

ダブルミキシングで製造したコンクリートの圧縮強度

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE PREPARED BY DOUBLE MIXING

田澤栄一*・笠井哲郎**・岡本修一***

By Ei-ichi TAZAWA, Tetsurou KASAI and Shu-ichi OKAMOTO

Concrete manufactured from cement paste prepared by double mixing (DM) under the optimum deviating proportion of water, exhibited higher strength and yielded less bleeding than those observed for concrete of the same mix proportion prepared by conventional mixing (SM). In order to explain this effect, several series of experiments and FEM analysis of model concrete were conducted. Based upon the observations such as positive correlation between compressive strength and bleeding, crack propagation initiated from the artificial bleeding flaw provided under coarse aggregate and strength reduction enhanced with increasing size of aggregate etc., GEM (Gravel Enveloped with Mortar of low bleeding) model is proposed in stead of the original model named as SEC (Sand Enveloped with Cement).

Keywords: double mixing, compressive strength, bleeding, model analysis

1. まえがき

コンクリートは基本的にセメントペーストと骨材から成る二相複合材料である。このため、一般にはコンクリートの強度はセメントペーストの強度とセメントペースト・骨材界面の付着力の大きさに依存するものと考えられる。このうち、セメントペーストの強度は実質の水セメント比（配合時の練りませ水からブリージング水を差し引いた値）に依存し、実質 W/C が小さいほど強度は大きくなる。これに対し、コンクリートやモルタルではセメントペーストと骨材との境界面に、沈下あるいはブリージング等によって引き起こされる潜在欠陥が存在する。このため、マイクロクラックは単に骨材相とセメントペースト相の剛性変化に伴う応力集中だけでなく、上記潜在欠陥が弱点となり、容易に引き起こされる性格をもっている¹⁾。この観点から造殻コンクリート^{2),3)} (Sand Enveloped with Cement 工法、以下 SEC 工法と略記)におけるコンクリート強度の増大は、 W/C の減少によるセメントペーストと骨材界面の強度増加によるものと

主張されてきた。一方、著者らは SEC の上位概念と考えられるダブルミキシング(以下 DM)で製造したフレッシュセメントペーストについて、最適の比率で水を二分割し、セメントペーストを練りませるとブリージングが 1/5 以下に減少することを示した⁴⁾。また、この効果はモルタル、コンクリートにおいても認められ、ホバート型ミキサーを用いて DM で製造したセメントペーストをパン型強制練りミキサーに投入してコンクリートを製造すると同一 W_1/C で製造した SEC と同等またはそれ以上の効果が得られることが示された⁵⁾。

本研究では、DM で製造したコンクリートの圧縮強度が増加するメカニズムを明らかにすることを目的として、セメントペースト、モルタル、コンクリートについてブリージングと圧縮強度の関係を実験的に検討した。また、コンクリートを骨材とモルタルの 2 相モデルに置き換え、その界面にブリージングを想定して設けた人工欠陥がモデルコンクリートの一軸圧縮破壊性状に及ぼす影響についても検討し、SEC 工法または DM 工法で製造したコンクリートの破壊モデルを提案した。

2. 実験方法

(1) 圧縮強度試験

a) 概要 セメントペースト、モルタル、コンク

* 正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類
(〒724 広島市西条町大字下見)

** 学生会員 工修 広島大学大学院工学研究科(同上)

*** 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所
(〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

リートについて練りませ方法を変えて、ブリージングとその圧縮強度との関係について検討した。また、コンクリートについては粗骨材の最大寸法（以下 G_{max} ）、コンクリートの容積に対する粗骨材容積比（以下 V_g ）を変化させた。また、モルタル、コンクリートについて、圧縮強度の供試体寸法の影響を試験し、均一性係数（ m ）について検討した。

b) 使用材料および配合 セメントは普通ポルトランドセメント（比重：3.16）を、細骨材は風化花崗岩系山砂（比重：2.59，吸水率：1.87%）を、粗骨材には粘板岩系フォルンフェルス（比重：2.73，吸水率：1.90%）および石灰岩（比重：2.71，吸水率：0.60%）の2種類の砕石を使用した。混和剤として、ナフタリンスルホン酸塩系の高性能減水剤を使用した。

配合について、セメントペースト、モルタル、コンクリートのいずれの場合も W/C は60%とした。モルタルの S/C は2.4，2.7の2種類とし、コンクリートの配合は表-1に示すとおりである。配合①、②の粗骨材の粒度分布は土木学会規準の範囲内のものである。配合①はブリージングが圧縮強度に及ぼす影響を、配合②は供試体寸法の影響をそれぞれ検討したものである。また、配合③、④、⑤および⑥の粗骨材の粒度分布はそれぞれ10~20，20~30，30~40 mm および 20~30 mm の単一粗骨材寸法のものを使用した。配合③、④、⑤はすべて $V_g=0.45$ とし、粗骨材の最大寸法の影響を、配合④、

