

潮流下における基礎構造物の設計および施工に関する 実験的アプローチ

～摩擦係数の把握実験および水中不分離性コンクリートの流水下打設実験～

(株)大林組	来島大橋 P. T		南	孝雄
同	上		戸梶	章
同	上		森下	幸直
同	上		宮本	佳明
同	上	正会員	渡辺	朗
同	上	正会員	若松	岳

1. まえがき

海中基礎工法の一つとして、支持地盤上にケーソンを設置しケーソンの中にコンクリートを充填して基礎構造物を完成させる、いわゆる「設置ケーソン工法」がある。

本四ルート来島大橋の海峡部下部工においてもその適用が検討されているが、厳しい潮流条件下（最大潮流速7kt以上）での施工となるため、検討作業において次の点が問題となった。

①ケーソンは、設置後大きな潮流力を受けることになるが、中詰めコンクリートを打設するまでのケーソンの滑動安定を照査する際、ケーソンと支持地盤（岩盤）の摩擦係数は実際にどの程度期待でき、また設計上いくらにすれば良いか

②岩盤掘削後、その軟弱部をコンクリートで置換える場合、流水下で水中コンクリートを打設することになるが、静水下と異なりコンクリートの品質低下、表面の洗掘、著しい水質汚濁等が生じないか

そこで著者らは、これらの点を定量的に把握するべく「摩擦係数の把握実験」と「水中不分離性コンリートの流水下打設実験」を行なった。

本報では、その2つの実験の概要と実験結果から得られた知見について述べる。

2. 摩擦係数の把握実験

2.1 実験の目的

ケーソンと岩盤の摩擦係数を調べるために、ケーソンモデル底面の材質、形状や岩盤の不陸状態を変化させて、ジャッキによりモデルを岩盤上で横引きし、自重と滑動時水平荷重から摩擦係数を求めた。

2.2 実験の概要

(1) 実験設備

実験場所内に、岩盤を凹凸面（±150mm 以下）と平坦面（±50mm以下）に仕上げた2か所を準備した。それぞれの岩盤面のコンターを図-1に示す。

ケーソンモデルの形状寸法を図-2に示す。モデルNo.1は鋼製フラット面とコンクリート刃口面を、モデルNo.2はコンクリートフラット面と鋼製刃口面をそれぞれ持つものである。モデルは2段重ねとし、上下段を逆転あるいは天地反転させることにより、自重一定でモデル滑動底面の材質、形状を変化させることができる。

(2) 実験条件とその組み合わせ

実験条件を表-1に(以下、気中状態/水中状態、岩盤凹凸面/岩盤平坦面、鋼板底面/コンクリート底面、底面フラット/底面刃口と区別する)、実験の組合わせを表-2に示す。

