

(31) サンドイッチ構造への高流動コンクリートの適用に関する研究

Study on application of self-compacting concrete to sandwich system structure

内藤 英晴*, 大村 隆一郎**, 三浦 尚***

Hideharu Naito, Ryuichiro Ohmura, Takashi Miura

* 博士 (工学), 五洋建設 (株) 東京支社 (〒140-0013 東京都品川区南大井 6-26-3)

** 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

*** 工博, 東北大学大学院 教授 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

Recently in the immersed tunnel of the sandwich system structure which is the steel-concrete composite structure, the self-compacting concrete is often used to improve the filling ability.

In this report, we experimentally examined the subsidence behavior of various self-compacting concretes which influence the filling.

And, as a method of improving the filling of concrete, we verified the effect of the filling method pressurized by raising a part of concrete.

In addition, as a method of simulating the filling of self-compacting concrete to the sandwich system structure, we attempted the application of Distinct Element Method (DEM).

Key Words : self-compacting concrete, steel-concrete composite structure, sandwich system structure, initial subsidence, Distinct Element Method

1. まえがき

近年, 鋼・コンクリート複合構造であるサンドイッチ構造の沈埋トンネルにおいては, 内部に充てんされるコンクリートとして, 充てん度を高めるために高流動コンクリートを利用することが多い. 本報告は, 充てん性に影響すると考えられるコンクリートの沈下特性を各種配合の高流動コンクリートについて実験的に検討するとともに, コンクリートの充てん度を高める充てんの方法として, 一部のコンクリートを打ち上げる加圧充てん方法について効果を検証した. さらに, 流動性に優れた高流動コンクリートのサンドイッチ構造への充てん状況を解析的にシミュレートする方法として, 個別要素法の適用を試み, その適用性について検討を加えたものである.

2. 高流動コンクリートの沈下特性

2.1 実験内容

(1) 使用材料

実験に使用した材料とその品質を表-1に示す.

表-1 使用材料

材料名	種 類	物性および成分
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (OPC)	比重3.16 比表面積3280cm ² /g
	低熱型ハイライト系セメント (HBC)	比重3.20 比表面積4180cm ² /g
	三成分系セメント (LHC)	比重2.73 比表面積4830cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 (BFS)	比重2.90 比表面積6050cm ² /g
	フライアッシュ (FA)	比重2.32 比表面積3350cm ² /g
	石灰石微粉末 (Ls)	比重2.73 比表面積5050cm ² /g
細骨材 (S)※	山砂	表乾比重2.61 吸水率1.43% 粗粒率2.58 洗い失量1.74%
	砕砂	表乾比重2.67 吸水率1.34% 粗粒率2.84 洗い失量4.56%
粗骨材 (G)	砕石 (G _{max} =20mm)	表乾比重2.71 吸水率0.70% 粗粒率6.82 実積率59.2%
混和剤	高性能A E 減水剤 (SP1)	ポリカルボキシル酸エーテル系と架橋 ポリマーの複合体 (遅延型)
	高性能A E 減水剤 (SP2)	ポリカルボキシル酸エーテル系と架橋 ポリマーの複合体 (標準型)
	増粘剤 (Va1)	メチルセルロース系
	増粘剤 (Va2)	ポリアクリルアミド系
	収縮低減剤 (AS)	水溶性アルキレンオキシド付加物

