高拘束圧下におけるモルタルの破壊過程*

中 川 浩 二** 小 林 昭 一** 丹 羽 義 次**

The Failure Process of Cement Mortar under High Confining Pressure

by

Koji NAKAGAWA, Shoichi KOBAYASHI and Yoshiji NIWA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

The present paper is concerned with the failure process of cement mortar under triaxial compressive stresses. To give the quantitative evaluation of process of failure of cement mortar with loaded history, the degree of failure α is defined as;

$$\alpha = 1.0 - \frac{\text{uniaxial compressive strength of cement mortar specimen with loading history}}{\text{uniaxial compressive strength of cement mortar specimen without loading history}}$$

The surface of the same degree of failure of cement mortar is determined in the three dimensional stress space. The following conclusions are made on the degree of failure of cement mortar under high triaxial compressive stresses.

- (1) The surface of the same degree of failure closes on the space diagonal.
- (2) The right section of the surface changes its shape with an increase of hydrostatic pressure.

When the hydrostatic pressure is low, the shape is slightly bulged from an equilateral triangle with apexes in the direction of principal stresses. With an increase of hydrostatic pressure it becomes almost regular hexagonal, and changes into the slightly bulged equilateral triangle of the reversed mode to the former.

- (3) The stress condition for the same degree of failure can be approximated by a single curve expressed as a function of the sum and the difference of the maximum and the minimum stresses.

(Received Dec. 22, 1970)

1 はじめに

モルタル、コンクリート、岩石など、いわゆる岩質材料の組み合わせ圧縮応力下における破壊条件（強度破壊条件）は、構造体の終局強度を推定するための基礎資料であり、その条件を正しく求めることは構造物の合理的設計を行なう上からも重要であることはいうまでもない。そのような実用上の要請からも、破壊条件（強度破壊条件）に関する研究は古くから多くの研究者によって行なわれており、今日、多くの有意な成果が得られている。しかし、強度破壊条件を考える場合に、これら岩質材料は一般にぜい性材料として取り扱われ、材料が強度破壊をするまでに生じる特性変化は普通問題にされていない。そのため、得られている破壊条件から、これら岩質材料の破壊の過程を知ることはいくつかできない。

いま対象をコンクリートに限ると、一軸圧縮荷重下における破壊の進行現象は古くからいろいろな方法で

観察されており、供試体が崩壊するまでに複雑な破壊過程が存在することは広く認められている。しかし、三軸圧縮荷重下におけるコンクリートの破壊進行現象に関する研究は少ない。この点を明らかにするため、筆者らは先に、コンクリートがぜい性であると考えうる範囲での破壊過程を、ボンドクラック比と残存一軸圧縮強度比という観点で応力空間内における等状態曲面を求め、強度破壊曲面と比較し、検討を加えた¹⁾。

ここではさらに、これらの等状態曲面について、さらに詳細な検討を行なうとともに、残存強度比についての等状態曲面を供試体の非弾性挙動が著しい範囲においてモルタルを材料として求め、高拘束圧下でのモルタル等、非均質材料の挙動を明らかにすることを試みた。

さて、岩石、コンクリート、モルタルのような岩質材料供試体に荷重を加えていくと、その荷重増加に対応して供試体内部の破壊が発生、発達し、やがて供試体は強度破壊、崩壊をする。この破壊の開始および供試体の強度破壊の条件は、筆者らの一人小林によって

* 原稿受理 昭和45年12月22日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

概念的に次のように説明されている。すなわち、いま材料がその系内において巨視的応力 σ_1 , σ_2 , σ_3 を受けるとき、破壊の開始を与える条件は

$$f_I(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3; \theta) = 0$$

で与えられ、これは破壊開始曲面と呼ばれている (σ_1 , σ_2 , σ_3 ; 主応力, θ ; 材料の方向特性を示すパラメータ)。ただし、ここでは材料は Drucker の意味で安定であり、巨視的な応力とひずみの関係は一義的であるとする。また、この破壊開始曲面を越えて荷重が増加すると破壊の伝播が生じ、ついには材料全体としての安定性を失ない、終局破壊を生じる。終局破壊強度は、対象とした材料ないし系が与えられた荷重群に対して示す最大耐荷力である。終局破壊条件に対して、一つの関数

$$f_F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3; \theta) = 0$$

を考え、比例載荷あるいは封圧下での載荷など、ある型式での載荷試験に対して曲面が決定されれば、その曲面は破壊曲面と呼ばれる。この曲面の特徴は、この曲面内にあるいかなる応力、ひずみ状態に対しても準静的なつり合い状態が必ず見出され、この曲面外の状態は決して実現されえないことである。一般にモルタル、コンクリートなどでは、破壊曲面は載荷経路に強く依存するので、応力空間に固定した形で得ることができないが、定められた型式の載荷経路に対して、それぞれに対応した曲面が一つ見出される。