(3) 実験要領

実験要領を図-3に示す。ケーソンモデルをセンターホールジャッキにより横引きし、引張力を鉄筋計(D32)にて、変位量を巻込み型変位計にてそれぞれ自動計測した。

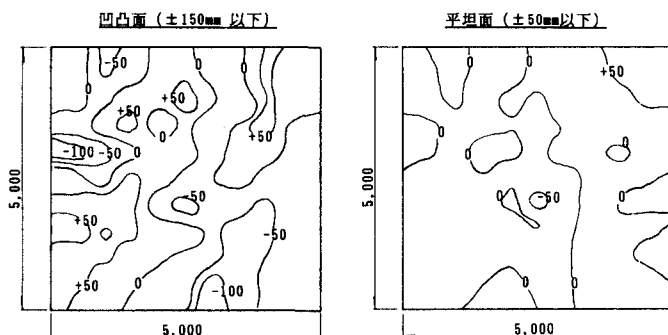


図-1 岩盤面のコンター

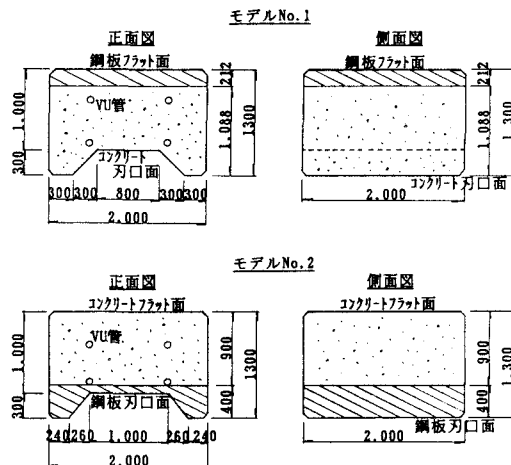


図-2 ケーソンモデルの形状寸法

計測結果から、滑動時の引張力（水平荷重）Hを抽出し、ケーソンモデルの自重Vを用いて下式により摩擦係数 μ を算出した。

$$\mu = \frac{H}{V}$$

なお、水中状態のケースにおいては、ケーソンモデルの水中部分の浮力を自重から控除した。

1 ケースの横引き回数は5回を標準とし、データのばらつきに応じて適宜追加した。

2.3 実験結果

実験より得られた摩擦係数の分布を図－4に示す。一部のデータを除き、同一ケース内でのデータの変動は小さく、概ね良好なデータが得られた。滑動底面や岩盤面の状態による摩擦係数の変化について次の点が認められた。

- ①一部のケースを除き、気中状態と水中状態での摩擦係数の差は小さい。
- ②同一条件内で、底面フラットと底面刃口での摩擦係数の差は小さい。
- ③コンクリート底面の方が鋼板底面よりも摩擦係数は大きく、前者で0.6～0.7、後者で0.3～0.4である。
- ④岩盤平坦面の方が、岩盤凹凸面よりも全体的に摩擦係数は大きい。

なお、①で述べた一部のケースとは、鋼板底面－岩盤凹凸面の場合であり、水中状態（実験No.9,10）の方が気中状態（実験No.1,2）よりも摩擦係数が大きい結果となった。この理由として、水中状態の実験を気中状態の実験の後に行なったため、上記④の結果からみて、繰返し実験による岩盤凹凸面の凸部が摩耗したことが考えられる。

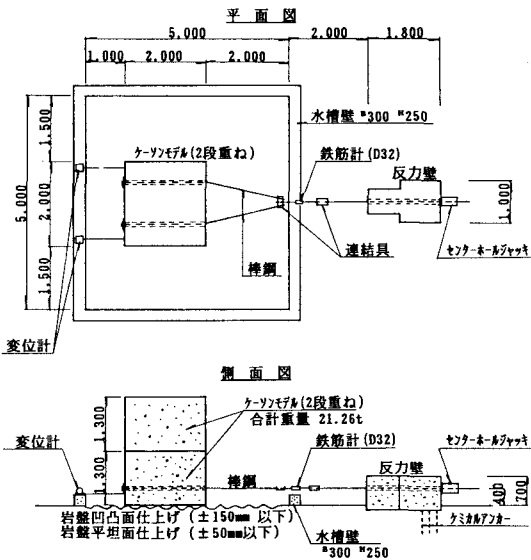
また、モデル底面と岩盤面との接触面積の点から②と④の結果を合わせてみれば、今回設定した程度の底面形状の

