

(32) コンクリート充てん鋼管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 concrete filled tube

大村 隆一郎*, 内藤 英晴**, 三浦 尚***

Ryuichiro Ohmura, Hideharu Naito, Takashi Miura

** 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)

* 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)

*** 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 construction of concrete filled tube (CFT) and immersed tunnel which is sandwich system structure has increased.

In these steel-concrete composite structures, the self-compacting concrete is often used to improve the filling ability.

In this report, about the concrete filled tube which has the diaphragm, we examined the influence which the difference of mixing of self-compacting concrete and difference of the rate of the opening of the diaphragm gave to the filling.

In addition, we attempted the application of Distinct Element Method (DEM) as a technique to simulate the filling of self-compacting concrete

Key Words : self-compacting concrete, steel-concrete composite structure, concrete filled tube, initial subsidence, gap, Distinct Element Method

1. まえがき

近年, サンドイッチ構造の沈埋トンネルやコンクリート充てん鋼管柱(CFT)の施工が増えてきている。これらの鋼・コンクリート複合構造においては, 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, ダイアフラムを有する鋼管構造を対象として, 高流動コンクリートの配合の違いやダイアフラムの開口率の違いが充てん性に及ぼす影響について検討を行ったものである。さらに, 流動性に優れた高流動コンクリートの充てん状況を解析的にシミュレートする手法をして, 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. 中間ダイアフラムを有する部材の充てん性に関する研究

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
	低熱型ポルトランドセメント(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AE減水剤(SP1)	ポリカルボキシ酸エステル系と架橋 ポリマーの複合体(遅延型)
	高性能AE減水剤(SP2)	ポリカルボキシ酸エステル系と架橋 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)	水溶性アルキルオキシ付加物

※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		OPR		30.0	〃	〃	181	603				〃	〃	1.35		
12		OPS		30.0	〃	〃	181	603				〃	〃	1.60 ^{*1}		
13	増粘剤系	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、その他はセルローズ系（Va1）を使用

（2）高流動コンクリートの種類と配合

本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±50mm、V75漏斗流下時間が10±5秒、空気量が4.5±1.5%の品質を満足するように混和剤の使用量を決定した。単位粗骨材容積はいずれの配合においても280リットル/m³の一定とし、粗骨材量の違いが充てん性に及ぼす影響を取り除くこととした。

（3）間隙量測定装置

図-1に試験装置を示す。試験容器としては透明のアクリル型枠（内径250mm）を用いて、コンクリート試料が隅々まで充てんされていることを確認できるようにした。コンクリート試料高さは200cmとした。試験容器の中間（下端から100cmの位置）には、厚さ5mmの鋼製ダイヤフラムを取り付けた。ダイヤフラム開口部の形状は、ダイヤフラム下面の間隙発生にともなって発生すると予想される側面のクラックをアクリル型枠上から観察できるように矩形とし、開口率は20%、40%、60%の3水準とした。なお、ダイヤフラム上面に作用するコンクリート重量によりダイヤフラムが移動しないよう、ダイヤフラムをアクリル型枠に取り付けるだけでなく、試験装置の鋼製底板から立ち上げた支持ボルトにもナットで固定した。コンクリートの充てんには、フレキシブルホースを用いて容器の下端からコンクリートの自重を利用して圧入した。コンクリート硬化後、ダイヤフラムが動かないように注意しながら側面の型枠だけを取り外し、ダイヤフラム下面の間隙の大きさをすきまゲージで測定した。また、試料上端における沈下量も併せて測定した。打設したコ

