

論文 内部欠陥を有するコンクリート圧縮破壊性状に関する研究

長谷川正人*¹, 丸山久一*², 池田清宏*³

要旨: コンクリート及びモルタルの応力-ひずみ曲線が、分岐理論の初期不整感度則に対して高い適合性を示すことから、コンクリート及びモルタルの圧縮強度は分岐現象に支配されていることが分かってきている[1]。そこで本実験では単一粒径の粗骨材の粒径をパラメータとして、強度が分岐現象に支配されるか否か、またその支配される度合いがパラメータの値によってどのように変化するかについて調べた。

キーワード: 分岐理論、初期不整、単一粒径の粗骨材、応力-ひずみ曲線、圧縮強度

1. はじめに

近年、特に混和材料の進歩によってコンクリートの多様化が進み、高流動コンクリート、超高強度コンクリートといった新しいタイプのコンクリートが使用されるようになってきた。しかしコンクリートの力学的性質特に変形挙動や耐荷性状については従来と同じ標準シリンダー供試体の性状に基づいて、実験的に定められたにすぎない。

一方、粒状体の滑り線形成に関する広範な研究から、その破壊のメカニズムが分岐現象に支配されていることが明らかになっている。池田ら[2,3,6]は初期不整が十分小さい場合には初期不整の影響が分岐方程式により完全に記述できるとし、実験や解析結果に基づいてパラメータを求めることにより、応力ひずみ曲線を近似する漸近近似法を提案し、また、分岐現象に従う場合の強度の確率密度関数を導くことにより確率論的な検討を可能にしている[4]。

石田他[1]はこの理論をコンクリートの一軸圧縮試験結果へ適用し、低強度コンクリートの圧縮強度が分岐により支配されていることを明らかにしている。本研究では池田ら[6]の理論を各種パラメータを変えて行ったコンクリートの一軸圧縮試験に適用することにより、どのような場合にその強度が分岐により支配されるか、またその支配される度合いがパラメータの変化によりどのように変化するかを調べることをとする。

2. 分岐理論

2.1. 不安定分岐点と応力-ひずみ曲線

まず材料の力学的挙動(荷重-変位)が分岐現象に支配されている場合の例を図1に示す。分岐現象とは荷重-変位曲線が枝分かれする現象であり、枝分かれする釣合い点を分岐点と呼ぶ。分岐は分岐経路の傾きによって安定分岐(傾きが正)と不安定分岐(傾きが負)に分けられ、図1は後者の例である。不安定分岐の場合、釣合い経路は極大点を持つ。材料の状態及び構造系が理想的であると、その荷重-変位曲線は図1の太線の様な完全系の経路を辿る。実際には材料には種々の不均質さ、欠陥等が存在するため、細線の様な釣合い経路(不完全系の経路)を辿る。不完全系の釣合い経路に対して、完全系からのずれを初期不整変数 ε と定義する。初期不整変数 ε は形状の狂い、材料の不均質さ、境界の不整等の種々の影響の重ね合わせを表す1次元量である。但し、この具体

*1 大成建設(株) 工修(正会員)

*2 長岡技術科学大学教授 工学部建設系、Ph.D.(正会員)

*3 東北大学教授 工学部土木工学科、Ph.D.

的な値を実際の供試体に対して定義することは、現時点では非常に困難である。図1に初期不整変数 ε が荷重-変位曲線に及ぼす影響を概念的に示す。図1に示す直線 $\delta P + h\delta u = 0$ 上の完全系の分岐点からのひずみの変動量 $\delta u|_{\delta P + h\delta u = 0}$ とピーク応力の完全系の分岐点からの変動量 δP_c はともに初期不整変数 ε の関数であるので、両関係式から ε を消去することにより、この両変動量の関係に対する式が誘導される[2]。

