

超高強度コンクリート製造システムの開発

川上正史¹・深津隆彦²・田辺忠顕³

¹正会員 工博 ㈱鴻池組 技術研究所 副部長 (〒554 大阪市此花区伝法4-3-55)

²日工博 B P技術部 部長

³正会員 工博 名古屋大学 教授 工学部土木工学科

超高強度コンクリートを製造する場合、練り混ぜ初期にセメントやシリカフュームが水と接触して強固なセメントボールが発生し、コンクリートの品質に悪影響を及ぼすことが多い。問題解決のため強力なせん断力をセメントペーストに与えることにより、セメントボールを破碎可能なスタティックミキサーを備えた製造システムを開発した。従来の製造方法を用いた場合に比較して、流動性が良化し、また、強度が10%以上増大すると同時に、強度のばらつきが約1/5となる、高品質な超高強度コンクリートを容易に製造できることがわかった。

Key Words : *manufacturing system, static mixer, ultra high-strength concrete, silica fume, cement ball*

1. はじめに

人類が構造部材として、コンクリートを製造、使用し始めてから9000年以上¹⁾あるいは約5000年²⁾という長い年月が経過していると言われている。9000年あるいは、5000年以前のコンクリートの製造技術がどのようなものであったかは、今では想像の域を出ないが、極めて小規模なコンクリート工事であったことから、現在でも実験室等で行なわれている人力による練り混ぜ方法と大差ないものであったと考えられる。ところで、我国におけるミキサーの使用はコンクリート構造物の規模が大きくなりはじめた明治時代後半に始まり、その本格的な使用は関東大震災以後の鉄筋コンクリート構造物の構築がさかんとなった大正時代後半とされている。しかし、これらのミキサーは重力式ミキサーの一種であり、混和材料がさかんに使用され、また、硬練りコンクリートが使用され、ミキサー形式が変化し始める昭和35年以前までは、コンクリートの製造方法に本質的な変化はなかったものと考えて良い³⁾。混和材料の使用等によりコンクリートの性質の著しく変化した昭和35年以後は、コンクリートの性質を考慮した強制練りミキサーの使用が始まり、その後、様々な改良を加えて現在に到っている。このように、コンクリートの製造技術は、コンクリート構造物の構造形式の変化やそれに伴うコンクリートの性質の変化等に

対する社会的要求と密接に結びついて発展してゆくものと考えられる。

ところで、最近のコンクリート構造物の超高層化あるいは大深度化は、コンクリートの性質として高強度化あるいは高流動化を要求している。この要求に従い、高強度コンクリート用の混和材料として高性能AE減水剤、シリカフューム⁴⁾に代表される超微粒子のポゾラン材料が、また、高流動コンクリート⁵⁾用混和材料としては、流動化剤、高性能AE減水剤、増粘剤、ポゾラン材料あるいは岩石粉末等を用いる場合が多い。このような混和材料を含んだコンクリートは粘性が大きき⁶⁾、現行のミキサーでは、これらのコンクリートの練り混ぜ能力が小さいため、練り混ぜ時間の延長を招き、さらに、材料投入順序に対する工夫等の対策を講じなければ、コンクリート品質に重大な悪影響を及ぼす可能性があるとも言われている。

本論文は上述の問題点を解決するため、まず、通常コンクリートの破壊機構に関する研究成果に基づき、高性能AE減水剤とシリカフュームを用いた超高強度コンクリートの破壊機構を考究する。次いで、この知見に基づき、超高強度コンクリートの高品質化に対する合理的な製造方法を提案し、この提案に基づいたプロトタイプ製造システムの作製について述べたのち、システムの性能の確認を行う。

2. 高強度化・高品質化に関する考え方

ここでは、製造システムを考案するに到るまでの経緯のうち、通常強度コンクリートの圧縮破壊機構から推論した超高強度コンクリートの破壊原因について述べ、これより、超高強度コンクリートの高強度化および高品質化の具体的な方法を提案する。

(1) 超高強度コンクリートの圧縮破壊の原因

通常強度（ここでは42MPa以下の強度⁷⁾を言う）のコンクリートでは圧縮荷重を徐々に増して行くと、**Fig.1**に示すように破壊荷重の70～90%で容積ひずみが収縮から膨張へと転じる。この点は臨界点(Critical Point)と呼ばれるコンクリートの事実上の破壊点であり、モルタルマトリクス中に縦方向のクラックを生じる点でもある。荷重の増大に伴ってこのモルタルクラックは供試体端面にまで達し、供試体はやがて破壊してしまう⁸⁾。上述の臨界点は、 $\log \sigma - \log \varepsilon_l$ 関係からも押さえることができる⁸⁾。**Fig.2**は通常強度のコンクリートの代表的な応力 σ と縦ひずみ ε_l の関係を対数グラフに表示したもので、両者の関係は**Fig.2**のような折れ線となり、破壊までに幾つかの折れ点が現れている。説明の便宜上、応力の低い方から第1折れ点、第2折れ点、…と名付けておく⁹⁾。**Fig.1**の臨界点は、第2折れ点に一致している⁸⁾。ところで、**Fig.2**には、コンクリートのモルタルマトリクスと同じ組成を有するモルタル供試体と、コンクリートおよびモルタルのセメントマトリクスと同じ組成を有するペースト供試体について求めた応力と縦ひずみの関係をそれぞれ破線と点線で示してある。モルタルの場合もペーストの場合も両者の関係は折れ線となり、幾つかの折れ点が現れている。**Fig.2**によれば、コンクリート、モルタルのみならずペーストの第2折れ点のひずみが一致している。このことは、コンクリートの臨界点の形成原因がセメントマトリクス中にあることを示している。粗骨材とモルタルマトリクスとの界面に発生・成長するボンドクラックは、破壊荷重の30%以上で成長する¹⁰⁾ので、コンクリートの破壊に大きく影響するという考え方もある。しかし、上述の結果はコンクリートの事実上の破壊点である臨界点の形成には、骨材の有無は関係がないことを示している。

