

静水圧下におけるモルタルの挙動について

ON THE BEHAVIOUR OF CEMENT MORTAR
UNDER HYDROSTATIC PRESSURE丹羽 義次*・中川 浩二**
By Yoshiji Niwa and Koji Nakagawa

とくに巨視的にみた材料性質の変化について検討した。

1. はじめに

モルタルおよびコンクリートの組み合わせ圧縮応力下での巨視的な強度破壊条件は、三次元主応力空間内の一凸曲面（強度破壊曲面）として求められている¹⁾。すなわち平均静水圧が低い範囲では、供試体が強度破壊点崩壊点近くに至るまでに生じる内部構造の変化は大きくなく、これらの材料は脆性であると考えても大きな誤りはない。しかし、平均静水圧がその材料に個有のある値より大きくなると、材料の挙動は著しく非弾性となり、明確な強度破壊、崩壊の現象は観察されなくなる。とくに静水圧（主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とし、 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ）下においては強度破壊、崩壊現象はみられず、静水圧の増加により供試体は流動化し、また静水圧を除去した後の力学的諸性質が著しく変化することは前に報告したとおりである²⁾（本文では、強度破壊：応力-ひずみ曲線が上り勾配から下り勾配に変化する現象、崩壊：供試体を一つの系と考え、分離などにより、系が系としての耐荷力を失う現象、破壊：クラックの発生、発達、強度破壊、崩壊など、材料の状態変化の総称、と定義して用いている）。

前報²⁾では、モルタル、コンクリート等非均質材料の破壊機構を解明するための研究の一環として、静水圧下のモルタルの挙動について若干の考察を行ない、高静水圧履歴を有するモルタル供試体の残存強度について論じたが、本報ではさらに、静水圧下での種々の配合のモルタル供試体の静水圧-変形関係、除荷後の残存強度、残留変形、密度（比重）の変化、圧縮抵抗性の変化など、

表-1 モルタル配合表 (重量比)

Sand/Cement Water/Cement	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0.4	①	②	③		
0.5		④	⑤	⑥	
0.6		⑦	⑧	⑨	⑩

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

2. 実験概要

(1) 供試体

供試体は 5.5×5.5×5.5 cm のモルタル立方体供試体であり、セメントには普通ポルトランドセメント、砂には豊浦標準砂を用いた。供試体の配合比は表-1に示す10種のものである。

練りませにはモルタルミキサーを用い、突き固めと振動締固めを行なった。打設後24時間を経て脱型し、ただちに恒温恒湿室（温度 20±1 deg., 湿度 90±5%）に移し、26日間水中養生、1日間気中養生を行なった後、材令28日で試験を行なった。

(2) 静水圧履歴

静水圧履歴を与えるために用いた試験機は島津製作所製三軸圧縮試験機である。載荷盤寸法は 5.0×5.0 cm としたので、供試体は図-1に示すように部分載荷となり、供試体が流動を始めるとその影響は無視できない

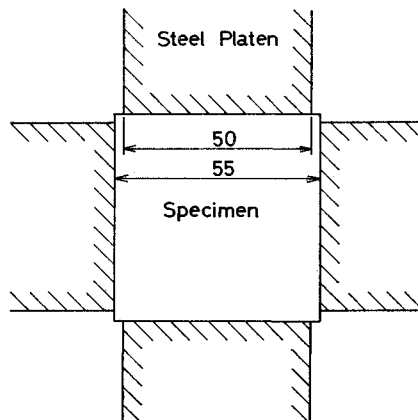


図-1 二次元的に見た載荷の機構

が、この点については 3.(3) で検討する。また加圧盤と供試体端面との間の摩擦による供試体内応力分布の乱れを小さくする目的で、テフロンシート（厚さ 0.05 mm）にシリコングリースを塗布したものを減摩材として用いた。

履歴荷重を与える操作の順序としては、まず供試体の三方向寸法をノギスで 1/20 mm の単位まで測定した後、三方向同時に所定荷重まで載荷した。所定荷重での荷重保持時間は約 10 秒であり、その後三方向同時に載荷時と同じ要領で除荷した。載、除荷時の荷重速度は応力変動が 15~20 kg/cm²/sec となるように一定に保った。

供試体の静水圧載荷にともなう変形の測定のために、加圧盤間の相対変位を求めた。すなわち、供試体変形量が平均値として得られるように、もっとも離れた 2 つの稜に平行に差動トランス型変位計を 3 組、計 6 個設置し、三方向加圧盤間の平均変形量と、それぞれに対応する荷重とを、それぞれ独立な 3 組の自動記録装置を用いて記録した（写真-1 参照）。

