

水中發破技術現況と 展望

On the situation vision of under sea blasting technique

早山 郁生*

1 緒言

筆者は本州四国連絡橋工事の水中發破計画及び実施、来島海峡岩礁發破等について1971年～1983年の間両工事の実務を担当した、これらの経験から1984年「水中發破」として関係者とともに上梓した。本書が縁となって、韓国、東亜大学校工科大学附設韓国資源開發研究所所長金燦國教授の招聘により釜山において水中發破に関心をもたれる方々に講演をする機会を得たことを喜びとするところである。本日のこの会合を契機に日韓両国の親善が深まれば幸いである。

2 水中發破の進歩と現況

2-1 水中發破の歴史

水中發破の歴史は水中兵器として火薬を使用したことに始まる。1585年ベルギー、アントワープをスペイン軍が攻撃した際に火薬搭載の舟で橋を爆発したという記録がある。1775年米軍は米国独立戦争で英国軍艦に機雷を仕掛けている。1797年米人 R. Fulton はフランスで水雷の研究をしている。1841年ロシア皇帝の臨席のもとでスウェーデン人 Immanuel Nobelは水雷爆発の実験をして成功した。Immanuelは有名なダイナマイトの発明者 Alfred Nobelの父である。1856年クリミア戦争でロシア軍は機雷を敷設している。1862年米国南北戦争において北軍の軍艦カイロは南軍の機雷により爆沈された。1866年英人 Robert Whitehead は魚雷を発明した。1877年ロシアトルコ戦争でロシア軍は機雷を敷設している。以後第一次世界大戦、第二次世界大戦において機雷、魚雷、爆雷は水中兵器として使用され、また1990年～1991年の湾岸戦争においても機雷が使用されたことは周知の通りである。

このように水中兵器の発達により水中爆発の研究がなされた。1948年 R.H.Cole は "Underwater Explosion" を Princeton University Press より出版した。これは

* 工学博士

- ・ひずみ、ひずみ速度
- ・地盤内の3次元的応力
- ・ひずみと応力の組み合わせ
- ・母岩の一体性
- ・材料の局所的な破壊
- ・節理や裂かに沿った岩塊の破壊,あるいはブロック破壊
- ・地下空間の全体崩壊

崩壊や材料の破壊は、解析モデルによる再現がより困難であるため、特殊な場合にのみに考慮される。

数値解析に基づいた信頼できる地質工学的評価は、解析モデルが正しく、矛盾がなく、かつ十分に現実性がある場合にのみ可能となる。検証のすんでいない解析モデルについては、その信頼性のみならず、式の展開や計算機プログラムに関しても確認が必要である。誤りが生じうる原因について注意深く検証する必要がある。概して、解析上の仮定は保守的なものである。もし、ある変数の自然のばらつきが安全性評価に重要な影響を及ぼすという疑いがあるならば、一般に問題は非線形であるため、関連する変数について値を変化させた感度解析を行うことによるのみ信頼のおける解答が得ることができる。

現地における計測結果は、掘削段階や操業段階の実挙動を解析の対象としている場合にのみ、解析の補強として利用できる。破壊を対象とする場合には、実測値は、結果を外挿する場合の基本データとしてのみ利用される。

10. 環境安全性評価

節理の開口に伴う処分場からの地下水の移行、水圏への漏洩、処分場への地下水流入、水や気体に対する地盤の大きな透過性、あるいは地表面の沈下などの、不具合に至る可能性のある状態に対しても、そのモデル化や解析の考え方は第9章に述べたものと同様である。しかし、この場合には、応力-ひずみ挙動解析と浸透流解析との連成が必要となる。そのために必要な地盤の特性を決定するために特別な室内（あるいは現位置）試験が実施される。長期の挙動に関する情報が必要となるため、試験結果を外挿する必要がある。

11. 現位置観測

とくに解析がかなり不確定な仮定に基づいている場合には、可能な限り、長期間の観測を実施すべきである。地盤調査、掘削、操業の期間中の現位置観測には、標準的な方法が適用可能である。地盤、廃棄物、構造部材間の相互作用を観測するために、通常、試験坑あるいは立坑内の現位置試験によってのみ、十分な精度とタイミングで、確認実験が行われる。透水性を実測に基づいて制

