

高流動コンクリートの間隙通過性に関する研究

藤原浩已¹・長瀧重義²・大即信明³・堂園昭人⁴

¹正会員 工博 日本セメント株式会社中央研究所副主任研究員(〒135 東京都江東区清澄一丁目2-23)

²正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-21 新潟県新潟市五十嵐二の町8050)

³正会員 工博 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

⁴正会員 工修 日本セメント株式会社中央研究所(〒135 東京都江東区清澄一丁目2-23)

高流動コンクリートは、型枠内に自己充填することが期待されるものであるが、この自己充填性を有するための最も重要な性能の1つに鉄筋間等の間隙を通過流動することができるための間隙通過性がある。本研究では高流動コンクリートの間隙通過時の閉塞を間隙部での粗骨材体積濃度の増大による粗骨材の架橋現象としてとらえ、このような現象を説明するメカニズムモデルを構築すると共に実験により検証した。その結果、閉塞が起こる粗骨材体積濃度、間隙幅および配筋方向等の条件をある程度明らかとすることができた。

Key Words : self-compacting property, ability to pass between bars, volume of coarse aggregate, wall effect, clogging of coarse aggregate

1. はじめに

高流動コンクリートが型枠内自己充填性を有するためには間隙通過性と呼ばれる鉄筋間などの狭い間隙を通過する性能が必要となり、これまで鉄筋間の通過に必要なコンクリートのフレッシュ性状の条件について多くの研究がなされている^{1) 2) 3)}。しかし、鉄筋間の通過に影響を及ぼす要因には、コンクリートのフレッシュ性状の他に配筋条件等が考えられるが、それらを体系的に研究した例は少ない。

そこで本研究では高流動コンクリートの間隙での閉塞のメカニズムモデルを構築し、そのモデルを検証するために、種々の要因を変化させた高流動コンクリートについて、間隙通過実験を行なった。

2. 間隙における閉塞メカニズムモデル

(1) 粗骨材の架橋と間隙幅

コンクリートが鉄筋間等の間隙で閉塞を起こす主要原因は、鉄筋間での粗骨材の架橋によるものと考えられる。このような架橋は図-1に示す挙動で説明される。すなわちコンクリートが間隙を流動する際(図-1a)には、鉄筋に接した粗骨材が鉄筋を回転しながら迂回しようとする(図-1b)。この時に隣り合うもう一方の鉄筋を回転してきた粗骨材と接触

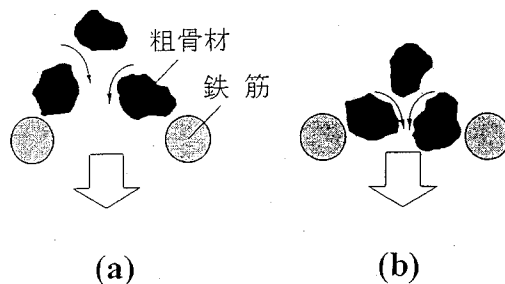


図-1 鉄筋間通過時の粗骨材の挙動

し、安定した構造を形成した場合には架橋するものと考えられる。このような架橋は鉄筋に接触しない粗骨材が介在するケースも考えられるが、構造的には安定となりにくいと考えられる。したがって、間隙幅がそれ程度以上大きくなると架橋の危険性が大きく低下する架橋限界間隙幅が存在するものと推定した。この考えに基づき、鉄筋に接触した粗骨材のみで架橋現象が起こるとし、粗骨材を半径 r の単一粒径を持った粒群と仮定すると、安定した架橋が起こりうる最大鉄筋間隔は1方向配筋の場合には図-2に示すように $(2+\sqrt{3})r$ 、クロス配筋の場合には $(2+2\sqrt{2})r$ となり、これ以上の間隔となると架橋の可能性は大幅に低下するものと考えられる。したが

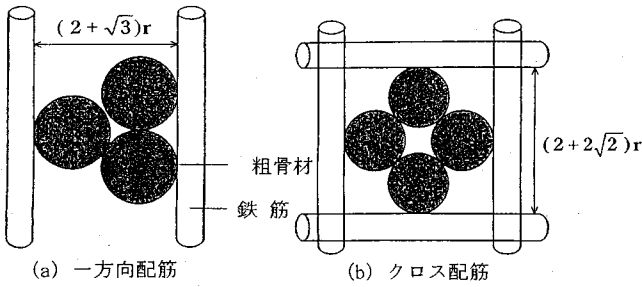


図-2 安定した架橋構造となる最大鉄筋間隔

って、粗骨材を直径20mm ($r=10\text{mm}$) の単一粒径を持った球と考えると、1方向配筋においては鉄筋純間隔37.3mm、クロス配筋においては鉄筋純間隔48.3mmが架橋限界間隙幅となる。

しかし、実際の粗骨材を考えると、最大寸法20mmとされる粗骨材は、20mmのふるいを90%以上通過することを意味しており、20mmを越える寸法を有する粒子が存在する。したがって可能性としては非常に小さいが20mm以上の寸法を有する骨材間で架橋を起こすこともあり得ると考えられる。しかし、これらの方を考慮しても最大寸法20mmの粗骨材を用いたコンクリートにおいては、1方向配筋で鉄筋純間隔約40mm、クロス配筋で純間隔約50mmを越えると、架橋による間隙部での閉塞の危険性が大きく低下すると推測される。

