

コンクリートの変形に関する一実験

正員 吉 本 彰*

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE DEFORMATION OF CONCRETE

(JSCE Sept. 1955)

Akira Yoshimoto, C.E. Member

Synopsis The stress-strain diagram of concrete, plotted in logarithmic paper, has a shape such as shown in Fig. 1. (In this paper, it is assumed that the strain corresponding to the stress 10 kg/cm^2 is equal to 0.). The relations between the points shown in Fig. 1 and the failure of concrete are studied by experiments. From the results of tests, it is concluded that the strain corresponding to the point A represents the greatest deformation which concrete is capable of developing without undesirable effects.

要旨 コンクリートの応力とヒズミの関係を対数グラフに図示すると、図-1のような折線となる(ただし、本論文では、応力 10 kg/cm^2 のヒズミを0とみなしてある)。著者は図-1における折点とコンクリートの破壊との関係について実験的研究を行った結果、A点のヒズミはコンクリートが、實際上支障なく、変形しうる大きさを示すものと結論した。

1. まえがき

コンクリートに持続荷重をかけると、コンクリート中に生じた応力が破壊強さよりかなり小さくても、時間の経過とともに変形が進んで、破壊することがあるが、荷重がある限度以下であれば、實際上、何らの不都合を生じない。従つて、コンクリートには荷重をうけてもさしつかえのない限界が存在しているはずであつて、この限界点を明らかにできれば、構造物の設計上益するところも少なくないと考えられる。また、コンクリート構造物の亀裂発生の問題などを追究する際には、コンクリートがどの程度の変形に耐えられるかを調べることも必要となつてくるが、これに対しては、この限界点までの変形量を一つの目安とできそうである。このような見地から、この限界点を押えてみたいと考え、コンクリートの変形について二、三の測定を行った。現在までに実施したのは圧縮力をうける場合のみであるが、一応の結論を得たのでこれについてべる。

2. 実験の概要

(1) 供試体 なるべく広範囲の品質のものについて測定する目的で、コンクリートの配合、養生法その他を種々に変化させた。使用したコンクリートの配合は表-1のとおりである。セメントはすべて普通ポルト

表-1 供試体の配合

番号	セメントの種類	配合 (セメント:骨材)	セメント量 (kg/m^3)	G/S	w/c	スランブ (cm)
I	A	1:5	365	1.5	0.44	0.5
II	"	1:6	317	"	0.47	0
III	"	1:9	222	"	0.59	0
IV	B	1:6	317	"	0.50	6
V	"	"	"	"	"	"
VI	C	1:5	342	"	0.45	10
VII	"	1:7.5	240	"	0.62	9.5

ランドセメントであるが、供試体の製作時期が異なるため、品質は同じでない。細骨材は七北田川産の砂を用いた。供試体 I~V に用いた砂は品質良好であるが、VI 及び VII に用いたものは凝灰岩質の粒を多量に含んでいた。粗骨材は七北田川産の砂利でいずれも品質良好である。砂利の最大寸法は 30 mm とした。

供試体の寸法は $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ コンクリートを2層につめ、各層について、底面 $8 \times 8 \text{ cm}$ 、重さ 8 kg の突き棒を 10 cm の高さから 20 回ずつ落下させて突き固めた。成形した供試体は翌日脱型し、Vは材令3日まで、その他は材令28日まで水中養生 (20°C) をなし、その後室内に放置した。

(2) ヒズミの測定 載荷にはアムスラー型 100 t 耐圧試験機を 50 t 目盛にして用い、ヒズミはマルテンスの鏡装置を用いて測定した。測定距離は 100 mm である。

荷重 0 t 付近は不正確になりがちなので、最初 1 t (応力 10 kg/cm^2) まで荷重をかけ、この場合のヒズミを0とみなし、その後 1 t ずつ荷重を増してヒズミを測定した。この基準のとり方については 7. で検討を加える。所定の荷重に達すれば、30 秒間一定の荷重に保つたのち、ヒズミを読みとつて次へ進むのを原則とした。載荷速度の影響をみるため、この時間を変

