

補強土の総合的研究

—その I 理論的検討—

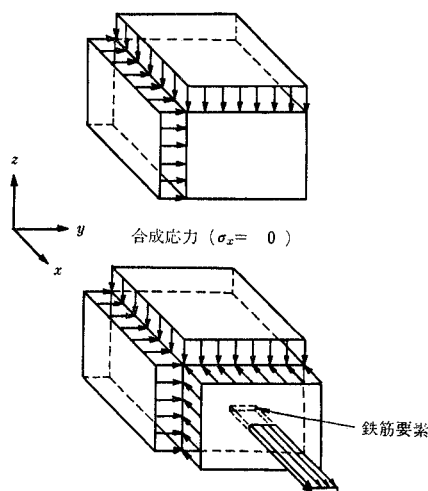
“Integrated Study of Reinforced Earth-I :
Theoretical Formulation”

Romstad, K.M., Herrman, L.R., and Shen, C.
Proc. of A.S.C.E., Vol. 102, No. GT 5,
pp. 457~471, may (1976)

土を引張強度をもつ材料によって補強する考えは古くからあったが、Vidal らによって最近生みだされた補強土工法はヨーロッパで広く用いられており、アメリカにおいても使用され始めている。しかしその解析には古典的土質力学に従ったすべり面を想定する理論が主として用いられており、補強土のモデル化としてはやや不満足といえる。本論（その1）では、補強土を合成体としてとらえ、FEM によって解析する手法について述べ、その2ではその手法によって解析した結果と、実物大試験による挙動とを比較する。

異種の材料から成る合成体を解析する手法として、構造全体をマクロ的にみて均質と考える方法がある。鉄筋コンクリートにおいて、鉄筋を換算断面として取り扱う方法もこれである。ここではユニットセルの概念を導入して、解析を行う。

中心にストリップが位置し、高さ、幅はおのお上の



図—1 セルに働く応力

下、左右方向のストリップ間隔で単位長さの奥行をもつ土のブロックをユニットセルとする。このセルには、土とストリップの2種の材料が含まれ、おのおのの応力—ひずみ関係は異なるが、セル全体として合成した挙動を考える（図—1 参照）。

$$\sigma_1 A^c = \sigma_1^{so} A^c + \sigma_1^{st} A^{st} \dots \dots \dots (1)$$

ここで σ : 応力, A : 作用面積, サフィクス c : 合成体, so : 土, st : ストリップを示し, $A^c \equiv A^{so}$ とする。また土とストリップ間にすべりがないと仮定すると、

$$\epsilon_1 = \epsilon_1^{so} = \epsilon_1^{st} \dots \dots \dots (2)$$

また変形係数 E を用いて、

$$\epsilon_1^{so} = \frac{\sigma_1^{so}}{E^{so}} \dots \dots \dots (3)$$

$$\epsilon_1^{st} = \frac{\sigma_1^{st}}{E^{st}} \dots \dots \dots (4)$$

式 (3), (4) を式 (2) に代入して、

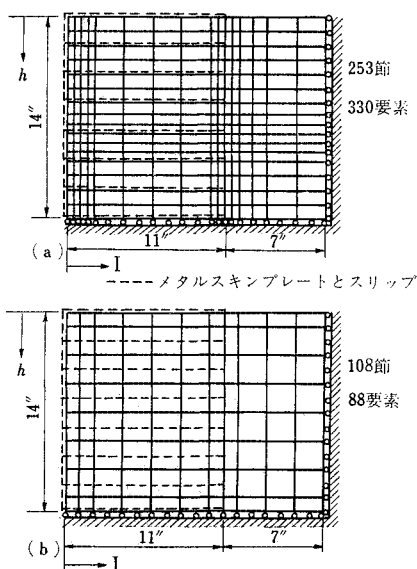
$$\sigma_1^{so} = \frac{E^{so}}{E^{st}} \sigma_1^{st} \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) と式 (1) より、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1^{st} &= \frac{\sigma_1 A^c E^{st}}{A^c E^{so} + A^{st} E^{st}} \\ \text{または } \sigma_1^{so} &= \frac{\sigma_1 A^c E^{so}}{A^c E^{so} + A^{st} E^{st}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

