

論文 袋式静水圧载荷試験機の開発とモルタル製ゲートへの適用

松尾 栄治*1・川崎 秀明*2

要旨：全国には膨大な数のゲートが供用されており、そのほぼ全てが鋼製ゲートである。現在、それらの多くは鋼材の腐食劣化が著しく更新期を迎えていることから、耐久性の高いセメント系材料への転換を図ることが望ましい。筆者らは、特に水密性の高い発泡スチロール骨材を用いた軽量モルタルに着目し、これを主材とした軽量モルタルゲートの開発を行っている。その過程において、室内において設計水圧を载荷するための試験装置を考案・作製し、実寸大のゲート供試体を用いた実証実験を行った。本稿では、その試験精度について明らかにするとともに、軽量モルタルゲートの適用性について検討した。

キーワード：発泡スチロール骨材, 軽量モルタル, ゲート, 静水圧

1. はじめに

循環型社会の構築が叫ばれる中、筆者の一人は発泡スチロール廃材を原料とした骨材（以下 EPS 骨材）を用いた軽量モルタル（以下 EPS モルタル）についての基礎研究を実施してきている^{1)~4)}。その中で、EPS モルタルの特長として、軽量性に対する強度が高いことや、断熱性や水密性が高いことなどを明らかにしており、その用途開発が期待されている。

一方、我が国には大小含めて膨大な数のゲートが供用されており、そのほぼ全てが鋼製である。これは鋼の材料的な剛性の高さを活用したものと推察されるが、現在はそれらの多くにおいて鋼材腐食が進行し更新期を迎えている。また、近年の地震や洪水など設計外力の増大によって扉体補強の必要性も高まっており、維持管理上の様々な問題が切迫していることから、耐久性の高いセメント系材料への転換を図ることが望ましい。なお、ゲートは扉体と称されることも多いが、ここでは同義である。

以上のような背景を鑑み、筆者らは鋼製ゲートに替わる EPS モルタルゲートの開発を実用化に近いレベルで実施した。その中では、実寸大の供試体に面的に水圧を载荷する実験を行うことが必須となるが、実際に設計水圧（=4.6m、後述）を作用させるためには極めて大がかりな試験装置が必要となる。室内で試験を実施するためには装置のコンパクト化が必須となるが、本研究では、特殊ゴムを介して载荷する方法によりこれを解決した。本稿では、実寸大のゲート供試体を作製し、それらに対し面的に水圧を载荷するための室内試験装置を開発したこと、およびその試験結果について報告するものである。

2. 静水圧载荷試験の概要

図-1 に载荷装置の概念を示す。鋼製タンクは平板状の6面体であり、そのうちの1面が膨張性の特殊ゴムと

なっている。この鋼製タンクに一般の上水道から注水を行うことにより、内部の水圧が上昇すると同時に特殊ゴムが膨張する。ここで、鋼製タンクの真横にゲート供試体を設置することで、特殊ゴムを介してゲートに水圧が作用する原理となっている。鋼製タンクの高さは1650mm であり、その高さまで満水になった後は、上面に接続した透明なホース内に水頭が移動する。その後はホース内で上昇する水頭高さをスケールで確認しながら注水载荷を行う。ホースを上方に延長するだけで任意の