ここで小林による終局破壊条件は本文における強度破壊条件とほぼ一致する。

いま材料をコンクリートに限って考えると、コンクリート内には乾燥収縮などをはじめとする原因によって、骨材と骨材周囲のモルタルマトリックスの間のボンドクラックなど、無数の初期欠陥を含んでいる。また、これらの初期欠陥はそれ以後のクラックの発生、発達といった破壊進行の原因となり、その応力変動に対する破壊進行の危険度はほぼ連続的であるといっても過言ではない。この状態は一軸圧縮荷重下のコンクリートから、荷重の増加にともない発生する弾性波の観測によっても確かめられている³⁾。

この危険度の連続性とは、コンクリート材料の破壊開始曲面は原点を含む非常に小さな閉曲面となるということであり、これを厳密に求めることは実際上意味のあることではない。そのため、この載荷初期から荷重が破壊強度の60%くらいにいたるまでに生じる供試体内の破壊の進行程度は、供試体が強度破壊にいたるまでに生じる破壊の量とくらべると小さく、巨視的な供試体の挙動のみを問題にするときには、このあたり⁵⁾まで破壊は開始していないとした研究もみられ、Vile や McCreath⁴⁾は応力-ひずみ曲線がほぼ直線である状態からはずれはじめる点をもって破壊の開始点と考

え、これを discontinuity point とし、二軸、あるいは三軸圧縮荷重下における破壊の開始を論じている。

また丹羽らはモルタル供試体について、三軸圧縮応力状態でいわゆる圧縮 (Compression)、伸長 (Extension) および中間試験を行ない、それぞれ最小主応力方向の荷重-変形曲線の折れ曲り状態から破壊開始点を定義し、破壊開始曲面を求めている。

先に述べたように、コンクリートの破壊は荷重増加に対してほとんど連続的ともいうべき状態で進行する。したがって、前述の discontinuity 曲面や、破壊開始曲面は、荷重下における供試体の連続的な状態変化を、応力-ひずみ関係を与える係数、という一つのパラメータからみた一つの等状態曲面と解釈することができる。

このほぼ連続的に進行する破壊過程をなんらかのパラメータで表わし、応力空間における表示を行なうことは、多軸応力状態でのコンクリートの破壊現象を理解する上で非常に有効である。このコンクリートの状態変化を表わすパラメータとしてはいろいろのものが考えられ、パラメータの選定には問題としているコンクリートの状態変化をできるだけよく表わしうるものであることが必要となる。

筆者らは先にコンクリートがほぼぜい性的に挙動すると考えうる応力範囲で、供試体の状態変化を表わすパラメータとして、ボンドクラック比を用いた等値線表示と、残存強度比を用いた等値線表示とを行なっている。Fig. 1, 2 はそれぞれコンクリートについて求めたボンドクラック比 β および破壊程度 α (後述 $\alpha = 1.0 - \text{残存強度比}$) をパラメータとして等状態曲線を Rendulic の応力面に表わしたものである。

Fig. 1. Bond crack ratios of concrete in Rendulic stress plane.

高拘束圧下では、コンクリート供試体の状態変化には粗骨材周縁のボンドクラックのみならず、モルタル部分の質的变化（モルタルを細骨材とセメントペーストとの混合体と考えれば、これは細骨材とセメントペーストとの間のボンドクラックおよびセメントペーストクラックであり、その結果としての質的变化と考え

