

地下コンクリート構造物の防水工法の研究

——多重止水層型枠工法の信頼性評価——

青山 幹 山口 恒雄 林 好正
小川 晴果 長沼 一洋 一之瀬 快朗
(本社 原子力本部)
(企画調査部)

Study on Waterproofing for Underground Concrete Structure

—— Evaluation of Reliability of Multi-barrier Waterproofing System Utilizing Unvulcanized Butyl Rubber Cast in Ferrocement ——

Tsuyosi Aoyama Tsuneo Yamaguchi Yoshimasa Hayashi
Haruka Ogawa Kazuhiro Naganuma Hayao Ichinose

Abstract

This paper describes a highly reliable multi-barrier waterproofing system for underground concrete structures which uses unvulcanized butyl rubber membrane cast in permanent formwork of ferrocement. Experiments were conducted to investigate the reliability of this system. The results were as follows: (1) The waterproofing membrane is exceedingly durable and there is no problem of blistering and delamination owing to strong adhesion of the membrane cast in ferrocement. (2) The ferrocement permanent formwork system including joints can resist deformation and cracks of structural concrete without injuring its watertightness. (3) By adopting this system field work can be reduced and long-term reliability of waterproofing can be expected.

概要

この研究は、非加硫ブチルゴム防水層を打込み一体成型したフェロセメント板をコンクリート地下構造物の永久型枠として用いる高信頼性の防水工法（多重止水層型枠工法）の開発に関するものである。当該工法の信頼性を確認するために各種試験を行ない、以下の事柄が明らかとなった。(1) 非加硫ブチルゴム防水層は長期耐久性に優れ、打込み一体成型によりフェロセメント板に強固に接着一体化するので、ふくれや剝離を生じない。(2) フェロセメント板及びその接合部は、水密性に優れており構造躯体コンクリートの変形やひびわれに対しても追従できる。(3) 多重止水層型枠工法の採用により、現場施工の省力化が図れ、長期にわたる止水・防水信頼性が期待できる。

1. はじめに

この研究は、昭和62年度科学技術庁放射性廃棄物処理処分技術開発促進費補助金事業の一環として行なったものである。低レベル放射性廃棄物処分施設をはじめとする長期耐久性が要求されるコンクリート地下構造物に適用する高信頼性の止水・防水技術（多重止水層型枠工法）の開発を目的とした。

2. 多重止水層型枠工法の概要

この工法は、工場においてあらかじめ防水層（非加硫ゴムルーフィング）を一体成型した高強度水密セメント系複合材料であるフェロセメント板を製作する。これを現場において地下外壁の打込み型枠として用い、現場打ちコンクリートと複合一体化させることにより、躯体外部に多重の

止水・防水構造を形成することを特長とする。

防水層に用いる非加硫ゴムルーフィングは、ルーフィング相互の接着安全性に特に優れ、伸縮性に富み下地の変形或は、万が一発生したひびわれに対しても追従性を有する。

一方、フェロセメント板は、立体網目状補強金網と高強度セメントモルタルからなるセメント系複合材料であり、耐衝撃性、ひびわれ分散性、耐腐食性、耐水性に優れている。また、フェロセメント板の打込み型枠としての安全性についても明らかにされている¹⁾。

この工法では、防水層に直接フェロセメント板を打設するので、非加硫ブチルゴム中のカルボキシル基とセメント中のCaO成分が反応しイオン結合することにより、防水層とフェロセメント板が化学的に強固に接着一体化する。従って、防水層現場後張り施工と異なり、防水層にふくれ

や剝離などの欠陥が発生せず、長期にわたる接着耐久性が期待できる。また、フェロセメント板の変形が現場打ちコンクリートによって拘束される為、その接合部の変形に起因する漏水の危険が少ない。更に、躯体工期の短縮、防水施工の省力化等数多くの利点が期待できる工法である。

