三軸部分圧縮強度試験におけるコンクリートの強度

STRENGTH OF CONCRETE WITH TRIAXIAL COMPRESSION TESTS IN WHICH
SPECIMENS WERE PARTIALLY LOADED IN AXIAL DIRECTION

徳 富 久 二*

Hisashi TOKUTOMI

Triaxial compression tests on concrete were performed. The specimens of the triaxial compression tests were partially loaded in the axial direction, and the fracture strength of the concrete was investigated. The experimental results were compared with the results of an analytical method proposed by the authors. The process of the analysis was as follows: The shapes of fracture in these tests were reverse truncated cones. The stress on the cone was decided by Griffith's fracture criterion. The cone was inserted into the specimen, and the fracture mechanism began when the stress in the circumferential direction on the outside cone reached the tensile strength of the materials.

Experimental values generally agree with the analytical results. Therefore this study shows the strength of concrete is affected remarkably by Griffith's fracture criterion on the tensile strength of the materials.

keywords: Triaxial compression tests, Griffith's fracture criterion, Tensile strength, Reverse truncated cones
三軸圧縮試験、グリフィスの破壊基準、引張強度、逆円錐台

1. はじめに

コンクリートの破壊はコンクリート内部の亀裂進展による引張破壊現象として捉えられ、今日では破壊に関する研究は、亀裂の進展、その進展開放される歪エネルギーなど細部に亙り展開され、多くの知見が得られている。一方、コンクリート構造物を対象とした設計レベルからコンクリートの破壊問題を考えると、破壊現象がこれらに必ずしも実用的な意味から適用されているとは言い難い。

筆者等は、Griffithの破壊規準に基礎をおいた引張亀裂の進展を表す量としての面濃度という物理量を提案してコンクリートの破壊を解釈しようとしてきた¹⁾。また、南九州に特殊土壌として広く分布するシラスの破壊を研究する過程で、側圧の作用下で軸方向に部分圧縮する強度試験(三軸部分圧縮試験と称す)を行って、シラスのような弱結物質の破壊問題を別の角度から実験的に検討した経緯がある²⁾。前者は破壊過程について言及するものであり、後者は最終崩壊について言及するものであった。

実験的に破壊条件を決定する三軸圧縮試験も共通の破壊基準に従うものと考えられる。コンクリートの破壊条件を決定する三軸圧縮試験も試験体の形状、寸法によって、その内部の応力状態が異なり複合応力下の特定の破壊条件であると見ることができる。その元としての破壊条件の存在について検討することを考える。三軸部分圧縮試験は、試験体の周囲に側圧が作用する状態において、一般に行われる三軸圧縮試験の軸方向を部分圧縮する実験であり、部分圧縮の条件をかえて実験するとき、その結果は共通する破壊基準に支配されていると考えるものである。本報告は、三軸部分圧縮試験の解析過程をコンクリートについて適用・実験し、その解析過程におい

てGriffithの破壊基準に基礎をおいた立場から検討したものである。また、本研究は、破壊力学における古典的手法であり、コンクリートのような脆性材料にGriffithの理論を適用する研究はこれまでにかなり行われているものの、その理論を実験的あるいは解析的に研究し、実用的適用について再度考察し、研究することも必要であると考えて行ったものである。

2. 三軸部分圧縮状態の解析

コンクリートの強度試験において、破壊が引張裂け破壊過程を伴う現象であることを窺うことができる。破壊条件を調べる三軸圧縮試験は、崩壊した最終状態に着目するものであって、この結果も供試体内部における応力状態と破壊基準によって決まってくるものと考えられる。このように供試体内部の要素の各点の破壊に着目するとき、通常の三軸試験の結果から破壊基準を導き出すことは不可能である。

側圧の作用下において、通常の三軸圧縮試験の軸方向を部分圧縮する試験を行って、部分圧縮の割合(載荷率)を変えて実験を行うとき、これらに共通する条件が存在するものと考えられる。部分圧縮の載荷率とは供試体全面に載荷する試験における載荷面に対する部分的に載荷する試験の載荷面の割合のことをいい、それぞれの直径の比(載荷面の直径/供試体の直径)で表すことにする。通常の三軸圧縮試験では供試体直径10cmで載荷面の直径が10cmであるので、載荷率を10/10と表す。この載荷率を変えて実験するとき、これらに共通する破壊基準が存在し、この元になる条件が破壊基準と見るものである。ここでは、三軸部分圧縮状態の解析について述べる。

* 鹿児島大学工学部建築学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Kagoshima Univ., Dr. Eng.

