

三軸圧縮応力下におけるコンクリートの破壊過程

FAILURE PROCESSES OF CONCRETE UNDER
TRIAXIAL COMPRESSIVE STRESS丹羽 義次*・小柳 治**・中川 浩二***
By Yoshiji Niwa, Wataru Koyanagi and Koji Nakagawa

1. はじめに

コンクリートがしだいに増加する圧縮応力を受けるとき、コンクリート供試体は興味ある挙動を示す。たとえば一軸圧縮応力下では、縦方向ひずみ ϵ_1 と横方向ひずみ ϵ_2 から求めた体積ひずみ $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_2$ は応力の増加とともに増加し、やがて減少する¹⁾。また、供試体内を伝わる超音波の伝播速度は低下し²⁾、供試体中から内部の破壊音、あるいは弾性波が発生する³⁾。これらは応力の増加に伴って、供試体内部に発生、発達するクラックによるものである、と説明されており、実際に応力履歴を受けた供試体内のクラックの検出もなされている⁴⁾。すなわち、コンクリートが圧縮応力を受けて崩壊するときには複雑な破壊の過程が存在し、内部構造が著しく変化する。

コンクリートの破壊現象を解明するためには、その破壊機構、あるいは載荷に伴う内部変化の進行状態を知ることが必要である。また破壊機構や破壊の進行程度と、巨視的な強度破壊条件との関係についても検討が必要であらう。

ここでは圧縮応力下におけるコンクリートの破壊現象を明らかにする試みのひとつとして、三軸圧縮応力履歴を受けるコンクリート供試体内の微小クラックの発生、発達の状況を検討するとともに破壊程度を与えるパラメータを考え、それによって供試体の破壊の進行程度を表わすことを試みた。

2. パラメーターの選定

材料の破壊を考えるとき、破壊という語をどのように

定義するかという問題がある。“破壊条件”などと用いられるように“破壊”という語を“崩壊”(collapse)や強度破壊(strength failure)と同義義に用いるならば、“破壊程度”という語は無意味である。以下本文では破壊、強度破壊、崩壊の概念をつぎのように定義する。

強度破壊：応力-ひずみ曲線が上り勾配から下り勾配へ変わる現象。

崩壊：供試体をひとつの系と考え、その系が分離などにより系としての強度を失う現象。

破壊：クラックの発生、発達、強度破壊、崩壊など、供試体の状態変化の総称。

岩石、コンクリートといった岩質材料は内部構造に若干の変化が生じて、供試体としての機能を失うことなく外荷重に耐えうる。たとえば Griffith の仮説でいう初期クラックの先端からのクラックの進展があっても供試体は崩壊していないし、また強度破壊もしていない^{5), 6)}。すなわち、これらの岩質材料が圧縮応力下で崩壊するまでには破壊過程が存在する。

この破壊過程について Paul は 図-1 のような初期破壊段階と、それに続いて生じる破壊段階という概念を

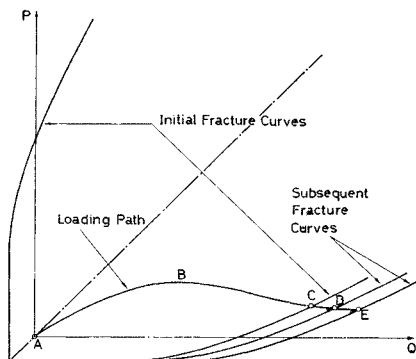


図-1 二軸応力場における Initial Fracture Curves と Subsequent Fracture Curves. (B. Paul による)

* 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

練りまぜは、シリーズ A では 2 切可傾式ミキサを用い、1 回打設量は約 30 l、シリーズ B ではパン型ミキサを用い、1 回打設量は約 15 l である。それぞれ突き固めた後、振動締め固めを行なった。打設後約 5 時間でみがきガラス板を用いて表面仕上げを行なった。

供試体は、打設後 24 時間を経て脱型し、ただちに恒温恒湿室（温度 20°C, ± 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 日で応力履歴を与えた。

(2) 圧縮履歴載荷

圧縮応力履歴載荷には島津製作所製三軸圧縮試験機を用い、差動トランスで測定される圧盤間変位と、荷重との関係を記録した。履歴載荷には一軸、二軸圧縮および三次元応力空間内の σ_{oct}^* = 一定面内でのいわゆる圧縮試験 (compression test) および伸長試験 (extension test) を行なった。載荷経路は 図-2 に示すとおりである。

三軸圧縮試験時にはそれぞれの主応力方向について、3 本の荷重-変形曲線が得られる。圧縮応力下における供試体の強度破壊点として、便宜上一軸および二軸圧縮試験時にはそれぞれの荷重-変位量曲線が変位量軸とほぼ平行となる点ととり、三軸圧縮試験時には最小主応力方向の荷重-変位量曲線がほぼ変位量軸に平行となる点をとった。いずれの場合も前節に述べた意味での供試体の崩壊は生じていないことに留意したい。

履歴として与えた応力は 図-2 中 O 印で示してある。供試体の個数は各応力履歴について 2~3 個である。

載荷時には、供試体端面と圧盤との間の摩擦を小さくするため、厚さ 0.05 mm のテフロンシートにシリコン

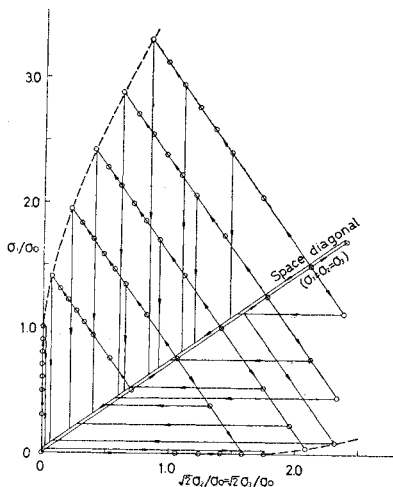


図-2 応力経路と応力履歴 (破線は強度破壊曲線)