* 東北大学助教授、工学部土木工学教室

えたものもあるが、特に断わらないものはすべて30秒である。

図-1 応力-ヒズミ関係図

3. コンクリートの応力-ヒズミ曲線

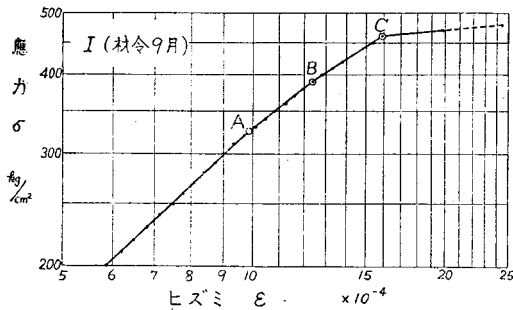
前のべたように、応力 10 kg/cm^2 のヒズミを0とみなして、破壊点近くまでの応力とヒズミを対数目盛で図示すると、いずれも 図-1 のような折線となる。すなわち、応力 σ とヒズミ ϵ との間には、破壊点近くまで

$$\epsilon \propto \sigma^n$$

なる関係が成立するが、数個の点をすぎるとに指数 n の値が変化している。図-2 は I の供試体についての実測例で、高応力の部分のみを示してある。この図によると、応力 $325,390$ 及び 460 kg/cm^2 で折点があらわれている。 460 kg/cm^2 をすぎてからはヒズミの増加がいちじるしく、 478 kg/cm^2 まで荷重した際爆発的に破壊した。

さて、図-1 において、折点 A, B 及び C をすぎるとに指数 n の値が大きくなっている。すなわち、これらの折点でヒズミの増加割合が急に増しているから、これらの点とコンクリートの破壊との間には何らかの関係があるように思われる。折点 A', B' では n の値が小さくなるし、また 7. のべるように、A', B' は応力 0 kg/cm^2 のヒズミを0としなかつたために生じたもので、コンクリートの破壊には無関係と考えられる。そこで、A', B' は除外して、A, B 及び C をそれぞれ第1, 第2及び第3折点と名づけ、これらの折点と、コンクリートの破壊との関係を調べてみよう。

図-2 応力-ヒズミ関係の実測例

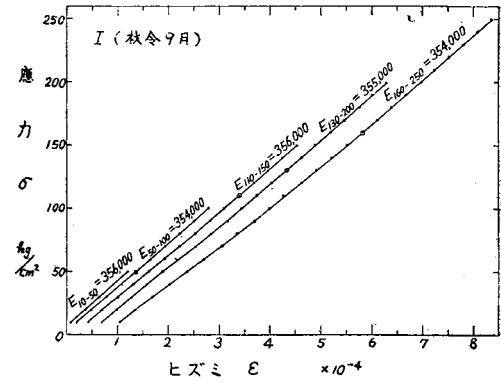


4. 繰返し載荷試験

コンクリートに破壊の始まる点を押える方法として、繰返し載荷を行い、応力-ヒズミ曲線の形につい

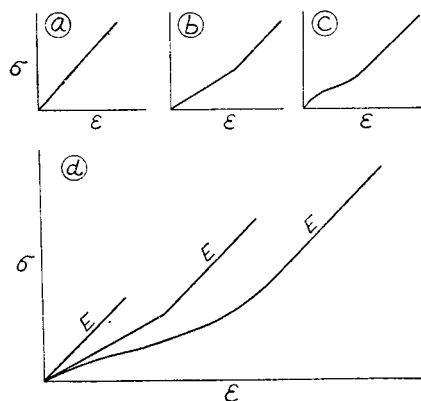
て考察することとした。この場合の応力-ヒズミ曲線を、一般の応力-ヒズミ曲線と区別するため、繰返し載荷曲線と名づけておく。