履歴として与えた所定荷重は原則として 10~90 t の 10 t きざみであり、静水圧としてはそれぞれおよそ 330~3000 kg/cm² となっている。

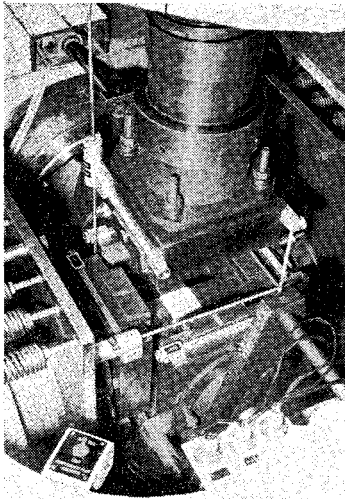


写真-1 差動トランス型変位計の配置

(3) 静水圧履歴を受けた材料の特性変化の測定

除荷した供試体の表面の付着物を布でぬぐい取った後、三方向寸法をノギスで 1/20 mm の単位まで測定し、履歴載荷を行なう前の供試体寸法と比較し、残留変形を求めた。

また、それぞれの供試体の残存強度を求めるために一軸圧縮試験を行なった。

静水圧履歴にともなう供試体の密度（比重）変化をケース ④、⑥（表-1 参照、以下同じ）の二種のものに

ついて求めた。すなわち、静水圧履歴を受けた供試体の空中重量と水中重量とを上皿てんびんで 100 mg の単位まで測定し、それぞれの供試体の密度（比重）を求めた。

3. 実験結果と考察

(1) 静水圧-変形曲線

差動トランス型変位計によって自記録された静水圧-変形曲線の例を、水-セメント比 0.5、砂-セメント比 1.5、2.0、2.5 のものについて 図-2、3、4 に示す (σ_n : 静水圧, δ_1 : 一方向の加圧盤相対変位)。

図において静水圧が 0 から 300 kg/cm² あたりまでは

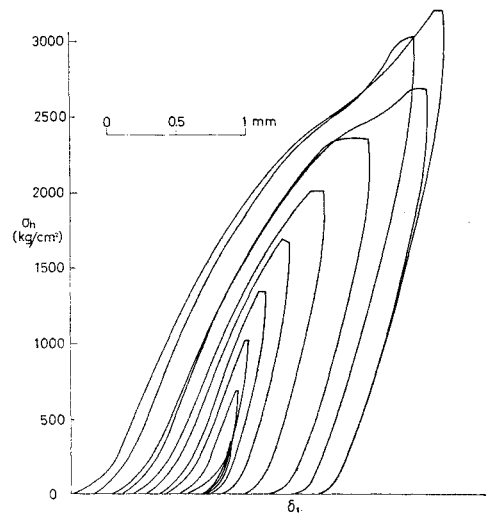


図-2 静水圧-変形曲線の例 (Case ④)

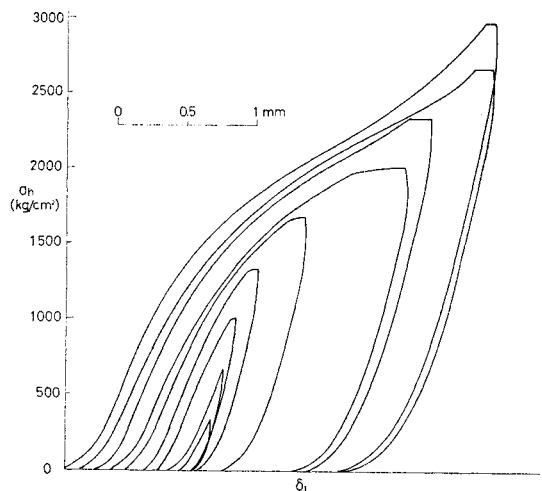


図-3 静水圧-変形曲線の例 (Case ⑤)

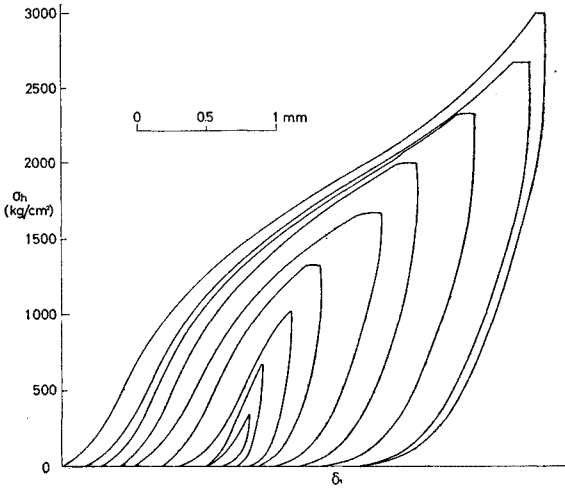


図-4 静水圧-変形曲線の例 (Case ⑥)

