

基礎岩盤の新しい評価法の提案

Water Power/工藤 正・訳

土の引張り強度の測定方法について

Highway Research Record/久楽 勝行・訳

円柱に作用する揚力の実験的研究

Proc. of A.S.C.E., WW/島田 真行・訳

基礎岩盤の新しい評価法の提案

“A New Method for Evaluating Foundations”

Christiansen, L.M., Von. Thun, J.L. and G.S. Tarbox
Water Power, Vol. 23, No. 3, pp. 93~95, March (1971)

(1) はじめに

アメリカ合衆国開拓局は、カリフォルニア Auburn ダムの基礎岩盤解析で岩盤の不連続面としての節理、劈開、断口、破壊ゾーン、劈開にそった破壊、機械的な破壊面などを最大から最小まで等級分けを行ない、この等級区分を数値化したもの (Joint-Shear Index) と岩盤の定数とを関連づけて有限要素法に適用させる独自の解析方法を開発した。この方法は、他の構造物の基礎地盤についても適用できるものと考えられるので、その概要についての報告を行なう。

(2) ダムの概要

Auburn ダムは、Central Valley 計画のなかの一つとしてサクラメントの近くの American 川の支川に計画されているコンクリートアーチダムである。このダムの高さは 208 m で、堤頂長 1200 m (これは完成すると世界最長のアーチダムとなる)、堤頂幅 12 m、ダム基礎の最大厚 60 m でありダムサイトの基礎岩盤は主として角閃岩で、右岸の中央部に変沈積岩、左岸には蛇紋岩を含んでいる。さらに両岸とも変はんれい岩がレンズ状層となって入り、岩盤の不連続面として小さな節理、せん断面、緑泥片岩の断層、滑石、断層粘土、母岩の碎屑などがある。

(3) この評価法の必要性

ダムの究極解析や、設計において、全地質特性を反映した地盤の変形係数を決めることは非常に重要なことであり、その点、多くの地質特性を含んでいるこのダムの基礎岩盤の解析は技術者にとって興味のある問題である。

ここでの解析はすべての地質特性をとり入れられるよ

うに、有限要素法の grid が組まれ、断面は水平断面と垂直断面がとられ、二次元解析を行なっている(図-1)。

ダム全体の変形形状は基礎岩盤の地質特性を示す個々の変形係数によって定まり、この係数を変えることで、たとえば、断層の基礎処理の効果などをみることができるとは。したがって、基礎岩盤全体のどこへどのような係数を適用するかが問題となるが、有限要素分割の大きさに限界があるため、微少な地質特性までも直接この係数に反映させることは非常に困難である。このため、有限要素法による計算に入る前にこの微少部分の検討を行ない、それを係数に含ませることが必要となる。

一方大きな断層やせん断面についての変形係数は、現場でのジャッキテストや実験室での直径 10 cm の供試体による試験から得られる。

Auburn ダムでのジャッキテスト (直径 1.00 m と直径 2.4 m) からは、岩のブロックとしての変形係数はわかるが、これらの大型テストでも、岩盤全体から見ると単に岩の小さな一部分にすぎず、この一軸試験の波及深度も、岩盤の表面から 6~7 m 程度までしか考えられない。まして、ここの複雑な地盤では、限られた試験個数が、ダム基礎の隅々の小岩塊の変形係数をも代表するわけにはゆかない。したがって、これらのジャッキテスト