2.1 崩壊形と解析仮定

部分圧縮する場合の崩壊形は、載荷板下でくさびが形成され、これが圧入するように崩壊することが、シラスやコンクリートの実験から推測される。写真-1は今回の実験における一般的崩壊形状である。写真右は左部分の崩壊した箇所を取りだしたもので、写真左よりおよそその崩壊形状が判る。くさびが上下に形成され、それらが互いに相貫するように形成されることが見られる。崩壊の形状は、くさび周辺と載荷板中央から放射状に伸びる数本の亀裂であり、その亀裂は写真(写真上部)に示すように3~4本で、くさびの外部において上下に連続する。

写真-1 三軸部分圧縮試験によるコンクリート試験体の崩壊状況

このような破壊形状を元に、図-1に示すようなくさびが形成されるものとする。図は試験体の1/4部分について示すものである。崩壊する状態における力の釣合は、くさび部分の釣合とその周辺部の釣合とから考えられる。

解析の仮定として、実験した崩壊形を理想化して次のように仮定する。厳密には仮定した応力には、応力の分布が存在することも考えられるが、その根拠を持たないため以下のように仮定する。

- 上下の載荷板の下に形成されるくさびの形状を逆円錐台状とし、これに一樣の垂直応力(σ)とせん断応力(τ)が作用するものとする。
- くさびに作用する載荷板からの荷重を P とし、一樣な分布力(p)が作用するものとする。
- くさびの底面($B'D'$)に作用する反力を F_c として、これも一樣に分布する(f_c)ものとする。
- くさび外側の台形($CDD'C'$)部分は、円周方向に引張応力を生じる。

くさびを形成する境界における垂直応力(σ)とせん断応力(τ)の関係をくさび形成条件と呼ぶこととする。このくさび形成条件は不明であるが、くさびは剛体的に圧入することが考えられる。載荷率を変えた実験を行うとき、双方の結果から共通のくさび形成条件を求めることができるが、本報告では後で述べるように Griffith の基準をくさび形成条件として採用した。

2.2 解析

図-2はくさび部分の力の作用方向および寸法関係を示すものである。図のように、崩壊荷重による分布力を p 、その合力を P とする。またくさび同士の交差部分(逆円錐台下部)に作用する分布力を f_c と

図-1 三軸部分圧縮状態のくさび形成と力の釣合

し、その合力を F_c とする。くさび部分に作用する垂直応力(σ)とせん断応力(τ)の y 方向成分を $yf(\sigma, \tau)$ とする。くさび部分に作用する垂直応力(σ)とせん断応力(τ)の分布における一樣性の保証はないが、平均化した垂直応力とせん断応力と考えて解析する。

くさび部分について、 σ と τ による $l-l'$ 軸に関するモーメントを求める。図のように、載荷板の半径を a 、供試体の半径を ϕa 、供試体の高さを $2ha$ とする。くさび形成位置(図の $A'B'$ の延長と $l-l'$ 軸の交点)が載荷面から $b \cdot a$ の距離にあるものとして b を くさび形成位置と呼ぶことにすると、 y の位置で、微小部分 ds に作用する力($\Delta yf(\sigma, \tau)$)を求める。図のように、 σ, τ による y 方向の力を $yf(\sigma, \tau)$ とするととき、

$$yf(\sigma, \tau) = \sigma \cdot \sin \alpha + \tau \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots (1)$$

であり、この力が半円周に作用し、またこの力の重心は、 $l-l'$ 軸からの距離を X_g とし、半径を r とするとき、

$$X_g = 2r/\pi \quad \dots\dots (2)$$

図-2 くさび部分の力の釣合および記号

であり、微小部分 ds に作用する力($\Delta yf(\sigma, \tau)$)は、円周方向の長さ $\pi \cdot y/b$ を乗じて

$$\Delta yf(\sigma, \tau) = yf(\sigma, \tau) \cdot ds \cdot \pi \cdot y/b \quad \dots\dots (3)$$

で与えられる。 ds に作用する $l-l'$ 軸のモーメント($\Delta yM(\sigma, \tau)$)は、 $ds=dy/\cos \alpha$ と (2)、(3)式により

$$\Delta yM(\sigma, \tau) = -2 \cdot yf(\sigma, \tau) \cdot dy/\cos \alpha \cdot y^2/b^2 \quad \dots\dots (4)$$

である。したがって σ, τ による $l-l'$ 軸まわりのモーメント($M(\sigma,$

τ)は、

$$\begin{aligned} M(\sigma, \tau) &= -\int \Delta_y M(\sigma, \tau) \\ &= -2 \cdot y f(\sigma, \tau) / (b^2 \cdot \cos \alpha) \cdot \int_{(b-h)/a}^{b/a} y^2 \cdot dy \\ &\equiv \overline{AA} \cdot y f(\sigma, \tau) \quad \dots\dots (5) \\ \overline{AA} &= -2/3 \cdot (a/b)^3 \cdot (b^3 - (b-h)^3) \cdot (1+b^2) \end{aligned}$$

