

プレキャストアーチカルバートの限界状態の 評価に関する共同研究報告書

-2ヒンジ式及び3ヒンジ式プレキャストアーチカルバートの正負交番載荷実験-

平成29年3月

国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター
モジュラーチ工法協会
日本テクスパン協会

Copyright © (2017) 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、国立研究開発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、この報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発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。

プレキャストアーチカルバートの限界状態の 評価に関する共同研究報告書

-2 ヒンジ式及び 3 ヒンジ式プレキャストアーチカルバートの正負交番載荷実験-

国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター

上 席 研 究 員 石田 雅博
主 任 研 究 員 篠原 聖二^{※1}
主 任 研 究 員 宇佐美 惣^{※2} (平成 26 年 8 月～)
研 究 員 吉田 英二 (平成 27 年 4 月～)
交 流 研 究 員 藤原 慎八^{※3} (～平成 26 年 9 月)
交 流 研 究 員 久保田 伸一 (平成 26 年 10 月～)

モジュラーチ工法協会

技 術 委 員 長 小高 武
副技術委員長 三岡 善平

日本テクスパン協会

技 術 部 会 長 大谷 義則
技術部会副会長 畠山 慎二
技 術 部 会 員 瀬戸 英俊
技 術 部 会 員 畠山 慎二
技 術 部 会 員 小林 達也

※1 現 阪神高速道路株式会社

※2 現 中日本高速道路株式会社

※3 現 ジオスター株式会社

要 旨

組立式のプレキャストアーチカルバートである 2 ヒンジ式アーチカルバート工法と 3 ヒンジ式アーチカルバート工法は、道路土工カルバート工指針における従来型カルバートの適用範囲外の構造となる。そのような構造の場合、地震時の限界性能を評価するためには、構造物自体の地震時挙動を把握しておくことが必要となる。

本研究は両方のヒンジ式アーチカルバートの耐震性能の評価手法を確立することを目的として、模型供試体を用いた正負交番載荷実験を行った。その結果、2 ヒンジ、3 ヒンジ式アーチカルバートのいずれも変形能は兵庫県南部地震の非液状化地盤で確認された 1%弱のせん断ひずみに対し安全で、かつ設計指針から安全の目安とした層間変形角 2%を上回る変形能を示した。また、それらのヒンジの回転性能は終局に至るまで損なわれることはなかった。

キーワード： プレキャストアーチカルバート、ヒンジ、地震時限界性能、損傷過程、終局状態、正負交番実験

目次

1.	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	ヒンジ式プレキャストアーチカルバートの特徴	3
1.2.1	カルバート指針による分類	3
1.2.2	カルバート指針による耐震性能の評価	5
1.2.3	2 ヒンジアーチの特徴	5
1.2.4	3 ヒンジアーチの特徴	9
1.3	ヒンジ式アーチカルバートの耐震性能の評価について	11
2.	正負交番載荷実験	12
2.1	実験概要	12
2.2	供試体の実大寸法での設計条件	15
2.3	事前解析による初期荷重の決定	17
2.4	実験供試体の寸法	21
2.5	実験供試体の製造	22
2.5.1	供試体の仕様	22
2.5.2	供試体の材料物性値試験結果	30
2.5.3	計測機器類	33
2.5.4	実験載荷装置	41
2.6	計測項目および確認項目	42
2.7	載荷手順	43
3.	実験結果	45
3.1	場所打ちアーチの実験結果	45
3.1.1	水平荷重と層間変形角との関係	46
3.1.2	損傷過程および終局状態	47
3.1.3	鋼材のひずみ履歴	53
3.1.4	曲率の計測	55
3.1.5	内空変位量と鉛直荷重の関係	57
3.2	2 ヒンジアーチの実験結果	58
3.2.1	水平荷重と層間変形角との関係	59
3.2.2	損傷過程および終局状態	60
3.2.3	変形能による評価	67
3.2.4	鋼材のひずみ履歴	68
3.2.5	曲率の計測	69

3.2.6	内空変位量と鉛直荷重との関係	71
3.2.7	ヒンジの挙動	72
3.2.8	曲がりボルトの挙動とヒンジに与える影響	73
3.3	3 ヒンジアーチの実験結果	75
3.3.1	水平荷重と層間変形角との関係	76
3.3.2	損傷過程および終局状態	77
3.3.3	変形能による評価	83
3.3.4	鋼材のひずみ履歴	84
3.3.5	曲率の計測	86
3.3.6	内空変位量と鉛直荷重との関係	88
3.3.7	ヒンジの挙動	89
4.	場所打ちアーチとの性能比較	91
4.1	2 ヒンジアーチとの比較	91
4.2	3 ヒンジアーチとの比較	93
5.	まとめ	95
	参考文献	97
	付属資料	99

1. はじめに

1.1. 研究の背景と目的

土工部に適用されるカルバートについては、省力化による工期短縮，部材厚の薄肉化によるコスト削減のために，部材間の接合部にヒンジを有するプレキャストアーチカルバートの採用が広がっている．一方，ヒンジを有するプレキャストアーチカルバートは，平成23年東北地方太平洋沖地震において，大きな被害が生じ，撤去・再構築を余儀なくされた事例があった．ヒンジを有するプレキャストアーチカルバートは構造特性が複雑であり，損傷過程，耐荷力および変形能といった破壊特性に関する技術的知見が少なく，耐震性能の評価手法が確立されていない．

そこで本研究では，プレキャストアーチカルバートを対象に，損傷過程，耐荷力および変形能といった破壊特性を評価し，限界状態を設定するための基礎データを得ることを目的とする．

なお，本研究報告書で対象としたヒンジ式のプレキャストアーチカルバートは，写真-1.1.1に示す2ヒンジ式アーチカルバート工法¹⁾（以降，2ヒンジアーチと称す）および写真-1.1.2に示す3ヒンジ式アーチカルバート工法²⁾（以降，3ヒンジアーチと称す）の2工法とする．



(a) 供用状況写真



(b) 施工写真

写真-1.1.1 2ヒンジアーチカルバート



(a) 供用状況写真



(b) 施工写真

写真-1.1.2 3ヒンジアーチカルバート

道路土工カルバート工指針³⁾（以降、カルバート指針と称す）では、カルバートがある一定の寸法以内であり、ヒンジを有する様な特殊な構造でないことなどの条件を満たす場合は、従来型カルバートとして指針の適用範囲内の構造として取り扱われる。ヒンジ式プレキャストアーチカルバートはヒンジを有するため、剛性ボックスカルバートには属さず、カルバート指針の適用範囲外の構造となる。

耐震性能に関すれば、適用範囲内にある従来型カルバートの場合、これまで地震による大きな被災事例が見られないことから、常時荷重による性能を満たすことができれば、耐震性能は満たされるという慣用設計法の考え方を採用することができる。しかしながら、ヒンジ式アーチカルバートのような適用範囲外カルバートであれば、従来型カルバートと異なる地震時挙動を示す可能性が考えられる。そのため、耐震性能の評価を行うには、適切かつ総合的な検討により、カルバート自体の地震時挙動や限界状態を把握することが必要となる。

1.2. ヒンジ式プレキャストアーチカルバートの特徴

1.2.1. カルバート指針による分類

アーチカルバートは、アーチ効果により経済的な部材が構成できることなどの利点や曲線形状による景観性の向上などが期待できる構造である。カルバート指針の中でのアーチカルバートは図-1.2.1 に示す構造形式による分類では、剛性ボックスカルバートの一種に分類されている。しかしながら、ここで分類されているアーチカルバートとは、場所打ちコンクリート構造やプレキャストコンクリート製の一体化された比較的断面の小さなアーチカルバート⁴⁾を示していると考えられる。

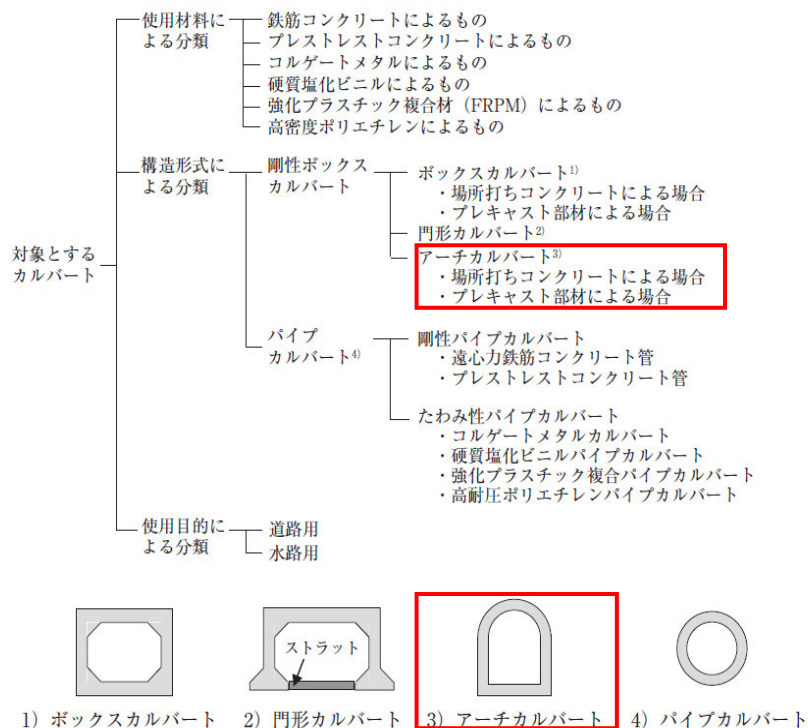


図-1.2.1 カルバートの種類 (カルバート指針³⁾ P.7 抜粋)

カルバート指針では従来型カルバートの場合、所定の構造形式や材料、規模の適用範囲を規定しており、原則として、裏込め・埋戻し材料が土であることや本体構造にヒンジがないことなども規定している。その他には、カルバートの縦断方向勾配が、10%程度以内であること、単独で設置されること、直接基礎により支持されること、中柱によって多連構造になっていないこと、土かぶり 50cm 以上を確保することが挙げられている。また、アーチカルバートの適用範囲寸法を、適用土かぶりでは、場所打ちコンクリートによる場合で 10m 以上、プレキャスト部材による場合で 0.5~14m、断面の大きさでは、場所打ちコンクリートによる場合では内空幅 8m まで、プレキャスト部材による場合では内空幅 3m、内空高さ 3.2m までとしている。したがって、ヒンジ式アーチカルバートはヒンジを有していることから適用範囲外のカルバートとして取り扱われることとなる。また、図-1.2.2 にヒンジ式アーチカルバートの断面ヒンジ位置を示す。

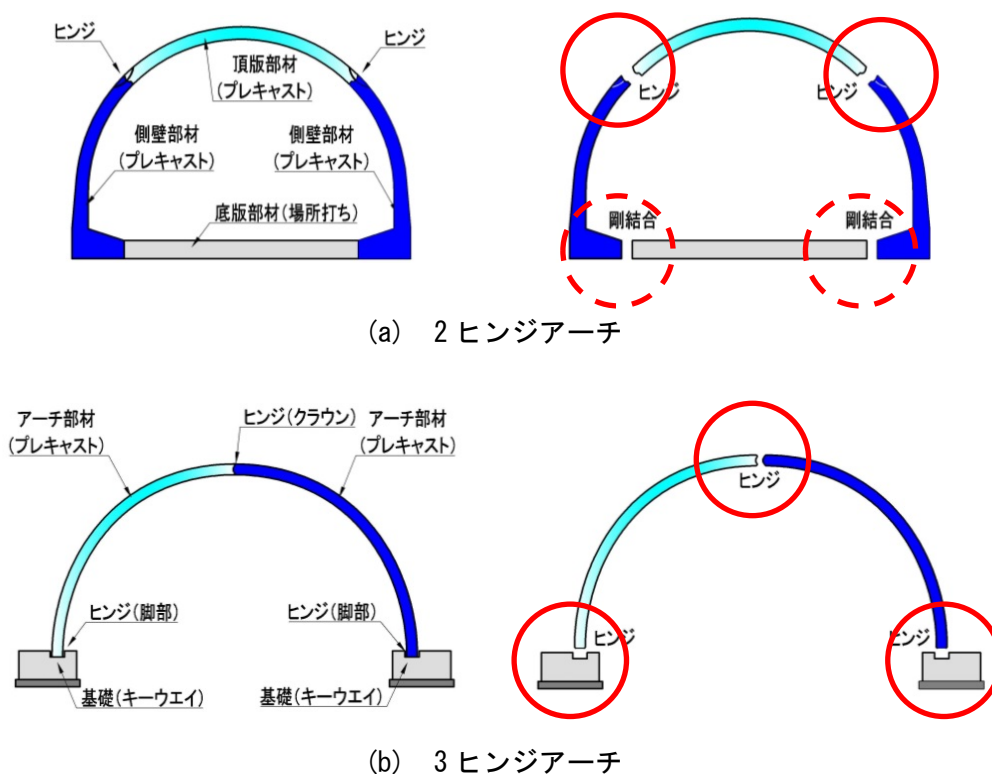


図-1.2.2 ヒンジ式アーチカルバート構造のヒンジ位置

1.2.2. カルバート指針による耐震性能の評価

カルバートの地震時における耐震性能に関する取り扱い、従来型カルバートの適用範囲内であれば省略してもよいとされている。これは、①既往の剛性カルバートの被災事例で大きな被害が生じた事例がないこと、②カルバートのような地中構造物は周辺地盤の挙動の影響が大きく、カルバート自身の慣性力の影響が少ないこと、③剛性カルバートは不静定次数の高いラーメン構造であり、部分的な破壊がカルバート全体の破壊につながる可能性が低いことなどが理由として挙げられている。従来型の適用範囲外となるヒンジ式プレキャストアーチカルバートはこれらの条件には当てはまらないため、耐震性能の評価が必要となる。

1.2.3. 2 ヒンジアーチの特徴

2 ヒンジアーチはフランスで考案され実用化されたプレキャスト部材からなる分割式アーチカルバートトンネルである。構造は図-1.2.2 (a) に示のように、主にプレキャストコンクリート製の頂版部材と左右の側壁部材、場所打ちコンクリートによる底版部材の計 4 部材で構成される。部材間の継手は、頂版と側壁はナックル形状のヒンジ接合、底版部材と側壁とは鉄筋継手による剛接合となっている。ヒンジ部は図-1.2.3 に示すように頂版の脱落防止対策としての曲がりボルト (M24 (10.9)) を挿入しており、ボルト周囲は発錆防止のためのモルタルを充填している。

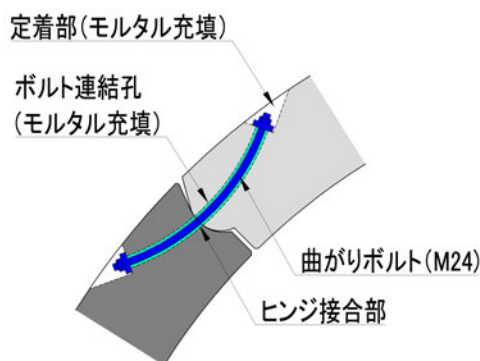


図-1.2.3 曲がりボルト詳細図

2 ヒンジアーチの耐震性に関する研究は、これまで様々な研究がおこなわれてきた。モジュラー工法の耐震性能に関する研究委員会⁵⁾では、模型実験と解析により、単独で設置された 2 ヒンジアーチの横断方向の耐震性の検討をしている。なお同委員会は耐震性を考慮しないフランスでの技術であった 2 ヒンジアーチ工法を、地震国日本で適用するにあたり、特に地震時の安定性に関する検討を実施するため、工法導入当時に設置されたものである。

委員会で行われた模型実験では、水平方向の変形挙動を把握するために実施された静的交番せん断変形実験、動的な荷重に対する挙動を把握するために実施された振動台実験が

ある。図-1.2.4に静的交番せん断実験で用いられたせん断土層実験装置を、図-1.2.5に動
 的实验で使われた地震時の地盤のせん断変形を考慮できるせん断土槽の略図をそれぞれ示
 す。これらの実験から以下のような結果が得られている。

- ・静的載荷の範疇ではあるが、兵庫県南部地震レベルの地盤変位（1.0～1.5%）に対し
 て2ヒンジアーチは部材およびヒンジ部に関して安定を保つ。それを超えるレベルの
 地盤変位に対しても、構造の安定を損なうような状態には至らない。
- ・カルバートの変形は側壁部材の変形量に支配され、頂版部材は剛体変形をするに過ぎ
 ない。この点において2ヒンジアーチは、頂版隅角部がヒンジ結合となった門型構造
 に近い構造である。
- ・土かぶりのあるケースではカルバートと地盤とがほぼ同じ挙動を示しており、一般的
 な地中構造物と同様、地盤の応答に支配されていると考えられる。一方、頂版部材が
 露出したケースでは頂版部材の自己振動によるものとみられる応答加速度の増大が
 見られた。ただし、橋梁の様に自己振動モードが卓越する可能性は極めて小さい。
- ・地震荷重の作用では、ヒンジ部で引張ひずみが発生する事が確認された。ただし、常
 時の圧縮力と重ねあわせると、加振中も常に圧縮軸力が作用しており、継手部が逸脱
 する可能性は低い。

また、同委員会では継手部に引張力が発生した際の対策として継手間連結装置を設置す
 ることが望ましいとされたため、ヒンジにある曲がりボルトは、同委員会の提案を踏まえ
 て、頂版の脱落防止対策として導入された。

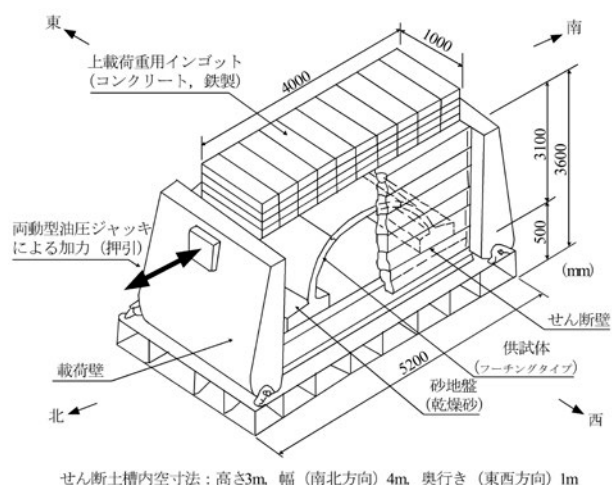


図-1.2.4 2ヒンジアーチの静的交番実験装置 [参考文献⁵⁾より転載]

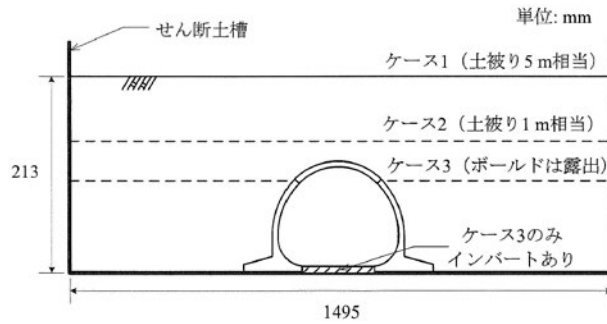


図-1.2.5 2 ヒンジアーチの振動台実験 [参考文献⁵⁾ より転載]

ヒンジ部を含めたカルバート全体構造の地震時挙動に関する研究としては、松下ら⁶⁾が、振動台実験を実施している。実験対象の概略を図-1.2.6 および写真-1.2.1、写真-1.2.2に示す。実験土槽には剛土槽の側壁下部をヒンジ構造として簡易なせん断土槽に改良したものをを用いている。実験で得られた結果は以下である。

- ・ 実験で用いたカルバートのヒンジ部は曲がりボルトを有さない単純な突合せ構造であったが、カルバート横断方向については、地盤のせん断変形が6%を超えるような強地震時においても、部材が終局する前に、ヒンジ部が先行的に破壊する可能性は低い。
- ・ インバートとサイドウォールの継目に亀裂が発生しており、実際の構造において弱点となる可能性がある。

以上の整理より、2 ヒンジアーチの横断方向の耐震性については一定の知見が得られており、レベル2地震動に対しても十分な耐震性を有することが確認されている。

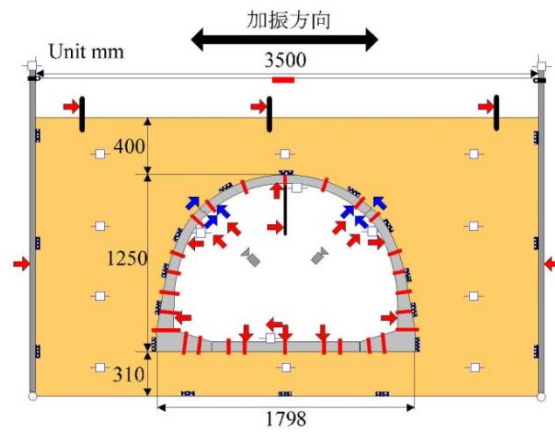


図-1.2.6 2 ヒンジアーチの剛土槽振動実験 [参考文献⁶⁾ より転載]

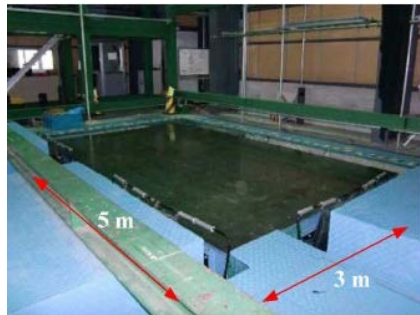


写真-1.2.1 強震応答実験装置の外観
[参考文献⁷⁾ より転載]

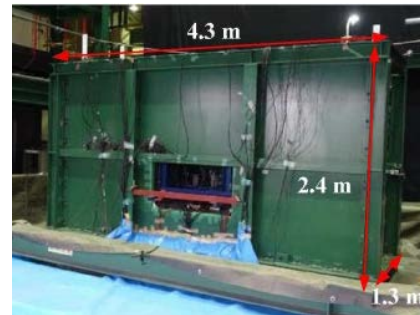


写真-1.2.2 実験土槽の外観
[参考文献⁷⁾ より転載]

1.2.4. 3 ヒンジアーチの特徴

3 ヒンジアーチは、フランスから導入された分割式アーチカルバートンネルである。構造は図-1.2.7 の正面形状に示すように、左右に分割されたコンクリート製プレキャストアーチ部材と現場打ちコンクリート製の基礎で構成される。このアーチ構造には頂部に1箇所、基礎部に2箇所のヒンジが存在し、頂部のヒンジは図-1.2.7 右上に示すように頂部を凹凸に加工した部材を突き合わせることによって、脚部ヒンジについては図-1.2.7 右下に示すように脚部に設置されるゴム系の脚部目地材の変形性能によって構成される。また、アーチ部材は函軸方向に分割されているため、現場打ちコンクリート製の頂部ビーム工によって函軸方向に連結される。

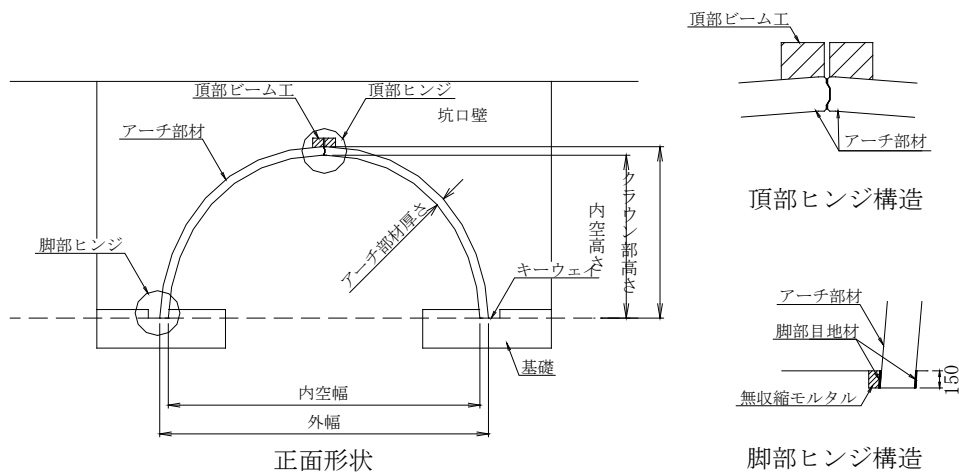


図-1.2.7 3 ヒンジアーチの構造

耐震性に関しては、これまで様々な研究が行われてきた。長岡技術科学大学では、縮尺を 1/20 とした振動台実験が豊岡ら⁸⁾によって行われた。図-1.2.8 に振動実験に用いられた概略図を示す。アーチ部材は縮尺の関係上コンクリートでの作成が困難であったため、アクリル樹脂で作成されている。この実験から以下の結果が得られている。

- ・ 盛土が密な地盤においては、振動によるアーチ部材間の開きはほとんどなく、テールアルメ補強壁の変位も 300gal 程度の正弦波までは安定しているため、この構造物の耐震性は十分期待できる。
- ・ 緩い地盤では振動によるアーチ部材の軸応力は小さくなるが曲げモーメントが大きくなりアーチの構造上好ましくない。

また、アーチ部材をコンクリート製とした地震挙動に関する研究としては、2 ヒンジアーチと同様に澤村ら⁹⁾が振動台実験を実施している。実験対象の概略図を図-1.2.9 および写真-1.2.1、写真-1.2.2 に示す。強震応答実験装置と実験土槽は 2 ヒンジアーチの実験と同じものが使われている。実験土槽には剛土槽の側壁をヒンジ構造として簡易なせん断土槽に改良したものをを用いている。実験で得られた結果は以下の通りである。

- ・ 地盤のせん断ひずみが 1%を超えるような条件においてもヒンジ部の回転角は微小

でありアーチ部材に著しい損傷が発生していない場合には、ヒンジ部から先行的に破壊が進展する可能性は低い。

- ・ 地盤のせん断ひずみが 7%を超えるような大変形レベルになるとアーチ部材では著しい塑性化が発生し、ヒンジ部でも外空側への変位が蓄積するが、部材の終局状態に至る前に先行的にヒンジ部が外れる可能性は低いと考えられる。

以上の結果より、2 ヒンジアーチカルバートと同様に 3 ヒンジアーチカルバートの横断方向の耐震性についても一定の知見が得られており、カルバート指針では、「カルバートの分割接合部にヒンジを有する構造では、カルバートの変位及び変形が大きくなり、また、部分的な破壊がカルバート全体の崩壊につながる可能性がある」との記載があるが、地盤のせん断ひずみが 7%を超えるような大変形時においてもヒンジが破壊もしくは外れる可能性は低いことが確認されている。

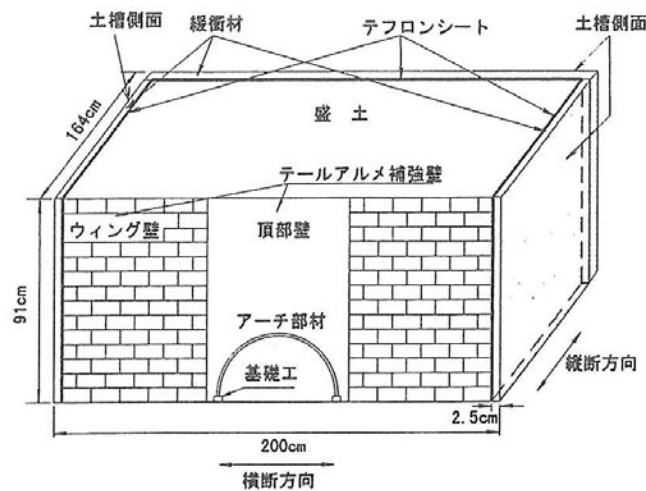


図-1.2.8 実験模型概略図 [参考文献⁸⁾より転載]

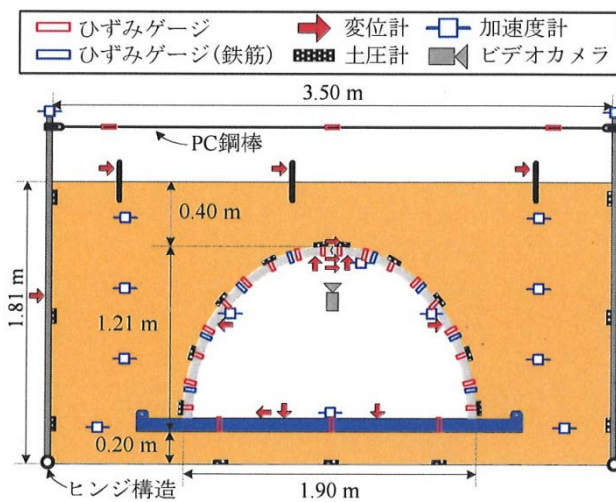


図-1.2.9 実験模型概要図 [参考文献⁷⁾より転載]

1.3. ヒンジ式アーチカルバートの耐震性能の評価について

2 ヒンジアーチおよび3 ヒンジアーチの耐震性能については、これまでの静的及び動的模型実験や数値解析などにより、地震時の挙動は明らかにされており、結果としてレベル 2 規模の地震動に対して、崩壊の危険性が無いこと、ヒンジ部が先行的に破壊する可能性が低いことなど、ある一定の性能を有していることは確認されている。しかしながら、これらの研究では、構造物の地震時の安全性を評価するために重要な、終局に至るまでの損傷過程や終局状態そのものが明らかにはされてはいない。また、レベル 2 規模の地震やそれを超えるような地震動での安全性の確認だけではなく、カルバートが終局に至るような想定以上の地震動が発生した場合の、構造物が終局状態に至るまでのメカニズムまでは判明されていない。特にヒンジ式アーチは高規格道路の様な重要道路のアンダーパスなどに多く使われていることから、カルバートが崩壊することは上部道路の使用が出来なくなるなど、致命的な社会状況を引き起こすことが考えられるため、終局状態そのものの確認は重要である。

本研究では、そのような課題を受けて、2 ヒンジアーチおよび3 ヒンジアーチの横断方向の耐震性能を評価する手法の確立を目的とし、模型供試体による載荷実験を行った。実験では正負交番の繰り返し荷重を、2 ヒンジアーチと3 ヒンジアーチの供試体に対し、構造が終局に至るまで作用させ、地震時の終局に至るまでの損傷過程や終局状態そのものを確認した。

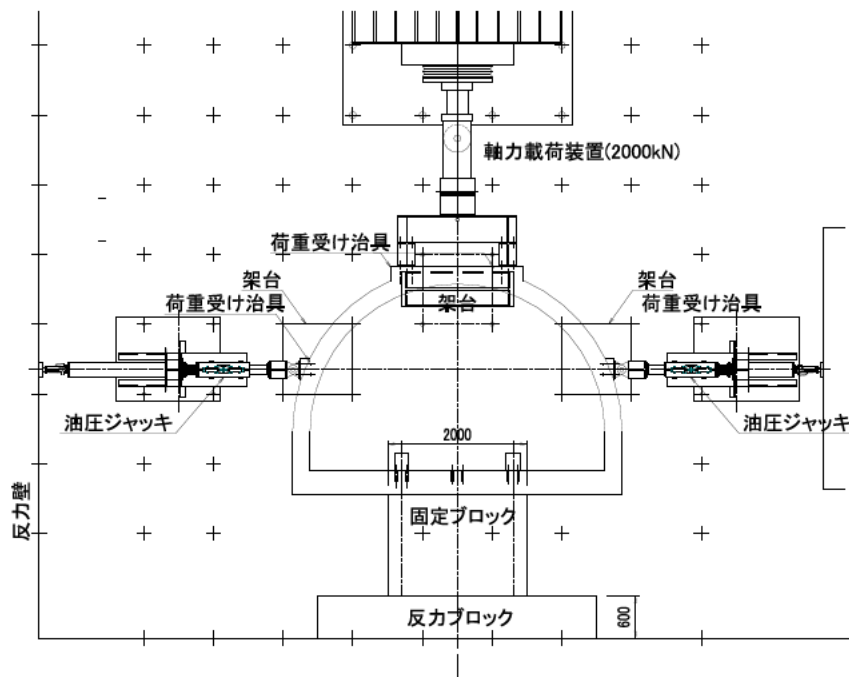
2. 正負交番載荷実験

2.1 実験概要

本研究では2ヒンジアーチと3ヒンジアーチの載荷実験に先行し、評価の参考とするため、カルバート指針における剛性カルバートに分類されている、場所打ちコンクリートにより一体施工された継手の無いアーチカルバート（以降、場所打ちアーチと称す）をモデルとした供試体による載荷実験を行った。したがって、載荷供試体は場所打ちアーチ、2ヒンジアーチ、3ヒンジアーチの合計3体とした。図-2.1.1と写真-2.1.1にそれぞれの実験での載荷状況を示す。供試体への載荷は、終局まで行うことを想定しており、終局時における供試体崩壊の危険を回避するため、写真-2.1.2に示すように実験供試体は函体軸が上を向くように横倒しで設置し実験を行った。なお、アーチのクラウンにある軸力載荷装置は、供試体の水平変位挙動に追従することができる構造となっている。

供試体は固定ブロックを介して反力壁にPC鋼棒および鋼材によって固定した。また3ヒンジアーチの基礎は不等沈下が生じにくい良質地盤に設置することが適用の前提条件であるため、供試体の基礎は鋼材(H-400×400×13×21)2本を用いた剛性の高い構造とした。

載荷は載荷ジャッキにより土圧や自重などの常時の死荷重による断面力を再現した供試体に対し、載荷ジャッキの荷重を保ちながら、左右の水平方向ジャッキにより正負交番の強制変位を終局に至るまで与え、損傷過程と終局状態の確認を行った。ここでいう終局状

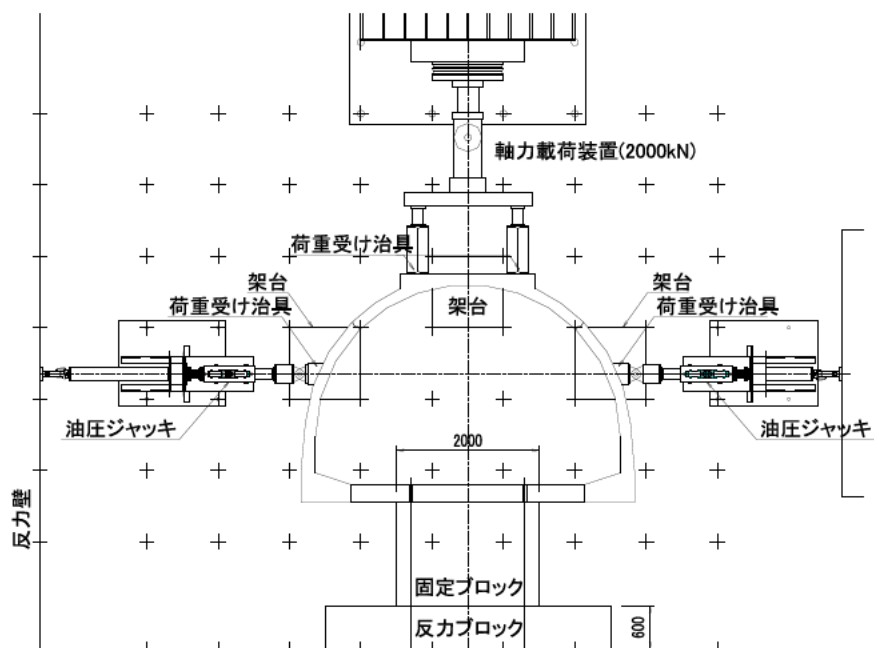


(a) 場所打ちアーチ載荷状況図

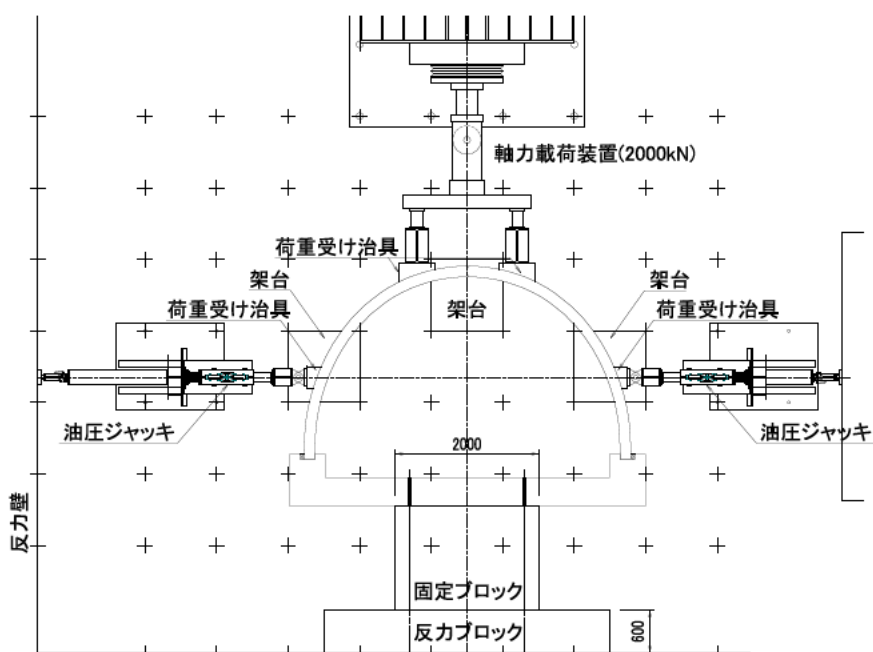
図-2.1.1 アーチカルバート供試体載荷状況図 (その1)

態とは、カルバートの水平耐力が大きく低下し始める状態とし、参考文献 10) から荷重が最大荷重の 80%以下に低下した時と定義した。

なお、場所打ちアーチと 2 ヒンジアーチは、隅角部の損傷過程を評価するために、参考文献 11)の荷重方法に準じて、写真-2.1.1 (a) (b) に示すように固定ブロックをアーチ底版幅より小さくし、隅角部が自由に動くことのできる、いずれの方向にも拘束されないモデルとし、底版の支点位置は図-2.3.1 (a) (b) に示すように固定ブロックの幅とした。

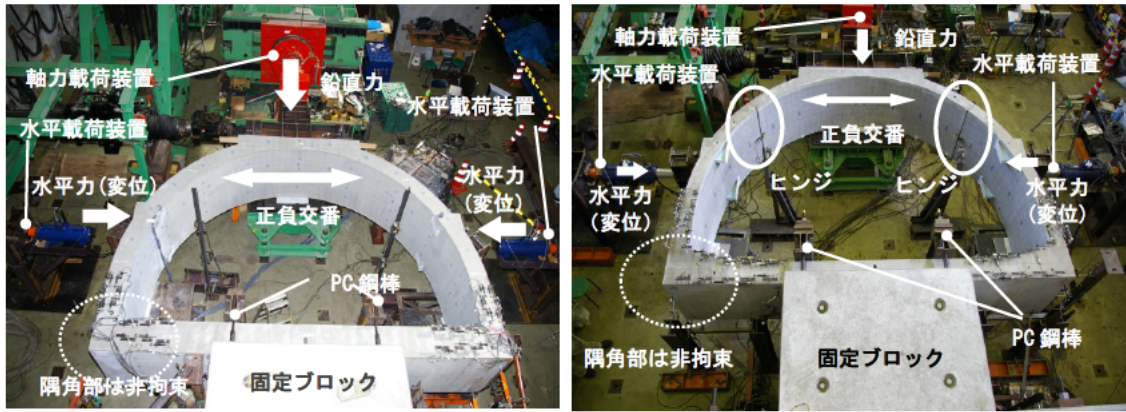


(b) 2 ヒンジアーチ荷重状況図



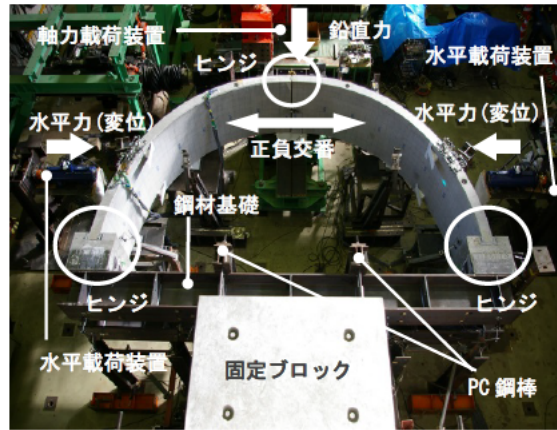
(c) 3 ヒンジアーチ荷重状況図

図-2.1.1 アーチカルバート供試体荷重状況図 (その2)



(a) 場所打ちアーチ

(b) 2 ヒンジアーチ



(c) 3 ヒンジアーチ

写真-2.1.1 供試体設置状況写真

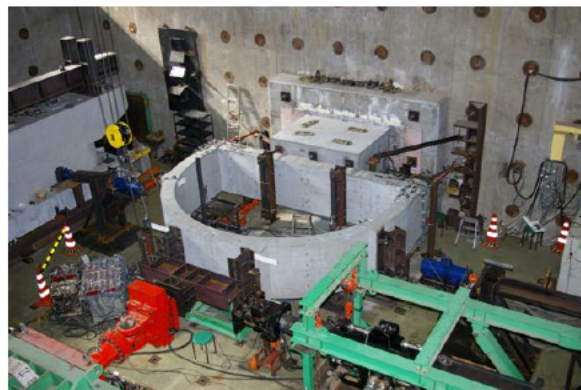


写真-2.1.2 載荷状況写真 (場所打ちアーチの例, 供試体を水平に設置)

2.2 供試体の実大寸法での設計条件

本研究で使用した実験供試体は、実大寸法に対し概ね 1/2 の寸法とした。実験供試体の寸法は、実大寸法の設計結果に縮尺を乗じることで決定した。

実大寸法でのアーチカルバートの仕様を示す。アーチ断面の内空幅は 3 種類のアーチカルバートをカルバート指針の適用範囲外に設定するため、場所打ちコンクリートによる従来型アーチカルバートの適用範囲である内空幅 8.0m 以内を超える 8.5m 程度とした。土かぶり条件は図-2.2.1 に示すように 2.0m とし、常時の荷重条件にてカルバート指針での慣用設計法を用いて部材厚や鉄筋量などの断面諸元を許容応力度法設計にて決定した。設計で使用した設計条件を表-2.2.1 に示す。コンクリートの設計基準強度は 2 ヒンジアーチおよび 3 ヒンジアーチの標準的な強度が 40N/mm^2 であることより、場所打ちアーチを含め、3 種類のアーチを 40N/mm^2 で統一した。部材の設計に使用した許容圧縮応力度は 14N/mm^2 、鉄筋の許容引張応力度は 180N/mm^2 を採用した。せん断力の検討については、コンクリートのみでせん断力を負担できるように部材厚を設計した。また場所打ちアーチと 2 ヒンジアーチは底版に発生する地盤反力を地盤バネで考慮しており、今回は N 値 30 の良質な砂質地盤上に構築されるものとした。

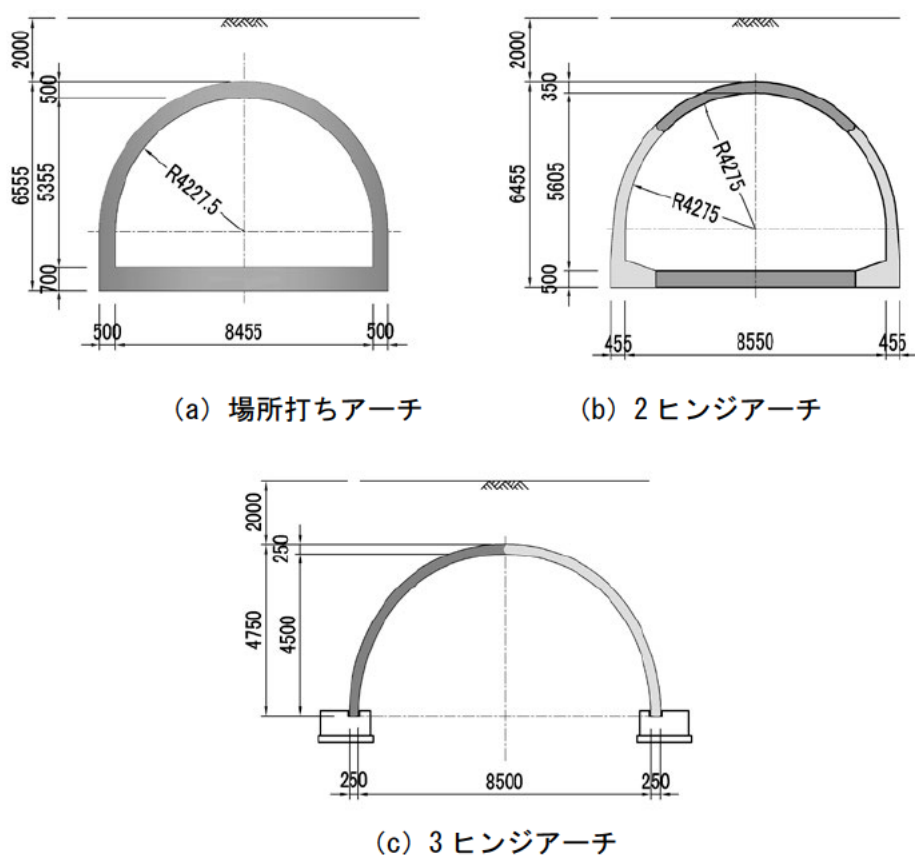


図-2.2.1 実大寸法での設計断面図(単位 mm)

表-2.2.1 実大寸法での構造諸元値

構造		鉄筋コンクリート構造		
設計手法		許容応力度法による		
		せん断の検討	コンクリートのみに負担	
		耐震設計	考慮しない	
		断面の決定	常時計算による	
材料	コンクリート	設計基準強度	40 N/mm ²	
		弾性係数	31 kN/mm ²	
	鉄筋	降伏強度	345 N/mm ²	
		弾性係数	200 kN/mm ²	
許容応力度		コンクリート	14 N/mm ²	
		せん断	0.55 N/mm ²	
		鉄筋	180 N/mm ²	
荷重条件		躯体自重	24.5 kN/m ³	
		土被り	2.0 m	
		埋戻し土	19 kN/m ³	
		活荷重	T-25	
				10 kN/m ²

2.3 事前解析による初期荷重の決定

正負交番荷重に先立ち、それぞれのアーチが図-2.3.1の左側に示すような常時死荷重により実大寸法の設計断面に生じる断面力を実験断面に再現するため、事前解析を行い、図-2.3.1の右側に示すような荷重ジャッキの初期荷重値および支持条件を決定した。

鉛直方向および水平方向の荷重ジャッキから作用させる集中荷重値と荷重位置は、その荷重の作用により供試体に発生する曲げモーメントおよび軸力の値や分布形状が、常時荷重による設計断面での断面力値と分布形状にできるだけ近づけることを目標に決定した。図-2.3.2に常時荷重による設計断面の発生断面力図、集中荷重による実験断面の発生断面力図を示す。

ここで3種類それぞれのアーチに対し、ジャッキの集中荷重によって実際の土圧の様な分布荷重による断面力値および断面力分布を完全に一致させることは困難であった。そのため場所打ちアーチと2ヒンジアーチでは、正負交番荷重によりはじめに損傷を受けると考えられる側壁基部に着目し、側壁基部位置での設計断面と実験断面との断面力を合わせることを目的に集中荷重の大きさおよび作用位置を設定した。

なお、3ヒンジアーチにおいては、実験断面に発生する曲げモーメントと軸力を設計断面に近づけるため、ジャッキの集中荷重を調整した。その結果、図-2.3.1(c)の実験断面に示すように、他アーチと比べ水平荷重が2倍ほど、鉛直荷重が半分ほどの差のある荷重となった。それにより、図-2.3.2(c)に示すような、実験断面のアーチ外側には設計断面では発生しない大きな曲げモーメントが発生した。参考文献2)に記載されている3ヒンジアーチの耐震設計例では、地震荷重を受けた場合、曲げモーメントの最大値はアーチ内側に発生しており、今回のモデルケースにおいても、アーチ内側の曲げモーメントが卓越した状態で終局する事が考えられた。そのため、正負交番荷重を行うにあたり、ジャッキからの集中荷重によって発生する外側引張が原因となるような終局が、内側引張による終局よりも先行して発生しないように、有効断面積の2%¹²⁾を上限とする鉄筋量増加を行った。

これらの事前解析により、実験の初期荷重と荷重位置は図-2.3.1右側に示すように決定した。場所打ちアーチは、図-2.3.1(a)に示すように鉛直方向に270kNの荷重を頂版アーチ中央から1450mmの位置2点に、水平方向に120kNの荷重を底版軸線より3250mmの位置へ載荷することとした。2ヒンジアーチは図-2.3.1(b)に示すように鉛直方向に240kNの荷重を頂版アーチ中央から1450mmの位置2点に、水平方向に80kNの荷重を底版軸線より3350mmの位置へ載荷することとした。3ヒンジアーチは図-2.3.1(c)に示すように鉛直方向に160kNの荷重を頂版アーチ中央から750mmの位置2点に、水平方向に200kNの荷重を底版軸線より2275mmの位置へ載荷することとした。その結果、図-2.3.2(a)に示すように、場所打ちアーチの側壁基部は、モーメントが設計断面155.7kN・mに対し実験断面では156.2kN・m、軸力が設計断面271.6kNに対し実験断面では270.0kNとなり、図-2.3.2(b)に示す2ヒンジアーチの側壁基部は、モーメントが設計断面174.1kN・mに対し実験断面では173.2kN・m、軸力が設計断面238.5kNに対し実験断面240.7kNとなり、

図-2.3.2 (c) に示す 3 ヒンジアーチの内側モーメントが設計断面 $18.5\text{kN}\cdot\text{m}$ に対し実験断面では $25.6\text{kN}\cdot\text{m}$, 軸力が設計断面 259.9kN に対し実験断面では 206.1kN となり, 設計断面と実験断面の曲げモーメントと軸力を合わせることができた. 図-2.3.1 と図-2.3.2 の初期荷重および断面力を整理した一覧を表-2.3.1 に示す.

