

[45] コンクリートの一軸圧縮強度

正会員○上迫田 和人（東京大学工学部）

正会員 前川 宏一（東京大学大学院）

正会員 岡村 甫（東京大学工学部）

1. まえがき

近年、有限要素法によるコンクリート構造物の挙動追跡が発達してきている。それに伴い、コンクリートの精密な材料特性を求めることが急務となってきた。その一つがコンクリートの一軸圧縮強度である。シリンドラー供試体による圧縮強度試験では、供試体端部に摩擦力が生じるので、得られる強度値は副次応力のない純粋な一軸圧縮強度とはみなし難い。一軸圧縮強度のデータが少ないために、従来の有限要素法では、一軸圧縮強度として、シリンドラー圧縮強度、あるいはそれをある割合で減じたものを用いている⁽¹⁾。本研究では、シリンドラー圧縮強度65 kg/cm²から750 kg/cm²の範囲で一軸圧縮強度を求め、有限要素法の解析精度向上のための基礎資料を提供した。

2. 実験の概要

本実験の目的は、コンクリートのシリンドラー圧縮強度から一軸圧縮強度が推定できるように、両者の関係を求ることであるが、コンクリートの圧縮力下での破壊機構について考察するために、モルタルの一軸圧縮試験も同時に行った。

(1)供試体 二次元有限要素法解析の要素の形状や大きさを考えて、一軸圧縮強度測定用の供試体は、20×20×5 cmのプレート供試体(1/100の精度をもつ型枠による成形)とした。圧縮試験用には、Φ10×20 cmのシリンドラー供試体を使用した。配合ならびに養生条件を表-1に示す。すべて早強セメントを用い、粗骨材の最大寸法は15 mmである。プレート供試体、シリンドラー供試体ともに、セメントベーストでキャッピングを行った。

(2)載荷方法 シリンドラー圧縮試験はJISの規定に基づき試験した。プレート一軸圧縮試験は以下の通りに行った。図-1に示すプレート供試体の上下載荷面(上面はキャッピング面)にシリコングリースをよく塗り込み、上下載荷板との間に、これもシリコングリースを塗った厚さ0.5 mmと0.1 mmのテフロンシートを重ねることにより載荷面での摩擦を除去した。上載荷板と試験機のクロスヘッドの間には球座を介して、できる限り偏心を防ぐようにした。載荷速度は毎秒2.5 kg/cmとした。

3. 実験結果

各配合ごとにプレート一軸圧縮強度、シリンドラー圧縮強度それぞれの平均値を求め、図-2、図-3にまとめた。横軸にシリンドラー圧縮強度、縦軸にシリンドラー圧縮強度からプレート一軸圧縮強度を引いたもの(強度低減量と呼ぶことにする)をとり、シリンドラー圧縮強度、プレート一軸圧縮強度おのおのの標準偏差を丸で結んで表示した。

表-1 配合及び養生条件

供試体個数 プレート シリンドラー	Concrete							Mortar		
	6	6	6	4	6	7	6	4	6	7
水セメント比(%)	70	55	52	47	40	30	29	70	50	30
単位量(kg/m ³)										
C	256	305	344	383	470	560	596	396	510	936
W	180	168	179	180	188	168	173	276	255	280
S	997	997	867	816	809	668	661	1570	1530	1110
G	970	951	917	935	872	1018	984(*)			
混和剤	303A	NO.5L			NL4000	NL4000				NL4000
養生期間(days)										
水中	5	6	4	19	4	11	7	9	8	10
乾燥	6	3	3.4	3.4	3	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4

*Crushed Stones

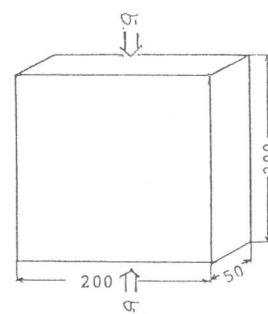


図-1 プレート供試体

コンクリートの強度低減量は、シリンダー圧縮強度が大きいほど、大きくなる傾向にあるが、単調に大きくなるのではなく、次の3つのグループに分かれて変化することが認められた。

第1グループ シリンダー圧縮強度 $65, 150 \text{ kg/cm}^2$ で強度低減量は認められない。

第2グループ シリンダー圧縮強度 $320, 440, 570 \text{ kg/cm}^2$ の強度低減量は 50 kg/cm^2 程度である。

第3グループ シリンダー圧縮強度 $640 \text{ kg/cm}^2, 760 \text{ kg/cm}^2$ (碎石コンクリート) の強度低減量は 200 kg/cm^2 程度であり、ばらつきが大きい。