図-3 繰返し載荷曲線



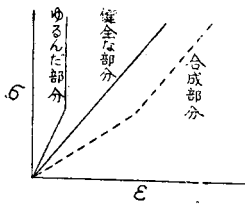
応力がある限度以下の場合、同一荷重を何回か繰返して載荷していると、コンクリートの全ヒズミ及び残留ヒズミは、前回のヒズミと、ほぼ一致するようになる。図-3 は I の供試体の測定結果で、ヒズミの増加がほとんど認められなくなつた場合の繰返し載荷曲線を示したものである。この場合の曲線の形は次のようになつている。応力が 50 kg/cm^2 の場合には、図-4 ㉔のように、直線となる。応力を 100 kg/cm^2 まで増加すると、図-4 ㉕のような折線となる。さらに荷重を増して、応力が 150 kg/cm^2 以上になると、繰返し載荷曲線は折線から図-4 ㉖のような反 S 曲線に変わる。この ㉔, ㉕, ㉖ の曲線を同一の尺度で画くと、図-4 ㉗ ④ のようになる。すなわち、㉕ 及び ㉖ の前半の傾斜は ㉔ の傾斜にくらべてゆるやかであるが、後半の傾斜は ㉔ の傾斜と等しくなる。図-3 には、㉔ の場合の E の値と ㉕ 及び ㉖ の場合の後半部分について求めた E の値を示してあるが、ほぼ等しくなつている。

図-4



この事実は、すでに、明らかにされているところで、繰返し載荷曲線が折線または反S曲線となる理由は次のように説明されている¹⁾。コンクリートは骨材のまわりをセメントペーストが取囲んだものとみなすことができるが、コンクリートに載荷してこの荷重を取り去つた場合、セメントペーストの残留ヒズミは粗骨材のそれよりも大きいから、セメントペースト中に引張応力が生じてコンクリートの組織がゆるむ。

図-5



このようなコンクリートに再び載荷すると、繰返し載荷曲線はゆるんだ部分の圧密と健全な部分の変形が重なつたものになる。すなわち、図-5に示すように、前半では、ゆるんだ部分が締まるため、ヒズミが比較的大きくなるが、後半では、ゆるんだ部分が完全に締つて、健全な部分のヒズミだけがあらわれる。

このように、繰返し載荷曲線に屈折点のあらわれるのはコンクリートにゆるみが生じたためと考えられるが、このゆるみは繰返し載荷のために生じた現象であつてコンクリートの破壊の前兆を示すものではない。もし破壊の前兆であれば、後半部の傾斜が、すなわち E が小さくなるはずである。図-3では、上述のように、 E の変化は認められないから、コンクリートはまだ健全なものと考えられる。

荷重を 30 t (応力 300 kg/cm^2) まで増加すると、繰返し載荷曲線は 図-6 のようになる。繰返し回数を増すごとに全ヒズミ及び残留ヒズミはいちじるしく増大してとどまることなく、第 7 回の載荷の途中でヒズミがいちじるしく増大して破壊した。図-6 には第

1 回から第 6 回までの載荷曲線を示してあるが、後半部は完全な直線とならず、30 t 近くではヒズミの増し方が大きくなつてゐる。また、これらの載荷曲線の直線部分について E の値を調べると、

第 1 回	$E_{160-250} = 354\,000 \text{ kg/cm}^2$
第 2 回	$E_{170-250} = 343\,000 \text{ "}$
第 3 回	$E_{190-270} = 344\,000 \text{ "}$
第 4 回	$E_{200-280} = 339\,000 \text{ "}$
第 5 回	$E_{200-280} = 336\,000 \text{ "}$
第 6 回	$E_{200-280} = 328\,000 \text{ "}$