(2) 粗骨材体積濃度と架橋現象

粗骨材の架橋は粗骨材間での接触によって起こる。このような接触は粗骨材間距離が十分とられていけば起こらないものと考えられる。したがって、架橋には粗骨材体積濃度 X_v (%) が重要な要因となる。すなわち、粗骨材が鉄筋に接触して回転運動を起こす際に、周囲に存在する粗骨材と接触しない程度に粗骨材間距離が取られていけば、換言すれば間隙部において X_v がある一定値以下であれば粗骨材間での接触は起こらず、したがって架橋も起らないと考えられる。

また、粗骨材が球に近くなるほど回転スペースに必要なモルタル量は少なくなる。すなわち X_v が同じ条件であるならば、球に近い形状の粗骨材ほど架橋の危険性は低下するものと考えられる。

そこで、まず回転スペースに必要なモルタル量を考える。粗骨材を長軸 $2a$ 、短軸 $2b$ の楕円体と考えると、その体積 V_g は次式で表される。

$$V_g = (4/3) \pi a^2 b \quad (1)$$

また、回転に必要なスペースは $(4/3) \pi a^3$ であるので、回転スペースに必要なモルタル量 V_s は以下の式で求まる。

$$V_s = (4/3) \pi a^2 (a-b) \quad (2)$$

したがって、単位容積 (1m^3) 当たりの粗骨材の回転スペースに必要なモルタル量 V_{ms} (L) は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} V_{ms} &= 10 \cdot X_v \cdot (V_s / V_g) \\ &= 10 \cdot X_v \cdot (a-b) / b \end{aligned} \quad (3)$$

また、粗骨材の回転スペース (球体) の空隙を埋めるモルタルも必要である。この時の空隙量は粗骨材の粒度分布によるが、今回の検討では最低限必要な量の計算として、3次球までのHorsfield充填 (1次球半径10mm, 2次球半径4.1mm, 3次球半径2.3mm) における空隙率である0.19を採用し⁴⁾、次式で求めた。

$$\begin{aligned} V_{mb} &= \frac{0.19}{(1-0.19)} \times \frac{(4/3) \pi a^3}{V_g} \times 10 X_v \\ &= 2.35 X_v (a/b) \end{aligned} \quad (4)$$

V_{mb} : 空隙を埋めるモルタル量(L)

したがって、 X_v が以下の式で求まる X_{vt} 以下であるならば粗骨材が回転運動を起こしても接触する可能性は低いことになる。

$$\begin{aligned} 10 \times (100 - X_{vt}) &= V_{ms} + V_{mb} \\ X_{vt} &= 81.0 (b/a) \end{aligned} \quad (5)$$

(3) 間隙における粗骨材体積濃度の増大

容器内のコンクリートにおいて、容器壁等境界面近傍では壁効果により X_v は低くなることが知られている⁴⁾。すなわち、配合による粗骨材体積濃度 X_{v0} のコンクリートは、境界面近傍で図-3に示すような X_v の分布をすると考えられる。この図において、境界面での X_v を0とし、 X_{v0} となるまでの境界面からの距離を l_0 とした。このような現象は閉塞直前の鉄筋近傍でも同様に起こるものと考えられる。

このことより、1方向配筋 (純間隔: d) された鉄筋の配置面において、 X_{v0} の配合粗骨材体積濃度を持つコンクリートの X_v は図-4に示すような分布をすると仮定した。この図において 部の面積

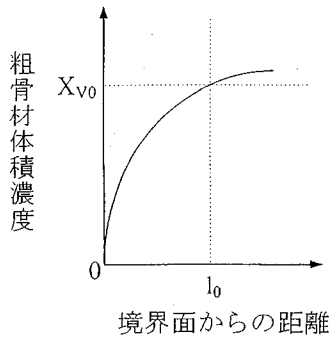
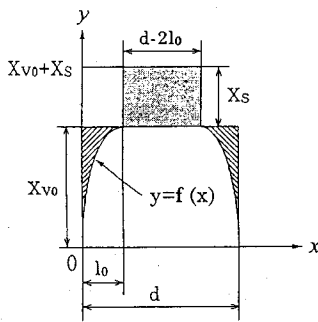


図-3 境界近傍における粗骨材体積濃度の分布



斜線部分の面積： $2\{X_{v0}l_0 - \int_0^{X_{v0}} f(x)dx\}$

図-4 1方向配筋における境界面からの距離と粗骨材体積濃度の関係

の和と斜線部の面積は等しくなる。したがって、以下の式が成り立つ。

$$X_s(d-2l_0) = 2\{X_{v0}l_0 - \int_0^{X_{v0}} f(x)dx\} \quad (6)$$

X_s : 間隙中央部での粗骨材体積濃度の増分

また、同様にクロス配筋（純間隔： d ）された鉄筋の配置面において、 X_{v0} の配合粗骨材体積濃度を持つコンクリートの X_v は図-5に示すような分布をすると仮定した。この図において図-6に示すような体積についての等式が成り立ち、したがって、以下の式が成り立つ。

$$X_s(d-2l_0)^2 = X_{v0}d^2 - \int_0^{X_{v0}} \{d-2f^{-1}(y)\}^2 dy \quad (7)$$

この場合の間隙中央部における X_v は1方向配筋の場合よりさらに増大する。このような間隙中央部での X_v の増大は、間隙幅が小さいほど大きくなる。

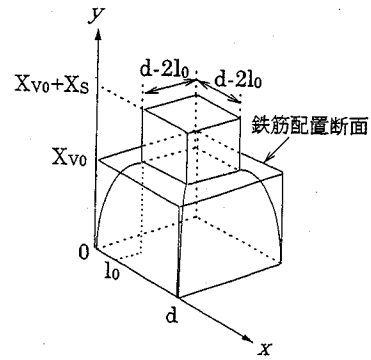
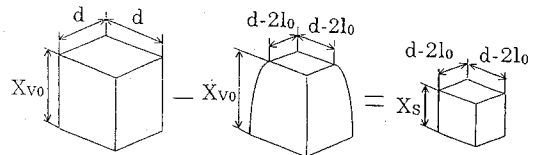