つぎに、半径 r の半円に作用する垂直分布荷重度(p)の重心位置は、 $l-l'$ 軸からの距離 y として

$$y = 4r/(3\pi) \quad \dots\dots (6)$$

したがって、分布荷重度(p)による $l-l'$ 軸まわりのモーメント(M_p)は、

$$\begin{aligned} M_p &= p/2 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot 4a/(3\pi) \equiv \overline{BB} \cdot p \quad \dots\dots (7) \\ \overline{BB} &= 2a^3/3 \end{aligned}$$

で与えられる。同様に、 f_c による $l-l'$ 軸まわりのモーメント(M_{fc})は、

$$\begin{aligned} M_{fc} &= -2/3 \cdot (b-h)^3 \cdot a^3/b^3 \cdot f_c \equiv \overline{CC} \cdot f_c \quad \dots\dots (8) \\ \overline{CC} &= -2/3 \cdot (b-h)^3 \cdot (a/b)^3 \end{aligned}$$

式(5)、(7)、(8)よりモーメントの釣合は、

$$\overline{AA} \cdot y f(\sigma, \tau) + \overline{BB} \cdot p + \overline{CC} \cdot f_c = 0 \quad \dots\dots (9)$$

である。

軸方向の力の釣合をくさび部分について求めると、 p による荷重(F_p)は、

$$\begin{aligned} F_p &= -1/2 \cdot p \cdot \pi \cdot a^2 \equiv \overline{DD} \cdot p \quad \dots\dots (10) \\ \overline{DD} &= -1/2 \cdot \pi \cdot a^2 \end{aligned}$$

σ, τ による力($F(\sigma, \tau)$) は、

$$\begin{aligned} F(\sigma, \tau) &= \int_{(b-h)/a}^{b/a} y f(\sigma, \tau) \cdot ds \cdot \pi \cdot y/b \\ &\equiv \overline{EE} \cdot y f(\sigma, \tau) \quad \dots\dots (11) \\ \overline{EE} &= 1/2 \cdot \pi \cdot h \cdot (a/b)^2 \cdot (2b-h) \cdot (1+b^2) \end{aligned}$$

f_c による力(F_{fc})は、

$$\begin{aligned} F_{fc} &= f_c \cdot 1/2 \cdot \pi \cdot (a/b)^2 \cdot (b-h)^2 \equiv \overline{FF} \cdot f_c \quad \dots\dots (12) \\ \overline{FF} &= 1/2 \cdot \pi \cdot (a/b)^2 \cdot (b-h)^2 \end{aligned}$$

したがって、 y 方向の力の釣合は、式(10)、(11)、(12)より、

$$\overline{DD} \cdot p + \overline{EE} \cdot y f(\sigma, \tau) + \overline{FF} \cdot f_c = 0 \quad \dots\dots (13)$$

式(9)および(13)より f_c を消去して、

$$p = (\overline{CC} \cdot \overline{EE} - \overline{FF} \cdot \overline{AA}) / (\overline{BB} \cdot \overline{FF} - \overline{CC} \cdot \overline{DD}) \cdot y f(\sigma, \tau) \quad \dots\dots (14)$$

となる。

つぎに、くさび周辺部の力の釣合について考える。

図-3はくさび周辺部の力の作用方向・釣合関係を示す。半径方向の力の釣合について考える。くさび斜面上の応力(σ, τ)による x 方向の応力を $x f(\sigma, \tau)$ とすると、

$$x f(\sigma, \tau) = \sigma \cdot \cos \alpha - \tau \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots (15)$$

図-3に示すように、半径方向に $x f(\sigma, \tau)$ 、 P_0 (側圧)が作用する。これらを f として表すと、半径 r における合力は $2 \cdot f \cdot r$ であり、 $x f(\sigma, \tau)$ による半径方向の合力($R(\sigma, \tau)$)は、

$$\begin{aligned} R(\sigma, \tau) &= \int \int_{(b-h)/a}^{b/a} 2 \cdot x f(\sigma, \tau) \cdot y/b \cdot ds \\ &\equiv \overline{GG} \cdot \sigma + \overline{HH} \cdot \tau \quad \dots\dots (16) \\ \overline{GG} &= h \cdot a^2/b \cdot (2b-h), \quad \overline{HH} = -h \cdot (a/b)^2 \cdot (2b-h) \end{aligned}$$

となる。

同様に、側圧(P_0)による半径方向の力(R_{P_0})は、

$$\begin{aligned} R_{P_0} &= -\int_0^\pi P_0 \cdot h \cdot a^2 \cdot \phi \cdot \cos \theta \cdot d\theta \equiv \overline{II} \quad \dots\dots (17) \\ \overline{II} &= -2 \cdot h \cdot a^2 \cdot \phi \cdot P_0 \end{aligned}$$