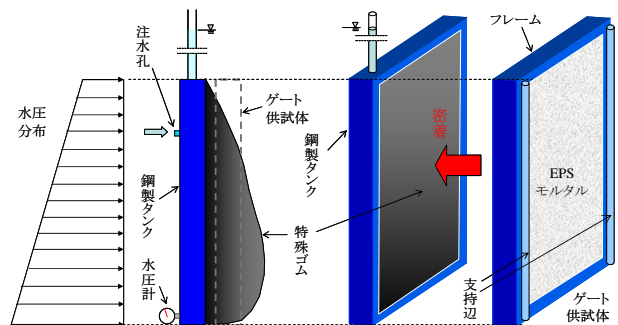


図-1 水圧载荷装置の概念

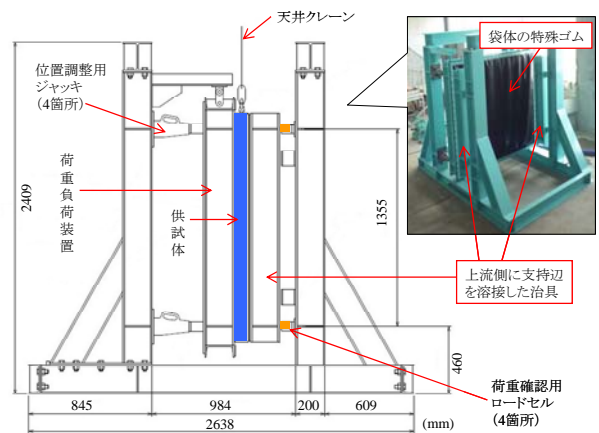


図-2 载荷装置の仕様

*1 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科 准教授 博(工) (正会員)

*2 (財) ダム技術センター ダム技術研究所首席研究員 博士(工) (正会員)

設計水圧を作用させることが可能であり、実験場所の省スペース化や節水効果が高い。なお、図-2に荷重装置の仕様を示すが、装置全体の寸法は幅 1910mm×長さ 2638mm×高さ 2409mm であり、主材質はSS400である。

仕様における重要な注意点として、ゲート供試体と鋼製タンクの相対位置は一定にする必要がある。両者は万力により強固に固定した。ゲート供試体は上から吊す状態で密着させ、荷重方向の支持条件は図-3のように左右の2辺支持とした。これは実構造物と同様に設定したものである。

3. EPS モルタルゲートの概要

3.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、練混ぜ水は上水道水を用いた。細骨材として用いた EPS 骨材は、ゴミとして回収された発泡スチロール廃材を洗浄・破碎し、遠赤外線減容処理を施して粒度調整したものである¹⁾。密度は 0.53g/cm³、粒径は 4mm 以下、実積率は 64.8%、粗粒率は 3.02、吸水率は 0%、骨材の損失質量百分率は 0.55% という物性を有する。

一部の供試体には材料的補強材としてビニロン短繊維（以下 VF）および高炉ヒューム（以下 BF）を混入した。VF は EPS モルタルに発生するひび割れ分散効果、靱性の改善、運搬時の耐衝撃性向上、供用時における流木などの衝突に対するひび割れ・剥離の低減効果を目的に混入した。直径は 660 μ m、標準長は 30mm、引張強度は 900MPa、切断伸度は 9.0%、ヤング率は 23GPa である。

BF は多機能特殊ボゾランとして位置付けられるものであり、製鉄所における小型溶鉱炉の炉頂から排出されるダストを集塵したものに、石膏などを添加した微粉末である。主成分は、SiO₂ (26.7%)、Al₂O₃ (13.5%)、CaO (18.1%) などであり、主な物理的性質は、密度が 2.60g/cm³、比表面積が 21,000cm²/g であり、強熱減量が 7.62% と大きい。EPS モルタルの水密性向上および乾燥収縮ひずみの低減を主目的に混入した。

3.2 配合およびゲートの仕様

ゲート供試体の寸法は縦 1650mm×横 1575mm であり、厚さは基準を 100mm とし、一部はパラメータとして 75mm とした。表-1に各ゲートの仕様一覧を示す。供試体記号の「G」は大学構内で作製したものであり、「K」はコンクリート二次製品工場で作製したものである。

「K」は表-2のようにモルタルの水セメント比を小さく設定した。これは振動モーター付きの型枠が使用可能であったためである。さらに蒸気養生を施しており、実際の製造ラインを想定している。なお蒸気養生では、打設 1.5 時間後から 3 時間まで 40℃・湿度 100% の環境にて養生した。