図-5 クロス配筋における境界面からの距離と粗骨材体積濃度の関係



$$\text{体積} = \int_0^{X_{v0}} \{d-2f^{-1}(y)\}^2 dy$$

図-6 図-5における体積の等式

したがって、このように X_v が間隙部で増大し、式(5)における $81.0(b/a)\%$ を越すようになった場合に粗骨材相互の間隙部での接触が起こるようになり閉塞の可能性が高まるものと考えられる。

(4) モルタルの塑性粘度・降伏値の影響

モルタル部の塑性粘度 η_{p1} および降伏値 τ_c が及ぼす間隙通過性への影響について考える。これまでの研究により、間隙幅および粗骨材体積濃度による τ_c が 10Pa 以下または η_{p1} が $3\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下の場合には、間隙部での粗骨材の架橋が起り、閉塞することが明かとされている⁵⁾。また、反対に τ_c が 50Pa 以上または η_{p1} が $10\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上の場合においても閉塞の危険性が高まることが知られている⁵⁾。 τ_c および η_{p1} が大きい場合には、コンクリートは単純なビンガム流体として取扱われ、コンクリート自体の降伏値が式(8)で示す間隙通過の際に発生する最大せん断応力よりも大きくなったために閉塞するものと考えられている⁶⁾。

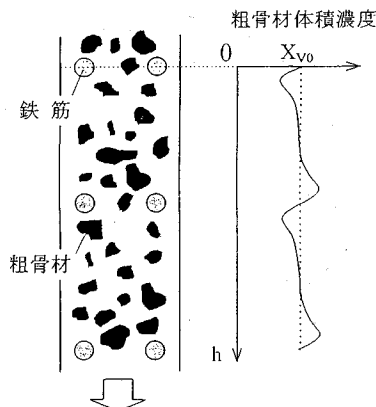


図-7 鉄筋間通過による粗骨材体積濃度の変化

$$\tau_{max} = Pd/2R \quad (8)$$

P:作用応力, d:鉄筋間隔, R:鉄筋径

したがって、粗骨材の架橋による閉塞現象に影響を及ぼすのは τ_i および η_{pl} が小さい領域である。

しかし、コンクリートの高流動性と分離抵抗性が確保された状態で間隙通過性に影響を与える τ_i および η_{pl} の効果は、 X_v や間隙幅等と比べると小さいことがわかっている⁷⁾。したがって、 τ_i および η_{pl} は間隙通過性の境界に近い間隙幅と X_v の条件下において影響を及ぼすものと考えられる。

τ_i が10Pa程度以下の小さい場合には、高流動コンクリートの流動の際に粗骨材とモルタルとの間に相対速度が生じるようになり、 X_v のムラが生じる。例えば鉛直下向きに高流動コンクリートが流動する場合には、粗骨材はモルタルに対し正の相対速度を持つ。しかし、鉄筋間においては鉄筋に接した粗骨材は回転運動を始めるため、モルタルの流速以下に減速されてしまう⁸⁾。したがって X_v は図-7に示すような分布をするものと考えられ、相対速度が生じない場合における X_v の分布と比べると、間隙部での X_v のレベルを押し上げる作用をするものと考えられる。

次に η_{pl} が3 Pa·s程度以下の小さい場合について考える。鉄筋間において、鉄筋に接触した粗骨材は前述したように回転を始める。この時、回転している粗骨材とその周りのモルタルの間では図-8に示すような相対的な速度差 V_0 が生じる。この場合、図-8(a)に示すようにモルタルの η_{pl} が大きい場合には V_0 は小さく、図-8(b)に示すように η_{pl} が小さい場合には V_0 は大きくなる。

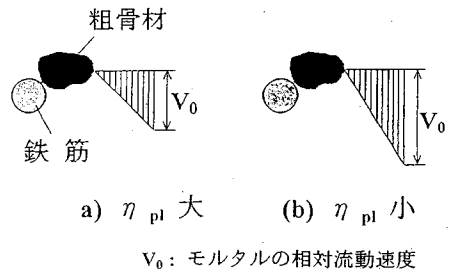


図-8 鉄筋間通過時の粗骨材とモルタルの相対速度

このような V_0 の発生はモルタル分の先送りを意味するものであるから、鉄筋間近傍での X_v はモルタルの η_{pl} が小さいほど大きくなるものと考えられる。しかし、このような現象による間隙部での X_v の増大量とモルタルの $\tau_i \cdot \eta_{pl}$ の関係を定量的に評価することは、 X_{v0} 、流動圧力、流動速度、間隙幅等種々の要因の影響を受けるため、難しいものと考えられる。

(5) 間隙における閉塞メカニズム

以上をまとめると、粗骨材の架橋による間隙における閉塞メカニズムは次の様になる。

- ①鉄筋間等の間隙部での閉塞は、粗骨材が架橋し、安定した構造を取る場合に起こる。
- ②安定した架橋構造を取るための最大間隙幅は、最大寸法が20mmの粗骨材を使用した場合、1方向配筋で約40mm、クロス配筋の場合には約50mmと推定され、それ以上の間隙幅では架橋の危険性は低下する。
- ③架橋は粗骨材の接触によって起こり、このような接触は粗骨材を長軸 $2a$ 、短軸 $2b$ の楕円体と考えると、粗骨材体積濃度が $81.0(b/a)\%$ を越すと起こるようになる。
- ④間隙部においては壁効果により以下の式で表される粗骨材体積濃度の増大が起こる。

i) 1方向配筋

$$X_s = 2\{X_{v0}l_0 - \int_0^{X_{v0}} f(x)dx\} / (d-2l_0) \quad (9)$$

ii) クロス配筋

$$X_s = (X_{v0}d^2 - \int_0^{X_{v0}} \{d-2f^{-1}(y)\}^2 dy) / (d-2l_0)^2 \quad (10)$$

