

# 論文 コンクリート充てん鋼管鉄塔への高流動コンクリートの適用に関する研究

浦野 真次\*1・北澤 智\*2・高澤 裕二\*3・野村 朋宏\*4

要旨：高さが 100m 程度のコンクリート充てん鋼管鉄塔のコンクリート圧入施工に関して、充てん状況に関するフレッシュコンクリートの可視化実験を行い、鋼管の断面減少部分のコンクリートの閉塞を防止するためのコンクリートの変形性能や粗骨材容積の上限等に関して検討した。その結果、粗骨材容積を  $333\text{l/m}^3$  以下と小さくして、圧入速度を最大限小さくすることで施工性が確保できることを示した。

キーワード：コンクリート充てん鋼管鉄塔、高流動コンクリート、圧入、V 漏斗流下時間

## 1. はじめに

大型送電線鉄塔のうちコンクリート充てん鋼管鉄塔は、中空鋼管鉄塔と比較して鋼管サイズが縮小できるため、鉄塔建設のコストダウンが可能となる。これまで、コンクリート充てん鋼管鉄塔の建設は、コンクリートを予め充てんした長さ数m程度の鋼管部材を鉄塔建設現場で組み立てる方法や、現地でモルタルを用いて中空鋼管鉄塔の脚下部よりポンプ圧入して上部まで押し上げ充てんする方法などが採用されている。しかし、前者ではコンクリートを充てんした鋼管の運搬重量増大による運搬範囲の制限と費用増大、後者ではヤング係数が小さいモルタルであるため設計面での有効性が小さいことや富配合モルタル使用による費用増大の問題点がある。このため、コンクリート充てん鋼管鉄塔の適用範囲が狭められているのが現状である。

そこで、コンクリート充てん鋼管鉄塔建設に伴うコストダウンのためには、コンクリートを建設現場で圧入して充てんすることが望ましい。

コンクリート充てん鋼管鉄塔は、鉄塔高さが 100m 程度にもなり、鉄塔脚支柱材である円形鋼管内径は下部（最大 600mm 程度）より頂上部

へと行くに従い減少（139mm 程度）している。断面の減少は、図 - 1 に示すように段落としのような状況になっている。このため、コンクリートを圧入する場合、コンクリートの変形性能の不足や粗骨材のアーチング<sup>1)</sup>により断面減少部分において閉塞が発生する可能性がある。

そこで、本研究では、コンクリート充てん鋼管鉄塔のコンクリート圧入施工に関する基礎的研究として、充てん状況に関するフレッシュコンクリートの可視化実験を行い、粗骨材のアーチング発生を防止するための粗骨材容積の上限等について検討した。

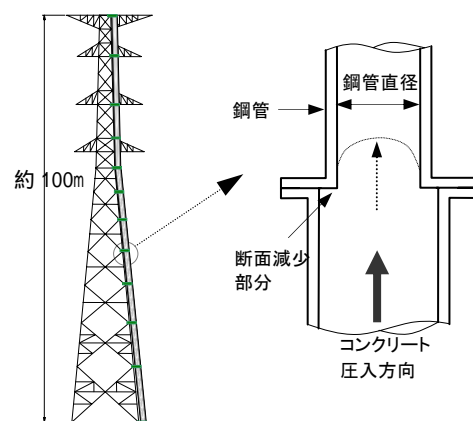


図 - 1 鉄塔および鋼管フランジ部模式図

\*1 清水建設（株）技術研究所土木研究開発部 工博（正会員）

\*2 中部電力（株）基幹系統建設センター技術グループ

\*3 中部電力（株）基幹系統建設センター技術グループ担当副長

\*4 清水建設（株）名古屋支店土木技術部 工修（正会員）

## 2. 可視化実験の概要

### 2.1 目的

コンクリート充てん鋼管鉄塔のコンクリート圧入において特に懸念される事項は、図 - 1 に示す断面変化・減少部分における閉塞である。圧入作業において、断面減少部分を流動する際、コンクリートの变形性能が不足している場合や、粗骨材によってアーチングが発生した場合、鋼管内で閉塞する危険性がある。したがって、施工性を評価するため、配合選定や実大施工実験に先立ってコンクリートの变形性能や粗骨材容積の目標値を検討することが必要である。しかし、流動挙動が直接観察できないため、閉塞のメカニズムは推測することしかできず、定量的に把握することは困難である。

