ＩＳＳＮ　0386－5878
共同研究報告書 第275号

共同研究報告書

トンネル覆工の薄肉化に関する
共同研究報告書

平成13年３月

国土交通省土木研究所
道路部トンネル研究室
日本道路公団試験研究所
道路研究部トンネル研究室

Copyright © (2001) 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 Director General of P.W.R.I.

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

共同研究報告書
第275号　2001年3月

トンネル覆工の薄肉化に関する共同研究報告書

国土交通省土木研究所道路部
トンネル研究室　室長　真下英人
研究員　砂金伸治

日本道路公団試験研究所道路研究部
トンネル研究室　室長　城間博通
馬場弘二

要旨

現在の覆工は、供用性に関する機能や不確定要素に対する機能、そして力学的機能といった種々の機能を考慮して設計や施工が行われている。覆工の力学的な特性を明らかにすると同時に、新たな材料を覆工に導入することにより、薄肉化を図った一層合理的な覆工の構造の提案ができ、コストの縮減と耐久性の向上を図ることが可能であると考えられる。

本研究では、覆工の設計手法を確立するための力学的特性に関する基礎データを得るためにトンネル覆工載荷実験を実施した。その結果、覆工に最初にひび割れが発生した荷重と最終的な破壊に至る場合の荷重の差は大きいこと、鋼繊維補強コンクリートの覆工への使用はコンクリート片の剥落防止に有用であることに加えて、曲げモーメントが卓越するような荷重条件では覆工の耐荷力が増加することが分かった。

キーワード：トンネル、覆工、載荷実験、ひび割れ、耐荷力

目　次

1. まえがき …… 1
2. トンネル覆工載荷実験 …… 2
2.1 トンネル覆工載荷実験装置 …… 2
2.1.1 載荷ピット …… 2
(1) 形状 …… 2
(2) 最大試験可能径 …… 2
(3) 油圧ジャッキの設置位置 …… 2
2.1.2 載荷実験装置の仕様 …… 2
(1) 設備仕様 …… 2
(2) ジャッキの制御方法 …… 3
(3) 載荷板および支承 …… 3
2.2 実験条件 …… 4
2.2.1 検討項目 …… 4
2.2.2 覆工に作用する荷重状態 …… 5
(1) 載荷形式Ａ …… 5
(2) 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ’ …… 6
(3) 載荷形式Ｃ …… 7
2.2.3 覆工の厚さ・強度・使用材料 …… 7
2.2.4 供試体諸元 …… 7
2.3 実験の準備 …… 9
2.3.1 供試体の作成および設置 …… 9
(1) 型枠 …… 9
(2) コンクリート打設および養生 …… 9
(3) 供試体の設置 …… 9
2.3.2 管理供試体 …… 9
2.3.3 計測項目 …… 9
2.4 実験結果 …… 13
2.4.1 管理供試体試験結果 …… 13
2.4.2 載荷形式Ａの結果 …… 15
(1) 荷重と変位の関係 …… 15
(2) 破壊状況とひび割れ …… 17
(3) ひずみの変化 …… 29
(4) ジャッキ反力とジャッキストロークの関係 …… 35

(5) 断面力 …… 40
2.4.3 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'の結果 …… 44
(1) 荷重と変位の関係 …… 44
(2) 破壊状況とひび割れ …… 47
(3) ひずみの変化 …… 68
(4) ジャッキ反力とジャッキストロークの関係 …… 74
(5) 断面力 …… 79
2.4.4 載荷形式Ｃの結果 …… 82
(1) 荷重と変位の関係 …… 82
(2) 破壊状況とひび割れ …… 82
(3) ひずみの変化 …… 87
(4) 断面力 …… 87
2.4.5 実験結果のまとめ …… 92
3. 解析結果との比較 …… 94
3.1 解析手法 …… 94
3.2 断面耐力曲線 …… 100
3.2.1 プレーンコンクリートの断面耐力曲線 …… 100
3.2.2 繊維補強コンクリートの断面耐力曲線 …… 103
3.3 解析結果 …… 106
3.3.1 載荷形式Ａによる各ケースの解析結果 …… 106
(1) ケース A-1 の結果 …… 106
(2) ケース A-2 の結果 …… 106
(3) ケース A-3 の結果 …… 107
(4) 載荷形式Ａの解析結果のまとめ …… 107
3.3.2 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'による各ケースの解析結果 …… 112
(1) ケース B-1 の結果 …… 112
(2) ケース B-2 の結果 …… 113
(3) ケース B-3 の結果 …… 113
(4) ケース B-4 の結果 …… 114
(5) ケース B'-1 の結果 …… 114
(6) 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'の解析結果のまとめ …… 115
3.3.3 載荷形式Ｃによる各ケースの解析結果 …… 126
(1) ケース C-1 の結果 …… 126
(2) ケース C-2 の結果 …… 126
3.4 解析結果のまとめ …… 126

4. 結論と今後の課題 …… 131

参考文献 …… 133
謝辞 …… 134

参考資料 …… 135
1. 各断面の荷重－ひずみデータ …… 135
2. 各ケースの材料試験結果 …… 196

1．まえがき

近年の道路交通の発展に伴い、道路トンネルの建設箇所が増加してきている。それと同時に、サービスの向上を目的とした道路トンネルの大断面化・偏平断面化が進みつつあり、トンネル建設におけるコスト縮減は早急に取り組むべき課題となっている。

道路トンネルの建設費のコスト縮減を考える場合、施工前や施工中における客観的な地山評価方法の確立が考えられ、またトンネル支保構造の特性を解明することによる地山に応じた適切な支保構造の構築が考えられる。特に後者では、吹付けコンクリートやロックボルトといった 1 次支保部材、また覆工といった 2 次支保部材の両者で合理的で経済的な構造とすることによってコストの縮減方法があると考えられる。

そのうち、2 次支保部材であるトンネル覆工は期待される機能として種々のものが考えられる。例えば、耐火に挙げられる防災に関する機能や、トンネル内の漏水に対する防水の機能、長年に渡って何らかの不明確な外的条件に対する構造自体への安全性を付与するための機能、さらに地山条件によっては覆工自体に外力を支持させる機能を併せ持たせるといったことが挙げられる。このように、覆工自体には種々の機能が組み合わされ、またレンガ積みでトンネルの建設を行っていた時代からの経験や、過去の実績に基づき設計や施工が行われてきた。そのため、覆工について地山条件を加味しつつ、力学的な特性を明らかにすることが適切な覆工構造を提案できる第一歩であると考えられる。

また、覆工の力学的な特性を踏まえた上で、例えば既存の覆工よりも強度の高いコンクリートや鋼繊維で補強したコンクリートといった新たな材料を覆工に導入することにより、地山等の条件によっては覆工の薄肉化を行うことが出来ると考えられ、それに伴い材料費および工事費等の削減が可能となることに加え、覆工の耐久性の向上を図ることが可能となると考えられる。

本研究ではトンネル覆工の設計手法を確立するための基礎的研究として、覆工に使用する材料を考慮した場合、および荷重の条件が覆工の力学的な特性に与える影響を検討するために覆工載荷実験を行い検証することとした。また、実験結果を踏まえて、覆工の持つ力学的な特性を地山条件、および覆工の構造系の変化を加味した簡単な数値解析を行い、実験結果の妥当性を検証した。

2．トンネル覆工載荷実験

2.1　トンネル覆工載荷実験装置

国土交通省土木研究所内にある構造力学実験施設において、トンネル研究室の保有するトンネル覆工載荷実験装置を用いて実験を行った。本節では実験を行う際に用いた実験装置について説明する。

2.1.1　載荷ピット

載荷ピットを含むトンネル覆工載荷実験装置の全景は写真-2.1 に示すとおりである。

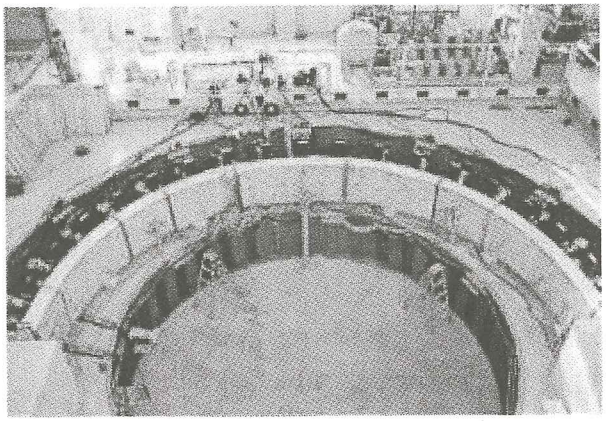


写真-2.1　トンネル覆工載荷実験装置の全景

(1)形状

載荷ピットは上下 2 段の構造で、上段で半円形供試体、下段で円形供試体の載荷試験が可能である。ピット全体の大きさは 10m×13m で、深さは 3.5m である。本実験では半円形の上段部を用いて載荷実験を実施した。

(2)最大試験可能径

上段部の半円形ピットにおける供試体の最大試験可能外径は 10m である。なお、荷重計等の設置状況や試験時に必要なジャッキストロークを確保するために、試験可能な外径は 10m より小さくなることがある。内径は、反力壁の設置位置および下段のピットの位置より 9.0m 以上で試験が可能である。

(3)油圧ジャッキの設置位置

油圧ジャッキはピット内の反力板にねじ止めで取り付ける構造である。反力板の高さは 100cm であり、1 断面当たり 2 台のジャッキを設置できる。反力板の位置は上段部のピットでは 10 度ピッチで 17 断面に設置できる。

2.1.2　載荷実験装置の仕様

(1)設備仕様

写真-2.2 に反力板と油圧ジャッキ、また写真-2.3 に油圧源を示す。油圧源は油圧ジャッキに油圧を送るために用いられる。また表-2.1 に載荷実験装置の設備仕様を示す。

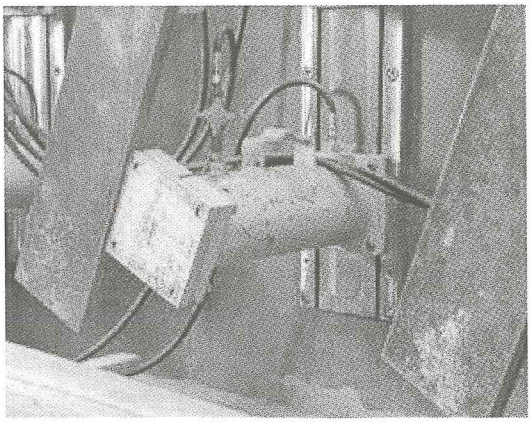


写真-2.2　反力板と油圧ジャッキ

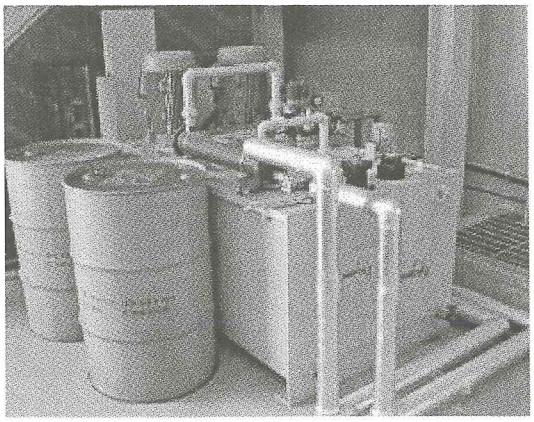


写真-2.3　油圧源

表-2.1　載荷実験装置の設備仕様

設備名	構成部品	仕様・内容
油圧ユニット	油圧ユニット	使用圧力：最大 35Mpa
	油圧配管	油圧源～サーボ弁マニホールド間：高圧用鋼管 サーボ弁マニホールド～油圧ジャッキ間：高圧ゴムホース
	サーボ弁	使用油圧：最大 35Mpa
	サーボ弁マニホールド	入出口配管：鋼管接続 分岐数：最大 6 系統
油圧ジャッキ	油圧ジャッキ	両動型 500kN×300mm(st)×36 台 ピストン径：125mm ピストン面積：122.7cm^2
制御装置	制御装置	制御方式：電気油圧サーボ式 制御範囲：0～100%(0～35MPa) 制御量：0～100%の整数値以内 制御精度：±1%以内

使用圧力の最大値が 35MPa であり、ピストン本体の断面積が 122.7cm^2 であることから、これらを乗じた約 430kN がジャッキ 1 本の載荷可能な最大荷重となる。上段部のピットを用いた実験では、ジャッキは 10 度ピッチの 17 断面で 1 断面あたり 2 台設置、すなわちする場合は 34 台のジャッキを使用する。

(2)ジャッキの制御方法

ジャッキ 6 台を 1 ポートで制御、合計 6 ポートで荷重を制御する構造で、1 ポート 6 ジャッキのすべてを使用しない場合は該当ジャッキのバルブを閉じることや、ジャッキを取り外すことで対応する。

また、本研究では後述する載荷形式により載荷を行ったが、その中で変位を制御する実験ケースがある。この場合は載荷に必要とされるジャッキを変位で制御が可能な装置に付け替えることにより実験を実施している。

(3)載荷板および支承

写真-2.4 に載荷板を示す。実際にはジャッキによる載荷では頭部からの点載荷と見なすことになるが、それを実際の地山の条件である面載荷の状態に近づけるために、ストローク等を考慮した結果、高さ 1000mm、幅 300mm、厚さ 30mm の鋼板を供試体とジャッキの間に挟み、載荷を行うこととした。