せん断変形などについても同様の解析を行えば、セルとそれを構成する土やストリップとの応力、ひずみの関係が表わせる。

こうして定めたセルを要素として、FEM を用いて



(a) はりと弾性体要素
(b) 合成体要素

図—2 FEM による解析

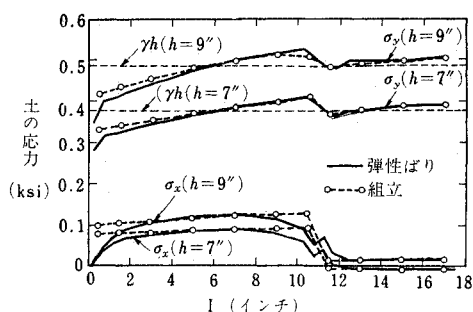


図-3 各水平断面における土の応力

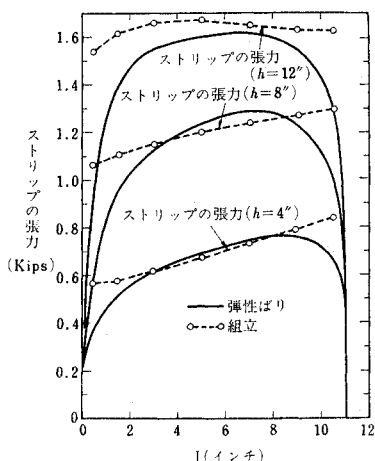


図-4 各水平断面におけるストリップの張力

解析を行えば、各部の応力、ひずみは容易に求められる。こうしたセルを用いた方法でなく、土とストリップをおのおの弾性体およびはりの要素として扱っても、FEM によって解くことができる。しかしこの方法では、要素数や節点数が増し、計算に要する費用が高くなる。得られる解は、合成体要素(セル)を用いた場合よりも精度は高いが、実用上問題となるストリップの最大引張力や、土の最大応力などについては大差がない。スキンとストリップの接合部付近や、ストリップの終点付近などの応力状態を検討する場合以外であれば、セルを用いた FEM で十分かつ有効と思われる。

(垂水尚志：国鉄構造物設計事務所)

杭基礎の支持力と沈下

"Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations"
Meyerhof, G.G.
Proc. of A.S.C.E., Vol. 102, No. GT 3,
pp. 195~228, March (1976)

この論文は、A.S.C.E. の土質工学部門での第 11 回テルツァギー・レクチャーとしてカナダ、ノバスコシア工科大学の G.G. マイヤホフ教授が行った講演を

内容としている。杭基礎の支持力の評価方法について、次の三つの項目について述べている。1. 砂地盤中の杭の極限支持力、2. 粘土地盤中の杭の極限支持力、3. 杭基礎の沈下。

「砂地盤中の杭の極限支持力」は次の五つの内容としている。a) 内部摩擦角、上載圧、根入れ深さ等の関数としての先端抵抗、b) 周面摩擦角、上載圧、杭周面上の土圧係数等の関数としての周面摩擦力、c) 静的コーンペネトロメーター、標準貫入試験結果からの先端抵抗、周面摩擦力の評価方法、d) 一様でない地盤での先端抵抗、e) 群杭の支持力。

「粘土地盤中の杭の極限支持力」は次の三つを内容としている。a) 粘着力、根入れ深さ等の関数としての極限支持力、b) 軟粘土・硬粘土の周面摩擦力、c) 群杭の支持力。

これらの杭基礎の設計に有用な内容より、一例として「砂地盤中の杭の先端抵抗の評価方法」を取り上げ、次に説明する。

砂地盤中の杭先端抵抗 q_p は、ある限界根入れ深さ D_c をこえると深さの増加とともに増加せず、一定値 q_l (限界先端抵抗とよぶ) となることが実験的に知られている。静的なコーン先端抵抗 q_c より q_l を求めることができ、 q_c の実験値を図-1 に示す。この図を用いて、軟弱層の下にある砂質支持層中の杭の先端抵抗 q_p を次のようにして求める。支持層への根入れ深さを D_b 、杭径を B とする。 D_b が 0 から D_c に近づくにつれて、 q_p は支持層表面上の先端抵抗から支持層の限界先端抵抗 q_l に増加する。 D_c を $10B$ とし、安全側にみて $0 \leq D_b \leq D_c$ で q_p は 0 から q_l に直線的に変化するものとする。いいかえると、次式により q_p が与えられるとする。