本研究では、フレッシュコンクリートの可視化実験手法<sup>2)</sup>を適用し、コンクリートおよび鋼管のモデルを用いて実験領域内のコンクリートの充てん状況を観察し、圧入中におけるモデルコンクリートのせん断ひずみ速度分布を求め、管内閉塞を防止するための粗骨材容積の上限や圧入速度に関して検討することとした。

### 2.2 実験概要

#### (1) 使用材料

充てんコンクリートには高流動コンクリートを用いることとし、そのフレッシュコンクリートの可視化モデルとして、モルタル相と粗骨材粒子群からなる固液2相系混相流体を用いた。モデルモルタルは、2種類の高吸水性高分子樹脂と水の添加量により流動性状を変化させた無色透明な粘性流体（密度  $1.0\text{g/cm}^3$ ）を用いた。図 - 2 に示すミニスランプフローおよびK漏斗流下時間<sup>2)</sup>で測定したモデルモルタルの流動性状を表 - 1 に示す。モデル粗骨材は、粗骨材の最大寸法が  $20\text{mm}$ （密度  $1.37\text{g/cm}^3$ ，F.M.6.30，実積率  $65.6\%$ ）の人工軽量粗骨材を用いた。

#### (2) モデルコンクリートの配合

モデルコンクリートの变形性能および粗骨材容積が充てん性に及ぼす影響を検討するため、配合は、モデル粗骨材とモデルモルタルの容積

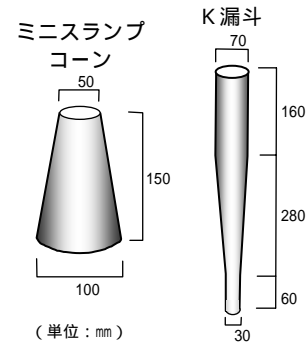


図 - 2 ミニスランプコーン・K漏斗の形状寸法

表 - 1 モデルモルタルの性状

No.	ベース吸水ポリマー添加量 (g/l)	増粘用ポリマー添加量 (g/l)	ミニスランプフロー (mm)	K漏斗流下時間 (s)
M1	3.5	0	295 × 300	2.5
M2	4.0	0	245 × 235	8.6
M3	4.0	4.0	320 × 305	13.4
M4	4.5	0	170 × 170	-
M5	5.0	0	160 × 150	-
M6	5.0	3.0	255 × 265	32.8
M7	5.5	3.0	240 × 240	99.1

表 - 2 モデルコンクリートの性状

配合 No.	モルタル No.	Vg/Vm	スランプフロー (cm)	V漏斗流下時間 (s)
1	M1	0.3	52.0 × 52.5	2.7
2	M3		61.0 × 62.0	3.9
3	M2		47.0 × 47.0	8.6
4	M7		52.0 × 54.0	15.7
5	M4		39.5 × 41.0	25.6
6	M5		39.5 × 39.5	35.6
7	M6		55.0 × 56.0	10.2
8	M2	0.5	42.5 × 42.5	3.9
9	M6		47.5 × 49.5	11.6
10	M7		47.5 × 47.5	19.5
11	M3		39.0 × 37.0	23.8
12	M1	0.9	33 × 33 (sl=20.5)	23.7

比（以下、 $V_g/V_m$  と称す）およびモデルモルタルの性状の組合せによって決定した。 $V_g/V_m$  は、一般の高流動コンクリートの粗骨材容積の範囲を検討するため、 $0.3$ （粗骨材容積で  $231\text{l/m}^3$ ）および  $0.5$ （ $333\text{l/m}^3$ ）とし、粗骨材を極端に多くしたケースとして  $0.9$ （ $474\text{l/m}^3$ ）も追加した。実験に用いたモデルコンクリートのスランプフローおよびV漏斗流下時間を、表 - 2 に示す。

モデルコンクリートには、コンクリートの流動を追跡するトレーサ粒子として発泡スチロール粒子（平均粒径  $2.5\text{mm}$ ，密度  $0.02\text{g/cm}^3$ ）を適量混入した。

