

神戸市営地下鉄上沢駅の上床版縦断クラックの補修

神戸市交通局海岸線建設室建設課 非会員 角谷 浩貴
会員 佐保 千載

はじめに

1995年兵庫県南部地震により開削式地下鉄構造物が大きな被害を受けた。その中でも神戸高速鉄道大開駅は、ボックスカルバートの鉄筋コンクリート造の中柱が完全に潰れ、路面の陥没を伴う崩壊という象徴的な被害を受けた。神戸市営地下鉄の新長田駅、上沢駅、三宮駅およびその前後において、路面の陥没までは至らなかったが、大開駅と同様に鉄筋コンクリート造の中柱が剪断破壊するとともに、床版・側壁に多くのクラックが生じた。中柱の被害総本数は軽微なものを含めて457本を数えるに至った。

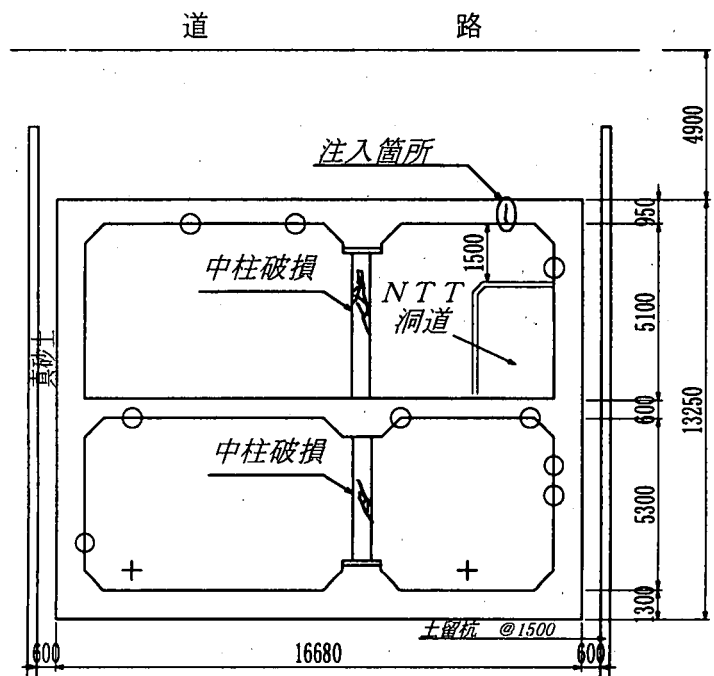
これら被災した中柱は、完全な再構築から、一部再構築あるいは補修、補強と様々な形で修復され、これを教訓に全国の地下鉄において中柱の耐震補強が施工されたところである。

このように地下鉄の被災と復旧は中柱が象徴的なものとなっているが、中柱の被災が無かった所も含めて全線にわたり横断方向および縦断方向のクラックが多く発生し、それらの補修も重要な復旧作業の1つであった。ここでは縦断方向に発生したクラックのうち、幅・深さともに大きく、特に構造的な面から完全な修復を必要とした上沢駅電気室上部の床版の縦断クラックの補修について報告する。

1. クラックの状況

上床版に大きな縦断クラックが発生した箇所は、上沢駅西部に位置する2層2径間非対象断面で、スパン比が2:1の割合で中柱が南側に偏った構造となっている。延長は約130mである。上層が電気室、下層が軌道階で5mピッチに設けられた中柱はすべて被災し、被害程度は上層部の方が大きく、27本の中柱のうち21本が剪断破壊し主筋が変形した。下層部は、主筋が変形したのは2本であり他は剪断クラックの発生にとどまった。被災状況を図-1に示す。なお図は西から東を見た断面を表している。

問題のクラックはスパンの小さい側の上床版側壁ハンチに近いところに縦断方向に発生した。多数の細かいクラックが集合状態であるのではなく、1本のクラックが鮮明に存在し、その幅は3~4mmと非常に大きなものであった。延長は当該断面区間130m全域にわたり、深さは超音波探査の結果によると、東端部の約10mの区間を除いて、厚さ95cmの床版を鉛直にほぼ貫通するところもあった。なおクラックの位置は配力筋の位置に一致していた。



※○はその他のクラック発生箇所

図-1 上沢駅電気室の被災状況 (横断面)