⑥は粗骨材の寸法を20~30 mm の単一粒度とし、 $V_g=0, 0.30, 0.45$ と変化させて粗骨材容積比の影響についてそれぞれ検討したものである。モルタル、コンクリートについては、高性能減水剤を固形分質量比でセメントの0.25%添加した。

c) 練りませおよび供試体の作成方法 セメントペーストおよびモルタルの練りませには20 lのホバート型モルタルミキサー（攪拌翼の回転数：低速時100 rpm，高速時200 rpm）を使用した。コンクリートは、セメントペーストを上記のホバート型モルタルミキサーで製造した後、100 lのパン型強制練りコンクリートミキサーを用いてセメントペーストと細・粗骨材を練りませで製造した。練りませ方法は表-2に示すとおりSM（従来の練りませ方法）、DM および SEC である。高性能減水剤の添加はモルタル、コンクリートとも、SMでは練りませ水に、DMでは一次水に溶かして行った。DM、SECにおける一次水セメント比（ W_1/C ）は、24%（高性能減水剤を一次水に添加した場合は21.5%）および9%であり、この W_1/C はそれぞれセメントペーストにおいてブリージングが最小および最大値を示す場合のものである^{4),6)}。本実験では、ブリージングの変化が著しいこの2つの条件で行った。

圧縮強度の寸法効果の試験における供試体寸法は、モルタルでは $\phi=5, 7.5, 10, 15$ cm，コンクリートでは $\phi=7.5, 10, 15, 20, 30$ cm の円柱供試体である。また、その他の試験における供試体寸法は、セメントペーストおよびモルタルでは $\phi=5$ cm，コンクリートでは $\phi=15$ cm とした。すべての供試体について ϕ/h (h ：供試体高さ)は1/2である。型枠はすべて鋼製型枠を使用し、型枠パイプレータで締め固めを行った。打込み後48時間後に脱型を行い、26日間水中養生（水温：20±1°C）後、材令28日で載荷した。

d) ブリージング試験 セメントペースト、モルタルについては土木学会規準「プレバッドコンクリートの注入モルタルのブリージング率および膨張率試験方法」に、コンクリートについてはJIS A 1123-75に準拠し、すべての条件についてブリージング率を測定した。

(2) モデルコンクリートによる試験⁷⁾

a) 概要 ブリージングがコンクリートの圧縮破壊に及ぼす影響について、コンクリートを粗骨材（インクルージョン）とモルタル（マトリックス）の2相モデルに置き換え、その界面にブリージングを想定した人工欠陥を作り、その欠陥の位置、長さがモデルコンクリートの一軸圧縮破壊性状に及ぼす影響について検討を行った。本実験ではモルタルマトリックス中に円柱形のインクルージョンを1個有する場合（シリーズI）、インクルージョンを4個有する場合（シリーズII）について行っ

表-1 コンクリートの配合

NO.	·G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m ³)				粗骨材		
				W	C	S	G	ad	粒度(mm)	岩種
①	40	60	40	178	297	713	1144	0.743	標準粒度	フォルンフェルス
②	25, 40	60	39	178	297	713	1144	0.743	標準粒度	石灰岩
③	20	60	37	174	290	697	1220	0.726	10~20	石灰岩
④	30	60	37	174	290	697	1220	0.726	20~30	石灰岩
⑤	40	60	37	174	290	697	1220	0.726	30~40	石灰岩
⑥	30	60	54	223	372	893	813	0.930	20~30	石灰岩

表-2 練りませ方法

成分	方 法
セメントペースト	SM: W $\xrightarrow{L:0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ H:3分 \rightarrow 排出
	DM: W ₁ $\xrightarrow{L:0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ H:1分 + W ₂ H:2分 \rightarrow 排出
モルタル	SM: W $\xrightarrow{L:0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ H:2分 + S H:1.5分 \rightarrow 排出
	DM: W ₁ $\xrightarrow{L:0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ H:1分 + W ₂ H:1分 + S H:1.5分 \rightarrow 排出
	SEC: (W ₁ +S) $\xrightarrow{L:0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ H:1.5分 + W ₂ H:2分 \rightarrow 排出
コンクリート	SM: W $\xrightarrow{L:0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ H:2分 + (S+G) $\xrightarrow{1.5分}$ \rightarrow 排出
	DM: W ₁ $\xrightarrow{L:0.5分}$ $\xrightarrow{+C}$ H:1分 + W ₂ H:1分 + (S+G) $\xrightarrow{1.5分}$ \rightarrow 排出
	SEC: (W ₁ +S)+C $\xrightarrow{1.5分}$ + (W ₂ +G) $\xrightarrow{2分}$ \rightarrow 排出