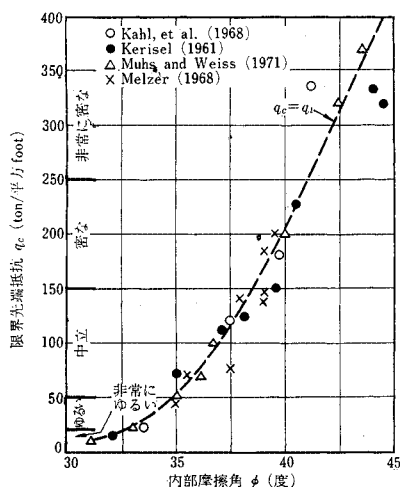


図-1

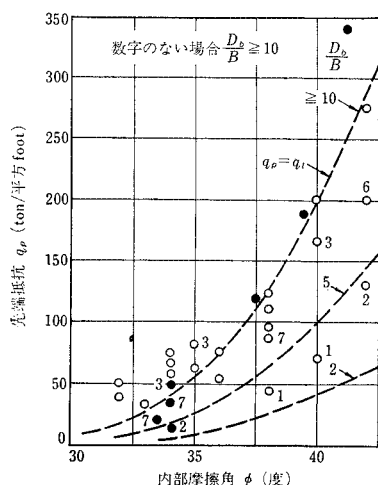


図-2

$$q_p = q_t D_b / 10 B \leq q_t \dots \dots \dots (1)$$

図-1 および式(1)を用いて求めた q_p と杭の実験から求めた q_p の比較を図-2 に示す。丸印の右側の数字は D_b/B の値であり、数字のない丸印は $D_b/B \geq 10$ を意味している。式(1)による評価がほぼ妥当であることを示している。

(長岡弘明：日本鋼管(株)技術研究所)

アンカーを用いた鋼矢板土留の破壊例

“Failure of Anchored Sheet Pile Walls”
Broms, B. and Stille, H.
Proc of A.S.C.E., Vol. 102, No. GT 3,
pp. 235~251, March (1976)

スウェーデンでは、幅の狭いトレンチの場合を除いて、アンカー式土留を用いるのが一般的である。この方式の土留で生じた8つの事故例について述べる。

(1) Manfred の土留は、層厚約 12 m でせん断強度約 0.3 kg/cm² の粘土地盤で、6.3 m 掘削するためのものである。地下水位は掘削底面より 1 m 低く、鋼矢板は長さ 10 m のものを用い、その支持力を増すために矢板直前にレールを打ち込み、矢板に溶接している。矢板打設後 1 か月して、掘削深さが 5.5 m になったとき、矢板背面での沈下が急激に増加し、矢板は前方へ変位した。これは、レールを矢板に溶接したら止った。このとき、上段アンカーの反力は 22 t から 29 t に増加した。その後 1 週間して矢板前面にコンクリート杭を打設したときにも沈下が増加しているが、これは、杭の打設により間隙水圧が上昇して、レールの支持力が減少したためであろう。

(2) Hjorten の土留も同様に、矢板前面で杭を打

設したときに矢板背面で 50~150 mm 沈下し、同時に、前方へも同量の変位をしている。この場合、アンカーに隣接する矢板は打止りまで打ち込んであった。

(3) Lilla Bält でも同様に、矢板の支持力が不足していたため、掘削中に矢板が 50~60 cm 前方に変位した。ただちに掘削部に注水し、矢板の支持力を増加したのち、排水をして掘削を完了した。

(4) Fyrislund (図-1 参照) では、アンカー位置を中心として、矢板下端を通る円弧のすべり安全率が 1.0 で、掘削時の全体的安定が不十分であったため、5.5 m まで掘削したときに土留が破壊した。

(5) Västberga では、ランキンの主働土圧に対して設計した土留が掘削中に変形し、アンカーの本数を増したにもかかわらず、冬期の地下水の凍結により破壊した。

