共同研究報告書
整理番号第330号

部分薄肉化ＰＣＬ版を用いたトンネル補強工法に関する共同研究報告書

平成18年3月

独立行政法人土木研究所
基礎道路技術研究グループ
石川島建材工業株式会社
日本コンクリート工業株式会社
日本サミコン株式会社
ジオスター株式会社

Copyright © (2006) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P. W. R. I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第330号 2006年3月

部分薄肉化ＰＣＬ版を用いたトンネル補強工法に関する共同研究報告書

独立行政法人土木研究所	基礎道路技術研究グループ	上席研究員	真下　英人
	同	主任研究員	石村　利明
	同	前主任研究員	箱石　安彦
石川島建材工業株式会社	セグメント事業部トンネルグループ	部長	斉藤　光男
	同	課長代理	中山　壮一郎
日本コンクリート工業株式会社	土木営業部擁壁技術グループ	ＧＬ	松尾　久幸
	同		石川　高志
日本サミコン株式会社	技術部	部長	村田　佳久
	設計開発課	課長	音田　奨
ジオスター株式会社	土木事業部技術グループ	課長	小高　武
	市場開発部開発営業チーム		久保田　伸一

要旨

老朽化した既設トンネルの維持対策として、様々な補修・改修工法が提案・実施されている。しかし、実施されている多くは補修を目的とする工法で、トンネルを補強するという視点から新たな工法の開発が期待されている。PCL（Precast Concrete Lining）工法は、覆工の内側に覆工材（PCL版）を設置し裏込め材を注入することによって一体化し、片側相互交通開放下での施工ができるなど優れた特長を備えた補修・補強工法である。しかし、覆工材の設置で建築限界を確保できない断面では盤下げが必要で工事費も増加するため、PCL版の肩部を薄肉化できれば建築限界の確保が可能と考えた。本研究においては、基礎試験として新素材である超高強度繊維補強コンクリートを適用した部分薄肉化PCL版の開発と曲げ試験、裏込め材の選定試験、ならびに継手部に関する曲げ試験を実施した。次に、荷重条件の異なる実大規模覆工載荷試験（載荷形式Ⅰ、載荷形式Ⅱ）により補強効果を確認した。部分薄肉化PCL版の補強効果としては、緩み荷重の作用を想定する載荷形式Ⅰでは無垢の覆工コンクリート（設計基準強度 $f'ck=18N/mm^2$、厚さ300mm）の耐荷力と比較して193%、膨張性地山のように覆工全周への荷重の作用を想定する載荷形式Ⅱでは同様に71%の耐荷力を有していることが確認された。

キーワード：トンネル補強、PCL工法、部分薄肉化PCL版、実大規模覆工載荷試験、補強効果

目　　次

1．研究概要 …… 1

1.1 目的 …… 1

1.2 研究内容 …… 2

2．各種要素試験結果（STEP1～STEP4） …… 6

2.1 部分薄肉化 PCL 版の構造形式選定試験（STEP1） …… 6

2.1.1 試験体の種類と材料特性 …… 6

2.1.2 試験体の形状と配筋 …… 6

2.1.3 載荷試験方法 …… 7

2.1.4 載荷荷重の設定と載荷サイクル …… 7

2.1.5 試験結果 …… 7

2.2 裏込め注入材の材料選定試験（STEP2） …… 10

2.2.1 試験概要 …… 10

2.2.2 試験結果 …… 11

2.3 裏込注入材に関する二面せん断試験（STEP3） …… 13

2.3.1 試験概要 …… 13

2.3.2 試験結果 …… 14

2.4 接合部の確認試験（部分薄肉部と標準 RC の接合性能）（STEP4） …… 16

2.4.1 試験概要 …… 16

2.4.2 試験経緯 …… 17

2.4.3 試験結果 …… 19

3．部分薄肉化 PCL 版の仕様 …… 23

4．耐荷力 - 実大規模の覆工載荷試験（STEP5） …… 24

4.1 試験概要 …… 24

4.2 試験方法 …… 24

4.2.1 載荷形式Ⅰ …… 24

4.2.2 載荷形式Ⅱ …… 26

4.3 使用材料 …… 27

4.3.1 覆工コンクリート …… 27

4.3.2 裏込め材 …… 28

4.3.3 内巻き補強（部分薄肉化 PCL 版） …… 28

4.3.4 力学的特性 …… 29

4.4 試験結果 …… 30
4.4.1 載荷形式Ⅰ試験結果 …… 30
4.4.2 載荷形式Ⅰひび割れ発生状況 …… 33
4.4.3 ジャッキによる反力係数の算出 …… 35
4.4.4 載荷形式Ⅱ試験結果 …… 36
4.4.5 載荷形式Ⅱひび割れ発生状況 …… 39

5．施工法 …… 42
5.1 標準施工法 …… 42
5.1.1 施工フロー …… 42
5.1.2 施工手順 …… 43
5.2 脚部対策工 …… 50

6．今後の課題 …… 51
6.1 開発工法適用に際しての留意事項 …… 51
6.2 今後の課題 …… 51

＜参考資料＞
参考資料1（施工検討例） …… 52
参考資料2（関連論文） …… 56

1. 研究概要

1.1 目的

既設トンネルの補修ならびに補強工法の 1 つに PCL (Precast Concrete Lining) 工法がある（平成 16 年 3 月現在、補修工法として 50 件近い実績)。しかしながら、トンネルの内空断面に余裕が無い場合、従来の PCL 工法をそのまま適用すると建築限界が確保できないため盤下げなどの対策を必要とした。そこで、肩部のみを薄肉化した PCL 版を開発することができれば、盤下げを行うことなく建築限界の確保が可能となるため、既設トンネルの補強方法として適用性が向上すると考えた（図 1.1.1)。

本研究は、超高強度鋼繊維補強コンクリートで部分的に薄肉化した PCL 工法を考案するとともに、薄肉部（変断面）を有する PCL 版の開発、最適な裏込め充填材の調査選定、ならびに、実物大規模の覆工載荷試験によってその耐荷力を把握することを目的とする。

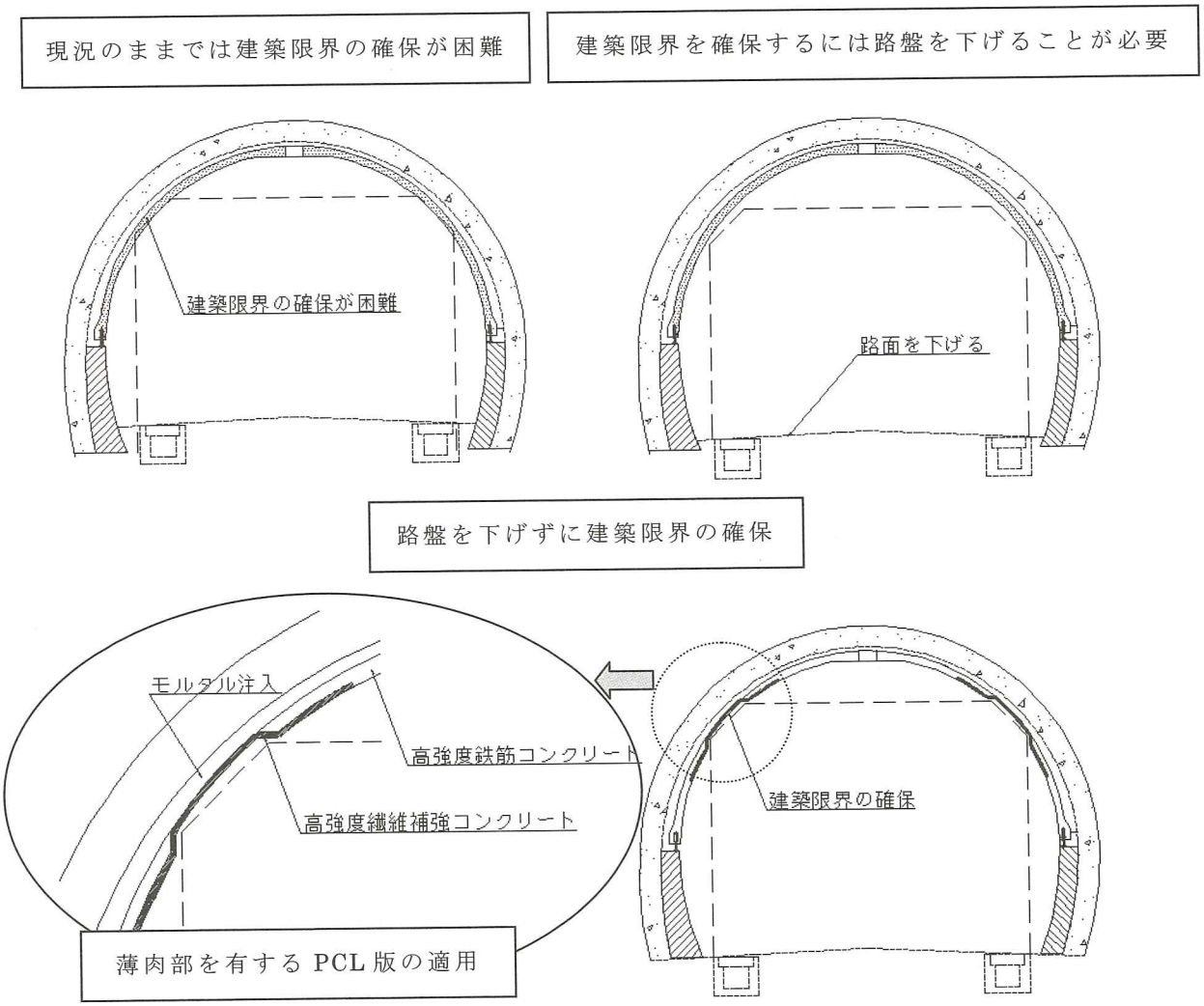


図 1.1.1　薄肉部を有する PCL 版の適用

1.2 研究内容

本研究は、部分薄肉化 PCL 版の開発から実大規模の覆工載荷試験まで、以下に示す 4 段階の要素試験（STEP1～4）と実大規模の覆工載荷試験（STEP5）を行った。

（1）部分薄肉化 PCL 版の構造形式選定（STEP1）
（2）裏込め注入材の材料選定試験（STEP2）
（3）裏込め注入材に関する二面せん断試験（STEP3）
（4）接合部の確認試験（STEP4）
（5）実大規模の覆工載荷試験（載荷形式Ⅰ、載荷形式Ⅱ）（STEP5）

（1）部分薄肉化 PCL 版の構造形式選定試験（STEP1）

PCL 版を薄肉化するには、薄肉部を鉄板（鋼材）と置き換える、鉄板や炭素繊維シートなどで補強した鉄筋コンクリート（RC）とする、あるいは、鋼繊維混入コンクリートとするなどの方法について事前に検討した。その結果、新素材である超高強度鋼繊維補強コンクリートに着目し、薄肉部の想定厚を PCL 版の標準部材厚の 50%程度に設定する方針で試設計を行った。このとき、薄肉部の厚さは、標準部材厚と曲げ耐力がほぼ等しくなるよう設定した。表 1.2.1 に、PCL 工法技術マニュアルで示される PCL 版の標準部材厚と弧長の関係を示す。また、実大規模の覆工載荷試験（STEP5）と弧長が一致する部材厚 14cm のケースについて、幅 50cm、長さ 300cm の矩形試験体を製作し、曲げ試験によってひび割れ発生状況、変形性能（荷重と変位の関係）、ならびに破壊性状などを比較した。

表 1.2.1　PCL 版の標準部材厚と弧長との関係

弧　長 m	標準部材厚	薄肉部厚 50%
	厚さ　cm	厚さ　cm
2 ~ 4	8	4
3 ~ 5	10	5
4 ~ 6	12	6
5 ~ 7	14	7

（2）裏込め注入材の材料選定試験（STEP2）

PCL 工法の裏込め注入には、通常、表 1.2.2 に示す気泡モルタルを用いている。しかしながら、トンネル補強を想定した場合、裏込め材の強度を上げることは有効と思われるため、強度の異なる 3 種類（設計基準強度 f' ck=2.0N/mm^2、20.0N/mm^2、40.0N/mm^2）の材料を用いて図 1.2.1 のような試験体を製作し、曲げ試験によってその違いを確認した。試験体は、STEP1 で得られた薄肉部を有する矩形梁と覆工コンクリートに相当する厚さ 30cm の無筋コンクリート（設計基準強度 f' ck=21.0N/mm^2）の間に、50mm の裏込め層を設けたものである。

表 1.2.2　裏込め材（気泡モルタル）の示方配合例

設計基準強度 f' ck N/mm²	ｾﾒﾝﾄ 細骨材比 C:S	水ｾﾒﾝﾄ比 W/C	空気量 %	単位量（kg/m³）			
				セメント C	水 W	細砂 S	気泡剤 A
2.0	1:2	71	46	300	213	600	2.7

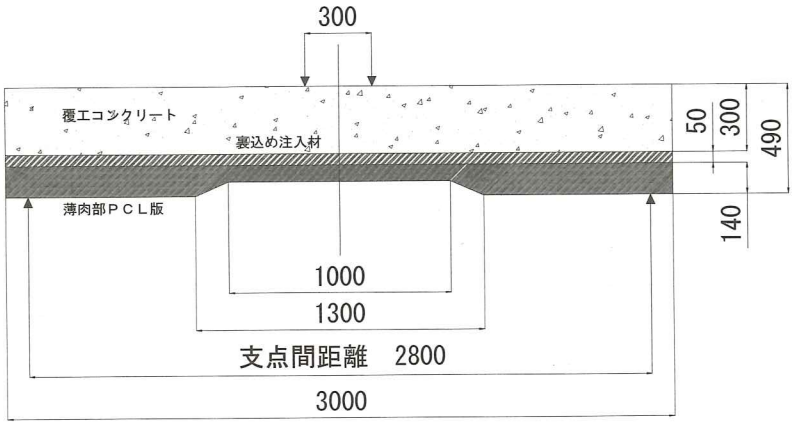


図 1.2.1　試験体の形状（単位：ｍｍ）

（3）裏込め注入材に関する二面せん断試験（STEP3）

STEP2 で用いた強度の異なる 3 種類（設計基準強度 f' ck=2.0N/mm²、20.0N/mm²、40.0N/mm²）の材料について、その付着性能を確認するため二面せん断試験を行った。図 1.2.2 は試験に用いた供試体の寸法形状で、中央部の母材両側に裏込め材を打ち継いで成形した。中央部の母材強度は、設計基準強度を 18.0N/mm²（覆工コンクリートを想定）、40.0N/mm²（PCL 版を想定）、ならびに 200.0N/mm²（超高強度鋼繊維補強コンクリートの薄肉部を想定）の 3 種類で、供試体高さは L=200mm としている。

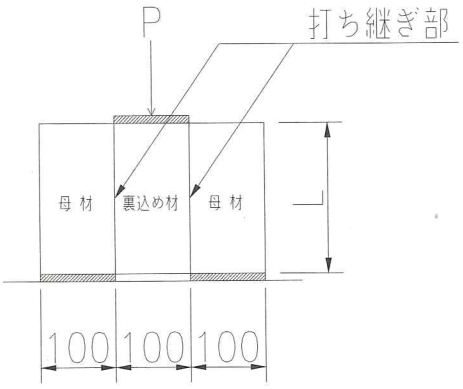


図 1.2.2　試験体の寸法形状（単位：ｍｍ）

（4）接合部の確認試験（STEP4）

部分薄肉化 PCL 版は、鉄筋で補強した超高強度鋼繊維補強コンクリートで薄肉部を製作したのち、両端に通常の鉄筋コンクリートを打継いで部材とするため、版内に継ぎ手箇所が存在する。そこで、材質が異なる打継ぎ部について円弧梁曲げ試験を行い、継ぎ手部の性能を確認した。図 1.2.3 に試験概要図を示し、曲げ試験は載荷点中央が継ぎ手部になるよう試験体を配置し、二点載荷方法によって行った。

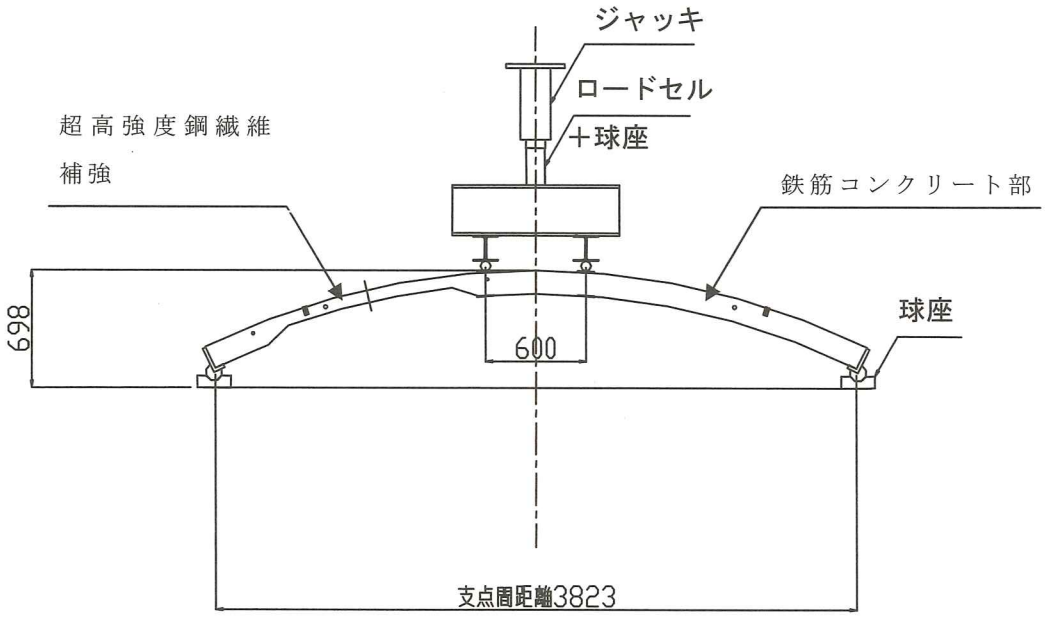


図 1.2.3　試験体形状と載荷方法（単位：ｍｍ）

（5）実大規模の覆工載荷試験（載荷形式Ⅰ、載荷形式Ⅱ）（STEP5）

土木研究所の試験装置（写真 1.1.1）を用いて、覆工コンクリートの補強を行いその効果を確認する。載荷方法は、覆工部に緩み荷重の作用を想定する載荷形式Ⅰ、ならびに、膨張性地山のように覆工全周への荷重の作用を想定した載荷形式Ⅱの 2 ケースについて実施した。載荷形式Ⅰにおける試験体の製作方法は、はじめに、覆工コンクリート部（設計基準強度 18.0N/mm²）を試験場所で現場打ちによって製作し所定の養生期間を経た後、覆工コンクリートに損傷を与えるために載荷形式Ⅰによって荷重を作用させた。荷重の作用は、最大荷重を確認した後、その 95%の時点で荷重を除荷する方法した。次に、覆工の内側に 50mm の隙間を設定して、部分薄肉部を有する PCL 版を設置し、覆工と部分薄肉化 PCL 版の隙間に裏込め材（設計基準強度 20.0N/mm²）を注入する方法で製作した。一方、載荷形式Ⅱの試験体製作は、現場打ち覆工コンクリートにスリットを設けて既設トンネルの損傷を模擬し、所定の養生期間を経た後、覆工の内側に部分薄肉化 PCL 版を設置し隙間に裏込め材を注入する方法で製作した。両載荷とも裏込め材が所要の養生期間を経たのち実施した。

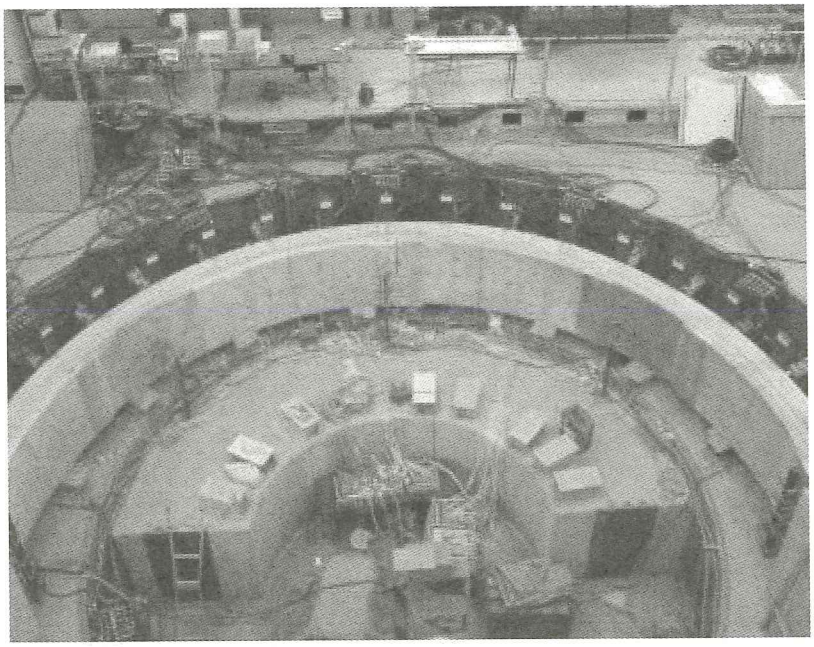


写真 1.1.1　実大規模の覆工載荷試験装置（補強後の状況：載荷形式Ⅰのケース）

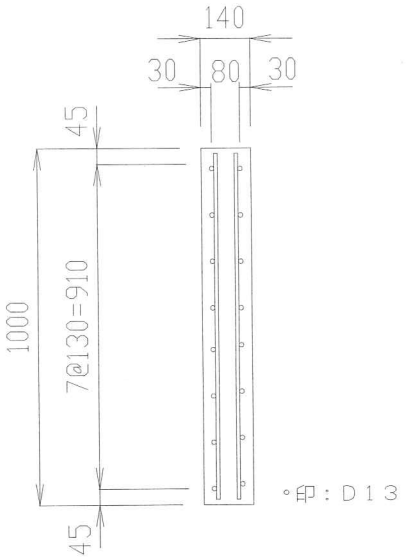


図 1.2.4 標準部断面配筋図（単位：ｍｍ）

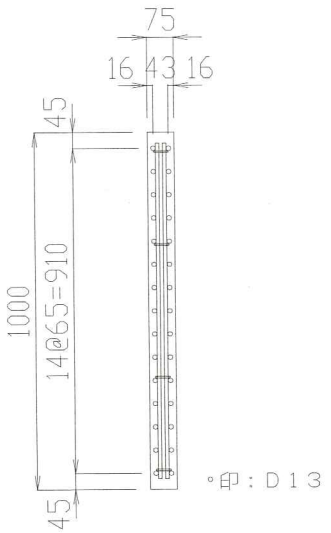


図 1.2.5 薄肉部断面配筋図（単位：ｍｍ）

2. 各種要素試験結果（STEP1～STEP4）

2.1 部分薄肉化 PCL 版の構造形式選定試験（STEP1）

部分薄肉化 PCL 版の薄肉部に最適な構造形式を選定するため、表 2.1.1 に示す 5 種類の試験体について曲げ試験を行った。試験体の形状は図 2.1.1～図 2.1.3 に示す 4 種類で、いずれも試験体の幅が 500mm の矩形断面とした。試験体のうち、図 2.1.3 の配筋で補強した超高強度繊維補強コンクリートは、蒸気養生の有無で二種類とした。試験体の略称として、Gコンクリート（超高強度コンクリート）およびDコンクリート（超高強度繊維補強コンクリート）とし、蒸気養生を行った場合を（Dコンクリート 1＋RC）とし、行わなかった場合を（Dコンクリート 2＋RC）とした。

2.1.1 試験体の種類と材料特性

表 2.1.1 に試験体の種類と載荷試験時における材料特性を示す。

表 2.1.1　試験体の種類と材料特性

試験体種類	圧縮強度 (N／mm²)	ヤング係数 (N／mm²)
標準部 RC 部材	44．1	33105
Dコンクリート	186．1	52547
Gコンクリート＋RC	154．9	52907
Dコンクリート 1+RC	189．3	53252
Dコンクリート 2+RC	123．1	51155

2.1.2 試験体の形状と配筋

試験体の形状と配筋概要を、図 2.1.1～図 2.1.3 に示す。図 2.1.2 のDコンクリートは超高強度鋼繊維補強コンクリートで、補強鉄筋は使用していない。

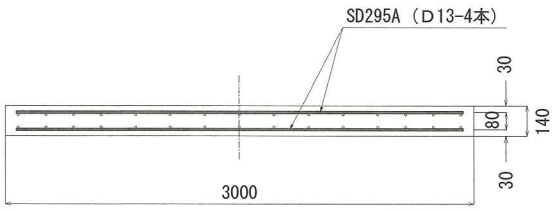


図 2.1.1　標準部：鉄筋コンクリート部材（試験体種類：RC）（単位：ｍｍ）

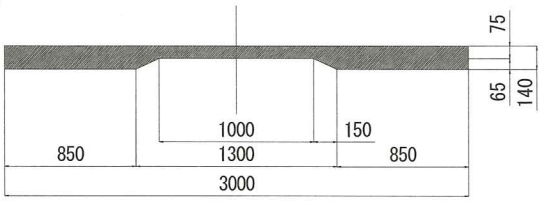


図 2.1.2　超高強度繊維補強コンクリート（試験体種類：Dコンクリート）（単位：ｍｍ）

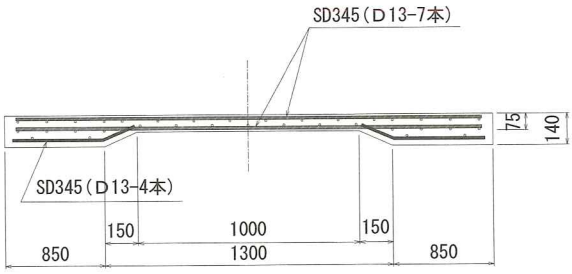


図 2.1.3　鉄筋で補強した高強度繊維補強コンクリート（単位：mm）
（試験体種類：D コンクリート、G コンクリート＋RC）

2.1.3 載荷試験方法

曲げ試験は、図 2.1.4 に示す二点載荷方法で行った。

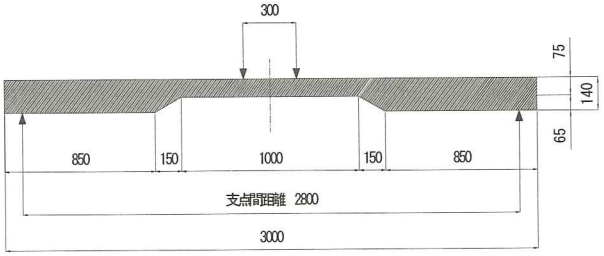


図 2.1.4　載荷試験方法（単位：mm）

2.1.4 載荷荷重の設定と載荷サイクル

載荷試験における載荷荷重の設定と載荷サイクルは、RC 部材の主筋が許容応力度（長期）$\sigma s=140N/mm^2$ になる時の抵抗モーメントを計算によって求め、抵抗モーメントに等しい曲げモーメントが得られる載荷荷重を基準荷重（基準値）とした。基準荷重は 9.6（kN）で、以下のようなサイクルで載荷試験を行った。

表 2.1.2 載荷サイクル

サイクル 1	0kN→1.0kN 毎→9.6kN（基準値）→2.0kN 毎→0kN
サイクル 2	0kN→2.0kN 毎→19.2kN（基準値 2 倍）→4.0kN 毎→0kN
サイクル 3	0kN→2kN 毎→28.8kN（基準値 3 倍）→4.0kN 毎→0kN
サイクル 4	0kN→2.0kN 毎→実破壊荷重まで

2.1.5 試験結果

図 2.1.5 は荷重と中央部たわみのグラフで、表 2.1.3 は測定結果（ひずみ量やクラック幅など）を示す。また、表 2.1.2 に各試験体における試験状況写真および試験後状況写真一覧を示す。