著しく、静水圧-変形曲線の勾配が大きくなるのがみられるが、これは主として、テフロンシートの変形のためや供試体表面に付着している砂粒子や表面の微小な凸部が供試体中へ押し込まれたり、あるいは壊されたりするために生じるものと考えられる（なぜなら、300 kg/cm² あたりまで載荷し、除荷後再載荷した時の曲線形はこのような勾配変化を示さず、ほぼ最初から 300 kg/cm² あたりに対応する勾配をもつ）。図-2（ケース④）、図-3（ケース⑤）ではそれぞれ 300 kg/cm² から 1 200 kg/cm² および 800 kg/cm² あたりまで、ほぼ直線状に近い静水圧-変形曲線が得られ、それに続く静水圧範囲では曲線の勾配がしだいに緩くなり、さらに静水圧増加中、あるいは所定静水圧を保持している間に大きな変形が生じる。

この大きな変形を生じる区間（流動区間と呼ぶ）を過ぎると静水圧-変形曲線の勾配は再び大きくなる。流動区間はケース④でおおよそ 2 200~2 600 kg/cm²、ケース⑤でおおよそ 1 700~2 400 kg/cm² である。またヒステシスループは流動区間で急激に大きくなり、流動区間を過ぎて加えられた静水圧に伴う変形の増加率は減少している。ケース④、⑤とくらべて、ケース⑥（図-4）では前二者ほど流動の生じる静水圧領域が明らかでなく、広範囲にわたっている。すなわち、静水圧-変形曲線が直線に近いといえる領域はわずかに 300~700 kg/cm² あたりで、流動区間はおおよそ 1 300~2 200 kg/cm² となる。これらから静水圧の増加によって供試体の内部に構造的な変化が起きていることが予想される。内部構造の変化については次節以下で考察するが、これは配合比により異なるある範

囲の静水圧（流動区間と呼んだ範囲）でとくに進行すると考えられる。また、同一の水-セメント比で砂量が比較的少ない供試体では、変化の生じる静水圧の範囲はせまく、変化は急激である。しかし砂量が多くなると、供試体の内部構造の変化はかなり低い静水圧段階から生じ、変化を生じる静水圧範囲は広くなる。いずれの場合も、内部構造の変化を生じると思われる静水圧範囲をすぎると、再びほぼ直線状の静水圧-変形曲線が得られる。

図-5 に水-セメント比 0.4（ケース①、②、③）、図-6 に水-セメント比 0.6（ケース⑦、⑧、⑨、⑩）の静

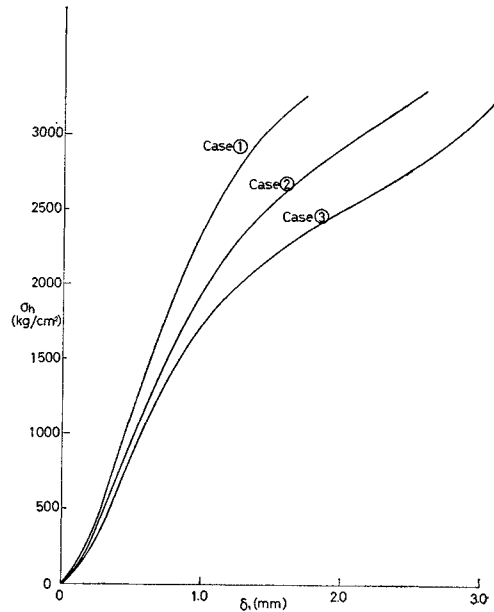


図-5 静水圧-変形曲線の例 (Case ①, ②, ③)

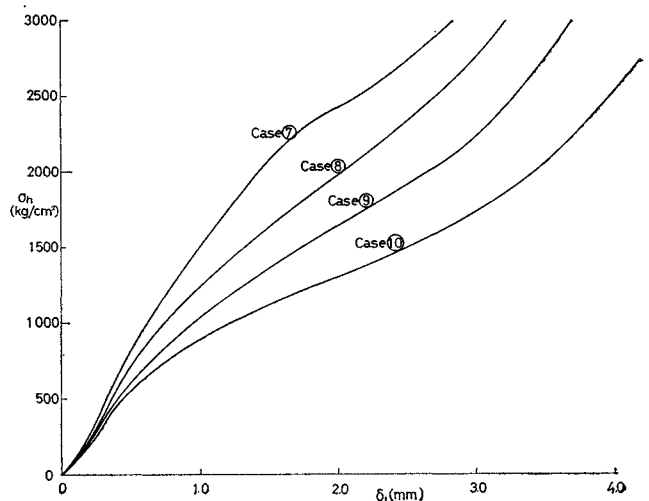


図-6 静水圧-変形曲線の例 (Case ⑦, ⑧, ⑨, ⑩)

水圧-変形曲線を示す。図-5 中、ケース①では静水圧が流動区間にまで至っておらず、ケース③ではおよそ 2 400~3 100 kg/cm² が流動区間となっている。また図-6 中ケース⑦では 2 300~2 600 kg/cm² が流動区間とみられるが、他の⑧、⑨、⑩の場合についてはケース⑥の場合と同様に流動区間は明確ではなく、強いていえばその静水圧はそれぞれおおよそ 1 700~2 500 kg/cm²、1 300~2 200 kg/cm²、および 1 000~1 800 kg/cm² である。