#### (3) 実験方法

コンクリートの圧入時における鋼管内での閉

塞を検討するため、最も径の細い頂上部付近で管径 190mm から 140mm に減少している部分を中心とした上下 ±50cm の鋼管を二次元断面としてモデル化し、充てん状況の可視化を行うことにした。モデルコンクリートの変形性能および圧入速度等をパラメータとして、断面減少部分のコンクリートの挙動に関する定量的評価を試みた。

断面減少部分付近のモデル型枠は、図 - 3 および図 - 4 に示すように、透明なアクリル板により作製し、型枠側面より透視できるものとした。鋼管中央部の 2 次元断面を模擬して観察を行うこととし、奥行き方向は 10cm の矩形断面とした。型枠の下部から、コンプレッサーを用いてモデルコンクリートをポンプで供給し、圧送・圧入した。圧入速度は、コンプレッサーの圧力を変化させて調整し、型枠内のモデルコンクリート平均上昇速度を 0.4 ~ 3.5m/min に変化させた。

型枠の断面減少部分を撮影し、これを流跡線およびせん断ひずみ速度取得の際の検査領域とした。撮影時間は、モデルコンクリート上面が型枠上面に達する程度までとした。

ビデオ撮影による画像解析を行い、トレーサ粒子の座標データを取得し、圧入中のモデルコンクリートのせん断ひずみ速度分布を求めた<sup>2)</sup>。その結果から、これまでに著者らが提案した V 漏斗流下時間と型枠内を流動する高流動コンクリートのせん断ひずみ速度との関係を用いた施工性評価方法<sup>3)</sup>に基づいて考察を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 流動状況の観察

流動状況の目視観察の結果、いずれの実験ケースにおいても、圧入中のモルタル相あるいは粗骨材粒子群の過大な材料分離は認められなかった。また、断面減少部分の隅角部では、流動が停滞するせん断面を形成しながら上昇しており、空気泡の残留は認められなかった。

モデル高流動コンクリートの流動性の相違に

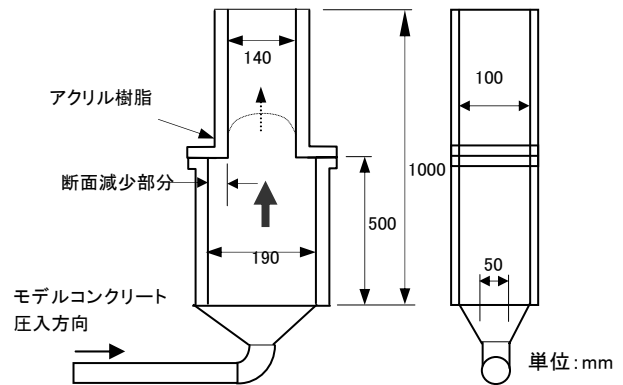


図 - 3 可視化モデル型枠の形状



図 - 4 可視化実験の状況

よって、型枠内を上昇する際の流動挙動が異なり、モデルモルタルの粘性が小さいほど、また  $V_g/V_m$  の大きい(粗骨材容積が多い)ものほど断面減少部分より下の位置において管中央と側部の流速差が小さく、栓流の状況となっていた。

一方、粘性の卓越するものは、中央と側部での流速差が認められた。

#### 3.2 トレーサ粒子の流跡線

画像解析により得られた、トレーサ粒子の流跡線の一例を図 - 5 および図 - 6 に示す。流跡線は、すべて同一時間における流動状況をトレースしたものである。断面変化部分では、モデルコンクリートの流動性にかかわらず断面減少部分においてこれを回避するような流動状況となっていることが確認された。

$V_g/V_m$  が 0.5 以下である条件では、図 - 5 に示したように比較的大きな流動状況の乱れはなく、断面減少部分においてスムーズに回避するような流動状況となった。

一方、図 - 6 に示したように  $V_g/V_m = 0.9$  とし

た場合では、断面減少部分において大きく中央に寄った後、外側に反るような流動を示した。これは、断面減少部分の隅角部において、流動が停滞する箇所が増大したため、これを回避するような流動挙動と考えられる。また、粗骨材容積が多いほど、また流速が速くなるほど流動の乱れが生じており、粗骨材のアーチングなどでスムーズな流動が妨げられているものと考えられる。

