

【討 議】

松尾友矩著 “フロックの破壊機構と強度に関する研究” への討議

(土木学会論文報告集第 229 号・1974 年 9 月所載)

討 議

玉井 信行 (東京大学)

著者が乱流理論の成果を踏まえた上で、フロックの破壊機構を流体力学的に説明される試みをされたことに敬意を表したいと考えます。結論として著者は、単位長さ当たり作用する力が種々のフロックにおいて一定値を示すゆえに、それがフロックの特性値と考えられるとし、フロックの構造、および限界粒子レイノルズ数に言及されています。

以下に述べるのは、著者の論文により啓発され、筆者が到達した見解であり、著者および識者の討議を頂きたいと考えます。

原論文の主題を言い直せば、「与えられた攪拌強度に対して、代表粒径 (安定粒径) がどのように決まるか?」という点に尽きると考えられる。そして、この両者の関係が流れの中の乱れとフロックの特性を集約して示している、というのが筆者の基本的認識である。この観点より、表-2 から表-8 に掲げられた資料を用いて、代表粒径と攪拌強度の関係を示したのが 図-A である。図中

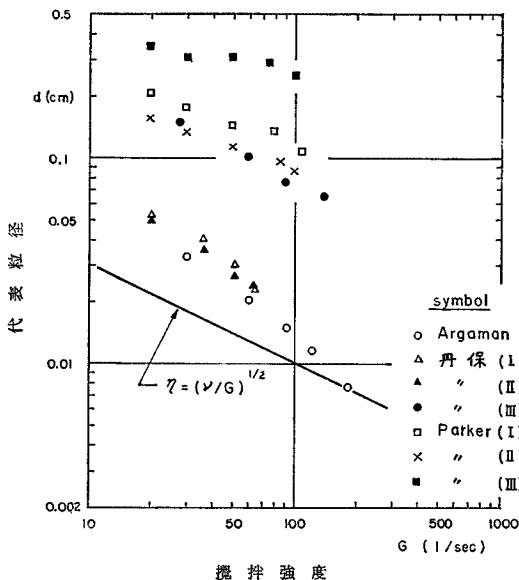


図-A 代表粒径と攪拌強度

表-A 実験結果の要約

分類	報告者	粒子レイノルズ数 (Re) _p	代表粒径と攪拌強度の関係 (実験公式)
(a)	Argaman	0.37~1.21	d ∝ G ⁻¹
	丹保 (I)	1.22~2.10	
	丹保 (II)	1.32~1.82	
(b)	丹保 (III)	19~23	d ∝ G ^{-1/2}
	Parker A I	31~40	
	丹保 B II	18~29	
(c)	Parker C III	61~115	d ∝ G ^{-4/11}

の η は参考のために記入された、乱れのマイクロスケールであり、表-1 に示されている値である。図-A より代表粒径と攪拌強度との関係を実験公式として表わすと表-A を得る。表中の G のべき数の選択は、実験結果と目視の範囲で一致し、以下の議論に最適な値を選んである。次いで、以下の議論において用いる式を再整理しておこう。粘性小領域におけるせん断応力の表示は、式 (20) より

$$\tau_{v1} = 2\mu\sqrt{\frac{2}{15}}\left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{1/2} = 2\mu\sqrt{\frac{2}{15}}G \dots\dots\dots(27)$$

また慣性小領域におけるせん断応力の表示は、式 (8') と式 (21) より次のように書き直される。

$$\tau_{v2} = 2.45(\varepsilon d)^{2/3} = 2.45\nu^{2/3}G^{4/3}d^{2/3} \dots\dots\dots(28)$$

(i) (a) 領域の現象 (表-A の分類に従う)

実験公式および式 (27) から判断して、 $\tau_{v1} \cdot d$ が一定値となる。これは接触面に沿う表面力がフロックに対して一定となることを示し、この表面力をフロックを代表する特性とみなし得る。著者が取扱われたのはこの場合である。一方、この領域で

$$\tau_{v2} \cdot d^n = \text{constant},$$

が成立するためには、 $n=2/3$ となり有意なモデルを構成できない。このことより考えて、図-A に見られるように、 $d \ll \eta$ は満足されていないが、(a) 領域は粘性が卓越する領域と考えてよいであろう。

(ii) (b) 領域の現象

この領域においては $d \propto G^{-1/2}$ であるので

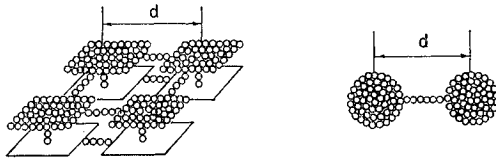
$$\tau_{v1} \cdot d^n = \text{const.}, \quad \tau_{v2} \cdot d^m = \text{const.} \dots\dots\dots(29)$$