⑤間隙部において以下の式が成り立つ場合に架橋の危険性が高くなる。

$$X_s + X_{v0} > X_{vt} = 81.0(b/a) \quad (11)$$

⑥モルタルの降伏値・塑性粘度が小さい場合、間隙部での粗骨材体積濃度を増大させるものと考えられる。

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(比重3.15)
細骨材	瑞穂産砕砂(比重2.61, F.M.=2.90)
粗骨材	青梅産碎石(比重2.64, 図-18参照)
離型剤(SP)	β -ナフタレンスルホン酸塩系
増粘材(HF)	ポリリルアミド共重合体主成分

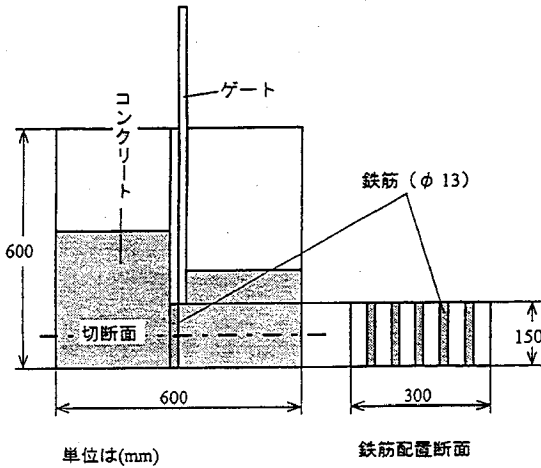


図-9 試験機A

表-1 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

	X_v (%)	SP 配合 (%)	単体量(kg/m ³)					モルタル物性		スランプ フロー (mm)
			C	W	S	G	H	τ_i (Pa)	η_{p1} (Pa·s)	
CP	30	2.0	450	185	919	792	6	19.5	9.0	625
CS		2.0					0	3.5	3.0	705

3. 閉塞メカニズムの検証実験

(1) 実験概要

本章は前章において構築した間隙での閉塞メカニズムモデルの妥当性を検証することを目的とした4つの実験から成る。

実験Iにおいては、同じ X_{v0} で鉄筋間通過試験において鉄筋間を通過した高流動コンクリートと、モルタルの $\tau_i \cdot \eta_{p1}$ が小さいことにより鉄筋間で閉塞した2種類のコンクリートについて、通過試験終了の状態では硬化させ、間隙部を切断研磨し、間隙部でのコンクリートの状態を観察することにより、閉塞が粗骨材の架橋によることを確認した。また、鉄筋配置面前後における X_v を測定し、モルタル部の $\tau_i \cdot \eta_{p1}$ が小さい場合における間隙部での X_v の増大現象を確認した。

実験IIでは、最大寸法20mmの碎石を粗骨材とし、数水準の X_v を持った高流動コンクリートを用いて、1方向配筋とクロス配筋の2条件で間隙幅を変化させた間隙通過試験を行ない、通過と閉塞の境界とな

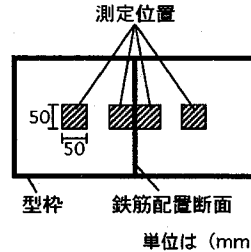


図-10 粗骨材体積濃度測定位置

る間隙幅を求めた。

実験IIIでは鉄筋や、型枠面等の境界近傍における X_v の変化を測定し、壁効果についての定量的な評価を行ない、式(6)、(7)における $f(x)$ を求めた。

実験IVでは実験IIで用いた碎石の形状を画像解析装置で評価し、式(5)における (b/a) を求めた。また、平行して形状の異なる数種の粗骨材を用いて、 X_{v0} の等しい高流動コンクリートを練り混ぜ、間隙通過試験を行ない粗骨材形状の影響を確認した。

以上の実験をもとに、閉塞のメカニズムモデルについての検証と定量的な評価を行なったものである。

(2) 実験I：高流動コンクリートの間隙部での閉塞状況の観察

a) 実験方法

実験に用いた間隙通過性試験装置を図-9(試験機A)に示す。この装置の左室にコンクリートを充填し、ゲートを開いてコンクリートを右室に流した。この試験において間隙部を通過したもの(左右のコンクリート表面高さの差が10cm以下)と間隙部で閉塞を起こしたものの2種のコンクリート(以下、通過コンクリートをCP、閉塞コンクリートをCSと略)について、試験後の状態では硬化させ、図に示した位置で切断研磨を行ない状態を観察した。これらのコンクリート配合条件とフレッシュ性状(モルタル部の降伏値、塑性粘度およびコンクリートスランプフロー値)を表-1に示す。モルタルの降伏値および塑性粘度はコンクリートの練り混ぜの際に、先にモルタルを練り混ぜ、試料を採取して外円筒回転型粘度計で測定したものである。実験に使用した材料を表