※山砂: 砕砂=50:50

表-2 高流動コンクリートの配合

配合 No.	種 類	記号	混和材 (wt%)	W/B (%)	s/m (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						S P		V a (W×wt%)	A S (P×wt%)
							W	C	BFS	FA	Ls	S	G	(P×wt%)		
1	粉体系	B40R	40	30.5	45.0	52.0	179	352	235			800	759	1.00		
2		B60R	60	31.1	〃	〃	179	231	346			〃	〃	1.00		
3		B60S	60	31.1	〃	〃	179	231	346			〃	〃	1.10 ^{*1}		
4		B60R	80	31.6	〃	〃	179	113	453			〃	〃	0.90		
5		F20R	20	30.5	〃	〃	176	461		115		〃	〃	1.05		
6		F40R	40	29.7	〃	〃	167	338		225		〃	〃	0.95		
7		F40S	40	29.7	〃	〃	167	338		225		〃	〃	0.90 ^{*1}		
8		F60R	60	29.0	〃	〃	160	220		330		〃	〃	0.80		
9		HBR		27.6	〃	〃	175	633				〃	〃	1.00		
10		LHR		30.0	〃	〃	167	557				〃	〃	1.00		
11	増粘剤系	OPR		30.0	〃	〃	181	603				〃	〃	1.35		
12		OPS		30.0	〃	〃	181	603				〃	〃	1.60 ^{*1}		
13		VCR		42.0	53.0	56.1	181	431				945	〃	1.55	0.25	
14		VCS		42.0	〃	〃	181	431				〃	〃	1.80 ^{*1}	0.25	
15		VCAR		42.0	〃	〃	181	431				〃	〃	1.90	0.25	1.00
16		VAS		42.0	〃	〃	181	431				〃	〃	2.90 ^{*1}	2.50 ^{*2}	
17	併用系	LS30R	30	45.8	45.0	52.0	183	400			172	800	〃	1.55	0.10	
18		LS30S	30	45.8	〃	〃	183	400			172	〃	〃	1.20 ^{*1}	0.10	
19		LS15R	15	37.8	〃	〃	186	492			87	〃	〃	1.35	0.10	

注*1：標準型高性能A E減水剤 (SP2)を使用、その他は遅延型 (SP1)を使用

注*2：アクリル系増粘剤 (Va2)を使用、その他はセルロース系 (Va1)を使用

(2) 高流動コンクリートの種類と配合

沈下特性を調べる実験で対象とした高流動コンクリートは表-2に示す粉体系、増粘剤系および併用系の3種類計19配合である。

なお、高流動コンクリートの配合は、練上がりから90分間に渡り、スランプフロー値が $650 \pm 50\text{mm}$ 、V75漏斗流下時間が 10 ± 5 秒、空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ の品質を満足するよう決定した。なお、単位粗骨材容積はいずれの配合においても $280\text{リットル}/\text{m}^3$ の一定とし、粗骨材量の違いが沈下量に及ぼす影響を取り除くこととした。

(3) 沈下量測定装置

沈下量測定装置を図-1示す。試料高さが沈下量に及ぼす影響を確かめるために試料高さHは50cm、100cm、150cm、200cmの4水準とした。アクリルパイプ内面には剥離剤を塗布して摩擦の低減を図った。また、試料はアクリルパイプの中に静かに流し込むことにより、大きな気泡を巻き込まないようにした。アクリルパイプ中に打ち込んだコンクリート試料の上面に薄いアクリル板を敷き、その上にコンクリートを押し込まないように内部バネを取り外した電気式変位計を設置し沈下量を測定した。打設したコンクリートと同一バッチから採取した試料により、凝結試験、ブリーディング試験も併せて実施した。なお、乾燥防止のためラップでアクリルパイプ上面を封緘した。沈下測定は室温 20°C 、相対湿度60%の恒温恒湿室内で実施した。

2.2 実験結果および考察

(1) 沈下曲線と初期沈下量

本実験により得られた高流動コンクリートの沈下曲線(時間と沈下量の関係)は一般に図-2のように示すことができる。同図に示すように、凝結が始まるまでのごく初期の材齢において、沈下は直線的に増加するが、凝結の進行とともにその増加割合は急激に減少する。その後、材齢の経過とともに僅かずつであるが増加する傾向を示