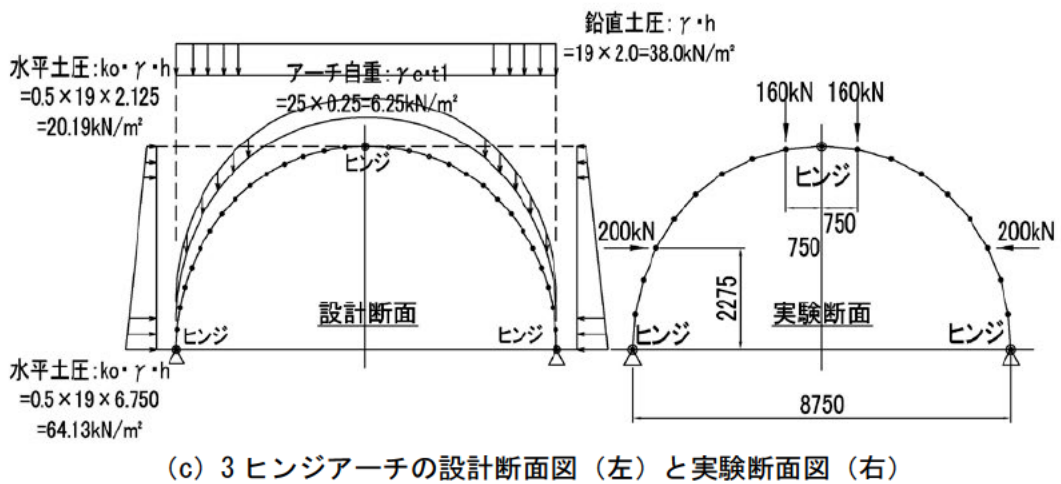
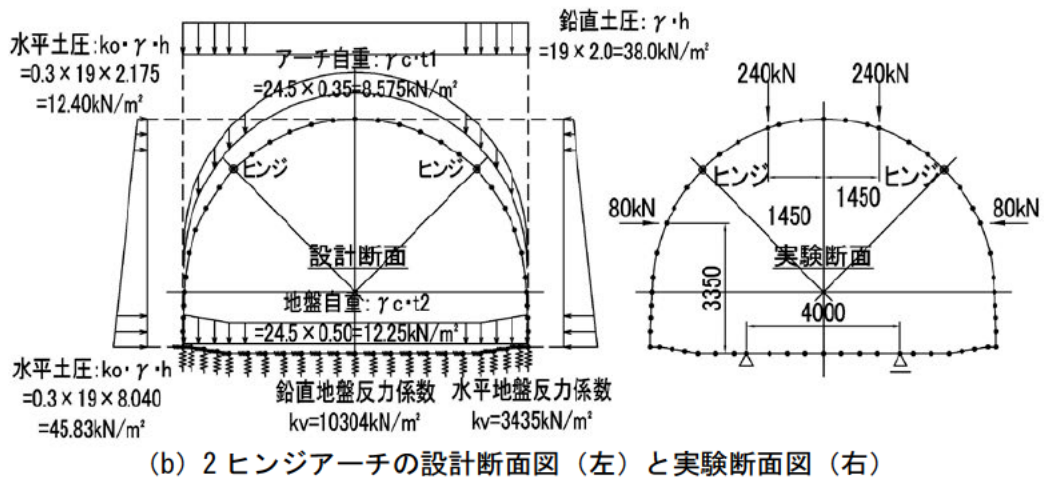
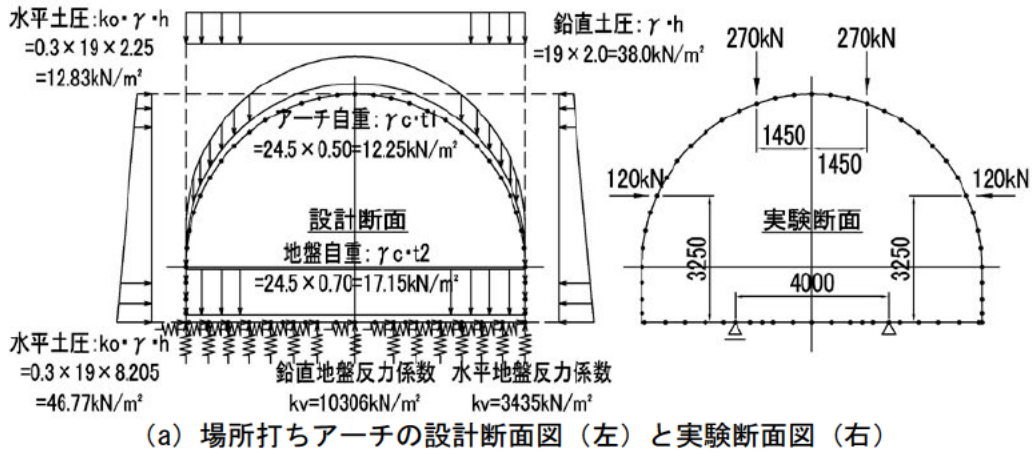
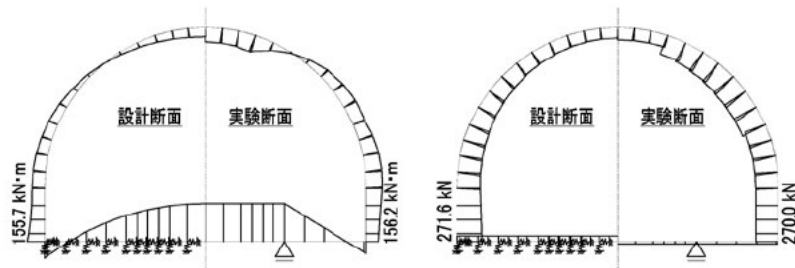
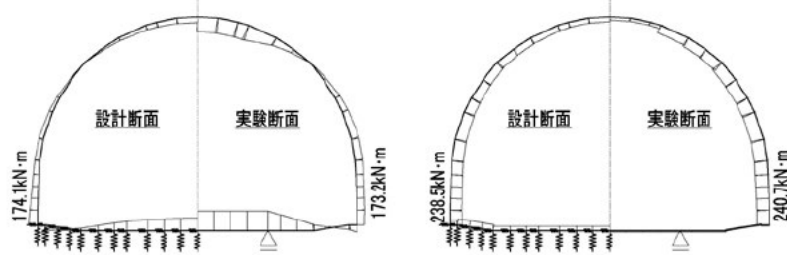


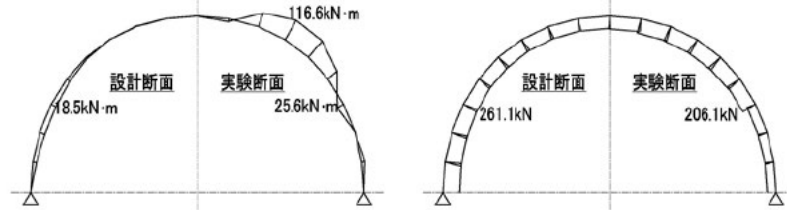
図-2.3.1 実大寸法での解析モデル図 (寸法の単位はmm)



(a) 場所打ちアーチの断面力比較図



(b) 2 ヒンジアーチの断面力比較図



(c) 3 ヒンジアーチの断面力比較図

図-2.3.2 実大寸法での断面力比較図 (左側は曲げモーメント図, 右側は軸力図)

表-2.3.1 初期荷重および断面力一覧

	初期荷重(kN)		断面力：軸力 (kN)		断面力：曲げ (kN・m)	
	鉛直荷重	側方荷重	設計断面	実験断面	設計断面	実験断面
場所打ちアーチ	270	120	271.6	270.0	155.7	156.2
2 ヒンジアーチ	240	80	238.5	240.7	174.1	173.2
3 ヒンジアーチ	160	200	261.1	206.1	18.5	25.6

2.4 実験供試体の寸法

供試体の寸法は、実大寸法での設計モデルで決まった寸法に対し、場所打ちアーチと 2 ヒンジアーチは 1/2 スケールとした。3 ヒンジアーチは概ね 1/2 (設計断面での内幅寸法 8500 mm に対し、供試体の内幅寸法 4800 mm, $4800/8500=0.56$) とし、部材厚は寸法を 10 mm 単位で丸め、0.6 倍スケール (設計断面 250 mm, 供試体断面 150 mm, $150/250=0.6$) とした。供試体の配筋は設計寸法モデルで決定した鉄筋量に対し断面積比を合わせて決定した。供試体の配筋要領図を図-2.4.1 に示す。2 ヒンジアーチのヒンジ部に使用する曲がりボルトについても、実大サイズの規格 M24 に対し断面積比が 1/2 に近い M16 とした。

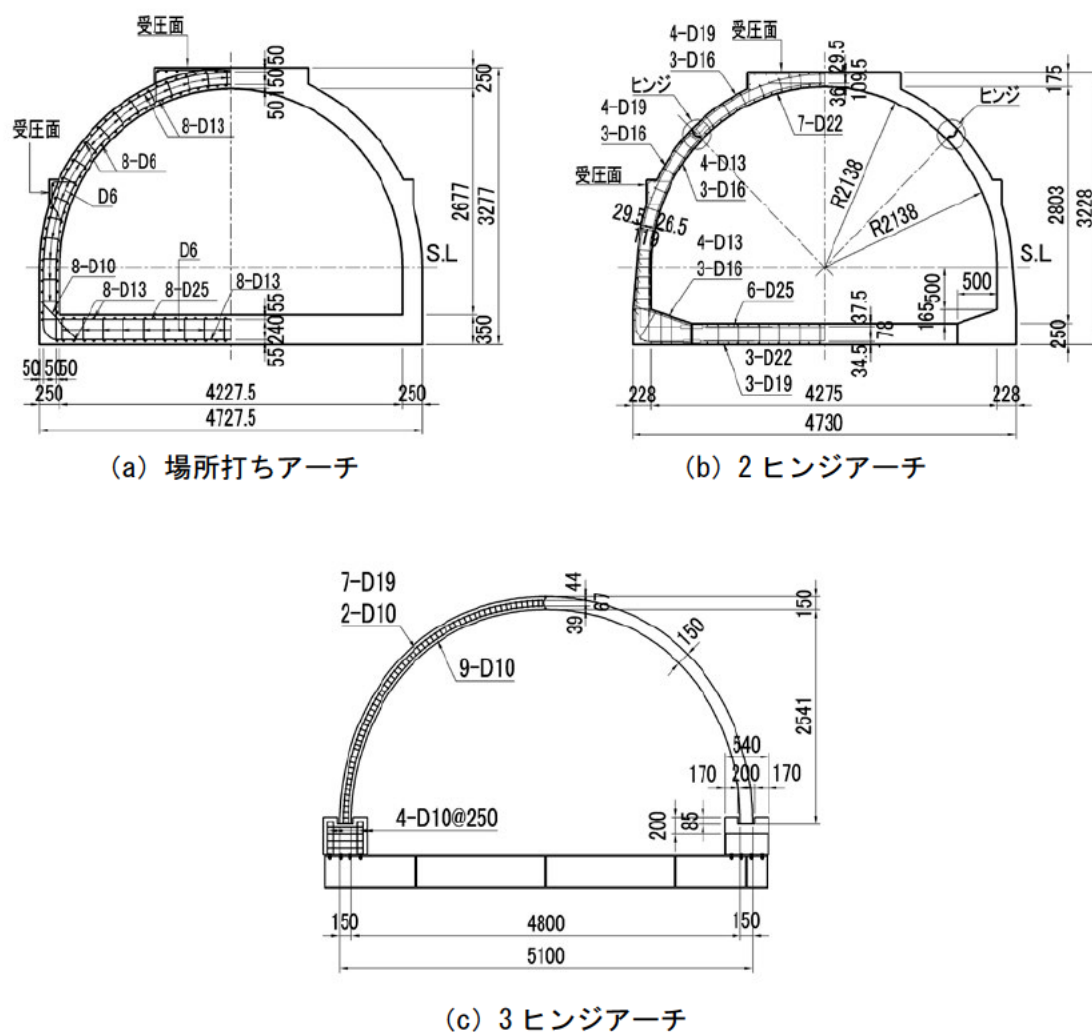


図-2.4.1 供試体構造配筋概要図 (単位mm, 鉄筋本数は奥行 1mあたり)

2.5 実験供試体の製造

供試体のコンクリートの配合表および形状寸法と配筋の製作図を次項以降に示す。

2.5.1 供試体の仕様

1) 場所打ちアーチ

- ・セメント : 普通ポルトランドセメント
- ・粗骨材 : 碎石, 最大寸法20mm
- ・細骨材 : 細砂, 砂
- ・目標強度 : 40N/mm²
- ・スランプ : スランプフロー15cm

表-2.5.1 コンクリートの配合表

セメントの種類		呼び強度 (N/mm ²)		スランプ (cm)		粗骨材最大寸法 (mm)	
普通		40		15		20	
水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	混和材
39.0	40.1	462	180	515	989	4.62	---

- 注) 製造工場 : (株) 浅沼生コン
 セメント : 普通ポルトランドセメント (三菱マテリアル (株))
 細骨材 : 佐野市閑馬町細砂, 千葉県君津市山砂
 粗骨材 : 佐野市閑馬町碎石 2005
 混和剤 : マスターポリヒード 15Sc (AE 減水剤 標準形 (I 種))

2) 2 ヒンジアーチ

- ・セメント : 普通ポルトランドセメント
- ・粗骨材 : 砕石, 最大寸法15mm
- ・細骨材 : 砕砂
- ・目標強度 : 40N/mm²
- ・スランプ : スランプフローの範囲 (mm) 500±75

表-2.5.2 コンクリートの配合表

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン プフロ ーの 範囲 (mm)	空気量 の 範囲 (%)	水結合 材比 W/P (%)	細骨 材率 S/ a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
					水 W	セメ ント C	混和 材 B	膨張 材 E x	細 骨 材 S	粗 骨 材 G	混和剤 A d
15	500±75	2.0± 1.5	30	46	165	526		24	751	916	5.26

- 注) ※セメント : 普通ポルトランドセメント (電気化学工業 (株))
 ※膨張材 : ジプカル (太平洋マテリアル (株))
 ※細骨材 : 砕砂 (第一石産運輸 (株) 埼玉県比企郡小川町産)
 ※粗骨材 : 砕石 (秩父工業 (株) 埼玉県大里郡寄居町産)
 ※混和剤 : 減水剤 : マスターグレニウム 8000E (B A S F ジャパン (株))
 ※水 : 地下水

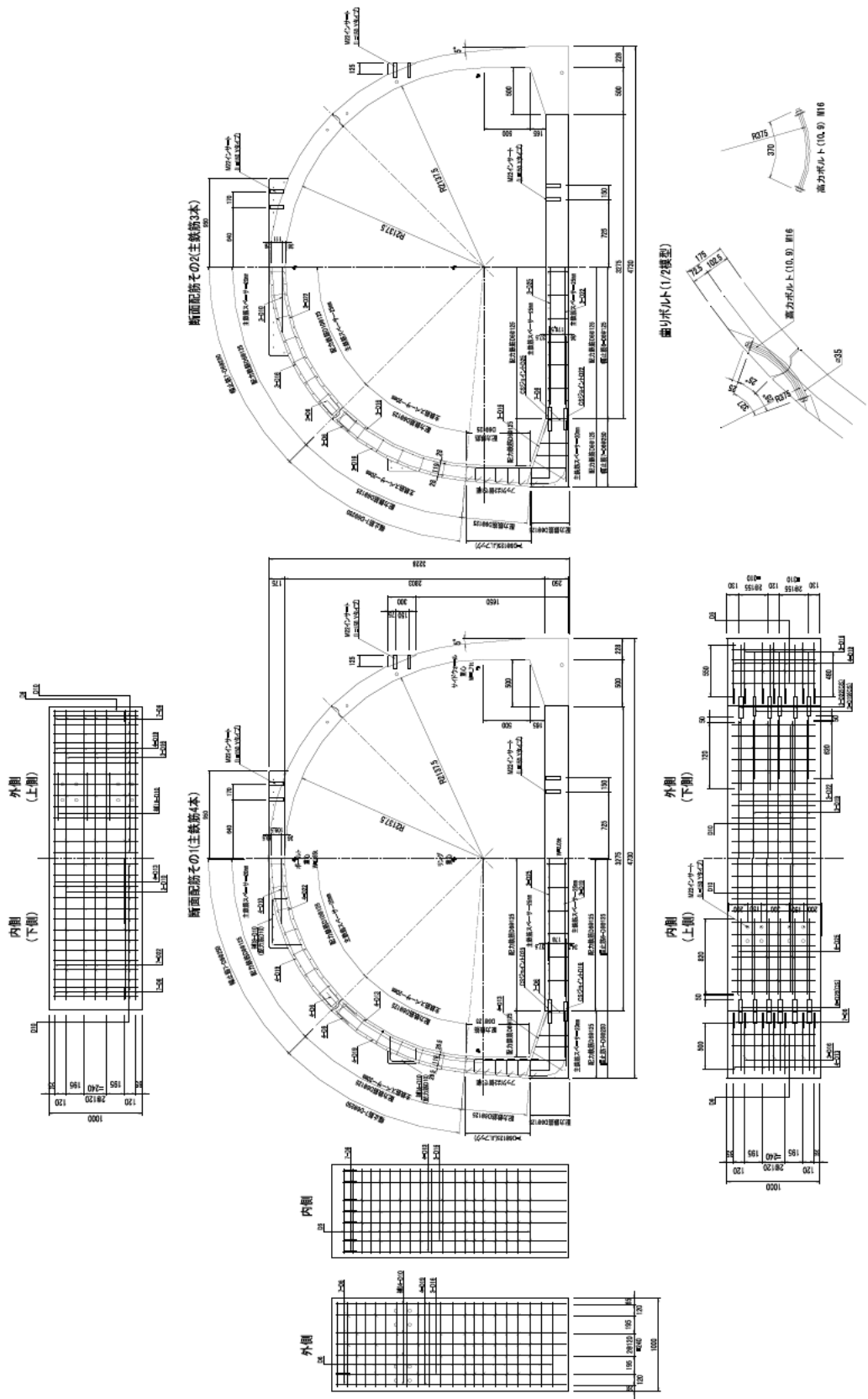


図-2.5.3 2 ヒンジアーチ構造配筋図

3) 3 ヒンジアーチ

- ・セメント : 普通ポルトランドセメント
- ・粗骨材 : 砕石, 最大寸法20mm
- ・細骨材 : 砂
- ・目標強度 : 40N/mm²
- ・スランプ : スランプフロー20cm

表-2.5.3 コンクリートの配合表

セメントの種類		呼び強度 (N/mm ²)		スランプフロー (cm)		粗骨材最大寸法 (mm)	
普通		40		20		20	
水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	混和材
36.0	41.5	439	158	746	1081	4.39	---

注) 製造工場 : 花岡建材工業 (株)
 セメント : 普通ポルトランドセメント ((株) トクヤマ)
 細骨材 : 千葉県市原市万田野
 粗骨材 : 茨城県笠間市産
 混和剤 : 高性能減水剤 I 型 (BASF ジャパン (株))

供試体組立図

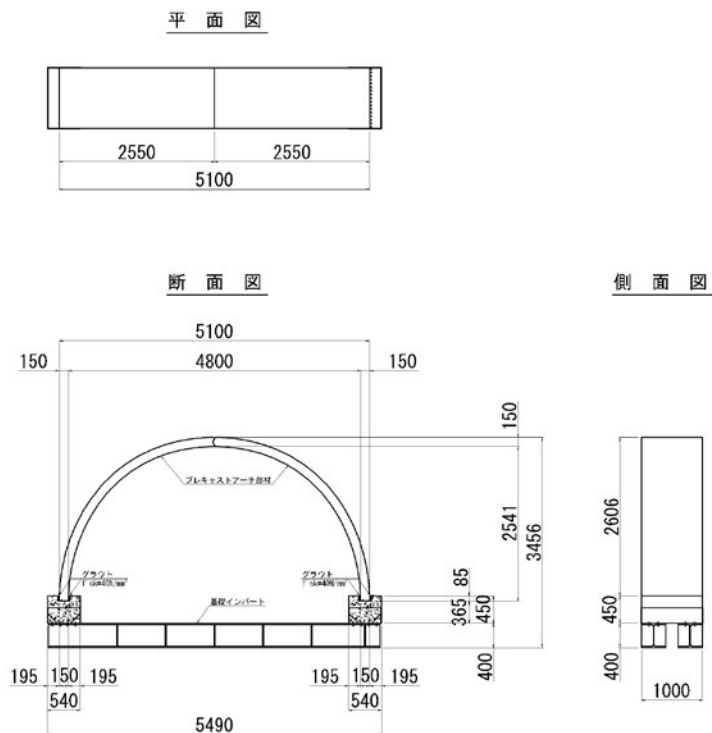


図-2.5.4 3 ヒンジアーチ組立図

2.5.2 供試体の材料物性値試験結果

実験に使用した供試体のコンクリートおよび鉄筋の材料特性試験結果を示す。

1) 場所打ちアーチ

コンクリートのコンシステンシー試験結果を以下に示す。

表-2.5.4 コンクリートのコンシステンシー試験結果

項目	スランプ cm	空気量%	練上り温度℃
本体	14.5	3.5	15.0

模型供試体の実験当日にコンクリートの物性値試験を行った。以下にコンクリート物性値試験結果（3本の平均値）を示す。

表-2.5.5 コンクリートの強度試験結果

項目	材齢	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²
本体	12日	49.8	35.2

鉄筋の引張強度試験を行い、弾性係数、降伏強度、引張強度、伸び、破断強度、応力～ひずみ関係について調べた。以下に鉄筋の引張強度試験結果（3本の平均値）を示す。

表-2.5.6 鉄筋の引張強度試験結果

項目	降伏強度 N/mm ²	弾性係数×10 ⁴ N/mm ²	引張強度 N/mm ²	破断伸び %
D 6(SD345)	435.6	19.5	578.9	24.2
D10(SD345)	402.4	18.4	560.3	18.7
D13(SD345)	386.2	18.0	546.7	18.9
D25(SD345)	372.3	19.2	560.5	---

2) 2 ヒンジアーチ

コンクリートのコンシステンシー試験結果を以下に示す。右側壁，左側壁は，正面図から見てそれぞれの左右の側壁部材を示す。

表-2.5.7 コンクリートのコンシステンシー試験結果

項目	スランプフロー mm	空気量%	練上り温度°C
右側壁	435×430	1.8	22
左側壁，頂版	480×505	1.7	21
インバート	440×450	1.8	18

模型供試体の実験当日にコンクリートの圧縮強度および静弾性係数試験，ポアソン比計測を，その翌日に割裂引張試験を行った。以下にコンクリート物性値試験結果（3本の平均値）を示す。

表-2.5.8 コンクリートの強度試験結果

項目	材齢	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²	ポアソン 比	割裂引張強度 N/mm ²
右側壁	34日	63.1	29.6	0.19	5.3
左側壁，頂版	32日	61.7	29.7	0.20	5.1
インバート	20日	65.6	30.0	0.19	5.5

※割裂引張試験の材齢は圧縮強度の材齢より1日分多い

また，曲がりボルト周辺に充填するモルタルの物性値試験を以下に示す。

表-2.5.9 充填モルタルの強度試験結果

項目	材齢	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²	ポアソン比
充填モルタル	14日	45.4	11.3	0.22

鉄筋の引張強度試験を行い，弾性係数，降伏強度，引張強度，伸び，破断強度，応力～ひずみ関係について調べた。以下に鉄筋の引張強度試験結果（3本の平均値）を示す。

表-2.5.10 鉄筋の引張強度試験結果

項目	降伏強度 N/mm ²	弾性係数×10 ⁴ N/mm ²	引張強度 N/mm ²	破断伸び%
D 6(SD345)	436.3	18.5	589.3	23.0
D10(SD345)	397.3	19.2	553.7	27.0
D13(SD345)	392.3	18.9	576.3	23.0
D16(SD345)	383.0	18.8	566.0	25.3
D19(SD345)	394.0	19.1	574.7	25.0
D22(SD345)	387.7	19.0	562.0	24.7
D25(SD345)	388.3	19.5	569.0	27.3

3) 3 ヒンジアーチ

コンクリートのコンシステンシー試験結果を以下に示す。右側壁，左側壁は，正面図から見てそれぞれの左右の側壁部材を示す。

表-2.5.11 コンクリートのコンシステンシー試験結果

項目	スランプ cm	空気量%	練上り温度℃
右部材	16.5	1.2	10.0
左部材	17.0	0.9	10.0

模型供試体の実験当日にコンクリートの圧縮強度および静弾性係数試験，ポアソン比計測，割裂引張試験結果（3本の平均値）を示す。

表-2.5.12 コンクリートの強度試験結果

項目	材齢	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²	ポアソン 比	割裂引張強度 N/mm ²
右部材	23日	52.5	41.3	0.21	4.4
左部材	20日	45.6	39.0	0.22	2.6
キーウェイ	13日	19.5	-	-	-

また，キーウェイに充填したモルタルの物性値試験を以下に示す。

表-2.5.13 充填モルタルの強度試験結果

項目	材齢	圧縮強度 N/mm ²
充填モルタル	7日	32.4

鉄筋の引張強度試験を行い，弾性係数，降伏強度，引張強度，伸び，破断強度，応力～ひずみ関係について調べた。以下に鉄筋の引張強度試験結果（3本の平均値）を示す。

表-2.5.14 鉄筋の引張強度試験結果

項目	降伏強度 N/mm ²	弾性係数×10 ⁻⁴ N/mm ²	引張強度 N/mm ²
D 6 (SD345)	383.3	20.6	639.7
D10 (SD345)	454.3	18.4	596.7
D19 (SD345)	429.0	17.9	634.0

2.5.3 計測機器類

表-2.5.15～表-2.5.17に実験供試体に使用したひずみゲージ, 変位計の物性値を, 図-2.5.7～図-2.5.11に計測機器類の設置状況図を示す. 載荷実験における測定項目は, 鉄筋ひずみ, ジャッキ荷重, 鉛直荷重, 橋脚水平変位・鉛直変位, 曲率である.

表-2.5.15 場所打ちアーチ計測項目一覧

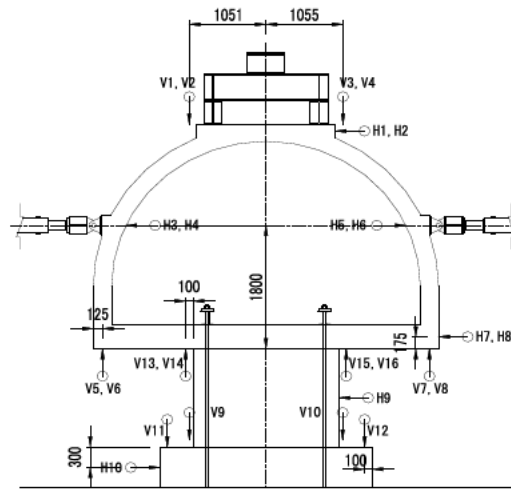
種類	項目	場所	点数	方法
荷重	水平荷重	水平力載荷点	2	ジャッキの後方のロードセル
	鉛直荷重	鉛直力載荷点	1	アクチュエーター内部のロードセル
	小計		3	
変位	水平変位	頂版水平変位	2	レーザー式変位計 (LK500)
		載荷点水平変位	4	レーザー式変位計 (LKG500)
		アーチ下端	2	CDP-50
		ブロック下端	2	CDP-25
	鉛直変位	天端	4	レーザー式変位計 (LB300)
		下端外側	4	SDP-200
		アーチ下端	4	CDP-25
		ブロック下端	4	CDP-50
	曲率変位	部材	24	CDP-25
	小計		50	
	ひずみ	軸方向鉄筋ひずみ		120
変状観測	コンクリートのひび割れ		-	各載荷終了時に目視による詳細観察
	コンクリートの剥離・圧縮破壊		-	〃
	鉄筋のはらみだし・座屈・破壊		-	〃

表-2.5.16 2 ヒンジアーチ計測項目一覧

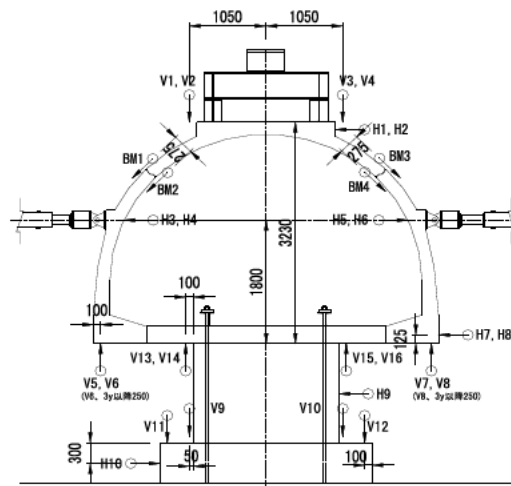
種類	項目	場所	点数	方法
荷重	水平荷重	水平力載荷点	2	ジャッキの後方のロードセル
	鉛直荷重	鉛直力載荷点	1	アクチュエーター内部のロードセル
	小計		3	
変位	水平変位	頂版水平変位	2	レーザー式変位計 (LK500)
		載荷点水平変位	4	レーザー式変位計 (LKG500)
		アーチ下端	2	CDP-25
		ブロック下端	2	CDP-25
	鉛直変位	天端	4	レーザー式変位計 (LB300)
		下端外側	4	SDP-200
		アーチ下端	4	CDP-25
		ブロック下端	4	CDP-25
	曲率変位	部材	32	CDP-25
	回転角	ヒンジ	4	CDP-50
	小計		62	
ひずみ	軸方向鉄筋ひずみ		120	ゲージは 248 枚. 鉄筋の表裏にひずみゲージを 2 枚ずつ
	曲がりボルトひずみ		4	
変状観測	コンクリートのひび割れ		-	各載荷終了時に目視による詳細観察
	コンクリートの剥離・圧縮破壊		-	〃
	鉄筋のはらみだし・座屈・破壊		-	〃

表-2.5.17 3 ヒンジアーチ計測項目一覧

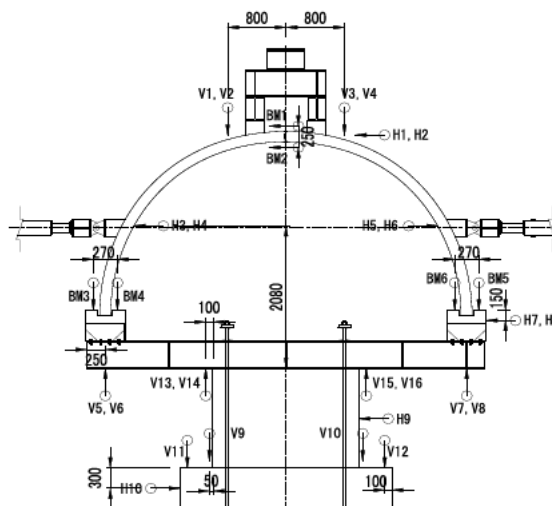
種類	項目	場所	点数	方法
荷重	水平荷重	水平力載荷点	2	ジャッキの後方のロードセル
	鉛直荷重	鉛直力載荷点	1	アクチュエーター内部のロードセル
	小計		3	
変位	水平変位	頂版水平変位	2	レーザー式変位計 (LK500)
		載荷点水平変位	4	レーザー式変位計 (LKG500)
		アーチ下端	2	CDP-50
		ブロック下端	2	CDP-25
	鉛直変位	天端	4	レーザー式変位計 (LB300)
		下端外側	4	CDP-25
		アーチ下端	4	CDP-25
		ブロック下端	4	CDP-25
	曲率変位	部材	12	CDP-25
	回転角	ヒンジ	6	CDP-50
	小計		44	
ひずみ	軸方向鉄筋ひずみ		100	ゲージは 264 枚. 鉄筋の表裏にひずみゲージを 2 枚ずつ
	基礎架台		32	
変状観測	コンクリートのひび割れ		-	各載荷終了時に目視による詳細観察
	コンクリートの剥離・圧縮破壊		-	〃
	鉄筋のはらみだし・座屈・破壊		-	〃



(a) 場所打ちアーチ変位計配置図



(b) 2 ヒンジアーチ変位計配置図



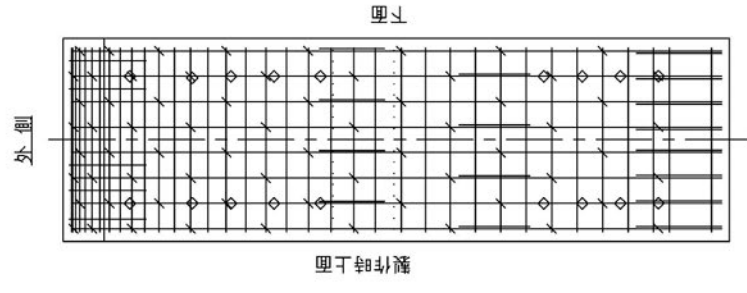
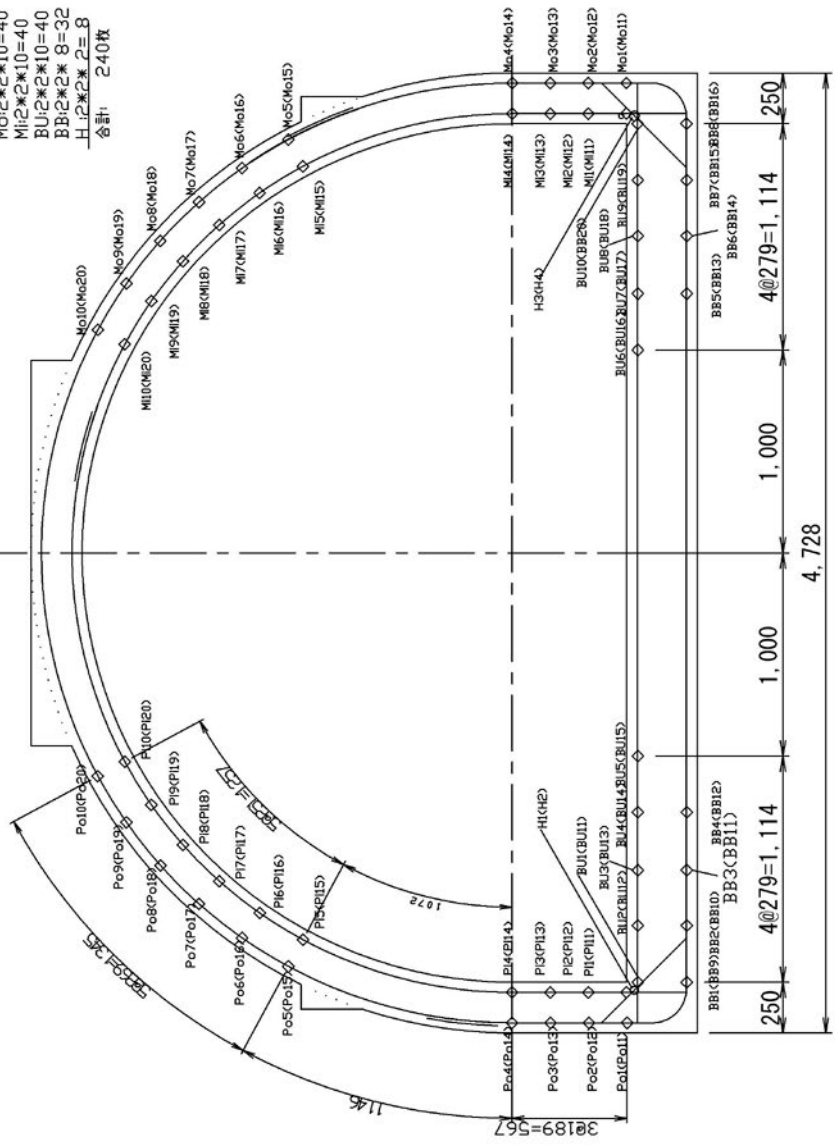
(c) 3 ヒンジアーチ変位計配置図

図-2.5.7 変位計配置図

ゲージ数量

- Po2*2*10=40
- Pl2*2*10=40
- Mo2*2*10=40
- Mi2*2*10=40
- BU2*2*10=40
- BB2*2*8=32
- HJ2*2*2=8
- 合計 240枚

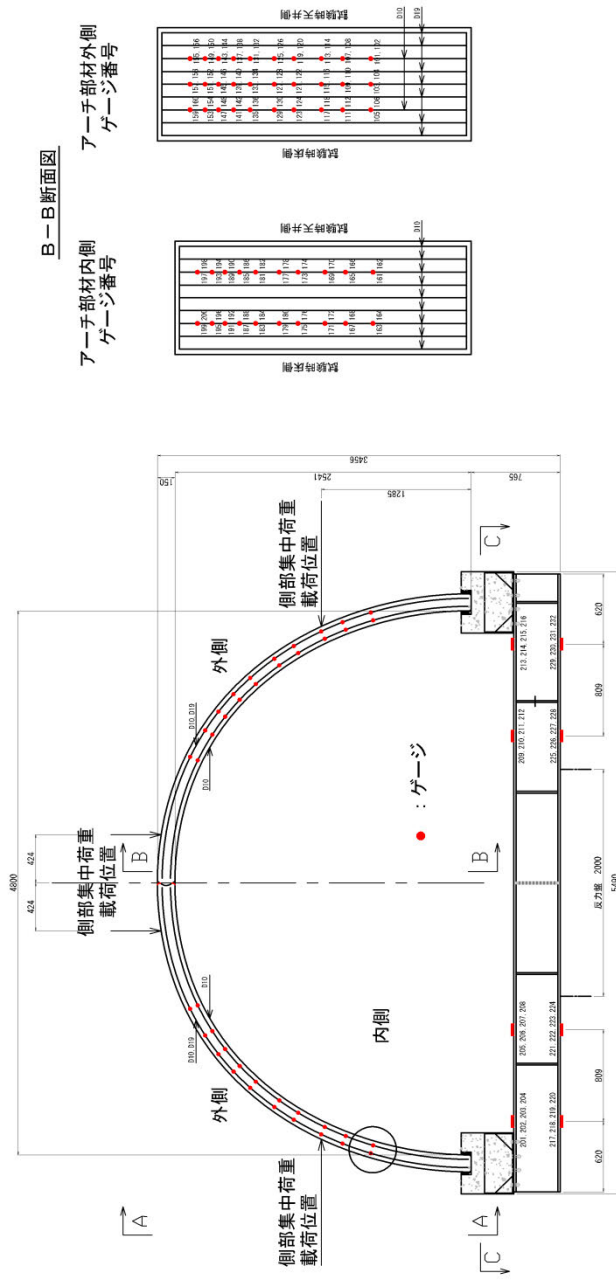
見えている主鉄筋は上から2段目
 () 付き番号は7段目



☆全ての測点は、内外2枚のひずみゲージを貼る
 ひずみゲージは、東京測器研究所 FLA-3-11-10LT

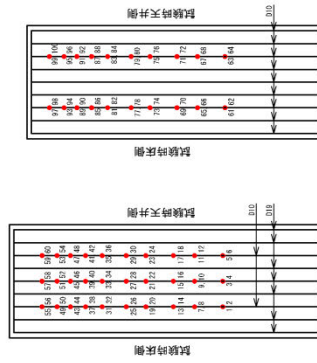
図-2.5.8 場所打ちアーチひずみゲージ配置図

断面図



A-A断面図

アーチ部材内側
ゲージ番号



B-B断面図

アーチ部材外側
ゲージ番号

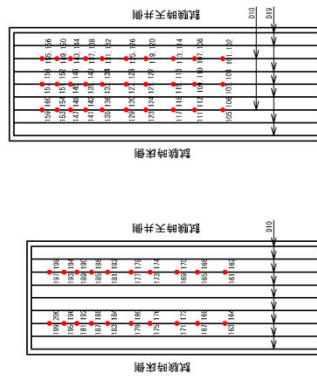


図-2.5.10 3 ヒンジアーチひずみゲージ配置図 (アーチ本体)

2.5.4 荷重載荷装置

実験に使用した荷重載荷装置の仕様を以下に、状況を写真-2.5.1 示す。

- ① 軸力 : 圧縮 2000kN, 引張 500kN
- ② 全ストローク : 300mm
- ③ 追従能力 : 水平方向±500mm, 垂直方向±10mm, 回転±5°
- ④ ピストン速度 : 0.1m/sec

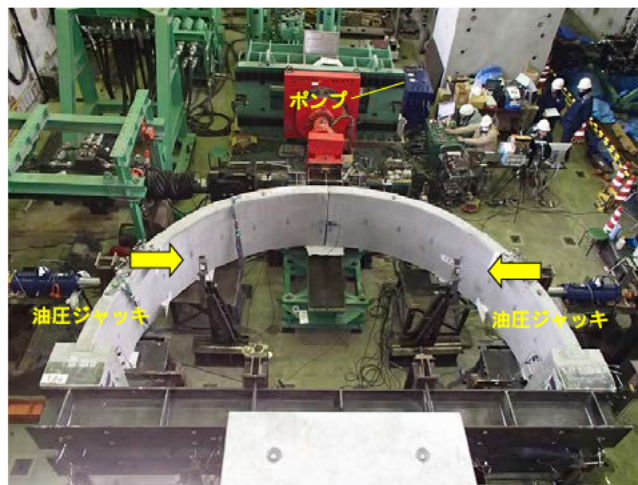
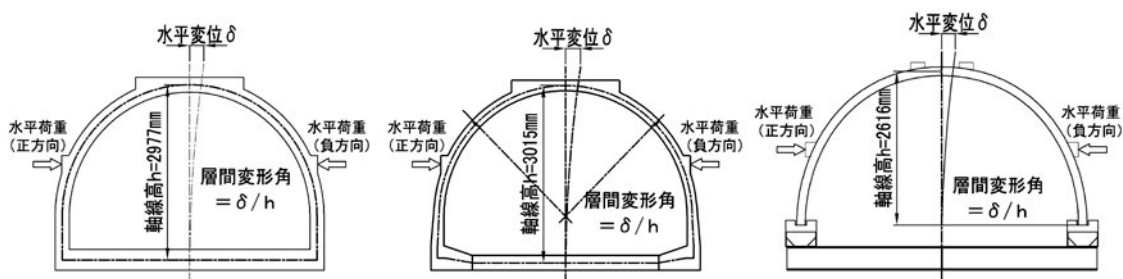


写真-2.5.1 実験の実施状況 (3 ヒンジアーチの状況)

2.6 計測項目および確認項目

計測項目および確認項目は、鉄筋降伏や荷重低下などの損傷イベントが発生した時の荷重値と層間変形角との関係や載荷中のヒンジの回転挙動、終局時の破壊形態とした。特にカルバート指針でヒンジを有する構造は、部分的な破壊がカルバート全体の崩壊につながる可能性を懸念事項として示しており、ヒンジの挙動や終局時のヒンジの破壊や脱落の有無を確認することは重要であった。

実験中の計測は、予備載荷による初降伏変位を基準変位 δ_0 とし、その整数倍の変位を正負交番載荷で作用させたが、最終的な評価に用いた数字は供試体に発生した層間変形角とした。評価に用いた供試体の層間変形角は、図-2.6.1 に示すようにアーチクラウンに発生した水平変位 δ を、底版軸線位置からアーチクラウン軸線位置までの高さ h で除した値と定義した。



(a) 場所打ちアーチ (b) 2 ヒンジアーチ (c) 3 ヒンジアーチ

図-2.6.1 層間変形角の定義

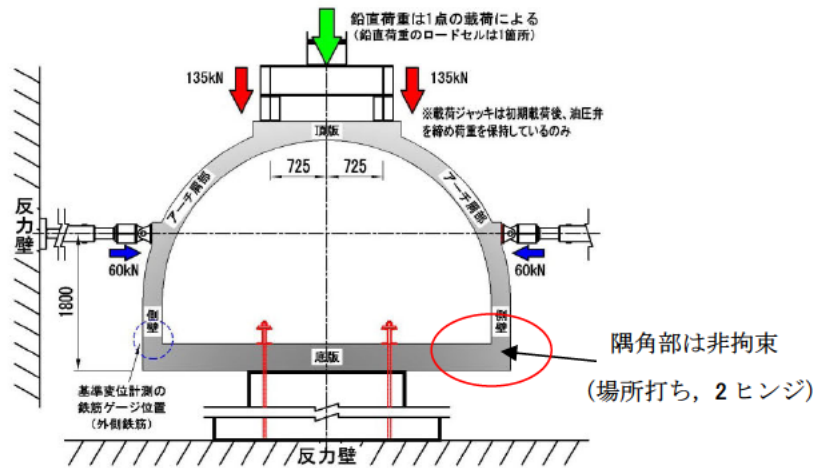
2.7 載荷手順

図-2.7.1 にそれぞれの実験供試体のセットアップ図を示す。初期荷重の載荷位置や大きさはそれぞれ実大寸法の実験断面の再現解析で求めた値に縮尺を乗じたものとし、場所打ちアーチは鉛直荷重 135kN を頂版アーチ中央部から 725mm の位置に 2 点載荷、水平荷重 60kN を底版下面より 1800mm の位置に載荷、2 ヒンジアーチは鉛直荷重 120kN を頂版アーチ中央部から 725mm の位置に 2 点載荷、水平荷重 40kN を底版下面より 1800mm の位置に載荷、3 ヒンジアーチは鉛直荷重 90kN を頂版アーチ中央部から 424mm の位置に 2 点載荷、水平荷重は 113kN を下面より 1285mm の位置に載荷した。なお、鉛直方向の荷重は 1 つの載荷ジャッキから鋼材を介して 2 点に分かれる載荷となっている。

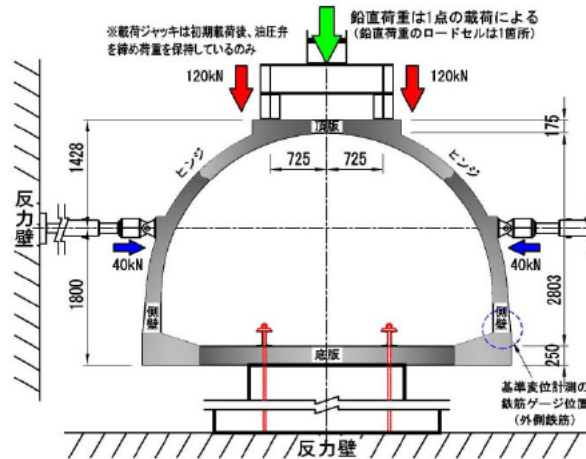
載荷では、正負交番載荷実験に先立ち予備載荷を行い、鉄筋ひずみの実測値が 1725μ (供試体に使用した鉄筋 SD345 の降伏強度の規格値をヤング係数 $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ で除した値) を超えた時点のアーチクラウンに発生した水平変位量を基準変位 δ_0 と定めた。予備載荷の結果、それぞれ図-2.7.1 に示す位置で 1725μ の鉄筋ひずみが実測され、基準変位は場所打ちアーチが $\delta_0 = 6\text{mm}$ 、2 ヒンジアーチが $\delta_0 = 22\text{mm}$ 、3 ヒンジアーチが $\delta_0 = 7\text{mm}$ となった。

載荷手順は、図-2.7.1 での右へ押す方を正方向とした。まず正方向載荷として、鉛直荷重を載荷した状態で、左側のジャッキを変位制御、右側のジャッキを荷重制御して、右側のジャッキを初期荷重 (場所打ちアーチは 60kN、2 ヒンジは 40kN、3 ヒンジは 113kN) を保持するように制御しながら左側のジャッキを基準変位まで押し込んだ。なお、鉛直荷重のジャッキは油圧弁を締めたままで荷重を保持している状態であり、左右の水平方向ジャッキの様な荷重制御や変位制御は行っていない。

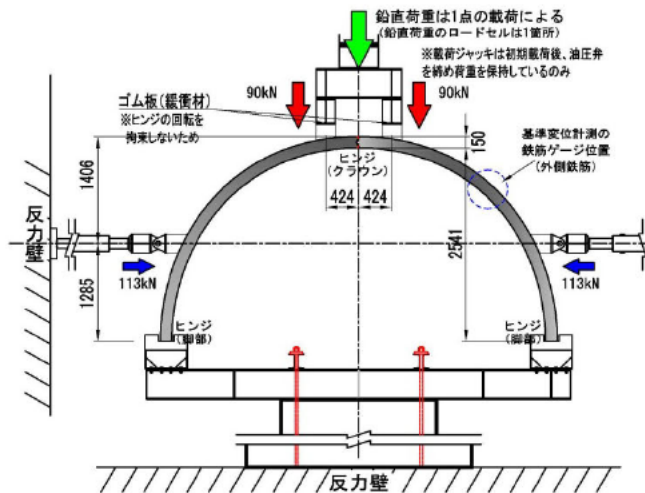
次に負方向載荷として左側のジャッキ荷重を初期荷重まで低減したところで、左側のジャッキを変位制御から荷重制御に、右側のジャッキを荷重制御から変位制御に入れ替え、同様の手順にて載荷を行った。この正負の水平載荷を 1 サイクルとし、基準変位の整数倍を各ステップ 3 サイクルずつ繰り返す漸増載荷を行った。載荷は左右の水平方向ジャッキの荷重を合計した値が最大の 80% を下回る時点まで行った。



(a) 場所打ちアーチ供試体セットアップ状況



(b) 2 ヒンジアーチ供試体セットアップ状況



(c) 3 ヒンジアーチ供試体セットアップ状況

図-2.7.1 供試体セットアップ状況図

3. 実験結果

3.1 場所打ちアーチの実験結果

予備載荷により決定したアーチ頂部の水平変位量 **6mm** を基準変位 δ_0 とし、 δ_0 の整数倍の変位で各ステップ 3 サイクルを載荷した。実験の記録では、基準変位 δ_0 を δ_y と記しており、例えば基準変位の 3 倍の水平変位を目標として載荷した結果は $3\delta_0$ ではなく、 $3\delta_y$ としている。なお、2 ヒンジアーチ、3 ヒンジアーチも実験の記録は同様である。

目標とした水平変位と、その際にアーチカルバートに生じた詳細な実験データから読み取った層間変形角との関係を表-3.1.1 に示す。それぞれの層間変形角は各載荷での最大荷重時の値である。

表-3.1.1 目標の頂部水平変位量と評価に用いた層間変形角との関係

目標水平変位		層間変形角	
		正側載荷	負側載荷
1 δ_y	±6 mm	0.235%	-0.235%
2 δ_y	±12 mm	0.454%	-0.450%
3 δ_y	±18 mm	0.655%	-0.664%
4 δ_y	±24 mm	0.849%	-0.881%
5 δ_y	±30 mm	1.037%	-1.043%
6 δ_y	±36 mm	1.207%	-1.276%
7 δ_y	±42 mm	1.375%	-1.478%
8 δ_y	±48 mm	1.542%	-1.667%
9 δ_y	±54 mm	1.723%	-1.912%
10 δ_y	±60 mm	1.902%	-2.132%
12 δ_y	±72 mm	2.076%	-2.509%
15 δ_y	±90 mm	2.632%	-2.423%

3.1.1 水平荷重と層間変形角との関係

正負交番载荷における水平荷重と層間変形角との関係および包絡線を図-3.1.1 に示す。水平荷重 P は図-2.7.1 の供試体セットアップ図での左右の水平方向ジャッキ荷重の合計値で、常時死荷重を模した初期荷重時からの増減分を示している。

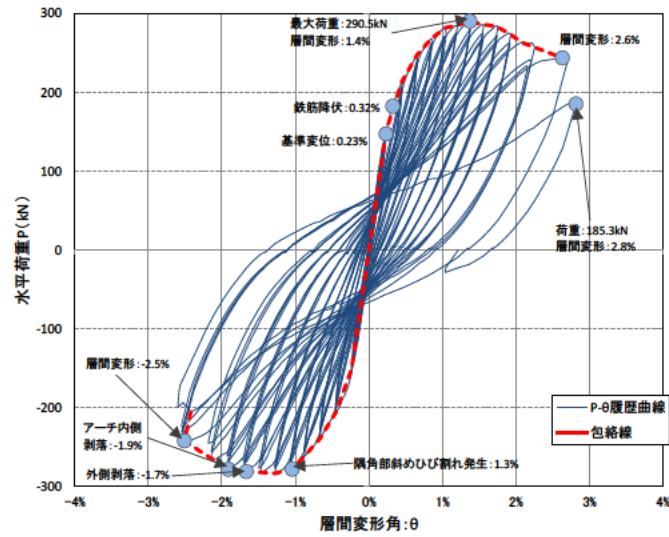


図-3.1.1 水平荷重-層間変形角の関係

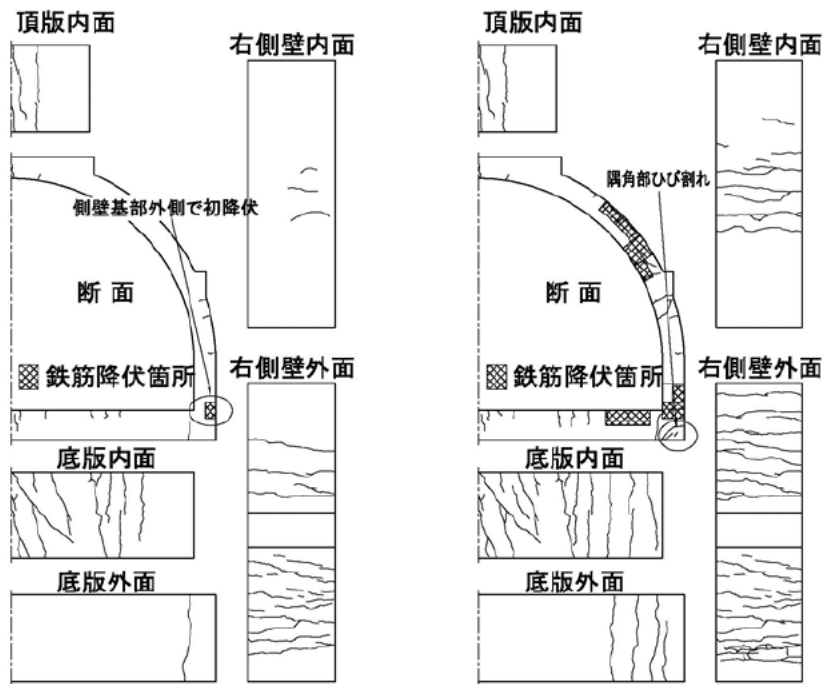
3.1.2 損傷過程および終局状態

終局に至るまでの損傷過程を、層間変形角を基準として以下に述べる。代表的な損傷状態の図を図-3.1.2 に示す。ここで供試体に発生した損傷は、曲げせん断破壊を起こした右側アーチ肩部を除き概ね左右対称であったため、損傷図は右側半分を示す。なお、損傷図はひび割れやかぶりコンクリート剥落状態を示したものであり、荷重による変形は考慮していない。

図-3.1.2 (a) に示すように、層間変形角 0.32%の荷重時において、左側壁基部の外面側主鉄筋が降伏した。その後、図-3.1.2 (b) に示すように、層間変形角 1.4%の荷重で隅角部へ斜めひび割れが発生し、最大荷重 290.5kN を示した。荷重ピーク後、荷重値は徐々に低下しながら、層間変形角 1.7%の荷重で側壁基部外面側のコンクリートが剥落し始め、図-3.1.2 (c) に示すように層間変形角 1.9%においてアーチ肩部内面側のコンクリートが剥落した。最終的には層間変形角が 2.8%に達した後、図-3.1.2 (d) に示すようにアーチ肩部での曲げせん断破壊が発生し終局に至った。曲げせん断破壊位置がジャッキ荷重位置に近いことから、ジャッキによる集中荷重の影響が大きいものと考えられる。