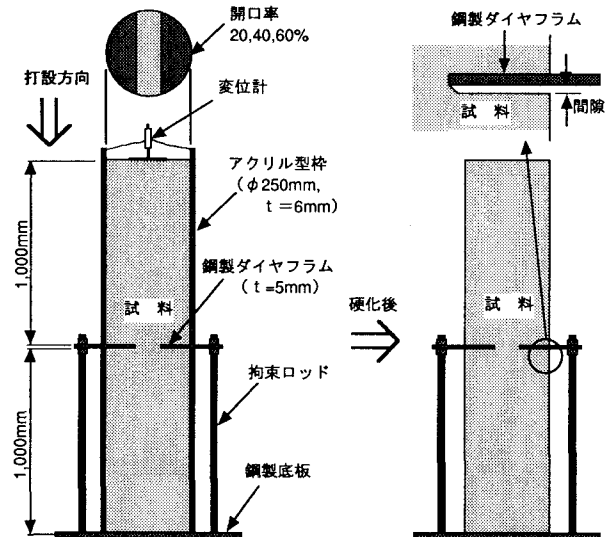


図-1 間隙量測定装置

ンクリートと同一の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。本試験は室温20℃、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）ダイヤフラム開口率と初期沈下量および間隙量

表-3に実験結果一覧を示す。図-2, 3, 4にはダイヤフラムの開口率と試料上端（試料下端から200cmの位置）における沈下量との関係の一例を示す。開口率100%の場合（ダイヤフラム無し）と比較すると、ダイヤフラムが介在することにより上面の沈下量は小さくなった。また、ダイヤフラムの開口率が大きくなるに従い、沈下

表-3 開口率と初期沈下量の関係

配合 No.	記号	試料天端の初期沈下量 (mm)				間隙量(mm)			
		ダイヤフラム開口率 (%)							
		0	20	40	60	100	20	40	60
1	B40R	3.40	3.13	3.36	3.73	6.80	0.65	0.85	0.92
2	B60R	2.30	3.57	3.43	3.89	5.81	1.03	0.28	0.17
3	B60S	1.65	1.38	1.63	1.81	2.92	0.23	0.14	0.00
4	B60R	4.17	4.98	5.01	6.15	8.00	0.79	0.72	0.64
5	F20R	2.52	4.45	4.29	4.69	7.44	0.42	0.18	0.00
6	F40R	2.62	5.13	5.22	4.74	4.52	1.81	0.57	0.00
7	F40S	2.02	4.02	4.77	4.05	3.88	0.17	0.07	0.00
8	F60R	2.78	5.20	6.28	6.37	6.60	2.21	1.28	0.00
9	HBR	3.00	2.44	2.52	3.17	9.77	0.89	0.00	0.00
10	LHR	3.32	5.26	4.32	4.41	9.04	2.35	0.23	0.11
11	OPR	2.95	4.50	4.22	5.13	6.24	0.68	0.00	0.00
12	OPS	1.88	2.34	2.54	2.54	3.38	0.00	0.00	0.00
13	VCR	3.20	4.87	5.21	6.02	8.00	1.95	1.46	0.55
14	VCS	2.29	2.81	2.74	2.86	4.34	0.91	0.00	0.00
15	VCAR	4.12	5.62	6.07	6.22	6.50	1.39	1.28	0.52
16	VAS	3.59	4.67	5.23	5.41	6.49	0.00	0.00	0.00
17	LS30R	1.50	2.77	2.62	3.13	3.50	0.29	0.00	0.00
18	LS30S	1.20	1.33	1.53	1.71	1.68	0.14	0.00	0.00
19	LS15R	3.29	4.15	4.33	4.49	6.91	0.00	0.00	0.00

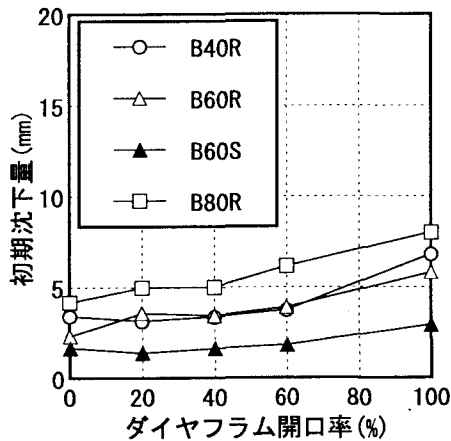


図-2 開口率と初期沈下量の関係 (粉体系)