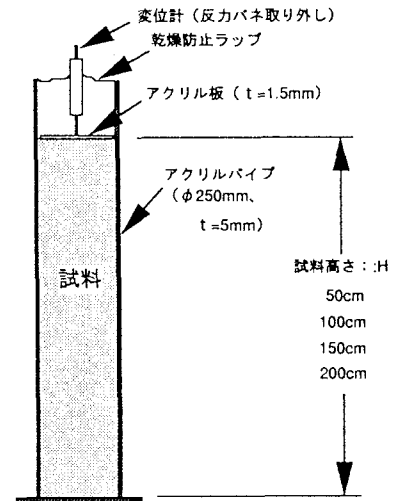


図-1 沈下量試験装置

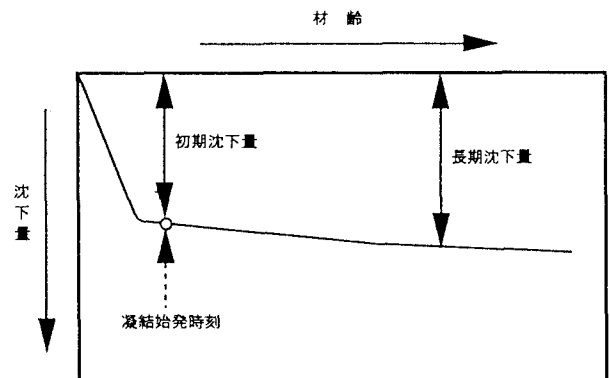


図-2 高流動コンクリートの沈下曲線

す。また、ごく初期の材齢において生じる急激な沈下は、コンクリートの凝結始発時刻よりも前に終了している。

表-3 初期沈下量および凝結試験結果

配合 No.	記号	試料上面の沈下量(mm)				凝結時間(min)	
		試料高さ H (m)				始発	終結
		0.5	1.0	1.5	2.0		
1	B40R	1.60	3.40	5.10	6.80	850	960
2	B60R	1.69	2.30	5.10	5.81	900	1030
3	B60S	—	1.65	—	2.92	510	650
4	B60R	2.00	4.17	6.00	8.00	760	940
5	F20R	1.60	2.52	4.60	7.44	940	1038
6	F40R	1.89	2.62	3.60	4.52	1140	1266
7	F40S	—	2.02	—	3.88	575	697
8	F60R	1.60	2.78	4.20	6.60	1400	1560
9	HBR	1.45	3.00	—	9.77	1400	1530
10	LHR	1.70	3.32	7.77	9.04	1600	1930
11	OPR	1.63	2.95	4.71	6.24	955	1055
12	OPS	—	1.88	—	3.38	465	565
13	VCR	1.40	3.20	4.20	8.00	1345	1477
14	VCS	—	2.29	—	4.34	760	898
15	VCAR	—	4.12	—	6.50	1960	2155
16	VAS	—	3.59	—	6.49	835	987
17	LS30R	1.20	1.50	2.80	3.50	665	785
18	LS30S	—	1.20	—	1.68	450	565
19	LS15R	—	3.29	—	6.91	940	1056

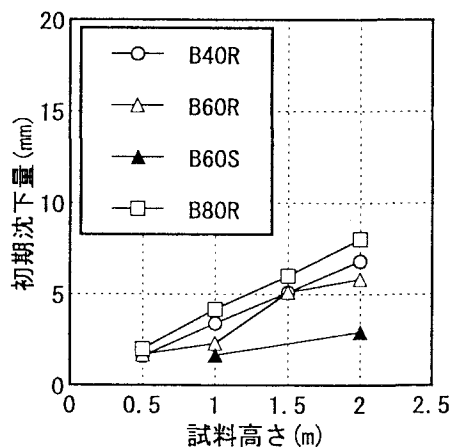


図-3 試料高さと初期沈下量の関係

しかし、沈下の急激な折れ曲り点の時刻と凝結始発時刻とでの沈下量にほとんど差がないため、ここでは凝結始発時刻における沈下量を初期沈下量と定義する。

(2) 試料高さと初期沈下量

沈下量測定試験および凝結試験結果を表-3に示す。また、沈下量測定用試料高さと初期沈下量との関係の一例を図-3に示す。いずれの配合の高流動コンクリートにおいても、試料高さが高くなるにつれ初期沈下量も大きくなっており、本実験の範囲では、初期沈下量は試料高さにほぼ比例している。