(6) S : T Per でも凍結により破壊しており、翌年測定したアンカー張力は凍結により 50% 増加していた。

(7) Kilaberg (図-2 参照) では、すべり面に垂直な応力および面に沿ったせん断抵抗が減少して、掘削中に破壊している。

(8) Västberga の別の場所(図-3 参照)では、矢板背面の盛土上で通行を始めたとき、アンカーが沈下し、矢板のアンカー用の孔が小さかったために、アンカーが矢板の位置で破断した。

土留の破壊機構は、地盤に起因する ① 貫入破壊、

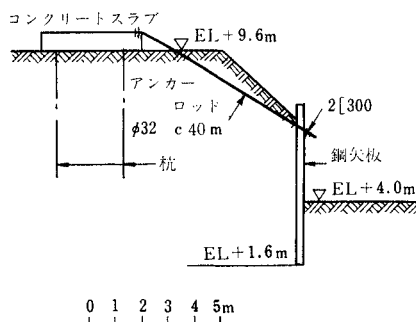


図-1 Fyrislund の鋼矢板土留

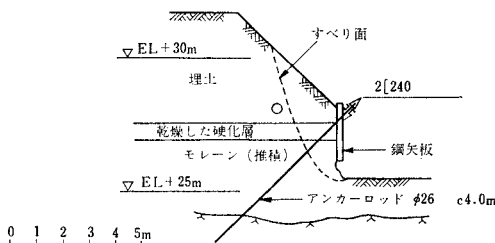


図-2 Kilabery の鋼矢板土留

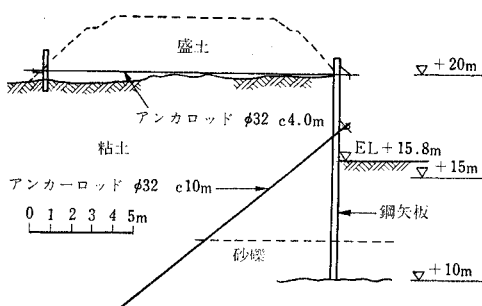


図-3 Västberga II の鋼矢板土留

② 先端破壊, ③ すべり破壊, および, 構造物に起因する, ④ アンカー破壊, ⑤ 矢板破壊とがあるが, 実際に発生した事故の原因は, 壁体の安定度の不足がもっとも多く, 筆者の知るかぎりでは, 腹起しあるいは矢板による事故は, スウェーデンでは生じていない。しかし, アンカーおよびその固定部材の破壊による事故はいくつか発生している。

(著ケ原義彦: 大成建設(株) 土木設計部)

表面波のフィードバック機構による ラングミュア循環の発生

"Generation of Langmuir Circulations by
Surface Waves-A Feedback Mechanism"
Garrette, C.

Journal of Marine Research, Vol. 34, No. 1,
pp. 117~130, March (1976)

本論文は, ラングミュア循環のセルの中を伝播する表面波の場所的な変化および表面波の平均流へ及ぼす効果を調べることににより, 表面波と循環の間には正のフィードバック機構が存在し, それゆえ循環は波の存在する場における表層の不安定現象とみなせることを明らかにした。理論的展開は次の3段階から成る。

(1) 流れによる表面波の変化

波数 $K=(k, l)$ の表面波が流速 $U(U, V)$ の流れのなかを伝播する場合に, 周波数 ω は次式で表わされる。

$$\omega = \omega' + U \cdot K \dots (1)$$

一方, エネルギー密度の変化は,

$$\frac{\partial}{\partial t} (E/\omega') + V \cdot [U + C'] E/\omega' = 0$$

$$\dots (2)$$

と表わされる。ここで $l/k = \tan \theta$, $\hat{U} = U(k/g)^{1/2}$ とおき, 式(1), (2)を変形した後, $|\hat{U}|$ が波速に比較して小さいという条件の下で θ と E の解を求めると,

$$\theta = \theta_0 - 2(\cos \theta_0)^{1/2} (\hat{U} \cot \theta_0 + \hat{V}) \dots (3)$$

$$E/E_0 = 1 + 4(\cos \theta_0)^{1/2}$$

$$\cdot (\hat{U} \cot \theta_0 \cot 2\theta_0 - \hat{V} \tan \theta_0) \dots (4)$$