表－1 実験条件

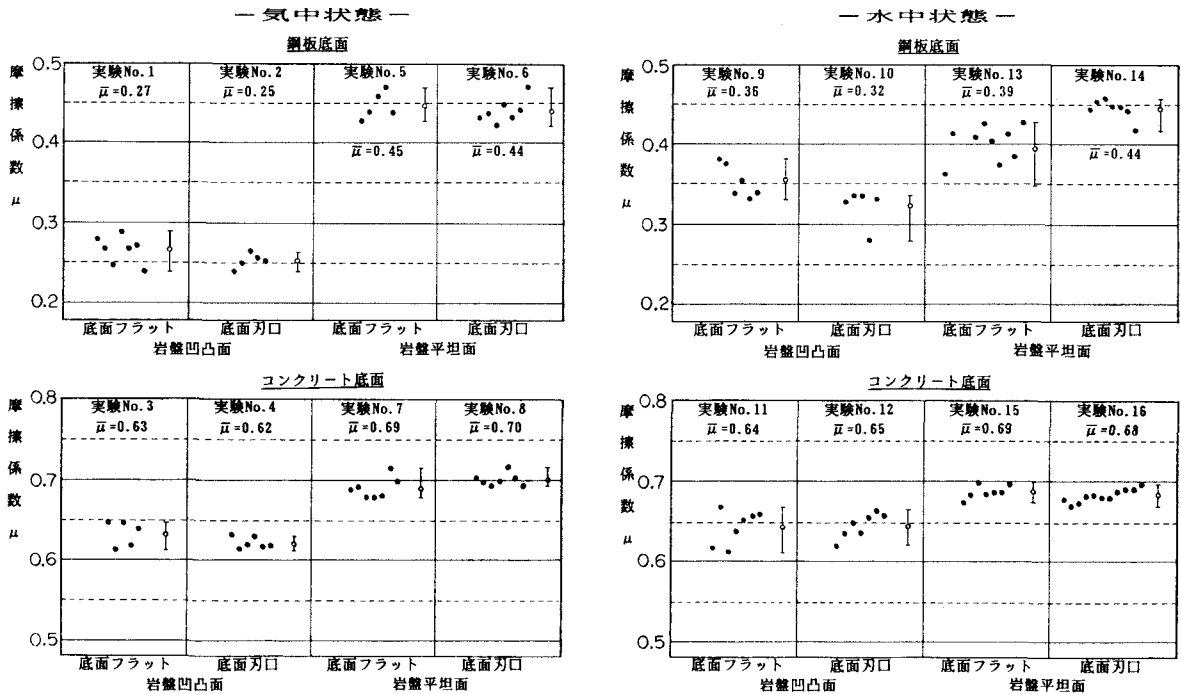
項 目	実 験 条 件
岩 盤 面 の 乾 湿	気 中／水 中
岩 盤 面 の 不 陸	凹 凸 面／平 坦 面
ケーソン底面の材質	鋼 板／コンクリート
ケーソン底面の形状	フラット／刃 口

表－2 実験の組み合わせ

実験 No.	岩 盤 状 態		ケーソン底面	
	乾 湿	形 状	材 質	形 状
1	気 中	凹 凸 面	鋼 板	フラット
2				刃 口
3			コンクリート	フラット
4				刃 口
5		平 坦 面	鋼 板	フラット
6				刃 口
7			コンクリート	フラット
8				刃 口
9	水 中	凹 凸 面	鋼 板	フラット
10				刃 口
11			コンクリート	フラット
12				刃 口
13		平 坦 面	鋼 板	フラット
14				刃 口
15			コンクリート	フラット
16				刃 口



図－3 実験要領



図－4 摩擦係数の実験結果

差（フラット、刃口）では摩擦係数におよぼす影響は小さいと考えるのが妥当であろう。

実験で得られた摩擦係数（実験値）と、現行の基準、指針等で述べられている滑動安定照査に用いる鋼と岩盤あるいはコンクリートと岩盤の摩擦係数（設計値）を比較したものを表－3に示す。

設計値は、実験値に対して安全側となっており、その使用は妥当であると考えられるが、鋼板底面の場合には、岩盤の不陸状態によっては摩擦係数が0.3を下回る可能性があることを考慮しておく必要がある。

表－3 摩擦係数の実験値と設計値

摩擦係数の実験値				摩擦係数の設計値			
モデル底面 材質	形状	岩盤面の 不陸	岩盤面の乾湿 気中 水中	国鉄 ¹⁾	港湾 ²⁾	道路橋 ³⁾	本四 ⁴⁾
鋼板	フラット	凹凸	0.27 0.36	—	—	—	0.3
		平坦	0.45 0.39				
	刃口	凹凸	0.25 0.32				
		平坦	0.44 0.44				
コンクリート	フラット	凹凸	0.63 0.64	tan30° (0.58)	0.5	0.6	0.5
		平坦	0.69 0.69				
	刃口	凹凸	0.62 0.65				
		平坦	0.70 0.68				

1) 土木学会「国鉄建造物設計標準」
2) 日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準」
3) 日本道路協会「道路橋示方書」
4) 本州四国連絡橋公団「仮設物設計指針」

3. 水中不分離性コンクリートの流水下打設実験

3.1 実験の目的

流水下における水中不分離性コンクリートの表面性状や品質の変化および水質への影響を調べるために、最大 2.0ktの流速を発生できる大型回流水槽を設置して水中不分離性コンクリートの打設実験を行なった。