載荷試験の結果より、超高強度繊維補強コンクリートに鉄筋を配置した試験体（D コンクリート 1＋RC）は，曲げによるクラックが細かく分散し、終局荷重も最も大きな値を示すことがわかった。また、断面変化部のクラックについて、どの試験体においてもクラックが集中して発生することは観察できなかった。したがって、D コンクリート 1＋RC の試験体を用いて、以降の試験を行うこととした。

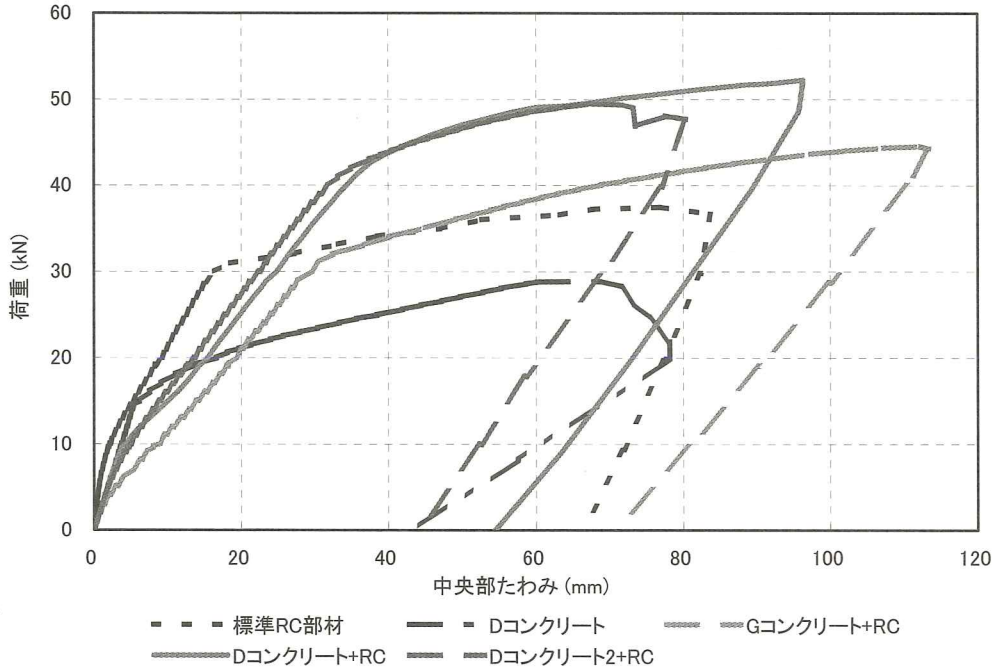
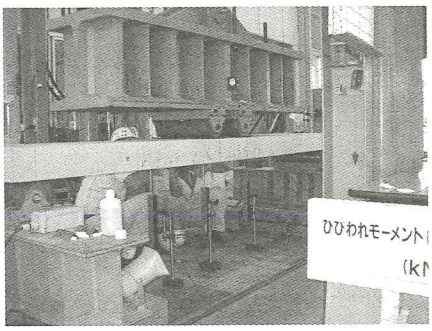
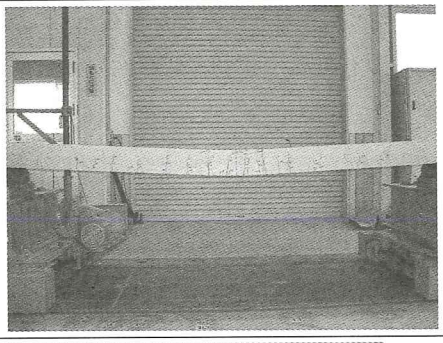
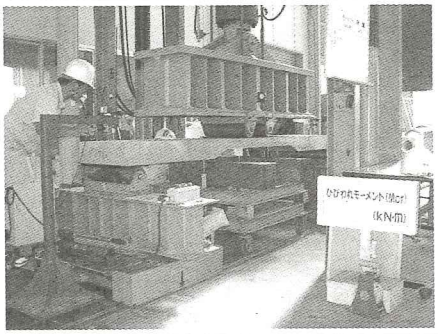
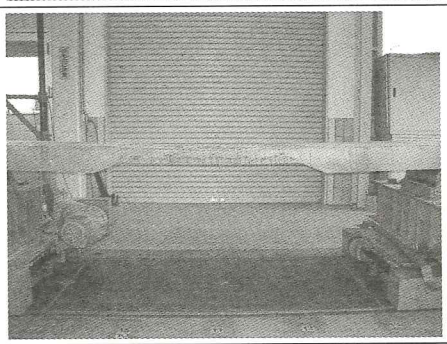
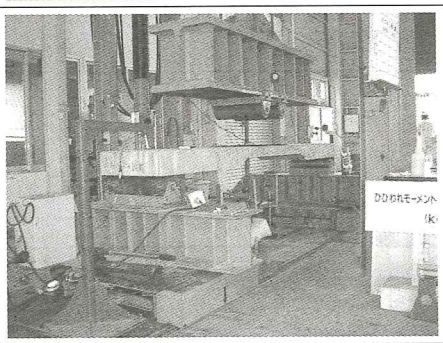
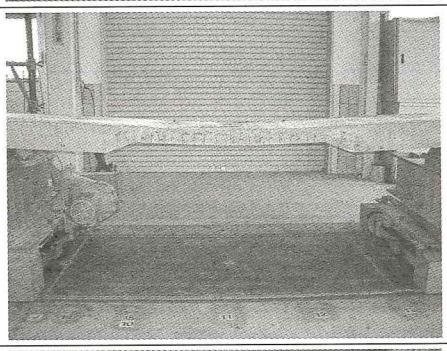
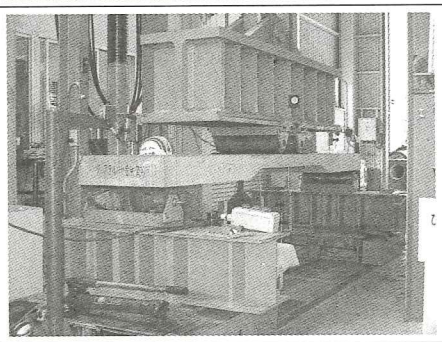
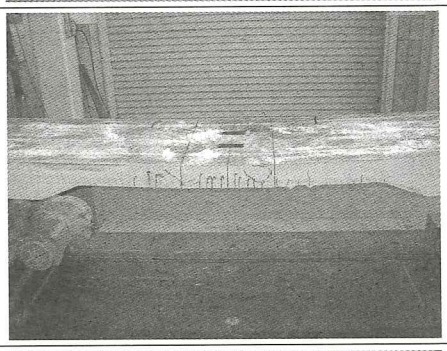
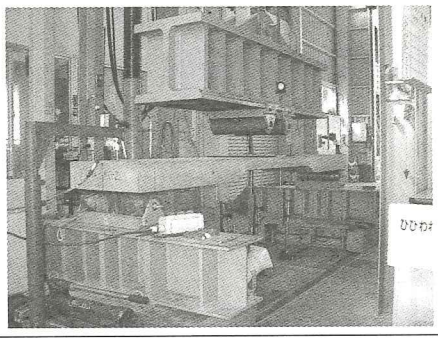
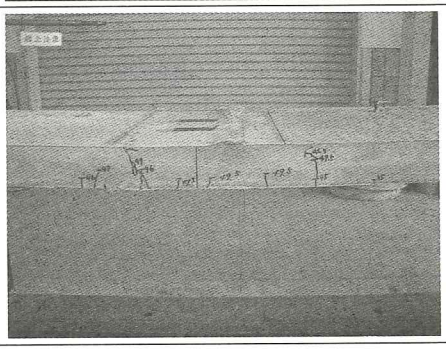


図 2.1.5　荷重－中央部たわみのグラフ

表 2.1.3　測定結果（試験体ごとのひずみ量およびクラック幅）

種　類	備　　考
RC （材齢 17 日）	設計載荷荷重時：鉄筋－330μ 載荷荷重 2 倍時：鉄筋－1450μ ひび割れ幅 0.1 ㎜（最大）
D ｺﾝｸﾘｰﾄ （材齢 24 日）	設計載荷荷重時：コンクリート引張縁－220μ 載荷荷重 2 倍時：コンクリート引張縁－1480μ（最大） ひび割れ幅 0.025 ㎜（最大）
G ｺﾝｸﾘｰﾄ+RC （材齢 22 日）	試験前に収縮クラックが存在する。 設計載荷荷重時：鉄筋－730μ 載荷荷重 2 倍時：鉄筋－1700μ（最大） ひび割れ幅 0.05 ㎜（最大）
D ｺﾝｸﾘｰﾄ 1+RC （材齢 12 日）	設計載荷荷重時：鉄筋－450μ 載荷荷重 2 倍時：鉄筋－1100μ（最大） ひび割れ幅 0.01 ㎜以下（最大） （目視では観測不能）
D ｺﾝｸﾘｰﾄ 2+RC （材齢 20 日）	設計載荷荷重時：鉄筋－330μ 載荷荷重 2 倍時：鉄筋－1070μ（最大） ひび割れ幅 0.01 ㎜以下（最大） （目視では観測不能）

表 2.1.4 試験状況写真一覧

試　験　状　況　一　覧		
	試験状況写真	試験後状況
RC		
Dコンクリート		
Gコンクリート+RC		
Dコンクリート1+RC		
Dコンクリート2+RC		

2.2 裏込め注入材の材料選定試験（STEP2）

2.2.1 試験概要

STEP2は最適な裏込め材を選定するための試験で、既設覆工、STEP1で選定された薄肉部材（Dコンクリート1＋RC）および表2.2.1に示す3種類の裏込注入材で構成された複合部材を製作し、曲げ試験によって裏込め材の特性を判定した。また、比較のために、PCL標準工法としての組合せからなる複合部材（既設覆工、気泡モルタル、および厚さ140mmの断面一様な標準RC部材で構成）についても試験した。STEP2で用いた試験体は、図2.2.1のようにPCL版、裏込め注入材（モルタル）および既設覆工コンクリートで構成され、この順番でコンクリートやモルタルを打設して4種類の試験体を製作した。表2.2.2に試験体種類と曲げ試験を実施した時点の材料強度試験結果を示す。試験体形状を図2.2.1に示し、載荷試験は二点載荷法で行った。

表 2.2.1　裏込め注入材の配合

	設計基準強度 N/mm^2	C：S	W/C	空気量 %	単位量 kg/m^3 セメント C	水 W	細砂 S	気泡剤 A
エアーモルタル	2.0	1:2	71	46	300	213	600	2.7
低強度モルタル	20.0	1:2	65	2	495	322	990	---
高強度モルタル	40.0	1:2	50	2	535	267	1069	---

表 2.2.2　試験体の種類と構成材料の強度特性　（単位は N/mm^2）

	試験体名称			
	標準RC部材	D-RC＋エアモル	D-RC＋低強度	D-RC＋高強度
覆工ｺﾝｸﾘｰﾄ	無筋ｺﾝｸﾘｰﾄ	無筋ｺﾝｸﾘｰﾄ	無筋ｺﾝｸﾘｰﾄ	無筋ｺﾝｸﾘｰﾄ
圧縮強度	29.4	30.9	30.9	29.6
ヤング係数	22874	26831	26831	23337
裏込材種類	エアーモルタル	エアーモルタル	低強度モルタル	高強度モルタル
圧縮強度	2.9	2.3	35.4	48.4
ヤング係数	4350	3568	23249	24634
ＰＣＬ版種別	標準部RC	部分薄肉(Dｺﾝｸﾘｰﾄ1+RC)	部分薄肉(Dｺﾝｸﾘｰﾄ1+RC)	部分薄肉(Dｺﾝｸﾘｰﾄ1+RC)
圧縮強度	45.4	169.3	206.3	200.0
ヤング係数	31609	48341	52057	51242

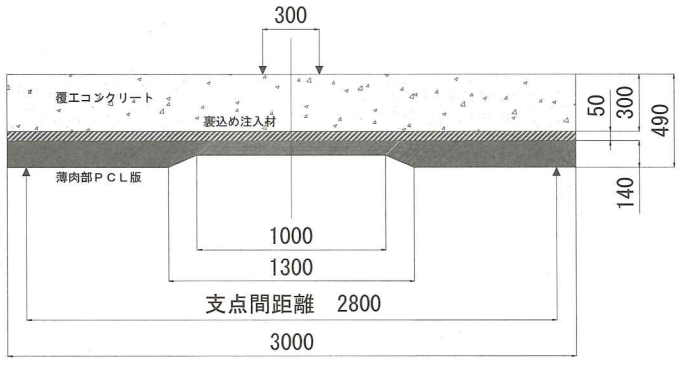


図 2.2.1　試験体の形状寸法と載荷方法（単位：mm）

2.2.2 試験結果

図 2.2.2 および図 2.2.3 に試験体ごとの荷重とたわみの関係を示す。図 2.2.2 は中央部たわみの範囲を 6mm までとし、試験結果（荷重とたわみの関係）を比較したものである。

裏込め材に気泡モルタル(エアモルタル)を使用したDコンクリート＋エアモル部材は、標準 RC 部材＋エアモルの組合せとほぼ同じ挙動を示したのに対し、裏込め材に低強度もしくは高強度モルタルを使用した D コンクリート+低強度、および D コンクリート＋高強度の試験体では、最大荷重が標準 RC 部材＋エアモルのほぼ 4 倍になった。また、裏込め材の強度（低強度および高強度）による違いは確認できなかった（むしろ、低強度のほうが最大荷重は大きかった)。試験の結果から、一体性に優れるという特性を考慮して、設計基準強度が 20N/mm² の低強度モルタルを使用した D コンクリート＋低強度の組合せが、部分薄肉部材として最適であると判断した。

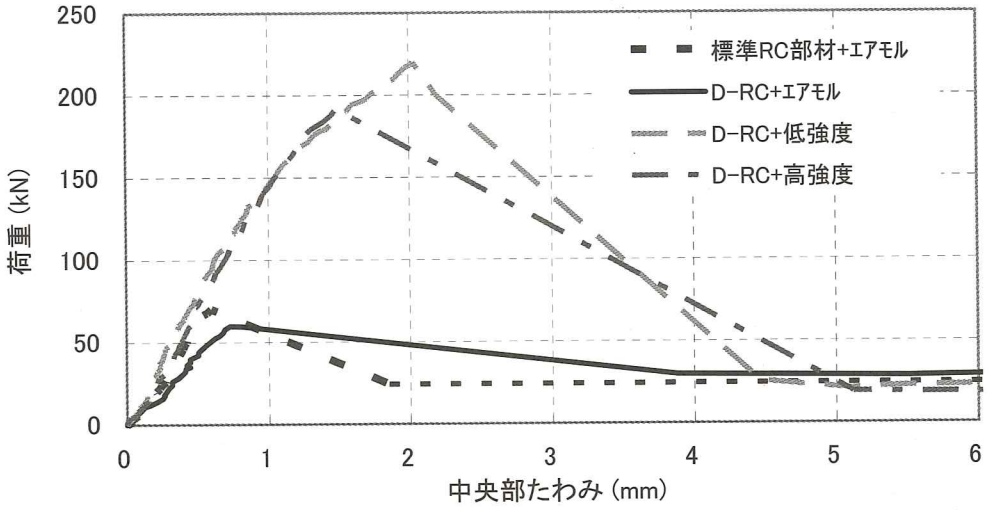


図 2.2.2　荷重とたわみの関係（6mm まで）

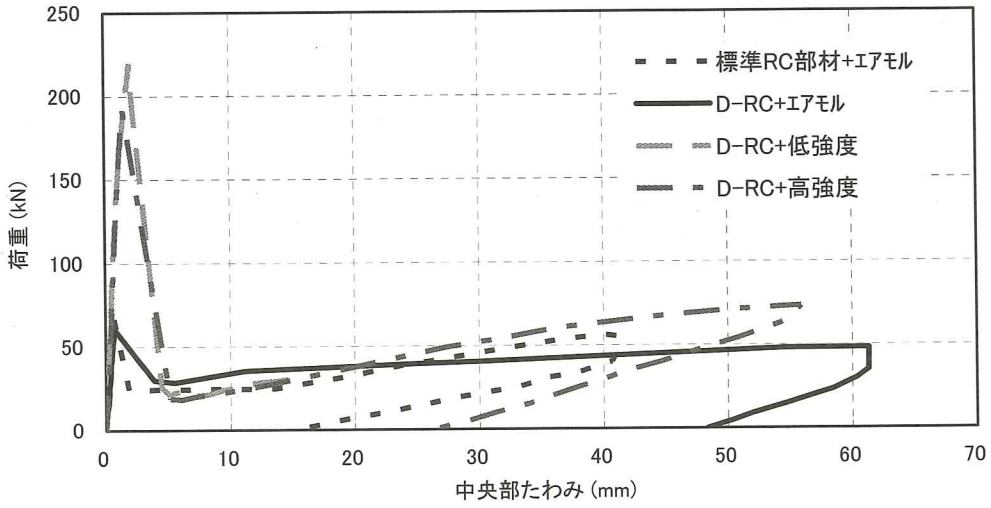
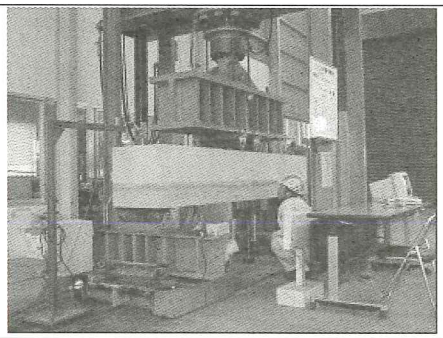
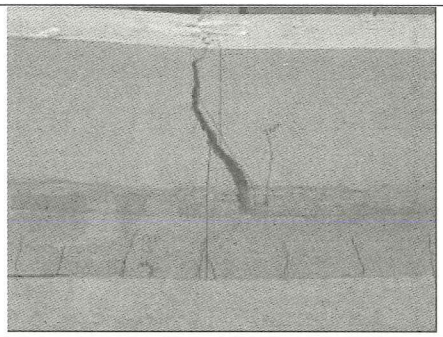
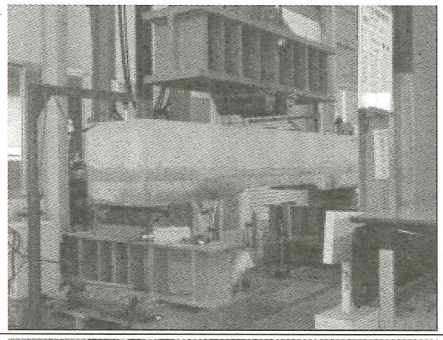
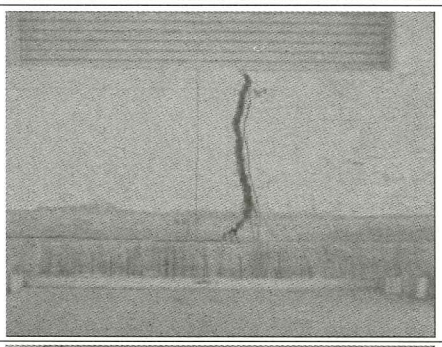
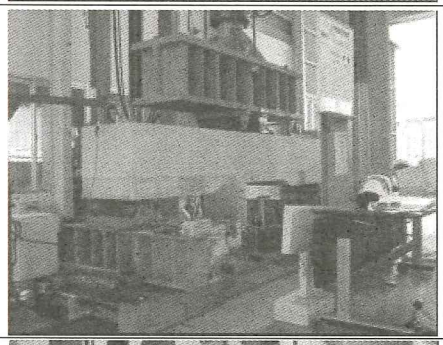
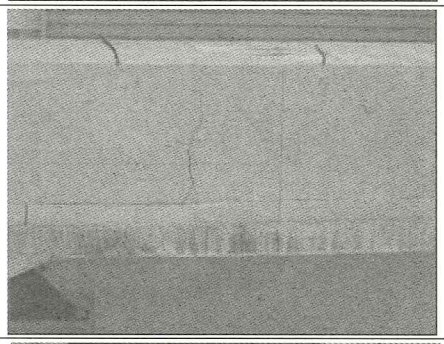
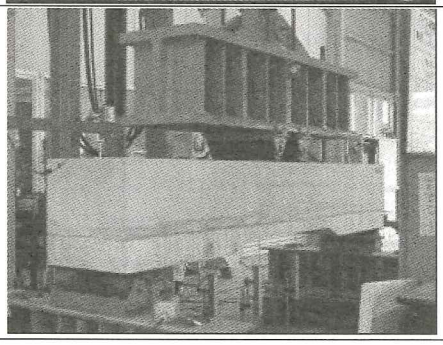
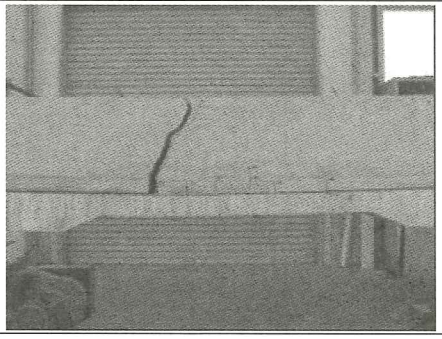


図 2.2.3　荷重とたわみの関係

表 2.2.3　試験状況写真一覧

試　験　状　況　一　覧		
	試験状況写真	試験後状況
標準RC部材		
D-RC+エアモル		
D-RC+低強度		
D-RC+高強度		

2.3 裏込注入材に関する二面せん断試験（STEP3）

2.3.1 試験概要

実大規模載荷試験の結果を解析する上で、裏込め注入材（モルタル）と PCL 版および覆工コンクリートとの付着力が重要となるため、図 2.3.1 に示す二面せん断試験を行い、試験データの蓄積を行った。

裏込め材と PCL 版および覆工コンクリートとの付着強さは、図 2.3.1 に示す試験体を製作して圧縮せん断試験（JIS K 6852）で求めることとした。試験体の種類は、図 2.3.2 に示す 9 種類で、それぞれ 3 個製作した。各試験体はそれぞれ 3 分割されている。中央部分の強度水準は 3 水準とし、18N/mm² （覆工コンクリートを想定）、40N/mm² （標準 RC 部材を想定）、ならびに 200N/mm² （D コンクリートを想定）とした。左右の部分は 3 種類の裏込め注入材を想定するもので、それぞれの材料強度は 2N/mm² （気泡モルタル）、20N/mm² （低強度モルタル）、ならびに 40N/mm² （高強度モルタル）で、中央部に打継いで試験体を製作している。

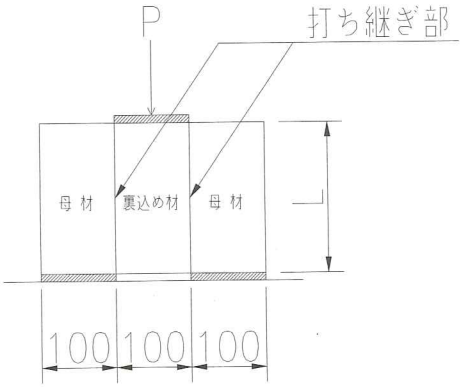


図 2.3.1　試験体形状図（単位：mm）

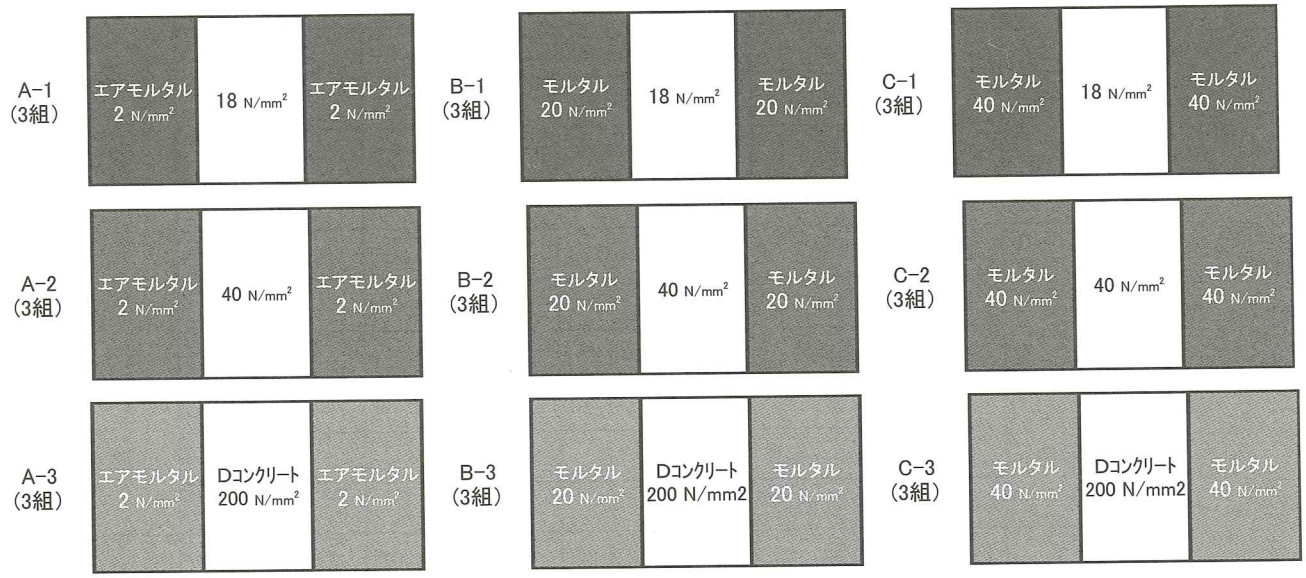


図 2.3.2　試験の種類

2.3.2 試験結果

二面せん断試験の結果を表 2.3.1 に示す。また、写真 2.3.1、写真 2.3.2 に供試体製作状況および載荷試験状況を示す。試験結果の平均値から判断して、20N/mm² の低強度モルタルが強度面で優れている傾向にあるが、同一条件でも結果には明らかなバラツキのあることが判った。したがって、今回の試験結果は参考値として止めることとし、さらなるデータの蓄積を必要とする。

表 2.3.1　二面せん断試験結果

No.		P (N)	h (mm)		b (mm)		τ (N/mm²)	
A-1	1	6420	199.90 199.90	199.90	101.00 101.60	101.30	0.159	0.150
	2	6330	199.90 199.90	199.90	101.80 101.60	101.70	0.156	
	3	5400	199.90 199.90	199.90	100.30 100.40	100.35	0.135	
A-2	1	3700	200.00 200.00	200.00	101.40 101.00	101.20	0.091	0.075
	2	3590	199.80 199.90	199.85	101.50 102.10	101.80	0.088	
	3	1850	200.00 200.00	200.00	100.40 100.70	100.55	0.046	
A-3	1	3560	199.80 199.95	199.88	101.20 101.30	101.25	0.088	0.087
	2	3270	199.95 199.85	199.90	101.40 100.70	104.20	0.078	
	3	3810	199.80 199.60	199.70	101.60 101.10	101.40	0.094	
B-1	1	7840	199.90 199.90	199.90	100.60 99.60	100.10	0.196	0.501
	2	33140	200.10 200.00	200.05	101.10 101.70	101.40	0.817	
	3	19990	200.00 200.00	200.00	101.60 101.85	101.73	0.491	
B-2	1	1400	199.80 199.90	199.85	100.90 101.90	101.40	0.035	0.058
	2	3190	199.90 199.80	199.85	101.20 102.45	101.83	0.078	
	3	2500	200.10 200.00	200.05	101.40 101.60	101.50	0.062	
B-3	1	18140	200.00 200.00	200.00	101.35 100.60	100.98	0.449	0.350
	2	6040	199.70 199.70	199.70	101.45 102.30	101.88	0.148	
	3	18360	199.80 199.70	199.75	101.10 101.50	101.30	0.454	
C-1	1	14170	199.80 199.70	199.75	101.30 102.00	101.65	0.349	0.252
	2	3090	200.00 200.00	200.00	101.50 101.25	101.38	0.076	
	3	13410	200.00 200.10	200.05	101.10 101.35	101.23	0.331	
C-2	1	1040	200.00 200.00	200.00	101.15 101.20	101.18	0.026	0.026
	2	脱型時に破壊	—	—	—	—	—	
	3	脱型時に破壊	—	—	—	—	—	
C-3	1	3340	199.80 199.90	199.85	101.90 101.40	101.65	0.082	0.098
	2	4160	200.00 199.90	199.95	101.40 101.85	101.63	0.102	
	3	4450	199.95 200.10	200.03	101.60 100.90	101.25	0.110	

