

要 旨

コンクリートの破壊特性を円柱状の粗骨材とセメントペーストマトリックスから成る単純なモデル(図-1)を使用し、理論および実験的に研究した。理論的研究においては、有限要素法を利用して、コンクリートのクラックおよびその進行状況を求め、破壊に至る過程をシュミレーションした。実験的研究においては4種類の骨材を使用し、第1段階としてセメントペースト、骨材およびセメントペースト-骨材間の強度特性を求め、第2段階として上記モデルを作成し、一軸圧縮試験により、その破壊過程を観察した。

理論的研究の結果、一軸圧縮応力下では、コンクリートの破壊はセメントペーストと骨材間のせん断破壊から始まり、これらの局部破壊がある程度進行した後、これがセメントペーストであるマトリックスに波及し、全体の破壊に至る局部進行性破壊となる。

一方、一軸引張応力下では、破壊は一軸圧縮応力下と同様にセメントペースト骨材間から始まるが、この部分における破壊がただちにマトリックスに波及し全体の破壊に至る突発性破壊となる。

実験は一軸圧縮応力下のみで行なったが、モデルの破壊モードは上記理論的結果を充分支持し得たと考えられる。

1. 理 論

1-1 解析上の仮定

コンクリート中でのクラックの発生およびクラック部分についてつぎの仮定を設けた。

- (1) クラックに垂直な方向の引張応力の伝達はない。
- (2) クラックに平行な方向には、引張および圧縮応力の両方も伝達しうる。
- (3) 開いたクラックの表面にはせん断応力はない。
- (4) クラックが閉じるとクラックを通して圧縮応力の伝達があり、クラック表面上にせん断応力が発生する。
- (5) クラックが発生していない部分は弾性挙動をする。
- (6) クラックの発生は応力がその部分の材料の強度に達したときとする。

1-2 クラックのシュミレーション

クラックのシュミレーションは「局部異方性法」(Local Anisotropy Method)⁽¹⁾の概念を導入して有限要素法によって行なった。*i*番目のエレメントにクラックが発生すると、*i*-1個のエレメントにクラックが既に生じているときの剛性マトリックス $[S^{i-1}]$ はつぎのように変換される。

$$[S^i] = [S^{i-1}] - [K^0]_j + [K^1]_j \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $[S^i]$ = *i*個のエレメントにクラックが生じているときの剛性マトリックス

$[K^0]_j$ = クラックが入る以前のエレメントJの要素剛性マトリックス

$[K^1]_j$ = クラックが入ったときのエレメントJの要素剛性マトリックス

荷重の増大に伴いクラックが進行していき既にクラックが生じたエレメントにおいてもクラックに垂直な方向の応力が圧縮となれば、その部分のクラックは閉じると仮定した。クラック面の接触によって生じるせん断応力はつぎのように仮定した。

$$\tau_f = \mu \sigma_n \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 τ_f = 発生したせん断応力、 σ_n = クラックに垂直な方向の圧縮応力 μ = マサツ係数。

上記せん断応力 τ_f は等価な節点力に置換⁽¹⁾し新たな荷重段階に対してシステムを解析した。

1-3 載荷面におけるマサツ力の考慮

コンクリートの圧縮強度は供試体寸法や載荷面でのマサツの度合いによって、種々異なった値となることが知られている。この載荷面でのマサツの影響を解析に取り入れるため、1次元のバネ要素を載荷面に平行に設置した。このバネ要素の剛性は種々の載荷条件に対して実験的に求めた。⁽¹⁾

2 モデル解析

2-1 モデルの有限要素への分割

図-1に示すモデルを図-2に示すようなCST要素に分割した。システムは対称であるため1/4部分のみを解析した。システムは骨材部分、マトリックス部分および骨材-マトリックスの接触部分に分割した。各々の部分の弾性特性および強度特性は表-1で示すように後記予備実験で求めたものをインプットした。