量は大きくなっており、ダイヤフラムの存在がコンクリートの沈下を抑制していることが認められる。開口率が60%程度と大きくなっても、沈下を抑制する効果はかなりあると考えられる。

図-5, 6, 7にはダイヤフラムの開口率と、ダイヤフラム下面に生じる間隙量との関係の一例を示す。ここで開口率0%の場合にはダイヤフラムにより上下のコンクリートが不連続となり、ダイヤフラム下方のコンクリートの沈下量だけダイヤフラム下面に間隙が生じると考えられる。そこで開口率0%の間隙量としては、別途実施の沈下量試験で得られた試料高さ1.0mでの沈下量を用いた。全体的に見て開口率が大きくなるに従って、間隙量は小さくなる傾向にある。開口率が60%の場合には、開口率が0%の値と比較して、大幅に小さくなっている。間隙量の大きさは、ダイヤフラムの存在とその開口率に大きく影響されることが判る。

(2) 配合の種類と間隙量

高炉スラグ微粉末を混入したものでは、混入率が大きくなると、試料上端での初期沈下量は大きくなるが、ダ

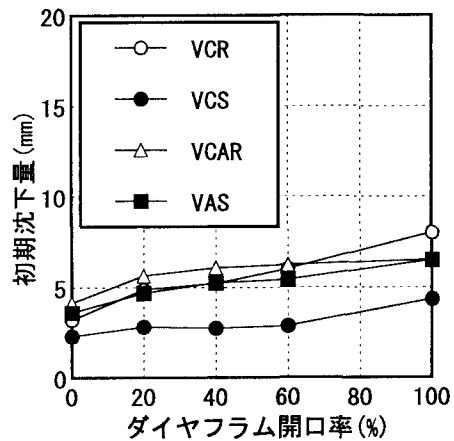


図-3 開口率と初期沈下量の関係 (増粘剤系)

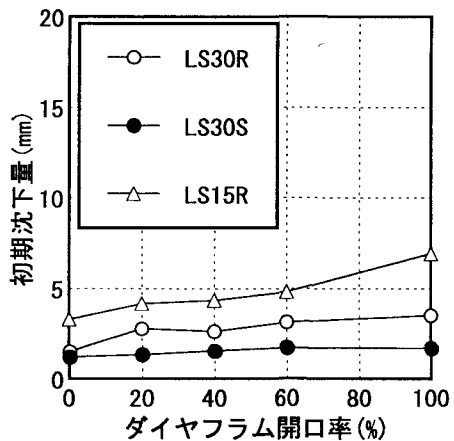


図-4 開口率と初期沈下量の関係 (併用系)

イヤフラム下面の間隙量は開口率および混入率の違いによる差は認められず、いずれもほぼ1 mm以下であった。一方、フライアッシュを混入したものでは、混入率の増加に伴い凝結始発時刻が遅れることによる影響と考えられる。しかし、開口率が60%の場合には、混入率によらず間隙量はほぼ0となった。また、石灰石微粉末を混入した併用系高流動コンクリートについて見ると、石灰石微粉末の置換率の違いによる間隙量の差異は明確でないが、いずれの開口率に対しても間隙量は小さくなっている。この原因としては、石灰石微粉末を混入すると凝結が早くなり、凝結が早まるとセメント硬化体の骨格形成も早まり、水和収縮に起因する沈下変形はより小さくなるからであると考えられる。図-8に凝結始発時間と開口率20%のダイヤフラム下面での間隙量との関係を示すが、凝結の早いものほど間隙量は小さくなっている。

