

[227] 深海底-4000mにおける特殊水中モルタルを用いた傾斜計の設置

正会員 ○大橋清一（五洋建設技術研究所）

正会員 草野守夫（五洋建設技術研究所）

正会員 小堀光憲（五洋建設技術研究所）

尾崎 彰（五洋建設技術研究所）

1. まえがき

KAIKO 計画 II（日仏日本海溝協同調査）の一環として、高分子増粘剤を添加して水中で不分離性を有する特殊モルタル（以下、特殊水中モルタルと称す）を用いて、-4000mの深海底に傾斜計・地震計を設置する機会を得て、昨年の8月、襟裳海山に傾斜計2台、地震計1台を設置した。

傾斜計等の設置に際しては、深海という未知の世界における特殊水中モルタルの性状把握とその運搬・打設とすべてが新しいことへの挑戦であった。

本報告では、深海底での低温、高圧下におけるモルタルの諸性状の変化を考慮した配合の選定および運搬・打設システム等について得られた知見を述べる。

2. KAIKO 計画 II の概要

KAIKO 計画 II は、地震の解明と予知のために、日仏の科学者による日本海溝や駿河トラフの深海での地質調査ならびに特殊な海底傾斜計と地震計の設置を目的としたプロジェクトであり、昨年の夏、約2か月間に渡って実施された。実施に当っては、最新鋭の 6000 m 級潜水艇ノチール（仏製）が使われた。（図-1 参照）

3. 施工概要および課題

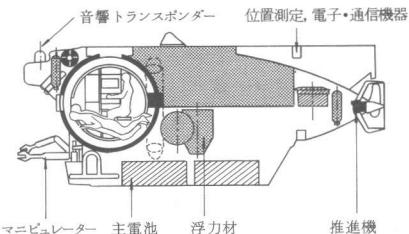
震源地周辺の起伏に富んだ深海底に傾斜計、地震計を設置して、岩盤の微小な挙動を覚えるためには、計器を岩盤に一体化することが重要である。この岩着のためには、簡易な材料として、特殊水中モルタルの適用が有効であると判断した。特殊水中モルタルの利用に当つての施工手順は、母船上でのモルタルの練り混ぜ、海底-4000mまでの運搬、潜水艇のマニピュレーターを用いた設置位置への移動および打設が想定された。しかしながら、全く未知の深海底での特殊水中モルタルの施工のため、次のような解決すべき課題があった。

- 1) 海中落下速度 2 ~ 3 m/sec (潮流等に流されるため、これ以上遅くできない) で 4000 ~ 6000 m の長距離を落下させてもモルタルが分離しないこと。
- 2) 長い施工時間 (練り混ぜから打設まで約 7 hr) に対して、モルタルが所要の流動性を保持すること。
- 3) 高圧力下 (計画 600 kgf/cm²) において、モルタルが流動性を保持することおよび硬化体として常圧下の物性ならびに力学的性質と遜色がないこと。

これらの課題に加えて、さらに温度変化 (母船上約 30°C, 深海底付近約 2°C) に対するモルタルの性状変化の把握と海底でのマニピュレーターを用いた簡単な操作で施工できるモルタル打設システムの工夫が要求された。

4. モルタル配合の決定

4.1 試験項目



概要 1. 能力 1) 最大潜水深度 6,000 m
2) 最大速力 2.5 ノット
3) 潜航時間 13 hr
4) 乗員 3 名
2. 寸法 全長 8.00 × 幅 2.70 × 高さ 3.45 m

図-1 潜水艇ノチールの概要

前述したような課題を解決し、適切なモルタルの配合を決定するために、常圧力下に加えて高圧力下においてもモルタルのフレッシュな状態での性状（フロー値の経時変化、凝結時間）と硬化後の力学的性質を把握する各種試験を実施した。表-1に試験項目を示す。

4.2 高圧力（ 600kgf/cm^2 ）による影響

フレッシュな状態で高圧力下に置かれたモルタルのフロー値の経時変化、凝結時間および硬化後の物性と力学的性質等を調べるために、高圧力釜（最大 1tf/cm^2 加圧可）を用いて実験を行なった。なお、凝結時間、フロー値の測定は、試験時ごとにその都度、圧力釜から取り出して行なった。

