

# 重力式岸壁々体の比重について

## 緒 言

港湾構造物の設計を行う場合に於て外力、外的条件等については詳細な計算を施し多額の費用を掛けて各種試験を行い、亦、材料の強度に關しても一応の試験を行うのが常であり、亦、型式の異なるものとの比較検討をするが、忒その構築材料の比重に關しては市販のハンドブック所載の値を採用するとか、試験片に依る測定値を採用するに止まり、比重の変化に依つて断面が如何に変更されそれぞれが工費に如何に影響する等に關しては考えられた事がないようである。

材料として今茲で問題にするのはコンクリートであるが、それに強度を附与する為或は工費節減の為、或は施工上の目的から諸種の混和物を加えることも屢々試みられているが、その場合にもその比重を推測或は測定して、安定計算式に代入するに止まっている。一方、重力野水堰堤築造の場合はコンクリートの比重の大なる程有利であるとして重いコンクリートを造る企てが屢々なされている。建築関係では比重の軽いコンクリートに關する研究が活発に行われている。港湾の重力式岸壁に於ては壁体の比重は軽重何れが有利であるか、その比重は何を以て決定すべきか、希望する比重のコンクリートを如何にして造るか等について茲に一私見を述べる。

## § 1. 従 来 の 考 え 方

### (1) 比 重

水中に在る物体は浮力を受ける為水中の比重は空氣中比重より約 1 を差引いた値となる。例えば、空氣中に於て 2.4 と 1.7 の比重の物体の重量の割合は 1 : 0.7 であるが、之等を水中に沈めると 1 : 0.5 となる。之等物体が水中に在つてその位置を保ち外力に対して安定である為にはその重量が必要なのであるから水中構造物用材料としては比重の大きい程有利であると考えられる。亦重力式野水堰堤の場合は矢張り浮力を受けるのでコンクリート中に石塊を多数混入して比重を増加せしめてその断面積を減少せしめるが多くの場合石塊が附近より大量廉価に得られるのでコンクリート単価の低減ともなり誠に一石二鳥である。之等の事実から重力式岸壁に於いても、比重は大なる方が有利であると考え

勝ちである。然しながら山間に造られる貯水堰堤の場合と異り、強大な支持力を有する基礎岸盤が存在しないこと等を考えれば堰堤の思想を岸壁に適用することの可否は一応検討を必要とすることは明らかである。

## (2). 安定計算

自重としては壁体重重及び裏込重量とし、外力としては土圧、残留水圧、載荷重、船舶の索引及衝垂力、浮力、地震力等であり、之等について、

(イ) 転倒に対する安定

(ロ) 壁体の滑出しに対する安定

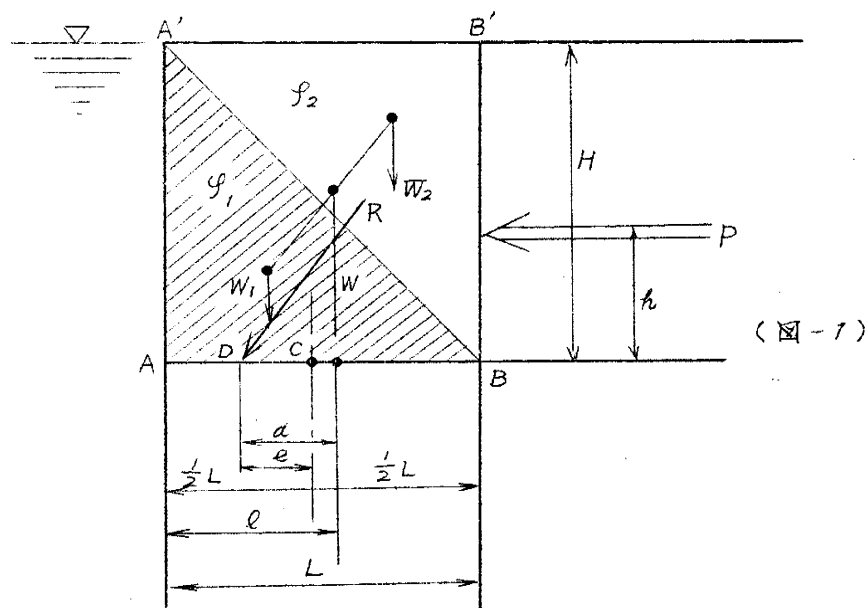
(ハ) 地盤支持力に対する安定

(ニ) 地盤の滑出しに対する安定

の四条件について検討して決定するので(イ)、(ロ) について安全係数を考える。(港湾協会編輯の設計示方書に依れば1.2を採用)

