text{ kg/cm}^2$

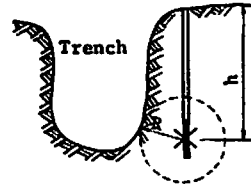


Fig.6 Relation of  $R$  and  $h$

sec とする。ここで  $R$  と  $h$  は Fig.6 に示す値である。  
また、32B パイプから海面までの距離を 6m 以上とする。海底面とパイプの接触を考え、地形地質を事前にチェックし対処する。

実験結果から、力積  $I$  は距離  $R$  および薬量  $W$  の関係で(18)式が与えられる。

$$I = 0.04846 W^{0.637} / R^{0.91} \quad (18)$$

許容力積  $I$  を与えれば、発破地点からの距離  $R$  に対

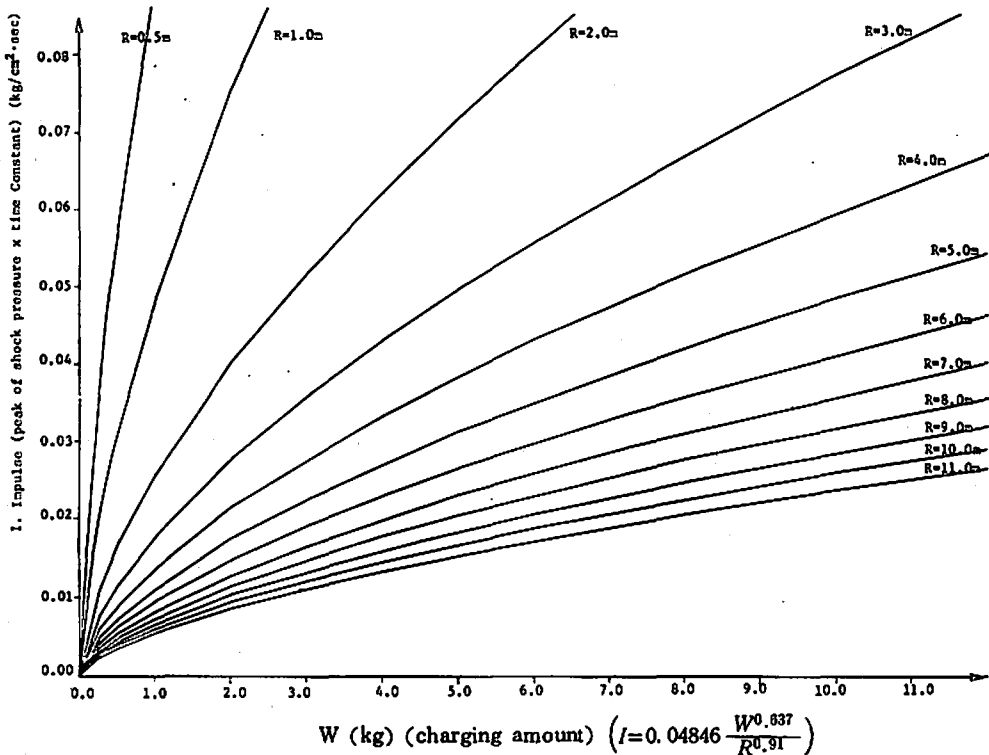


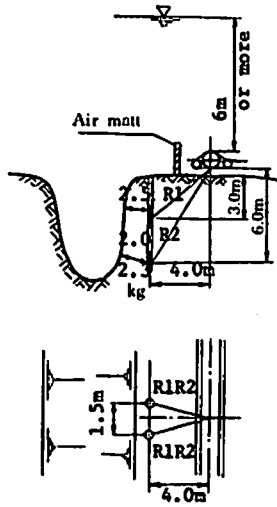
Fig.7 Relative diagram between volume of explosive and impulse