著者らの1人は、通常強度のコンクリートの圧縮破壊が、セメントマトリクス中に発生・成長する極めて微細な欠陥、未水和破壊セメント粒子BCP(Broken Clinker Particles)^{11), 12)}の割裂によって起因されることを明らかにしている⁹⁾。このことから

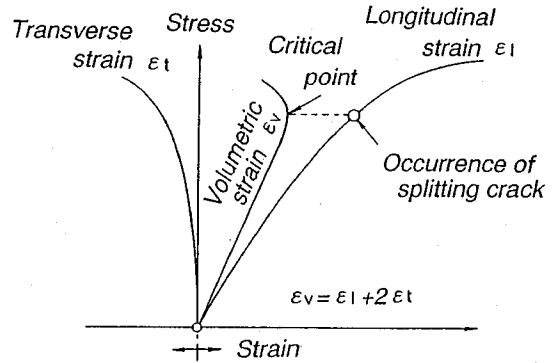


Fig.1 Typical stress-strain curves for a normal strength concrete

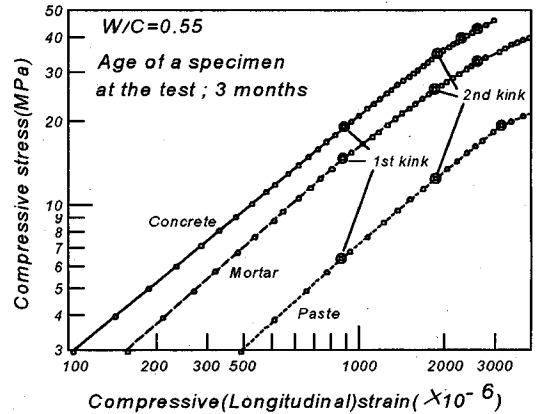


Fig.2 Log-log plot of stress vs. longitudinal strain for a typical concrete, mortar and paste specimen

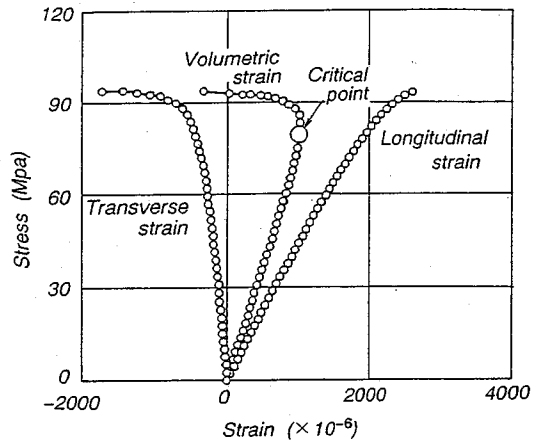


Fig.3 Stress-strain curves for a typical ultra high-strength concrete

Table 1 Strength and critical points for silica fume concrete with river gravel or with crushed slag

Coarse aggr.	Specimen number	Compressive strength (MPa)	Critical point	
			stress (MPa)	longitudinal strain ($\times 10^{-6}$)
River gravel	1	73.6	63.0	1900
	2	69.4	64.2	1900
	3	77.6	64.4	1900
Crushed slag	1	90.5	79.9	1900
	2	92.6	79.1	1900
	3	91.4	75.5	1900

上述の縦方向のモルタルクラックの発生原因はBCPの割裂に因るのであり通常強度のコンクリートの圧縮破壊の原因は、粗骨材には無関係でセメントマトリックス中に存在すると考えている。

では、超高強度（ここでは102MPa⁷⁾前後の強度を言う）コンクリートの場合はどうであろうか。超高強度コンクリートは、その名が示すように強度が非常に大きく、また、供試体の破断面の様相も通常の強度のコンクリートのそれとは異なるため¹³⁾、先に述べた42MPa以下の強度を示す通常強度のコンクリートの圧縮破壊機構とは、本質的に異なるものと一般には解釈され易い。Fig.3はシリカフームを用いた超高強度コンクリートの代表的な応力-縦ひずみ、応力-横ひずみおよび応力-容積ひずみの関係を求めてみたものである。この図から明らかなように、超高強度コンクリートの場合も、通常強度のコンクリートの場合と同様の応力-縦ひずみ、応力-横ひずみおよび応力-容積ひずみ関係を示しており、臨界点もFig.1の場合と同じく破壊荷重の85%で現われている。したがって、破壊機構を間接的に表す超高強度コンクリートの応力-ひずみ関係からは、通常強度コンクリートとの差異を見いだすことはできない。

さらに、この点について明らかにするために、骨材の種類を変えて臨界点の性状について調べることとした。Table 1は、川砂利および強硬で付着力の期待できるスラグ碎石を用いた同配合のシリカフームコンクリートに対する強度、臨界点での応力および臨界点での縦ひずみを一括して示したものである。Table 1から次のことが分かる。粗骨材の種類および個々の供試体によって強度および臨界点の応力は異なった値を示している。川砂利を用いたシリカフームコンクリートの強度は、スラグ碎石を用いたシリカフームコンクリートのそれと比べると、かなり小さく、もはや超高強度とは言えない状態となっている。しかし、臨界点の縦ひずみは粗骨材の