## § 2. 比重と安定諸条件との関係

今計算を簡易化するため(図-1)に於て $AA'B$ の如き三角断面の壁体を考えて壁体の滑出しに対する安全係数を常に同一に保ちながら壁体の比重を色々に変化せしめて、その転倒及び地盤支持力の安定条件が如何に変化するかを調べて見よう。



(1). 符 号

|             |                                       |
|-------------|---------------------------------------|
| $\varphi_1$ | 壁体の水中比重                               |
| $\varphi_2$ | 壁体の水中比重                               |
| $W_1$       | 壁体の水中重量                               |
| $W_2$       | 裏込の水中重量                               |
| $W$         | $W_1 + W_2$                           |
| $P$         | 外力の総和 (方向は水平と仮定)                      |
| $H$         | 壁 高                                   |
| $h$         | $P$ の作用点の高さ                           |
| $R$         | $W$ と $P$ との合成力                       |
| $d$         | $R$ の水平投影長                            |
| $e$         | $\overline{CD}$ $R$ が底面と交る点と底面中央部間の距離 |
| $L$         | 必要とする底幅                               |
| $A$         | 必要とする断面積                              |
| $\ell$      | 前踏 $A$ より $W$ 迄の距離                    |
| $f$         | 底面と基礎間の摩擦係数                           |
| $k_s$       | 壁体の滑出に対する安全係数                         |
| $k_o$       | 壁体の転倒に対する安全係数                         |
| $n$         | $k_s / f$                             |
| $S_1$       | 前趾に於ける底面圧力強度                          |
| $S_2$       | 後趾に於ける底面圧力強度                          |
| $Q$         | 地盤の許容支持力                              |
| $K$         | 常 数                                   |
| $Cx$        | 壁体の純断面積                               |
| $(1 - x)$   | 空隙率                                   |
| $Gx$        | 壁体の空気中重量                              |

(2)  $\varphi_1 > \varphi_2$  の場合に於ける検討

滑出しに対する安全係数が  $k_s$  である為の条件

$$Wf = P \cdot k_s$$

$$\therefore W = \frac{k_s}{f} \cdot P = nP$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_1 = \frac{1}{2} L H \varphi_1 \end{array} \right. \dots\dots\dots (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_2 = \frac{1}{2} L H \varphi_2 \end{array} \right. \dots\dots\dots (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W = W_1 + W_2 = nP \end{array} \right. \dots\dots\dots (3)$$

(1), (2), (3) より

$$L = \frac{2\pi P}{(\varphi_1 + \varphi_2) H} \quad (4)$$

$$l = \frac{2\pi P(\varphi_1 + 2\varphi_2)}{3H(\varphi_1 + \varphi_2)^2} \quad (5)$$

$$\text{亦 } d = \frac{\kappa}{n} \quad (6)$$

$$\varphi_1 > \varphi_2 \text{ なる故 } l < \frac{1}{2} L$$

$$e = \frac{L}{2} - l + d$$

$$e = \frac{n^2 P(\varphi_1 - \varphi_2) + 3\kappa H(\varphi_1 + \varphi_2)^2}{3\pi H(\varphi_1 + \varphi_2)^2} \quad (7)$$

合成力が底面内に収まる為の条件は

$$L - 2e \geq 0$$

之を解いて

$$\varphi_1 \leq \frac{\sqrt{6\pi^2 \kappa H P \varphi_2 + n^4 P^2 + n^2 P}}{3\kappa H} - \varphi_2 \quad (8)$$

転倒に対する安全係数が  $k_0$  である為には

$$k_0 P \kappa = W l$$

之を解いて

$$\varphi_1 = \frac{\sqrt{6\kappa H n^2 P k_0 \varphi_2 + n^4 P^2 + n^2 P}}{3\kappa H k_0} - \varphi_2 \quad (9)$$

