

層理面方向を考慮した原位置岩盤せん断試験(内海大橋)

In-situ Rock Shear Tests  
with Consideration of Bedding Directions (Utsumi Ohashi)

周 藤 宜 二\* (Yoshiji Stoh)

原 田 洸\*\* (Isamu Harada)

北 村 英 俊\*\* (Hidetoshi Kitamura)

岡 村 護\* (Mamoru Okamura)

キーワード：岩盤/層理面/原位置岩盤せん断試験/せん断強さ (IGC:F6)

1 まえがき

内海大橋は、広島県の東南部に位置する沼隈町と内海町を結ぶ離島架橋で、橋長832m、幅員8.5mの道路橋である。架橋地点は幅約550mの海峡部で海峡の中央部にはマナイタゾワイと呼ばれる岩礁があり、可搬水域を2分している。このマナイタゾワイは、干潮時には東西30m、南北70m以上が露出し、満潮時には水没する。

図-1に内海大橋の一般図を示す。上部工の構成は、南北2航路上に架かるニールセンローゼ橋2連をメイン橋梁とし、3径間連続箱桁1連、単純合成箱桁2連、3径間連続鉄桁1連である。また、下部工は、陸上部に直接基礎逆T式橋台2基、直接基礎矩形柱張出式橋脚3基、海上部に多柱式基礎I型断面柱張出式橋脚4基およびマナイタゾワイを利用して直接基礎I型断面柱橋脚2基を配置している。

海中に設置する直接基礎橋脚の施工にあたり仮締切工法として①コンクリート遮水壁締切工法 ②鋼管矢板締切工法 ③海中型枠工法 を比較検討した結果、経済性、施工性などで有利な鋼管矢板締切工法を採用した。鋼管矢板根入れ部地盤は、床掘に伴い傾斜地盤となるために斜面上の深礎杭の設計計算法に基づいて自立式矢板として設計した(図-2参照)。

しかし、実際に仮締切を行い岩盤の性状を観察したところ、当初推定したものより地盤の状態が劣るものと考えられ、止水壁の安定性についてさらに詳細に検討を行う必要が生じた。

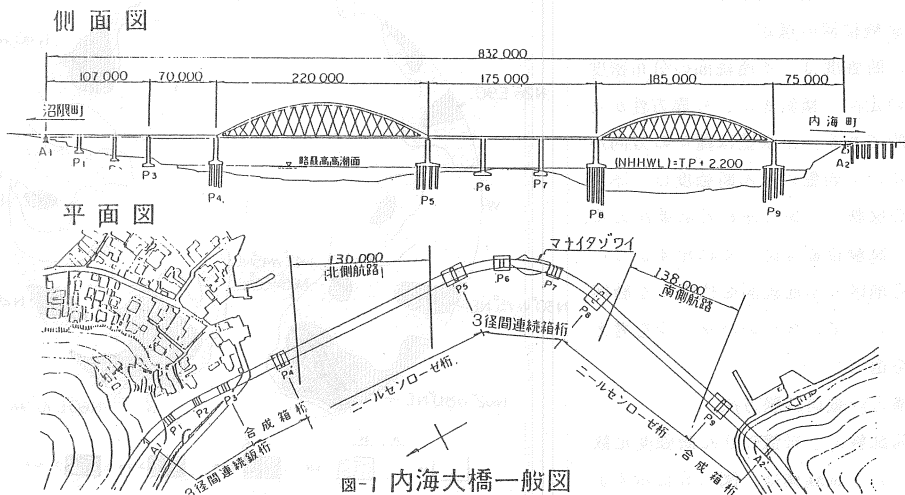


図-1 内海大橋一般図

\* 復建調査設計株式会社、 \*\* 広島県福山土木建築事務所

このような事から、原位置においてせん断試験を行い岩盤の強度を評価することにしたが、以下のような理由で、ブロックせん断あるいはロックせん断試験と比較して簡易な横方向載荷試験を実施した。