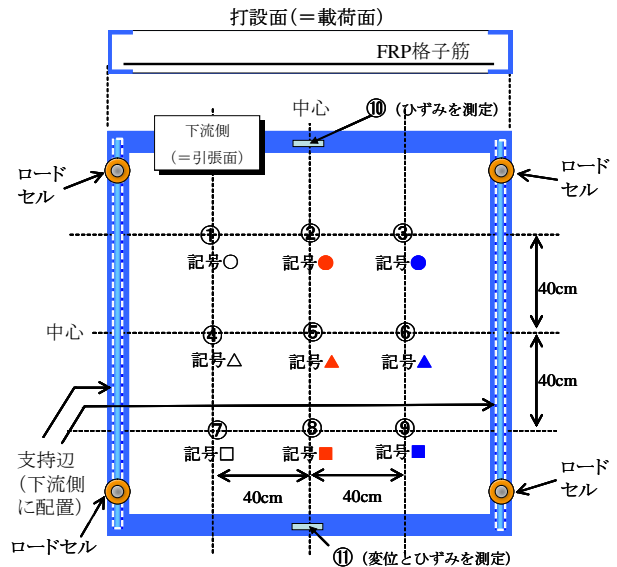


図-3 支持条件と変位測定位置

表-1 ゲートの仕様

供試体 No.	フレーム種類	厚さ (mm)	FRP格子筋ピッチ (mm)	VF 混入率 (%)	BF 混入率 (%)	AE 減水剤 (標準量)
G1	なし	100				○
G2	溝型鋼	100				
G3	溝型鋼	100		0.5		
G4	溝型鋼	100			20	
G5	溝型鋼	100	50			
G6	溝型鋼	100	50	0.5		
K1	溝型鋼	100				○
K2	溝型鋼	100	50			○
K3	溝型鋼	100		1.0		○
K4	溝型鋼	100		0.5		○
K5	溝型鋼	100	50	1.0(表層)		○
K6	溝型鋼	75				○
K7	溝型鋼	75	50			○
K8	溝型鋼	75		1.0		○
K9	溝型鋼	75		0.5		○
K10	溝型鋼	75	50	1.0(表層)		○

表-2 配合

供試体 No.	W/C (%)	EPS 混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	EPS	AE減水剤	BF	VF
G1	35	50	263	750	265	15	—	—
G2	40	50	279	698	265	—	—	—
G3	40	50	279	698	265	—	—	6.5
G4	40	50	279	698	265	—	115	—
G5	40	50	279	698	265	—	—	—
G6	40	50	279	698	265	—	—	6.5
K1	35	50	263	750	265	15	—	—
K2	35	50	263	750	265	15	—	—
K3	35	50	263	750	265	15	—	13.0
K4	35	50	263	750	265	15	—	6.5
K5	35	50	263	750	265	15	—	(13.0)
K6	35	50	263	750	265	15	—	—
K7	35	50	263	750	265	15	—	—
K8	35	50	263	750	265	15	—	13.0
K9	35	50	263	750	265	15	—	6.5
K10	35	50	263	750	265	15	—	(13.0)

ゲートは原則としてステンレス製（実験ではコスト削減のため鋼製）のフレーム構造を採用した。これは、打設時の型枠として使用できること、ゲート開閉時における戸当たり部の摩擦・磨耗・衝撃からの保護、複合構造化による剛性向上など、様々なメリットを有する。

また、一部の供試体には炭素繊維の連続繊維格子筋を引張補強材として用いた。格子のメッシュ間隔は 50mm とし、これを下流面にかぶり 10mm で配置した。格子筋の引張強度は 1,400N/mm²、引張ヤング係数は 100,000 N/mm²である。

フレーム鋼材の内側には剥離剤を塗布し、EPS モルタルとの付着を極力小さくした。これはフレームの拘束によって EPS モルタルに収縮ひび割れが発生するのを抑制するためである。K5 および K10 供試体は EPS モルタルを 2 層構造とした。これは VF 混入を下流の引張側表層のみに混入させることで材料コストの観点から経済性を考慮したものである。まず VF を混入しない EPS モルタルを打設し、直ちに VF を混入した EPS モルタルを表層 2cm 程度に打ち重ねた。すなわち、格子筋は VF の存在する表層部内に設置されることになる。

4. 実験方法

水圧の载荷は材齢 91 日前後とし、十分に強度発現していることを前提とした。すなわち、打設から養生までは保水性の高いマットを被せ、1 日 2 回程度の散水を施した。設計水圧は旧建設省の基準⁵⁾にしたがい 4.6m とした。これは小型水門を想定している。実験ではゼロから設計水圧までの往復 2 回の载荷を行い、コンクリート面（下流面）のひび割れ状況、全 9 点の変位を計測した。また 4 ヶ所にロードセルを設置して荷重の確認を行った（図-3 参照）。なお、ゲート構造の性能評価においては、最大変位や残留変位、ひび割れ進展などで議論をする方が、ひずみで議論するよりも整理がしやすい。ただし、安全係数（応力に対する圧縮・引張強度の余裕）を議論する場合は、ひずみに静弾性係数を乗じて応力を推定する以外に方法がないため、ひずみの計測が必要となる。