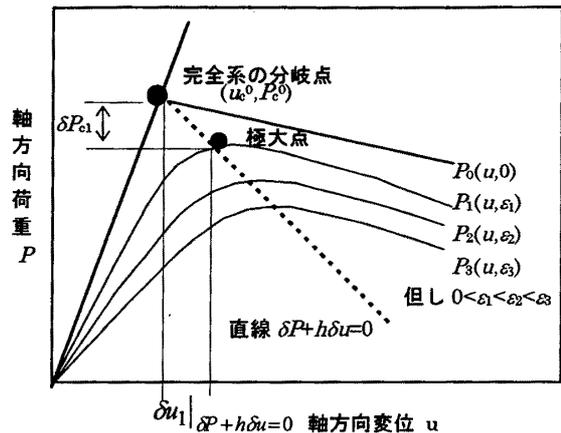


図1.初期不整と荷重-変位曲線

2.2. 初期不整感度則

分岐現象に支配される荷重-変位曲線(釣合い経路)は分岐方程式によって表される。池田ら[6]は構造系の非線形の釣合式から、分岐現象の釣合い経路を表す分岐方程式(1)を誘導している。

$$\left| \delta u - \frac{\delta P}{E} \right| \delta P + p \left| \delta u - \frac{\delta P}{E} \right|^{3/2} + q\varepsilon + \text{高次項} = 0 \tag{1}$$

ここに、 $\delta u \equiv u - u_c^0$ 、 $\delta P \equiv P - P_c^0$ 、 u は軸方向変位、 P は軸方向荷重、 ε は初期不整変数をそれぞれ表わす。また、 p 、 q 、 E はパラメータである。分岐方程式(1)を用いて、次の関係式が導かれる[2]。

$$\delta P_c \equiv P_c - P_c^0 = - \left(\frac{27pq^2}{4} \right)^{1/3} \varepsilon^{2/3} + \text{高次項} \tag{2}$$

ここに δP_c は完全系の分岐荷重 P_c^0 と不完全系の極大点の荷重 P_c の差、 δu_c は完全系の分岐点 u_c^0 と不完全系の極大点の変位 u_c の差である。式(2)は δP が漸近的に ε の $2/3$ 乗に比例することを表す Koiter が発見した有名な法則である[5]。分岐点を通る直線 $\delta P + h\delta u = 0$ における変位に対する式と上述の漸近則(1), (2)より

$$\delta u|_{\delta P + h\delta u = 0} \propto (-\delta P_c) \tag{3}$$

という比例関係が求まる。この比例関係が認められるものは、分岐現象であると考えられる。

2.3. 圧縮強度の確率密度関数

(3)式を実験結果に適用するためには、ケースごとに完全系の分岐荷重(圧縮強度) P_c^0 が得られていなければならない。この完全系の分岐荷重 P_c^0 を推定するために圧縮強度の確率密度関数を利用する。池田ら[4]は初期不整変数 ε が正規分布に従うと仮定したときの圧縮強度の確率密度関数 $f(P_c)$ を誘導している。

$$f(P_c) = \frac{2|P_c - P_c^0|}{\sqrt{2\pi}(C_0\sigma^{1/2})^2} \exp\left(-\frac{1}{2} \left| \frac{P_c - P_c^0}{C_0\sigma^{1/2}} \right|^4\right) \tag{4}$$

式(4)において、期待値 $E[P_c]$ 、分散 $Var[P_c]$ を求めると次のようになる[4]。

$$E[P_c] = P_c^0 - 0.822 C_0 \sigma^{1/2}, \quad Var[P_c] = (0.349 C_0 \sigma^{1/2})^2 \quad (5)$$

この期待値 $E[P_c]$ 、分散 $Var[P_c]$ に対し、それぞれ実験結果から得られる圧縮強度の標本平均、標本分散を用いることにより圧縮強度の確率密度関数 $f(P_c)$ が計算できる。この確率密度関数の上限値として完全系の分岐荷重 P_c^0 を得ることができる。

3. 実験概要

表 1. 使用材料

3.1. 使用材料・配合

今回使用した材料及び配合をそれぞれ表 1, 2 に示す。本実験においては、コンクリートを構成する各種要因の中で粗骨材の粒径について検討するために、単一粒径のガラス球 (S, M, L) を粗骨材として用いた。連続的な粒度分布を持つ例との比較検討のために

セメント	普通ポルトランドセメント 比重 3.16		
細骨材	信濃川産川砂 比重 2.57 F.M.2.68		
粗骨材	ガラス球	5mm:(S)	比重 2.55
		12mm:(M)	比重 2.52
		25mm:(L)	比重 2.51
		信濃川産川砂利:(R) 比重 2.72	
AE 剤	特殊アニオン系界面活性剤 1種		