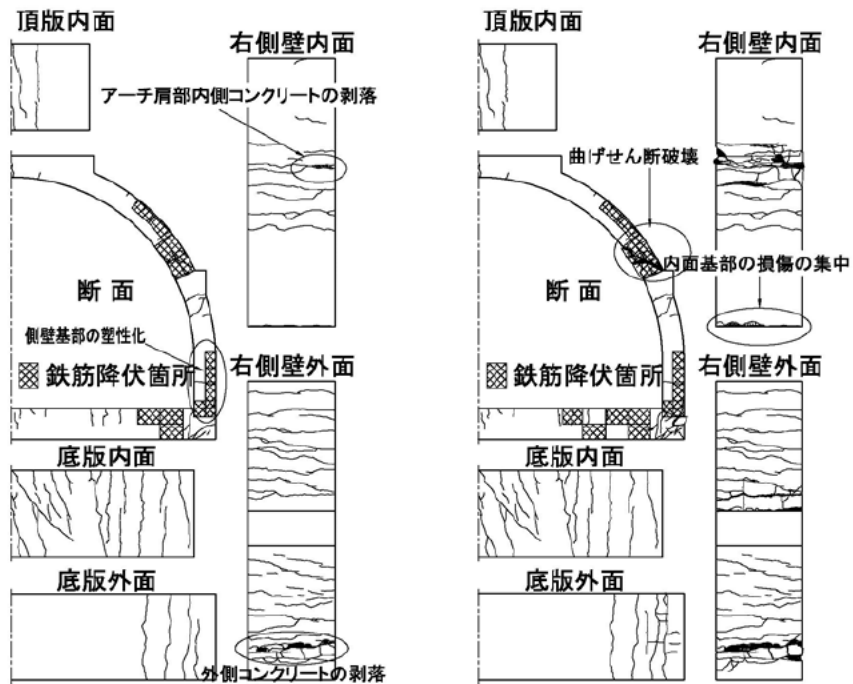
損傷はアーチ肩部内面のコンクリートが剥落し始める層間変形角 1.9%までは側壁基部のひび割れが先行して進行していたが、側壁基部が塑性化したため、曲げモーメント分布に変化が生じた。それにより、アーチ肩部へ作用する曲げモーメントおよび軸力の割合が大きくなった。その後、層間変形角が大きくなるに従い、層間変形角 2.8%でのアーチ肩部で曲げせん断破壊につながったものと考えられる。

主鉄筋に降伏が生じた側壁基部に注目すると、図-3.1.2 (c) に示すように外側は広い範囲に分散して損傷および鉄筋が降伏に至っているのに対し、内側では図-3.1.2 (c) に示すように、鉄筋の降伏が付根に集中しており、ひび割れは上部へ広がらず付根に集中する様子が見られた。これは、隅角部での損傷が進んだことにより内側主鉄筋の定着が劣化したために鉄筋の抜け出しが生じ、ひび割れが分散しなかったことが原因と考えられる。



(a) 層間変形角 0.32%
(初降伏時)

(b) 層間変形角 1.4%
(最大荷重時)



(c) 層間変形角 1.9%
(アーチ内面剥落時)

(d) 層間変形角 2.8%
(載荷終了時)

図-3.1.2 ひび割れ損傷図

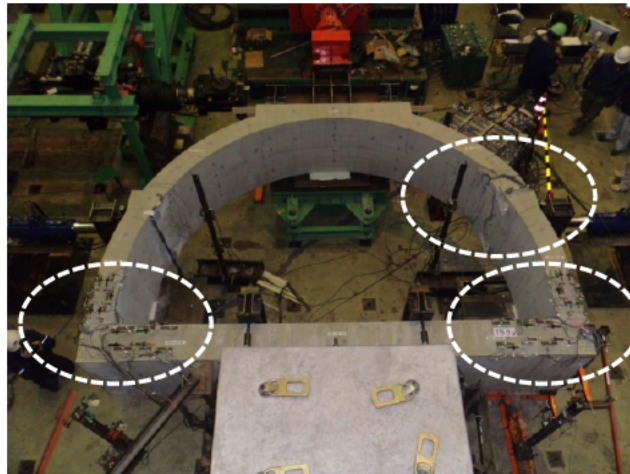


写真-3.1.1 载荷終了後の状況（ジャッキ荷重は除荷した状態）
 アーチ右肩部に曲げせん断破壊が発生，隅角部の損傷が目立つ

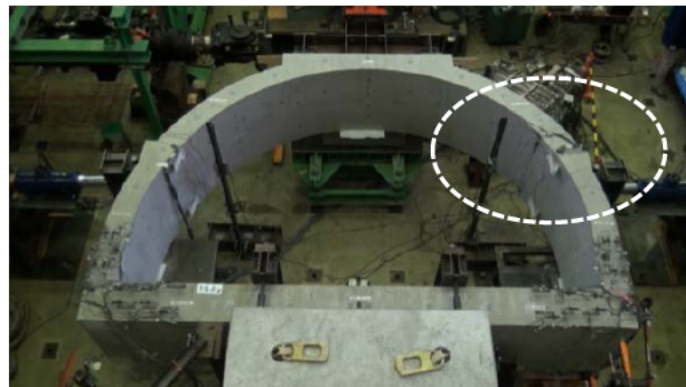


写真-3.1.2 終局時状況（水平変位作用中）
 アーチ右肩の曲げせん断破壊が発生した時点，この直後に終局に至った



写真-3.1.3 アーチ肩部曲げせん断破壊状況

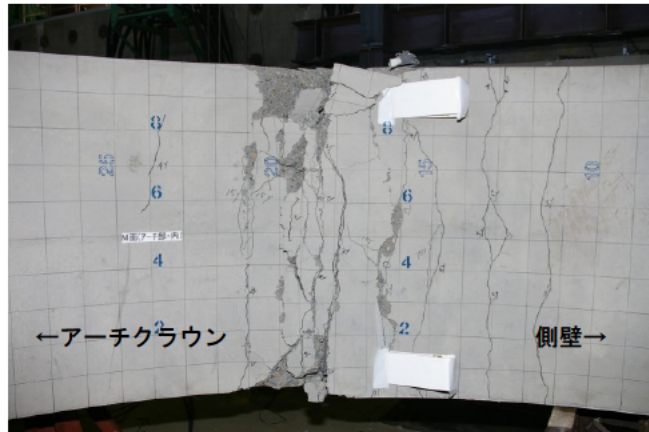


写真-3.1.4 アーチ肩部内側状況（曲げせん断破壊側）

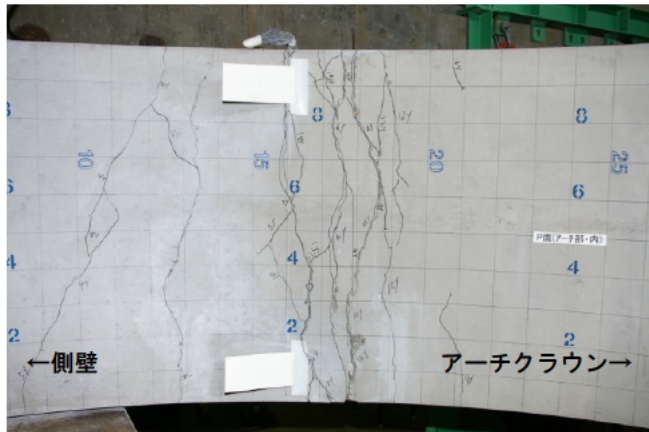


写真-3.1.5 アーチ肩部内側状況（写真-3.1.4の逆側）
剥落はないが、大きなひび割れが目立つ



写真-3.1.6 隅角部損傷状況（上から撮影，曲げせん断破壊側の隅角部）
隅角部に対して，クロスするようなひび割れが発生している



写真-3.1.7 隅角部損傷状態（下面から撮影）
下面側にはコンクリートの剥落が確認された



写真-3.1.8 側壁外側写真（曲げせん断破壊側の側壁）
曲げひび割れの分散，側壁基部のコンクリート剥落が確認された



写真-3.1.9 側壁外側写真（写真-3.1.8 とは逆側）
同様にひび割れの分散，側壁基部のかぶりコンクリート剥落が確認された

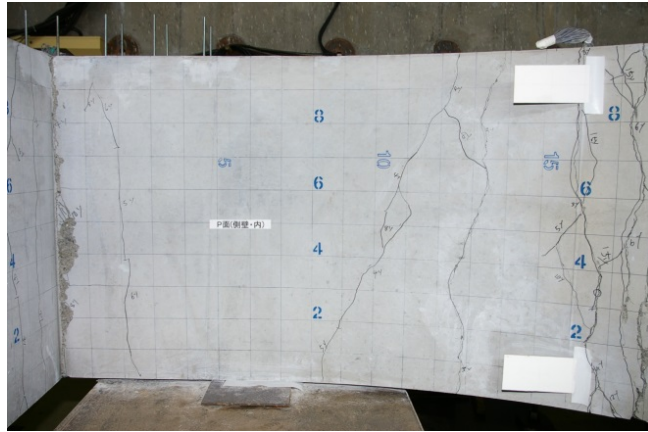


写真-3.1.10 側壁内側状況

ひび割れの分散範囲は小さく、かぶりコンクリートの剥落範囲も小さい

3.1.3 鋼材のひずみ履歴

鋼材のゲージは図-2.5.8に示す位置に、一カ所につき内外2枚の貼り付けした。ここでは、はじめに降伏をした側壁基部の内側と外側、および曲げせん断破壊を起こしたゲージ位置の計測データを示す。グラフは荷重による供試体の劣化によって生じた計測値の乱れが現れる前までとした。

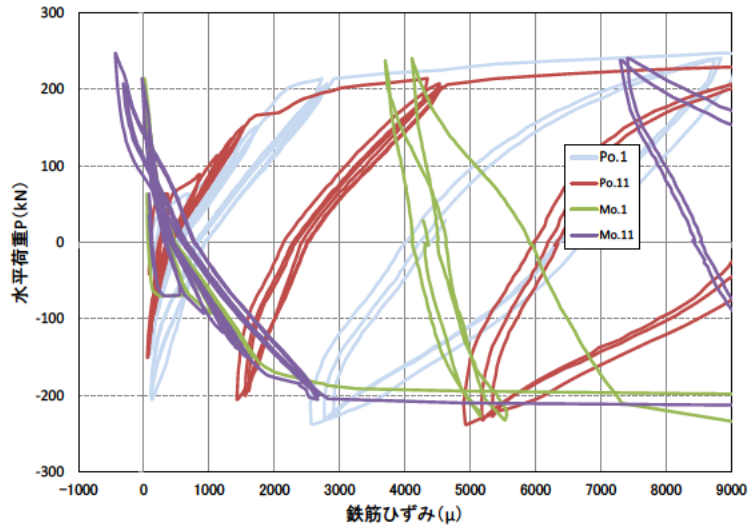


図-3.1.3 側壁基部外側の鉄筋ひずみ (4 δ_y まで)

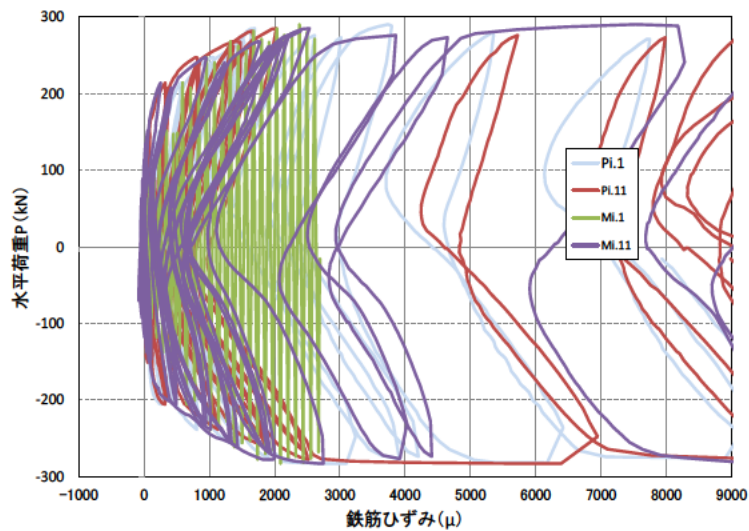


図-3.1.4 側壁基部内側の鉄筋ひずみ (8 δ_y まで)

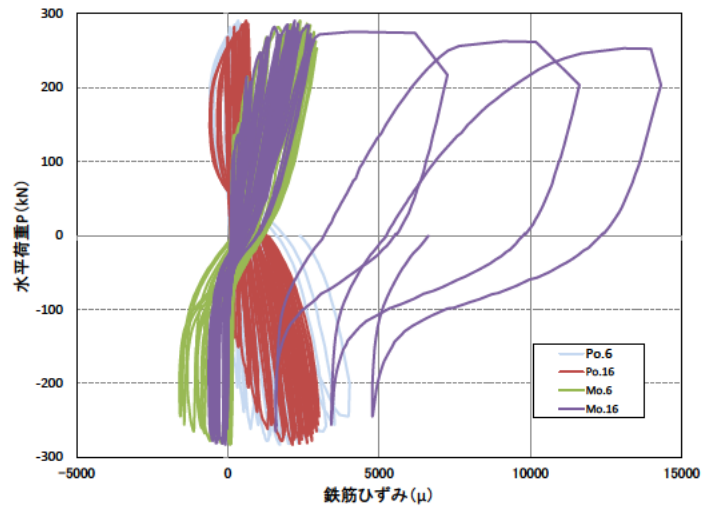


図-3.1.5 アーチ肩部外側の鉄筋ひずみ (11 δ_y まで)

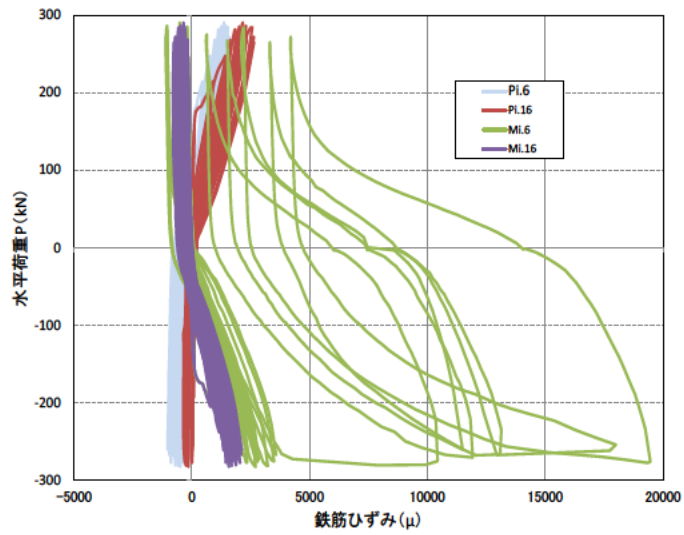


図-3.1.6 アーチ肩部内側の鉄筋ひずみ (10 δ_y まで)

3.1.4 曲率の計測

実験供試体に発生した曲率は、図-3.1.7 に示す手法により、計測区間内に生じた平均の曲率として以下の式¹⁰⁾にて算出する。

$$\phi = \frac{\Delta_T - \Delta_C}{D_t \cdot h}$$

ここで、
 ϕ : 計測区間内の断面における平均曲率
 Δ_T , Δ_C : 計測区間における引張縁近傍及び圧縮縁近傍の相対変位
 D_t : 引張縁側と圧縮縁側に配置された変位計の距離
 h : 計測区間長

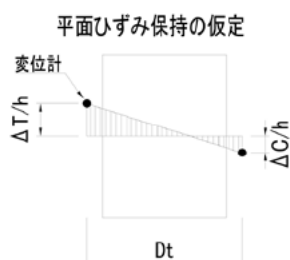


図-3.1.7 変位計配置図 [参考文献¹⁰⁾]

計測の際、写真-3.1.11 に示すように、曲率計測区間にひび割れが生じたため、計測されたデータはひび割れによって発生した部材の折れ角などを含めた計測値である。したがって、ここで曲率と称するデータは、あくまで参考データである。

側壁基部での水平荷重と曲率との関係を図-3.1.8 と図-3.1.9 に示す。また、荷荷が進んだ場合には、部材にせん断損傷などが発生するため、図は水平荷重がピークを迎えた層間変形角 1.4%までの範囲までとする。

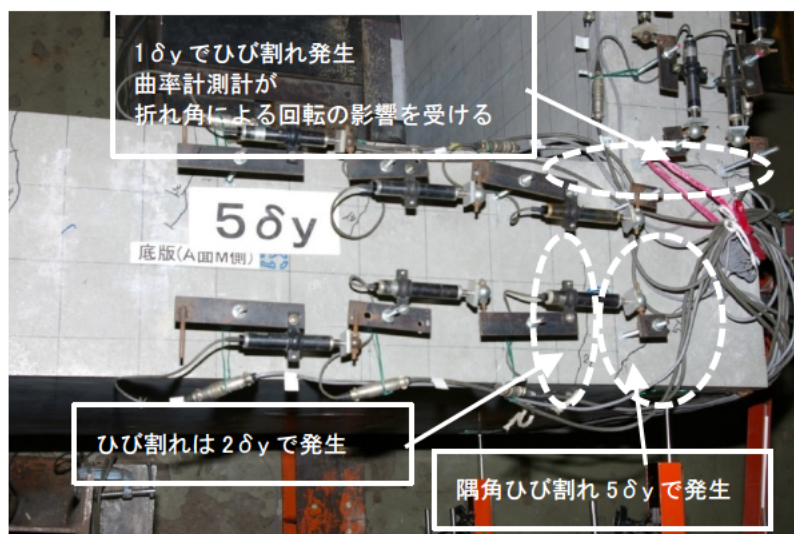


写真-3.1.11 曲率計測範囲内に発生したひび割れ

曲率を計測した部材位置は、図-2.5.11 (a) を参照とする。

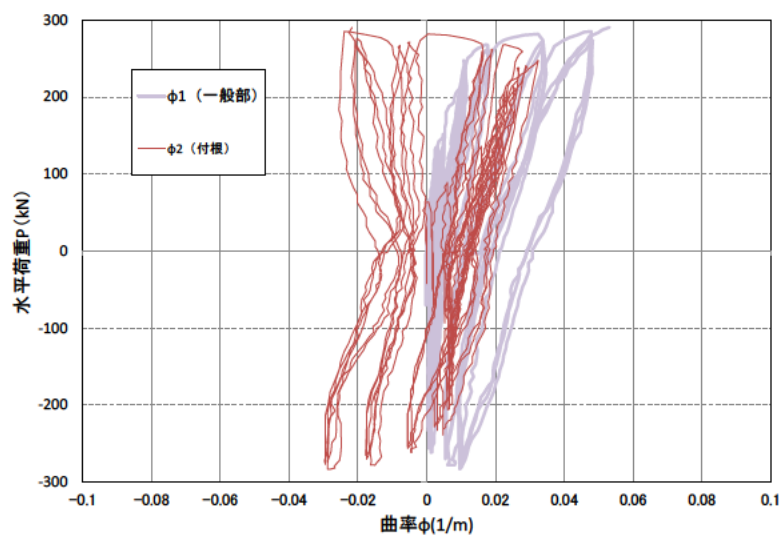


図-3.1.8 水平荷重と曲率の関係
(左側側壁基部, 荷重ピーク 1.4%まで)

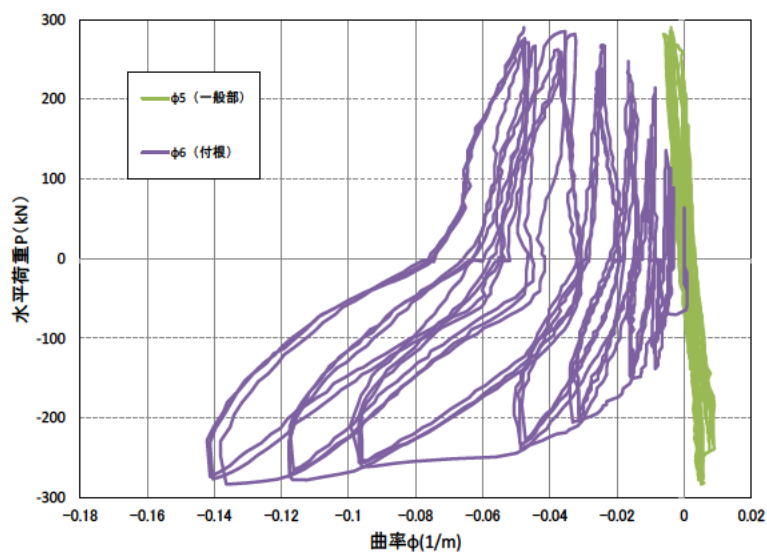


図-3.1.9 水平荷重と曲率の関係
(右側側壁基部, 荷重ピーク 1.4%まで)

3.1.5 内空変位量と鉛直荷重の関係

層間変形角の増加による内空寸法および鉛直荷重の変化を図-3.1.10 に示す。ここでの内空幅は載荷点位置の水平距離であり、内空高についてはアーチ中心線での距離とした。内空変形量がプラスになった場合は内空寸法の増加を、マイナスになった場合は減少を示している。なお、鉛直荷重の推移では層間変形角±2%付近で計測値が不連続となっているが、これは実験が2日間に渡ったため、一旦、載荷装置の荷重を除荷しなければならず、翌日に再載荷を行ったが、ジャッキの載荷精度の問題により、前日と同じ荷重の再現はできなかったことが原因である。

アーチの変形は図-3.1.10 の断面図に示すように、層間変形角の増加に従い内空幅が狭まり、内空高は広がり頂版が持ち上がるような推移をした。これは側方荷重ジャッキの変位載荷によって側壁が内側に押される塑性変形が徐々に残留していったためと考えられる。またアーチカルバートに作用していた鉛直荷重は、終局時においても土圧などの鉛直死荷重を模した初期荷重 $P=270\text{kN}$ 以上の値を保持した。このことより、アーチ肩部の曲げせん断破壊によりアーチカルバートの耐力は低下したが、その状態でも土かぶり荷重などの上載荷重は保持されており、終局後も内空断面の形状が保持できないような鉛直方向の耐荷力の喪失には至っていないことが確認できる。

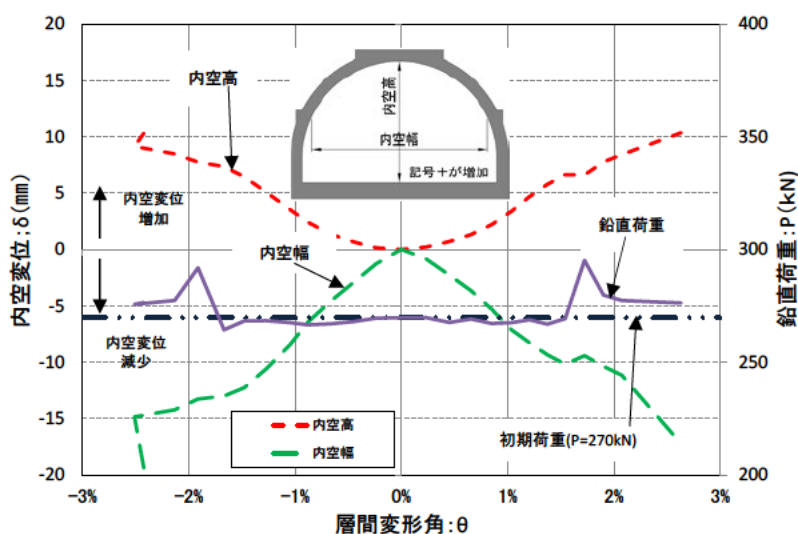


図-3.1.10 内空変位量と鉛直荷重の推移

3.2 2 ヒンジアーチの実験結果

予備載荷の結果，アーチ頂部の水平変位量 23mm を基準変位 δ_0 とし， δ_0 の整数倍の変位で各ステップ 3 サイクルを載荷した．実験の記録では，基準変位 δ_0 を δ_y と記しており，例えば基準変位の 3 倍の水平変位を目標として載荷した結果は $3\delta_0$ ではなく， $3\delta_y$ としている．

目標とした水平変位と，その際にアーチカルバートに生じた詳細な実験データから読み取った層間変形角との関係を表-3.2.1 に示す．それぞれの層間変形角は各載荷での最大荷重時の値である．

表-3.2.1 目標の頂部水平変位量と評価に用いた層間変形角との関係

目標水平変位		層間変形角	
		正側載荷	負側載荷
1 δ_y	±23 mm	0.734%	-0.779%
2 δ_y	±46 mm	1.475%	-1.533%
3 δ_y	±69 mm	2.203%	-2.270%
4 δ_y	±92 mm	2.950%	-3.035%
5 δ_y	±115 mm	3.677%	-3.790%
6 δ_y	±138 mm	4.436%	-4.541%
7 δ_y	±161 mm	5.000%	-5.323%
8 δ_y	±184 mm	5.477%	-6.007%

3.2.1 水平荷重と層間変形角との関係

正負交番载荷における水平荷重と層間変形角との関係および包絡線を図-3.2.1 に示す。水平荷重 P は図-2.7.1 での左右のジャッキ荷重の合計値で、常時死荷重を模した初期荷重時からの増減分を示している。

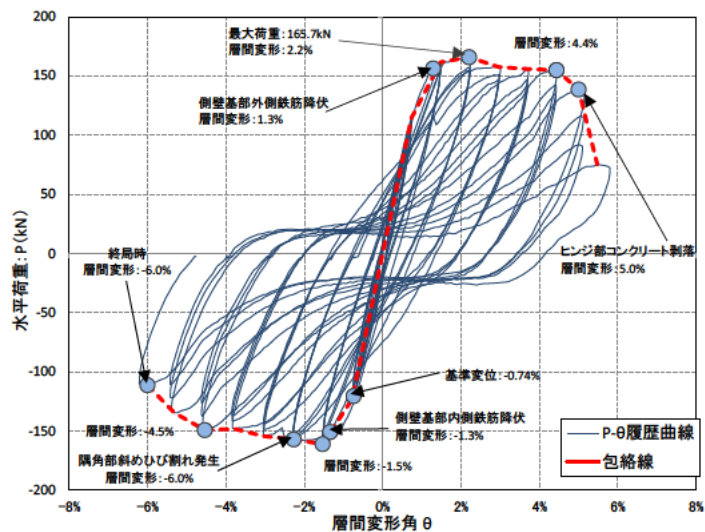


図-3.2.1 水平荷重-層間変形角の関係

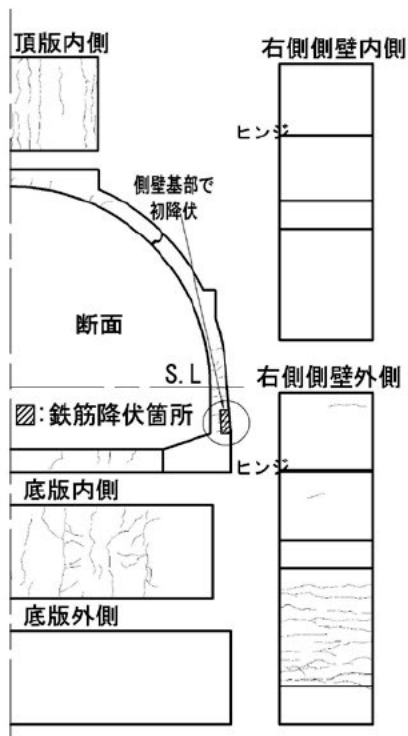
3.2.2 損傷過程および終局状態

終局に至るまでの損傷過程を、層間変形角を基準として以下に述べる。代表的な損傷状態の図を図-3.2.2 に示す。ここで供試体に発生した損傷は、ほぼ左右対称であったため、損傷図は片側の右側半分を示す。なお、損傷図はひび割れやかぶりコンクリート剥落状態を示したものであり、荷重による変形は考慮していない。

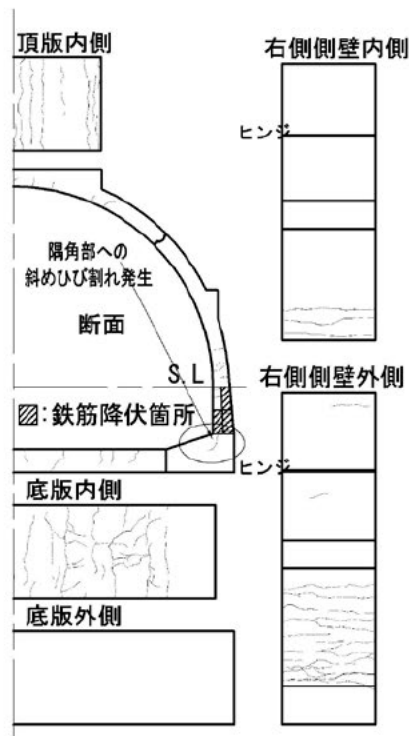
図-3.2.2 (a) に示すように、層間変形角 1.3%で左右側壁基部の外側側鉄筋が降伏した。その後、層間変形角 2.2%において最大荷重である正側載荷 $P=165.7\text{kN}$ に達し、その際、図-3.2.2 (b) に示すように、内側側鉄筋が降伏し、隅角部へ斜め方向のクラックの発生が生じた。最大荷重以降は最大の約 95%以内の荷重が層間変形角 4.4%まで保たれた。層間変形角 3%で隅角部に斜め方向ひび割れが目立ち始め、正負とも層間変形角が約 4.4%を過ぎたあたりから、荷重が低下し終局に至った。荷重低下が起こり始めた時点での損傷状態を図-3.2.2 (c) に示す。側壁付け根の外側のかぶりコンクリートの剥落はこの時点から確認され始めた。

終局状態における供試体を図-3.2.2 (d) に示す。終局状態では側壁付け根から隅角部にかけて、場所打ちアーチと同様に大きなひび割れやかぶりコンクリートの剥落などが見られた。一方で、2 ヒンジアーチは肩部にヒンジがあることから、場所打ちアーチの様なアーチ肩部への曲げせん断破壊は生じなかった。このことから、終局時に荷重低下を引き起こした主要因は、隅角部でのひび割れや剥落などの損傷であると考えられる。隅角部は力の流れが複雑になり適切に応力状態を評価することが難しい。そのため、設計において隅角部は一般部に対して耐荷力を十分に高めた上で剛域と扱うことが一般的である。本実験の供試体の構造では隅角部の損傷が進展したが、隅角部に斜めひび割れが生じたのは評価の目安とした層間変形角 2%以降の 2.2%時であり、耐震性能は確保されているものと考えられる。しかし、終局状態に至る過程では、隅角部の損傷の影響が見られたため、実構造物においては隅角部が高い耐力を有するよう、考慮する必要があると考えられる。

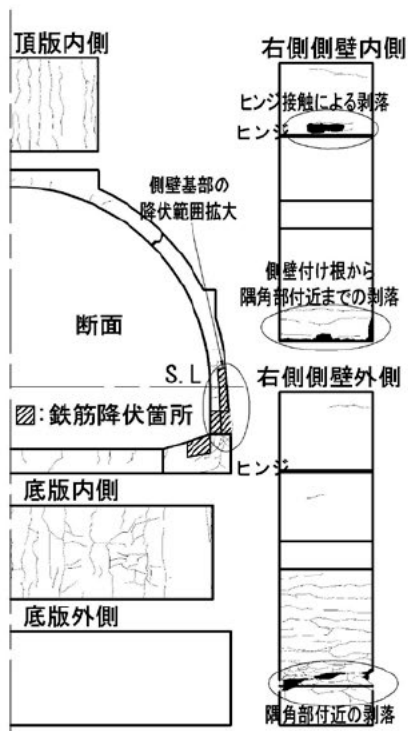
なお、図-2.3.2 (b) に示した集中荷重による実験供試体への事前解析では、頂版内側および底版内面において実験断面の曲げモーメントが設計断面に比べ大きく出ており、実際に実験においても図-3.2.2 (a) に示すように、初期荷重載荷の段階からこの箇所に曲げクラックを観測した。しかしながら、その後の正負交番載荷によってこの部位への鉄筋降伏や大きな変形などは発生しておらず、この部位の初期の損傷は当研究の目的である損傷過程や終局状態の確認に対し、大きな影響を与えるものではないものと考えられた。



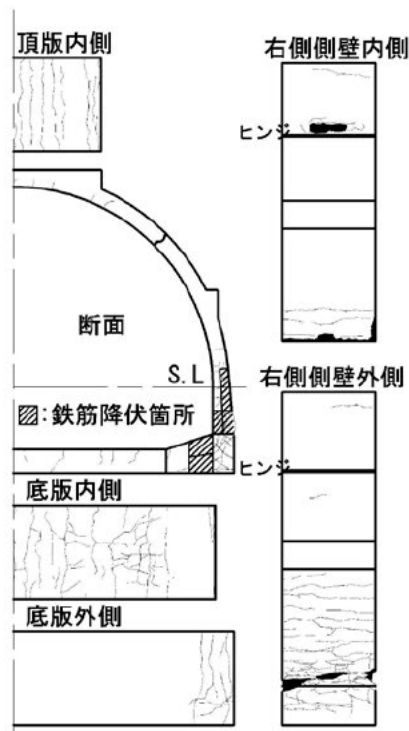
(a) 層間変形角 1.3%
(初降伏時)



(b) 層間変形角 2.2%
(最大荷重時)



(c) 層間変形角 4.4%
(荷重低下前)



(d) 層間変形角 6.0%
(載荷終了時)

図-3.2.2 ひび割れ損傷図

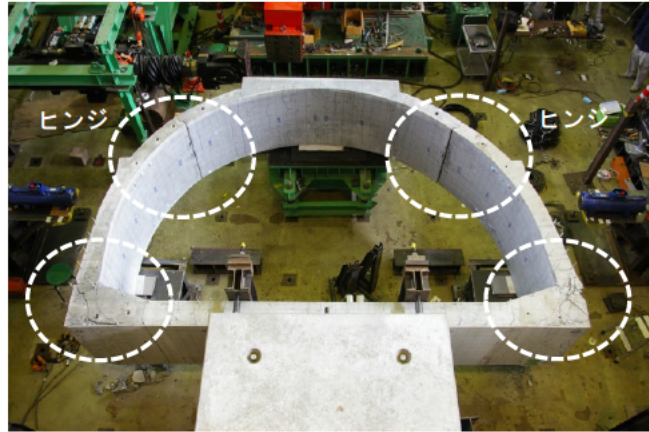


写真-3.2.1 載荷終了状況（ジャッキ荷重は除荷した状態）
隅角部の損傷が目立つ．ヒンジの変状は見られない



写真-3.2.2 載荷状況（水平変位作用中）



写真-3.2.3 隅角部損傷状況（上面からの撮影）
隅角部にクロス状のひび割れを確認

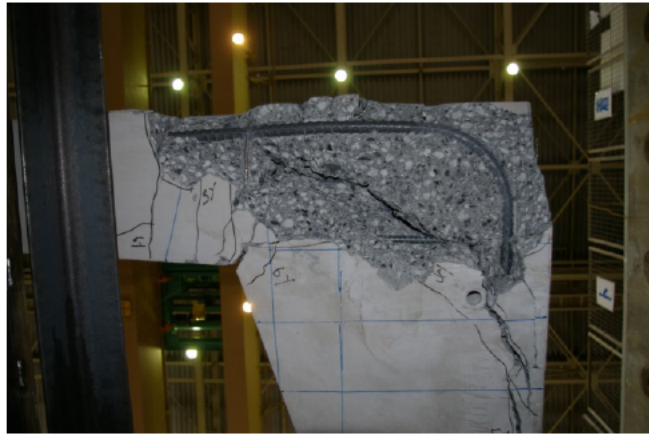


写真-3.2.4 隅角部損傷状況（下面から撮影）

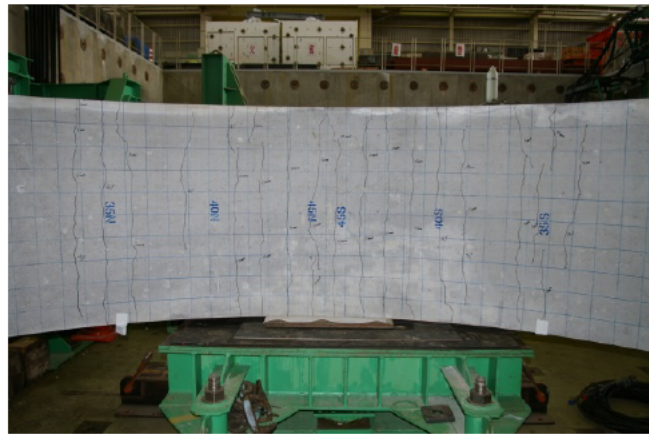


写真-3.2.5 アーチクラウン内側状況
 曲げクラックは初期載荷時に発生したものである

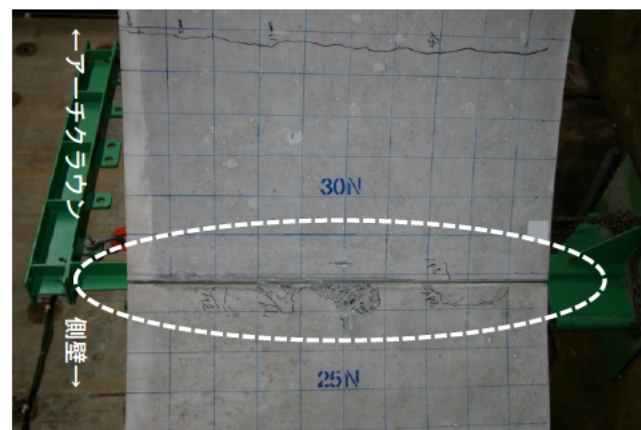


写真-3.2.6 ヒンジ内側状況その1
 ヒンジが閉合し接触したことによる剥落を確認

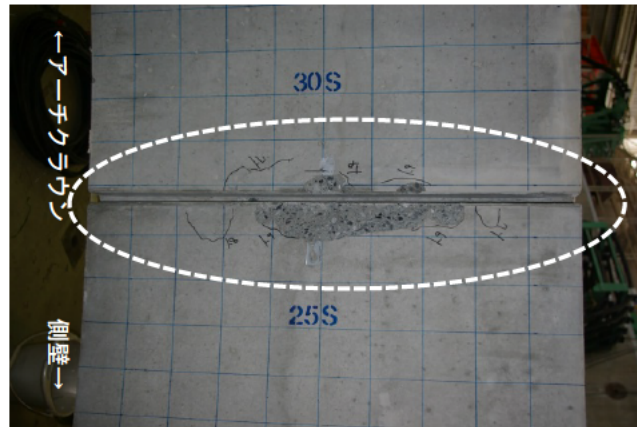


写真-3.2.7 ヒンジ内側状況その2
 ヒンジが閉合し接触したことによる剥落を確認

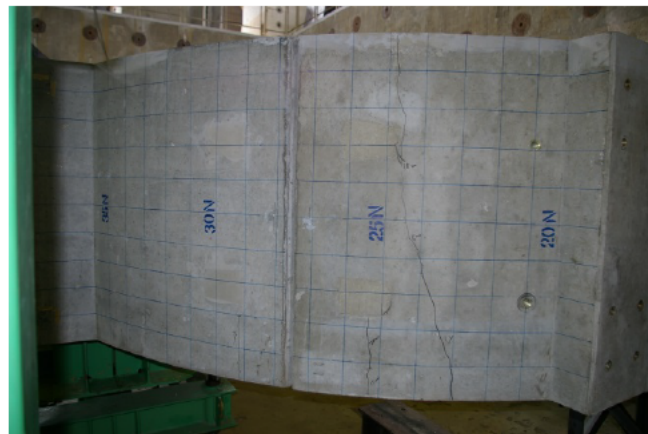


写真-3.2.8 ヒンジ外側状況
 剥落やひび割れなどの損傷は確認されない



写真-3.2.9 終局後のヒンジ回転状況 (外側へ回転)

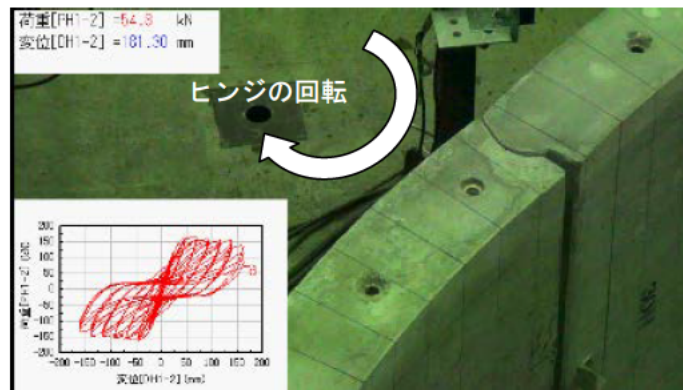


写真-3.2.10 載荷中のヒンジ回転状況（外側へ回転）



写真-3.2.11 終局後のヒンジ回転状況（内側へ回転）

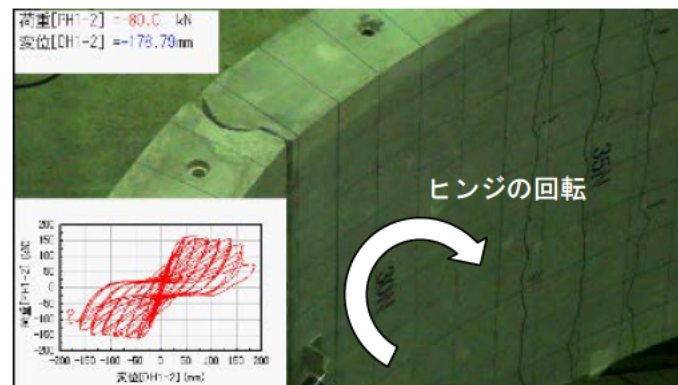


写真-3.2.12 載荷中のヒンジ回転状況（内側へ回転）

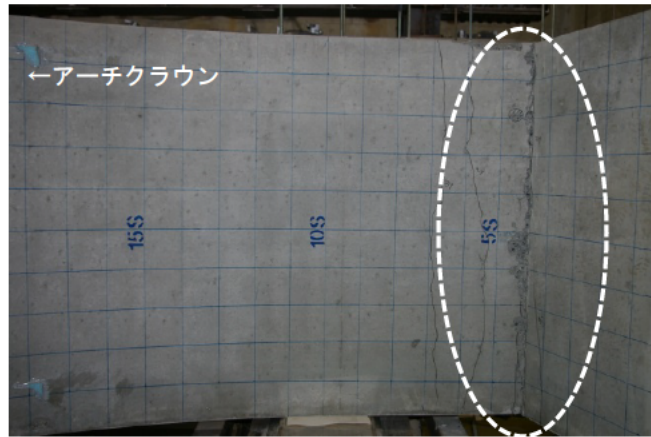


写真-3.2.13 側壁基部内側状況（隅角部を内側から撮影）
ひび割れの分散やコンクリートの剥離範囲は小さい

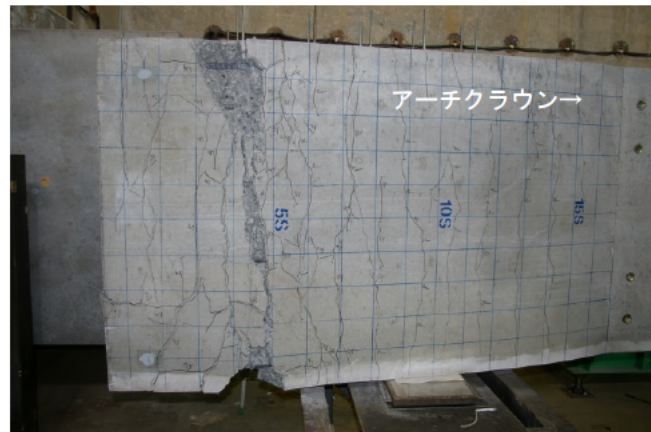


写真-3.2.14 側壁基部外側損傷状況
ひび割れの分散，側壁基部でのかぶりコンクリートの剥落が目立つ

3.2.3 変形能による評価

変形能による評価を行う。ここでいう変形能とは、構造材料や構造部材、構造物が外力を受けある限界状態に至るまでの変形量を示す¹³⁾。一般に高次不静定構造である地中構造物は、一部の部材が損傷しても構造物全体の崩壊には直結しないとされている¹⁴⁾。そのため限界状態の評価には個別の部位の耐力ではなく、構造物全体の変形能の指標である層間変形角に着目する考え方がある¹⁵⁾。その場合、カルバートの崩壊が所定の層間変形以内では起きないことを確認することが重要となる。具体的な要求変形能として、例えば1%¹⁶⁾などが存在するが、ここではカルバートの設計指針の中では大きな数値である2%(=1/50)¹⁷⁾を目安として評価する。一般的な地中構造物の場合、変形は地盤のせん断変形に支配されると考えられており、兵庫県南部地震における非液状化地盤のせん断ひずみが最大で1%弱¹⁸⁾であったことを考慮すると、評価で目安とした2%の変形能は安全側に設定した値であると言える。ヒンジ式アーチの場合、一般の地中構造物と比べて剛性は低く、地盤と構造物との相互作用の関係が一般の地中構造物と異なることより、同じ2%の変形能の評価が安全側であると断定はできないが、地震時のヒンジ式アーチの挙動は、参考文献5)の模型を使った動的振動実験において、一般の地中構造物と同様に地盤のせん断変形に支配されることが確認されている。これらの知見より、今回の実験では変形能の評価の目安を2%とした。

図-3.2.1に示したように、水平荷重は層間変形角が正方向荷側2.2%、負方向荷側1.5%でピークを迎えたが、構造物にとって好ましくない隅角部の損傷の発生は目安とした層間変形角2%以降であり、最終的には層間変形角4%以上の変形能を示した。実際の地震時による地盤のひずみに対し、断面耐力や変形能には大きな余裕があると考えられる。

3.2.4 鋼材のひずみ履歴

鋼材のゲージは図-2.5.9に示す位置に、一カ所につき内外2枚の貼り付けした。ここでは、はじめに降伏をした側壁基部の内側外側の計測データを示す。グラフは荷重による供試体の損傷によって生じた計測値の乱れが現れる前までの表記とする。

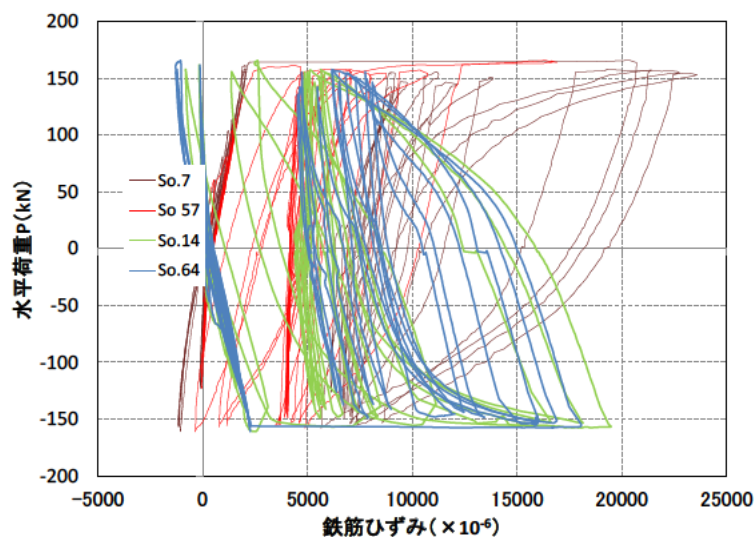


図-3.2.3 側壁基部外側の鉄筋ひずみ (6 δ_y まで)

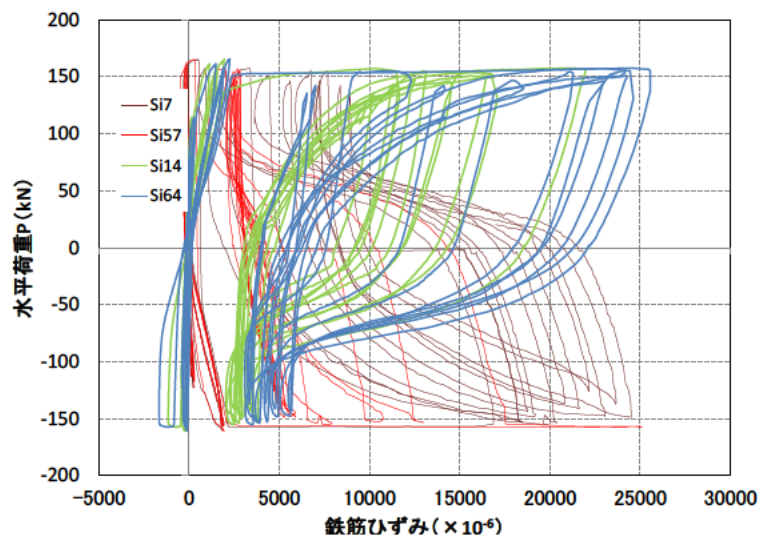


図-3.2.4 側壁基部内側の鉄筋ひずみ (6 δ_y まで)

3.2.5 曲率の計測

曲率は「3.1.4 曲率の計測」に記載した場所打ちアーチと同様な手法により算出する。計測の際、写真-3.2.15に示すように、曲率計測区間にひび割れが生じたため、計測されたデータはひび割れによって発生した部材の折れ角などを含めた計測値である。したがって、ここで曲率と称するデータは、あくまで参考データである。

側壁基部での水平荷重と曲率との関係を図-3.2.5、図-3.2.6に示す。また、荷荷が進んだ場合には、部材にせん断損傷などが発生するため、図は水平荷重がピークを迎えた層間変形角 2.2%までの範囲とする。

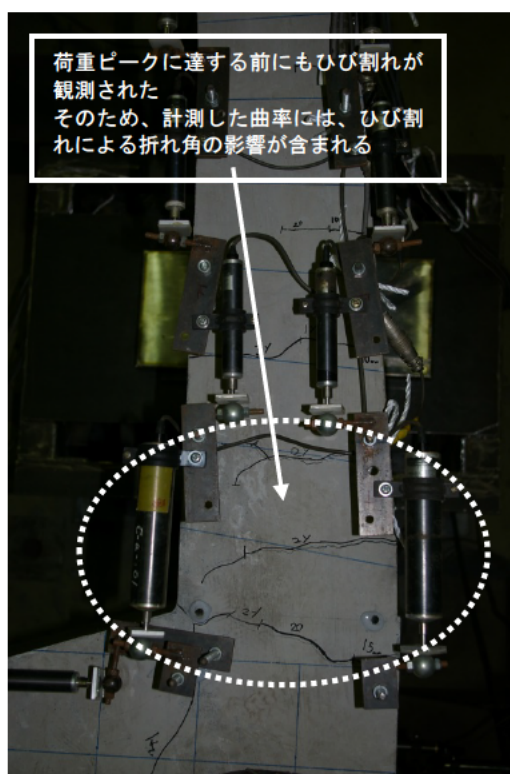


写真-3.2.15 側壁基部の曲率計測範囲内に発生したひび割れ

曲率を計測した部材位置は，図-2.5.11 (b) を参照とする。

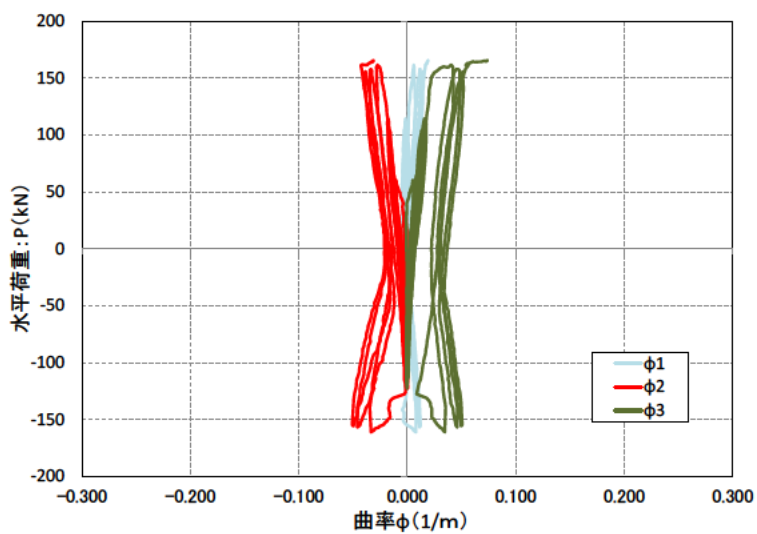


図-3.2.5 水平荷重と曲率の関係
(左側側壁基部，荷重ピーク 2.2%まで)

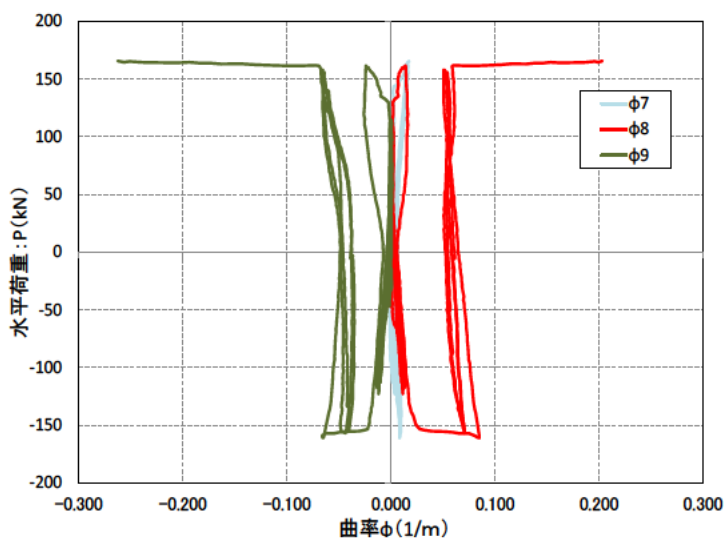


図-3.2.6 水平荷重と曲率の関係
(右側側壁基部，荷重ピーク 2.2%まで)