載荷試験は、(1)供試体に応力履歴を与えるため載荷と、(2)応力履歴を受けた供試体の残存一軸圧縮強度を求めるための載荷とに分けることができる。まず(1)の載荷試験には島津製作所製三軸圧縮試験機を用い、載荷盤には 5.0×5.0 cm の鋼圧盤を用いた。供試体端面と鋼圧盤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。これにより、みかけの摩擦係数は 0.02 程度にまで小さくできると報告されている。履歴載荷は載荷経路として比例載荷をとり、圧縮 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)、伸長 ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)、中間 ($\sigma_1 + \sigma_3 = 2\sigma_2$) の三グループについて行なった。荷重比は、それぞれのグループで最大、最小主応力の比 σ_1/σ_3 が 10, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 となるように各 8 種をとり、別に圧縮試験では σ_1/σ_3 が 1.5, 2.5 の場合と一軸圧縮試験を、また伸長試験では二軸圧縮試験を行ない、さらに $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ である静水圧試験を行なっている。荷重速度は、最大主応力方向での応力変動が毎秒 5~7 kg/cm² となるように保った。履歴載荷と同時に、圧盤間の相対変位を差動トランス型変位計により、三方向それぞれ独立に測定した (Fig. 3)。履歴応力を与えるための所定荷重は、この変位計により得られる荷重-変位量曲線のこう配が大きく変化するあたり、あるいは供試体が崩壊してしまう荷重をもとにして適当な間隔で定めた。荷重が所定値に達すると、この所定荷重で 1 分間荷重を保持した。これは載荷速度の乱れによる供試体の状態変化の乱れを小さくする目的で行なったものである。その後、三方向荷重を比例状態に保ったまま、載荷時と同程度の速度で除荷した。除荷したのち供試体の残存強度を求めるため、一軸圧縮試験

Fig. 3. Pre-loading equipment and displacement transducers.

を行なった。この場合に用いた試験機は島津製作所製リーレー式 30 ton 圧縮試験機であり、圧盤、減摩材は履歴載荷時と同じものを用いた。

なお前述のとおり、モルタル、コンクリートの破壊曲面は載荷経路に強く依存し、応力空間に固定した形では得られない。特にここでは主として問題とした応力範囲は、前に報告した静水圧下でのモルタルの遷移領域にあたり、材料がその内部構造を破壊の進行により著しく変える領域であり、材料の破壊の進行（したがって破壊程度）は載荷経路、載荷速度に大きく影響されることが予想される。そのため、本研究では、載除荷経路、載除荷速度、所定荷重保持時間を定めて実験を行ない、破壊程度曲面を求めた。

3 実験結果と考察

実験に用いた供試体の数は一つの荷重比について12個であり、その内10個に履歴応力を与え、残りの2個を基準一軸圧縮強度測定のために履歴載荷なしで一軸圧縮試験を行なった。履歴載荷時において、最大および最小荷重の比 P_1/P_3 が大きい範囲では、供試体が崩壊するまでに生じる変形は大きく、また荷重-変形曲線のこう配の変化が著しくなってから供試体が崩壊するまでの荷重差がほとんどないため、履歴荷重の増加中、あるいは1分間の所定荷重保持中に崩壊する供試体がいくつかみられた。しかし P_1/P_3 がある程度（圧縮、伸長、中間の各グループによって異なるが、およそ5~7）より小さくなると、このような荷重増加中、あるいは所定荷重保持中の供試体の崩壊はほとんどなくなる。そして荷重増加を停止した瞬間にはかなりの速さで変形進行がみられる場合でも、間もなくその速度は遅くなり、除荷開始時にはほとんど変形進行はみられなかった。供試体の基準一軸圧縮強度は実験がかなり長期間にわたったため、全実験を通じての

基準強度は求めず、それぞれの荷重比での基準値を用いた。その値はおよそ350~400 kg/cm²である。

供試体に履歴荷重を与えても、その供試体の残存強度に対する異方性は、履歴荷重が特に苛酷でないかぎり、定量的に問題にするほど現われないことが予備試験の結果認められている。しかし、供試体の載荷にともなう内部破壊が進行すると、厳密にはそれぞれ三方向荷重の比および大きさにともなった供試体の異方性が生じる。そのため三軸圧縮載荷履歴を三方向異なった大きさで与えた場合には残存一軸圧縮強度には3個の値があり、それらが等しいという保証はない。そこで残存強度の方向による相違という混乱をさけるため、多くの場合、最小の一軸圧縮強度を与えると予想される最大荷重方向を、残存強度測定のための一軸圧縮試験時の載荷方向と定めた。

さて、供試体に与えた履歴荷重を応力に換算し、最大履歴主応力 σ_1 と、その履歴応力に対して得られた残存強度 σ_r をそれぞれ基準強度 σ_0 で除して無次元化し、各グループ別に図示したものが Fig. 4~6 である。 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ である静水圧履歴は各グループに共通として扱いかい、それぞれの図に記入している。図中、各ケースにおける実験個数は8~10個であり、またばらつ

Fig. 4. Pre-loaded stresses and residual strength ratios (Compression tests).