が成立するためには $n=m=2$ となり、粘性力と慣性力

のどちらを考慮してもモデルを構成できる。式 (27), (28) から計算されるせん断応力の大きさに関しては、

$$d \geq 0.16(\nu/G)^{1/2} \text{ であれば } \tau_{y2} \geq \tau_{y1}, \dots (30)$$

であり、ここに参照されている資料についてはすべてこの判定基準の粒径より大きく、 $\tau_{y2} > \tau_{y1}$ といえる。さらに (b) 領域に属するブロックでは粒径が η より一桁大きくなっているため、慣性小領域に入っていると判断してよい、と考えられる。



図—B 慣性力モデル

式 (29) の結果より、この領域では慣性力そのものがブロックの物性を代表するモデルとなり、ブロックはそれに応じた形状をとることになる。一つの考えは、板状のブロックが細かい鎖状のもので連結され層を成しているようなモデルが考えられる。図—1 のモデルブロックが破壊したような形も考えられる。あるいは、球形の塊が鎖で繋がった形式も考えられるであろう。

(iii) (c) 領域の現象

この領域においては $d \propto G^{-1/11}$ と考えれば

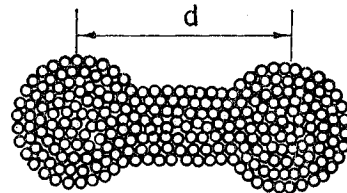
$$\tau_{y1} \cdot d^{11} = \text{const.}, \quad \tau_{y2} \cdot d^{11} = \text{const.}$$

を満足するためには $n=11/4$, $m=3$ であり、粘性力に基づいては有意なモデルを構成し得ず、慣性力が支配的と考えれば力のモーメントがブロックの性状を代表するモデルとなる。 d と G の関係については、図—A のみよりは $d \propto G^{-1/3}$ と考え得るが、そうした場合には粘性力に対するモデルのみ構成し得て

$$\tau_{y1} \cdot d^3 = \text{const.}$$

となる。しかしながら式 (30) を指標にして、(b) 領域に属する粒径より大きなブロックについては慣性小領域の運動に支配されると考えられるので、 τ_{y2} に対して有意なモデルを構成しうべき数で、かつ d と G の関係につき実験結果をほぼ満足しうる値を選んでいる。

この場合には慣性力が支配的と考えていることでもあり、 d だけ離れた点に作用する動圧によるモーメントが



図—C モーメントモデル

ブロックの破壊を決定していると考えられ、ブロックの形状は図—C の形式が考えられる。

まとめ

以上述べてきたように攪拌強度に応じた代表粒径の関係よりブロックの状態を考察するのが自然のように思われる。筆者の考察の結論は次のようにまとめられるであろう。

(1) 攪拌強度と代表粒径の関係に応じて種々の破壊機構が考えられる。それらにおいて支配的な力は、界面力、慣性力、曲げモーメントである。

(2) 乱れのマイクロスケールと粒径の関係、せん断応力の強さ、モデルが構成できるか否かの3つの観点からして、粘性が卓越するのは表—A の分類による (a) 領域のみと考えられる。したがって、限界粒子レイノルズ数は一桁の数と考えられる。

回 答

松尾友矩 (東京大学)

私の論文に対して早速に検討を加え、新しいモデルの可能性を示された玉井氏からのご討議を頂きましたこと深く感謝致しております。

玉井氏の示されたモデルについての私の若干の見解を申し述べさせていただき討議に対するお答えとしたいと思います。

(1) 玉井氏の提示された慣性力モデル (B領域)、モーメントモデル (C領域) においては、どのような力が

どのようにブロックに働きどのようなブロックの抵抗に会うときに破壊が引き起こされるのかのイメージが理解しにくいように思われます。

a) 界面力モデル、慣性力モデル、モーメントモデルにしても、ブロックに加えられる支配的な外力としてブロック表面に作用する表面応力 τ_y だけを考えるのであれば、形式的に $P = \tau_y \cdot d^2$ という力として評価しても、また $M = \tau_y \cdot d^3$ という偶力モーメントとして評価しても、ブロックの形状を大きさによらず相似なものと考えれば、ブロックに対する外力としての表面応力の影響はブロックの大きさにはよらない同質のものでなければならぬと思われます。

b) むしろ（これはフロックの大きさにはよらないと思いますが） $\tau_y \cdot d^3$ の偶力モーメントを受けて回転運動を続けていくとすれば、回転による遠心力の作用については検討が必要なのかもしれません。この遠心力の効果については別の機会に考えてみたいと思います。

c) “慣性力そのものがフロックの物性を代表するモデル”，あるいは“力のモーメントがフロックの性状を代表するモデル”といわれるモデルの定性的な内容はどうのようなものなのでしょう。フロックの“物性”はどちらかといえば凝集条件とか粒径といったフロック側の要因によって支配されていると考える方が自然であると思われまます。