図-1にこの工法による施工手順の概念図をまた、図-2にこの工法によって形成される多重止水層の横断面図を示す。

3. 要求される性能と試験項目の選択

多重止水層一般部は、打込み防水層(非加硫ゴムルーフィング)、フェロセメント板及び構造躯体コンクリートによって構成される。また、その接合部ではシーリング材(非加硫ブチルゴムテープ状定型シーリング材,可撓性エポキシ樹脂系不定型シーリング材)及び増し張り防水層(非加硫ゴムルーフィング)が現場において施工される。これらの構成材料を劣化させ漏水を引き起こす可能性のある要因について机上で検討を行ない多重止水層が健全性を損なわれることなく長期にわたって止水・防水機能を維持し

多重止水層 構成材料	防水層 (非加硫ゴム ルーフィング)	フェロセメント板	シーリング材 (可撓性エポキ シ樹脂不定型 シーリング材)
要求性能			
物理的性能			
接着耐久性	防水層のふくれ抵抗性試験		(湿潤面接着力試験)
耐熱性	経年劣化をうけた防水層の物性試験		シーリング材の熱冷繰返し試験
耐寒性	防水層の熱冷繰返し試験		
寸法安定性		(長さ変化試験)	
耐凍害性	防水層の熱冷繰返し試験	(凍結融解試験)	シーリング材の熱冷繰返し試験
化学的・生物学的性能			
耐候性	経年劣化をうけた防水層の物性試験		
気密性		(中性化試験)	
耐食性	(薬液浸漬試験)	(薬液浸漬試験)	(薬液浸漬試験)
耐微生物性	(微生物繁殖試験)		(微生物繁殖試験)
力学的性能			
耐水圧性	接合部の水密性試験	接合部の水密性試験	接合部の水密性試験
水密性	実大水張り試験	実大水張り試験	実大水張り試験
変形に対する追従性	打込み防水層の変形追従性試験 接合部防水層の変形追従性試験	フェロセメント板の変形追従性試験	接合部シーリング材の変形追従性試験
施工性	実大水張り試験	実大水張り試験	実大水張り試験

注) / : 試験不要 () : 既往の試験データ有

表-1 要求される性能と試験項目の対応

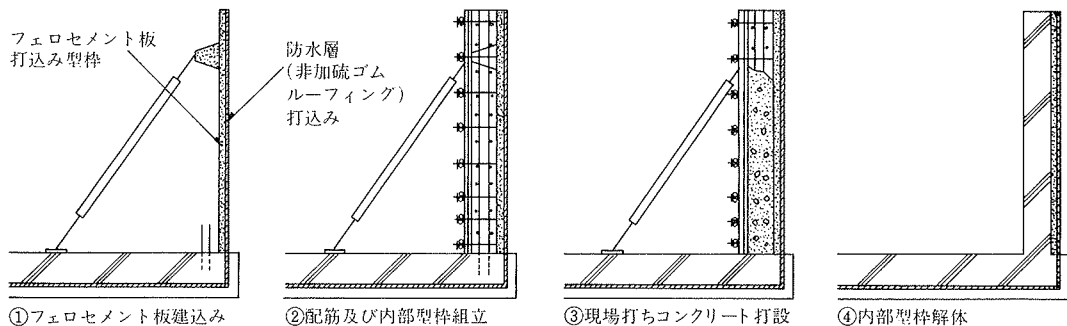


図-1 多重止水層型枠工法の施工手順概念図

続けるうえで要求される性能を明確にした。要求される性能と試験項目の対応を構成材料ごとに表-1に示す。

4. 防水層の耐久性

4.1. 経年劣化を受けた防水層の物性試験

(1) 試験計画：フェロセメント板に打込まれる防水層及びその接合部に増し張りされる防水層の耐久性を確認する為に施工後20年を経過した同種の屋根防水層(非加硫ゴムルーフィング厚2mm, 接着工法, トップコート無)からサンプルを採取し, 屋根メンブレン防水の劣化診断指針・同解説²⁾の試験方法に準じて試験した。