写真-2.5 に支承を示す。変位を固定、曲げモーメントを自由とする支承である。

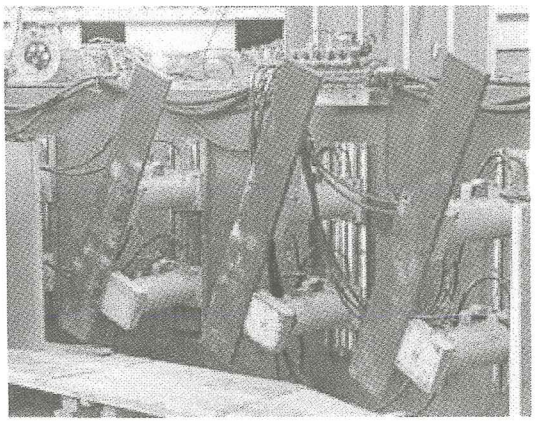


写真-2.4　載荷板

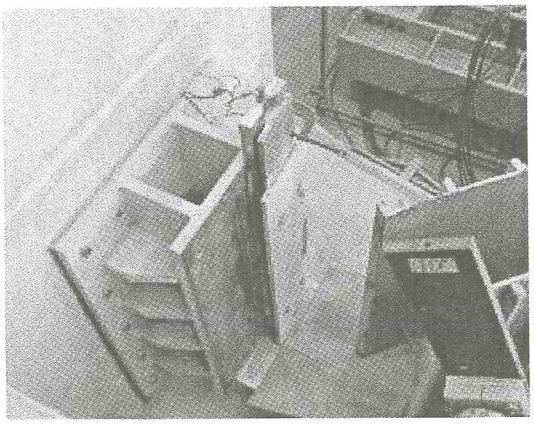


写真-2.5　支承

2.2　実験条件

本節ではトンネル覆工の設計手法を確立するために、覆工に使用する材料、荷重条件、供試体諸元を考慮した場合の実験を通し、覆工の力学的特性を把握することとした。本節では実験条件について述べる。

2.2.1　検討項目

従来の道路トンネルの覆工は施工地域によって若干の差違があるものの、道路トンネル技術基準(構造編)・同解説に基づき、表-2.2 に示す配合を基本として設計・施工が行われている。

表-2.2　現在の道路トンネルの覆工材料諸元(通常部)

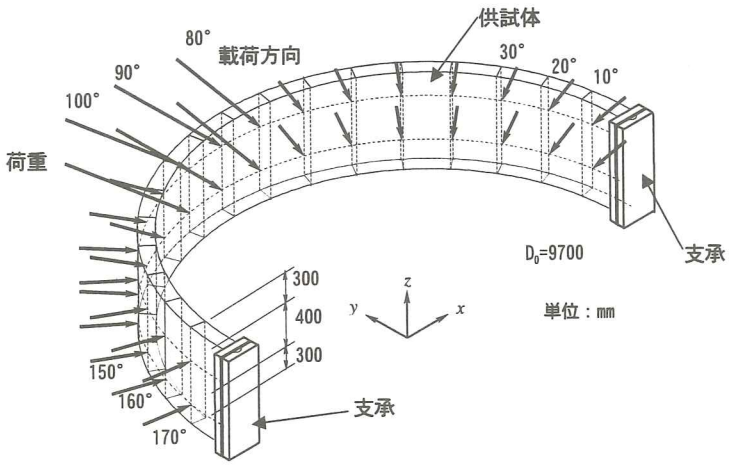
覆工厚 (cm)	セメントの種類	σ_c (N/mm^2)	C (kg/m^3)	スランプ (機械) (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)
30	普通/高炉	18 以上	270 程度	12～15	4 程度	60 以下	40 以下

これを踏まえ、実験では、表-2.3 の①～④に示したパラメータに関して検討を行った。

表-2.3　支配パラメータ

パラメータ	数値および形態	その他
①覆工に作用する荷重状態	A)　軸力が卓越する荷重 B)　曲げモーメントが卓越する荷重 C)　全断面で圧縮状態となる荷重	・荷重は面載荷または面載荷に近い状態を基本とする
②覆工の厚さ	A)　20cm B)　30cm	
③覆工の強度	A)　18N/mm² B)　13.5N/mm²	・粗骨材最大寸法、W/C も付随的に決定される ・B)は、A)の強度で実験を実施した場合、供試体が破壊しないことが予想されたため、最終状態を把握するために強度を下げて実験を実施した場合に使用する
④覆工に使用する材料	A)　プレーンコンクリート B)　鋼繊維補強コンクリート C)　樹脂繊維補強コンクリート	

また、図-2.1 に実験に使用した供試体の概要図を示す。供試体は 2 車線断面トンネルを模擬した形で半円形で、外径は 9.7m である。供試体は図-2.1 に示すように設置し、トンネル中心方向に載荷した。また、荷重の載荷位置やひび割れの発生等について説明を加えるため、図-2.1 に示すように座標系を設定した。すなわち、トンネル覆工を内面側から見て、右側の脚部を 0 度、天端部を 90 度、左側の脚部を 180 度とした。



図－2.1　覆工供試体の概要図

2.2.2　覆工に作用する荷重状態

実験では荷重状態を 4 通り定義した。定義された荷重状態は「載荷形式」と称することとし、それぞれ載荷形式Ａ、載荷形式Ｂ、載荷形式Ｂ’および載荷形式Ｃと定義した。以下にその内容を記す。

(1) 載荷形式Ａ

図-2.2 に載荷形式Ａのイメージを示す。載荷形式Ａは山岳トンネルにおいて、長期の緩みに起因するような上部からの荷重等に代表される緩み荷重が作用したと想定される場合で、全体的に軸力の影響が大きく表れ、覆工の肩部分の一部で曲げモーメントが集中して発生する載荷形式である。

載荷は図-2.1 の座標系において、10 度ピッチの 17 断面で、20kN/本の荷重を全ジャッキより作用させ軸力を導入した後、80～100 度部分のジャッキのみで載荷を継続し、残りはジャッキのバルブを閉めることによりジャッキ自体を地盤反力ばねに模擬した。載荷は供試体の下部より 30cm と 70cm にジャッキ中心部が配置されるように、1 断面に 2 本のジャッキを設置し、供試体が破壊に達するまで継続した。表-2.4 に載荷形式Ａの載荷の過程を示す。

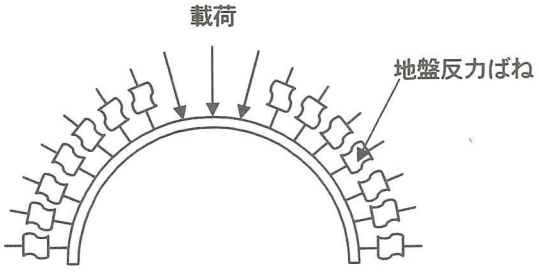


図-2.2　載荷形式Ａのイメージ

表-2.4　載荷の過程（載荷形式Ａ）

載荷ステップ	使用ジャッキ	載荷目標値 (kN/本)
1	10～170 度	5
2	10～170 度	10
3	10～170 度	15
4	10～170 度	20
5～	80～100 度	5 毎継続

(2) 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'

図-2.3 に載荷形式Ｂおよび載荷形式Ｂ'のイメージを示す。これらは覆工の天端および肩部背面に空洞が発生した状態で上部から荷重が作用したと想定される場合で、肩部で曲げの影響が大きく現れる形式である。

載荷は図-2.1 の座標系において、10～40 度、90 度および 140～170 度の 9 断面で行った。載荷形式Ｂと載荷形式Ｂ'の違いは、ジャッキは同一角度の部分を用いたが、供試体の厚さにより軸力導入の過程を変えたものである。表-2.5 (a) ～ (b) に載荷形式Ｂと載荷形式Ｂ'の載荷の過程を示す。ジャッキは載荷形式Ａの場合と同様の配置とした。載荷は載荷可能な最大荷重を越えたと判断できるまで継続し、軸力導入後はジャッキのバルブを閉めることにより 10～40 度および 140～170 度のジャッキ自体を地盤反力ばねに模擬した。

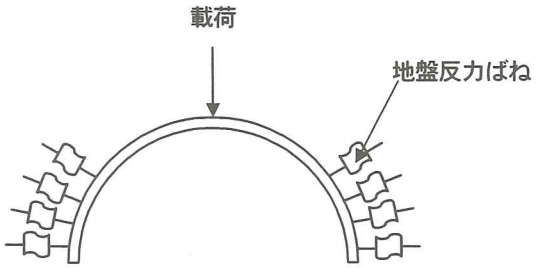


図-2.3　載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'のイメージ

表-2.5 (a)　載荷の過程 (載荷形式Ｂ)

載荷ステップ	使用ジャッキ	載荷目標値 (kN/本)
1	90 度	5
2	10 度、170 度	5
3	90 度	15
4	10 度、170 度	10
5	90 度	20
6	20 度、30 度、150 度、160 度	2.5
7	90 度	22.5
8	20 度、30 度、150 度、160 度	5
9	90 度	25
10	20 度、30 度、150 度、160 度	7.5
11	90 度	27.5
12	20 度、30 度、150 度、160 度	10
13	90 度	30
14	90 度	32.5
15	40 度、140 度	2.5
16	90 度	35
17	40 度、140 度	5
18	90 度	37.5
19	40 度、140 度	7.5
20	90 度	40
21	40 度、140 度	10
22～	90 度	変位制御

表-2.5 (b)　載荷の過程 (載荷形式Ｂ')

載荷ステップ	使用ジャッキ	載荷目標値 (kN/本)
1	90 度	4
2	10 度、170 度	4
3	20 度、30 度、150 度、160 度	4
4	10 度、170 度	8
5	40 度、140 度	4
6	90 度	16
7～	90 度	変位制御

(3) 載荷形式C

図-2.4 に載荷形式Cのイメージを示す。載荷形式Cはトンネルに等方的に土圧が作用することを想定した場合で、全周から同一の荷重が作用し、全断面で圧縮となり、圧縮破壊を招くと考えられる。図-2.1 の座標系において、10～170 度の 17 断面のジャッキを用いて載荷を行った。表-2.6 に載荷形式Cの載荷の過程を示す。

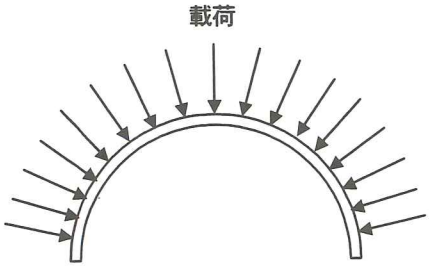


図-2.4 載荷形式Cのイメージ

表-2.6 載荷の過程(載荷形式C)

載荷ステップ	使用ジャッキ	載荷目標値(kN/本)
1	10～170 度	5 毎継続

2.2.3 覆工の厚さ・強度・使用材料

覆工の厚さは現状の 2 車線程度のトンネルでは 30cm が標準である。本研究では、30cm の場合の実験に加え、覆工の薄肉化を検討する目的で厚さを 20cm とした場合の実験を行った。

覆工の強度は現状の 2 車線程度のトンネルでは 18N/mm^2 が標準である。本研究では、目標とするコンクリート強度を 18N/mm^2 とした。ただし、載荷形式Cの実験では 18N/mm^2 のコンクリートを用いると現状の載荷装置で供試体が破壊に達しないと予想されたため、目標とする強度を 13.5N/mm^2 とした実験を行った。

覆工の使用材料は現状の 2 車線程度のトンネルでは特殊地山等の場合を除いてプレーンコンクリートを用いる。本研究では、建設コストの縮減を図るための覆工の薄肉化、および構造の耐久性向上を図るための覆工からの剥離・剥落の防止方策を検討するため、鋼繊維または樹脂繊維を混入したコンクリートを用いて実験を行った。

2.2.4 供試体諸元

表-2.7 に 2.2.2～2.2.3 に基づいて決定した合計 10 ケースの供試体の諸元を示す。

表-2.7 実験に使用した供試体の仕様

使用材料(コンクリート)	ケース番号	厚さ(mm)	外径(mm)	目標 28 日強度(N/mm^2)	繊維直径(mm)	繊維長さ(mm)	載荷の制御方法	載荷形式
プレーンコンクリート	A-1	300	9700	18	－	－	荷重制御	A
鋼繊維補強コンクリート	A-2	300	9700	18	0.8	60	荷重制御	A
プレーンコンクリート	A-3	200	9700	18	－	－	荷重制御	A
プレーンコンクリート	B-1	300	9700	18	－	－	変位制御	B
鋼繊維補強コンクリート	B-2	300	9700	18	0.8	60	変位制御	B
鋼繊維補強コンクリート	B-3	300	9700	18	0.8	30	変位制御	B
樹脂繊維補強コンクリート	B-4	300	9700	18	0.8	50	変位制御	B
鋼繊維補強コンクリート	B'-1	200	9700	18	0.8	60	変位制御	B'
プレーンコンクリート	C-1	300	9700	13.5	－	－	荷重制御	C
鋼繊維補強コンクリート	C-2	300	9700	13.5	0.8	60	荷重制御	C

載荷形式Aの実験に用いた諸元として、ケースA-1では道路トンネル技術基準に基づき、供試体の材料をプレーンコンクリート、厚さを30cmとした。ケースA-2では鋼繊維による補強効果を把握するために、日本道路公団試験研究所による材料試験や施工実績を踏まえ、長さが60mm、直径が0.8mmの鋼繊維を鋼繊維混入率(鋼繊維補強コンクリート1m³中に占める鋼繊維の容積百分率)0.5%(40kg/m³)で混入した鋼繊維補強コンクリートを用い、厚さを30cmとした。ケースA-3では薄肉化の影響を検討するためにケースA-1と同一の材料を用い、厚さを20cmとした。

載荷形式Bの実験に用いた諸元として、ケースB-1ではケースA-1と同一の諸元、ケースB-2ではケースA-2と同一の諸元とした。ケースB-3では鋼繊維長さの影響を把握するために、繊維長を30mmにした以外はケースB-2と同一の諸元を持つ鋼繊維補強コンクリートとした。ケースB-4では樹脂繊維による影響を把握するために、長さが50mm、直径が0.8mmの樹脂繊維を混入率0.5%(6.5kg/m³)で混入したものとした。また、載荷形式B'として、ケースB'-1では鋼繊維補強コンクリートにおける薄肉化の影響を把握するために、厚さを20cmにした以外はケースB-2と同一の諸元を持つ鋼繊維補強コンクリートとした。

載荷形式Cの実験に用いた諸元として、ケースC-1は圧縮破壊を生じる場合のプレーンコンクリートを用いた覆工の状態を把握するために、厚さを30cm、強度を13.5N/mm²とした。ケースC-2は同様の条件で鋼繊維補強コンクリートを用いた。