(3) 配合の種類と初期沈下量

高炉スラグ微粉末をセメントに60%まで混入した場合の初期沈下量は、フライアッシュを混入したものに比べて僅かながらやや大きい傾向を示しているが、顕著な差異は見られない。

フライアッシュをセメントに60%まで混入しても、普

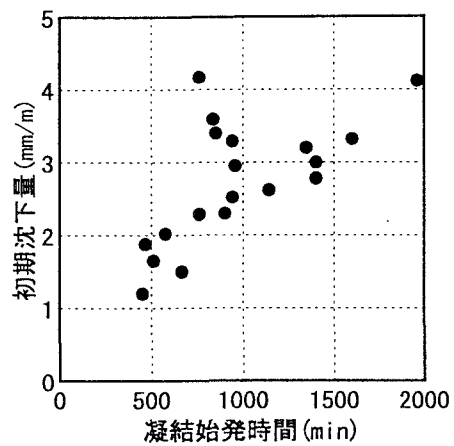


図-4 凝結始発時間と初期沈下量の関係

通ポルトランドセメント単味による場合とほぼ同程度の初期沈下量であり、フライアッシュの混入が初期沈下量に及ぼす影響は認められない。また、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混入率と初期沈下量との間にも明確な関係は認められない。石灰石微粉末を混入した併用系高流動コンクリートにおいて、石灰石微粉末混入率の影響について見ると、混入率30%の方が同15%に比べて初期沈下量は約1/2となっており、本実験の範囲では石灰石微粉末の混入は初期沈下量の低減に有効であると判断できる。

セメントに普通ポルトランドセメントのみを使用した高流動コンクリートの場合に比べて、低熱ビーライト系セメントや三成分系セメントを単味で用いた場合、初期沈下量は大きくなっており、セメントの種類により初期沈下量も異なるものであった。

高性能A/E減水剤に遅延型と標準型を用いた場合を比較すると、いずれの結果においても凝結始発時間の短い標準型を用いた方が、初期沈下量は小さい結果となった。このことから、初期沈下量の大きさは凝結によりセメント硬化体の骨格が形成されるまでの時間に大きく左右されることが判る。

高性能A/E減水剤に標準型を用いた増粘剤系について見ると、増粘剤にアクリル系を用いたものでは、セルロース系を用いたものに比べて初期沈下量は約1.5倍となり、増粘剤の種類によっても沈下性状は異なるものであった。

(4) 凝結時間およびブリーディングと初期沈下量

図-4には、凝結始発時間と試料高さ1mについての初期沈下量との関係を示す。同図より、凝結始発時間が遅いほど初期沈下量も大きい傾向にあり、初期沈下量は凝結特性に大きく影響されることが判る。

ブリーディングの発生は、粉体系では打設から2~3時間、増粘剤系は16時間、併用系は4時間経過後であったが、沈下はそれよりはるかに以前の打設直後から大きく生じている。また、ブリーディングの終了時間は凝結始発時間とほぼ等しかったが、その時点では初期の大きな

表-4 加圧充てん試験結果

配合 No.	記号	上蓋下面の間隙量 (mm)			
		加圧高さ (m)			
		0.00	0.25	0.50	1.00
2	B60R	2.30	1.23	0.47	0.08
3	B60S	1.65	0.61	0.07	0.00
6	F40R	2.62	2.22	1.52	0.15
7	F40S	2.02	0.52	0.00	0.00
9	HBR	3.00	0.19	0.00	0.00
11	OPR	2.95	1.65	0.40	0.00
12	OPS	1.88	0.05	0.00	0.00
13	VCR	3.20	1.56	0.99	0.10
14	VCS	2.29	0.23	0.00	0.00
15	VCAR	4.12	1.47	1.15	0.14
16	VAS	3.59	0.58	0.05	0.00
17	LS30R	1.50	1.23	0.21	0.03
18	LS30S	1.20	0.26	0.05	0.04
19	LS15R	3.29	0.39	0.06	0.00