モルタルの場合は、シリンダー圧縮強度 $200, 440 \text{ kg/cm}^2$ では強度低減は認められず、 750 kg/cm^2 で、ばらつきが大きくなり平均 50 kg/cm^2 の強度低減量である。

また、コンクリートのプレート供試体のひびわれ、破壊の観察の結果も上の3つのグループ間で異なっていた。

第1グループ 図-4に示す横ひびわれ、又は図-5に示す斜めひびわれができる。このひびわれはするどくシグザグになっていて、ひびわれた部分は面外にはみだしている。繰返し載荷することによりひびわれのシグザグが顕著になる(写真-1)。載荷後、供試体上載荷面には長手方向のひびわれ(図-4, 5)が入っており、またシグザグ状の横ひびわれ、斜めひびわれから上部がもろくなっていることが認められる。破壊面の粗骨材は割れていない。

第2グループ 図-6に示す縦ひびわれができる。このひびわれは第1グループでみられる横ひびわれ、斜めひびわれと様子が異なっている。シグザグとなっていず、ゆるやかな凹凸のある直線状のひびわれで、また面外にはみだすのではなく、割れすきまでできている(写真-2)。載荷後に、このグループの中で最も強度の高い配合の供試体(シリンダー圧縮強度 570 kg/cm^2)の破壊面を観察すると、粗骨材は割れたものと、割れていないものが混在している。

第3グループ 図-6に示す縦ひびわれができる。この縦ひびわれは、第2グループの縦ひびわれより凹凸が少ない(写真-3)。粗骨材はほとんど割れている。例外として、シリンダー圧縮強度 640 kg/cm^2 の供試体で、 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 厚の偏平骨材が破壊面に壊れずに残っている。この供試体の強度は 240 kg/cm^2 と極端に低くなっている。

モルタルのプレート供試体は、どの強度でも図-6に示す縦ひびわれができる。ただし、シリンダー圧縮強度 200 kg/cm^2 の供試体の中には、図-4に示す横ひびわれができるものがある。