W: 水, C: セメント, W₁: 一次水, W₂: 二次水, S: 細骨材, G: 粗骨材
 L: 低速 (モルタルミキサー), H: 高速 (モルタルミキサー)
 \rightarrow : モルタルミキサー, \rightarrow : コンクリートミキサー

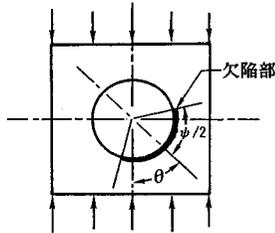


図-1 供試体 (シリーズ I)

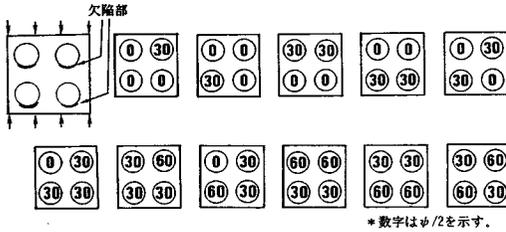


図-2 供試体 (シリーズ II)

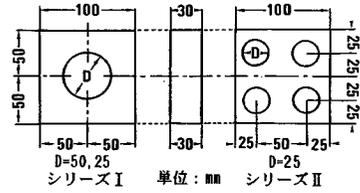


図-3 供試体の形状寸法

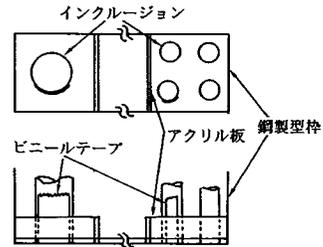


図-4 供試体の作製方法

た。また、シリーズ I については、FEM 弾性解析により欠陥部近傍の応力分布を計算し、実験結果と比較検討した。

①シリーズ I：実際のコンクリートにおいて、ブリージング水隙は加力方向に対して常に垂直方向にあるとは限らない。そこで、このシリーズでは同じ大きさの欠陥でもその位置により、また、同じ位置にあっても欠陥の大きさにより、モデルコンクリートの力学的特性がどのような影響を受けるかを検討した。図-1 に示すように、モルタルマトリックス中に円柱形のインクルージョンを 1 個埋め込んだモデルを使用し、欠陥の位置を θ で、長さを $\phi/2$ で表わし、 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, \phi/2=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ とそれぞれ変化させた。

②シリーズ II：一般に、系には多数の欠陥が存在するが、その場合破局ひびわれがどのような経路で進展するかを検討する必要がある。そこで、このシリーズでは、図-2 に示すようなモルタルマトリックス中に円柱形のインクルージョンを正方形に 4 個配置したモデルを用い、種々の欠陥の組合せに対し、どの位置の欠陥から、ひびわれ (モルタルクラック) が発生、伝播するかを検討した。なお、この実験においての θ は各欠陥部とも 0° である。

b) 供試体寸法および作成方法 供試体は、図-3 に示す、 $100 \times 100 \times 30$ mm のモルタルマトリックス中に、シリーズ I では、 $\phi=50$ または 25 mm のインクルージョン (以下、それぞれ D 50、D 25 で示す) を、シリーズ II では $\phi=25$ mm のインクルージョンを埋め込んだ。本実験では、インクルージョンはモルタルにより作製した。セメントには、普通ポルトランドセメント、細骨材

には、風化花崗岩系山砂を使用した。インクルージョンのモルタルの配合は、 $W/C=30\%$ 、 $S/C=2.5$ 、マトリックスのモルタルの配合は $W/C=50\%$ 、 $S/C=2.12$ とした。D 50 のインクルージョンは、 $\phi 50 \times 100$ mm の圧縮試験用型枠にモルタルを打ち込むことにより、また、D 25 の場合はあらかじめ作製したモルタル板からコアを抜くことにより作製し、両者は 7 日間水中養生を行った。その後、欠陥となる所定の位置にビニールテープ (厚さ約 0.5 mm) を貼り、供試体作製用型枠に固定し (図-4)、周囲にマトリックスとしてモルタルを打ち込み、脱型時にビニールテープを抜き取ることでインクルージョンとモルタルマトリックスの界面に欠陥をつくり、28 日間の水中養生後、打設面を研磨成型し供試体とした。

c) 載荷方法 載荷には 20 t モルタル圧縮試験機を使用した。また供試体と載荷板の間には、端面拘束の影響をできるだけ除去するため、サンドイッチ状にグリスを塗布した 2 枚のビニールシートをはさんで載荷した。

3. セメントペースト、モルタル、コンクリートの圧縮強度特性

(1) 練りませ方法の影響

図-5 はセメントペースト、モルタルおよびコンクリートのブリージング率の経時変化を示したものである。モルタル、コンクリートの場合、DM、SEC ともに W_1/C に関係なくブリージングは SM の場合より小さくなっており、 $W_1/C=9\%$ でセメントペーストの場合に生じるブリージングの増加⁵⁾は認められない。これは、モルタルやコンクリートの場合、セメントペーストの練りませ時に生じた団粒⁵⁾が骨材のすり合せ効果に