実験に当たっては供試体の強度の管理を行い、目標とした強度に達した時点で実験を実施した。供試体のスランプは打込み時を12cmとし、鋼繊維や樹脂繊維を混入させたケースでは混入前で15cmないしは18cmとして、混入後で12cmとなるようにした。表-2.8にそれぞれのケースで用いたコンクリートの配合を示す。

表-2.8　実験に使用した供試体のコンクリートに関する諸元

コンクリート種類	単位	配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
		プレーン	鋼繊維	鋼繊維	プレーン	鋼繊維	樹脂繊維
呼び強度	N/mm²	18	18	18	13.5	13.5	18
スランプ	cm	12	18(混入後12)	18(混入後12)	12	15(混入後12)	18(混入後12)
粗骨材の最大寸法	mm	40	20	20	20	20	20
セメントの種類		普通	普通	普通	普通	普通	普通
W/C	(%)	57.5	65	65	75.5	75.5	50
s/a	(%)	43.8	52	52	47.6	48.6	54.5
空気量	(%)	4.0	4.5	4.5	4.5	4.0	4.5
単位量(kg/m³)	セメント	270	280	280	223	230	280
	水	156	183	183	168	173	175
	細骨材	822	927	927	890	900	951
	粗骨材	1091	886	886	1012	983	810
	混和剤	2.86	2.97	2.97	2.36	2.44	4.72
鋼繊維・樹脂繊維の諸元	長さ(mm)	−	60	30	−	60	50
	直径(mm)	−	0.8	0.8	−	0.8	0.8
	混入率	−	0.5% (40kg/m³)	0.5% (40kg/m³)	−	0.5% (40kg/m³)	0.5% (6.5kg/m³)
実験ケース		A-1 A-3 B-1	A-2 B-2 B'-1	B-3	C-1	C-2	B-4
備考		混和剤=AE減水剤標準形(I種)、C×1.0(%)×ρ					

2.3　実験の準備

2.3.1　供試体の作成および設置

(1) 型枠

型枠は写真-2.6 に示すように木製の型枠とし、コンクリートの打設圧に耐えうるように十分に補強した構造とした。供試体の精度を確保するために、側板は事前に所定の曲率に加工した合板を補強して使用した。

(2) コンクリート打設および養生

近隣の工場より購入したレディミクストコンクリートをポンプ車を用いて打設した。コンクリートの打設状況を写真-2.7 に示す。なお、鋼繊維や樹脂繊維の混入は、現場にて打設前にミキサー車に投入し混合した。打設後、表面の乾燥を防ぐために養生シートで養生し、脱型は材令 5 日以上とした。強度は実験条件を統一できるように強度管理を行い、予め規定していた強度に達した時点で実験を実施した。

(3) 供試体の設置

供試体の設置は覆工の軸方向が鉛直方向と平行になる向きで設置し、供試体下部にはテフロン板およびテフロンシートで摩擦を除去した支承を配置し、覆工アーチ支点は回転のみを自由とする支承を配置して拘束した。

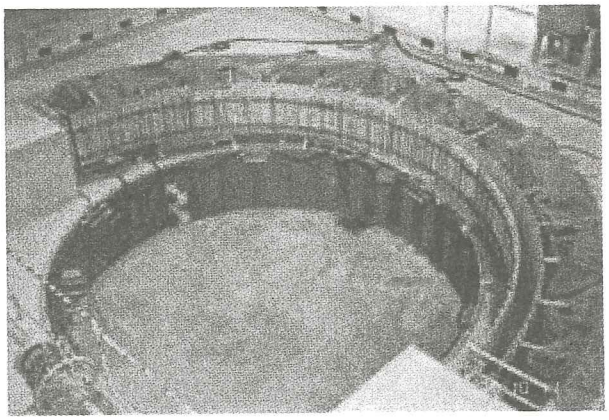


写真-2.6　型枠の全体図

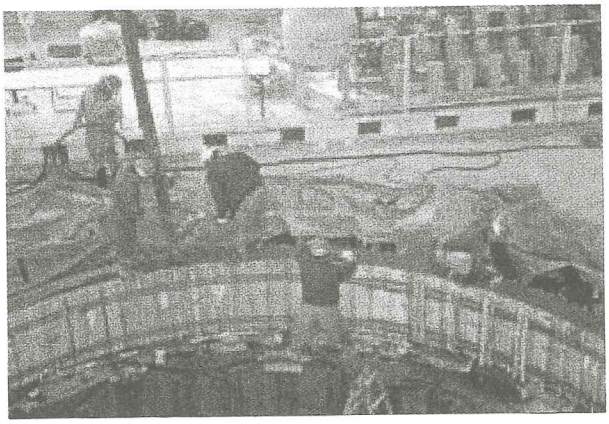


写真-2.7　コンクリートの打設状況

2.3.2　管理供試体

実験の供試体に用いたコンクリートの特性値を把握するために、圧縮供試体と曲げ供試体の管理供試体を製作し、原則として実際の試験を実施した材令で強度試験を実施した。また、実際に実験に用いた供試体から可能なものについてはコアリングを行い、コンクリートの特性値の把握を行った。圧縮強度試験においては原則としてヤング率、一軸圧縮強度およびポアソン比、曲げ試験については曲げ強度および曲げタフネスを算定した。

2.3.3　計測項目

表-2.9 に本実験で計測した項目を示す。なお、ひずみゲージが実験前に損傷したり、供試体の厚さの関係で荷重計が設置できないことがあり、計測位置がケースによっては異なっていることがある。また、種々の検討を加えていった過程において測定位置を変更する必要が生じたため、ひずみゲージの貼付位置はケースによって異なる場

合がある。図-2.5 にこれらの計測システムの概要を示す。さらに図-2.6 にケース A-1、およびケース A-2 のひずみゲージの貼付位置を示す。それ以外のケースにおけるひずみゲージの貼付位置は表-2.10 に示すとおりである。

表-2.9　測定項目および数量

測定項目	測定機器	計測点数	備考
載荷重	油圧計	6	載荷装置に示された圧力 (載荷形式A・Cで測定)
作用変位	載荷装置ストローク計	2	載荷装置に示された変位 (載荷形式B・B'で測定)
ジャッキ反力	ロードセル	10	
ジャッキストローク	変位計	17	
変位	変位計	11	
ひずみ	ひずみゲージ	168～188	
ひび割れ	目　視	－	

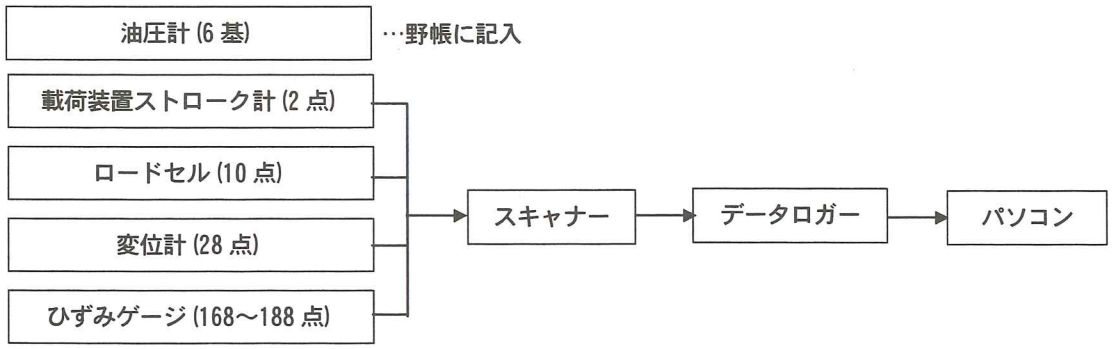


図-2.5　計測システムの概要

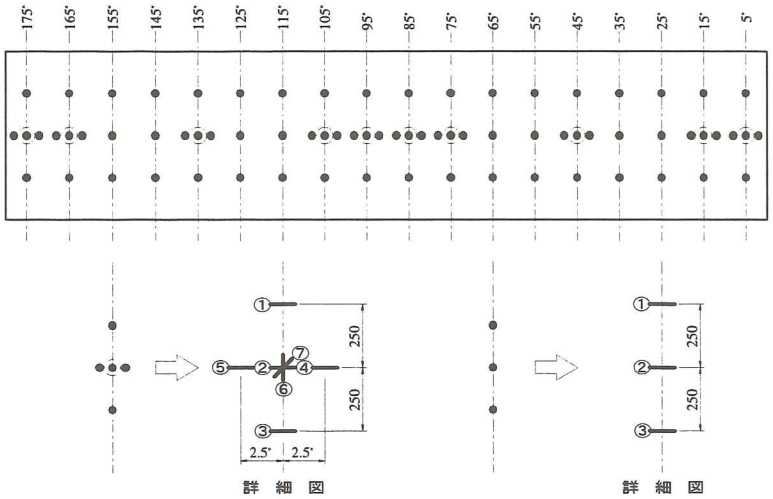


図-2.6　ひずみゲージ貼付位置

表-2.10　ひずみ測定箇所一覧表

(注) 空欄は測定実施

測定角度(度)		測定側	測定高さ(cm)	該当ケース		
位置	対称位置			A-1 A-2	A-3 B-2 B'-1 B-3	B-1 B-4 C-1 C-2
2.5	177.5	内縁・外縁	50		未測定	未測定
5	175	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50		未測定	未測定
7.5	172.5	内縁・外縁	50		未測定	未測定
12.5	167.5	内縁・外縁	50			
15	165	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50			未測定
17.5	162.5	内縁・外縁	50			
25	155	内縁・外縁	75/50/25			
35	145	内縁・外縁	75/50/25			
42.5	137.5	内縁・外縁	25		未測定	未測定
45	135	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50		未測定	未測定
47.5	132.5	内縁・外縁	50		未測定	未測定
52.5	127.5	内縁・外縁	50	未測定		
55	125	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50	未測定		未測定
57.5	122.5	内縁・外縁	50	未測定		
62.5	117.5	内縁・外縁	75/50/25	未測定		
65	115	内縁・外縁	75/50/25			
67.5	112.5	内縁・外縁	75/50/25	未測定		
72.5	107.5	内縁・外縁	75	未測定	未測定	
		内縁・外縁	50		未測定	
		内縁・外縁	25	未測定	未測定	
75	105	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50		未測定	未測定
77.5	102.5	内縁・外縁	75	未測定	未測定	
		内縁・外縁	50		未測定	
		内縁・外縁	25	未測定	未測定	
82.5	97.5	内縁・外縁	50			
85	95	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50			未測定
87.5	92.5	内縁・外縁	75	未測定		
		内縁・外縁	50			
		内縁・外縁	25	未測定		

また、荷重計を用いての変位測定や変位計を用いての供試体の変位、およびジャッキのストロークは、実験状況を確認しながら載荷形式毎に調整した。ケース A-1 とケース A-2 の場合を図-2.7 に示す。また、実際に測定した箇所を表-2.11 に示す。

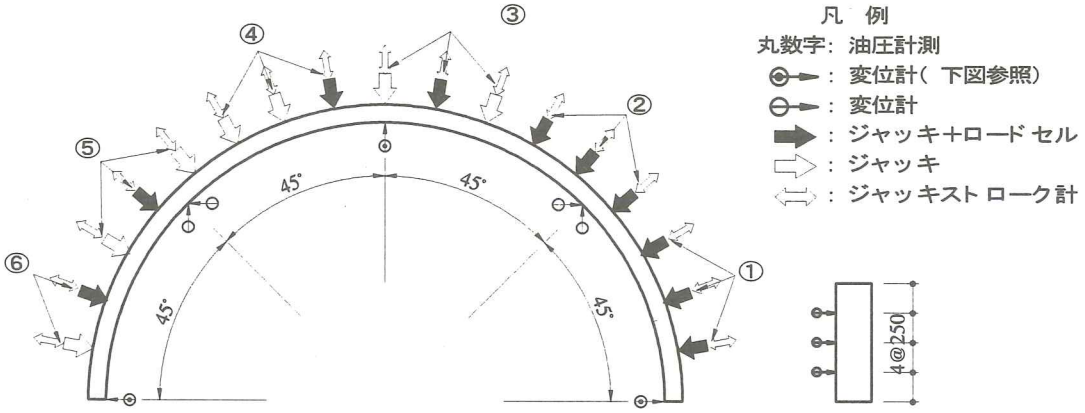


図-2.7　計測位置（ケース A-1、A-2）

表-2.11　変位・反力測定箇所一覧表

（注）　空欄は測定実施

測定角度(度)	測定対象	該当ケース		
		載荷形式 A	載荷形式 B・B'	載荷形式 C
0	供試体変位(水平3点)			
10、20、30、40	ジャッキストローク			
	ジャッキ反力			
45	供試体変位(水平、鉛直)			
50、60、80	ジャッキストローク		未測定	
	ジャッキ反力		未測定	
70	ジャッキストローク		未測定	
	ジャッキ反力	未測定	未測定	
90	供試体変位(鉛直3点)			
	ジャッキストローク			
	ジャッキ反力	未測定		未測定
100	ジャッキストローク		未測定	
	ジャッキ反力		未測定	未測定
110、120、130	ジャッキストローク		未測定	
	ジャッキ反力	未測定	未測定	未測定
135	供試体変位(水平、鉛直)			
140、160	ジャッキストローク			
	ジャッキ反力			
150、170	ジャッキストローク			
	ジャッキ反力	未測定		未測定
180	供試体変位(鉛直3点)			

2.4 実験結果

2.4.1 管理供試体試験結果

実験にあたり、供試体の基本的な特性を把握するための材料試験を実施した。材料試験はプレーンコンクリートについては一軸圧縮強度試験、繊維補強コンクリートについては一軸圧縮強度試験および曲げ試験を実施した。一軸圧縮強度試験を実施した場合は各ケース毎のヤング係数、一軸圧縮強度およびポアソン比、また曲げ試験を実施した場合は曲げ強度および曲げタフネスを算定した。また、参考としてケースC-2においてのみ引張試験を実施した。

一軸圧縮強度試験は一軸圧縮試験機を用い、図-2.8に示すような荷重とひずみの関係を測定した。圧縮強度は、ひずみが2000×10^{-6}を越え、荷重が概ね一定値と見なすことが可能な場合の荷重Pより強度を算定した。ヤング係数は、文献1)等に従って、図-2.8に示したP/3、すなわち圧縮強度の1/3の点とひずみが50×10^{-6}の点とを結ぶ線分の傾きである割線弾性係数として算定した。また、ポアソン比はその場合のひずみの差を供試体の縦方向と横方向について測定し、その比として算定した。