高性能AE減水剤に遅延型と標準型を使用した場合について比較すると、いずれの配合においても凝結始発時間の短い標準型を用いた方が、間隙量は小さくなる結果

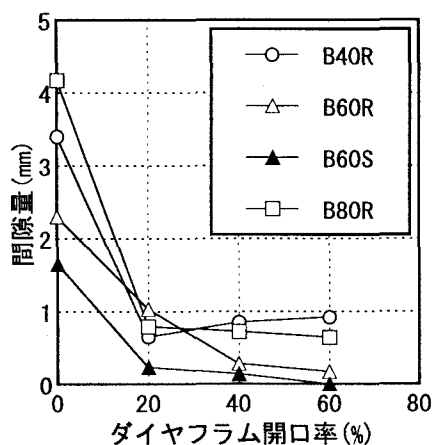


図-5 開口率と間隙量の関係（粉体系）

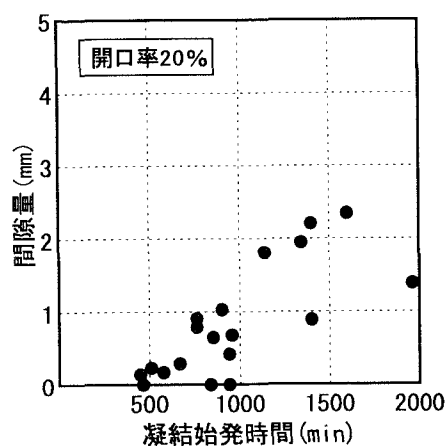


図-8 凝結始発時間と間隙量の関係

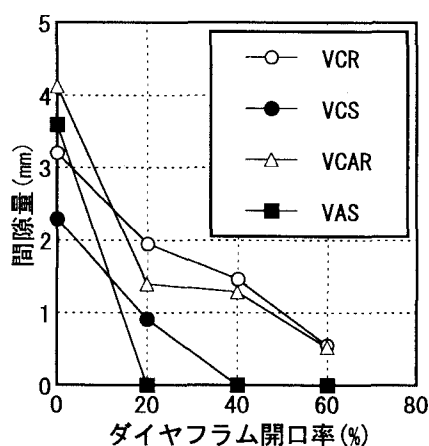


図-6 開口率と間隙量の関係（増粘剤系）

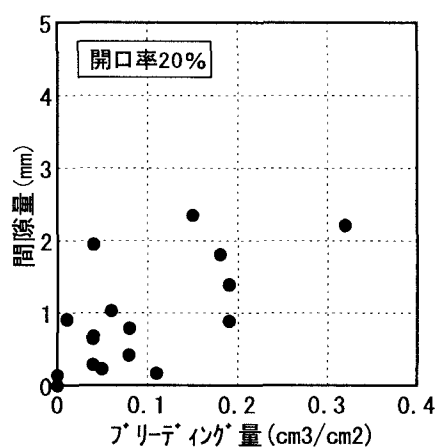


図-9 ブリーディング量と間隙量の関係

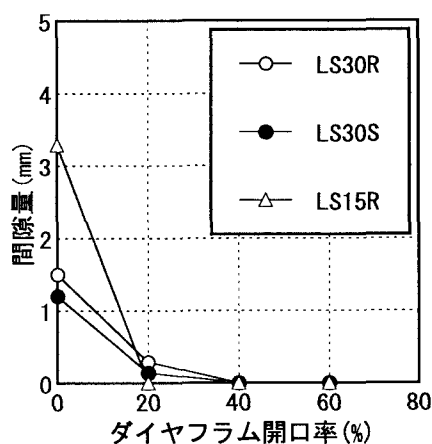


図-7 開口率と間隙量の関係（併用系）

となった。標準型の高性能AE減水剤を使用することは間隙発生抑制には有効であると言える。また、このことより初期沈下と同様に、間隙の大きさは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。

同じく増粘剤系高流動コンクリートについて、収縮低

減剤を併用した場合としない場合とを比較すると、初期沈下量と間隙量については収縮低減剤を用いることによる差は認められない。コンクリートの硬化開始までにはほぼ決定される間隙発生に対しては、収縮低減剤はほとんど効果がないものと考えられる。