- ①床掘深度が4～5mであるので、せん断試験において鉛直荷重を大きい範囲まで考える必要がない。
- ②岩盤の層理面方向により強度がどのように違うかを評価するためになるべく数多くの試験を行う必要がある。
- ③現場条件になるべく類似した試験を行う。

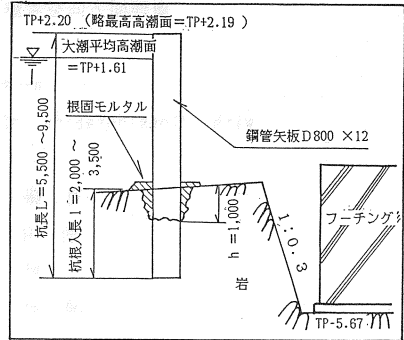


図-2 鋼管矢板締切工

## 2 調査地点の地質および岩盤状況

架橋地周辺部の地質は、古生層の粘板岩、砂質粘板岩、砂岩および中生代白亜紀末から古第三紀に貫入してきた花崗岩質岩脈の細脈である。海峡部には、これらの基盤岩の上に第四紀の洪積層(層厚0～8m)や沖積層(層厚0～8m)が堆積している。古生層は近くに花崗岩体が貫入しているために熱変成作用を受けホルンフェルス化している。地質は局部的に乱れ、小褶曲や小断層が多い。地質構造は、概ねNW～WNWの走行で北側へ30～80°傾斜する単斜構造を示している。

試験位置(P<sub>7</sub>)の地質は、層理面の顕著な砂質粘板岩および粘板岩であり、局部的に薄い輝緑凝灰岩を挟む古生層で、幅20～30cm程度の断層が数本存在する。

岩盤の状態は、局部的に土砂化したところもあるが、大半は不連続面の多い軟岩I程度の岩盤で、不連続面には薄い粘土や軟質化した方解石脈を挟むところが多い。また幅1～10cm程度の非常に小規模な花崗岩質岩脈が不連続面に多数貫入している。

図-3は、シュミットネットを用いる等面積投影法により、P<sub>6</sub>、P<sub>7</sub>両地点の不連続面を統計的に処理したものである。これより、最も頻度の大きい不連続面の走向はN62°～65°Wで傾斜は50～80°NEである。次いで頻度の大きい不連続面の走向はN60°Eで、傾斜は70°NW前後のもの、走向N40°Wで傾斜80°SWのものである。なお、前記の最も頻度の大きい不連続面は、当地区の層理面と一致している。

## 3 試験位置および載荷試験方法

### 3.1 試験位置の選定

岩盤のせん断強度は、不連続面の分布密度や不連続面の走向、傾斜等により異方性があるのが一般的である。止水壁は種々の方向から力を受けるので岩盤のせん断強度は、不連続面の形態を反映した値を求める必要がある。したがって、試験位置は図-4に示すように載荷方向と当地区の不連続面を代表する層理面との関係において、3つのパターンを考えて試験位置を選定した。