2-2 解析結果

上記モデルに一軸圧縮応力および一軸引張応力を作用させた。図-3はクラック発生以前の骨材周辺における主応力分布を示す。図中の各等応力線の値は引張主応力と作用応力の比を表わしている。4種類の骨材について解析を行なったが、これらの骨材の弾性定数がほぼ同様の値であるため、各々の場合の応力分布もほぼ図-3のようであった。図-4は理論的に求められた骨材周辺におけるクラックのモードを示している。一軸引張応力下では、図中のB点からクラックが発生し、クラックが発生すると作用応力の増加がほとんどなく、また、マトリックスと骨材間のせん断付着のクラック (Shear bond crack)もほとんど進行せずマトリックス内に作用応力と垂直な方向にモルタルクラック (Mortar crack)が進行して破壊に至った。このモデルの引張破壊強度はマトリックスであるセメントペースト引張強度の約80%であった。これに対して、一軸圧縮応力下ではせん断付着クラックが図中のA点より発生し、このクラックが骨材とマトリックス間に進行し、これと同時にせん断付着クラックから作用応力方向にモルタルクラックが進行した。

3 実験

3-1 予備実験⁽¹⁾

前述モデル解析に必要なデータを得るため4種類の骨材 (石灰岩、花崗片麻岩、中粒砂岩および縞状花崗岩) およびセメントペースト (W/C=0.45)について (1)弾性係数 (2)一軸圧縮強度 (3)曲げ引張付着強度 (4)割裂引張付着強度 および (5)せん断付着特性を求めた。結果は表-1に示す通りである。なおセメントペーストと各種骨材間のせん断付着特性は、図-5に示すような角柱供試体による一軸圧縮試験より求めた。図-6にその実験結果を示す。実験結果によればセメントペースト-骨材間のせん断付着特性はモルクロンの仮定を満足し得ると考えられる。

3-2 コンクリートモデルの圧縮試験

W/C=0.45のセメントペーストとそれぞれ前記4種類の骨材を使った図-1に示すようなコンクリートモデルを作成した。供試体は試験材令28日まで20℃の水中で養生し、一軸圧縮試験を行なった。初期クラック発生時の作用応力は観測できなかった。モデルは主クラックが載荷面上に達した後も、更に大きな荷重を支持した。図-7は圧縮試験後に観測したモデルコンクリートの骨材周辺における破壊モードである。

4 考察および結論

- (1) セメントペーストと骨材の付着強度はセメントペースト自体の引張強度よりも小さいため、せん断付着クラックが最初に発生すると推測される位置 (図-4A点) は引張主応力が最大である位置 (図-3)とは異なる。したがって二相材料においては単に引張応力が最大となる位置からクラックが発生すると結論できない。
- (2) 有限要素法によるモデル解析は、コンクリートが一軸引張応力下ではせん断付着クラックの発達もほとんどなく突発性の破壊を起すが、一軸圧縮応力下では、内部クラックの発生およびその進行を伴った局部進行性破壊となる結果を与えた。
- (3) モデル解析はコンクリートが一軸引張応力によって破壊した場合は一軸圧縮応力によって破壊した場合よりもはるかに内部クラックが少ないことを予測した。これは実験⁽²⁾によっても一部確認されている。
- (4) モデル解析においては予測されたせん断付着クラックは実験では、その初期荷重段階においては観測できなかった。TaylorとBroms⁽³⁾はこの点を「ポテンシャルクラック」という意味で説明した。骨材マトリックスの接触部分の応力がその部分のせん断付着強度に達しても、この接触部分の実際のスベリはこれを取り巻くマトリックスによって拘束され、このスベリ効果が十分に累加されるまでは実際のクラックとして現われない。
- (5) モデル解析によると、このモデルの引張強度はセメントペーストマトリックスの引張強度の約80%であり、圧縮強度はセメントペーストマトリックスの圧縮強度の55~80%程度であった。この結果から、コンクリートの引張および圧縮強度は伴にそのコンポーネントの強度よりも小さいことが推測される。

参考文献

- (1) ONO, K., Ph. D. dissertation
University of Toronto, 1972
- (2) 吉本彰 Private Communication,
山口大学工学部土木工学科
- (3) TAYLOR, M. A. and BROMS, B. B.,
"Shear Bond Strength Between Coarse Aggregate and Cement
Paste or Mortar", Journal of ACI,
Proceedings, Vol. 61, No. 8,
pp. 939~957, August 1964.