つぎに、図-3 a)の台形AIJC、BLKD部分には引張応力が働くことが

図-3 くさび周辺部の力の釣合および記号

写真-1の崩壊形から考えられる。この引張応力は、図-3 b)において、 $\beta \cdot f_t$ の作用する応力による力としてくさび周辺部において釣り合う。この合力(R_{ft})は、図-3 a)の斜線部の面積にたいして引張強度(f_t)の β 倍の応力が平均的に作用するととして、以下のように求めておく。これはこの部分の引張応力が試験条件によって変化する場合を想定するものである。

$$\begin{aligned} R_{ft} &= -2 \cdot h \cdot a^2 \cdot (\phi - 1 + h/(2b)) \cdot \beta f_t \\ &\equiv \overline{JJ} \cdot f_t \quad \dots\dots (18) \\ \overline{JJ} &= -2 \cdot h \cdot a^2 \cdot (\phi - 1 + h/(2b)) \cdot \beta \end{aligned}$$

コンクリートと載荷板との摩擦力を考える。荷重の初期段階では、くさび部分の水平方向のつりあいは、図-3 a)の円錐台のIJKLの台形部分にくさび円錐台斜面の垂直応力(σ)とせん断応力(τ)の水平成分とつりあう圧縮応力が作用して釣り合っている。後述するように、コンクリートと載荷板の摩擦力は、コンクリート試験体が荷重の増大によって、半径方向の変位に対してこれを拘束するように発生するものとする摩擦力である。したがって、くさび部分について考えると、摩擦力に釣り合う水平方向の力は、くさび部分に作用

する水平力と釣り合う。この場合実際は斜面上の垂直応力とせん断応力として作用し、その水平合力が摩擦力と釣り合うと考えられる。このように、実際は摩擦力の存在しないときの応力と摩擦力による応力の和として存在するものであるが、ここでは分離して考える。同時にこれは、くさび周辺部へ影響し、くさび周辺部への水平力として作用する。

負の方向に同一の力の作用として、この摩擦力を F として、

$$\overline{KK} = -F \quad \dots\dots(19)$$

とする。これら式(17)、(18)、(19)、(20)より、くさび周辺部の力のつりあいは、

$$\overline{GG} \cdot \sigma + \overline{HH} \cdot \tau + \overline{II} + \overline{JJ} + \overline{KK} = 0 \quad \dots\dots(20)$$

となる。

くさび形成条件は載荷率を変化させた実験から求められるものがあるが、ここでは破壊基準式を予め想定して解析する。コンクリートの破壊に引張破壊が大きく寄与するものであるとすると、引張破壊基準として広く知られる Griffith の破壊基準との関係から推定することが考えられる。Griffith の破壊基準は偏平楕円クラックに応力が集中したときの引張破壊条件として求められたもので、材料内の一点がこの条件となる場合の条件であると捉えることができ、ガラスのように極端な脆性を示す材料では一点の破壊が終局破壊に到達し、Griffith の破壊基準と崩壊荷重が適合するが、コンクリートのような材料では、一点の破壊によって系全体の破壊に至ることはない。ここでは、Griffith の破壊基準を修正して、つぎのようにくさび形成条件として表す。引張強度を f_t 、脆性度による修正係数 k_g を導入して、また本解析における符号を考慮すると、

$$\tau^2 = 4 \cdot k_g \cdot f_t \cdot (\sigma + f_t) \quad \dots\dots(21)$$

となる。これと式(21)から σ 、 τ を求めることができる。したがって、式(14)は、 $\gamma f(\sigma, \tau)$ を書き換えて、

$$p = (\overline{CC} \cdot \overline{EE} \cdot \overline{FF} \cdot \overline{AA}) / (\overline{BB} \cdot \overline{FF} \cdot \overline{CC} \cdot \overline{DD}) \cdot (\sigma \cdot \sin \alpha + \tau \cdot \cos \alpha) \quad \dots\dots(22)$$

となり、 σ 、 τ を代入して軸方向応力度(p)を求めることができる。

くさび形成位置(b)を種々に変化させ、鉛直荷重度(p)を計算するとき、各くさび形成位置によって崩壊荷重が計算される。計算された崩壊荷重 p の最小値が、求める崩壊荷重となる。このことにより、崩壊荷重は引張強度によって定義できることになる。

§3. コンクリートの三軸部分圧縮試験

三軸部分圧縮装置を設計・製作して、軸方向載荷面積を変化させた三軸部分圧縮試験をコンクリートについて実施した。

3.1 使用材料と試験体の作製

使用材料は表-1に示す一般的コンクリート 1種類について同時に全試験体を作製して、変動を極力避けようとするものである。

供試体は図-4 に示すように、3種類である。供試体は直径10cmとする円柱であり、図のように高さが異なる。図の塗りつぶした部分

は部分圧縮部である。供試体の高さは載荷部分の直径の2倍の寸法とする。図-4 a) は部分載荷率(γ :載荷部分の直径/試験体直径)が10/10、図-4 b) は $\gamma=8/10$ 、図4 c) は $\gamma=6/10$ であるので、高さをそれぞれ20、16、12cmとするものである。図には供試体への側圧と軸圧としての荷重の作用方向を矢印で模式的に示している。