载荷速度は注水孔に接続した蛇口で制御し、原則として 2 往復の载荷で約 90 分の時間をかけた。特に载荷時に時間をかけ、下流面でのひび割れ観察を入念に行った。载荷後はひび割れが貫通しているか否かを確認した。

なお、上記の試験に先立ち、EPS モルタルの透水試験を行い水密性を評価した。配合は G シリーズおよび K シリーズのベース配合（BF、VF ともに無混入）を対象とした。供試体はφ10×20cm の円柱とし、材齢 28 日まで標準養生を施した後、円柱中央付近をダイヤモンドカッターにて 2 分割し、打設面と型枠底面に 0.245N/mm² の水圧を 7 日間（=604,800s）作用させた。

表-3 材料試験の結果

供試体 No.	強度(N/mm ²)					
	円柱圧縮	角柱圧縮	割裂引張	曲げ	2面せん断	ヤング係数
G1	19.2	25.4	2.67	4.45	9.93	6565
G2	16.3	22.6	1.79	3.79	8.10	6700
G3	19.8	25.0	2.61	2.97	9.24	6529
G4	21.6	26.8	1.95	3.11	9.64	6670
G5	17.8	25.3	1.71	4.39	9.04	5847
G6	16.6	24.9	1.79	4.70	10.22	5659
K1	17.9	27.3	1.04	4.34	9.98	6817
K2	17.8	23.9	1.62	4.33	9.71	6217
K3	20.6	31.5	2.81	6.92	12.42	6752
K4	15.1	26.0	1.81	4.93	10.28	6916
K5(表層)	16.9	28.1	2.07	6.32	10.81	6633
K5(内部)	15.6	23.7	1.56	4.18	9.46	6236
K6	16.0	27.5	1.33	4.35	9.87	6960
K7	15.7	23.0	1.39	4.45	8.97	5800
K8	18.8	29.1	2.19	6.58	11.83	6211
K9	17.4	26.0	1.65	5.00	10.39	6543
K10(表層)	17.8	25.5	2.25	5.70	9.88	6054
K10(内部)	17.2	25.3	1.82	5.44	9.96	6452

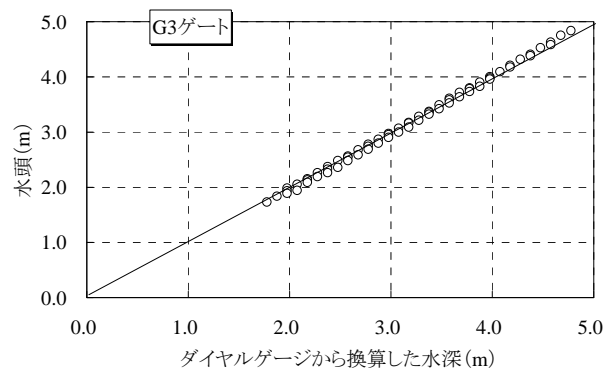


図-4 水圧から換算した水深と水頭の関係

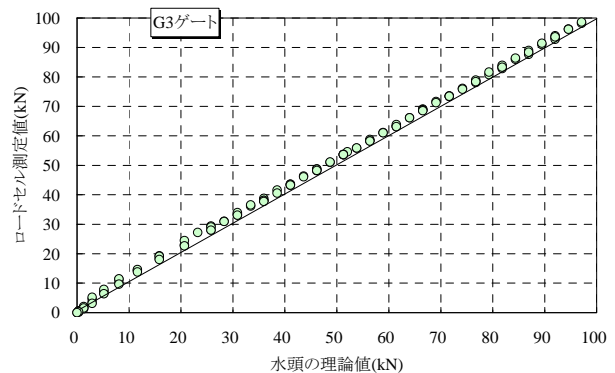


図-5 水頭の理論値とロードセル測定値の関係

5. 実験結果および考察

5.1 水圧载荷試験機の検証

水圧载荷試験と同日に実施した EPS モルタルの材料強度試験結果を表-3 に示す。G シリーズと K シリーズは水セメント比が異なるものの、強度に対する影響は小さく、50%で一定とした EPS 混入率が強度における支配要因となったと考えられる。図-4 に実際の水深と水頭(上