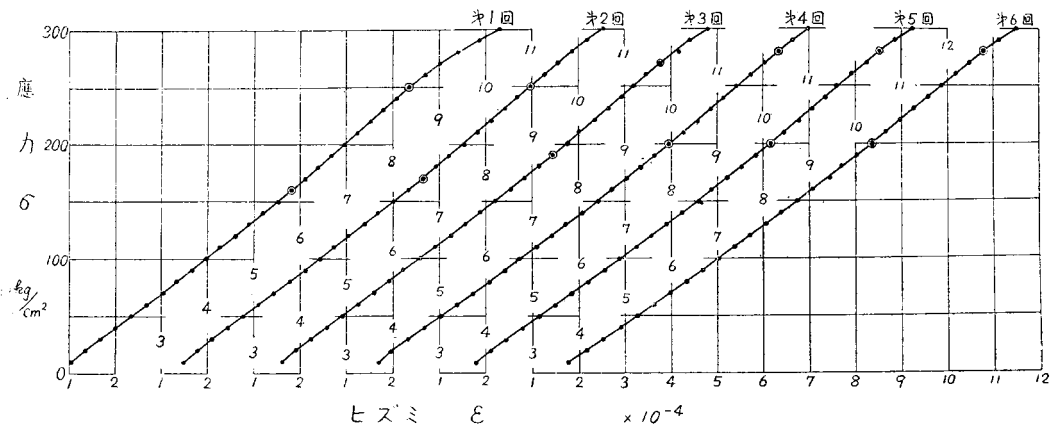
となつてゐる。応力 250 kg/cm^2 以下の場合にくらべると、 E の値は小さくなつてゐるし、また繰返し回数が増すにつれて減少する傾向がある。これはコンクリートの破壊が始まつたことを示すものと考えられることができる。

以上を要約すると、応力 250 kg/cm^2 まで繰返し載荷してもコンクリートは健全であつたが、 300 kg/cm^2 まで増すとコンクリートの破壊が始まつたということになる。この破壊の始まる点と 図-2 の折点との関係を調べてみよう。図-2 の第 1 折点のヒズミは 9.9×10^{-4} である。図-3 に示した繰返し載荷曲線についてみると、 250 kg/cm^2 のヒズミは 8.35×10^{-4} であつて第 1 折点のヒズミより小さいが、 300 kg/cm^2 まで応力を増すと、第 1 回の載荷でヒズミは 10.31×10^{-4} まで増し、第 1 折点のヒズミより大きくなつてゐる。これからみると、コンクリートの全ヒズミが第 1 折点のヒズミをこえない間は安全であるが、これをこすと破壊が始まるとみなすことができようである。

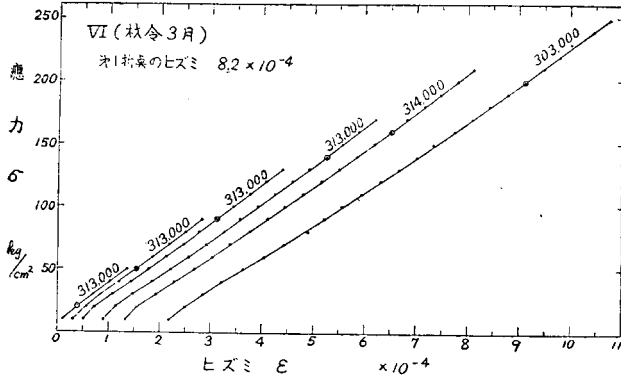
この傾向は他の供試体でも認められる。図-7 及び 8 は供試体 VI について、材令 3 月及び 28 日で測定した繰返し載荷曲線を示したものである。