(1) 凝結時間

図-2に常圧力下（ 1kgf/cm^2 ）と高圧力下（ 600kgf/cm^2 ）の凝結試験結果を示す。高圧力下のモルタルの凝結時間は、常圧力下での始発 63.5hr 、終結 84.3hr に対して、それぞれ 25.5hr 、 38.0hr で 4割程度に短くなっている。これは、高圧力によるセメントの化学反応の促進に起因するものと考えられる^{1),2)}。そして、この高圧力下での凝結時間の短縮は、海底での作業時間が常圧力下での 2.5 倍に相当するということで、本施工におけるモルタル打設までの凝結時間に大きな影響を及ぼす。

(2) フロー値の経時変化

高圧力下でのフロー値は、常圧力下に比べ加圧後 5hr で約 20mm 小さくなっている。（図-3 参照）しかしながら、この問題に対しても、配合を変化させることにより対応できるので本施工に当って、その影響は少ないものと推察される。

(3) 圧縮強度

$W/C=50\%$, $s/c=2$, $H/W=0.8\text{wt\%}$ (H ; 高分子剤, W ; 混練水) の配合で、モルタルを型枠（供試体 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ ）に充填し、そのまま 3°C 海水中の高圧力下において 6 日間養生した。圧力解放後の供試体と標準養生のものの圧縮強度の結果は、次のようにある。

- ① 600kgf/cm^2 下, 3°C 海水中養生 $\sigma_0=232\text{kgf/cm}^2$ (空気量 0 %)
 - ② 常圧力下, 20°C 水中養生 $\sigma_0=260\text{kgf/cm}^2$ (空気量 6.2 %)
- ただし、高圧力下の値は、圧力解放時に一度圧縮された空気が膨張し、供試体のフープ方向に無数のクラックが発生しているため、あくまでも参考値である。外観によれば、緻密な組織になっていて、高強度のモルタルが得られていることが予測される。

(4) 硬化モルタルの微視的な観察

写真-1 a, b に常圧力下と高圧力下での SEM の観察結果を示す。常圧力下で硬化させたモルタルの破断面は、箔状または薄板状の微粒子になっており、セメント水和物の典型的なトバモライト組織である。一方、高圧力下でのモルタル破断面は、平らでトバモライト組織が少なく、常圧力下では全く見られない帶状の水和生成物からなっており微細化した緻密な構造であることがわかる。また、X.R.D. でも高圧力下で硬化させたモルタルは、常圧力下のものより、

表-1 モルタルの試験項目

試験項目	練り混ぜ後の環境下	
	常圧(1気圧)	高圧(600気圧)
フローケイズ（経時変化）	○	○
空気量	○	○
凝結時間	○	○
圧縮強度	○	○
硬化モルタルの観察	偏光顕微鏡による	○
	走査型電子顕微鏡(SEM)による	○
	X線回折による(X.R.D.)	○

○ ; 代表的な配合についてのみ実施

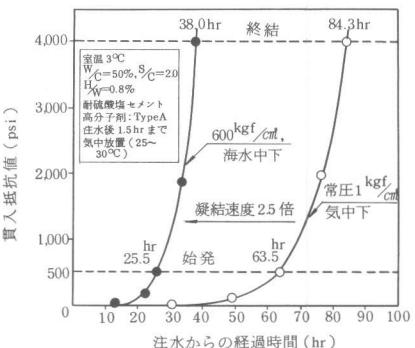


図-2 高圧力の影響による凝結時間の違い

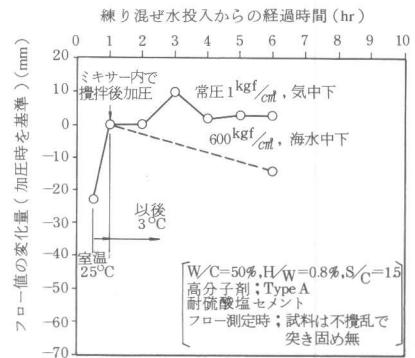


図-3 高圧力下(600kgf/cm^2)におけるフロー値の経時変化

屈折強度のパックグランド値が高く、非晶質層が多い結果になっており、SEMでの組織は微細化した緻密な構造という結果を裏づけている。

4.3 フロー値・凝結始発時間の設定

(1) フロー値について

常圧力下における実施工のモルタル運搬打設容器（詳細は後述）を使った数回の打設実験によって、モルタルがその自重で自然落下し、かつ仕上り面が平坦になるような流动性を保つフロー値として、160～180 mmが必要であることがわかった。したがって、フロー値の目標値としては、高圧力下での20 mmの低減量を考慮して、180～200 mmを設定した。

