

堰堤コンクリートの强度規準並びに

剪断强度について（其の 2）

正員 工学博士 畠 野 正*

STRENGTH STANDARD AND SHEARING STRENGTH OF DAM CONCRETE (II)

Dr. Eng., Tadashi Hatano, C. E., Member

Synopsis In the previous paper of this series, the writer stated that in the case of dam concrete where the stresses are 2 dimensional or 3 dimensional, strength standard should be shearing strength (in relations to the normal pressure on the surface), and he explained his examination method of shearing strength.

In this paper, the results of experiments are described. It is written in the form of an equation as follows:

$$\tau = \tau_0 + 1.15\sigma$$

τ : shearing strength. σ : normal compression.

要旨 先に筆者は堰堤コンクリートの強度規準並びに剪断強度について論じ、新しい剪断強度試験法を提唱したのであるが、本文はこの方法に従つて実験した結果を述べたものである。セメント使用量を 1m^3 当り、 300kg , 250kg , 200kg の 3 種類に変化せしめ、水使用量を 1m^3 当り $170l$, 砂利砂重量比を 2.5 とした場合の材令 7 日及び 28 日の各々の場合につき実験したのであるが、その結果は剪断強度は圧力の増加と共に略々直線的に増加し、且つ増加の割合はセメント使用量、材令に関せず略々一様であつた。

1. 実験の方法

実験の要領は図-1 に示す如くである。即ち 10cm 角、 60cm 長のコンクリート供試体 1 の両端に、 $22 \times 15 \times 2\text{cm}$ の鋼板 2 をあて、これにあけた径 27mm の孔に径 25mm の鋼棒 3 を 4 本通す。この鋼棒の端部に切ったネジとナットによつて、鋼板を供試体の一端に固定し、他端は更に圧力計 4 を附して、その外側に更に鋼板をあて、これらをナットによつて締めつける。

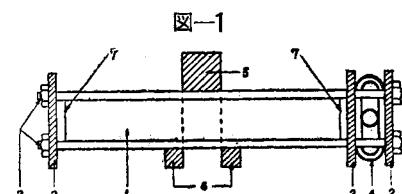
使用した圧力計は $5 \times 3\text{cm}$ の矩形断面をもつ特殊鋼を長、短径 33cm 及び 14cm の梢円形の環状に仕あげたもので、この環を短径方向に圧縮し、その変形量をダイアル・ゲーデで読むものである。その最大圧力量は 15 ton である。

剪断荷重を加えるのは、鉄物ブロック 5 及び 6 であつて、前者は $10 \times 7 \times 12\text{cm}$ 、後者は、 $5 \times 5 \times 12\text{cm}$ に正確に仕あげたものである。

図-1 に於ける左端のナットを固定しておき右端のナットを圧力計を介して締めつける。これによつて供試体は軸圧力をうけ、その大きさは圧力計に表示される。

後述する様に最初ある程度の軸圧力を加えておいた供試体に剪断荷重を加えると、その荷重の増加と共に圧力計の針は移動して、軸圧力の大きさが次第に増大するのが見られる。剪断破壊時に於ける終局の軸圧力の大きさは、最初剪断荷重を加えない前の軸圧力の大きさがある範囲内に止る間は直接にその大きさには関係しないで、コンクリートの両端部に接触する材料によつて定まる様である。本実験に於ては鋼板 2 に直接接触した場合、杉板、ゴム板、スポンジゴム板を図-1 の 7 の如く挿入した場合の 4 者につき実験した。この場合一度使用した挿入板を再度使用すると終局の軸圧力にある程度の変化が認められた。

載荷の状態は写真-1 に示す如くであるが、左端の圧力計及び鋼板 1 枚が右端に比し重いので、右端に適当に



鋼板を加えて左右の重さを均等にした。供試体に加えられた鋼板、鋼棒、圧力計及び附加鋼板の全重量は45kgであった。

2. 実験の結果

供試体のコンクリートの性質は、表-1に示す如くである。此等のコンクリートの圧縮及び引張の強度は表-2に示す如くである。圧縮試験は径15cm、長30cmの円筒により、引張試験は同形のものを赤沢式圧裂試験法によつた。又此等の値は3~4個の供試体につき得られた値を平均したものである。