表-1 試験体コンクリートの調合表 (kg/m^3)

スラブ° (cm)	水比 (%)	水 (kg)	セメント (kg)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)	空気量 (%)
18	65	195	300	759	998	4

混和剤: 丸ノボ-ルEX20-4 使用

供試体数は4試験条件につき各3個の合計12個づつ、総計36個と割裂引張試験用の供試体15個の計51本と予備の供試体である。コンクリートの条件を均一にするため、生コンにより一気に打設した。コンクリート打設後24時間室内放置したのちに脱型し、35日間水中養生($20 \pm 1^\circ \text{C}$)を行う。その後養生室内に空中放置した。

図-4 コンクリート供試体形状・寸法と載荷状態

3.2 実験方法

割裂引張試験は、JIS A1113による引張強度試験方法によった。三軸部分圧縮試験との対応を見る目的をもつので三軸部分圧縮試験を行った材令の試験体について強度試験を行った。

図-5 は、三軸部分圧縮試験装置の概要を示す。試験装置は三軸室、側圧装置、軸圧装置の三部分よりなる。エアーハイドロプースターによってウォーターリザーバーの水を高側圧化して三軸圧縮室に導入することができる。軸方向載荷装置はアムスラー型圧縮試験装置である。

三軸部分圧縮室は、図-6 に示す装置を設計・製作した。この装置は供試体(図のA、B)に載荷棒からの軸力を部分載荷板を通して作用させる。Aは部分載荷率が10/10の全面載荷状態の試験を、Bは部分載荷率が8/10の部分載荷状態を示す。Bの部分載荷試験は部分載荷板がスライドするCとDの部分に分かれている。この状態を右図に拡大して示す。部分載荷率に応じて載荷板が異なることはもちろん、載荷板ガイドも変化し、これらを含めた載荷治具の直径は供試体の直径となる。

供試体と載荷治具のガイド部全体にゴムスリーブを被せて水漏れを防ぐ硬質ゴム輪で固定する。

実験順序は、供試体をセットした三軸圧縮室を軸方向載荷装置である耐圧試験機に設置する。徐々に側圧を作用させるがその側圧と

図-5 三軸部分圧縮試験装置全体図

図-6 三軸部分圧縮室

同一応力になるように軸圧を加える。所定の側圧に達した後に、軸方向荷重を増大させ崩壊まで至らしめる。側圧は、4段階(0、20、40、60 kg/cm²)、各段階、載荷率について供試体 3本を目標に実験する。

計測は、作用させた側圧(エアハイドロプスターからの側圧)、と載荷板上部に設置した荷重計(ロードセル)で計測される軸方向荷重である。

実験は、強度の変動がないように5日間で終了し、試験順序は各条件をランダムに振り分けて行った。

3.3 実験結果

割裂引張試験の結果を表-2に示す。三軸部分圧縮試験を行ったときに割裂引張試験を行うものである。通観して試験日における強度のバラツキは認められない。引張強度の平均は 27.1 kg/cm²である。

表-2 割裂引張強度試験結果 (kg/cm²)

1	2	3	4	5
25.1	24.6	24.5	22.6	27.1
32.9	29.6	24.2	27.7	21.4
32.6	27.3	28.1	30.1	28.7

平均 27.1 kg/cm²

三軸部分圧縮試験の結果を表-3に示す。三軸部分圧縮試験は、各試験条件について3本の結果を目標として行ったが、側圧が大きくなるにしたがって(特に、40kg/cm²と60kg/cm²において)、試験が困難となった。追加実験を行って欠測値を補うよう努めたが、準備した試験体が不足したため、表に示すような結果となった。

実験が困難な主たる原因は、ゴムスリーブからの圧力の漏れとエアハイドロプスターによる側圧の不安定性であった。

図-7は横軸に側圧、縦軸に崩壊荷重をとって結果を整理したものである。実験が困難であったため、結果のばらつきが大きいものの、

表-3 三軸部分圧縮強度試験の崩壊荷重度(kg/cm²)

γ	No	側圧 (kg/cm ²)			
		0	20	40	60
6/10	1	391.4	813.5	753.3	—
	2	433.9	834.7	753.3	—
	3	534.1	642.5	699.6	900.7
8/10	1	397.2	535.2	—	716.2
	2	423.8	547.1	599.5	771.2
	3	293.8	608.1	635.3	—
10/10	1	247.9	318.7	396.8	472.8
	2	215.2	473.7	424.8	506.8
	3	275.9	417.6	356.5	—