(2) 凝結始発時間

施工手順、温度変化、高圧力下等を考慮に入れると凝結始発時間は、次の2つの条件を満足しなければならない。すなわち①温度30°Cにおいては、〔母船上（夏場約30°C）でのモルタル混練開始から水深約500m（約10°C）に達するまでの所要時間1.5hr〕+〔モルタル流動に必要な余裕時間2.5hr〕=4.0hrが必要であり、②温度2°C、高圧力下の施工終了までの作業時間においては、〔施工時間7hr+余裕時間2.5hr〕×高圧力下での凝結促進効果2.5倍=24hrが必要である。なお、施工終了後は、遊離石灰の溶出による品質の低下を抑えるため、速やかな凝結硬化が望ましい。

4.4 モルタル配合の決定

前述(1), (2)の設定条件を満足する配合を求めるために, W/C , s/c , 高分子増粘剤の種類, 凝結遲延剤の添加量, セメントの種類等を適宜変化させて実験を行なった。図-4は, フロー値と W/C , s/c の関係である。図より, 混練直後のフロー値180~200 mm を満足するのは, $W/C=40\%$, $s/c=1.0$, $W/C=45\%$, $s/c=1.0$ と1.5, $W/C=50\%$, $s/c=2.0$ の4配合であることがわかる。混練時の高分子増粘剤の分散性を考えると s/c は1.5以上が望ましいので $s/c = 1.0$ を除くとフロー値に関して適合する配合は2つである。上記, 2つの配合による練り置き時間とフロー値の関係を図-5に示す。 $W/C = 45\%$, $s/c = 1.5$ の場合, フロー値は練り置き時間とともに減少し, 注水後5 hr 経過時で168 mmまで低下するのに対して, $W/C = 50\%$, $s/c = 2.0$ の場合, フロー値は, 注水後5 hr 経過時212 mmで十分な流動性を保つことがわかった。以上の結果より, フロー値の高圧力による低下, 経時変化を考慮に入れたモルタル配合は, $W/C = 50\%$, $s/c = 2.0$, $H/W = 0.8 \text{ wt\%}$ であると判断した。

図-6に室温と凝結始発時間の関係を示す。前述の凝結始発時間の設定値①30°Cの温度に対して4 hr, ②2°C, 高圧力下で

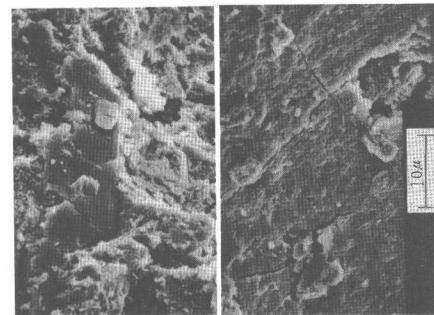


写真-1a 常温常圧下 写真-1b 3°C, 600kgf/cm²下

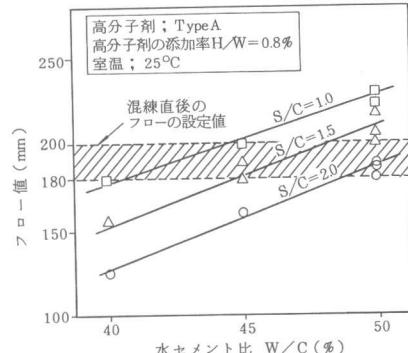


図-4 水セメント比、 s/c とフロー値の関係

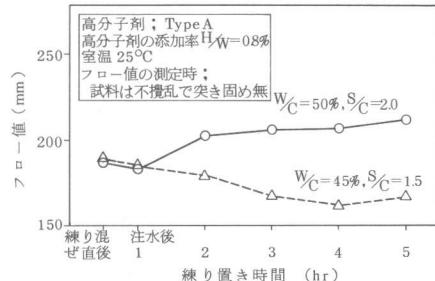


図-5 練り置き時間とフロー値の関係

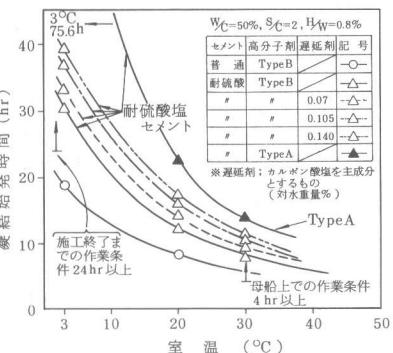


図-6 室温と凝結始発時間の関係

の作業終了までの所要時間24hrの2つの条件を満足する組合せは、耐海水性にすぐれた耐硫酸塩セメント、TypeBとなる。表-2に最終的に決定した適切なモルタル配合を示す。

