

Fig. 1 The plan of structures surrounding Shintanqiao

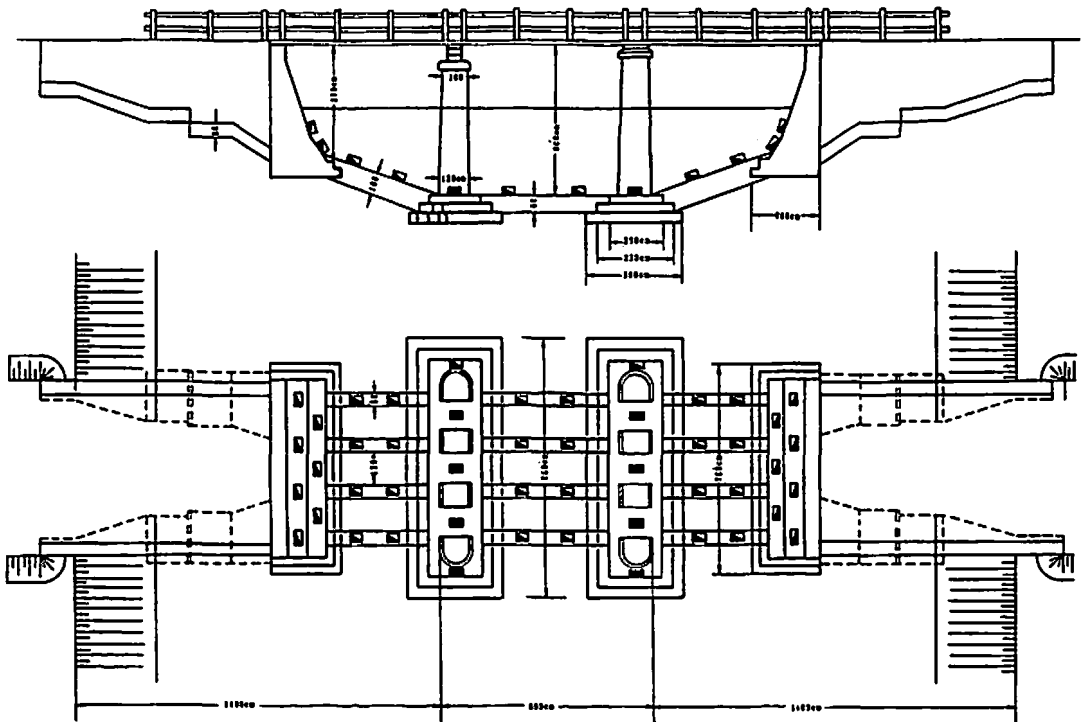
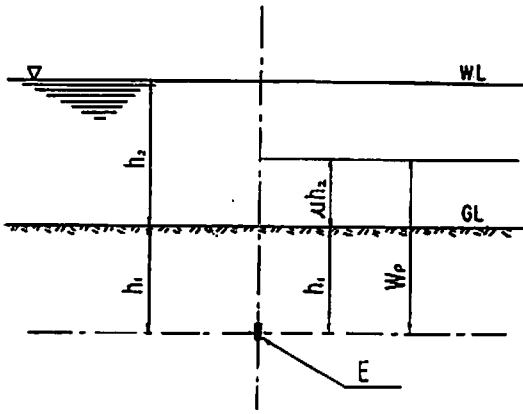


Fig. 2 The structure of Shintanqiao and the charge parts of explosives

水中張付け発破法では、破碎対象物が十分にゆるめられるとともに、均一に破碎され、ずりの処理が容易に行われるようにする必要がある一方、割りぐり石等の飛散を極小または皆無に抑える必要がある。

ずりの飛散を制御し、飛散の防止をはかるように考えられた陸上部装薬発破での弱装薬計算式は(1)式<sup>2)</sup>で与えられる。今回の装薬量計算ではこれに適切な係数を選定することとした。



E : Explosive

Fig. 3 The blasting by a charged cartridge in the shallow part of under water ground

$$Q = q \cdot f(n) \cdot w^3 = q \cdot \left( \frac{4 + 3n}{7} \right)^3 \cdot w^3 \quad (1)$$