粒径の異なる川砂利 R (10~15mm) を用いたものについても実験を行った。また、水セメント比は分岐によって強度が支配される、範囲の小さいものを採用した。

表 2. 配合

名称	粗骨材 寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (xC, %)
				W	C	S	G	
S (ガラス球)	5	65	42	205	315	750	1027	0.025
M (ガラス球)	12						1015	
L (ガラス球)	25						1011	
R (川砂利)	10~15	65	42	168	259	756	1108	0.0987

配合においては同一のモルタル容積を持つものとした。さらに、ガラス球の容積は全てのケースについて一定とすることとした。

表 3. 圧縮試験結果

3.2. 圧縮試験

試験は 1 ケースにつきサンプル数をそれぞれ 11~14 本程度とし、それぞれの荷重-変位曲線を測定した。試験に用いた供試体は $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体である。

名称	平均圧縮強度 (MPa)	標準偏差 (MPa)	完全系の分岐 応力 P_c^0 (MPa)
S(ガラス球)	20.0	1.59	24.4
M(ガラス球)	16.9	3.26	25.9
L(ガラス球)	12.9	2.59	23.6
R(川砂利)	18.1	1.31	21.7

4. 実験結果及び考察

4.1. 圧縮荷重及び分岐荷重 P_c^0 (分岐応力 σ_c^0)

圧縮試験から得られた圧縮強度の平均値、標準偏差、および平均値と標準偏差から式(4), (5) を用いて計算した完全系の分岐応力 σ_c^0 を表 3. に示す。

今回の実験において単一粒径の粗骨材寸法の大きいものほど、平均圧縮強度は小さくなる傾向があることが分かる。さらに圧縮試験後、供試体を観察したらガラス球は全てのケースにおいて破壊はしていなかった。このことより強度が低下する要因としては粗骨材が欠陥（一種の初期不整）として作用していると同時に、粗骨材の剛性とモルタルの剛性の差により粗骨材周辺で大きな応力集中を引き起こしているからだと考えれば、応力集中の度合いが粗骨材寸法が大きいものほど大きいことが推測される。また、ガラス球を粗骨材として用いた場合には、粗骨材とモルタルの境界面の付着性状が、川砂利などの一般の粗骨材を用いたものとは大きく異なることが予想されるが、それらの影響は全て応力-ひずみ曲線に投影されるものと考えているので分岐理論的な考察が可能となる。

4.2. 応力-ひずみ曲線

図2～4に圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線を示す。また、図5に川砂利(10～15mm)を用いた場合の応力-ひずみ曲線を示す。

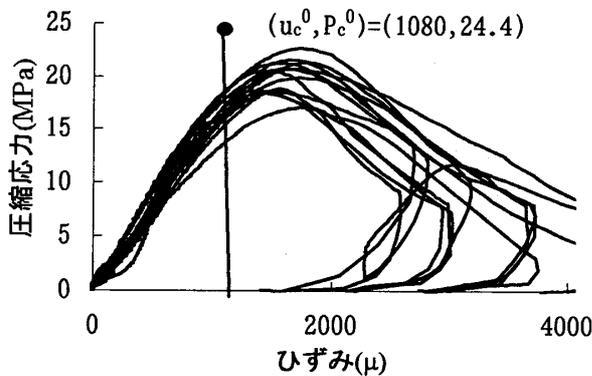


図2. 応力ひずみ曲線(S:5mm)

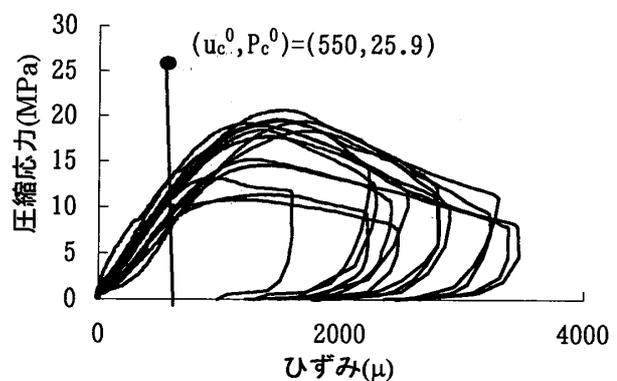


図3. 応力ひずみ曲線(M:12mm)