図中に示すように直線で近似して、 p を崩壊荷重、 P_0 を側圧とすると以下になる。

$$\gamma=10/10 \quad \text{で} \quad p = 3.61 \times P_0 + 275 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$8/10 \quad // \quad p = 5.94 \times P_0 + 398 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$6/10 \quad // \quad p = 6.76 \times P_0 + 514 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

図-7 三軸部分圧縮強度試験の結果

§4. コンクリートと載荷板の摩擦力

シラス供試体における三軸部分載荷実験では、シラスと載荷板の接触による摩擦力が崩壊荷重に与える影響は相対的に小さく、摩擦力が問題になることはなかった。しかしながら、コンクリート供試体ではこの摩擦力が崩壊荷重に影響し、意味を持つようになると思われる。ここでは解析に用いる載荷板とコンクリートとの摩擦力について検討する。

4.1 摩擦力の合力

コンクリートの三軸部分圧縮強度の解析にあたって必要とする摩擦力は、載荷板中心方向に作用する摩擦力(F)を求めることである。

単位面積あたりの摩擦力が、半径方向に比例すると仮定するとき、半径方向 r の位置では摩擦応力が $k \cdot r$ で表されるとすると、図-8のように微小部分について

$$F = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} \int_0^a k r \cdot dr \cdot r \cdot d\theta \cdot \cos\theta = 2/3 \cdot k \cdot a^3 \cdots (23)$$

で与えられる。

図-8. 摩擦力の合力

図-9. 有限要素分割

比例定数 k は、載荷板に作用する垂直応力によって変化する。載荷板に作用する垂直応力と摩擦力の関係を、有限要素法によって求める。図-9 のような要素数を280、節点数を165 とする要素分割によって求める。摩擦力の算定には一定の垂直荷重を作用させることにより端面が水平に変位する量と、半径方向に比例する水平荷重を作用させたときの水平変位を等置することによって摩擦力を評価するものである。

図-10 は垂直荷重と水平荷重の作用下における水平変位を表したものである。垂直荷重は 100kg/cm^2 の分布荷重を、水平荷重は $10\text{kg/cm}^2/\text{cm}$ の中心から比例した荷重を作用させたものである。F.E.M弾性解析における水平変位は 100kg/cm^2 の垂直応力を作用させた場

図-10 F.E.M解析による垂直、水平応力作用下の水平変位

合には図のように載荷板周辺の変位が比例関係にあることが判る。一方、中心から比例した水平力を作用させた場合の水平変位は図のように、載荷板周辺の変位が比例関係から逸脱するが、これもほぼ比例するものとみなして解析した。節点 9, 20 の垂直応力による変

位は、 $5.49 \times 10^{-4}\text{cm}$ であり、点線の節点 9, 20 の変位は $9.47 \times 10^{-4}\text{cm}$ である。したがって、 $100 \times 9.47 / 5.49 (\text{kg/cm}^2)$ の垂直応力作用の下での変位が $10\text{kg/cm}^2/\text{cm}$ の中心から比例する水平応力作用下の水平変位と等価である。これを、 $q (\text{kg/cm}^2)$ の垂直応力作用の場合に換算すると、

$$10q / (100 \times 9.47 / 5.49) = 0.0580 \cdot q = k \cdots (24)$$

となり、摩擦力(F)は

$$\begin{aligned} F &= 2/3 \cdot k \cdot a^3 \\ &= 2/3 \cdot a^3 \times 0.0580 \times q \quad (\text{kg}) \end{aligned} \cdots (25)$$

ここに、 a : 円形載荷板の半径 (cm)
 q : 載荷板に作用する垂直応力

となる。

§5. 実験結果の検討

三軸部分圧縮試験の解析過程を使用して、実験結果を検討する。

5.1 実験結果と計算結果の比較

計算仮定は、くさび形成条件としてGriffithの破壊基準を導入することと、コンクリート供試体と載荷板の摩擦力を考慮することである。これまでのシラスの解析では実験によってくさび形成条件を決定するものであり、また供試体と載荷板の摩擦力は無視していた。くさび形成条件として、実験から求められる新たな提案も考えられるが、既にある破壊基準を適用し検証することが必要である。ここでは新たに、基準を求めるものでなくGriffithの破壊基準をくさび形成条件に導入して検討した。また、Griffithの破壊基準は引張破壊から求められた基準であるので、引張破壊で統一されることになることも導入の契機である。