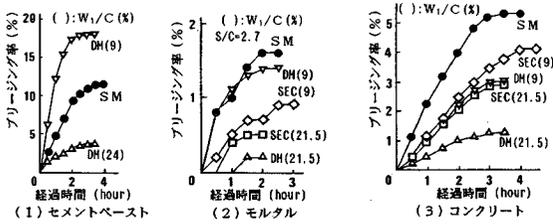


図-5 プリージング率の経時変化

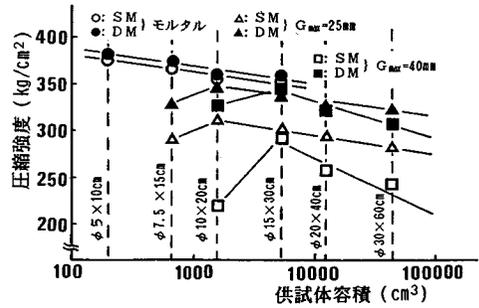


図-7 圧縮強度と供試体寸法の関係

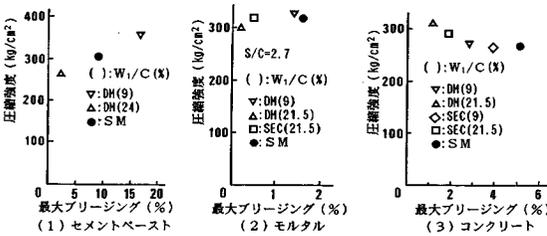


図-6 最大プリージング率と圧縮強度の関係

よってすりつぶされたためにセメントペーストの場合と異なったものと思われる。水を分割して加えた場合に、 W_1/C によらず従来の練りませ方法よりモルタルやコンクリートのプリージングが減少するというこの事実は、SEC工法やダブルミキシングでは W_1/C によらず従来の練りませ方法よりプリージングに関しては、悪い結果が生じないことを意味する。

図-6は最大プリージング率と圧縮強度の関係をセメントペースト、モルタル、コンクリートについてそれぞれ示したものである。セメントペーストの場合、プリージングが大きく実質 W_1/C が小さいほど圧縮強度が大きくなっている。モルタルの場合はプリージングとの相関は明瞭ではなく、プリージングによらずほぼ一定の圧縮強度を示している。一方、コンクリートの場合セメントペーストの場合とは逆に、プリージングの増加に伴い圧縮強度は低下している。また、SECとDMには差が認められず、プリージングと圧縮強度の相関のみが認められた。これらのことは、SECとDMは本質的には同等のもので、コンクリートの強度増大の効果は両者ともプリージングの減少によって説明できる。すなわち、モルタルのプリージングが減少することにより、粗骨材の下に空隙が生じにくくなるためであると考えられる。

(2) 寸法効果

図-7は、SMおよびDMで製造したモルタルとコンクリート (G_{max} : 25, 40 mm) について、圧縮強度と供試体寸法の関係を示したものである。図において、 G_{max} =25 mmのコンクリートの ϕ =7.5 cmおよび G_{max} =40 mmのコンクリートの ϕ =10 cmの場合を除いて、モルタル、コンクリートとも供試体寸法が大きくなるに

従い強度は低下し寸法効果が現われている。例外としたコンクリート (G_{max} =25 mmの ϕ =7.5 cmおよび G_{max} =40 mmの ϕ =10 cm) では、 G_{max} に対し供試体寸法が小さ過ぎたためせき板効果⁸⁾が生じ、供試体寸法が小さいにもかかわらず強度低下を示したものと思われる。そこで、以下ではこの2つの場合を除いて検討した。モルタルではどの供試体寸法においても、わずかにDMの方がSMに比べ圧縮強度は大きくなっているが、供試体寸法の影響はほぼ同程度に現われている。コンクリートでは前述したと同様にDMの方がSMに比べ圧縮強度は大きく、また、供試体寸法の影響はSMの方が大きく現われている。この傾向は G_{max} が大きいほどより顕著となっている。供試体寸法の影響を定量的に評価するには、図のそれぞれの場合の直線の傾きを比較すれば十分であると考えられる。しかし、ここではモルタル、コンクリートの圧縮強度がワイブル理論⁹⁾に従うものとして、以下のように均一性係数 (m) により評価する。

強度の寸法依存に関する研究は過去に多数の報告があり¹⁰⁻¹²⁾、コンクリートについても大寸法のものほど強度が低下することが示されている¹³⁾。一般に完全脆性型破壊では、強度の寸法効果は次式で表わされる。

$$\sigma = \sigma_0 (V/V_0)^{-1/m} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 σ : 強度、 V : 供試体容積、 σ_0 : 基準を意味するサフィックス、 m : 均一性係数