3.2.6 内空変位量と鉛直荷重との関係

層間変形角の増加による内空変形量と鉛直荷重の推移を図-3.2.7に示す。終局時の2ヒンジアーチは、内空高さが減少、内空幅が増加しており、扁平な形状になった。これは内空高が増加し、内空幅が減少した場所打ちアーチと対照的な挙動であった。参考文献5)では図-3.2.8に示すように2ヒンジアーチのせん断変形による挙動を単純化した場合、門型のヒンジ構造の挙動に等価となることを確認している。よって、場所打ちアーチの挙動と異なった原因としては、2ヒンジアーチがせん断変形することで、頂版中央が元の軸線位置より下がり扁平となったことであると考えられる。このことより、終局時の鉛直土かぶり圧を模した鉛直荷重が初期鉛直荷重値以下となった理由を考慮すると、原因は2ヒンジアーチが扁平形状となり、頂版が内空側へ変形することで、鉛直方向は初期荷重を制御せず保持していたのみであったことより、ジャッキの荷重が下がったためと考えられる。しかしながら、そのような終局時においても、約90%の鉛直荷重が作用しており、供試体のアーチ形状は維持されていた。このことから、2ヒンジアーチは終局後であっても鉛直方向の上載荷重を維持することができ、鉛直耐荷力の喪失には至らないと考えられる。

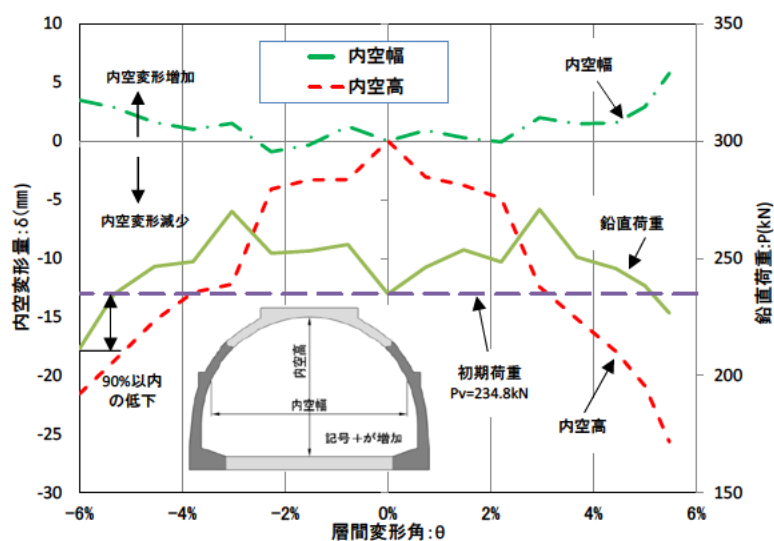


図-3.2.7 内空変形量と鉛直荷重との推移

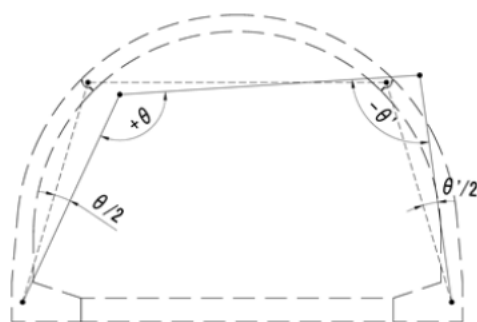


図-3.2.8 2ヒンジアーチの挙動の単純化

3.2.7 ヒンジの挙動

図-3.2.9 に水平荷重とヒンジの回転角との関係を示す。ヒンジの挙動は回転角を計測する変位計が途中でストローク不足を起こしたため、層間変形角 3.8%までの計測であるが、ヒンジは荷重に従った安定した回転挙動を示した。終局時においても写真-3.2.6、写真-3.2.7 に示すような、ヒンジの閉合による接触のために生じたコンクリートの部分的な剥落が見られたが、頂部崩落につながるようなヒンジの破壊や脱落などの現象は見られなかった。

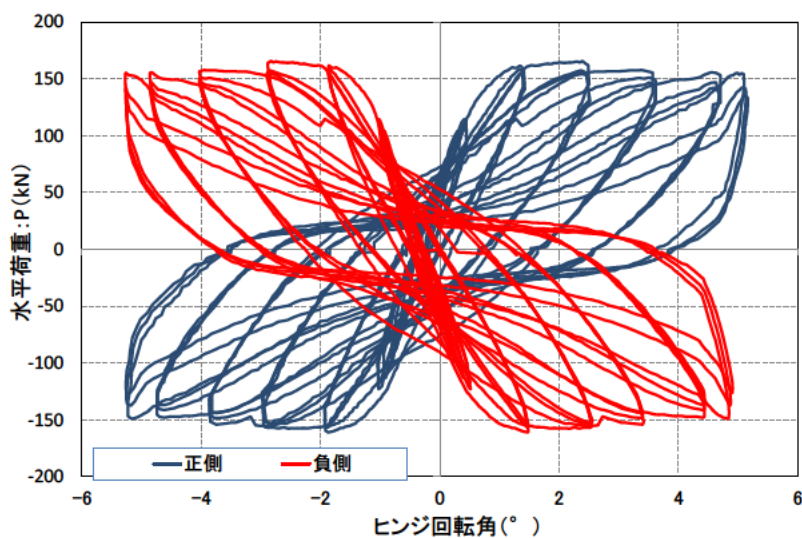


図-3.2.9 水平荷重-ヒンジ回転角の関係

3.2.8 曲がりボルトの挙動とヒンジに与える影響

ヒンジ部の曲がりボルトにおいて、図-3.2.10 に示すように頂版部材と側壁部材とのピース間および曲がりボルトセンターにてひずみを計測した。計測の結果、曲がりボルトのひずみは、図-3.2.11 に示すように層間変形角が 4% 付近までは、ほとんど変化がないが、それ以降は大きく増加する傾向が見られた。曲がりボルトは、ある一定のヒンジの回転角までひずみは変化しないが、その角度を超えた段階からひずみが増加するような非線形的な挙動をすることが確認された。

図-3.2.12 は層間変形角が 3.8% までの、曲がりボルトのひずみに変化が見られない範囲でのヒンジの回転角と層間変形角との関係を示すものである。ほぼ正比例関係であり、ヒンジの回転角は主に層間変形角に支配されていることが確認できる。また、内側のヒンジに部材の接触による剥離が確認されたのは、層間変形角 3.7%~4.4% の間であり、曲がりボルトのひずみが増加する点とほぼ一致した。ヒンジの幾何的な接触などが、曲がりボルトのひずみ増加に影響を及ぼしたと考えられる。

層間変形角が 4% 程度以降、終局までの曲がりボルトに発生した最大ひずみは層間変形角 6% 時において約 4400 μ まで発生した。元々、曲がりボルトは参考文献 5) による委員会の提言を受け、頂版部材の脱落防止を目的に導入された装置であるため、終局状態においては脱落防止の機能を満たしていること、および曲がりボルトが存在することによる本体構造への悪影響が無いことの確認が重要である。

実験結果からは、曲がりボルトに発生したひずみ量は、降伏ひずみの 4700 μ (JIS B 1051 のボルトの強度区分 10.9 の降伏応力 940N/mm² に対し、ヤング係数 2.0×10^5 N/mm² で除した値) 以下であったため、ボルトの破断による脱落防止機能の喪失には至っていない。

図-3.2.13 に示すヒンジ部近傍の鉄筋のひずみ値を終局まで計測したが、その値は $\pm 100 \mu$ (圧縮ひずみと引張ひずみ) 程度であった。ヒンジ部には曲げモーメントがほとんど発生しておらず、ピン構造として機能していることが伺える。

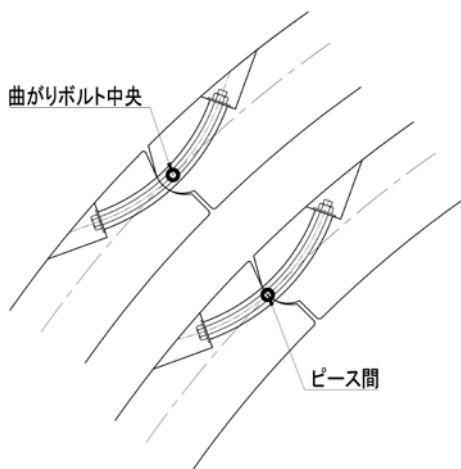


図-3.2.10 曲がりボルトのひずみゲージ位置図

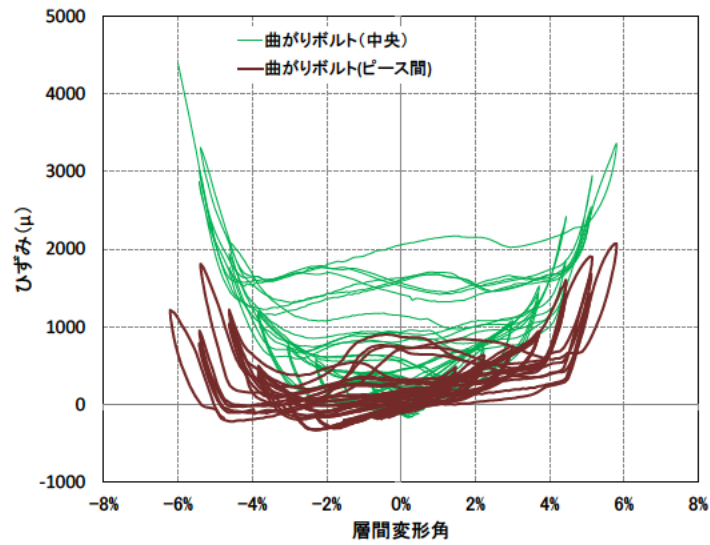


図-3.2.11 曲がりボルトひずみ-層間変形角の関係

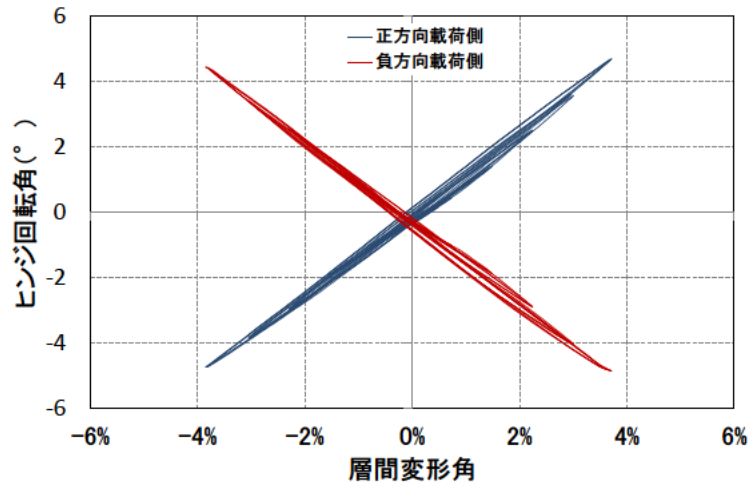


図-3.2.12 層間変形角-ヒンジ回転角の関係 (層間変形 3.8%まで)

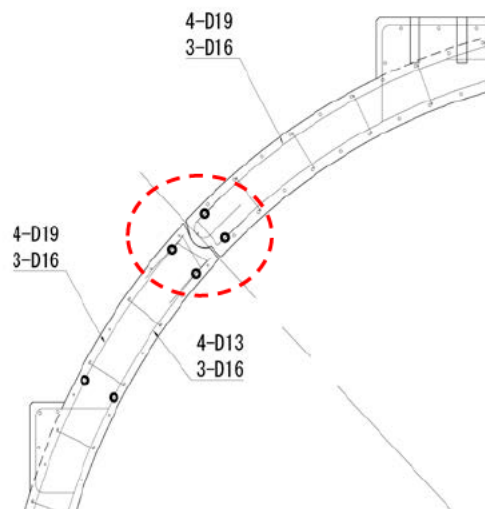


図-3.2.13 ヒンジ付近の鉄筋ゲージ位置
(黒丸がゲージ位置, ヒンジから 100 mm以内に設置)

3.3 3 ヒンジアーチの実験結果

予備載荷の結果，アーチ頂部の水平変位量 7mm を基準変位 δ_0 とし， δ_0 の整数倍の変位で各ステップ 3 サイクルを載荷した．実験の記録では，基準変位 δ_0 を δy と記しており，例えば基準変位の 3 倍の水平変位を目標として載荷した結果は $3\delta_0$ ではなく， $3\delta y$ としている．

目標とした水平変位と，その際にアーチカルバートに生じた詳細な実験データから読み取った層間変形角との関係を表-3.3.1 に示す．それぞれの層間変形角は各載荷での最大荷重時の値である．

表-3.3.1 目標の頂部水平変位量と評価に用いた層間変形角との関係

目標水平変位		層間変形角	
		正側載荷	負側載荷
1 δy	± 7 mm	0.257%	-0.254%
2 δy	± 14 mm	0.515%	-0.524%
3 δy	± 21 mm	0.792%	-0.779%
4 δy	± 28 mm	1.059%	-1.050%
5 δy	± 35 mm	1.303%	-1.323%
6 δy	± 42 mm	1.584%	-1.591%
7 δy	± 49 mm	1.834%	-1.860%
8 δy	± 56 mm	2.093%	-2.103%
9 δy	± 63 mm	2.374%	-2.354%
10 δy	± 70 mm	2.336%	-2.640%
11 δy	± 77 mm	2.942%	-2.913%

3.3.1 水平荷重と層間変形角との関係

正負交番载荷における水平荷重と層間変形角との関係および包絡線を図-3.3.1 に示す。水平荷重 P は図-2.7.1 での左右のジャッキ荷重の合計値で、常時死荷重を模した初期荷重時からの増減分を示している。

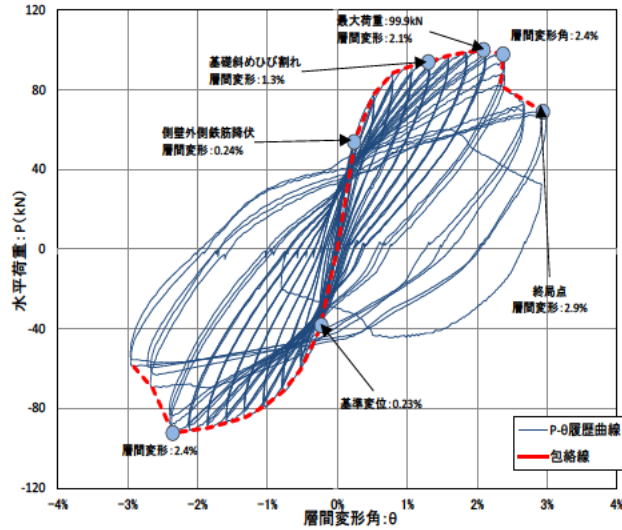


図-3.3.1 水平荷重-層間変形角の関係

3.3.2 損傷過程および終局状態

終局に至るまでの損傷過程を、層間変形角を基準として以下に述べる。代表的な損傷状態の図を図-3.3.2に示す。ここで供試体に発生した損傷は、概ね左右対称であったため、損傷図は片側の右側半分を示す。なお、損傷図はひび割れやかぶりコンクリート剥落状態を示したものであり、荷重による変形は考慮していない。

損傷過程は、まず基準変位に至る前の初期荷重および予備載荷によって、アーチ部材の外側面に多数の曲げひび割れが分散して発生した。これは事前解析より決定した初期荷重によって図-2.3.2 (c) のモーメント図に示すような大きな曲げがアーチ外側へ発生したことが原因である。次に図-3.3.2 (a) に示すように層間変形角 0.24%でアーチ部材外側の鉄筋が降伏した後、荷重が徐々に増加するとともに、アーチ部材の内側面に曲げひび割れが発生した。図-3.3.20 (b) の層間変形角 2.1%において最大荷重 99.9kN に達した後、図-3.3.2 (c) の層間変形角 2.4%において、アーチ部材の載荷点位置の曲げ損傷により急激に荷重が低下し、層間変形角 2.9%で終局を迎え載荷を終了した。終局時の損傷状況を図-3.3.2 (d) に示す。終局状態は左右のアーチ部材の載荷位置が塑性ヒンジ化しており、載荷前に比べ大きく変形をしている。載荷位置の内側には曲げによる損傷が発生していた。クラウン部のヒンジと脚部のヒンジについては、アーチ部材の曲げ損傷により供試体が終局状態に至るまで、ヒンジが外れるような脆性的な破壊は生じることはなくヒンジ機能は保持されていた。ただし、基礎コンクリートにはせん断力によるひび割れが発生していた。この箇所にはじめにひび割れが確認されたのは層間変形角 1.3%の時であった。今回の実験で用いた供試体は、基礎部を含めて、実構造物を再現したものであり、実際の構造物にも同様な損傷が発生する可能性がある。そのため荷重条件や構造条件によっては、基礎コンクリートにせん断破壊が発生し、アーチ部材の脚部の支持機能が失われることも考えられる。

また、載荷装置が集中荷重のため、設計断面力を実験供試体には完全に再現できず、載荷初期にアーチ外側に鉄筋降伏が発生したが、その後の終局状態はアーチスパン中央付近の内側での曲げ圧縮破壊にて至ったことから、アーチ外側の損傷が終局の要因となる可能性は小さいと考える。

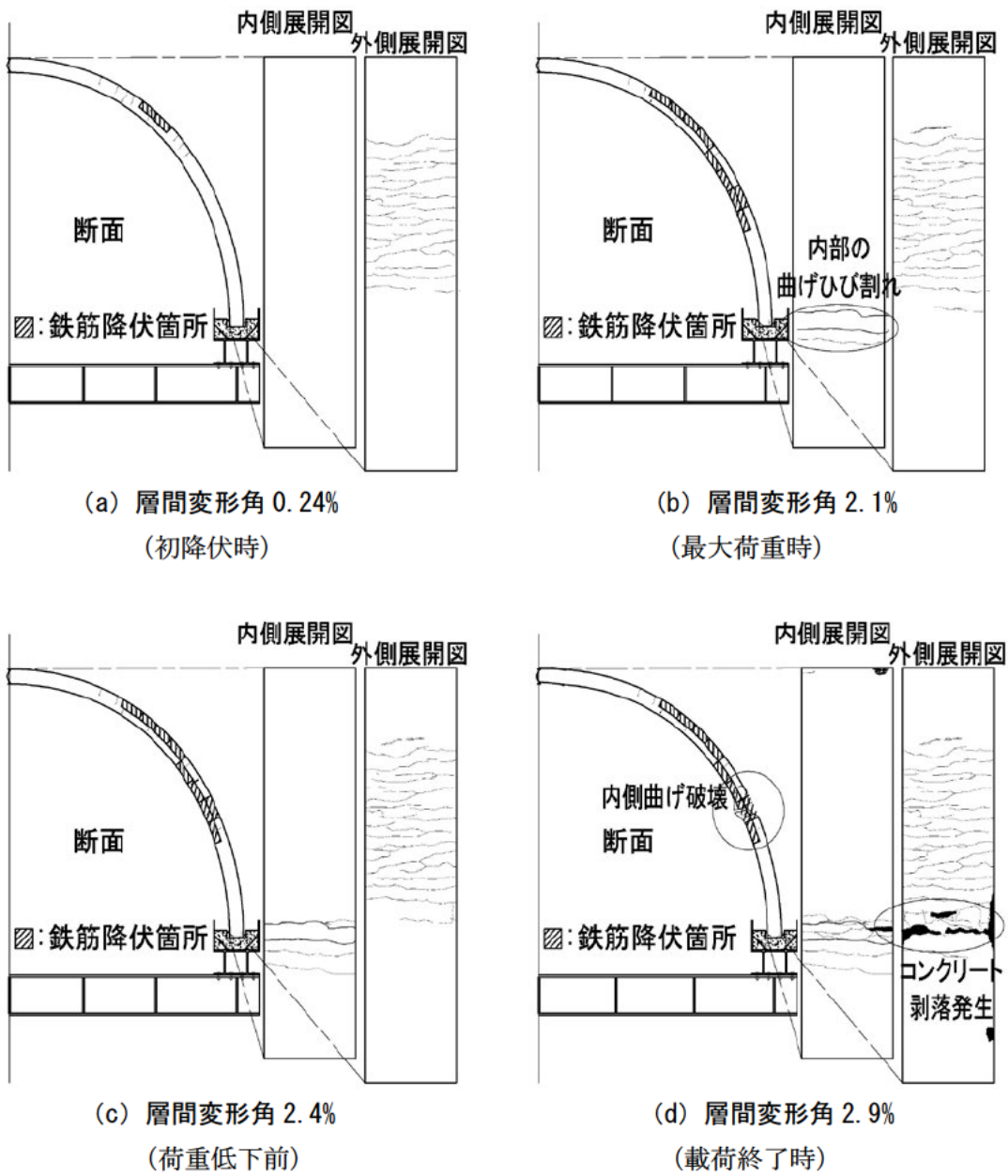


図-3.3.2 ひび割れ損傷図

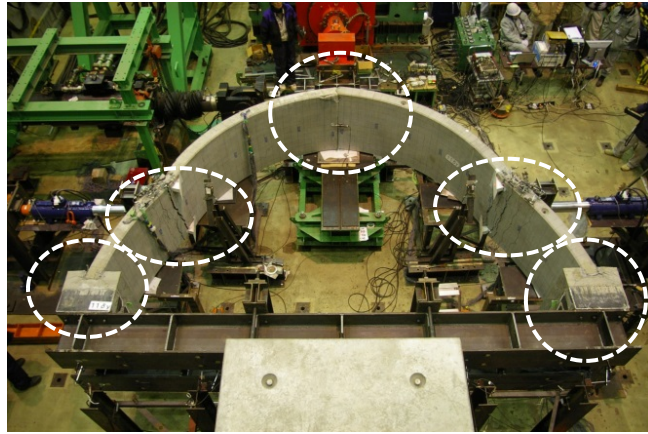


写真-3.3.1 荷重終了状況

水平荷重載荷位置での損傷，基礎部の損傷，クラウンヒンジの変形を確認

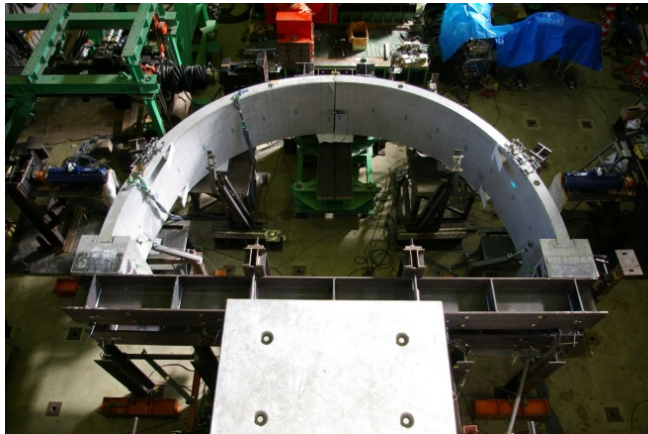


写真-3.3.2 荷重前状況

荷重載荷前は，ほぼ円弧状であった



写真-3.3.3 荷重中の状況（水平変位作用中）

終局直前の右方向へ荷重中



写真-3.3.4 基礎部終局状況
基礎部コンクリートのひび割れを確認



写真-3.3.5 基礎部終局状況 (写真-3.3.4の反対側)



写真-3.3.6 水平荷重載荷点の破壊状況
曲げ破壊の状況，左右同様な破壊状態であった



写真-3.3.7 水平荷重載荷点の破壊状況（写真-3.3.6の内側の状況）

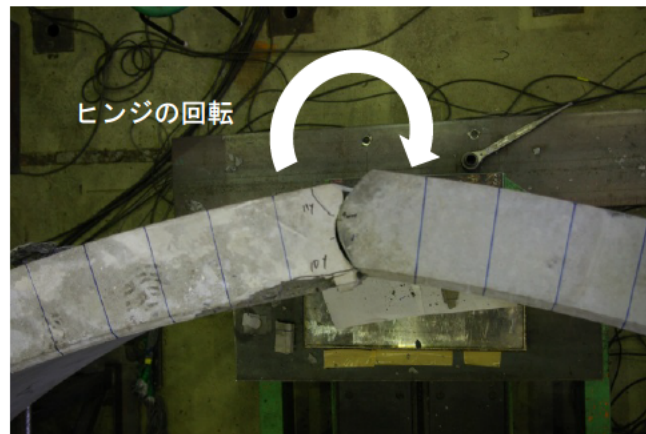


写真-3.3.8 クラウンヒンジ終局時の状況

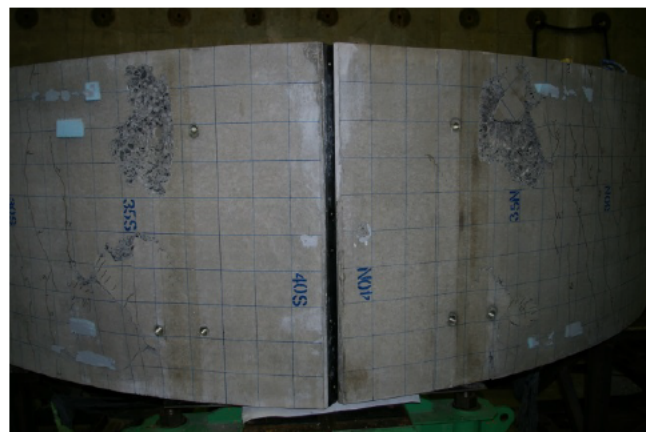


写真-3.3.9 クラウンヒンジ終局時の状況（アーチ外側の状況）
ヒンジの回転により大きく開いている状態を確認

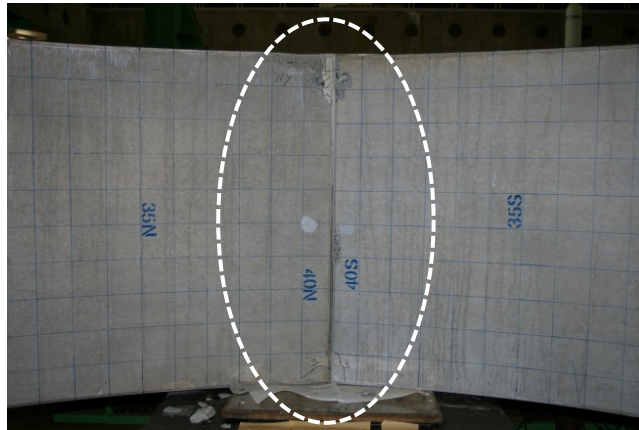


写真-3.3.10 クラウンヒンジ終局時の状況（アーチ内側の状況）
ヒンジ閉合による接触のため、部分的な剥落を確認

3.3.3 変形能による照査

変形能による評価は2 ヒンジアーチと同様に2%を目安とする。図-3.3.1 に示すように、水平荷重は正側が2.1%、負側が2.4%と、両方とも層間変形角が2%を過ぎるまで荷重はゆるやかな上昇を続けている。そのことより変形能は少なくとも評価の基準とした2%以上を有していることが確認できる。

3.3.4 鋼材のひずみ履歴

鋼材のゲージは図-2.5.10 に示す位置に、一カ所につき内外 2 枚の貼り付けした。ここでは、はじめに降伏をした箇所のアーチ外側のゲージおよび終局破壊を起こした箇所のアーチ内側の計測データを示す。グラフは载荷による供試体の損傷によって生じた計測値の乱れが現れる前までの表記とする。

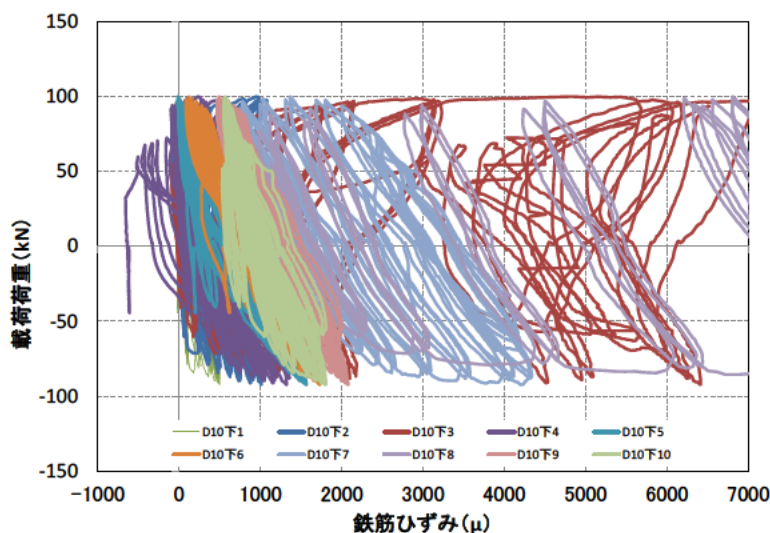


図-3.3.3 アーチ外側の鉄筋ひずみ（終局まで、左側アーチ）

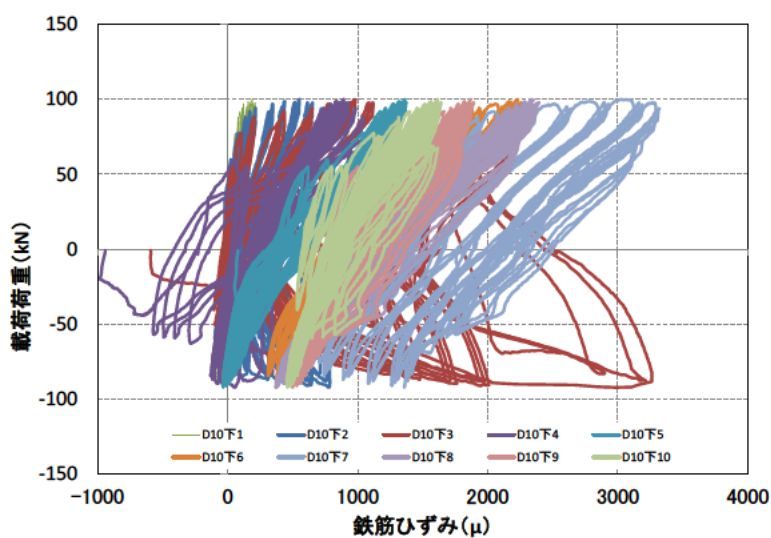


図-3.3.4 アーチ外側の鉄筋ひずみ（終局まで、右側アーチ）

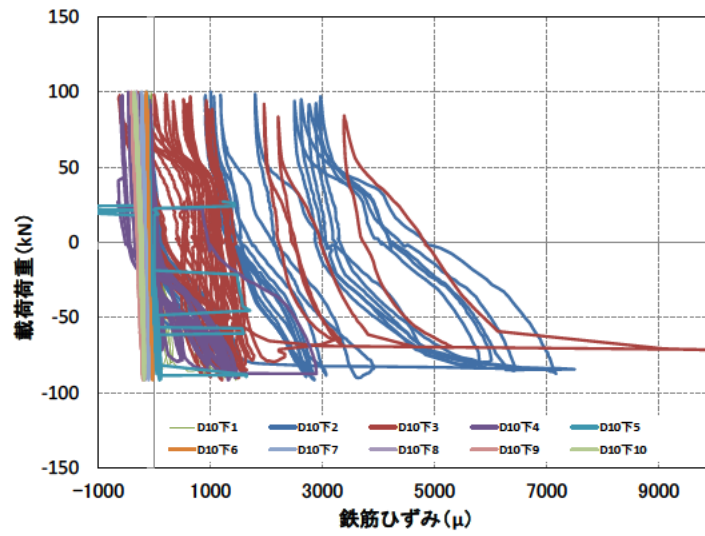


図-3.3.5 アーチ内側の鉄筋ひずみ (8 δ y まで, 左側アーチ)

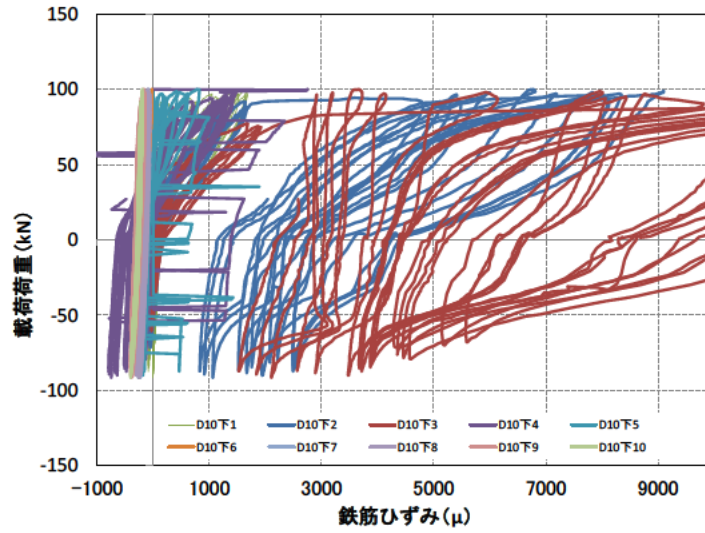


図-3.3.6 アーチ内側の鉄筋ひずみ (8 δ y まで, 右側アーチ)

3.3.5 曲率の計測

曲率は「3.1.4 曲率の計測」に記載した場所打ちアーチと同様な手法により算出する。3ヒンジアーチでは、曲率を計測した区間は、図-2.5.11 および写真-3.3.11 に示すように正負交番荷重の載荷点と一致しており、計測データは、集中荷重の影響を直接受けた値であると考えられる。

水平荷重と曲率との関係を図-3.3.7 と図-3.3.8 に示す。図は水平荷重がピークを迎えた層間変形角 2.1%までの範囲とする。

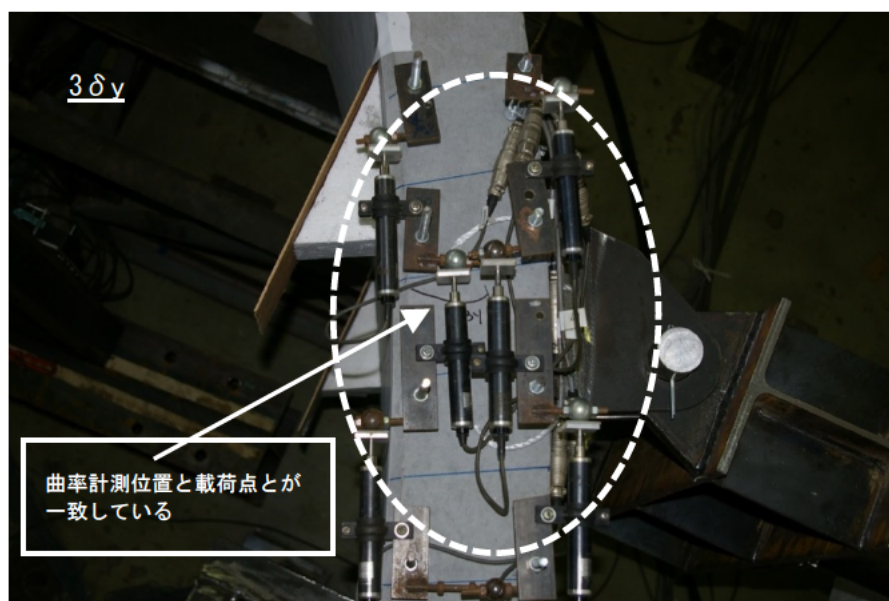


写真-3.3.11 アーチの曲率計測範囲と正負交番載荷位置との関係

曲率を計測した部材位置は、図-2.5.11 (c) を参照とする。

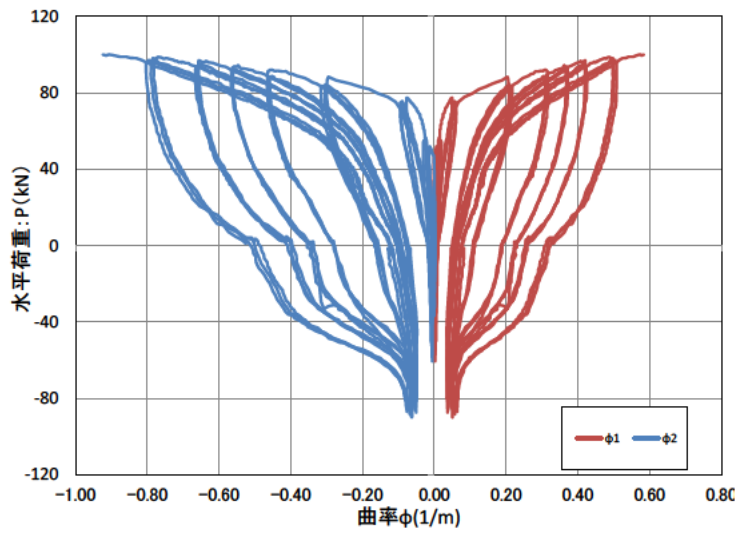


図-3.3.7 水平荷重と曲率の関係
(左側アーチ部材, 荷重ピーク 2.1%まで)

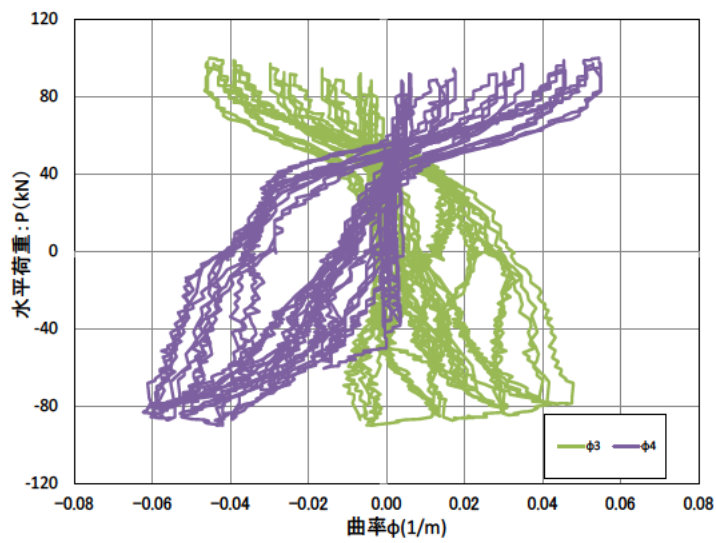


図-3.3.8 水平荷重と曲率の関係
(右側アーチ部材, 荷重ピーク 2.1%まで)

3.3.6 内空変形量と鉛直荷重との関係

3 ヒンジアーチの層間変形角の増加による内空変形量と鉛直荷重の変化を図-3.3.9 に示す。3 ヒンジアーチは荷重に従い内空高さは増加、内空幅は減少しており、凸型の尖頭形状になっている。初期の鉛直荷重との関係を見ると、3 ヒンジアーチは終局後に断面が尖頭形状となり、クラウンが上へ押し上げられたため、初期鉛直荷重以上の荷重が作用している。このため、地震力により終局に至った断面においても、上載荷重を維持することができ、鉛直耐荷力の喪失に至らないと考えられる。

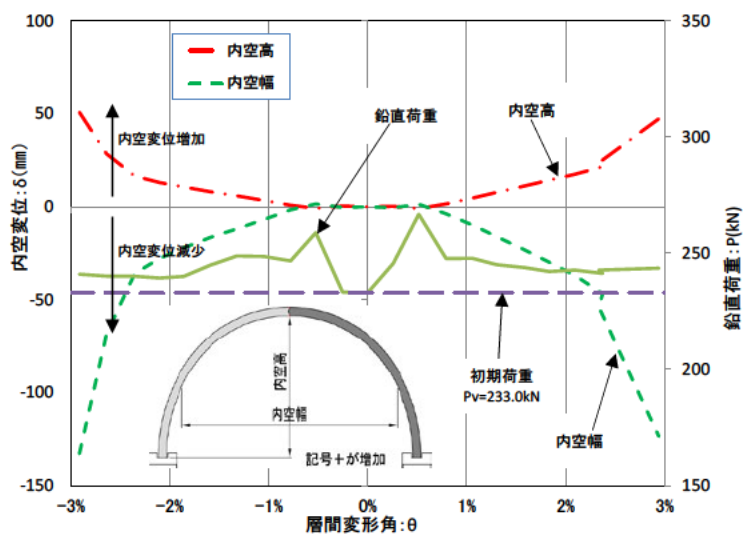


図-3.3.9 内空変形量と鉛直荷重との推移

3.3.7 ヒンジの挙動

水平荷重とヒンジ回転角の関係を図-3.3.10 に、層間変形角とヒンジ回転角との関係を図-3.3.11 に示す。なお、ヒンジの回転角を計測するための変位計が荷重途中で外れたため、両グラフでは層間変形角 2.4%までの計測値を示している。回転角の方向は図-3.3.12 に示すように、クラウンは脚部が開くような回転をプラス、閉じるような回転をマイナス、脚部はアーチが外側へ回転する方向をプラス、内側へ回転する方向をマイナスとする。計測の結果、クラウンヒンジの回転角は $\pm 1^\circ$ の範囲で、脚部ヒンジは -4° から $+2^\circ$ の範囲で安定して挙動している。また写真-3.3.8 から写真-3.3.10 において、ヒンジの大きな損傷は見られないことから、ヒンジの破壊により脱落に至るような終局状態が発生する可能性は低いと考えられる。

クラウンヒンジの回転角は正負交番荷重の初期である層間変形角 0.51%付近までは、図-3.3.13 に示すようにプラス側に移行し、それ以降は図-3.3.14 に示すようにマイナス側へ移行している。クラウンヒンジがプラスに回転していれば、図-3.3.12 に示すようにアーチ

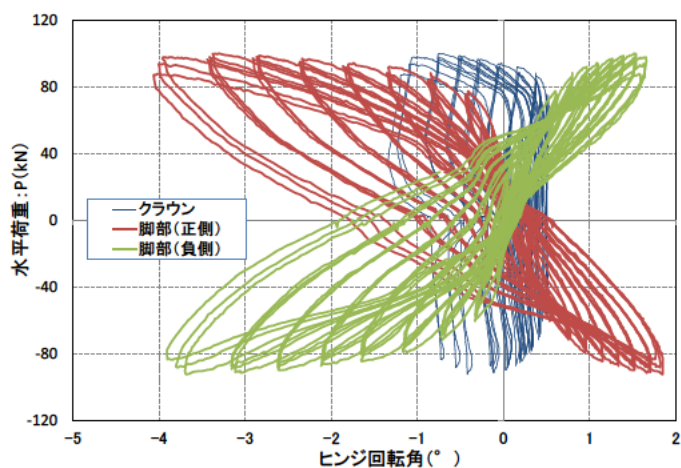


図-3.3.10 水平荷重-ヒンジ回転角の関係

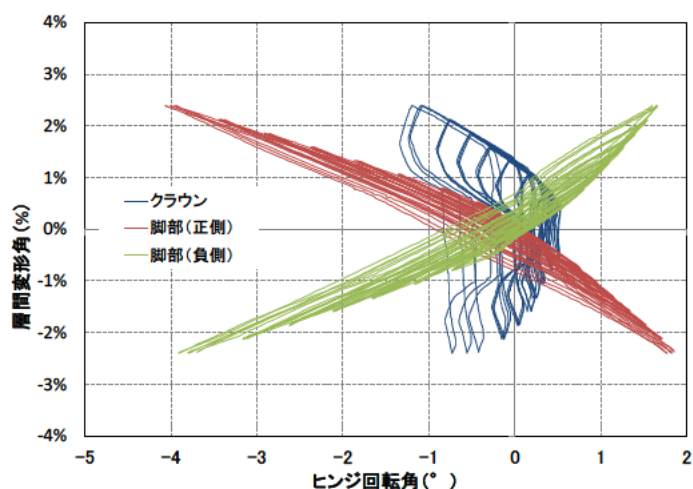


図-3.3.11 層間変形角-ヒンジ回転角の関係

形状はクラウンが下側に変形しており、マイナスに回転していれば上側に変形していることを示す。このことから、回転角の方向が変わった 0.51%時点を境にして、それまではアーチクラウンが内空側に変位し、断面が凹型になるような変形をしていたが、その後の正負交番载荷により、側壁が内側の徐々に押され、断面が凸型に変形していったと考えられる。

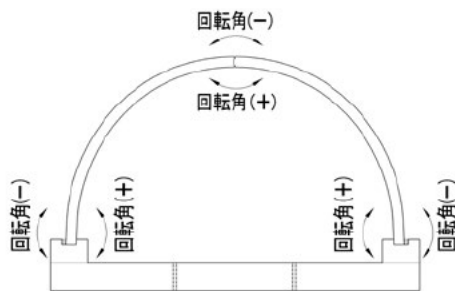


図-3.3.12 ヒンジの回転角方向

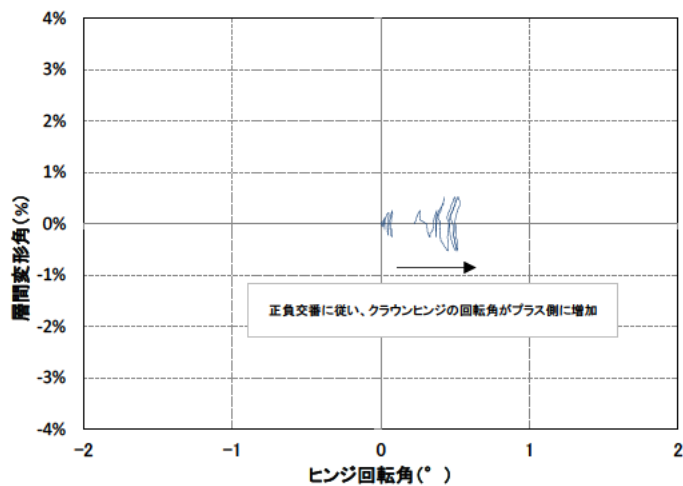


図-3.3.13 層間変形角-ヒンジ回転角の関係（層間変形 0.51%まで）

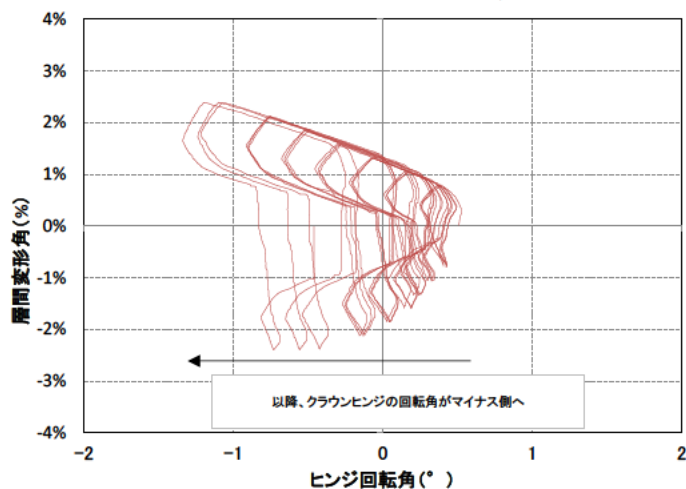


図-3.3.14 層間変形角-ヒンジ回転角の関係（層間変形 0.51%以降）

4. 場所打ちアーチとの性能比較

4.1 2 ヒンジアーチとの比較

1) 変形能の比較

図-4.1.1 に 2 ヒンジアーチと場所打ちアーチとの包絡線比較図を示す。2 ヒンジアーチの最大荷重値は場所打ちアーチの 0.57 倍 (165.7kN/290.5kN) であるが、その時の変形能の比は 1.6 倍 (2.2%/1.4%)、終局付近では 1.7 倍 (4.4%/2.6%) であった。このことは、2 ヒンジアーチは場所打ちアーチと比べ、ヒンジの存在および部材厚が薄いために剛性や耐力は低い、変形能により地震力を受け持つ構造であることが伺える。

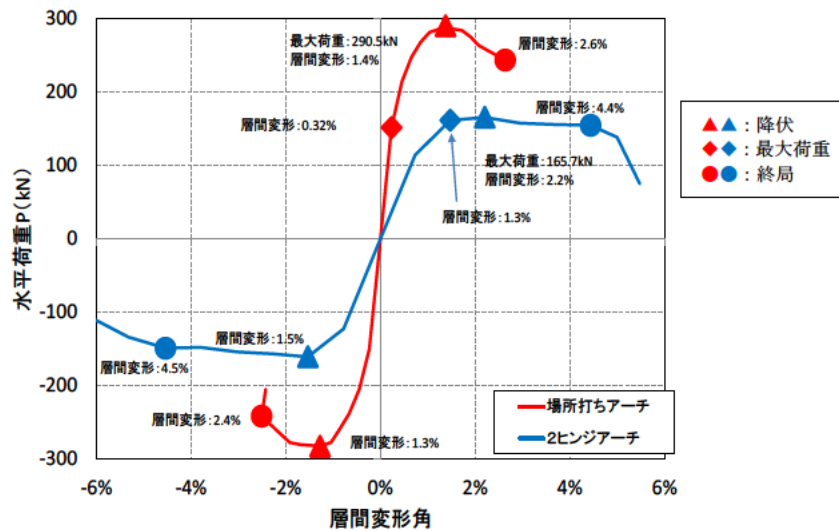


図-4.1.1 包絡線比較 (2 ヒンジと場所打ち)

2) 終局状態および破壊状態の比較

2 ヒンジアーチと場所打ちアーチの終局時の損傷状態を比較すると、場所打ちアーチではアーチ部の曲げせん断破壊が発生したのに対し、2 ヒンジアーチは肩部にヒンジを有していることから同様の損傷が発生しなかったことが相違点として挙げられる。一方、一致点としては、側壁基部の鉄筋降伏箇所は外側に幅広く分布しているが、内側は付根に集中していること、および隅角部の損傷が同じような斜め方向へのひび割れを起こしていることが挙げられる。ここで、両構造とも側壁基部の外側の損傷が分散したことに対し、内側の損傷が付け根に集中した原因としては、内側鉄筋を定着する隅角部の損傷が大きくなり、その鉄筋の定着が弱くなったため、鉄筋の抜け出しが生じたためだと考えられる。

3) 地震後の点検の比較

アーチカルバートのような地中構造物の場合、地震被害などの損傷確認は一般に函体内

面からの目視により行なわれる。今回の実験結果のような隅角部や側壁外側の損傷が発生した場合、内面側からの目視では確認することは困難であり、目視ができる内面側での損傷が確認された時には、側壁基部外面や隅角部での損傷は大きなものとなっているものと考えられる。そのため、損傷が起こりやすい部位をはじめから把握しておくことや、変形能が大きく、ヒンジの回転と載荷される荷重に相関がある 2 ヒンジアーチの場合においては、地震後の内空変形やヒンジの回転などを計測することで損傷状態を推定し対策を講じるなど、構造物の特徴を事前に評価しておくことが必要と考えられる。

4.2 3 ヒンジアーチとの比較

1) 変形能の比較

図-4.2.1 に 3 ヒンジアーチと場所打ちアーチとの包絡線比較図を示す。3 ヒンジアーチの最大荷重値は場所打ちアーチの 0.34 倍 (99.9kN/290.5kN) であり、その時の変形能は 1.5 倍 (2.1%/1.4%)、終局付近では 0.92 倍 (2.4%/2.6%) であった。3 ヒンジアーチはヒンジの数が多く部材厚も薄いため、場所打ちアーチとの剛性差が生じ、実験での最大荷重値の差が大きくなった。しかしながら地中構造物に対しては安全側で評価した 2% 以上の変形能を有しており、また、最大荷重時の層間変形角と降伏時の層間変形角を除いた靱性率は $\mu = 8.8$ (2.1%/0.24%) と、場所打ちアーチ $\mu = 4.4$ (1.4%/0.32%) に比べ大きな値であった。

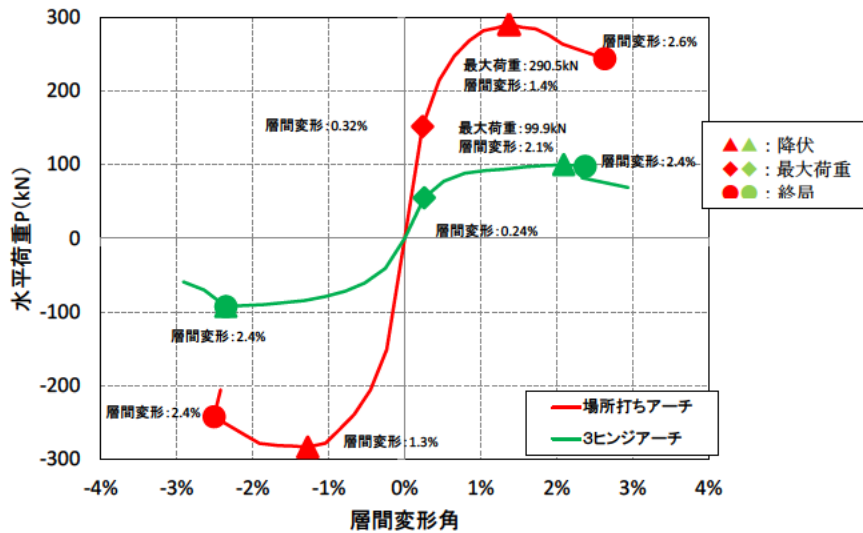


図-4.2.1 包絡線比較 (3 ヒンジと場所打ち)

2) 終局状態および破壊状態の比較

3 ヒンジアーチと場所打ちアーチの終局時の損傷状態を比較すると、2 ヒンジアーチには隅角部や側壁基部に損傷が集中するなどの場所打ちアーチと共通する現象が見られたが、3 ヒンジアーチはアーチの曲げ損傷が大きくなるなど、場所打ちアーチとの損傷状態とは異なっていた。これは、場所打ちアーチと 2 ヒンジアーチの供試体は、一体化された底版で閉合されていること、非拘束の隅角部を有しているなどの共通項が多い構造であるが、3 ヒンジアーチはアーチと基礎部は一体化されておらず、隅角部も存在しないなど構造系が異なっていることが原因と考えられる。

3) 地震後の点検の比較

実験での損傷過程では、先にアーチ外側ヘクラックが発生したが、これは初期荷重の影

響によるものであり、その後の正負交番载荷では、アーチ内側の曲げによる損傷が大きくなり終局に至っている。そのため地震後の函体内面からの目視により損傷を確認することは比較的容易だと考えられる。

また、目視ではアーチクラウンのヒンジの回転角や内空側および内空外側への変形量も確認できたことから、構造物の損傷とのクラウンの変形量との因果関係を把握しておくことも重要と考える。

5. まとめ

本研究では、ヒンジ式プレキャストアーチカルバートである 2 ヒンジアーチと 3 ヒンジアーチの、耐震性能の評価手法を確立する目的で模型供試体を用いた正負交番載荷実験を行った。実験の範囲内で得たそれぞれの知見を示す。

1) 2 ヒンジアーチの知見

- ・ 損傷過程は側壁基部の主鉄筋が降伏した後、隅角部の損傷が進み終局に至るものであった。
- ・ ヒンジの回転性能は部分的な剥落が生じたものの、終局に至るまで損なわれることはなかった。また曲がりボルトの存在による悪影響も確認されなかった。
- ・ 終局状態はヒンジの脱落や、カルバートが鉛直耐荷力を喪失するような破壊形態にならなかった。
- ・ 変形能は兵庫県南部地震の非液状化地盤で確認された最大せん断ひずみ 1%弱に対し安全で、かつ安全の目安とした層間変形角 2%以上であることを確認できた。
- ・ 2 ヒンジアーチはヒンジの機能により、場所打ちアーチのようなアーチ肩部への損傷や曲げせん断破壊はなかった。
- ・ 破壊の形態は、アーチ肩部での損傷以外、側壁内側では付根に集中し外側では分散する、また隅角部には斜めのひび割れが入るなど、場所打ちアーチと一致した。
- ・ 場所打ちアーチと比べ耐力が低い、大きな変形能によって地震力を受け持つ構造である。

また、課題としては、

- ・ 隅角部の損傷は、層間変形角が 2%以降の大きな変形時ではあるが、今回の実験では隅角部の損傷が進んだことで終局に至っている。設計では隅角部を剛域として扱うことが一般的であるため、隅角部は高い耐力を有するなどの考慮が必要であると考えられる。
- ・ 実際の構造物が地震により損傷を受けた場合を考えると、一般にカルバートの損傷確認は躯体内部からの目視に頼っているが、今回の実験では、実際の構造物の場合では目視にて発見しにくい隅角部や側壁外側に多く発生したため、目視以外での損傷確認手法を確立していくことが課題として挙げられる。

2) 3 ヒンジアーチの知見

- ・ 損傷過程は、初めにアーチ外側の鉄筋が降伏したが、最終的には曲げモーメントによる部材内側引張により終局に至るものであった。
- ・ ヒンジの回転性能は終局に至るまで損なわれることはなかった。
- ・ 終局状態ではヒンジの脱落や、カルバートが鉛直耐荷力を喪失するような破壊形態にならなかった。
- ・ 変形能は兵庫県南部地震の非液状化地盤で確認された最大せん断ひずみ 1%弱に対し安全で、かつ安全の目安とした層間変形角 2%以上であることを確認できた。
- ・ 場所打ちアーチに比べ耐力は低いが、高い変形能が特徴的である。
- ・ アーチ内面側の曲げが卓越して終局に至る構造であり、目視による損傷の確認が容易である。

また、層間変形角 1.3%にて脚部ヒンジの基礎コンクリートへのせん断ひび割れが発生したことから、荷重条件や構造条件によっては、アーチの支持機能が失われる可能性が考えられるため、その対応が課題として挙げられる。

参考文献

- 1) (財) 地域地盤環境研究所, モジュラーチ工法協会: Moduarch 技術マニュアル, 2008.7.
- 2) (財) 先端建設技術センター, テクスパン工法設計施工マニュアル検討委員会: テクスパン工法設計施工マニュアル(案), 1998.12.
- 3) (社) 日本道路協会: 道路土工 カルバート工指針, 2010.
- 4) 日本アーチカルバート工業会ホームページ,
<http://www.arch-culvert.org/>
- 5) (財) 土木研究センター, モジュラーチ工法の耐震性能向上に関する研究委員会(その1)(その2)報告書, 1996.5, 1997.3
- 6) 松下麗菜, 澤村康生, 岸田潔, 木村亮, 2 ヒンジプレキャストアーチカルバートの強地震時における損傷形態に関する振動実験, 土木学会第70回年次学術講演会, III-132, pp.263-264, 2015.9
- 7) 新道路技術会議: 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No.24-4 ー大型実験および数値解析による連続アーチカルバート盛土の設計規範の構築に関する研究ー, 2015.7
- 8) 豊田浩史, 高貝真: テールアルメ盛土中における3ヒンジアーチの動的挙動, 土木学会論文集 No.624/III-47 pp.255-266 1999.6
- 9) 澤村康夫, 石原央之, 岸田潔, 木村亮: 強震応答実験装置を用いた3ヒンジプレキャストアーチカルバートの振動実験, 第59回地盤工学シンポジウム 平成26年度論文集 pp.207-214, 2014.11
- 10) 運上茂樹, 星隈順一, 西田秀明, 橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)(橋脚の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法), 土木研究所資料第4023号, 2006.8
- 11) 幸左賢二, 安田扶律, 藤井康男: 開削トンネル隅角部の耐震性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.1057-1062, 1998
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編, 2012.3
- 13) (社) 土木学会: 土木用語大辞典, 1999.2
- 14) 土木学会: トンネル標準示方書 開削工法・同解説, 2006.
- 15) 松尾豊史, 金津努, 大友敬三, 福本彦吉: コンクリート製地中構造物の合理的な耐震性能評価指標に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, No.0163, pp.1-8, 2003.6
- 16) 土木学会原子力土木委員会: 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針, 2005.