合成力が底面の *middle third* 内に収まる条件は

$$1 - \frac{6e}{L} \geq 0$$

之を解いて

$$\varphi_1 \leq \frac{\sqrt{6\pi^2 \kappa H P \varphi_2}}{3\kappa H} - \varphi_2 \quad (10)$$

即ち  $\varphi_1$  の値は (8), (9) 或は (10) 式に示す如く一定の値より小でなければならない。

底面の圧力強度を示す式は 合成力が *middle third* に収まる場合は

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{W}{L} \left( 1 + \frac{be}{L} \right) \\ S_2 &= \frac{W}{L} \left( 1 - \frac{be}{L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(4)

合成力が *middle third* より出る場合は

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{4W}{3(L-2e)} \\ S_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

(11) 式に於て  $S_1$  の値を小にする為には  $\frac{be}{L}$  の値を小にすればよい。

$$\frac{be}{L} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} + \frac{3kH(\varphi_1 + \varphi_2)}{n^2 P} \dots\dots\dots (13)$$

$\varphi_1 = k\varphi_2$  (但し  $k > 1$ ) とすれば 上式は

$$\frac{be}{L} = \frac{3kH\varphi_2}{n^2 P} (k+1) - \frac{2}{k+1} + 1 \dots\dots\dots (14)$$

この式を見ると  $k$  の値が小なる程即ち  $\varphi_1$  の値の小なる程  $\frac{be}{L}$  の値が小になる事がわかる。(12) 式に於て  $S_1$  の値を小にする為には  $(L-2e)$  の値を大にすればよい事がわかる。

$$L-2e = \frac{4nP(\varphi_1 + 2\varphi_2)}{3H(\varphi_1 + \varphi_2)^2} - \frac{2k}{n} \dots\dots\dots (15)$$

この式に依って  $\varphi_1$  が小なる程  $(L-2e)$  が大になり  $S_1$  が小になる事がわかる。此盤の許容支持力を  $Q$  とすれば合成力が *middle third* 以内にある場合は

$$Q \geq \frac{W}{L} \left( 1 + \frac{be}{L} \right)$$

之を解けば

$$\varphi_1 \leq \frac{\sqrt{6n^2 kHP\varphi_2 + 6n^2 kPQ + n^4 P^2 - n^2 P} - \varphi_2}{3kH} \dots\dots\dots (16)$$

合成力が *middle third* より出る場合は

$$Q \geq \frac{4W}{3(L-2e)}$$

之を解けば

$$\varphi_1 \leq \frac{n\sqrt{n^2 P^2 Q^2 + 4n^2 HP^2 Q\varphi_2 + 6kHPQ^2\varphi_2 + n^2 P Q}}{H(3kQ + 2n^2 P)} - \varphi_2 \dots\dots\dots (17)$$

(16) (17) 式が、底面圧力強度を許容支持力以内に制限する為の条件で  $\varphi_1$  之等の値より大きくてはならない。

(3)  $\varphi_1 = \varphi_2$  の場合

$$e = \frac{1}{2} L \dots\dots\dots (18)$$

$$L = \frac{n P}{H \varphi_1} \dots\dots\dots (19)$$

$$e = \frac{h}{n} \dots\dots\dots (20)$$

(4)  $\varphi_1 < \varphi_2$  の場合

この場合も(2)の場合の各式と同一となるので転倒に対しても底面圧力強度に対しても  $\varphi_1$  の値は一定値以下である事を必要とし然も  $\varphi_1$  の値が小なる程有利である。

$\varphi_1 < \varphi_2$  の場合に限って  $\varphi_1$  の値を適当に定める事に依って  $S_1 = S_2$  即ち底面圧力強度を等分布させる事が可能な場合がある。即ち(1)式に於て  $S_1 = S_2$  なる時には  $e = 0$  でなければならないので

$$e = \frac{1}{2} L - e + d = 0$$

之を解いて

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= K \varphi_2 \\ \text{但し } K &= \frac{\sqrt{24 \pi^2 h H P \varphi_2 + n^4 P^2} - n^2 P}{6 h H \varphi_2} - 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