応する許容薬量  $W$  が決まってくる。この関係は Fig.7 に示した。

### 3.4 許容力積の使用例

施工に先がけ、この許容値を採用し、検討する必要がある。Fig.8のごとく、実際のパイプ周辺の掘削発破条件で検討する。それぞれの爆源からの距離  $R_1, R_2$

および使用する薬量を与え、パイプが受ける力積は Fig.7 から求める。この力積が同時にパイプに加わるとすれば、この合計値を考えればよい。この実施例では合計力積が  $0.0530 \text{ kg/cm}^2 \text{ sec}$  となり、許容値が  $0.064 \text{ kg/cm}^2 \text{ sec}$  なので、この値を下廻るため、パイプは影響を受けないことになる。



$$R_1 = \sqrt{3.0^2 + 4.0^2 + 0.75^2} = 5.1^m$$

$$R_2 = \sqrt{6.0^2 + 4.0^2 + 0.75^2} = 7.2^m$$

NO.	Distance (m)	Volume of Explosive (kg)	Impulse (kg/cm <sup>2</sup> sec)
1	5.1	1.5	0.0140
2	7.2	2.0	0.0125
3	5.1	1.5	0.0140
4	7.2	2.0	0.0125
			0.0530

≦ 0.064

0.064 is used in this special ..... OK

Fig. 8 Example of operation

4. 考察

鋼管は発破によって歪を生ずるか、この歪が鋼管破壊の重要な要因となる。鋼管の挙動を解析するためには、衝撃波圧のピーク値、および作用時間、作用面積を考慮しなければならない。衝撃圧と鋼管の歪との関係は、次のように考慮できる。

(1) 衝撃圧の到達時にはパイプの円周方向に圧縮歪が生ずる。全円周に同時には生じないが、この時の値が最大歪となる。この場合に部分的な座屈やパイプの溶接部の不良部の座屈や亀裂が生じ、断面形状が変化する。円周方向歪が最大となる圧縮歪では、最大の引張り歪を生ずる。

(2) 断面剛性が低下し、0.1sec後に、さらに振動合成により断面が変形を起し破壊に達することがある。

(3) 円周方向の圧縮歪と軸方向の引張り歪が合成して影響するときは、鋼管の下端斜方向に、せん断的破壊が考えられる。

(4) 段発発破によって発生すると考えられる、振動モードの連成振動による歪が、最大値となったときに、次段によって生ずる衝撃圧による歪のピークが、重ならぬようにしなければならない。

(5) 歪のピーク値の立ち上りは、爆源からの距離が近いほどすどく、距離が遠いとパイプからの伝達波が先に到達するので、立ち上りはすどくない。ピーク値は、衝撃圧が到達した後に最大となる。また、ピーク値の減衰が大きいので、歪が問題となるのは最初の1.2波である。爆源からの距離が長いと、構造物に作用する圧の面積が増大するので充分考慮しなければならない。

(6) 水深があれば、鋼管の変位が少なくなり、単純

梁として考えられるので振動には有利となる。

(7) 集合パイプでは、最大のパイプが管径の小さいパイプの荷重も受ける。変位量は、26Bパイプが21mスパンで距離が1.5mのとき、使用薬量が3kgで50cm程度である。施工時には、36m間にブイを使用するので、スパンが40m以上にもなり、5000μの曲げ歪が出ると思えば、150cm程度の変位量が想定される。パイプが海底面から2m以下に吊られている時は海底面に接触する恐れがあり、注意を要する。

(8) せん孔発破は、吊し発破に比較し、ピーク圧としては半分となるが、力積を考えると反対に多くなるので、パイプに与える影響が大きくなることもある。

(9) パイプの円周方向の応力歪には力積が影響するが、軸方向歪は水流およびガス球が影響を支配する。

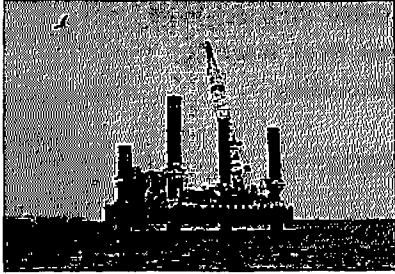
吊し発破では、力積が大きければ、水流もガス球も大きくなる。せん孔発破では必ずしも大きくない。エヤカーテンを使えばピーク圧が下がることは確かであり、これに伴う衝撃波の継続時間がそのまま継続されるか低下すれば、効果大きい。特に水流やガス球に対しては効果が明瞭である。