- 17) 阪神高速道路（株）：開削トンネル耐震設計指針－横断方向の耐震設計－，2008.10
- 18) 濱田政則，大町達夫：直下地震による表層地盤の変位量とひずみ量の検討，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集， pp.69-80, 1996

付属資料

実験の観測記録および各変位量での载荷終了後における損傷状態図を示す。最終的な評価に用いた水平変位量はアーチクラウンとアーチ全体の水平の相対変位量を用いたが、観測記録での入力変位量は、载荷中のアーチクラウンに発生した水平変位量を直接読み取った値である。

1. 場所打ちアーチ

実験時の加振ステップ毎の供試体の損傷の進展状況の記録を以下に示す。a 面はアーチカルバートの正面断面図を上から見た面、b 面は下から見た面、m 面はアーチカルバートの正面に対して右側、p 面は左側となる。

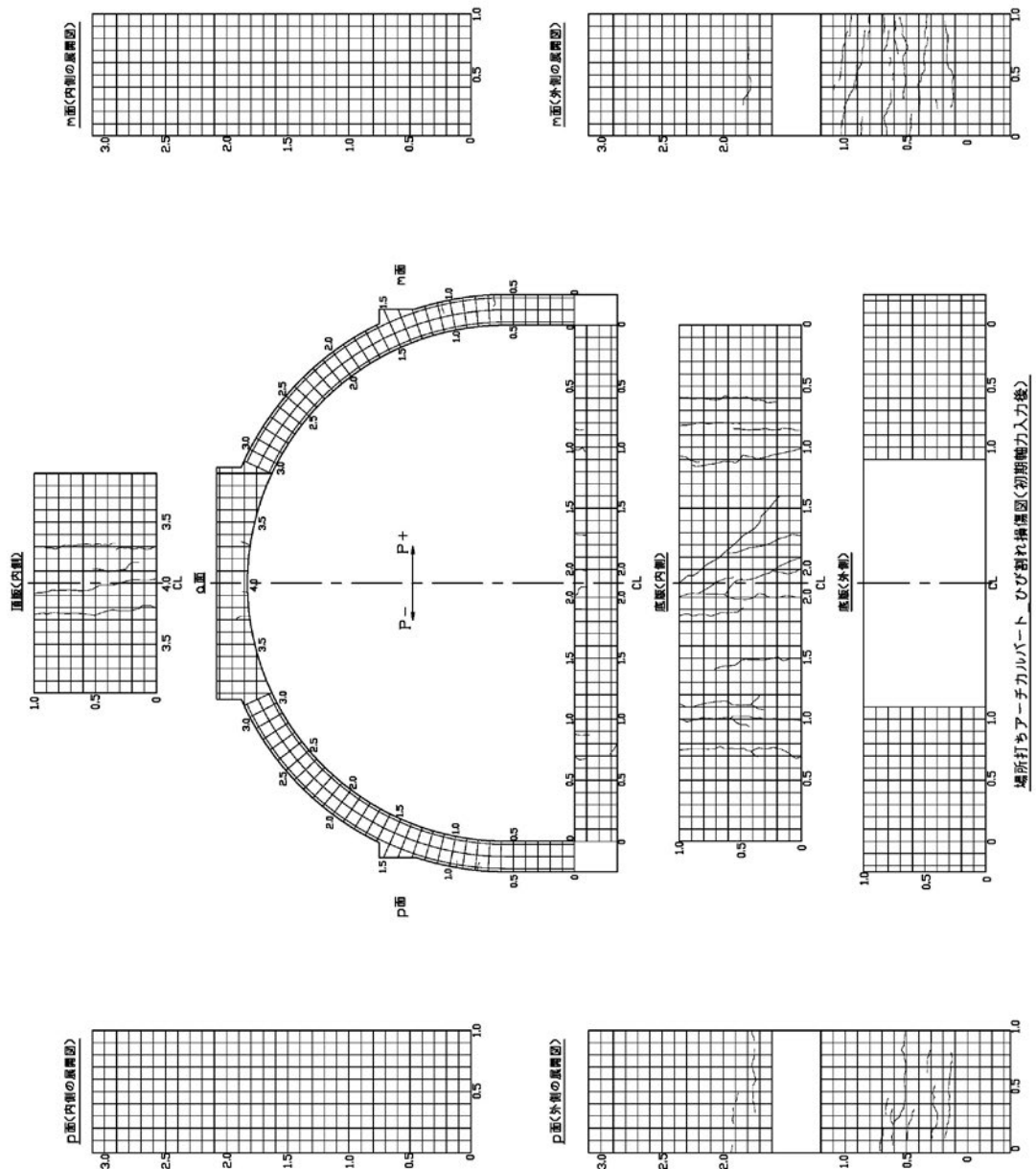
1) 初期軸力導入後

加振機 入力変位	損 傷 状 況
初期軸力導入後	<ul style="list-style-type: none">・底版（a 面 m 側）… m 面の内側から p 面の内側へ 850mm 付近で、底版上面から下面へ約 50mm のひび割れが発生した。m 面の内側から p 面の内側へ 1000mm 付近で、底版上面から下面へ約 50mm のひび割れが発生した。m 面の内側から p 面の内側へ 1700mm 付近で、底版上面から下面へ約 50mm のひび割れが発生した。・底版（a 面中央）… m 面の内側から p 面の内側へ 2000mm 付近で、底版上面から下面へ約 50mm のひび割れが発生した。p 面の内側から m 面の内側へ 2000mm 付近で、底版上面から下面へ約 50mm のひび割れが発生した。・底版（a 面 p 側）… p 面の内側から m 面の内側へ 700mm 付近で、底版上面から下面へ約 50mm のひび割れが発生した。p 面の内側から m 面の内側へ 800mm 付近の底版下面から、m 面の内側へ 700mm 付近の上面へ約 50mm のひび割れが斜めに発生した。p 面の内側から m 面の内側へ 900mm 付近で、底版上面から下面へ約 150mm のひび割れが発生した。・頂版 a 面…

	<p>p 面側の底版上面から頂版側へ 3700mm 上方付近で, 頂版の内側から外側へ約 150mm のひび割れが発生した.</p> <p>p 面側の底版上面から頂版側へ 3900mm 上方付近で, 頂版の内側から外側へ約 150mm のひび割れが発生した.</p> <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 3700mm 上方付近で, 頂版の内側から外側へ約 150mm のひび割れが発生した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ a 面 (側壁 m 側) … <p>底版上面から頂版側へ 650mm 上方付近で, m 面の外側から内側へ約 150mm のひび割れが発生した.</p> <p>底版上面から頂版側へ 1050mm 上方付近で, m 面の外側から内側へ約 150mm のひび割れが発生した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 底版 (m 側・内) … <p>m 面側から p 面側へ 600mm 付近で, 底版下面から上面へかけてひび割れが横断した.</p> <p>m 面側から p 面側へ 800mm 付近で, 底版下面から上面へかけてひび割れが横断した.</p> <p>m 面側から p 面側へ 1100mm 付近で, 底版下面から上面へかけてひび割れが横断した.</p> <p>m 面側から p 面側へ 1400mm 付近の底版上面から, p 面側へ 2100mm 付近の底版下面へかけてひび割れが斜めに横断した.</p> <p>m 面側から p 面側へ 1700mm 付近の底版上面から, p 面側へ 1900mm 付近の底版下面へ約 600mm のひび割れが斜めに発生した.</p> <p>m 面側から p 面側へ 2100mm 付近の底版下面から, 上面へかけてひび割れが枝分かれに発生した.</p> <p>p 面側から m 面側へ 800mm 付近で, 底版下面から上面へかけてひび割れが横断した.</p> <p>p 面側から m 面側へ 1000mm 付近で, 底版下面から上面へかけてひび割れが横断した.</p> <p>p 面側から m 面側へ 1100mm 付近で, 底版下面から上面へ約 700mm のひび割れが発生した.</p> <p>p 面側から m 面側へ 1500mm 付近で, 底版下面から上面へ約 700mm のひび割れが発生した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 頂版 (内) … <p>p 面側の底版下面から頂版側へ 3800mm 上方付近で, 頂版の下面から上面へかけてひび割れが横断した.</p> <p>p 面側の底版下面から頂版側へ 3950mm 上方付近の頂版の下面から, 頂版側へ</p>
--	--

	<p>4000mm 上方付近の上面へかけてひび割れが斜めに横断した。</p> <p>m 面側の底版下面から頂版側へ 3600mm 上方付近で, 頂版の下面から上面へかけてひび割れが横断した。</p> <p>m 面側の底版下面から頂版側へ 4000mm 上方付近の頂版の下面から, 頂版側へ 4050mm 上方付近の上面へかけてひび割れが斜めに横断した。</p> <p>・ p 面 (側壁・外) …</p> <p>底版上面から頂版側へ 150mm 上方付近で, p 面の下面から 150mm 上方付近に約 650mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 300mm 上方付近で, p 面の下面から 150mm 上方付近に約 350mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 500mm 上方付近で, p 面の下面から 100mm 上方付近に約 300mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 600mm 上方付近で, p 面の下面から 100mm 上方付近に約 300mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 600mm 上方付近の p 面の下面から 250mm 上方付近で, 約 150mm のひび割れが頂版側へ 550mm 上方付近の上面側へ斜めに発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 800mm 上方付近の p 面の下面から, 頂版側へ 700mm 上方付近の上面側へかけて斜めに横断した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 1100mm 上方付近の p 面の下面から, 頂版側へ 1000mm 上方付近の上面側へかけて斜めに, 枝分かれしながら横断した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 1250mm 上方付近で, p 面の下面から上面へかけてひび割れが横断した。</p> <p>・ m 面 (側壁・外) …</p> <p>底版上面から頂版側へ 150mm 上方付近で, m 面の下面から 100mm 上方付近に約 650mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 200mm 上方付近で, m 面の下面から約 800mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 500mm 上方付近で, m 面の下面から約 700mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 650mm 上方付近で, m 面の下面から約 400mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 650mm 上方付近で, m 面の上面から約 400mm のひび割れが下面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 800mm 上方付近で, m 面の下面から約 500mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 800mm 上方付近で, m 面の上面から約 350mm のひび割</p>
--	--

	<p>れが下面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 950mm 上方付近で, m 面の下面から約 850mm のひび割れが下面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 950mm 上方付近で, m 面の下面から 400mm 上方付近に約 600mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 1000mm 上方付近で, m 面下面から 200mm 上方付近に約 400mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 1000mm 上方付近で, m 面下面から 200mm 上方付近に約 400mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ m 面 (アーチ部・外) … <p>底版上面から頂版側へ 1800mm 上方付近で, m 面の下面から 200mm 上方付近に約 150mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 1800mm 上方付近で, m 面の下面から 500mm 上方付近に約 250mm のひび割れが上面側へ発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 底版 (b 面 m 側) … <p>m 面側から p 面側へ 1100mm 付近で, 底版上面から下面へ約 50mm のひび割れが発生した。</p> <p>m 面側から p 面側へ 1800mm 付近で, 底版上面から下面へ約 50mm のひび割れが発生した。</p> <p>m 面側から p 面側へ 2100mm 付近の底版上面から, p 面側へ 2200mm 付近の底版下面へ, 約 80mm のひび割れが斜めに発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 底版 (b 面中央) … <p>底版中央付近の底版下面付近から上面へひび割れが枝割れするように発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 底版 (b 面 p 側) … <p>p 面側から m 面側へ 700mm 付近の底版上面から, m 面側へ 800mm 付近の下面へ約 100mm のひび割れが斜めに発生した。</p>
--	---



場所打ちアーチカルバートひび割れ損傷図(初期軸力導入後)

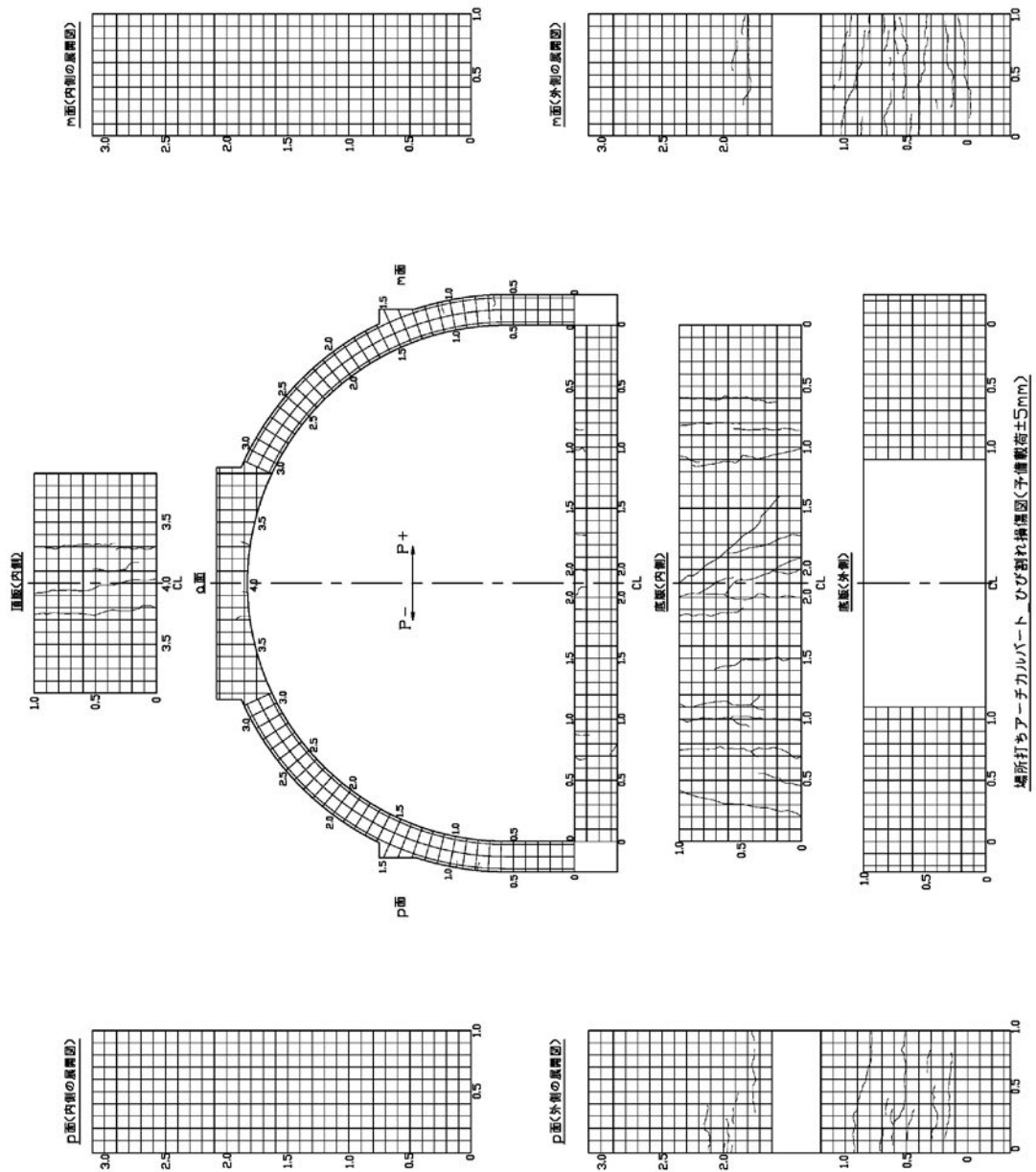
付属 図-1.1 場所打ちアーチ損傷図 (初期軸力導入後)

2) 予備載荷

加振機 入力変位	損 傷 状 況
<p>予備載荷① ±1mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・底版（中央・内）… p 面側から m 側へ 1600mm 付近に, 底版の下面から 300mm 上方で約 300mm のひび割れが発生した. p 面側から m 側へ 1700mm 付近に, 底版の上面から 200mm 下方で約 150mm のひび割れが下面へ斜めに発生した. ・頂版（内）… m 面側の底版下面から頂版側へ 3800mm 上方付近で, 頂版の上面から下面へかけて約 300mm のひび割れが発生した. ・p 面（側壁・外）… 底版上面から頂版側へ 50mm 上方付近で, p 面の上面から下面へ約 150mm のひび割れが発生した. 底版上面から頂版側へ 50mm 上方付近で, p 面の上面から 300mm 下方付近で, 下面へ約 250mm のひび割れが発生した. 底版上面から頂版側へ 50mm 上方付近で, p 面の下面から 100mm 下方付近で, 上面へ約 150mm のひび割れが発生した. ・p 面（アーチ部・外）… 底版上面から頂版側へ 2000mm 上方付近で, p 面の下面から上面へ約 500mm のひび割れが斜めに発生した. ・m 面（側壁・外）… 底版上面から頂版側へ 120mm 上方付近で, m 面の上面から約 150mm のひび割れが下面側へ発生した.
<p>予備載荷② ±2mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・底版（p 側・内）… p 面側から m 面側へ 500mm 付近の底版上面から, m 面側へ 600mm 付近の底版上面から 300mm 下方にかけてひび割れが斜めに発生した. ・底版（中央・内）… p 面側から m 面側へ 1700mm 付近で, 底版下面から上面へ約 300mm のひび割れが発生した. p 面側から m 面側へ 1700mm 付近で, 底版下面から 350mm 上方で, 約 200mm のひび割れが上面側へ発生した. p 面側から m 面側へ 1450mm 付近の底版上面から, m 面側へ 1550mm 付近の底版上面から 300mm 下方にかけてひび割れが斜めに発生した. ・底版（m 側・内）… m 面側から p 面側へ 1000mm 付近で, 底版下面から上面へ約 500mm のひび割れ

	<p>が発生した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・頂版（内）… <p>m側の底版上面から頂版側へ3800mm上方付近で、頂版の下面から600mmの上方で約100mmのひび割れが発生した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・p面（側壁・外）… <p>底版上面から頂版側へ50mm上方付近で、p面の下面から約400mmのひび割れが上面側へ発生した.</p> <p>底版上面から頂版側へ1500mm上方付近で、p面の下面から300mm上方付近で約200mmのひび割れが発生した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・m面（側壁・外）… <p>底版上面とm面の側壁の接合付近で、m面の下面から上面へひび割れが横断した.</p> <p>底版上面から頂版側へ100mm上方付近で、m面の上面から100mm下方付近に約150mmのひび割れが下面側へ発生した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・b面（アーチ部p側）… <p>p側の底版上面から頂版側へ1110mm上方付近で、p面の外側から内側へ約100mmのひび割れが発生した.</p> <p>p側の底版上面から頂版側へ1250mm上方付近で、p面の外側から内側へ約50mmのひび割れが発生した.</p>
<p>予備載荷③ ±3mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・底版（m側・内）… <p>m面側からp面側へ1000mm付近で、底版下面の500mm上方付近から650mm上方付近にかけてひび割れが進展した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・p面（側壁・外）… <p>底版上面から頂版側へ50mm上方付近で、m面の上面より350mm下方付近から550mm下方付近にかけて、枝分かれするようにひび割れが発生した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・m面（側壁・外）… <p>底版上面から頂版側へ200mm上方付近で、m面の上面から約150mmのひび割れが下面側へ発生した.</p>
<p>予備載荷④ ±4mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・p面（側壁・外）… <p>底版上面とp面の接合付近に、p面上面より100mm下方付近から200mm下方付近までひび割れが進展した.</p> <p>底版上面から頂版側へ200mm上方付近で、p面上面より200mm下方付近から450mm下方付近までひび割れが進展した.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・p面（アーチ部・外）… <p>p面側の底版上面から頂版側へ1950mm上方付近で、p面上面より100mm下方から約150mmのひび割れが下方へ発生した.</p>

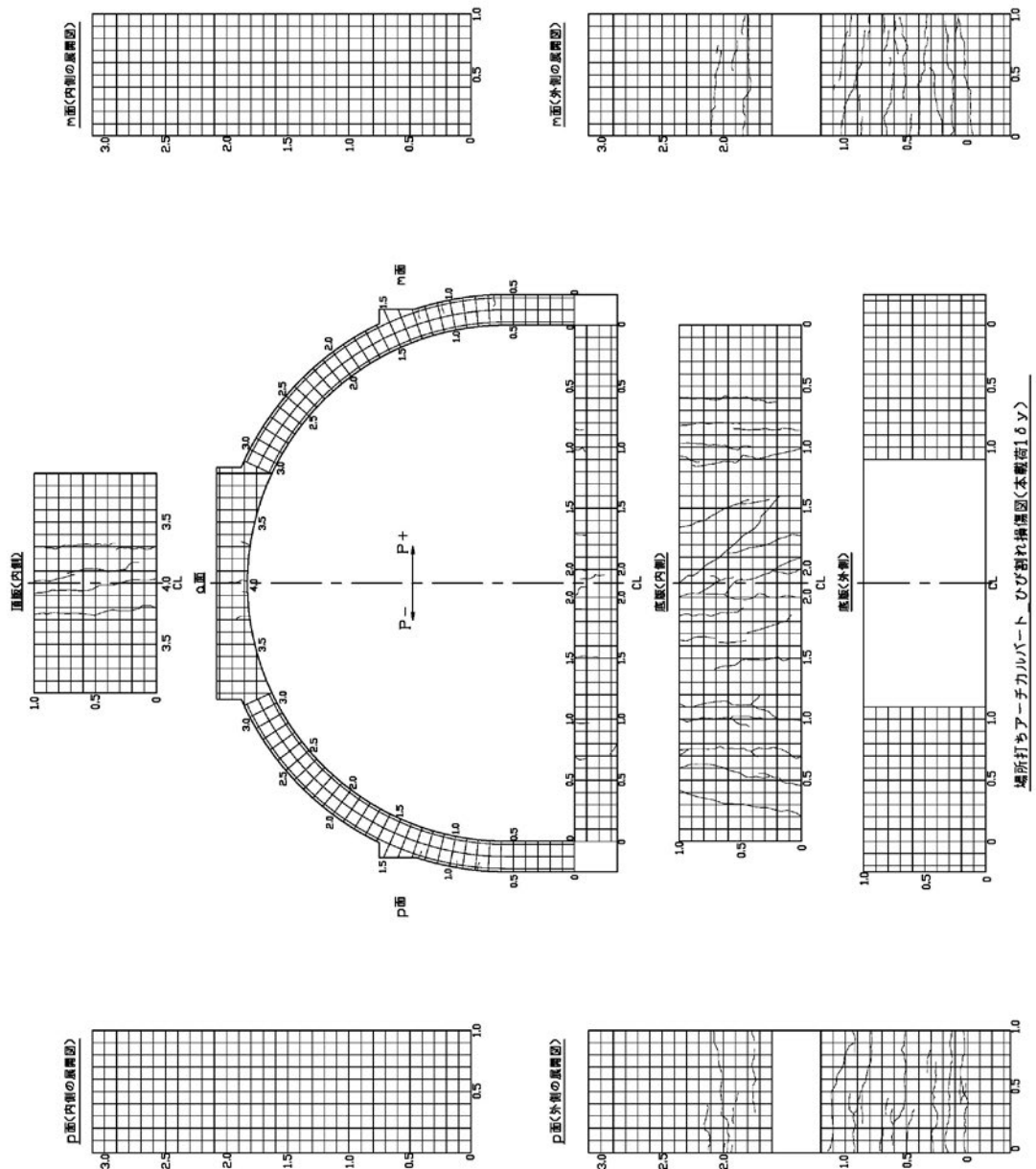
	<p>p 面側の底版上面から頂版へ2000mm 上方付近で、p 面上面から下面へ約 700mm のひび割れが発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ m 面（側壁・外） … <p>底版上面から頂版側へ 200mm 上方付近で、 m 面の上面から下面へ約 200mm のひび割れに進展した。</p>
<p>予備載荷⑤ ±5mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 底版（p 側・内） … <p>p 面側から m 面側へ 300mm 付近で、底版下面から上面へひび割れが横断した。</p> <p>p 面側から m 面側へ 1000mm 付近で、底版上面から 300mm 下方付近へ斜めにひび割れが発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ p 面（側壁・外） … <p>p 面側の底版上面と p 面の接合付近に、p 面の上面より 350mm 下方から 450mm 下方にかけてひび割れが発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ p 面（アーチ部・外） … <p>p 面側の底版上面から頂版側へ 1950mm 上方付近で、 m 面の下面より約 300mm ひび割れが下方へ発生した。</p> <p>p 面側の底版上面から頂版側へ 2100mm 上方付近で、 m 面の下面より約 400mm ひび割れが下方へ発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ m 面（アーチ部・外） … <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 1800mm 上方付近で、 m 面の上面より 350mm 下方から 550mm 下方にかけてひび割れが進展した。</p> <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 1800mm 上方付近で、 m 面の下面より 300mm 下方から下面にかけてひび割れが進展した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ m 面（側壁・外） … <p>底版上面から頂版側へ 250mm 上方付近で、 m 面の上面より 300mm 下方から 400mm 下方にかけてひび割れが進展した。</p> <p>底版上面から頂版側へ 700mm 上方付近で、 m 面の上面より 300mm 下方から 400mm 下方にかけてひび割れが斜めに進展した。</p>



付属 図-1.2 場所打ちアーチ損傷図（予備載荷±5mm）

3) $1 \delta y$ ($\pm 6\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$\pm 6\text{mm}$ ($1 \delta y$)	<ul style="list-style-type: none"> ・底版 (a 面・中央) p 面の内側から m 面の内側へ 1500mm 付近で、底版の上面から下面へ約 200mm のひび割れが発生した。 ・底版 (b 面・中央) 底版 b 面の中付近で、底版の上面から約 350mm のひび割れが斜めに発生した。 ・b 面 (側壁・p 側) p 面側の底版上面から頂版へ 50mm 上方付近で、p 面の外側から内側へかけて約 200mm のひび割れが発生した。 ・b 面 (アーチ部・p 側) p 面側の底版上面から頂版へ 1050mm 上方付近で、p 面の外側から内側へかけて約 100mm のひび割れが発生した。 ・b 面 (側壁・m 側) m 面側の底版上面と m 面の接合付近に、m 面の外側から内側へかけてひび割れが横断した。 m 面側の底版上面から頂版へ 50mm 上方付近で、m 面の外側から内側へかけて約 200mm のひび割れが発生した。

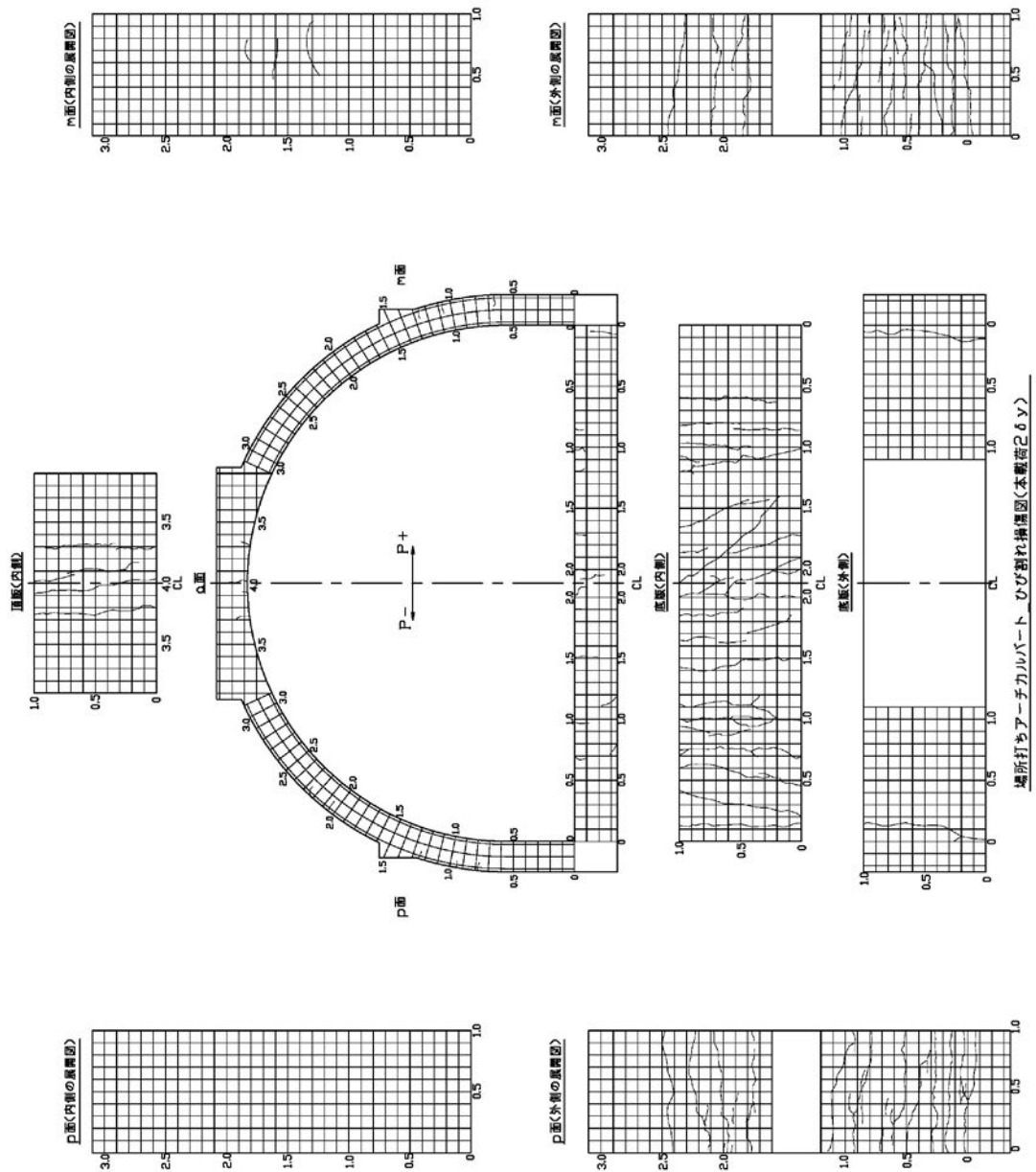


付属 図-1.3 場所打ちアーチ損傷図 (1δy)

4) $2\delta y$ ($\pm 12\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$\pm 12\text{mm}$ ($2\delta y$)	<ul style="list-style-type: none"> ・ a 面 (アーチ部・p 側) … p 面側の底版上面から頂版へ 2050mm 上方付近で, p 面アーチ部の外側から内側へ約 100mm のひび割れが発生した. ・ 底版 (p 側・内) … p 面側から m 面側へ 950mm 付近で, 底版上面から 600mm 下方にかけてひび割れが発生した. p 面側から m 面側へ 1100mm 付近で, 底版上面から下端にかけてひび割れが横断した. ・ 底版 (m 側・内) … m 面側から p 面側へ 1200mm 付近で, 底版上面から 100mm 下方にかけてひび割れが発生した. ・ m 面 (側壁・内) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1300mm 上方付近で, m 面上面より 50mm 下方から 500mm 下方にかけて斜めにひび割れが発生した. m 面側の底版上面から頂版側へ 1600mm 上方付近で, m 面上面より 250mm 下方から 500mm 下方にかけて斜めにひび割れが発生した. ・ p 面 (側壁・外) … p 面側の底版上面から下面側へ 100mm 付近で, p 面の上面から下面へ約 650mm のひび割れが発生した. p 面側の底版上面から頂版側へ 250mm 付近で, p 面の上面から下面へ約 150mm のひび割れが進展した. ・ p 面 (アーチ部・外) … p 面側の底版上面から頂版側へ 1750mm 付近で, p 面の上面から下面へ約 200mm のひび割れが進展した. ・ m 面 (側壁・外) … M 面側の底版上面から頂版側へ 500mm 上方付近で, m 面の下面より 100mm 上方から 150mm 上方にかけてひび割れが進展した. ・ m 面 (アーチ部・外) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1800mm 上方付近で, m 面の下面から 100mm 上方にかけてひび割れが進展した. m 面側の底版上面から頂版側へ 2100mm 上方付近で, m 面の下面から 200mm 上方にかけてひび割れが進展した. m 面側の底版上面から頂版側へ 2300mm 上方付近の m 面の下面から, 2500mm

	<p>上方付近の m 面の上面にかけてひび割れが斜めに発生した.</p> <ul style="list-style-type: none">・底版(p 面・外) … <p>p 面の内側から m 面の内側へ 0mm 付近から 200mm 付近にかけて, 底版の下面から上面へひび割れが斜めに横断した.</p> <ul style="list-style-type: none">・底版(m 面・外) … <p>m 面の内側から p 面の内側へ 50mm 付近から 1100mm 付近にかけて, 底版の上面から下面へひび割れが斜めに横断した.</p>
--	--

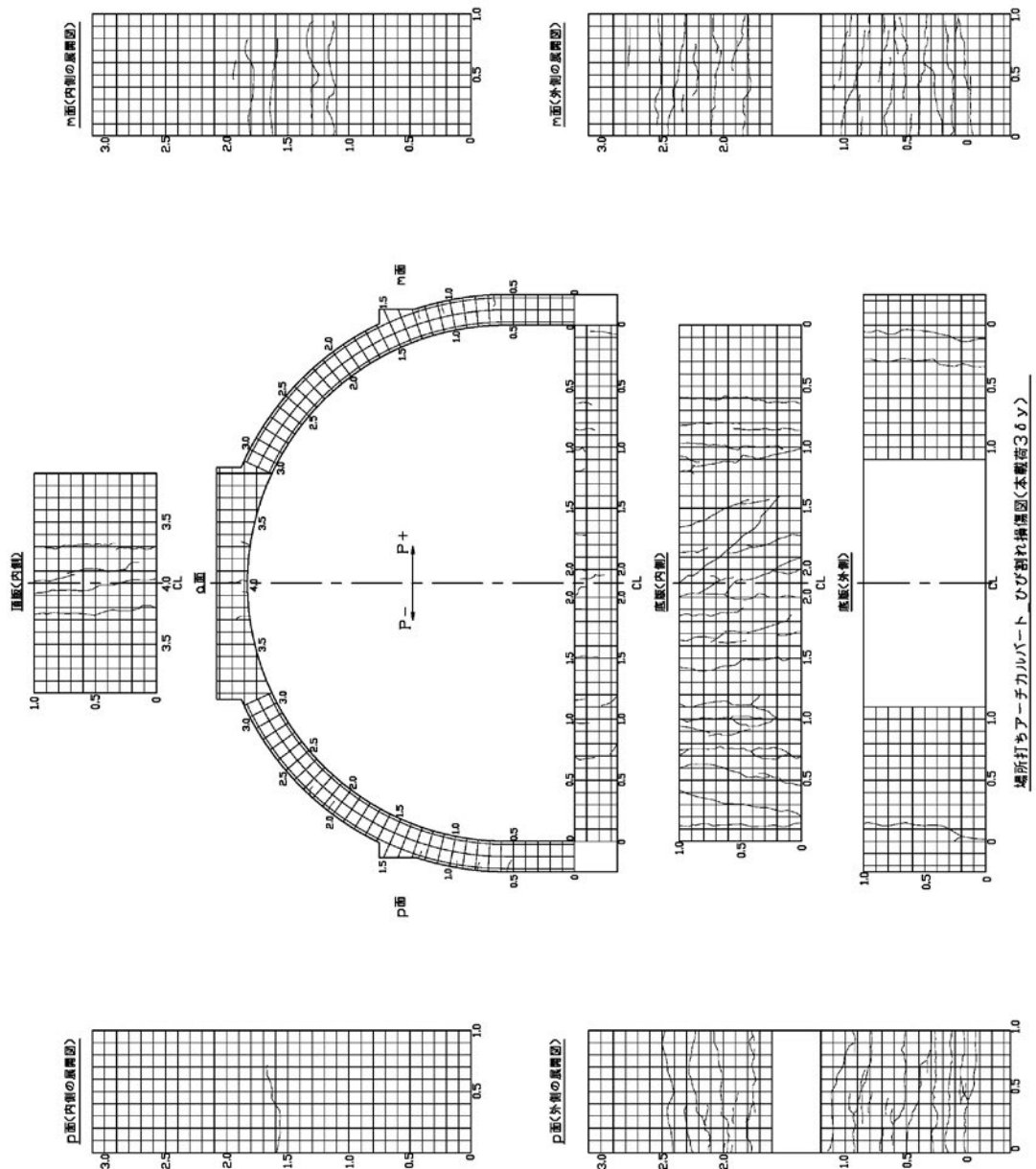


付属 図-1.4 場所打ちアーチ損傷図 (2 δy)

5) $3\delta y$ ($\pm 18\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$\pm 18\text{mm}$ ($3\delta y$)	<ul style="list-style-type: none"> ・底版 (a 面 m 側) m 面側から p 面側へ 600mm に, 上面から下面へ約 150mm のひび割れが発生した. ・底版 (中央・内) … p 面側から m 側へ 1700mm 付近に, 下面から 200mm 下方にかけてひび割れが発生した. p 面側から m 側へ 1700mm 付近に, 下面から 400mm 下方にかけてひび割れが発生した. ・p 面 (側壁・内) … p 面側の底版上面から頂版側へ 1500mm 付近に, 上方から 700mm 下方にかけてひび割れが発生した. ・m 面 (側壁・内) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1150mm 付近に, 下面から上方 500mm 付近にかけてひび割れが発生した. m 面側の底版上面から頂版側へ 1300mm 付近に, 下面から上方 500mm 付近にかけてひび割れが発生した. m 面側の底版上面から頂版側へ 1600mm 付近に, 下面から上方 500mm 付近にかけてひび割れが発生した. m 面側の底版上面から頂版側へ 1800mm 付近に, 下面より 200mm 上方付近から 700mm 上方付近にかけて, ひび割れが発生した. ・p 面 (アーチ部・外) … p 面側の底版上面から頂版側へ 2600mm 付近に, 下面から上面へかけてひび割れが横断した. ・m 面 (側壁・外) … 底版上面と m 面の接合付近のひび割れ幅が 0.75mm に広がった. ひび割れの新たな発生に進展は無かった. ・底版 (m 面・外) … m 側の内側から p 面側の内側へ 1800mm 付近に, 下面より 400mm 上方付近から 700mm 上方付近にかけて, ひび割れが発生した. m 側の内側から p 面側の内側へ 2200mm 付近に, 下面より 350mm 上方付近から 750mm 上方付近にかけて, ひび割れが斜めに発生した. m 側の内側から p 面側の内側へ 2800mm 付近に, 下面より 150mm 上方付近から 450mm 上方付近にかけて, ひび割れが発生した.

	<p>・b面（アーチ部・p面側）</p> <p>p面側の底版上面から頂版側へ1650mm上方付近に、下面から上面へひび割れが横断した。</p> <p>p面側の底版上面から頂版側へ1750mm上方付近に、下面から上面へひび割れが横断した。</p> <p>p面側の底版上面から頂版側へ2450mm上方付近に、下面から上面へひび割れが横断した。</p> <p>・b面（アーチ部・m面側）</p> <p>m面側の底版上面から頂版側へ2000mm上方付近に、下面から上面側へ約100mmのひび割れが発生した。</p> <p>m面側の底版上面から頂版側へ2300mm上方付近に、下面から上面側へ約100mmのひび割れが発生した。</p>
--	--



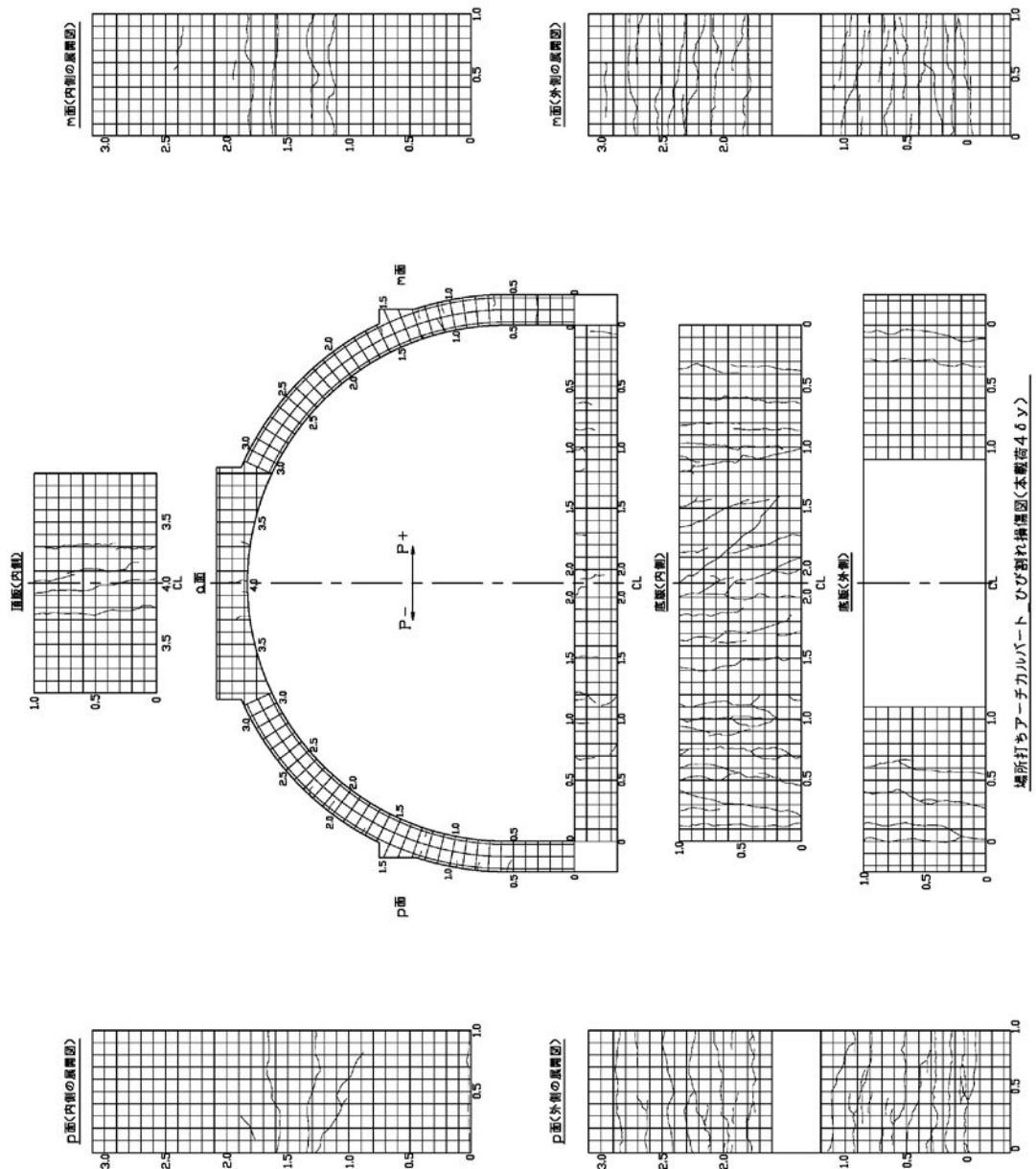
場所打ちアーチカルバートひび割れ損傷図(本橋3 δy)

付属 図-1.5 場所打ちアーチ損傷図 (3 δy)

6) $4\delta y$ ($\pm 24\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$\pm 24\text{mm}$ ($4\delta y$)	<ul style="list-style-type: none"> ・ a 面 (側壁・p 側) … 底版上面と p 側の側壁の接合部にひび割れが横断した. ・ 底版 (m 側・内) … m 面の内側から p 面の内側へ 350mm 付近で, 下面から 400mm 上方付近にかけてひび割れが発生した. ・ p 面 (側壁・内) … 底版上面と p 面の内側の接合部に, 上面から下面へひび割れが横断した. p 面側の底版上面から頂版側へ 900mm 付近の下面より 200mm 上方付近から, 頂版側へ 1250mm 付近の上面にかけてひび割れが斜めに発生した. ・ m 面 (アーチ部・内) … m 面側の底版上面から頂版側へ 2400mm 付近で, 下面より 600mm 上方付近から 850mm 上方付近にかけてひび割れが発生した. ・ p 面 (側壁・外) … p 面側の底版上面から頂版側へ 300mm 付近で, 下面より 100mm 上方付近から下面にかけてひび割れが枝分かれするように進展した. ・ p 面 (アーチ部・外) … p 面側の底版上面から頂版側へ 2600mm 付近で, 下面から 450mm 上方付近にかけてひび割れが発生した. ・ p 面 (側壁・外) … p 面側の底版上面から頂版側へ 2700mm 付近で, 下面より 350mm 上方付近から上面にかけてひび割れが発生した. ・ p 面 (アーチ部・外) … p 面側の底版上面から頂版側へ 2850mm 付近で, 下面から上面にかけてひび割れが横断した. ・ m 面 (側壁・外) … 底版上面と m 面の接合付近のひび割れ幅が約 0.75mm から約 1.2mm に広がった. ひび割れの新たな発生に進展は無かった. ・ m 面 (アーチ部・外) … m 面側の底版上面から頂版へ 1600mm 付近で, 下面より 200mm 上方付近から 450mm 上方付近にかけてひび割れが発生した. ・ m 面 (側壁・外) … m 面側の底版上面から頂版へ 2250mm 付近の上面より 100mm 下方付近から, 頂版へ 2400mm 付近の上面より 350mm 下方付近にかけてひび割れが斜めに発生した. ・ m 面 (アーチ部・外) … m 面側の底版上面から頂版へ 2700mm 付近で, 下面より 400mm 上方付近から 800mm 上方付近にかけてひび割れが発生した.