4. 考 察

第1, 第2, 第3グループで強度低減量が異なっているが、その境界の基準が明確ではないため、以上の実験結果を用いて、

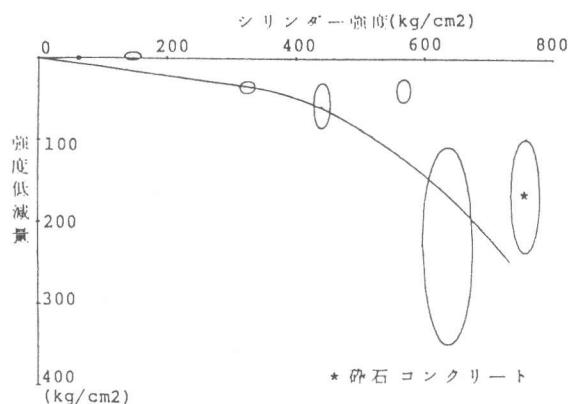


図-2 コンクリートの一軸圧縮強度低減量

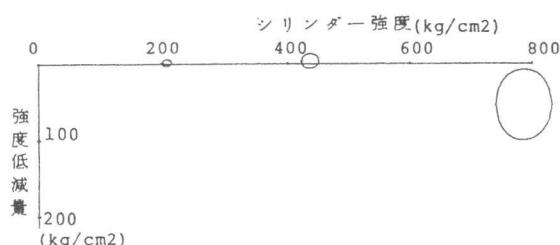


図-3 モルタルの一軸圧縮強度低減量

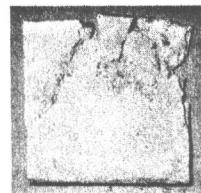


写真-1 第1グループ

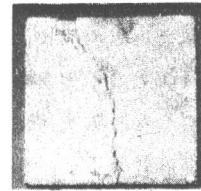


写真-2 第2グループ

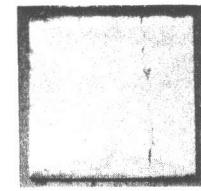


写真-3 第3グループ

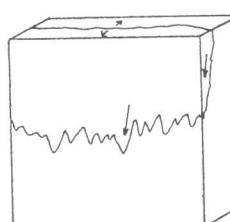


図-4 横ひびわれ

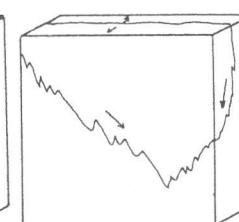


図-5 斜めひびわれ

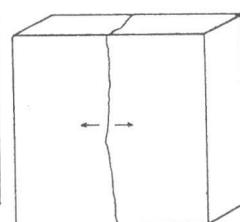


図-6 縦ひびわれ

有限要素法解析における一軸圧縮強度を推定することは必ずしも容易なことではない。ここでは、シリンダー圧縮強度とプレート一軸圧縮強度の差、強度低減量のグループ間の差は、破壊機構の違いによるものと考え、コンクリートの圧縮破壊機構に関する考察とモデル化を行った。なお、予備実験により、プレート供試体の端面摩擦を除去しない、シリンダー圧縮試験と同じ条件下でのプレート圧縮強度は、シリンダー圧縮強度 $180 \sim 700 \text{ kN/cm}^2$ の範囲で、シリンダー圧縮強度より $0 \sim 20 \text{ kN/cm}^2$ 程度大きいことが認められた。よって、図-2、図-3に示す強度低減は、供試体形状の違いによるものではないとして議論を進める。

骨材が周辺部より硬いために、上下方向に圧縮力が加わると、骨材の境界面に上下方向の微小クラックが発生する。この微小クラックは圧縮応力の上昇とともに増え、その増え方は、圧縮応力が、供試体の強度に近づくにつれて大きくなる。図-7の、横軸に圧縮応力、縦軸に応力上昇により供試体に発生した微小クラックの累積を意味する微小クラック密度をとると、両者の関係は下に凸の曲線で表現できる。

コンクリート供試体が、端面拘束を受けていない場合には、微小クラックが上下方向に連結することにより、縦ひびわれが供試体を上下に貫くことになり破壊する。ところが、端面拘束のある場合には、供試体端部付近は三軸圧縮を受け微小クラックが生じにくく、供試体中央で微小クラックが上下に連結する段階では破壊せず、さらに微小クラック密度が大きくなり、微小クラックが横方向にも連結することにより、斜めひびわれが生じくさび状に破壊する。図-7において、微小クラックの上下方向の連結により生じた縦ひびわれが供試体を貫く時の微小トランク密度を線2、微小クラックの横方向の連結により生じた斜めひびわれが供試体を貫く時の微小クラック密度を線Cでモデル化した。また、骨材の上下がひびわれていると、骨材が局所的な力を受け、もし高圧縮レベルならば骨材を割る可能性があり、端面拘束がなければ、骨材が割れることにより、微小クラックが少ない段階で縦ひびわれが一挙に進行し破壊する。この破壊は、ある圧縮応力レベルに達することにより発生すると考え、骨材を割ることにより縦ひびわれが供試体を貫く圧縮応力を線3でモデル化した。

結局、コンクリートは、微小クラック密度-作用応力曲線が、線2に達した時、あるいは端面拘束等の影響で微小クラックが偏在する場合は線Cに達した時に破壊し、その時の圧縮応力が圧縮強度となる。ところが、一方で骨材が局所的な力を受け、割れる圧縮レベル（線3）が存在し、端面拘束がなければ、線3に微小クラック密度-作用応力曲線が達した時に破壊し、その時の圧縮応力が圧縮強度となる。以上の破壊をそれぞれ、2型破壊、C型破壊、3型破壊と呼び、図-8に示した。

以上のようにコンクリートの破壊過程をモデル化することで、モルタルも含めた本実験結果を統一的に説明できる。シリンダー圧縮試験では、端面拘束があるためにC型破壊する。プレート一軸圧縮試験の第2、第3グループは、破壊観察の結果から、それぞれ2型、3型を破壊すると考えられる。第2、第3グループの強度低減の実験結果は、図-7を用いることにより明確に表現される。また線3は骨材強度あるいは欠陥骨材の有無（偏平骨材では容易に骨材表面ではなく離が生じ、供試体の破壊を導くと考えられる。）により、同一配合のコンクリートに対しても変動するので、線3に支配される第3グループでの強度ばらつきが大きく、それに対し、線3に支配されないものは、強度が骨材品質のばらつきに影響されないので、強度ばらつきが小さい。また、強度の高い碎石を使ったコンクリートは、線3が右にくるので、強度低減量は減少する。