(2) 残留変形

静水圧履歴に伴う残留変形の変化を図-7~9 に示した。

静水圧が比較的低い範囲では残留変形は小さく、ほとんど無視できる程度であり、時には表面付着物などによる測定誤差のため残留変形が負となる(体積が増加する)かのような現象もあらわれる。しかし静水圧が、配合比により異なる、材料固有のある値に達すると残留変形の増加は急激となる。この区間(流動区間とほとんど一致する)より高い静水圧領域では残留変形の増加率はかなり低くなる。この状況は、静水圧-変形曲線が低い静水圧段階では直線に近い、やがて流動し、再びほぼ直線状となることと対応している。

(3) 密度(比重)変化

静水圧の増加に伴う供試体の変形が何に起因するかを知る必要がある。

供試体の変形の原因としては

1. モルタル供試体の密度(比重)の増加
2. 圧盤間げきからの流出

の2つが考えられる。ここでは静水圧履歴を受けた供試体の残留変形を問題とすると、加圧盤間げきからの流出量を正確に測定することは困難であるため、除荷した供試体の密度(比重)変化を2.(3)の方法で直接測定した。

水中重量の測定時における供試体中への水の浸み込みによる比重の増加程度は供試体の配合、受けた履歴静水圧によって異なるが、最初の15秒間の浸水時間における重量の増加は最大200mg程度であることが推定された。これは比重に換算して0.0013程度であり、比重測定のため供試体を水に浸している時間は20秒程度であるから、この影響は無視することにした。

図-10 にケース④およびケース⑥の比重変化を示す。ケース④では静水圧が2 000 kg/cm² あたりに達するまで比重変化は小さく、2 000~

2 600 kg/cm² の間にほとんど増加する。

またケース⑥では非常に低い静水圧段階から比重増加は始まり、著しくなるのは1 000 kg/cm² あたりからで2 300 kg/cm² あたりまで続く。この値を先に述べた静水圧-変形曲線の流動区間とくらべると両者はほとんど一致しており、比重の増加は流動区間および若干のその後域で生じる、といえる。

両ケースの場合とも、この実験における最大静水圧近くでは比重の増加はほぼ停止するかのようであり、全比

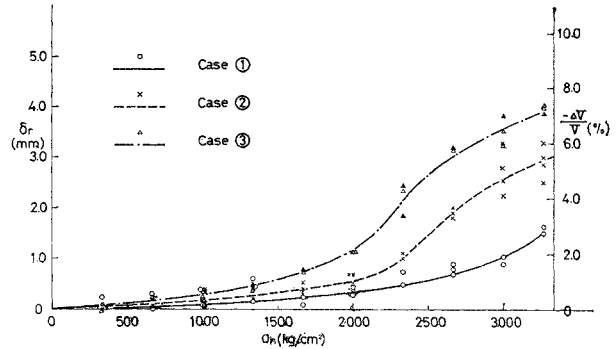


図-7 静水圧履歴 (σ_h) にもなう残留変形 ($\delta_r = \delta_{1r} + \delta_{2r} + \delta_{3r}$) と体積減少 ($-\Delta V/V$) Case ①, ②, ③

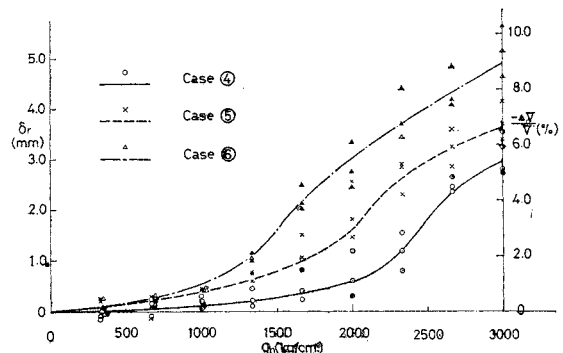


図-8 静水圧履歴 (σ_h) にもなう残留変形 ($\delta_r = \delta_{1r} + \delta_{2r} + \delta_{3r}$) と体積減少 ($-\Delta V/V$) Case ④, ⑤, ⑥

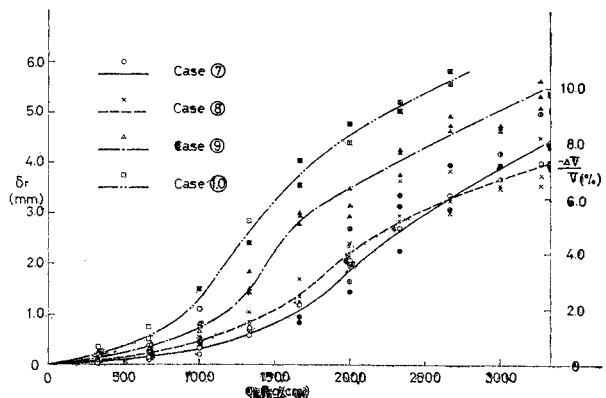


図-9 静水圧履歴 (σ_h) にもなう残留変形 ($\delta_r = \delta_{1r} + \delta_{2r} + \delta_{3r}$) と体積減少 ($-\Delta V/V$) Case ⑦, ⑧, ⑨, ⑩