	<p>m 面側の底版上面から頂版へ 2900mm 付近で、下面より 450mm 上方付近から 800mm 上方付近にかけてひび割れが発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・底版(b 面 p 側) … <p>m 面の内側から p 面の内側へ 200mm 付近で、上面から下面へひび割れが横断した。</p> <p>m 面の内側から p 面の内側へ 500mm 付近で、上面から下面へひび割れが横断した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・底版(b 面 m 側) … <p>底版上面と m 側の側壁の接合部にひび割れが横断した。</p> <p>m 面の内側から p 面の内側へ 400mm 付近で、上面から下面側へ約 200mm のひび割れが発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・b 面 (アーチ部・m 面側) <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 2500mm 付近で、上面から下面側へ約 200mm のひび割れが発生した。</p>
--	---



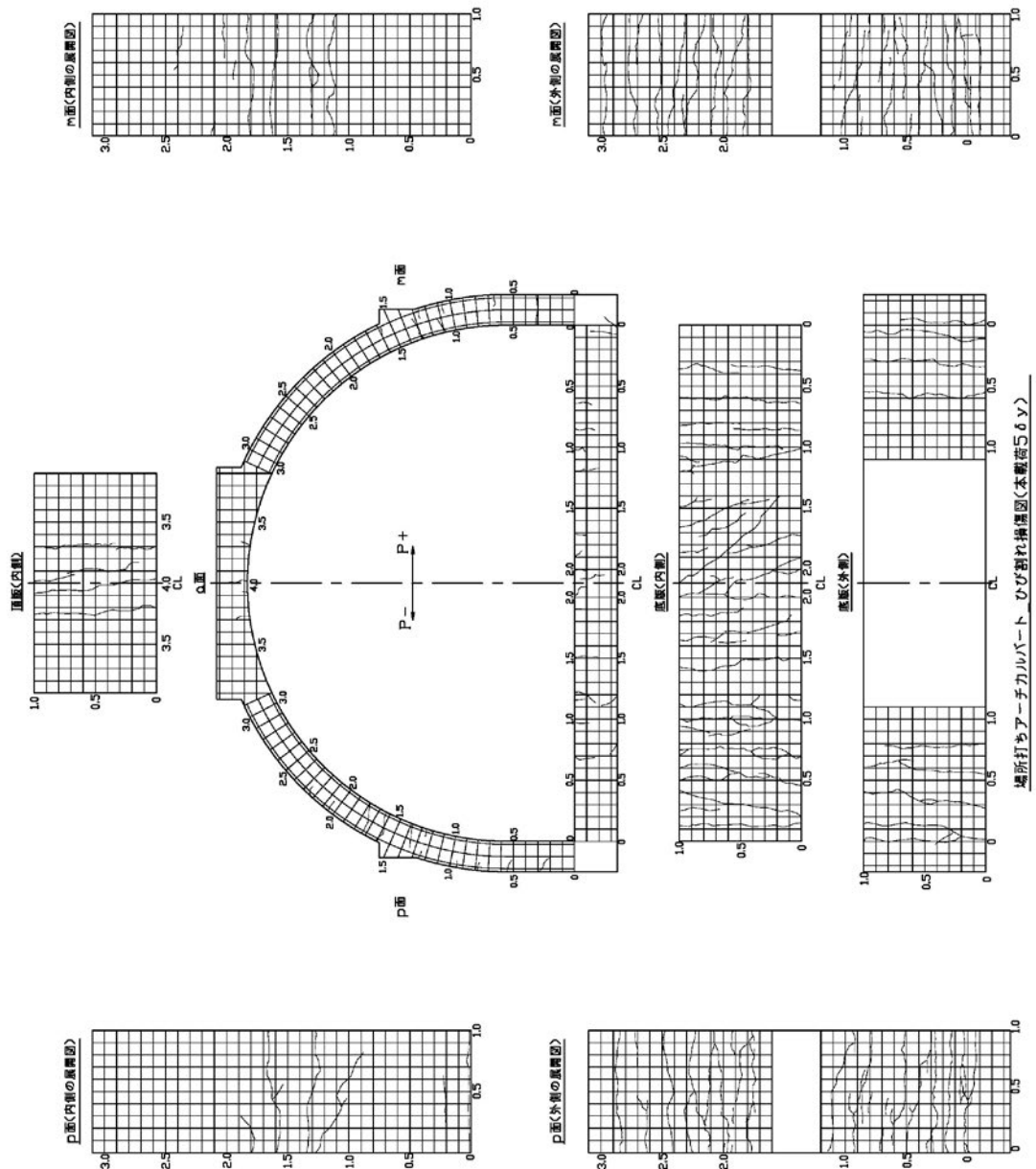
場所打ちアーチカルバート ひび割れ損傷図(本観測4.6y)

付属 図-1.6 場所打ちアーチ損傷図 (4δy)

7) $5\delta y$ ($\pm 30\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
<p>$\pm 30\text{mm}$ ($5\delta y$)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ a 面 (側壁・m 側) … m 面と底版の隅角部において、m 面の外側から内側へかけてひび割れが斜めに発生した。 ・ p 面 (側壁・内) … p 面側の底版上面から頂版側へ 1500mm に発生したひび割れのひび割れ幅が約 0.30mm であった。 p 面側の底版上面から頂版側へ 2000mm 付近で、下面より 450mm から 700mm 上方にかけてひび割れが発生した。 ・ m 面 (側壁・内) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1500mm に発生したひび割れのひび割れ幅が約 0.45mm であった。 ・ p 面 (側壁・外) … p 面側の底版上面から頂版側へ 50mm 付近で、下面から 80mm 上方付近にかけてコンクリート表面が剥離した。 p 面側の底版上面から頂版側へ 300mm 付近で、下面から 120mm 上方付近にかけてコンクリート表面が剥離した。 ・ p 面 (アーチ部・外) … p 面側の底版上面から頂版側へ 1600mm 付近で、下面より 150mm 上方付近から 250mm 上方付近にかけてコンクリート表面が剥離した。 p 面側の底版上面から頂版側へ 2100mm 付近で、下面より 450mm 上方付近から 950mm 上方付近にかけてひび割れが進展した。 ・ m 面 (アーチ部・外) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1600mm 付近で、ひび割れが横断した。 m 面側の底版上面から頂版側へ 1650mm 付近で、下面から 300mm 上方付近にかけてひび割れが発生した。 m 面側の底版上面から頂版側へ 2900mm 付近で、下面から 450mm 上方付近にかけてひび割れが発生した。 m 面側の底版上面から頂版側へ 2900mm 付近で、上面から 200mm 下方付近にかけてひび割れが発生した。 ・ m 面 (側壁・外) … m 面側の底版上面から下面側へ 150mm 付近で、上面から下面へひび割れが横断した。 ・ 底版 (b 面 m 側) …

	<p>m 面と底版の隅角部において、m 面の外側から内側へかけてひび割れが斜めに発生した。</p> <ul style="list-style-type: none">・ b 面（アーチ部・m 面側） … <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 1200mm 付近で、ひび割れが横断した。</p> <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 1400mm 付近で、ひび割れが横断した。</p> <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 1800mm 付近で、ひび割れが横断した。</p> <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 2200mm 付近で、ひび割れが横断した。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 底版（m 側・外） … <p>m 面の内側から外側へ 50mm 付近で、下面から 750mm 上面付近にかけてひび割れが発生した。</p>
--	--

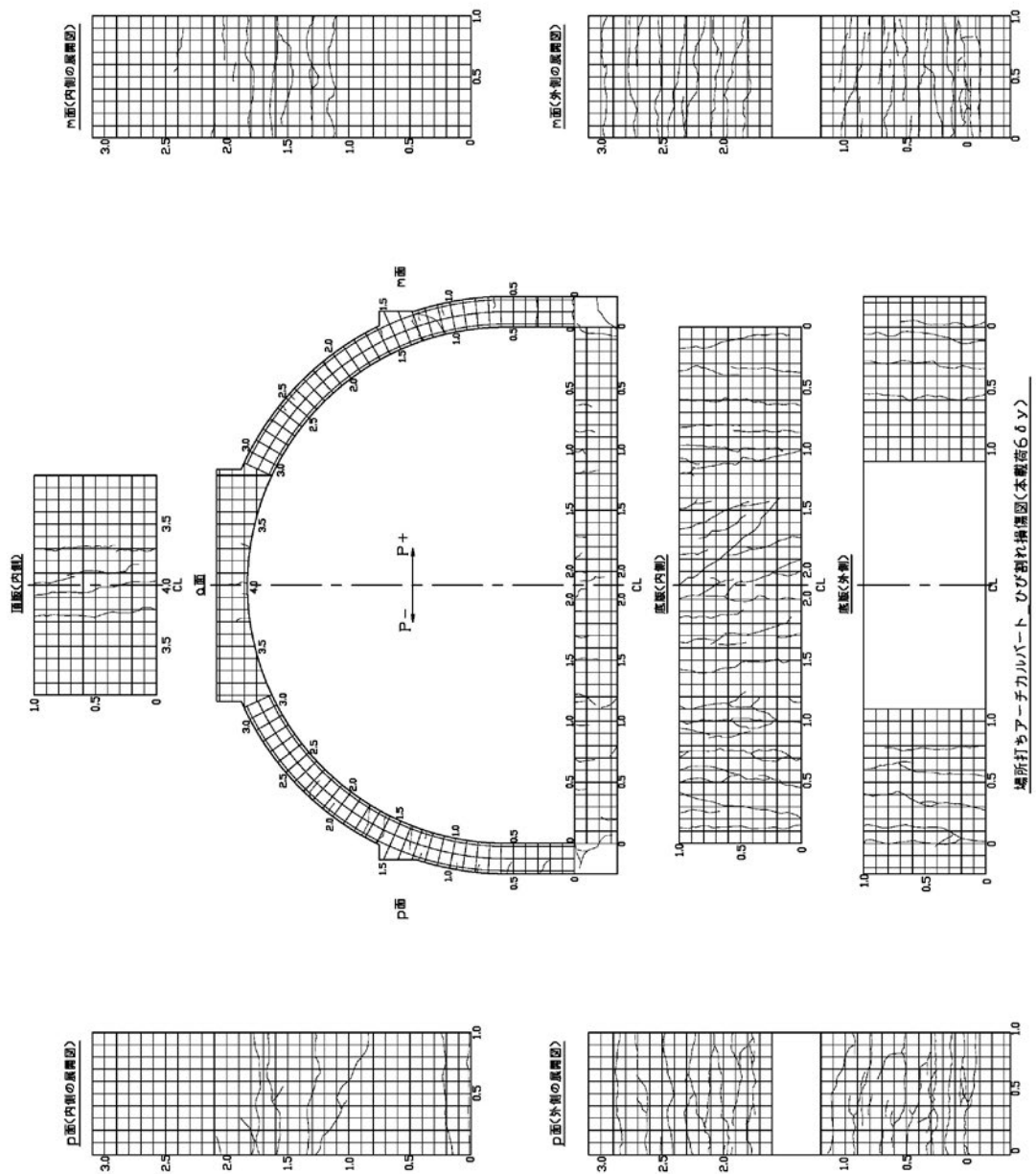


場所打ちアーチカルバートひび割れ損傷図(本幅 $5\delta y$)

付属 図-1.7 場所打ちアーチ損傷図 ($5\delta y$)

8) $6\delta y$ ($\pm 36\text{mm}$)

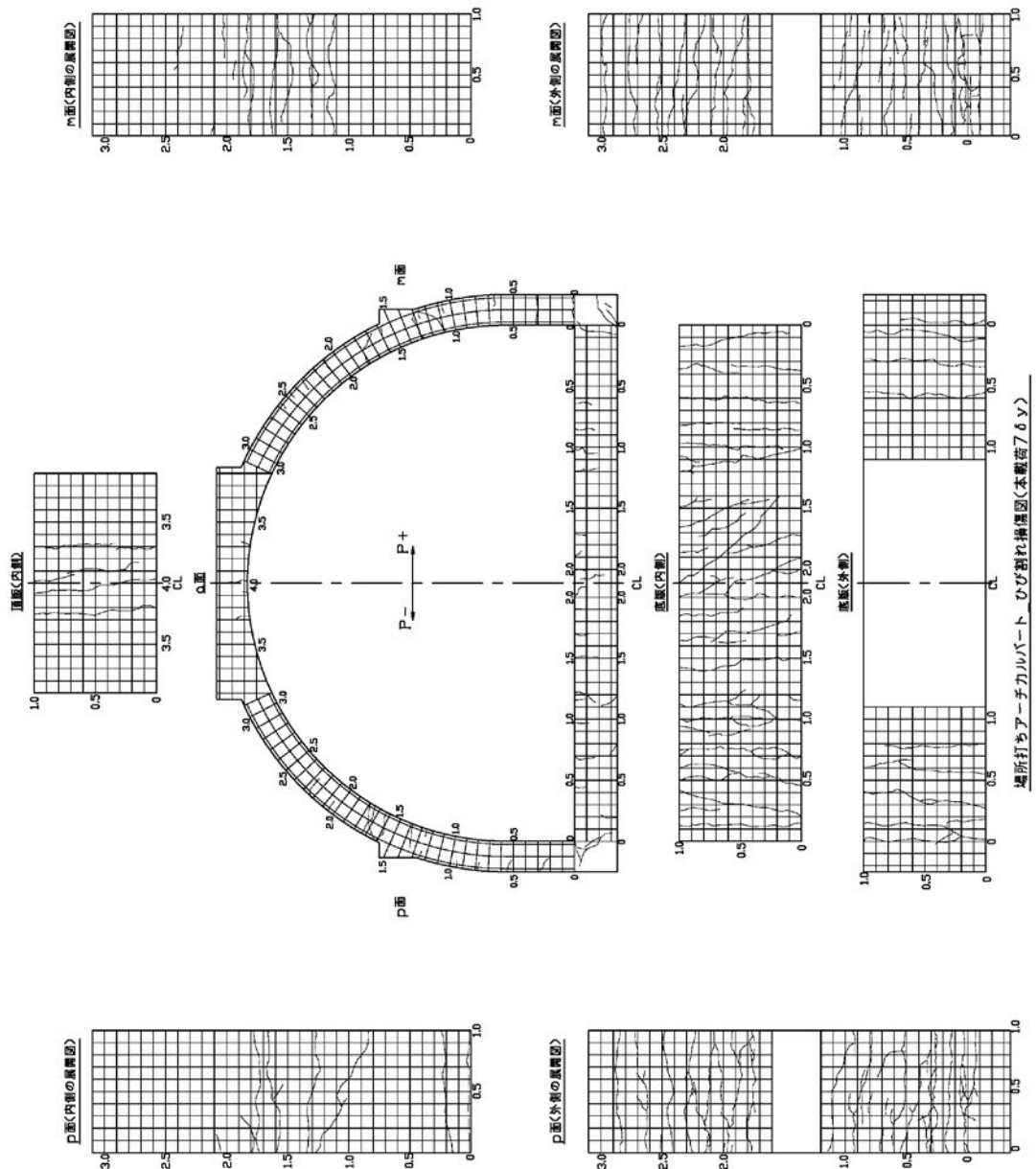
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$\pm 36\text{mm}$ ($6\delta y$)	<ul style="list-style-type: none"> ・ a 面 (側壁・m 側) … <p>m 面と底版の隅角部付近において、底版上面から m 面の内側より p 面の内側へ 50mm 付近の下面にかけてひび割れが斜めに発生した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ p 面 (側壁・内) … <p>p 面側の底版上面から頂版側へ 1700mm 付近で、ひび割れが横断した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ m 面 (側壁・内) … <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 1500mm に発生したひび割れのひび割れ幅が 0.45mm から 0.75mm となった。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ m 面 (側壁・外) … <p>底版上面と m 面の接合付近のひび割れ幅が約 1.2mm から約 2.0mm に広がった。 底版上面と m 面の接合付近で、下面より 150mm 上方付近のコンクリート表面が剥落した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 底版 (b 面 m 側) … <p>b 面と m 面の隅角部において、m 面の外側から内側に斜めに発生したひび割れの中央付近のコンクリート表面が剥落した。</p>



付属 図-1.8 場所打ちアーチ損傷図 ($6\delta y$)

9) $7\delta y$ ($\pm 42\text{mm}$)

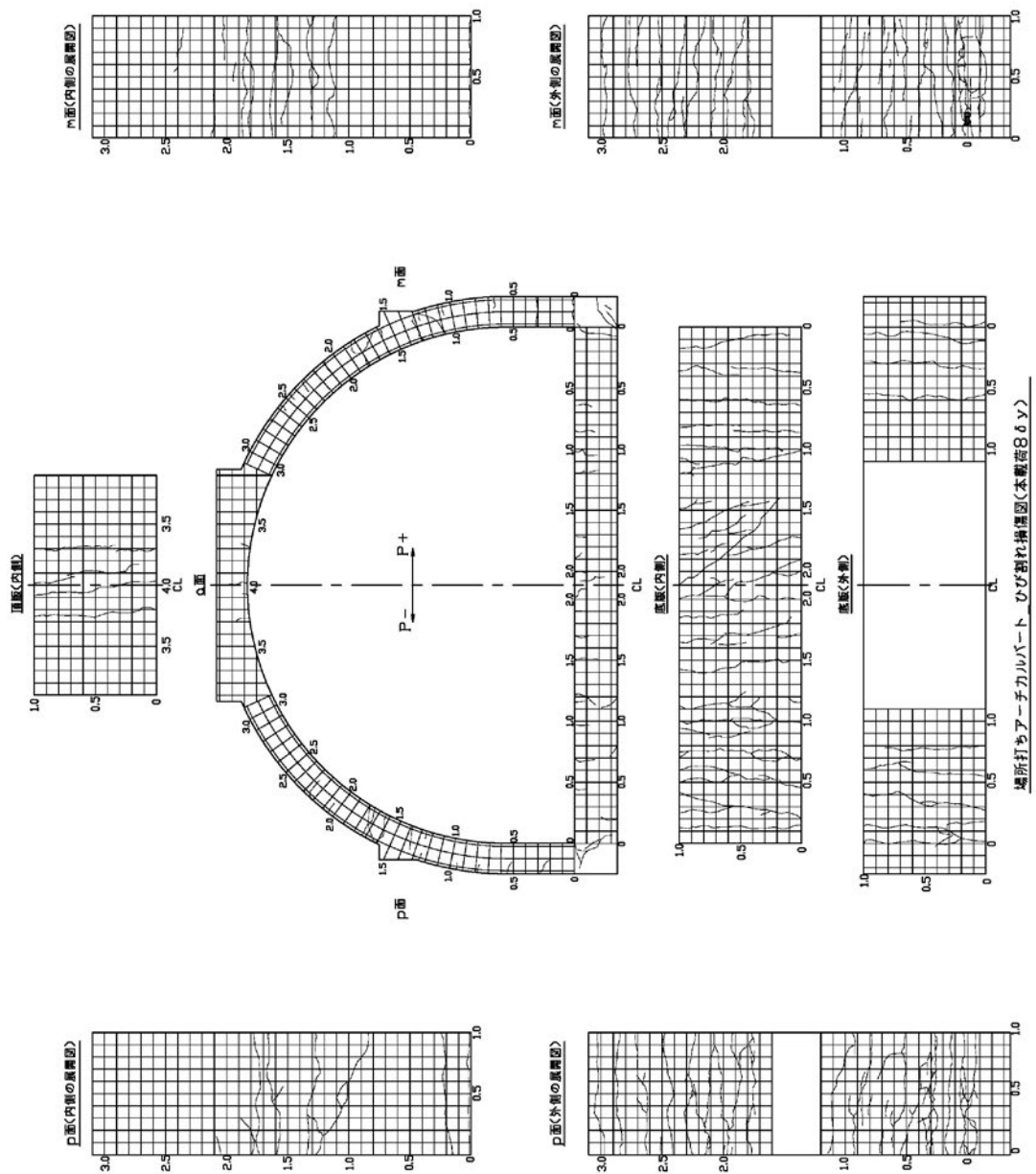
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$\pm 42\text{mm}$ ($7\delta y$)	<ul style="list-style-type: none"> ・ p 面（側壁・内）… p 面側の底版上面から頂版側へ 1650mm 付近で、下面より 350mm 上方付近に発生したひび割れのひび割れ幅が約 0.55mm となった. ・ m 面（側壁・内）… m 面側の底版上面から頂版側へ 1650mm 付近に発生したひび割れのひび割れ幅が約 1.0mm となった. m 面側の底版上面から頂版側へ 1800mm 付近で、下面より 250mm から 550mm 上方にかけてひび割れが発生した. ・ m 面（側壁・外）… 底版上面と m 面の接合付近のひび割れ幅が約 2.0mm から約 5.0mm に広がった. 底版上面と m 面の接合付近において、剥落したコンクリート表面範囲が広がった. 底版上面と m 面の接合付近で、上面より 200mm 上方付近から 450mm 上方付近にかけてコンクリート表面が剥落した.



付属 図-1.9 場所打ちアーチ損傷図 ($7\delta y$)

10) $8\delta y$ ($\pm 48\text{mm}$)

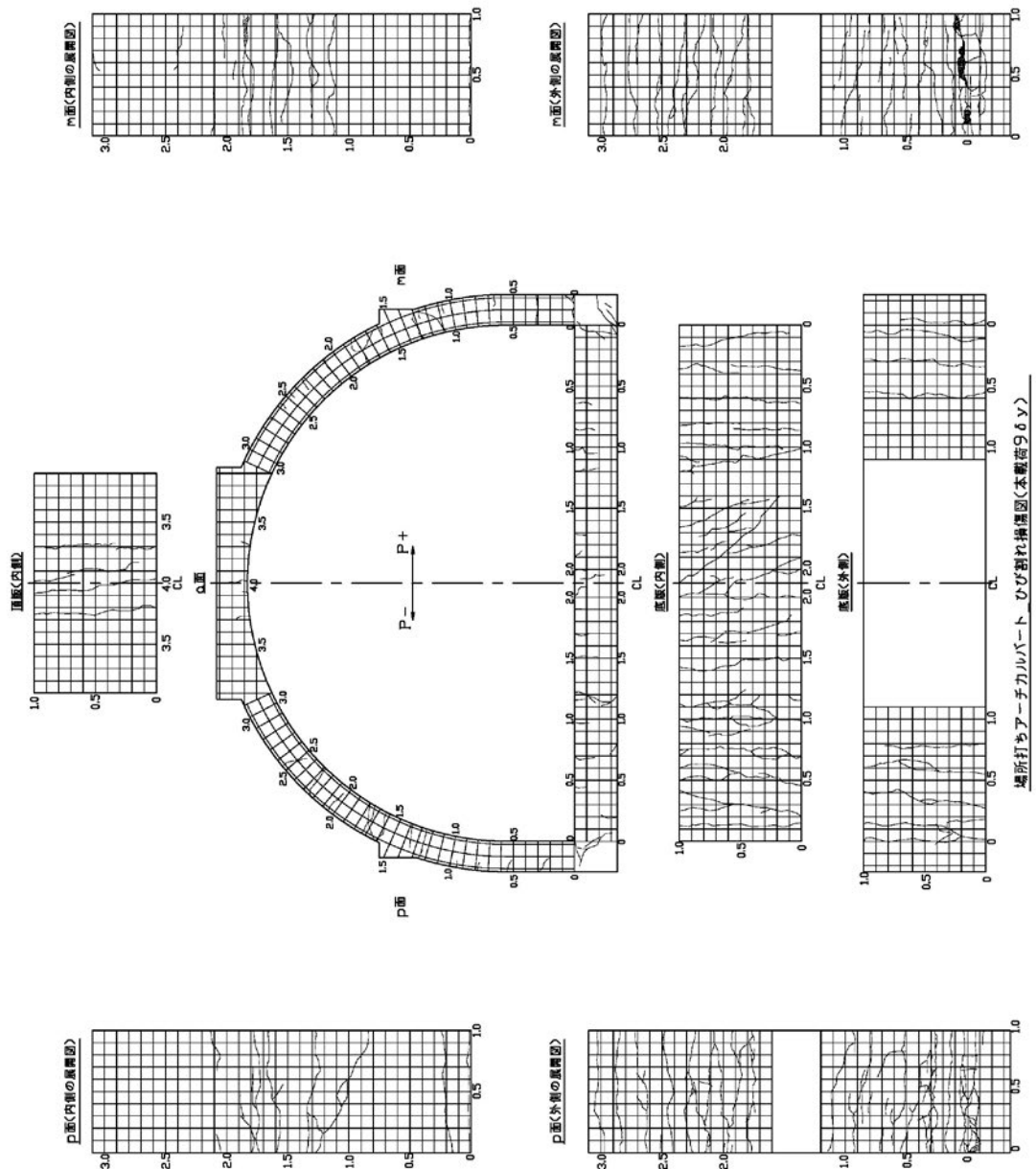
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$\pm 48\text{mm}$ ($8\delta y$)	<ul style="list-style-type: none"> ・ p 面（側壁・内）… p 面側の底版上面から頂版側へ 1350mm 付近で、下面より 200mm 上方付近から 450mm 上方付近にかけて、ひび割れが進展した。 ・ m 面（側壁・内）… m 面側の底版上面から頂版側へ 1650mm 付近に発生したひび割れのひび割れ幅が約 1.2mm となった。 ・ p 面（側壁・外）… 底版と p 面の接合付近において、コンクリート表面が剥離した。



付属 図-1.10 場所打ちアーチ損傷図 ($8\delta y$)

11) $9\delta y$ ($\pm 54\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$\pm 54\text{mm}$ ($9\delta y$)	<ul style="list-style-type: none"> ・ m 面 (アーチ部・内) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1850mm 付近で, 上面から 250mm 下方付近へかけて, コンクリート表面が剥離した. ・ p 面 (側壁・外) … p 面側の底版と側壁の接合付近のコンクリート表面の剥離が進展した. ・ m 面 (側壁・外) … m 面側の底版上面と側壁の接合付近の剥落が進んだ. ・ m 面 (アーチ部・外) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1800mm 付近で, 上面より 300mm 下方付近から上面へひび割れが進展した. m 面側の底版上面から頂版側へ 1800mm 付近で, 下面より 400mm 方付近のコンクリート上面が剥離した.

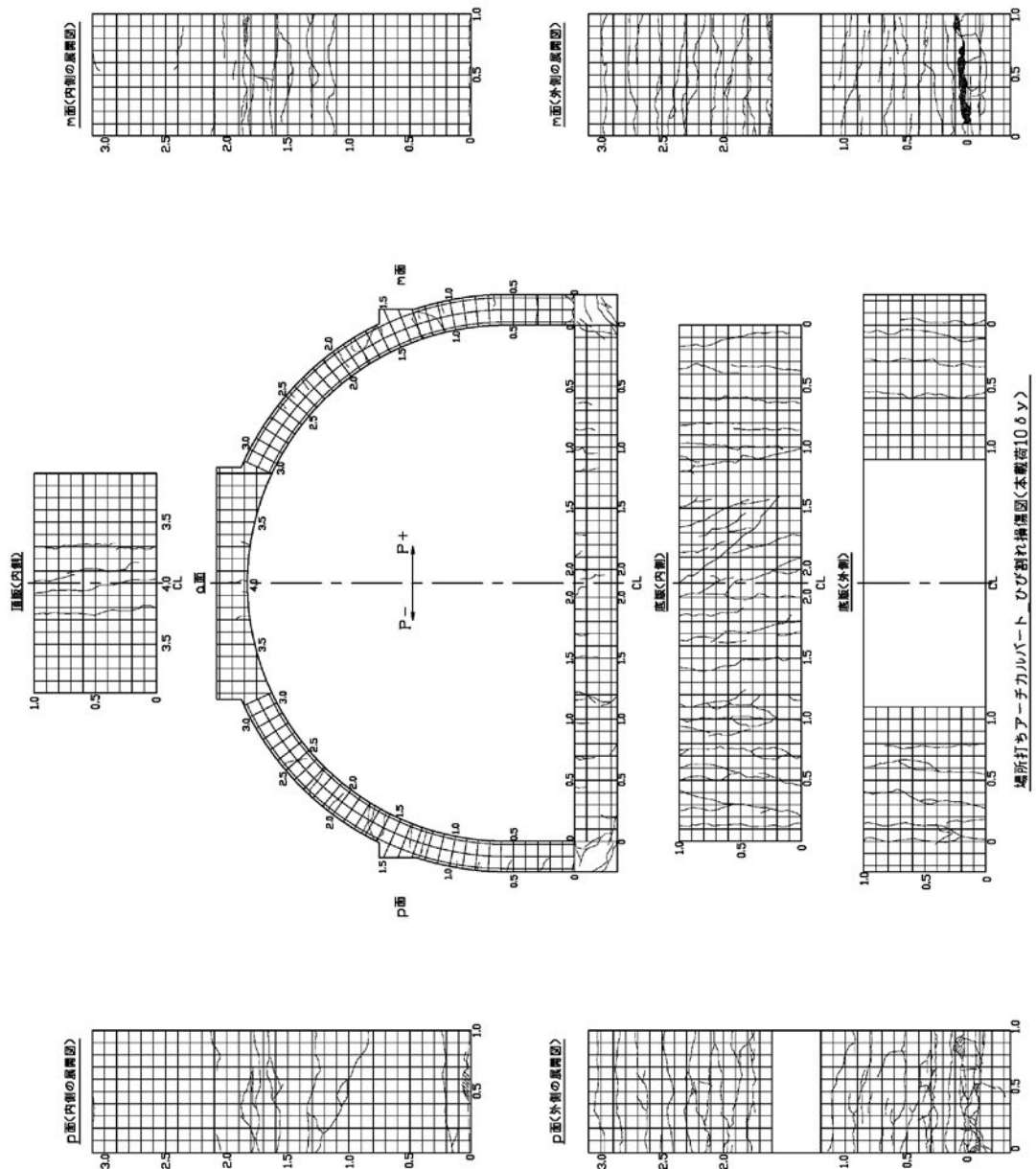


場所打ちアーチカルバートひび割れ損傷図(本橋桁9δy)

付属 図-1.11 場所打ちアーチ損傷図 (9δy)

12) 10 δ y (±60mm)

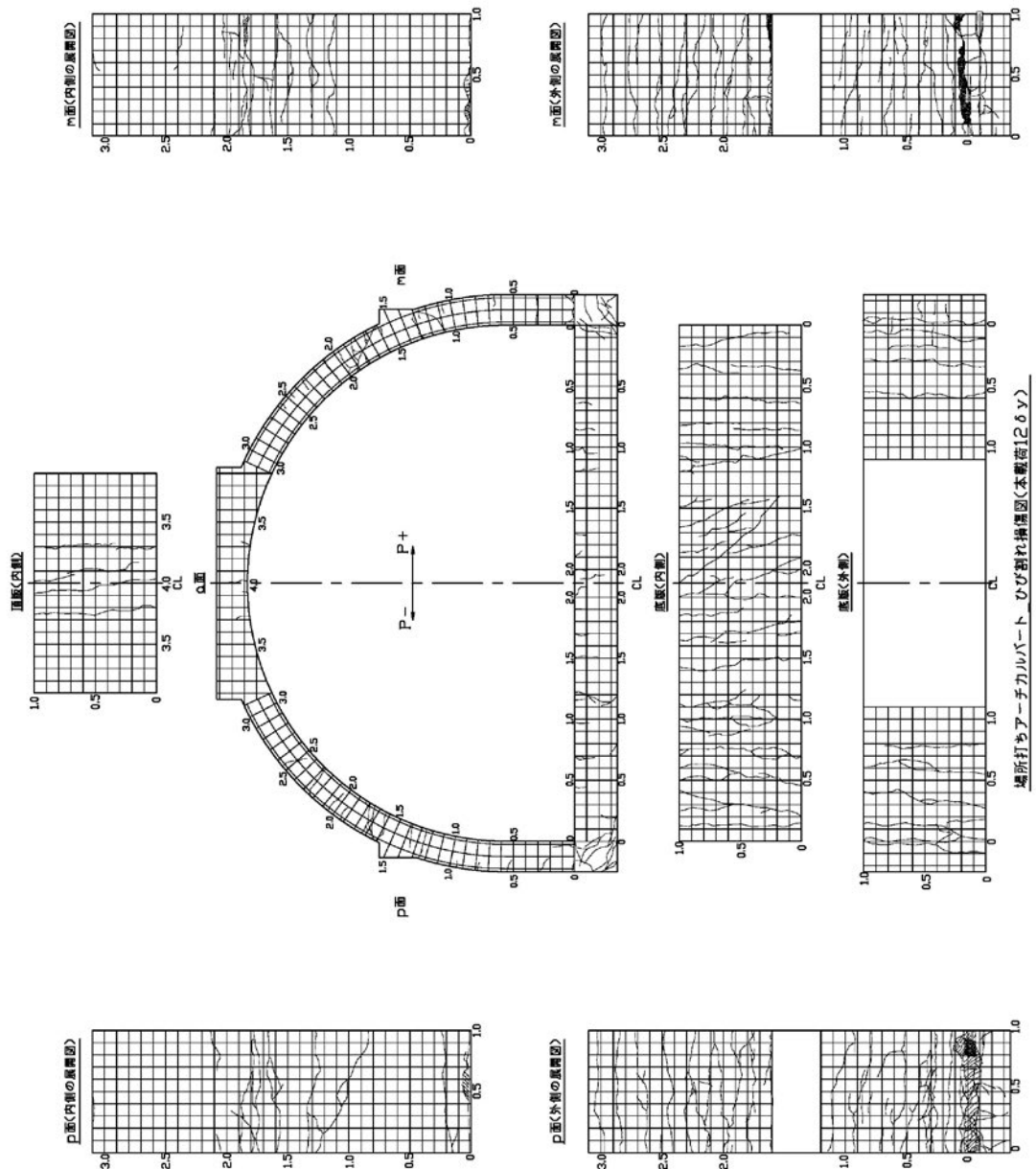
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±60mm (10 δ y)	<ul style="list-style-type: none"> ・ a 面 (側壁 p 側) … p 面側壁と底版の隅角部において, p 面の外側から底版の外側へひび割れが 3 本程度発生した. ・ a 面 (側壁 m 側) … m 面側壁と底版の隅角部において, m 面の外側から底版の外側へひび割れが 4 本程度発生した. ・ a 面 (アーチ部 m 側) … m 面側の底版上面から頂版側 1600mm 付近で, 外側から 150mm 程度のひび割れが発生した. ・ p 面 (アーチ部・内) … p 面側の底版上面から頂版側へ 1600mm 付近に発生したひび割れのひび割れ幅が約 0.2mm となった. ・ m 面 (アーチ部・内) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1600mm 付近に発生したひび割れのひび割れ幅が約 0.8mm となった. ・ 底版(m 面・内) … m 面側壁と底版の接合付近に剥離が発生した. ・ p 面 (側壁・外) … p 面側の底版上面から下面側へ 100mm 付近で, 下面から 100mm 上方付近にかけてコンクリート上面が剥離した. p 面側の底版上面と側壁の接合付近に発生したひび割れのひび割れ幅が約 3.0mm となった. ・ m 面 (アーチ部・外) … m 面側の底版上面から頂版側へ 1600mm 付近 (載荷点付近) の下面から 800mm 上方付近にかけてコンクリート表面が剥落した. ・ m 面 (側壁・外) … m 面側の底版上面と側壁の接合付近の剥落が進んだ. ・ 底版(b 面 m 側) … m 面側壁と底版の隅角部において, m 面の外側から底版の外側へひび割れが 4 本程度発生した. ・ 底版(b 面 p 側) … p 面側壁と底版の隅角部において, p 面の外側から底版の外側へひび割れが 3 本程度発生した.



付属 図-1.12 場所打ちアーチ損傷図 (10δy)

13) 12 δ y (±72mm)

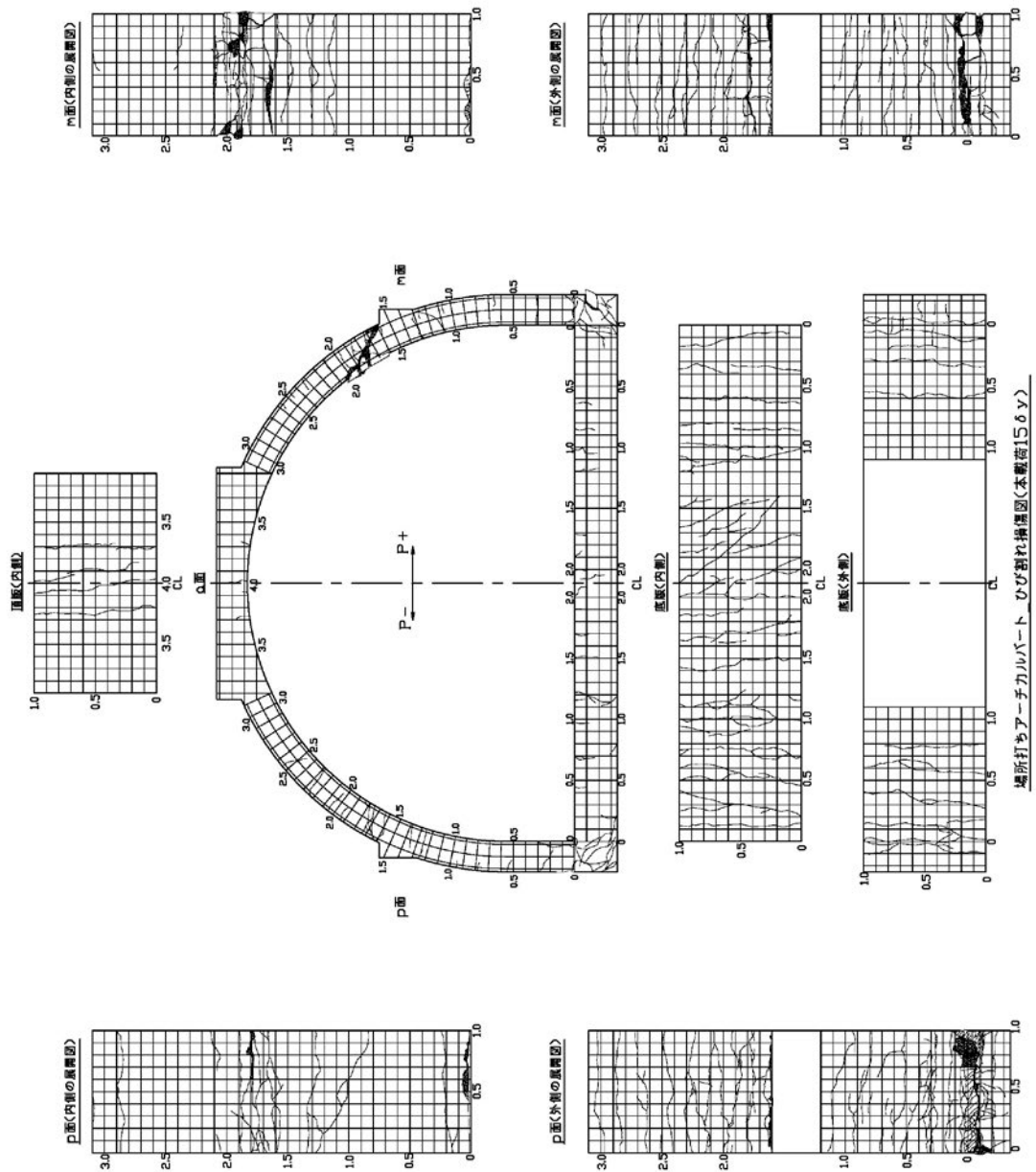
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±72mm (12 δ y)	<ul style="list-style-type: none"> ・ a 面 (側壁 p 側) … p 面側壁と底版の隅角部において, p 面の外側から底版の外側へひび割れが 2 本程度発生した. ・ a 面 (側壁 m 側) … m 面側壁と底版の隅角部において, m 面の外側から底版の外側へひび割れが 2 本程度発生した. ・ p 面 (アーチ部・内) … p 面側の底版から頂版側へ 1600mm 付近で発生したひび割れのひび割れ幅が約 0.80mm となった. ・ m 面 (アーチ部・内) … m 面側の底版から頂版側へ 1800mm 付近で, 上面から 300mm 下方付近にかけて発生したコンクリート表面剥離が進展した. m 面側の底版から頂版側へ 1600mm 付近で発生したひび割れのひび割れ幅が約 0.25mm となった. ・ 底版 (m 面・内) … m 面側壁と底版の接合付近のコンクリート表面の剥離が進展した. ・ m 面 (アーチ部・外) … m 面側の底版から頂版側へ 1600mm 付近で横断したひび割れが上面より 300mm 下方付近で頂版側へ約 200mm 水平に進展した. ・ m 面 (側壁・外) … m 面側の底版と側壁の接合付近のコンクリート表面の剥落が進展した. ・ 底版 (m 面・外) … m 面の内側と底版の接合付近を横断したひび割れが下面より 450mm, 750mm 上方付近で p 面側へ約 100mm 水平に進展した. ・ 底版 (b 面 m 側) … m 面側壁と底版の隅角部において, m 面の外側から底版の外側へひび割れが 2 本程度発生した. ・ 底版 (b 面 p 側) … p 面側壁と底版の隅角部において, p 面の外側から底版の外側へひび割れが 2 本程度発生した.



付属 図-1.13 場所打ちアーチ損傷図 (12 δy)

14) 15 δy ($\pm 90\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
±90mm (15 δy) 1 波目	(*) 載荷中, 鉄筋が破断する音が 1 回した.
±90mm (15 δy) 2 波目 除荷の途中	<p>m 面側壁と底版の隅角部において, m 面の内側から底版の外側へせん断破壊した.</p> <p>・b 面 (アーチ部・m 面側)</p> <p>m 面側の底版上面から頂版側へ 2100mm 付近の内側から, 頂版側へ 1600mm 付近の外側へかけて, せん断破壊した. (*) 載荷中, 鉄筋が破断する音が 7 回した.</p>



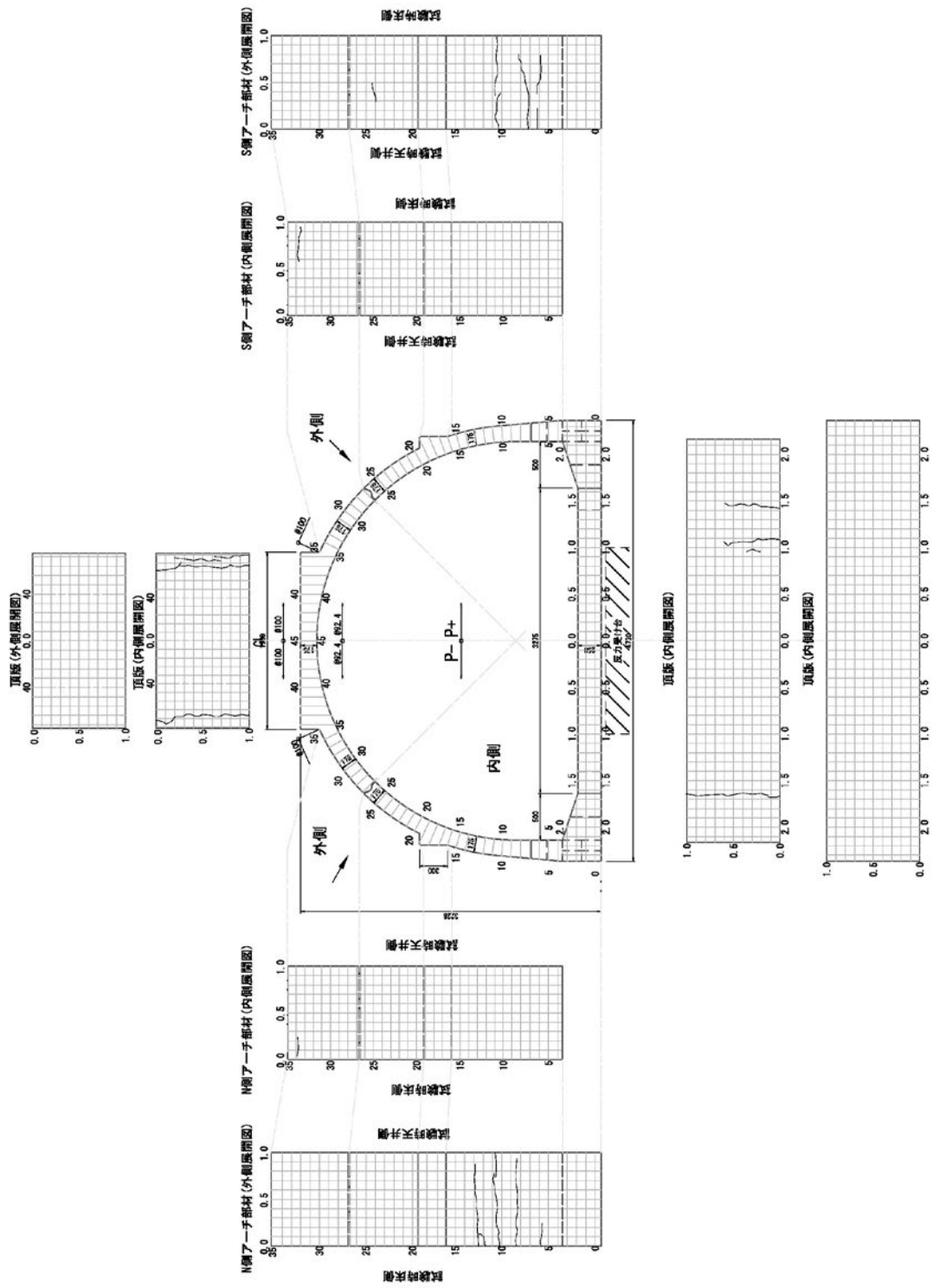
付属 図-1.14 場所打ちアーチ損傷図 (15δy)

2. 2 ヒンジアーチ

実験時の加振ステップ毎の供試体の損傷の進展状況の記録を以下に示す。S側はアーチカルバート右側，N側は左側となる。

1) 予備载荷①

加振機 入力変位	損 傷 状 況
±5.0mm 予備载荷①	<p>S側</p> <p>側壁外…5S～11S間にクラックが6本発生し，内2本が横断クラックだった (7S, 10S)</p> <p>側壁内…34S～37S間にクラックが4本発生し，内1本が横断クラックだった (37S)</p> <p>側壁上…頂部(軸力载荷付近)断面変化部にクラックが1本発生した</p> <p>底版 …ハンチ付け根から60cmの間にクラックが4本発生した</p> <p>N側</p> <p>側壁外…5N～13N間にクラックが6本発生し，内2本が横断クラックだった (8N, 11N)他，24N付近にもクラックが1本発生した</p> <p>側壁内…34N付近にクラックが1本発生し，36N付近には横断クラックが発生した</p> <p>側壁上…頂部(軸力载荷付近)断面変化部にクラックが1本発生した</p> <p>底版 …ハンチ付け根に横断クラックが発生した</p>



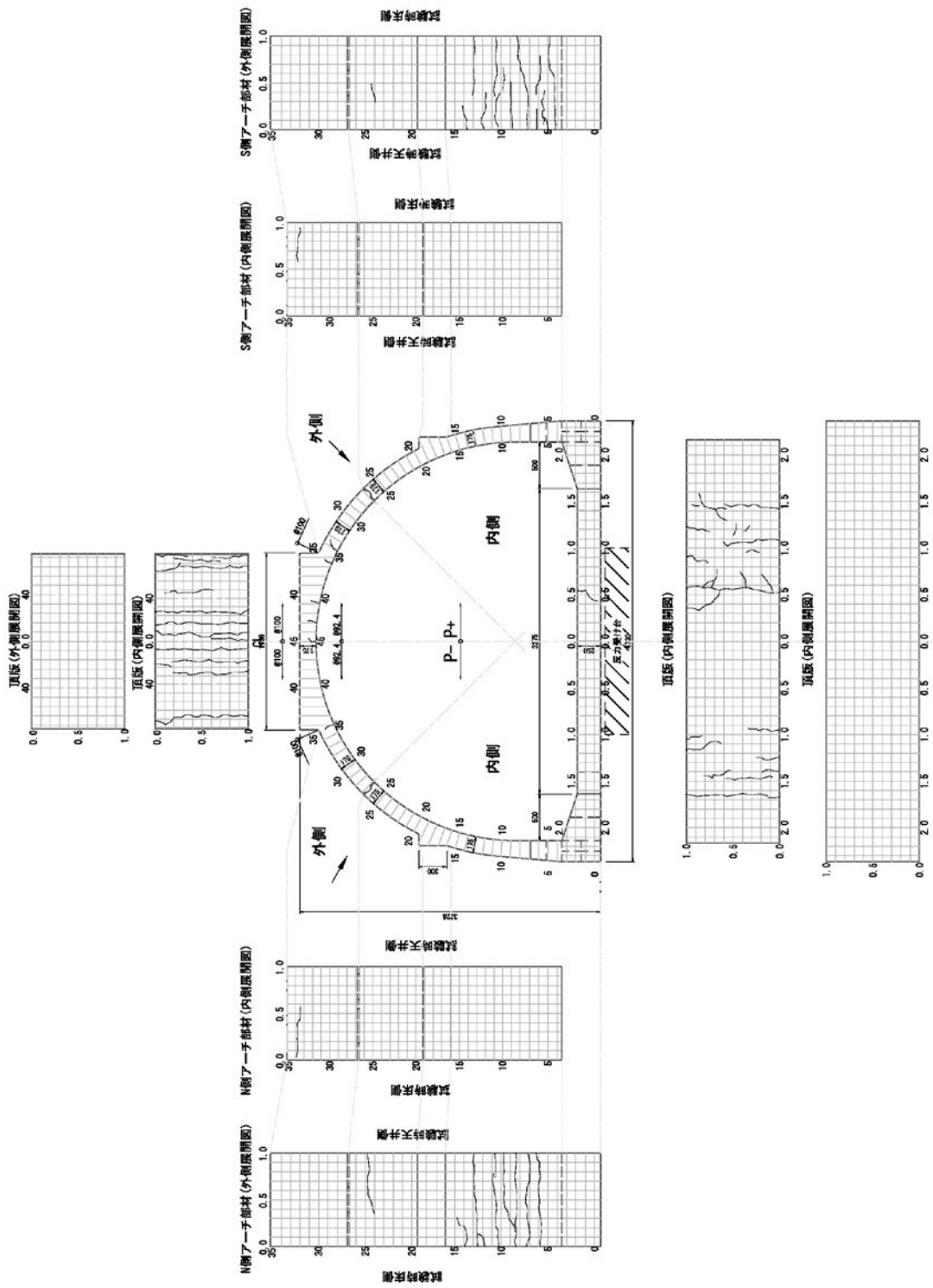
付属 図-2.1 2 ヒンジアーチ損傷図 (予備載荷±5 mm)

2) 予備載荷②

加振機 入力変位	損 傷 状 況
<p>±10.0mm 予備載荷②</p>	<p>S 側 側壁外…4S, 12S, 13S 付近に新たなクラックが 1 本ずつ発生し, 5S~11S 間にクラックが 3 本程度増えた 側壁内…35S, 39S にクラックが 1 本ずつ増え, 41S~46S 間に横断クラックが 4 本発生した 側壁上…頂部(軸力載荷付近)にクラックが 3 本発生し, 曲率変位計付近にもクラックが 4 本発生した 底版 …中央部に横断クラックが発生し, ハンチ付け根から 60cm 間に枝分かれ, 延進または新たなクラックが 10 本程度発生し, 2 方向クラックに進展した。また, ハンチ付け根付近では下面にも斜め方向クラックが発生した。また, 上面にも新たなクラックが発生した</p> <p>N 側 側壁外…6N, 13N, 24N 付近のクラックが延進し, 横断クラックに進展した他, 9N 付近に新たなクラックが 1 本発生した 側壁内…41N~46N 間に横断クラックが 3 本発生した 側壁上…頂部(軸力載荷付近)にクラックが 2 本発生し, 曲率変位計付近にもクラックが 2 本発生した 底版 …ハンチ付け根から 20cm 付近に横断クラックに近いクラックが発生し, ハンチ付け根付近では下面に斜め方向クラックが発生した</p>