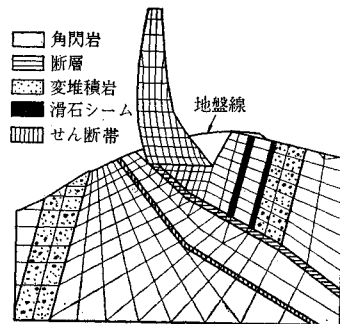


図-1 ダムと岩盤の有限要素分割例

E_c : コアでのせん断弾性係数
 E_d : 現場での変形係数
 \bigcirc : 角閃岩でのジャッキテスト結果

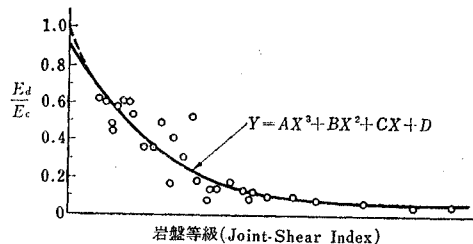


図-2 岩盤等級と係数比の関係図

の結果を岩盤全体に拡張する相関的方法が必要とされ、ここにこのダムで行なった方法を提案する。

(4) 新しい岩盤評価法の提案

現場で行なわれた大型ジャッキテストは小さな不連続面（節理，断口，壁開，小さなせん断面）を含んでいるものとする。諸測定用に現地より採取したコアは，そのなかにある割れ目を含んでいる物質や割れ目の開き具合，風化の状態などについて，地質家により詳細に整理された。そして地表面から 30 cm 間隔にダム基礎岩盤としての等級分けを行なった。

次にコアのなかから，乱されていないものを選び，これによって弾性係数の測定を行ない，この値を使って割れ目のない岩でのジャッキテストの理論変形量を計算する。ここで算出された理論変形量を，実際のジャッキテストで得られた全変形量から差引いて得られる残留変形量は岩盤柱状コアが示す不連続性に相関性をもつものと見なす。いいかえれば，ここにいう Joint-Shear Index 法では，変形係数の減少量を尺度として，不連続性の度合を知り得るものとするのである。

次の段階は，土木，地質家の共同チームによってこの Index を相関的に計量し定めることであつた（この報告では，定量的な問題までは言及していない）。

図-2 にコアと現場試験での係数比と岩盤の等級区分との関係図を示す。このなかで横軸は，基礎岩盤の状態（採取コアなど）からダムサイトの岩盤全体について知ることができる。また，ジャッキテストを行なった箇所の変形係数は地表面ではテストの結果が 100% 有効であるとし，深さが 6~7 m でその影響範囲をはずれるものと考えた。

図-2 のような関係式が得られたあとで再び現場でのジャッキテストを行なって，岩盤の等級区分が適正であることを確認した後，有限要素法による解析に移る。

(5) あとがき

開拓局の技術者達は，この方法によって，ダムの基礎評価の壁を打破れるのではなからうかと考えている。

“土の引張り強度の測定方法について”

“New Method for Determination of Tensile Strength of Soils”

Fang, H.Y. and W.F. Chen

Highway Research Record No. 345

Highway Soils Engineering 11 Report (1971)

(1) ま え が き

材料の引張り強度に関係するクラックの発生による破

壊が，最近高速道路やフィルダムにおいて問題視されてきている。現場における土質力学的な見地からすると，土の引張り強度は土の強度特性のうちでも，重要なものの一つにあげられるが，一般には土の引張り強度はないものとして考えられてきた。その理由として，土の引張り強度は圧縮強度に比較して小さいこと，および満足な試験方法が確立されていないなどがあげられる。

この論文は土の引張り強度を決定するための新しい簡単な試験方法について述べたものである。また，塑性理論を基にして土の引張り強度を計算するための単純化した公式を誘導した。そして，この論文で述べる圧裂試験（double punch test）と引裂き試験（split test）とから決定した引張り強度をコンクリート，モルタル，アスファルトコンクリートなどの種々の材料についても比較検討を行なった。その結果，圧裂試験によって土の引張り強度を求めることができ，しかも室内および現場でも容易に試験が行なえることが判明した。

(1) 圧裂試験の方法

この試験の方法は，図-1 に示すような円筒形の土の供試体の上，下部の中央に置かれた 2 枚の鉄製の載荷盤上に，供試体が破壊するまでゆっくり垂直荷重を加えるものである。土の引張り強度は塑性理論を基にして求めた式 (1) を使って最大載荷重から求める。