Griffithの破壊基準の導入とは、(20)式の垂直応力(σ)とせん断応力(τ)、すなわちくさび形成条件である σ と τ にGriffithの破壊基準式(21)を適用するもので、再掲すると

$$\overline{GG} \cdot \sigma + \overline{HH} \cdot \tau + \overline{II} + \overline{JJ} + \overline{KK} = 0 \cdots (20)$$

$$\tau^2 = 4 \cdot K_0 \cdot f_t \cdot (\sigma + f_t) \cdots (21)$$

から、ここに Griffith 式の符合は解析の符合を採るものである。これらの式よりくさびを形成する条件の σ と τ を求める。(21)式は材料によって異なる修正係数として K_0 を導入してあるが、本報告の解析では $K_0=1.0$ としてGriffith式そのものを使用した。

計算方法は所定の載荷条件(供試体形状、載荷率)、引張強度、摩擦係数、側圧を特定するとき、くさび形成位置(b)を仮に設定し、はじめにコンクリートと載荷板の摩擦力が働かないものとして垂直力(q)を求める。つぎの段階からは、計算された垂直力(q)に相当する摩擦力が働くとして、垂直力(q)を算出する。この操作を繰り返し、くさび形成位置における収束した垂直応力を求める。くさび形成位置(b)を変化させ q を計算したとき、 q の極小値が載荷条件における崩壊荷重となる。

5.2 三軸部分圧縮試験結果について

解析は、引張強度のみによって崩壊荷重が決まるものである。したがってコンクリートの三軸部分圧縮試験の結果は引張強度が特定

されると各側圧毎の崩壊荷重を求めることができ、試験結果と比較できる。一方解析過程では、くさび周辺部の台形部分に作用する引張強度の分布を一樣に仮定している。くさび周辺部の力のつりあいに関しては、半径方向のつりあいのみを取り扱っているため、分布が一樣でない場合は式(18)のように $\beta \cdot f_t$ に表れる。しかしながら、この係数はくさびの形成位置によって変化するものであるため一義的に決めることができない。図-11は、側圧が引張強度の5倍まで変化するときの β の変化に伴ってくさび形成位置の変化の様子を示す。

図-11 側圧、 β とくさび形成位置の関係

載荷率が $\gamma=10/10$ の場合では、側圧が0のとき、 β が0から1の範囲でくさび形成位置は、2.0から2.2の範囲をとることが判る。大きく変化するの、載荷率が $\gamma=6/10$ の側圧が0の場合であり、1.9 から2.4までの範囲を採る。

このような範囲のくさび形成位置をとるときの、くさび周辺部台形部分の円周方向の応力を、図-12のような分割によるF.E.M解析によって求め、比較検討した。図の陰影をした要素のヤング係数をその他の部分のヤング係数の1/10とした弾性解析である。

図は載荷率が $\gamma=10/10$ の場合であり、 γ が8/10、6/10の場合は同様の分割であるので省略する。このようにして計算された結果を図-13に示す。

結果は載荷面からの距離に対する層ごとの平均応力を表し、その応力が最大値を採る応力を1として表すものである。 γ が10/10では載荷面近傍において最大引張応力を生じ、 γ が6/10では最大引張応力が生じる層は供試体の中心部となることが判る。バラツキがあるものの、同一載荷率においては、くさび形成位置によって極端に円周方向応力が異なる結果となるとは判断されない。したがって、実線のように、載荷率毎の平均値によって表すことにし、平均引張応力を求め、 β を求めた。

図-12 くさび形成位置の違いによる円周方向の解析

図-13 くさび周辺台形部の円周方向引張応力

解析過程はくさび周辺の円周方向台形部分が一樣な引張強度に達したとき破壊すると仮定するものであった。ここで均等分布しない場合は、最大の引張応力が引張強度に達するとき破壊が開始すると考える。図-13 はこのような意味から計算された引張応力の最大値を1として表現したものである。このとき平均引張応力は最大引張応力の β 倍として先の計算過程に組み込まれる。平均引張応力は台形部分の面積を考慮した応力であり、これを求めると、 β は $\gamma=10/10$ で $0.13 \cdot f_t$ 、 $\gamma=8/10$ で $0.65 \cdot f_t$ 、 $\gamma=6/10$ で $0.79 \cdot f_t$ となる。

また、この計算結果は γ が6/10では載荷面付近に圧縮応力が生じている。計算過程は台形部分の面積を考慮しているので $0.79 \cdot f_t$ を使用したとき、小さく評価されることになる。したがって、 0.79 を台形の面積比に換算して、 β を決定した。この場合は 0.89 となる。同様に、 γ が10/10の場合の $0.13 \cdot f_t$ は大きく評価されていることになる。この場合についても面積比で換算する。 γ が10/10のときは換算した結果は誤差範囲内であり、結果は変わらない。

結局、 β は

$\gamma=10/10$	で	$0.13 \cdot f_t$
8/10	//	$0.65 \cdot f_t$
6/10	//	$0.89 \cdot f_t$