キーワード 兵庫県南部地震 上沢駅 床版クラック補修 エポキシ樹脂 足踏み式ポンプ注入
連絡先 ☎650-8570 神戸市中央区加納町6-5-1 神戸市交通局海岸線建設室建設課

TEL 078-322-5972 FAX 078-322-6186

水漏れは被災後の降雨によってもまったく見られず、これは防水工（アスファルト防水）がしっかりしていたためと思われる。

2. 補修の方法と補修材料

(1) エポキシ樹脂による注入

クラックの大きさ、深さ、長さ、および中柱の被災状況から、震災直後は構造物全体の再構築もやむなしとの考え方があった。しかし床版の沈下等残留変形がほとんど見られないこと、再構築となると1年程度の不通が続くこととなり、震災で混乱した中で一刻も早い公共交通の復旧が望まれている中で、そのような長期にわたる不便は許されない状況にあること等から現状での修復を行なうこととした。

補修の条件として、①クラックが完全に充填されること、②強度が十分に確保できること、③弾性性状等材質のアンバランスにより修復箇所が構造上の欠点にならないこと、④余震が続く中、早期に施工出来る工法であることを考慮し、エポキシ樹脂による注入を実施することとした。

採用した樹脂の硬化後の性能規格を表-1

表-1 硬化樹脂の性能規格（メーカー規格値）

	規 格 値		試験方法
比 重	1.20±0.10		JIS K 7112
圧縮降伏強さ (N/cm ²) {kgf/cm ² }	50 {510}	以上	JIS K 7208
圧縮弾性係数 (N/cm ²) {kgf/cm ² }	1.0×10 ³ {1.0×10 ⁴ } 以上		JIS K 7208
曲 げ 強 さ (N/cm ²) {kgf/cm ² }	50 {510}	以上	JIS K 7203
引 張 強 さ (N/cm ²) {kgf/cm ² }	30 {310}	以上	JIS K 7113
衝 撃 強 さ (N/cm ²) {kgf/cm ² }	0.15 {1.5}	以上	JIS K 7111
硬 度 (H _D)	80	以上	JIS K 7215
引張剪断接着強さ (N/cm ²) {kgf/cm ² }	10 {100}	以上	JIS K 6850

に示す。硬化樹脂の弾性係数が10⁴kgf/cm²のオーダーであり、それに対してコンクリートが10⁵kgf/cm²のオーダーであることから判断して、修復した部分が変形性能において大きな弱点とはならないと考えた。

(2) 足踏みポンプ式による注入

一般にエポキシ樹脂によるクラック補修注入は、シリンダーを用いてゴムもしくはバネの力を利用して行なわれる。神戸市営地下鉄においても、震災によって生じたクラックは当該クラックを除いて、すべてシリンダー工法によって注入を実施した。しかし当該クラックの場合、シリンダー方式では次のような問題が予想された。

①注入圧の問題……シリンダー工法では2~3kgf/cm²程度の圧力しかかけられないため、当該クラックのように上向きでさらに深さが1m近くあるクラックへの確実な注入に不安がある。

②1回の注入量の問題……シリンダー工法ではシリンダー1本に50cc程度しか樹脂が装填できないので当該クラックのように幅が広く、深い場合は不向きである。

この2つの問題を解決する比較的簡単な注入方法として足踏みポンプを使用することとした。この方法はタンクに入れた樹脂を足踏みポンプで送り出すもので、シリンダー方式に比べて高压（30~50kgf/cm²）での注入が可能であり、樹脂の硬化が始まるまではタンクに樹脂を追加して作業を続ける事も出来るという長所がある。

(3) 斜め注入孔の設置

図-2に被災直後において他のクラックと同様

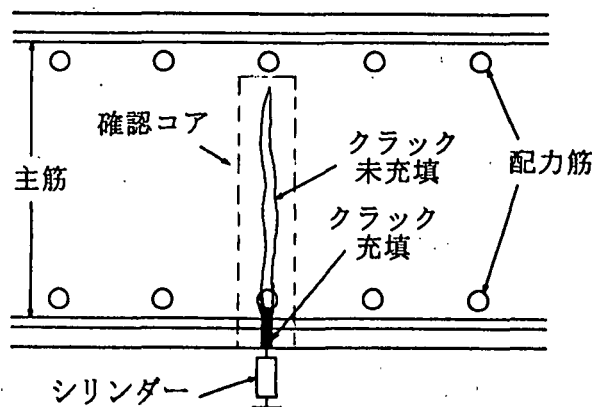


図-2 シリンダー工法による注入（横断面図）

にシリンダー工法によって樹脂注入を行ない、注入効果を確認するためのコアを採取した状態を示す。先にも記したようにクラックは下側配力筋に沿って発生しており、注入された樹脂は配力筋より上には到達していなかった。