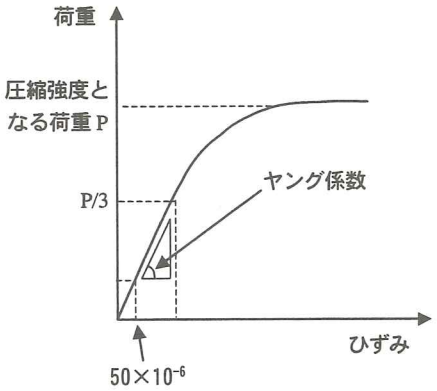


図-2.8 一軸圧縮強度試験の荷重-ひずみ関係

曲げ試験は変位制御による4等分点載荷により実施し、得られた結果から曲げ強度および曲げタフネスを次式によって求めた。曲げ強度は管理供試体に発生した曲げ引張応力の最大値として算定した。

$$\text{曲げ強度} \quad \sigma_b = \frac{Pl}{bh^2} \qquad \cdots (2.1)$$

$$\text{曲げタフネス} \quad \overline{\sigma_b} = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \frac{l}{bh^2} \qquad \cdots (2.2)$$

ここで、
- σ_b : 曲げ強度 (N/mm^2)
- P : 試験機の示す最大荷重 (N)
- l : スパン長 (mm)
- b : 破壊断面の幅 (mm)
- h : 破壊断面の高さ (mm)
- $\overline{\sigma_b}$: 曲げタフネス係数 (N/mm^2)
- T_b : 図-2.9に示すδ_{tb}までの面積 (N・mm)
- δ_{tb} : スパンの1/150のたわみ (mm)

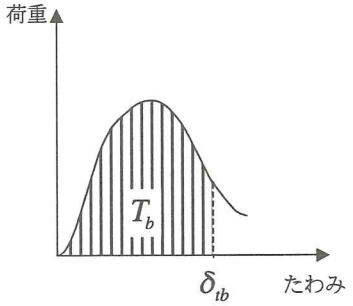


図-2.9 荷重-たわみ曲線

表-2.12に圧縮強度試験結果から得られた各ケース毎の圧縮強度、ヤング係数およびポアソン比、曲げ試験結果から得られた曲げ強度および曲げタフネスの平均値について示す。表中の横線で示されているところでは強度を算

定しなかった。また、ケースB-4では一軸圧縮試験のうち、管理供試体については実験実施時(材令14日)に合わせて試験を行うことが出来たが、コア抜き供試体については実施できず、材令21日で行った。それによると、材令14日で行った管理供試体による圧縮強度よりも小さいといった結果が得られたため、材令22日で残されていた管理供試体を用い、再び圧縮試験を実施した。また、さらにコア抜き供試体による一軸圧縮試験を材令30日においても実施した。この強度が大きく異なる理由として、打設後から数日間、実際の覆工供試体の置かれていた環境で著しく気温の低下が見られ、管理供試体との養生過程で若干の気温差があったと予想される。

また、ケースC-2においては直接引張試験により引張強度を算定した。

表-2.12　実験に使用した供試体の平均強度

使用材料	ケース番号	配合	供試体の平均強度												
			一軸圧縮試験								引張試験		曲げ試験		
			管理供試体				コア抜き供試体				管理供試体		管理供試体		
			圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比	材齢	圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比	材齢	引張強度	材齢	曲げ強度	曲げタフネス	材齢
			N/mm²	kN/mm²		日	N/mm²	kN/mm²		日	N/mm²	日	N/mm²	N/mm²	日
プレーン	A-1	①	26.29	20.65	0.20	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
鋼繊維補強	A-2	②	19.86	16.85	0.16	21	20.24	17.80	0.18	22	-	-	3.88	3.61	22
プレーン	A-3	①	20.05	14.43	0.14	13	20.63	-	-	13	-	-	-	-	-
プレーン	B-1	①	26.89	21.57	0.22	13	25.70	-	-	14	-	-	-	-	-
鋼繊維補強	B-2	②	21.80	19.60	0.11	14	19.70	-	-	14	-	-	4.88	7.52	16
鋼繊維補強	B-3	③	23.67	17.17	0.15	17	19.07	-	-	18	-	-	3.51	2.48	21
樹脂繊維補強	B-4	⑥	28.33	20.50	-	14	20.54	18.87	-	21	-	-	4.43	4.00	14
			28.30	20.43	-	22	20.50	-	-	30	-	-	-	-	-
鋼繊維補強	B'-1	②	22.80	18.30	0.25	14	20.57	-	-	14	-	-	5.20	4.55	28
プレーン	C-1	④	14.43	14.42	0.10	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
鋼繊維補強	C-2	⑤	12.77	13.17	-	13	9.00	-	-	14	1.71	20	3.95	3.67	20

2.4.2　載荷形式Ａの結果

(1) 荷重と変位の関係

①天端

図-2.10(a)に天端部(90 度)の内縁側の荷重変位曲線を示す。各ケースとも供試体が破壊し、供試体が破壊したときの天端の作用荷重はケースA-1では390kN/本、ケースA-2では330kN/本、またケースA-3では175kN/本となった。破壊時の荷重は異なるが破壊時の天端変位は各ケースとも概ね40㎜となった。

②脚部

図-2.10(b)に0度および180度部分、すなわち脚部の荷重変位曲線を示す。ケースA-1およびケースA-2では天端からの載荷荷重が50kN/本を超えた付近から0度については右方向に、180度については左方向の変位が生じた。変位値は0度の方が若干大きく供試体が開く形となったが、全体的な変形は小さかったと考えられる。また、ケースA-3では180度で載荷初期に変位が発生していることから軸力導入時で供試体に若干の移動が生じたと考えられるが、その後は大きな変形は生じなかった。以上より、軸力導入時には左右からの載荷荷重で微妙なアンバランスがあったり、また、ひび割れの発生が左右対称に発生せず載荷の継続につれて挙動が左右対称ではなくなることもあったが、それらの差は小さく、各ケースとも概ね左右対称の挙動を示していたと考えられる。

③45度・135度部分

図-2.10(c)に45度部分の水平方向の荷重変位曲線を示す。なおケースA-1とケースA-2では135度においての計測を実施しなかった。ケースA-1とケースA-2では、変位の値は概ね同様の挙動を示していたと考えられる。また、ケースA-3では、45度で載荷荷重が50kN/本の時に変位が大きく変化しているものの、傾きについては45度と135度で概ね等しいことから、概ね左右対称に挙動したと考えられる。

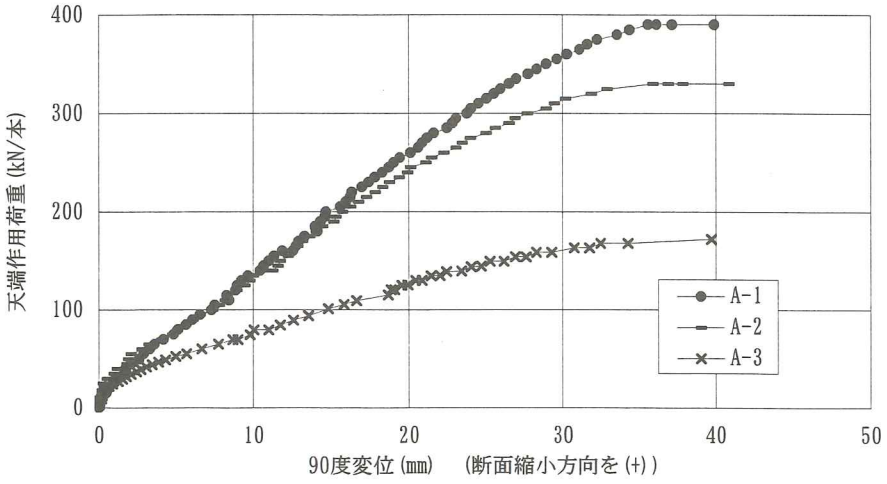


図-2.10 (a)　荷重変位曲線 (載荷形式Ａ，90度，高さ50cm)

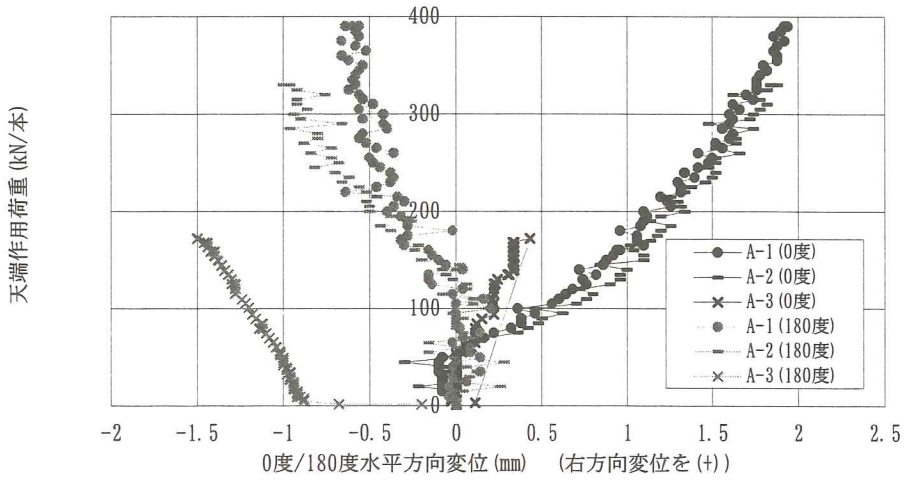


図-2.10 (b)　荷重変位曲線 (載荷形式Ａ，0度/180度，高さ50cm)

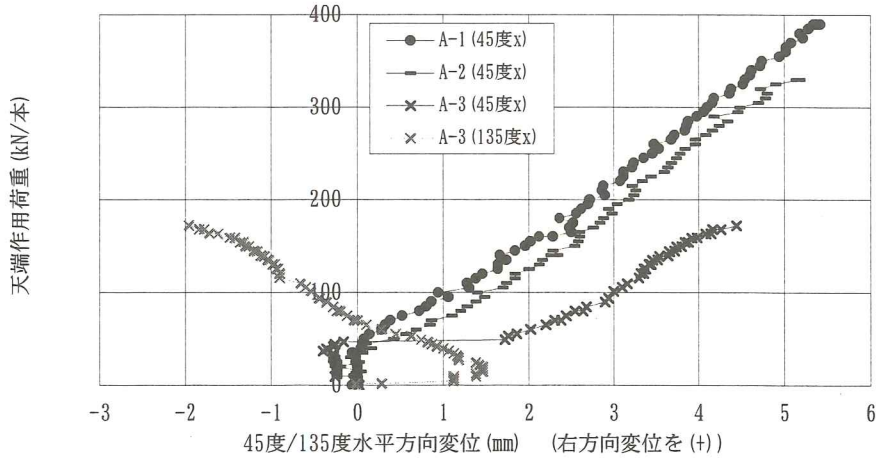


図-2.10 (c)　荷重変位曲線
(載荷形式Ａ，45・135度水平方向，高さ50cm)

(2) 破壊状況とひび割れ

ケース A-1、A-2、および A-3 のひび割れ図を図-2. 11 (a) ～ (d) 、図-2. 12 (a) ～ (c) 、および図-2. 13 (a) ～ (d) に示す。ひび割れ図は内縁側、すなわちトンネル覆工を内側から見た状態を基準 (図の右側が角度が 0 度、左側が 180 度) とし、それに対応した部分の外縁側の図を示した。図中の上部は供試体の上側、下部は下側として示した。また、各ケースにおける最終の破壊状況を写真-2. 8 (a) ～ (h) 、写真-2. 9 (a) ～ (h) 、および写真-2. 10 (a) ～ (f) に示す。さらに、それらのケースにおける発生したひび割れ発生荷重とひび割れの状況について表-2. 13 (a) ～ (c) に示す。

ケース A-1 では、表-2. 13 (a) より第 1 ひび割れが 80kN/本 (天端変位 9. 00mm) で天端部の内縁側にひび割れ幅が 0. 15mm 程度で確認された。また、第 2 ひび割れが 160kN/本 (天端変位 16. 6mm) で 65 度および 115 度の外縁側で確認された。ひび割れの発生状況は、図-2. 11 (a) および (b) より供試体の上下方向にひび割れが進展する形状が多かった。その理由として、第一に載荷板を挿入した面的な載荷を行っているため、ひび割れ発生直後は供試体の上から下にわたって進展すると考えられる。第二にプレーンコンクリートを用いたことからひび割れ発生直後は 1 本に集中して進展していくものと考えられる。なお、図-2. 11 (c) に見られるように、載荷荷重が非常に大きくなるにつれて複数本のひび割れを生じた。載荷荷重が 390kN/本で供試体は破壊し、写真-2. 8 (g) および 2. 8 (h) に示すように供試体の左肩部分 (115° 付近) の内縁側から供試体の一部が崩れ落ちる現象が観察された。その後、段階的に天端部、右肩部分 (65 度付近) の順に破壊が発生した。写真-2. 8 (c) および 2. 8 (d) に 90 度付近の最終状態を、また写真-2. 8 (e) および 2. 8 (f) に 65 度付近の最終状態を示す。写真-2. 8 (c) より 90 度の外縁側でも圧縮による破壊が生じたと考えられるが、実際には最初に 115 度の内縁側で破壊が生じた。その理由として 90 度の外縁側の破壊は載荷板により拘束され、外にはらみ出す形の破壊が抑制されていたと考えられる。

ケース A-2 では、表-2. 13 (b) より第 1 ひび割れが 60kN/本 (天端変位 2. 80mm) で天端部の内縁側にひび割れが確認された。また、第 2 ひび割れが 240kN/本 (天端変位 19. 9mm) で 62～68 度および 114 度の外縁側で確認された。ひび割れの発生状況は、プレーンコンクリートとは異なり、図-2. 12 (b) および (c) より載荷荷重が低い段階から複数本の細かなひび割れが観察され、横方向にも進展する様子が観察された。ひび割れの開口幅は、ひび割れが細かく多数発生しており定量的な計測が不可能な場合が多かった。供試体の破壊は、写真-2. 9 (f) および (g) より 65 度付近や 115 度付近で圧縮の限界に達したと考えられる破壊が生じたが、内縁側から崩れ落ちる現象は観察されなかった。このことから、剥落の抑制に鋼繊維補強の効果が現れていることが分かった。

