

論文

[1046] 高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価試験方法に関する研究

正会員 谷川恭雄 (三重大学工学部)
 同 ○森 博嗣 (名古屋大学工学部)
 同 渡辺健治 (三重大学大学院)
 三輪正保 (三重大学大学院)

1. まえがき

近年、超高層RC造建築物あるいはプレストレストコンクリート構造物などに、高強度コンクリートが頻繁に使用されるようになり、圧縮強度が1000kgf/cm²を越すコンクリートも実用化されつつある[1]が、このような高強度・超高強度コンクリートに関する研究は、硬化後の力学特性や耐久性に関するものが中心である。しかし、より高強度化を図るためには、水セメント比をさらに小さくしたり、各種の混和材料を用いるの必要があり、このようなコンクリートの施工性能に対する不安が少なからず生じている[2]。

本研究の目的は、高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシーを合理的に評価する方法を確立するための基礎的なデータを収集することにある。このため、今回は、高性能A E減水剤[3]およびシリカフェームを混入した低水セメント比のフレッシュコンクリートの性状を、各種コンシステンシー試験方法を用いて測定し、この種の新しいコンクリートのコンシステンシーを検出するための試験方法について若干の考察を行った。なお、本実験は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」の一環として実施したものである。

2. 実験方法

実験に用いたコンクリートの調査表を、表-1および表-2に示す。実験-Iでは、水セメント比(W/C)を、25、30、35および55%の4種類、スランプ(SL)を18~21cmの範囲内の1種類としたコンクリートを、また、実験-II

表-1 コンクリートの調査表(実験-I)

Series	W/C*	W	C	Si	S	G	HAE	Series	W/C*	W	C	Si	S	G	HAE
T-35	35	165	471	0	723	987	0.9	K-35	35	165	471	0	723	987	1.6
T-30	30	165	550	0	684	987	1.5	K-30	30	165	550	0	684	987	2.1
T-25	25	165	660	0	597	1035	3.8	K-25	25	165	660	0	597	1035	6.0
TS25	25	165	528	132	550	1035	5.0	KS25	25	165	528	132	550	1035	8.0
N-55	55	180	327	0	821	971	0								

[Notes] W/C* = W/(C+Si) (%), W: water (kg/m³), C: cement (kg/m³), Si: silica fume (kg/m³), S: sand (kg/m³), G: coarse aggregate (kg/m³), HAE: high-performance AE water reducing agent (%/(C+Si)).

表-1 コンクリートの調査表(実験-I)では、水セメント比を25、27、30、35および55%の5種類、スランプを18~21cm(hシリーズ)および22~25cm(sシリーズ)の2種類に変化させたコンクリートを用いた。水セメント比が55%のコンクリートを除いたすべてのコンクリートは、単位水量を165kg/m³の一定とし、2種類の高性能A E減水剤(TシリーズおよびKシリーズ)の添加量でスランプを調整した。本実験では、高性能A E減水剤の添加量に相当する分を単位水量から減じて混練を行っている。また、実験-Iでは、W/C=25%の

表-2 コンクリートの調査表(実験-II)

Series	W/C*	W	C	Si	S	G	HAE	Series	W/C*	W	C	Si	S	G	HAE
T-35-h	35	165	471	0	723	987	0.9	K-35-h	35	165	471	0	723	987	1.7
T-35-s	35	165	471	0	723	987	1.1	K-35-s	35	165	471	0	723	987	2.1
T-30-h	30	165	550	0	684	987	1.4	K-30-h	30	165	550	0	684	987	2.1
T-30-s	30	165	550	0	684	987	1.5	K-30-s	30	165	550	0	684	987	2.5
TS30-h	30	165	440	110	644	987	3.0	KS30-h	30	165	440	110	644	987	3.0
TS30-s	30	165	440	110	644	987	4.0	KS30-s	30	165	440	110	644	987	4.0
TS27-h	27	165	489	122	610	1019	3.7	KS27-h	27	165	489	122	610	1019	3.3
TS27-s	27	165	489	122	610	1019	4.5	KS27-s	27	165	489	122	610	1019	4.0
TS25-h	25	165	528	132	550	1035	5.0	KS25-h	25	165	528	132	550	1035	4.5
TS25-s	25	165	528	132	550	1035	6.0	KS25-s	25	165	528	132	550	1035	5.0
N-55-h	55	180	327	0	821	971	0								

[Notes] W/C* = W/(C+Si) (%), W: water (kg/m³), C: cement (kg/m³), Si: silica fume (kg/m³), S: sand (kg/m³), G: coarse aggregate (kg/m³), HAE: high-performance AE water reducing agent (%/(C+Si)).