種類には関係なく、同じ値1900 ($\times 10^{-6}$)を示している。これは、シリカフームコンクリートの破壊原因が粗骨材には関係ないこと^{8), 11, 12)}、言いかえれば、超高強度コンクリートの場合においても、先に述べた通常強度のコンクリートの場合と同じく、その圧縮破壊の原因がセメントマトリックス中に存在している欠陥の割裂にあることを示唆しているように思われる。

(2) 超高強度コンクリートの高強度化、高品質に関する仮説

(1)で述べてきたように、超高強度コンクリートの圧縮破壊の原因は、セメントマトリックス中に存在すると考えられる。もし、この仮説が正しいとすれば、高強度化を図るためにはセメントマトリックスを強化すれば良いし、さらに高品質化を図るためにはセメントマトリックスをできるだけ均一なものに改質すれば良いと考えられる。筆者らは、このような発想に基づき、超高強度コンクリート製造システムの開発に取り組むこととした。

さて、セメントマトリックスを強化する方法あるいはできるだけ均一なものとする方法は種々あるが、著者らの長年にわたる研究¹⁴⁾によれば、コンクリートを製造する際に練り混ぜ方法を変える方法が最も経済的であり、かつ配合の変更の必要もない点において合理的である。練り混ぜ方法を変える場合、コンクリートを構成する材料の一部を先に練り混ぜるいわゆる分割練り混ぜ方法が良いと思われる。分割練り混ぜ方法にも種類があるが、その中でも先にセメントと水とを練り混ぜペーストとした後、骨材を加えて練り混ぜる方法（セメントペースト先練り方法）が推奨される。本方法の成功例としては、古くはウレクリータ方法¹⁵⁾、新しくはVCP (Vibrated Cement Paste) 方法¹⁴⁾等がある。

(3) 従来の製造（一括練り混ぜ）方法の問題点

一般に、コンクリートを練り混ぜる場合、微粒のセメントと水が接するとセメントボールを生じ易い。とりわけ、超高強度コンクリートを製造するには、シリカフームに代表される超微粒子のポズラン材料を用いることが多く、さらに水結合材比を小さくして利用する機会が多い。このため、超高強度コンクリートを製造する場合には強固なセメントボールを一層生じ易くなり、また、セメントペーストの増粘に伴ってフレッシュコンクリートの粘性も著しく大きくなる。Photo 1にシリカフームを核とし、これを覆うようにセメントが付着した、セメントボールの1例を示しておく。全ての材料を一度に



Photo 1 Shape of cement balls

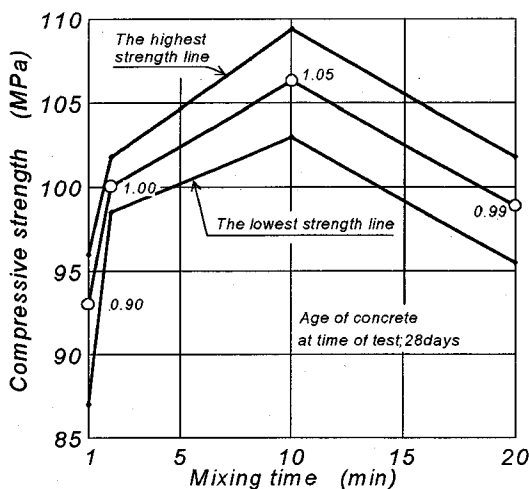


Fig.4 Relation between compressive strength of ultra high-strength concrete which made by batch mixing and mixing time

ミキサ中に投入して練り混ぜる、従来の一括練り混ぜ方法においては、駆動用モータの馬力を大きくしたり、攪拌羽根の回転数を増したりするような単にミキサ能力を強化するような方法では、セメントボールの破碎は難しいと思われる。すなわち、セメントペースト先練り方法でコンクリートを製造した場合、セメントペーストを十分に練り混ぜるため、セメントボールが少なくなることによるセメントマトリックスの均質化と強化が生じ、ばらつきの小さい、より高強度な超高強度コンクリートの作製が期待できる。

ところで、セメントボールを少なくするには練り混ぜ方法を変える以外に、練り混ぜ時間を長くする方法も考えられる。Fig.4は、従来の一括練り混ぜ方法による超高強度コンクリートの圧縮強度と練り混ぜ時間との関係を示したものである。図中の測点は、供試体3本の平均値を示している。ミキサは水

平パン型強制練りミキサを使用している。この図から明らかのように、超高強度コンクリートの圧縮強度は練り混ぜ時間10分で最高強度を示している。すなわち、練り混ぜ時間10分が最適練り混ぜ時間である。最適練り混ぜ時間10分のところで最高強度を示す理由の1つは、コンクリート中のセメントボールの減少によってセメントペーストがより均一となり、強度が上昇したものと解釈できよう。このことは、文献16)においてもほぼ同様の見解が述べられており強度の上昇がある限定された配合のみに生ずるものとは考え難い。練り混ぜ時間20分で強度の減少する傾向が認められるが、この理由については今のところ定かではない。

従来のミキサを用い一括練り混ぜ方法で製造しても、超高強度コンクリートは高強度化する。このことには間違いはないが、ここで問題となるのは練り混ぜ時間が長くなることである。均一で高強度なコンクリートが得られても、練り混ぜ時間が10分かかれば、実用上、従来の方法を採用することは難しい。