(2) 試験結果：結果のまとめを表-2に示した。引張強さ, 引裂き強さは経年とともに増大する傾向にあったが, 伸び率は逆に減少していく傾向にあった。今回の試験データ及び既往の試験データから回帰式を求め, 伸び率の寿命予測を行なったところ, 図-3に示すように長期にわたる耐久性が保持されることが期待された。

4.2. 防水層の熱冷繰返し試験

(1) 試験計画：打込み防水層が繰返し温度変化を受けたときの物性変化並びにフェロセメント板との付着性状について検討することを目的とした。型枠(150×500×50

		A.初期値	B.20年後の値	初期値比 B/A	
引張試験	引張強さ(kgf/cm ²)	長手方向	5.4	19.2	3.6
		幅方向	4.4	16.5	3.8
	100%伸び時の応力(kgf/cm ²)	長手方向	3.2	12.3	3.8
		幅方向	2.4	9.9	4.1
	破断時の伸び率(%)	長手方向	730	430	0.63
		幅方向	860	460	0.56
引裂強さ(kgf/cm)	長手方向	4.0	13.8	3.4	
	幅方向	4.8	12.7	2.6	

表-2 防水層の物性試験結果(20年後)

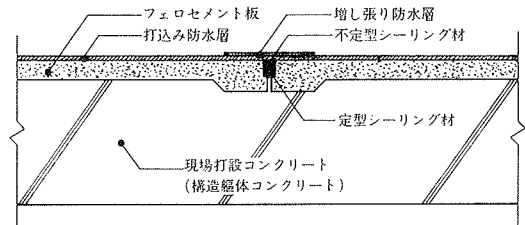


図-2 多重止水層の横断面図

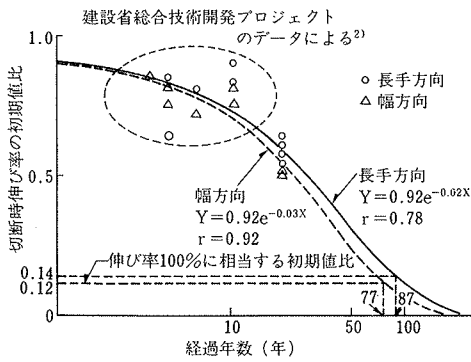


図-3 防水層伸び率の経時変化

mm) 底面に防水層(非加硫ゴムルーフィング、厚2mm、JISA6008 適合品)をあらかじめ敷設しておき、その上に表-3に示す物性のフェロセメント板を打設し24時間後に脱型し、材令4週迄気中(20±3°C、65±5% R.H.)で養生を行なった。また、比較用としてフェロセメント板の材令4週経過後に接着剤を用いて防水層を貼り付けた、後張り仕様の試験体もあわせて作成した。

養生を終えた試験体にプログラム式恒温槽を用いて図-4に示す要領で熱冷繰返し(-20~60°C)を50サイクルまで行なった。10サイクル(120時間)ごとに試験体を取り出し、約1時間常温(20±3°C)で放置した後、防水層にアタッチメント(40×40mm)を貼り付け精密万能試験機(試験速度10mm/分)を用いて接着強度を求めた。

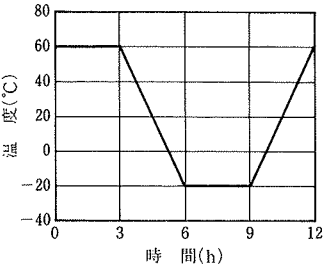


図-4 熱冷繰返しサイクル

(2) 試験結果：図-5に試験結果を示した。防水層打込み仕様では、後張り(接着剤張り)仕様に比べ著しく高い接着強度が得られた。また、後張り仕様では、熱

配筋	ひびわれ強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	曲げ弾性率 (kgf/cm ²)
溶接金網 φ2.30#ダブル	94.0	157	2.85×10 ⁵
亀甲金網 φ2.30#シングル			