(3) ブリーディング量と間隙量

図-9には、ブリーディング量と開口率20%のダイヤフラム下面の間隙量との関係を示す。ブリーディング量が多い配合ほど、間隙量も大きくなる傾向が若干見えるが、間隙におよぼす影響は凝結性状など他の要素の方がより大きいことがわかる。さらに、ブリーディングの影響は開口率が小さいほど顕著であった。ダイヤフラムの開口率が小さいと、ダイヤフラム下面にブリーディング水が溜まりやすいことと、コンクリートの流動変形が阻害され間隙を埋めようとする作用が小さくなるために、間隙量にブリーディングの影響が出やすくなると考えられる。しかし、開口率が大きくなるに従い、コンクリートは変形しやすいために間隙は小さくなり、またダイヤフラム下面にとどまるブリーディング水も少なくなると考えられる。その結果、開口率が大きいとブリーディングによる影響は小さくなり、ブリーディングと間隙量と

H=25cm W=5cm , H=25cm W=10cm , H=25cm W=15cm

H=50cm W=5cm , H=50cm W=10cm , H=50cm W=15cm

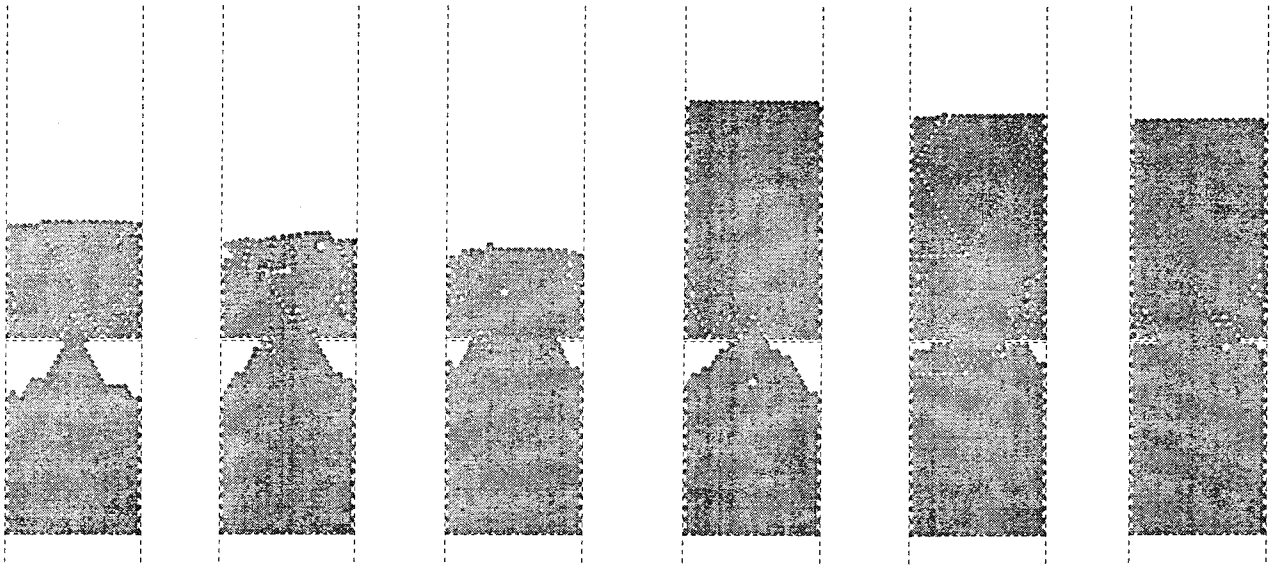


図-11 シミュレーションによる最終形状

の相関は低くなるものと考えられる。

3. 充てんシミュレーション

3. 1 シミュレーション手法

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。そこで、ここでは中間ダイヤフラムを有する部材への高流動コンクリートの充てん状況に対して、個別要素法による数値シミュレーションを適用することとした。

個別要素法においては、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（陽解法による中心差分法）。なお、ここでは全ての要素は粗骨材の平均粒径に近い12.5mm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。