ただし、Qは装薬量（単位：kg）

qは爆薬の単位消費量（単位：kg/m<sup>3</sup>）

f(n)は漏斗指数(n)の函数で、

標準装薬発破時  $f(n) = 1$

過装薬発破時  $f(n) = 0.4 + 0.6n^3$

弱装薬発破時  $f(n) = \left( \frac{4 + 3n}{7} \right)^3$

wは最小抵抗線（単位：m）である。

陸上部の壁体等の構築物の解体発破では、一般に、

垂直方向の抵抗線W<sub>H</sub>は水平方向の抵抗線W<sub>L</sub>より大

きく、その比W<sub>L</sub>/W<sub>H</sub>は0.6~0.8程度にとられる。もしこの値がこれより大きくなれば、過装薬となりずりの飛散が激しく適正な解体処理が難しくなり、また逆に小さくなれば弱装薬となって、構築物の適正な破砕効果が得られなくなる。

今回工事の橋脚と橋台は強度の高い片麻岩の骨材を使用した場所打ちコンクリートからなっている。片麻岩の爆薬の単位消費量qの値は参考文献2)の表3-2によれば1.4~1.8（単位：kg/m<sup>3</sup>）であるが、日本の鉱業労働災害防止協会編纂鉱山保安テキスト坑内篇（昭和60年3月31日改訂版）の表2.11によればその値は2.1kg/m<sup>3</sup>である。

水中張付け発破時に薬包を取り巻く周囲の水体は陸上部における装薬発破時の垂直方向の最小抵抗線W<sub>H</sub>を有する岩石体と類似の作用を有するものと見做してさしつかえないものと考えられる。

等効果法<sup>2)</sup>という手法によれば、図3に示す水中の岩・土層中に装填された爆薬で発破する場合は、水深を岩層中での抵抗線長に換算して陸上における発破の装薬量計算式同様に、次式により薬量を算出することができる。

$$Q = q \cdot f(n) \cdot W_p^3 \quad (2)$$

ただし、qは陸上の発破における爆薬の単位消費量（単位：kg/m<sup>3</sup>）

W<sub>p</sub>は換算最小抵抗線長（単位：m）、

$$W_p = h_1 + \mu h_2 \quad (3)$$

h<sub>1</sub>は薬包上部の岩・土層深度（単位：m）、

Table 1 Table of conversion factor  $\mu$  for under water blasting

		Type of rock- and mud seam		
		Soil and stone	Gravel	Rock
Ratio on depth of rock- and mud seam vs. depth of water— h <sub>1</sub> /h <sub>2</sub>	0	0.55	0.50	0.40
	0.25	0.42	0.38	0.33
	0.50	0.34	0.31	0.28
	0.75	0.30	0.28	0.24
	1.00	0.27	0.25	0.21
	1.50	0.24	0.21	0.17
	2.00	0.22	0.18	0.14
	2.50	0.20	0.16	0.11
	3.00	0.18	0.14	0.10
	3.50	0.16	0.13	0.09
	4.00	0.15	0.11	0.08

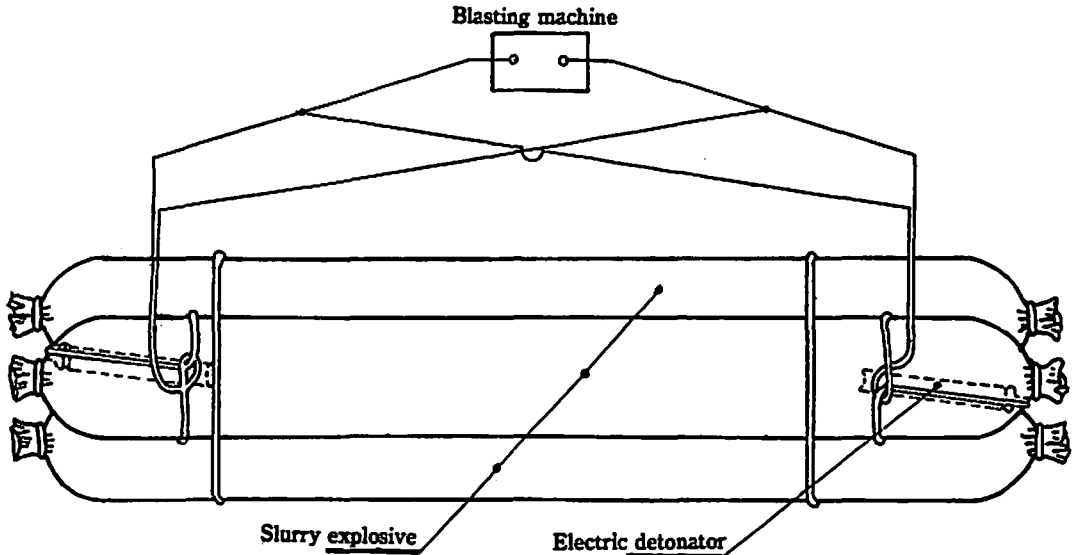


Fig. 4 The primer and the connecting block diagram

$h_2$ は薬包上部の水深 (単位: m),  
 $\mu$ は水深を岩・土層深度へ換算する換算係数,  
 それで水深 $h_2$ を岩・土層の厚さに換算すれば, (3)式により水中張付け発破 $h_1 = 0$ の時の換算最小抵抗線長が得られる。