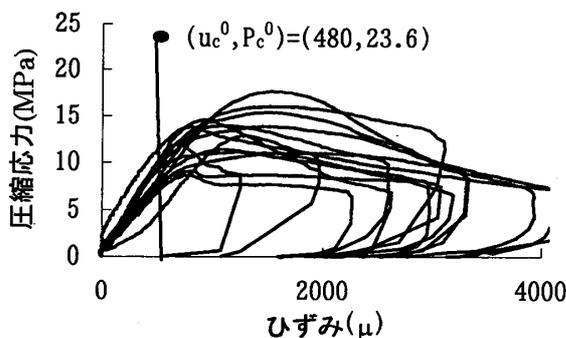


図4. 応力ひずみ曲線(L:25mm)

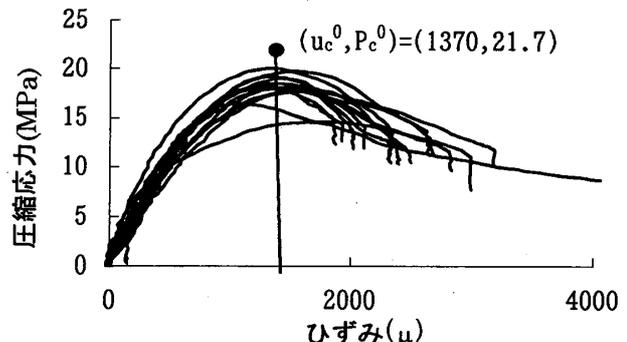


図5. 応力ひずみ曲線(R:10～15mm)

完全系の分岐点の位置 (u_c^0, P_c^0) を決めるにあたり P_c^0 は表 3. のものを使用した。また、 u_c^0 と h の値を種々に変えて式(3)の比例関係を最も満たすような u_c^0 を求め、これをそのケースの完全系の分岐点のひずみ u_c^0 とした。

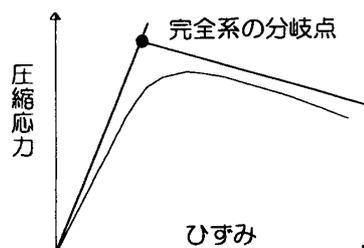


図 6. 分岐点の一つのもの

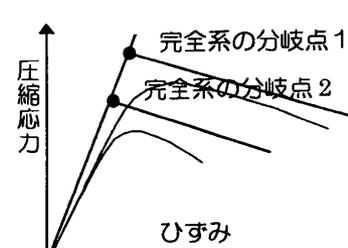


図 7. 分岐点が複数のもの

川砂利を用いたものは応力ひずみ曲線上で比較的分岐点が一つに決まりやすい(図 6.参照)。それに対して、単一粒径の粗骨材を用いた場合は、応力ひずみ曲線の中に他の曲線から枝分かれしたようなものが見かけられる(図 7.参照)。これは、粗骨材の配置が比較的均質なものとなるのでいろいろな分岐モードが出てくるのではないと思われる。このことから単一粒径の粗骨材を用いた応力ひずみ曲線を 2~3 のケースに分類することとした(図 8.参照)。

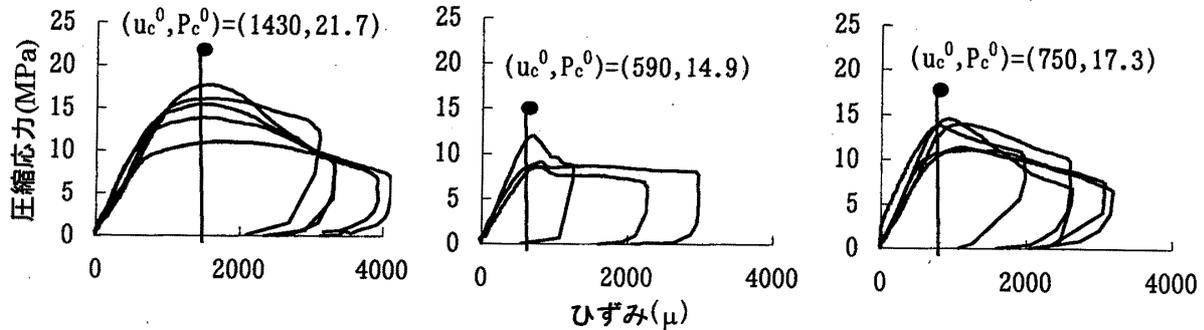


図8. 応力ひずみ曲線のモードによる分類(L:25mm)

