

[討議・回答]

萩原淳平
中井雅司 共著
名和豊春

「モルテカルロ法を用いた高流動コンクリートの 限界粗骨材量推定方法」への討議・回答

(土木学会論文集, No. 690/V-53, 2001年11月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

藤原浩巳 (宇都宮大学)

Hiromi FUJIWARA

高流動コンクリートが自己充填性を有するためには、高流動性に加えて分離抵抗性および間隙通過性の3つの性能が十分に高いものであることが必要である。これら3つの性能の内、高流動性および分離抵抗性はコンクリート自身の性能であるが、間隙通過性はコンクリート自身の性能の他、施工条件、特に配筋条件の影響を強く受けるものである。これまでの研究によって間隙通過性に影響を与える配合上の要因としては粗骨材量、施工上の要因としては鉄筋純間隔が最も強い影響を与えることが明らかとされており、これらの関係についての詳細な研究も進められている¹⁾。本論文もこれらの一連の研究の中の一つであり、鉄筋間で起こる粗骨材の架橋現象をモデル化し、その妥当性について検証を行った結果をもとに、任意の配筋条件に対して自己充填性が確保される限界粗骨材量を推定する方法を提案したものである。

このような研究は自己充填性に対する高流動コンクリートの信頼性を高めるものとして評価されるべきものと考えるが、同じ領域を研究する者として以下に記すような疑問な点があり、今後の研究の進展のために是非討議を行いたいと思うものである。

(1) 自己充填性限界状態の仮定における妥当性

本論文では、コンクリートをモルタルと粗骨材の2相系材料としてとらえ、モルタルのレオロジー性状を適正化しコンクリートの高流動性および分離抵抗性が達成されたとしても、自己充填性が得られないのは、鉄筋等の間隙において粗骨材同士の架橋現象が生じるためとしている。しかしながら、このような粗骨材同士の架橋現象は自己充填性に非常に大きな影響を与えるものであることは認められるものであるが、これが自己充填不良の原因の全てではなく、他の要因の影響も存在する。言い換えれば、施工条件によっては間隙において粗骨材の架橋が起らなかったとしても自己充填性が不十分であることも起こり得、これは高流動コンクリートが水のようなニュートン流体とは異なるこ

とに起因する。

一般に、本論文中に用いられているU型充填装置のようなものを用いた間隙通過性試験における結果においては、仕切りゲート開放後早い段階で間隙部で閉塞を起こすものと、コンクリートの多くの部分が間隙を通過するものの2つに明確に分かれる傾向がある²⁾。前者においては間隙部において粗骨材が架橋し閉塞したものであることは明らかであるが、後者においては“通過すべきコンクリート量”の全量が通過しなかったとしても、その原因は粗骨材の架橋によるものと考えるには無理があり、むしろ間隙部における圧力損失、装置内面との摩擦およびコンクリートの内部摩擦力等に原因を求めるべきものと考える³⁾。なお、ここでの“通過すべきコンクリート量”とはコンクリートが水のようなニュートン流体であった場合に通過する量を意味するものである。

本論文においては自己充填の限界状態はU型充填装置における充填高さ30cmとしており、これは鉄筋間隙での粗骨材同士の架橋によって生じるものとしている。しかしながら、充填高さ30cmは“通過すべきコンクリート量”のほぼ90%が通過したことを意味しており、このような状態において鉄筋間隙で粗骨材同士の架橋が通過全断面で生じたとは考えられず、本論文の仮定の妥当性に疑問がある。

(2) 間隙部閉塞モデルの妥当性

本論文では鉄筋間で架橋する粗骨材は付着モルタル膜で覆われているものとし、また鉄筋においては付着拘束されたコンクリート膜に覆われているものとして閉塞をモデル化している。そして、限界粗骨材量の計算において粗骨材および鉄筋はそれぞれモルタル膜およびコンクリート膜を持ったものとし計算している。しかしながら架橋を構成する粗骨材と鉄筋において、一方はモルタル膜が付着するとし、もう一方はコンクリート膜という異なるものが付着するとしたモデルには、その妥当性において疑問が生じる。特に付着コン

クリート膜厚の計算においては、コンクリートのスランプフローから導き出される降伏値を用いているが、その結果は6~7mmとなっており、この膜をコンクリート膜とすることは出来ないと考えられる。このような観点より、本論文における閉塞モデルの妥当性に疑問をもつものである。

以上、今後のこの領域の研究を更に進めるためにも是非検討され、ご回答いただければ幸いである。

参考文献

- 1) 藤原浩巳, 長滝重義, 大即信明, 堂園昭人: 高流動コンクリートの間隙通過性に関する研究, 土木学会論文集, No. 550/V-33, pp. 23-32, 1996年11月.
- 2) 土木学会: コンクリート技術シリーズ, 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題, pp. 34-46, 1997年11月.
- 3) 藤原浩巳, 長滝重義, 堂園昭人, 小島明: 高流動コンクリートの自己充填性に関する研究, 土木学会論文集, No. 571/V-36, pp. 1-13, 1997年8月.

