

論文 羽根付回転式円筒管を用いたコンクリートの練混ぜ性能に関する基礎的研究

吉國 美涼^{*1}・加藤 佳孝^{*2}・西村 次男^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨：運搬型の羽根付回転式円筒管を改良し練混ぜ可能なミキサとするために、構造が類似している傾胴式ミキサをもとに検討を行った。その結果、運搬型の羽根付回転式円筒管はコンクリート粒子の相対位置を変化させるような運動をさせないことから混合・混練効果は小さく、羽根の形式を変える必要があることが明らかとなった。また、傾胴式ミキサは、他のミキサと異なりコンクリートの品質を単位体積当たりの積算電力量で表現することは困難であることが明らかとなった。

キーワード：羽根付回転式円筒管，傾胴式ミキサ，練混ぜ，単位体積当たりの積算電力量

1. はじめに

現在，ダム現場において短時間に大容量のコンクリートを施工することが望まれている。これに対し，いくつかの新しい運搬工法や練混ぜ工法が開発され実用化されている。例えば，図-1に示すように円管の内側に数枚の羽根を螺旋状に取り付けたもの（以下「羽根付回転式円筒管」と称す）を回転させることにより，コンクリートを大量に安定した状態で，連続して運搬することができる装置¹⁾や，図-2に示すような箱型容器を複数個組み合わせることにより，材料が落下しながら練混ぜられる材料落下型ミキサ²⁾などが挙げられる。しかし，これらの工法も前者は，プラントで練混ぜたコンクリートを一度ダンプトラックに排出した後，この運搬装置に投入し運搬すること，後者はこのミキサで練混ぜた後にダンプトラック等で運搬する必要があることから，今後さらなる施工の合理化を考えた場合，練混ぜながら運搬できることが望ましいと考えている。

そこで我々は，図-1の運搬用として使用されている羽根付回転式円筒管を，練混ぜ性能を有するミキサに改良することを最終目標として検



図-1 羽根付回転式円筒管の概略図

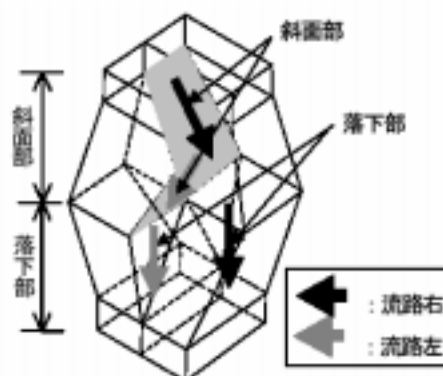


図-2 材料落下型ミキサ²⁾

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 工修 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 講師 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学生産技術研究所 技術官 (正会員)

*4 東京大学生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

討を行なっている。本研究では、一連の研究の基礎段階として、まず初めに、重力を利用した混練方式である傾胴式ミキサの練混ぜ性能を参考に、羽根付回転式円筒管の練混ぜ性能に関する検討を解析的および実験的に行なった。

2. 検討方法とその範囲

羽根付回転式円筒管による練混ぜ性能を支配する要因は、羽根の設置角度や形状、枚数、パイプの径や回転速度、パイプの傾斜角度、コンクリートの性状や練混ぜ量など無数に存在することが容易に予測できる。そこで本研究では、これらの要因の中から影響が大きいと考えられる羽根の形状、パイプの回転数、コンクリートの練混ぜ量を取りあげ検討を行った。

羽根の形状に関する検討は、管内の粒子の挙動を見る必要があるため、解析的に検討を行った。パイプの回転数、コンクリートの練混ぜ量に関する検討は、羽根付回転式円筒管と構造的に類似する重力を利用したミキサである傾胴式ミキサにより検討を行った。

また、一般にコンクリートの練混ぜの程度は、ミキサの大きさや形式にかかわらず、コンクリート単位体積当たりの積算電力量を指標として表現できることがわかっている³⁾。そこで最終的には、羽根付回転式円筒管の練混ぜ性能についてもコンクリート単位体積当たりの積算電力量で管理することを考えている。

3. 解析概要

運搬用として使用されている羽根付回転式円筒管と傾胴式ミキサの羽根の形式の相違が、コンクリート粒子の運動の相違に与える影響を明らかにするために解析的評価を行った。なお、解析手法は運搬用として使用されている羽根付回転式円筒管の解析に筆者らが用いた個別要素法を用いた⁴⁾。