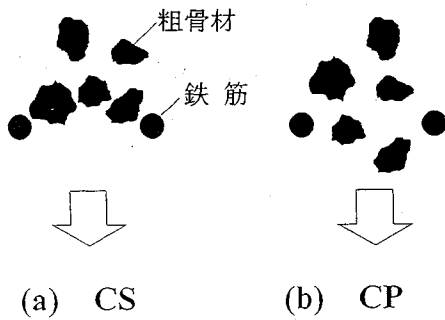


図-11 CSおよびCPの鉄筋配置面前での粗骨材の状態

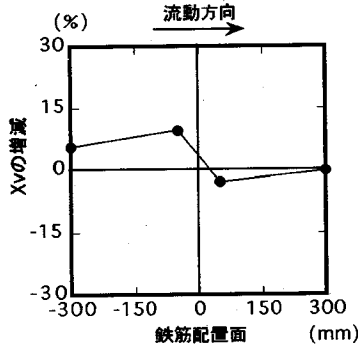


図-12 CPにおける鉄筋配置面前後におけるX_vの変化

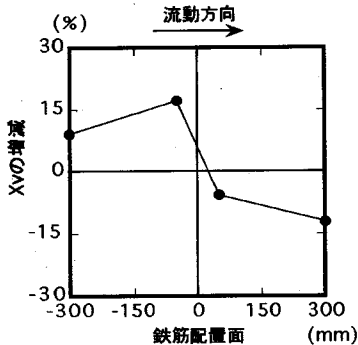


図-13 CSにおける鉄筋配置面前後におけるX_vの変化

- 2 に示す。

切断研磨した面は、図-10に示す鉄筋配置面の直前および直後、左右の室の中央部に5×5cmのエリアを設定し、その部分でのX_vを測定した。なお、X_vは、画像解析装置により各エリア内に現れる最大径1mm以上の骨材の面積より断面分布を求め、このデータをもとにJohnson-Saltykovの方法^{9) 10)}で単位体積当たりの粒径分布を計算し、直径5mm以上となる粒子の体積が全体に占める割合から算出して求めた。

b) 実験結果

図-11にCPおよびCSの鉄筋配置面前面での粗骨材

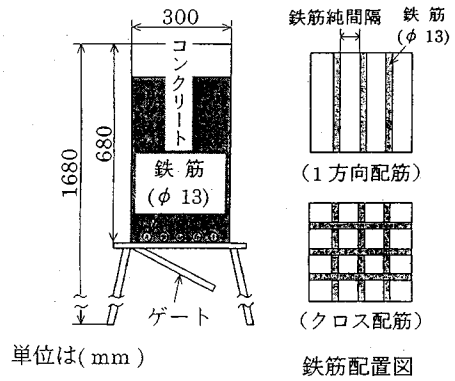


図-14 試験機B

の状態を示す。この図より、CSにおいては鉄筋間で粗骨材が架橋を起こしている様子が観察された。したがって、従来の知見通り鉄筋間での粗骨材の架橋が閉塞の原因であることが明らかとなった。

図-12および13に鉄筋の前後におけるX_{v0}=30.0%を基準としたX_vの増減を示す。CPおよびCSとも鉄筋の直前でX_vは増大しており、特にCSにおいてはその増大率は大きい。

したがって、間隙でのX_vの増大が本実験で確認されるとともに、モルタルの $\tau_i \cdot \eta_{pl}$ が小さい場合には、その増大率が大きいことが確認された。

(3) 実験II：高流動コンクリートの間隙通過性と粗骨材体積濃度および配筋条件の關係の検討

a) 実験方法

図-14に示す試験装置(試験機B)の上端部まで高流動コンクリートを充填し、ゲートを開いてコンクリートが落下するか、途中で閉塞するかを調べた。通過の判断は鉄筋の配置面の一部でも完全にコンクリートが抜け落ちるとともに、全コンクリートの95%以上が落下した場合に通過と判断した。

配筋条件は図-14に示すように、1方向とクロスした2方向の2水準の配筋方向とし、1方向配筋の場合には鉄筋純間隔を27, 37および47mmの3水準、クロス配筋の場合には鉄筋純間隔を27, 37, 47および57mmの4水準とした。使用材料は実験Iと同じとした。コンクリートにおけるX_{v0}は8.1, 16.1, 24.2, 28.0, 32.3および36.0%の6水準で変化させた。また、モルタル部分の構成はアクリル系増粘材を用いた高流動コンクリートの配合を参考⁵⁾にセメント：水：細骨材の容積比20.0：28.7：51.3で一定とし、SPはセメント重量に対し2.0~3.0%、HF混和率は対セメント重量比0.0~8.8%の範囲で変化させることによりモルタルの降伏値を3~50Pa程度、塑性粘度を2~12Pa·s程度の範囲で変化させた。

表-3 間隙通過性試験結果

配筋条件	1方向			クロス				モルタルフロー範囲		コンクリート配合数	
	純間隔(mm)	27	37	47	27	37	47	57	τ_t (Pa)		η_{pl} (Pa·s)
粗骨材体積濃度(%)	8.1	○	○	○	△	○	○	○	3.2~20.5	1.8~7.9	4
	16.1	○	○	○	×	○	○	○	5.0~30.6	3.6~8.5	8
	24.2	△	○	○	×	×	△	○	8.9~48.6	3.7~10.2	7
	28.0	×	△	○	×	×	×	○	3.8~50.2	2.5~11.5	6
	32.3	×	×	○	×	×	×	○	4.9~38.4	3.6~9.9	8
	36.0	×	×	○	×	×	×	○	2.8~25.9	2.1~7.2	4

b) 実験結果

表-3に実験結果を整理した。表中の○はコンクリートのスランブフローが550mm以上となったもので、モルタルの降伏値・塑性粘度の値にかかわらず通過と判断された条件、×は閉塞と判断された条件である。また、△はスランブフローが550mm以上であってもモルタルの降伏値・塑性粘度の値によって通過-閉塞が左右される条件で、遷移域と判断されるものである。この結果、 X_{v0} によるが、1方向配筋においては純間隔が40mm近辺が通過と閉塞の境界となっており、2方向配筋においても、純間隔50mm近辺が境界となっている可能性は高いと判断され、2章における推定とほぼ一致した。