式(1)を用い、図-7の結果からそれぞれの場合における m を求め、図-8に G_{max} (モルタルについては G_{max} =5 mmとした)を横軸にとり示した。なお、この計算においてモルタルでは ϕ =5 cmを、 G_{max} =25 mmのコンクリートでは ϕ =10 cmを、 G_{max} =40 mmのコンクリートでは ϕ =15 cmの供試体寸法のものそれぞれ標準供試体(式(1)のサフィックスが0の場合に相当)とした。図-8において、SM、DMとも G_{max} が大きくなるほど m は低下しており、山田ら¹⁴⁾や大岸ら¹⁵⁾の結果と一致している。しかし、DMではSMの場合よりどの G_{max} においても m は大きい値を示している。このことは、ダブルミキシングにより従来法に比べより

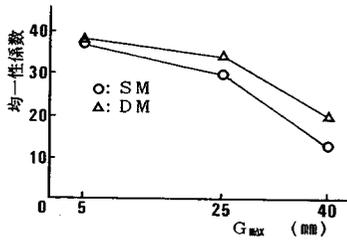


図-8 均一性係数と粗骨材最大寸法の関係

均質なコンクリートを製造できることを示すものである。これらの結果は、前述したようにDMによりブリージングが減少し、ブリージングの発生により骨材下面に形成される欠陥の大きさがSMの場合より小さくなったためと考えられる。

(3) 粗骨材の最大寸法および容積比の影響

図-9は G_{max} を変化させたときの、図-10は V_g を変化させたときのSM, DMで製造したコンクリートの圧縮強度を示したものである。なお、図-14においてはモルタルの値を $V_g=0$ としてプロットした。また、粗骨材は単一粒径のものを用いた。両図において、SM, DMとも G_{max} および V_g が大きくなるほど圧縮強度は低下している。川上¹⁰⁾は、粗骨材の量と粒度がコンクリート強度に与える影響を、同一モルタルマトリックスに対して、単一粒径の粗骨材を加える実験から検討した。これによると、モルタル中に粗骨材を加えることにより強度は低下し、その低下の程度は粗骨材の粒径の対数に比例し、粗骨材の占める容積比に比例すると述べている。図-9, 10の結果はこの川上の結果を裏付けており、 G_{max} および V_g の増大に伴って圧縮強度は低下している。図-9において、 G_{max} の増大に伴う強度低下はSMに比べDMでは小さい。また、図-10における V_g の増加に伴う強度低下もSMに比べDMでは小さくなっている。これらのことは、ダブルミキシングによってブリージングを減少させると、粗骨材下面にできる欠陥の寸法が小さくなる結果、モルタルと粗骨材の付着が改善され、コンクリートの圧縮強度は粗骨材の量または

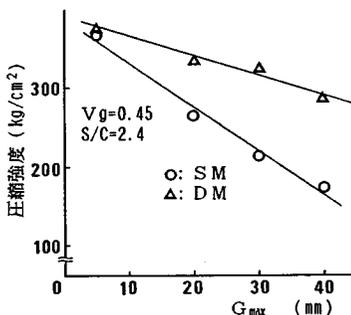


図-9 圧縮強度と粗骨材最大寸法の関係

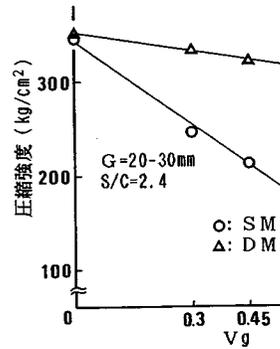


図-10 圧縮強度と粗骨材容積比の関係

最大寸法の影響を受けにくくなるのがわかる。ダムコンクリートでは G_{max} として 150 mm 程度までが用いられるが、この結果を外挿してみるまでもなく、DMがダムコンクリートに有利であることは明らかである。

4. モデルコンクリートの圧縮破壊特性

(1) シリーズI

図-11は、欠陥の位置 (θ) を一定とした場合の、圧縮強度比 σ_k/σ_{non} (インクルージョンを有しないマトリックスの圧縮強度に対する、供試体の圧縮強度の割合) と欠陥の長さ ($\psi/2$) の関係を示したものである。図より、 θ が一定なら、インクルージョンの直径によらず、 $\psi/2$ が長くなるほど、圧縮強度は無欠陥の場合より低下することがわかる。また、図-12は、 $\psi/2$ を一定とした場合の σ_k/σ_{non} と θ の関係を示したものである。 $\psi/2$ が一定ならば、インクルージョンの直径によらず、欠陥が加力方向に対し垂直方向から水平方向に変化するに伴い、供試体の強度低下は少なくなることがわかる。図-13に、これら供試体のインクルージョンとモルタルマトリックスの境界部に貼ったひずみゲージ (ゲージ長 5 mm) の挙動を示す。 $\theta=0^\circ$ の場合では、低荷重域で欠陥先端部ばかりでなく、他の境界もより大きく開き始めている。 $\theta=45^\circ$ の場合では、インクルージョン側部方向の欠陥先端部は低荷重域から開き始めているが、下部側は破壊時まで圧縮状態である。 $\theta=90^\circ$ の場合では、両欠陥先端部とも高荷重域でも開かず、他の境界の方が