(2002.5.16 受付)

▶ 回答者 (Closure) —— 荻原淳平 (北海道電力(株))・中井雅司 (北海道電力(株))・名和豊春 (北海道大学)
Junpei OGIHARA, Masashi NAKAI and Toyoharu NAWA

まず初めに、著者らの研究に貴重なご討議を賜ったことに対して、討議者ならびに論文集編集委員会に感謝の意を表します。

既報¹⁾では、自己充填性の限界状態をU形充填高さ30cm²⁾とし、この時に付着モルタル膜に覆われた粗骨材粒子同士が鉄筋間隙部において架橋すると仮定いたしました。本仮定に対する解釈について、討議者からのご指摘の観点に立ち戻って自己充填性の限界状態について説明を加え、閉塞が生じる機構について再考した結果をもって、著者らの回答と致します。

1. 自己充填性の限界状態について

U形充填装置を用いた実験の場合には、討議者からのご指摘されたようにコンクリートの挙動が2種類に分かれます。すなわち、仕切りゲート開放後、早い段階に間隙部で閉塞を起こすものと、多くのコンクリートが通過した後閉塞を生じるものです。前者の現象は、コンクリートが分離している場合や粗骨材量が非常に多すぎる場合に起きる現象であり、コンクリートの配合が非常に不適切な場合であると言えます。著者らは、流動性および分離抵抗性が十分である時の限

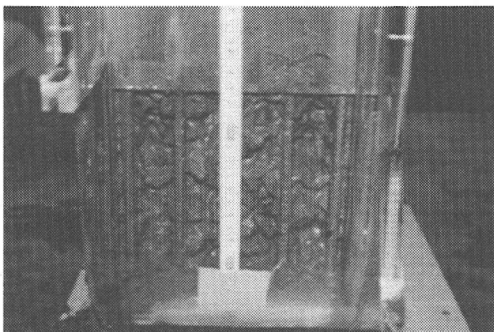


写真-1 鉄筋間隙部におけるコンクリートの閉塞状況

界粗骨材量を求めようとしたものであり、研究の対象としては後者の現象が生じるコンクリートを対象としました。写真-1は、U形充填装置の鉄筋間隙部(鉄筋障害条件R1)を写したものであります。なお、実験終了後すぐに鉄筋間隙部を通過したコンクリートは取り除いてあります。コンクリート(粗骨材量0.31m³/m³, スランプフロー59cm, V漏斗流下時間15秒)のU形充填高さは、27cm(コンクリート量の約80%が通過)でした。写真-1に示されるように、鉄筋間隙部でコンクリートが閉塞しており、粗骨材同士が架橋していることが分かります。このような事実から、著者らはコンクリートの大部分が通過しても、鉄筋間隙部において粗骨材同士の架橋が生じていると判断いたしました。

次に、このコンクリートの閉塞現象のメカニズムを再考いたします。図-1は、U形充填装置におけるコンクリートの閉塞現象についての考え方を示したものです。実験開始直後の(a)図では、まず付着モルタル膜に覆われた粗骨材同士が鉄筋間隙部で架橋します。しかし、鉄筋間隙部に液圧³⁾($p=0.8 \cdot Wc \cdot h$, Wc : コンクリートの密度)に見合うせん断力が作用するため、このせん断力がモルタル降伏値より大きい場合、付着モルタル膜が薄くなり、その結果、付着モルタル膜に覆われた粗骨材同士が接触しなくなり架橋構造が崩れ、コンクリートの流動が再び開始します。コンクリートが流動中は、この過程を繰り返し、大部分のコンクリートが鉄筋間隙部を通過するものと考えられます。

他方、(b)図は、コンクリートが流動を停止した時を示したものであります。コンクリートが右室に充填されていくに従い、液圧が小さくなり、その結果鉄筋間隙部に作用するせん断力は小さくなります。せん断力が、モルタル降伏値に等しくなった時に付着モルタル膜に覆われた粗骨材同士は流動しなくなり、鉄筋間隙部で架橋するため、コンクリートが閉塞し、コンク