とする。

割裂引張強度は実験した平均強度が 27 kg/cm^2 である。 γ が、10/10の側圧 0 kg/cm^2 のとき、これは圧縮強度に相当するものであり、平均は 276 kg/cm^2 である。この圧縮強度と割裂引張強度を比較すると、引張強度の数値が高い結果となっている。圧縮強度が $270 \sim 280 \text{ kg/cm}^2$ の一般的な割裂引張強度は $22 \sim 26 \text{ kg/cm}^2$ であることから、解析に使用した引張強度は 24 と 27 kg/cm^2 の2種類について解析した。

以上の仮定した数値を使用して、三軸部分圧縮強度における解析過程によって各試験条件について計算する。

図-14はくさび形成位置(b)による、側圧毎の崩壊荷重の変化を図示したものである。くさび形成位置は側圧の増大とともに増加することが判り、側圧が0の場合でもくさび形成位置(b)は、2付近である。くさび形成位置が2のとき、円錐状のくさびとなり、側圧の増加によって、円錐台状になることが判る。これらの側圧毎の最小崩壊荷重が求める荷重(強度)である。この例は γ が10/10、引張強度を 24 kg/cm^2 としたときである。

このようにして試験条件、側圧毎の強度の結果を図-15に示す。実

図-14 くさび形成位置(b)と崩壊荷重(p)の関係

図-15 三軸部分圧縮強度試験の結果と計算結果

線が引張強度が 27kg/cm^2 、点線が 24kg/cm^2 の場合である。

γ が $8/10$ と $6/10$ では解析値が実験値を下まわるように現れる。引張強度の大小関係はそのまま解析値の大小関係となって現れることは当然の結果である。

図-16 は $\gamma=6/10$ のときの得られた実験結果から推定される、95%信頼限界であり、解析値は実線と点線で表される。解析値はおおよそ信頼限界内にあることが判る。すなわち、実験値のばらつきの状態を考えると、解析値は実験値の母集団から出現していないと結論

図-16 信頼限界 ($\gamma=6/10$)

づけることができない、棄却できないことを意味している。解析値との差が大きい $\gamma=6/10$ におけるこの結果はその他のばらつきの少ない試験条件の場合にはさらに良い適合度を示すものである。およそ解析値が実験の範囲内ではあるが妥当なものであることを示す。

以上より、解析値と実験値がよく一致するものではないが、実験値のばらつきを考慮するとおよそ解析値は実験値を代表する傾向を示すものと考えられる。

§6. 結論

シラスの破壊問題から発生した三軸部分圧縮試験の解析過程をコンクリートの破壊、特に圧縮強度に適用して考察した本報告は、コンクリートの破壊を引張強度に起因することに根拠をおいて解釈したものである。圧縮試験体内部に生じるくさびの形成条件に Griffith の破壊基準を導入して、周辺の拘束状態によって引張裂け破壊による崩壊状態を定義して解析する、いわゆる引張強度のみに依存した解析である。

くさびの圧入によるくさび周辺応力解析にあたって仮定したくさびの形状、引張応力の分布など、多くの解析仮定を設けた解析であるなど、厳密な適用とは云えないものの、これまでに述べた結果を取りまとめ、その結果から発展して考えられることを示すと、

(1) 本研究はコンクリートにおける三軸部分圧縮試験を行って、解析値と比較検討した。この結果、およそ解析値が実験値を代表するものであると考えられる。

(2) またこのことは試験条件を変化させて実験を行い、破壊形状からモデルを仮定して、Griffithの破壊条件を導入して解析したとき、実験結果は解析結果から出現していることを棄却できないとすることができるもので、このことは、コンクリートの破壊が、これまで指摘されてきたように、引張強度に起因するものであることを示す。実用的には複合応力下における共通の破壊基準として、Griffithの破壊基準に支配されるものとして大局的に捉えることができる。

(3) コンクリートと載荷板の摩擦力によって結果が左右され、試験体形状による三軸部分圧縮強度の変化は摩擦によって異なることが判る。解析仮定には、コンクリート供試体と載荷板の摩擦力の効果が含まれるもので、従来より指摘されているこの摩擦力の圧縮強度に与える影響を考察することができる。

(4) 引張強度によって三軸圧縮試験の強度を推定することができる。また、解析は、Griffithの破壊基準をクラック発生条件とするくさびの圧入によって、くさび周辺に生じる引張領域が材料(ここではコンクリートの)の引張強度に到達するときに崩壊するとしたものであり、引張強度のみによって破壊基準を表すものである。三軸圧縮試験の結果も引張強度から推定が可能となる。

参考文献

- 1) 藤松 進、徳富久二 : コンクリートの破壊条件に関する位相化面モーメント仮説、日本建築学会論文報告集、第219号、1974
- 2) 徳富久二 : 三軸部分圧縮強度試験による地山シラスの力学的特性、日本建築学会論文報告集、第370号、1986.12

(1996年11月10日原稿受理、1997年4月16日採用決定)