となる。ここに添字 0 は $U=0$ のときの値を示す。 $\theta_0 \ll 1$ のときは, $\hat{V}$ の項は $\hat{U}$ の項に対して無視できる。この場合, 式(4)は x 軸のまわりに狭い方向スペクトルをもった表面波は, $U(y)$ が最大の領域で振幅が最大となることを示している。

(2) 波による流れへの効果

波と流れの共存する場の平均流に対する方程式は, Phillips (1966) にしたがえば,

$$\frac{\partial M_{\alpha}^m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{\beta}} \int_h^{\zeta} (\rho U_{\alpha} U_{\beta} + p^m (\delta_{\alpha\beta})) dx_3 = F_{\alpha}^m \dots (5)$$

$$\text{ここに, } F_{\alpha}^m = \frac{\partial}{\partial x_{\beta}} (-U_{\alpha} M_{\beta} - S_{\alpha\beta} + M_{\alpha} C_{\beta}') \\ + M_{\beta} \frac{\partial U_{\beta}}{\partial x_{\alpha}} \dots (6)$$

であり, F_{α}^m は波が平均流に及ぼす応力であり, $S_{\alpha\beta}$ は radiation stress を示す。波の運動量と平均流が x に独立なとき, 深海波を仮定すれば, 弱い流れに対して式(6)は,

$$F^m = [-E_0 \tan \theta_0 (\cos \theta_0)^{1/2}, E_0 (\cos \theta_0)^{1/2}] d\bar{U}/dy \dots (7)$$

となる。 $\theta_0 \ll 1$ の場合は, F_x^m は F_y^m に対して無視できる。式(7)によれば, F_y^m は U が最大の方向へ流れを発生させる向きに作用している。

一方, 波のエネルギー逸散は平均流の運動量を増加させる。このために式(5)の右辺に逸散による運動量変化 (rM_{α}) が付け加わることになる。ただし, rM_y は対称形なため打ち消し合う。よって主要な応力は, rM_x であり,

$$M_x = E_0 (k/g)^{1/2} (\cos \theta_0)^{1/2} [1 + 2\hat{U} \cot^2 \theta_0 (\cos \theta_0)^{1/2} \\ \cdot (1 - 1/2 \tan^2 \theta_0) - 3\hat{V} \sin \theta_0 (\cos \theta_0)^{-1/4}]$$

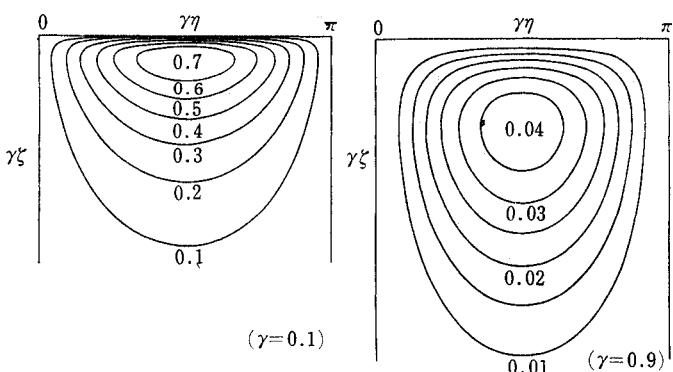


図-1 $\sin \gamma\gamma(e^{\gamma\zeta} - e^{-\gamma\zeta})$ の等高線図

.....(8)
と表わされる。 $\hat{V}$ を含む項は $\hat{U}$ の項に対して小さく、無視できる。式(8)によれば、 M_x は U を加速する方向に作用していることになる。

(3) 不安定の成長

以上の結果をまとめると、

$$\tau(y) = (aU, b \, dU/dy) \quad (z=0) \dots\dots\dots(9)$$

という応力が作用する場における流れの発生を考察する必要がある。このため、

$$U = \Re_e u(z) e^{i\beta y} e^{qt}, \quad P = \Re_e P(z) e^{i\beta y} e^{qt} \dots\dots\dots(10)$$