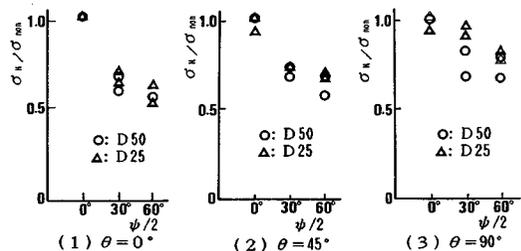


図-11 圧縮強度比と欠陥の長さの関係

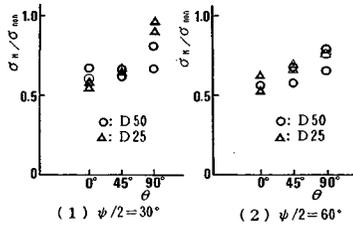


図-12 圧縮強度比と欠陥の位置の関係

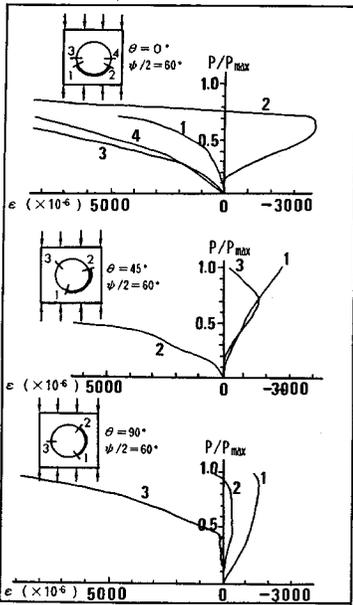


図-13 ひずみゲージの挙動(シリーズI)

先に開き始めている。

図-14, 15は、マトリックス側界面付近の欠陥先端部の応力状態について、FEM弾性解析を行った結果である。図-14において、 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ の場合の最大主応力は欠陥先端部またはその付近で、引張り側となり、 $\theta=45^\circ$ の場合の最大主応力は下部方向の先端部には圧縮側に、側部方向の先端部では引張り側となっている。また、欠陥が $\theta=90^\circ$ から $\theta=0^\circ$ へと加力方向に対して垂直になるに伴い、最大せん断応力が增大している。したがって、 $\theta=0^\circ, 90^\circ$ では低荷重域で両方のクラック先端部から、また、 $\theta=45^\circ$ ではインクルージョン側部のクラック先端部から開き始めると考えられ、図-13のひずみゲージの挙動とよく対応している。そして位置変化による欠陥先端部の微小ひびわれ発生には、主引張応力ばかりでなく、最大せん断応力の影響も存在するものと思われ、特に $\theta=0^\circ$ の場合に、この最大せん断応力の影響は著しいと考えられる。これは図-15において、欠陥がインクルージョン下部に加力方向に対し垂直に位

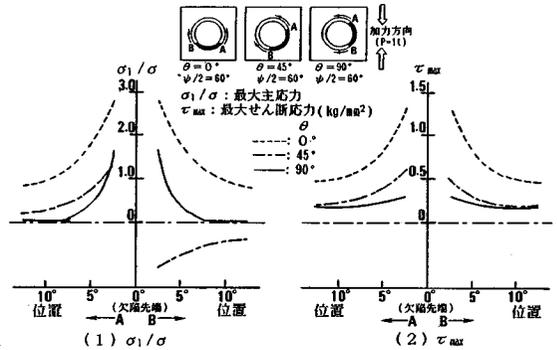


図-14 マトリックス側の欠陥先端部の応力 (FEM弾性解析 : θ の影響)

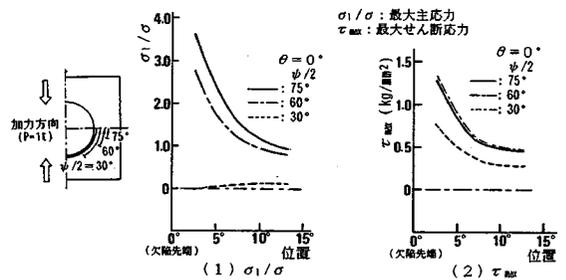


図-15 マトリックス側の欠陥先端部の応力 (FEM弾性解析 : $\psi/2$ の影響)

置する場合 ($\theta=0^\circ$)、欠陥の大きさ ($\psi/2$) が $30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ と大きくなるに伴い、欠陥先端部の主応力が引張りに向かって増大し、最大せん断応力も増大していることからわかる。したがって、欠陥が大きくなるほど、低荷重でクラック先端部は開きはじめ、図-11の結果に帰着するものと考えられる。

