

鉄筋コンクリート水圧トンネルの漏水に関する模型実験

Leakage Test in RC-Lining Pressure Tunnel by Models

大矢 一夫* 前川 一行**
Kazuo Oya Kazuyuki Maekawa

松井 健一*** 山田 幸一***
Kenichi Matsui Koichi Yamada

要 約

この報告書は、鉄筋コンクリート水圧トンネルの漏水機構及び状況を調査するための模型実験の結果について示したものである。

実験の結果、鉄筋コンクリート管路には、水圧により多数の微細なひびわれが発生することを確認した。さらにこれらのひびわれは、たとえ幅が微細でも高水圧下では多量の漏水の原因となり、止水するためには内壁全面を止水膜で被覆する必要があることを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 試験体の形状及び製作
- § 3. 試験装置及び試験方法
- § 4. 試験
- § 5. 補修工法の検討
- § 6. まとめ
- § 7. あとがき

§ 1. はじめに

上水道などの鉄筋コンクリート水圧トンネルでは、水圧によるコンクリートのひびわれや、施工継手の構造及び施工条件などにより漏水が予想される。しかし、これらの現象については明確ではない。たとえば、内圧によるひびわれについても密度や幅及びそれらの挙動については明らかにされておらず、漏水についても明確ではない。さらに、施工継手に設置する止水板についても、コンクリートの打込みや締固めの方法など影響を受ける要因が多く、効果は明らかではない。とくに高い水圧が作用した場合には漏水の機構は複雑となる。この種のトンネルでは、内側に鋼管を用いて水密構造とするのが通例である。

本報告書は、内側に鋼管を用いない鉄筋コンクリート

水圧トンネルに、相当の水圧が作用した場合、トンネル壁部に発生するひびわれや漏水を推定し、さらに止水を目的とした補修方法を検討するために実施した模型実験の結果を示すものである。なお、実験は昭和56年11月から57年12月の間に実施した。

§ 2. 試験体の形状及び製作

試験体は、Fig.1 に示すように、内径1,810mm、外径2,210mm、長さ3,000mmの鉄筋コンクリート管で、中央に施工継手を設けたものである。継手には幅300mm、厚さ13mmのセンターバルブ・コルゲート型の塩化ビニル樹脂製の止水板を埋設した。試験体の配筋は5.0kgf/cm²(490kN/m²)の内圧に耐えるように設計されたもので、特定のモデルとしたトンネルの場合と同一のひずみとなるようにした。主鉄筋はSD30、D19を130mm間隔として内側及び外側に配した。また、配力筋はSD30、D13を円周に対して36本(内側167mm、外側184mm間隔)配した。さらに、配力筋の端部には水圧試験のためのふたが取付けられるように、φ16mmのボルトを沿わせて溶接した。

試験体は型枠を水平に置き、コンクリートポンプを用いてコンクリートの打込みを行ったが、コンクリートの打込みや締固めの方法が漏水などにどのような影響を与えるかを確認するために、打込み方法を変えた2体を作製した。すなわち、試験体 No.1 は型枠の側壁及び天井部