Fig. 5. Pre-loaded stresses and residual strength ratios (Intermediate tests).

Fig. 6. Pre-loaded stresses and residual strength ratios (Extension tests).

きもかなり大きい、これらデータからおよその残存強度比-最大履歴圧縮応力曲線を、それぞれの主応力比について、図のように描くことができる。ここで残存強度比 (σ_r/σ_0) が 0.9 より大きい部分については、実験精度の点からも充分な結果が得られていない。これらの図より明らかなように、最大主応力の増加に対応する材料の破壊の進行状態（ここでは残存一軸圧縮強度の低下状態）は、主応力比 σ_1/σ_3 が大きい場合には急激であるが、主応力比が小さくなるにしたがい、ゆるやかになる。最大主応力の増加にともなう破壊の進行程度が特に変化する主応力比 σ_1/σ_3 はおよそ 5~7 であり、前述の履歴载荷中の変形進行状況ともあわせて考えると、このあたりの主応力比でモルタルの破壊の進行が急激な状態から、安定な状態へ変化していることが予想される。

つぎに Fig. 4, 6 の圧縮試験および伸長試験結果の残存強度比-最大履歴応力表示において、 σ_r/σ_0 が 0.8 および 0.6（これは前に定義した破壊程度 $\alpha=0.2$ および $\alpha=0.4$ に対応する）の値を与える応力履歴値を各ケースについて求め、Rendulic の応力面に表示して連ねたものが Fig. 7 である。この図には参考のため供試体の強度破壊曲線をもあわせて表示した。すなわちこれらは強度破壊曲面および、前に定義した破壊程度曲面を σ_1 軸および静水圧線を含む平面で切った切

Fig. 7. Strength failure and degree of failure curves in Rendulic stress plane.

口曲線である。

前に筆者らは、破壊程度曲面が強度破壊曲面の助けを借りることによって閉曲面となるであろうことを予想したが、¹⁾このことは Fig. 7 の $\alpha=0.2, 0.4$ の曲線により認められる。また前報 (Fig. 2) では、応力が所定値に達すると直ちに除荷したが、本研究では 1 分間の荷重保持を行ってから除荷しているため、破壊程度曲面に若干の差がある。この破壊程度曲面が静水圧線上で閉じるということは、モルタルのような不均質材料の破壊は与えられる応力が静水圧のみで、せん断応力成分がなくとも進行することを意味している。静水圧下のモルタルの破壊進行現象についてはすでに筆者らによって詳しい報告がなされている。⁸⁾

強度破壊曲面および破壊程度曲面を静水圧線に垂直な主応力和一定の平面で切った切口曲線(直截線)を、Fig. 8 (強度破壊曲面)、Fig. 9 (破壊程度 $\alpha=0.4$ 、すなわち残存強度比 $\sigma_r/\sigma_0=0.6$)、Fig. 10 (破壊程度 $\alpha=0.2$ 、残存強度比は 0.8) に示す。三主応力の間には互換性があるため、ここでは $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ に大きさの制限は考えていない。この直截線と Rendulic の応

Fig. 8. Right sections of strength failure surface.

Fig. 9. Right sections of degree of failure surface ($\alpha=0.4$).

Fig. 10. Right sections of degree of failure surface ($\alpha=0.2$).

Fig. 11. Relations between the sum and the difference of the maximum and the minimum stresses.

力曲線との両者から問題とする三次元応力空間での強度破壊曲面, 破壊程度曲面が容易に組み立てられる。

Fig. 11 に強度破壊および $\alpha=0.2$, $\alpha=0.4$ の破壊程度を与える履歴応力状態の最大主応力と最小主応力の和と差の関係を無次元表示している。これによると, 和の小さい領域においては圧縮試験より伸長試験の方が差の値が大きいという傾向があり, またかなりのばらつきがあるが, それぞれ一本の曲線で近似できる。

Fig. 8 の強度破壊曲面の直截線については多くの報告にみられるとおり, ややふくらんだ三角形状であり, 静水圧の増加とともにほぼ等方的に大きくなるのがみられる。しかし, 破壊程度曲面の直截線は, 静水圧の低い間は強度破壊曲面のそれと同じく, 主応力の方向に頂点をもつ三角形に近い六角形状である。そして静水圧の増加とともに正六角形に近い状態となり, さらに静水圧が増加すると主応力の反対の方向に頂点をもつ三角形状に近くなる。また六角形の大きさは正六角形に近い状態のものがほぼ最大で, それ以後の静水圧の増加に対しては小さくなる。この直截六角形の形状変化の理由として次のことが考えられる。いま破壊程度を与える条件は, Fig. 11 のように最大, 最小主応力の和と差の関係で一義的に定められる。このとき τ_{oct} (八面体せん断応力) は圧縮試験の場合も伸長試験の場合も, 最大, 最小主応力の差の形によって全く同