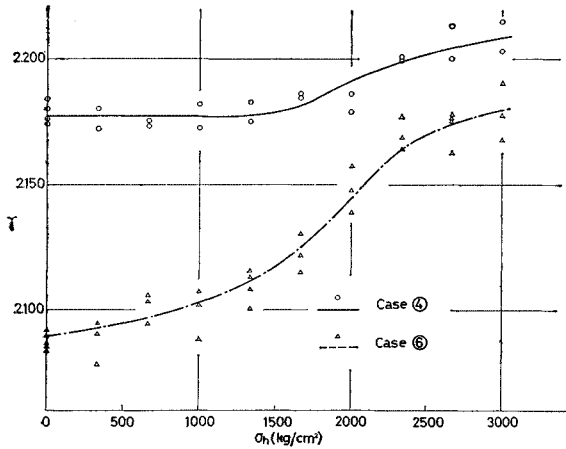


図-10 静水圧履歴 (σ_h) にもなる比重 (γ) の変化

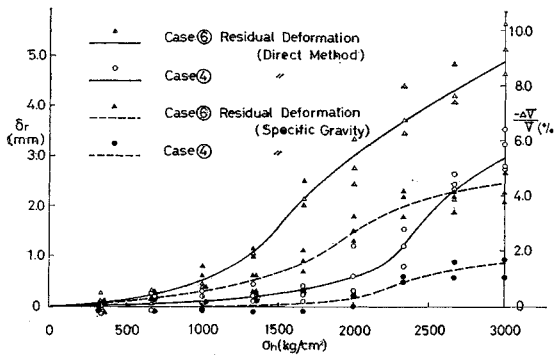


図-11 静水圧履歴 (σ_h) にもなる残留変形 ($\delta_r = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$) と体積減少 ($-\Delta V/V$) の直接測定 (ノギスによる測定) と間接測定 (比重からの換算) との比較

重増加量はケース④でおおよそ 0.03, ケース⑥でおおよそ 0.08 となり, 同一の水-セメント比の場合, 砂量によって比重変化状況は著しく異なることがわかる。

図-11 は供試体の密度 (比重) の増加 (すなわち供試体の体積減少) のみによって変形が生じた場合の換算残留変形と, ノギスで直接求めた残留変形を比較し, 示したものである。この図からおおよそつぎのことがいえる。

すなわち, 供試体の残留変形はモルタルの密度 (比重) の増加と, 圧盤間げきからの流出という 2 つの原因で生じる。供試体の流動が始まると砂粒子やセメントペーストの破片は一部は供試体中の空げき, 水げきへ押し込まれ, また他の一部は圧盤の間げきから流出する。そのために密度 (比重) の大きく増加する区間と残留変形の大きく増加する区間は一致し, さらに流出もこの区間で大きくなることになる。ケース④, ⑥の場合, ここで行なった実験の機構では, 全残留変形量中に占める流出と密度増加による割合は等分に近い。しかし密度 (比重) の増加率が小さくなり始めても流出は止まらないた

め, 2 600 および 2 600 kg/cm^2 より大きい範囲では変形は主として圧盤間げきからの流出によって生じる。なお, 高静水圧下におけるモルタルの変形特性については富田ら³⁾によって若干の報告がなされているが, 流出に関する検討はなされていない。

(4) 残存強度

前述のように静水圧の増加にともない, モルタル供試体は流動を含む内部構造の変化を生じる。したがって, この静水圧を除去した供試体の力学的性質は内部構造の変化程度に支配され, 履歴静水圧の大きさにより変化すると予想される⁴⁾。この変化を除荷した供試体の一軸圧縮強度 (残存強度) で表わしその測定結果を 図-12~14 に示す。

これらから, 同一の水-セメント比で砂の量が比較的少ない場合は, 残存強度の低下する静水圧の範囲はせまく, 残存強度の低下は静水圧増加に対して急激であり, 砂量が比較的多い供試体ではかなり低い静水圧段階から