において、流速の時間的変化を調べる。基本式は、

$$\partial U / \partial t + 1/\rho \cdot \nabla p \equiv \nu \nabla^2 U, \quad \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \dots\dots\dots(11)$$

であり、境界条件は、

$$\mu \partial U / \partial z = aU, \quad \mu \partial V / \partial z = b^* \partial U / \partial y, \quad W = 0 \quad (z=0) \dots\dots\dots(12)$$

である。式(11),(12)の解は、 u に対しては、

$$u = u_0 \exp(a/\mu \cdot z), \quad q = \nu[(a/\mu)^2 - \beta^2] \dots\dots\dots(13)$$

となる。式(13)によれば、循環は確かに成長することが可能であり、かつ、 q の形から、成長速度がもっとも速いものは β が最小、すなわち、横方向のスケールの最大のものであることがわかる。また v, w に対しては、流れ関数を導入し、また $(\eta, \zeta) = (a/\mu)(y, z)$, $r = (u/a)\beta$ とおけば、

$$\psi(y, z, t) = u_0 b a^{-1} r (1-r^2)^{-1} \sin(r\eta) \cdot (e^{i\zeta} - e^{-\zeta}) \exp(qt) \dots\dots\dots(14)$$

となる。関数 ψ の形状を調べるため、 $\sin(r\eta)(e^{i\zeta} - e^{-\zeta})$ の値が図-1に示されている。循環の縦横比はおおよそ1のorderになっている。

(宇多高明：建設省土木研究所 赤羽支所)

リモートセンシングによる ミシシッピー川の特徴調査

"Remote Sensing of Mississippi River Characteristics"
Ruff, J.F., Skinner, M.M., Winkley, B.R.,
Simons, D.B. and Dorrageague, D.F.
Proc. of A.S.C.E., Vol. 102, No. WW 2,
pp. 189~202, May (1976)

河川技術者は河川の維持や安定化を図る場合、経験に頼ることも多いが、これは対象河川の全領域についての十分な情報を同時に得ることができないことに起因している。この点に関して、リモートセンシングに適切な地上調査と組み合わせれば、きわめて有効な手段となり得ることが明らかになった。すなわち、可視スペクトル領域およびそれ以外のスペクトルを利用した映像によって、興味ある現象を認めることが可能と

なった。リモートセンシングによるデータは、①色差、②鏡面反射 (specular reflection)、③灰色レベルの差、等に基づいており、これらの特徴は、①流況、②浮遊砂分布、③露出した土砂沈殿物、④侵食形態、⑤水深、⑥河床形状、⑦人工構造物の影響、⑧水面温度分布、等の河川特性と密接に関連していることが明らかになった。

データの収集は、ミシシッピー川流域において、対象地点での各種の地上調査とともに、航空機を利用して行われ、6 inch のレンズのカメラにより 9×9 inch の写真が撮影され、また 2.5 m radian の視野をもち、8~14 μ m のスペクトル領域を感知する熱赤外線ラインスキャナーが用いられた。