さらにケース A-3 では、表-2. 13 (c) より第 1 ひび割れが 50kN/本 (天端変位 4. 30mm) で天端部の内縁側にひび割れが確認された。また、第 2 ひび割れが 92kN/本 (天端変位 13. 6mm) で 110 度の外縁側で確認された。ひび割れの発生状況は、図-2. 13 (a) および (b) より、供試体の上下方向にひび割れが進展する形状が多く、ケース A-1 と類似していた。また、図-2. 13 (c) に示された破壊時のひび割れ図から考えると、破壊直前でもひび割れが複数本は発生しておらず、1 本に集中して進展したと考えられる。載荷荷重が 176kN/本で供試体は破壊し、写真-2. 10 (e) および 2. 9 (f) に示すように供試体の左肩部分 (115 度付近) の内縁側から崩れ落ちるように破壊した。その後、天端部、右肩部分 (65 度付近) の順に破壊が発生する様子が確認され、破壊の様子はケース A-1 と類似していた。写真-2. 10 (c) および (d) に 90 度付近の最終状態を示す。ケース A-1 と同様に 90 度の外縁側では圧縮による破壊が生じていたと考えられるが、覆工の厚さが A-1 と比較して小さく、破壊時に急速にひび割れが進展することが観察された。

各ケースに共通して、第 1 ひび割れの発生と供試体の破壊との荷重の差は大きいことが分かった。

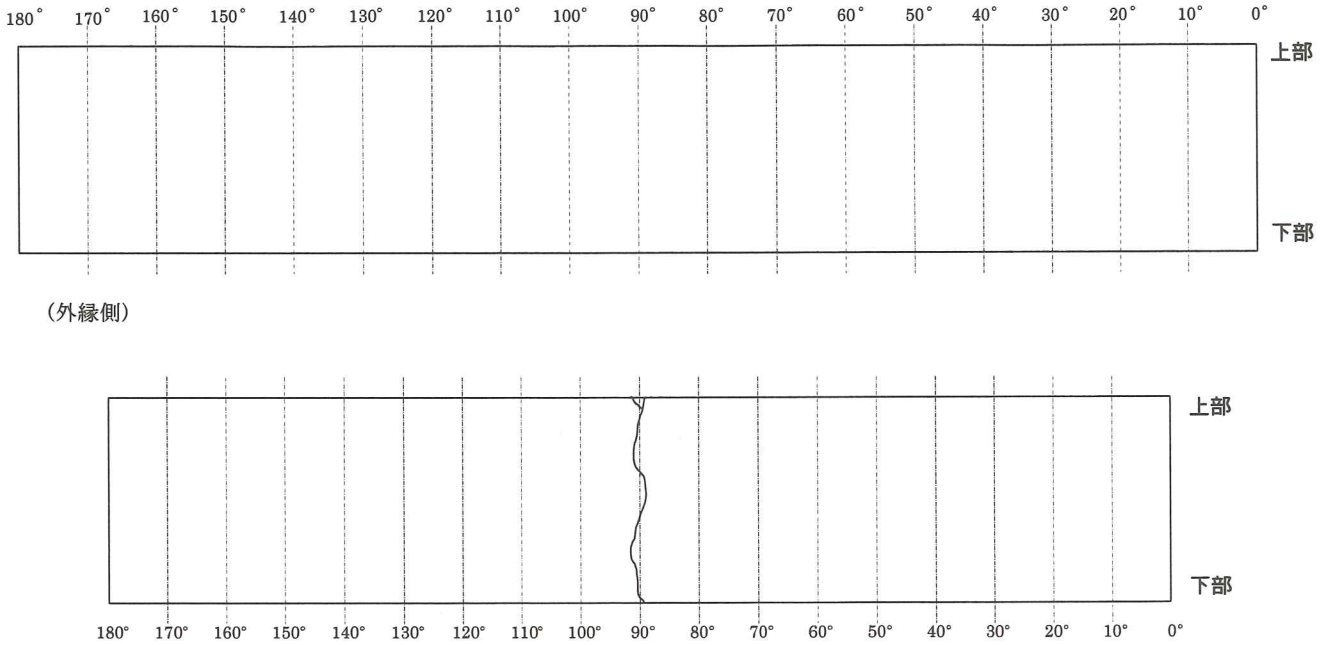


図-2.11(a)　ひび割れ図　(ケースA-1　100kN/本載荷時(天端変位＝7.30mm))

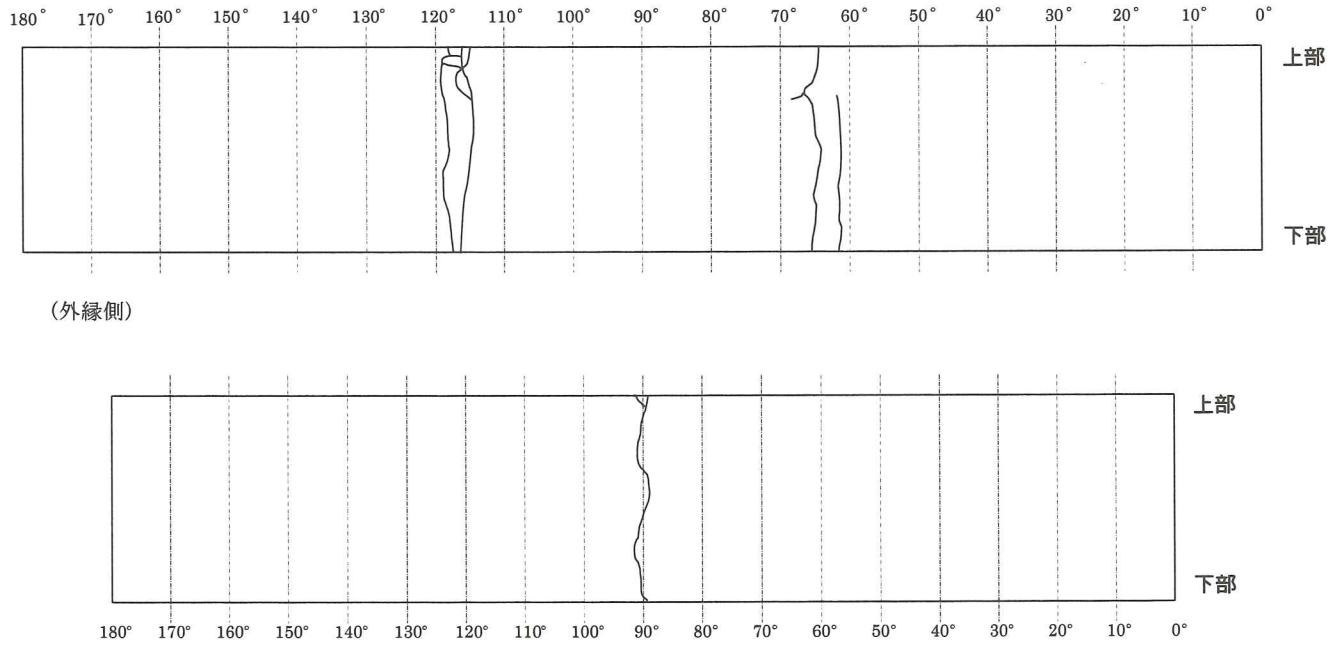


図-2.11(b)　ひび割れ図　(ケースA-1　200kN/本載荷時(天端変位14.68mm))

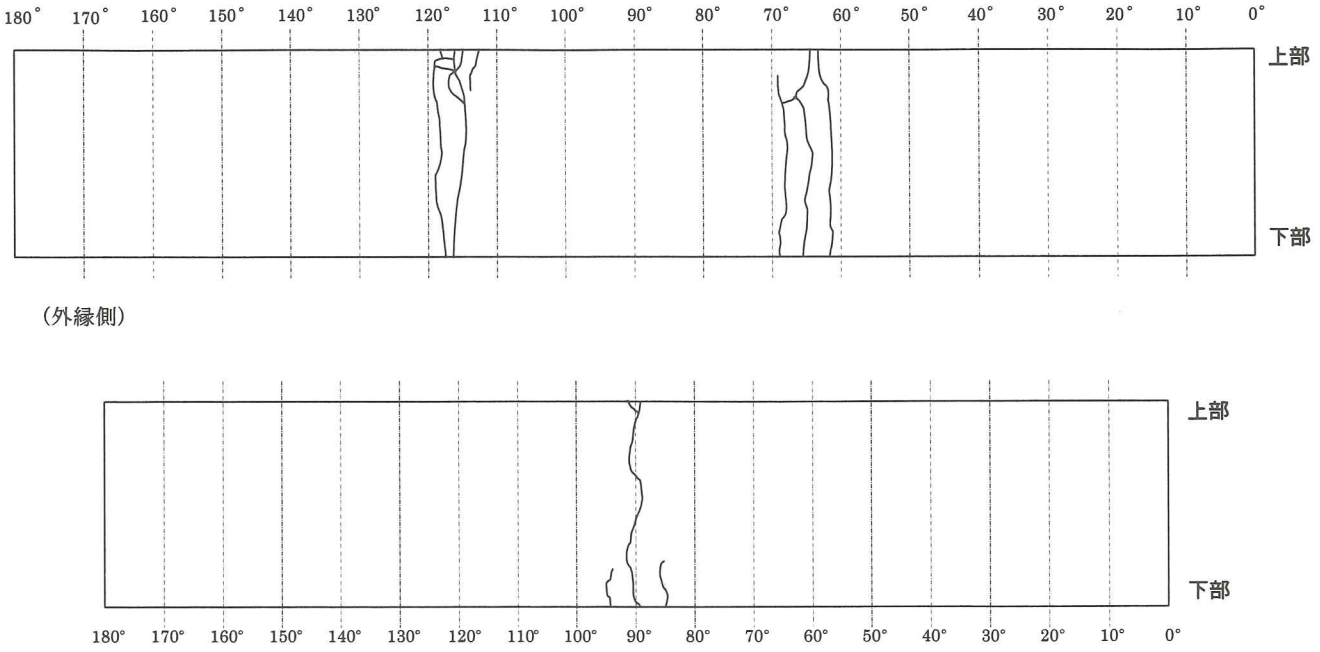


図-2.11(c)　ひび割れ図　(ケースA-1　300kN/本載荷時(天端変位23.80mm))

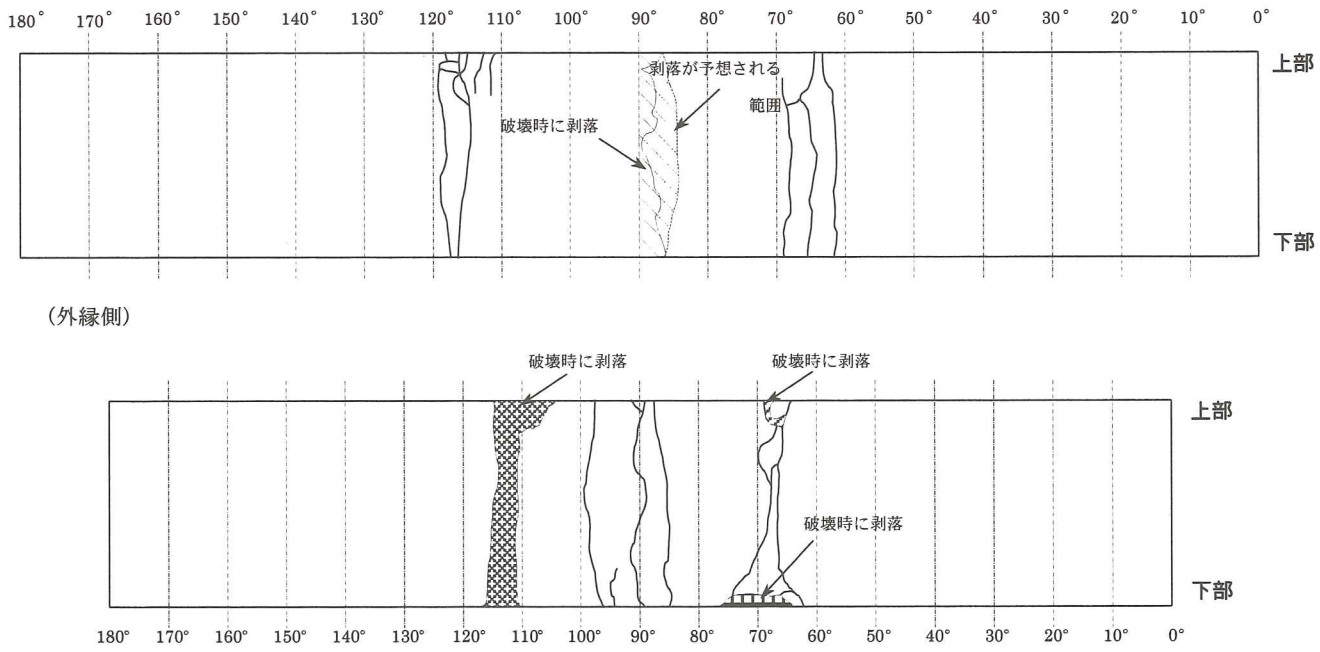


図-2.11(d)　ひび割れ図　(ケースA-1　最終状態(390kN/本載荷時)(天端変位39.92mm))