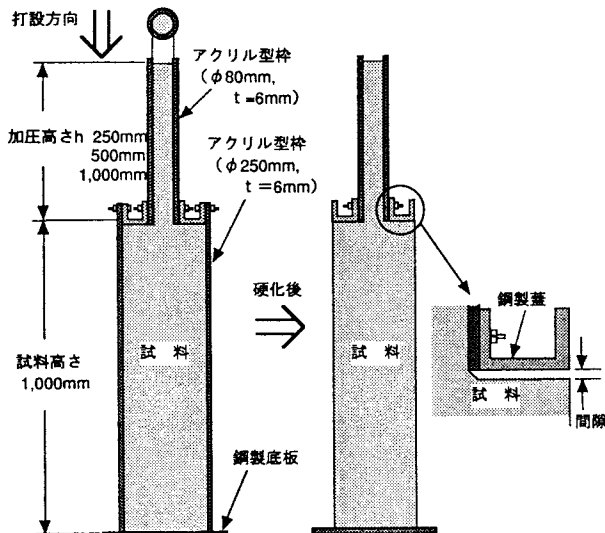


図-5 加圧充てん試験装置

沈下はすでに終了している。このことから、初期材齢での大きな沈下の発生は、ブリーディングのみによって引き起こされるものではなく、ブリーディングの影響は小さいと考えられる。

3. 加圧打設工法の効果に関する研究

3.1 実験内容

(1) 高流動コンクリートの種類と配合

対象とした高流動コンクリートは、表-2に示す全19配合のうち、粉体系7配合（B60R, B60S, F40R, F40S, HBR, OPR, OPS）、増粘剤系および併用系高流動コンクリートについては同表に示す7配合の計14配合である。

(2) 試験装置

図-5に試験装置を示す。直径250mm×高さ1.0mの円筒形アクリル型枠に鋼製の上蓋を取り付け、さらにその上蓋の中央開口部には直径80mmの円筒形アクリル型枠を取り付けた（開口率約10%に相当）。ここで提案する加圧法とは、このアクリル円筒中に打設されたコンクリートの自重によってコンクリートに継続的に圧力を加えるという打設法である。上載圧（加圧）の影響を調べるために、加圧高さを3種類（0.25m, 0.5m, 1.0m）としたが、それに応じて直径80mmの円筒形アクリル型枠も3種類用意した。充填装置の型枠内面には剥離材を塗布して摩擦の低減を図り、打設の際には打設口のアクリル型枠からフレキシブルホースを挿入して試料を流し込んだ。コンクリートの硬化後、側面の型枠だけを取り外し、上蓋下面とコンクリートとの間隙をすきまゲージで測定した。

3.2 実験結果および考察

(1) 加圧高さと間隙量

加圧高さを変えた時の上蓋下面での間隙量の測定結果

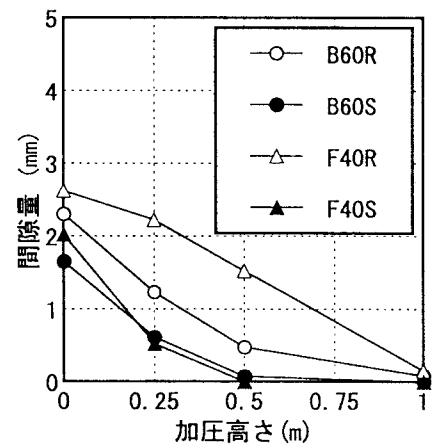


図-6 加圧高さと間隙量の関係

を表-4に、その関係を図化したものの一例を図-6に示す。ここでの加圧高さ0mの間隙量とは、別途得られた試料高さ1.0mにおける天端での初期沈下量を用いている。いずれの結果を見ても加圧高さが大きいほど、上蓋下面での間隙量は小さくなっており、加圧高さ0mの場合と比較しても、大幅に小さくなっている。しかし、加圧高さの増加に伴う間隙量の減少のしかたは高流動コンクリートの種類により異なる。いずれの配合でも加圧高さを高くすることは、間隙量の低減に効果的であり、今回用いた配合では加圧高さh=0.5mでもかなりの効果があり、h=1.0mでは、ほとんど間隙は見られなくなった。