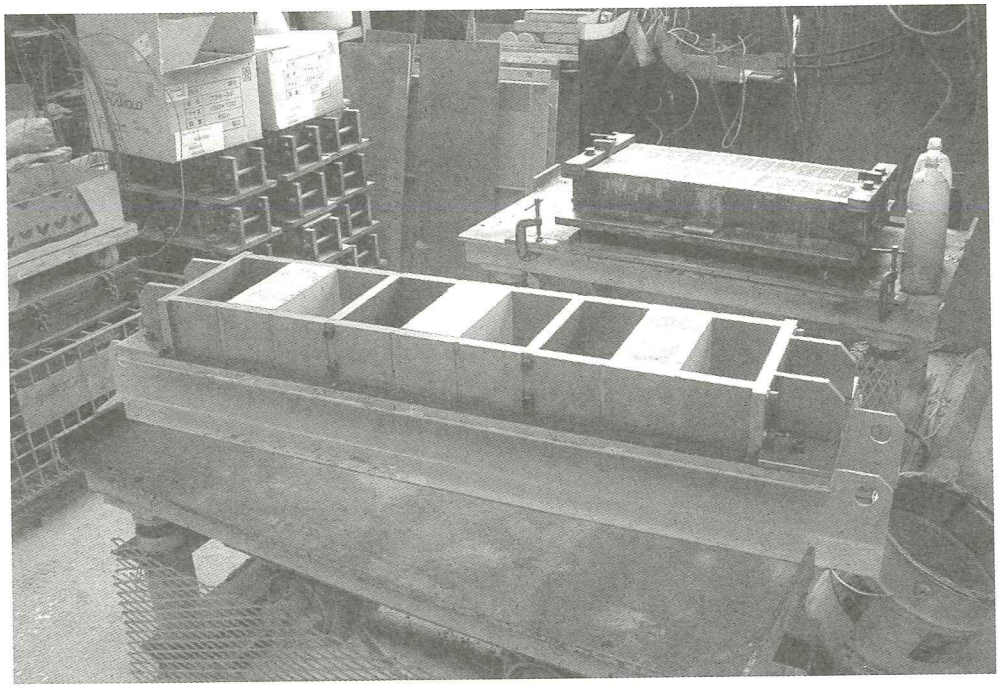


写真 2.3.1 供試体製作状況

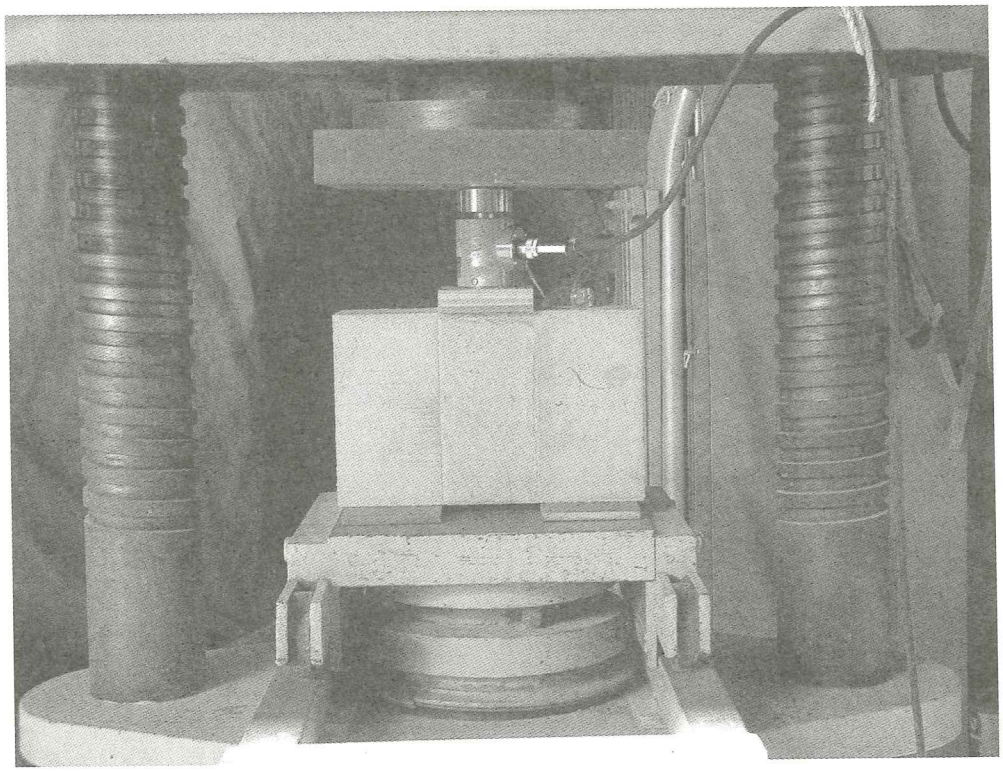


写真 2.3.2 載荷試験状況

2.4 接合部の確認試験（部分薄肉部と標準 RC の接合性能）（STEP4）

2.4.1 試験概要

部分薄肉部 PCL 版は薄肉部を鉄筋で補強した D コンクリートで製作し、その他の部分は鉄筋コンクリート（RC）部材としている。両者間には、材質が異なる打継ぎ目が存在するため、その箇所が弱点になる可能性もある。そこで、図 2.4.1 に示す試験体と載荷方法（試験装置）の組合せで、打継ぎ部の耐力を調査した。載荷方法は二点載荷方法とし、打継ぎ部を載荷点中央になる位置に配置した。また、鉄筋ゲージの取付け位置図を図 2.4.2 に示す。

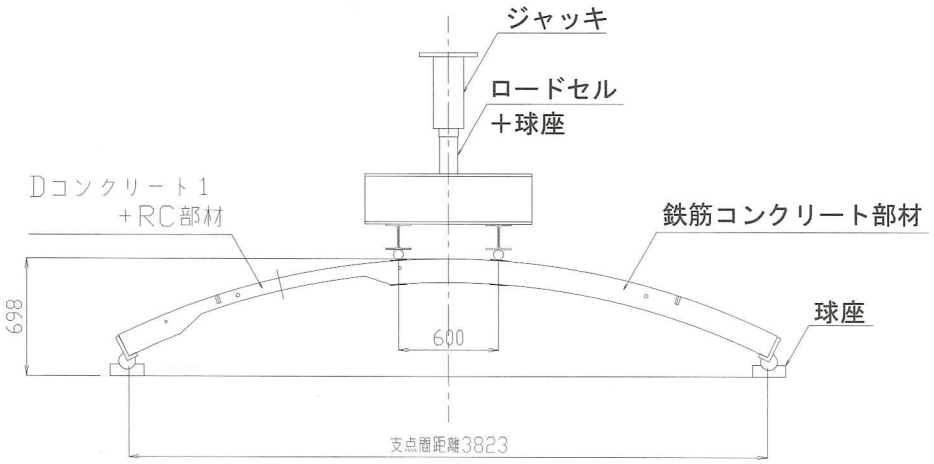


図 2.4.1　試験体形状と載荷方法（試験装置）（単位：ｍｍ）

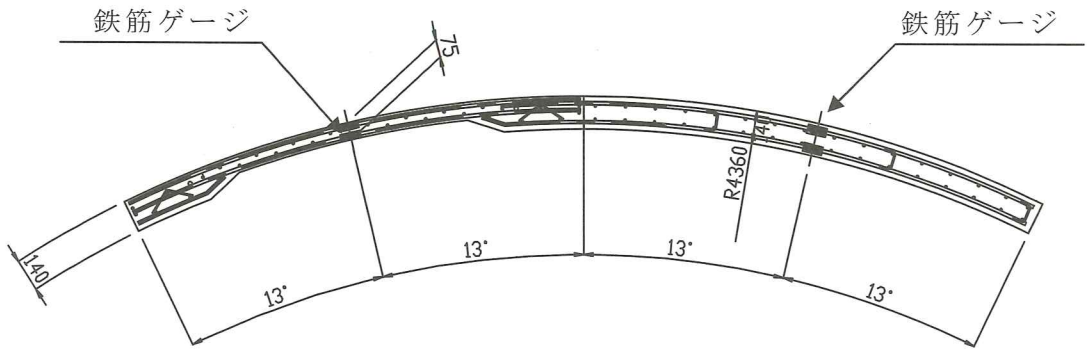


図 2.4.2　鉄筋ゲージ取付け位置（単位：ｍｍ）

2.4.2 試験経緯

載荷試験は、脚部の支点構造をピン支点として載荷試験を行った（1 回目）が載荷過程で支点の移動が発生したため、再度、支点構造を水平ローラーに替えて試験を行った（2 回目、試験体は同じ）。以下に試験の経緯を示す。

① 1回目の試験経過・脚部をピン支点となる治具を用いて載荷試験を開始した。

・載荷荷重 55kN で打継ぎ目部にひび割れを目視確認

・載荷荷重 60kN で RC 本体部にひび割れを目視確認

・載荷荷重 65kN で D コンクリート部にひび割れを目視確認

・脚部の移動を確認したため、載荷試験を中止

② 2回目の試験経過・脚部を水平ローラー支点となる治具にて再度載荷試験を行った。

・試験体中央変位および打継ぎ部目開きの挙動から判断して打継ぎ部鉄筋が降伏したと考え試験を終了した。

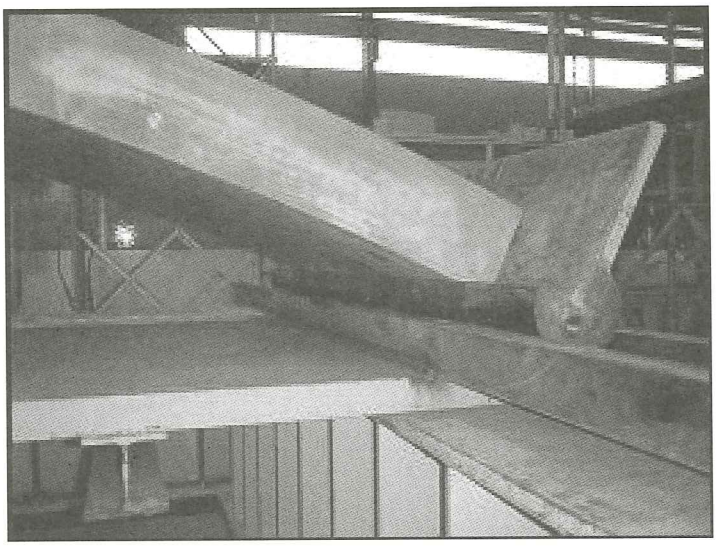


写真 2.4.1 脚部支点構造（1 回目）

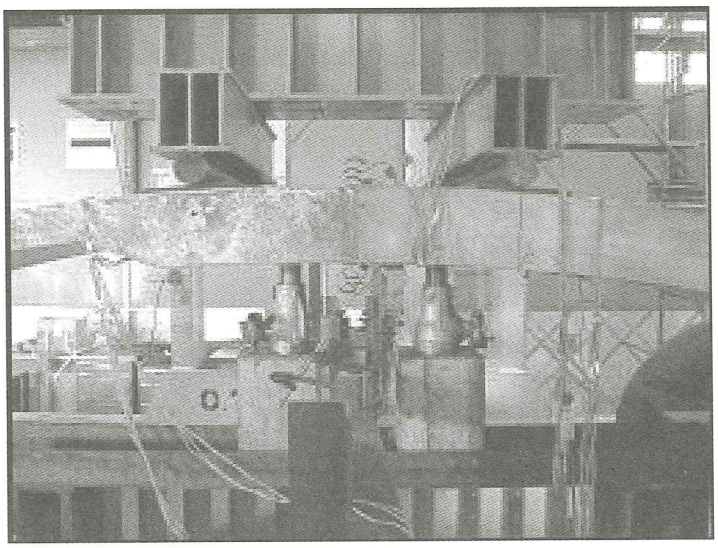


写真 2.4.2 ひび割れ状況（1 回目）



写真 2.4.3　脚部支点の構造変更（２回目）

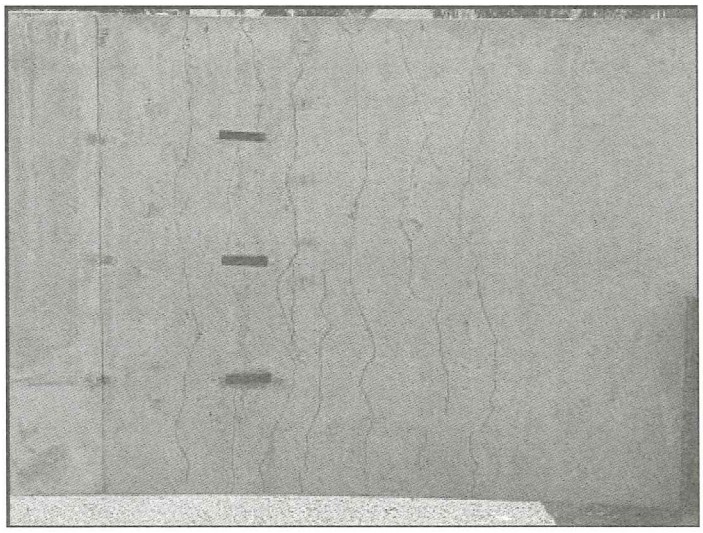


写真 2.4.4　RC 部のひび割れ状況（２回目）

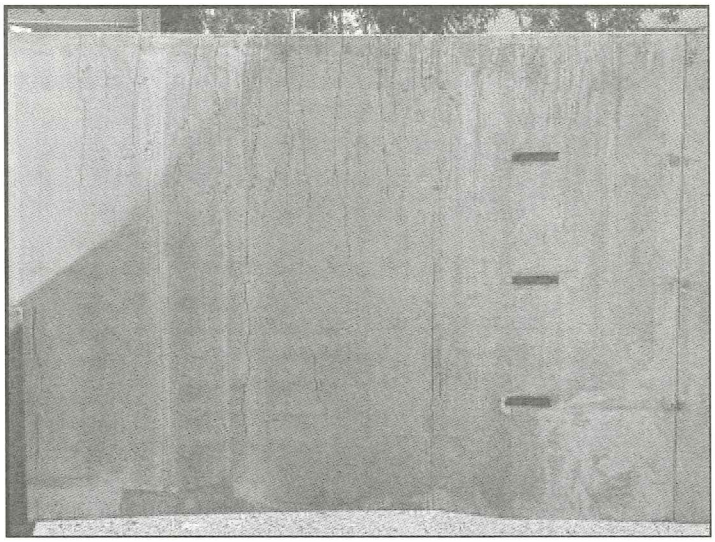


写真 2.4.5　D 部のひび割れ状況（２回目）

2.4.3 試験結果

1)　1回目試験

図 2.4.3 に試験体中央における荷重と変位の関係を示す。また、図 2.4.4 に試験体中央部に設けた打継ぎ部の目開き量と荷重の関係を示す。なお、図中の凡例の数字は試験サイクル数を示す。

図 2.4.3 において、1サイクル目で荷重が 30 kN を越えると荷重と変位の勾配が緩やかになっている。これは荷重が 30 kN を越える近辺で支点が水平移動をおこしていたためと考えられる。試験中にひび割れが目視で確認されたのは、打継ぎ部では載荷荷重 55kN、鉛直変位 5mm の時、鉄筋コンクリート本体では載荷荷重 60kN、鉛直変位 7mm の時、D コンクリート部では載荷荷重 65kN、鉛直変位 17mm の時点であった。ひび割れの発生状況から判断して、打継ぎ部が欠陥となっているような状況は観察できず、通常の RC 梁の載荷試験結果と類似することがわかった。

2)　2回目試験（支点を水平ローラーに変更）

図 2.4.5 に試験体中央部における荷重と変位の関係を示す。また、図 2.4.6 には試験体中央部に設けた打継ぎ部の荷重と目開き量との関係を示す。

図 2.4.5 より、載荷重が 30kN を越えると、曲線の勾配が緩やかに変化し、塑性域に入ったことがわかる。一方、図 2.4.6 では、載荷重 36kN 付近で打継ぎ部の目開き量が急増していることから、図 2.4.5 の曲線勾配の変化は目開き量の増加が原因であると思われる。また、試験は、荷重と変位曲線が水平に近づいた時点で載荷を中止した。図 2.4.7 には、薄肉部材と標準部材のそれぞれ円弧方向中央部断面下縁側に設置した鉄筋の荷重とひずみ曲線を示す。これによれば、載荷を終了する荷重段階（55kN）では、各部材中央に設置した鉄筋のひずみは 1300～1500μ で、降伏点に近いことがわかる。また、載荷初期には D コンクリート部材の鉄筋ひずみが大きいものの、載荷荷重が増加するにつれて D コンクリート部材の鉄筋ひずみは RC 部材の鉄筋ひずみより小さくなっている。これは、載荷初期では D コンクリート部材の曲げ剛性が標準部材より小さいこと、また、逆転する原因としては、D コンクリート部材中では鋼繊維の混入効果によってひび割れが分散し、その結果として鉄筋ひずみが小さくなったものと考えられる。

図 2.4.8 にはひび割れ状況図を示す。これによれば、D コンクリート部の断面が変化する部分にはひび割れが集中して発生していないことが確認できた。また、載荷点間にはひび割れが少ないが、その近傍にはひび割れが多数分散して発生していた。載荷点間にひび割れが少ないのは、打継ぎ部にひび割れが集中したためと考えられる。

以上より、一般的な鉄筋コンクリート部材のひび割れ分布状態と比較して、打継ぎ部にひび割れは集中したがその近傍に多数ひび割れが分散して発生していたこと、ならびに、D コンクリートの断面が変化する部分に異常なひび割れのないことなどを確認することができた。したがって、本試験体における継ぎ手部の構造には特段の欠点のないことが判明したため、載荷形式Ⅰおよび載荷形式Ⅱ試験に用いる実物大試験体の製作は、本試験体と同様の方法で行うこととした。