4.3. 初期不整感度則に対する検討

図 2.~4. に示す本実験により得た応力-ひずみ曲線に対し式(3)の関係を適用した結果を図 9.~12. に示す。この図において R^2 は、初期不整感度則における適合性を示す相関係数である。川砂利を用いた場合は、比較的原点を通る直線関係が認められる。一方、単一粒径の粗骨材を用いた場合においては、初期不整感度則に対する適合性が低いものとなった。前述したように単一粒径の場合には、複数の分岐モードとそれに対応する分岐経路が存在するものと思われる。

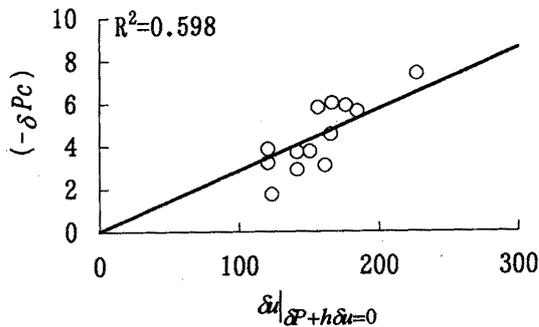


図9. 初期不整感度則の適用 (S: 単一粒径5mm)

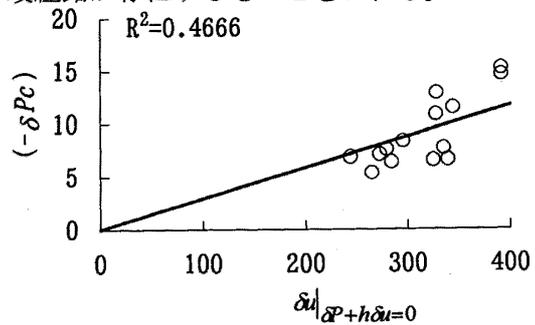


図10. 初期不整感度則の適用 (M: 単一粒径12mm)

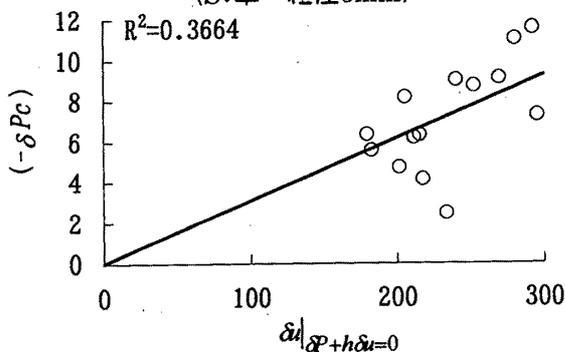


図11. 初期不整感度則の適用 (L: 単一粒径25mm)

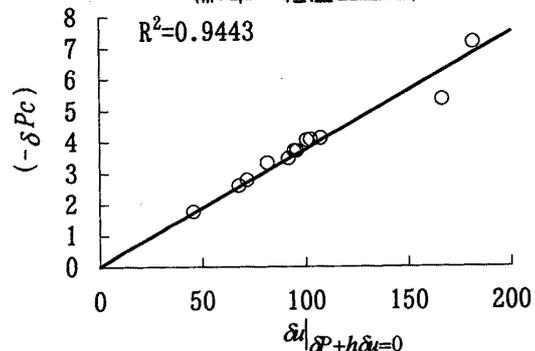


図12. 初期不整感度則の適用 (R: 川砂利10~15mm)

この理由により、単一粒径の場合の応力ひずみ曲線を数種類に分類した場合の初期不整感度則を図 13. に示す。また、単一粒径のものに応力ひずみ曲線を数種類に分類することによって、初期