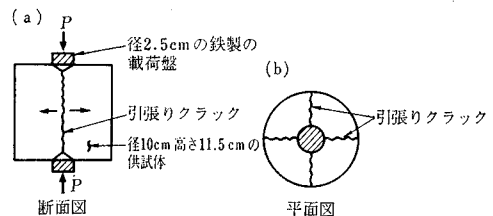


図-1 圧裂試験機の模式図

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi(1.0bH - a^2)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- σ_t : 引張り強度 (kg/cm²)
- P : 最大載荷重 (kg)
- a : 載荷盤の半径 (cm)
- b : 供試体の半径 (cm)
- H : 供試体の高さ (cm)

である。

Hyland と Chen によるコンクリートおよびモルタルの試験の結果によると，引張り強度に及ぼす供試体の高さ半径，および載荷盤の影響は近似的に比例関係が成り立つことが示されている。また，Fang によると供試体の高さ半径の比は 0.8~1.2 が適当であり，供試体の直径に対する載荷盤の直径は 0.2~0.3 が適当であることが示されている。一般に，突固めモールド (10 cm × 11.5 cm) による供試体には 2.5 cm の載荷盤が，

CBR モールド (15 cm×15 cm) には 3.3 cm の載荷盤がよいとされている。載荷盤は変形しない剛性のものであればならない。

(3) 実験結果

使用した試料は中ぐらいの塑性をもつ土 (液性限界=31%, 塑性指数=10) で, No. 10 ふるいを通過したものを、空気乾燥した。供試体の作製には突固めモールドを使用し, 3層に締固めた。1層あたりの突固め回数は 15, 25, 55 回にした。圧裂試験の載荷速度は 2.5 cm/min とした。同様な供試体について引裂き試験と一軸圧縮試験を合せて行なった。

図-2 は打撃回数の異なる 3種類の試料について、引張り強度と含水比の関係を示したものである。最大引張り強度は最適含水比よりも乾燥した側に存在する。図-3 は突固め密度と引張り強度の関係を示したものである。含水比の高いところでは、密度が増大しても引張り強度はあまり増加しないが、含水比の低いところでは密度が増大するにしたがって引張り強度が急激に増加することが示されている。また、図-4 はコンクリート、モルタル、アスファルトコンクリートなどの引張り強度と土の引張り強度の比較を示したものである。図-4 から、二つの異なる引張り強度試験の結果がよい一致を示していることがわかる。