### §. 3 ま と め

以上述べた事を要約すると、滑出しに対する安全係数を一定に保ては壁体比重の小なる程転倒や地盤支持力に対して安全となる、という事である。之を換言すれば、(i) 転倒、(ii) 滑出し、(iii) 地盤支持力の三つから壁体の安全を検討した結果 (i) (iii) の安全係数に比して (ii) のそれが不足する場合は壁体の比重を大にすべきであり、逆の場合は比重を軽くするのがよいという事になる。

#### 計算例

上記のことを或る特定の場について数値計算をして見よう。

$$P = 50^t, \quad H = 10^m, \quad h = 4^m, \quad \varphi_2 = 1.0, \quad f = 0.6$$

$$k_s = 1.2, \quad k_o = 1.2 \quad \text{とすれば}$$

$$n = k_s / f = 2, \quad W = n P = 100^t, \quad d = 2$$

となる。之等の値を用いて各種の  $\varphi_1$  の値に応じて必要とする底幅  $L$ 、断面積  $A$ 、及び転倒条件、地盤支持力条件を求めると(表へ1)の如くなる

表 - 7

| $\varphi$ | $L$   | $l$   | $e$   | $L-2e$ | $\frac{be}{L}$ | $\frac{W}{L}$ | $S_1$    | $S_2$ | $A$    | 備 考                         |
|-----------|-------|-------|-------|--------|----------------|---------------|----------|-------|--------|-----------------------------|
| 18.5      | 1.02  | 0.36  | 2.15  | —      | —              | —             | —        | —     | 5.10   |                             |
| 9.5       | 1.90  | 0.70  | 2.25  | —      | —              | —             | —        | —     | 9.50   |                             |
| 6.8       | 2.56  | 0.97  | 2.31  | —      | —              | —             | —        | —     | 12.80  |                             |
| 4.0       | 4.00  | 1.60  | 2.40  | —      | —              | —             | —        | —     | 20.00  |                             |
| 3.14      | 4.84  | 2.00  | 2.42  | 0      | 3.00           | 2.06          | $\infty$ | —     | 24.20  | toe (1)                     |
| 2.56      | 5.62  | 2.33  | 2.48  | 0.66   | 2.65           | 17.8          | 202.0    | —     | 28.10  | $k_0=1.2$ (ロ)               |
| 1.8       | 7.14  | 3.23  | 2.34  | 2.46   | 1.96           | 14.0          | 54.2     | —     | 35.70  |                             |
| 1.6       | 7.70  | 3.55  | 2.30  | 3.10   | 1.79           | 13.0          | 43.0     | —     | 38.50  |                             |
| 1.5       | 8.00  | 3.73  | 2.27  | 3.46   | 1.70           | 12.5          | 38.6     | —     | 40.00  |                             |
| 1.4       | 8.34  | 3.94  | 2.23  | 3.88   | 1.61           | 12.0          | 34.4     | —     | 41.70  | (木)                         |
| 1.3       | 8.70  | 4.16  | 2.19  | 4.32   | 1.51           | 11.5          | 30.9     | —     | 43.50  |                             |
| 1.2       | 9.10  | 4.41  | 2.14  | 4.82   | 1.41           | 11.0          | 27.7     | —     | 45.50  |                             |
| 1.1       | 9.53  | 4.68  | 2.08  | 5.37   | 1.31           | 10.5          | 24.8     | —     | 47.65  |                             |
| 1.0       | 10.00 | 5.00  | 2.00  | 6.00   | 1.20           | 10.0          | 22.2     | —     | 50.00  |                             |
| 0.9       | 10.52 | 5.36  | 1.90  | 6.72   | 1.08           | 9.5           | 19.9     | —     | 52.60  |                             |
| 0.83      | 10.93 | 5.63  | 1.83  | 7.27   | 1.00           | 9.1           | 18.2     | 0     | 54.65  | middle third <sup>(1)</sup> |
| 0.7       | 11.76 | 6.13  | 1.75  | 8.26   | 0.89           | 8.5           | 16.1     | 0.9   | 58.80  |                             |
| 0.6       | 12.48 | 6.77  | 1.47  | 9.54   | 0.71           | 8.0           | 13.7     | 2.3   | 62.40  |                             |
| 0.5       | 13.33 | 7.41  | 1.26  | 10.81  | 0.57           | 7.5           | 11.8     | 3.2   | 66.67  |                             |
| 0.4       | 14.28 | 8.16  | 0.98  | 12.32  | 0.41           | 7.0           | 9.9      | 4.1   | 71.40  |                             |
| 0.3       | 15.38 | 9.08  | 0.61  | 14.16  | 0.24           | 6.5           | 8.1      | 4.9   | 76.90  |                             |
| 0.175     | 17.02 | 10.59 | 0     | 17.02  | 0              | 5.9           | 5.9      | 5.9   | 85.10  | center (=)                  |
| 0.1       | 18.18 | 11.56 | -0.47 | 19.12  | -0.16          | 5.5           | 4.6      | 6.4   | 90.90  |                             |
| 0         | 20.00 | 13.33 | -1.33 | 22.67  | -0.40          | 5.0           | 3.0      | 7.0   | 100.00 |                             |