### 3.3 施工性判定方法の概要

高流動コンクリートは、間隙通過時の流動などの動的な状態において、強制的にせん断力を受けたり、高速で流動したりするような場合には、材料の均一性および閉塞等に関する限界状態となる分離限界点があるものと考えられる。著者らは、V漏斗試験装置内に発生するせん断ひずみ速度を暫定的に分離限界点と仮定し、間隙通過時の施工性の良否を判定するための指標とし、CFT(コンクリート充てん鋼管柱)の圧入施工時の施工性判定を行って既に報告した<sup>3)</sup>。図-7に示すように、高流動コンクリートが施工中の任意の型枠内で流動する際、V漏斗流下時間-せん断ひずみ速度の最大値の関係において示される分離限界点以上の大きなせん断ひずみ速度を与えられた場合に閉塞の危険度が著しく上昇するとした評価方法である。コンクリート充てん鋼管鉄塔においても、同一の評価方法が適用可能であると考え、各実験ケースにおいて発生したせん断ひずみ速度の最大値とV漏斗流下時間の関係を考察し、断面減少部分の付近の通過時の施工性判定を行うこととした。

### 3.4 せん断ひずみ速度

各実験ケースのトレーサ粒子の流跡線の座標取得結果から、せん断ひずみ速度を算出した。せん断ひずみ速度の算出方法は既報<sup>2)</sup>を参照されたい。

圧入中に発生するせん断ひずみ速度は、すべての実験ケースにおいて1/s程度以上のせん断ひずみ速度が発生した。粗骨材容積が多いケースの断面減少部分通過時や、追跡したトレーサ

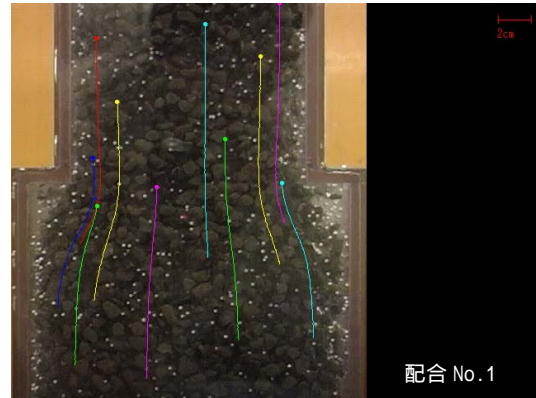


図-5 トレーサ流跡線の一例(配合No.1)



図-6 トレーサ流跡線の一例(配合No.12)

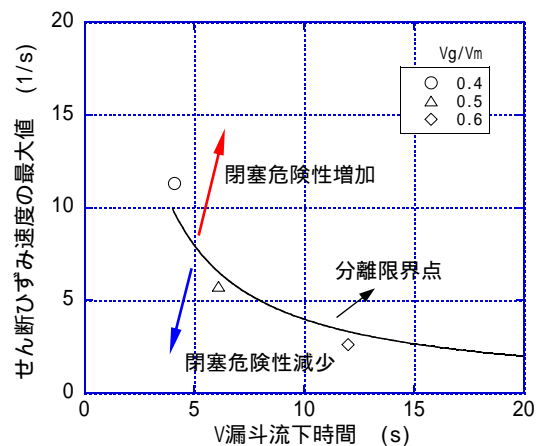


図-7 V漏斗流下時間とせん断ひずみ速度との関係<sup>3)</sup>

粒子の一部粒子の流動の停滞時にはせん断ひずみ速度が最大20/s程度以上と大きくなるケースもあった。

V漏斗流下時間と各実験ケースにおいて発生したせん断ひずみ速度の最大値の関係を図-8に示す。なお、圧入速度を変化させたケースも同時に図示したため、同一のV漏斗流下時間で