剪断試験の結果は表-3、4に示す如くである。之等の表に於て初期軸圧力とは剪断荷重をかける前にコンクリート供試体に予め加えた軸圧力の大きさを示し、終局軸圧力とは剪断荷重を加えて終に破壊を生ずるときの軸圧力の大きさを云う。即ち予めある軸圧力を与えたものに剪断荷重を加えると剪断荷重の増加があまり大きくなはない間は、初期軸圧力の儘であるが、剪断荷重がある程度以上になると圧力計の読みは次第に増大して軸圧力の増大するのが見られる。これは剪断荷重によつて軸方向へ延びようとするのを両端に於て制限する為に生ずる圧力の増加を見る事が出来る。

写真-1

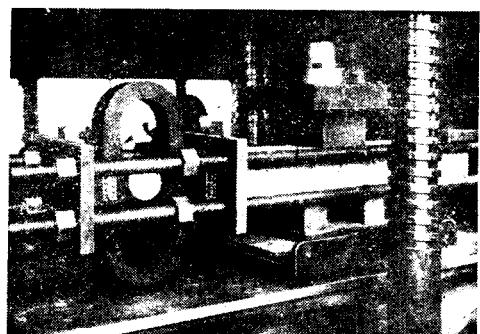


表-1

区分	セメント使用量	材 齢	水 使用 量	粗細骨材重量比	粗骨材組成
1	300 kg/m ³	7日			25~15mm
2	250 "	7"			50%
3	200 "	7"			15~10mm
1'	300 "	28"	170 l/m ³	2.5	30%
2'	250 "	28"			10~ 5mm
3'	200 "	28"			20%

表-2

区分	圧縮強度	引張強度	区分	圧縮強度	引張強度
1	131.9 kg/cm ²	13.0 kg/cm ²	1'	242.2 kg/cm ²	21.3 kg/cm ²
2	59.3 "	6.8 "	2'	98.8 "	12.9 "
3	40.9 "	5.3 "	3'	73.0 "	7.7 "

表-3

供試体	初期軸圧力 kg/cm ²	終局軸圧力 kg/cm ²	剪 断 強 度 kg/cm ²	備 考
1	1	—	19.0	
	2	—	28.0	
	3	14.7	58.5	鋼 板
	4	5.4	63.5	杉 板
	5	5.3	69.5	鋼 板
	6	25.5	72.0	同 上
	7	46.5	76.0	同 上
	8	48.0	82.0	同 上
	9	63.0	107.0	同 上
	10	71.4	108.0	同 上
	11	77.0	116.8	同 上
	12	88.0	117.0	同 上
	1	—	19.0	
	2	—	17.0	

2	3	0.5	10.1	25.0	スポンヂ及び堅ゴム
	4	1.5	21.5	39.5	同 上
	5	2.5	22.5	40.0	同 上
	6	3.7	24.5	46.5	スポンヂ
	7	6.0	26.0	46.5	杉板
	8	2.0	27.5	48.5	鋼 鋼
	9	17.5	34.0	57.5	同 上
	10	37.4	37.6	58.5	同 上
	11	29.5	38.5	61.3	同 上
	12	39.4	41.0	64.5	同 上
	1	25.0	22.0	40.5	鋼鋸, 初期軸圧力によりクラック入る
	2	12.0	22.0	36.7	杉 板
3	3	14.5	21.7	39.0	スponジ及び杉板
	4	2.5	18.0	30.8	杉 板
	5	1.5	15.6	30.9	スponジ 2枚
	6	2.0	21.6	40.0	鋼 鋼
	7	6.0	12.0	29.5	スponジ
	8	1.5	10.5	20.7	スponジ及び杉板
	9	2.5	12.0	26.6	スponジ 2枚及び杉板
	10	—	—	8.5	

表-4

供試体	初期軸圧力 kg/cm ²	終局軸圧力 kg/cm ²	剪断強度 kg/cm ²	備 考
1'	1	—	48.0	
	2	—	52.5	
	3	21.5	27.5	杉 板
	4	36.5	42.5	同 上
	5	27.7	44.5	鋼 鋼
	6	50.0	63.0	堅ゴム
	7	55.3	70.0	鋼 鋼
	8	82.5	90.0	スponジ
	9	84.0	89.5	鋼 鋼
	10	110.5	113.7	同 上
	11	101.6	108.5	同 上
	12	136.5	137.5	同 上
2'	1	42.5	46.0	鋼 鋼
	2	56.0	59.0	同 上
	3	29.5	42.0	同 上
	4	7.5	23.5	スponジ及び杉板
	5	12.6	27.0	同 上
	6	—	26.0	
	7	65.0	67.0	鋼 鋼
	8	11.0	32.0	杉 板
	9	3.0	24.0	スponジ及び杉板
	10	69.0	69.0	鋼 鋼
	11	—	29.0	
	12	6.0	36.0	鋼 鋼
1	45.0	47.5	71.0	鋼 鋼
2	32.0	44.0	70.0	同 上
3	16.0	31.0	56.0	杉 板