* 八面体直応力 (平均応力) $\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$

グリースを塗布したものを減摩材として用いた。載荷、除荷の速度は最大主応力方向で 5~6 kg/cm²/sec を保つようにした。

(3) クラックの検出

コンクリート中には載荷以前から多数の内部クラックが存在し、それらは主として骨材の下面 (打設方向) にある。この原因としてつぎのことが予想される。すなわちブリージングによって骨材下面に水げきあるいは空げきが生じる。またブリージングの結果として骨材下面が空げきあるいは水げきとはならなくても、この部分での骨材とマトリックスの結合強度は他の部分と比較して弱く、温度変化やコンクリートの硬化過程でのモルタル部分の体積変化によって応力集中を生じ、この部分に初期クラックが多く発生する。これら初期クラックの存在のために載荷方向、切断方向によって検出されるクラックの形態が異なることが予想される。そのため載荷方向、切断方向を一定に定め、打設方向を圧縮試験 (compression test) では最大主応力方向と、伸長試験 (extension test) では最小主応力方向とそれぞれ一致させた。また初期欠陥からのクラックの発達状態をよりよく知るために、供試体中央を打設方向と平行にコンクリートカッターで注意深く切断した¹⁰⁾。

微小クラックの検出には予備試験の結果、つぎの方法を採用した。すなわち載荷履歴を与えた供試体をコンクリートカッターで注意深く切断し、表面が乾くのを待って黒色マジックインクをアセトンで約 3 倍に薄めたものを表面に塗布した。インクが乾くのを待ってターンテーブル上で供試体表面を薄く磨き取り、欠陥中に浸み込んだインクの痕跡から微小クラックを読み取った。研磨粉にはカーボラダム 400 を用いた。このように処理した供試体面には肉眼でもはっきりと認めうるインク痕跡が現われるが、拡大鏡 (20 倍) および実体双眼顕微鏡の助けを借りてインク痕跡を追跡し、クラック図を作製した。コンクリート中のクラックには種々の大きさのものが予想されるがここでは 20 倍の拡大により検出可能なものを微小クラックとして扱っている。またボンドクラック比 β の算出のために対象とした骨材は、処理した面での直径がおおよそ 3.5 mm 以上のものである。

クラック検出のために問題とした領域は A, B のシリーズでそれぞれ供試体中央部約 30 cm², 20 cm² であり、領域中の骨材-マトリックス境界の長さの総和はそれぞれ約 800 mm および 500 mm である。骨材周縁のクラックの検出に際して、モルタル部分と骨材部分との分離により生じたものではなく、水げき、空げきと思われる欠陥もある程度みられたが、これらもクラックとして扱った。

(4) 残存一軸圧縮強度

応力履歴を受けた供試体の残存強度から、前に定義した供試体の破壊程度を求めるために、一軸圧縮試験を行った。クラック検出のために二等分した供試体をさらに2つに切断し、おおよそ 5.1 cm×5.1 cm×10.5 cm の角柱を作製した。角柱の長手方向はつねに供試体打設方向と一致するようにとった。残存強度は2本の角柱の試験結果の平均値として求めた。

4. 実験結果と考察

使用した供試体の強度破壊条件を Rendulic の応力面に表わしたものが図-3である。比較のためシリーズBおよび小林・小柳による結果¹¹⁾をあわせて示す。これらには若干の差はあるが、大差はないといえる。本実験に

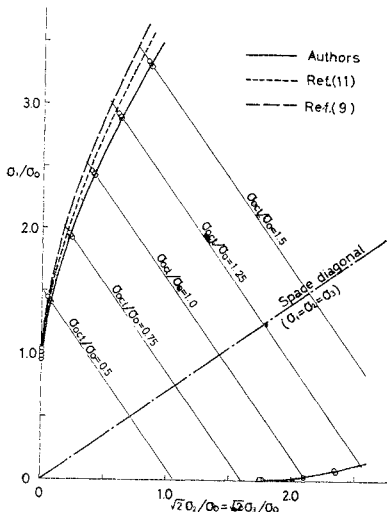


図-3 強度破壊条件の比較

用いた供試体の一軸圧縮強度は 509 kg/cm² (5個平均)であり、シリーズB (370 kg/cm²), 小林・小柳 (436 kg/cm²) とくらべてかなり高強度である。以下この一軸圧縮強度を基準量とし、σ₀ で表わす。

(1) 骨材クラック

シリーズBでは粗骨材としてかなり均質、かつ堅硬である高槻産砕石を用いたため、骨材クラックはほとんどみられなかった。しかし本実験に用いた川砂利は種々の岩質の混合物であり、いわゆる死石も含まれている。そのため表面処理を行った供試体表面には若干の骨材クラックが観察された。しかし、それらのクラックは例外を除いては骨材中に止まるのみであり、モルタル中への発達はほとんど観察されなかった。したがってこれら

の骨材クラックの多くは欠陥として荷重以前から存在したものであり、また量的にもこれらは供試体の崩壊に大きな影響をおよぼしていない、と考えられるので問題の対象から省いている。

(2) ボンドクラック

前述のようにコンクリート供試体には荷重以前から骨材周縁にいくらかのボンドクラックが存在し、これらの



写真-1 クラック図の一例 (応力履歴は σ_{oc}/σ₀=1.25, τ_{oc}/σ₀=0)

多くは骨材の下面に検出される。この傾向はシリーズAよりもシリーズBで著しいが、これは主として両者の水-セメント比、あるいは単位水量が大きく異なるためであると解釈される。これらのボンドクラックは供試体の荷重時に応力集中源として作用し、クラックの成長を促す。そのためボンドクラックは全般的に骨材の下面(打設方向で)に多く検出される。クラック図の一例を写真-1に示す。

a) 静水圧履歴とボンドクラック比

与えた静水圧履歴の最大値はシリーズAで一軸圧縮強度の1.75倍 (891 kg/cm²), シリーズBで2.40倍 (900 kg/cm²) である。与えた静水圧履歴とボンドクラック比との関係を