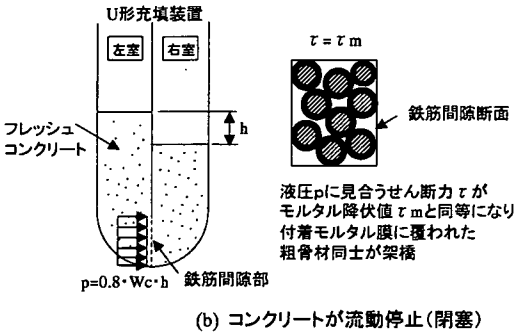
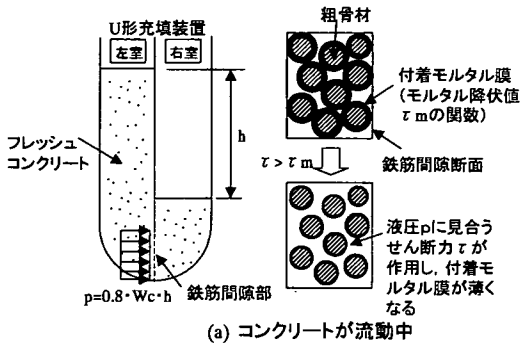


図-1 コンクリートの閉塞現象のメカニズム

リートの流動が停止するものと考えられます。

既往の実験結果 (U形充填高さが30 cmとなる限界の粗骨材量) を既往の間隙部閉塞モデルにより再現できたことから、U形充填高さが30 cmになる時の鉄筋間隙部に作用するせん断力は、モルタル降伏値と同等であり、10~20 Pa程度と考えられます。既報では、モルタル降伏値とモルタルフロー値が1次関数で一義的に表せることを示しました。また、モルタルフロー値は、粗骨材量および粗骨材の粒度に拘らず、スランブフローの一次関数で一義的に表せることも示しました。したがって、モルタル降伏値10~20 Paは、スランブフロー60~65 cmに相当します。以上より、既報で提案した間隙部閉塞モデルは、高流動コンクリートに適するスランブフローの値である60~65 cmのコンクリートについては、U形充填高さ30 cmとなる限界の粗骨材量を算出できるものと考えられます。

2. 間隙部閉塞モデルの妥当性について

討議者からのご指摘である「粗骨材にはモルタル膜が、鉄筋にはコンクリート膜が付着するとしたモデルでは疑問が生じる」という質問に対し回答致します。

前章で述べたように、著者らはコンクリートは分離

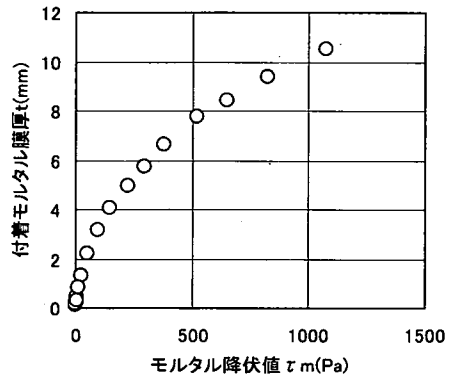


図-2 モルタル膜厚とモルタル降伏値の関係

表-1 細骨材の各粒径に対する個数割合

粒径区分(mm)	個数割合(%)
5~2.5	0
2.5~1.2	0.1
1.2~0.6	1
0.6~0.3	7.5
0.3~0.15	29.2
0.15~0.09	30.7
0.09~0.06	31.5
合計	100

していないという仮定条件のもとに、間隙部閉塞モデルを構築しました。その際に、コンクリートを粗骨材とモルタルの2相材料と仮定し、さらに粗骨材に付着されるモルタルが存在すると仮定いたしました。既報¹⁾で提案した式によれば、付着モルタル膜厚とモルタル降伏値の関係は図-2に示すようになります。

図-2よりモルタル降伏値が増加するに従い、付着モルタル膜は増加し、通常コンクリートまで対象とすると1 cm程度までも達することがわかります。なお、既報¹⁾において、解析対象のモルタル降伏値は、先に述べた自己充填性を有する10~20 Pa程度であり、図-2から、その際のモルタル膜厚は1~2 mm程度となります。また、表-1に細骨材の寸法と個数割合の関係を示します。表-1より粒径1 mm以下の粒子の個数割合は約98%となります。したがって、討議者のご指摘されましたように厚さは非常に薄いものの、1~2 mmの厚さのモルタル中には数多くの細骨材の微粒子が含まれており、これを粗骨材に付着したモルタル膜と呼ぶことにいたしました。