4	7.0	27.5	54.0	杉板
5	48.0	48.0	69.5	銅板
6	37.0	41.0	67.5	同上
7	14.5	38.0	64.5	同上
8	3.0	19.5	43.0	スポンヂ及び杉板
9	2.6	22.0	45.0	同上
10	3.0	26.0	52.5	スポンヂ
11	—	—	21.0	

初期軸圧力と終局軸圧力の差は初期軸圧力の大きさに関係するのは勿論であるが、供試体の端部に接する材料の性質によって左右されるので、各種の終局軸圧力を於ける剪断強度を求める為に鋼釘を直接に接触させた場合、15 mm 厚の杉板、4 mm 厚の堅ゴム、10 mm 厚のスポンヂゴム及び之等を併用した各場合につき実験した。備考に記入した材料名は之等の端部接触状態を示すものである。

軸圧力の大きさは圧力計に示された力の大きさを供試体断面積で割った値であり、剪断強度は破壊剪断荷重を供試体断面積の2倍で割った値である。

軸圧力の項に記載のない実験は端部を自由にした従来の方法による剪断試験を示すもので、剪断破壊する前にその荷重の $\frac{1}{2}$ 程度の時中央に於て曲げ破壊を生じている。

写真-2

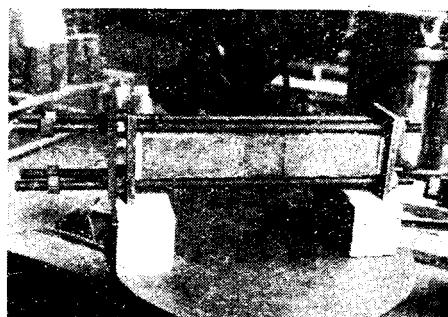
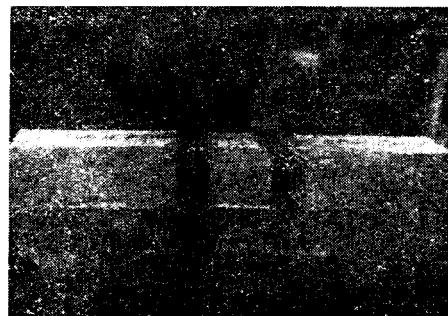


写真-3

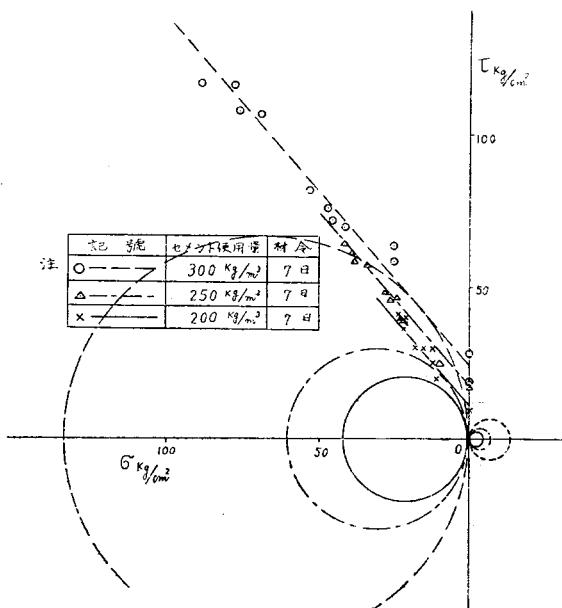


写真-4



軸圧力を加えて剪断破壊した際の状態は写真-2,3,4 に見られる。写真-2 は鉄物ブロックによつて梁の上面が一様に凹んだ状態を示すものである。写真-3 は之と反対に下面の中央部が凸出した状態を示す。この凸出部分の両側に鉄物ブロックの接触した跡が幅 5 cm に明瞭に見られるが、その外側の両端は内側の部分よりやゝ跡が薄く、破壊時に於て梁の両端が上昇することを示している。写真-2,3 に於て梁中央部の上下面にクラックが見られる。これは前文に於て説明した様に荷重のかゝらない面が変形を許される為に剪断面で破壊する以前に生ずるクラックである。写真-2,3 の状態のものから鋼釘を取外すと写真-4 に示す様に剪断面に沿つて略々平面的に破壊された3部分に分離する。