コンクリートに、実験-Ⅱでは、W/C=25、27および30%のコンクリートにシリカフェームを単位セメント量の20%内割で混入したシリーズを加えた。使用したセメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産で、粗粒率=2.79、粗骨材は岡崎産碎石で、粗粒率=6.65、最大寸法=20mmである。また、TシリーズおよびKシリーズの高性能AE減水剤は、それぞれポリカルボン酸系およびナフタリン系のものである。

コンクリートの混練には、強制練りミキサ(回転数=60rpm)を用いた。混和剤を水に混入し、最初にモルタルを混練した後に、粗骨材を投入してコンクリートを混練した。水セメント比が30%以上のシリーズでは、

モルタル混練30秒、粗骨材投入後90秒の合計2分、水セメント比が30%未満のシリーズでは、モルタル混練120秒、粗骨材投入後60秒の合計3分の混練を行った。

混練後0分、30分および60分後に約30秒の練返しを行ってから、各種コンシステンシー試験を行った。実験-Ⅰでは、スランプ試験、スランピング試験(スランプ試験時のコンクリート上面の降下速度を測定する試験)[4]、光センサー式スランプフロー試験、コンクリートフロー試験(ASTM C124)、スプレッド試験(DIN 1048)、L型フロー試験[5]および小型ボックス試験[6]の7種類、実験-Ⅱでは、スランプ試験、光センサー式L型フロー試験およびコンクリートフロー試験の3種類の測定装置を用いた。スランピング試験装置、光センサー式スランプフロー試験装置、小型ボックス試験装置および光センサー式L型フロー試験装置を、図-1、図-2、図-3および図-4にそれぞれ示す。ここで、光センサー式とは、コンクリートの流動速度を2個の光センサーによって測定するもので、今回の実験のために新たに開発したものである。光センサー式スランプフロー試験では、コーンの中心から、12cm~17cmの区間、また、光センサー式L型フロー試験では、仕切り板から3cm~8cmの区間におけるコンクリートの平均流動速度を測定した。

3. 実験結果とその考察

図-5は、スランプ値(SI.)の経時変化を示したものの一例である。W/C=55%のコンクリート(N-55)に比べ、高性能AE減水剤を使用した高強度コンクリートは、一般にスランプダウンが少ない。今回の実験では、混練時間が比較的短かったこともあり、スランプダウンが観察されたものは少なく、むしろスランプが増大(スランプアップ)するコンクリートもみられた。また、比較用のW/C=55%のコンクリート以外のすべてのコンクリートで、ブリージングは皆無であった。以上のことから、この種のコンクリートでは、スランプを20cm以上としても材料分離の心配はなく、十分実用できることがわかった。