御するためには、立地点の状況を検証するために実験を実施することが望ましいが、正確な測定は簡単ではない。

12. 一時的な廃棄物処分場

国によっては、再取り出しおよび管理不能な状態での有害廃棄物の処分を認めないという考え方を採用している。この場合、処分場は一時的な処分を対象として設計される。

そのような廃棄物処分場の主な特徴を以下に示す。

- ① 廃棄物に対する要件は長期の処分に対するものよりも厳しくない。例えば、ガスの漏洩が効果的に管理されるならば、廃棄物の処理は不要かあるいはある程度行うことで十分である。
- ② 一時期にそのままの状態で廃棄される廃棄物は、多くの場合、地表に近い地中ピットに廃棄される。これらのピットは天候の影響を避けるために覆いを必要とする。
- ③ ピット周囲の点検路によって、漏水やガス、温度などが管理される。
- ④ 少量の有害廃棄物は地下施設のボアホールや立坑内に設置される。このような施設は廃棄物の回収も考慮して設計されねばならない。
- ⑤ 一時的な貯蔵は、廃棄物およびその処理物質が長期地下処分に適した特性になるまでにある程度の期間が必要な場合にも行われる。
- ⑥ 一時的な処分場に対するリスク評価手法は、これまでの章で述べてきたものほとんど変わらない。一時的な貯蔵期間（一般に数年間）を超える長期間に対する考慮は必要ない。

13. 最終的な全体評価

地下式処分場の全施設の設計に対する最終的な決定と承認は、数値解析の結果と地盤調査によるのみならず、比較可能な地盤に建設された同種の構造物から得られた経験にも基づくべきである。設計の最終承認は、対象地点や構造物の実態を、関係するすべての情報に基づいて評価する総合的な作業であり、関係する専門家からなる組織によって実施されるべきである。このとき、数値的、物理的結果としてではなく論理的な帰結によってのみ導かれる判断（「工学的な直感や経験」）が行われる。

生じる可能性のある不正確さの原因や、保守的な評価に結びつく仮定について慎重に検討され、最終的な評価に与える影響が考察される。例えば、解析に使用する地盤の特性やその他の変数のばらつきについては、入力データの変動が設計結果に与える影響を把握するために感度解析に基づいた検討が行われる。

第二次大戦までの水中発破に関する成果をまとめた本である。1963年 U. Langefors, B. Kihlström "Rock Blasting" 1973年 R. Gustafsson "Swedish Blasting Technique" 1979年 J. Henrych "The Dynamics of Explosion and Its Use"等において水中発破がとりあげられてきている。水中発破について本格的な研究と実施をしたのはスウェーデンの Atlas Copco でその成果は 1971年に "Underwater Blasting with the OD Method"に記述されている。

ライン川の河川深掘工事に水中発破を実施したのは1961年で 35万立方メートルの掘穿量である。1963～64年にはイタリア、ゼノアで港湾深掘に 80万立方メートルの掘穿量を実施している。1966年ポルトガル レキソス港橋梁工事、1969～70年英国ミルフード港工事では170万立方メートル、1970年トルコ パンディク造船所、1970～72年に南アフリカ イートロンドン港の工事を実施している。日本で1974年に4万4000立方メートルの来島海峡岩礁除去、1979～83年には本州四国連絡橋児島坂出ルート橋梁建設のために 4年以上の長期間に水中発破を行い掘穿量は94万立方メートルにもなった。

場 所	年	目 的	掘穿量 m ³
Genoa, Italy	1963～64	港湾深掘	800,000
Rhine, Germany	1961	河川深掘	350,000
Leixos, Portugal	1966	橋梁建設港湾深掘	31,000
Milford Haven, Great Britain	1969～70	港湾水路深掘	1,700,000
Pandick Shipyards, Turkey	1970	港湾深掘	11,000
East London, South Africa	1970～72	港湾深掘	150,000
来島海峡コノ瀬	1974	水路深掘	44,000
本州四国連絡橋児島坂出ルート	1979～83	橋梁建設	940,000

2-2 水中発破の様式

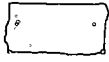
水中発破の様式は以下の 3パターンがある。

- (1) 吊し水中発破：爆薬を水中に吊して行う
- (2) はりつけ水中発破：爆薬を水中の岩石構造物等にはりつけて行う
- (3) 穿孔水中発破：水中の岩石構造物等に穿孔してその中に爆薬を装薬して行う

(水 面)

吊し水中発破

(水 中)



爆薬

はりつけ水中発破



爆薬

穿孔水中発破



爆薬

(岩 石)