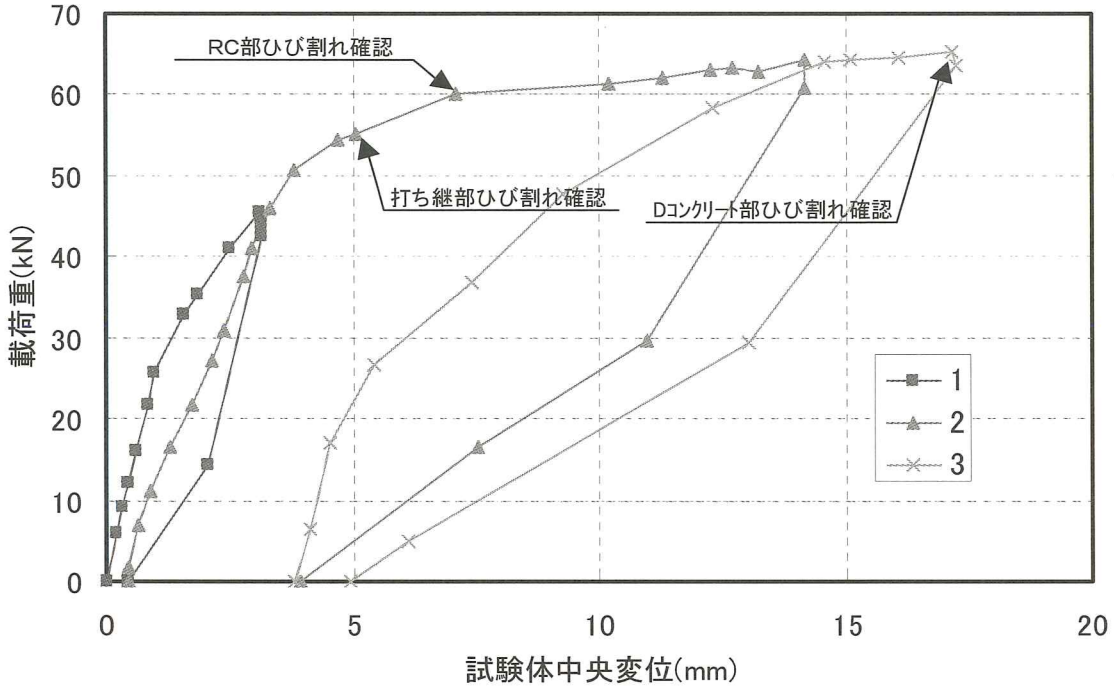


図 2.4.3　荷重と変位の関係（1回目）

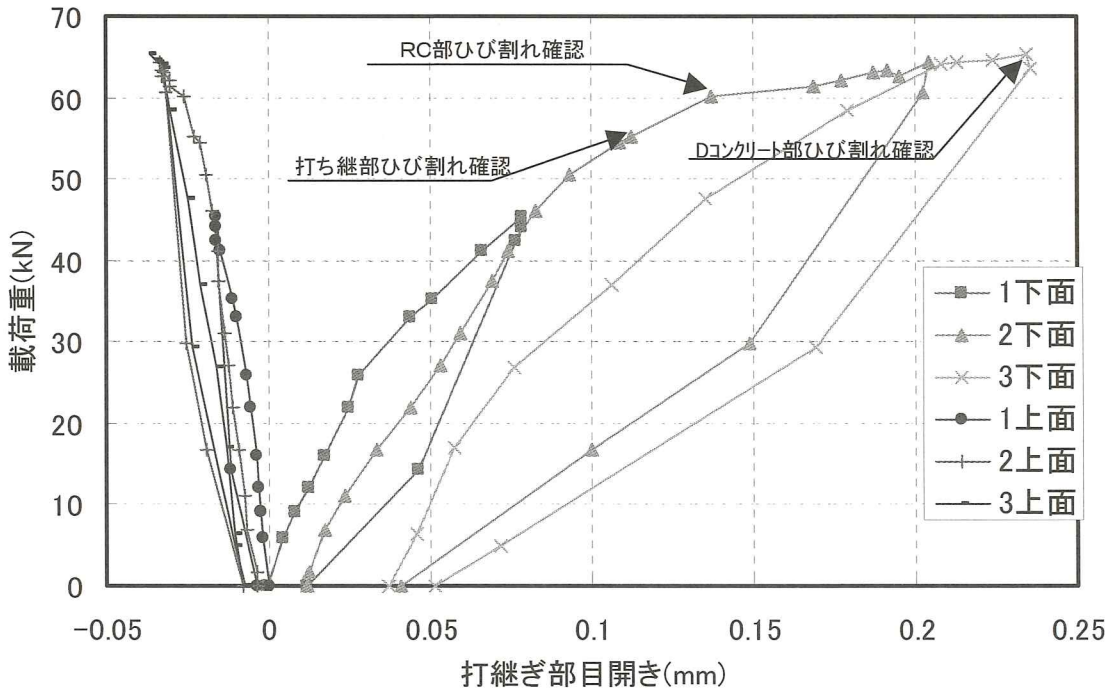


図 2.4.4　荷重と打ち継部の目開きの関係（1回目）

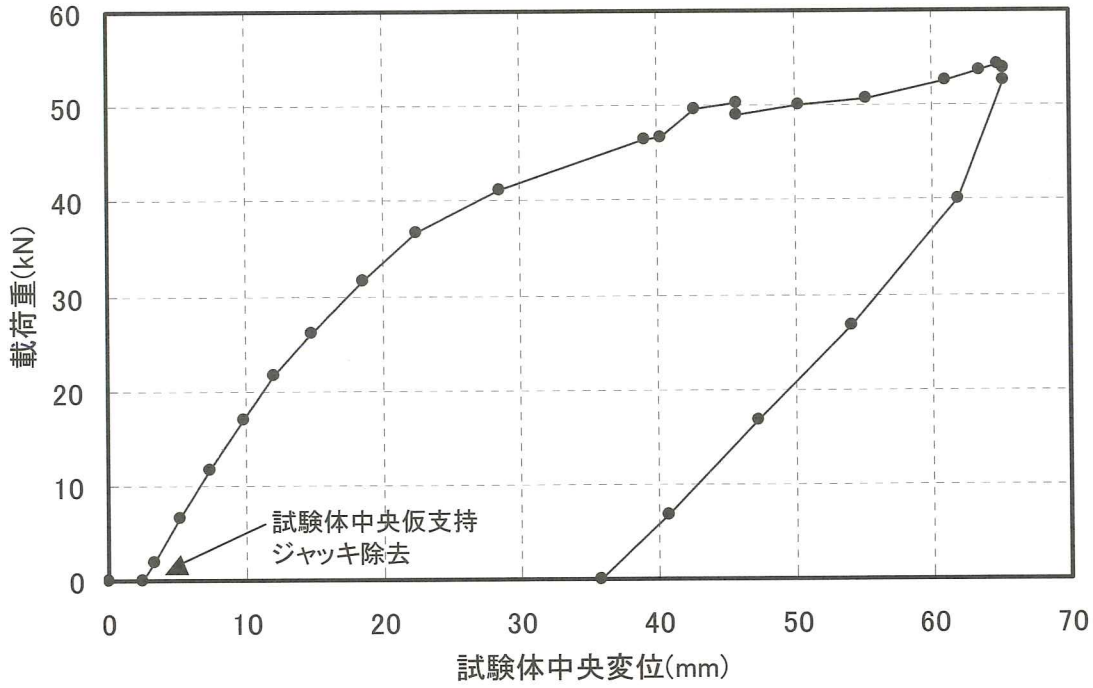


図 2.4.5　荷重と変位の関係（2回目）

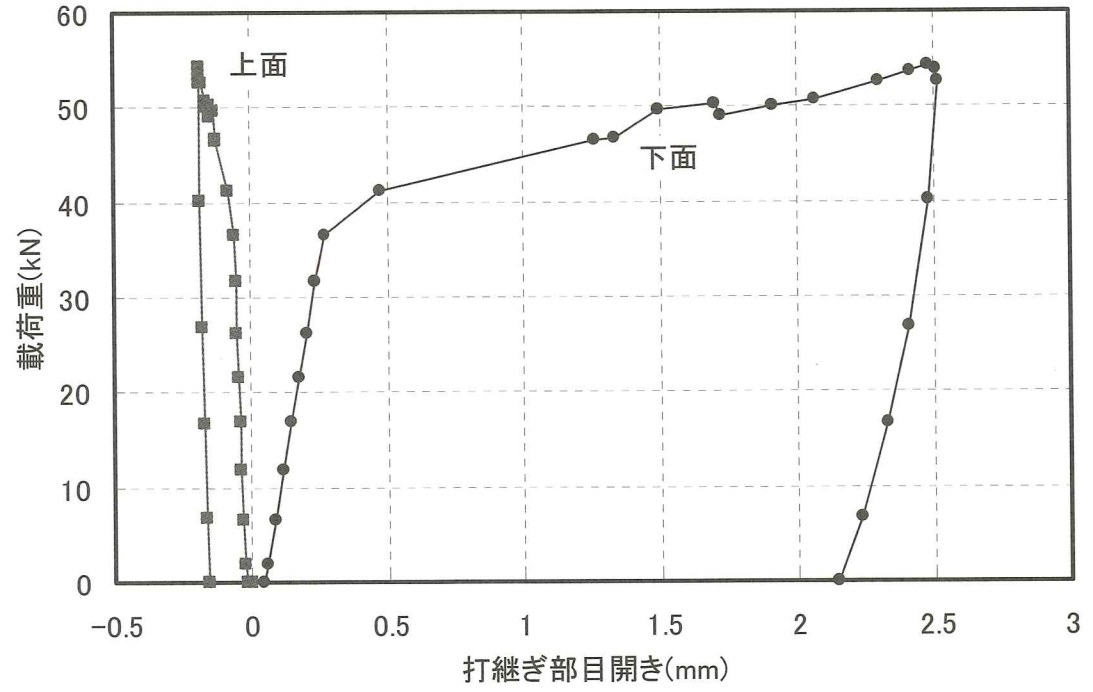


図 2.4.6　荷重と打ち継部の目開きの関係（2回目）

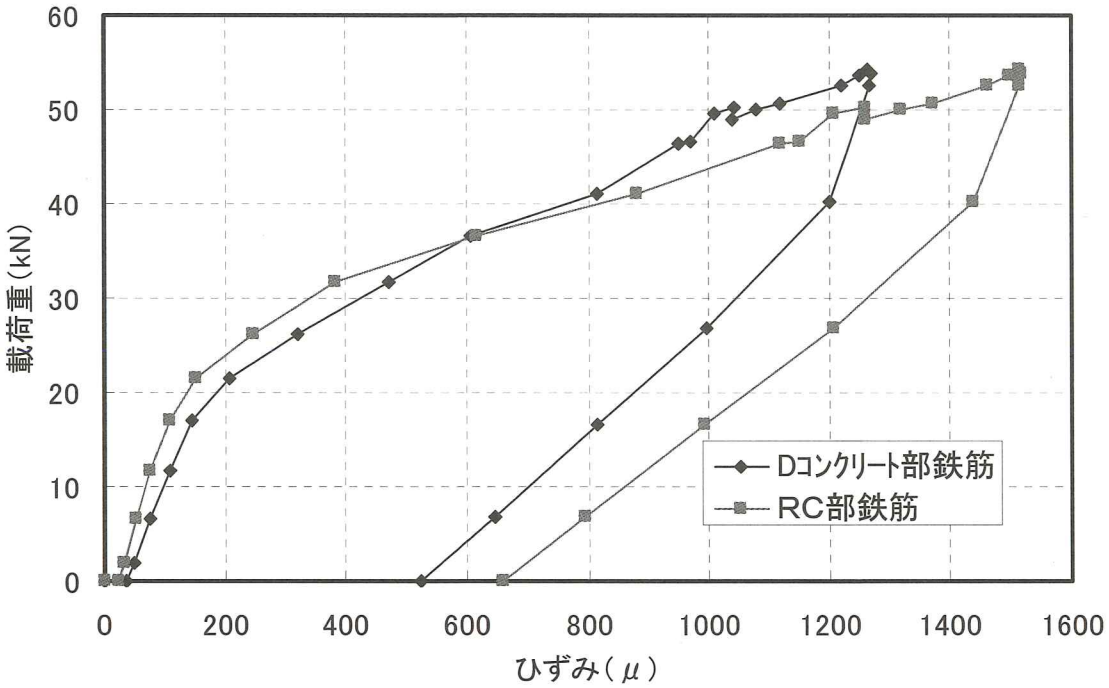
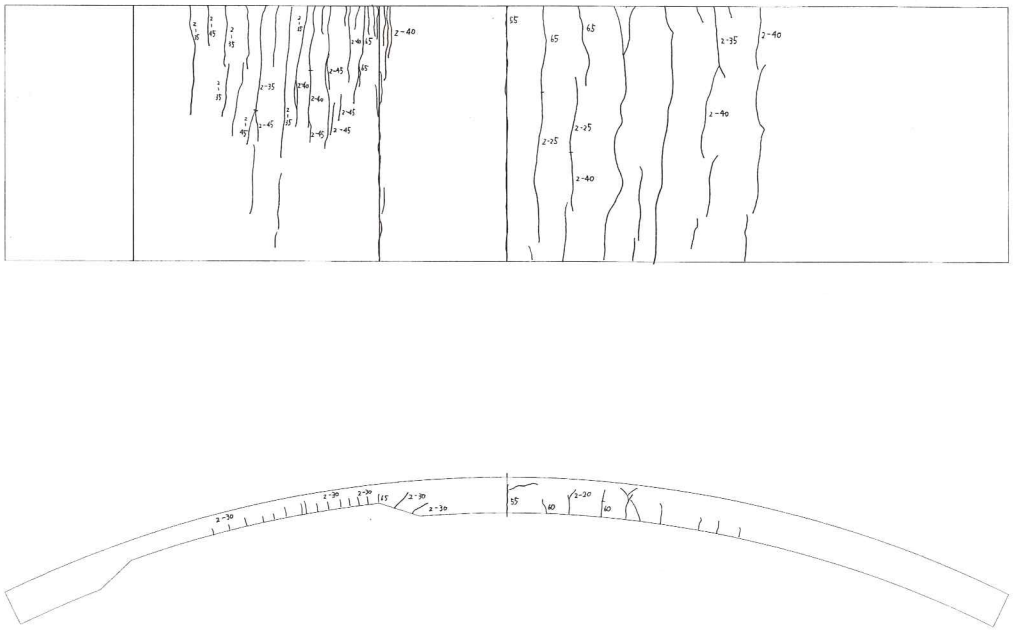


図 2.4.7　荷重とひずみの関係（2回目）



※記載の数値はステップ時の荷重(kN)を示す。

図 2.4.8　ひび割れ状況図

3. 部分薄肉化 PCL 版の仕様

STEP1 から STEP4 の試験結果をもとに決定した部分薄肉化 PCL 版の仕様を表 3.1.1、使用材料を表 3.1.2 にそれぞれ示す。また、標準部材厚が 14cm の場合の形状寸法例を図 3.1.1 に示す。標準仕様の PCL 版は、トンネル弧長ごとに部材厚さと鉄筋量が設定されており、現場条件に適合するようその都度厚さや鉄筋量を調整している。そのため、薄肉部の厚さおよび鉄筋量については、トンネル弧長ごとの標準部材厚および鉄筋量（一般的な条件から算出された鉄筋量）に対し、長期の許容曲げ耐力が等しくなるよう設定することとした。長期の許容曲げ耐力を算出する場合の鉄筋許容応力度については、PCL 版標準部では通常採用している 140N/mm^2、薄肉部では鉄筋の許容限界に近い 200N/mm^2 とした。

表 3.1.1　部分薄肉化 PCL 版の仕様（単位幅当り）

弧　長 m	PCL 版標準厚と鉄筋量		薄肉部設定厚と鉄筋量	
	厚さ　cm	鉄筋種類・本数	厚さ　cm	鉄筋種類・本数
2 ~ 4	8	D10－8 本	5.0	D10－10 本
3 ~ 5	10	D13－8 本	5.5	D13－10 本
4 ~ 6	12	D10－8 本	6.0	D13－12 本
5 ~ 7	14	D13－8 本	7.5	D13－15 本

表 3.1.2　部分薄肉化 PCL 版の使用材料

	設計基準強度と使用材料
標準部	設計基準強度 f' ck=40N/mm^2 の鉄筋コンクリート
薄肉部	設計基準強度 f' ck=200N/mm^2 の超高強度鋼繊維補強コンクリート

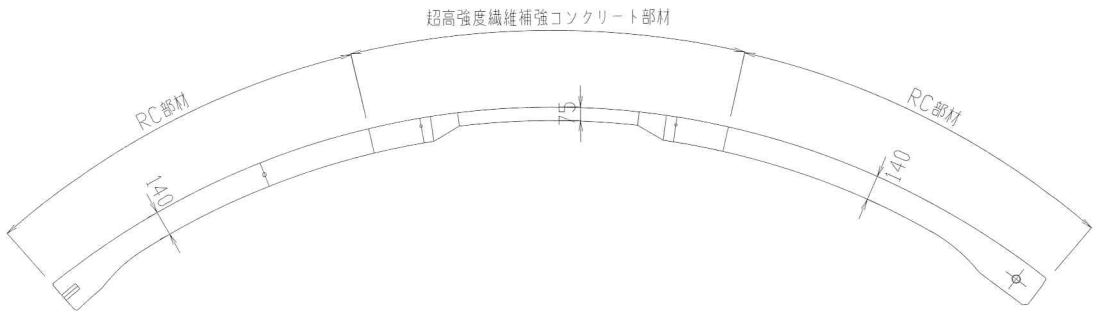


図 3.1.1　部分薄肉化 PCL 版の形状寸法例（部材厚 14cm）

4. 耐荷力 - 実大規模の覆工載荷試験（STEP5）

4.1 試験概要

試験に用いた内巻き補強の概要図を図 4.1.1 に示す。補強方法は、トンネルの覆工コンクリートに相当する部分（内側半径 4550mm、厚さ 300mm）を現場打ちコンクリートで製作し、次に、その内側に予め工場で製造した 2 体の部分薄肉化 PCL 版を 50mm の隙間を設けてセットしたのち、覆工部と PCL 版で形成される隙間に裏込めモルタルを注入する方法とした。

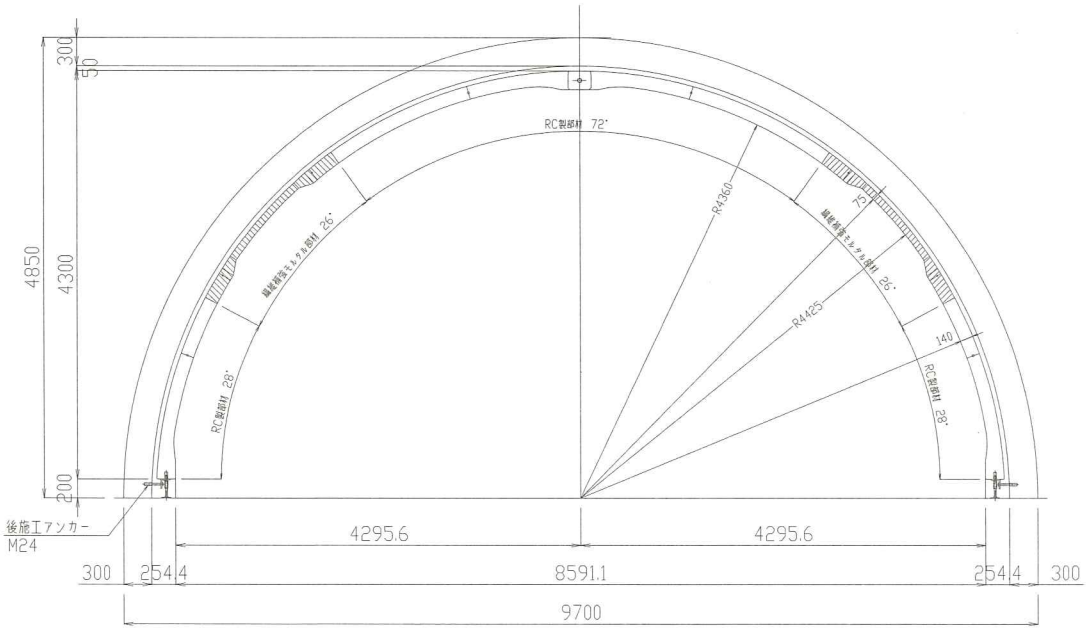


図 4.1.1 内巻き補強概要図

4.2 試験方法

4.2.1 載荷形式 I

(1) 損傷載荷

覆工供試体は、以下の載荷方法により耐荷力の期待できない状態を模擬した（損傷載荷）。載荷方法は、まず供試体と載荷装置のなじみをとるため、荷重制御によって全てのジャッキが 20kN になるまで覆工供試体に載荷した（図 4.2.1）。次に、ジャッキが 20kN になった時点で 10° ～70° ならびに 110° ～170° に配置したジャッキのバルブを閉じ、80° 90° 100° の 6 ジャッキ（2 段 6 本）については、変位制御に切り替えて載荷した。載荷は最大荷重を確認し、最大荷重の約 95%にて荷重低下するまで続行し、その後荷重を除荷した。（図 4.2.2）。

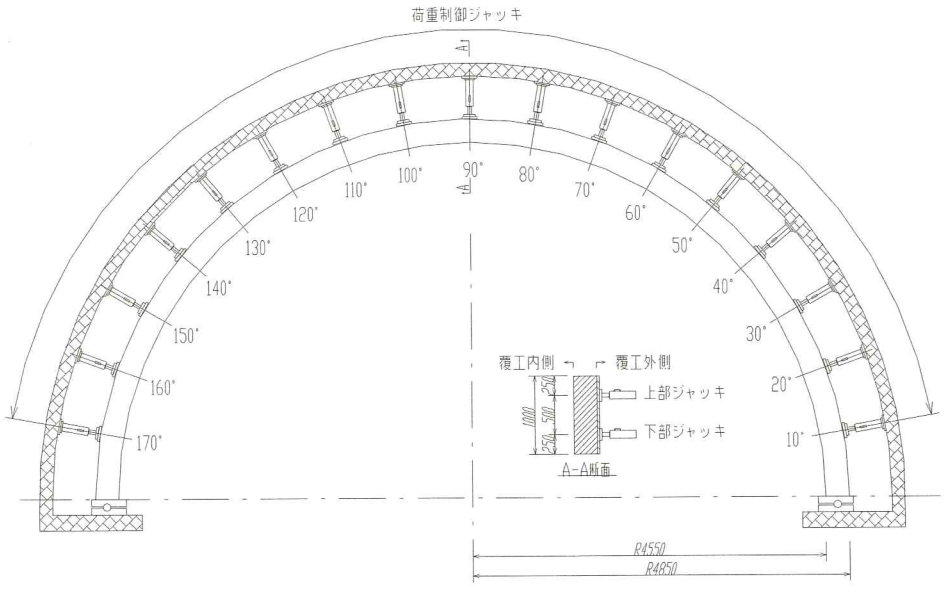


図 4.2.1　初期荷重 20kN 導入時の載荷ジャッキ配置図

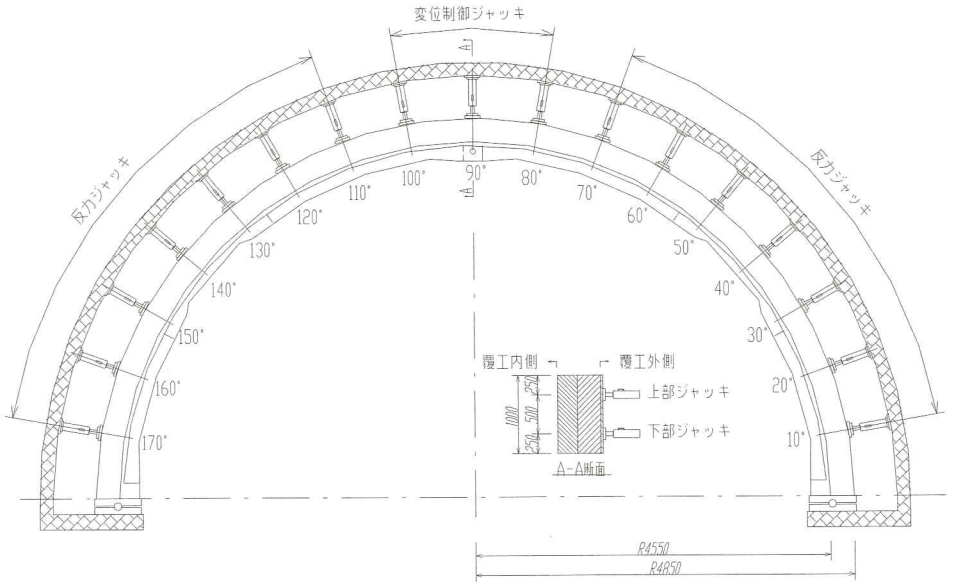


図 4.2.2　変位制御載荷時の載荷ジャッキ配置図

(2)　補強後載荷

損傷載荷によって損傷を受けた覆工コンクリートの内側に、2 体の部分薄肉化 PCL 版および裏込めモルタルを用いて補強し、所要の養生期間を経たのち、損傷載荷と同様の要領で試験体が破壊するまで載荷した（補強後載荷）。ここで、覆工コンクリートと PCL 版の隙間にはセメントと砂の比率が 1：2 のモルタルを充填した。

4.2.2　載荷形式Ⅱ

載荷形式Ⅱで用いた覆工コンクリート部は、あらかじめ、50°～70°および 110°～130°の 2 箇所に斜め方向のスリット（厚さ 0.5mm のテフロンシートを厚さ 2.0mm のステンレス板で挟んで形成）を設け、現場打ちで製作し、その内側を載荷形式Ⅰと同様、部分薄肉化 PCL 版と裏込め材で補強し試験体とした。ここで、覆工コンクリート部に設けたスリットは、せん断クラックが覆工部に存在している状態を模擬したものである。載荷ジャッキの配置状況を図 4.2.3 に示す。載荷方法は、全てのジャッキを荷重制御によって 20kN まで載荷し、試験体の左右に異常なひずみや変位などの無いことを確認したのち、荷重制御によって破壊まで載荷した。

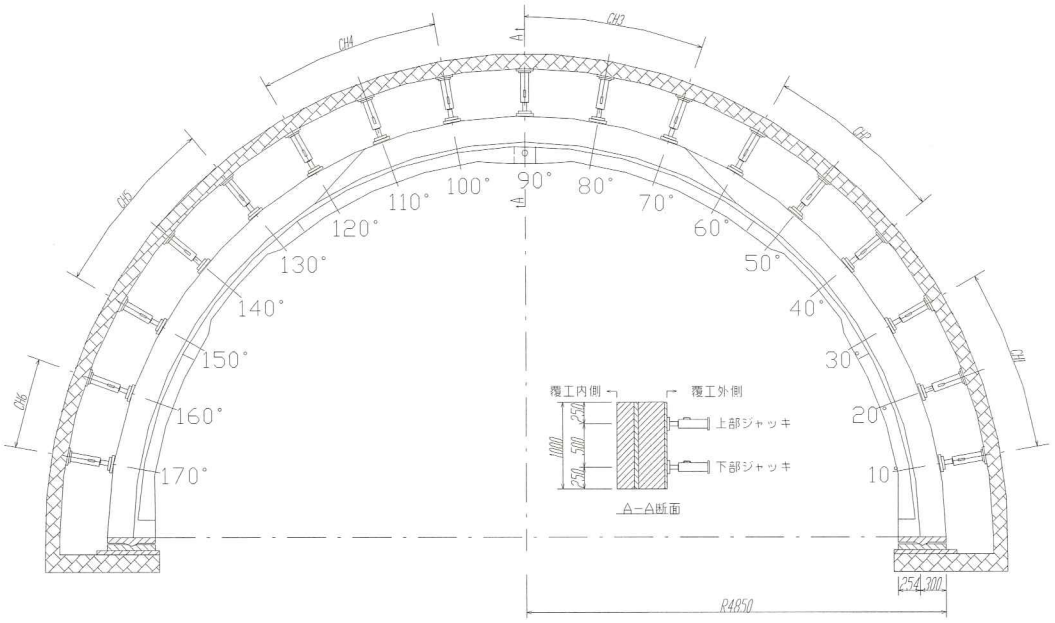


図 4.2.3　試験体と載荷ジャッキの配置状況

4.3 使用材料

4.3.1 覆工コンクリート

覆工コンクリートに使用した材料、レディミックスコンクリートの配合計画（呼び強度など）、ならびに配合表を、表 4.3.1、表 4.3.2 および表 4.3.3 にそれぞれ示す。

表 4.3.1 使用材料

セメント	種類	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	密度 3.16 kg/cm³
細骨材	砂	行方郡麻生町産	
	砕石	茨城県新治郡産	
粗骨材	砕石	茨城県新治郡産	
	砕石	筑波（新治）産	
混和剤	種類	AE 減水剤標準形（Ⅰ種）	
水	上澄水		

表 4.3.2 配合計画表

コンクリートの種類による記号	呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法による記号	セメントの種類による記号
普通	18	12	40	N

表 4.3.3 配合表

水ｾﾒﾝﾄ比 W／C(%)	細骨材率 S／A(%)	単位量（kg/m³）				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE
66.0	42.6	157	238	804	1120	2.52

4.3.2　裏込め材

裏込め材に用いた材料および配合を、表 4.3.4 および表 4.3.5 に示す。

表 4.3.4　使用材料

セメント	種類	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	密度 3.16 kg/cm³	単位容積重量 1500 kg/m³
細骨材	産地	行方郡麻生町産		
混和剤	種類	AE 減水剤標準形（Ⅰ種）		
水	上澄水			

表 4.3.5 モルタル配合表

ｾﾒﾝﾄ細骨材比 C：S	水ｾﾒﾝﾄ比 W／C(%)	単位量（kg/m³）			
		水 W	セメント C	細骨材 S	混和剤 AE
1：2	41.9	250	597	1336	6.33

4.3.3　内巻き補強（部分薄肉 PCL 版）

内巻き補強（部分薄肉 PCL 版）に用いた材料を表 4.3.6 に示す。また、標準 PCL 版の配合計画、示方配合、ならびに薄肉部の配合を、表 4.3.7、表 4.3.8 および表 4.3.9 にそれぞれ示す。

表 4.3.6　使用材料

名　　称	規　格　・　品　名		
鉄筋	SD295A および SD345A		
セメント	種類	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	密度 3.16 g/cm³
超高強度鋼繊維コンクリート	種類	鋼繊維（FM）	密度 2.56 g/cm³
細骨材	産地	茨城県鬼怒川産	
粗骨材	産地	茨城県岩瀬町産	
混和剤	種類	減水剤　標準形（Ⅰ種）	
水	上澄水		

表 4.3.7　PCL 版標準部　配合計画表

ｺﾝｸﾘｰﾄの種類による記号	呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法による記号	ｾﾒﾝﾄの種類による記号
普通	40	10	20	N

表 4.3.8　PCL 版標準部　配合表

水ｾﾒﾝﾄ比 W／C(%)	粗骨材率 S／A (%)	単位量（kg/m³）				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE
37.7	42	155	411	764	1072	2.67

表 4.3.9　超高強度鋼繊維補強コンクリート 標準配合表

単位量（kg/m³）			
プレミックス C	水 W	鋼繊維 S	減水剤 AE
2254	180	180	(26)

4.3.4 力学的特性

上記の使用材料により製作したテストピースを載荷形式Ⅰおよび載荷形式Ⅱの試験当日に圧縮試験を行い、各配合における物性値を確認した。

表 4.3.10　載荷形式Ⅰにおける各材料の物性値

	圧縮強度 N/mm²	ヤング率 kN/mm²	ポアソン比	備　考
覆工コンクリート	14.9	15.2	0.17	損傷載荷時
ＰＣＬ版（標準部）	76.1	34.7	0.17	再載荷時
ＰＣＬ版（薄肉部）	210.0	53.1	0.20	再載荷時
裏込モルタル	36.3	18.8	0.23	再載荷時
覆工コンクリート	23.9	18.7	0.20	再載荷時

表 4.3.11　載荷形式Ⅱ試験における各材料の物性値

	圧縮強度 N/mm²	ヤング率 kN/mm²	ポアソン比	備　考
覆工コンクリート	19.3	19.9	0.17	
裏込モルタル	27.6	17.1	0.19	
ＰＣＬ版（標準部）	55.7	34.7	0.19	０度側
ＰＣＬ版（標準部）	38.7	30.3	0.19	１８０度側
ＰＣＬ版（薄肉部）	171.2	52.3	0.21	４５度側
ＰＣＬ版（薄肉部）	185.6	51.4	0.20	１３５度側

4.4 試験結果

4.4.1 載荷形式Ⅰ試験結果

(1) 載荷形式Ⅰによって測定された荷重と変位の関係（P-δ）を図 4.4.1 に示す。図の縦軸は 6 台のジャッキ（80°～100°に配置した載荷）の荷重合計を、横軸は覆工コンクリート外側中央（90°）における高さ 50cm の変位を示す。また、図 4.4.1 は、覆工コンクリートに損傷を与えるための損傷載荷試験、損傷した覆工を部分薄肉 PCL 版と裏込めモルタルで補強し破壊までの補強後載荷試験、ならびに、損傷覆工を厚さ 125mm の現場打ち無筋コンクリート（f' ck = 18.0 N/mm²）で補強し破壊まで載荷した試験結果について、試験開始時の変位をゼロとして併記するものである。

覆工コンクリートに損傷を与えるための損傷載荷では、載荷ジャッキの荷重合計が 2043kN で最大に達し、荷重が最大荷重の 95%に低下した時に除荷を開始して試験を終了した。試験最大荷重時覆工供試体の状況は、天端部外面および 65°、115°付近の左右肩部の内面で圧壊を呈し、覆工内側面に円周方向の長いひび割れが観測された。その詳細を図 4.4.2 および写真 4.4.1 にそれぞれ示す。また、損傷載荷試験で荷重を完全に除荷したあとの覆工コンクリートは、およそ 15mm の残留変位があるものの完全に破壊した状況ではなく、無補強の再載荷試験では損傷載荷試験で得られた最大荷重のおよそ 75%程度まで再載荷できることが確認されている。

(2) 部分薄肉 PCL 版と裏込めモルタルによる補強後載荷では、荷重合計が 1920kN に達した時、裏込めモルタルと PCL 版の界面の付着切れによって載荷重が 1200kN まで低下し、変位は 2mm 程度増加する現象が観察された（写真 4.4.4 および写真 4.4.5）。これは、PCL 版天頂接合部に若干の隙間が存在したためでと考えられる。荷重と変位の関係で不連続な関係が発生した原因は、PCL 版天頂部における隙間の存在によるもので、試験体は PCL 版を水平にセットしているため隙間を除くことができなかったことに起因するものと考えられる。それに対し、通常の施工では部材の自重によって面接触しているため天頂部（クラウン部）における隙間は発生しないものと思われる。

(3) 隙間が閉じることで PCL 版は相互に密着し耐荷力を回復するとともに載荷荷重は滑らかに上昇し、最大荷重 3945kN を示したのち、90°付近内面の PCL 版の一部ならびに覆工外面側のコンクリートが圧縮破壊した。それと同時に覆工外面側コンクリートが大きく剥落して実験を終了した。

部分薄肉化 PCL 版と裏込めモルタルを用いた損傷覆工コンクリートの補強効果は、無垢の覆工の耐荷力（最大荷重）が 2043kN であるのに対し、部分薄肉化 PCL 版補強では 3945kN で、1.93 倍となった。

(4) 図 4.4.3 は、PCL 版で補強した補強後載荷における荷重と変位の関係を抜粋して示し、載荷試験状況の観察記録を付加したものである。また、破壊状況を写真 4.4.2 および写真 4.4.3 にそれぞれ示す。