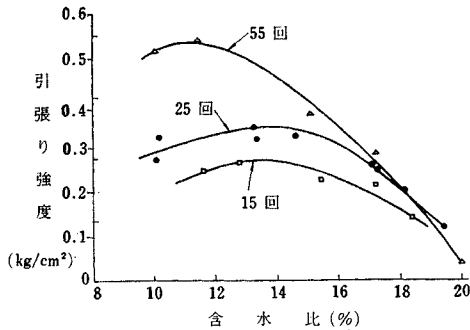


図-2 引張り強度と含水比の関係

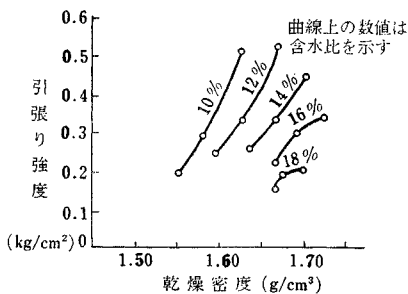


図-3 引張り強度と乾燥密度の関係

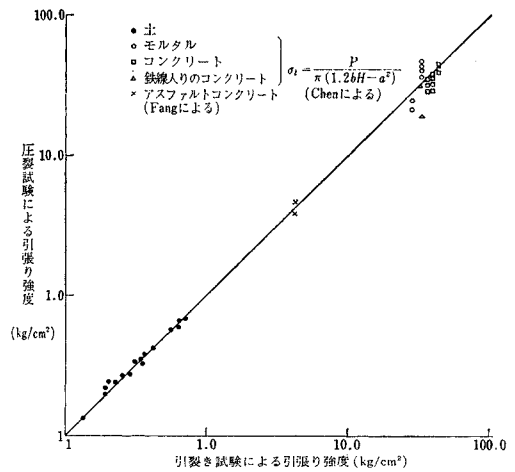


図-4 圧裂試験および引裂き試験から決定した種々の材料の引張り強度の比較

(4) 結論

本試験結果から次のようなことが指摘できる。

- 1) 圧裂試験は試験するうえに簡単であり、しかも容易にできる利点を持っている。そして、一連の CBR 試験、突固め試験と併用してできる。
- 2) 土の引張り強度は式(1)から求めることができる。また、式(1)によって求められた値は引裂き試験の結果ともよく一致している。
- 3) 土の引張り強度は最適含水比の状態よりも乾燥した側に存在する。
- 4) クラックによる破壊が重要視される場合には、材料の引張り強度を試験する必要がある。その意味で、圧裂試験は室内または現場においても試験することができ、便利である。

円柱に作用する揚力の実験的研究

“Laboratory Study of Lift Forces on Circular Piles”
Bidde, D.D.
 Proc. of A.S.C.E., WW, Vol. 97, No. 4
 pp. 595~614, November (1971)

海洋開発にともない、外海における石油採取基地等の建設が盛んになりつつあり、それらの構造物の経済的設計が望まれている。外海でさまざまな方向の波や潮流の力を受ける構造物部材には、その形状からいって円柱を用いることが最も合理的である。一般に設計にあたっては、波や潮流の力を円柱がその運動方向力 (F_x) のみに受けるとしか考えないが、実際には、同水平面上の直角方向に作用する力、揚力 (F_y) の大きさも無視できない。現場の試験でも本研究の場合のようにパイルが海底につくまでに大きな揚力が作用することが実証されてい

る。この揚力を無視すると振動により構造物部材にクラックを生じ、疲労破壊の原因となる。一般に揚力は波が円柱を通過するとき交互に発生する渦と関連があることから本研究では、渦の発生過程と、揚力と外力方向力との比、 $m = F_y / F_x$ について検討した。実際の外海では、波の状態は、波向、波高、周期ともランダムな現象であるが、ここでは基本的な問題として規則波を用いた。本研究に用いる運動方向力 F_x の算定にあたっては、

$$F_x(t) = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} a + \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| \dots (1)$$

$F(t)$: 円柱の単位長さあたりの x 方向力

C_M, C_D : 慣性、抗力係数, ρ : 流体の密度

D : 円柱の直径, u : 円柱における流体 x 方向速度

a : 円柱における流体粒子加速度,

のモリソンの式を用いる。上式での u, a は微小振幅波理論により求めるものとする。

実験に用いた水路は、長さ 30 m, 高さ 0.9 m, 幅 0.3 m と長さ 60 m, 高さ 1.8 m, 幅 2.4 m の 2 本を用いた。波力計は高感度でかつ低周波の振動にも安定なものを使用した。図-1, 2 に概要が示されるが、外力によって装置中のひずみ棒が曲げられ、取付けられたひずみ計により x, y 成分の張力、圧力を増幅器で取り出すようになっている。検定はあらかじめ反力点を決定し、図-3 のように静荷重で行なった。実験に用いた円柱は、直径 41 mm と 180 mm の 2 種類である。実験波の諸元は、水深 60 cm, 波高 0.8 cm ~ 18 cm, 周期 0.82 sec ~ 2.0 sec である。実験は最初円柱全体の剛性測定からはじめられ、41 mm 円柱の固有振動数は 56 cps であり、180 mm 円柱のそれは 12 cps であった。図-4 はその固有振動記録の一例である。これらの固有振動数は今回の実験範囲の波や渦の周波数が 5 cps 以下であることから実