### 3.2 横方向載荷試験方法

横方向載荷試験より岩盤のせん断強度定数を評価するための試験体は、図-5に示すような手順で作成した。また試験状況概略図を図-6に示す。テストピットは、油圧ジャック

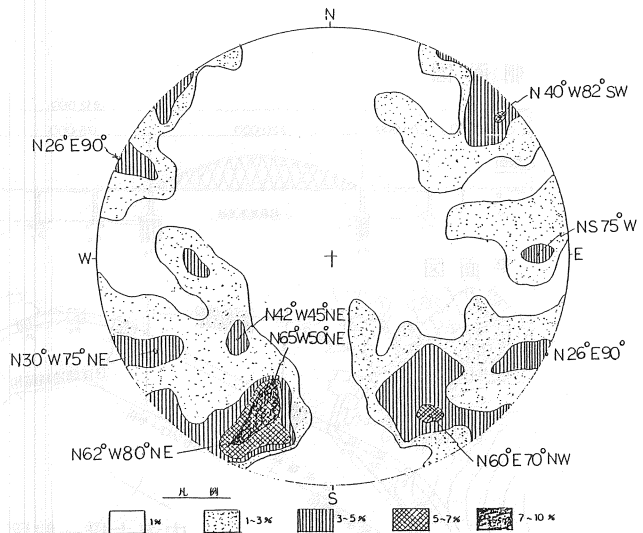


図-3 P<sub>6</sub>、P<sub>7</sub>地点の不連続面カウンターダイアグラム  
(シュミットネットにより下半球投影)

層理面方向を考慮した原位置岩盤せん断試験（内海大橋）

キ等を設置するためのもので長さ3m、幅0.9m、深さ0.3mであり、1つのテストピットで3個の試験を行った。1つの試験体は、加圧部断面が0.3m×0.3mで長さ1mにわたって周辺岩盤と分離するためにコンクリート用ジャンボカッターで深さ35cmの溝を入れた。これは岩盤のせん断破壊を平面的なすべりで近似できるようにすることを目的にしたものである。なお、カッターで岩盤を切るためにモルタルを平均5cm厚さで打設したが、岩盤のせん断強度が表層部のモルタルの影響を受けるのを防止するために、載荷部から30、50、60、70、80、90cmの位置に載荷方向と直交方向に深さ5cmの切込みを入れた。

また、テストピット内の両側面のせん断側、反力側にモルタルを5cm厚さで打設するが、せん断側下端のモルタルは岩盤に付着させないようにテープを貼って打設し、反力側のモルタルは5cm深さの根入れを行うものとした。試験は、図-4に示すように当地区の不連続面を代表する層理面と載荷方向との関係を次の3パターンに分類して実施した。なおパターンⅠに相当する地点のテストピット番号をT-1、パターンⅡに相当するものをT-2、パターンⅢに相当するものをT-3とした。