*技術研究部技術研究所 副所長
**技術研究部技術研究所 係長
***技術研究部技術研究所

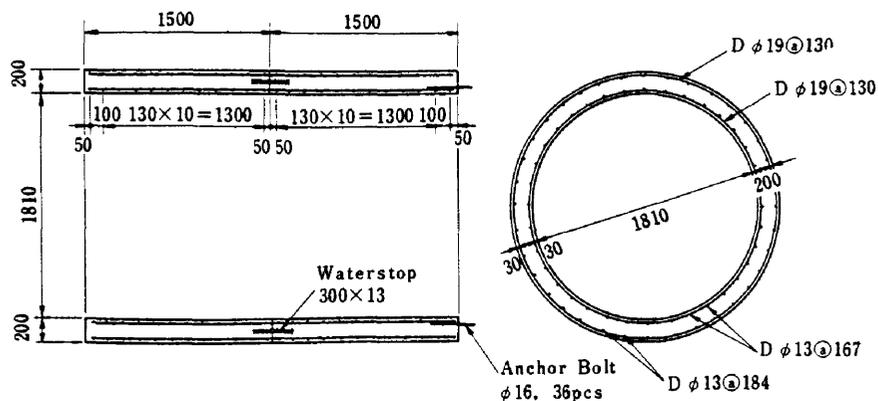


Fig.1 試験体の形状、寸法(mm)
Model of experiment

の外側に開口部を設けてコンクリートを打込み、締固めも型枠バイブレータや挿入形バイブレータを用いて入念に施工したものであり、試験体 No.2 は通常のトンネルの施工方法に準じ、天井部の内側の1箇所から打込み、締固めも内側からの型枠バイブレータのみとしたもので

ある。なお、これら試験体はいずれも2ブロックに分けてコンクリートを打込んだ。

コンクリートの配合及び品質試験の結果は Table 1 及び Table 2 に示すとおりである。

Table1 コンクリートの配合
Concrete mix proportions

種類	スランブ (cm)	粗骨材最大寸法 (mm)	水・セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	1㎡当りの材料(kg)				
						セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
実験用	21±2	10	52.0	52	4±1	394	205	904	850	*3.94

*チューポールA・Z

Table2 実験用コンクリートの品質試験の結果
Results of quality test

試験体	圧縮強度 (標準, 28日) (kgf/cm²)	水圧試験時のコンクリートの品質				備考	
		材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm²)	引張強度 (kgf/cm²)	弾性係数 (kgf/cm²)		
NO. I	1	269	45	255	23.5	2.17×10 ⁵	コンクリート打込 2 / 1
	2	286	34	245	22.5	1.98×10 ⁵	2 / 12
NO. II	1	275	106	288	25.0	2.17×10 ⁵	2 / 23
	2	288	97	300	26.1	2.15×10 ⁵	3 / 5

標準は20℃水中養生, 他は現場水中養生

§ 3. 試験装置及び試験方法

試験装置は Fig.2 に示すように、試験体の両端を密閉するためのふた、漏水量を測定するための受皿、試験体を水平に設置するための架台、試験体に内圧を作用させたときに、ふたに作用する圧力によって生じる継目の変位を拘束するための鋼製支持枠とジャッキ、及び水圧を作用させるための水タンクとコンプレッサで構成されている。受皿は、中央部に幅400mm、次いで左右にそれぞれ1,250mm、400mm、と仕切りを付け、中央部は継目を含む部分の漏水を、1,250mmの区間は各ブロックの壁部分からの漏水をそれぞれ区別して計測できるようにした。また、ジャッキによる載荷は継目に設置した変位計を観察しながら内圧に釣合うようにした。

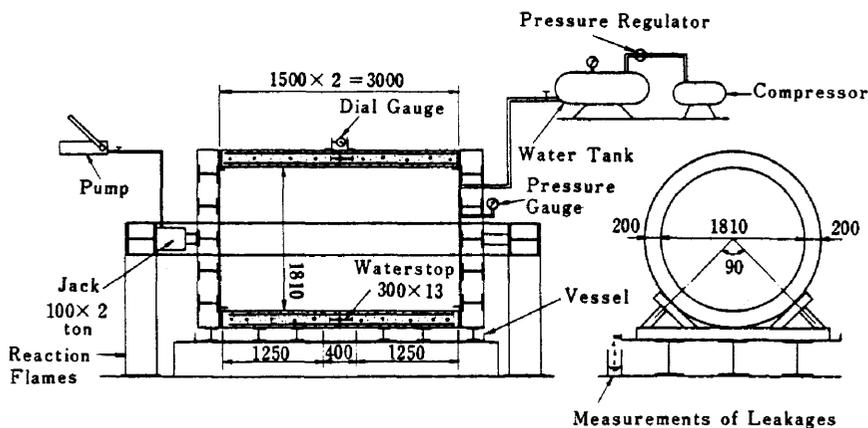


Fig.2 試験装置概略
System of experiment

試験は、試験体に水を満した後に水タンクとコンプレッサを用いて最高5.5kgf/cm²(490kN/m²)まで水圧を上げ、各圧力段階におけるひびわれと漏水の状況を観察した。なお、試験体の表面と鉄筋にワイヤーストレインゲージを貼付けて、それぞれのひずみを測定した。