この問題を解決する方法として、下側配力筋の上部より直接クラックに注入するための注入孔を設けることとした。注入孔は図-3に示すようにコンクリートドリル(φ10mm)により45°の角度で削孔し、アルミパイプ(φ8mm)を挿入した。注入孔がクラックに到達していること確認はこのアルミパイプ内に息を吹き込み、その感触で行なった。

なお下側配力筋のかぶり部にシリンダー工法により先行注入を行ない、縦断クラックへの注入時のシールとした。

(4)エポキシ樹脂のタイプ選定

当該クラックは、幅、深さ、長さ共に特異なものであるうえに、上向き注入となる。この条件に見合った性状を持つ樹脂を選択するため、一般的な土木構造物のクラック補修に使われる低粘度型と、微細なク

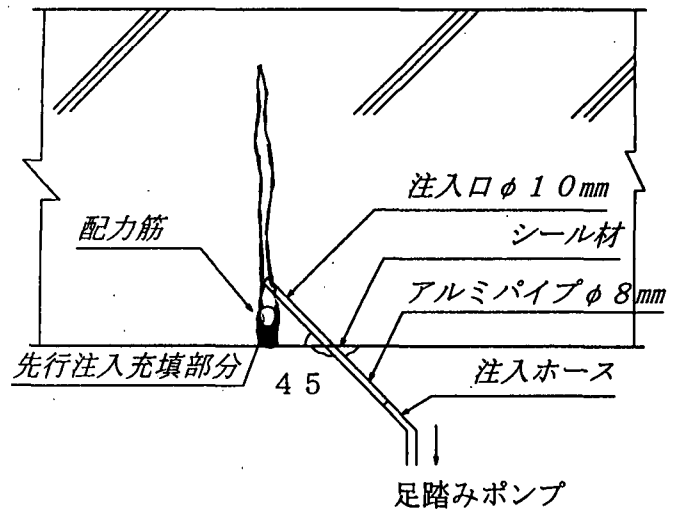


図-3 斜め注入孔(横断図)

表-2 樹脂の性状

項目	Aタイプ(低粘度型)		Bタイプ(超低粘度型)	
	主 剤	硬 化 剤	主 剤	硬 化 剤
主 成 分	エポキシ樹脂	変性芳香族リジンリチオール	エポキシ樹脂	変性脂肪族リジン
外 観	淡黄色透明液	濃褐色透明液	淡黄色透明液	淡黄色透明液
混合粘度	1,000±500mPa·s(30℃)		150±50mPa·s(20℃)	
混 合 比	主剤：硬化剤=2：1(質量比)		主剤：硬化剤=3：1(質量比)	
可使時間	100±10分(20℃、500g)		45±10分(20℃、500g)	

ラックの補修に使われる浸透性の良い超低粘度型について試験注入を行なった。両者の性状を表-2に示す。

試験注入は図-4に示すように仕切りコアを抜くことにより、縦断方向に2mの試験注入区間を設定して行なった。

この区間に斜め注入孔を1本、表面クラックへの注入と共に縦断クラックへの注入に対してはシールの役割を果たすためのシリンダー注入口を250mmピッチに配置した。仕切りコア内のクラック部に高さ80cm近くまでパテ状のものでシールを行ない、その高さまで充填された樹脂がこぼれ始めた時点で注入作業を終了した。

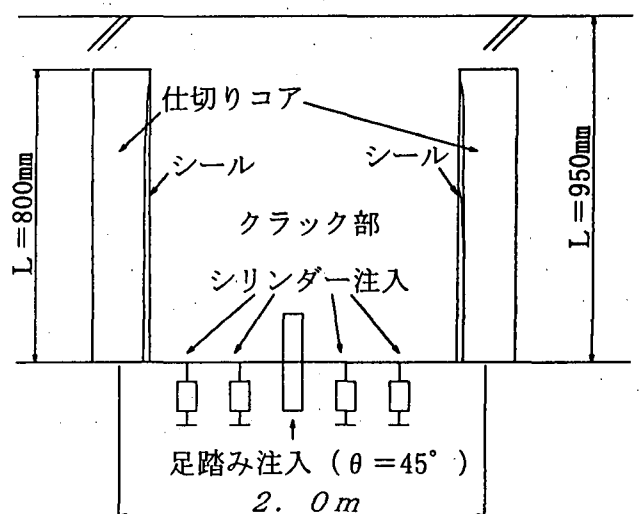


図-4 試験注入(縦断図)