2-3 水中発破の実施目的

水中発破の実施目的は以下のような場合がある。

- (1) 港湾、水路、河川、湖沼等の水深を深くし、港湾新設等の工事のため
- (2) 橋梁、橋脚の基礎を造るための岩石破碎
- (3) 海底の沈船を引き上げ解体するため
- (4) 魚礁を造るために岩石を破碎
- (5) 機雷、魚雷、爆雷などの爆発により船舶を沈めるため
- (6) 地震探鉱などで海底で発破をかけるため

2-4 水中発破用火薬類

日本において使用されている水中発破用火薬類は以下のものである。

(1) 水中発破用爆薬

種 類	形態	比重	爆速km/s	耐 水 圧	起爆性	伝爆性	LVD
GX ｽｲｯﾁ	膠質	1.55	6.5-6.8	10at.10日 5at.30日	大	大	有
鑄造爆薬	固形	1.60	6.7-7.0	10at. 30日以上	小	小	無
成形爆薬	固形	1.60	7.0-7.5	10at. 30日以上	小	小	無
従来のｽｲｯﾁ	膠質	1.45	6.2-6.5	3at. 不爆	大	大	有

(2) 水中発破用火工品

- a 水中発破用電気雷管：EDX-1 EDX-S EDX-3 耐水圧は 200m水深まで可能
EDX-1:400kg/cm² EDX-2:800kg/cm² EDX-3:1800kg/cm²
- b 水中発破用導爆線：50m水深まで可能

ことになる。水中発破の設計、施設、環境、人間管理等にわたる計画をたて火薬類の適応性、物性の測定、電気発破の結線、潮流の影響、無線起爆では超音波の受波、電磁誘導ではループアンテナの設置、海水による影響、穿孔間隔、火工台船、火薬類の運搬、貯蔵、雷対策、迷走電流対策、警戒船、監視船、発破時間帯指揮系統、作業員教育、マニュアルの作成、多方面にわたりハード、ソフトの両面から徹底した安全対策をたてる必要がある。

3 水中発破の実施例

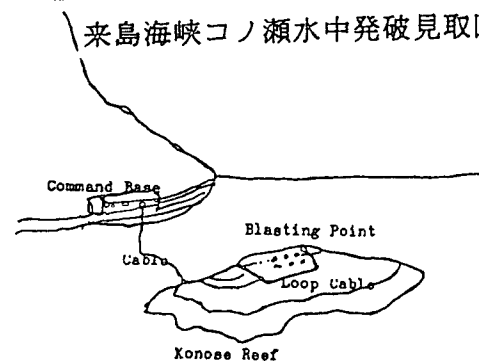
3-1 来島海峡岩礁除去

1974年に来島海峡岩礁除去の相談を受けた。1978年11月～12月に水中発破を実施した。第1回は1孔、装薬量100kg, 第2回は3孔、装薬量350kg, 第3回は6孔、装薬量1080kgである。起爆法は電磁誘導起爆法でループアンテナは35m×45m, 水深は14mである。

3-2 本州四国連絡橋児島一坂出ルートの中水発破

本州四国連絡橋児島一坂出ルートの中水発破施工状況は以下に示す通りである。

1979年1月から1983年9月の57ヶ月間に156回の水中発破を施工し172トンのダイナマイトを使用穿孔本数6592本であった。



(1) 7Aの発破

7Aは坂出番州沖に位置し水深は15～25m, 堆積層20～25mを残したままで、74m×85mの範囲に穿孔し深さマックス50mの孔を1632孔、穿孔間隔1.8m×2.25m穿孔径127mmとした。爆薬はGXダイナマイト、雷管はEDX-2号1孔の爆薬量を20kg及び30kgとした。起爆法は有線電気発破とし発破器により段発1秒差で12段とした。全体を8ブロックに分け1ブロック4回で計32回の発破を実施した。1回あたり薬量は960kgを12回 1080kgを12回、1440kgを8回、総薬量36トンである。1979年1月27日より同年11月7日の285日に及んだ。7Aは1978年10月10日児島坂出ルートの起工式後の最初の発破地点である。