図-7 は材令 3 月におけるもので、同時に製作した他の供試体について調べた結果では

図-6 繰返し載荷曲線



図一七 繰返し載荷曲線

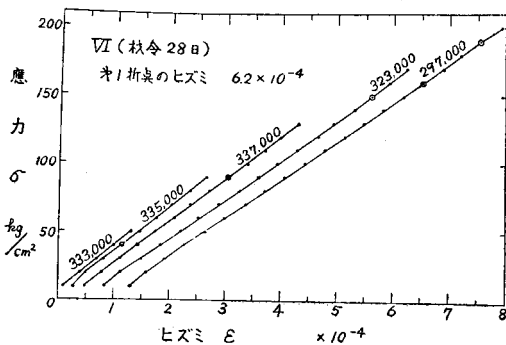


第1折点のヒズミ 8.2×10^{-4}

であつた。上限応力 210 kg/cm^2 以下の場合には、何回か載荷を繰返すうちに、繰返し載荷曲線は一定の形に収れんする。図一七にはこの場合の曲線が示してあるが、図一三と同じ要領で直線部分の傾斜を調べてみると、 210 kg/cm^2 まではほぼ同じになつている。 210 kg/cm^2 における全ヒズミは 8.11×10^{-4} で第1折点のヒズミよりわずかに小さい。応力を 250 kg/cm^2 まで増すと、繰返し載荷曲線は一定の形に収れんしなくなる。図一七には 12 回目の曲線を示してあるが、その傾斜も、 210 kg/cm^2 以下の場合にくらべて、ゆるやかである。従つて、この場合にも、コンクリートのヒズミが第1折点のヒズミをこえたために破壊が始まつたといえそうである。

図一八は材令 28 日の結果で、水中から取り出した湿潤状態のものについて測定した。測定時の室内の相対湿度は 92% を示し、はなはだしく高かつたため、測定終了まで供試体表面は乾燥しなかつた。また、同種の供試体にオケツチェン型ヒズミ計をとりつけたが、測定終了まで収縮はほとんど認められなかつた。従つて、本測定では乾燥による影響を、一応、除き得たものと考えられる。繰返し載荷の上限応力は 30、

図一八 繰返し載荷曲線



$50, 70, \dots \text{ kg/cm}^2$ というように 20 kg/cm^2 ずつ増したが、図一八には、複雑化を避けるため、 40 kg/cm^2 おきの結果を示しておいた。これらの曲線の傾斜をくらべると、上限応力 170 kg/cm^2 のものは、それ以前のものより、ややゆるやかになつている。この場合の全ヒズミは 6.23×10^{-4} 、同種の他の供試体について調べた第1折点のヒズミは 6.2×10^{-4} である。従つて、コンクリートの全ヒズミが第1折点のヒズミをこえた可能性がある。傾斜がややゆるやかなのはそのためと考えられるが、載荷曲線は 9 回の繰返して一定の形に収

れんした。さらに荷重をまして上限応力 200 kg/cm^2 にすると、一定の形に収れんする傾向は認められなかつた。図には 10 回目の載荷曲線を示してあるが、後半部は完全な直線にならず、傾斜もかなりゆるやかである。この結果からみても、破壊が始まる点と第1折点のヒズミとは密接な関係があるようである。

5. 第1折点のヒズミに及ぼす載荷速度の影響

以上の実験結果からみて、第1折点の位置が不動であれば、第1折点が破壊の始まる点とみなしてさしつかえないと考えられる。しかし、第1折点の位置が不安定なものであれば、このように結論することは適当でない。第1折点の位置は応力またはヒズミのいずれかで表わすことができるが、応力で表わすとすれば、載荷速度によつてその値が異なることは、従来の実験結果から、容易に推定できる。前節の説明ではヒズミを基準にしたが、このヒズミも載荷速度によつて変化するならば、第1折点の位置を押えることは不可能となる。そこで、第1折点のヒズミが載荷速度によつて変化するかどうかについて検討してみよう。

図一九はIIの供試体について載荷速度を変化させた場合の応力-ヒズミ関係を示したものである。aは30秒間一定荷重に保つたのち、ヒズミを測定して次の荷重へ進んだもので、全所要時間について載荷速度を調べると、平均 1.4 t/min である。bは3分間一定荷重に保つた場合で、平均載荷速度は 0.29 t/min である。aとbを比較すると、破壊強さも第1折点に相当する応力の値も相異している。ところが、第1折点のヒズミはほとんど等しく、差異は認められない。