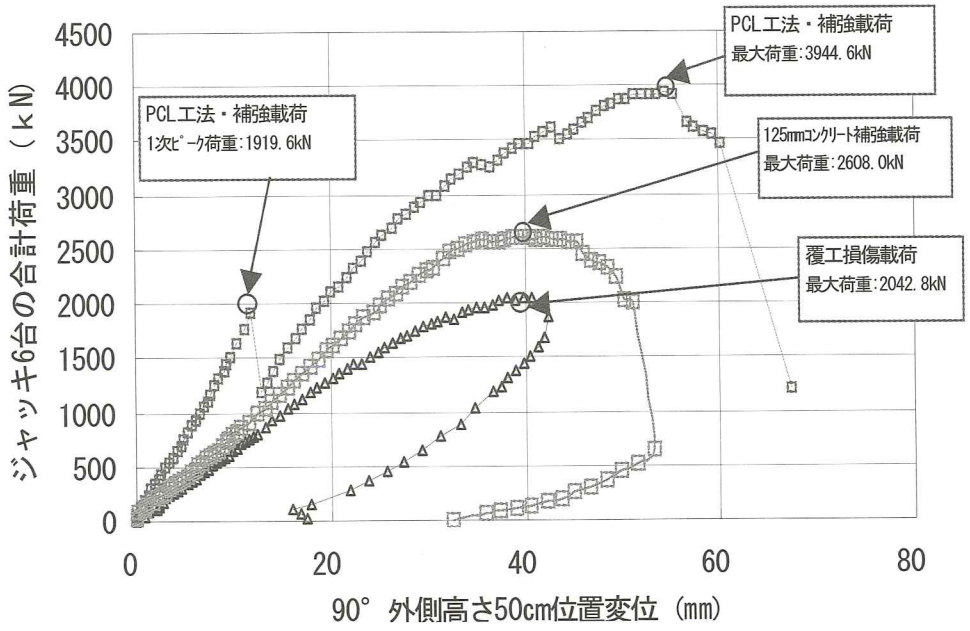


図 4.4.1　載荷形式Ⅰにおける荷重と変位の関係（損傷載荷および補強後載荷試験）

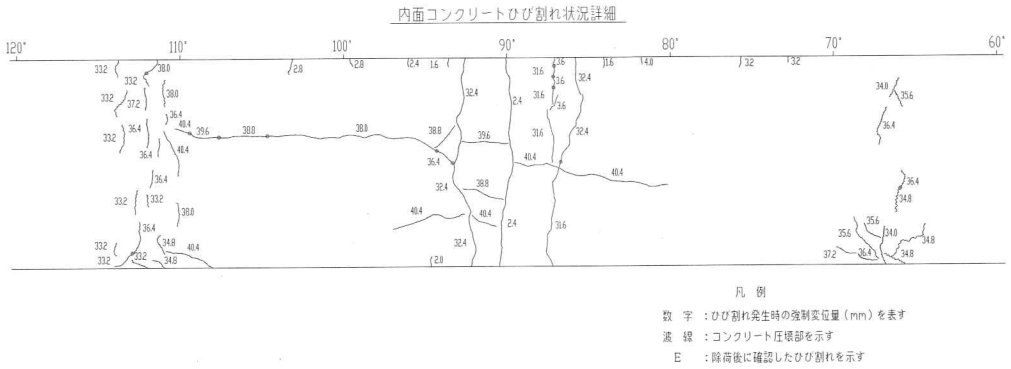


図 4.4.2　覆工内面におけるひび割れ発生状況（損傷載荷試験終了時、60°～120°）

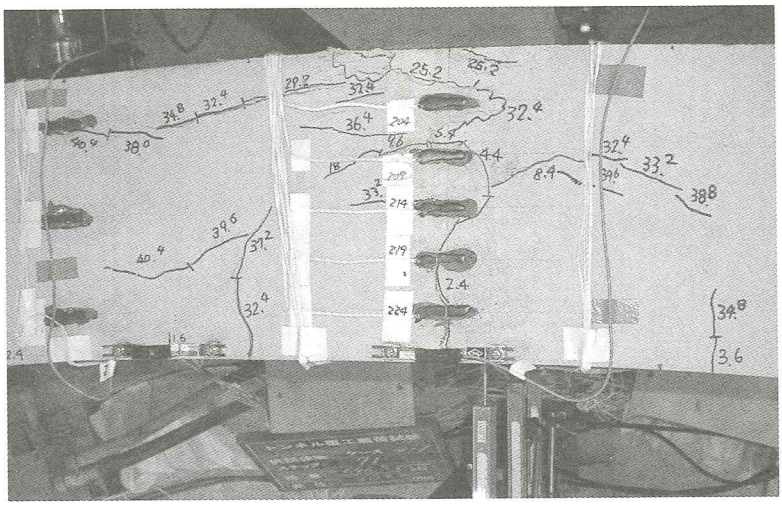


写真 4.4.1　覆工上面におけるひび割れ発生状況（損傷載荷試験終了時）

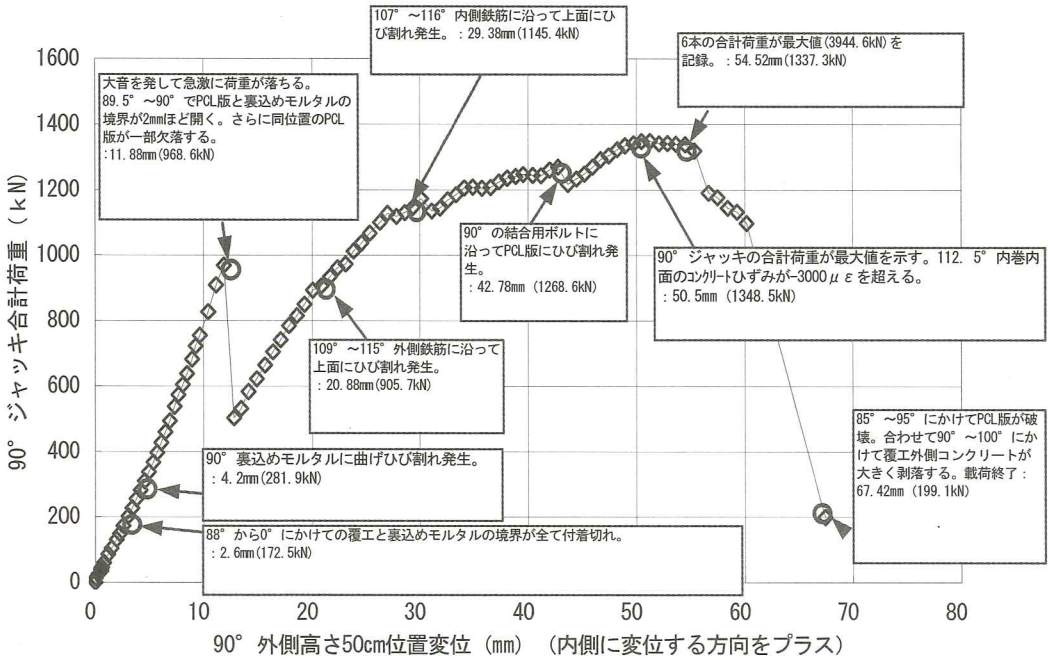


図 4.4.3　PCL 版による補強後載荷試験の荷重と変位の関係および観察記録

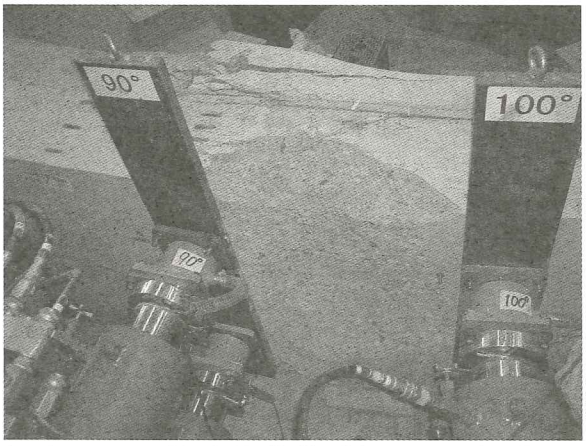


写真 4.4.2 補強後載荷破損状況（90° 外面）

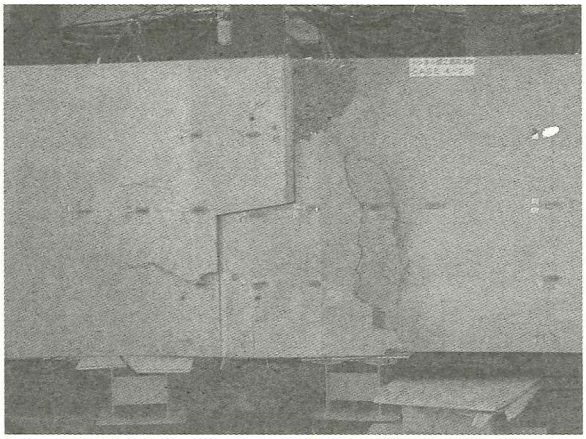


写真 4.4.3 補強後載荷破壊状況（90° 内面）

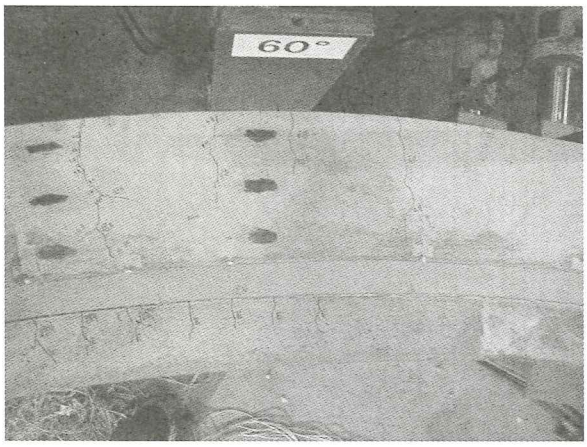


写真 4.4.4 上面破損状況（60° ）

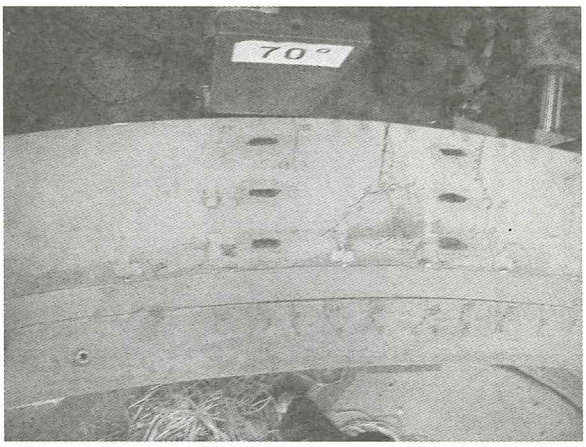


写真 4.4.5　上面破壊状況（70° ）

4.4.2 載荷形式Ⅰひび割れ発生状況

図 4.4.4 は、損傷載荷によるひび割れの発生状況を示すもので、覆工コンクリートの 90° 付近の内面側には曲げ引張によるひび割れが、また、65° と 115° 付近の内面側には曲げ圧縮力によるクラックの発生が確認できる。

凡 例

数 字 ：ひび割れ発生時の強制変位量（mm）を表す
波 線 ：コンクリート圧壊部を示す
： 同上
E ：除荷後に確認したひび割れを示す
：載荷板

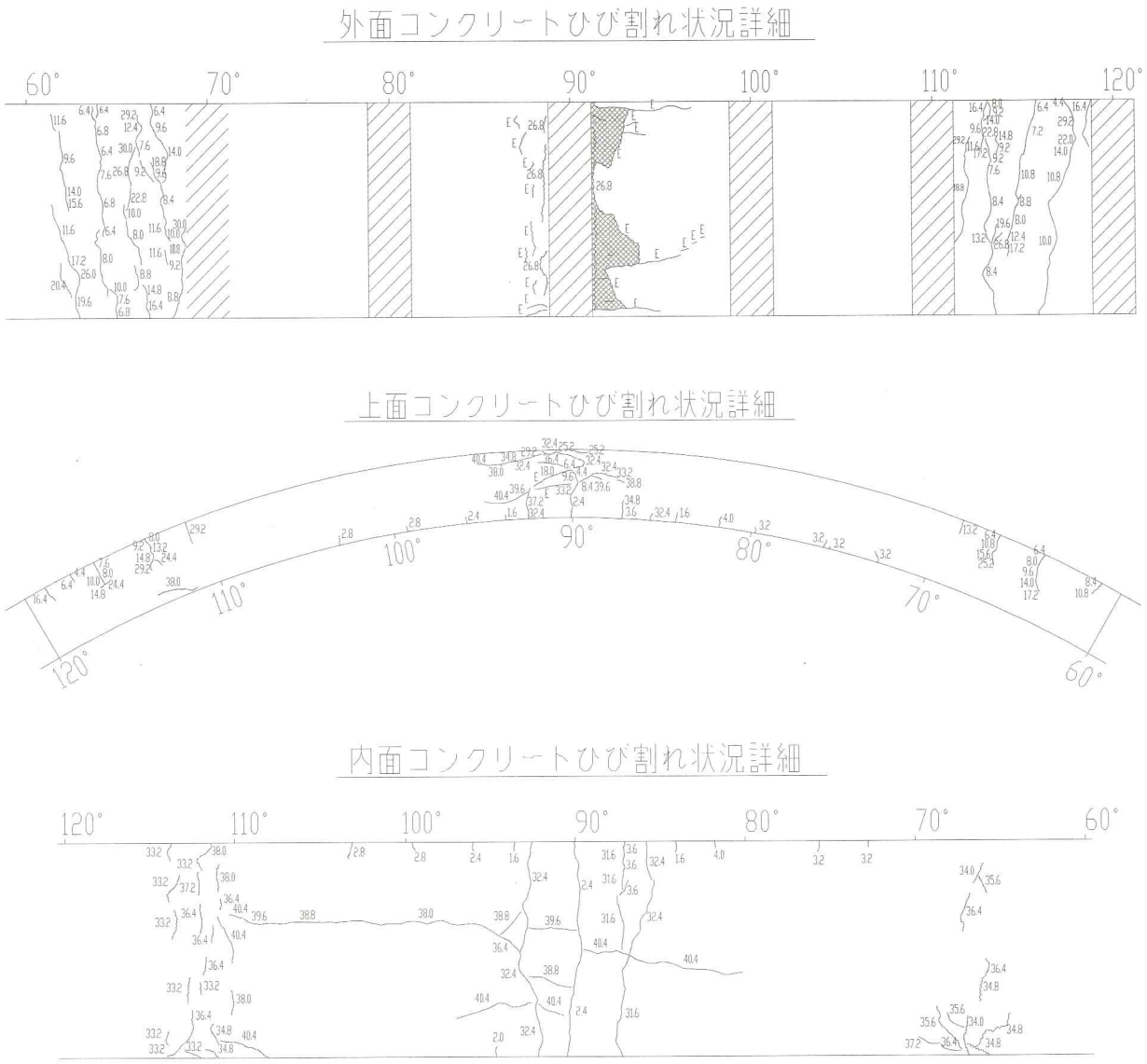


図 4.4.3 損傷載荷時のひび割れ状況

図 4.4.5 は、PCL 版と裏込め材による補強後載荷のひび割れ状況を示したものである。裏込モルタルと覆工コンクリートの付着面および PCL 版と裏込モルタルの付着面では、前者が早めに切れ、後者はやや遅れて付着が切れたことを示すクラックが確認できた。最終的には、大音響とともに PCL 版の 90° 付近が破壊し、90° 付近と 110° 付近の PCL 版上面には割裂を示すクラックが確認できた。

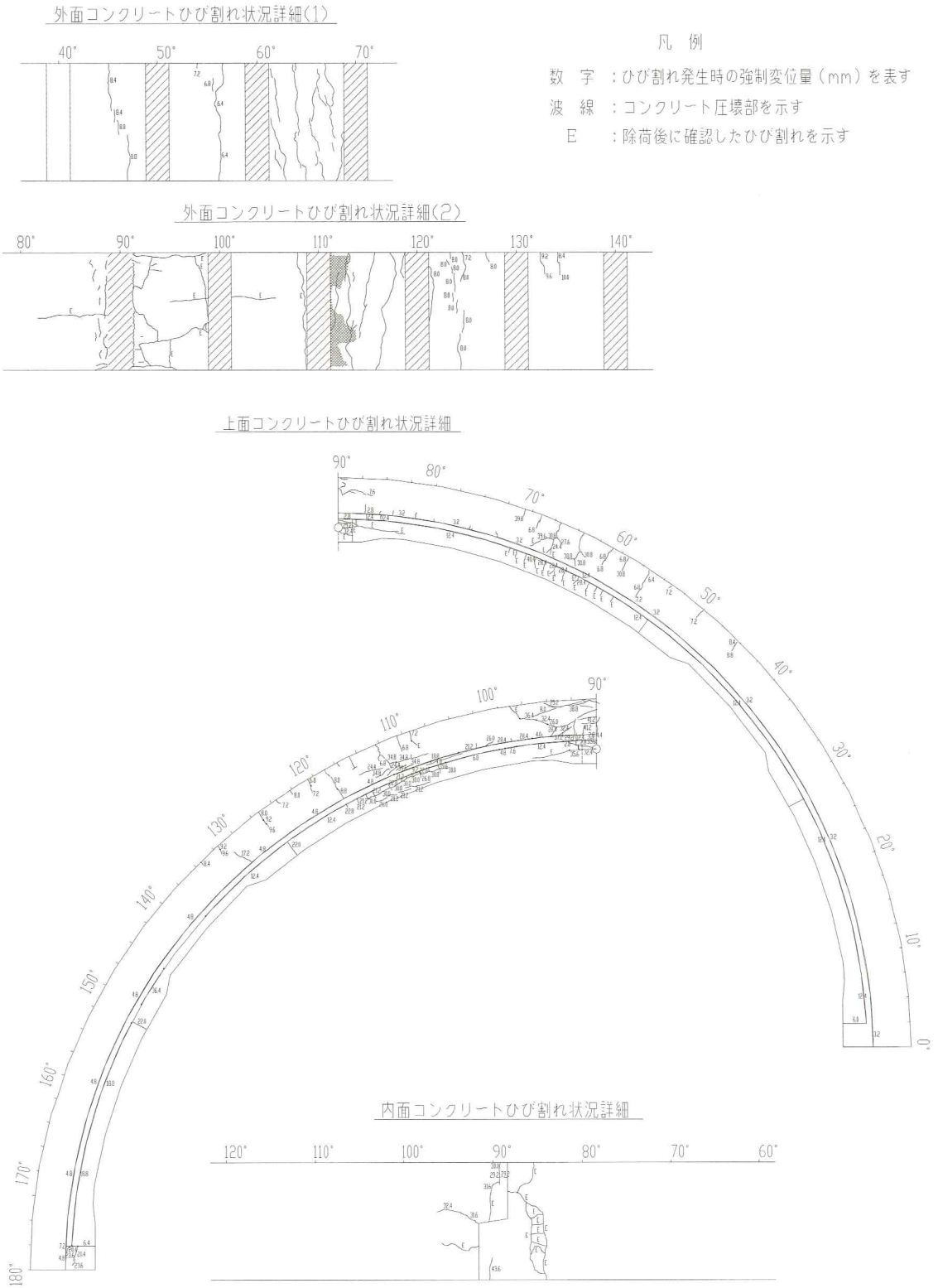


図 4.4.5 補強後載荷におけるひび割れの発生状況

4.4.3 ジャッキによる反力係数の算出

載荷形式Ⅰにおいて、80°から100°の油圧ジャッキは載荷用油圧ジャッキであり、70°と110°の油圧ジャッキには殆ど反力が生じていなかった。ジャッキの反力係数は、荷重と変位の傾きであると定義し、表4.4.1に各図の荷重と変位の傾きから求めたジャッキの反力係数を示す。

表4.4.1　ジャッキの反力係数

(単位：MN/m)

	損傷載荷時	補強後再載荷時
１０度	58.0	183.8
２０度	160.0	219.3
３０度	137.9	256.7
４０度	113.6	99.1
５０度	83.0	196.5
６０度	93.5	201.8
７０度	0.0	0.0
８０度	― ― ―	― ― ―
９０度	― ― ―	― ― ―
１００度	― ― ―	― ― ―
１１０度	0.0	0.0
１２０度	120.8	188.3
１３０度	281.7	299.9
１４０度	307.7	362.0
１５０度	232.0	226.0
１６０度	133.3	196.5
１７０度	65.8	228.1
平均	128	190

4.4.4 載荷形式Ⅱ試験結果

(1) 図 4.4.6 は載荷形式Ⅱにおけるジャッキ１本当りの荷重と天端部（90° 位置）の変位の関係で、スリットを埋込んだ覆工を部分薄肉化 PCL 版（裏込め材共）で補強した場合と無垢の覆工（スリットの埋込みもなく補強も無い場合）とを比較したものである。これによれば、PCL 版補強の場合、ジャッキ荷重が 150 kN の時、荷重は増えないものの中央部の変位は 1mm から 3mm に増加している。これは、120° 付近に設けたスリットが滑りさらに裏込めモルタルと PCL 版の付着が切れたことによる変位増加で、その後、外力は主に PCL 版に伝達され、331kN のとき最終破壊に至った。しかし、実験では、275kN 以降は供試体支承部が回転および移動したことにより、設定した載荷形式Ⅱでの載荷ができない状態となり、それ以降の載荷が難しい状況となった。そのため、実験として有意でないので、本実験では 275kN を最大荷重とする。仮に供試体支承部の回転や移動を拘束して載荷形式Ⅱでの載荷が続行可能であった場合を想定すると、その最大荷重は本実験結果の耐荷力よりも大きな値となる可能性があったと考えられる。本実験結果は、無垢の覆工の耐荷力には至らなかったが、支承部の回転や移動を拘束する脚部補強工を併用することによって、現仕様の部分薄肉 PCL 版でも無垢の覆工の耐荷力と同等の耐荷力を得られる可能性を示唆する結果であった。一方、無垢の覆工の場合、荷重と変位の関係はほぼ直線的に推移し、最大荷重は 289kN となった。また、PCL 版で補強した覆工コンクリートの試験時圧縮強度は 19.3N/mm² であるのに対し、無垢の覆工では 14.4N/mm² と低く、試験体としての材料強度に違いがある。したがって、部分薄肉化 PCL 版の補強効果を、強度比（19.3/14.4=1.34）の補正を行った無垢の覆工の耐荷力（最大荷重を 388 kN に補正）と比較すると、29%程度小さくなることが判った。すなわち、スリットを設けた覆工を PCL 版で補強した効果は、無垢の覆工が持つ耐荷力と比べて、71%の耐荷力に相当する。

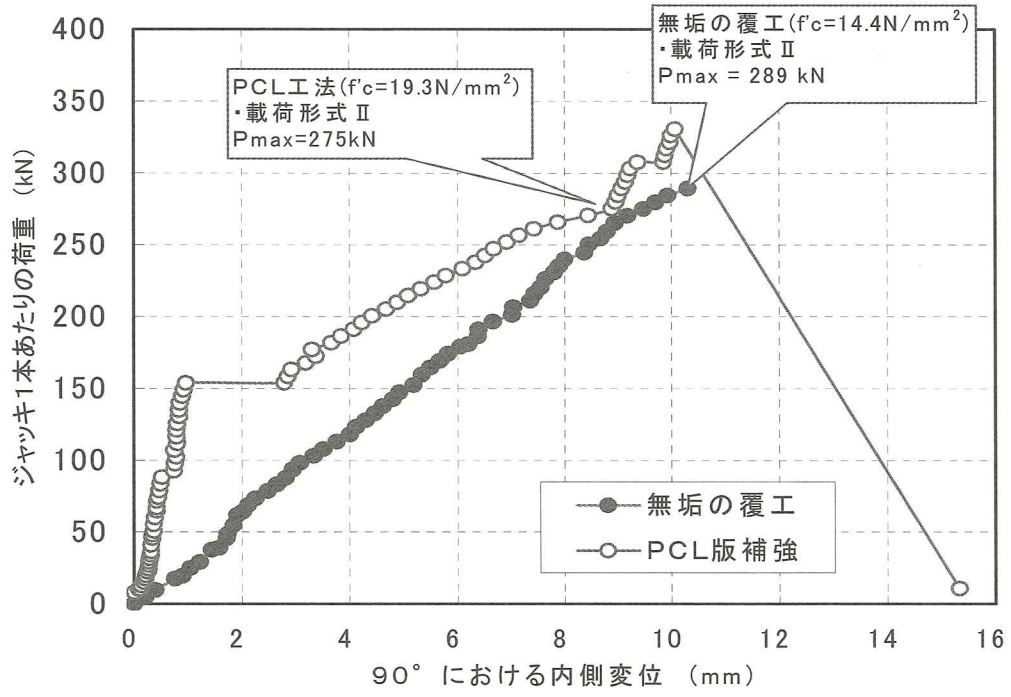
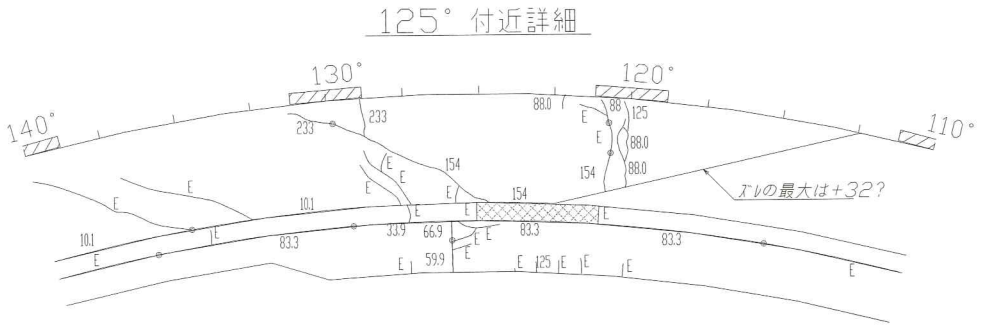


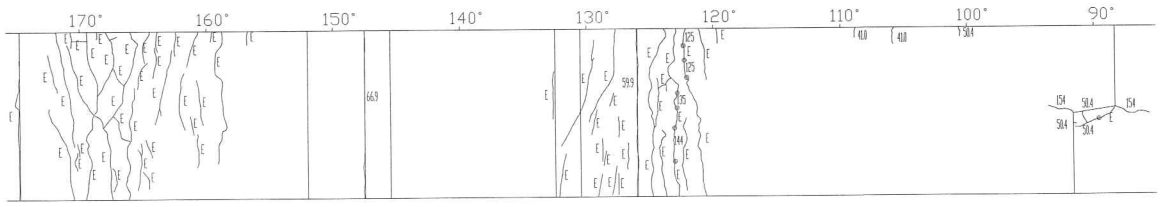
図 4.4.6　　載荷形式Ⅱにおける荷重と変位の関係（角度 90° ）

(2) 破壊時のひび割れ発生状況を、図 4.4.7(125° 付近におけるひび割れ状況図)、図 4.4.8（90° ～180° の範囲における補強内側面のひび割れ状況図)、写真 4.4.6（125° 付近のひび割れ状況)、写真 4.4.7(125° 付近における補強内側面のひび割れ状況)、写真 4.4.8(170° 付近のひび割れ状況)、ならびに写真 4.4.9（170° 付近における補強内側面のひび割れ状況）をそれぞれ示す。



※記載の数値はステップ時の荷重(kN)を示す

図 4.4.7 破壊時におけるひび割れ状況図（125° 付近）



※記載の数値はステップ時の荷重(kN)を示す

図 4.4.8 破壊時における補強内側面のひび割れ状況図（90° ～180° ）

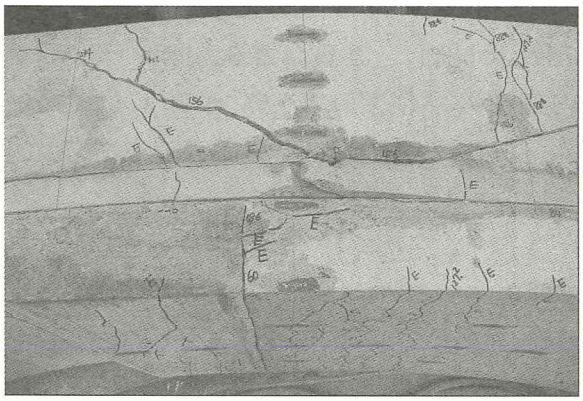


写真 4.4.6
破壊時のひび割れ状況（125° 付近）

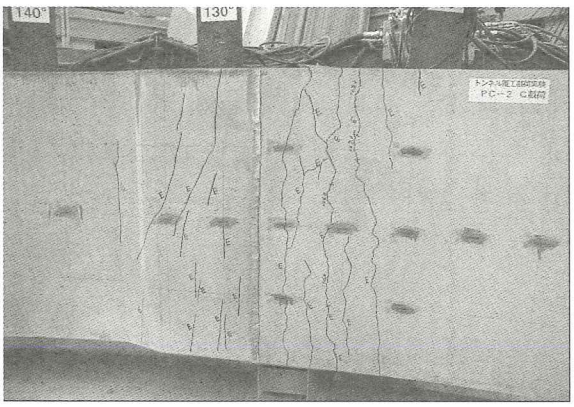


写真 4.4.7
破壊時の補強部内側面ひび割れ状況
（125° 付近）

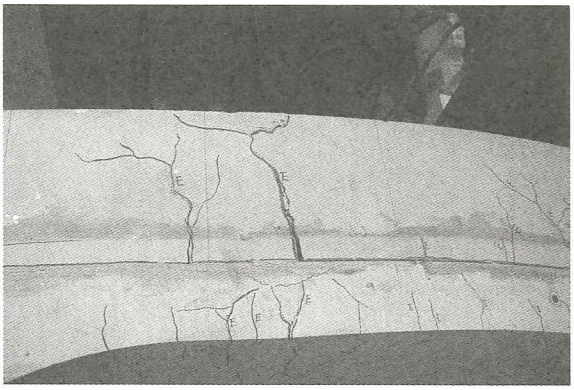


写真 4.4.8
破壊時のひび割れ状況（170° 付近）

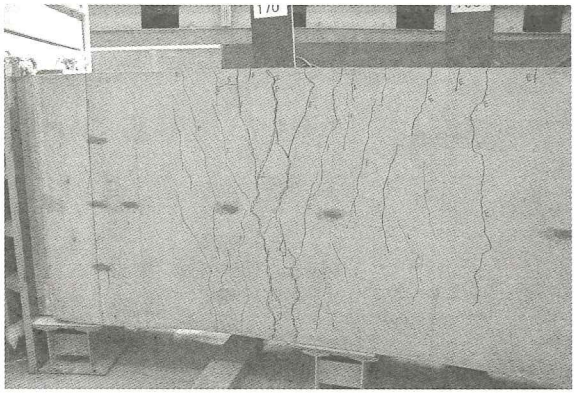


写真 4.4.9
破壊時の補強部内側面ひび割れ状況
（170° 付近）

4.4.5 載荷形式Ⅱひび割れ発生状況

図 4.4.9 は、破壊時におけるひび割れ状況を示したもので、120° と 170° 付近の内面側には曲げによるひび割れが発生し、170° 付近の覆工コンクリート外面側が圧縮破壊していることが確認できる。