表-3 フェロセメント板の物性

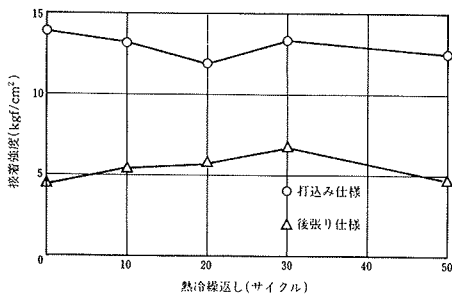


図-5 防水層の熱冷繰返し試験結果

冷サイクルの増大に伴い若干ふくれの発生が認められたが、打込み仕様では、ふくれの発生はなく、接着強度の低下もほとんどなかった。

4.3. 防水層のふくれ抵抗性試験

(1) 試験計画：打込み防水層が背面水圧を受けた場合のふくれ抵抗性について検討することを目的とした。

4.2.に準じ試験体(φ150×40mm)を作成し、図-6Aに示す透水試験装置を用いて5.0kgf/cm²(水頭差50mに相当)の水圧を裏面より5時間加えた後、防水層に鋼製アタッチメント(40×40mm)を貼り付け精密万能試験機(試験速度10mm/分)を用いて接着強度を求めた。

(2) 試験結果：表-4に試験結果を示した。フェロセメント板の水密性が高いために、裏面からの水圧によっても防水層にふくれは発生せず、また、接着強度の低下も認められなかった。更に、長期にわたるふくれ抵抗性を確認す

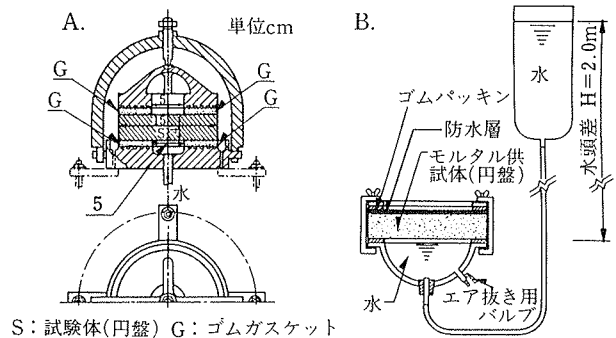


図-6 防水層のふくれ抵抗性試験要領

記号	仕様	接着強度 (kgf/cm ²)		フェロセメント板の透水量 (g)
		初期値	透水試験後	
A	後張り	8.5	7.5	0.6
U	打込み	14.7	14.7	0.7

表-4 防水層のふくれ抵抗性試験結果

るため、図-6Bに示す要領で防水層の裏面より水圧0.2kgf/cm²(水頭差2mに相当)を加え試験を継続中である。

5. 接合部の水密性

(1) 試験計画：フェロセメント板接合部の水密性について検討することを目的とした。4.2.に準じ試験体(320×650×50mm)を作成し、これを2枚組合せたものを接合部のモデルとした。増し張り防水層、非加硫プトルゴムテープ状定型シーリング材、可撓性エポキシ樹脂系不定型シーリング材の組合せからなる7種類の接合部仕様の施工を行なった後、写真-1に示す水圧試験装置を用いてフェロセメント板に徐々に水圧を増大させながら加え(ピッチ0.5kgf/cm²/15分、最大水圧4kgf/cm²)ひびわれ開始水圧

及び漏水開始水圧を求めた。なお、比較用として接合部なしの仕様2種（打込み防水層有，無）についても同様に試験を行なった。

(2) 試験結果：表一5に試験結果を示した。接合部なしのフェロセメント板は、防水層の有無にかかわらず優れた水密性を有しており、4 kgf/cm²（水頭 40 m に相当）の水圧を加えても漏水しないことが確認された。フェロセメント板の接合部に増張り防水層あるいは定型シーリング材だけを用いた仕様では、3.5 kgf/cm²（水頭 35 m に相当）以上の水圧で防水層、シーリング材の面外の変形による破断、漏水の危険があることが確認された。