個別要素法は非連続体をシミュレーションするための手法であり、対象物を独立した小要素の集合体として取り扱うことができるため、材料の不均一性を考慮することができる。このた

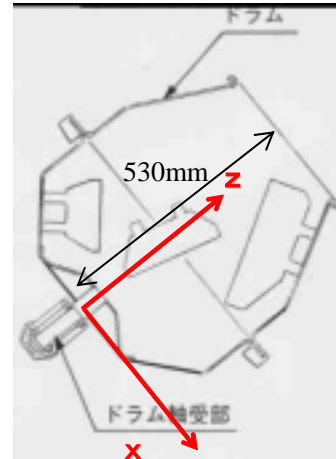


図-3 傾胴式ミキサのモデル

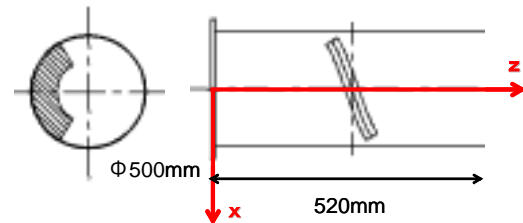


図-4 羽根付回転式円筒管のモデル

表-1 解析に使用したパラメータ

ばね定数(N/m)		減衰定数(Ns/m)		摩擦係数
垂直方向	せん断方向	垂直方向	せん断方向	
1×10^5	5×10^4	0.01	0.01	0.01

め、地盤の動的解析や構造物の動的破壊特性、土石流解析などに主に適用されている。コンクリートの分野では、吹付けコンクリートのシミュレーションや自己充填コンクリートの流動状況の可視化等に利用されている。個別要素法では、要素の変形は別の要素との接触点のみで生じるものとし、接触したブロック間にばねを置き、力のやりとりを表現している。各要素ごとに独立な運動方程式をたて、時間領域で漸進的に解き、個々の要素の運動を追跡していく。

傾胴式ミキサのモデルを図-3に示す。羽根付回転式円筒管のモデルを図-4に示す。羽根付回転式円筒管の羽根の断面形状は台形とし、管への投影で120度に相当する大きさとした。また実際には羽根付回転式円筒管の長さはかなり長いものであるが、今回は傾斜胴式ミキサと比較を行うため、傾胴式ミキサと同程度の長さとし、底にふたを設けた。なお、両者ともミキサの傾斜角度は20度、回転数は30rpmとした。

解析に使用した各定数を表-1に示す。今回は解析の簡略化のために5~20mmの粗骨材粒子が混合される過程について解析を行った。各定数は波動伝播速度から算定した。また要素数は2万個とし、その大きさは粗骨材の粒度分布に従った。

4. 実験概要

4.1 使用材料

実験に用いた材料を以下に示す。セメントは普通ポルトランドセメントで、細骨材は川砂(密度:2630kg/m³,吸水率:2.19%,F.M:2.70)を、また粗骨材は最大寸法20mmの碎石(密度:2700kg/m³,吸水率:0.61%)を用いた。なお、コンクリートの製造に当たっては、骨材の表面水がコンクリートの品質に大きな影響を及ぼすことから、細骨材の表面水率を0.5~1.0%の範囲となるように、また粗骨材は表面乾燥状態となるように調整して用いた。

コンクリートの配合を表-2に示す。水セメント比は55%、細骨材率は45%とし、混和剤は使用しなかった。なお、コンクリートの配合は、40リットルの傾胴式ミキサ(練混ぜ量:30リットル、ミキサの傾斜角度:20度、ドラムの回転数:30rpm)で300秒練り混ぜたときにスランプ8cmとなるよう試し練りを行って定めた。

4.2 実験方法

実験に用いた傾胴式コンクリートミキサはドラム練り上げ量が1.5切(40リットル)、口径×ドラム径×ドラム長が300×520×530mm、ドラムの傾斜角度が20度である。コンクリートを練り混ぜる方法は、次のように行った。先ずミキサの傾斜角度を90度に保ち、コンクリートの構成材料であるセメント、細骨材、粗骨材を図-5のように層状に均して入れ、最後に水をこの上から均等に入れてミキサの傾斜角度を20度にし、ミキサを始動させた。

実験の要因は、コンクリートの練り混ぜ量(回転数30rpmのもとで20,30,40リットル)および回転数(練混ぜ量30リットルのもとで20,30rpm)とした。練り混ぜ中はコンクリートの外