3. スタティックミキサ

以上述べてきたように、従来の方法では、短時間で均一で高強度な超高強度コンクリートを製造することが難しいことが分かった。ここでは、短時間に均一で高強度な超高強度コンクリートを得るための製造手段について述べる。

(1) スタティックミキサの外観

短時間で均一かつ高強度な超高強度コンクリートを製造するには、先にセメント、ポゾラン材料と高性能AE減水剤あるいは流動化剤の入った練り混ぜ水とを練り混ぜ、これに強力な外力を瞬間的に作用させるような装置を介してセメントボールを破碎し、均一なペーストとしたものを粗・細骨材に混入して練り混ぜすれば良いと思われる。

長年にわたる様々な実証実験¹⁴⁾を経て、次のような装置を作製した。すなわち、Fig.5に示すように、円板の外周縁部とその内側の周縁部に貫通孔を設け、この円板をFig.6に示すような複数枚集合させた要素集合体を作り、これをFig.7に示すようにチュービングポンプの圧送管路内に設置した、いわゆるスタティックミキサを作製した。

(2) スタティックミキサの機能

セメントボールを含むペーストを、上述の圧送管路中を通過させると、ペーストは圧送管路内に設置

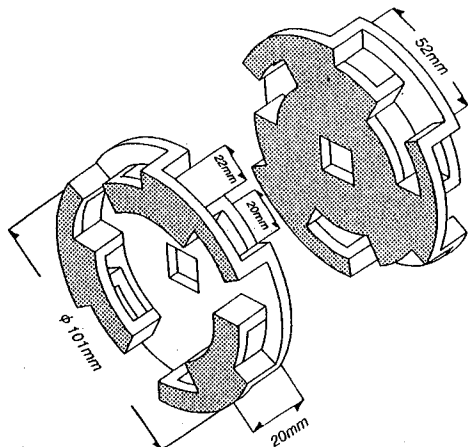


Fig.5 Elements of static mixer

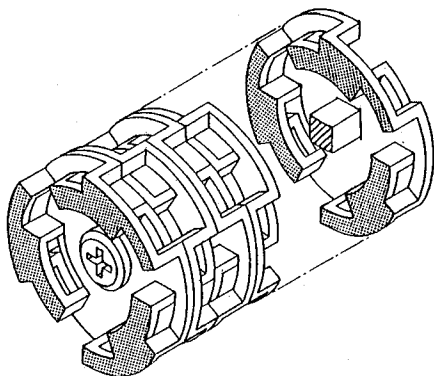


Fig.6 Appearance of gathered elements

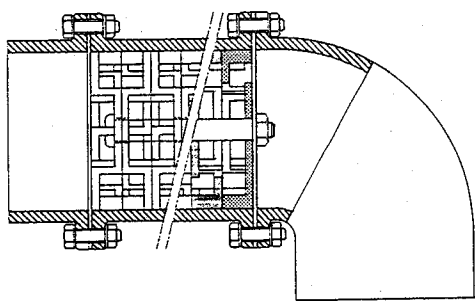
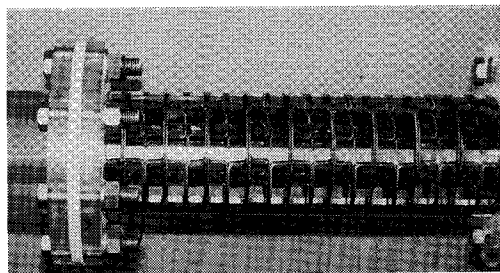


Fig.7 Structure of static mixer

された要素集合体の各要素の壁面と衝突しながら貫通孔を通過するのであるが、その際に渦流が発生し、ペーストに強力なせん断力が加えられる。これによって、ペーストに含まれるセメントボールが破碎され、ペーストが均一化されることが期待される。

Photo 2は、透明なアクリル製の圧送管路内にスタティックミキサを設置して、空気泡の破碎状況を観察したものである。Photo 2(a)は、空気泡を通さない場合である。Photo 2(b)は、写真左端圧送管内

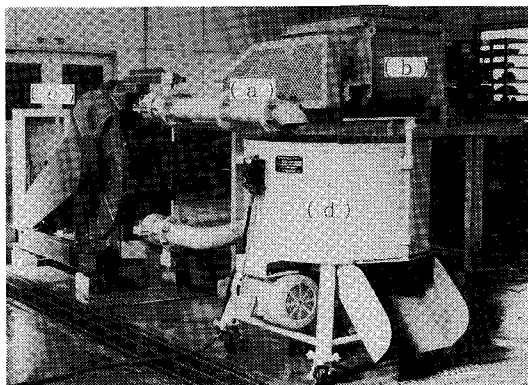


(a)Before the crushing



(b)On the crushing

Photo 2 Crushing of air bubbles in the static mixer



(a)Static mixer, (b)Paste mixer, (c)Pump and (d)Concrete mixer

Photo 3 Appearance of ultra high-strength concrete manufacturing system

に大きな空気泡を通した場合である。上述の推論を裏付けるように、スタティックミキサ内で空気泡が微塵に破碎（(a)に比べて白く見える部分）されている。

4. 高品質・超高強度コンクリート製造システムの作製

以上述べてきた著者らの見解を確かめるため、3.に述べたスタティックミキサを組み込んだ高品質・超高強度コンクリート製造システムを作製した。シ

Table 2 Efficiency of major machines in the manufacturing system

Name of machine	Type of machine	Capacity	Efficiency of electric motor
Paste mixer	Twin-shaft type	50 l	2.2kw, 200V
Pump	Squeeze type	416 l/min	7.5kw, 200V
Concrete mixer	Horizontal pan type	60 l	2.2kw, 200V