(2) 配合の種類と間隙量

高炉スラグ微粉末を混合したものでは、加圧高さh=0.25mでも間隙量は大きく減少しており、加圧高さh=1.0mでは、間隙はほとんど0に近い。高炉スラグ微粉末混入の場合の加圧高さhと間隙量の関係は普通ポルトランドセメント単味で用いた場合とほぼ同じであり、この工法を用いた場合、高炉スラグ微粉末の混入による影響は少ないと言える。フライアッシュを混入したもので

は、加圧高さ h の増加に対して間隙量はほぼ直線的に減少し、遅延型高性能 AE 減水剤を用いたものでは、高炉スラグ微粉末を混入したものや普通ポルトランドセメントを単味で用いたものに比べて、加圧高さ $h=0.5\text{m}$ までの間隙量の減少率は小さいものになっている。しかし、加圧高さ $h=1.0\text{m}$ では同じように間隙はほぼ 0 に近いものとなった。

低熱ビーライト系セメント単味によるものは、普通ポルトランドセメント単味によるものと比較して間隙量は小さく、特に加圧高さ $h=0.25\text{m}$ で急激に間隙量は減少している。

高性能 AE 減水剤に遅延型と標準型を使用した場合を比較すると、いずれの結果においても凝結始発時間のより短い標準型を用いた方が、間隙量は小さい結果となった。

セルローズ系増粘剤とアクリル系増粘剤を使用したものとは、いずれも加圧高さ $h=0.25\text{m}$ で急激に間隙量が減少しており、加圧の効果が生じやすいと言える。また、収縮低減剤の有無についてその差は見られず、収縮低減剤はこのような間隙の抑制には効果のないものと判断される。

4. サンドイッチ構造の充てんシミュレーション

4. 1 シミュレーション手法

サンドイッチ構造へのコンクリートの充てん性を数値解析により予想できれば、工事の省力化や品質向上のための技術開発に大いに役立つと考えられる。現在、フレッシュコンクリートの流動解析手法としては、コンクリートを連続体として取扱うもの^{1), 2), 3)}と、非連続体として取扱うもの^{4), 5)}とに大別される。

大変形を伴う高流動コンクリートの流動解析手法としては、コンクリートを非連続体として扱う個別要素法も有望な手法と考えられる。ここでは、サンドイッチ構造内部に高流動コンクリートを充てんするケースについて、個別要素法の適用を試みた。個別要素法は、1971年に Cundall が岩盤の崩壊問題に適用したのが最初である。この手法においては、要素どうしの接触点のみを通じて力の伝達が行われるものとし、ひとつひとつの要素に対して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。そして物質の線形、非線形は要素間に弾性バネから成る線形接触要素、滑り要素、接触付着要素を想定することで表現される。ただし、全要素に対して運動方程式をたて、これを連立して直接解くのは実際上困難であるので、時間領域で差分近似（陽解法に基づく中心差分法）することにより数値解析で各要素の挙動を追跡する。この場合の要素の速度および角速度は以下の式（1）と式（2）で表される。

表-5 パラメータスタディにより同定した定数

解析定数	同定値あるいは設定値
バネ定数	$K_n, K_s=1000\text{ (N/mm)}$
付着力	$b_n=0.11\text{ (N)}$
	$b_s=0.08\text{ (N)}$
摩擦係数	$\mu=0.01$
減衰定数	$\alpha=0.9$