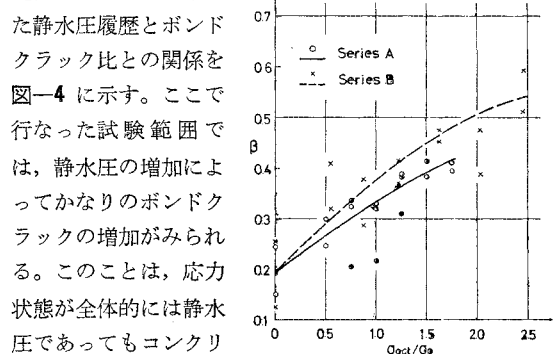


図-4 静水圧履歴 (σ_{oc}/σ₀) とボンドクラック比 β

b) 一軸圧縮試験時における応力履歴とボンドクラック比

一軸圧縮応力下でのボンドクラック比βの値を図-5に示す。シリーズA, Bにおける差はほとんどない。この図で供試体の一軸圧縮強度の50%程度の応力まで

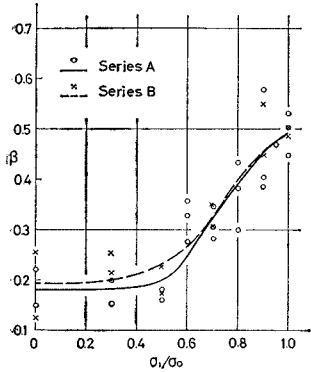


図-5 一軸圧縮応力履歴 (σ_1/σ_0) とボンドクラック比 β

はほとんど β の増加はみられないが、それ以上では急激に増加する。さらに供試体強度破壊応力における β の値は両者の場合とも約 0.5 となる。ボンドクラックは骨材下面をはじめとする危険な個所から発生、発達する。そしてすでに存在するボンドクラックは応力集中源として作用し、クラック先端の集中応力は荷重をさらに増加させるとき、ボンドクラックがさらに成長するか、モルタル部分へ発達するか、停止するかに大きな影響を与える。一軸圧縮状態では側方拘束がないため、供試体内部においても側方への変形が比較的自由である。そのため $\beta=0.5$ 程度でそのボンドクラックが応力集中源として作用し、

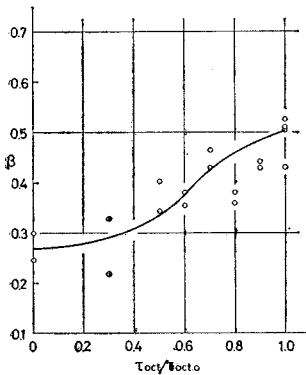
マトリックス部分へのクラックの著しい発達を促すことになる。

c) σ_{oct} = 一定面上における τ_{oct} * の増加にともなうボンドクラックの発達

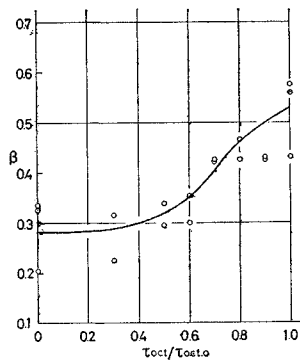
図-6 に $\sigma_{oct}/\sigma_0=0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ におけるボンドクラック比を示している。前述のようにボンドクラック比は $\tau_{oct}=0$ 、すなわち応力が静水圧であっても増加するため、図において σ_{oct} の増加にともない β の値はしだいに高くなっている。この荷重方法では静水圧線上の一点を出発して強度破壊線上（この時の τ_{oct} の値を $\tau_{oct,0}$ とする）にいたる $\tau_{oct}/\tau_{oct,0} \leq 0.5$ では $\tau_{oct}=0$ の状態と β の値に大差はないが、 $\tau_{oct}/\tau_{oct,0} > 0.5$ ではかなり急激に増加するのが認められる。

σ_{oct} の値が大きくなると、コンクリート供試体の非弾性挙動は著しくなり、前に定義した強度破壊点の近くでは応力の増加はなくても供試体の変形は続く。したがって変形の増加にともなう破壊の進行程度のばらつきを小さくするため、除荷は強度破壊点の直前で行った。

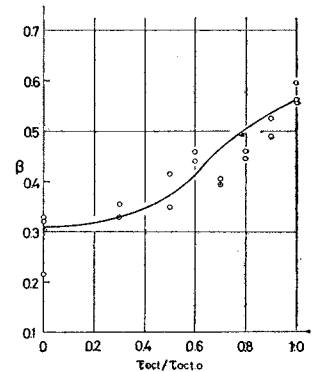
強度破壊点におけるボンドクラック比 β とその時の拘



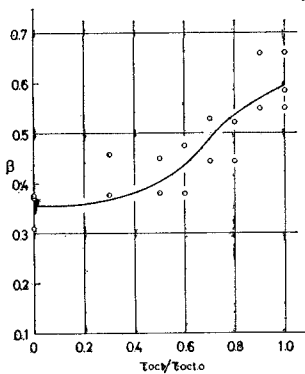
(a) $\sigma_{oct}/\sigma_0=0.5$



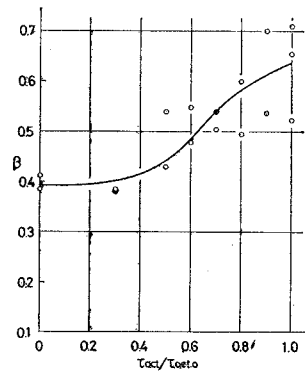
(b) $\sigma_{oct}/\sigma_0=0.75$



(c) $\sigma_{oct}/\sigma_0=1.0$



(d) $\sigma_{oct}/\sigma_0=1.25$



(e) $\sigma_{oct}/\sigma_0=1.5$

図-6 σ_{oct} = 一定面内における τ_{oct} の履歴 ($\tau_{oct}/\tau_{oct,0}$) とボンドクラック比 β ($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$)