表-2 コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	単体量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
55	45	181	329	823	1031

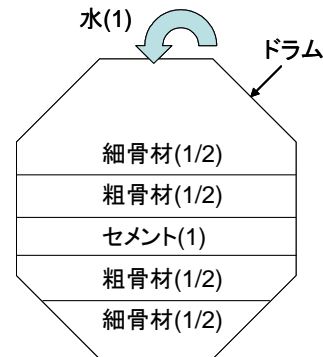


図-5 材料の投入方法

観観察を行うとともに、ミキサの消費電力量を計測した。練り混ぜ時間は10秒から1800秒までとし、各練り混ぜ時間後におけるコンクリートのスランプ、空気量、圧縮強度を測定した。

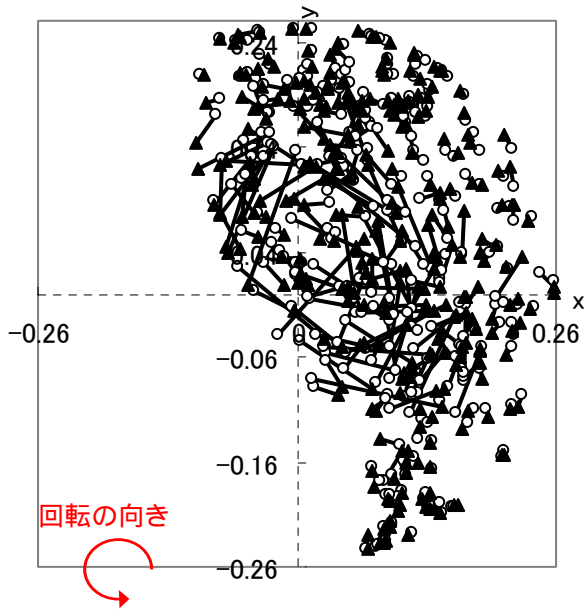
5. 結果および考察

5.1 羽根付回転式円筒管と傾胴式ミキサの比較(解析)

図-6に傾胴式ミキサ、図-7に羽根付回転式円筒管が1回転する間に粒子が移動した位置をプロットしたものを示す。グラフは白抜きの丸が始点、三角の黒塗りが1回転後を示している。傾胴式ミキサの場合、回転方向(x-y平面)および回転軸方向(x-z平面)に不規則な運動をしている。一方、羽根付回転式円筒管の場合、粒子は回転方向および回転軸方向に円を描くような形で一つの固まりとして運動をしている。このため、運搬型の羽根付回転式円筒管では、ミキサとして使用できるほどの混合・混練能力はないと考えられる。

以上のことから羽根付回転式円筒管で練混ぜを行うためには、コンクリート粒子の相対位置が変化するような羽根の形式に改良する必要がある。

(a) 回転方向



(b) 回転軸方向

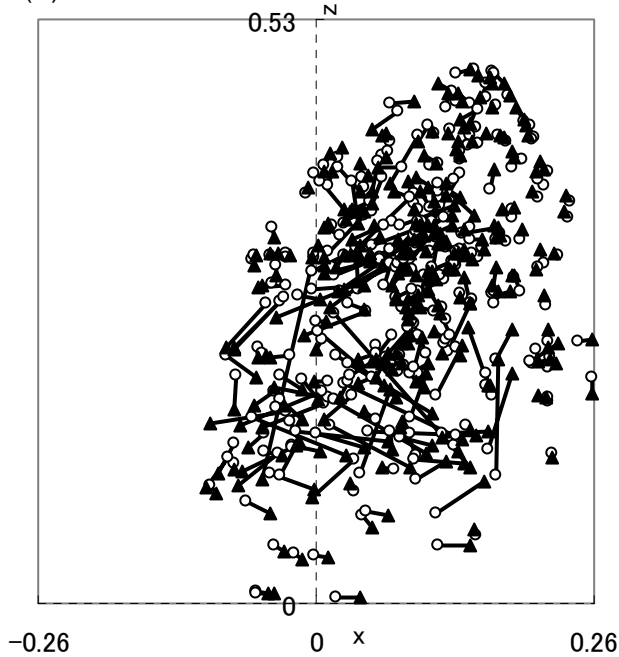
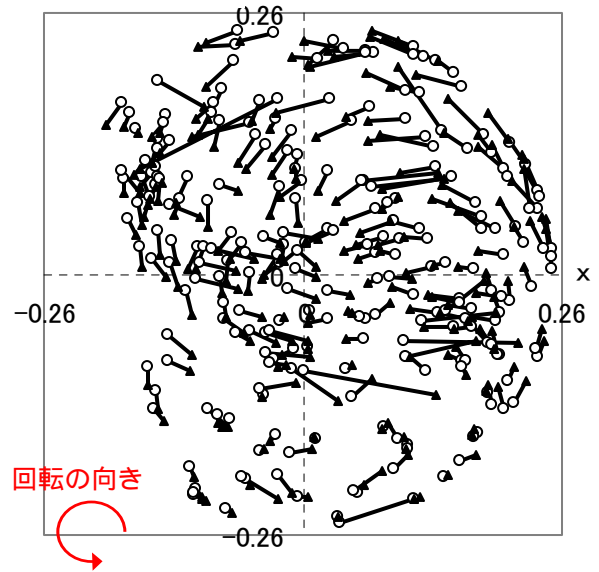