また、△と判断された1方向配筋、純間隔37mm、 X_{v0} 28.0%の条件とクロス配筋、純間隔47mm、 X_{v0} 24.0%の条件での、スランブフロー500mm以上のコンクリートにおけるモルタルの降伏値・塑性粘度と通過-閉塞の関係を表-4に示す。今回の実験の範囲内ではあるが、表よりスランブフロー600mm以上の高流動であっても塑性粘度が15Pa以上、降伏値5 Pa·s以上大きくなければ閉塞することがわかった。

(4) 実験Ⅲ：壁効果による間隙部での粗骨材体積濃度増大の評価

a) 実験方法

前述したように、型枠壁や鉄筋等の境界面近傍においては粗骨材体積濃度は低下する。本実験においては、この低下量を定量的に評価して間隙中央部での粗骨材体積濃度の増大量 X_s を推定し、その結果より間隙部における粗骨材体積濃度 $X_s + X_{v0}$ を得ることを目的とした。

実験は、粗骨材とペーストを組合わせたコンクリートを用いてφ15×30cmの型枠に流し込み、硬化後に中心部を通り縦に切断研磨し、型枠壁より2.0mm間隔で画像解析装置により粗骨材体積濃度を測定した。なお、このときのコンクリートの X_{v0} は24.0、

表-4 フルッシュ性状と間隙通過性の関係

純間隔mm	配筋条件	X_v (%)	HF混和率(%)	SP添加率(%)	モルタルフロー特性		スランブフロー(mm)	通過性
					τ_t (Pa)	η_{pl} (Pa·s)		
37	1方向	28.0	0.44	3.0	3.8	2.5	705	×
					10.8	3.3	670	×
					19.8	6.7	580	○
					29.1	8.9	515	○
47	クロス	24.2	0.83	3.0	8.9	3.7	720	×
			1.25		14.2	4.2	670	×
			1.66		17.2	4.7	690	○
			2.49		25.8	7.5	605	○

28.0、32.0および36.0%の4水準とし、組合わせたペーストは、W/C=23.0%、SP添加率3.0%（対セメント重量）の配合条件とした。

b) 実験結果

図-15に各配合条件別の粗骨材体積濃度と型枠面からの距離の関係を示す。この結果より最小二乗法で求めた各配合条件別の $f(x)$ を表-5に示す。これらの式と式(6)より得られる、間隙部での粗骨材体積濃度 $X_s + X_{v0}$ の計算結果を、1方向配筋の場合を図-16に、クロス配筋の場合を図-17に示す。図中の曲線は、 X_{v0} の条件別となっており、それぞれの X_{v0} 条件における間隙中央での粗骨材体積濃度 $X_s + X_{v0}$ を示している。なお、図の横軸は間隙幅を示すものである。これらの結果、間隙幅が小さい程、1方向配筋よりクロス配筋、配合で与えられる X_{v0} が大きいか、間隙中央での粗骨材体積濃度 $X_s + X_{v0}$ が大きくなり、閉塞しやすい条件になることがわかった。

(5) 実験Ⅳ：粗骨材形状の評価および間隙通過性の関係

a) 実験方法

粗骨材の架橋に及ぼす粗骨材形状の影響は大きいものと考えられる。そこで本実験では、実験Ⅰ～Ⅲで用いた青梅産砕石の形状を実績率(JIS A1104)および画像処理装置による円度(4π面積/周囲長²)で評価した。次に粗骨材を長軸2a、短軸2bの楕円体とした場合の円度より計算される(b/a)および X_{v0} を求めた。また、比較として表-6に示す、明らかに形状の異なる粗骨材4種類についても同様な評価を行なった。これらの粗骨材の粒度分布曲線を図-18に示す。また、これらの粗骨材を用い、 X_{v0} が30.0%となるようにモルタル(基本配合は実験Ⅱと同様、SP=3.0%、HF=2.3%)と組み合わせたコン

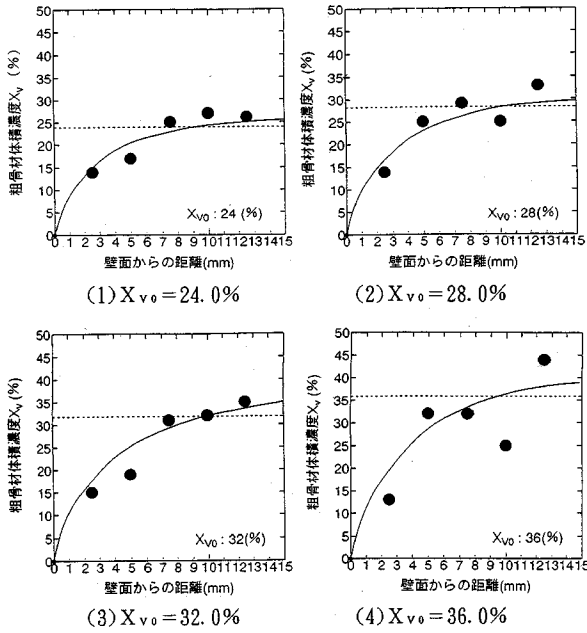


図-15 型枠面からの距離とXvの関係

表-5 Xvo別のf(x)