3.2 実験の概要

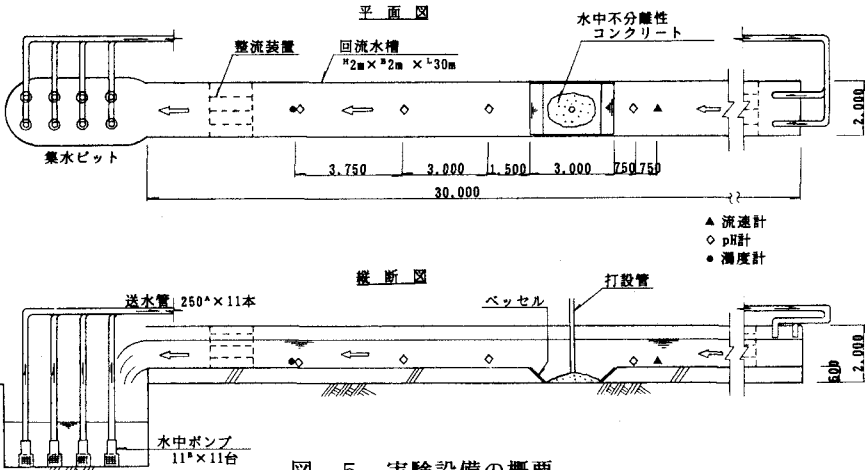
(1) 実験設備
実験設備の概要を図－5に示す。回流水槽は、幅2m×高さ2m×延長30mとし、中央にコンクリートを打設する

台形ベッセルを設置した。実験には海水を使用し、10⁸の水中ポンプ11台を用いて循環させた。

(2) 実験条件とその組合せ

実験条件を表－4に、実験の組合せを表－5に示す。

実験No.5で用いた洗掘抑制工とは、打設領域を平面的にシートで覆う構造で中央に打設管挿入用の開口を設けたものである。すなわち、強潮流時のコンクリート表面の洗掘を防止する一方法として、その効果を確認するものである。



図－5 実験設備の概要

表－4 実験条件

項目	実験条件
流速 (kt)	1.0 / 1.5 / 2.0
SCA [*] 添加量 (kg/m ³)	0 / 2.3 / 2.5 / 2.8
洗掘抑制制工	無 / 有
打設方法	静水・流水下 ¹⁾ / 完全流水下 ²⁾
使用セメント	高炉B種 (BB) / 超低発熱 (T)

* 水中不分離性混和剤
1) 打設管筒先がコンクリートに埋まってから通水開始
2) 流水条件下で打設開始

表－5 実験の組合せ

実験 No.	配 合		流 水 条 件		洗 掘 抑 制 工	打 設 方 法
	使用セメント	SCA (kg/m³)	流速 (kt)	時間 (hr)		
1	BB	0	1.5	6	無	静水・流水下
2		2.3	1.0			
3			1.5			
4			2.0			
5		2.5	1.0		有	
6			1.5			
7			1.5			
8			2.0			
9		2.8	2.0		無	
10	T	2.5	1.5	12		

表－6 コンクリート性状の変化に関する計測

項目	方法
打設コンクリート天端の目視観察 (水洗前)	流水終了時のスケッチ、写真撮影
打設コンクリート天端の目視観察 (水洗後)	スケッチ、写真撮影
コアサンプルの目視観察・圧縮強度・単位重量	コアサンプル 3本/ケース×上下2点/本現場水中養生 材令28日圧縮試験
流水中の天端高さの変化	レッドによる測定

表－7 水質汚濁に関する計測

項目	方法
SSおよび濁度	水槽内流水の濁度計による現場計測および採水機体の室内SS分析
pH	水槽内流水のpH計による現場計測
その他 (COD/DO等)	打設前、通水終了時の採水機体の室内分析