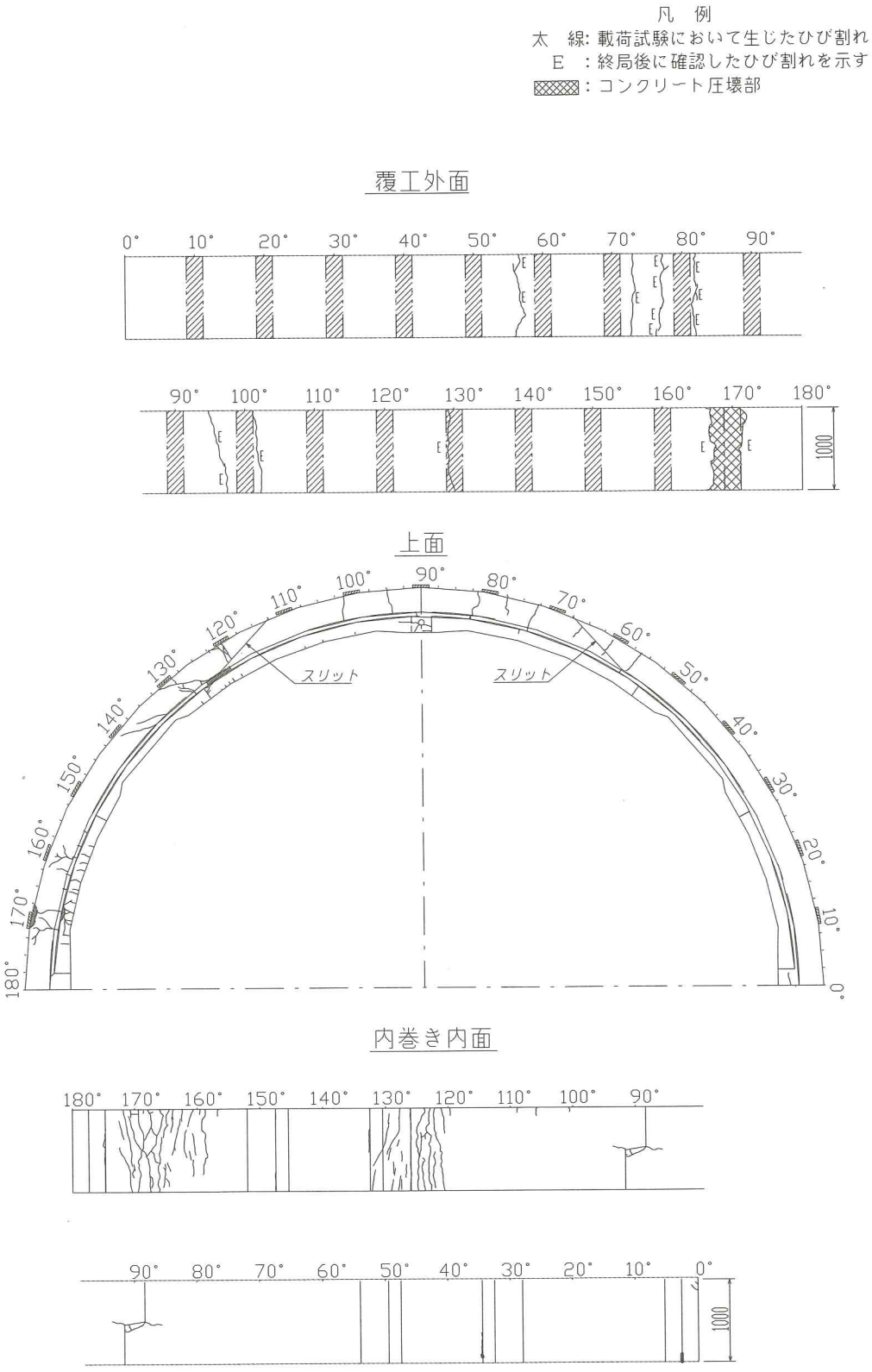
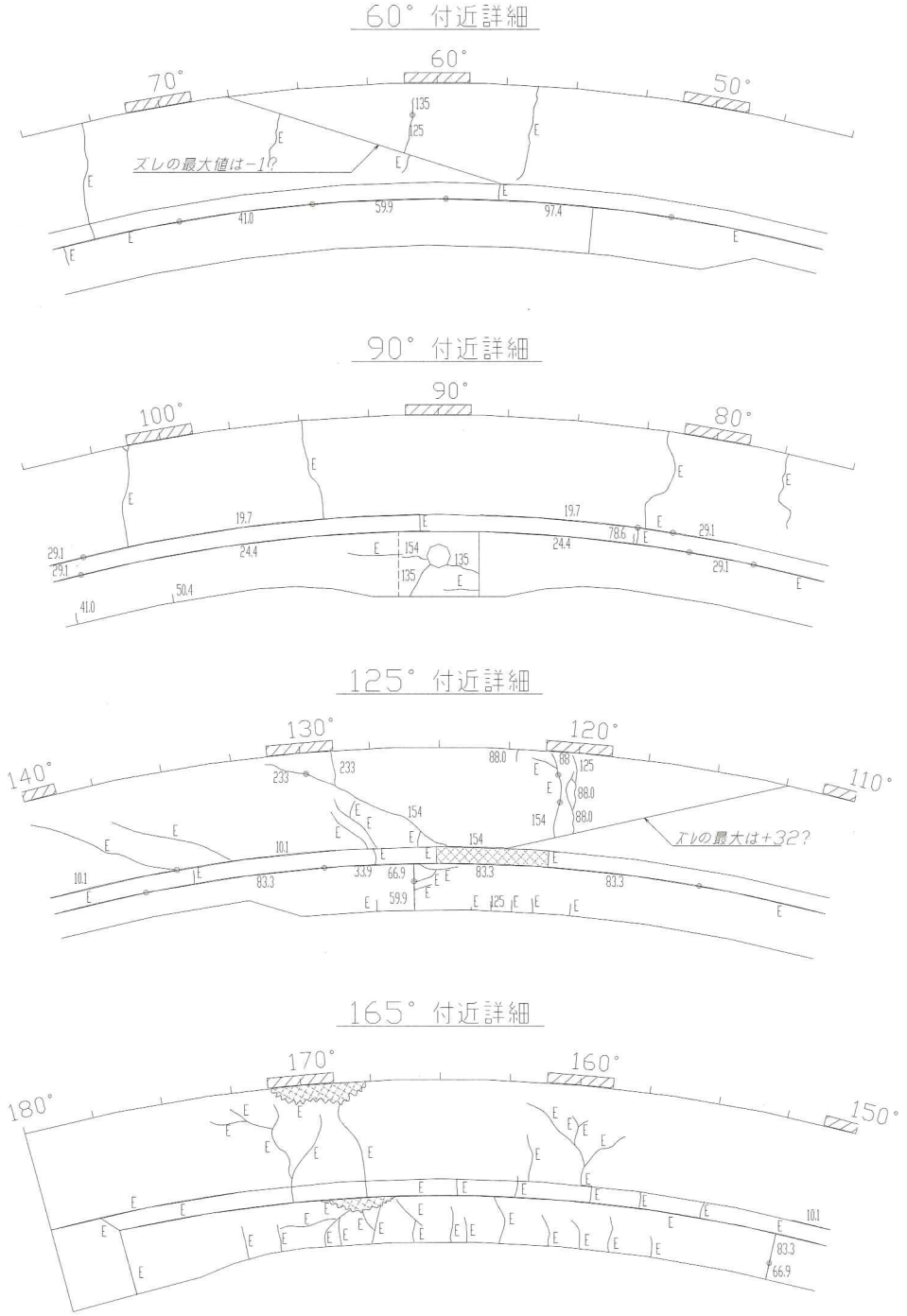


図 4.4.9 ひび割れ概況図

図 4.4.10 および図 4.4.11 は、終局状態における各部のひび割れ状況を示したものである。図中の数値はジャッキの荷重で"E"は載荷終了後に確認したクラックである。裏込モルタルと覆工コンクリートの付着面および PCL 版と裏込モルタルの付着面は、前者が早めに切れ、後者はやや遅く付着が切れたことを示すクラックが 125° 付近では載荷試験の初期から確認できた。60° と 125° のスリット付近を比較すると、125° 付近により多くのクラックが生じていることがわかる。また、最終的には 165° 付近の PCL 版内面側に曲げによる多数のひび割れと覆工コンクリートの外面側には圧縮破壊によるクラックが確認できた。



※記載の数値はステップ時の荷重(kN)を示す。

図 4.4.10　終局状態のクラック図

凡　例
太　線: 載荷試験において生じたひび割れ
数　字: ひび割れ発生荷重（kN）を表す
E　: 終局後に確認したひび割れを示す

注）図の荷重表記には油圧から換算したジャッキ1本当りの荷重値を用いた

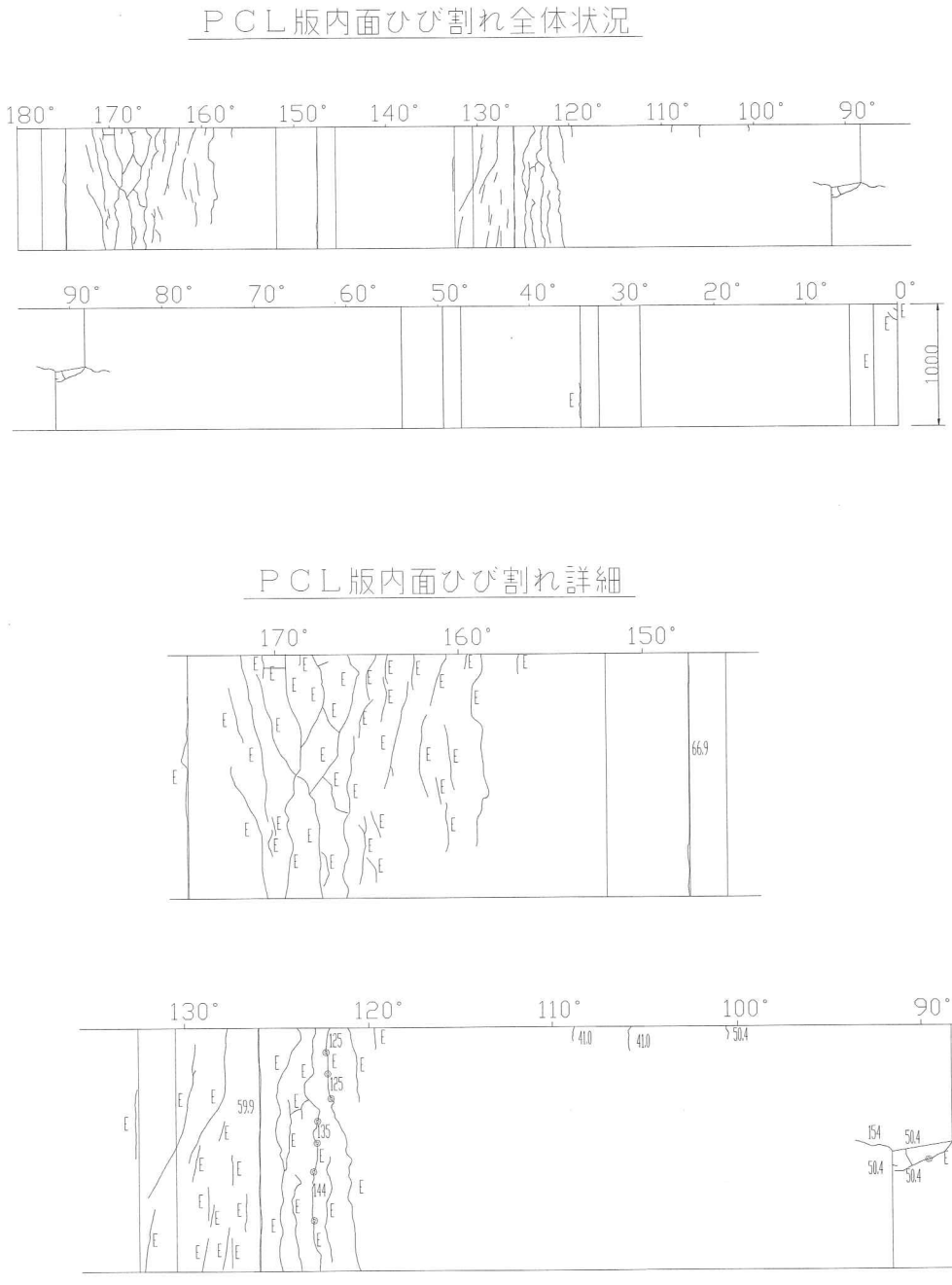


図 4.4.11　PCL 版内面ひび割れ図

5. 施工法

5.1 標準施工法

5.1.1 施工フロー

PCL工法の標準施工フローを図5.1.1に示す。

既設トンネルとPCL版の配置状況を図5.1.2に示す。

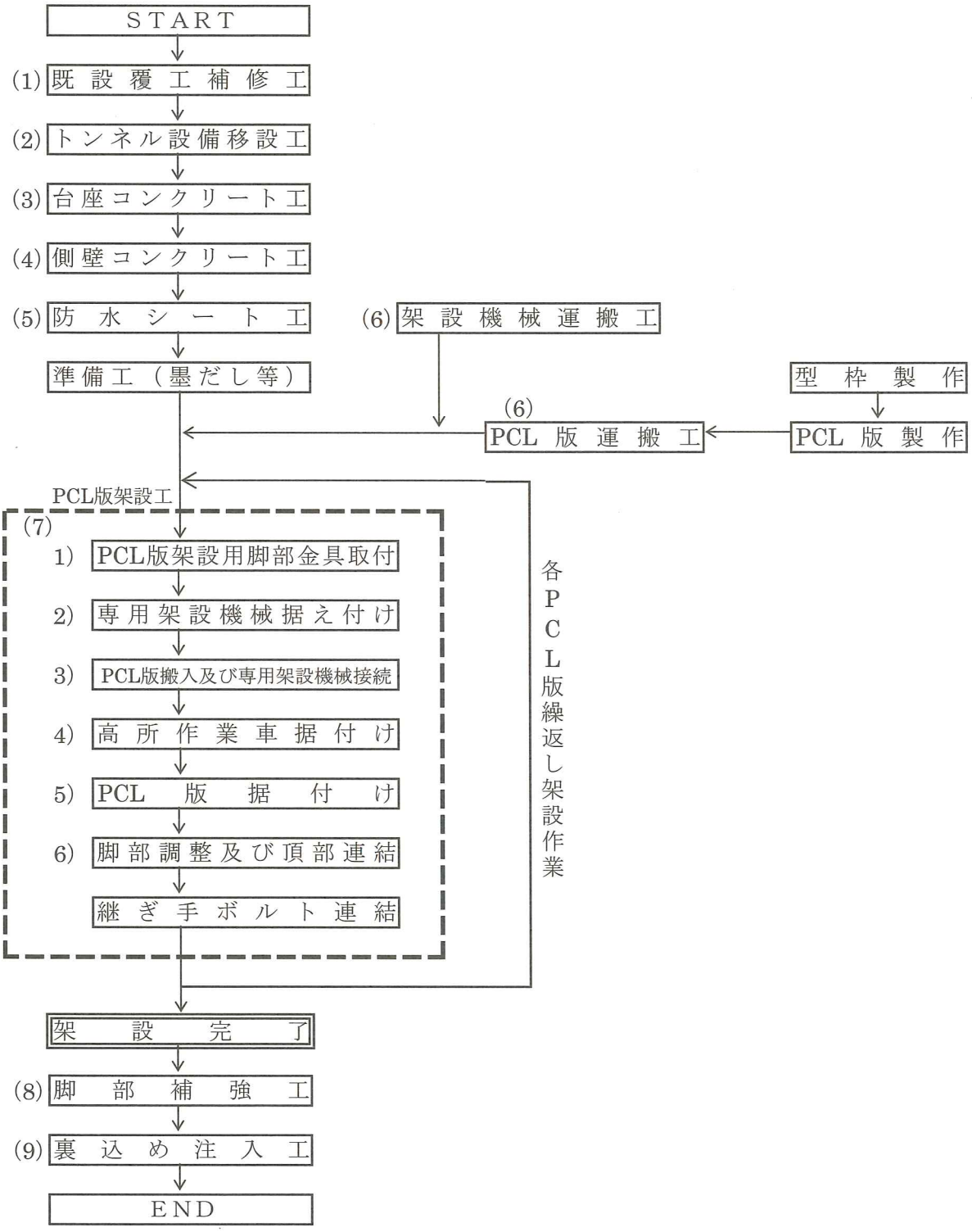


図 5.1.1　施工フロー

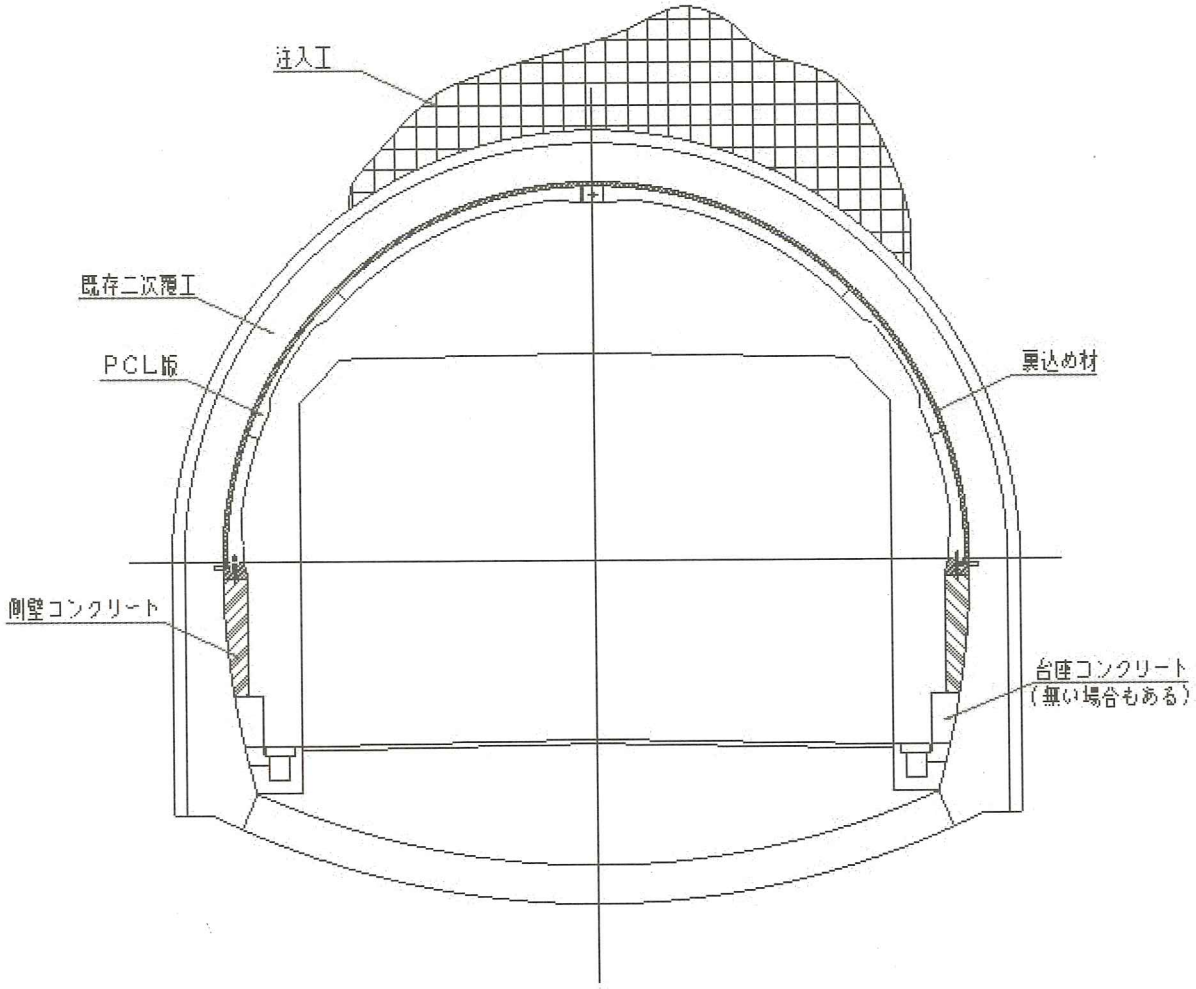


図 5.1.2　トンネル断面

5.1.2 施工手順

(1)　既設覆工補修工

既設トンネルの覆工コンクリートに、補修を必要とするひび割れ、欠損、漏水、ならびに地山との隙間などがある場合は、PCL版架設の前工程として補修・補強を行う。

(2)　トンネル設備移設工

トンネル内の照明等、作業に支障する設備の撤去・移設をおこなう。

(3)　台座コンクリート工（側壁コンクリートに含まれる場合が多い）

(4)　側壁コンクリート工

側壁コンクリートは、現場打ちを基本とするが、水路トンネルなど現場打ちに向かない現場では、プレキャストコンクリート版を用いる場合もある。

1）現場打ちコンクリート

木製型枠にて、コンクリート打設時に変形、モルタル漏れのないように組み立てる。

また、設計基準強度、配筋量は設計図書に準拠する。

2）プレキャストコンクリート版

プレキャストコンクリート版にて、側壁コンクリートを構築する。

プレキャストコンクリート版を用いる場合、覆工との定着や、版相互の連結方法の検討が必要である。

(5)　防水シート工　（必要に応じて）

防水シート工が必要な場合には、高所作業車にて、トンネル内空面に防水シートを貼付け固定する。

なお、作業は交通規制（片側交互通行）にて片側半面ずつおこなうのが一般的である。

(6)　運搬工

1)　PCL版の運搬

PCL版の運搬は通常トラックを用いる。運搬時の荷姿は、荷下ろし時の作業半径をできるだけ少なくするため、運搬車両の後方に部材を配置するのがよい（図5.1.3）。

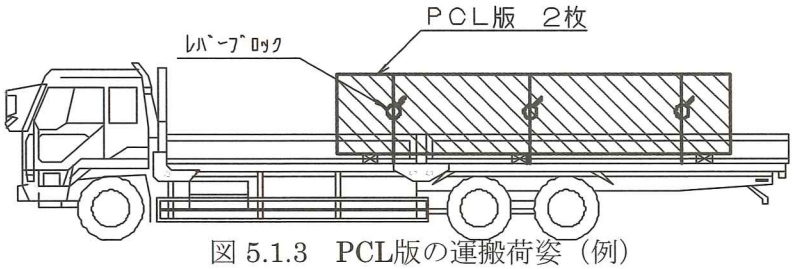


図 5.1.3　PCL版の運搬荷姿（例）

2)　専用架設機械（スピンアーム等）の運搬

専用架設機械（スピンアーム等）は、点検整備の上、トレーラー等にて現地に搬入する。

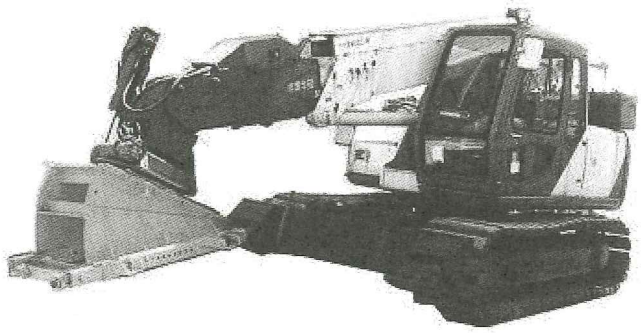


写真 5.1.1　専用架設機械の例

(7)　PCL版架設工

PCL版架設フローを、図5.1.4　に注意事項と併せて示す。

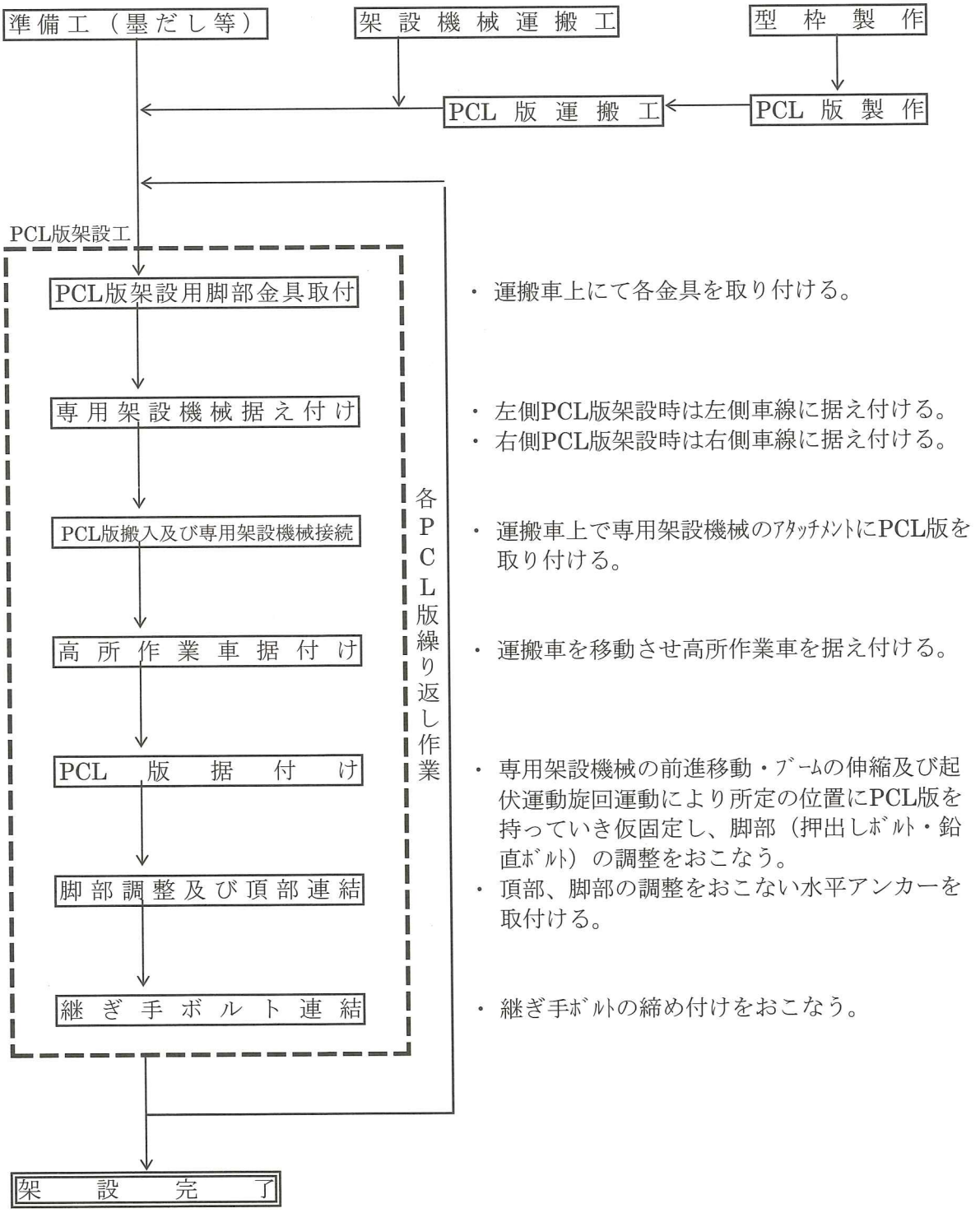
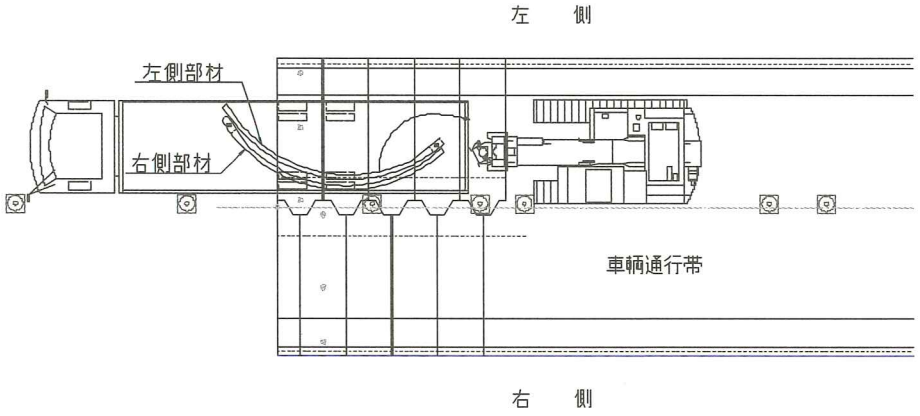