もせん断ひずみ速度が変化している。粗骨材容積が  $231\text{ l/m}^3$  の場合、V漏斗流下時間にかかわらず発生するせん断ひずみ速度の最大値は  $1\sim 4\text{ s}$  となり、閉塞の危険性は小さい領域である。一方、粗骨材容積が  $333\text{ l/m}^3$  の場合、V漏斗流下時間が  $15\text{ s}$  程度以下の比較的粘性の小さい領域においては、 $231\text{ l/m}^3$  よりせん断ひずみ速度が大きくなる傾向となった。V漏斗流下時間が  $15\text{ s}$  以上の粘性の大きい領域では、せん断ひずみ速度は粗骨材容積  $231\text{ l/m}^3$  と同程度の  $1\sim 4\text{ s}$  と小さくなる傾向となった。これは、V漏斗流下時間が  $15\text{ s}$  程度以下の比較的粘性の小さい範囲では、粗骨材容積が多く圧入速度が速くなると粗骨材の接触によって流動の乱れが生じやすく、アーチング・閉塞の危険性が増加する方向に移行しやすいためと考えられる。一方、V漏斗流下時間の大きい範囲では、モルタル相の粘性が支配的要因となり、高速での流動が生じにくい流動状態となる。ただし、分離限界点も小さいため、必ずしも安全側とは言えない。粗骨材容積が高流動コンクリートの範囲を超えた  $474\text{ l/m}^3$  の場合では、明らかに大きなレベルのせん断ひずみ速度であり、閉塞の危険性が大きい領域である。

スランプフローと各実験ケースにおいて発生したせん断ひずみ速度の最大値の関係を図 - 9 に示す。粗骨材容積が  $231\text{ l/m}^3$  の場合は、V漏斗流下時間と同様にスランプフローの影響はほとんど認められない。一方、粗骨材容積が  $333\text{ l/m}^3$  の場合、スランプフロー  $40\sim 50\text{ cm}$  程度の範囲において、せん断ひずみ速度の値が比較的大きく変化している。これは、粗骨材容積が大きい場合、粗骨材の接触が増加して流動の乱れが生じやすくなっており、これがモルタル相の粘性や圧入速度の大きさにもよって変化すると考えられる。一般に、スランプフローは降伏値と関係する指標であり<sup>4)</sup>流動中の変形のしやすさとは関係ないが、粗骨材容積がある程度大きい場合はスランプフローを大きくするほうがよいと考えられる。

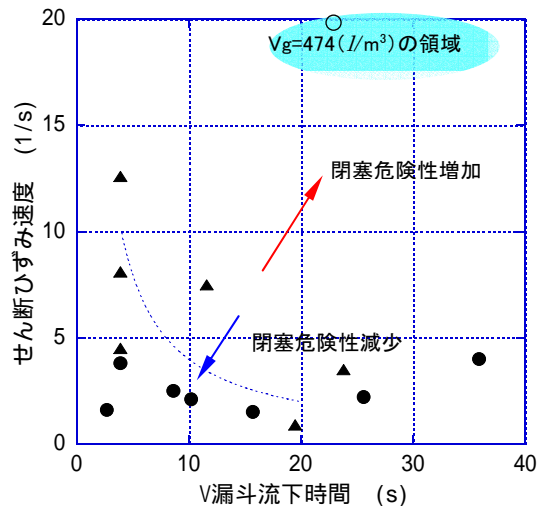


図 - 8 V漏斗流下時間とせん断ひずみ速度との関係

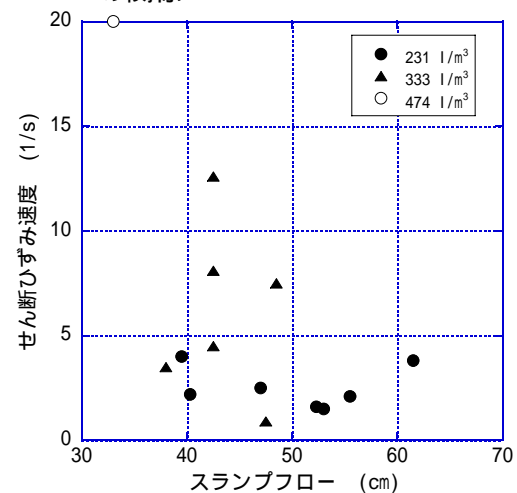


図 - 9 スランプフローとせん断ひずみ速度との関係

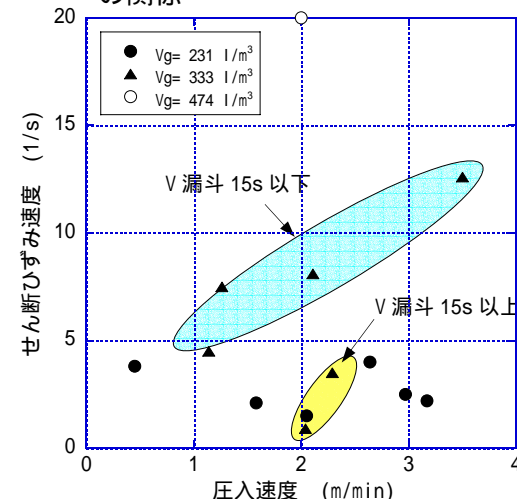


図 - 10 圧入速度とせん断ひずみ速度との関係

圧入速度とせん断ひずみ速度の関係を図 - 10 に示す。粗骨材容積が  $231\text{ l/m}^3$  と非常に小さい場合には、圧入速度を大きくしてもせん断ひず