* 八面体せん断応力 $\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$

束圧 ($\sigma_2/\sigma_0 = \sigma_3/\sigma_0$)_c との関係を図-7に示す。シリーズ A, B の供試体について拘束圧 0 では $\beta \cong 0.5$ であるが、その後若干の差がある。しかし強度破壊点の直前で除荷すると、ここで行なった実験の範囲では β の値は 0.7 より小さい。

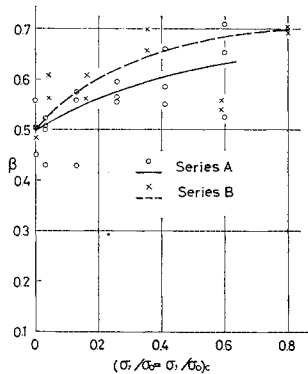


図-7 強度破壊点の拘束圧 ($\sigma_2/\sigma_0 = \sigma_3/\sigma_0$)_c とボンドクラック比 β

(3) モルタルクラックと崩壊形態

前述のようにモルタルクラックが発生、発達する場所はボンドクラックの場合のように限られていず、検出が容易でないため、定量化ははなはだ困難である。そのため表面処理を行なったコンクリートの断面を肉眼で入念に観察し、モルタルクラックの発達程度をつぎの5つの段階に分けた。ここでモルタルクラック領域とはモルタルクラックの発達した小領域をいう。

- i) 多数個所のモルタルクラック領域が観察されたもの……………段階-4
- ii) 2~3 個所のモルタルクラック領域が観察されたもの……………段階-3
- iii) モルタルクラックの領域は観察されないが、ボンドクラックの橋わたしをするモルタルクラックや粗骨材端からの微小なモルタルクラックが観察されたもの……………段階-2
- iv) ボンドクラックを橋わたしするモルタルクラックらしいものが観察されたもの……………段階-1
- v) モルタルクラックが観察されなかったもの……………段階-0

図-8 にモルタルクラックの観察結果を示す。一軸圧縮試験ではモルタルクラックは $\sigma_1/\sigma_0 = 0.6 \sim 0.7$ で骨材隅角部から、とくに骨材周辺のボンドクラックを連結する形で現われはじめ、 $\sigma_1/\sigma_0 = 0.9$ あたりから著しく発達する。また二軸圧縮の場合の方が一軸圧縮の場合よりもいくらか早く、かつ多く発生、発達するのがみられた。三軸圧縮応力状態となる(最小主応力が0でなくなる)とモルタルクラックの発達状況は著しく変化する。 $\sigma_1 \cong \sigma_2 = \sigma_3$ の領域について考えると、 $\sigma_{oct}/\sigma_0 = 0.5$ では強度破壊応力近くでかなりのモルタルクラックが観察される。しかし、さらに σ_{oct} が増加するとその発達は顕著でなくなり、 $\sigma_{oct}/\sigma_0 \cong 1.25$ では強度破壊応力近くでも明らかなモルタルクラックは観察されなかった。シリーズBの供試体の強度破壊点におけるモルタルクラック

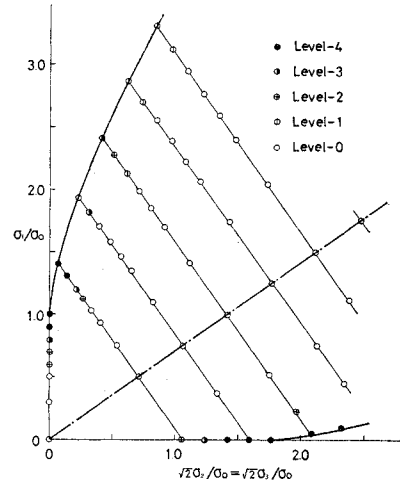


図-8 応力履歴にともなうモルタルクラックの発達状況

の観察結果からも同様の傾向がみられた⁹⁾。しかしモルタルクラックの性状は、細骨材が不連続粒度であるか、連続粒度であるかによりかなりの差がある。すなわちシリーズBでは骨材周縁から発生したクラックはシリーズAとくらべて少数であり幅広い。またシリーズAのものは多数の小さなクラックとなる傾向がある。これはシリーズBではモルタル部分が比較的均質であり、また骨材の隅角部がなめらかでないため、骨材周縁での応力集中の影響が大きく、モルタルクラックは骨材先端から単一の大きなものが発生する。これに反してシリーズAでは、比較的粗骨材が円滑であり、モルタル部分は比較的均質なため、モルタル中にも多数のモルタルクラックの発生源が存在することになり、大きな骨材の隅角部の応力集中よりも、ある広さを有する領域での応力分布が問題となる。

写真-2 にシリーズ A, B の種々の拘束圧下で、ほぼ強度破壊応力を履歴として受けた供試体中の微小クラックを示す。

また写真-3 は強度破壊応力近くの二軸圧縮応力履歴を受けたものを示す。写真からも明らかなように、シリーズAではシリーズBとくらべて微小クラックの検出が困難であった。

拘束応力によりモルタルクラックの発達性状が異なるため、供試体の崩壊機構も異なる。すなわち一軸圧縮応力、あるいは $\sigma_{oct}/\sigma_0 = 0.5$ 程度の圧縮試験では、強度破壊応力近くで供試体中に多数の最大主応力方向に平行なクラックが発生する。そのため供試体は柱状体の集合したものへと構造的に変化し、供試体の崩壊は瞬間的に生じる。拘束圧が大きくなるとモルタルクラックの発生は少なくなり、崩壊はボンドクラックの連結の結果としての骨材の相対変位により生じる。さらに拘束圧が増

加すると ($\sigma_{oct}/\sigma_0=1.25, 1.5$) モルタル クラックはほとんど発生せず、骨材の周囲で変質したモルタルの層が発生する。このような応力状態では、供試体中の骨材は回転、あるいは相対的な移動を生じ、またこれを取り囲むモルタル部分は流動現象を生じ、その結果供試体の崩壊が起こる。