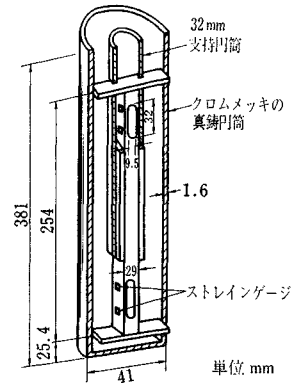


図-2 41 mm 波力計

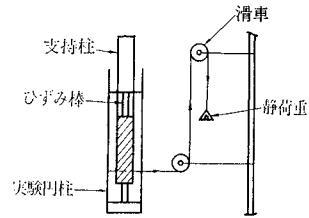


図-3 外力検定法

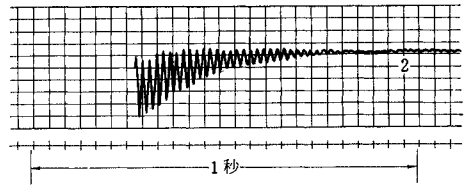


図-4 41 mm 径円柱の固有振動記録

表-1 渦の目視観測 (水深 0.6 m, 41 mm 径円柱)

実験 No.	波高 (cm)	レイノルズ数	クーリガン・カーメンター数	形態素描
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
周期 = 2.0 sec				
1	0.8	850	0.9	渦発生せず 運動の大きさ径以下
2	1.0	1220	1.3	
3	1.4	1680	1.8	
4	1.8	2140	2.3	わずかに流線はく離
5	2.0	2450	2.7	非常に弱いカルマン渦列
6	2.4	2920	3.2	明白なカルマン渦列
7	2.7	3230	3.5	
8	3.0	3700	4.0	円柱後に渦発生
9	3.4	4180	4.6	
10	3.9	4810	5.2	円柱前後に渦発生
11	4.6	5610	6.1	
12	5.0	6250	6.8	乱れがはげしくなる
13	5.6	6900	7.5	
14	6.1	7550	8.2	
15	6.9	8530	9.3	極端に乱れがはげしくなり渦は確認できない
16	7.6			
17	8.1			
18	8.6			
19	8.9	11200	12.2	

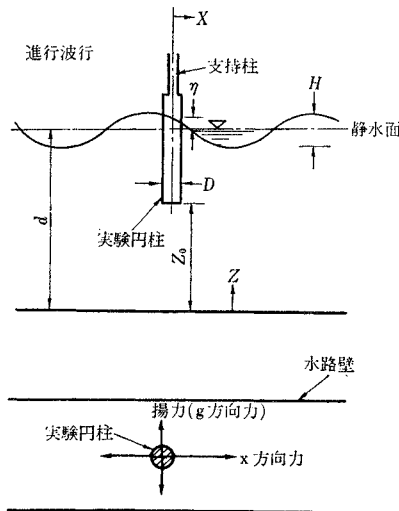


図-1 実験記号説明

験結果に影響を与えない。次に揚力に大きな影響を及ぼす渦の発生過程を検討するため、流体表面にアルミニウム粉末をまき、前述の実験波による水粒子の運動を目視観測した。観測結果の一部が表-1に示される。渦の発生を論ずるのにもちいられるこれらクーリガン・カーペンター数 $K-C$ レイノルズ数 Re は

$$K-C : u_{\max} T / D \dots\dots\dots (2)$$

$$Re : u_{\max} D / \nu \dots\dots\dots (3)$$

ν : 流体の動粘性係数, T : 波の周期, である。

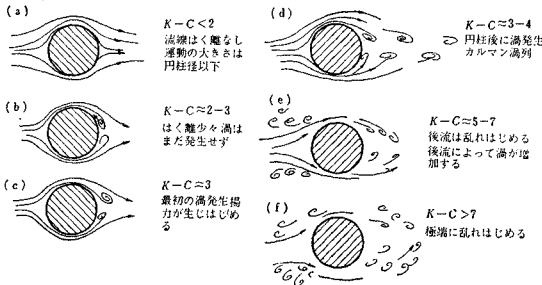


図-5 渦発生過程図

また、図-5にクーリガン・カーペンター数と円柱のまわりの渦発生過程が図示されるが、このような図式は波の運動による渦発生過程を理解するのに簡単に適切な方法である。一般に揚力 F_y は