(3) 実験方法

コンクリートの製造は、打設実験場所から車で約30分離れた生コンプラントにて行なった。

コンクリートの打設はポンプ車（4thブーム）により行ない、打設管先端に設けたピンチバルブの開閉操作によりコンクリート打設を開始あるいは終了した。

打設管筒先高さはベッセル底より20cm上りとし、全打上がり高さ約50cmまでそれを維持した。1回の打設量は約2m³であり、20分弱で打設した。

表-8 コンクリートの配合

実験 No.	セメントの 種類	SCA 添加量 (kg/m ³)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラブ 厚 (cm)	空気量 の範囲 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						スラブ 厚 (cm)		空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	
								W	C	S	G	SCA	ad1	ad2	気中		水中	
1	BB	0	20	スラブ 18±2.5	4±1	49	44	193	394	717	936	0	C× 0.2%	—	スラブ 20.5	4.7	449	—
2	"	2.3	"	57.5 ±2.5	6以下	65	40	236	364	618	950	2.3	C× 0.25 %	C× 0.2%	60.0	3.5	281	262
3															60.0	3.4	279	229
4															56.5	3.3	303	262
5															58.5	3.6	304	262
6	"	2.5	"	"	"	"	"	240	370	612	941	2.5	"	"	55.0	3.5	311	262
7															60.0	3.4	316	304
8	"	2.8	"	"	"	"	"	255	393	589	905	2.8	"	"	58.0	3.3	275	262
9															57.5	3.3	295	289
10	T	2.5	"	"	"	"	"	220	338	629	967	2.5	"	"	55.0	6.0	277	248

ad1: AF減水剤 ad2: 高性能減水剤

表-9 コンクリート表面の状況

実験No.	配合		流水条件		洗掘抑制工	打設方法	天端目視観察結果	天端洗掘量の分布(流向中心軸)	
	セメント	SCA(kg/m ³)	流速(kt)	時間(hr)				下流	上流
1	BB	0	1.5	6	無	静水・流水下	モルタル分、骨材が流出		
2	BB	2.3	1.0	6	無	静水・流水下	全体に平坦 表層部ノロがわずかに流出		
3	BB	2.3	1.5	6	無	静水・流水下	全体に平坦 表層部ノロが流出		
4	BB	2.3	2.0	6	無	静水・流水下	全体に平坦 モルタル分、骨材が流出		
5	BB	2.3	2.0	6	有	静水・流水下	全体に平坦 表層部の流出なし		
6	BB	2.5	1.0	6	無	完全流水下	全体に平坦 表層部の流出なし		
7	BB	2.5	1.5	6	無	静水・流水下	全体に平坦 表層部ノロが若干流出		
8	BB	2.8	1.5	6	無	静水・流水下	全体に平坦 表層部ノロが若干流出		
9	BB	2.8	2.0	6	無	静水・流水下	全体に平坦 モルタル分、骨材が流出		
10	T	2.5	1.5	12	無	静水・流水下	全体に平坦 表層部ノロが流出		

水槽内の循環水（海水）は実験ケースごとに新しいものと入替えた。

計測項目および計測方法を目的別に表－6、表－7に示す。

(4) コンクリートの配合

コンクリートの配合を、フレッシュコンクリートの試験結果および標準供試体の圧縮強度試験結果と合わせて表－8に示す。

3.3 実験結果

(1) コンクリート表面の状況

打設翌日に行なったコンクリート表面の目視観察結果とコンクリート天端の測量結果を表－9に示す。流水によるコンクリート表面の洗掘について、次の点が認められた。

①流速 1.0ktでは、洗掘はほとんど生じない。（実験No.2,6）

②流速 1.5ktでは、水中不分離性混和剤（以下 SCA）添加量が 2.5kg/m^3 の場合でも全体的に数mmの洗掘が生じる。（実験No.7）

また、流水の巻込みによる局所的な1cm以下の洗掘も見られるが、SCA添加量を 2.8kg/m^3 に増やすことによりこれを抑えることができる。（実験No.8）

③流速 2.0ktでは、SCA添加量（ $2.3\sim 2.8\text{kg/m}^3$ ）に関わらず全体的に1cm～2cmの洗掘が生じる（実験No.4,9）が、洗掘抑制工によりこれを防ぐことができる。（実験 No.5）

⑤低発熱セメントを用いた場合（実験No.10）は、高炉セメントの場合（実験No.7）に比べて洗掘量が大きくなる。これはコンクリートの凝結時間の差によるものと考えられる。

(2) コアの品質

材令28日におけるコア供試体の圧縮強度試験結果を表－10に示す。冬季の打設実験であり現場水中養生であったため、コアの圧縮強度は標準供試体のものの約70%前後になったが、水中不分離性コンクリートの場合（実験No.2～10）、コア採取位置による品質のばらつきは少なかった。