図-6 傾胴式ミキサ

(a) 回転方向



(b) 回転軸方向

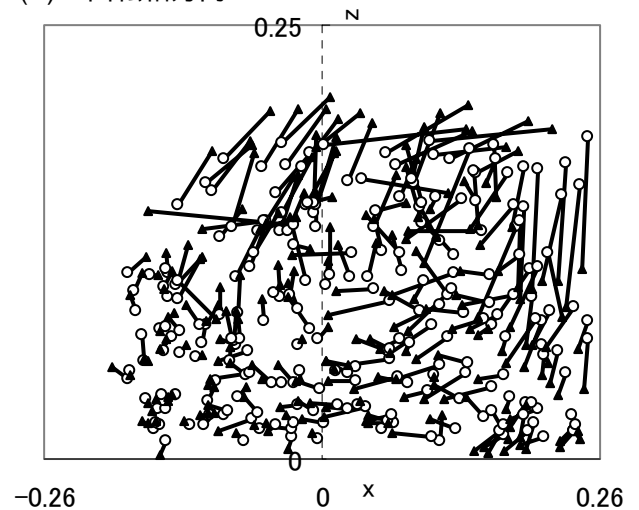


図-7 羽根付回転式円筒管

5.2 コンクリートの品質に及ぼす影響（実験）

図-8, 9 に練混ぜ時間とスランプの関係を図-10, 11 に練混ぜ時間と圧縮強度の関係を示す。空気量の試験結果は、いずれの実験ケースにおいても変動幅 1%程度であった。また今回検討を行なった配合はプレーンコンクリートであることから空気量の変動がスランプや圧縮強度に与える影響は小さいものと考えている。

スランプは練混ぜ時間の増加にともない増加

し、ある練混ぜ時間で最大となり、その後減少した。この現象はミキサの種類、コンクリートの配合の違いを問わず認められるもので、その他の条件で実施された他の研究者の試験結果³⁾と同様である。図-8 に示すように、練混ぜ量の異なるコンクリート（練混ぜ量：20, 30, 40 リットル）では、練混ぜ量が 20, 30 リットルの場合 180 秒から 300 秒前後でスランプが最大値を示しているのに対し、練混ぜ量が 40 リットルの

場合 900 秒前後で最大値を示した。ある練混ぜ時間でスランプが最大となるのは、練混ぜが進むほどセメントが分散すると考えると、セメントの凝集の程度により最も流動性が高くなる点が存在するのではないかと考えられる。

ミキサの回転数を 20rpm, 30rpm と変化させると、図-9 に示すように、スランプが最大となる練混ぜ時間は回転数が 20rpm の場合約 300 秒、30rpm の場合約 180 秒となった。これをミキサの回転回数で表すと両者とも 90~100 回転であり、ほとんど大差はなかった。このことから今回検討した範囲内では回転速度の違いによる遠心力の影響は小さいと考えられる。

図-10 に示すように、練混ぜ量の異なるコンクリートにおいて、材齢 28 日の圧縮強度は、練混ぜ量が 20, 30 リットルの場合は、最初の圧縮強度のピーク値が約 300 秒であるのに対し、練混ぜ量が 40 リットルの場合は、300 秒~900 秒の間と、圧縮強度が最初にピーク値に達するまでの時間が長くなった。この傾向はスランプに関しても認められることを考慮すると、練混ぜ量が 40 リットルの場合、羽根により持ち上げられたコンクリートの落下距離が短いこと、3 枚の羽根によりコンクリートが切り分けられることにより練混ぜられる効果が他のケースと比較して小さいこと等が理由として考えられる。