(1) (8) 式に依って  $\varphi > 3.14$  の場合は必ず転倒する。 $\varphi = 3.14$  の場合に合灰力が前趾を通過するので辛うじて転倒はしないが  $S_1 = \infty$  となる。

(ロ) (9) 式に依って  $\varphi = 2.56$  の場合には滑出し及転倒に対する安全係数が 1.2 となるが

$S_1 = 202 \text{ t/m}^2$  となる。

(7)

(ハ) (10) 式に依って  $\varphi_1 = 0.83$  の場合に合成力が底面三分の一處を通過する。

(ニ) (21) 式に依って  $\varphi = 0.175$  の場合には  $e = 0$  となり  $S_1 = S_2$  となる。

(ホ)  $\varphi_1 = 1.4$  の鉄筋コンクリートを使用する場合は  $ks = 1.2$ ,  $ks > 1.2$  であるが  $S_1 = 34.4 \text{ t/m}^2$  となる。若し地盤許容支持力  $Q = 35 \text{ t/m}^2$  であればこの處で差支えないが、 $Q = 25 \text{ t/m}^2$  の場合は (17) 式に依って  $\varphi_1 = 1.12$  とする必要がある。亦  $Q = 20 \text{ t/m}^2$  の場合は同じく  $\varphi_1 = 0.90$  とする必要がある。

亦  $Q = 40 \text{ t/m}^2$  を許す場合は (17) 式に依って、 $\varphi_1 = 1.53$  とするのが経済的である事がわかる。

#### §. 4. 壁体比重を増減せしめる方法と工費の比較

##### (1) 比重を増加させる方法

転倒や地盤支持力に対して余裕があり湧出しに対する安全性を増そうとする場合に採用するので重力式野水堰堤の場合と同様に石塊を多量に混入するのが簡単で経済的である。

##### (2) 比重を減少させる方法

比較的地盤支持力の大きくない場合に採用される。

(イ) 屑材或は其他混和物として軽い材料を用うる方法 (鉾澤、石炭滓、火山灰、珪藻土等)

(ロ) 空気泡を混入する方法 (A. E. コンクリート)

(ハ) 壁体中に空隙を設けてコンクリートの使用量を減少せしめる方法。

等が考えられるがそのうち (ハ) について若干述べよう。

##### (3) コンクリート純断面積の関係

水中に於ける比重  $\varphi_1$  であるコンクリートを用うる時は底幅  $L$ 、断面積  $A_1 = \frac{1}{2} L \cdot H$  である。今この壁体の重心の位置が変わらぬようにして、

空隙を設けて見よう、空隙容積を  $x$  (ノール) とすれば  $\text{ノール}$  の壁体に含まれるコンクリートの量は  $x \text{ m}^3$  である。この場合に必要とする底幅  $Lx$ 、断面積  $Ax$  とし見掛けの比重が  $\varphi_x$  に変化し、 $Ax$  中に含まれるコンクリートの総量を  $Cx$  とする時は、

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= x \cdot \varphi_1 \\ Lx &= \frac{2 \cdot P}{H(\varphi_1 + \varphi_2)} \\ Ax &= \frac{1}{2} Lx \cdot H \\ Cx &= x \cdot Ax \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