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left\{ \frac{\sum F_i^{(t)}}{m} + g_i \right\} \Delta t \quad \text{式 (1)}$$

$$\dot{\theta}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{\theta}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left\{ \frac{\sum M_i^{(t)}}{I} \right\} \Delta t \quad \text{式 (2)}$$

ここに、 $\dot{u}_i$ ：要素重心の速度、 m ：要素質量、 $\dot{\theta}_i$ ：要素重心の角速度、 $\sum F_i$ ：要素重心に作用する力、 Δt ：時間刻み、 g_i ：重力加速度、 $\sum M_i$ ：要素重心に作用するモーメント、 I ：要素の慣性モーメント

また、要素の位置と回転角は次式で表わされる。

$$x_i^{(t+\Delta t/2)} = x_i^{(t)} + \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} \cdot \Delta t \quad \text{式 (3)}$$

$$\theta_i^{(t+\Delta t/2)} = \theta_i^{(t)} + \dot{\theta}_i^{(t-\Delta t/2)} \cdot \Delta t \quad \text{式 (4)}$$

ここに、 x_i ：要素重心の位置、 θ_i ：要素重心の回転角

なお、ここでは全ての要素は粗骨材の平均粒径である 13mm の直径を有する円形要素とし、計算は市販の個別要素法プログラム（米国製）と CPU のクロック周波数が 200MHz のパソコンを使用した。

4. 2 シミュレーション結果

サンドイッチ構造への充てんシミュレーションを行う際には、要素間のバネ定数（法線および接線方向）、付着力、摩擦係数、減衰定数を設定する必要があるが、これらの値を設定する方法として、ここでは実際のスランプフロー試験で得られたフロー値（650mm）、500mm フロー到達時間（5 秒）と近くなるよう、パラメータスタディを行った。この繰返し計算により同定した値を表-5 に示す。また、スランプフロー試験の最終シミュレーション結果を図-7 に示す。

サンドイッチ構造への充てんシミュレーションモデルを図-8 に示すが、計算ステップ数に対するプログラム上の制約を考慮して、計算可能なモデルサイズを設定した。ただし、充てんされるコンクリートと鋼板との一体化を図るための L 型補剛材のサイズは実構造で一般に用いられる程度の大きさ（L-100×100）とし、L 型補剛材の向きを 2 通りとした。要素の充てん方法としては、容