み速度は大きく増加しない。しかし、粗骨材容積が  $333\text{l}/\text{m}^3$  の場合には、V漏斗 15s 程度以下と比較的粘性が小さくなると、圧入速度が大きくなるに従ってせん断ひずみ速度は増加する傾向にあり、圧入速度  $3\text{m}/\text{min}$  程度以上は、閉塞の危険性が大きくなると考えられる。粗骨材容積を  $474\text{l}/\text{m}^3$  とした場合は、それほど圧入速度を大きくしなくてもせん断ひずみ速度が大きなレベルとなり、明らかに閉塞の危険性があるといえる。このため、実際のポンプによる施工の際には、粗骨材容積を考慮した上で圧入速度を最大限小さくすることが望ましい。

#### 4. 可視化実験に関するまとめ

本研究は、コンクリート充てん鋼管鉄塔のコンクリート圧入施工に関して、充てん状況に関するフレッシュコンクリートの可視化実験を行い、管内閉塞を防止するための粗骨材容積の上限や圧入速度に関して検討した。画像解析結果に基づき、各実験ケースにおいて発生したせん断ひずみ速度の最大値とV漏斗流下時間の関係を考察し、断面減少部分の付近の通過時の施工性判定を行った。その結果、粗骨材容積は、可能な限り小さくすることで、断面減少部分の流動時に発生するせん断ひずみ速度を低減することができ、閉塞の危険性を小さくすることができることが明らかとなった。粗骨材容積は、コンクリートのスランプフローやV漏斗流下時間で示される変形性能を考慮した上で、 $333\text{l}/\text{m}^3$  程度までは施工が可能であると考えられる。また、 $333\text{l}/\text{m}^3$  程度まで粗骨材容積を多くした場合には、圧入速度は、可能な限り小さくする必要がある。

#### 5. 配合選定のための課題

実際の施工に適用するコンクリートの配合を選定するためには、以下に示す課題がある。

- ・ 粗骨材容積を少なくした場合、硬化後の品質に関してペースト部分が增大して収縮が大きくなること、弾性係数が小さくなるこ

となどの不具合が予測される<sup>5)</sup>。このため粗骨材容積は硬化後の品質確保を考慮した上で決定する必要がある。

- ・ V漏斗流下時間が大きい場合には、コンクリートポンプの圧送圧力が大きくなるため、可能な限り小さくするように検討を行う必要がある。
- ・ コンクリート製造から鉄塔位置までの運搬は、鉄塔位置によっては運搬時間が過大となり、品質変化が過大となるために施工性に不具合を生じる可能性がある。
- ・ 設計基準強度（材齢7日で  $30\text{N}/\text{mm}^2$ ）や供用時の耐久性なども確保する必要がある。

今後は、以上の要求品質を総合的に勘案して最も適切な配合選定を行い、鉄塔頂上部細径鋼管の施工実験、実大施工実験を順次実施する予定である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会編：「8．可視化実験結果」，コンクリートのポンプ施工指針[平成12年版]，コンクリートライブラリー100，pp.143-148, 2000.
- 2) 浦野真次，橋本親典，辻幸和，杉山隆文：可視化実験による高流動コンクリートの流動性評価に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.585/V-38，pp.163-174，1998.2
- 3) 浦野真次：コンクリート充填鋼管柱内の高流動コンクリートの施工性判定，フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題シンポジウム論文集，土木学会コンクリート技術シリーズ37，pp.45-52，2000.7
- 4) 日本コンクリート工学協会：第1章 ビンガムモデルによる基本的な力学性状の把握，フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，pp.1-50,1996.4
- 5) 土木学会編：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，pp.101-126，1998