石油精製工場が7Aから300mの所にあるため振動測定、構造物の加速度、歪み重油タンクの液面測定等をきめ細かく行った。7Aの発破の成功は石油精製工場に対する自信をうることができ無自由面のオーバーテン発破と魚介類の被害の皆無の結果も大きな収穫となった。

c 水中発破用親ダイ、ブースター、プライマー等

2-5 水中発破起爆法

水中発破起爆法には次の方法がある。

- (1) 有線電気起爆法
- (2) 無線電気起爆法
 - a 電磁誘導遠隔起爆法
 - b 超音波遠隔起爆法
- (3) 導爆線起爆法

2-6 穿孔発破の実施

穿孔発破には自己昇降式作業台船 (Self-Elevating Platform 略称SEP) を用いる。日本にあるSEPの例、以下の通りである。

名称	寸法 長 幅 高	穿孔機 搭載数	特 徴
たまの	70m 38m 5.5m	6台	水深50mまで使用、開口部が大
盤石	47m 35m 12m	4台	水深50mまで使用、急潮流下でも作業可能
MINISEP	24m 18m 2m	3台	浅海部の作業に適している、位置決め容易
躍進	30m 27m 10m	3台	クレーン船で吊り運搬し海中陸上で使用可能

穿孔法としてはOD法 (Overburden Drilling Method) がある。日本で開発されたものにウエルマン穿孔機がある。

2-7 水中発破計画と影響

水中発破は陸上発破に比較して穿孔作業、装薬作業が難しく不発残留薬の回収は不可能である。水を媒体とするため、発破に伴う水中衝撃圧、地盤振動の影響が問題となる。水中発破の失敗は許されない。

筆者が実施した事項は以下の通りである。

- (1) 水中発破予測計算
- (2) 水中衝撃圧の伝播と魚介類に対する影響調査、グラウンドウエーブ、ウォーターウエーブの解析、魚の種類による水中衝撃圧の影響
- (3) 地盤振動の解析、波動の伝播性

2-8 水中発破施工の安全

水中発破を安全に実施することは極めて重要な事項である。もしも事故が発生すれば原因の如何にかかわらず社会的な大問題となり工事の進行にも支障を来たす

(2) 6 P の発破

6 P は番州の沖600m水深は30~35m堆積層は13~15mを残したまま69m×48mの範囲をマウス50mまで穿孔発破により掘削する。6 P は3ノットの潮流がある。768孔を穿孔し穿孔間隔は2.25m×2.2m及び2.25m×2.0m穿孔径は146mmである。爆薬はGXダイナマイト、雷管はEDX-2号 1孔あたり爆薬量は20kg及び30kgである。起爆法は電磁誘導発破で発破回数は21回、総薬量は16.32トである。1回あたり爆薬量は360kg4回、480kg8回、1080kg8回であり全部斉発発破とした。6 P は南北備讃瀬戸大橋橋脚の最終で1980年11月12日より1981年5月26日まで194日間となった。ルークールは120m×60mの範囲にマウス33mの水深で設置した。6 P の発破でも7 Aと同様に石油精製工場において振動測定をなし測定員を配置した。

(3) 5 P の発破

5 P は備讃瀬戸南航路の北側に位置し水深は21~27m、掘削範囲は71m×37m水深マウス32mまで発破掘削した。5 P から石油精製工場までは約1500mである。爆薬はGXダイナマイト1孔あたり20~28kg、504孔で穿孔間隔は2.2m×2m穿孔径は153mm起爆法は超音波無線起爆と斉発発破である。総発破回数は8回総爆薬量は12.1トである。1回あたり480kg1回、960kg1回、1440kg2回、1728kg1回、2016kg3回である。5 P は5ノットの潮流がある。1979年2月4日より6月1日の120日に実施した。

(4) 4 A の発破

4 A は二面島に位置する掘削範囲は73m×63mで水深は0~8m穿孔深度はマウス7~10mである。爆薬はGXダイナマイト、雷管はEDX-2号 1孔あたりの爆薬量は14~50kg、穿孔間隔は2m×2m穿孔径は153mm、穿孔本数は1189本総爆薬量は41.622ト、発破回数は19回であった。民家までの距離1200mである。4 A では90kg1回、160~170kg2回、720kg1回、1050kg2回、1400kg1回、2000~2200kg8回、2400~2700kg4回、2900~3000kg4回で水中発破19回、岩礁発破4回である。何れも導爆線発破で斉発発破とした。1979年2月4日より1980年9月29日の604日の長期にわたった。

(5) 3 P の発破

3 P は三ツ子島の北側に位置している。ここでも導爆線発破によりGXダイナマイトを用い663孔で発破回数は15回、総薬量23.5トであった。1979年4月2日より1980年5月2日の400日に及んだ。1回薬量は77kg1回、127kg1回、226kg1回、600~1000kg3回、1200~1500kg5回、1800~2100kg7回で水中発破15回、岩礁発破3回である。