方に延ばした透明なホースで確認) の関係を示す。実際の水深とは、鋼製タンクの最下部付近に設置した水圧計の読みに「水圧計設置位置と鋼製タンク底面との差である 0.175m ぶんの水頭差」を加えたものであり、設計水圧 4.6m よりもそのぶん大きく加圧したこととなる。また、注入水がタンクを満たすまでは水圧計のみで測定を行い、ホースにまで水頭が上昇した時点から水頭のデータも得られることとなる。図より、両者はほぼ一致していることから、本試験機の載荷精度が高いことが確認できた。図-5 にロードセルの測定結果の一例を示す。水頭の理論値とは鉛直平板に作用する全静水圧を水理計算により求めた値であり、反力である 4 個のロードセルの合力と等しくなるはずである。この図からも設計通りの水圧が載荷できていることが確認できる。なお、全てのゲート供試体においても同様の精度が確認できた。

図-6 に水圧の載荷によってゲート供試体が破壊に至ったパターンの下流面を示す。この供試体 (G1) はフレーム構造ではなく、EPS モルタルのみを板状に成型したものである。FRP 格子筋やビニロン短繊維なども使用しておらず、基礎データを採取する目的で実施した。当然ながらひび割れ発生と同時に曲げ破壊した。

フレーム構造を有する供試体の代表例として図-7 に K3 供試体の結果を示す。これは載荷後の下流面の状況であるが、スケッチ用にひび割れを墨で太くして強調しており、実際のひび割れ幅は小さかった。上流面にはひび割れが発生していないことから、貫通ひびわれではないことも確認された。図-8 に貫通ひび割れが発生した例として、K9 供試体の試験後の上流面の状況を示す。これもひび割れを強調しているが、下流面と同様の「Y 字ひび割れが上下対称に発生し、それらがつながって X 字となるような形態のひび割れ」となっている。

5.2 ゲートの力学的評価

9 個の計測点の中で最も変位が大きく出る傾向にあるのは⑤番 (中段の中央) である。この変位計についてゲート間の比較を行った。剛性・残留変位に着目することでゲートの性能を確認できる。また、透水試験の結果はいずれも拡散係数として求められた。G シリーズの配合では、打設面側が $4.26 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{秒}$ 、型枠底面側が $3.52 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{秒}$ であった。K シリーズの配合では、打設面側が $3.52 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{秒}$ 、型枠底面側が $1.73 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{秒}$ であった。いずれの拡散係数も小さいと判断でき⁹⁾、材料的には水密性が高いことが確認できた。

表-4 にゲート載荷試験結果の一覧を示す。ここで可否の目安とは、ゲートとしての使用限界状態を判断する目安として計測が可能な項目を独自に設定した。すなわち、「①最大変位が 15mm 未満」、「②設計荷重 (4.6m 水頭) を 2 回載荷後でもひび割れが非貫通であること」、「③