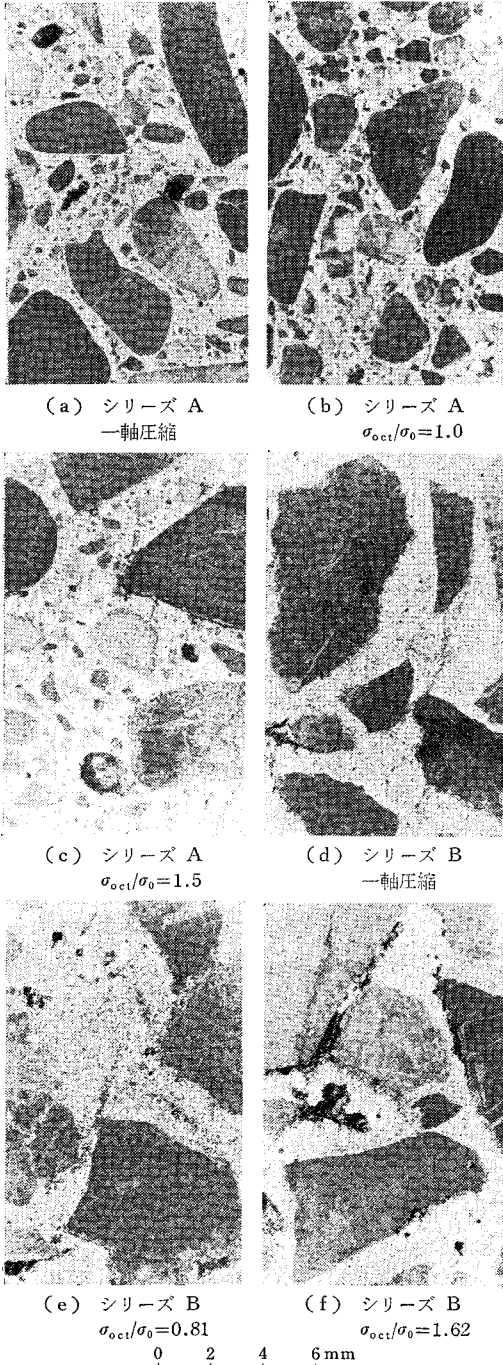


写真-2 強度破壊点直前の微小クラック

(4) 内部破壊曲面

観測の結果得られたボンドクラック比 β の値を Rendulic の応力面に示すと 図-9 となる。ここでは、それぞれの応力履歴についてのボンドクラック比の平均値をとってその応力履歴に対する β の値とした。図中、実曲線は供試体の強度破壊曲線を表わす。また図中に $\beta=0.35, 0.4, 0.45, 0.5$ とと思われる点を連ねた曲線を破壊線で示している。これらの曲線は供試体内部の変化程度を与えるものであり、以下これを内部破壊曲線と呼ぶ。 $\beta \leq 0.4$ では曲線は圧縮応力範囲では連続しており、 $\beta=0.45$ についても連続曲線となることが予想される。このことからつぎのことが結論される。

すなわち強度破壊曲線は静水圧の増加とともに大きく広がっていくが、ボンドクラック比を尺度としてみたコンクリートの内部破壊

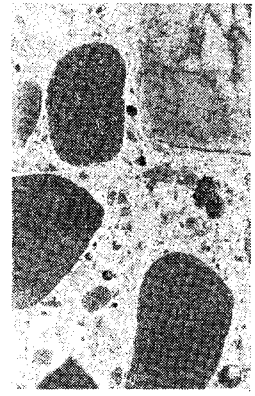


写真-3 強度破壊点直前の微小クラック (二軸圧縮)

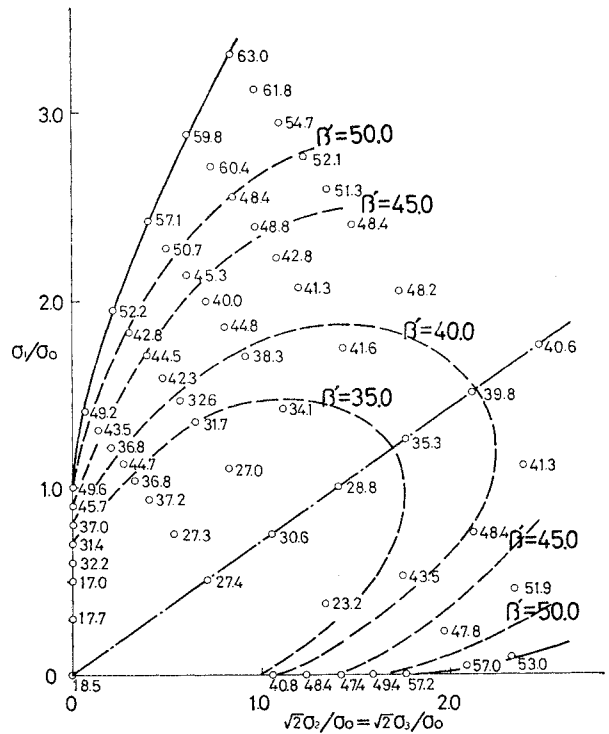


図-9 Rendulic の応力面に表わしたボンドクラック比と内部破壊曲線 ($\beta' = \beta \times 100$)

曲線は強度破壊曲線の内部で閉曲線となる（厳密には β が大きい場合は、内部破壊曲線は強度破壊曲線を一部加えて閉曲線となる）。三次元的に考えると、コンクリートの内部破壊曲面は強度破壊曲面の内部に圧縮応力範囲で連続な曲面として描くことができる。さらにコンクリートの内部にはほぼ連続的といえる危険度で欠陥が存在しており、応力の変動によってほぼ連続的に破壊が進行する。そのためコンクリートでは初期破壊曲面は原点を含む小さな閉曲面であり、破壊強度曲面との間には連続的な段階で破壊曲面が続いていると考えられる。