$$W_P = \mu h_2 \quad (4)$$

表1にこの換算係数 $\mu$ の値を示すが, 換算係数は, 混泥土石で0.55, 砂利で0.50, 岩石で0.40となる。

構築物の破碎小割りの飛散を防止するため, 破碎深度 $W$ と最小抵抗線長 $W_P$ の比は次式を満足するようにする。

$$W/W_P \leq 0.7 \quad (4)$$

以上の関係から水平方向に自由面を有しない張付け発破に対しても適切な自由面係数 $K$ を使用するようにした次式の適用によって装薬量を算出した。

$$Q = \frac{1}{K^{r-1}} \cdot q \cdot \left( \frac{4+3n}{7} \right)^3 \cdot W^3 \quad (5)$$

ただし,  $K$ は自由面係数<sup>3)</sup>で, その値は1.10~1.20である。

$r$ は自由面の数,

$W$ は破碎深度 (単位: m)

新瀧橋の橋脚基礎とリブの厚さは0.8~1.0 mである。石材と場所打ちコンクリート中の骨材は共に強度の高い片麻岩であるので, (2)式によって求めた薬包の重量は0.66kgと1.28kgであった ( $q = 2.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $K = 1.20$ で計算)。

### 4.3 薬包の配列

実験によって張付け発破による破碎域の縦断面は長円形となることがわかった。この長円の短軸の半長(短半軸)が破碎域の深さ(深度)である。一般には, この長円の長半軸と短半軸の比は2~3である。発破後十分破碎され, はつり作業が容易にできるようにするためには, 薬包間の距離, すなわち薬包間隔 $a$ は1.5 $W$ に採ったがよい。

### 4.4 起爆方式

起爆にはFDF-500型の発破器を使用し, 使用スラリー爆薬の薬包毎に2個の電気雷管を挿入した親ダイを並列に結線する方式を採った。親ダイと結線の要領を図4に示した。

## 5. 発破の安全設計

### 5.1 許容地盤振動速度に対する最大許容薬量

新瀧橋建設場所の地質は海成の粘土から成っており, 発破に起因する地盤振動は環境上大きな問題となる。

しかし辛いことに, 東塩川の水深は浅く, 地盤振動の影響範囲が比較的大きなものとならないと判断された。

また, 周囲にある保護すべき建造物では, アーチ型の鋼製送水管が最も重要なものであったので, この送水管の保護に細心の注意を払った。実験結果から得た地盤振動速度の減衰式は次式<sup>4)</sup>のとおりであり, これので地盤振動速度が予測される。過去の工事例のほか発破安全規則の値を参考にし, この鋼製送水管の最大許容地盤振動速度 $V$ を $6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>4)</sup>であるとすれば, 式

$$V=117.4 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{0.94} \quad (6)$$

により、送水管に対する最大許容薬量はそれぞれ近接側0.8kg、反対側1.2kgであった。ただし、

Qは1段当りの最大許容薬量 (kg)、

Rは薬包とアーチ型送水管との間の距離 (m)、である。

## 5.2 水中の衝撃波での安全距離

水中張付け発破によって発生するエネルギーは水を介して伝播して水中衝撃波を生成するが、水の圧縮性は極めて小さく、密度は比較的大きいので、水中での初期衝撃波圧力は陸上部発破での初期衝撃波圧力より特段に大きい。

新澁橋周辺の環境並びに状況を考慮して、水中衝撃波による船舶への影響を考えた。地盤振動速度の許容値から行なった計算では最大許容薬量は1.2kgである。

航行する船舶への水中衝撃波ピーク圧の安全値Pを $0.98\text{MPa}^5$ と設定すると、次式によって船舶の安全距離Rdは13mとなる。

$$P_m=1989 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R_d} \right)^{1.21} \quad (7)$$

そこで、多数の船舶の往来等を考慮して、安全距離を20mに決定した。

## 6. 工事施工状況

上述の薬量と地盤振動速度の計算によって、0.8kgと1.2kgの2種の薬包組を用いて、1度に1薬包組を爆轟することとし、スラリー爆薬(含水爆薬)及び瞬発電気雷管でFDF-500型発破器を使用して発破を実施した。