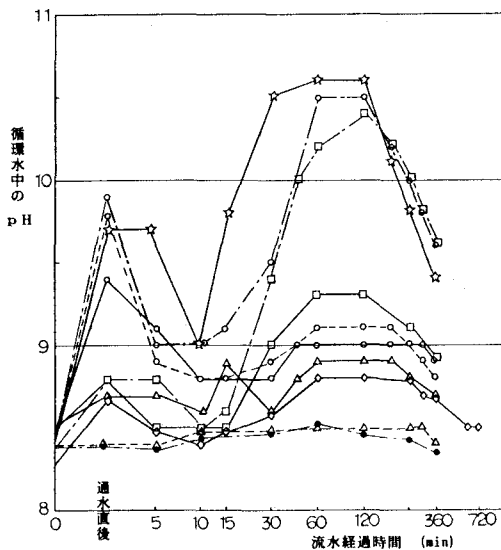
表－10 コア供試体の圧縮強度

実験 No.	配 合		流速 (kt)	単位体積重量(t/m^3)		圧縮強度(kg/cm^2)	
	使用 セメント	SCA (kg/m^3)		上 部	下 部	上 部	下 部
1	B B	0	1.5	2.26	2.27	373	392
2		2.3	1.0	2.19	2.22	199	210
3			1.5	2.19	2.23	199	206
4			2.0	2.21	2.23	197	203
5			抑制 2.0	2.21	2.25	214	226
6		2.5	1.0	2.20	2.25	253	273
7			1.5	2.25	2.28	281	291
8		2.8	1.5	2.21	2.24	219	226
9			2.0	2.19	2.23	219	232
10	T	2.5	1.5	2.15	2.20	152	161

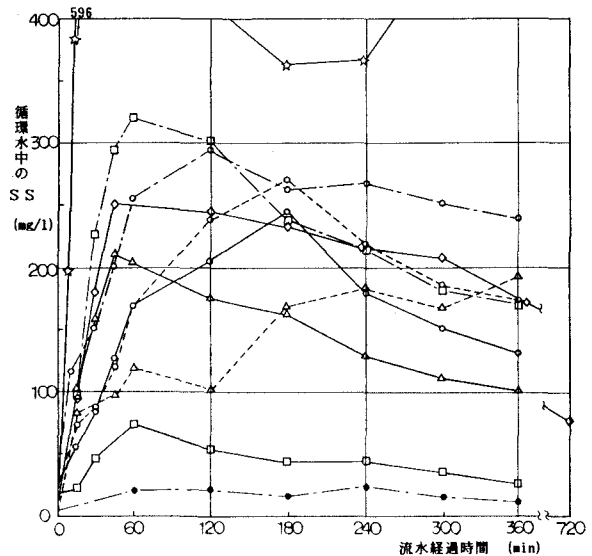
コアは上流側より3本採取し、1本のコアから上下部2本の供試体を作成した

凡 例（図－6、図－7 共通）

実験 No.	配 合	流速条件		洗 掘 抑制工	打 設 方 法	記 号
	使用 セメント	SCA (kg/m^3)	流速 (kt)	時間 (hr)		
1	B B	0	1.5	6	静水・ 流水下	—☆—
2		2.3	1.0			---○---
3			1.5			—○—
4			2.0			---○---
5			2.5	有	完全流水下	---●---
6			1.0			---△---
7			1.5			—△—
8		2.8	1.5	無	静水・ 流水下	—□—
9			2.0			---□---
10	T	2.5	1.5	12		—◇—



図－6 循環水中のpHの履歴



図－7 循環水中のSSの履歴

(3) 水質への影響

流水中のpHおよびSSの履歴を図-6、図-7に示す。また、流速とpH最大値の関係を図-8に、流速とSS発生原単位量の関係を図-9に示す。水質汚濁状況について、次の点が認められた。

- ① pH、SSの上昇は流水開始後約2時間までで、その後下降する。
- ② SCA添加量0、2.3kg/m³のものは、通水直後に一度pHが上昇する。これは打設開始時に発生する汚濁が流下するためである。
- ③ 流速2.0ktでは、SCA添加量の多少に関わらずpH、SSとも大きくなる。
- ④ 低発熱セメントを用いた場合は、高炉セメントの場合に比べてpHはやや低く、SSはやや大きくなる。これはセメントのアルカリ量およびコンクリートの凝結時間の差によるものと考えられる。
- ⑤ 洗掘抑制工を行なうことにより汚濁を制御することができる。