(5) 応力履歴と残存強度

高静水圧履歴を受けたモルタル供試体の残存一軸圧縮強度は著しく低下することはすでに報告した¹²⁾。ここでは圧縮応力履歴が供試体の残

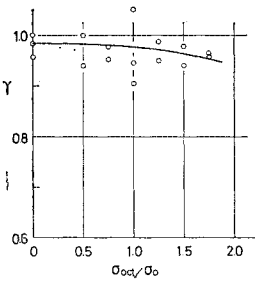


図-10 静水圧履歴 (σ_{oct}/σ_0) と残存強度比 γ

存一軸圧縮強度にどのような影響を与えるかについて検討する。まず図-10 に与えた静水圧履歴と残存強度比 γ との関係を示す。これによると一軸圧縮強度の 1.75 倍程度の静水圧に対しては、若干の残存強度の低下傾向がみられるのみである。

この傾向はモルタルにおける実験結果と類似している。

図-11 に一軸圧縮応力履歴に伴う残存強度比 γ の変化を示す。これによると、一軸圧縮応力下でのコンクリートの残存強度は、応力履歴

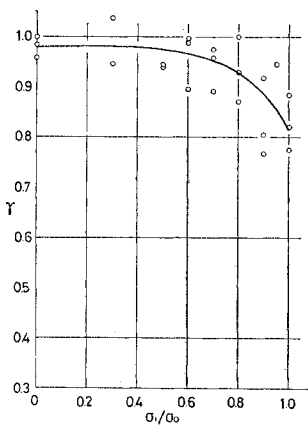
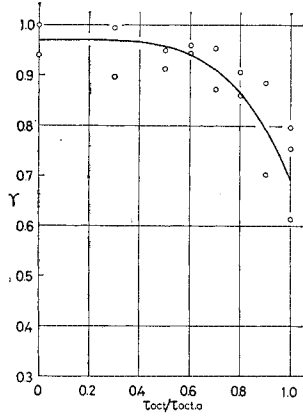
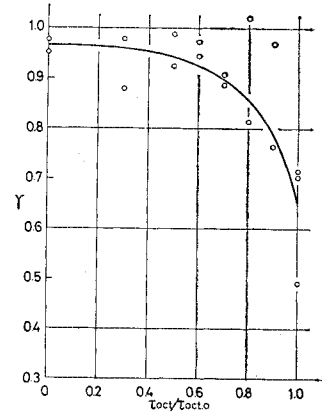


図-11 一軸圧縮応力履歴 (σ_t/σ_0) と残存強度比 γ

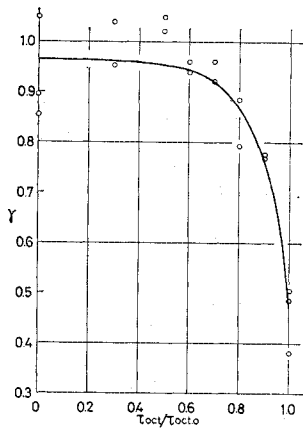
が一軸圧縮強度の 60% 程度まではほとんど変化しない。しかし、それ以上の応力履歴についてはいくらかの残存強度の低下がみられ、強度破壊直前の応力を履歴としても供試体では、残存強度比 γ は 0.8 程度とな



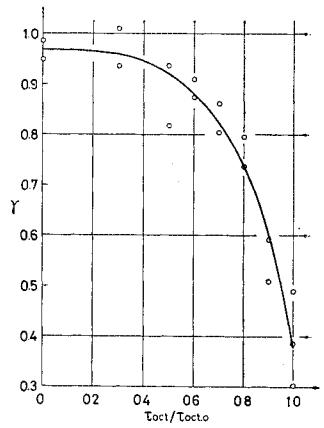
(a) $\sigma_{oct}/\sigma_0=0.5$



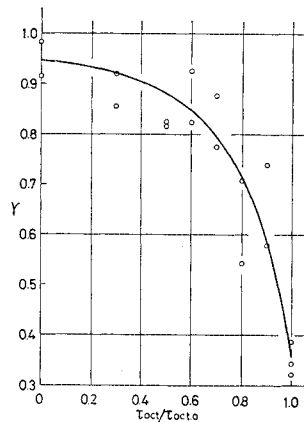
(b) $\sigma_{oct}/\sigma_0=0.75$



(c) $\sigma_{oct}/\sigma_0=1.0$



(d) $\sigma_{oct}/\sigma_0=1.25$



(e) $\sigma_{oct}/\sigma_0=1.5$

図-12 σ_{oct} —一定面内における τ_{oct} の履歴 (τ_{oct}/τ_{oct0}) と残存強度比 γ ($\sigma_t \cong \sigma_s = \sigma_0$)

る。これにはモルタルクラックの発達傾向との関連がみられ、この残存強度の低下は供試体中のモルタルクラックの発生、発達に大きく影響されると考える。すなわち、一軸圧縮応力履歴を受ける供試体の残存強度の低下は、供試体中にモルタルクラックが卓越しない段階ではあまり大きくないが、モルタルクラックの発達とともにコンクリートの内部構造が大きく変化し、残存強度も低下する。

図-12に $\sigma_{oct}/\sigma_0=0.5\sim 1.5$ 面内における τ_{oct}/τ_{oct-0} の増加に伴う残存一軸圧縮強度比 r の変化を示す。 σ_{oct} が小さい間は τ_{oct}/τ_{oct-0} が 0.7 あたりまではあまり大きな残存強度比の低下はみられないが、 σ_{oct} が大きくなると残存強度比の低下は $\tau_{oct}/\tau_{oct-0}=0.5$ あたりから顕著となる。また強度破壊