之より

$$C_x = \frac{n p_x}{p_2 + x p_1} \quad \dots \dots \dots (23)$$

(23) 式を見ると  $x$  の値の小なる程  $C_x$  の値が小になっている。即ち空隙を増して見掛けの比重を小にする程コンクリート使用量が減少する。

$p_x$  の各種の値に應ずる  $x$  及び  $Ax$ 、 $C_x$  の関係は (表-2) に示す。

表 - 2

| $p_x$ | 空隙率(1-x) | $x$   | $Ax$  | $C_x = Ax \cdot X$ | $G_x = C_x \times 2.4$ |
|-------|----------|-------|-------|--------------------|------------------------|
| 1.4   | 0.000    | 1.000 | 41.70 | 41.70              | 100.0 ---- (イ)         |
| 1.3   | 0.071    | 0.929 | 43.50 | 40.30              | 96.8                   |
| 1.2   | 0.142    | 0.858 | 45.50 | 39.00              | 93.6 ---- (ロ)          |
| 1.1   | 0.214    | 0.786 | 47.65 | 37.40              | 89.8                   |
| 1.0   | 0.286    | 0.714 | 50.00 | 35.70              | 85.7                   |
| 0.9   | 0.357    | 0.643 | 52.60 | 33.80              | 81.2                   |
| 0.83  | 0.408    | 0.592 | 54.65 | 32.30              | 77.5                   |
| 0.7   | 0.500    | 0.500 | 58.80 | 29.40              | 70.6 ---- (ハ)          |
| 0.6   | 0.572    | 0.428 | 62.40 | 26.70              | 64.1                   |
| 0.5   | 0.643    | 0.357 | 66.67 | 23.80              | 57.2                   |
| 0.4   | 0.713    | 0.287 | 71.40 | 20.50              | 49.2                   |
| 0.3   | 0.786    | 0.214 | 76.90 | 16.40              | 39.4                   |
| 0.175 | 0.875    | 0.125 | 85.10 | 10.60              | 25.5                   |
| 0.1   | 0.929    | 0.071 | 90.90 | 6.40               | 15.3                   |

例えは-

- (イ) 水中比重 1.4 のコンクリートの場合、壁体断面積  $Ax = 41.7 \text{ m}^3/\text{m}$  であるが、
- (ロ) 若し空隙を 14% 程度設ければ比重は 1.2、 $Ax = 45.5 \text{ m}^3/\text{m}$  を必要とするが  $C_x = 39.0 \text{ m}^3/\text{m}$  となって結局  $2.7 \text{ m}^3/\text{m}$  のコンクリートが節約される。
- (ハ) 亦空隙を 50% 設けると比重は 0.7 となり  $Ax = 58.80 \text{ m}^3/\text{m}$  を必要とするが、それに含むコンクリート量は  $29.4 \text{ m}^3/\text{m}$  であって、12.3  $\text{m}^3/\text{m}$  が節約される。

(4). 空気中に於ける壁体重量の関係

これは壁体の運搬据付に要する設備費運転費に関係する事項であ。空気中の壁体重量を  $G_x$ 、空気中に於けるコンクリート比重  $\delta$  とすれば

$$G_x = C_x \times \delta$$

$G_x$  は  $C_x$  の小なる程小になる。即ち空隙を増す程小になる。(表-2参照)

(5) 空隙を設ける事に依って工費が如何に変化するか。

空隙を設ける事に依って節約される工費は、

- (イ) コンクリート純断面積の減少に基づくもの。
- (ロ) コンクリート重量減少に基づく運搬据付費の差
- (ハ) 埋立土量減少に基づく埋立費の差
- (ニ) 底面圧力強度減少に基づく基礎工費の差

空隙を設ける事に依って増加する費用は、

- (イ) 底幅増加に基づく基礎石量又は床底量置換量の増加
- (ロ) 底幅増加に基づく基礎均し面積の増加
- (ハ) 純断面積増加及び空隙作製の為の型枠費の増加額
- (ニ) 空隙を設ける為に新たに必要とする鉄筋の価格
- (ホ) 空隙を設ける為にコンクリート配合を改良ならしめる必要ある場合にその価格の差

等である。

之等を比較する事に依って何れが有利であるかを算出する事は容易である。

壁体に空隙を設ける工法については稿を改めて述べたい。