図一十はVIの供試体について載荷速度を変化させた場合である。aは所定の荷重に達すればすぐヒズミを読みとつて次へ進んだもので、平均載荷速度は 2.6 t/min である。bは2.5分間一定荷重に保つた場合で、平均載荷速度は 0.33 t/min である。所定の荷重に30秒間保つた場合の測定値は、複雑化を避けるた

図-9 応力-ヒズミ関係に及ぼす載荷速度の影響

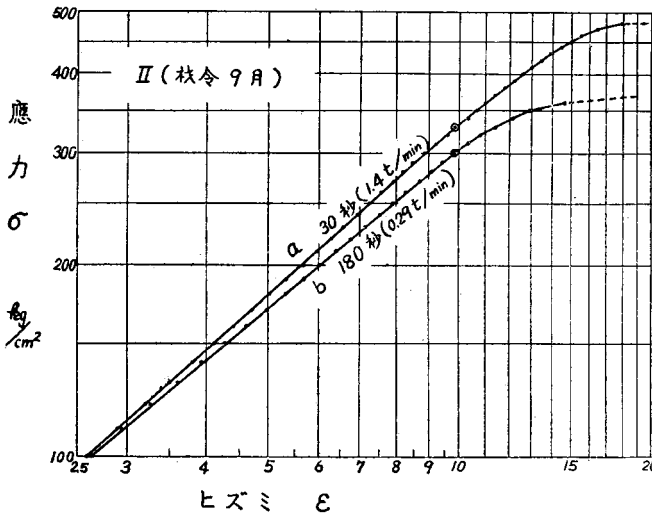
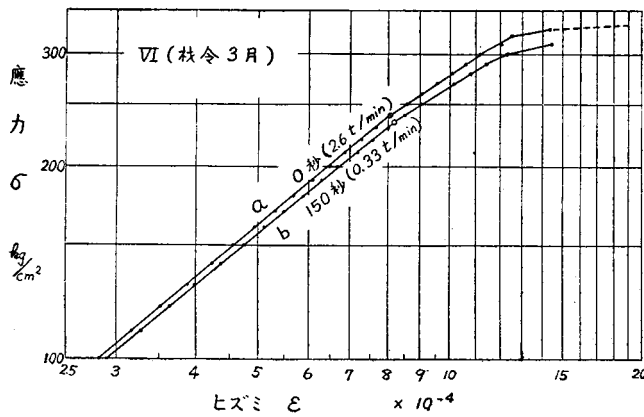


図-10 応力-ヒズミ関係に及ぼす載荷速度の影響



め、図には示していない。載荷速度を変えた場合の第1折点のヒズミは、表-2のように、ほとんど等しい値を示している。

表-2 第1折点のヒズミに及ぼす載荷速度の影響

所定荷重に保った時間	第1折点のヒズミ
0 秒	8.0×10^{-4}
30 "	8.2 "
150 "	8.2 "

なお、このほかに繰返し載荷した場合の全ヒズミ及び弾性ヒズミを調べてみると 図-11 のようになる。

I (材令 9月) の第1折点のヒズミは 9.9×10^{-4} であるが、全ヒズミがこれより小さいうちは、弾性ヒズミ、全ヒズミともいずれも直線となつている。ところが、第1折点のヒズミをこえると、前にのべたように、全ヒズミ、残留ヒズミのいずれも一定値に収れんすることなく、直線関係は成立しなくなる。VI (材令 3月)

の場合も、全ヒズミが第1折点のヒズミより小さい間は直線となつている。上限応力を 250 kg/cm^2 まで上げると第1折点のヒズミをこえ、繰返し載荷してもヒズミが一定値に収れんしなくなる。図には 12 回目のヒズミを示してあるが、直線からそれている。VI (材令 28 日) は上と全く同じ傾向を示している。 190 kg/cm^2 におけるヒズミは 10 回目の測定値である。