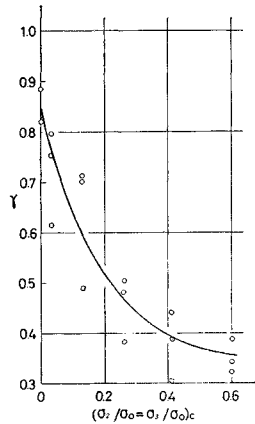


図-13 強度破壊点の拘束圧 ($\sigma_3/\sigma_0 = \sigma_3/\sigma_0$)_c と残存強度比 r

点直前の応力履歴を受けた供試体の残存強度比 r と強度破壊点の拘束応力の関係を示すと図-13となる。これらと図-6、図-8とを比較することにより、つぎの推論が可能である。すなわち拘束圧が比較的小さい間は、モルタルクラックが供試体の残存強度の低下に大きな役割を演じるが、拘束圧が大きくなると、モルタル部分の変質による流動

が大きく作用するようになる。また粗骨材境界におけるクラックのみでは残存強度に大した影響はないが、モルタル部分の変質は直接影響を与える。ここで 2. で定義した破壊程度を Rendulic の応力面に表わすと図-14となる。破壊程度はそれぞれの応力履歴についての平均値をとっている。図中実曲線は強度破壊曲線を表わし、破線で破壊程度 0.1, 0.2 と思われる等値線を表わしている。一軸圧縮強度の3倍程度の静水圧履歴をモルタル供試体を受けると、残存強度は急激に低下しはじめ、6倍程度の履歴では残存強度比は約 0.2 近くにもなることを考えると、これらの等値線は前述の意味で閉曲線となる。すなわち、これらの曲線は σ_{oct} が大きくなるにしたがい強度破壊曲線から離れ静水圧線に近づく。このことは前に述べた σ_{oct} , τ_{oct} の増加と残存強度比との関係から説明される。

(6) 微小クラックと残存強度

コンクリート供試体は圧縮応力履歴によって内部破壊

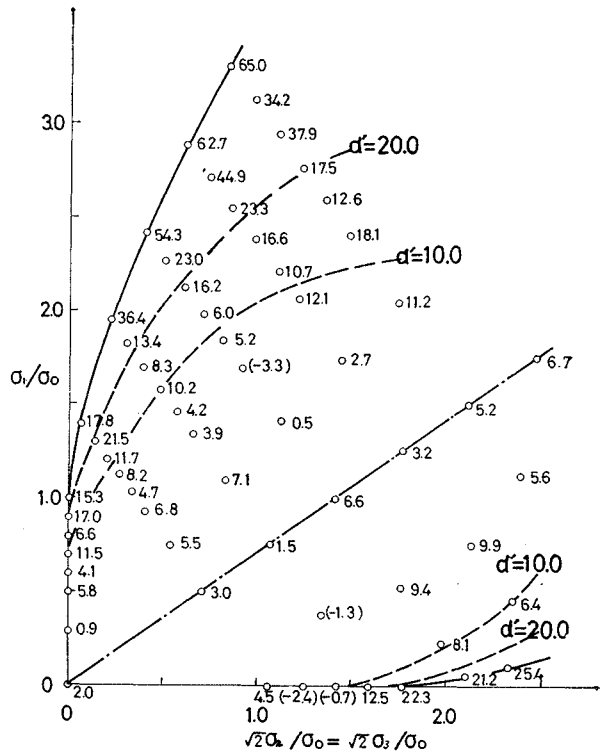


図-14 Rendulic の応力面に表わした破壊程度 α と破壊程度曲線 ($\alpha' = \alpha \times 100$)

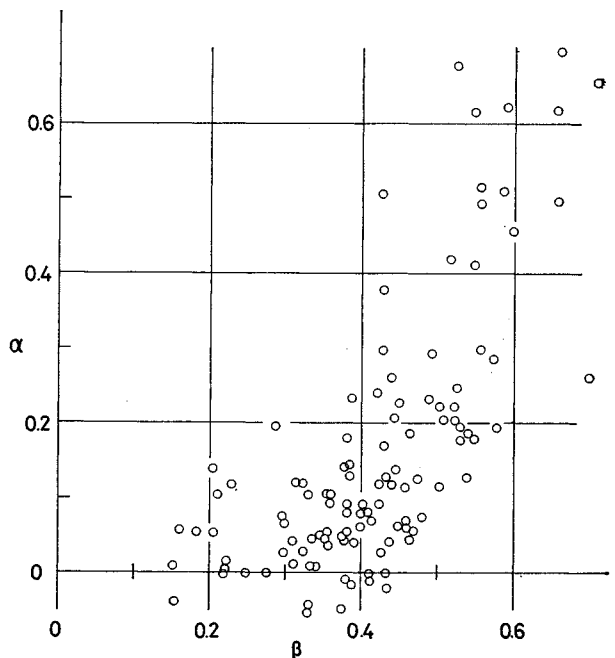


図-15 ボンドクラック比 β と破壊程度 α との関係

を生じる。またこの内部破壊の結果、応力履歴を受けた供試体は載荷以前とは力学的性質が異なり、残存一軸圧縮強度は低くなる。コンクリートの内部破壊はクラックの発生、発達およびモルタル部分の変質（モルタルをセメントペーストと細骨材との混合物と考えれば、これも細骨材とセメントペーストとのボンドクラックおよびペーストクラックと解釈しうる）によってもたらされる。そこでボンドクラック比 β が供試体の残存強度比 r 、したがって破壊程度 α といかなる相関性を有するかを考える。図—15にボンドクラック比 β と破壊程度 α との関係を示す。この図で α 、 β にはかなり強い相関がみられるがそのばらつきは大きい。これは前に述べたように σ_{oct} の小さい範囲では、ある程度以上の応力に対してはモルタルクラックが発生し、また σ_{oct} の大きい範囲ではモルタル部分の変質が起こる。すなわちボンドクラック比 β の増加にはモルタル部分のクラック発達を含む変質が伴う。したがって破壊程度の進行が β の増加によると同時に、モルタル部分の変質にも影響を受けるためである。