ミキサの回転数を 20rpm, 30rpm と変化させると、図-11 に示すように、圧縮強度は一度ピーク値を示し、その後は、練混ぜ時間の増加とともに増加した。

コンクリート単位体積当たりの積算消費電力量とスランプの関係を図-12 に、圧縮強度の関係を図-13 に示す。ここで、コンクリート単位容積当たりの積算電力量とは、練混ぜ時の積算電力量からミキサ空転時の積算電力量を引いて、それをコンクリートの練混ぜ量で除した値である。

図-12 に示すスランプはいずれのケースにおいてもスランプが最大となるコンクリート単位体積当たりの積算消費電力量が存在し、その値は練混ぜ量が 30 リットルの場合が最も小さく、

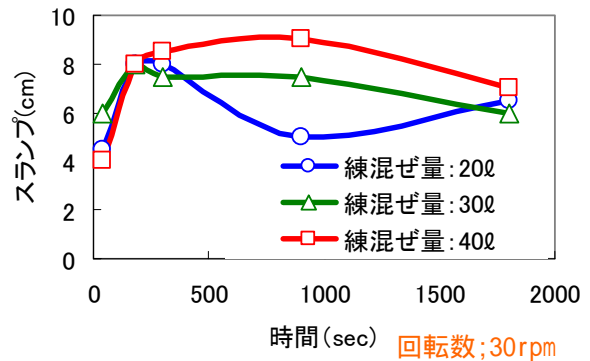


図-8 練混ぜ時間とスランプの関係 (練混ぜ量)

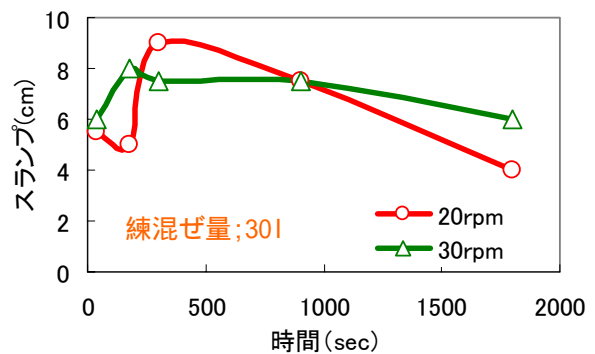


図-9 練混ぜ時間とスランプの関係 (回転数)

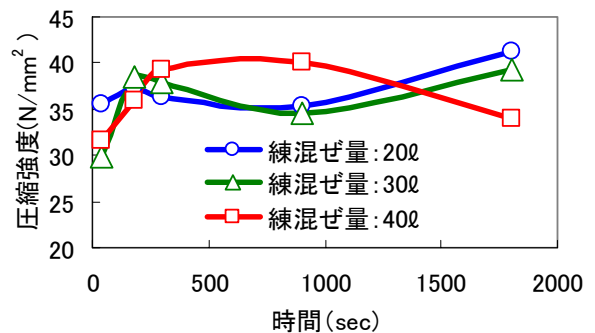


図-10 練混ぜ時間と圧縮強度の関係 (練混ぜ量)

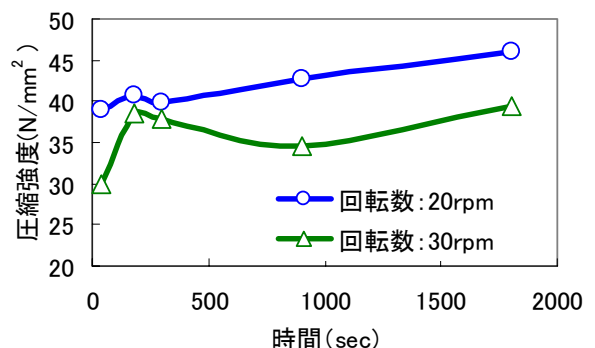


図-11 練混ぜ時間と圧縮強度の関係 (回転数)