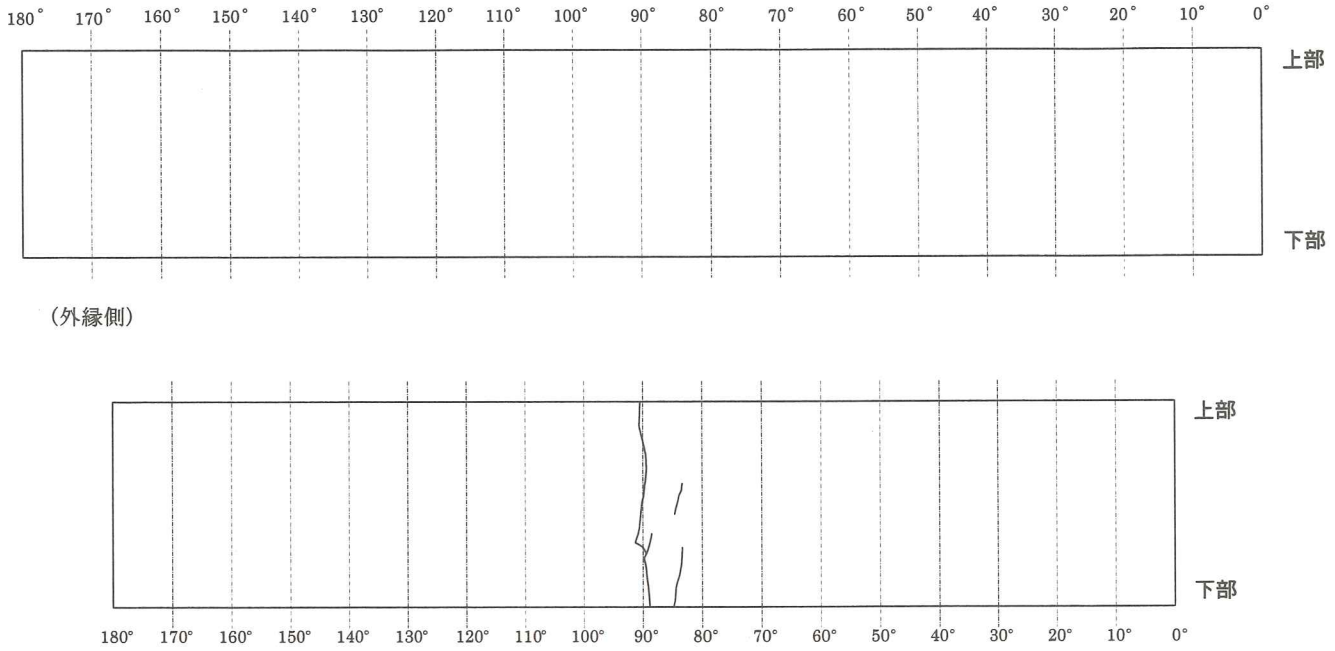


図-2.12(a)　ひび割れ図　(ケースA-2　100kN/本載荷時(天端変位7.36mm))

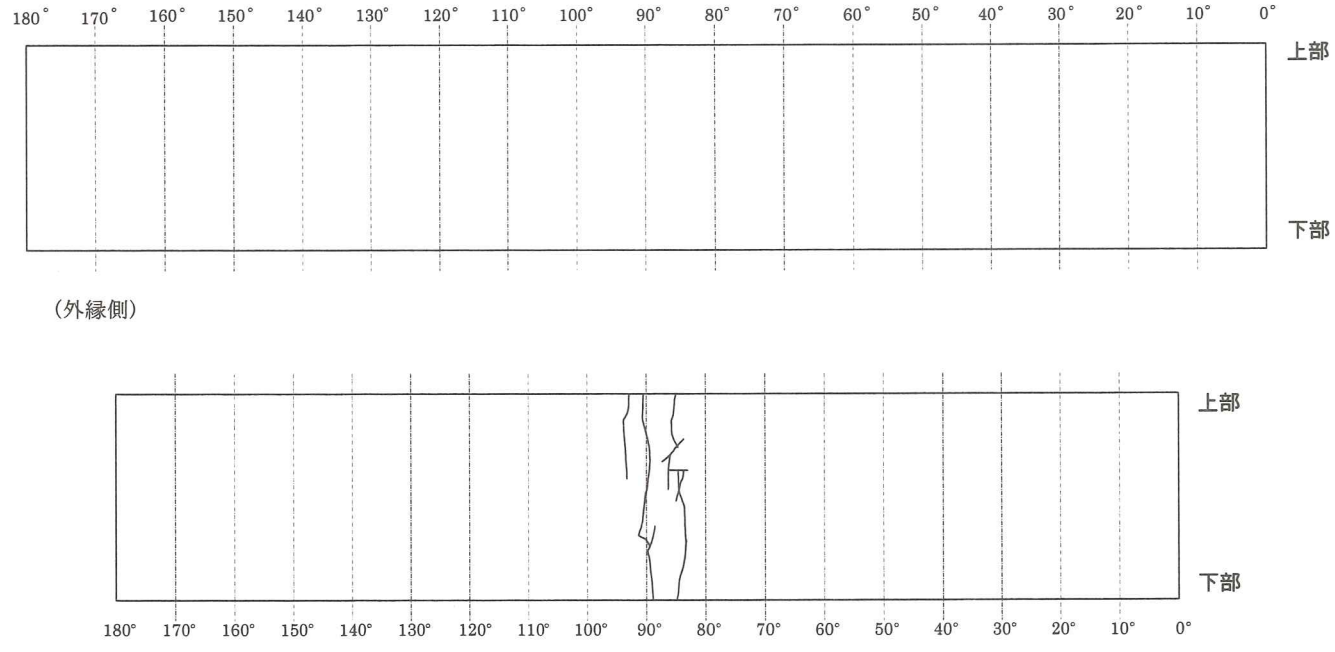
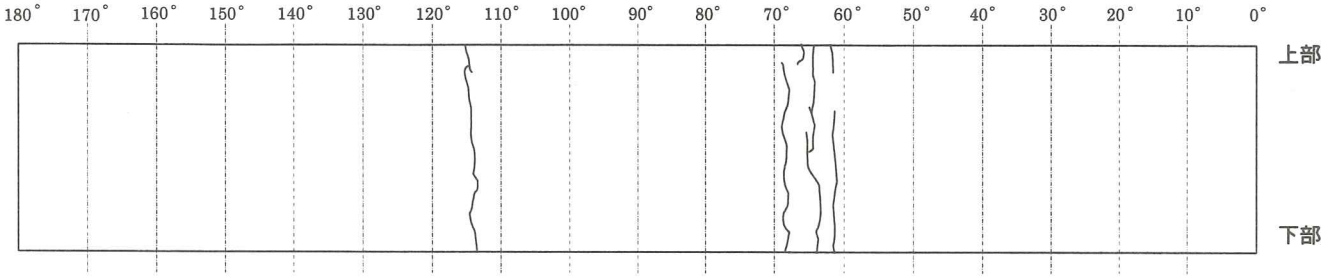
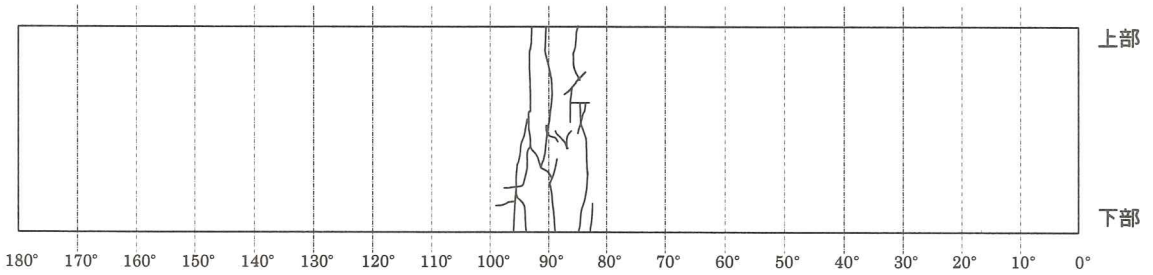


図-2.12(b)　ひび割れ図　(ケースA-2　200kN/本載荷時(天端変位15.76mm))

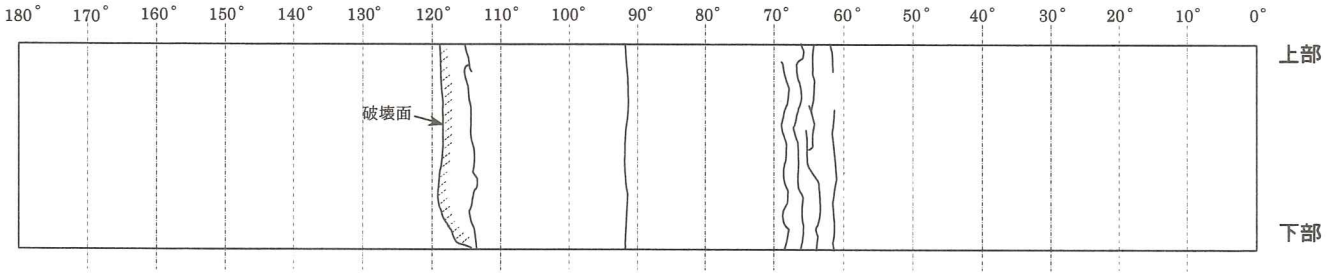


(外縁側)

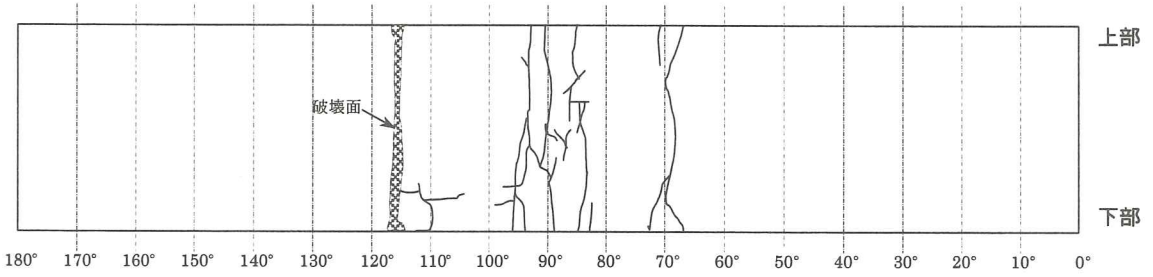


(内縁側)

図-2.12(c)　ひび割れ図　(ケースA-2　300kN/本載荷時(天端変位27.70mm))



(外縁側)



(内縁側)

図-2.12(d)　ひび割れ図　(ケースA-2　最終状態(330kN/本載荷時(天端変位40.88mm)))

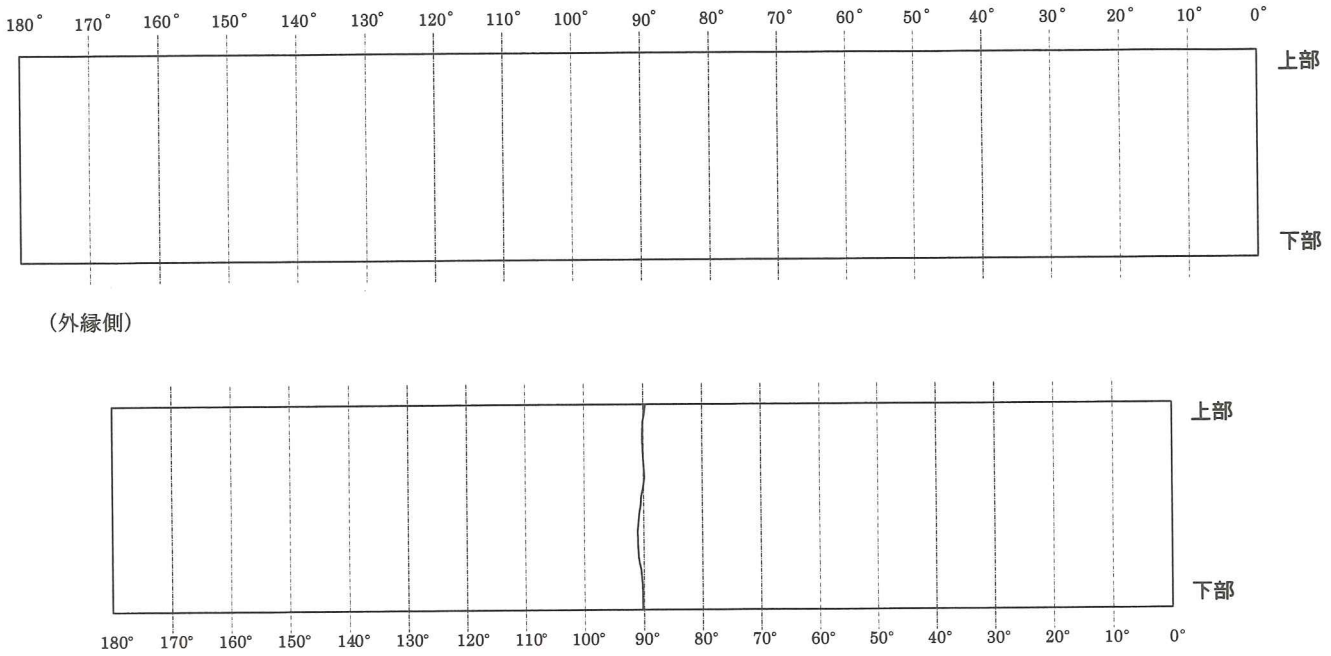


図-2.13(a)　ひび割れ図　(ケースA-3　50kN/本載荷時(天端変位4.30mm))