一方、鉄筋間を通過する場合は、鉄筋の表面にコンクリートが流動しない層(鉄筋に付着するコンクリート膜)が存在すると仮定しました。これは、鉄筋間を流れるコンクリート流が、完全流体である水が橋脚の間を流下する場合に近似して考えたものです(図-3参照)。すなわち、橋脚間の流速分布は、橋脚に近づくほど、流速が遅くなり橋脚周辺に死水域が存在することが知られており、これにより鉄筋の近傍にも流動

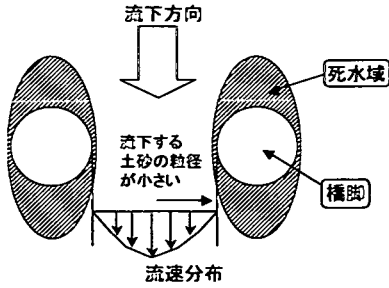


図-3 橋脚部における流況模式図

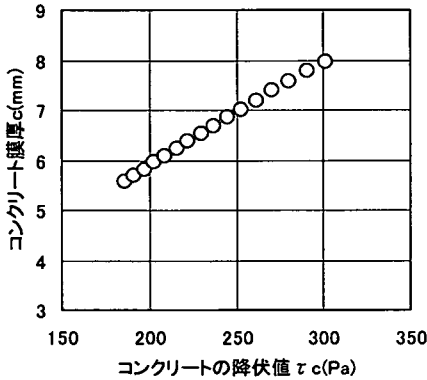


図-4 コンクリート膜厚とコンクリートの降伏値の関係

しないコンクリート層と考えたわけです。

既報¹⁾で提案した式に基づいて求めた鉄筋に拘束されるコンクリート膜厚とコンクリートの降伏値の関係を図-4に示します。ただし鉄筋径は13mmの場合で、コンクリートの降伏値は、スランプフローから推定したものです。図-4よりコンクリートの降伏値が増加するに従いコンクリート膜厚が増加し、コンクリート膜厚が厚いほど粗骨材粒径の大きなものが含まれていくものと考えられます。既報¹⁾において解析に使用したスランプフローは60cmであり、降伏値に換算すると253Paとなります。図-4から、その際のコンクリート膜厚は、7mm程度となります。図-5は粗骨材の個数基準の確率密度関数²⁾を示したものであり、各粒径に対する個数割合を表しています。個数基準の粗骨材の粒度分布は、小さい粒径側に偏っており、粒径7mm以下の割合は約20% (粗粒)～40% (細

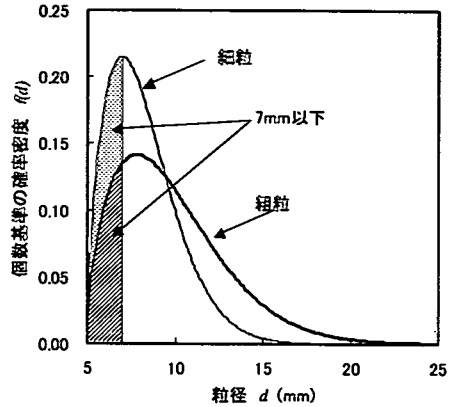


図-5 粗骨材の個数基準に従う確率密度関数

粒) となります。したがって、討議者をご指摘されましたように厚さは薄いものの、コンクリート中には数多くの粗骨材が含まれており、これを鉄筋に付着したコンクリート膜と呼ぶことにいたしました。

なお、水理学でよく知られた事実から図-4に示した付着力を考慮した考察から粗大な粒子は鉄筋近傍に付着しないものと判断されます。すなわち、土砂を伴った流れ (図-3参照) では、流速の速い領域に粒径の大きな土砂が、流速の遅い領域に粒径の小さい土砂が偏析します。したがって、コンクリートの流下においても、鉄筋近傍のような抵抗を受ける領域では、流速が低下し、微小な粒子が堆積し易くなるものと考えられます。

参考文献

- 1) 萩原淳平, 中井雅司, 名和豊春: モンテカルロ法を用いた高流動コンクリートの限界粗骨材量推定方法, 土木学会論文集, No. 690/V-53, pp. 65-82, 2001.
- 2) 高流動コンクリート施工指針, コンクリートライブラリー93, 土木学会, 1998.
- 3) 野口貴文, 友澤史紀, 呉相均: 高流動コンクリートの間隙通過性に関するレオロジー的考察, コンクリート工学年次論文報告書, Vol. 17, No. 1, pp. 23-28, 1995.
- 4) 藤原浩巳, 下山善秀, 富田六郎, 久保田裕康: 高流動コンクリートの充填性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告書, Vol. 14, No. 1, pp. 27-32, 1992.

(2003.1.20 受付)