20, 40 リットルの順で大きくなる。また魚本ら³⁾は、ミキサの容量、形式が異なる場合でもスランプは 0.5Wh/l (図中破線) で最大値を示すとし

ており，今回の検討の範囲内では回転数によらず練混ぜ量が 30 リットルの場合にのみ，その傾向が認められた。従って，練混ぜ量が 30 リットルのとき羽根によりコンクリートを持ち上げるエネルギーは，重力により混練されるエネルギーに効率良く変換されているのに対し，20，40 リットルの場合はロスが起きている。これは，羽根により持ち上げられる量とミキサ底部に残る量の割合が関係しているものと考えている。したがって，スランプの品質変化をミキサの積算電力量のみによって評価することは難しいが，今後，実際に練混ぜに寄与したエネルギー量を推定することにより，スランプの品質変化を表わす新たな指標を提案できるものと考えている。

図-13 に示す圧縮強度は回転数が 30rpm のときはスランプの傾向と同様圧縮強度が最大となる単位体積当たりの積算電力量が存在したが，回転数が 20rpm のときは増加した。

6. まとめ

運搬型の羽根付回転式円筒管を改良し練混ぜ可能なミキサとするために，構造が類似している傾胴式ミキサをもとに検討を行った。本検討において以下に示す結論を得た。

- (1) 傾胴式ミキサは，コンクリート粒子の相対位置を変化させるように混合・混練を行うのに対し，羽根付回転式円筒管は，コンクリート粒子を円を描くように運動させている。
- (2) 解析結果より，練混ぜるためには，羽根付回転式円筒管の羽根の形式を変える必要があると考えられる。
- (3) 傾胴式ミキサの場合，2 軸型やパン型ミキサと同様に，コンクリートの品質は単位容積当たりの積算電力量で変化するが，ミキサの積算電力量のみによって評価することは難しい。

謝辞

本研究を実施するにあたり，独立行政法人水資源機構ならびに財団法人水資源協会には，多大

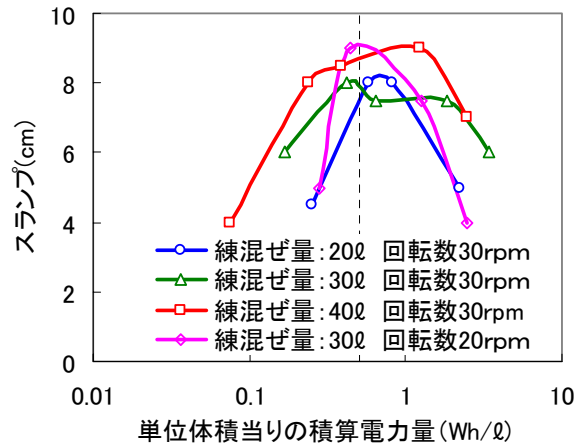


図-12 コンクリート単位体積当たりの積算消費電力量とスランプの関係

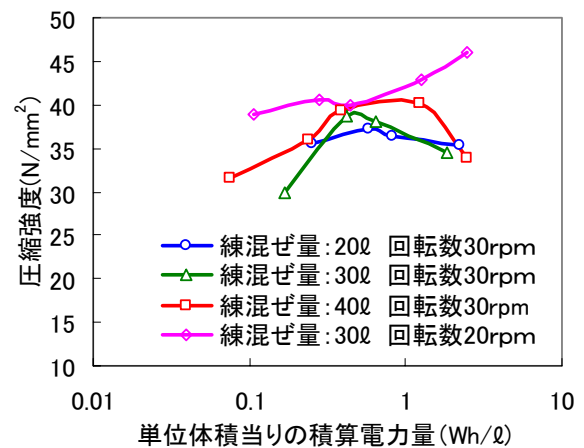


図-13 コンクリート単位体積当たりの積算電力量と圧縮強度の関係

なるご協力を頂き，深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大藪勝美ほか：新しいコンクリート運搬工法 SP-TOM を滝沢ダムへ適用するための検討，ダム技術，No.178，pp.9-33，2001.7
- 2) 石丸啓輔，橋本親典ほか：重力による材料落下型連続ミキサの練混ぜ機構の可視化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1303-1308，2000
- 3) 魚本健人ほか：新しいコンクリート製造管理システムに関する研究 生産技術研究所報告 第39巻 第1号，1997.3
- 4) 吉國美涼，魚本健人ほか：個別要素法を用いたコンクリート運搬システムの基礎理論の解明，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.1097-1102，2000