図-2



以上の結果から終局軸圧力 σ と剪断強度 τ の関係を図に表わすと、図-2,3 となる。同図によつて σ と τ とは材令とセメント使用量に関せず一様な直線的関係を以て表現されるとして差支えないであらう。即ち軸圧力を受けない時の剪断強度を τ_0 とすれば、上述実験の結果はすべて次式の如く表わす事が出来るであらう。

但し $\sigma_c < \sigma \leq 0$ こゝに σ_c : 圧縮強度

尙図-2,3 に於ける大円、小円は表-2 の圧縮及び引張強度を以て描いた圧縮及び引張の Mohr の破壊の円である。

3. 実験結果による考察

以上の実験結果を考察して次の如き諸点を指摘する事が出来る。

(イ) 本実験に於ける剪断強度は剪断荷重を断面積で平均した値で与えられる。

筆者は前文に於て本実験法によつて得られた剪断荷重を断面積で平均して剪断強度とするのは安全側即ち事実よりも大きくなりない剪断強度を与えるものであると述べておいた。その理由を要約すると次の如くである。

(i) 破壊前に梁の両端が上昇して、点荷重に近い状態となり、剪断面に於ける剪断応力は急激に変化する様に分布すると考えられる。今その最大剪断応力の所で破壊するとすれば、荷重を断面積で平均して強度とすると小なる強度を与える事になる。

(ii) 剪断面に於ける応力を組合せて、これにある角度をなす面に於て引張破壊を生ずる場合を考えれば、剪断強度は剪断面に於ける剪断応力より小である筈はない。

(iii) 応力状態を3次元的に考えると、剪断面附近の軸圧力及び剪断荷重の方向に直角な方向に変形が許されて、先づクラックが入り実際の剪断荷重を分担する部分は断面積より幾分小となる。従つて全断面積をとつて考えた剪断強度は実際の強度より幾分小となると考えられる。

もし以上の如く剪断強度を表わす直線が真に安全側であるならば圧縮破壊の Mohr の円に交らねばならない。然るに図一 2,3 に見られる如く、この直線は破壊の Mohr の円よりも殆ど外側にあるのである。これは如何なる理由に基くものであろうか。考えられるのは次の 2 点である。

（c）圧縮試験に於ける破壊の Mohr の円が、真の破壊の円より小さいのではないか。

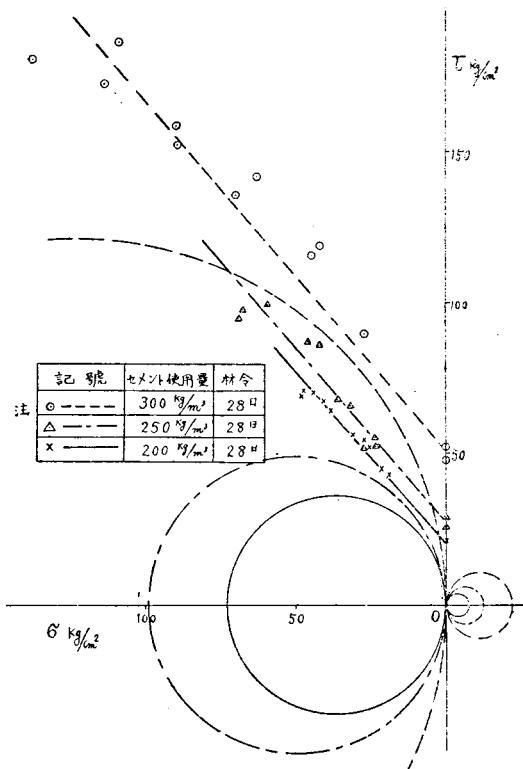
(ii) 求めた平均の剪断強度が、実の剪断強度に近いのではないか。

前者については、種類を異にする2つの実験を組合せた事に対する誤差を考慮しなければならぬ事は勿論であるけれども、又一方従来の取扱いによる所謂圧縮強度そのものに対し批判の余地のある事を示すものであろう。圧縮強度の大きさが供試体の形状によって著しく異なると云う従来の実験結果が適確に説明出来ない点から考えても所謂圧縮破壊の問題は更に深く考究されねばならない点を含んでいる。これらに関しては、こゝには直接触れる事をしないで、問題を提起するに止める。