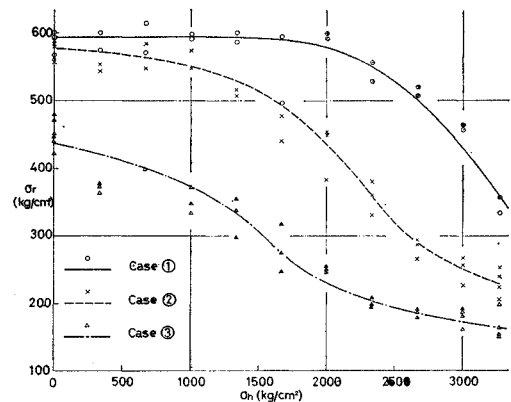


図-12 静水圧履歴 (σ_h) にもなる残存一軸圧縮強度 (σ_r) Case ①, ②, ③

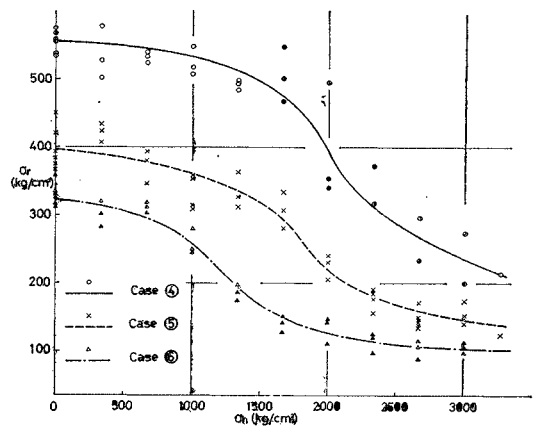


図-13 静水圧履歴 (σ_h) にもなる残存一軸圧縮強度 (σ_r) Case ④, ⑤, ⑥

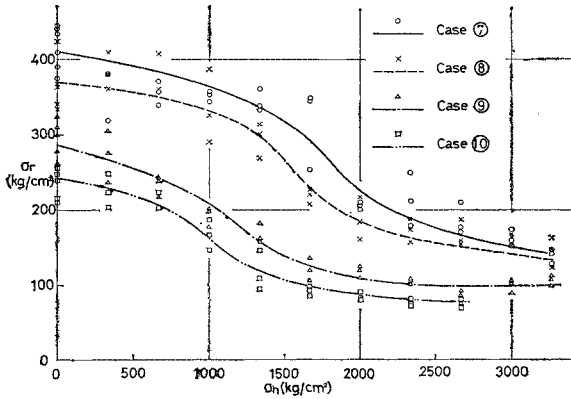


図-14 静水圧履歴 (σ_h) にもなる残存一軸圧縮強度 (σ_r)
Case ⑦, ⑧, ⑨, ⑩

強度低下がはじまり、かなり広い範囲にわたって続くことが認められる。

ケース④, ⑥について残存強度の無次元表示を行ない、これに図-10の比重変化曲線を静水圧0と3000 kg/cm²とを合わせた縮尺で上下逆にして重ねたものを図-15に示す。これによると履歴静水圧の増加に対して残存強度が著しく低下しはじめる静水圧は、比重が著しく増加しはじめる静水圧より低くなる。これは一軸圧縮試験結果は供試体の全体的な変形とくらべていくらか構造敏感性性質をもつため、供試体の内部構造変化が起り始めると残存強度の変化の方が比重変化よりも早く現われるものと説明される。

高静水圧によって定常な状態に達したと思われるモルタルの残存強度を表-2に示す(ケース②, ④は推定値)。

この終局強度 σ_{ult} は履歴静水圧を与える前の一軸圧縮強度に関係なく、砂-セメント比 S/C によって決定されるかのようであり、ここで行った実験の範囲では、水-セメント比 W/C にほとんど関係なく、

$$\sigma_{ult} = k \frac{C}{S}, \quad k = 260 \text{ kg/cm}^2$$

として近似的に表わすことが可能である。

(5) 圧縮抵抗性

図-16にケース⑥の供試体を170 kg/cm²と1670および2000 kg/cm²との間で繰り返し载荷した場合の静水圧-変形曲線の例を示す。この図で2回目以後の载荷時の曲線形がほとんど一致することから、この曲線勾配はそれぞれの内部構造変化を受けた供試体の圧縮抵抗性を与えるとみることができる。

この圧縮抵抗性を比較するため、一定範囲の静水圧変

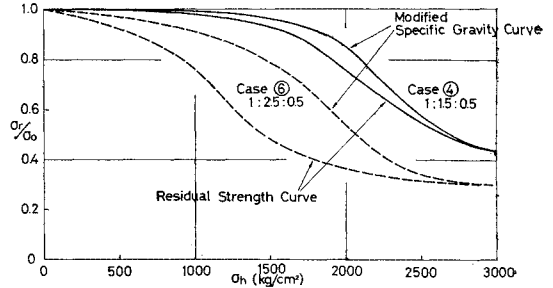


図-15 静水圧履歴にもなる残存強度比 (σ_r/σ_0 : σ_0 は履歴応力を受けない場合の一軸圧縮強度) と比重の変化曲線の比較

表-2 高静水圧によって定常状態に達したと思われるモルタルの残存一軸圧縮強度 (kg/cm²)

Sand/Cement	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Water/Cement					
0.4	—	190	150		
0.5		180	130	100	
0.6		170	130	100	80