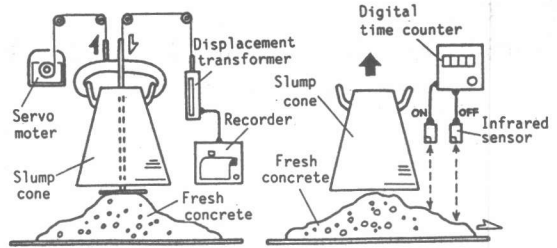


図-1 スランピング試験装置 図-2 光センサー式スランプフロー試験装置

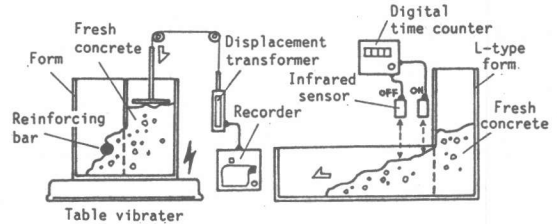


図-3 小型ボックス試験装置 図-4 光センサー式L型フロー試験装置

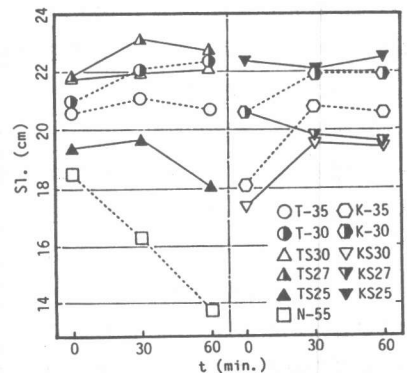


図-5 スランプ値(SI.)の経時変化

図-6、7および8は、それぞれスランプフロー値 (Sfl.)、コンクリートフロー値の変化量 (Cfl._{1.5}-Cfl.₀: 1.5回落下後の値から最初の値を減じたもの) および スプレッド値の変化量 (Spr._{1.5}-Spr.₀) とセメント水比(C/W)の関係を示したものである。図-7によれば、コンクリートフロー値は、一般にセメント水比が大きくて粘性の高いコンクリートほど小さくなる傾向を示している。しかし、フロー値は、底板との付着力あるいは摩擦力(すべり抵抗)の影響を大きく受けるため、粘性が小さくてもすべり抵抗の大きいコンクリートでは、フロー値は小さくなる。このすべり抵抗が試験値に及ぼす影響は、大小の差はあるが、どのコンシステンシー試験でも

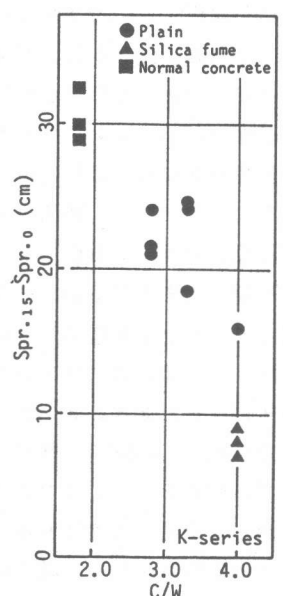
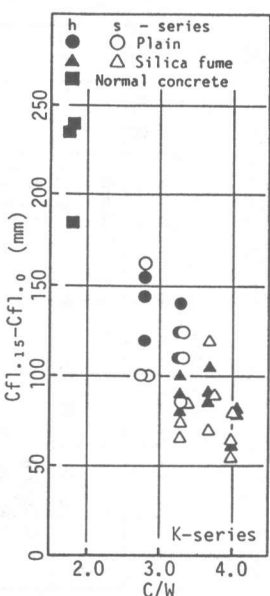
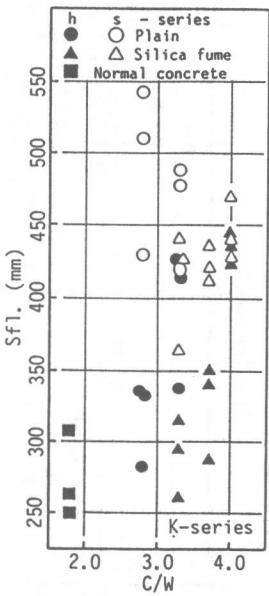
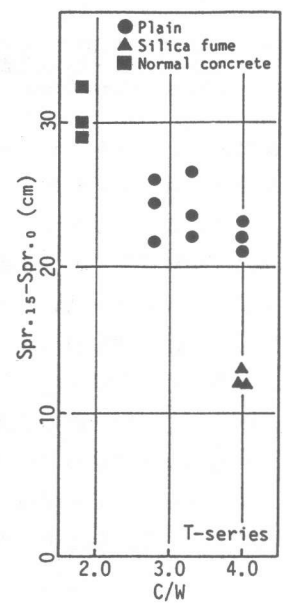
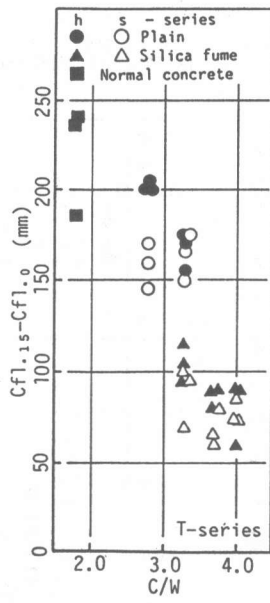
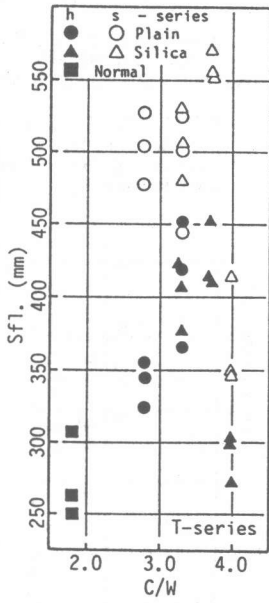