(2) フロックの基本的な構造をどのようなものと考えられるかは私の論文の後半部分の最大のテーマでもありました。その点玉井氏の想定された図—B, 図—C からはもう一つフロックの構造が明らかにならないように思えます。

a) フロックの基本的な構造として 図—1 のようなモデルを想定するのであれば、丹保氏ら²⁾ が示された密度関数の考え方を発展させた関係式を導入することによって、おそらく私の示した面力のような力あるいは玉井氏が示された (a), (b), (c) の領域区分等は必要がなくなるように思われます。

b) もう少し一般的な形で考えても、フロックの示す抵抗力が粒径の何らかの関数であるような構造を考えるならば、実験値として得られる $\tau_y \cdot d^n$ の関係式において n を整数 (1, 2, 3) と仮定する必然性は少ないと思われまます。 n が整数しかも 1, 2, 3 のときだけ有意のモデルであると規定するためには条件が不足しているのでは

ないでしょうか。

c) 図—B, 図—C に示された双極子的なフロック（と呼ぶことにします）モデルは Parker ら⁴⁾ によっても提示されていますが、フロックが一度破壊された後の状態を考えてみればすでに双極子的モデルではなくなってしまうから、次には別の破壊機構を考え直さなければならなくなります。双極子的なモデルの寿命はいたって短いと考えられます。

(3) 粘性的な力が支配的な領域か、慣性的な力が支配的な領域なのかの判定、すなわち、限界粒子レイノルズ数の大きさについてはまだまだ検討が必要だと思えます。粒子レイノルズ数が大きな領域は大体において粒径の大きな状態に対応しており、粒径が大きくなるとフロックの持つ構造なども非常に複雑になってくるであろうことが想像され、なかなか簡単な形では整理しきれないのが実情であると思えます。

以上玉井氏から頂いた討義に関連して私の考えたことをまとめてみました。

面力一本で押し通した形である私のモデルの限界がどこに現われてくるのか、玉井氏のモデルがどのような条件のもとに成立するのかは、フロックの側の条件をもっと直接的に調べていくことによってのみ明らかになり整理が進むものと考えられます。

今回私が提示した一つの試論がたたき台となってさらに皆様との討論を通じてすこしでもフロックの問題への理解が進められていくとすれば、これにすぐる望みはありません。

コンクリートライブラリー一覽

No.	編著者	題 目	定価	〒
3	委員会編	異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート構造物の設計例		
10	委員会編	構造用軽量骨材シンポジウム	500	140
11	樋口芳朗	微細な空気を充てんするためのセメント注入における混和材料に関する研究	120	60
15	委員会編	ディビダーク工法設計施工指針(案)改版	900	210
17	委員会編	MDC 工法設計施工指針(案)	700	210
20	委員会編	フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究	500	100
21	委員会編	パウル・レオンハルト工法設計施工指針(案)	700	210
22	委員会編	レオバ工法設計施工指針(案)	700	140
23	委員会編	BBRV 工法設計施工指針(案)	900	210
24	委員会編	第2回構造用軽量骨材シンポジウム	1100	210
25	丸安・小林 阪本	高炉セメントコンクリートの研究	550	210
26	松本嘉司	鉄道橋としての鉄筋コンクリート斜角げたの設計に関する研究	200	80
27	岡村甫	高張力異形鉄筋の使用に関する基礎的研究	200	60
28	尾坂芳夫	コンクリートの品質管理に関する基礎研究	200	60
29	委員会編	フレシネー工法設計施工指針(案)		
30	委員会編	フープコーン工法設計施工指針(案)	1000	210
31	委員会編	OSPA 工法設計施工指針(案)	1100	210
32	委員会編	OBC 工法設計施工指針(案)	1100	210
33	委員会編	VSL 工法設計施工指針(案)	1000	210
34	委員会編	鉄筋コンクリート終局強度理論の参考	1600	210
35	委員会編	アルミナセメントコンクリートに関するシンポジウム	1300	210
36	委員会編	SEEE 工法設計施工指針(案)	1300	210

37	委員会編	コンクリート標準示方書（昭和49年度版）改訂資料	1500	210
38	委員会編	コンクリートの品質管理試験方法	1500	210
39	委員会編	膨張性セメント混和材を用いたコンクリートに関するシンポジウム	1500	210