- パターンⅠ： 載荷方向が層理面の走向と同方向
- パターンⅡ： 載荷方向が層理面の走向にほぼ直交し、かつ層理面の傾斜方向と逆方向（流れ目）

パターンⅢ： 載荷方向が層理面の走向とほぼ直交し、かつ層理面の傾斜方向と同方向

（差し目）

載荷試験方法は、まず試験体のH/3高さ（今回はH=30cmであるから10cm）に油圧ジャッキ、荷重計、球座の中心軸を合わせて水平になるようにする。

載荷様式は、土質工学会基準“杭の水平載荷試験方法・同解説”に準拠し、表-1に示すような方法を選択した。ただし、この試験においては、

- i) 試験体の鉛直荷重は自重のみである。
- ii) 水平荷重は、岩盤の

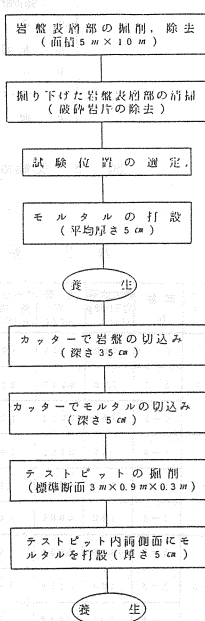


図-5 試験体作成手順

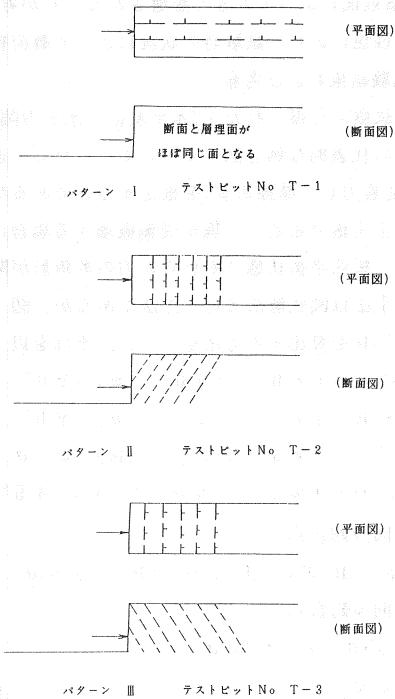


図-4 載荷方向と層理面との関係

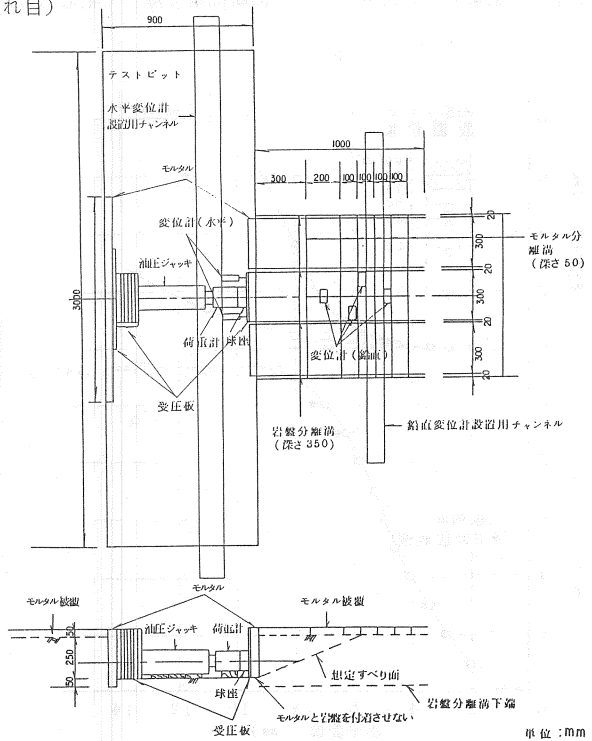


図-6 試験状況概略図

層理面によって大きく影響されることが考えられる。  
 などの理由により、試験時の状況によって載荷様式を変更した。

表-1 載荷様式

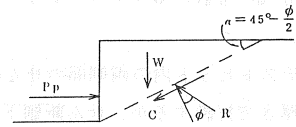
載荷方法	一方向載荷
荷重段階	8段階以上
荷重速度	$\frac{\text{計画最大荷重}}{8 \sim 20}$ tf/分
荷重保持時間	各荷重段階 3分

4 試験結果および考察

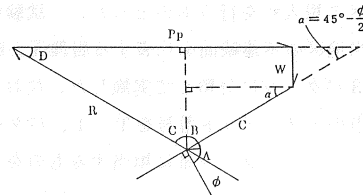
載荷試験より得られた i) 水平変位～水平力関係、ii) 水平変位～鉛直変位関係の代表的な例を図-7に示す。これら一連の試験より、岩盤の強度定数(粘着力C、摩擦角 $\phi$ )を推定するのであるが、その基本原理は図-8に示す土圧論である。土塊が受働破壊する場合に、同図に示すような力が作用し、塑性平衡状態でそれらの力の多角形が閉じることになる。

解析手法は図式解法で行う方法もあるが、図-8b)に示す幾何学的関係よりC、Rを算出する方法をとった。それを以下に示す。

$$\begin{aligned} \angle A &= 180^\circ - (90^\circ + \phi) = 90^\circ - \phi \\ \angle B &= 180^\circ - (90^\circ + \alpha) = 90^\circ - \alpha \\ \angle C &= 180^\circ - (\angle A + \angle B) = \phi + \alpha = 45^\circ + \phi/2 \\ \angle D &= 180^\circ - (90^\circ + \angle C) = 45^\circ - \phi/2 = \alpha \end{aligned}$$



a) 土塊に作用する力



b) 力の多角形

水平方向の釣合式

$$P_p = R \cos \alpha + C \cos \alpha = (R + C) \cos \alpha$$

鉛直方向の釣合式

$$R \sin \alpha = W + C \sin \alpha$$

の2式より

$$C = \frac{P_p \sin \alpha - W \cos \alpha}{2 \cos \alpha \sin \alpha} \quad R = \frac{P_p}{\cos \alpha} - C$$