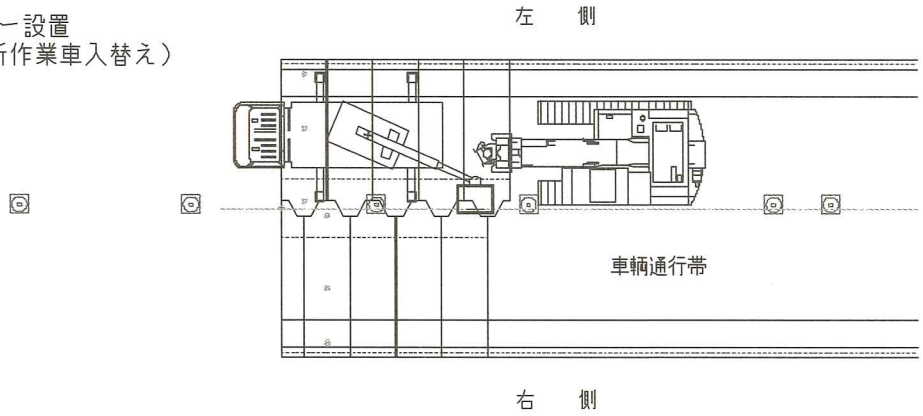
図 5.1.4　PCL版架設フロー

次ページに、PCL版架設時の交通規制の例を示す。

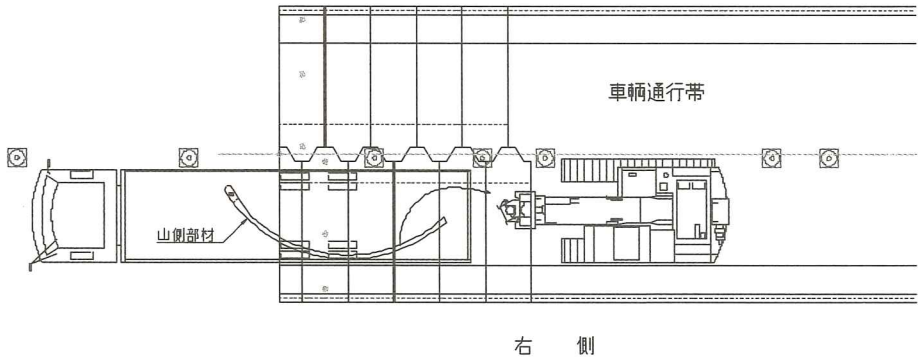
1．左側桁架設



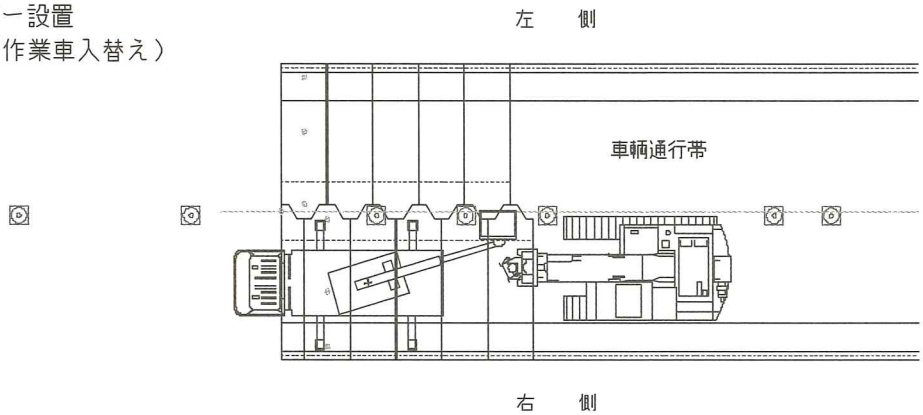
2．頂部アンカーバー設置
（運搬車・高所作業車入替え）



3．右側桁架設



4．頂部アンカーバー設置
（運搬車・高所作業車入替え）



1）PCL版架設用脚部金具取付

PCL版製作時に予め埋め込んであるインサートに、所定のボルトで高さ調整金具および引寄せ金具を確実に固定する。それぞれの金具に押出しボルト・支持ボルトを取付ける。

2）専用架設機械据え付け

PCL版設置側車線に、専用架設機械を据付ける。交通規制は、PCL版設置側の車線を規制する（PCL版は左右交互に架設していくので、その都度、規制車線は移動する）。

3）PCL版搬入及びPCL版専用架設機械接続

PCL版を積んだ運搬車両を専用架設機械の後ろ向きになるように誘導し、専用架設機械のアタッチメントにPCL版をボルト・ナット・プレートにて固定する。

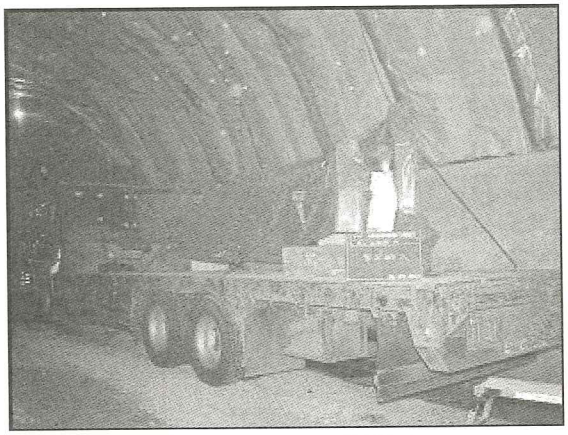


写真 4.1.2　PCL版搬入

4）高所作業車据付け

運搬車よりPCL版を取卸した後、運搬車は前進で待機場所に移動する。次に、運搬車が移動したスペースに、高所作業車を設置する。ここで、高所作業車を使用してPCL版相互の連結作業を、片側交互通行の状況下で行う場合、資材や作業器具を道路上に落とす危険性があるため、落下防止対策を講じるとともに、高所作業車の作業バケットには上下開口式の仮囲いを取付け、作業はその中で行う。

5）PCL版据付け

PCL版の据付けは、架設機械のブームを起伏・伸縮・旋回させ、さらに先端部のアタッチメントの首振り、ターンテーブルの回転などを行いながら所定の位置に据付ける。

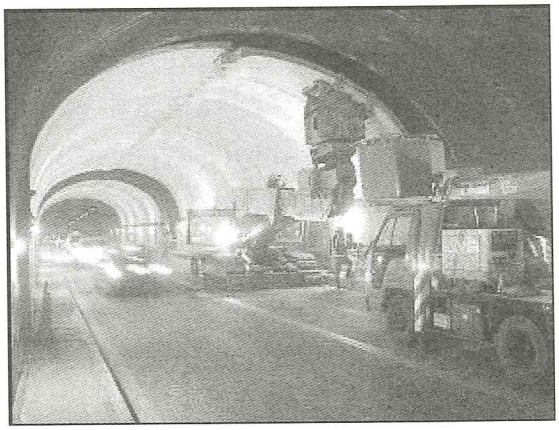


写真 4.1.3 架設状況

版寄せは、インサートにアイボルトを取付け、先行して架設したPCL版とﾚﾊﾞｰﾌﾞﾛｯｸ（1.5t用）を用いて版寄せを行う。これら一連の作業は、トンネル断面が大きい場合、写真4.1.3で示すように片側交互通行で施工が可能である。ただし、PCL版の起伏時及び旋回時に15分程度の前面通行禁止となることがある。

一番最初に据付けるPCL版は、架設後に仮固定を行う。その方法は、PCL版背面の覆工コンクリートにアンカーを打込み、頂部のグラウト孔などを利用してアンカーボルトにて仮固定する方法や、支保工などをPCL版下に組立ててサポートする方法がある。

6）脚部調整及び頂部連結

PCL版の高さ調整は、脚部に取付けた金具、押出しボルト、ならびに支持ボルトなどを微調整して行い、調整が終了した段階でこれらのボルト類を固定する。次に、高所作業車にてPCL版の頂部に連結ボルトを挿入して版相互を連結する。

(8) 脚部補強工

1) 型枠の取付

PCL版の据付け終了後、PCL版、覆工部ならびに基礎（腰壁）で囲われる脚部の隙間にモルタルを注入する。型枠は、PCL版の脚部にあらかじめ埋められているインサートや脚部に配置した鉄筋を用いて型枠を固定する。型枠とPCL版や腰壁コンクリートの凹凸による隙間には、シールテープなどを貼付けモルタルが漏れないようにする。

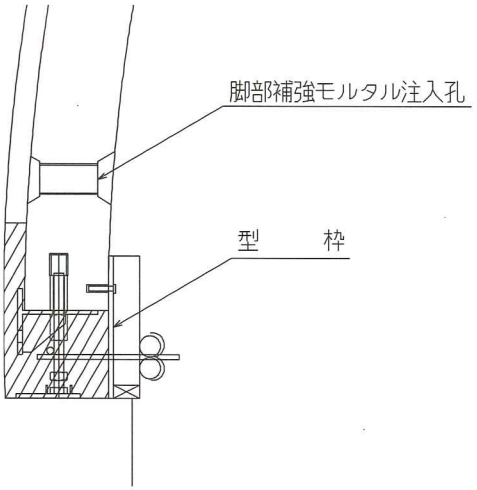


図 5.1.5　脚部補強工

2) モルタルの注入

型枠取付完了後、PCL版に設けた脚部補強モルタル注入孔よりモルタルを注入する。モルタルは、生コン工場で規定の配合で製造し、アジテータトラックにて現場に搬入する。一方、注入設備を積載したトラックを坑内に待機させ、注入ホースをPCL版の注入孔と接続する（ネジ固定）。次に、モルタルをアジテータトラックからホッパーに受け、低速でモルタルポンプを作動させ注入を開始する。

注入高さの確認は、別の注入孔から目視により確認する。注入を完了した箇所（注入孔）には、プラスチックキャップを取付ける。注入は、左右交互に片側づつ行う。

(9) 裏込め注入工（モルタル注入）

1) モルタルの製造

生コン工場より予め指定した配合の生モルタルをアジテータトラックにて現場に搬入する。

2) 小口部処理（坑口型枠）

布製パッカーを小口隙間部に配置し、その中にセメントグラウトを注入し小口型枠とする。

3) モルタル注入

脚部補強モルタル注入後、PCL版背面と既設トンネルコンクリートとの空隙部にモルタル用圧送ポンプを用いてモルタルを注入する。

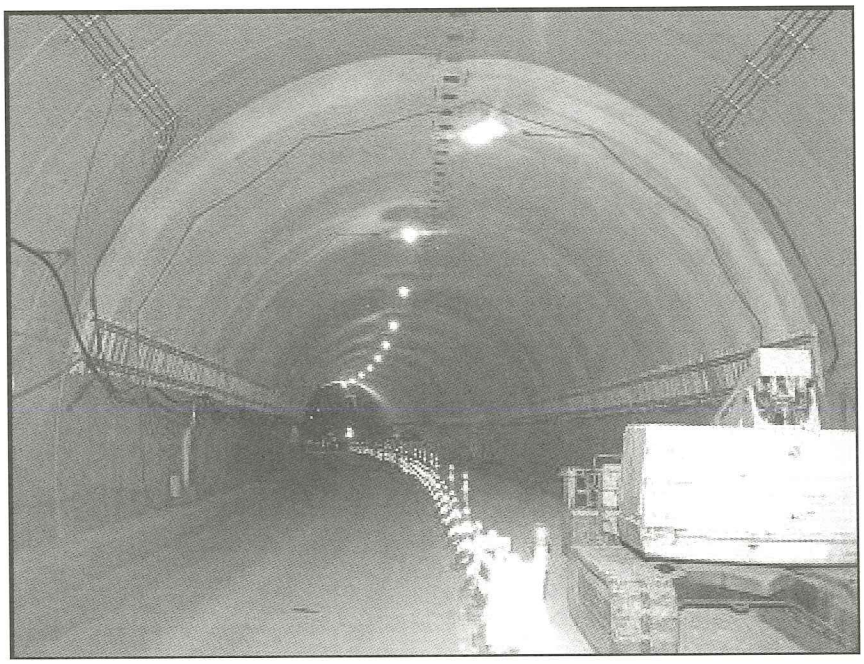


写真 5.1.4 完　　成

5.2　脚部補強工

PCL 工法の補強効果は、脚部の強度が確保されることで効果を発揮する。そのことは、実物大の載荷試験装置（写真 5.2.1）を用いた載荷形式Ⅰや載荷形式Ⅱでの支点が移動するという現象が起こったことからも判るように、荷重を側壁コンクリートに伝達することが必要となる。また、左右の荷重バランスが均等であることも補強効果を増大させるための因子である。したがって、補強対策として PCL 工法を適用する場合、PCL 版の脚部を固定することと PCL 版に対しバランス良く荷重を作用させる対策の実施が必要条件と考えられる。

PCL 工法における標準的な脚部詳細を図 5.2.1 に示す。PCL 版脚部は水平レベルを確保するためのボルトおよび高ナットによる高さ調整、脚部の内側移動を防止するための覆工コンクリートに埋込んだインサートとのボルト連結（支持ボルト）、脚部の外側への拡がりを防止する役目の押出しボルト、ならびに、モルタル充填（ハッチング部）によって構成されている。

充填モルタルは、脚部を支持する基礎コンクリート（腰壁又は側壁という）と同程度以上の圧縮強度(21N/mm²)を必要とし、一方、覆工コンクリートの背面に空洞がある場合、充填対策工を施す必要がある。すなわち、PCL 版と裏込めモルタルで形成される補強工には左右均等の外力の作用（反力も同じ）が不可欠で、バランスの崩れた外力の作用は、PCL 版に想定外の応力が発生し補強効果の低減につながる。

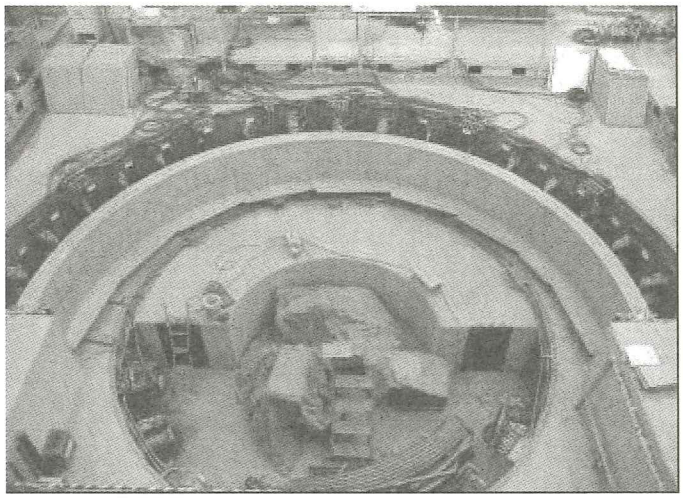


写真 5.2.1　実物大試験装置

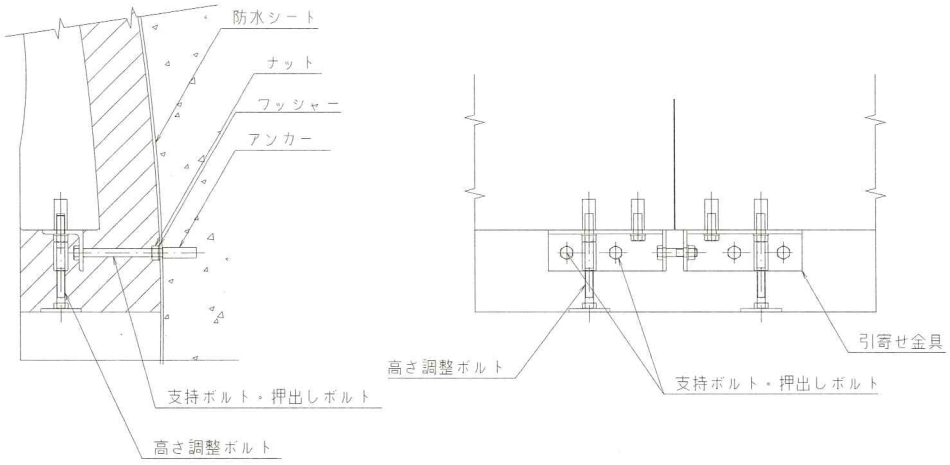


図 5.2.1　PCL 版脚部の固定方法

6. 今後の課題

6.1 開発工法適用に際しての留意事項

部分薄肉化PCL版を用いた本工法は、盤下げを行うことなく既設トンネルの補強ができ、載荷形式Ⅰでは無垢の覆工コンクリート（設計基準強度 f'ck=18N/mm²、厚さ 300mm）の耐荷力と比較して193%、載荷形式Ⅱでは同様に71%の耐荷力を実現している。載荷形式Ⅱでは無垢の覆工の耐荷力に至らなかったが、実験で見られたような供試体支承部の回転や移動の現象を解消することが出来れば、現仕様の部分薄肉PCL版でも無垢の覆工と同等の耐荷力を得られる可能性を示唆する結果であった。これらの補強効果は、標準PCL版を用いても同様の効果が期待でき、建築限界に余裕の有る場合には部分薄肉化することなく通常工法の適用ができるものと思われる。したがって、本開発工法は既設トンネルの補強対策工として工期短縮ができ、片側の相互交通開放下での施工が可能など優れた特長を持つトンネル補強工法と言える。ただ、試験によって確認された成果は室内試験の範囲内で実現場とは若干の相違点もあり以下の点に留意する。

裏込め材には、通常、設計基準強度 2N/mm² の気泡モルタルを用いるが、実大規模載荷試験では基礎試験の成果を反映させ、設計基準強度 20N/mm² のモルタル（セメントと砂の比率 1:2）を適用している。そのため、一度の打設高さを通常工法と同じにするには、打設時のPCL版に発生する変形を吸収しなくてはならない。変形防止策として押えボルトの適用が有力だが、覆工コンクリートの支圧強度が不足する場合や覆工コンクリートと版との隙間が著しく変化する場合は、支圧強度を増すか間隔をできるだけ均一にする対策を必要とする。また、PCL版の補強効果に対し、PCL版を支え荷重伝達の役目をもつ側壁については、構造細目などの部分で更なる検討が今後の課題として残った。一方、補強対策の事前準備として、既設覆工の変調原因やひび割れ発生原因の把握は調査項目として必須であり、覆工コンクリートの破損程度、汚れ、漏水など、裏込め材との付着を妨げる要因について考慮することも必要である。すなわち、既設覆工の補強をPCL工法で計画する場合、覆工の変調やひび割れの発生原因については十分に調査するとともに、変調原因の根本的な除去ならびに破損の程度に応じた補修・補強対策の実施が不可欠と考えられる。また、導水対策をとして防水シート等を布設する場合は、覆工と裏込め材との付着を期待できないことから、実大規模載荷試験から得られた補強効果と異なることも予想される。

6.2 今後の課題

既設トンネルの補強工法としてPCL工法の適用性を向上させるためには、今後、検討すべき課題として以下がある。

①. 耐荷力の評価方法
②. 鉛直支点反力の伝達構造の検討（合理的な側壁構造に関する検討）
③. 裏込め材と覆工コンクリートとの付着強化方法の検討
④. 裏込め材の付着性能に関する基礎データの蓄積

参考資料１

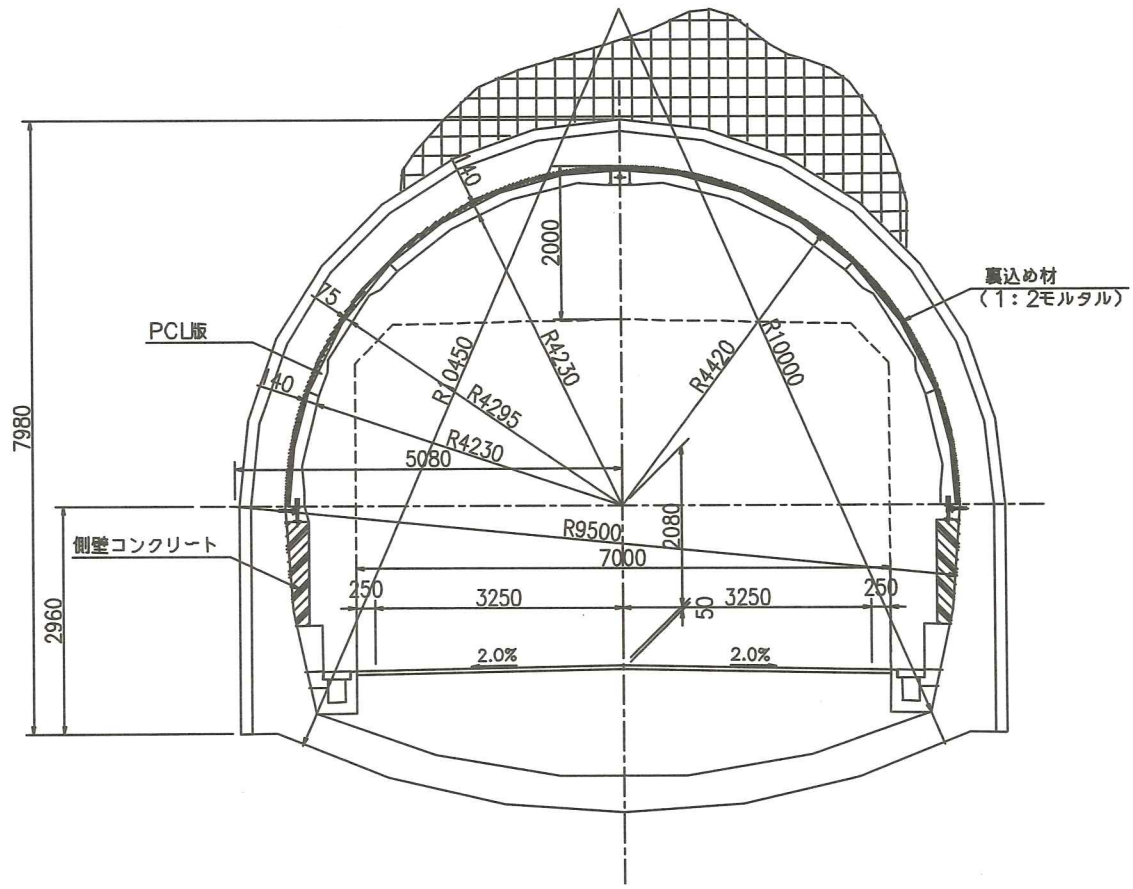
施 工 検 討 例

施工検討例

1.1　検討条件

本検討例は、仮定の検討条件により覆工補強として部分薄肉 PCL 版を使用した場合の施工検討例とする。検討条件は、下記に示す通りである。

(1)　トンネル断面形状



(2) トンネル延長

トンネル補強延長は計 30m とする。

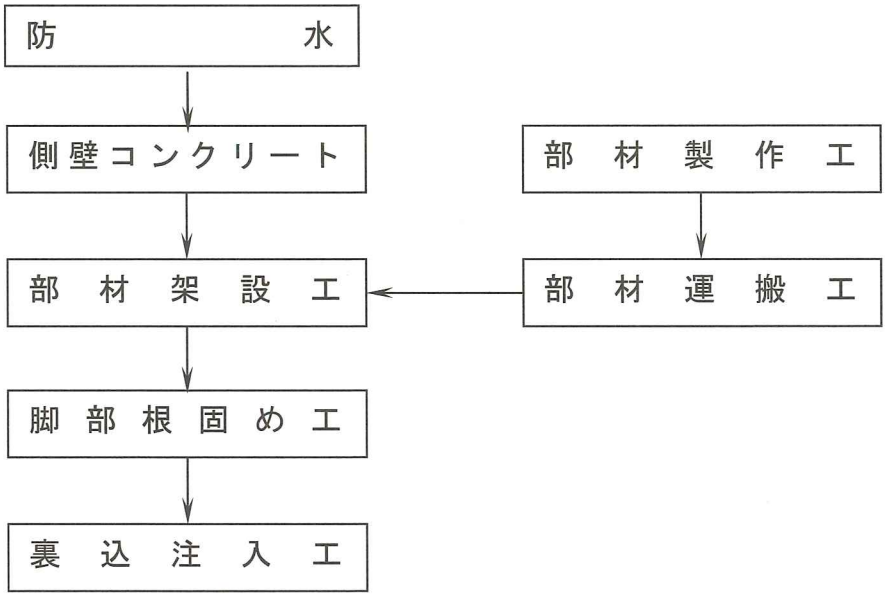
(3) スピンアームによる施工とする。

(4) 日当たり施工枚数は、6 ピース／日程度とする。

(5) 交通条件は、片側交互通行とする。

1.2　施工フロー

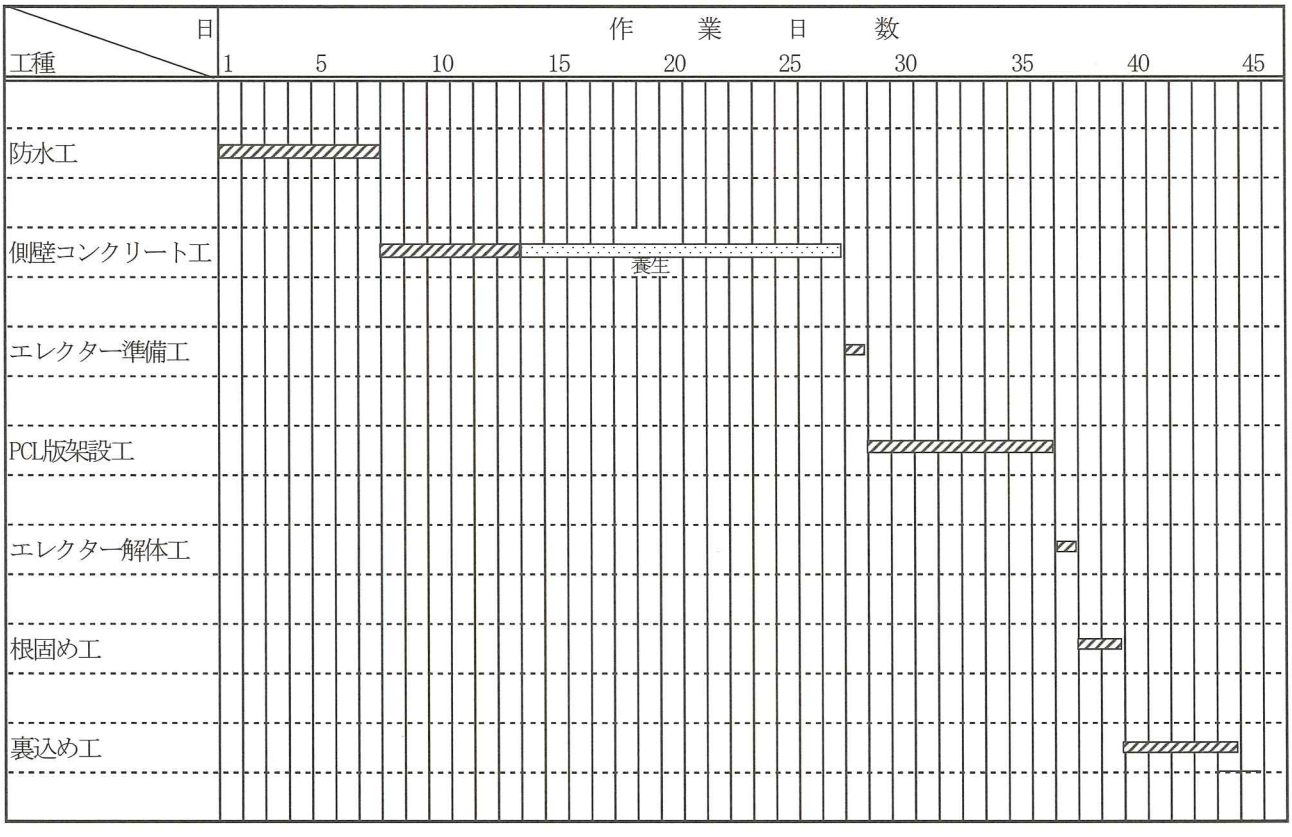
標準施工フローは下記の通りとする。



1.3　施工工程

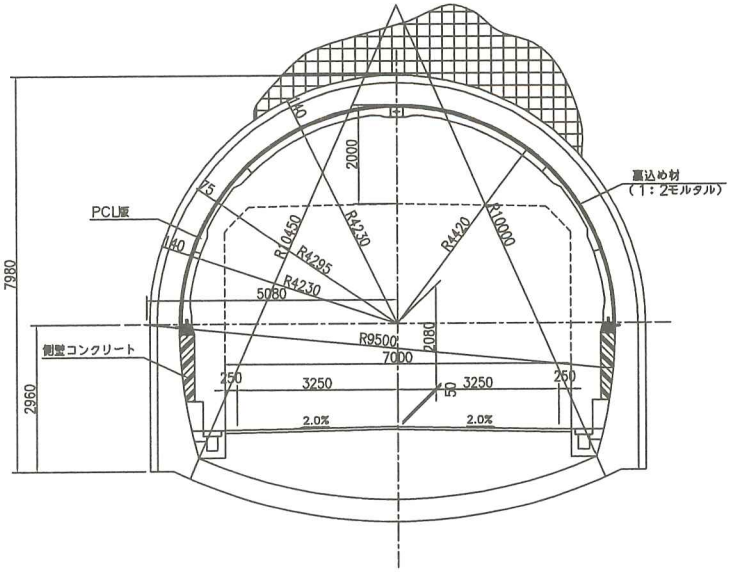
表 1.3.1 に本検討例での施工工程を示す。PCL 工法を用いた場合、比較的短期間での作業が可能となる。