Xvo (%)	近似式 f(x)
24.0	$y = -\frac{0.75}{x+2.5} + 0.30$
28.0	$y = -\frac{1.00}{x+2.8} + 0.36$
32.0	$y = -\frac{1.74}{x+3.9} + 0.45$
36.0	$y = -\frac{2.00}{x+4.0} + 0.50$

クリートについて間隙通過性を評価した。実験は図-19に示す鉄筋(φ=13mm)3本配置した試験機(試験機C)の左室上端部までコンクリートを充填し、次にゲートを開いてコンクリートを右室に流れ込ませ、静止した状態での左右のコンクリートの高さの差を測定した。この高さの差より圧力差を算出して間隙通過性の評価とした。

b) 実験結果

表-7に実験結果を示す。骨材の形状はガラス球、造粒砕石、黒川産玉砂利、奥尻産黒耀石、青梅産砕石の順に真球に近くなり、ガラス球を除きこの順に実績率も大きくなる。ガラス球は真球に最も近いにもかかわらず実績率が低いのは、単一粒度を持った複数の粒群の組合せで粒度分布が調整されており、他の粗骨材の様に連続粒度分布となっていないため

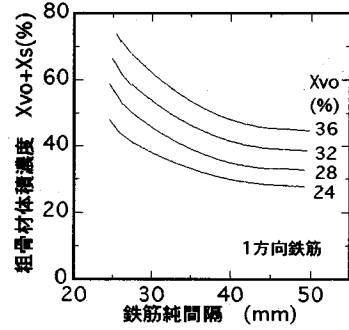


図-16 1方向配筋における鉄筋純間隔とXvo, Xs + Xvoの関係

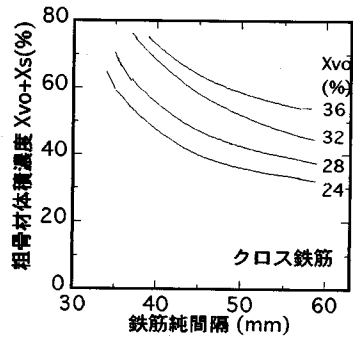


図-17 クロス配筋における鉄筋純間隔とXvo, Xs + Xvoの関係

表-6 使用した粗骨材

粗骨材種類	比重	骨材形状	
		円度	親縁(%)
青梅産砕石	2.64	0.74	59.8
奥尻産黒耀石	2.33	0.77	61.8
黒川産玉砂利	2.33	0.80	63.0
造粒砕石	2.61	0.83	64.8
ガラス球	2.61	1.00	61.2

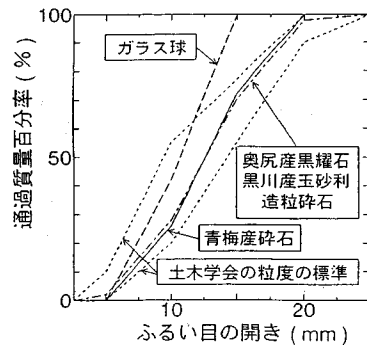


図-18 使用粗骨材の粒度分布曲線

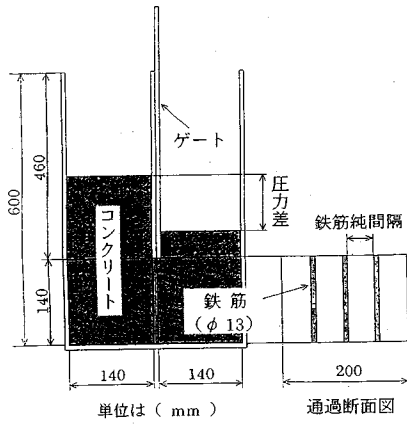


図-19 試験機 C

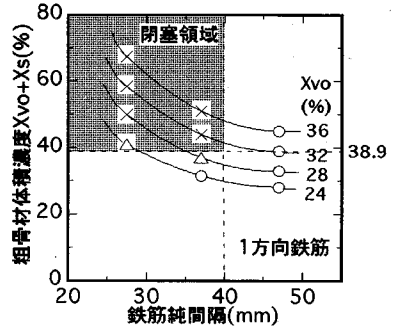


図-21 1方向配筋における閉塞条件

表-7 実験結果

粗骨材種類	モルタル特性	コンクリート性状		b/a	X _v (%)
		スランプロ (mm)	圧力差 (Pa)		
青梅産砕石	τ_c :	593	8212	0.48	38.9
奥尻産黒耀石	19.7 (Pa)	515	7105	0.51	41.3
黒川産玉砂利	η_{pl} :	580	6399	0.54	43.7
造粒砕石	11.7	595	461	0.58	47.0
ガラス球	(Pa·s)	618	118	1.00	81.0

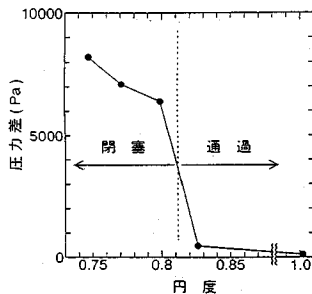


図-20 粗骨材の円度と圧力差の関係

である。

図-20に粗骨材の円度と圧力差の関係を示す。今回の実験条件では円度0.80近辺を境に閉塞と通過に分れる結果となり、粗骨材の形状が間隙通過性に大きな影響を与えることがわかった。

また、表-7に示した粗骨材相互の接触が起こる粗骨材体積濃度 (X_v) より、青梅産砕石を用いた場合には間隙部で38.9%のX_vとなると粗骨材相互の接触を起こし、閉塞の可能性が増すと考えられる。