3. 2 シミュレーションモデル

中間ダイヤフラムを有する鋼管構造への充てんシミュレーションモデルを図-10に示す（なお、要素の数と大きさは実際とは異なる）。ここでは充てん後のコンクリートの沈下変形に対してダイヤフラムの影響を見ることを目的として、ダイヤフラム近傍を取り出してモデル化を行った。そして、容器内に全要素がパッキングされた状

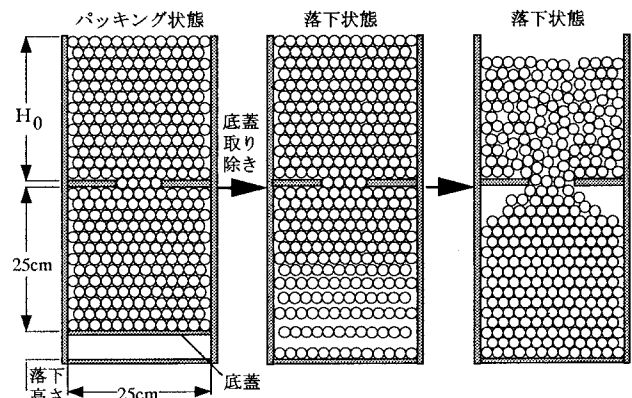


図-10 シミュレーションモデル

態で、底蓋を取り除くことにより、要素を落下させることとした。なお、解析ケースとしては、ダイヤフラムの開口幅Wが5cm（開口率20%）、10cm（同40%）、15cm（同60%）の3ケース、ダイヤフラムより上方のコンクリート高さHが25cmと50cmの2ケースの計6ケースとした。

充てんシミュレーションを行う際には、法線および接線方向における要素間のバネ定数と付着力、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）と計算値とが近くなるよう、各値を種々変化させるパラメータスタディにより決定した。

3. 3 シミュレーション結果

6ケースについてのシミュレーションの最終形状を図

ー11に示す。これより、ダイヤフラム上方のコンクリート（要素）高さが大きい方が、ダイヤフラム下面への充てん性も向上することが見てとれる。また、開口幅が小さいほど、ダイヤフラムによる流動性が阻害され、ダイヤフラム下面への要素の充てん性が悪くなる様子が見られる。実験においても同様の結果が得られており、個別要素法によるシミュレーションでも実験での状況を定性的に表わすことができたと言える。

4. まとめ

(1) ダイヤフラムが介在する場合のコンクリート上端での沈下量は、ダイヤフラムのない場合よりも小さく、開口率が小さくなるにしたがい沈下量は小さくなった。これより、ダイヤフラムの介在は、充てんされたコンクリートの沈下を小さくする効果があると言える。しかしその反面、ダイヤフラムの開口率が小さくなるに従って、ダイヤフラム下面の間隙量は大きくなる傾向が認められた。

(2) ダイヤフラム下面に生じる間隙の大きさは、ダイヤフラムの開口率の他に、充てんされるコンクリートの種類、配合によっても相異なり、その大きさは凝結が早いと小さくなる。

(3) ダイヤフラム下面の間隙量はコンクリートの沈下特性に大きく影響を受け、試料高さが大きくなると沈下量も大きくなる。本実験でのダイヤフラム下方の試料高さは1.0mであったが、実際のCFT構造ではダイヤフラム下

方のコンクリート高さは本実験よりさらに大きくなり、配合やダイヤフラム開口率等によっては鋼管の局部座屈に対して耐力を低下させる程の間隙となることも予想される。したがって、このような場合には発生する間隙量を確認するとともに、間隙が耐力低下に及ぼす影響の確認、あるいは間隙内への補修材の注入等が必要となる。

(4) 中間ダイヤフラムを有する部材への高流動コンクリートの充てん性について、個別要素法による流動解析の適用を試みた。その結果、実験結果を定性的に表現することができ、高流動コンクリートの流動解析の手法として個別要素法は有望な手法と考えられる。

参考文献

- 1) Y. Tanigawa and H. Mori: Analitical 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