表 1.3.1　工程表

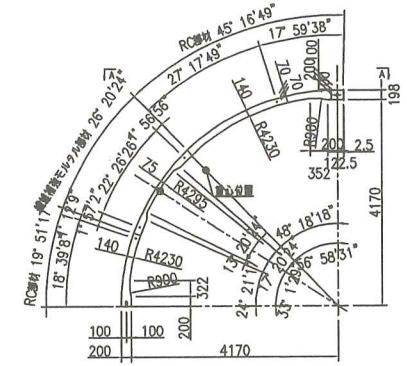


PCL工法一般図　s＝1／50

PCL版断面図



PCL版外形図



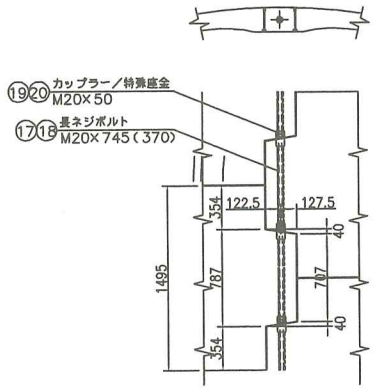
A－A



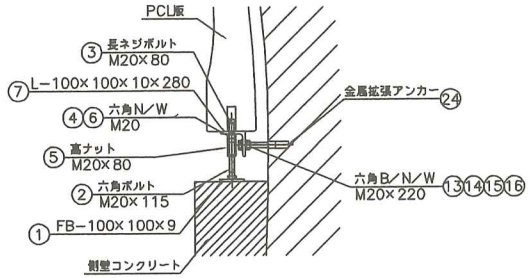
材料表　　1パネルあたり

符号	項　目	規　格	単位	数量	備考
1	高さ調整金具	FB－100×100×9	枚	2	
2		六角ボルト M20×115	本	2	
3		長ネジボルト M20×80	本	2	
4		六角ナット M20	本	2	
5		高ナット M20×70	個	2	
6		平座金 M20	枚	2	
7	リング間引寄せ金具	L－100×100×10×280	個	2	
8		FB－100×100×9	枚	2	
9		六角ナット M20	本	2	溶接
10	リング間引寄せボルト	六角ボルト M20×90	本	1	目地数／毎
11		六角ナット M20	個	1	目地数／毎
12		平座金 M20	枚	1	目地数／毎
13	支持ボルト	六角ボルト M20×140	本	2	
14		高力ボルト用座金 M20	枚	2	
15		六角ナット M20	個	2	
16		平座金 M20	枚	2	
17	天頂部連結長ボルト	長ネジボルト M20×745	本	1	Aパネル
18		長ネジボルト M20×370	本	1	Bパネル
19		カップラー M20×50	個	1	
20		特殊座金 M20	枚	1	
21	押出しボルト	六角ボルト M20×150	本	2	
22	リング間引寄せ	六角ボルト M20×30	本	2	
23	金具固定ボルト	平座金 M20	枚	2	
24	金属拡張アンカー	金属拡張アンカー M20	本	2	

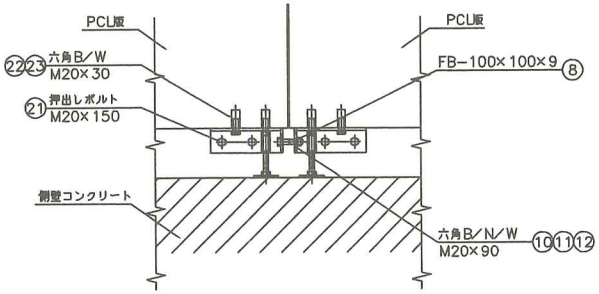
取付詳細図（天頂部）s=1／20



取付詳細図（脚部）　s=1／10



リング間引寄せ詳細図 s=1／10



参考資料２

関　連　論　文

ＰＣＬ版の部分薄肉部に関する要素試験結果報告

日本サミコン㈱　正会員　○音田　奨　独立行政法人土木研究所　正会員　真下　英人
石川島建材工業㈱　正会員　中山 壮一郎　ジオスター㈱　正会員　小高　武
日本コンクリート工業㈱　正会員　石川　高志

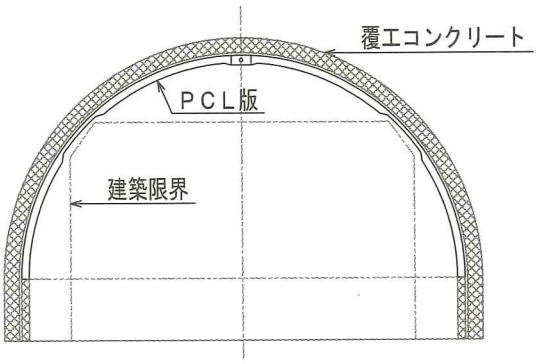
１．はじめに

変状の発生した既設トンネルの耐荷力強化を目的とする補強工法の実現は，緊急の開発課題である．しかも，内空断面に余裕の無い場合では，トンネル肩部で建築限界を確保できないといった難点があった．そこで，**図－１**に示すように，内巻工法の一つであるＰＣＬ工法（プレキャストコンクリートライニング工法）に用いるプレキャスト（ＰＣＬ）版の一部を，部分的に薄肉化することで建築限界の確保を目差した．また，部分薄肉化ＰＣＬ版を実現するために，新素材である反応性微粉末を含んだ鋼繊維モルタルに着目し，適用するための要素試験と，実大規模のトンネル覆工を用いた補強効果に関する載荷実験を実施した．

本報告は，部分薄肉化ＰＣＬ版に関する要素試験結果について述べる．

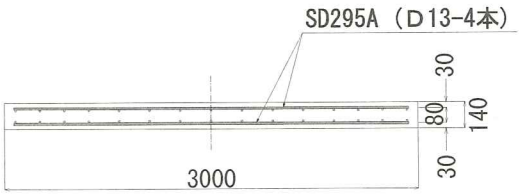
２．載荷試験方法

部分薄肉化ＰＣＬ版に適当と思われる形状と材料を探すため，**表－１**に示す５種類の試験体を用いてその曲げ性能を比較した．本試験体の形状や鉄筋量は，内空幅が9100mmであるトンネルと製造・運搬・施工時荷重を想定して，厚さが140mmで鉄筋の応力度が約145N/mm^2 になるように決定した．

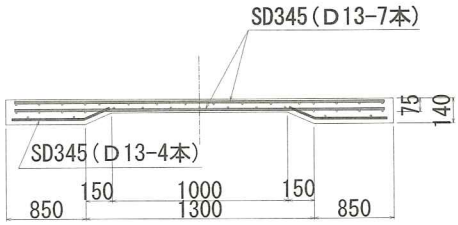


図－１　薄肉部を有すＰＣＬ工法

そこで，試験体には，**図－２**に示す厚さ140mm，幅500mmの鉄筋コンクリート部材（複鉄筋矩形断面）を標準部材Ａとし，部分薄肉部材Ｂを**図－３**に示す厚さ75mm～140mm，幅500mmのような形状に設定した．部分薄肉部材Ｂの種類は，鋼繊維の混入有無，鉄筋補強の有無および養生の違いを組合せて合計４種類とした．鉄筋で補強した試験体３，４，５の場合，標準部材Ａの引張鉄筋の応力度が145N/mm^2 に達する時の曲げモーメントを作用させ，鉄筋の応力度が200N/mm^2 に達するように鉄筋量を設定した．鋼繊維の形状は長さ15mm，径0.2mmで，混入量は２％（体積比）とした．試験体２は鋼繊維混入・鉄筋無し，試験体３は鋼繊維無し・鉄筋補強、試験体４と５には養生条件に相違があり，試験体５では蒸気養生を行わなかった．載荷試験は，支間長2800mmで支間中央から左右に150mm離れた箇所二点に鉛直荷重を載荷して行った．



図－２　標準部材：Ａ



図－３　部分薄肉部材：Ｂ

表－１　試験体の種類

試験体番号	部材種別	部材略称	結合材種類	鉄筋の有無	養生条件	材齢（日）	結合材圧縮強度(N/mm^2)	結合材静弾性係数(kN/mm^2)
1	A	RC	コンクリート	有り	気中養生	18	44.1	33.1
2	B	D	高強度鋼繊維モルタル	無し	80℃,72時間＋気中養生	25	186.1	52.6
3	B	G-RC	高強度モルタル(鋼繊維なし)	有り		24	154.9	52.9
4	B	D-RC1	高強度鋼繊維モルタル	有り		12	189.3	53.3
5	B	D-RC2	高強度鋼繊維モルタル	有り	気中養生	20	123.1	51.2

キーワード　トンネル，補修・補強，ＰＣＬ工法，部分薄肉，高強度鋼繊維モルタル
連絡先　〒113-0024　東京都文京区西片１-17-8 ＫＳビル ジオスター㈱内PCL協会事務局 TEL.03-5844-1208

３．試験結果および考察

載荷試験の状況を**写真－１**，載荷試験で得られた支間中央の荷重－変位関係を**図－４**に示す．また，一例として，試験体番号４の載荷試験後のクラックの発生状況を**写真－２**に示す．

載荷試験の結果より以下の点が確認できた．

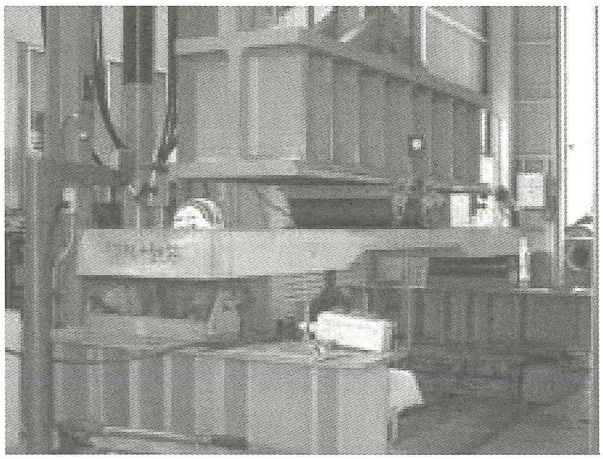
１）標準部材の引張鉄筋の応力が145N/mm^{2}に達する設計上の荷重(9.4 kN)と比較して，いずれの部材も，終局荷重は３～５倍程度あった．

２）部分薄肉部材Ｂの断面変化部（断面厚さが140mm から75mmへ縮小する箇所）には，４種類の試験体全てにおいて，引張応力が集中したと思われるクラックは認められなかった．従って，実物大試験ではこの断面変化部の形状を変更せずこのままで使用できると判断した．

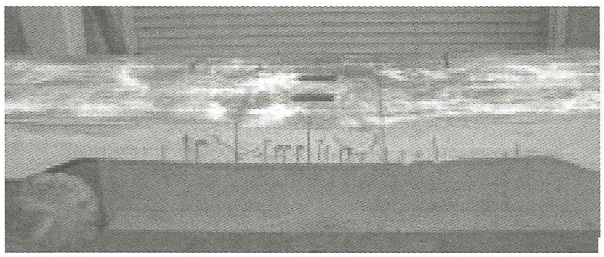
３）初期の荷重－変位関係は，標準部材のＡの厚さが部分薄肉部材Ｂより厚いため，曲げ剛性の大きさに比例して急勾配となった．

４）蒸気養生を行った試験体４（**Ｄ－ＲＣ１**）と気中養生だけ行った試験体５（**Ｄ－ＲＣ２**）では，終局荷重に殆ど差が見られなかった．両者の相違点は，養生方法の相違による圧縮強度だけであることから，その圧縮強度の差が終局荷重時の支間中央変位の最大値に現れているものと推測される．また，ＲＣ理論による計算結果においても，コンクリートに生じる圧縮応力が結合材の圧縮強度より十分小さかったことから，本試験においては，両者の結合材の圧縮強度は低くても同程度の終局荷重を得ることができたものと思われる．

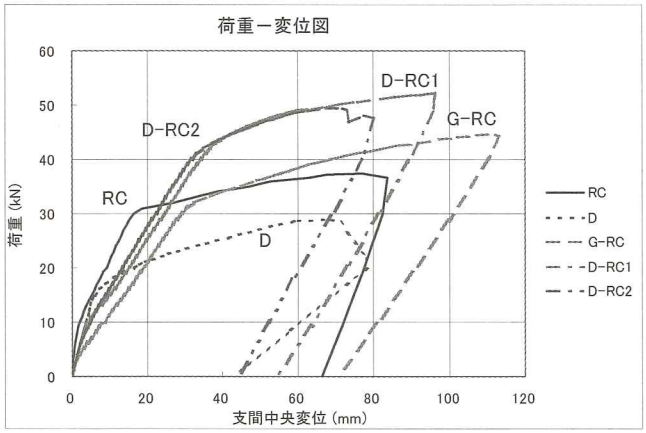
５）鉄筋を配置していない試験体２（**Ｄ**）部材では，終局荷重時でも圧縮破壊を生じなかった．また，荷重－変位関係は，他の部材と異なり，終局荷重に達した後もなだらかに荷重が減少しながら変位が増加していた．これらの現象は，引張縁から次第に鋼繊維が抜け出したため，引張鋼材量が荷重の増加とともに減少したためと考えられる．一方，初期の荷重－変位関係が他の部分薄肉部材より勾配が急であったが，目視観察の結果，鋼繊維が他の部材より下縁に多く集積したことの影響と考えられる．



写真－１　載荷試験状況



写真－２　載荷試験状況



図－４　荷重変位図

６）試験体３（**Ｇ－ＲＣ**）の初期の荷重－変位関係は，同程度の曲げ剛性（＝EI）を有する試験体２（**Ｄ**），試験体４（**Ｄ－ＲＣ１**）および試験体５（**Ｄ－ＲＣ２**）より緩やかであった．これは，試験体３が，鋼繊維を混入していないために気中養生中に発生したと思われる収縮クラックの影響によるものと推測される．

４．まとめ

ＰＣＬ版の部分薄肉化を実現するために，新素材である反応性微粉末を含んだ鋼繊維モルタルに着目し，標準部材Ａ（ＲＣ）とあわせて５種類の試験体について曲げ試験を行った．その結果，高強度鋼繊維モルタルに鉄筋を配置した試験体４（**Ｄ－ＲＣ１**）は，曲げによるクラックが細かく分散し最も大きな終局荷重を示した．そこで，耐荷力の観点から試験体４が部分薄肉部材として最もふさわしいと判断した．今後はこの部材を用いて行った裏込め材に関する付着性能試験や実物規模の試験体を用いた補強効果に関する試験結果について報告する予定である．

参考文献

１）箱石・真下・石村・森本：損傷トンネル覆工にける内巻きコンクリートの補強効果に関する実験的研究，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，2003.

２）砂金・真下：ﾄﾝﾈﾙ覆工の耐荷力に及ぼす鋼繊維補強コンクリートの効果，土木技術資料44-12(2002)

部分薄肉化ＰＣＬ版を用いたトンネル覆工の補強方法の開発

独立行政法人土木研究所　正会員　真下　英人　日本コンクリート工業㈱　正会員　松尾　久幸
ジオスター㈱　正会員　○久保田　伸一　日本サミコン㈱　正会員　音田　奨
石川島建材工業㈱　正会員　中山　壮一郎

１．はじめに

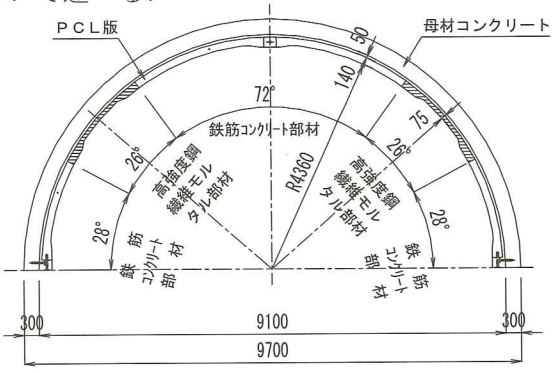
「ＰＣＬ版の部分的薄肉部に関する要素試験結果報告」の試験結果をもとに製作した部分薄肉化ＰＣＬ版を，予め覆工コンクリートが終局状態になるまで載荷して損傷を与えた実大規模のトンネル覆工の内側に，ＰＣＬ工法の布設手順に準じて内巻き補強し，その補強効果を確認することとした．

本報告は，部分薄肉化ＰＣＬ版の補強効果に関する実験結果について述べる．

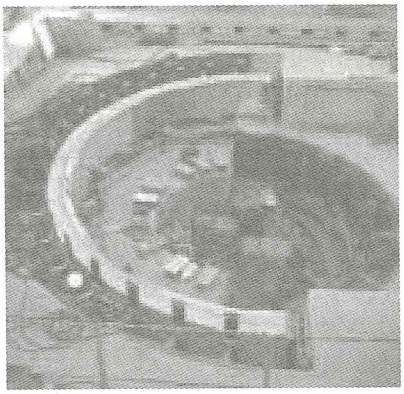
２．実験概要

実験は，山岳トンネルにおいて覆工に緩み荷重が作用した場合を想定して行った．供試体は，予め損傷を与えた覆工コンクリート（外形 9.7m，厚さ 30ｃｍ，高さ 1.0mの半円形）をＰＣＬ版で内巻き補強したものを使用した．覆工コンクリートは，補強後の載荷実験と同じ要領で載荷実験を行い，覆工コンクリートが終局状態になるまで損傷を与えた．

覆工コンクリートは無筋コンクリートとし，ＰＣＬ版は要素試験の結果に基き，鉄筋コンクリート部材（ｔ＝14ｃｍ）にはD13の主鉄筋を内外面ともに 8 本配置し，高強度鋼繊維モルタル部材（ｔ＝7.5ｃｍ）には長さ 15mm，径 0.2mmの鋼繊維を 2%（体積比）混入したのに加えてD13 の主鉄筋を内外面とも 15 本配置した．ＰＣＬ版は，まず高強度鋼繊維モルタル部材を製造した後に鉄筋コンクリート部材を製造し，互いの鉄筋は重ね継手で継いだ．またＰＣＬ版と覆工コンクリートの隙間(50mm)には裏込めモルタル(1:2 モルタル)を打設した．供試体概要を**図－１**に示す．



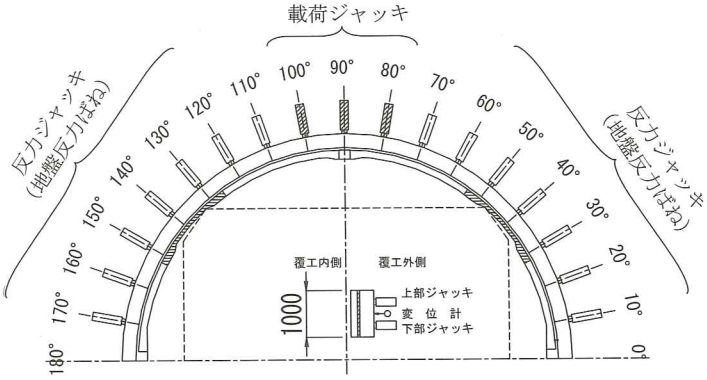
図－１　供試体概要図



写真－１　載荷実験状況

載荷は，**写真－１**及び**図－２**に示すように覆工を内面側から見て右側を 0 度と定義した座標系において，10～170 度全ての断面で軸力を導入し（20kN），その後天端の 80～100 度の 3 断面で載荷を継続し，残りの部分のジャッキはバルブを閉めることでジャッキを地盤反力ばねに模擬して行った．

荷重の制御方式は軸力導入までは荷重制御とし，その後は変位制御とした．変位制御時の載荷ピッチを**表－１**に示す．



図－２　載荷実験概要

表－１　載荷ピッチ

変　位	90°	80° 100°
10mm まで	0.4mm	0.25mm
終了まで	0.8mm	0.5mm

キーワード　トンネル，補修・補強，ＰＣＬ工法，部分薄肉，高強度鋼繊維モルタル
連絡先　〒113-0024　東京都文京区西片 1-17-8　ＫＳビル　ジオスター(株)内 PCL 協会事務局　ＴＥＬ03-5844-1208

3．実験結果

表－2に管理供試体の試験結果を示す．各試験は，載荷実験当日に行ったものである．

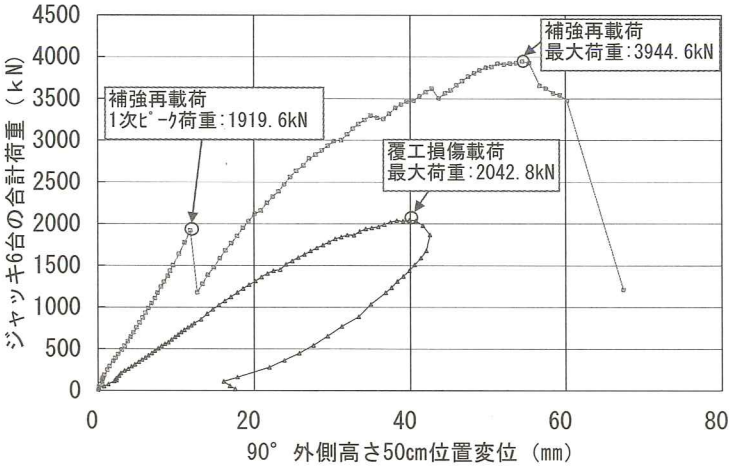
図－3に覆工コンクリートに損傷を与えるために行った載荷実験の荷重変位曲線と補強後に行った載荷実験の荷重変位曲線を示す．

覆工コンクリートに損傷を与えるための載荷実験では，載荷ジャッキの合計が2042.8kNで最大荷重に達した．その後，円周方向に長いひび割れを観測して載荷を終了した．（**写真－2**）

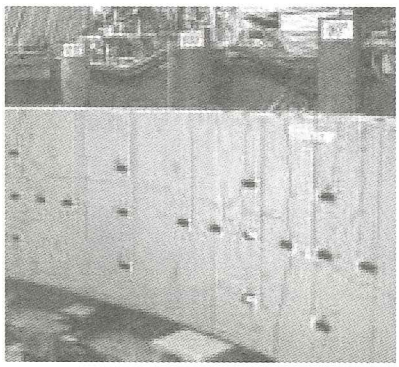
補強後の載荷実験では，載荷ジャッキの合計が1919.6kNに達した時にＰＣＬ版の90°上部外面側が欠け，荷重が急激に落ちた．これは，左右のＰＣＬ版天頂接合部には若干のすきまがあり，その隙間分ＰＣＬ版が変位したため，裏込めモルタルとＰＣＬ版との付着が切れたためと考える．その後，載荷荷重は上昇し，最大荷重3944.6kNに達した．これは，裏込めモルタルとＰＣＬ版が重ね部材として荷重に抵抗したためと考える．また，その後若干荷重が低下した後に，ＰＣＬ版90°付近の内面が崩壊し，それと同時に覆工外面側コンクリートが大きく剥落して実験を終了した．（**写真－3**，**写真－4**）

表－2　管理供試体試験結果

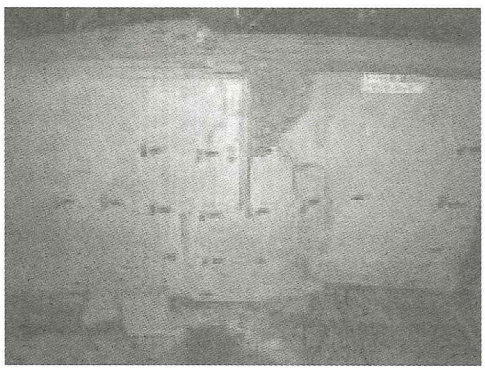
	圧縮強度 N/mm²	静弾性係数 kN/mm²	ポアソン比	備　考
覆工コンクリート	14.9	15.2	0.17	損傷載荷時
PCL版（コンクリート）	76.1	34.7	0.17	再載荷時
PCL版（高強度鋼繊維ﾓﾙﾀﾙ）	210.0	53.1	0.20	再載荷時
裏込めモルタル	36.3	18.8	0.23	再載荷時
覆工コンクリート	23.9	18.7	0.20	再載荷時



図－3　荷重変位曲線



写真－2　覆工損傷状態



写真－3　再載荷最終状態１（補強内面，上面）



写真－4　再載荷最終状態２（90°覆工外面）

4．まとめ

山岳トンネルにおいて覆工に緩み荷重が作用した場合を想定して行った実験では，薄肉部を有するＰＣＬ版で補強したトンネルは，無筋コンクリートで覆工した健全なトンネルと同程度の耐力を有していることが確認できた．今後は，膨張性地山に挙げられる特殊地山で全周から荷重が作用した場合を想定して同様の実験を行い，部分薄肉化ＰＣＬ版を用いたトンネル覆工の補強方法の開発に努めたい．

参考文献

1）箱石・真下・石村・森本：損傷トンネル覆工における内巻きコンクリートの補強効果に関する実験的研究，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，2003.

2）砂金・真下：ﾄﾝﾈﾙ覆工の耐荷力に及ぼす鋼繊維補強コンクリートの効果，土木技術資料44-12(2002)