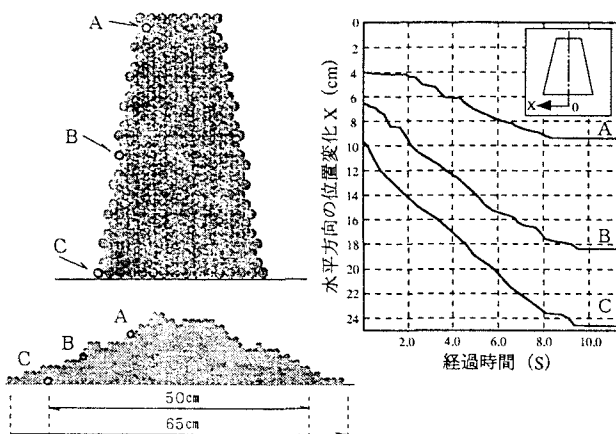


図-7 スランプフロー試験の流動シミュレーション

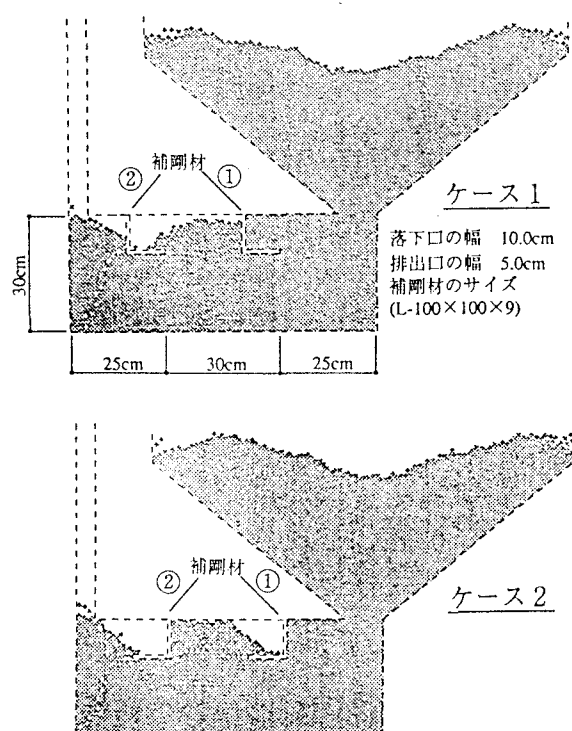


図-8 充てんモデルと解析結果

器上部にホッパーを取り付け、ホッパー内に溜めた全要素に落下高さ50cmに相当する下向きを与えて、容器内に充てんする方法を採った。

計算ではL型補剛材の向きがいずれの場合でも、最終的に容器内部は全て充てんされる結果となったが、計算途中において、どの位置に空隙ができやすいかといった評価は可能であると考えられる。

計算途中で得られた結果を図-8に示すが、これよりL型補剛材の向きが異なると、充てん状況も異なることが予想される。L型補剛材が充てん口側を向いた場合には、充てん口から遠い方のL形材では前面側だけでなく

背面側でも空隙ができやすいと考えられる。L形材が充てん口と反対側を向いた場合には、両方のL形材において背面側に空隙のできやすいことが推察される。なお、このシミュレーションに用いた要素数は3620個、計算時間は約11時間であった。

5. まとめ

(1) 高流動コンクリートの沈下は、コンクリートの打設直後から生じ、凝結始発までの初期において急激に増加する。凝結の進行とともにその増加率は減少していき、凝結始発以降において沈下はわずかつつ増加するものの、その増加率は非常に小さいものとなる。

(2) 本実験で取り扱ったコンクリート試料の高さが2m以下の範囲においては、初期沈下量と試料高さはほぼ比例する。

(3) コンクリートのブリーディングが発生する時点では、すでに沈下は生じており、ブリーディングが終了した時点では、初期の急激な沈下増加も終えている。これより、コンクリートの初期沈下に及ぼすブリーディングの影響は小さいものと考えられる。

(4) 初期沈下量の大きさは、高流動コンクリートの種類によって異なり、凝結性状に大きく左右される。凝結の早い配合ほど、初期沈下量は小さくなることが判明した。

(5) 加圧により上蓋とコンクリートとの間の間隙は減少し、加圧高さが大きくなるに従い、発生する間隙の量は小さくなっており、加圧充てん工法は間隙を抑制するのに有効であることが判明した。

(6) 個別要素法をサンドイッチ構造への充てんシミュレーションに適用したが、高流動コンクリートの流動解析の手法として有望な手法であると考えられる。ただし、解析で用いる定数とコンクリートのレオロジー定数との関係について理論的説明が今後さらに必要であろう。

参考文献

- 1) Y. Tanigawa and H. Mori: Analytical Study on Deformation of Fresh Concrete, Journal of Engineering Mechanics, Proceedings of ASCE, vol. 115, No. 3, pp. 493-508, 1989.
- 2) 谷川恭雄, 森 博嗣, 野田 豊: フレッシュコンクリートのポンプ圧送に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告書, vol. 14, No. 1, pp. 421-426, 1992.
- 3) 小谷, 神田: フレッシュコンクリートの流動解析, フジタ工業技術研究所報, vol. 21, pp. 103-108, 1985.
- 4) 谷川恭雄他: サスペンション要素法によるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション方法, 材料, vol. 38, No. 431, pp. 26-31, 1989. 8
- 5) 木山, 藤村, 二木: 粒状体地盤の離散剛要素法解析と模型実験, 材料, vol. 35, No. 392, pp. 30-40, 1994. 12