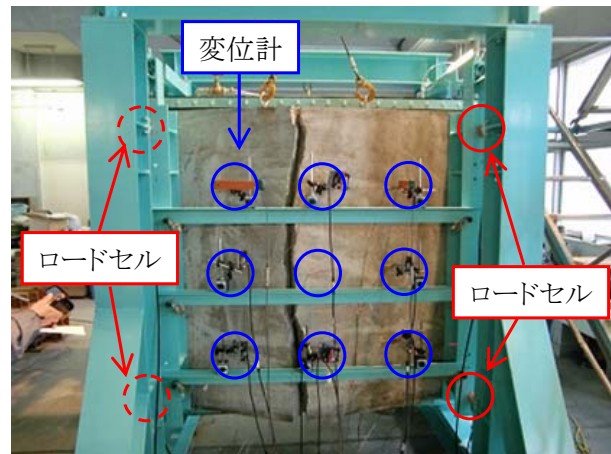


図-6 試験終了後のゲート供試体 (G1) の下流面

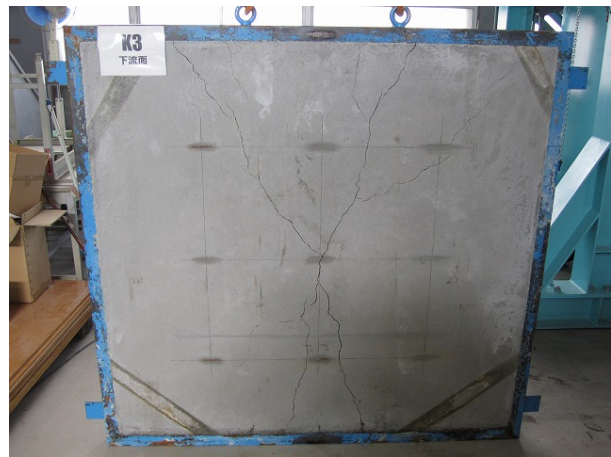


図-7 試験終了後のゲート供試体 (K3) の下流面



図-8 試験終了後のゲート供試体 (K9) の上流面

除荷後の残留ひび割れ幅が 0.2mm 以下であること」の 3 項目を総合的に評価して◎および○とした。中でも最大変形量が 10mm 以下と小さかったものを◎として区分している。なお、最大変位 15mm という条件については、今回のゲート寸法においてはたわみ度 1/100 に相当する。

表-4 ゲート試験の主な結果

供試体 No.	重量 (kg)	ひび割れ発生水頭 (m)	最大水頭 (m)	初載荷往路の最大変位 (mm)	貫通ひび割れの有無	可否の目安
G1	356.6	2.4	2.4	3.7	あり	×
G2	402.6	3.1	3.5	11.0	あり	×
G3	399.0	2.8	4.6	18.4	なし	○
G4	380.0	2.9	4.6	40.8	あり	×
G5	374.4	3.2	4.6	7.5	なし	◎
G6	388.2	3.0	4.6	5.3	なし	◎
K1	379.4	2.8	4.2	18.4	あり	×
K2	373.0	3.2	4.6	6.8	なし	◎
K3	387.2	3.5	4.6	8.9	なし	◎
K4	376.0	3.5	4.6	21.9	なし	○
K5	367.0	3.0	4.6	8.2	なし	◎
K6	278.6	2.0	2.8	75.2	あり	×
K7	282.2	2.4	4.6	22.1	なし	○
K8	284.8	2.4	4.6	73.5	あり	×
K9	279.0	2.3	3.2	63.7	あり	×
K10	273.0	1.2	4.6	22.3	なし	○

なお、鋼製ゲートを対象とした場合のたわみ度の許容値は 1/800 以下と規定されているが⁵⁾、材料によってはこれを緩和する事例が多く、新材料の場合は別途議論の余地がある。ここでは 1/200 を便宜的な閾値とみなした。

設計水頭よりも小さな水圧で使用限界状態を逸脱した場合は試験を打ち切り、その時の水頭を示した。

重量とはフレーム（100mm 厚では 60kg、75mm 厚では 44kg）および格子筋 2.5kg も込みの実測値であり、国交省標準タイプの鋼製ゲートの場合の 445kg と比較すべき値である。いずれも軽量化が図れていることが確認できるが、ゲートの場合は自重による閉門も行われるため、軽すぎる場合は問題となる。本研究では従来と比較して 20% 程度の軽量化を大凡の目安とした。

100mm 厚の場合は格子筋を設けた全てのケースと VF を 1% 混入したケースが上記の合格の目安に達した。これらのケースは繰り返し載荷時にも弾性域に十分に収まっており、初回残留変位は 2~3mm であり増大することもなかった。また、中央部の最大荷重時の変位は 7~8mm であったが、スパンが 1.5m であることから 1/200 のたわみ度に相当し、十分な剛性を発現している。