不整感度則に適合性が高くなる。このことは単一粒径の粗骨材の配置によって分岐モードが変動することを示している。単一粒径の場合の強度変動は、

- ・ 供試体の固体差、すなわち初期不整の変動
- ・ 分岐モードの変動

という2種類の変動が原因となっていると判断される。

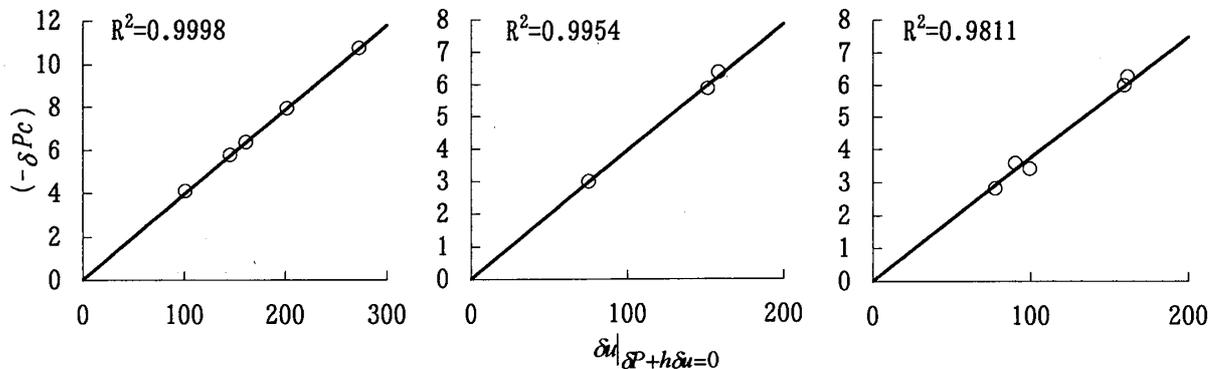


図13.応力ひずみ曲線を分類したときの初期不整感度則の適用(L:25mm)

5. まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

(1)初期不整感度則は、強度が比較的低い場合において適合性が高い。このことから、コンクリートの圧縮強度は分岐現象に支配されていることが示せた。

(2)単一粒径の粗骨材を用いることによって粗骨材の配置は比較的均質なものとなり、いくつかの分岐のパターンが現れる。固体の性質によって強度が支配されている可能性を示した。また、構造系が比較的非対称であれば分岐点の一つに決まりやすく、強度を単一の分岐点が支配していることが分かった。このことはコンクリートの大きな特色である粗骨材の非均一性が破壊のモードの安定化に寄与していることを表している。

(3)ガラス球を粗骨材とした単一粒径粗骨材を用いたコンクリートにおいて、圧縮強度の低下は粗骨材の最大寸法に依存し、粗骨材の最大寸法が大きければ圧縮強度の低下が大きいことが示された。粗骨材の強度との関係を検討する必要がある。

【謝辞】

本研究をまとめるにあたり、文部省科学研究費06805038の助成を頂き、東北大学工学部土木工学科の河又洋介氏に多大なる御協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1] 石田仁、丸山久一、池田清宏、長谷川正人：コンクリートの圧縮破壊性状に関する分岐理論的考察、コンクリート工学年次論文報告集,Vol.17,No1,pp475~480,1995
- [2] 池田清宏、岩熊哲夫、中沢正利、後藤聡、堀宗朗：初期不整感度則による分岐特性の漸近近似法、構造工学論文集 Vol.39A、1993
- [3] Ikeda, K. and Goto, S. : IMPERFECTION SENSITIVITY FOR SIZE EFFECT OF GRANULAR MATERIALS, SOILS AND FOUNDATIONS Vol. 33, No.2, 1993
- [4] 池田清宏、室田一雄、丸山久一、柳澤栄司：材料の強度変動の統計理論、構造工学論文集 Vol. 41A、1995
- [5] Koiter, W.T. (1945) : On the stability of elastic equilibrium, Dissertation. Delft, Holland, (English translation: NASA Tech. Trans. F10, 1967).
- [6] Ikeda, K. Chida, T. and Yanagisawa, E : Imperfection sensitive strength variation of soil specimens, Preprint, 1996