§ 4. 試験

4-1 水圧試験の状況

前述のような方法で試験体の水圧試験を行ったが、ひびわれ及び漏水の状況についての概要は次のようであった。

概要

1) 水圧0~0.5kgf/cm² (0~49kN/m²)

試験体 No.1 では、水圧0.5kgf/cm²(49kN/m²)で、施工時にできたピンホールなどからわずかに水が滲出する部分がみられた。

試験体 No.2 では、試験体に水を満した状態で継目の一部及び施工時にできたアバタの部分から水の滲出するのが観察された。

2) 水圧1.0kgf/cm² (98kN/m²)

試験体 No.2 とも天井部の幾分広い部分や、コンクリートの乾燥によって生じたヘアクラックの一部からわずかに水の滲出するのが観察された。この漏水はブリージングによって生じた水みちからのものと考えられる。

継目については、試験体 No.1 では漏水は認められなかったが、試験体 No.2 では約半分の部分から極く少量の漏水が認められた。

3) 水圧2.0kgf/cm² (196kN/m²)

試験体 No.1, No.2 とも、長さ20cm程度の水平方向のひびわれが部分的に発生しはじめ、漏水が認められるようになった。また、コンクリートの充填が十分でないと考えられる天井部の広い部分から水が滲出するのが認められたが、いずれもその量は少ない。

試験体 No.1 では継目からの漏水は認められない。

4) 水圧2.5~3.0kgf/cm² (245~294kN/m²)

試験体 No.1, No.2 ともに水平方向のひびわれが多発し、漏水量は急激に増加する。このひびわれの長さは20~50cmと多様である。

試験体 No.1 の継目からも漏水が認められた。

5) 水圧4.0kgf/cm² (392kN/m²)

試験体 No.1, No.2 とも、さらに多数のひびわれが発生する。これらひびわれは成長してつながり、ほぼ試験体の全長に亘るものが多くなる。漏水量もさらに増加する。

6) 水圧5.0kgf/cm² (490kN/m²)

ひびわれの長さが増大し、さらに新しく発生したひびわれも加わり、試験体全面にほぼ等間隔(160~200mm)となった。これらひびわれの幅は大きいもので0.04~0.05mmであるが漏水量は非常に多い。

以上のように水圧試験では、水圧2.0kgf/cm² (196kN/m²)程度でひびわれが発生しはじめ、漏水するようになる。ひびわれの発生量及び漏水量は、水圧が3.0kgf/cm²(294kN/m²)以上になると急増する。また、継目からの漏水はコンクリートの施工方法にも影響され、とくに入念に施工した場合には水圧2.0kgf/cm² (196kN/m²)までは漏水は認められなかったが、通常の施工では低い水圧でも漏水する。しかし漏水量は多くはなかった。発生したひびわれについては Fig.3, Fig.4に示す。

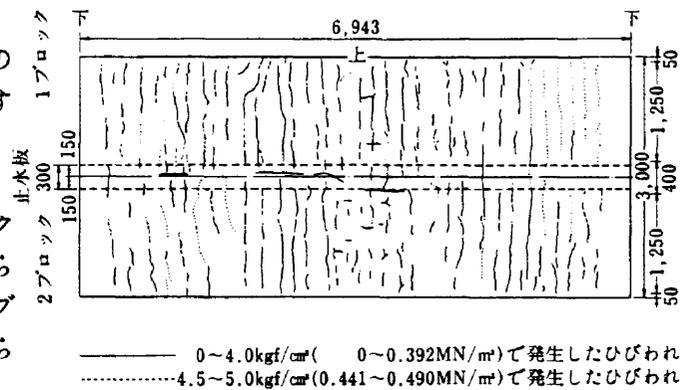


Fig.3 ひびわれスケッチ(試験体No.I)
Fissures after loading(Model No.I)