しかし、フェロセメント板接合部に不定型シーリング材を用いた仕様は、4 kgf/cm² の水圧でも漏水せず優れた水密性を有していた。

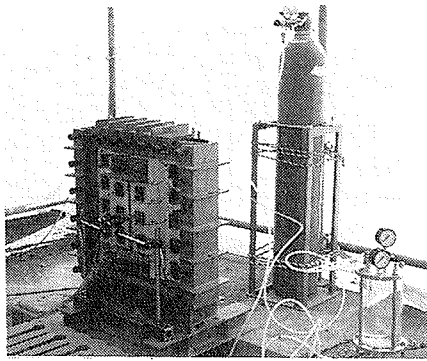


写真-1 水圧試験装置

試験体記号	仕様構成			接合部断面構成図	ひびわれ発生水圧 (kgf/cm ²)	漏水開始水圧 (kgf/cm ²)
	①増し張り防水層	②定型シーリング材	③不定型シーリング材			
A	—	—	—		1.5	漏水なし
B	—	—	—		1.5	漏水なし
C	○	—	—		2.0	4.0
D	—	○	—		1.5	3.5
E	—	—	○		2.0	漏水なし
F	○	○	—		1.5	漏水なし
G	○	—	○		2.0	漏水なし
H	—	○	○		2.0	漏水なし
I	○	○	○		2.0	漏水なし

表一5 接合部の水密性試験結果

6. 変形追従性

6.1. 打込み防水層の変形追従性試験

(1) 試験計画：予期しない原因により万一フェロセメント板にひびわれが発生した場合の打込み防水層の追従性について確認することを目的とした。

打込み防水層の仕様としてガラス繊維補強、非補強の2種類を取り上げ、4.2. に準じて試験体(150×150×50 mm)を作成した。図-7に示す要領で精密万能試験機(試験速度 2 mm/分)を用いてフェロセメント板に局部圧縮载荷による間接的引張荷重を加え、ひびわれを発生させ、ひびわれ幅及び発生ひずみを測定するとともに防水層の挙動を目視観察した。

(2) 試験結果：フェロセメント板の伸び能力は 380～470×10⁻⁶ であり、破断直後のひびわれ幅は、0.25～0.31 mm であった。防水層はガラス繊維補強、非補強にかかわらずフェロセメント板に衝撃的なひびわれが生じてても剝離や破断を生じず、また、ひびわれ幅を更に载荷により 1

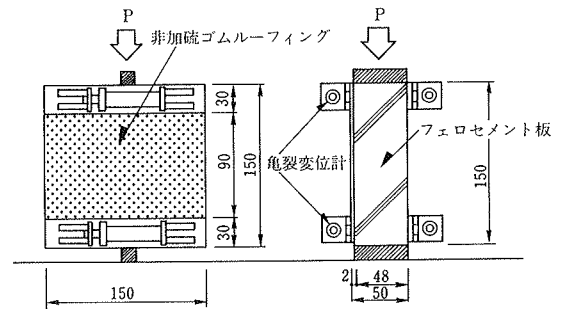


図-7 打込み防水層の変形追従性試験要領

記号	防水層の種類	引張強度(kgf/cm ²)		最大ひずみ(×10 ⁻⁶)	破断時ひびわれ幅(mm)	最大ひびわれ幅(mm)	防水層の状況
		ひびわれ	破壊				
R	ガラス繊維補強	56.0	59.9	474	0.31	1.16	剝離・破断なし
N	ガラス繊維非補強	54.1	59.1	381	0.25	1.05	剝離・破断なし

表一6 打込み防水層の変形追従性試験結果

mm 程度まで広げても充分追従出来ることが確認された。防水層打込み仕様では後張りに比べ、下地への接着強度が著しく高いにもかかわらず下地のひびわれに対する十分な追従性を有していることが確認された。