じ形で表わされるのに反して, σ_{oct} (八面体直応力) は中間主応力の値によって変化する。したがって直截線の六角形状が σ_{oct} の増加に対して大きくなっていく間では, 同一の σ_{oct} に対する τ_{oct} の値は伸長試験よりも圧縮試験の方が大きく, 逆に小さくなっていく範囲では伸長試験の方が圧縮試験よりも大きくなるのが考えられる。

破壊条件 (強度破壊条件) を表わすのに八面体応力表示が用いられることがしばしばあるが, Fig. 8, 9 において直截線が円でなく, また σ_{oct} の値によって直截線の形状が著しく変化することからも, 少なくとも等破壊程度を与える条件として八面体応力一定条件は有用ではないと結論される。

Fig. 12. Comparison of ultimate fracture and failure process curves.

Fig. 12 に, 前述の McCreath らによる Discontinuity と終局破壊の条件と, 丹羽らによる破壊開始と終局破壊の条件とを本研究における破壊程度 $\alpha=0.2$, 0.4 の曲線および強度破壊曲線とともに Rendulic の応力面に表わしている。これらの諸条件は終局破壊条件 (ここに表わした範囲では強度破壊条件と同義であると解釈される) が異なるため, 直接比較はできないが, $\alpha=0.2, 0.4$ の曲線は Discontinuity line や破壊開始曲線とくらべてかなり外にあり, かなり破壊の進んだ状態を表わしていることがわかる。

4 む す び

本研究は比較的高圧状態でのモルタルの破壊の進行状態を明らかにする目的で, 応力履歴を与えたモルタル供試体の残存一軸圧縮強度からその履歴応力状態における破壊程度を定義し, 三次元主応力空間内における等状態曲面として破壊程度曲面を求めたものである。ここで得られた結果を要約すると, 次のとおりである。

(1) 残存強度比による破壊進行の等状態表示（破壊程度表示）は、圧縮応力下における材料の力学的な特性変化を定量的に表わしうる点から、材料の破壊研究のための尺度として有用である。

(2) 破壊程度曲面は、静水圧線に向って閉じる曲面となる。

(3) 破壊程度曲面の直截曲線は、 σ_{oct} の増加によって大きく形状を変える。すなわち、 σ_{oct} の小さい間は主応力方向に頂点をもつ三角形に近い、ややふくらんだ六角形状であるが、 σ_{oct} の増加につれて正六角形に近くなり、さらには主応力と反対の方向に頂点をもつ三角形に近い形の六角形状となる。またこの変化は直截六角形状が大きくなり、最大面積に達し、やがて小さくなる変化とほぼ一致している。

(4) 等破壊程度を与える応力条件は、履歴応力の最大主応力と最小主応力の和と差の関係によって近似的に表わされる。しかし、せん断応力成分がなくても（履歴応力が静水圧であっても）破壊は進行するという事実からも、等破壊程度を与えるための条件として、八面体せん断応力一定説や Mohr の破壊説などを用いることはできない。

参 考 文 献

- 1) 丹羽義次, 小柳 治, 中川浩二, 土木学会論文報告集, **185**, p. 41 (1971).
- 2) 小林昭一, 第30回岩の力学国内シンポジウム講演概要集, p. 105 (1970).
- 3) 横道英雄, 松岡健一, 高田宜之, セメントコンクリート, **228**, p. 2 (1966).
- 4) McCreath, D. R., J. B. Newman, and K. Newman, Matériaux et constructions, **2**, 7, p. 73 (1969).
- 5) Vile, G. W. D, Proceedings of the International Conference on the Structure of Concrete, p. 275 (1965) London
- 6) 丹羽義次, 小林昭一, 宮地明彦, セメント技術年報, XXIII, p. 240 (1970).
- 7) 丹羽義次, 小柳 治, 小林昭一, 土木学会論文集, **143**, p. 28 (1967).
- 8) 丹羽義次, 中川浩二, 土木学会論文報告集, **185**, p. 101 (1971).
- 9) たとえば丹羽義次, 小林昭一, 平島健一, 材料, **16**, 108 (1967) あるいは 7).