5. おわりに

この研究は多軸応力下におけるコンクリートの破壊の機構を明らかにする試みの一つとして、圧縮応力履歴を受けるコンクリート供試体内の内部破壊の進行状態を観察、検討し、同時に圧縮応力履歴を受けた供試体の残存一軸圧縮強度から供試体の破壊程度を定義し、強度破壊曲面と比較することを試みたものである。コンクリート内部のクラックの発生、発達は応力経路の影響を受け、クラックの形状、量は応力履歴として与えた値について一意的ではないと考えられる。したがって内部破壊曲面、破壊程度曲面を定めるとき、ある定まった応力経路について、という制限を受けるのはやむを得ないことである。ここでは原則として σ_{oct} 一定面内で τ_{oct} を増加させるといふ定められた応力経路で実験を行ない、それぞれの曲線を定めた。

得られた結果を要約するとつぎのとおりである。

- i) コンクリート供試体中には載荷前からブリッジなどによる欠陥が存在する。それらは主として骨材下面にあり、応力履歴を受けた供試体でも当然骨材下面で卓越する。その傾向は水-セメント比あるいは単位水量の影響を強く受け、シリーズAにくらべてシリーズBで著しい。
- ii) 強度破壊点直前の応力履歴を有する供試体のボンドクラック比 β は、一軸圧縮応力下で約0.5である。拘束圧の増加とともにこの値は増加するが本実験の範囲では0.7よりも低い。

- iii) 一軸圧縮応力下で発生するモルタルクラックは圧縮応力方向にほぼ平行であるが、拘束圧の増加とともに短くなり、かつ最大主応力方向に対して傾きを有することも起こる。はっきりとモルタルクラックの発生が認められるのは、圧縮応力領域($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$)でシリーズAでは $\sigma_{oct}=1.0$ 、シリーズBでは $\sigma_{oct}=1.21$ が限界であった。

- iv) 一軸圧縮応力下およびそれに近い三軸圧縮応力下では最大圧縮応力方向にほぼ平行なモルタルクラックが発達し、その結果できた柱状体の座屈などの結果、供試体は崩壊する。かなり拘束圧の大きい三軸圧縮応力下では、強度破壊直前でも明らかなモルタルクラックは発生せず、供試体はモルタル部分の流動と骨材の回転、相対変位などにより崩壊すると考えられる。

- v) 一軸圧縮応力下およびそれに近い三軸圧縮応力下ではモルタルクラックがかなり発生するまで残存強度の変化は大きくない。しかし拘束圧の大きい三軸圧縮応力下では、モルタルクラックがなくともモルタル部分は変質し、残存強度の大きな低下がみられる。すなわち供試体中のクラックが粗骨材とマトリックスの境界のみに止まる間は残存強度に大きな変化はないが、モルタル部分に変質が始まると残存強度の低下は著しくなる。

- vi) シリーズAとシリーズBの供試体ではボンドクラック比、モルタルクラックの発生限界に大差はみられなかった。しかしシリーズBではボンドクラック比の検出が容易であるが、シリーズAでは識別に困難が伴った。またモルタルクラックはシリーズBでは長く幅広いが、シリーズAでは多数の細かいものが主であった。

- vii) 伸長試験では圧縮試験よりもモルタルクラックの発生が早く、かつ多い。

- viii) ボンドクラック比を尺度としてみたコンクリートの内部破壊曲面は強度破壊曲面の内部で、あるいはその一部を含み、外に向って凸な閉曲面となる。コンクリートの内部にはほぼ連続的といえる危険度の欠陥が無数に存在しており、応力の変動によってほとんど連続的に内部破壊が進行する。そのため、コンクリートの初期破壊曲面は原点を含む小さな閉曲面であり、強度破壊曲面との間に連続的な段階で内部破壊曲面が続いている。

- ix) 残存一軸圧縮強度から定義したコンクリートの破壊程度曲面もまた強度破壊曲面の内部で、あるいはその一部を含み、外に向って凸な閉曲面となる。すなわち材料の巨視的な性質である一軸圧縮強度も圧縮応力履歴によって低下し、これは応力状態が静水圧であっても同様である。

謝辞：本研究に対し終始適切なお助言をいただいた小林昭一助教授、ならびに実験に協力を頂いた中西輝雄、長岡鉦司の両君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Brandtzaeg, A., Richart, F. and Brown, R. : "The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression", Bulletin No. 190, Univ. of Ill. Engineering Experiment Station, Urbana, Ill., Apr. 1929.
- 2) Jones, R. : "A Method of Studying the Formation of Cracks in a Material Subjected to Stresses" British Journal of Applied Physics (London), Vol. 3, No. 7, July 1952, pp. 229~232.
- 3) Rüsçh, H. : "Physikalische Fragen der Betonprüfung" Zement-Kalk-Gips, Vol. 12, No. 1, 1959, pp. 1~9.
- 4) Hsu, T.T.C., Slate, F.O., Sturman, G.M. and Winter, G. : "Microcracking of Plain Concrete and the Slope of the Stress-Strain Curve", Jour. of Amer. Conc. Inst., 60, 1963 pp. 209~223.
- 5) 丹羽義次・小林昭一・小柳 治・中川浩二 : "コンクリート中の初期欠陥からのクラックの発生および発達", セメント技術年報 XXI, 1967, pp. 229~234.
- 6) 丹羽義次・小林昭一 : "ぜい性材料の破壊条件に関する考察", 材料, 16 巻, 160 号, pp. 1~7., 昭和 42 年
- 7) Paul, B. : "Fracture, 2" ed. by H. Liebowitz, Academic Press, pp. 426~445., 1969.
- 8) Glucklich, J. : "Fracture of Plain Concrete" Jour. of ASCE, EM, 6, pp. 127~138, Dec. 1963.
- 9) 丹羽義次・小林昭一・小柳 治・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,
- 10) 文献 4)
- 11) 小林昭一・小柳 治 : "コンクリートの圧縮域における破壊条件", 材料, 16 巻, 170 号, pp. 897~902., 昭和 42 年.
- 12) 丹羽義次・小林昭一・小柳 治・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, XXI, 1967, pp. 222~224.

(1970. 6. 10・受付)