このようにして行われた実測値の測定例を示すのが写真-1である。図中、破線(抄録者挿入)は灰色の

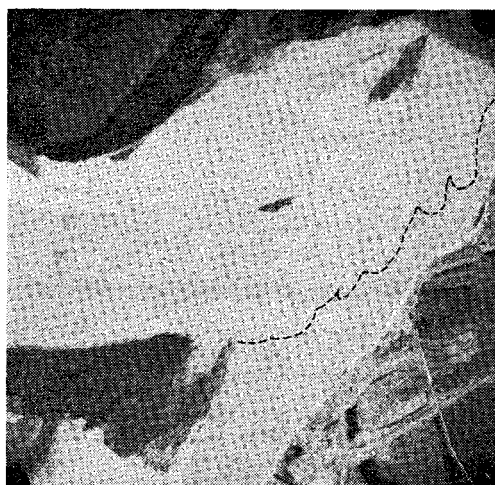


写真-1 渦のパターン

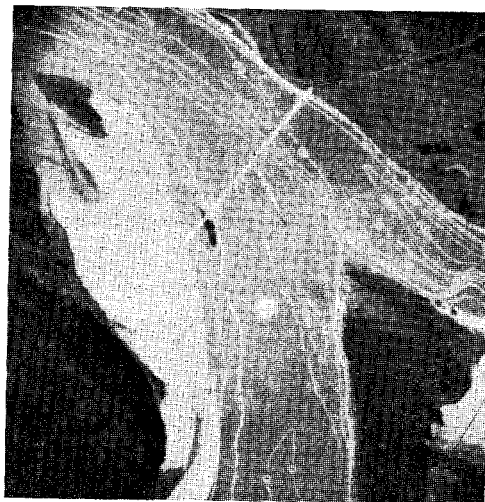


写真-2 河床面の等高線

差を区別するものであるが、これによってツアーゾーンが区別できる。パーの下流の合流点付近の境界に沿って存在するこのシアーズゾーンが、大きな時計まわりの循環によって誇張されており、この循環は島の先端で発生し、下流方向に大きくなっている。

一方、この渦は表面にとどまらず、河床まで広がっていることが予想されるが、これは写真-2に示された深浅図を見れば明らかである。すなわち、シアーズゾーンは、水路のもっとも深い所と一致している。またシアーズゾーンの渦の方向によれば、左側の流れが右側より速いことになるが、これは実際に行った地上調査

によって確認された。さらに、左側の流れの色が濃いことから、浮遊物質濃度が高いことが考えられるが、地上でのサンプリング調査によれば、平均濃度は左側で 283 ppm、右側で 146 ppm となり、上記の点は実際に確かめられた。

以上の例で明らかなように、瞬間的に広域における数多くの有効な情報を得ることができるリモートセンシングが、河川の分野に利用されれば、現在の技術水準の向上にもなり、また費用の節約にも貢献するであろう。

(宇多高明：建設省土木研究所 赤羽支所)

マーク
は語る



三井建設株式会社

三井が(株)西本組を吸収して当社を
発足させ、昭和 20 年 5 月に三井本社の

社章に準拠して制定した。

この「丸に井ゲタ三」は三井家の始祖
高利の母智光院の「夢想」により作られ
たもので、丸は天を表わし、井ゲタは地
を、三は人をかたどり、いわゆる「天地
人」三方を意味する。延宝 5 年(1676)
ごろ、三井高利が呉服店越後屋の暖簾の
紋所として初めて使用したといわれるが
300 年の歴史をもつ由緒あるマークであ
る。

天地人の調和合一を示すこのマークは

「かけがえのない地球を守る一員として」
の自戒のもと、「よい仕事を早く完成し
て社会に貢献」(当社基本方針から)す
べく日夜精進する全員の誇り高き旗印と
して各人の胸裏に生きている。

なおマークは、社員バッジ、社旗、作
業所標識板、重機車両、シート、作業
服、ヘルメット、株券、封筒、レターヘ
ッドなど社用印刷物、手帳、カレンダー
ー、カタログ、PR誌など宣伝物等々に
使用されている。(戸沼道郎・記)

土木計画便覧

米谷栄二 編 <A5> 12,500円

最も現代的かつ実用的なハンドブックを意図して編集されたもので、土木計画の全般にわたって基本的な問題と最新の研究成果をまとめ、必要な統計・データ・法規などの資料を豊富に収録。

現代土木工学

- ②土木解析学…………… 椎貝博美 編 <A5> 3,300円
- ③土木総合計画論…………… 八十島義之助 編 2,800円
- ⑤土木構造設計…………… 松本嘉司 著 3,600円
- ⑥土木施工管理…………… 河野彰 編 2,800円

●続刊

- ①土木工学総論 ④土木施設設計概論 ⑦土木施工論

東京・日本橋／振替：東京7-5番

M丸善

鋼 橋 設計編 I・II

小西一郎編 <B5> I)23,000円 II)25,000円

ギャラガー 有限要素解析の基礎

川井忠彦監訳 <A5> 4,600円

水質工学 <全2巻>

合田健編著 <A5> 基礎編2,700円／応用編3,600円

土木設計便覧 改訂3版

編集委員長 鶴岡鶴吉 <A5> 11,000円

土木計測便覧

京都大学土木会編 <A5> 7,000円

土木計画とOR

石原藤次郎校閲／吉川和広著 <B5> 4,000円