6.2. 接合部防水層の変形追従性試験

(1) 試験計画：フェロセメント板接合部の挙動によりそこに増し張りされた防水層に引張応力が作用した場合の影響を確認することを目的とした。4.2. に準じ試験体(150×500×50 mm)を作成した後、接合部防水層(非加硫ゴムルーフィング厚 2 mm)の増張り(接着剤張り)を行ない、気中で1週間養生を行なった。接合部防水層の仕様としては、ガラス繊維補強したもの(JIS A6009 適合品)とガラス繊維非補強のもの(JIS A6008 適合品)の2種類

を取り上げた。図-8に示す要領でフェロセメント板の接合部から両側に10.0mm間隔で基準線を入れ精密万能試験機(試験速度3mm/分)を用いて接合部に面内及び面外の引張を加えた。接合部の変位が、5mm、10mm、及び30mmに達したときの基準線の間隔を測定すると共に、接着界面でのずれ、剥離を観察した。

(2) 試験結果：表-7~9に試験結果を示した。接合部防水層の応力負担状況は、JASS8(防水工事)のうち下張り緩衝材の品質基準(案)に準じ、下地変形抵抗負担指数で評価した。接合部防水層の仕様にかかわらず面内引張、面内せん断、面外せん断、何れの挙動に対しても変形の増加に伴う下地変形抵抗負担指数は小さく、30mmの変形に対しても破断の危険はなかった。但し、ガラス繊維補強した防水層では、引張強度が大きく伸び能力に乏しいため、変形の増加に伴い打込み防水層との接着界面でずれや剥離を生ずる恐れがあった。ガラス繊維非補強の防水層では、何れの挙動に対しても変形の増加に伴う接着界面でのずれはなく、30mmの変位に対しても充分追従可能であった。

6.3. 接合部シーリング材の変形追従性試験

(1) 試験計画：フェロセメント板接合部の挙動により、シーリング材(可撓性エポキシ樹脂不定型シーリング材)に引張応力が作用した場合の影響を確認することを目的とした。JIS R5201に準じて作成したモルタル供試体を24時間後に脱型し気中(20±3°C, 65±5% R.H.)で4週間養生した後、可撓性エポキシ樹脂系不定型シーリング材を打設した。気中で1週間養生した後、精密万能試験機(試験速度1mm/分)を用いてシーリング材に面内、面外の変形を加え伸び能力と接合強度を求めた。

(2) 試験結果：試験結果を表-10に示した。可撓性エポキシ樹脂系不定型シーリング材は、面内せん断、面内引

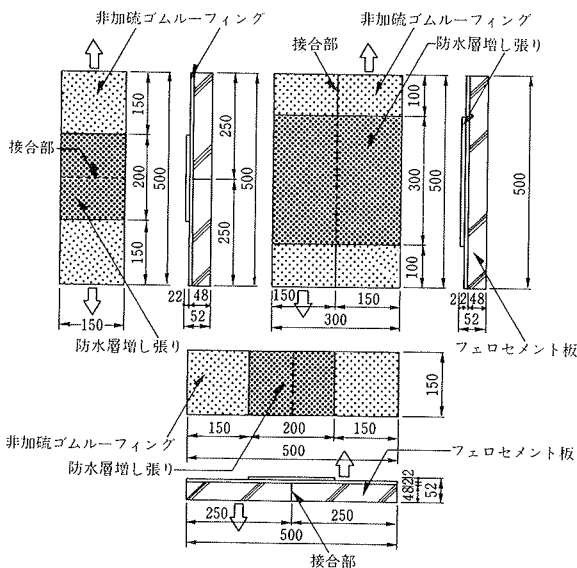


図-8 接合部防水層の変形追従性試験要領

記号	接合部防水層の種類	下地変形抵抗負担指数 (%/mm)		基準線からのずれ(mm)											
		変位(mm)				上端				下端					
		5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30		
NHR	ガラス繊維補強	0.8	0.4	0.2	0.2	2.7	5.0	13.9	26.4	2.5	3.4	4.9	4.5		
NHN	ガラス繊維非補強	4.1	3.9	4.3	4.0	0	0	0	0	0	0	0	0		