以上の結果は、実際のコンクリートにおいて、ダブルミキシング等によりブリージングを少なくすると圧縮強度が増大することや(図-5)、打設方向と異なる向きに加力した場合、同一コンクリートでも圧縮強度が相違すること¹⁷⁾を裏付けているものと思われる。

(2) シリーズII

図-16にインクルージョンの全境界長 (b) に対する全欠陥長 (d) の割合 (d/b) と、 σ_M/σ_{non} の関係を示す。欠陥が存在するというだけで圧縮強度はかなり低下するが、全欠陥長が長くなることの圧縮強度への影響は少ない。このことより、最終破壊性状には以下に述べるどの位置にどのような欠陥が存在するかが重要と考えられる。

図-17に、4個のインクルージョンのうち1個の境界部に欠陥が存在する場合、また、すべてのインクルージョン境界部に欠陥が存在しそのうちの1個または2個が大きな場合についての最終ひびわれパターンを示す。これ

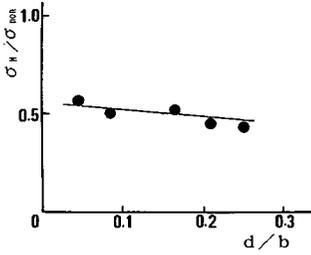


図-16 圧縮強度と d/b の関係

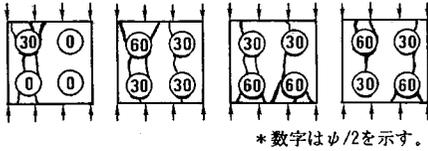


図-17 最終ひびわれパターン

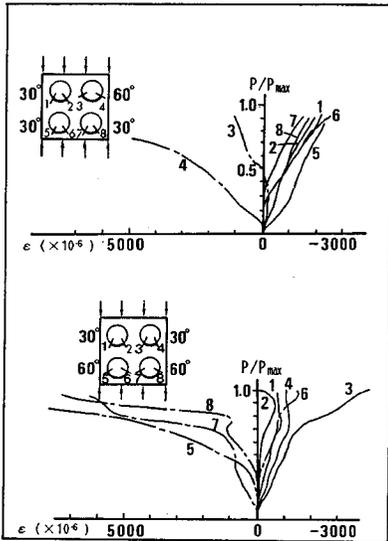


図-18 ひずみゲージの挙動 (シリーズII)

らの図から破局クラックは、欠陥が存在する場合には、その欠陥から、また、多数の欠陥が存在する場合には、その中の最大の欠陥から発生していることがわかる。また、図-18に示すクラック先端に貼ったひずみゲージの挙動からも、大きな欠陥の先端が先に低荷重域から開き始めることがわかる。

この結果は、実際のコンクリートにおいて、同一ブリージングなら、寸法の大きな骨材の下部にできる欠陥から、また、局所的なブリージングの差がある場合では、ブリージングの多い部分の骨材下部の欠陥から、破局クラックは進展することを示唆している。

5. GEMモデルの提案

ダブルミキシングやSECによってコンクリートのブリージングは大幅に変化し、これに伴って圧縮強度が変化する。本章ではグリフィスの破壊理論¹⁸⁾を用いてこの点を検討する。

グリフィスは脆性材料中に長さ $2c$ のひびわれが存在するときの材料の破壊強度 (σ_m) を、式 (2) のように求めた。

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E : 材料の弾性係数、 γ : 単位面積当たりの表面エネルギー

式 (2) において、不均質材料であるコンクリートでは γ は一義的に決定できないが、同一配合、同一骨材を用い破壊性状が同一であるコンクリートの比較においては γ は同一と考えてよい。 $2c$ は材料の内部ひびわれまたは内部欠陥の寸法であるが、材料内に微小ひびわれが発生しても最大ひびわれ $2c$ に至るまでは破壊が起こらないと考えてもよいし、大きさ $2c$ の欠陥に対応する破壊強度 σ_m が存在すると考えてもよい。式 (2) は材料強度 σ_m が $1/\sqrt{c}$ に比例することを意味している。

さて、ブリージングの差はコンクリートの場合、粗骨材の下面にできる空隙の差につながるものと考えられる。粗骨材の下面全部が欠陥にならずとも、ブリージングによってできる空隙の大きさは粗骨材の寸法に関係するはずである。また、モルタルでは砂の寸法に関連した欠陥ができることになる。この欠陥の最大長さが式 (2) の c に関係し、欠陥が大きければ大きいほど材料は低い平均応力で破壊する。コンクリートでブリージングの影響が大きくなる理由である。また、ブリージングの欠陥はセメントペーストでは生じず、実質 W/C に従う。本実験における結果は、粗骨材の周りをブリージングの少ないモルタルがとり囲んでいるから生じるもので、SEC 工法やダブルミキシングによりコンクリートの強度が改善される理由を説明する正しいモデルは、SEC (Sand Enveloped with Cement) よりも、Gravel Enveloped with Mortar、すなわち、GEMモデルであると考えられる。