Table 3 Chemical composition of silica fume

Constituent	
SiO ₂	(%) 97.0
Al ₂ O ₃	(%) 0.09
Fe ₂ O ₃	(%) 0.09
MgO	(%) 0.09
CaO	(%) 0.11
Na ₂ O	(%) 0.09
K ₂ O	(%) 0.30
C	(%) 0.90
S	(%) 0.10
LOI	(%) 1.10

Table 4 Mix proportion of ultra high-strength concrete

Max.size of aggr. (mm)	W/(C+Si) (%)	Si/(C+Si) (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				Water W	Cement C	Silica fume Si	Fine aggr. S	Coarse aggr. G	High-range water reducer SP
13	26.1	10	40.0	148	510	57	650	1091	25.5

システムの概観を **Photo 3** に示す。システムの構成は次の通りである。

セメントとポズラン材料および高性能 AE 減水剤あるいは流動化剤の入った練り混ぜ水とを予め練り混ぜるペーストミキサ、ペーストミキサより排出されたペーストを蓄えるホップ、ホップ内のペーストを圧送するチュービングポンプ、チュービングポンプの圧送管路内に設置されたスタティックミキサ、およびスタティックミキサより圧送されたペーストと骨材を練り混ぜし、コンクリートを最終的に製造するコンクリートミキサである。本システムに使用したペーストミキサ、チュービングポンプおよびコンクリートミキサの性能を一括して示すと、**Table 2** の通りである。

5. 製造システム性能の確認に関する実験

製造システムの性能を確認するために、圧縮試験を中心とした実験を行った。以下にその詳細を述べる。なお圧縮試験以外の実験方法については、それに関連する項において述べることにする。

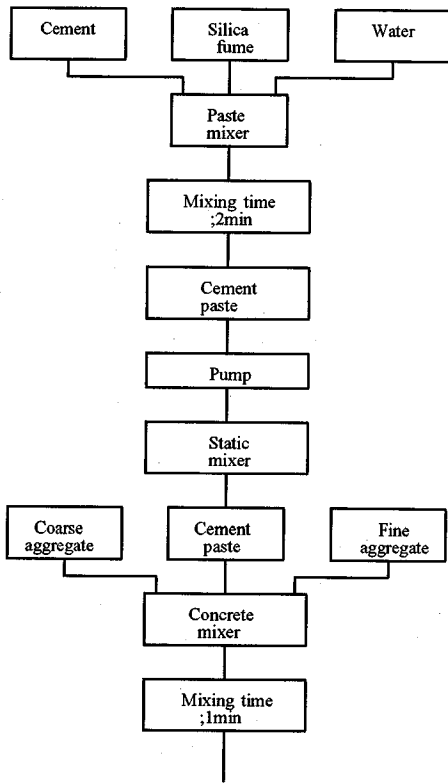
(1) 実験に用いた材料とコンクリート

セメントには市販の普通ポルトランドセメントを、また、ポズラン材料としては市販のシリカフュームを用いた。このシリカフュームの比重は 2.20、比

表面積は 20m²/g である。また、成分を **Table 3** に示す。細骨材としては徳島県吉野川産の川砂を用いた。この砂は比重 2.60、吸水量 1.82% および FM=2.80 である。粗骨材としては磁鉄鉱スラグ碎石を用いた。この碎石の最大寸法は超高強度コンクリートであることを考慮して 13mm⁷⁾ とした。比重および吸水量はそれぞれ 2.91 および 0.89% である。磁鉄鉱スラグ碎石を用いた理由は、超高強度コンクリートのモルタルマトリックスの強度と同等かそれ以上の強度を期待し得る骨材を多く含む天然骨材あるいは碎石を入手できなかったためである。練り混ぜ水には水道水を使用した。また、混和剤としてはポリカルボン酸エーテル系の複合体を主成分とする高性能 AE 減水剤を用いた。これらの材料を用いたコンクリートの配合を示すと **Table 4** の通りである。なお、従来の一括練り混ぜ方法で作製したコンクリートのスランプ、スランプフローおよび空気量は、それぞれ 24.3cm、62.0cm および 0.7% であった。

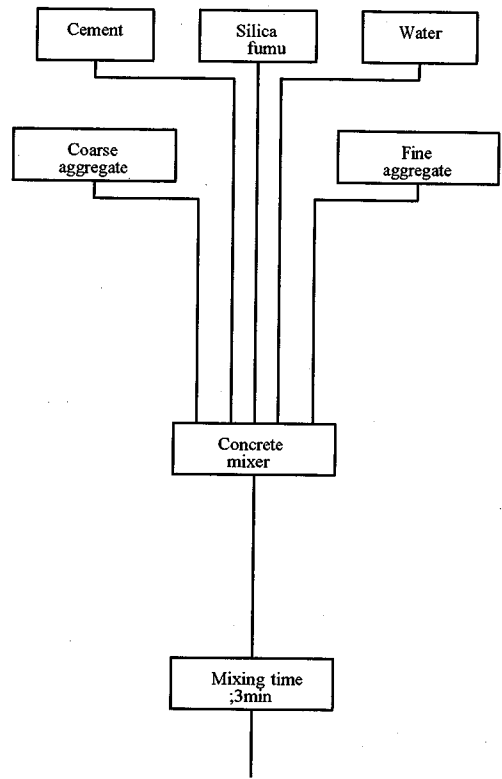
(2) 試験の方法

コンクリートの製造方法としては、**Fig.8(a)** に示す著者らの考案したセメントペースト先練り方法と、比較のため **Fig.8(b)** に示す従来の一括練り混ぜ方法の 2つを用いた。練り混ぜ時間は 2つの方法に対し同じとした。すなわち、著者らの考案したセメントペースト先練り方法の場合には総練り混ぜ時間 3