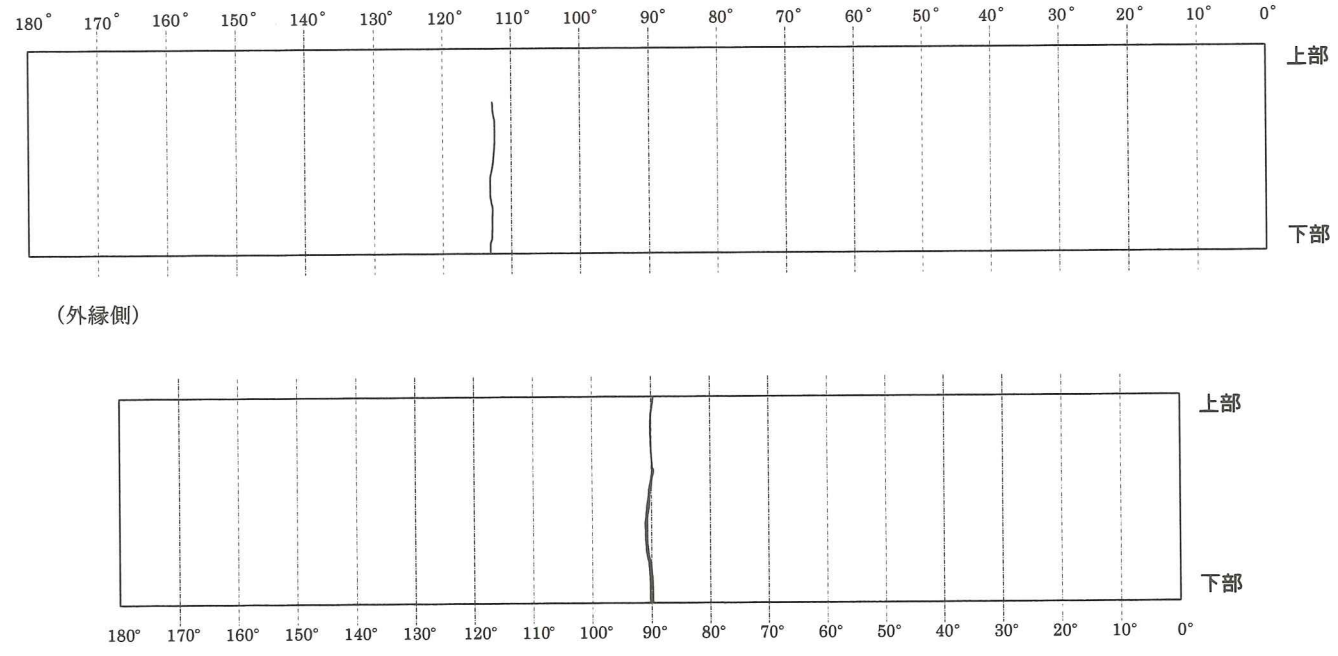


図-2.13(b)　ひび割れ図　(ケースA-3　100kN/本載荷時(天端変位14.25mm))

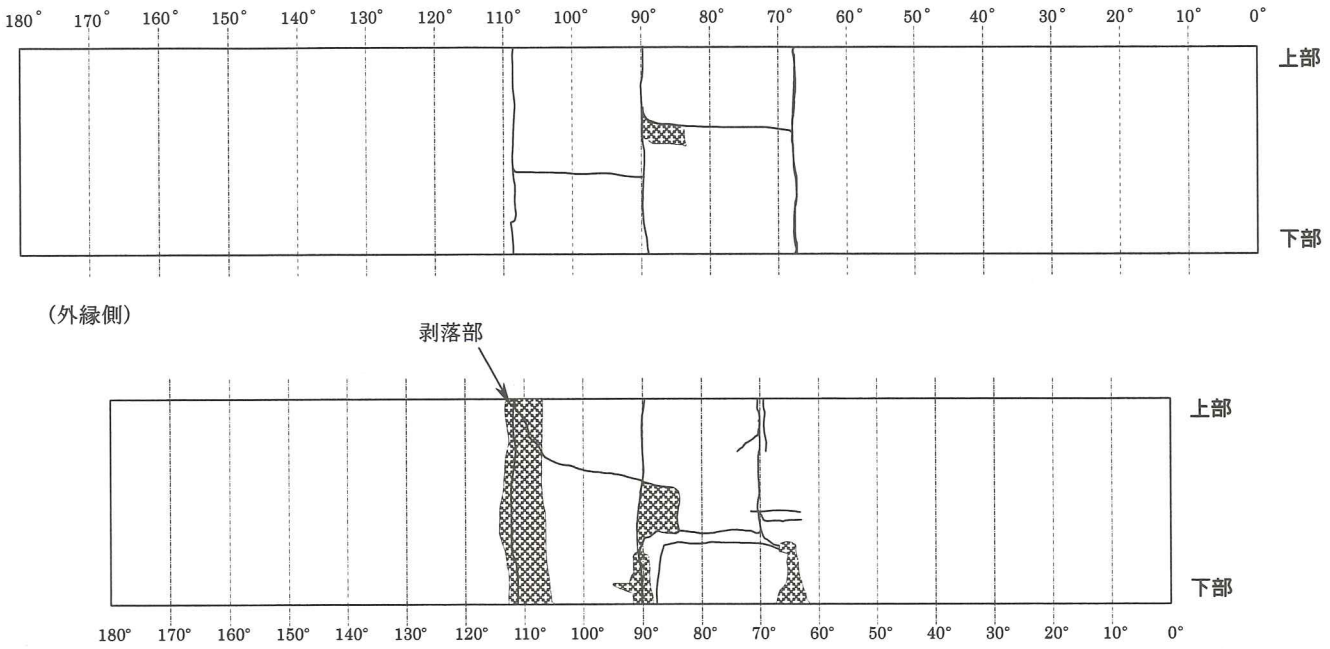


図-2.13(c)　ひび割れ図　(ケースA-3　最終状態(176kN/本載荷時(天端変位39.72mm))

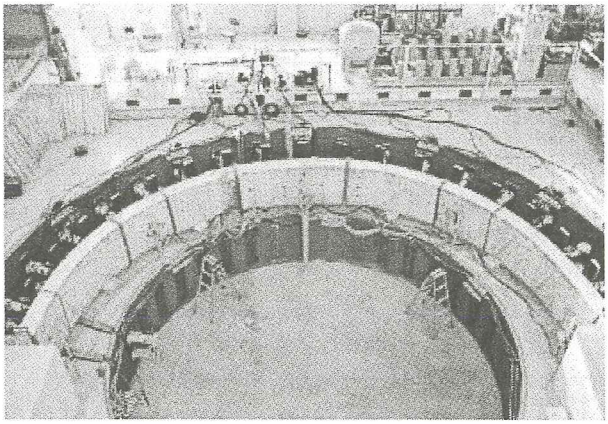


写真-2.8(a)　供試体全体(ケース A-1)

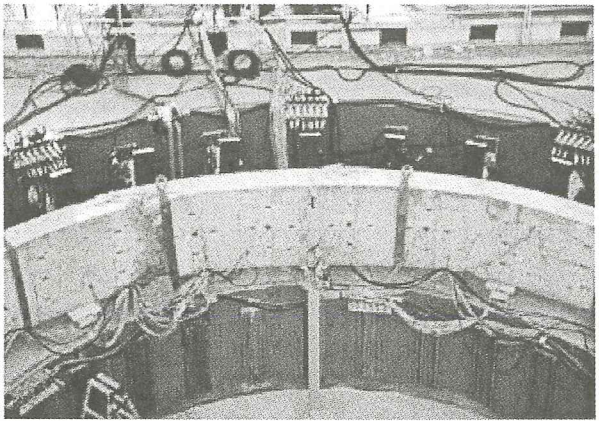


写真-2.8(b)　肩部～天端付近の内側(ケース A-1)

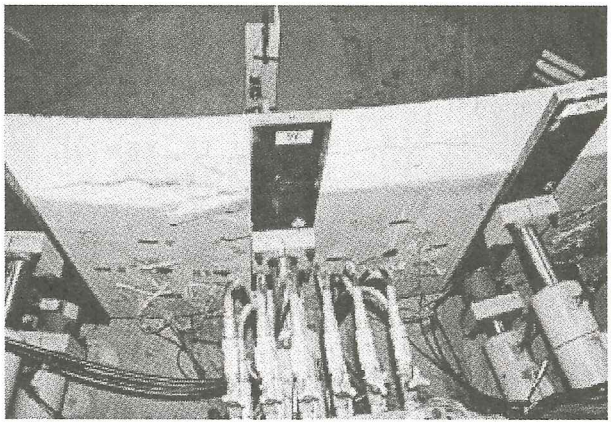


写真-2.8(c)　90 度付近上側～外側(ケース A-1)

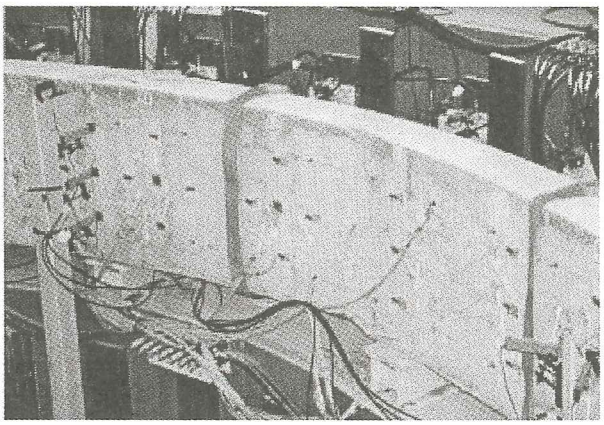


写真-2.8(d)　90 度付近内側(ケース A-1)

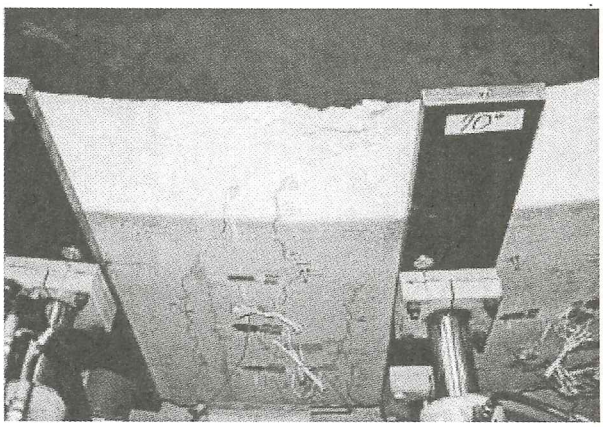


写真-2.8(e)　65 度付近上側～外側(ケース A-1)

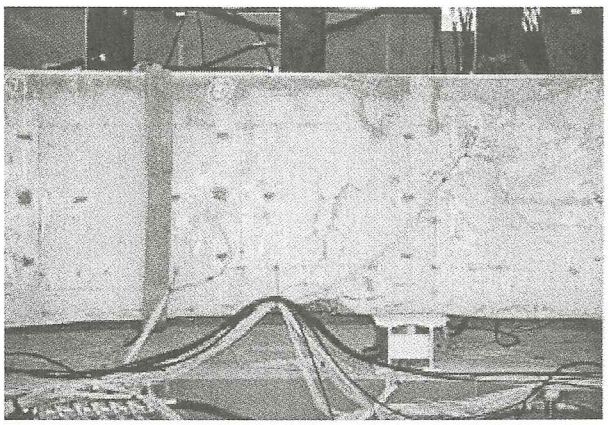


写真-2.8(f)　65 度付近内側(ケース A-1)

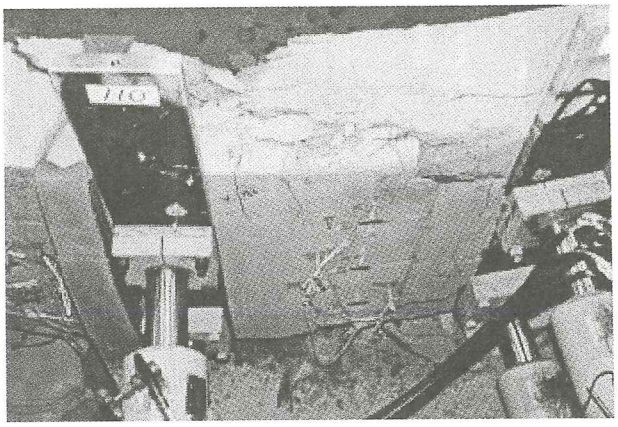


写真-2.8(g)　115 度付近上側～外側(ケース A-1)

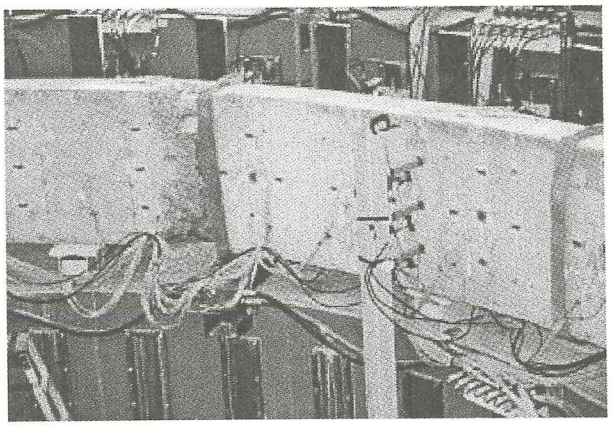


写真-2.8(h)　115 度付近内側(ケース A-1)

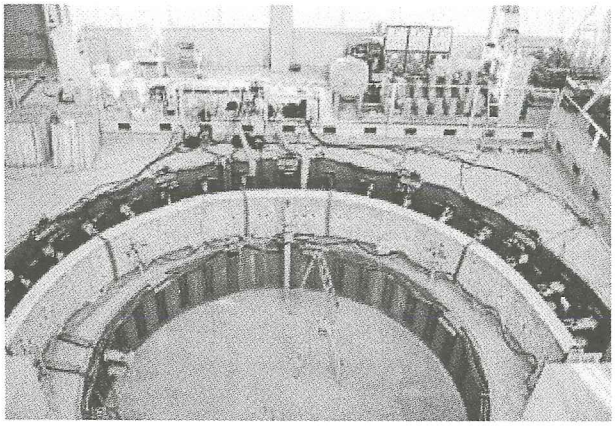


写真-2.9(a)　供試体全体(ケース A-2)

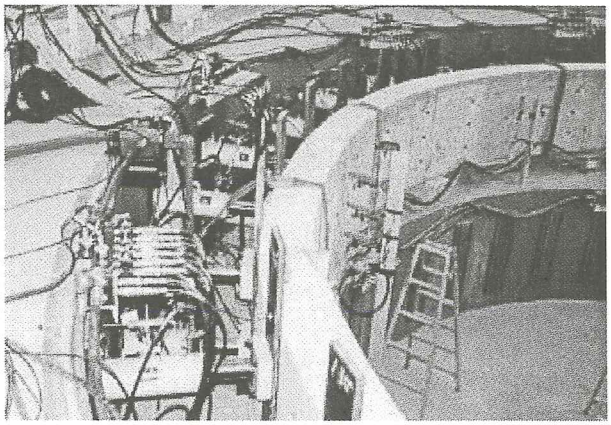


写真-2.9(b)　肩部～天端付近の内側(ケース A-2)