表-7 接合部防水層の変形追従性試験結果・面内引張

記号	接合部防水層の種類	下地変形抵抗負担指数 (%/mm)				剥離率 (%)							
		変位(mm)				上端				下端			
		5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30
NSR	ガラス繊維補強	0.5	0.2	0.1	0.1	15.0	26.7	52.7	86.7				
NSN	ガラス繊維非補強	1.3	1.3	1.7	1.6	9.3	14.3	23.3	31.0				

表-8 接合部防水層の変形追従性試験結果・面内せん断

記号	接合部防水層の種類	下地変形抵抗負担指数 (%/mm)				基準線からのずれ (mm)				剥離率 (%)			
		変位(mm)				変位(mm)				変位(mm)			
		5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30
GSR	ガラス繊維補強	0.7	0.4	0.5	0.4	0	0.2	1.7	3.8	13.7	34.0	65.3	85.3
GSN	ガラス繊維非補強	1.2	1.5	1.3	1.0	0	0	0	0	7.7	13.7	24.7	36.0

表-9 接合部防水層の変形追従性試験結果・面外せん断

記号	取合い部の挙動	強度(kgf/cm ²)	伸び率(%)	破断状況
NH	面内引張	9.6	39.0	シーリング材の凝集破断
NS	面内せん断	10.4	56.0	シーリング材の凝集破断
GS	面外せん断	7.5	50.0	シーリング材の凝集破断

表-10 接合部シーリング材の変形追従性試験結果

張、面外せん断の何れの変形に対しても十分な接合強度と変形追従性を有していることが確認された。

6.4. フェロセメント板の変形追従性試験

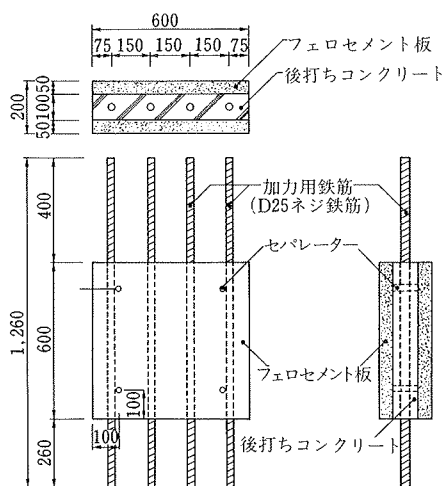
(1) 試験計画：コンクリート構造躯体に何らかの原因でひびわれが生じた場合のフェロセメント板の挙動を明らかにすることを目的とした。構造躯体からフェロセメント板への力の伝達は、両者の付着力によるものであることから、フェロセメント板の裏面(コンクリートに接する面)処理仕様として接着仕様と絶縁仕様の2つを取り上げ検討することとした。

フェロセメント板(600×600×50mm)打設後、接着仕様の場合は、くし目鏝を用いて表面の目荒らしを行ない、絶縁仕様の場合は金鏝仕上げを行なった。フェロセメント板を24時間後に脱型し材令4週まで気中(20±3°C, 65±5% R.H.)養生した後、図-9に示す要領でこれを打込み型枠として加力用鉄筋を配筋し、後打ちコンクリート(設計基準強度300kgf/cm²)を打設した。その際、絶縁仕様の場合は、フェロセメント板裏面に撥水処理剤を塗布した。加力試験装置を用いて4本の鉄筋に均等に引張力を与

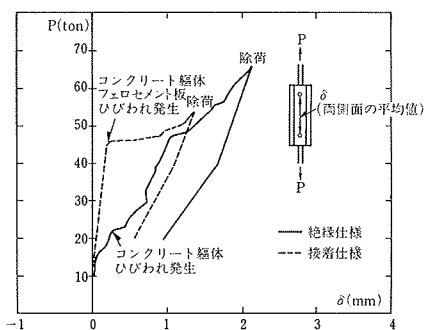
えて、コンクリート躯体に一軸引張応力を生じさせ、フェロセメント板及びコンクリート躯体のひずみ、ひびわれ発生状況を測定した。