動に対する供試体の変形量と取り、4回目の载荷曲線の330~670 kg/cm²における割線の勾配から剛性を体積弾

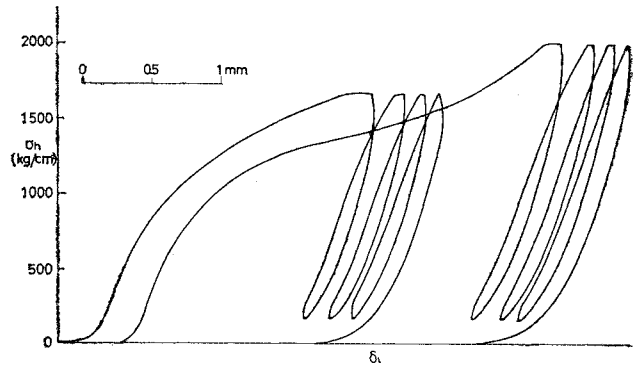


図-16 170 kg/cm²と1670および2000 kg/cm²の間で繰り返し载荷した場合の静水圧 (σ_h) -変形 (δ) 曲線 Case ⑥

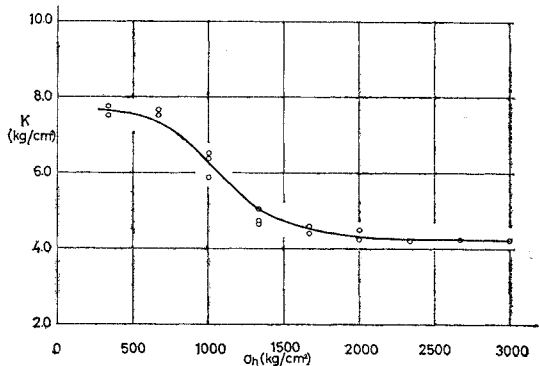


図-17 静水圧履歴 (σ_h) にもなる剛性係数 (K) の変化、静水圧330~670 kg/cm²の間での剛性係数を比較 Case ⑥

性係数の形で求め、その結果を図-17に示した(所定静水圧 330 kg/cm² のものは例外として、170~330 kg/cm² の間の勾配から求めた)。

このようにして得られた静水圧履歴を受けたモルタル供試体に対する剛性は、履歴静水圧の増加によって減少する。すなわち、流動区間に至るまで減少を続け、流動区間では減少は非常にゆるやかとなり、その後供試体の内部構造変化が終了し、定常状態にいたると、剛性もほ

ぼ一定となる。この傾向はこれまで述べてきた他の諸性質と対応しており、砂がセメントペーストに囲まれたモルタルという多相連続体が、内部構造変化によって不連続体(粒状体に近い)としての性質をも持ち、圧縮抵抗性が減少するものと説明される。

(6) 時間効果

本研究では、静水圧下におけるモルタル供試体の挙動

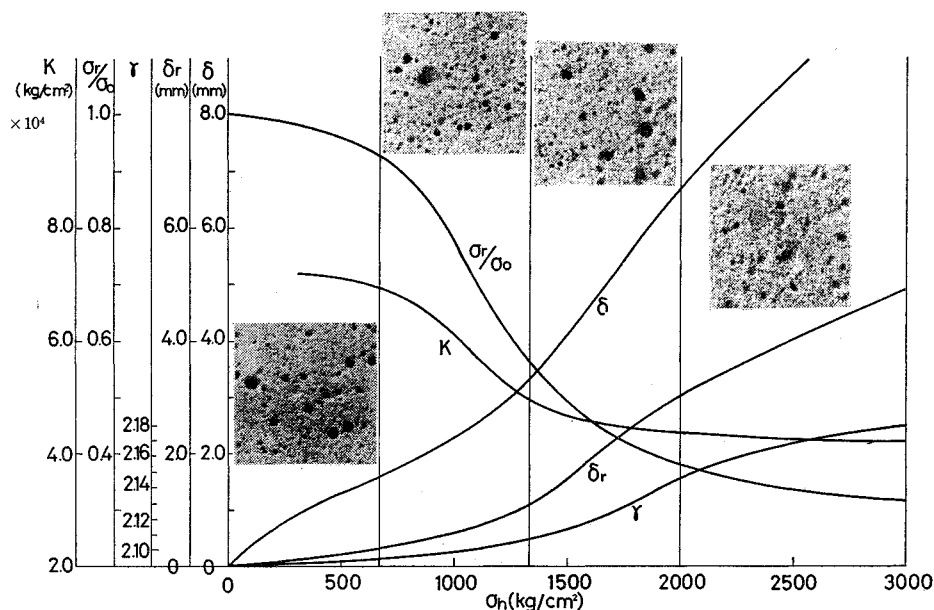


図-18 静水圧履歴 (σ_h) にもなる諸性質の変化のまとめ Case ⑥ (表-3 参照)