薬包組を正しく装着するために、発破施工前に橋脚と橋台基礎の中心軸をナイロンコードで明瞭に示し、手作業で薬包組を橋脚と橋台基礎上に装着した。発破は、送水管と反対側の位置を先行して実施した。薬包組装着配置状況は図2に示した。

## 7. 工事の効果

はつり作業も含めて20日程度の工事期間を経て新澁橋の解体工事は無事終了した。使用した爆薬の総量は約50kgで、発破の総回数は52回に及んだ。

発破では3m程度の水柱が立ち、水中の裾部における土砂の高さは1m以下であった。

本工事においては次に述べる事象が観察され、今後の施工指針が得られた。

- ①橋脚と橋台の基礎上に約0.5mの厚さの沈泥があったが、発破効果をよくするために、予め0.4kgの薬量を用いて沈泥を取り除いた後、本薬包組の

装着を行い発破した。

- ②薬包組0.4kg 1個の爆轟時の水柱の高さは最大5m程度に過ぎないが、しかし橋台基礎の沈泥を除去する際に、工期を短縮するため0.4kgの薬包組2個を同時に起爆し爆轟させたことがあった。この時、2波の水中衝撃波が重畳してできた水柱は、水深2mそこそこの箇所でも、高さ8mにも及んだ。従ってこの際、0.4kg以上の薬量使用による発破作業は絶対に行なわないよう注意を払った。

- ③水中の状況は複雑で不明な要因が多いので、最小抵抗線の長さや方向をはっきり確認することは至難なことである。また薬包を基礎のクラック等の空隙中に入れて装薬することもできない。そのため、距離・間隔等の測定には十分注意を払い、ずりの飛散防止に努める必要がある。

## 8. まとめ

水中張付け発破では、削孔作業が不要であり、工期短縮等の面で利点を得る一方、発生する地盤振動及び水中衝撃波が大きい等欠点も生ずるので、これらの影響を極力避け、航行する船舶や構築物等に対する安全を十分確保する必要があった。被破壊体の解体に使用した装薬量は計算で求めた許容最大装薬量以下とした。被破壊体のずりの飛散防止、破砕深度及び水深に関する計算を行い、事故なく新澁橋の解体発破工事を完了した。

## 謝 辞

工事に当っては、本学の鄭建礼氏にご協力を賜った。また、本稿をまとめるに当たっては、(社)火薬学会会員町田和美博士に文章等の手直しをして頂くなどご協力を得た。

ここに、これらの方々に対し衷心より謝意を表する。

## 文 献

- 1) 鄭俊興ほか「橋梁水中裸露薬包折除爆破(橋梁の水中裸装薬による除去発破工事、発破機材、1993年5期)」
- 2) 王岷壽「控制爆破理論與應用(制御発破の理論と応用)」台湾科技圖書股份有限公司
- 3) 王廷武ほか「地面与地下工程控制爆破(地上及び地下工事での制御発破)」

(注) 上記文献中P289の構造特性係数表10-4並びに自由面係数表10-5によって、新澁橋工事での自由面係数Kは1.10~1.20中より採用される。

- 4) (注) 中華人民共和国(P.R.C)の「発破安全規則」によれば、鉄筋コンクリート構造の構築物の最大許容地震波速度は $5\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であるが、鋼トラス構造の構築物の場合には

許容地震波の取り決めはない。  
台湾の研究者はこれを  $8 \sim 16 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  にと  
っている。  
本稿で示す鋼トラス送水管では、ワイヤ  
ケーブルの弛緩等を勘案して、この数値を  
 $6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  とした。  
なお、本送水管は淮海大学（学生等総数約

3,000人）の生活用水を供給している唯一  
の送水管であり、極めて重要なものである。  
5) 朱傳統ほか「爆破安全与防護（発破における安全  
と防護）」  
（注）揚子江長寿地区での裸薬包1個装着の発破  
では、船舶への安全値  $P_{mi}$  は  $98 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$  とさ  
れ、今回もこの数値を採用した。

---

## Demolition of the bridge by under water blasting technique with bare explosive packages

by Jun-Xing SHU\* and Zhong-Yi WEI\*

The bare explosive package under water, a kind of blasting technique used to demolish a bridge has been proved highly effective on reducing the working process, period and the cost for drilling hole. Under the marine mud condition, it is necessary to pay much attention to the harmfulness of ground vibration under water and work out of the safe distance of shock wave in the water.

The result shows that the formulas and parameters selected in this paper are reasonable.

(\*China Institute of Mining & Technology Xuzhou, China)