3) 予備載荷③

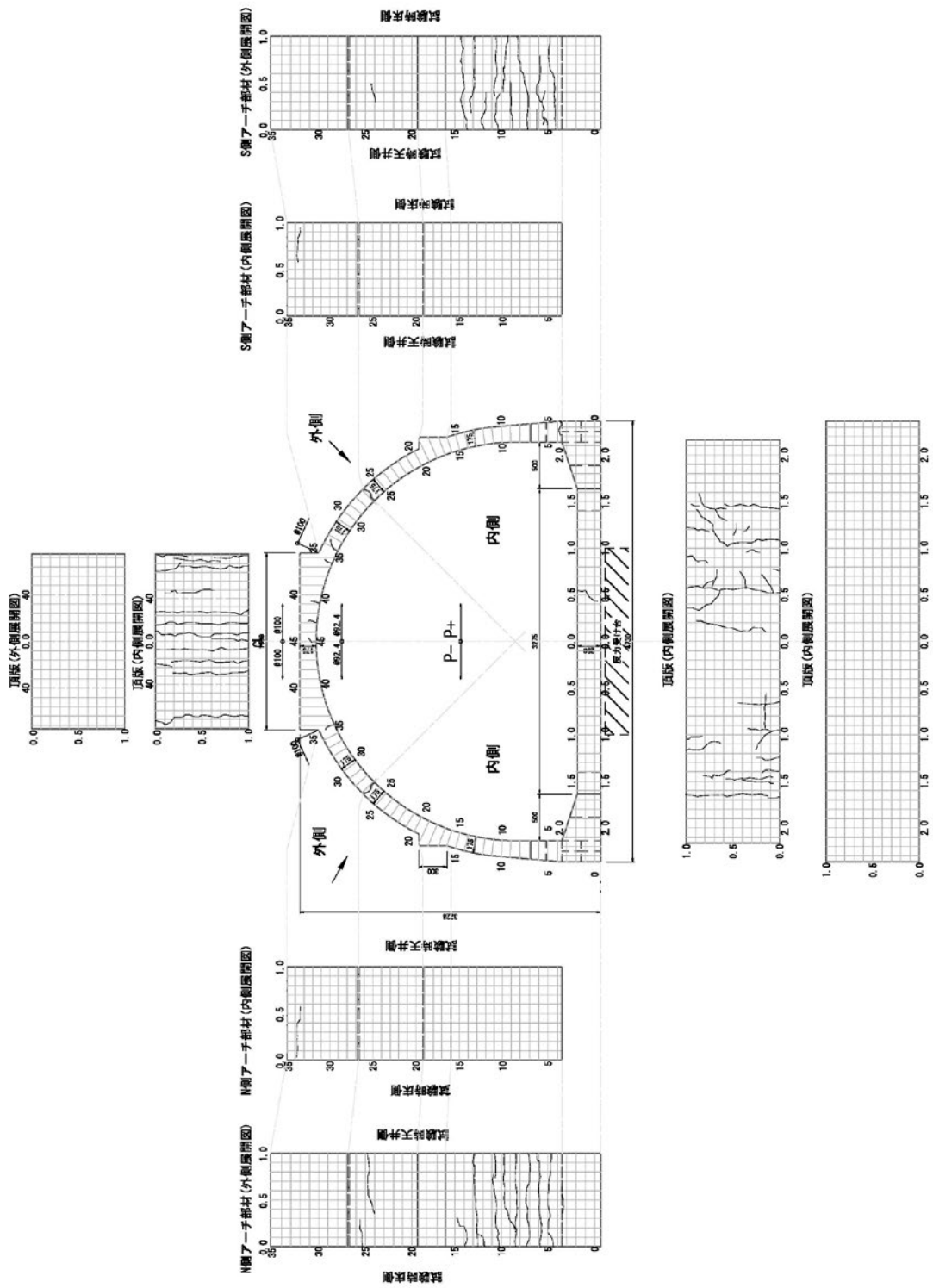
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±15.0mm 予備載荷③	<p>S 側</p> <p>側壁外…4S 付近のクラックが延進し，横断クラックに進展した他，5S～13S 間に延進，枝分かれするクラックが 5 本程発生した．また，14S に新たなクラックが 2 本発生した</p> <p>側壁内…変化なし</p> <p>側壁上…曲率変位計付近に新たなクラックが 2 本発生した（1 本はハンチ付け根 4S）</p> <p>側壁下…ハンチ付け根付近に新たなクラックが 1 本発生した</p> <p>底版 …ハンチ付け根から中央部にかけて延進，枝分かれするクラックが 6 本程増えた他，上面曲率変位計付近にも新たなクラックが 2 本発生した</p> <p>N 側</p> <p>側壁外…7N 付近に横断クラックが発生し，14N 付近には新たなクラックが発生した他，24N 付近のクラックが延進した</p> <p>側壁内…34N 付近のクラックが延進し，43N 付近には横断クラックが発生した</p> <p>側壁上…変化なし</p> <p>底版 …ハンチ付け根から 20～60cm 間に新たなクラックが 3 本発生した</p>



付属 図-2.3 2 ヒンジアーチ損傷図 (予備載荷±15 mm)

4) 予備載荷④

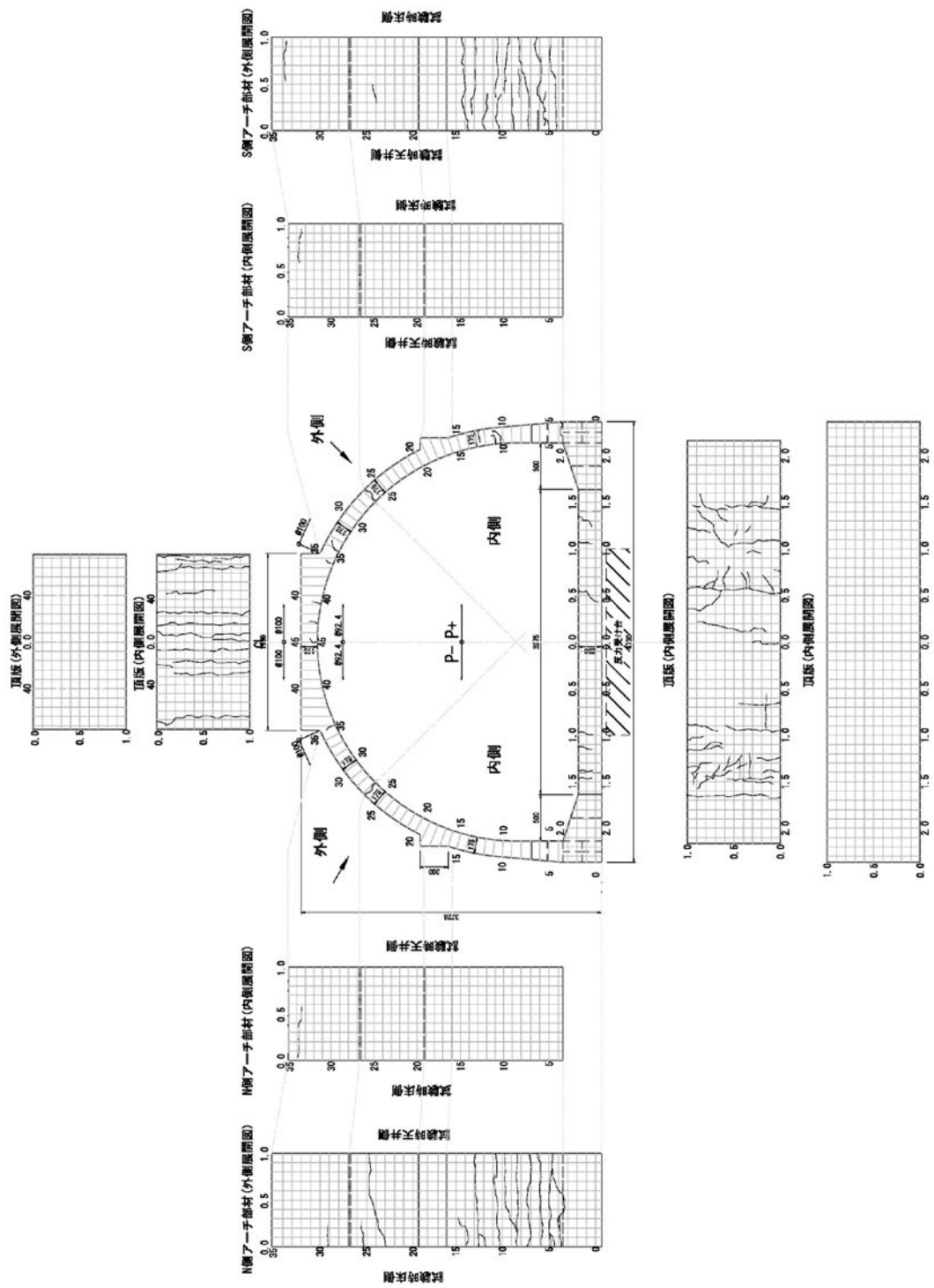
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±20.0mm 予備載荷④	<p>S側</p> <p>側壁外…12S, 14S 付近のクラックが延進し, 横断クラックに進展した</p> <p>側壁上…ハンチ付け根 4S 付近のクラックが延進した</p> <p>底版 …中央部付近に新たなクラックが5本程発生した</p> <p>N側</p> <p>側壁外…3N に新たなクラックが発生し, 5N に横断クラックが発生した</p> <p>底版 …上面に新たなクラックが2本発生した</p> <p>※その他の面は, 変化なし及び, 僅かな既存クラックの延進が生じる程度だった</p>



付属 図-2.4 2 ヒンジアーチ損傷図 (予備載荷±20 mm)

5) $1 \delta y$ ($\pm 23\text{mm}$)

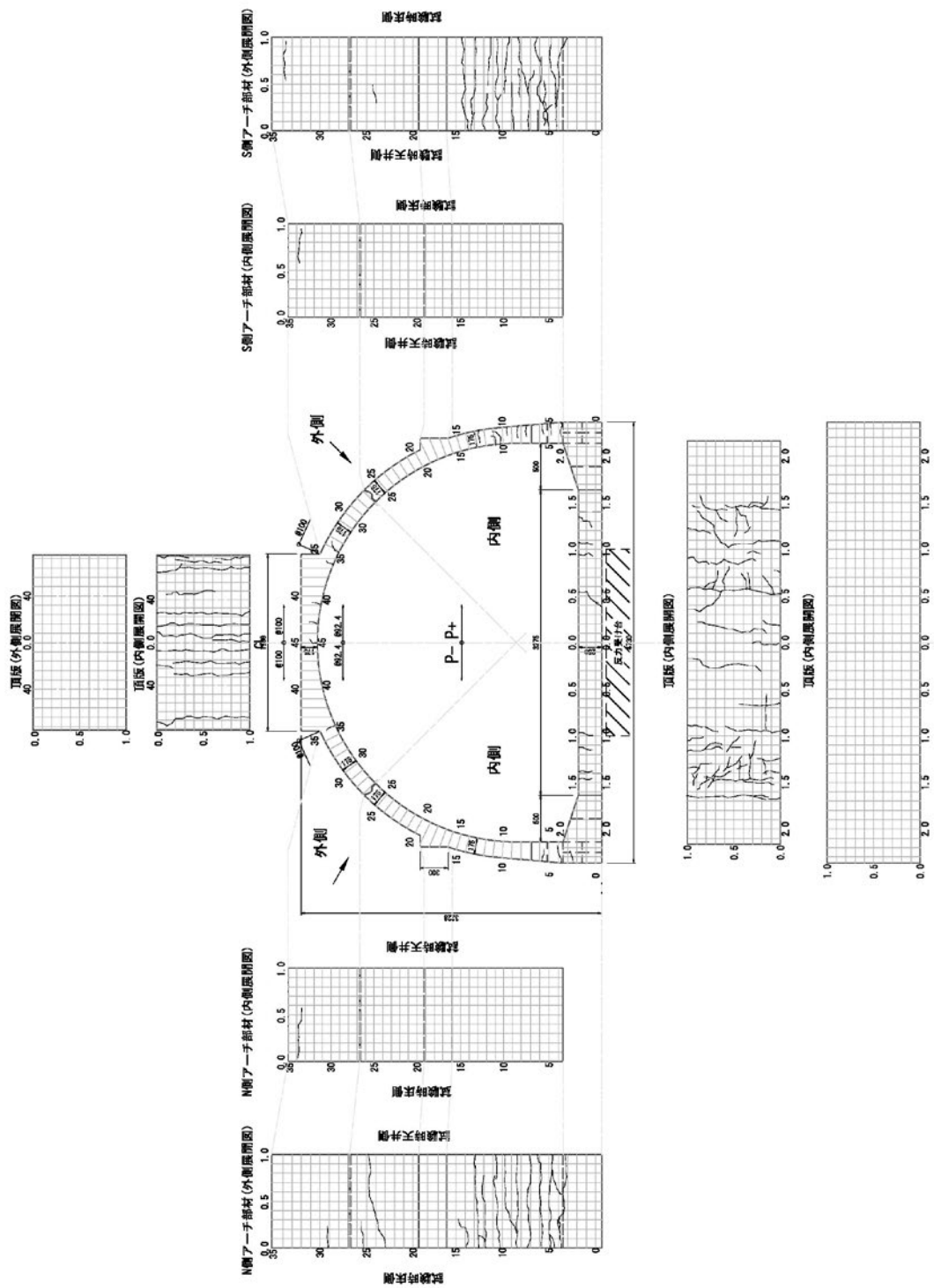
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$1 \delta y$ ($\pm 23\text{mm}$) 3 波	<p>S 側 側壁外…8S, 13S 付近に新たなクラックが発生した 底版 …ハンチ付け根から中央にかけて延進, 枝分かれするクラックが 3 本程増えた</p> <p>N 側 側壁外…3N 付近に枝分かれクラック, 12N 付近に新たなクラックが発生した 他, 24N 付近のクラックが延進し, 横断クラックに進展した 底版 …ハンチ付け根から中央にかけて延進, 枝分かれするクラックが 10 本程増え, 2 方向クラックに進展した</p> <p>※その他の面は, 変化なし及び, 僅かな既存クラックの延進が生じる程度だった</p>



付属 図-2.5 2 ヒンジアーチ損傷図 (1δy)

6) $2\delta y$ ($\pm 46\text{mm}$)

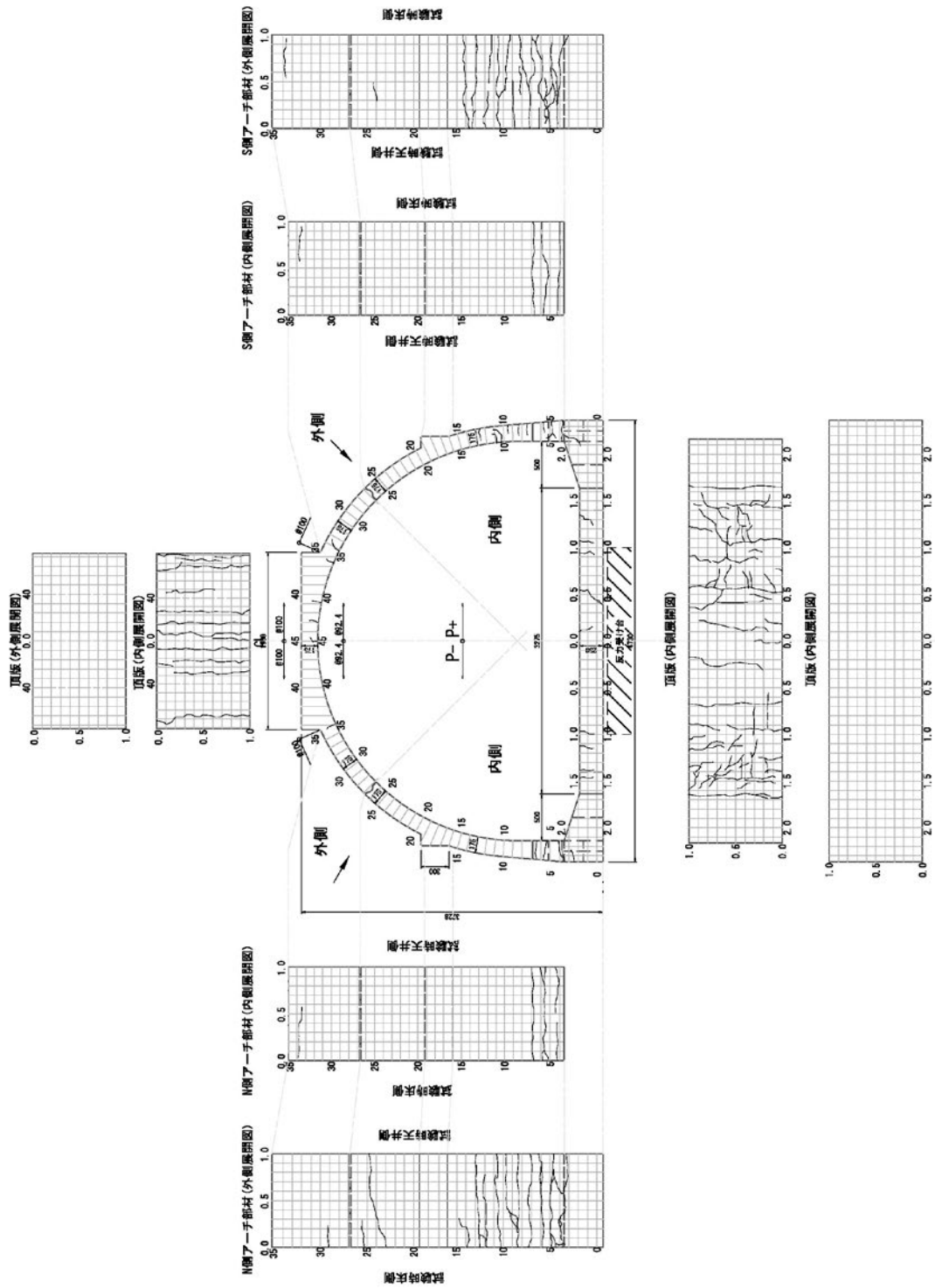
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$2\delta y$ ($\pm 46\text{mm}$) 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…3S～6S間に枝分かれクラックが6本程増え、2方向クラックの兆候が現れはじめ、4S付近には横断クラックが1本増えた</p> <p>側壁上…ハンチ付け根4S付近に横断クラックに近い新たなクラックが2本発生し、既存クラックの延進を含め、横断クラックに近いクラックが3本となった</p> <p>側壁下…ハンチ付け根4S付近に横断クラックが1本発生し、隅角部にも新たなクラックが1本発生した</p> <p>底版 …ハンチ付け根から中央にかけて延進、枝分かれするクラックが8本程増え、密な状態に進展した他、中央部上面ではクラックが延進し、横断クラックに進展した</p> <p>N側</p> <p>側壁外…4N付近のクラックが延進し、横断クラックに進展した</p> <p>側壁上…ハンチ付け根4N付近に横断クラックに近い新たなクラックが2本発生し、隅角部にも新たなクラックが1本発生した</p> <p>側壁下…ハンチ付け根4N付近に横断クラックが2本発生した</p> <p>底版 …ハンチ付け根から中央にかけて延進、枝分かれするクラックが8本程増え、2方向クラックが進展した他、中央部上面のクラックの僅かな延進が生じた</p>



付属 図-2.6 2 ヒンジアーチ損傷図 (2δy)

7) $3\delta y$ ($\pm 69\text{mm}$)

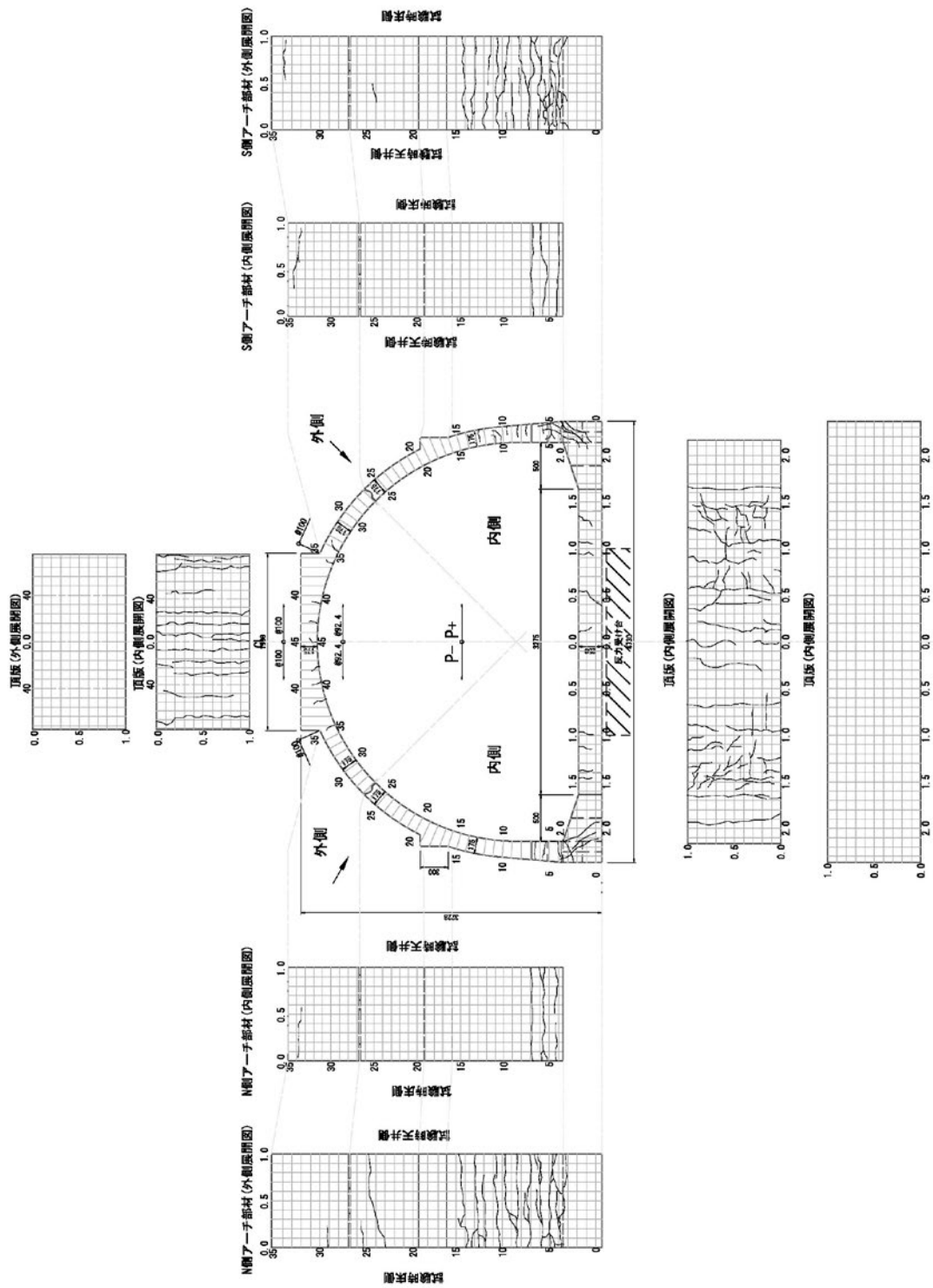
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$3\delta y$ ($\pm 69\text{mm}$) 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…3S～6S間に枝分かれクラックが3本程増え、5S付近のクラック幅も開き始め、コンクリートにはらみ出しの兆候が現れた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根4S付近、また5S、7S付近にも新たな横断クラックが発生した</p> <p>側壁上…隅角部に新たなクラックが1本発生した</p> <p>側壁下…ハンチ付け根4S付近のクラック幅が開き始めた</p> <p>底版 …ハンチ付け根から中央にかけて延進、枝分かれするクラックが7本増え、さらに密な状態に進展し、ハンチ付け根に横断クラックが発生した</p> <p>N側</p> <p>側壁外…3N～6N間に枝分かれクラックが4本程増え、2方向クラックの兆候が現れ始め、5N付近のクラック幅が開き始めた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根4N付近、また5N、7N付近にも新たな横断クラックが発生した</p> <p>側壁上…ハンチ付け根4N付近に新たな横断クラックが1本増えた</p> <p>側壁下…ハンチ付け根4N付近のクラック幅が開き始め、新たな横断クラックも1本増えた</p>



付属 図-2.7 2 ヒンジアーチ損傷図 (3δy)

8) $4\delta y$ ($\pm 92\text{mm}$)

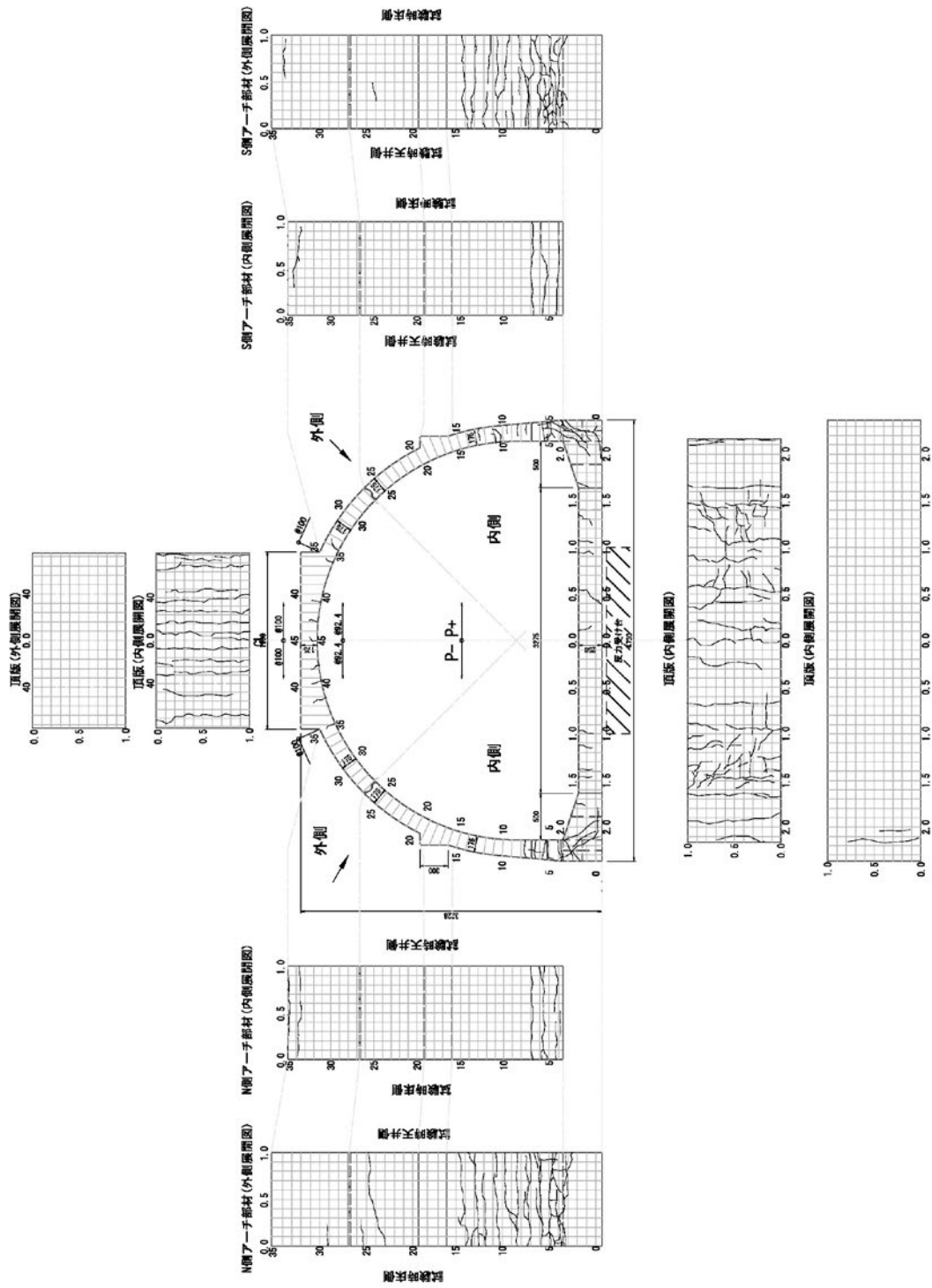
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$4\delta y$ ($\pm 92\text{mm}$) 3 波	<p>S 側</p> <p>側壁外…3S～6S 間に枝分かれクラックが 8 本程増え，網密な状態に進展し，5S 付近のクラック幅もさらに開き，コンクリートにはらみ出しも進展した</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4S のクラック幅が開き，一部角割れが生じ始めた他，40S 付近に横断クラックが 1 本発生した</p> <p>側壁上…隅角部に斜め方向の長いクラックが 3 本発生した</p> <p>側壁下…隅角部に斜め方向の長いクラックが 2 本発生した</p> <p>底版 …ハンチ付け根から中央にかけて延進，枝分かれするクラックが 10 本程増え，網密な状態に進展した</p> <p>N 側</p> <p>側壁外…3N～7N 間に枝分かれクラックが 5 本程増え，2 方向クラックが進展した</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4N のクラック幅が開き，一部角割れが生じ始めた他，39N 付近に横断クラックが 1 本発生した</p> <p>側壁上…隅角部に斜め方向の長いクラックが 3 本発生した</p> <p>側壁下…隅角部に斜め方向の長いクラックが 2 本発生した</p> <p>底版 …ハンチ付け根から中央にかけて延進，枝分かれするクラックが 5 本程増え，密な状態に進展した</p>



付属 図-2.8 2 ヒンジアーチ損傷図 (4δy)

9) $5\delta y$ ($\pm 115\text{mm}$)

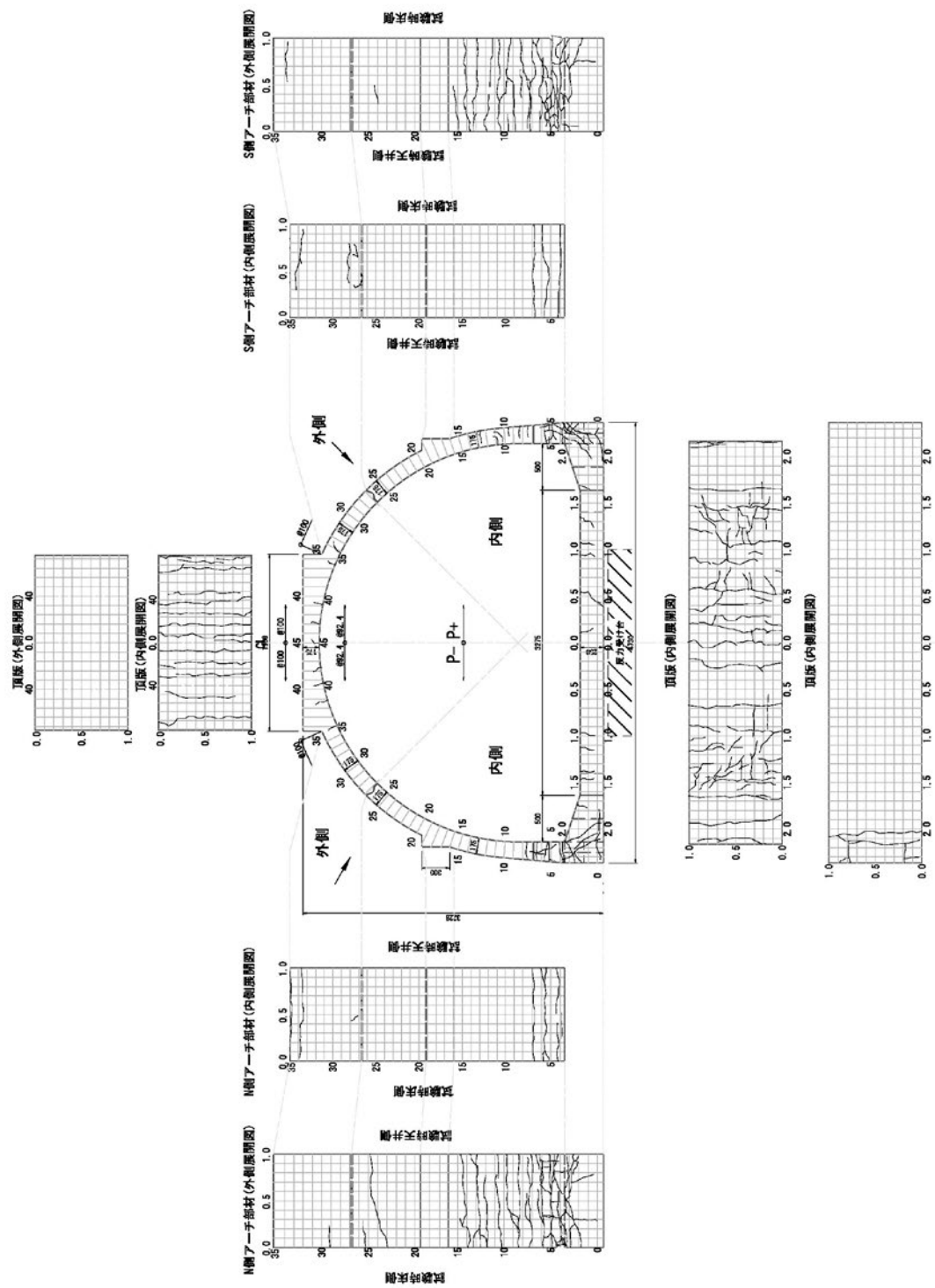
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$5\delta y$ ($\pm 115\text{mm}$) 3 波	<p>S 側</p> <p>側壁外…3S～6S 間のクラック幅がさらに開き，圧壊が生じ始めた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4S のクラック幅がさらに開き，圧壊が生じ始めた</p> <p>側壁上…隅角部に既存クラックからの延進，枝分かれするクラックが 5 本程発生し，2 方向クラックに進展．クラック幅も開いた</p> <p>側壁下…隅角部に剥落が生じた</p> <p>N 側</p> <p>側壁外…3N～7N 間に枝分かれクラックが 5 本程増え，密な状態に進展したほか，クラック幅もさらに開き，圧壊も生じ始めた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4N のクラック幅がさらに開き，圧壊が生じ始めた</p> <p>側壁上…隅角部に既存クラックからの延進，枝分かれするクラックが 5 本程発生し，2 方向クラックに進展．クラック幅も開いた</p> <p>側壁下…隅角部に既存クラックからの延進，枝分かれするクラックが 4 本程発生し，クラック幅の開き，また，はらみ出しも生じた(剥落寸前)</p> <p>※底版部では，南北ともハンチ付け根から中央部にかけて，既存クラックからの枝分かれクラックが数本(5 本程度)増えた他，底版裏面にもクラックが数本(5 本程度)生じた</p>



付属 図-2.9 2 ヒンジアーチ損傷図 (5δy)

10) $6\delta y$ ($\pm 138\text{mm}$)

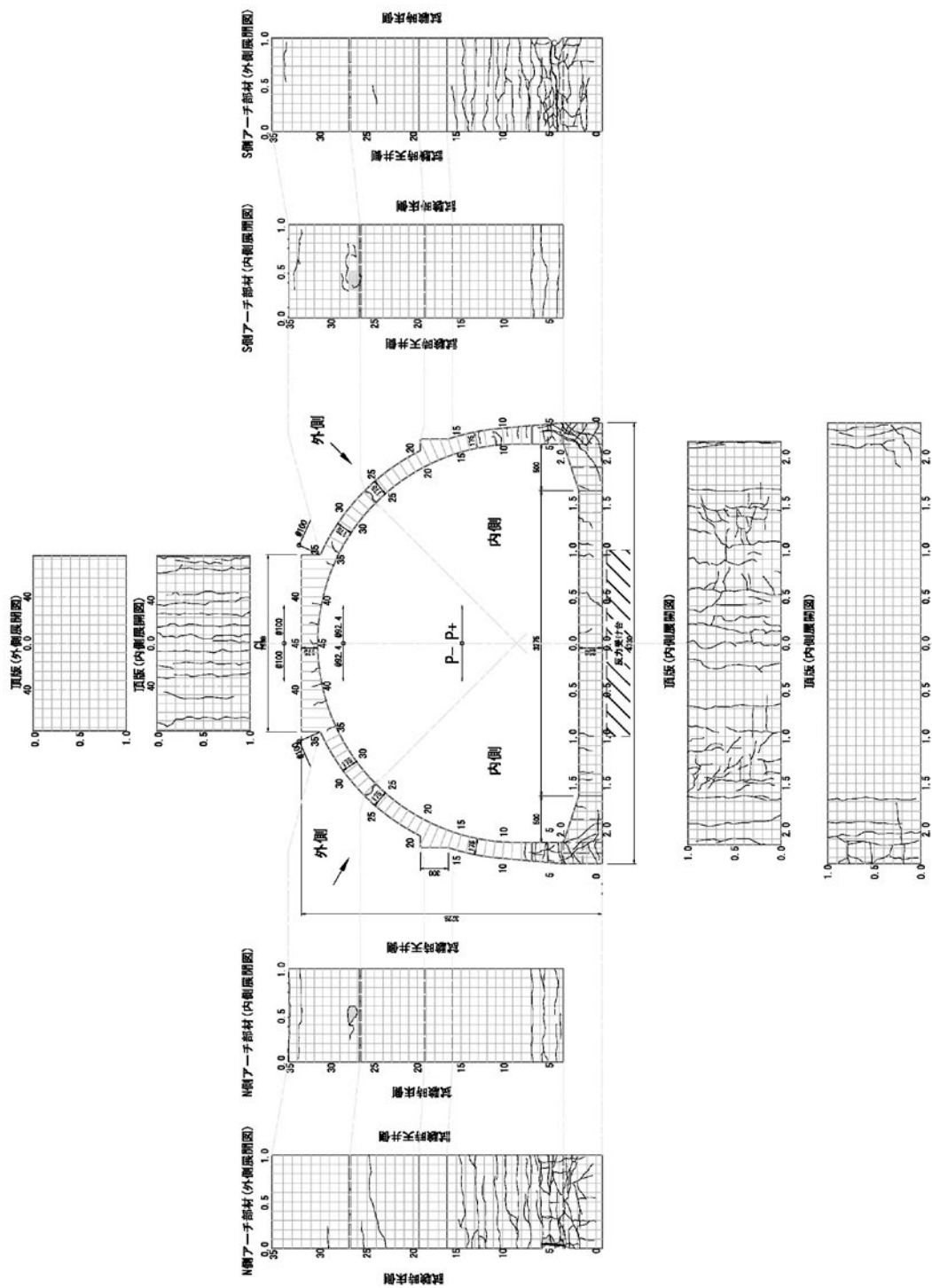
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$6\delta y$ ($\pm 138\text{mm}$) 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…特に 4S～5S 付近ではらみ出し，圧壊が進み，一部剥落も生じた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4S の圧壊がさらに進行した他，ヒンジ部に新たなクラックが 4 本発生した</p> <p>側壁上…隅角部にコンクリートのはらみ出しが生じ始めた</p> <p>側壁下…隅角部に著しい剥落が生じた</p> <p>N側</p> <p>側壁外…特に 4N～5N 付近ではらみ出し，圧壊が進み，一部剥落も生じた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4N の圧壊がさらに進行した他，ヒンジ部に新たなクラックが 2 本発生した</p> <p>側壁上…隅角部にコンクリートのはらみ出しが生じはじめた</p> <p>側壁下…隅角部に剥落が生じた</p> <p>※底版部では，南北ともハンチ付け根から中央部にかけて，既存クラックからの枝分かれクラックが数本(5 本程度)増えた他，底版裏面にもクラックが数本(5 本程度)生じた</p>



付属 図-2.10 2 ヒンジアーチ損傷図 ($6\delta y$)

11) $7\delta_y$ ($\pm 161\text{mm}$)

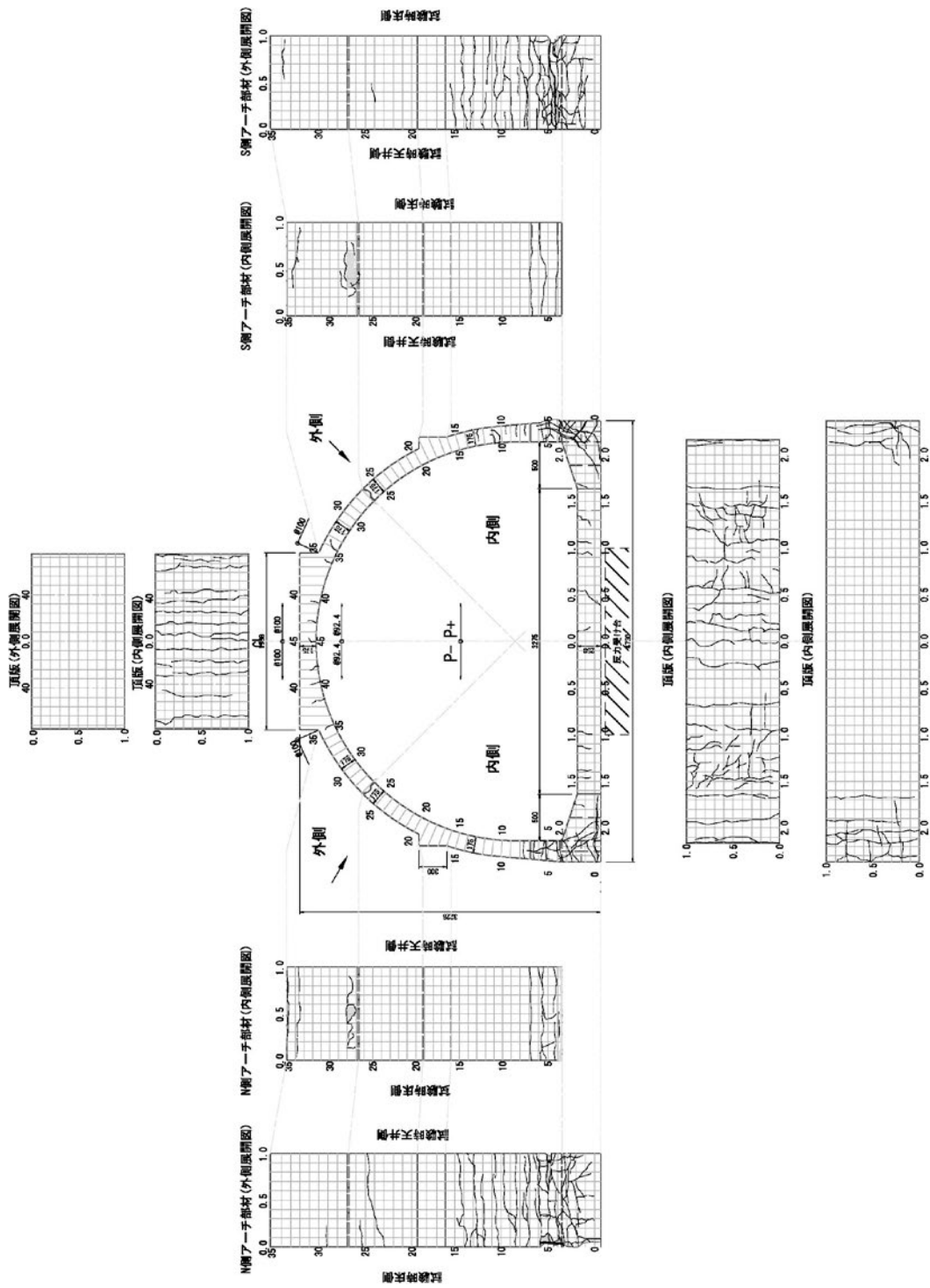
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$7\delta_y$ $(\pm 161\text{mm})$ 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…特に 4S~5S 付近の損傷がさらに進行し、下面側に鉄筋露出が生じた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4S, またヒンジ部に剥落が生じた</p> <p>側壁上…隅角部にコンクリートのはらみ出しが著しく進行した</p> <p>側壁下…隅角部の剥落が進行し、鉄筋露出が生じた</p> <p>N側</p> <p>側壁外…特に 4N~5N 付近の損傷がさらに進み、上面側・下面側ともに、著しい鉄筋露出が生じた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4N, またヒンジ部に剥落が生じた</p> <p>側壁上…隅角部にコンクリートのはらみ出しが著しく進行した</p> <p>側壁下…隅角部の剥落が進行し、鉄筋露出が生じた</p> <p>※底版部では、南北ともハンチ付け根から中央部にかけて、既存クラックからの枝分かれクラックが数本(5本程度)増えた他、底版裏面にもクラックが数本(5本程度)生じた</p>



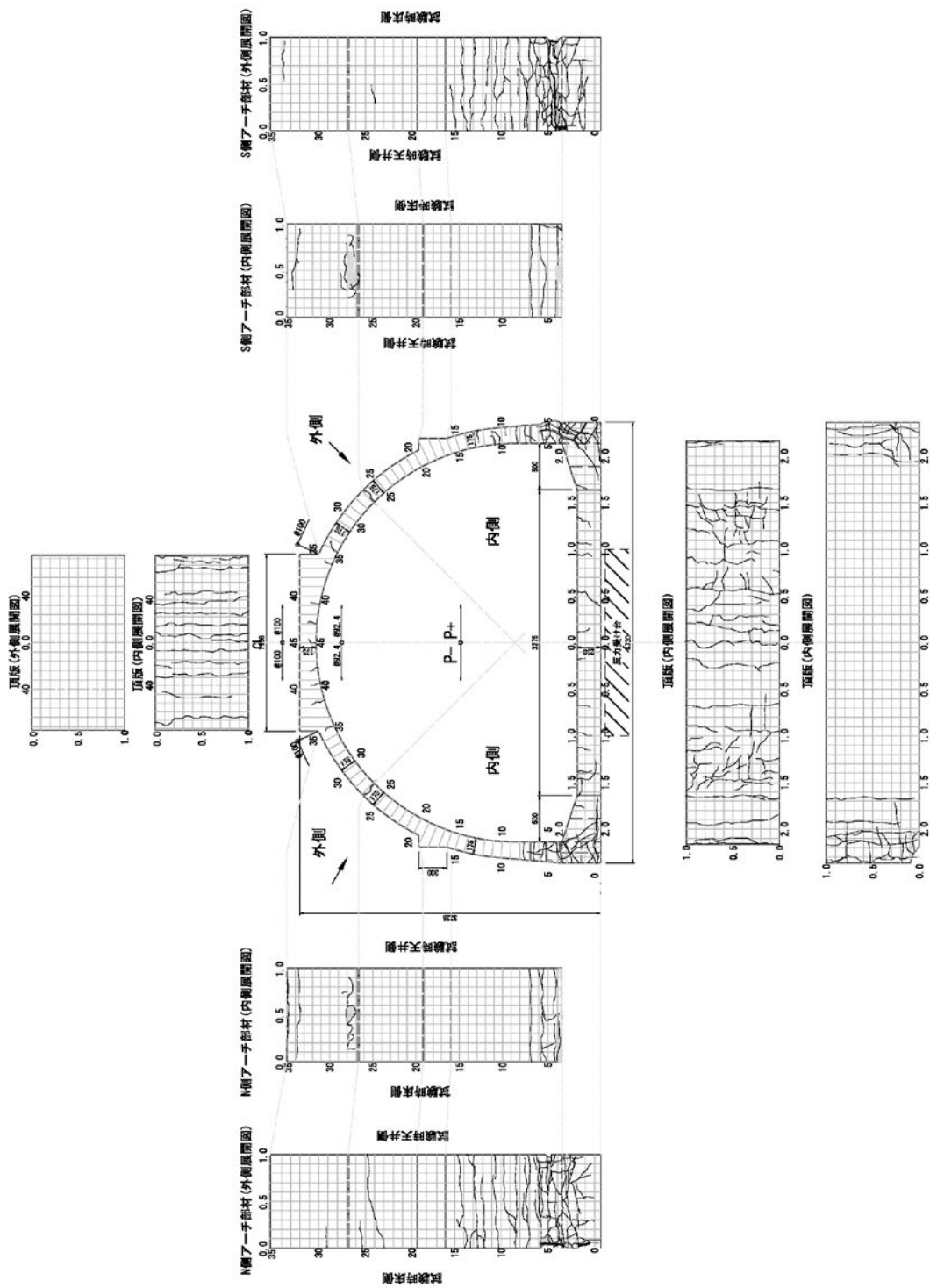
付属 図-2.11 2ヒンジアーチ損傷図 (7δy)

12) $8\delta y$ ($\pm 184\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$8\delta y$ ($\pm 184\text{mm}$) 1波	<p>S側</p> <p>側壁外…特に 4S~5S 付近, ほぼ全範囲に渡り剥落・鉄筋露出が生じた</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4S, またヒンジ部の剥落範囲が広がった</p> <p>側壁上…隅角部にコンクリートのはらみ出しがさらに著しく進行した</p> <p>側壁下…隅角部大半のコンクリートが剥落し, 鉄筋露出範囲も広がった</p> <p>N側</p> <p>側壁外…下面側で底面から 5N 付近までの広範囲のコンクリートが剥落し, 鉄筋も露出した</p> <p>側壁内…ハンチ付け根 4N, またヒンジ部の剥落範囲が広がった</p> <p>側壁上…隅角部にコンクリートのはらみ出しがさらに著しく進行した</p> <p>側壁下…隅角部大半のコンクリートが剥落し, 鉄筋露出範囲も広がった</p> <p>実験終了</p>



付属 図-2.12 2 ヒンジアーチ損傷図 (8δy)



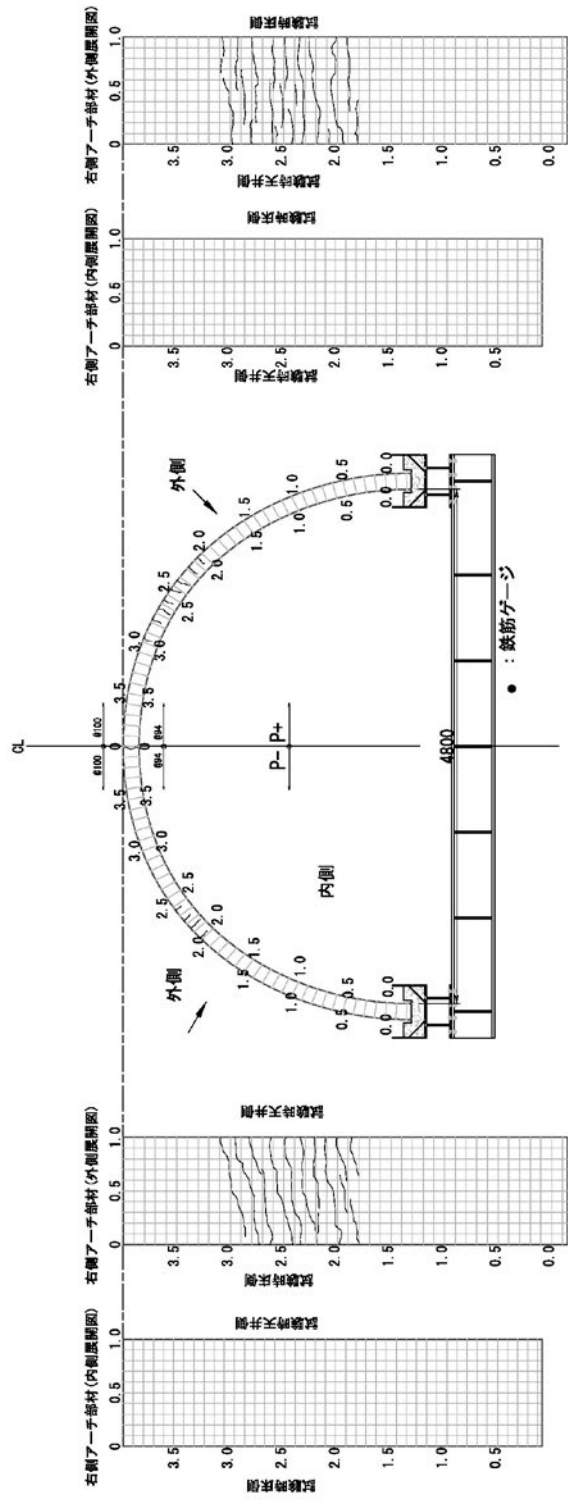
付属 図-2.13 2 ヒンジアーチ損傷図 (載荷終了時)

3. 3 ヒンジアーチ

実験時の加振ステップ毎の供試体の損傷の進展状況の記録を以下に示す。S側はアーチカルバート右側、N側は左側となる。

1) 初期軸力導入後

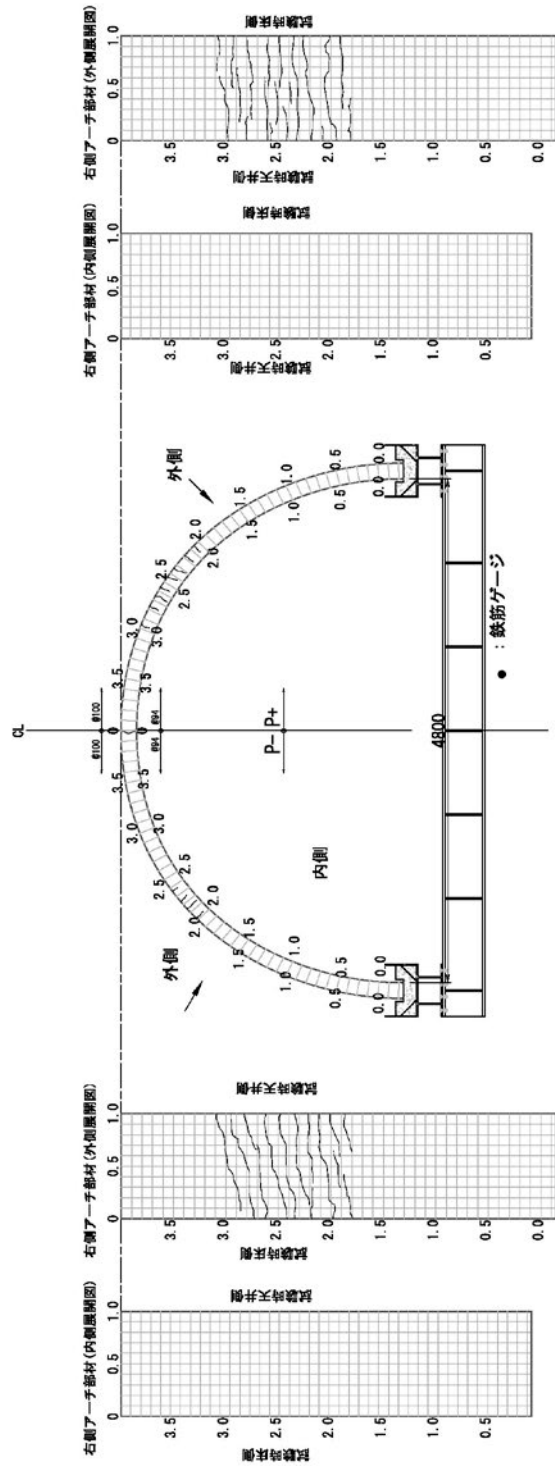
加振機 入力変位	損 傷 状 況
軸力導入後	※計画の軸力 180kN に対し、アクチュエーターの初期導入軸力：240kN を導入 S側 側壁外…18S～31S の間にほぼ等間隔で横断クラックが 9 本程度発生した 側壁上…外面のクラックから繋がるクラックが 8 本程発生した N側 側壁外…18N～31N の間に、ほぼ等間隔で横断クラックが 8 本程度発生した 側壁上…外面のクラックから繋がるクラックが 6 本発生した