試験注入の結果を表-3に示す。

表-3 試験注入結果

	Aタイプ (低粘度型)	Bタイプ (超低粘度型)
注入施工時間	100分	35分
注入材硬化時間	100分経過後も硬化せず。	60分以内にほぼ硬化。
足踏みポンプによる注入状況	注入抵抗が大きい。 注入ホースにもかなりの圧力がかかり耐圧ホースでないと耐えられない。	注入時の抵抗が小さく、注入材がスムーズに入る。注入ホースにもあまり圧力がかかっていない。
シリンダーによる注入状況	注入圧2 kgf/cm ² でシリンダー内に注入材が10~20cc残る。	注入圧2 kgf/cm ² でほとんど抵抗なく全注入材が注入された。
確認コアの状況	採取できた800mmのコア一長に対し、全域に完全な注入がされていた。	採取できた600mmのコア一長に対し全域に注入材が入った形跡が見られたが、完全に充填されているのは下部の300mm程度であった。

試験の結果をコアにより確認すると、Bタイプについては上部の充填が不十分となっており、流動性に優れ施工性も良いが、一旦目標のクラックに充填された後硬化するまでの間に、コンクリートのエントレンドエア等へ含浸してしまう可能性があると考えられた。

一方、Aタイプは注入圧を大きくしたり、注入時間が長くなるなど、施工性に劣る点もあるが、コアを見ると完全な充填がされており、一旦目標のクラックに充填された後は、硬化するまで殆どそのまま流動も浸透もしないと考えられる。したがって注入剤としてはAタイプのものを使用することとした。

3. 注入作業

(1) 注入区画の設定

試験施工では注入区画をコアで仕切ることにより2mと設定したが、実際の注入においては一つの注入区画を10mとした。したがって区画数は13ブロックとなった。区画割りの配置を図-5に示す。

区画は試験注入の場合と同様、区画端でコアを抜き、クラックをパテ状のものでシールする方法により区切った。この時試験施工のときと同様に、クラック上部の一部をシールせずに残すことにより、樹脂のこぼれ出しにより注入終了の確認を行なった。

1回の注入作業時間は樹脂の硬化開始時間(7~10時間)内の5時間を目標とし、1方試験注入の結果縦断クラック1m当たりの注入時間は1時間程度であったため、1区画内に2箇所の注入孔を設けることとした。

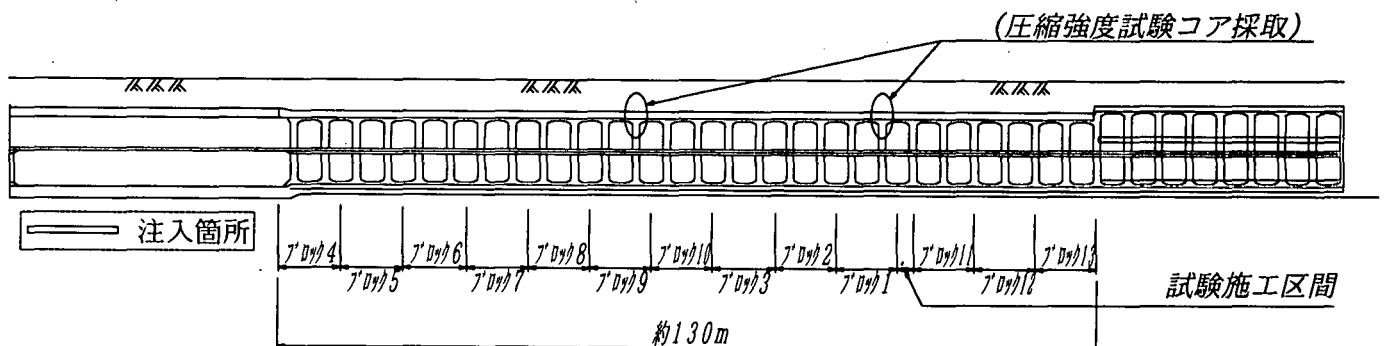


図-5 注入区画割り図 (縦断図)