(6) 岩黒島3 P、4 P、櫃石島2 P

岩黒島3 P、4 Pで発破28回 33トのGXダイナマイトを用い、導爆線起爆、

櫃石島橋脚部 2 P で電磁誘導発破により33回、G X ダイナマイト10.2トソ使用、した。

本州四国連絡橋児島坂出ルートでは導爆線発破62回 薬量97.3トン、有線電気段発破32回、薬量36トソ、電磁誘導起爆発破54回、薬量26.5トソ、超音波無線起爆発破8回、薬量12.1トソとなる。

3-3 その他の水中発破

この他にも1972年大三島水中発破8回、1975年薬量180～1520kgの本工事規模の水中発破を 7 A で4回、4 A で4回、計8回、1977年には石油精製工場の振動測定のための発破を8回行った。1978年に実施した来島海峡本発破にいたるまでに鳴門海峡、愛媛県吉田町、来島海峡現地において無線起爆法の実験を繰り返して行なった。

3-4 水中発破の成功の原因

1971年本州四国連絡橋公団より水中発破について委託研究を受け1974年運輸省第三港湾建設局より来島海峡岩礁除去の委託研究を受け1983年9月の櫃石島橋の水中発破まで12年余の長年月水中発破に関与してきた。水中発破についてはまさに完璧な成果をあげることができた。その原因は以下記述の通りである。

(1) 基礎的な研究を進めたこと

水中発破施工に必要な基礎研究を行った。境界領域の仕事であり新たに基礎実験や計算をし、文献調査をした。これら基礎研究を着実に成果をあげることが成功への早道である。

(2) 新器材の登場

器材、測定装置、電子計算機の導入が急速に進んだこと、S E P が建造されコンピューターの普及などが丁度時宜を得たものであった。スウェーデンで1960年代に始まった水中発破を更に発展させる時期であった。

(3) オイルショックにより時を稼ぐことができた

1973年のオイルショックは本工事着工直前であった。工事は全面的に中止された。1978年10月の着工までの5年間は不充分であった研究をするために極めて有効であったといえることができる。

(4) 記録の保持をした

記録は委託項目毎に保存された。また記録映画も整理した。瞬間的な発破の記録には映画が大いに役立った。

(5) 委員会が和気あいあいであった。

12年余にも及ぶ長期間であり委員会の参加者はのべ350人にもなった この間まことに和気あいあいの委員会であった。本州四国連絡橋公団、運輸省の委託側との信頼関係も極めて大なるものがあつた。

4 水中発破の展望

水中発破をいかに利用するかは要求により考えるべきである。「必要は発明の母—Necessity is the mother of invention」という諺の通り、何をなすべきかということから出発しなければならない。現在考えられるテーマはどのようなものであろうか。例えば以下の項目をあげてみよう。

(1) 港湾の整備

船舶は大型となってきたために従来の深度では不都合となり港湾の深さを増さねばならなくなった。港の岸壁の修理も必要になる等である。

(2) 深海鉱山の開発

深海鉱山は今後の世界における大問題である。開発には水中発破が当然問題となる。どの程度の深度が必要になるかによって、水中発破の方法、使用器材も当然考慮しなければならない。

(3) 長大橋等の橋脚の建設

本州四国連絡橋のような長大橋建設には水中発破が必要になる。

(4) 水中発破に関連した作業のロボット化

水中発破関連の仕事には危険を伴う作業がある。作業のロボット化が必要になる。新しいロボットの開発は重要な問題である。

(5) 水中衝撃圧及び地盤振動の軽減

現在の水中発破で問題になっている水中衝撃圧の軽減は構造物魚介類に対する影響を少なくするために、また地盤振動の軽減も対策が必要になる。

(6) コンピューターによる予測

最近発破においてコンピューターによる予測が実用化されてきた 水中発破においても各種の想定に対して予測が詳細且つ正確に広く利用されるであろう。

本學會發刊書籍

ANFO 爆劑新發破學. 東亞出版社

新火藥發破學. 機電研究社

新火藥發破學解説. 寶晋齊

서울地下鐵工事 3, 4號線發破工法.(非賣品)

岩石 力學. 機電研究社.

岩石 力學解説. 同上.

智山許墳博士回甲記念集.

智山許墳博士古稀記念集.