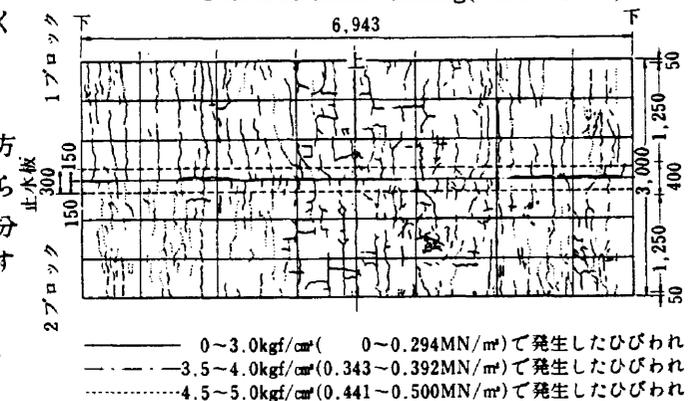


Fig.4 ひびわれスケッチ(試験体No.II)
Fissures after loading(Model No.II)

4-2 漏水量

ひびわれや施工継手からの漏水は、水圧を作用させる方法や時間などに影響される。さらに、これら微細なひびわれは試験中にコンクリートの遊離石灰で目詰りする。また、試験の中断期間中はコンクリートの自癒作用でひびわれが閉塞することも考えられる。試験は1つの試験体について数回繰り返して、その間の変化を観察した。

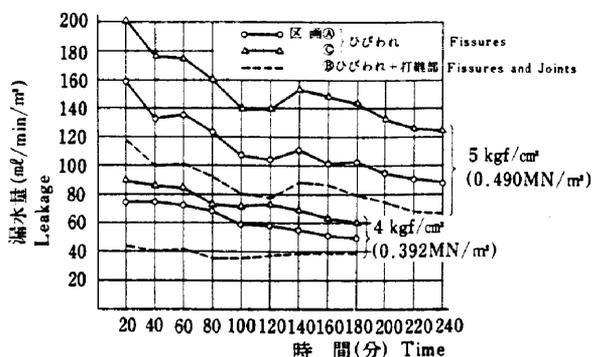


Fig.5 漏水試験の結果(試験体No.I)
Results of leakage test

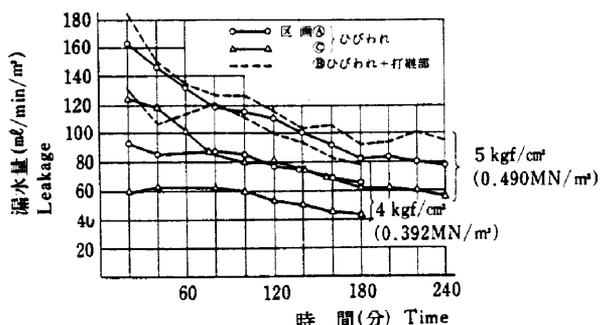


Fig.6 漏水試験結果(試験体No.II)
Results of leakage test

試験の結果の一部を Fig.5, Fig.6 に示す。ここで①は第1回打設部の継目を含まない壁部分(1,250mm間)の漏水量を示し、②は第2打設部の同様部分の漏水量を示す。また、③は中央の継目を含む幅400mm区間の漏水量を示すものであるが、これには継目からの漏水量とひびわれからの漏水量が合わさっている。漏水量の表示は、試験体の内側単位面積当りの量 (ml/min/m²) で示した。

試験の結果、漏水の状況は大きく変動することが判明した。とくに、ひびわれ発生当初は大量の漏水が観察され時間と共に増加する傾向にあったが、やがて漏水量は減少してくる。これは、内圧によるコンクリートのひびわれは一時に発生するのではなく、徐々に発生あるいは拡大して、それに伴ない漏水も増加するものと考えられる。しかし、これらひびわれには、時間の経過と共にコンクリートの遊離石灰などで目詰りする部分が増加し、この結果漏水量は減少するものと考えられる。最終的な漏水量を把握するためには実験を長期連続して実施する必要があるが、今回の実験は、漏水量がほぼ一定となったと考えられる時点で打切った。これら一連の実験での最終測定値を実験による漏水量として Table 3 に示した。また、継目を含む③区間の漏水量から、継目のみの漏水量を次のような仮定と条件のもとに推定した。