(2) 注入量の設定と注入順序

注入された樹脂は対象とする縦断クラックのみに充填されるわけではなく、それにつながる横断クラックにも充填されていくことになるので、注入は各区画に存在する横断クラックも同時に行なった。注入量の設定方法は1区画毎に縦断クラックと横断クラックに分けてそれぞれ、幅×深さ×延長×ロス率(1.3)×比重(1.2)により算定した。クラック幅は縦断・横断クラックともに表面で3～5箇所観測した値の平均値を、深さは区画を区切るために両端で抜いたコアーにより観測することを基本とし、横断クラックも同じ値とした。コアーが破損しクラックが観測できなかったものについては、床版厚(95cm)とした。延長は表面で観測できるクラックの総延長とした。

当初、表面クラックへのシリンダー式注入と、縦断クラックへの足踏み式注入を同時に行なったが、足踏みポンプの圧力によりシリンダー注入側のシーリングが破れ樹脂が漏れだす事故が発生した。そのためそれ以降の注入は、まずシリンダー式による1次注入を縦断・横断を含めて全表面クラックに対して実施し、その硬化後に、足踏みポンプによる縦断クラックへの注入(2次注入)を行なうこととした。2次注入の設定注入量は総設定量から1次注入の実績量を差し引いて求めた。

(3) 再注入の施工

2次注入はほとんどの区画で設定量に見合った注入が実施されたが、設定量に達せず、しかもシール上端からの樹脂のこぼれ出しを見ないまま硬化時間に達したものについては再注入(3次注入)を実施することとした。その方法は図-6に示すように、翌日にそれまで注入した量と設定量から予想充填高さを算出し、それより高い位置に新たに斜め注入孔を設け注入を行なった。第11ブロックは再々注入(第

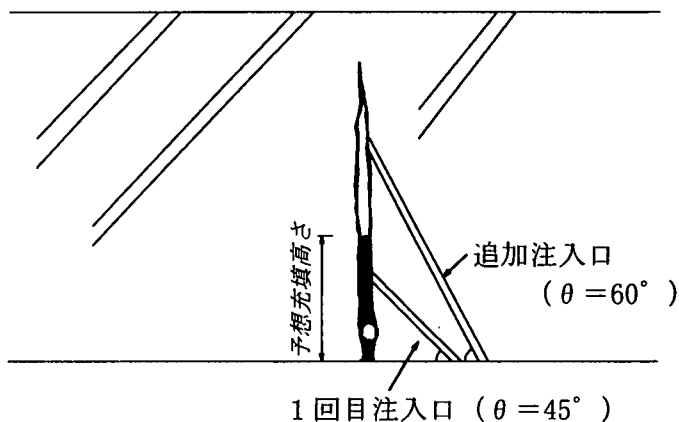


図-6 再注入の要領(横断図)

表-4 注入実績 (単位: 注入量=kg 注入率=%)

ブロック 番号	全クラック 注入設定量	面クラック 1次注入量	縦断クラック				全クラック	
			2次設定量	2次注入量	2次注入率	3・4次注入量	総注入量	総注入率
①	52.16	15.20	36.96	24.0	64.9	4.0	43.20	82.8
②	28.39	15.20	13.19	14.0	106.1	—	29.20	102.9
③	18.92	10.70	8.22	10.3	125.3	—	21.00	111.0
④	24.97	6.96	18.01	17.9	99.4	—	24.86	99.6
⑤	21.69	4.80	16.89	12.5	74.0	3.0	20.30	93.6
⑥	25.66	10.00	15.66	14.6	93.2	—	24.60	95.9
⑦	27.82	8.38	19.44	15.3	78.7	3.0	26.68	95.9
⑧	31.62	—	31.62	28.5	90.1	—	28.50	90.1
⑨	27.27	—	27.27	21.5	78.8	—	21.50	78.8
⑩	31.91	7.14	24.77	24.2	97.7	—	31.34	98.2
⑪	56.74	6.20	50.54	32.6	64.5	2.5	41.50	72.8
⑫	34.54	9.00	25.54	24.8	97.1	—	33.80	97.9
計	381.69	93.58	288.11	240.2	83.4	12.7	346.48	90.8
⑬	—	6.90	—	—	—	—	6.90	—