6. まとめ

ダブルミキシングで製造したコンクリートのブリージングと圧縮強度の関係について検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) ダブルミキシングやSEC工法でモルタルやコンクリートを製造する場合、 W_i/C によらずブリージングは従来法に比べ減少し、セメントペーストの場合に観

察される最悪 W_i/C は存在しない。また、ブリージングの減少に伴い圧縮強度はセメントペーストでは減少するがコンクリートでは増大する。

(2) ダブルミキシングによってブリージングを減少させると、コンクリートの圧縮強度は供試体寸法や粗骨材の容積比および粗骨材最大寸法の影響を受けにくくなり、式(1)から求まる均一性係数 m の値は大きくなる。すなわち、従来法で製造した場合に比べより均質なコンクリートとなる。

(3) モデルコンクリートの圧縮強度はインクルージョンとモルタルマトリックスの境界面に欠陥が存在することにより低下し、その低下量は、欠陥が長くなるほど、また、その位置が加力方向に対して垂直となるほど大きくなる。そして、1つの系内に複数個の欠陥が存在する場合は、破局クラックは、その中の最も大きな欠陥から発生する。

(4) SEC工法やダブルミキシングによる強度改良効果は、ブリージングの減少によって粗骨材下部の界面に発生する欠陥の寸法が小さくなるために生じると説明できる。この際のコンクリートのモデルとして、SEC (Sand Enveloped with Cement) は適当ではなく、ブリージングの少ないモルタルが粗骨材のまわりを囲むモデル、すなわち GEM (Gravel Enveloped with Mortar) が妥当である。

謝辞：本研究では大型供試体の作製にあたり、(財)電力中央研究所(我孫子研究所)より大型型枠を借用した。また、防衛大学校 南 和孝助手、広島大学学生であった西川 毅氏および広島大学大学院生 岸谷克己君らの助力を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 和泉正哲・三橋博三・佐々木達夫：コンクリートの圧縮破壊発生機構に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，第289号，pp.11~25，1980。
- 2) 伊東靖郎・辻 正哲・加賀秀治・山本康弘：S.E.C. コンクリートの特性と展望，セメントコンクリート，No.410，pp.22~29，1981。
- 3) 扇 啓祐ほか：SEC工法により製造したコンクリートの

性質，セメントコンクリート，No.492，pp.26~35，1988。

- 4) 田澤栄一・笠井哲郎：フレッシュセメントペーストのダブルミキシング効果，土木学会論文集，第396号/V-9，pp.135~142，1988。
- 5) 宮沢伸吾・田澤栄一・丹 義幸・江川貴志：練り混ぜ方法がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響，土木学会年次学術講演会講演要旨集，第39回，pp.183~184，1984。
- 6) 田澤栄一・丹 義幸：ダブルミキシング効果に関する2，3の実験と考察，セメント技術年報，Vol.37，pp.209~212，1983。
- 7) 田澤栄一・南 和孝・岡本修一・西川 毅：ブリージングを想定したモデルコンクリートの圧縮破壊性状，コンクリート工学年次論文報告集，第9回，pp.133~138，1987。
- 8) Neville, A.M. : Properties of Concrete, Pitman (Canada), 1963. (後藤幸正・尾坂芳夫監訳：コンクリートの特性，技報堂出版，pp.420，1979.)
- 9) Weibull, W. : Proceeding of Royal Swedish Institute of Engineering Research, No.151, 1939.
- 10) 西松裕一ほか：岩石の強度の寸法効果と測定精度，材料，第18巻，第194号，pp.69~75，1969。
- 11) 横堀武夫：材料強度学，改訂版，岩波書店，pp.334，1974。
- 12) Tazawa, E. and Kobayashi, S. : Polymers in Concrete, ACI, Publication SP-40, pp.67~68, 1973.
- 13) Blanks, R.F. and McNamara, C.C. : Mass Concrete Tests in Large Cylinders, J. Am. Concrete Inst. Proc., Vol.31, pp.280~303, 1935.
- 14) 山田和夫・畑中重光：セメント系複合材料の強度の確率分布指標について，セメント技術年報，Vol.33，pp.351~355，1979。
- 15) 大岸佐吉・小野博宣・棚橋 勇：コンクリートの強度分布の確率特性，コンクリート工学年次論文報告集，第9回，pp.127~132，1987。
- 16) 川上英男：コンクリート強度におよぼす粗骨材の影響，京都大学学位論文，1971。
- 17) 久保直志・松木三郎：コンクリートの打ち込み方向と載荷方向に関する一実験，セメントコンクリート，No.254，pp.17~21，1968。
- 18) Griffith, A.A. : The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Transactions of Royal Society, A.221, pp.163, 1920。

(1988.11.10・受付)