Placing

(a) Method of the manufacturing system



Placing

(b) Method of batch mixing

Fig.8 Mixing method

分を、また、従来の一括練り混ぜ方法の場合のそれも3分とした。練り混ぜ時間を3分としたのは、実用上合理的な時間と考えたからである。セメントペースト先練り方法に対しては、スタティックミキサの要素数を0,2,12および20とした。

練り上がった試料をφ10×20cmの鋼製モールドに2層につめ、各層棒状バイブレータにより入念に締固めた。供試体は翌日キャッピングその翌日脱型して圧縮試験時まで水中養生(21±1℃)を行った。試験時の材令は28日である。供試体の本数は、各要素数に対し原則として6本とした。圧縮試験には供試体が超高強度であることを考慮し、測定値に試験機剛性の影響が少ない容量200tの高剛性試験機を用いた。試験時の載荷速度は0.01mm/sである。

(3) セメントボールと要素数の関係

本論文では1つの推論として、ペースト中に存在するセメントボールがコンクリートの強度あるいは強度のばらつきに大きな影響を及ぼすものと考え、また、複雑な貫通孔を繰り返し通過する間にセメン

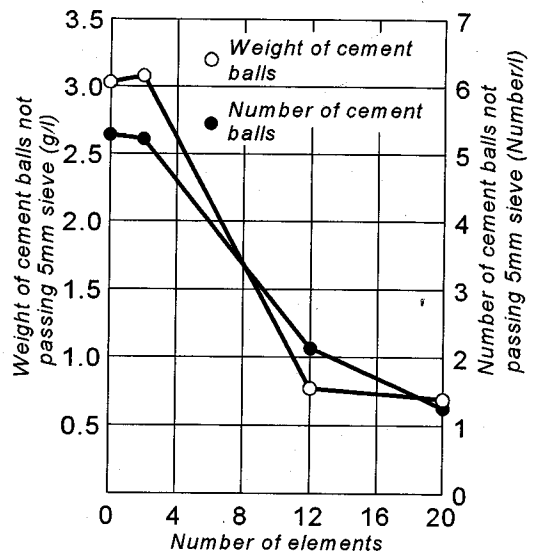


Fig.9 Number of cement balls versus weight of cement balls and number of cement balls

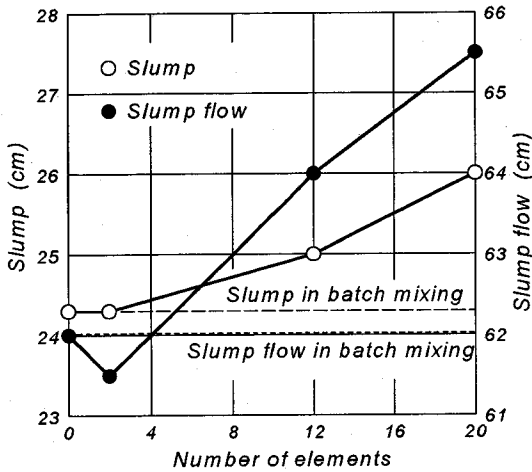


Fig.10 Number of elements versus slump of concrete and slump flow of concrete

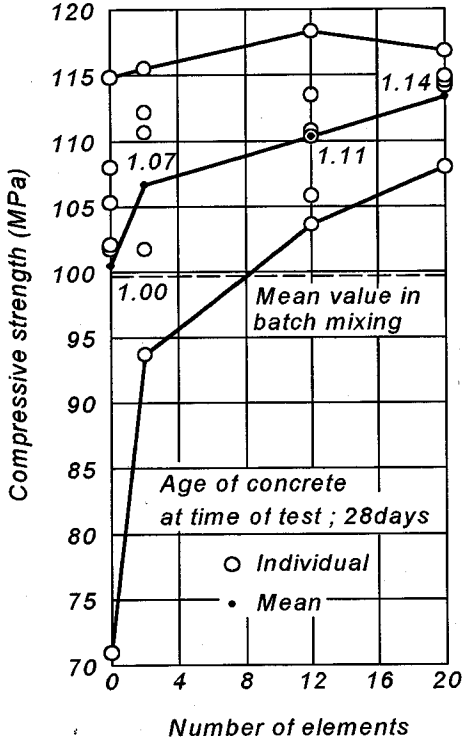


Fig.11 Relation between compressive strength and number of elements

トボールを効果的に破碎すると思われるスタティックミキサについて述べてきた。そこでまず、セメントボールの量とスタティックミキサの要素数との関係を調べてみた。実験の方法は次の通りである。

Table 4 に示した配合比のセメント、シリカフェームおよび高性能 AE 減水剤を添加した練り混ぜ水をペーストミキサで 30ℓ 練り混ぜし、これをチュービングポンプで圧送、スタティックミキサを通過し