Table3 実験より得られた漏水量
Results of leakage test

水圧 (kgf/cm ²)	試験体NO. I				試験体NO. II			
	①	②	③	継目 推定④	①	②	③	継目 推定④
2.0	—	—	—	—	5.9	0.8	8.8	2.8
3.0	11.4	13.5	10.6	1.8	13.0	14.3	22.9	6.4
4.0	49.8	59.4	38.8	4.6	65.5	41.6	76.7	19.9
5.0	88.3	124.3	67.0	5.5	77.1	54.9	95.2	24.8

①, ② : ひびわれからの漏水 (ml/min/m²)
③ : ひびわれ+打継部漏水 (ml/min/m²)
④ : 継目漏水推定 (ml/min/m²)

①継目からの漏水量は中央部③区間の漏水量よりひびわれからの漏水量を差引いたものである。

②継目近辺のひびわれからの漏水量は、①, ②区間の1/2とする。これは止水板の影響でひびわれが表面にまで到達していないものもあると考えられ、ひびわれの数が①, ②区間に比較して1/2程度であることから推定したものである。

継目からの漏水量は、継目の単位長さ当りの量 (ml/min/m) で示した (Table 3)。

試験体 No.1, No.2.を比較すると、壁部①及び②区間の漏水量は、コンクリートの打設方法の違いによる差は明確でない。これは試験体の施工スパンが1.5mと短いため、打設方法によるコンクリートの品質の差があまり現れなかったこと、及び水圧試験時のコンクリートの材令が試験体 No.2の方が長く、試験体 No.1にくらべてNo.2の方が力学的に有利であったことなどによるものと考えられ、水圧の高い場合は、入念な施工を行った試験体 No.1の方がNo.2より多量の漏水を示している。しかし、継目の漏水量は明らかに試験体 No.2の方が大きく、コンクリートの打設方法による影響が明瞭であった。

4-3 ひずみ測定

試験官に内圧を作用させた時の鉄筋及びコンクリートの挙動を観察するために、ひずみを測定した。ひずみ測定位置は、各ブロックの中央部のコンクリート表面と外側の主鉄筋で、円周に対して12点とした。

測定の結果、ひずみは場所によって変動が非常に大きい。Table 4 は試験体 No.1のコンクリート表面のひずみ測定結果を示したものであるが、内圧が2.0~2.5kgf/cm² (196~245kN/m²) 以上になると、とくに測定値の変動が大きくなる。これは、コンクリートのひびわれの影響によるものと考え、各断面での測定値を平均してみた。Fig.7はその結果を示したものである。これによると、コンクリートの円周方向の平均ひずみは、内圧2.5

kgf/cm² (245kN/m²) まではいずれも直線的に増加し、それ以上になると急増している。この時点での平均ひずみは 100×10^{-6} 程度であり、コンクリートの弾性係数が 2.1×10^5 kgf/cm² (20.6GN/m²) という試験結果から、コンクリートには 21kgf/cm^2 (2.06MN/m²) 程度の引張応力が作用していると考えられる。このことは、コンクリートの引張強度試験の結果 ($\sigma_t = 23 \text{kgf/cm}^2$ (2.25MN/m²)) からみて、この時点でひびわれが発生したものと想像され、肉眼での観察結果とも一致する。なお、コンクリートの平均ひずみは、内圧の増加と共に大きくなり、 5.0kgf/cm^2 (490kN/m²) では $650 \sim 700 \times 10^{-6}$ にもなるが、この値はひびわれの幅をも含んだ平均的な変位を示していると考えられる。