これらの結果によると、全ヒズミ、弾性ヒズミのいずれも第1折点以内では直線となつているが、第1折点をこえると直線関係が成立しなくなる。繰返し試験は載荷速度がきわめて小さい場合に相当するから、この場合にも第1折点を押えることは可能で、そのヒズミの大きさには変化がないことが推定される。

6. 実験結果に対する考察

以上の実験結果から次のことがいえる。

(1) 第1折点のヒズミは、載荷速度に関係なく、ほぼ一定値を示すものであつて、コンクリートの変形がこのヒズミをこえると、繰返し載荷曲線の傾斜はゆるやかになるし、ヒズミが一定値に収れんしなくなるから、コンクリートに破壊の起り始めることが推定される。

(2) また、第1折点以前では全ヒズミ及び残留ヒズミが一定値に収れんし、第1折点以後はこの傾向が認められないことから推定すると、第1折点以前では、長時間載荷していても、コンクリートのヒズミがある程度以上に増加

図-11 応力-全ヒズミ及び応力-弾性ヒズミ関係

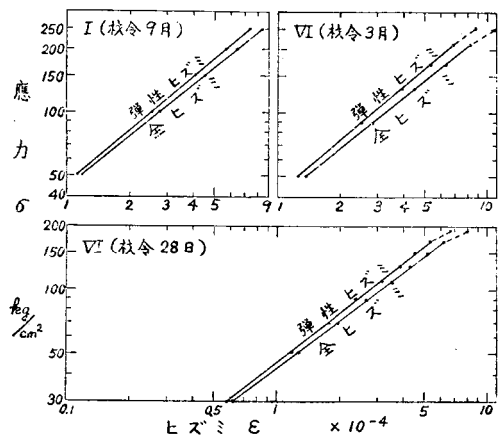
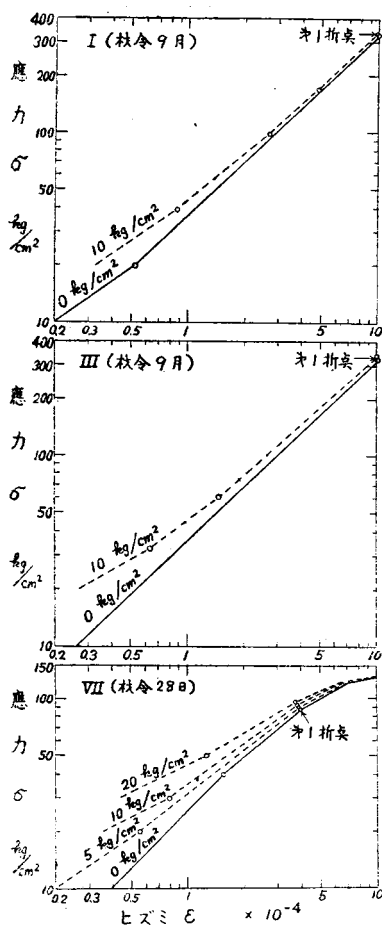


図-12 応力-ヒズミ関係に及ぼす基準応力の影響



察では、すべて、最初に応力 10 kg/cm² まで載荷した際のヒズミを 0 とみなしてある。しかし、応力-ヒズミ関係は応力 0 の状態から出発すべきものであるから、基準応力（ヒズミを 0 とみなす場合の応力）のとり方によつてこの関係がどういふように変化するかを調べてみよう。

図-12 には基準応力を種々にとつた場合の応力-ヒズミ関係を示してある。基準応力 0 kg/cm² の場合は実線で示してあるが、この場合には三つの型がある。すなわち、I では 図-1 と同じような形になり、低応力の部分に A' または B' に相当する点があつてゐる。III は第 1 折点まで一直線にのびている。VII は第 1 折点以前に一つの折点があつてゐる。I の場合に A' または B' に相当する利点があつたのは測定誤差によるものと考えられる。応力 10 kg/cm² のヒズミの測定値はあまりにも小さすぎるから、第 1 折