てくるペーストを 5mm ふるいで受ける方法で行なった。5mm ふるい上に残ったセメントボールは、便宜上 5mm 以上の粒径を有するセメントボールとして、その個数および重量を調査した。

Fig.9 にペースト II 中に含まれる 5mm 以上の粒径を有するセメントボールの個数と要素数との関係、およびペースト II 中に含まれる 5mm 以上の粒径を有するセメントボールの重量と要素数との関係を示す。いずれの関係においても、要素数が 12 以上でセメントボールが急速に減り、スタティックミキサによるセメントボールの破碎効果を裏付けている。

(4) コンシステンシーと要素数の関係

スタティックミキサを通過したセメントペーストの流動性はこれを通過していないセメントペーストの流動性に比較すると、かなり良好化しているように思われた。ペーストの流動性の変化を調べるためグラウトに用いられるロート状の水槽を用いるコンシステンシー試験¹⁷⁾を行ってみた。しかし、先に述べたようにセメントペーストには 5mm 以上のセメントボールが含まれているので流出管の閉塞が時として生じ目的を達することができなかった。そこで、コンクリートのコンシステンシーの変化を調べてみた。Fig.10 にスランプと要素の関係およびスランプフローと要素数の関係を示す。スランプの場合、要素数 2 までは一括練り混ぜ方法と同等の値となっているがこの要素数以降一括練り混ぜ方法のスランプより大きくなる傾向を示している。スランプフローの場合、要素数 2 では一括練り混ぜ方法に比べて少し小さな値となっているが要素数が増すにつれて大きくなる傾向を示している。要素数 20 では 65.5cm のスランプフロー値となり一括練り混ぜ方法の 62.0cm に対し 3.5cm 大きくなっている。これらの結果よりスタティックミキサを用いて製造したコンクリートの流動性は、従来の一括練り混ぜ方法によるコンクリートのそれに比較して、良好化することが分かる。

(5) 圧縮強度と要素数の関係

Fig.11 に圧縮強度とスタティックミキサの要素数との関係を示す。図中の点線は、一括練り混ぜ方法による平均圧縮強度を示している。

図によれば、スタティックミキサを用いたコンクリートの強度は、一括練り混ぜ方法によるコンクリートのそれに比べてすべて大きい。一括練り混ぜ方法による強度は、要素のない場合(要素数 0)のそれにほぼ等しい値を示している。また、スタティ

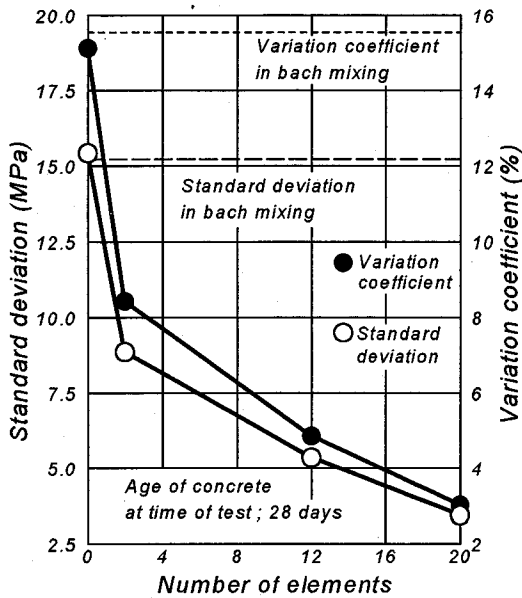


Fig.12 Number of elements versus standard deviation and variation coefficient

クミキサを用いて製造されたコンクリートの平均強度は、要素の数が増えるにしたがって大きくなっている。一括練り混ぜ方法による強度を 1.00 とすると、要素数 2 の場合は 1.07 倍、要素数 12 の場合は 1.11 倍および要素数 20 の場合は 1.14 倍の強度上昇を示している。

(6) 強度のばらつきと要素数との関係

また、Fig.11 にはそれぞれの要素数に対する最大強度を結ぶ線および最小強度を結ぶ線が描かれている。

これによると、要素数が多くなればなるほど両者の開きが小さくなっている。このことは、要素数が増えるに従って個々の供試体間の強度のばらつきが小さくなって行くことを示している。そこで次には、強度に対する標準偏差と変動係数について調べてみた。

Fig.12 は、強度の標準偏差とスタティックミキサの要素数、あるいは強度の変動係数とスタティックミキサの要素数との関係を示したものである。図中の破線と点線は、それぞれ一括練り混ぜ方法による強度の標準偏差と変動係数を示している。この図から明らかなように、一括練り混ぜ方法の標準偏差と変動係数は要素のない場合（要素数 0）のそれらとほぼ同じである。また、スタティックミキサを用いた場合には、標準偏差、変動係数ともに要素数が多くなるに従って小さくなっている。これらの結果は、スタティックミキサを用い、その要素数を多くすれ

ば、推計・統計学上からも高品質な超高強度コンクリートが製造できることを示している。また、これらの結果は、スタティックミキサを用いれば、強度のばらつきを、一括練り混ぜ方法のそれに対し約 1/5 にまで小さくできることを示している。

(7) 本製造方法と従来の製造（一括練り混ぜ）方法との比較

ところで、2. 3 項の Fig.4 に一括練り混ぜ方法による材令 28 日の圧縮強度と水平パン型強制練りミキサの練り混ぜ時間との関係を示しておいた。この場合の材料、コンクリートの配合および供試体の養生方法等は本章の実験に用いたコンクリートのそれと同様であり、またコンクリートの練り混ぜに使用したコンクリートミキサも全く同じものである。