表-3 静水圧履歴にもなる諸性質の変化のまとめ

領域	I (弾性領域)	II (遷移領域)	III (流動領域)	IV (定常領域)
荷重-変形曲線 δ	載荷初期に著しい勾配の変化がみられるが、この部分を除けばほぼ直線状である。	ゆるやかに勾配が低下する。	変形が著しく、荷重増加を停止してもしばらくは変形が続く。	変形は荷重増加とともに進行するが、前領域より、その勾配は小さくなる。
比重 γ	ほとんど変化しない。	増加はみられるが、大きくない。	急激に増加する。	増加率は小さくなり、ある一定値に収束するかのようである。
残留変形 δ_r (ノギスによる測定)	ほとんど変化しない。	増加傾向がみられる。	増加率は最大値をとり、著しい残留変形の増加がみられる。	増加率はかなり小さくなり、ほぼ一定の増加率で増加が続く。
残存強度 σ_r/σ_0	低下傾向にあるが、全体からみて低下量は大きくない。	急激な低下が起こる。	低下率はかなり小さくなる。	ほとんど低下はみられず、一定値におちつく傾向にある。
剛性 K (330~660 kg/cm ² の間)	ほとんど変化しない。	急激な低下がみられる。	低下率は小さくなる。	ほとんど低下はみられず、一定値におちつく傾向にある。
供試体内部構造の変化	載荷初期の荷重-変形曲線の勾配変化はテフロンシートの変形や供試体表面の砂粒凹凸の圧潰、供試体中への押し込みにより生じる。 静水圧の増加にもない、骨材である砂とセメントペーストとの間のボンドの破壊は予想されるが、巨視的にはほぼ弾性的であるとみてよい。	前領域でのボンドの破壊がさらに進行し、砂粒子とセメントペーストとの分離がはじまる。 内部構造の変化は、まだ供試体全体には至っていない。	供試体内部構造の変化は全体的となり、破碎されたセメントペーストや、砂粒子の破片が空げき、水げき中へ押し込まれ、また同時に圧盤間げきから流出する。	内部構造の変化は続くが主要な部分は終了しており、ほぼ定常状態にある。供試体は高圧のため流動性を持ち、圧盤間げきから流出しつづける。

を時間に独立なものであるとし、与えられる履歴応力が静水圧のみである、という条件下では、与えられた最大静水圧に対応するそれぞれの配合のモルタルの性質は一義的であるとして扱ってきた。しかしここで対象としたような高静水圧下ではモルタルの流動現象がみられ、このことから静水圧下の挙動に時間依存性があることは容易に予想される。この点については、図—16 に示した静水圧-変形曲線で、2回目以後の載荷時の曲線形がほとんど一致することから、2回目以後の載、除荷によって進行する内部構造の変化は小さいとみられ、1回の載荷によって供試体は、ほぼ一定の状態に達していると考えられる。本研究ではこの1回の載、除荷によって得られたほぼ一定の状態を、与えた最大静水圧に対応する状態であるとした。

4. ま と め

これまで静水圧履歴を受けたモルタルの性質についていくつかの検討を加え、静水圧下におけるモルタルの挙動を考察してきた。ここでこの状態を供試体の挙動の変化に対応する静水圧によって 図—18 のように4つの領域に分け、それぞれの領域での諸性質についての測定値を図示すれば、よりいっそう静水圧による材料の変化状態が明らかである。図には例としてケース⑥の場合の測定結果および写真例を示し、残存強度については載荷履歴を受けない状態のものを1とした無次元表示を行なった。ここで示した静水圧履歴を受けたモルタル供試体の断面写真は、供試体の切断により内部構造が乱され、また表面が水に洗い流されるため、静水圧下における状態

とは若干異なると考えられるが、これらの写真は内部構造の変化を知るうえで有用であろう。また 表—3 に、それぞれの領域における各性質の変化状態の概略を記入した。

5. お わ り に

本研究は、モルタル、コンクリート等非均質材料の破壊に関する研究の一環として、主として静水圧履歴を受けた種々の配合のモルタルの性質から、高静水圧下におけるモルタルの挙動を考察したものである。

本研究により高静水圧下におけるこれら非均質材料の性質は多くの点で明らかになった。

さらに現在、偏差応力をも含む高圧下でのモルタルの挙動を明らかにするための研究を続行中である。

最後に、終始適切なお批判、ご助言をいただいた小林昭一助教授、実験に協力をいただいた中西輝雄技官（現奈良県水道局）に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、丹羽義次・小林昭一・平島健一：三軸圧縮応力状態におけるモルタルの破壊条件，材料 601号，pp. 108～114，1967
- 2) 丹羽義次・小林昭一・小柳 洽・平島健一・中川浩二：高静水圧履歴を有するモルタルの圧縮強度，セメント技術年報，XXII，pp. 222～224，1967
- 3) 富田和政・秋本昌胤・川本眺万：三軸圧縮応力下におけるモルタルの変形特性，土木学会論文報告集，No. 175，pp. 75～83，1970-3
- 4) 丹羽義次・小林昭一・小柳 洽・中川浩二：“三軸圧縮荷重下におけるコンクリート中の微小クラックと残存強度”，コンクリート ジャーナル，Vol. 7，No. 12，pp. 24～31，Dec. 1969

(1970.7.31・受付)