$$F_y = 1/2 C_L \rho u^2 A \dots\dots\dots (4)$$

C_L : 揚力係数, A : 円柱投影面積, で表わされるが、本研究では, $m = F_y / F_x$ を直接求めることにした。このようにする方が、技術者の興味をそそるところであり、測定誤差が相殺される利点もある。実験は各ケースとも2回ずつ行なわれ、 F_x, F_y の最大値の平均より m を求め、 $K-C$ 数, Re 数との関係を検討した。測定結果を考察すると(図-6参照), まず $K-C$ 数に対しては, $K-C$ 数が3~5のとき二つの円柱とも $m = F_y / F_x$ はしだいに増大しはじめ、15付近で最大値をとる。 Re

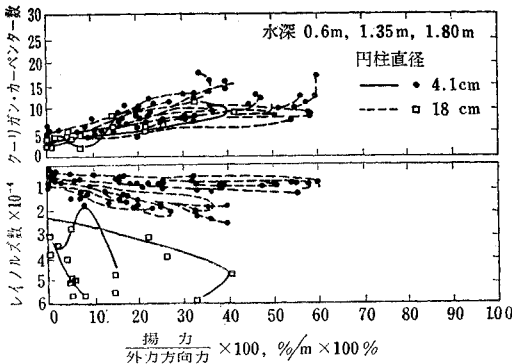


図-6 揚力/外力方向力に対するクーリガン・カーペンター数とレイノルズ数

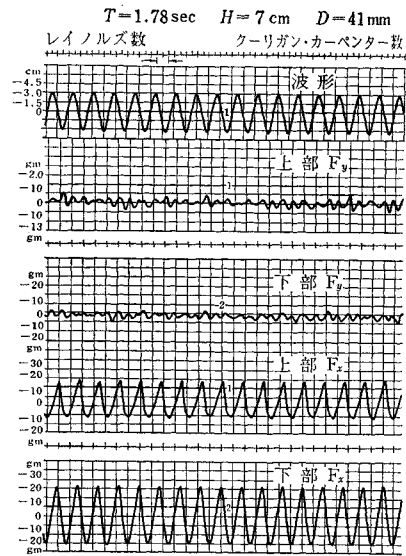


図-7 実験記録の一部

数に対しては 41 mm 径円柱の場合は $K-C$ 数と同様の傾向をとるが、180 mm 径円柱の場合は m と相関性をもたない。41 mm 径円柱の場合の渦発生時の Re 数が 0.5×10^4 に対し、180 mm 径円柱の場合は 2.5×10^4 である。 Re 数は外力模型の構造物の大きさが実物大に近づくほど適切なパラメーターといえなくなる。

また、図-7は41 mm 径円柱に周期 1.78 sec, 波高 7 cm の波を与えた場合の波高, 上部 F_y , 下部 F_y , 上部 F_x , 下部 F_x のストレインゲージ波形記録である。この場合, $K-C$ 数は 6.23 で前述の観測からかなりの渦が発生している、揚力の変動周波数は波の周期の約2倍であり、2つの渦が交互に発生していることと一致する。 m は 25% であり、後流はまだ完全に乱されていないし、揚力 F_y も比較的、規則変動をしている。実験をとおして、 $K-C$ 数をパラメーターとして m を検討するのが適切であることが知られた。また、他の研究によれば、円柱の揚力 F_y の変動周波数は外力波のその2倍であると述べられているが、本研究では確認できなかった。結論として、

- 1) クーリガン・カーペンター数 ($K-C$) $u_{\max} T / D$ は, $m = \text{揚力} / \text{外力方向力}$ の比を推定するのに適切なパラメーターである。
- 2) 渦は $K-C$ 数が約3になって発生し、揚力は、この渦に関連し、 $K-C$ が 15 のとき、 m の値は最大値、60% を示す。
- 3) レイノルズ数 (Re) は、180 mm 径円柱の場合には、41 mm 径円柱の場合に比べて、 m との相関性が少なく、波による渦の発生研究における基本的なパラメーターとしては適当でない。