いま、練り混ぜ時間 3 分の強度を基準（1.00）とすると練り混ぜ時間 1 分のは 0.90、10 分のは 1.06、20 分のは 0.99 の強度比となっている。最大の強度比を示した練り混ぜ時間 10 分の場合の強度比の値を Fig.11 のスタティックミキサを用いて作製したコンクリートのそれと比較すると、要素数 2 の場合にほぼ対応している。しかし、要素数 12 および要素数 20 に比べると強度の上昇割合が小さく、要素数 20 の強度比の増加割合の 50% 程度にすぎない。このように、従来の一括練り混ぜ方法では最適練り混ぜ時間が 10 分もかかり、強度上昇割合も小さいことを考えると、総練り混ぜ時間が 3 分（ペーストミキサによる練り混ぜ時間 2 分、コンクリートミキサによる練り混ぜ時間 1 分、合計 3 分）であり、また、強度上昇割合も大きい本製造方法は、高品質・超高強度コンクリートの製造方法としては合理的なものと言える。

6. 結論

高品質・超高強度コンクリートの製造に関し、スタティックミキサを用いた製造システムを提唱し、このシステムを用いた製造方法の得失を従来の製造（一括練り混ぜ）方法のそれと比較し、実証的に考察した。その結果を要約すると、次の通りである。

- 1) ペースト中のセメントボールはスタティックミキサを用いることによって大きく減少する。
- 2) 超高強度コンクリートの流動性はスタティックミキサを用いることによって良化する。
- 3) 超高強度コンクリートの圧縮強度はスタティックミキサを用いることによって約 10% 増大する。
- 4) 超高強度コンクリートの強度のばらつきはスタティックミキサを用いることによって約 1/5 と

る。

- 5) 提唱した製造システムは、従来の製造システムと比較して短時間に、高品質で高強度な超高強度コンクリートを製造できると考えられる。

謝辞：本製造システム開発にあたり、山口大学吉本彰名誉教授から貴重な御意見あるいは御助言を頂いた。ここに付記して、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Malinoski, R. and Garfinkel, Y. (長瀧重義ほか訳) : 新石器時代にも高強度コンクリートがあった, セメントコンクリート, No.519, May, pp.1-11, 1990.
- 2) 李 最雄 : 世界最古のコンクリート, 日経サイエンス, pp.74-84, 1987年7月.
- 3) 町田篤彦 : 土木におけるコンクリートの製造技術, コンクリート工学, pp.5-8, 1993年3月.
- 4) Wolsiefer, J. : Ultra High-Strength Field Placeable Concrete With Silica Fume Admixture, *Concrete International*, pp.25-31, April, 1984.
- 5) 例えば, 特集・コンクリート新時代—現場から締め作業が消える, 耐久性の向上もたらす"超流動", 日経コンストラクション, No.69, pp.16-33, 1992年, 8月14日.
- 6) Malhotra, V.M. and Garette, G.G. : Silica Fume Concrete-Properties, Applications, and limitations, *Concrete International*, pp.40-46, May, 1983.
- 7) ACI Committee 363 : State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, *J.ACI*, pp.364-411, July-August, 1984.
- 8) Yoshimoto, A., Kawasaki, K. and Kawakami, M. : Microscopic Cracks in Cement Matrix and Deformation Behavior of Concrete, *Proc. 19th Jap. Cong. on Mate. Rese.* pp.126-131, 1976.
- 9) 吉本 彰 : コンクリートの変形に関する一実験, 土木学会誌, 49-9, pp.22-27, 1955年9月.
- 10) Hsu, T.T.C, Slate, F.O., Sturman, G.M. and Winter, G. : Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve, *J. ACI*, pp.209-224, Feb., 1963.
- 11) 例えば詳しく述べられたものとしては, 吉本 彰 : コンクリートの変形と破壊, 学献社, pp.10-22, 1990.
- 12) 川上正史 : 未水和セメントクリンカー粒子が硬化コンクリートの強度特性に及ぼす影響, 名古屋大学学位論文, pp.14-43, 1989年10月.
- 13) Carrasquillo, R.L., Slate, F.O. and Nilson, A.H. : Microcracking and Behavior of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loading, *J. ACI*, pp.179-186, May-June, 1981.
- 14) 例えば, 川崎健次, 川上正史 : 加振セメントペーストを用いたコンクリートの諸特性について, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.121-124, 1981.
- 15) 山田順治 : コンクリートものがたり, 文一総合出版, pp.37-38, 1986.
- 16) 橘 大介, 山崎庸行 : 超高強度コンクリートコンクリート工学, pp.94-99, 1993年3月.
- 17) 国分正胤編 : 土木材料実験, 技報堂, pp.416-419, 1972年7月.

(1994. 1. 13受付)

DEVELOPMENT OF ULTRA HIGH-STRENGTH CONCRETE MANUFACTURING SYSTEM

Masashi KAWAKAMI, Takahiko FUKATSU and Tada-aki TANABE

In the initial stage of mixing for ultra high-strength concrete, the fine particles of silica and cement contact with water to generate cement balls which deteriorate the concrete quality. Crushing was difficult with conventional mixers, but the manufacturing system with a static mixer which developed, impresses an enormous shearing force on the cement paste to crush the cement balls into uniform particles. So compared with the conventional batch system, the consistency of the concrete is improved, the compressive strength of the concrete is increased by over 10% and the strength disparity decreased to about one-fifth to enable the manufacture of quality ultra high-strength concrete reliably.