となり、粘着力の合力Cをすべり断面面積で除して粘着力Cが求まる。

ここに

- $P_p$ : 受働土圧 (強制的に負荷したもので既知量)
- $W$ : 自重
- $C$ : 粘着力の合力
- $R$ : 反力
- $\alpha$ : すべり面の角度
- $\phi$ : 摩擦角

図-8 受働破壊時の力の釣合い

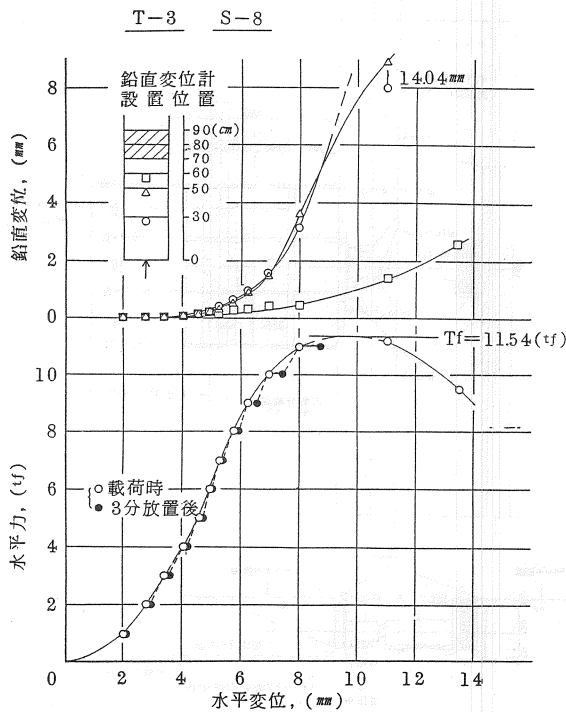


図-7 水平変位～水平力～鉛直変位関係

表-2 解析結果

テストピット No	試験 No	最大水平力 $T=P_p$ (tf)	自重 $W$ (tf)	すべり面角度 $\alpha$ (°)	粘着力合力 $C$ (tf)	反力の合力 $R$ (tf)	すべり面断面積 $A$ (m <sup>2</sup> )	推定粘着力 $C$ (tf/m <sup>2</sup> )	推定摩擦角 $\phi$ (°)
T-1	S-1	2.80	0.035	40	1.80	1.86	0.116	15.5	10
	S-2	2.32	0.047	32	1.32	1.42	0.142	9.3	26
	S-3	2.61	0.072	22	1.31	1.50	0.197	6.6	46
T-2	S-4	1.20	0.035	39	0.74	0.80	0.118	6.3	12
	S-5	0.77	0.039	36	0.44	0.51	0.122	3.6	18
	S-6	3.60	0.080	18	1.76	2.03	0.221	8.0	54
T-3	S-7	11.50	0.086	20	5.99	6.25	0.228	26.3	50
	S-8	11.54	0.058	25	6.30	6.43	0.164	38.4	40
	S-9	7.45	0.058	25	4.04	4.18	0.167	24.2	40

1) 粘着力  $C = \frac{\text{粘着力合力 (tf)}}{\text{すべり面断面積 A (m}^2\text{)}}$

2) 摩擦角  $\phi = 90^\circ - 2\alpha$   
 $(\alpha = 45^\circ - \frac{\phi}{2} \text{より})$   
 $(\alpha: \text{すべり面角度})$