鉄筋のひずみについても同様な手法で整理したが、結果はコンクリートの場合と同様で、内圧 2.5kgf/cm^2 (245kN/m²) までは直線的にコンクリートと同程度のひずみを示し、それ以後は急激に増加する。このことは、コンクリートにひびわれが発生するまでは、鉄筋とコンクリートが一体となって荷重を分担しているが、コンクリートのひびわれ発生により、鉄筋の荷重負担が大きくなったものと考えられる (Fig.8)。

§ 5. 補修工法の検討

水圧試験の結果、ひびわれから大量の漏水があり、止水を目的とした補修工法の検討が必要となった。

Table4 ひずみ測定の結果(試験体No.I, 1ブロック, 中央部コンクリート表面)
Results of strain measurement(model No.I-1, Concrete surface in the center)

位置	水圧 (kgf/cm ²)									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
101	47	69	99	142	200	900	1312	1670	1894	1973
102	40	52	72	84	103	107	134	283	362	346
103	40	52	71	81	94	101	332	440	551	548
104	39	50	66	74	82	91	96	740	980	1083
105	31	36	51	57	66	71	76	111	149	129
106	36	40	52	60	70	78	84	115	137	105
107	30	43	57	67	79	86	93	124	108	92
108	37	48	62	76	87	97	108	150	288	287
109	32	45	61	75	87	96	102	132	190	828
110	37	50	65	79	90	99	121	770	883	913
111	38	52	67	86	101	120	636	930	1068	1183
112	31	42	55	66	86	253	688	903	1067	1172
平均	37	48	65	79	96	179	315	531	640	722

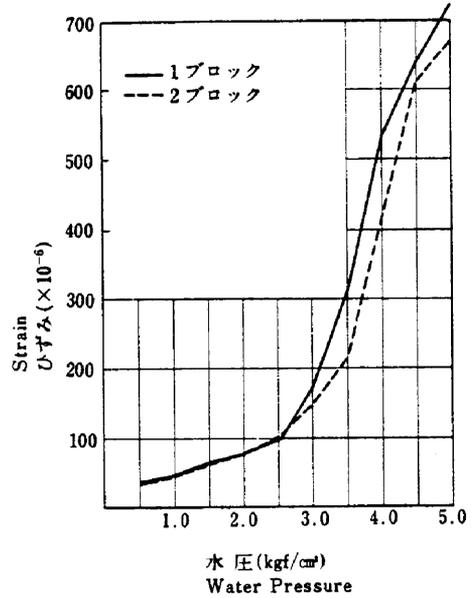


Fig.7 試験体の平均ひずみ(試験体No.I)
Average strain of model No.I
(コンクリート表面, 中央部円周方向)
(Concrete surface in the center)

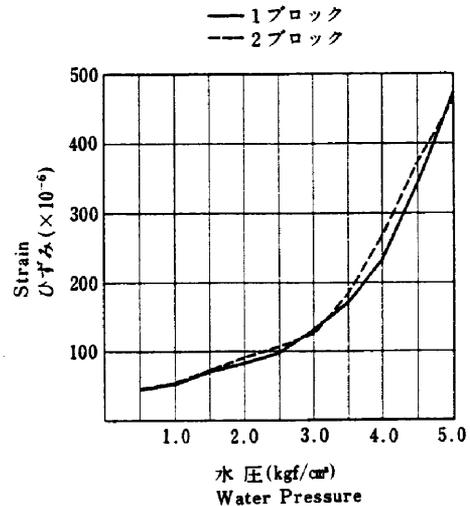


Fig.8 試験体の平均ひずみ(試験体No.I)
Average strain of model No.I
(中央部, 外側主鉄筋)
(Outside main reinforcement in the center)

今回の試験で観察されたひびわれは、コンクリート表面の全体にわたり間隔も狭く幅も微細であった。そのために補修はトンネル内壁の全面にわたって止水膜を作るのがもっともよいと判断される。しかし、このような特殊な構造物の止水膜としては、湿润状態のコンクリート面にも施工でき、付着が良好であること、及び水圧によるひびわれ幅の増減の変化に十分追随し得る伸び能力を有すること、などの性質が要求される。