5. 結論

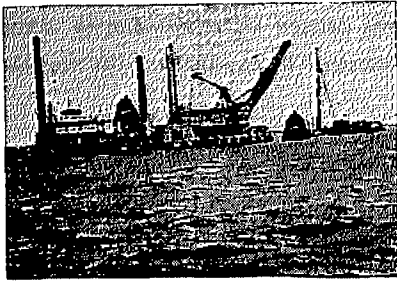
本研究においては、海底に設置された鋼管が水中の岩盤掘削に発破工法を採用したときに発生する水中衝撃圧に対して、どのような挙動を示すかを調べ、岩盤掘削に用いられる爆薬量の最適値と鋼管が、損傷に対して許容し得る応力値を求めた。その結果について述べる。

(1) 鋼管に生ずる歪のうち、最初に発生する圧力によって発生するのが円周方向の歪であり、水流やガス球による2次圧力によって生ずる歪は、軸方向歪であ

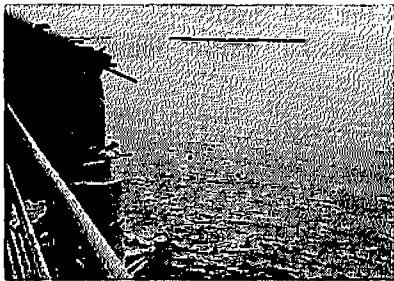




(1) SEP in operation



(2) Dredger during bench excavation



(3) Job site under surveying

Fig.9 Job site operation

る。また軸方向歪はピーク圧が、重複する可能性があり、曲げ座屈が考えられる。

(2) 鋼管に生ずる応力度は、衝撃圧×継続時間、す

なわち力積で考慮すべきである。

(3) 軸方向に対する鋼管の許容できる歪力積は、溶接部の信頼性および、その他の要因を考慮して、 $2,000 \mu$ であり、力積は  $0.032 \text{kg}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ 、但しせん孔発破で十分な条件を満足すれば  $0.064 \text{kg}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$  である。

(4) 許容力積と葉量、距離の関係は(18)式で与えられ、計算して決めることになり、鋼管挙動が破壊におよばない発破の設計が可能となった。

以上の鋼管挙動による発破実験の結果が、本工事に採用され、設計に用いられて、Fig.9の施工に見られるように、海底鋼管横の岩盤掘削が無事完了した。

この実験研究は実務面での研究であり、大きな規模の工事から得た結果なので、有意義なものであり良い指針となったと思う。

なお同実験にあたっては、計測関係の一部を総合安全工学研究所に委託した。また解析に関しては東工試の田中一三氏に御助力をお願いした。また大成建設㈱の現場における実施と、その計測などで多数の方々の協力をいただいた、ここに紙面をかりて御礼申し上げる。

#### 文 献

- 1) R. H. Cole; under water Explosions. Princeton, University Press (1948)
- 2) 本四連絡橋公団：安全工学協会、Jan. 1968 水中発破による影響の調査(その2)報告書(1974)
- 3) 大久保忠良；石油パイプラインの耐震技術基準；道路 1972—3
- 4) J. P. Murtha and W. J. Nordell; Reaction forces for Bottom-fixed structures subjected to water shock
- 5) Michael Hsiang-teh Chm. Richard Collins Loading of a Rigid structure by an underwater explosion Nov/1972
- 6) Kim Yci The Dynamic Response of a Submerged structure to an Impulsive water Shock loading, Proceedings of the Fifth U. S. National Congress of Applied Mechanics, 1966