(6) 考察

以上の実験結果をもとに、粗骨材が青梅産砕石である高流動コンクリートの間隙での閉塞現象について、2章で構築したメカニズムモデルの検証を行な

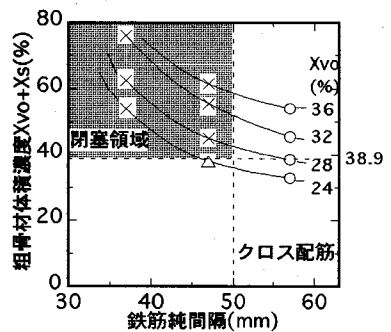


図-22 クロス配筋における閉塞条件

う。

まず、青梅産砕石の場合には(b/a)が0.48であるから間隙部におけるX_vが38.9%以上となった場合に架橋による閉塞を起こしやすくなると考えられる。また、最大寸法が20mmであるので、間隙幅が1方向配筋の場合には40mm、クロス配筋の場合には50mm以下の条件で閉塞となりやすい。これは表-2によりある程度実証されるものである。次に図-16に1方向配筋の場合の間隙幅40mm、図-17にクロス配筋の場合の50mmのラインを示すと共に、図中のX_s + X_{vo}のライン上に表-2より得られる通過-閉塞の判定結果を示したものを図-21および図-22に示す。この結果、閉塞と判断された条件は図中の閉塞領域内にあり、概ね2章で構築したメカニズムの妥当性を示したものと考えられる。

4. まとめ

高流動コンクリートの間隙部における閉塞のメカニズムモデルを構築し、その検証を実験で行なった。その結果をまとめると以下の様になる。なお、粗骨材は長軸/短軸=a/bの楕円体とする。

①流動中の高流動コンクリートは鉄筋間等の間隙部

で粗骨材体積濃度が増大し、粗骨材間での架橋が起こった場合に閉塞することが実験で確認された。

②間隙部における粗骨材体積濃度の増大は壁効果によるものと推定し、その増大量 (Xs) を以下の式で表した。

i) 1 方向配筋

$$X_s = 2 \{ X_{v0} l_0 - \int_0^{X_{v0}} f(x) dx \} / (d - 2l_0)$$

ii) クロス配筋

$$X_s = (X_{v0} d^2 - \int_0^{X_{v0}} \{ d - 2f^{-1}(y) \}^2 dy) / (d - 2l_0)^2$$

③間隙部において粗骨材体積濃度が増大し、その結果 81.0(b/a)% 以上となると、粗骨材相互の接触の可能性が高まり、架橋しやすくなるが推定され実験的に確認された。

④最大寸法 20mm の粗骨材を用いた場合、粗骨材の架橋は、間隙幅が 1 方向配筋で約 40mm、クロス配筋で約 50mm 以下の条件で起こる確立が高いと推定され実験的に確認された。

以上の研究により、これまで実験的な検討がほとんどであった高流動コンクリートの間隙通過性について、そのメカニズムをある程度解明することが出来たと思われる。しかし、本研究は 1 種類の粗骨材についてのみ行なったものであり、その粒度分布の影響についても未検討である。今後、形状および粒度分布の異なる各種の粗骨材についても同様の検討を行ない、今回示したメカニズムの妥当性について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 阿部靖弘, 和泉意登志, 井上和政, 戸田彰彦, 田中恭一, 橋爪進: 超ワーカブルコンクリートの調合設計に関する基礎研究, (その 3 鉄筋あき間隔と限界粗骨材量との関係), 日本建築学会大会学術講演概要集, A, pp. 919~920, 1992.
- 2) 近松竜一, 竹田宣典, 十河茂幸: 超流動コンクリートの流動性と分離抵抗に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 381~386, 1992.
- 3) 北村八朗, 西崎文能, 鎌田文男, 十河茂幸: 逆打ち用ハイパフォーマンスコンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 101~106, 1992.
- 4) 三輪茂雄: 粉体工学通論, 日刊工業新聞社, pp. 37~39, 1991.
- 5) 藤原浩己, 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集, Vol. 14, No. 1, pp. 27~32, 1992.
- 6) 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸: 超流動コンクリートにおける粗骨材連行性に関するメカニズム的考察, 超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp. 79~84, 1993.
- 7) 堂園昭人, 藤原浩己, 下山善秀: 高流動コンクリートの鉄筋間通過性に関する研究, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 308~309, 1994.
- 8) 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 寺西浩司, 犀川寛, 若林信太郎: 2 相系可視化 X 線実験によるフレッシュコンクリートの鉄筋間通過挙動に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, No. 33, pp. 109~112, 1995.
- 9) W. A. Johnson: Estimation of Special Grain Size, *Metal Progress*, 49, p. 87, 1946.
- 10) S. A. Saltykov: Stereometric Metallography, 2nd Edition, *Metallurgizdat*, Moscow, p. 446, 1958.

(1995. 8. 7 受付)

STUDY ON THE ABILITY TO PASS BETWEEN STEEL REINFORCING BARS OF HIGHLY FLOWABLE CONCRETE

Hiromi FUJIWARA, Shigeyoshi NAGATAKI, Nobuaki OTSUKI and Akito DOZONO

One of the most important properties of highly flowable concrete is the ability to pass between steel reinforcing bars. In this paper the mechanism of the accumulation of coarse aggregate between the bars, which is considered the main factor to the ability, is presented and verified experimentally.

Based on the results, the conditions of volume and shape of coarse aggregate in the concrete and space and direction of the steel reinforcing bars to pass between the bars were clarified.