次に第3の平均の剪断強度が真の剪断強度に近いのではないかと云う素をは次の様に説明出来るであろう。

剪断面に於ける剪断応力が不規則な変化をなして分布しているとして、その最大応力が剪断強度に迄達する。この様な応力状態ではコンクリートは充分塑性を有していて、荷重をそれ以上増加しても、最大応力の部分は剪断強度の儘の大きさを維持し、荷重の增加部分はその附近の応力の小なる部分が分担して、この部分の応力が次第に剪断強度迄に達する。かくして全断面一樣の剪断強度に達して然る後に破壊が起る。かくすれば剪断

四



荷重を断面で平均して得た値が真の剪断強度になる訳である。

この様な考え方は、東大中西不二夫教授の鉄材に関する破壊説の中の軟鋼の捩り破壊に関する考察を想起して興味ある問題である。同教授によれば軟鋼の丸棒を捩つた場合に横断面に於ける剪断応力は全断面一样に剪断強度に迄達すると云う。

本実験に於ける剪断応力も以上の様に考えれば剪断強度は平均値をとつてよい事になり、剪断強度を表わす直線が圧縮破壊の Mohr の円と交らない事の説明となるのである。

(ロ) コンクリートの剪断強度はその面に作用する直圧力と共に略々直線的に増大し、且つその増加の割合はコンクリートの種類に関せず略々一様である。

直圧力が本実験範囲、即ち 0 から圧縮強度の間に於ては、剪断強度は殆ど直線的に増大すると云つて差支えない。又これらの直線は材令及びセメント使用量を本実験の程度に変化させても、その勾配に変化を来さないものと云える。従つてこの程度のコンクリートに於ては(1)式に於ける τ_0 を求めさえすれば、 τ の値を知る事が出来る事になる。

この直線の勾配は(1)式の係数の示す様に $1.15 = \tan 49^\circ$ であつて、Coulomb の所謂内部摩擦角は 49° と云う事になる。この値から圧縮試験に於ける剪断面の鉛直となすべき角度は 20.5° と計算せられ、事実と略々一致するのは興味ある事である。

(ハ) 堤堤コンクリートの強度の規準は(1)式によつて定めらるべきである。

前文に於て詳述した様に、従来の堤堤コンクリートの強度の規準のとり方は、本実験で明らかになつた(1)式を破壊の包絡線として、その規準を考える方法に改めらるべきである。

附記 本実験の実施にあたつて、日本大学々生の鳥井、清水、守屋、実習生の伊崎、当研究所の若本の諸君が示された非常なる努力に対して厚く謝意を表するものである。

UDC 627.821.046:627.824.7

コンクリート・ダムの滑動安定度について

正員 工学博士 畑 野 正*

SLIDING SAFETY OF CONCRETE DAMS

Dr. Eng., Tadashi Hatano, C. E., Member

Synopsis Applying an axial compression of various magnitudes on a beam which is made of concrete and cube of rock which contact with each other, an experiment was made to shear off the beam along the contact planes.

As the result of this experiment, the following relation was found.

$$\tau = \tau_0 + n\sigma$$

τ : shearing strength σ : axial compression

So-called sliding factor is based on τ in the case of $\tau_0=0$, and Henny's shear friction safety factor is based on τ of rock or concrete.

The writer's opinion is that the sliding safety factor must be based on the shearing strength along the contact planes of concrete and rock, and calculated at every points of dam base separately.

要旨 コンクリート・ダムの滑動に対する安定度を、コンクリートと岩石との附着面に於ける断剪強度を実験的に求めることにより、合理的に決定する方法について論じたものである。

1. 緒 言

コンクリート・ダムの滑動の問題はダムの安定度を論ずる上に最も重要な事項の一つである。然るに今日迄のこの問題に関する研究を顧ると、実験的にも理論的にも難解な問題として、あまり手を触れていない状態である様に思われる。

* 東京電力株式会社