層理面方向を考慮した原位置岩盤せん断試験（内海大橋）

また、摩擦角 $\phi$ については、実際の破壊面は層理面等に影響されて凹凸が生じているが、これを平面であると仮定して、まずすべり面角度 $\alpha$ をすべり面の水平距離と載荷部の高さより求める。さらに受働破壊時にはすべり面角度 $\alpha$ は、 $\alpha = 45^\circ - \phi / 2$ であるので、この式より摩擦角 $\phi$ は、 $\phi = 90^\circ - 2\alpha$ と推定した。

以上述べた解析法により今回実施した試験の解析結果を表-2に、また、 $C \sim \phi$ 関係図を図-9に示す。これらの結果より次のようなことが言える。

- (1) 岩盤の水平耐力には層理面の方向と載荷方向とが関係しており、パターンⅢの場合が強く、パターンⅡの場合が弱い。『流れ目』と『差し目』とは強度に差異があるのが一般的であり、今回の試験においてこの差異を定量的に把握できた。
- (2) 同一の岩質においても岩盤の強度定数 $C$ 、 $\phi$ は、層理面と載荷方向とが関係して非常に差異がある。 $C$ 、 $\phi$ 関係が高位に位置するのはパターンⅢ、低位に位置するのはパターンⅡの場合である。

なお、同一載荷方向と層理面との関係においては、 $C$ が大きければ $\phi$ が小さく、また逆に $C$ が小さければ $\phi$ が大きくなるという傾向がある。これは、今回の試験においては鉛直荷重を載荷していないことや同一のテストピット内の試験においても層理面等の不連続面の分布密度が各試験体によって異なるためであると考えられる。

5 あとがき

岩盤のせん断強度定数( $C$ 、 $\phi$ )を求めることを目的に原位置において横方向載荷試験を実施した。この試験については、規準化された試験方法はないが、今回実施した試験方法の特徴は、破壊面を2次元的に評価するために試験体を周辺岩盤と分離したところにある。本試験の得失は以下の通りである。

- (1) 短時間に多くの試験ができる。
- (2) 載荷装置等が他の原位置岩盤せん断試験に比較して簡単である。
- (3) 鉛直荷重を変えて試験を行う事ができない。

岩盤の強度定数には載荷方向と層理面等の不連続面とが大きく影響するので、不連続面をよく観察して現場条件に合致した値を選定する必要がある。今回実施した横方向載荷試験は、上載荷重が小さい場合には比較的適応できると考えられるが、今後ブロックせん断試験やロックせん断試験と対比してみる必要があると考えられる。

謝辞：本試験を実施するにあたり多大な協力をいただいた(株)大林組・住友建設(株)共同企業体の皆様方および復建調査設計株式会社 宮原健二理学博士に感謝申し上げます。

<参考文献>

- (1) 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への通用:土木学会、1983年
- (2) 軟岩—調査・設計・施工の基本と事例:土木学会、1984年
- (3) 土質調査法；土質工学会
- (4) 抗の水平載荷試験方法・同解説：土質工学会、1983年

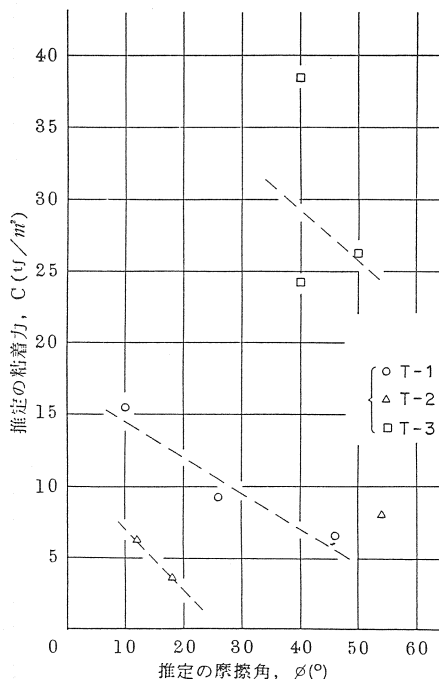


図-9  $C \sim \phi$  関係