第1グループのプレート供試体は、ブリージングの影響

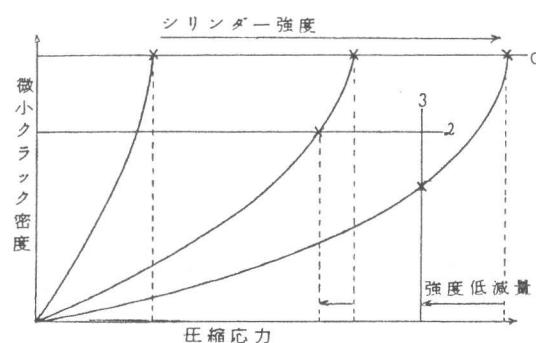


図-7 コンクリートの破壊過程

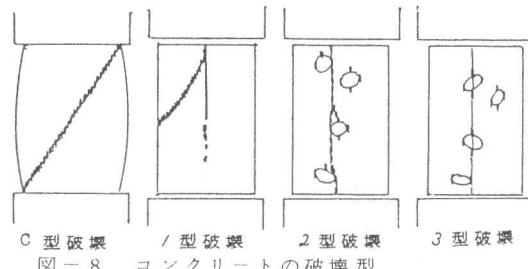


図-8 コンクリートの破壊型

で、供試体上部が相対的に弱くなっているので、微小クラックは上部に集中して起こる。供試体下部の微小クラック密度が線 2 に達する前に供試体上部の微小クラックが線 C に達することにより、供試体上部が斜めにひびわれて壊れる（1型破壊）。つまり端面拘束のあるシリンダー供試体と同じ微小クラック密度で破壊するので、強度低減がない。

モルタルのプレート供試体では、横ひびわれのできたものは 1 型破壊をしていると考えられるが、他は 2 型破壊（シリンダー圧縮強度 200 kg/cm^2 , 440 kg/cm^2), 3 型破壊 (780 kg/cm^2) をしていると考えられる。モルタルは粗骨材がないのでコンクリートに比べ内部欠陥が少ない。よって微小クラックは生じにくくなり、微小クラック密度 - 作用応力曲線はより下にふくらんでくると同時に、線 3 がより右に移動する。その結果、C 型破壊は 2 型破壊とでは強度差がほとんどなくなり、3 型破壊との強度差が小さくなる。

破壊過程のモデル化により強度低減の説明ができたので、これに基づき、有限要素法解析を行うにおいて、一軸圧縮強度を図-2 から推定する際の留意点を述べる。

2 型破壊と 3 型破壊では、強度低減量は明らかに異なるが、あるコンクリート要素がどちらで壊れるかは確率現象である。だから例えば、図-2 のシリンダー圧縮強度 570 kg/cm^2 のプレート供試体が 2 型破壊しているのを理由に、それ以下の強度のコンクリートは 3 型破壊はしないとして強度低減量を決めるべきではない。3 型破壊、つまり骨材の割れ、あるいは骨材表面のはく離を引き金に一挙にひびわれが進展するかどうかは、骨材条件のみならず、コンクリートの他の内的条件や外力等の外的条件に敏感にかかわるからである。つまり 2 型破壊か、3 型破壊かはシリンダー強度により一意的に決まるものではない。現段階ではこの確率現象を数量化して合理的な一軸圧縮強度を求めることはできないので、図-2 のだ円ほう絡線の中心位置をもって低減強度とするのがよいと思われる。

本実験では、シリンダー圧縮強度 150 kg/cm^2 以下のコンクリートは、圧縮方向に材料が不均一なために、1 型破壊したが、ブリージングが少ない場合や打込み方向に対して圧縮力方向が垂直な場合は、圧縮力方向が材料が均一なので、2 型破壊することが予想される。この場合、強度低減量が、シリンダー圧縮強度 300 kg/cm^2 以上の供試体と同じく 50 kg/cm^2 程度であるとは思えない。低強度コンクリートでは、1 つの縦ひびわれにより破壊するのではなく、供試体全体に縦ひびわれが入ることにより破壊すると考えられるからである。よって、図-2 において、原点と、シリンダー強度 320 kg/cm^2 のだ円中心を結ぶ直線で強度低減量を予測しても大きな間違いではないと判断した。

5. 結論

本研究を行った結果、次の結論が導かれた。

- (1) シリンダー圧縮強度 65 kg/cm^2 から 750 kg/cm^2 の範囲で、端面摩擦を除去して得られたプレート一軸圧縮強度は、シリンダー圧縮強度より、3 つの段階に分かれて低減することが認められた。
- (2) 強度低減量が 3 つの段階に分かれるのは、それぞれの破壊過程が異なるからだと考え、ひびわれ進行のモデルより統一的に説明した。
- (3) 破壊過程の選択は確率的なものであり、シリンダー強度により一意的に決めることはできないので、有限要素法解析適用のために、一軸圧縮強度のはらつきを考慮した推定方法を提案した。

〔謝辞〕 本研究の実験において、東京大学工学部榎本松司技官の度重なる助言、援助をいたいたいたことを感謝いたします。なお、本研究は昭和56年度科学技術研究費補助金（課題番号 56460123）により行われた。

〔参考文献〕

- (1) J. Niwa, K. Maekawa and H. Okamura, "Nonlinear Finite Element Analysis of Deep Beams" IABSE Colloquium Delft, June 1981.