図-6 スランプフロー値 (Sfl.) とセメント水比 (C/W) の関係

図-7 コンクリートフロー値の変化量 (Cfl._{1.5}-Cfl.₀) とセメント水比 (C/W) の関係

図-8 スプレッド値の変化量 (Spr._{1.5}-Spr.₀) とセメント水比 (C/W) の関係

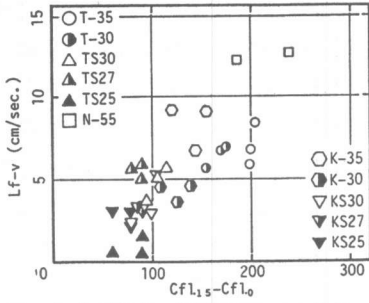


図-9 L型フロー初速度(Lf-v)とコンクリートフロー値の変化量(Cfl_{1.15}-Cfl₀)の関係

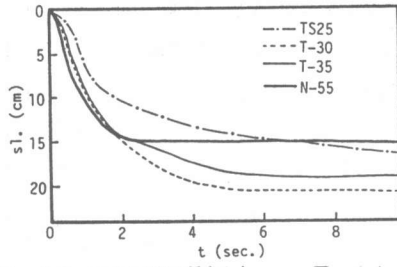


図-10 スランピング(s.l.)- 降下時間(t)曲線の一例

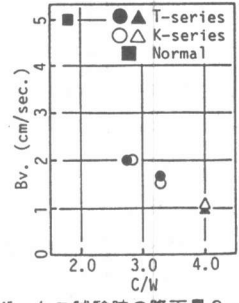


図-11 ボックス試験時の降下量2cm ~ 4cmの区間における降下速度(Bv.)とセメント水比(C/W)の関係

同様であり、シリカフェウム混入コンクリートのコンシステンシー評価を難しくしているといえよう。

また、衝撃荷重によって変形を促すコンクリートフロー試験やスプレッド試験によれば、理論的には、試料の粘性を検出することが可能である。しかし、粘性の差異がこれらの測定値に反映される程度はごくわずかであることがシミュレーション結果[4]から明らかになっており、測定値の精度を考慮すると、これらの試験値のみによって粘性を検出することはかなり難しいと考えられる。図-9は、実験-IIで光センサーによって測定したL型フロー初速度(Lf-v)とコンクリートフロー値の変化量(Cfl_{1.15}-Cfl₀)との関係を示したものである。粘性が小さく、流動速度が大きくなるほど、フロー値の変化量は大きくなるが、その関係はかなりのバラツキを包含している。

図-10は、スランピング試験によって得られたスランピング(s.l.)-降下時間(t)曲線の一例である。スランプ試験において、コンクリート上面が降下し始める時の速度は、すべり抵抗の影響も少なく、試料の粘性の検出が比較的容易な測定値の一つである[4]。しかし、この測定装置では、コーンの引上げおよび変形量測定のための

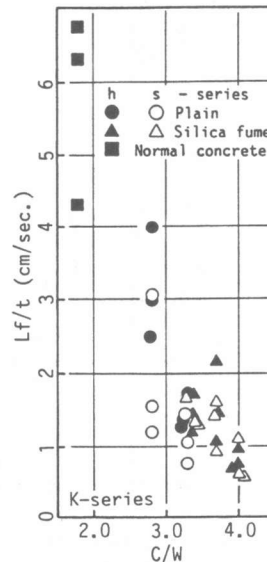
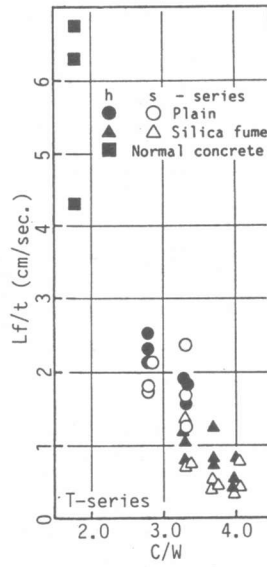