現在、補修材料としては、セメント系、ゴム系、アス

ファルト系、あるいは合成樹脂系など各種の材料があり、いずれも塗布または吹付けにより施工するものである。これらの材料のうち上記の必要な性質を有すると思われるものを選定し、水圧試験を行ってひびわれの発生した試験体 No.2 を用いて、補修実験を行った。本実験に用いた材料は、シリコン系、エポキシ系（2種）、合成ゴム系、の防水材の合計4種類で、シリコン系とエポキシ系の材料はそのまま、合成ゴム系はセメントを添加してモルタルとして用いるものである。施工については、メーカーの仕様により2回塗りとした。実験での平均塗布厚さは、シリコン系、エポキシ系（1）では0.3mm、エポキシ系（2）では0.6mm、合成ゴムモルタルは1.5mmであった。

試験は補修による効果を確認するために再度水圧試験を行った。その結果の概要は次のようであった。

- 1) 水圧3.0kgf/cm² (294kN/m²) までは、いずれも漏水はなかった。
- 2) 水圧4.0kgf/cm² (392kN/m²) では、エポキシ系（2）と合成ゴムモルタルは漏水が認められなかったが、シリコン系、エポキシ系（1）では補修前の1/8程度の漏水があった。
- 3) 水圧5.0kgf/cm² (490kN/m²) では、合成ゴムモルタルは漏水がほとんど認められなかったが、エポキシ系（2）では補修前の約1/12、シリコン系、エポキシ系（1）では補修前の約1/4の漏水があった。

表面塗布による補修は高水圧下では、わずかなピンホールや塗りむらの箇所から水が止水膜の裏側に廻り込みこれを剥離させる。このために、コンクリート面の気泡や水泡の跡は事前に埋めるという作業が必要となる。これらの影響を少なくするためには、止水膜の厚さが大きいことが有利である。

§ 6. まとめ

以上のように、鉄筋コンクリート水圧トンネルの漏水機構や補修方法を解明するために模型により試験を行ってきたが、これら試験の結果をまとめると次のようである。

- 1) 試験では内圧2.5kgf/cm² (245kN/m²) で、コンクリートの引張限度と思われる平均値 100×10^{-6} のひずみが測定され、部材を貫通するひびわれが多数発生した。
- 2) ひびわれの幅や間隔は、鉄筋の量や配筋の状況により異なると考えられる。今回の実験では、ひびわれの幅は0.05mm以下と小さいものであったが、間隔は狭く数は多い。

3) 内圧が高くなると、ひびわれ幅は小さくとも漏水量は多い。とくに、ひびわれ発生当初は大量の漏水がある。しかし、これらひびわれは、コンクリートからの遊離石灰などで目詰まりして漏水量は減少する。

4) 施工継手の止水板の効果は、コンクリートの打込みや締固めに影響を受ける。通常の施工方法ではその効果を十分に発揮することはできず、低い圧力でも漏水する。

打込み締固めにとくに注意して完全な施工をした場合でも継目からは漏水する。しかし、継目からの漏水は壁面のひびわれからの漏水に比較するとそれ程多くはない。

5) ひびわれからの漏水を止めるための補修は、内壁全面にわたって行う必要がある。

6) 補修材としては、湿潤状態のコンクリート面への良好な付着や、十分な伸び能力を有するものでなければ効果が期待できない。

7) 塗布による補修は、水圧が高い場合はピンホールや塗りむらなどの影響が大きくなる。このため塗布厚さは大きいことが望ましい。

§ 7. あとがき

今回一連の試験により鉄筋コンクリート水圧トンネルのひびわれの状況や漏水について、さらにそれらの補修に関する問題が明らかになった。しかし、時間などの制限もあり、漏水の経時的な変化や経済的で確実な補修工法については別の機会にさらに検討したいと考えている。

実験を行うにあたっては、試験装置の設計製作など平塚工場の小室工場長、熊谷係長はじめ多くの方々からの全面的な強力を頂きました。また、試験体の設計については、土木設計部の野田係長ほかの方々にも強力して頂きました。心より感謝の意を表します。