(2) 試験結果：荷重—コンクリート躯体変形関係を図—10に示した。接着仕様の場合には、コンクリート躯体のひびわれ発生と同時にフェロセメント板にも同位置にひびわれが生じ、ひびわれ幅が0.7~0.8 mmに達するとフェロセメント板が破断することが確認された。

一方、絶縁仕様の場合には、躯体にひびわれが生じる以前に、フェロセメント板と躯体との界面で附着が切れ、躯体にひびわれが生じた後、更に躯体側の鉄筋が降伏するレベルまで変形させてもフェロセメント板にひびわれは生じないことが確認された。



図—9 フェロセメント板の変形追従性試験要領



図—10 荷重—コンクリート躯体変形関係

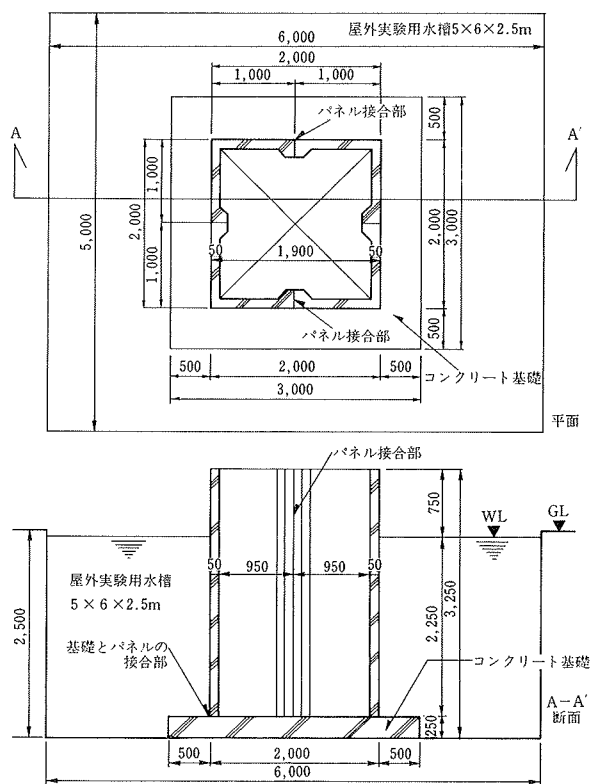
7. 実大水張り試験

(1) 試験計画：実大試験体を建込み、フェロセメント板及びその接合部の施工性を確認するとともに、当該試験体を用いた長期水張り試験により水密性のチェックを行なうことを目的とした。

4.2.に準じて実大試験パネル (1,000×1,000×3,000) を作成した。図—11に示す要領でパネル4枚を組合せ、屋外実験用水槽 (5,000×6,000×2,500) 内に建込んだ後接合部の施工を行なった。接合部の仕様は、5.の試験結果を踏

まえ、定型・不定型シーリング材、及び増張り防水層の組合せとした。試験体の外部から最大250 cmの水深まで水張りを行ない、そのままの状態でも2箇月間放置し、漏水の有無を目視観察した。

(2) 試験結果：実大試験体においても、フェロセメント板の建込み及び、その水平・垂直接合部のシーリング材、増し張り防水層の施工性は良好であり、現場施工上の問題点は何ら認められなかった。また、水深250 cm (0.25 kgf/cm²)、2箇月間の実大水張り試験でも漏水は全く認められず接合部の水密性が確認された。



図—11 実大水張り試験要領

8. おわりに

今回の試験結果並びに既往の研究結果から判断して多重止水層型枠工法は長期にわたる止水・防水信頼性を有し、現場施工上の問題点もないことが確認された。

今後、高度の水密性と長期間の信頼性を要求されるコンクリート構造物の止水・防水工法として実用化を図ってきたい。

参考文献

- 1) 青山, 林, 小川：フェロセメント打込み型枠工法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1987), pp. 629~630
- 2) 建設大臣官房技術調査室監修：建築防水の耐久性向上技術, 技報堂出版, (1987), pp. 28~33