5. モルタルの水中運搬打設システム

図-7にモルタルの水中運搬打設システムを示す。このシステムは、深海ブイ、トランスポンダー（発信器、自動切り離し器装備）、モルタル容器、錘（チーン）より構成されている。ここでは、特にこのシステムのなかのモルタル打設に関するモルタル容器について述べる。容器の材料は、強くて軽量であること、航海中（母船上等）で腐食しないことなどが要求される。このため、容器本体はアクリル製、付属品（ピン、脚等）は、ステンレス製とする。今回、モルタル容器の製作において特に工夫した点は、①海中運搬時の材料分離および流出対策、②潜水艇のマニピュレーターによる海底での容易な打設作業、③海底の斜面、凹凸に対応でき、かつモルタル打設時の漏れ等による損失防止などである。まず、①に関しては、圧力変化に対応するため水密でない構造にするとともに、上蓋、下蓋を装備した円筒容器にしている。②に関しては、下蓋の内側に織布と鉄板から成るフレキシブルな底蓋（開口後はモルタルの流出を防ぐスカートになる）を吊り構造とし、この底蓋は切断ピンの操作によって吊り糸が切断され、モルタルの自重によって容易に打設できるようにしている。なお、海底での運搬、移動をマニピュレーターで容易にできるように、モルタルを含めた容器全体の水中重量を30kgfにしている。③に関しては、図中には示していないが、容器側面に3本の高低調整脚（1本は水平方向の調整も可能）を装着するとともに、海底面の凹凸と傾斜に対して、前述のスカートと容器下端周囲にジャバラ構造（伸縮自在）を配置することで対処している。なお、実施工の手順の概念を図-8に、マニピュレーターによる施工状況を写真-2に示す。

6.まとめ

本報告は、-4000mという深海の環境下（高圧力、低温）における特殊水中モルタルの施工に当っての諸問題の検討結果について述べた。特に、高圧力下におけるモルタルの諸性状については、セメントの凝結が促進されること、硬化体の組織は常圧力下で見られる一般の水和生成物とは全く異なり、緻密な組織が形成されていることがわかった。

最後に、今回設置した傾斜計、地震計が地震の解明、ひいては東海地震等の予知に寄与することを念願し、本施工に際して終始御指導を頂いた東大理学部、飯山、金沢両先生、北大理学部、島村先生と硬化体組織の分析に御協力頂いた名工大、鈴木先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 化学便覧 基礎編II（改訂3版），日本化学会編，p395.
- 2) 岡田、藤井、山田、新池；コンクリートの加圧養生に関する2,3の実験、セメント技術年報、No.16, 1962, p281~283.

表-2 モルタル配合

Air (%)	W/C (%)	S/C	W	C	S	混和剤		(kgf/m ³)
						高分子剤	消泡剤	
4.0	50	2.0	312	624	1248	2.50	0.62	(W×0.8%) (C×0.1%)

使用材料

セメント：O社耐硫酸塩セメント $\rho=3.20$
細骨材：君津産山砂 $\rho=2.63$
高分子増粘剤：D社セルロースエーテル系(TypeB)
消泡剤：N社非イオン界面活性剤

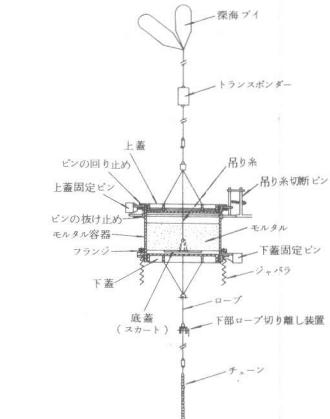


図-7 モルタルの水中運搬打設システム

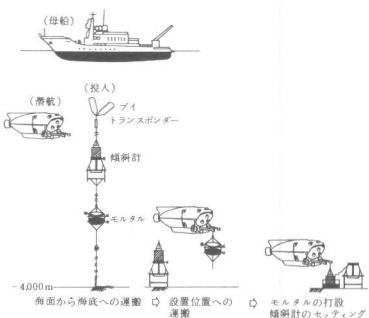


図-8 施工手順

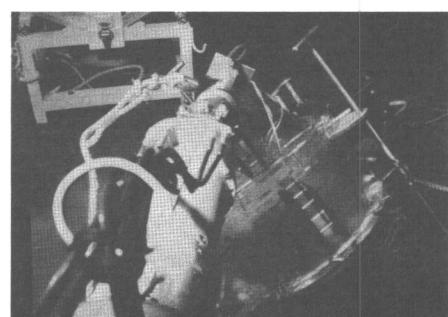


写真-2 マニピュレーターによるモルタル容器の設置状況