付属 図-3.1 3ヒンジアーチ損傷図（初期軸力導入後）

2) 予備載荷①

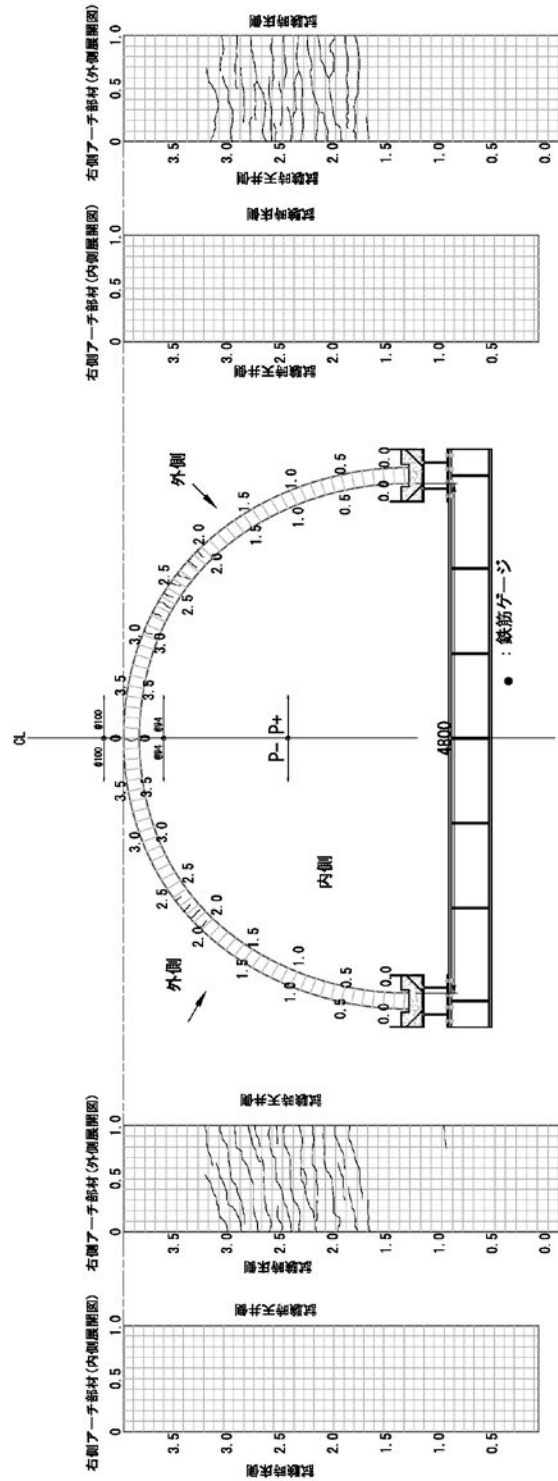
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±0.5 mm 予備載荷①	<p>S 側</p> <p>側壁外…32S 付近に新たなクラックが 1 本発生した他、既存クラックからの延進、枝分かれが 4 本ほど発生した</p> <p>側壁上…外面のクラックから繋がるクラックが 2 本増えた</p> <p>N 側</p> <p>側壁外…30N～32N 付近に新たなクラックが 3 本発生した他、既存クラックからの僅かな延進、枝分かれが 8 本ほど発生した</p> <p>側壁上…外面のクラックから繋がるクラックが 1 本増えた</p>



付属 図-3.2 3ヒンジアーチ損傷図（予備載荷±0.5 mm）

3) 予備載荷②

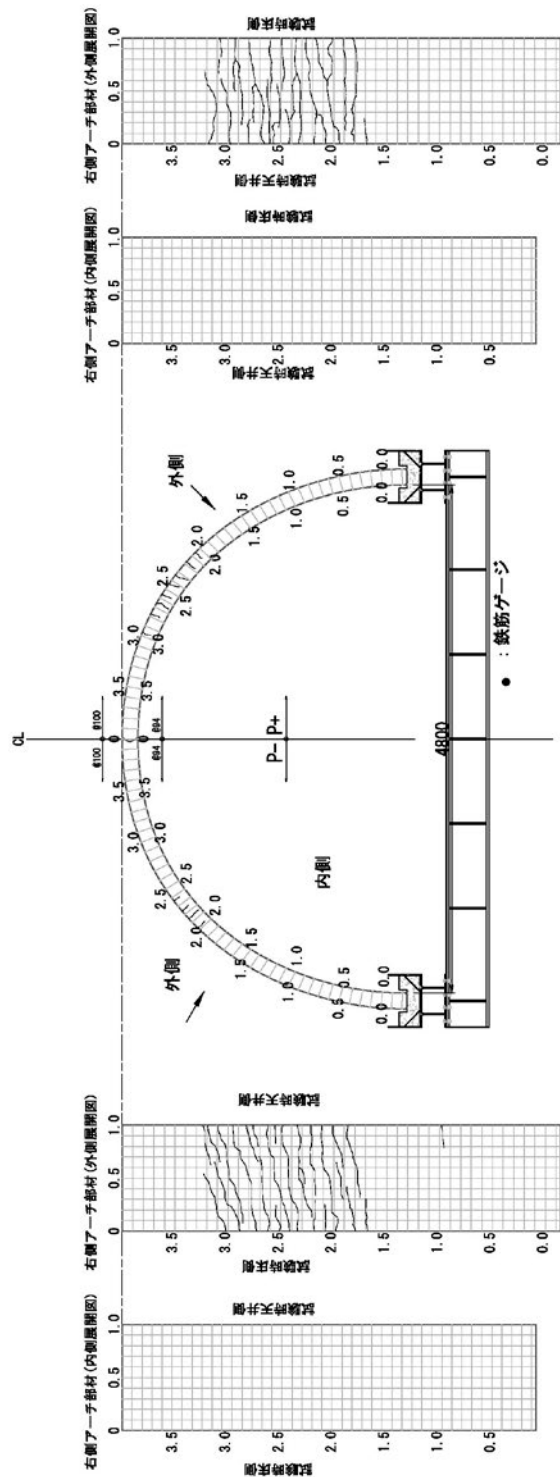
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±1.0mm 予備載荷②	<p>S 側 側壁外…17S 付近に新たなクラックが 1 本発生した他、18S～32S 間の既存クラックからの延進、枝分れが 5 本程増えた</p> <p>N 側 側壁外…9N、17N 付近に新たなクラックが 1 本ずつ発生したのみだった</p>



付属 図-3.3 3ヒンジャーチ損傷図 (予備載荷±1.0mm)

4) 予備載荷③

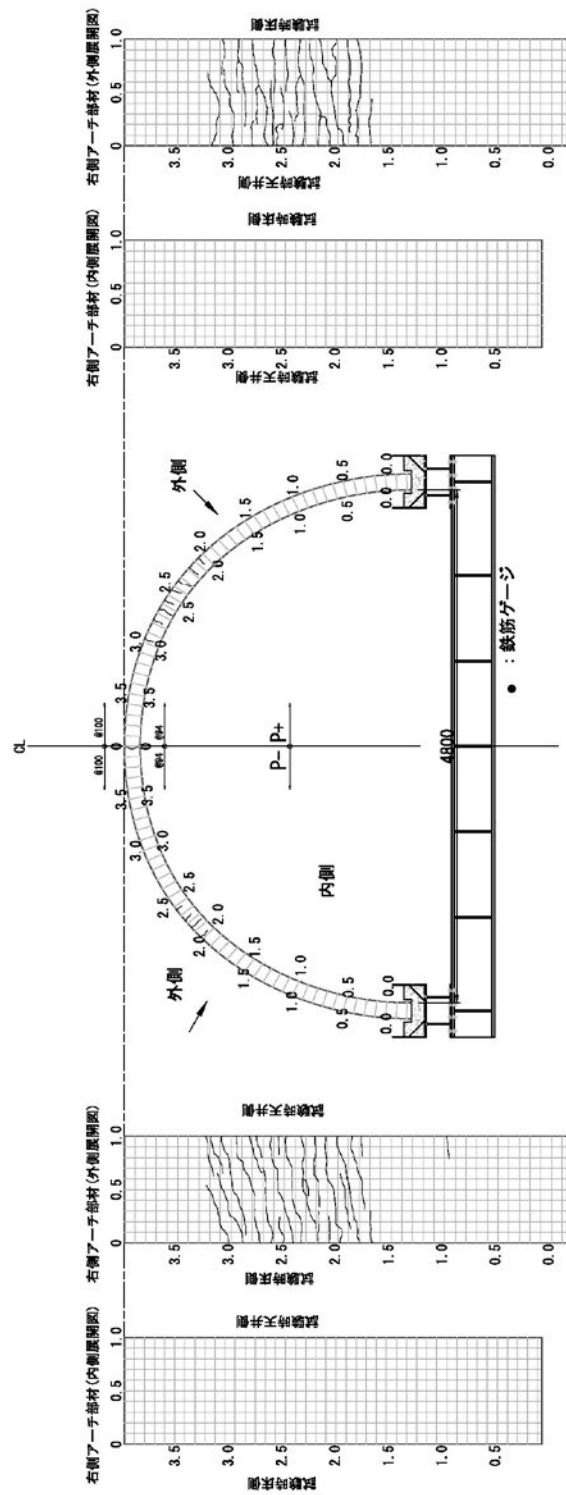
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±1.5 mm 予備載荷③	N側 側壁外…32N 付近に新たなクラックが1本発生した



付属 図-3.4 3ヒンジャーチ損傷図 (予備載荷±1.5 mm)

5) 予備載荷④

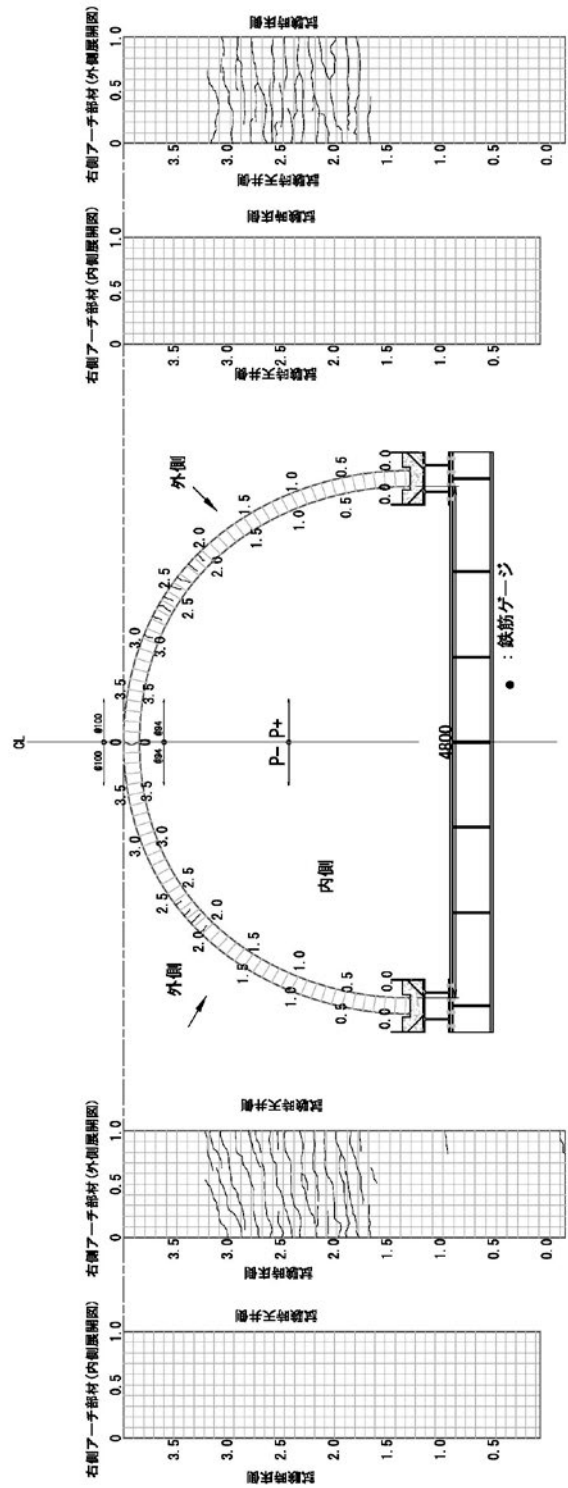
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±3.0 mm 予備載荷④	<p>S 側 側壁外…17S～32S 間の既存クラックからの延進、枝分れが 5 本程度増えた 側壁下…基部(ヒンジ部)に新たなクラックが 1 本発生した</p> <p>N 側 側壁外…17N～32N 間の既存クラックからの枝分れ、新クラックが 1 本ずつ増えた</p>



付属 図-3.5 3ヒンジャーチ損傷図 (予備載荷±3.0 mm)

6) 予備載荷⑤

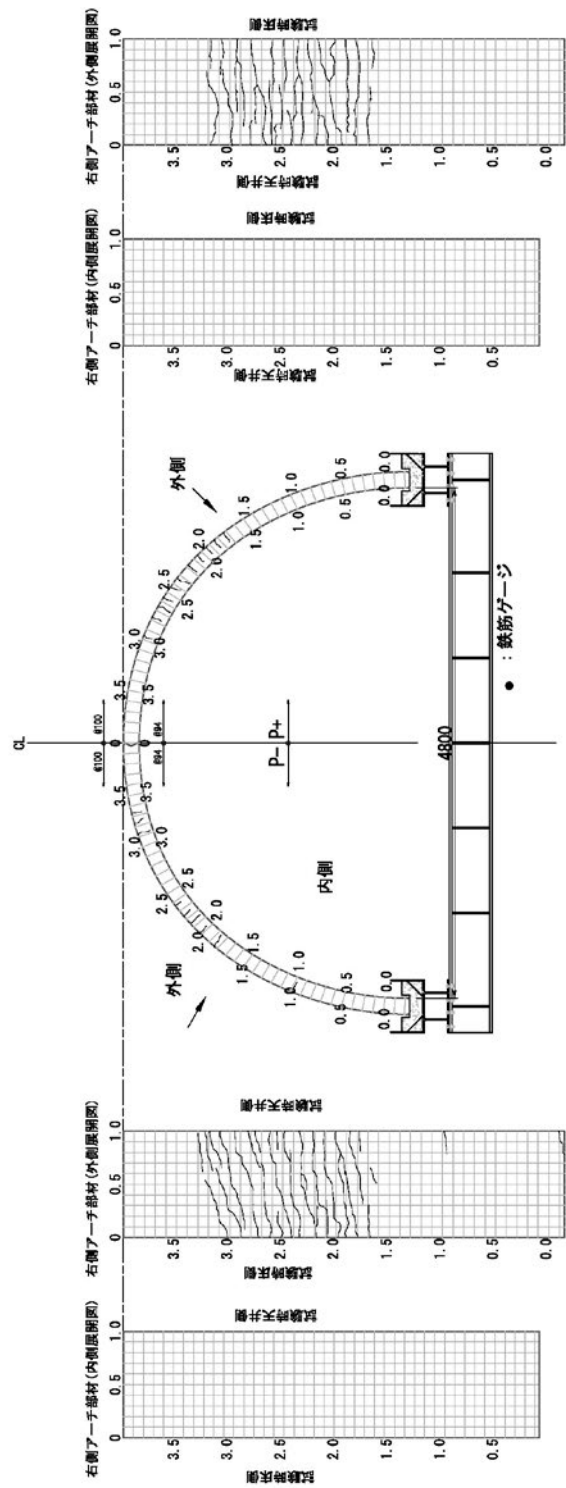
加振機 入力変位	損 傷 状 況
±6.0 mm 予備載荷⑤	<p>S 側 側壁外…29S 付近のクラックの延進が 2 本程度増えたのみだった</p> <p>N 側 側壁外…基部 1N 付近の上側に新たなクラックが 1 本発生した他、16N 付近にも新たなクラックが発生した</p>



付属 図-3.6 3ヒンジアーチ損傷図 (予備載荷±6.0 mm)

7) $1 \delta y$ ($\pm 7\text{mm}$)

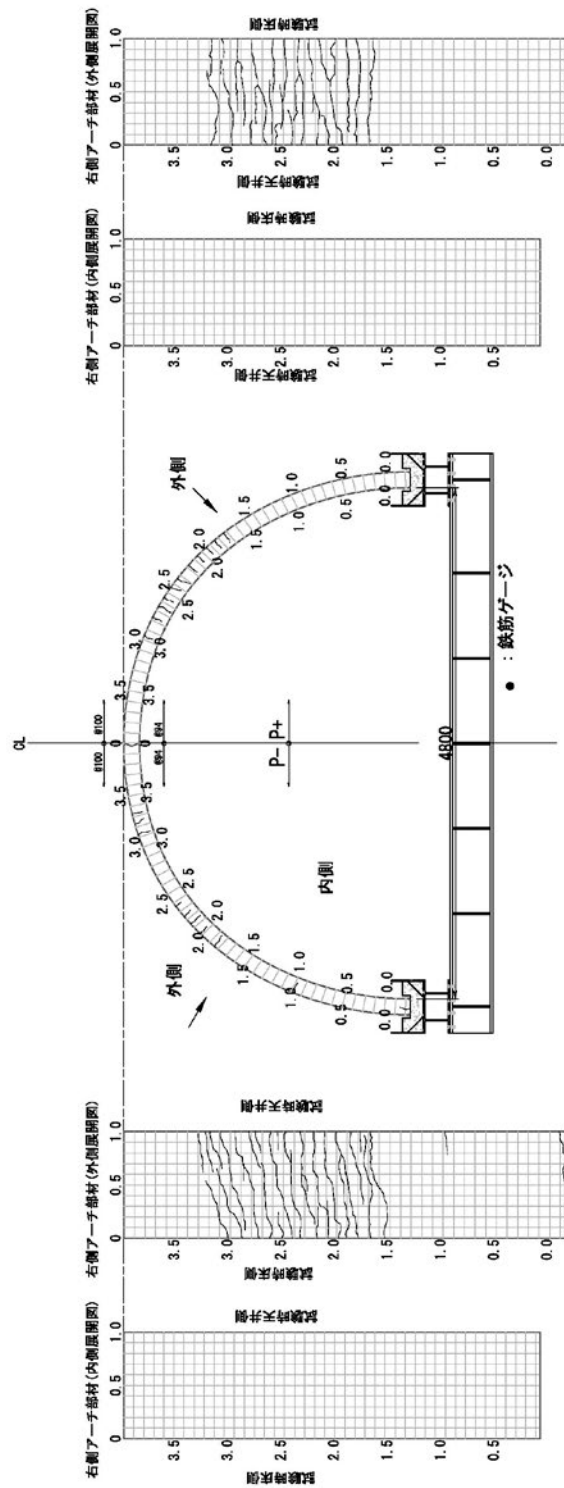
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$1 \delta y$ ($\pm 7\text{mm}$) 3 波	S 側 側壁外…基部 1S 付近の下側に新たなクラックが 1 本発生した他、17S 付近で 既存クラックの延進し、下面側から新たなクラックも発生した 側壁下…基部(ヒンジ部)にクラックが 1 本増えた N 側 側壁下…基部(ヒンジ部)に新たなクラックが 1 本発生した



付属 図-3.7 3ヒンジアーチ損傷図 (1δy)

8) $2\delta y$ ($\pm 14\text{mm}$)

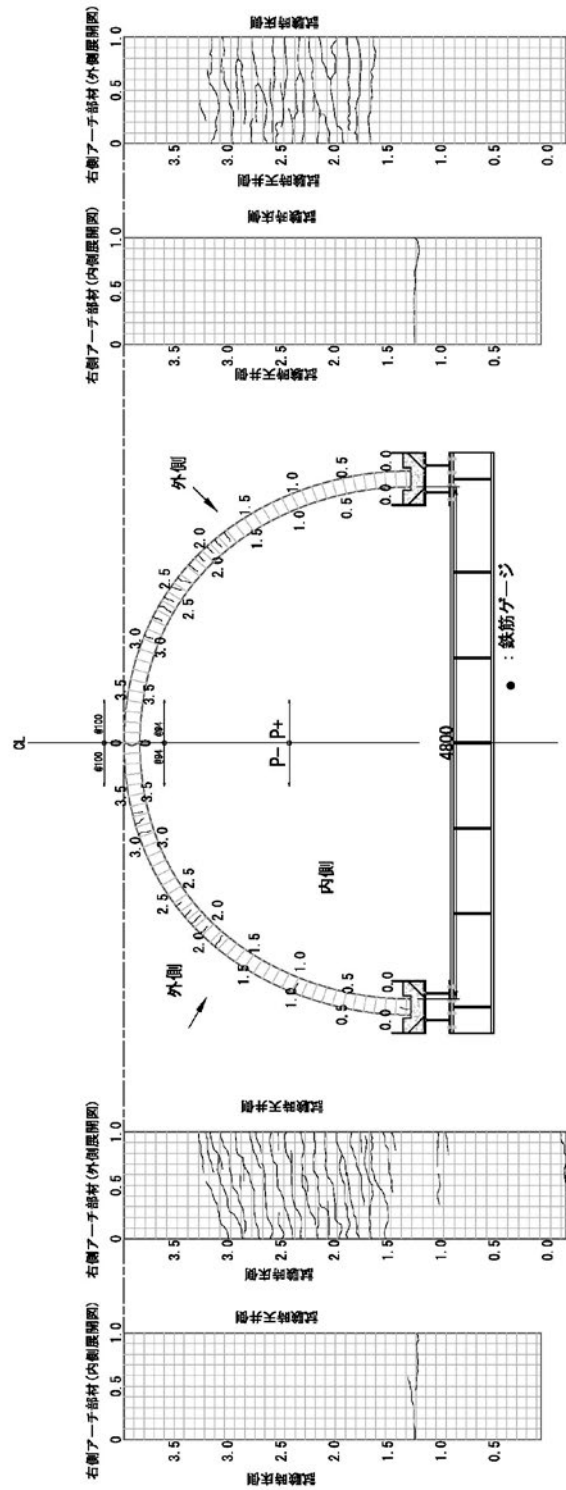
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$2\delta y$ ($\pm 14\text{mm}$) 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…17S付近のクラックが横断クラックに進展した他、20S～32S間で既存クラックからの延進、枝分れが3本程増えた</p> <p>側壁下…基部(ヒンジ部)にクラックが1本増えた</p> <p>N側</p> <p>側壁外…基部1N付近にクラックが1本増えた。また、14N水平加振機付近に新たなクラックが発生し、16N、17Nのクラックは横断クラックに進展した。その他、18N～30N間の既存クラックからの延進、枝分れが2本程度増えた</p> <p>側壁上…基部(ヒンジ部)に新たなクラックが1本発生した</p>



付属 図-3.8 3ヒンジアーチ損傷図 (2 δy)

9) $3\delta y$ ($\pm 21\text{mm}$)

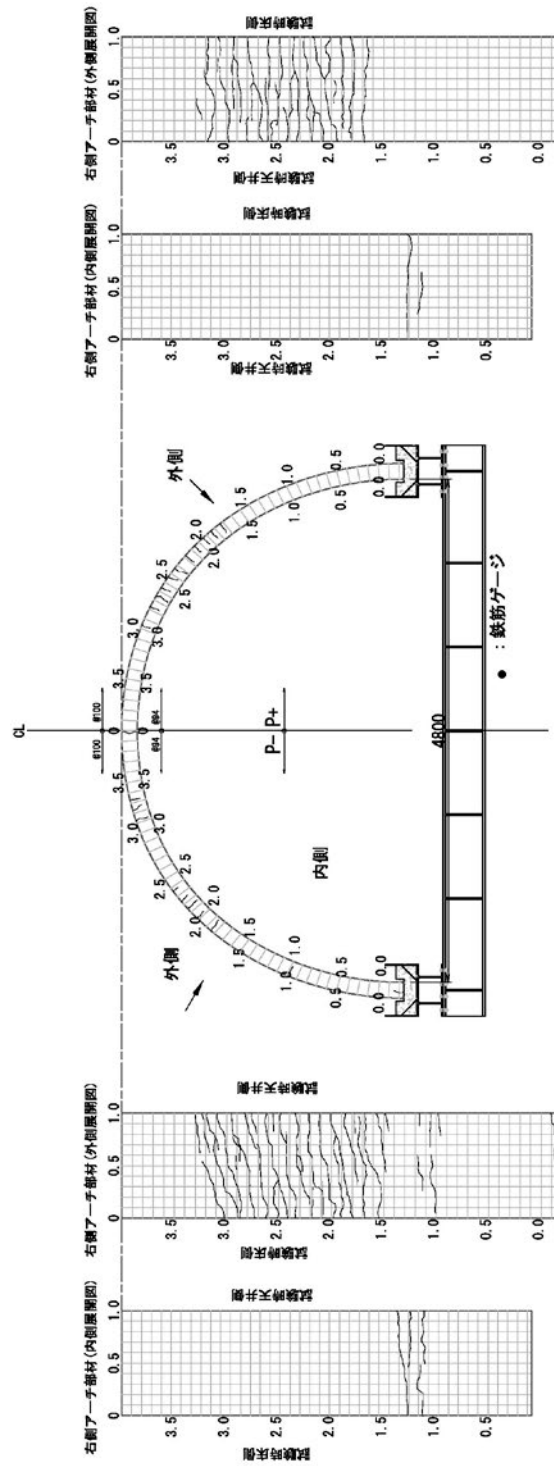
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$3\delta y$ ($\pm 21\text{mm}$) 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…33S 付近に新たなクラックが発生した</p> <p>側壁内…13S 付近に横断クラックが発生した</p> <p>側壁上…内面 13S の横断クラックから繋がるクラックが発生した</p> <p>側壁下…内面 13S の横断クラックから繋がるクラックが発生した</p> <p>N側</p> <p>側壁外…10N、15N 付近に新たなクラックが発生したほか、27N 付近の既存クラックが1本延進した</p> <p>側壁内…13N 付近に横断クラックが発生した</p> <p>側壁下…内面 13N の横断クラックから繋がるクラックが発生した</p>



付属 図-3.9 3 ヒンジアーチ損傷図 (3δy)

10) $4\delta y$ ($\pm 28\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$4\delta y$ $(\pm 28\text{mm})$ 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…22S～33S間で既存クラックからの延進、枝分れが5本程増えた</p> <p>側壁内…12S付近に新たなクラックが発生し、13S付近のクラック幅が 0.45mmに開いた</p> <p>側壁上…基部(ヒンジ部)にクラックが1本増えた他、13S付近のクラックが 延進した</p> <p>側壁下…基部(ヒンジ部)にクラックが1本増えた他、13S付近のクラックが 延進した</p> <p>N側</p> <p>側壁外…10N付近のクラックが横断クラックに進展し、12N水平加振機付近 に新たなクラックが発生した他、25N～33N間で既存クラックからの 延進、枝分れが4本程増えた</p> <p>側壁内…12N付近のクラックが横断クラックに進展し、13N付近のクラック 幅が0.2mmに開いた</p>



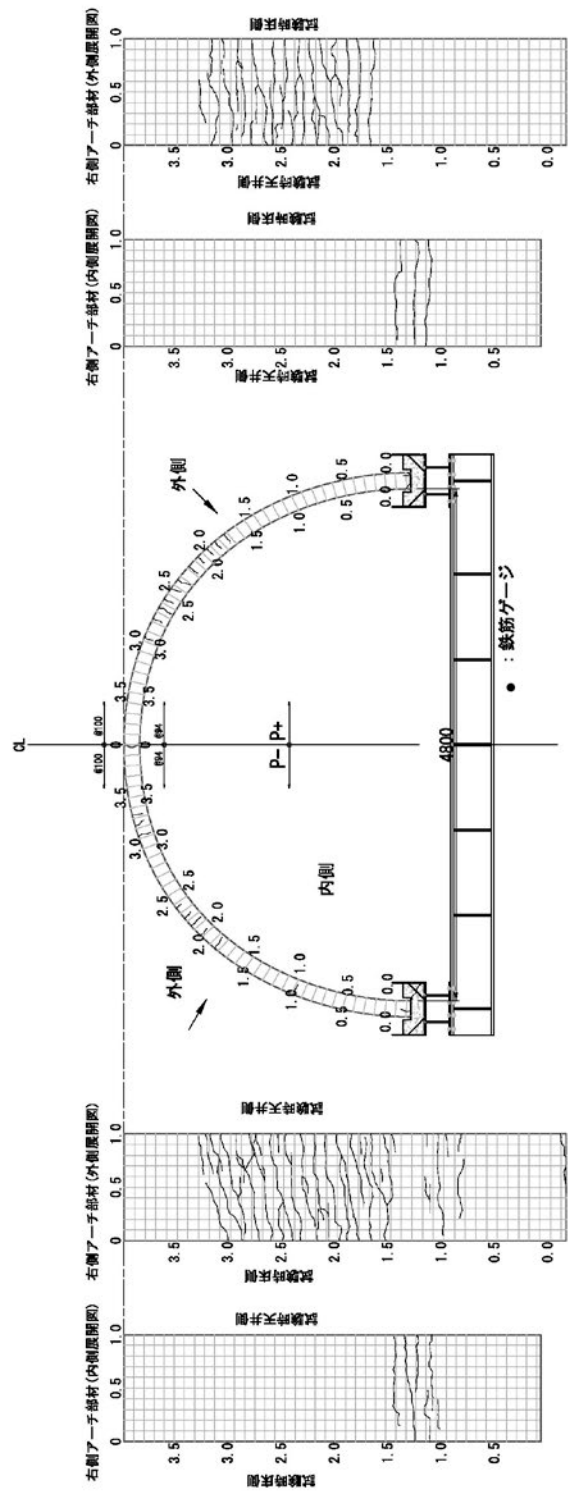
付属 図-3.10 3ヒンジアーチ損傷図 (4 δ_y)

11) $5 \delta y$ ($\pm 35\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$5 \delta y$ $(\pm 35\text{mm})$ 3 波	<p>S 側</p> <p>側壁外…20S～29S 間で既存クラックからの延進、枝分れが 3 本程増えた 側壁内…12S 付近のクラックが横断クラックに進展し、13S 付近のクラック幅が 0.65mm に開いた他、15S 付近に新たなクラックが発生した 側壁上…基部(ヒンジ部)のクラックが延進した他、12S 付近の内面横断クラックから繋がるクラックが発生した 側壁下…基部(ヒンジ部)にクラックが 1 本増えた他、13S 付近のクラックが延進した</p> <p>N 側</p> <p>側壁外…23N～28N 間で既存クラックからの延進、枝分れが 2 本程増えた 側壁内…11N～14N 付近で既存クラックからの延進、枝分れ 2 本程増え、15N 付近には新たなクラックが発生した 側壁上…基部定着コンクリートに新たなクラック(せん断)が 1 本発生した 側壁下…基部定着コンクリートに新たなクラック(せん断)が 1 本発生した</p>

12) $6\delta y$ ($\pm 42\text{mm}$)

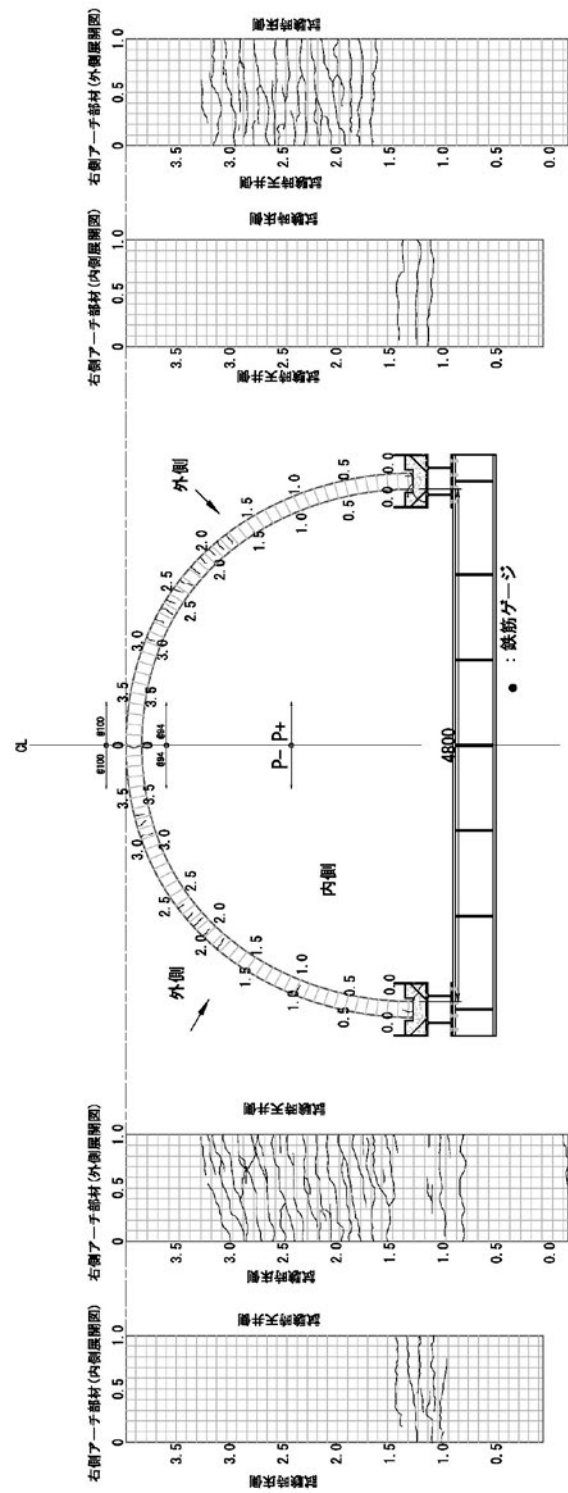
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$6\delta y$ $(\pm 42\text{mm})$ 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…11S、14Sに新たなクラックが発生した</p> <p>側壁内…13S付近のクラック幅が1.0mmに開いた他、15Sのクラックが横断クラックに進展した</p> <p>側壁上…基部(ヒンジ部)にクラックが2本増えた</p> <p>側壁下…基部(ヒンジ部)のクラック幅が開いた</p> <p>N側</p> <p>側壁外…基部1N付近、8N付近に新たなクラックが発生した</p> <p>側壁内…11N付近に新たなクラックが発生し、15N付近のクラックは横断クラックに進展した。また、13N付近のクラック幅が0.25mmに開いた</p> <p>側壁下…基部定着コンクリートのクラックが延進した</p>



付属 図-3.12 3ヒンジアーチ損傷図 (6 δy)

13) $7\delta y$ ($\pm 49\text{mm}$)

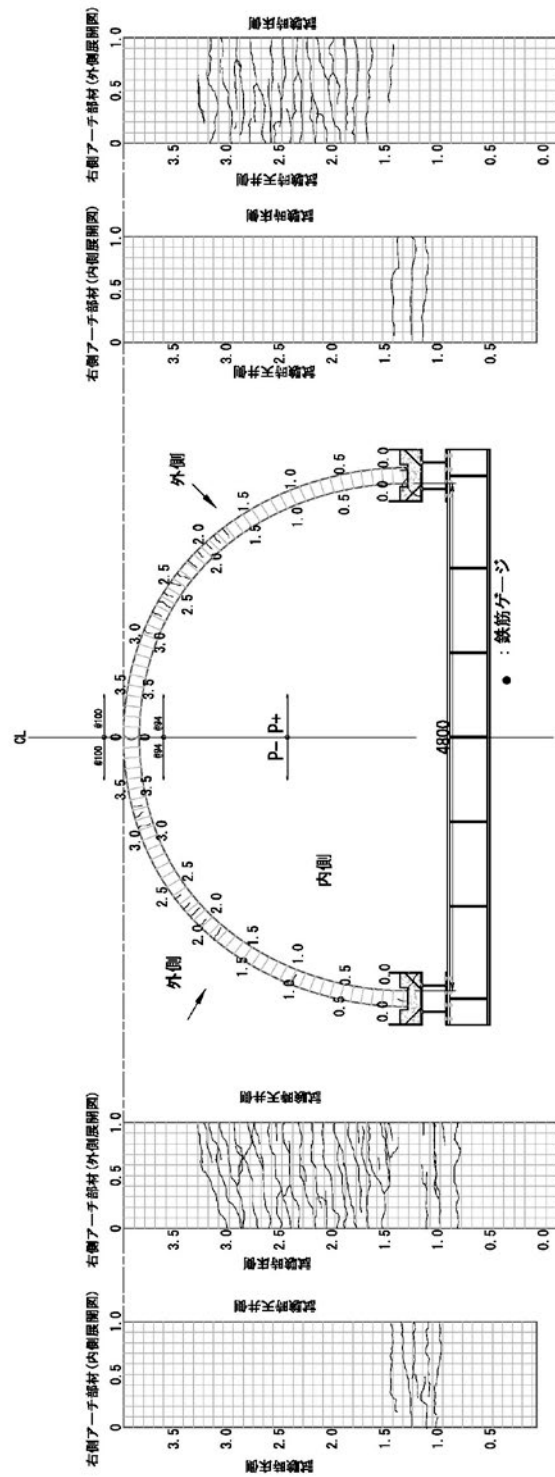
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$7\delta y$ ($\pm 49\text{mm}$) 3波	<p>S側</p> <p>側壁内…13S 付近のクラック幅が 1.5mm に開いた</p> <p>側壁上…基部(ヒンジ部)にクラックが 1 本増え、定着コンクリートに新たなクラック(せん断)が 1 本発生した</p> <p>側壁下…基部定着コンクリートに新たなクラック(せん断)が 2 本発生し、ヒンジ部のクラック幅が開いた</p> <p>N側</p> <p>側壁外…8N 付近のクラックが横断クラックに進展した</p> <p>側壁内…11N 付近のクラックが横断クラックに進展し、13N 付近のクラック幅が 0.3mm に開いた</p>



付属 図-3.13 3ヒンジアーチ損傷図 ($7\delta_y$)

14) $8\delta y$ ($\pm 56\text{mm}$)

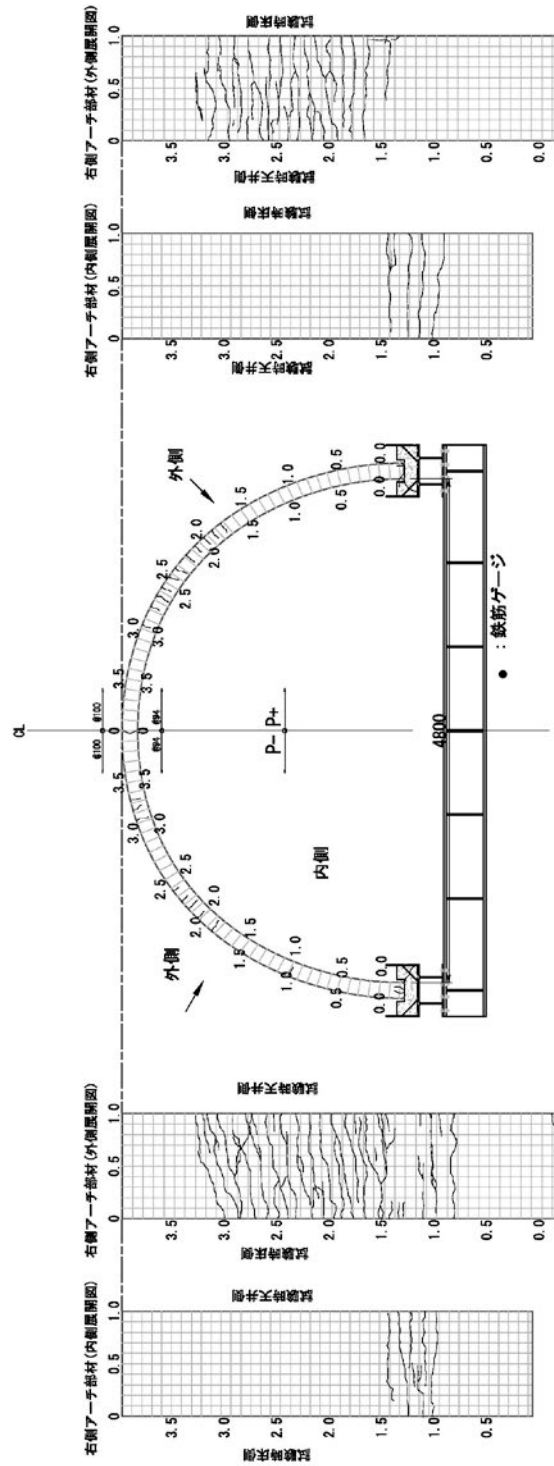
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$8\delta y$ ($\pm 56\text{mm}$) 3波	S側 側壁内…13S 付近のクラック幅が 1.8mm に開いた 側壁下…基部定着コンクリートのクラック(せん断)が延進した N側 側壁内…13N 付近のクラック幅が 0.4mm に開いた



付属 図-3.14 3ヒンジアーチ損傷図 (8 δy)

15) $9\delta y$ ($\pm 63\text{mm}$)

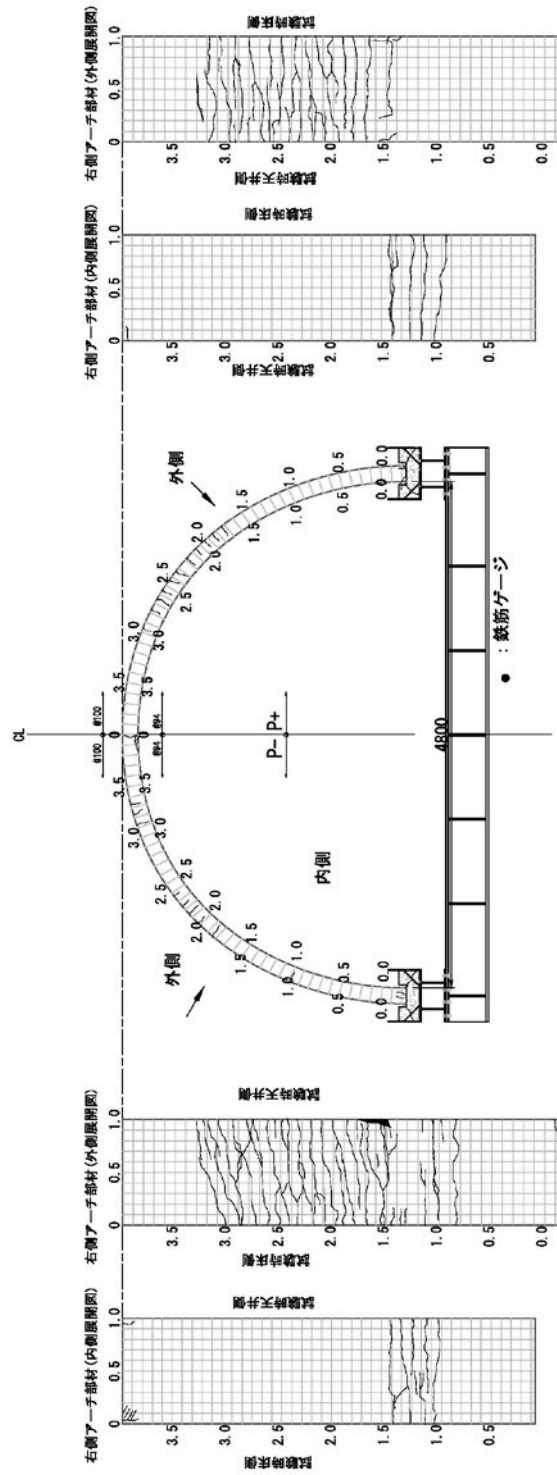
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$9\delta y$ ($\pm 63\text{mm}$) 3波	<p>S側</p> <p>側壁外…14S 荷点付近に浮きを伴うクラックが4本程発生した</p> <p>側壁内…10S 付近に横断クラックが発生し、12S 付近の既存クラックでは一部剥離が生じ始めた。また、13S 付近のクラック幅が3.0mmに開いた</p> <p>N側</p> <p>側壁外…14N 荷点付近に浮きを伴うクラックが4本程発生した</p> <p>側壁内…13N 付近のクラック幅が0.6mmに開き、一部剥離が生じはじめた</p>



付属 図-3.15 3ヒンジアーチ損傷図 (9 δ y)

16) $10 \delta y$ ($\pm 70\text{mm}$)

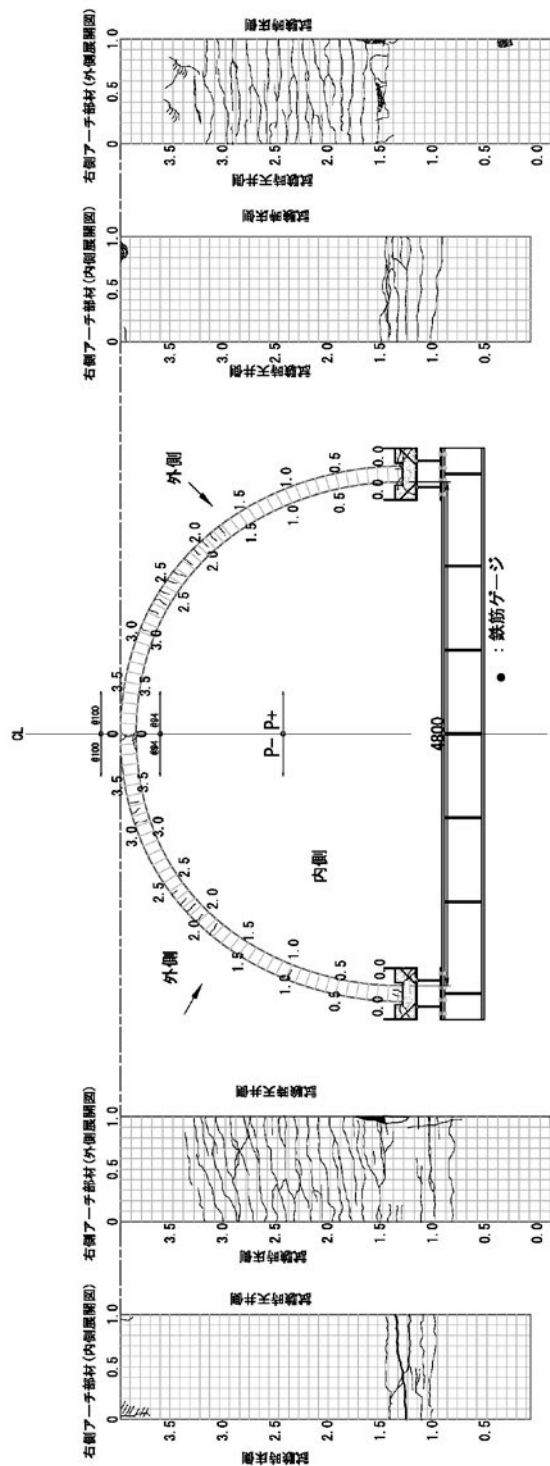
加振機 入力変位	損 傷 状 況
$10 \delta y$ $(\pm 70\text{mm})$ 3 波	<p>S 側</p> <p>側壁外…14S 荷点付近に剥落が生じた</p> <p>側壁内…10～15S 付近のクラック幅が全体的に開き、特に 15S 付近には剥離・剥落が生じた</p> <p>側壁上…基部定着部に隙間が広がり、定着コンクリートに新たなクラック（せん断）が発生した</p> <p>側壁下…基部定着コンクリートに新たなクラック（せん断）が発生し、浮きも生じた</p> <p>N 側</p> <p>側壁外…14N 荷点付近に剥落が生じた</p> <p>側壁内…10～15N 付近に浮き・剥離が生じた</p> <p>側壁上…基部定着コンクリートに新たなクラック（せん断）が発生した</p> <p>側壁下…基部定着コンクリートに新たなクラック（せん断）が発生した</p> <p>※頂部ヒンジ部にもクラック生じ、4mm のずれも生じた</p>



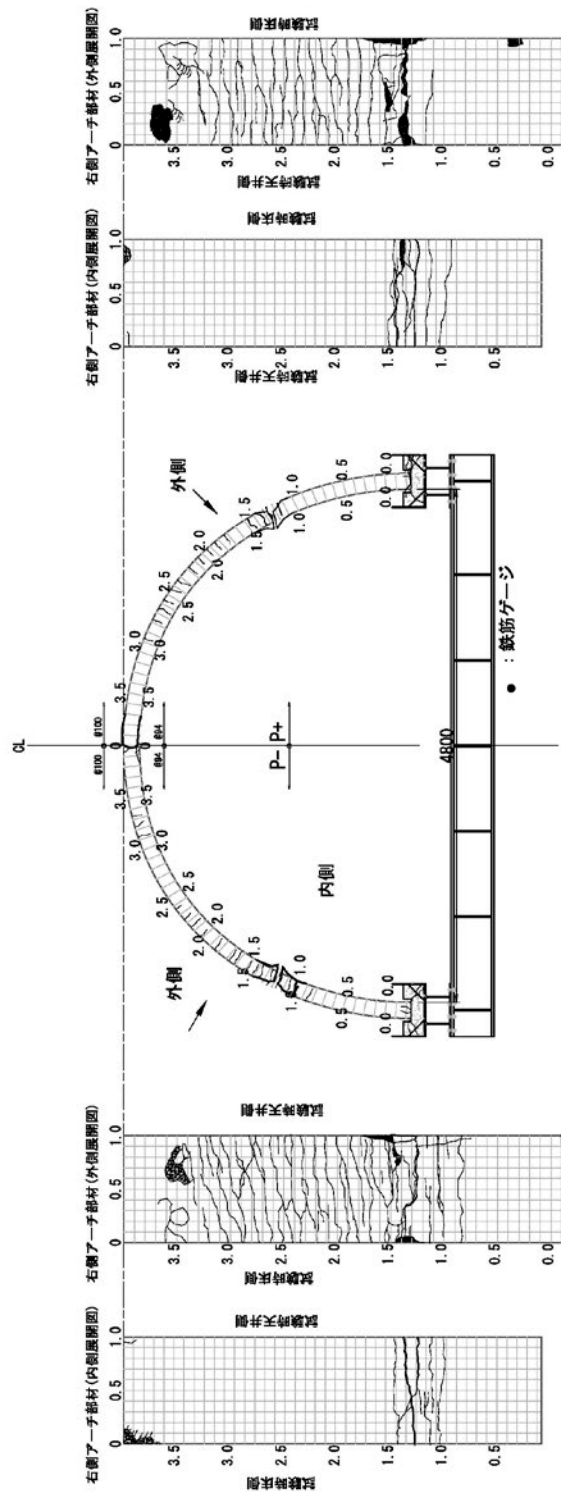
付属 図-3.16 3ヒンジアーチ損傷図 (10 δy)

17) $11 \delta y$ ($\pm 77\text{mm}$)

加振機 入力変位	損 傷 状 況
$11 \delta y$ ($\pm 77\text{mm}$) 1 波	<p>S 側</p> <p>側壁外…14S 荷点付近に著しい浮き・剥落が生じた</p> <p>側壁内…10～15S 付近に著しい浮き・剥落が生じ、コンクリートがはらみ出た</p> <p>側壁上…基部の定着が完全に剥れた</p> <p>側壁下…基部の定着が完全に剥れ、剥落も生じた</p> <p>N 側</p> <p>側壁外…14N 荷点付近に著しい浮き・剥落が生じた</p> <p>側壁内…10～15N 付近に著しい浮き・剥落が生じ、コンクリートがはらみ出た</p> <p>側壁上…基部の定着が完全に剥れた</p> <p>側壁下…基部の定着が完全に剥れ、剥落も生じた</p> <p>実験終了</p>



付属 図-3.17 3 ヒンジアーチ損傷図 (11 δ y)



付属 図-3.18 3ヒンジアーチ損傷図（載荷終了状況）

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.492 September 2017

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754