図-12 L型フロー速度(Lf/t)とセメント水比(C/W)の関係

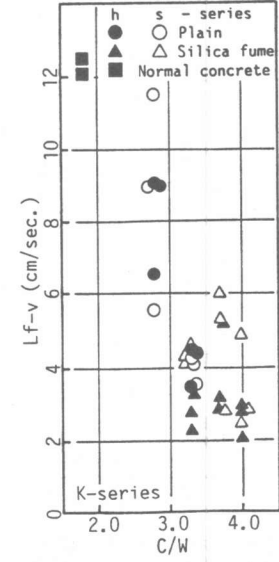
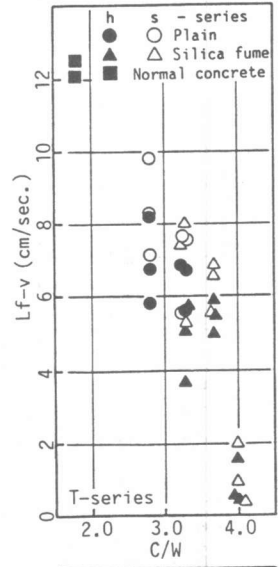


図-13 L型フロー初速度(Lf-v)とセメント水比(C/W)の関係

機構が多少大がかりになる。また、同様に装置が簡便とはいえないが、小型ボックス試験のように、振動を加えた時の流動速度を測定する試験方法は、この種のコンクリートのワーカビリティを予測するのに有効である[6]。図-11に小型ボックス試験によるコンクリートの降下速度(Bv.)とセメント水比(C/W)の関係を示す。

図-12および図-13は、L型フロー速度(Lf/t)およびL型フロー初速度(Lf-v)とセメント水比(C/W)の関係を示したものである。結果にバラツキがみられるものの、セメント量の増大にともなって粘性が増大し、流動速度は低下する。L型フロー初速度は、コンクリートの流動が開始する初期の測定値であり、すべり抵抗力の影響が比較的少ないことがシミュレーション結果から明らかになっている[7]。また、光センサーによる測定は比較的簡便であり、現場における粘性の検出方法として有望である。

筆者らは既に、スランプ値とフロー値から、コンクリートをビンガムモデルと仮定した場合のレオロジー定数、すなわち降伏値(τ_y)および塑性粘度(η)を推定する手法を提案し、その妥当性について検討した[4]。

この方法は、コンクリートの変形性状を粘塑性有限要素法[8]によってシミュレートし、この結果と実測結果の比較からレオロジー定数を推定するものであり、理論的には、異なる2つの測定値があれば、2つのレオロジー定数を推定することができる[9]。図-14は、上記の提案手法を適用して、実験-IIから得られたスランプ値(S1.)とコンクリートフロー値(Cf1.)の測定結果から、ビンガムモデルの2つのレオロジー定数(τ_y, η)を推定し、両者の関係をプロットした

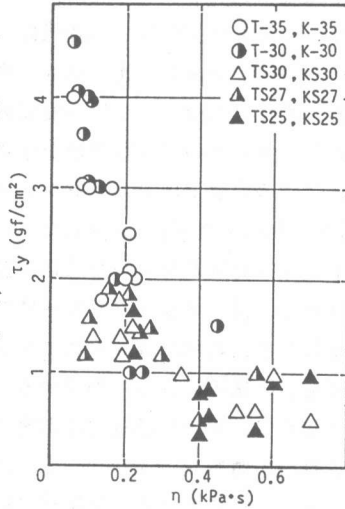


図-14 降伏値(τ_y)と塑性粘度(η)の推定値

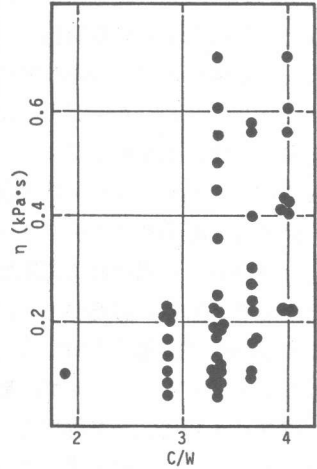


図-15 塑性粘度(η)とセメント水比(C/W)の関係

表-3 各種コンシステンシー試験の高強度・超高強度コンクリートに対する適性

試験方法	測定値	関係因子			精度		簡便性
		τ_y	η	Slip	τ_y	η	
スランプ試験	S1.	○	×	×	○	×	○
	Sf1.	△	△	△	△	×	○
	S1-v	△	○	△	×	△	△
スランピング試験	(sl.-t 曲線)	○	○	×	○	○	×
小型ボックス試験	(sl.-t 曲線)	○	○	△	○	○	×
コンクリートフロー試験	Cf1.	△	○	△	△	△	△
スプレッド試験	Spr.	△	△	△	×	△	○
L型フロー試験	Ls	○	×	△	○	×	○
	Lf	△	△	○	△	×	○
	Lf/t	△	○	△	×	△	○
	Lf-v	△	○	×	×	○	△