75mm 厚の場合は K7, K10 すなわち格子筋の入ったケースが一応の合格と考えられる。いずれもひび割れは非貫通であり、除荷後のひび割れ幅は 0.2mm 以下であった。これらのゲート供試体は繰り返し載荷時においても弾性域に収まっており、初回残留変位は約 6mm で増大することはなかった。ただし、K7, K10 ともに中央部の最大荷重時の変位は 22mm と大きく、これは 1/70 のたわみ度に相当する。

G3 ゲートおよび K4 ゲートについては可否の判断が難しいケースである。いずれも VF を混入しており、ひび割れの貫通は確認できなかったが、除荷後のひび割れ幅

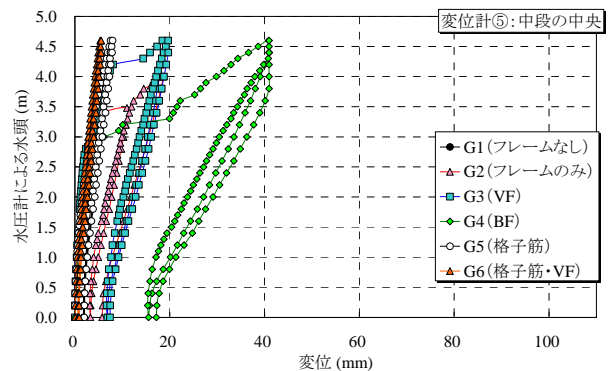


図-9 水頭と中央部の変位の関係 (Gシリーズ)

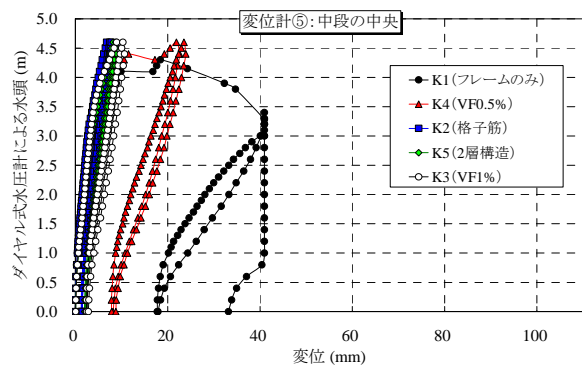


図-10 水頭と中央部の変位の関係 (K-100mm厚)

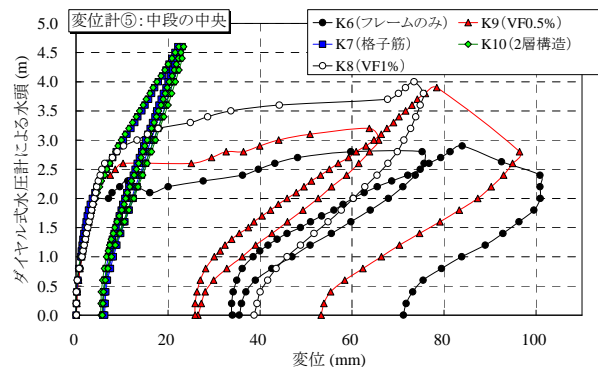


図-11 水頭と中央部の変位の関係 (K-75mm厚)

は 0.2mm 以上あり、最大変位も 18mm と大きかった。ただし、初回載荷の残留変位は 7~8mm で増大することはなかった。一方、不合格と考えられる上記以外のケースは、設計水位 4.6m に至る前にひび割れの進展によって塑性域に達してしまったものである。すなわち、最大変位が 20mm 以上に達するか、水圧の昇圧が不可能な状態に陥っており、除荷後も 0.2mm 以上の水密性の上で問題となるひび割れが残った。

図-9~11 に水頭とゲート中央部の変位の関係をシリーズごとに示す。図-9 において G1 は他のマーカーに隠れているため確認が困難だが、ほぼ G6 と同程度

の剛性を示しつつ、水頭 2.4m にて破壊した。G4 および K1 は変位計のキャパシティーの問題から約 41mm までしか測定できていない。剛性・残留変位に着目し、総合的に評価すると格子筋の優位性が明らかである。