表-1 実験結果

MATERIAL	E (KSI)	ϵ_c (KSI)	ϵ_{fm} (PSI)	ϵ_{fb} (PSI)	ϵ_{sp} (PSI)	ϵ_{cp} (PSI)	C	ϕ (DEG)
Aphanitic Limestone	4.45	17.4	542 (87)	0.385 (20)	116 (20)	0.532 (30)	349	38.7
Granitic Gneiss	3.68	25.4	482 (19)	0.484 (18)	226 (7)	0.648 (30)	779	32.2
Medium Grained Sandstone	4.22	14.2	557 (18)	0.395 (14)	183 (7)	0.525 (30)	525	37.1
Banded Granite	3.24	22.2	619 (57)	0.438 (14)	168 (14)	0.481 (31)	787	34.7
Cement Paste	2.06 (0.08)	8.49* (0.40)	1410 (56)	1.000 (31)	349 (31)	1.000 (31)	-	-

- * Degree of hydration when tested at the age of 28 days = 0.700 ± 0.015
- E = Elastic Modulus
- ϵ_c = Cylinder compressive strength (*Cube compressive strength)
- ϵ_{fm} = Flexural bond strength
- ϵ_{fb} = Modulus of rupture in bending of cement paste
- ϵ_{sp} = Tensile bond strength in splitting
- ϵ_{cp} = Splitting strength of cement paste
- C = Cohesive strength
- ϕ = Friction angle

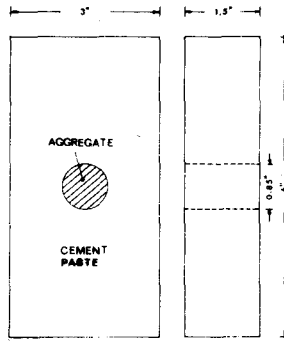


図-1 コンクリートモデル

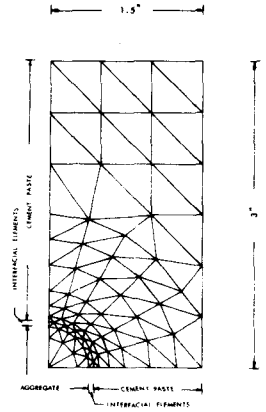
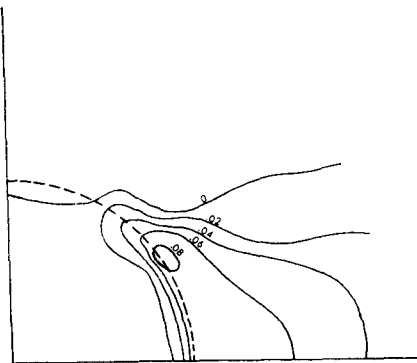
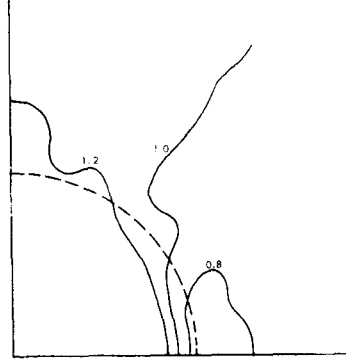


図-2 CSTへの分割



a COMPRESSION



b TENSION

図-3 クラック発生以前の骨材周辺における主応力分布

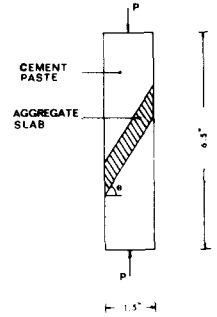


図-5 セン断付着試験

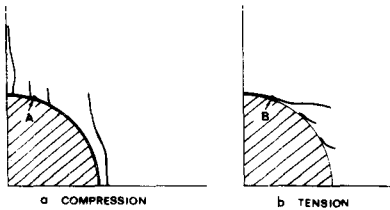


図-4 理論的なクラックモード

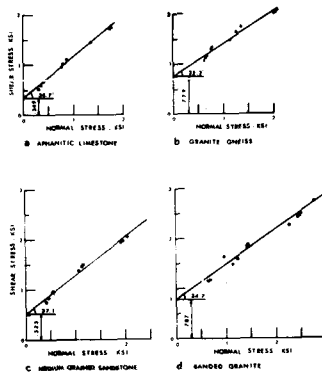


図-6 セン断付着試験結果

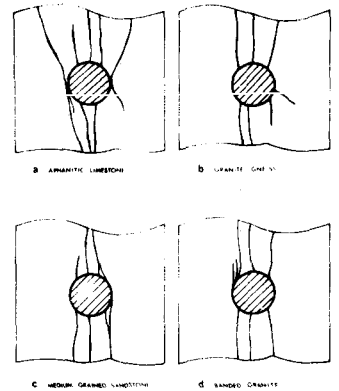


図-7 モデルコンクリートの破壊モード