[註] 関係(○:大、△:中、×:小)、精度(○:高、△:中、×:低)、簡便性(○:易、△:中、×:難)、S1.:スランプ値、Sf1.:スランプフロー値、S1-v:スランプフロー初速度、sl.:スランピング、Cf1.:コンクリートフロー値、Spr.:スプレッド値、Ls:L型スランプ値、Lf:L型フロー値、Lf/t:L型フロー速度、Lf-v:L型フロー初速度。

ものである。また、図-15は、塑性粘度(η)とセメント水比(C/W)の関係を示したものである。一般に、同一のスランプ値、あるいはフロー値を与える降伏値(τ_y)は、塑性粘性(η)が増大するとともに小さくなる[8]。したがって、水セメント比の小さい高粘性のコンクリートの降伏値は、図-14中の下部に分布している。また、水セメント比が30%のコンクリートについて比較すると、シリカフェームを混入したコンクリートの方が降伏値が小さく塑性粘性が大きくなっている。

表-3は、定性的ではあるが、今回の実験で用いたコンシステンシー試験の適用性を、過去に行ったシミュレーション結果[8]とも比較・検討し、評価したものである。

高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシーを適切に評価するためには、粘性と何らかの関連があると思われる測定値(たとえば、スランプフロー値など)ではなく、レオロジー定数そのものを用いる必要がある。すなわち、各種のコンシステンシー試験による測定値は、たとえそれが粘性に関連する値であっても、降伏値によって相違するため、粘性の評価を誤る危険性があるからである。スランプ試験に加えて、すべり抵抗力の影響を受けにくい測定値(たとえば、L型フロー初速度)を併用し、これらの値をシミュレーション結果と比較することによって、2つのレオロジー定数を推定する手法が、いまのところ実用化に最も近いものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、高強度・超高強度コンクリートのフレッシュ状態における性状を各種のコンシステンシー試験によって測定し、この種のコンクリートのワーカビリティ評価方法を確立するための基礎資料を収集した。現段階で得られている知見は、以下のようにまとめられる。

- 1)高性能AE減水剤を用いた低水セメント比のコンクリートでは、スランプ値を20cm以上としても材料分離の心配はなく、十分実用可能である。
- 2)高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシーを適切に評価するためには、粘性を合理的に検出する試験方法を開発する必要がある、レオロジー定数(降伏値および塑性粘度)そのものを用いる必要がある。現段階では、スランプ試験およびL型フロー試験を併用した評価方法が最も有望であると思われる。

[謝辞]

本実験に際して、山本常夫氏・下野敏秀氏(竹本油脂㈱)、山中修一氏(花王㈱)、竹本油脂㈱コンクリート研究室の연구원の方々、成田圭介君・野田豊君(三重大学)、宮脇昌広君(名古屋大学)の協力を得た。ここに、付記して謝意を表する。

[引用文献]

- [1]長滝：コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10-1，pp.61-68，1988.
- [2]和美・田村・小森・笠井：コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10-2，pp.225-230，1988.
- [3]下野・山本・木之下：日本建築学会大会学術講演梗概集，A，pp.653-654，1988.
- [4]森・谷川：日本建築学会構造系論文報告集，No.377，pp.16-26，1987.
- [5]米沢・嵩・和泉・三井・奥野：日本建築学会大会学術講演梗概集，A，pp.263-264，1988.
- [6]谷川・森・増田・渡辺：フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集，pp.73-78，1989.
- [7]谷川・森・米沢・和泉・三井・奥野：日本建築学会大会学術講演梗概集，A，pp.255-256，1989.
- [8]Y.Tanigawa and H.Mori：Jour. of Eng. Mech.， Proc.of ASCE， Vol.115， No.EM3， pp.493-508， 1989.
- [9]谷川・森・筒井・黒川：コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9-1，pp.493-498，1987.