また、G1 の結果から、フレーム構造を前提とすべきであることが確認できる。衝撃や荷重伝達への保護のみならず、強度上も複合構造体の基本となる。ビニロン短繊維を混入した場合は、100mm 厚のゲートにおいて全て貫通ひび割れを抑制できた。75mm 厚の扉体においても一部で貫通ひび割れを抑制できた。このように、ビニロン短繊維のみの補強では貫通ひび割れを発生させない効果は高いものの、最大変位量自体の抑制には効果が小さく、残留変位に対する抑制効果も小さい。また、ビニロン短繊維の 2 層構造の効果については、1 層構造で混入した場合とほぼ同じ性能を有すると判断でき、材料コストの低減が可能であるが、打設時の煩雑さに課題が残る。

FRP 格子筋を用いた場合は全て合格となり、その剛性補強の効果が高いことが確認できる。特に繰返し荷重を考慮した場合は、FRP 格子筋の弾性抵抗によって残留変位を大きく抑制できることから、設計荷重がある程度大きい場合は FRP 格子筋の使用を基本構造とすべきである。ただし、格子筋の種類、断面積などについては合理的な設計という観点からさらなる検討の余地がある。

以上より、強度的に最も有利なゲート構造は「フレーム構造+FRP 格子筋+ビニロン短繊維」による複合構造である。ゲート厚については剛性確保の観点から厚い方が有利であるが、最適厚さについては、適用箇所の荷重条件によって考慮すべき今後の課題である。

性能評価の考え方については「①ひび割れの非貫通、②ゲートの最大変位(たわみ度)、③繰返し荷重に対するの残留変位の進展がないこと」などが、性能評価上のポイントと考えられる。また、載荷試験と同時に解析による性能評価が望ましく、その確立によって効率的な軽量モルタルゲートの設計と施工が可能となると考えている。

6. まとめ

本研究では EPS モルタルを母材とした軽量モルタルゲートの実用化試験を行った。得られた主な結論は下記の通りである。

- (1) 本研究で開発した水圧載荷試験装置は、ゲート供試体に対して実際に近い面的水圧を載荷・制御することができることをゲート載荷試験によって確認した。従来の水圧を再現した構造体試験は、油圧ジャッキを数多く並べる方法など極めて複雑かつ高価

な手法に限られていたが、本方法は袋体を用いることで低水圧ながら格段に容易かつ経済的に水圧を与えるものである。

- (2) EPS モルタルゲートは設計水圧に対して十分な剛性を有しており、それは鋼製フレームと内部の引張補強材との組合せを必要とする。特にフレームは扉体保護対策として基本となるものだが、強度増強上も必要不可欠である。
- (3) FRP 格子筋による扉体の剛性増強効果は優れており、変位抑制効果も非常に高い。
- (4) ビニロン短繊維の混入は、貫通ひび割れの発生を抑制する効果が期待できる。剛性に対する補強効果も若干見られる。

謝辞：本研究は国交省および国総研の「河川技術研究開発公募」の中の「新材料を用いた樋門樋管用ゲートの性能設計・施工技術に関する技術開発」の採択を受けて実施した。また実験実施においては、豊国工業（株）の有村圭二氏をはじめとする諸氏に多大なるご協力を頂戴した。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 松尾栄治, 玉滝浩司, 保井 渉: 発泡スチロール廃材を細骨材代替とした超軽量モルタルの材料分離性状および強度特性, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.358-367, 2007.7.
- 2) 松尾栄治, 保井 渉: 発泡スチロール廃材から作製した細骨材を用いた超軽量モルタルの熱的性質, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.2, pp.249-258, 2009.6.
- 3) 松尾栄治, 玉滝浩司, 保井 渉, 川崎秀明: 発泡スチロール廃材を細骨材とした超軽量モルタルの圧縮疲労特性, コンクリート工学年次論文集第 32 巻 1 号, pp.1487-1492, 2010.7.
- 4) 松尾栄治, 川崎秀明, 高海克彦: 発泡スチロール細骨材を用いた軽量モルタル床版の押抜きせん断特性, コンクリート工学年次論文集第 35 巻 2 号, pp.1339-1344, 2013.7.
- 5) (社)ダム・堰施設技術協会: ダム・堰施設技術基準(案)第 4 刷, 2007.3.
- 6) 國分正胤: 土木材料実験(改訂版), 技報堂, 1972.