4次注入)まで行なったが所定の注入量には達しなかった。最終的に総注入率は設定量に対して90.8%となった。

足踏みポンプによる注入施工状況を写真-1に、ブロックごとの注入実績と設定量を表-4に示す。なお第13ブロックの縦断クラックは横断クラックと同様に浅い表面のみのクラックであったため2次注入は行っていない。

4. 注入結果の確認

全ブロックの施工終了後、総注入率が90%未満となった第1、第9および第11ブロックについて確認コアを採取した。採取したコアはすべてコアの上部まで完全に樹脂が充填されていることを確認した。

一方、注入修復されたクラックの部分の強度を確認するために、採取したコアからテストピースを4個作成し、圧縮強度試験を行なった。結果は361~389(平均371) kgf/cm²でありこの躯体の設計基準強度 $\sigma = 210$ kgf/cm²に対して十分な強度が得られた。またそのテストピースの破壊状況を写真-2に、そのスケッチを図-7に示すが、破壊試験によるクラックは注入箇所以外に生じるとともに、注入線を横切るように発生しており、注入による補修がコンクリート躯体の弱点箇所となっていないとの確認が出来たといえる。

おわりに

平成7年1月17日、兵庫県南部地震により大きな被害を受けた神戸市営地下鉄は、当初電車の運行再開までに1年はかかると予想された。それが結果的には1ヵ月後の2月16日には被害の大きかつ

た新長田、上沢、三宮駅を通過する形で全線の運行を再開し、さらに震災から2ヵ月後の3月16日には新長田と三宮駅を再開駅し、3月31日には上沢駅も再開駅した。

これほどまでに再開の時期が当初見込みと食違った原因は、迅速な仮受工の施工により確実に被災柱の受け替えを行なったこと、これにより変形を最小限に食い止めることが出来たことにあると考えられる。そのおかげでボックスカルバート構造全体の再構築でなく、中柱のみの再構築と床版・側壁はエポキシ樹脂注入による補修のみにより、ボックスカルバートを再生させることが出来た。

一時期、阪神間のコンクリート構造物のいたるところに注射器が刺された光景が見られた。樹脂注入のためのシリンダーである。日本中の樹脂注入器がなくなり、海外からの輸入品が届くまで注入が出来なくなる、などといううわさもまことしやかに流れた。

補修が完了してまもなく3年を経過しようとしているが、その後の床版の変位、漏水ともに見られていない。今後も注意深く観察を続ける必要があるが、現時点の結果から判断すればエポキシ樹脂による足踏みポンプ注入は有効な補修方法の選択であったと考える。

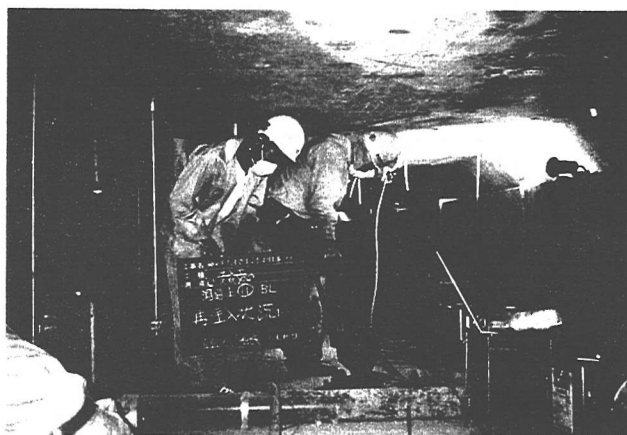
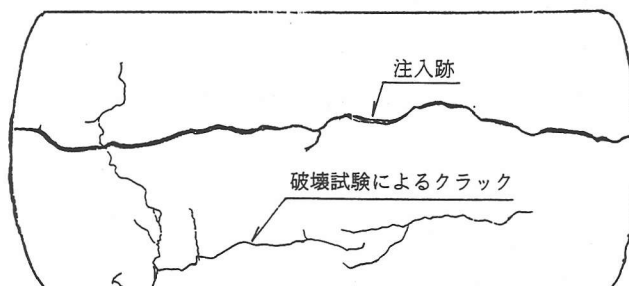


写真-1 足踏み式ポンプによる注入施工状況



写真-2 注入部の圧縮破壊試験コア



$\phi = 100$ mm

図-7 注入部の圧縮破壊試験コアスケッチ