点まで直線と考える方が妥当であろう。事実、同種のコンクリートについて測定した他の資料では直線となつてゐる。従つて、基準応力を 0 kg/cm² とした場合の応力-ヒズミ関係は、III のように第 1 折点まで直線でのびる場合と、VII のように第 1 折点以前に他の折点のあらわれる場合の二つとなる。

さて、III の場合は基準応力を 0 kg/cm² としても、10 kg/cm² としても、第 1 折点は容易に見分けられるから問題はない。これに反して、VII の場合は基準応力を 0 kg/cm² とすると第 1 折点の判定がむづかしくなる。著者の実験で、第 1 折点以前に他の折点のあらわれたのは VI と VII の供試体で、砂の品質がよくない場合であるが、従来発表された測定値を図示してみると、この種のものが散見されるから、この場合にも第 1 折点を誤りなく判定することを心がけなければならぬ。

7. 第 1 折点判定の際の基準応力のとり方

以上の考察では、すべて、最初に応力 10 kg/cm² まで載荷した際のヒズミを 0 とみなしてある。しかし、応力-ヒズミ関係は応力 0 の状態から出発すべきものであるから、基準応力（ヒズミを 0 とみなす場合の応力）のとり方によつてこの関係がどういふように変化するかを調べてみよう。

点まで直線と考える方が妥当であろう。事実、同種のコンクリートについて測定した他の資料では直線となつてゐる。従つて、基準応力を 0 kg/cm² とした場合の応力-ヒズミ関係は、III のように第 1 折点まで直線でのびる場合と、VII のように第 1 折点以前に他の折点のあらわれる場合の二つとなる。

さて、III の場合は基準応力を 0 kg/cm² としても、10 kg/cm² としても、第 1 折点は容易に見分けられるから問題はない。これに反して、VII の場合は基準応力を 0 kg/cm² とすると第 1 折点の判定がむづかしくなる。著者の実験で、第 1 折点以前に他の折点のあらわれたのは VI と VII の供試体で、砂の品質がよくない場合であるが、従来発表された測定値を図示してみると、この種のものが散見されるから、この場合にも第 1 折点を誤りなく判定することを心がけなければならぬ。

第 1 折点を判定するには、応力 0 kg/cm² だけを基準にせず、その他にも二、三の応力を基準として、応力-ヒズミ関係を求めるようにすればよい。例えば、VII の場合、基準応力を 5、10 及び 20 kg/cm² とすると、図-12 に示すように、第 1 折点以前の折点が消えてしまうから、この場合にも判定を誤ることはない。

8. むすび

以上の結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 圧縮力をうけるコンクリートの応力とヒズミの関係を対数グラフに図示すると、図-1 のような折線となる。
- (2) この図における第 1 折点 A のヒズミは載荷速度によつて変化しない。
- (3) コンクリートの変形が第 1 折点のヒズミより大きくなると、コンクリートに破壊が起り始め、変形は増加しつづけて一定値に収れんしない。
- (4) 従つて、第 1 折点のヒズミはコンクリートが實際上支障なく、変形しうる大きさを示すといえる。
- (5) 応力-ヒズミ関係を求める際、基準応力は 0 kg/cm² のほかに、二、三適当なものを選ぶと、第 1 折点を正確に押えることができる。

付記 本研究の一部は昭和 28 年度文部省科学研究助成費の交付を受けたものであり、使用したセメントの大部分は磐城セメント仙台出張所より寄贈を受けたものである。また、この研究に関しては京都大学 坂静雄、近藤泰夫両教授から御教示を賜わり、さらに測定に当つては、田代幹夫、沼尻 功、志賀宜郎の諸君その他の協力を得た。付記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

1) Max Göbilar: Beitrag zur Frage des Einflusses der Grobzuschläge auf das elastische Verhalten von Beton, Zement 1938, 8-25, 9-1, 9-8 および 9-22. (昭.30.2.16)