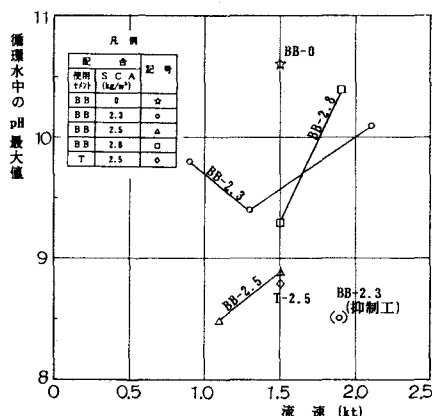


図-8 流速とpH最大値の関係

4. まとめ ～実験結果の設計および施工計画への反映～

強潮流下で設置ケーソン工法を施工する場合、設計および施工計画に資するデータを得る目的から「摩擦係数の把握実験」と「水中不分離性コンクリートの流水下打設実験」を行なった。

実験結果より次の結論が導かれた。

(1) ケーソンと岩盤の摩擦係数

① ケーソンと岩盤の摩擦係数は、滑動底面が鋼板の場合で0.3～0.4、コンクリートの場合で0.6～0.7である。したがって、ケーソンの滑動安定照査に用いる摩擦係数は、現行の基準、指針等で述べられているとおり、鋼と岩盤で0.3、コンクリートと岩盤で0.5ないし0.6として良い。

② ただし、ケーソン底面が鋼板で岩盤の不陸が大きい場合は、①の値を下回る可能性がある。したがってこの場合、安全率を少し大きくするのが良い。

③ 設計上、滑動がクリティカルになる鋼製ケーソンにおいては、刃口部をコンクリート製とすることで所要有効重量を半分程度にすることができる。

(2) 潮流条件下での水中不分離性コンクリートの打設方法

① 流速1.0kt程度の条件下では、SCAを2.3kg/m³添加することにより、流水によるコンクリート表面の洗掘を発生させずに均一な品質を持つコンクリートを打設することができる。

ただし、打設開始時に発生する汚濁を抑えるためには、SCAを2.5kg/m³程度添加するのが良い。

② 流速1.5kt程度の条件下では、洗掘や汚濁が急増する境界であると考えられるため、SCAを2.5kg/m³以上添加するのが良い。

③ 流速2.0kt程度の条件下では、SCA添加量の多少に関わらず洗掘や汚濁の発生が大きくなる。この場合、コンクリート表面をシートで覆う等の天端洗掘抑制工が有効である。

④ 低発熱セメントを用いた場合は、高炉セメントの場合に比べて洗掘やSSの発生が若干大きくなるが、施工上特に対策を要する程ではない。

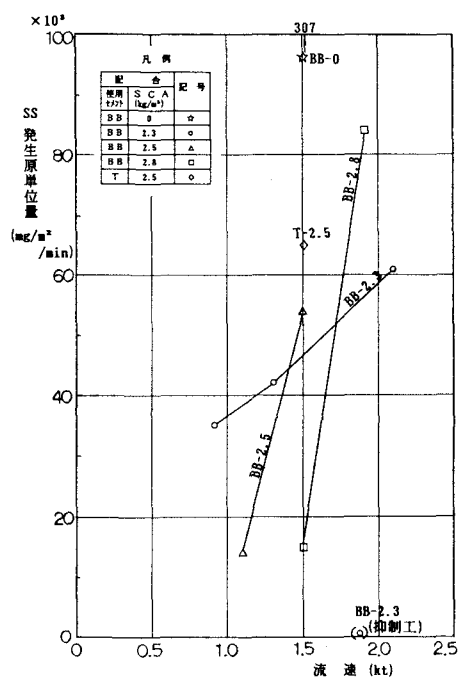


図-9 流速とSS発生原単位量の関係

今後も海洋開発が進められていくなかで、瀬戸大橋や明石海峡大橋（現在施工中）のような大規模で施工精度の高い海中（水中）工事がますます増えていくと考えられる。これらに対しても積極的に取組んでいく上で、今回の実験結果を一つの基礎データとして活用してゆきたいと考えている。

最後に、本実験の実施にあたり、坂出陸運㈱、信越化学工業㈱、ポゾリス物産㈱の御協力を頂いたことを記して謝意を表します。