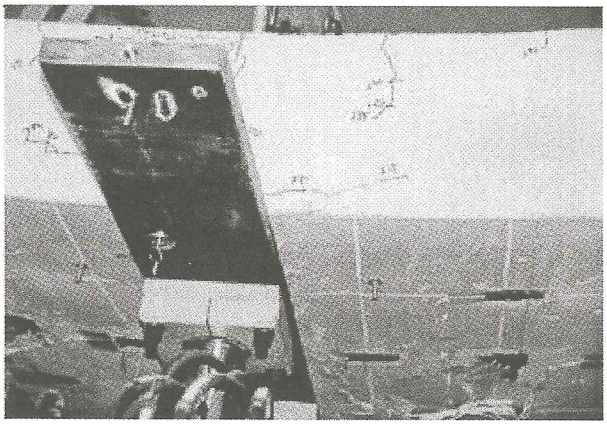


写真-2.9(c)　90 度付近上側～外側(ケース A-2)

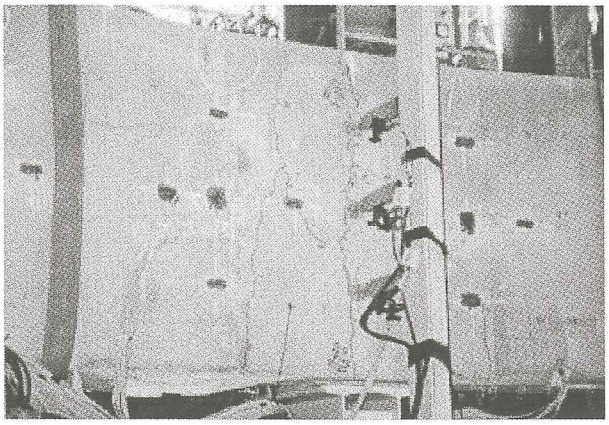


写真-2.9(d)　90 度付近内側(ケース A-2)

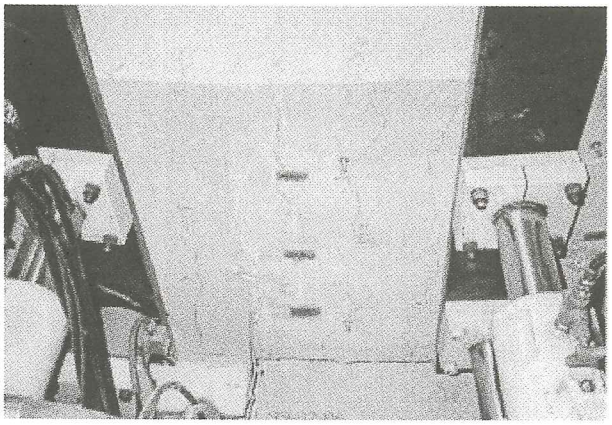


写真-2.9(e)　65 度付近上側～外側(ケース A-2)

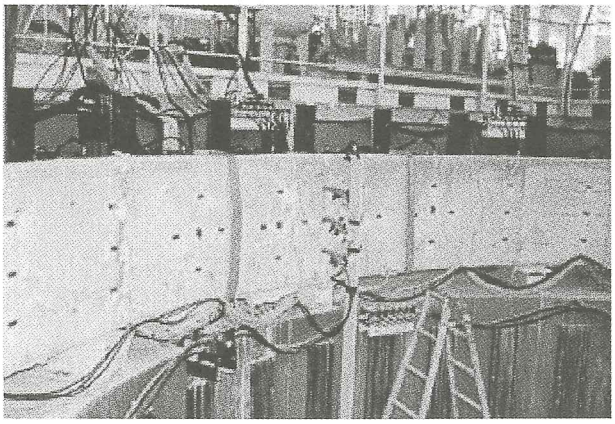


写真-2.9(f)　65 度付近内側(ケース A-2)

ＩＳＳＮ　　0386－5878
共同研究報告書 第275号

共同研究報告書

トンネル覆工の薄肉化に関する
共同研究報告書

平成13年３月

国土交通省土木研究所
道路部トンネル研究室
日本道路公団試験研究所
道路研究部トンネル研究室

Copyright © (2001) 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 Director General of P.W.R.I.

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

共同研究報告書
第275号　2001年3月

トンネル覆工の薄肉化に関する共同研究報告書

国土交通省土木研究所道路部
トンネル研究室　室長　真下英人
研究員　砂金伸治

日本道路公団試験研究所道路研究部
トンネル研究室　室長　城間博通
馬場弘二

要旨

現在の覆工は、供用性に関する機能や不確定要素に対する機能、そして力学的機能といった種々の機能を考慮して設計や施工が行われている。覆工の力学的な特性を明らかにすると同時に、新たな材料を覆工に導入することにより、薄肉化を図った一層合理的な覆工の構造の提案ができ、コストの縮減と耐久性の向上を図ることが可能であると考えられる。

本研究では、覆工の設計手法を確立するための力学的特性に関する基礎データを得るためにトンネル覆工載荷実験を実施した。その結果、覆工に最初にひび割れが発生した荷重と最終的な破壊に至る場合の荷重の差は大きいこと、鋼繊維補強コンクリートの覆工への使用はコンクリート片の剥落防止に有用であることに加えて、曲げモーメントが卓越するような荷重条件では覆工の耐荷力が増加することが分かった。

キーワード：トンネル、覆工、載荷実験、ひび割れ、耐荷力

目　次

1. まえがき …… 1
2. トンネル覆工載荷実験 …… 2
2.1 トンネル覆工載荷実験装置 …… 2
2.1.1 載荷ピット …… 2
(1) 形状 …… 2
(2) 最大試験可能径 …… 2
(3) 油圧ジャッキの設置位置 …… 2
2.1.2 載荷実験装置の仕様 …… 2
(1) 設備仕様 …… 2
(2) ジャッキの制御方法 …… 3
(3) 載荷板および支承 …… 3
2.2 実験条件 …… 4
2.2.1 検討項目 …… 4
2.2.2 覆工に作用する荷重状態 …… 5
(1) 載荷形式A …… 5
(2) 載荷形式B・載荷形式B' …… 6
(3) 載荷形式C …… 7
2.2.3 覆工の厚さ・強度・使用材料 …… 7
2.2.4 供試体諸元 …… 7
2.3 実験の準備 …… 9
2.3.1 供試体の作成および設置 …… 9
(1) 型枠 …… 9
(2) コンクリート打設および養生 …… 9
(3) 供試体の設置 …… 9
2.3.2 管理供試体 …… 9
2.3.3 計測項目 …… 9
2.4 実験結果 …… 13
2.4.1 管理供試体試験結果 …… 13
2.4.2 載荷形式Aの結果 …… 15
(1) 荷重と変位の関係 …… 15
(2) 破壊状況とひび割れ …… 17
(3) ひずみの変化 …… 29
(4) ジャッキ反力とジャッキストロークの関係 …… 35

(5) 断面力 …… 40
2.4.3 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'の結果 …… 44
(1) 荷重と変位の関係 …… 44
(2) 破壊状況とひび割れ …… 47
(3) ひずみの変化 …… 68
(4) ジャッキ反力とジャッキストロークの関係 …… 74
(5) 断面力 …… 79
2.4.4 載荷形式Ｃの結果 …… 82
(1) 荷重と変位の関係 …… 82
(2) 破壊状況とひび割れ …… 82
(3) ひずみの変化 …… 87
(4) 断面力 …… 87
2.4.5 実験結果のまとめ …… 92
3. 解析結果との比較 …… 94
3.1 解析手法 …… 94
3.2 断面耐力曲線 …… 100
3.2.1 プレーンコンクリートの断面耐力曲線 …… 100
3.2.2 繊維補強コンクリートの断面耐力曲線 …… 103
3.3 解析結果 …… 106
3.3.1 載荷形式Ａによる各ケースの解析結果 …… 106
(1) ケース A-1 の結果 …… 106
(2) ケース A-2 の結果 …… 106
(3) ケース A-3 の結果 …… 107
(4) 載荷形式Ａの解析結果のまとめ …… 107
3.3.2 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'による各ケースの解析結果 …… 112
(1) ケース B-1 の結果 …… 112
(2) ケース B-2 の結果 …… 113
(3) ケース B-3 の結果 …… 113
(4) ケース B-4 の結果 …… 114
(5) ケース B'-1 の結果 …… 114
(6) 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'の解析結果のまとめ …… 115
3.3.3 載荷形式Ｃによる各ケースの解析結果 …… 126
(1) ケース C-1 の結果 …… 126
(2) ケース C-2 の結果 …… 126
3.4 解析結果のまとめ …… 126

4.　結論と今後の課題 …… 131

参考文献 …… 133
謝辞 …… 134

参考資料 …… 135
1. 各断面の荷重－ひずみデータ …… 135
2. 各ケースの材料試験結果 …… 196

1．まえがき

近年の道路交通の発展に伴い、道路トンネルの建設箇所が増加してきている。それと同時に、サービスの向上を目的とした道路トンネルの大断面化・偏平断面化が進みつつあり、トンネル建設におけるコスト縮減は早急に取り組むべき課題となっている。

道路トンネルの建設費のコスト縮減を考える場合、施工前や施工中における客観的な地山評価方法の確立が考えられ、またトンネル支保構造の特性を解明することによる地山に応じた適切な支保構造の構築が考えられる。特に後者では、吹付けコンクリートやロックボルトといった 1 次支保部材、また覆工といった 2 次支保部材の両者で合理的で経済的な構造とすることによってコストの縮減方法があると考えられる。

そのうち、2 次支保部材であるトンネル覆工は期待される機能として種々のものが考えられる。例えば、耐火に挙げられる防災に関する機能や、トンネル内の漏水に対する防水の機能、長年に渡って何らかの不明確な外的条件に対する構造自体への安全性を付与するための機能、さらに地山条件によっては覆工自体に外力を支持させる機能を併せ持たせるといったことが挙げられる。このように、覆工自体には種々の機能が組み合わされ、またレンガ積みでトンネルの建設を行っていた時代からの経験や、過去の実績に基づき設計や施工が行われてきた。そのため、覆工について地山条件を加味しつつ、力学的な特性を明らかにすることが適切な覆工構造を提案できる第一歩であると考えられる。

また、覆工の力学的な特性を踏まえた上で、例えば既存の覆工よりも強度の高いコンクリートや鋼繊維で補強したコンクリートといった新たな材料を覆工に導入することにより、地山等の条件によっては覆工の薄肉化を行うことが出来ると考えられ、それに伴い材料費および工事費等の削減が可能となることに加え、覆工の耐久性の向上を図ることが可能となると考えられる。

本研究ではトンネル覆工の設計手法を確立するための基礎的研究として、覆工に使用する材料を考慮した場合、および荷重の条件が覆工の力学的な特性に与える影響を検討するために覆工載荷実験を行い検証することとした。また、実験結果を踏まえて、覆工の持つ力学的な特性を地山条件、および覆工の構造系の変化を加味した簡単な数値解析を行い、実験結果の妥当性を検証した。

2．トンネル覆工載荷実験

2.1　トンネル覆工載荷実験装置

国土交通省土木研究所内にある構造力学実験施設において、トンネル研究室の保有するトンネル覆工載荷実験装置を用いて実験を行った。本節では実験を行う際に用いた実験装置について説明する。

2.1.1　載荷ピット

載荷ピットを含むトンネル覆工載荷実験装置の全景は写真-2.1 に示すとおりである。

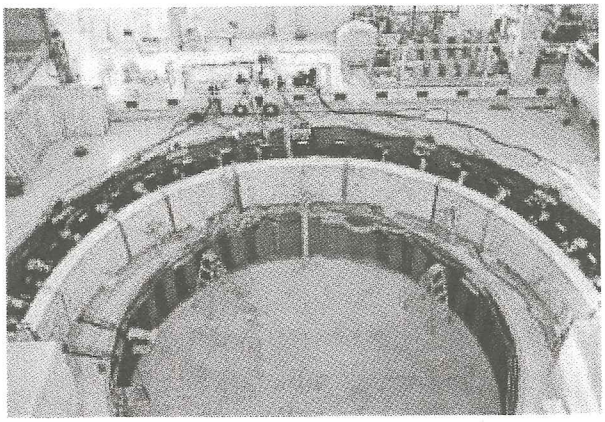


写真-2.1　トンネル覆工載荷実験装置の全景

(1)形状

載荷ピットは上下 2 段の構造で、上段で半円形供試体、下段で円形供試体の載荷試験が可能である。ピット全体の大きさは 10m×13m で、深さは 3.5m である。本実験では半円形の上段部を用いて載荷実験を実施した。

(2)最大試験可能径

上段部の半円形ピットにおける供試体の最大試験可能外径は 10m である。なお、荷重計等の設置状況や試験時に必要なジャッキストロークを確保するために、試験可能な外径は 10m より小さくなることがある。内径は、反力壁の設置位置および下段のピットの位置より 9.0m 以上で試験が可能である。

(3)油圧ジャッキの設置位置

油圧ジャッキはピット内の反力板にねじ止めで取り付ける構造である。反力板の高さは 100cm であり、1 断面当たり 2 台のジャッキを設置できる。反力板の位置は上段部のピットでは 10 度ピッチで 17 断面に設置できる。

2.1.2　載荷実験装置の仕様

(1)設備仕様

写真-2.2 に反力板と油圧ジャッキ、また写真-2.3 に油圧源を示す。油圧源は油圧ジャッキに油圧を送るために用いられる。また表-2.1 に載荷実験装置の設備仕様を示す。

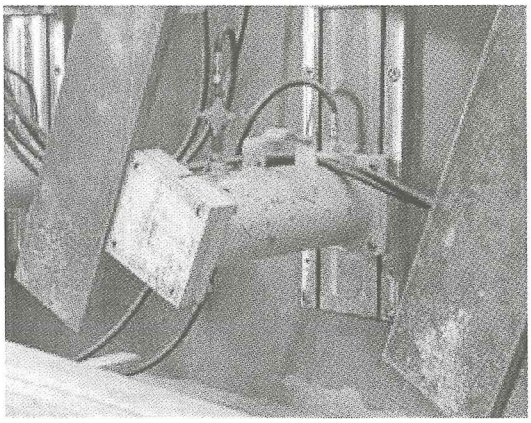


写真-2.2　反力板と油圧ジャッキ

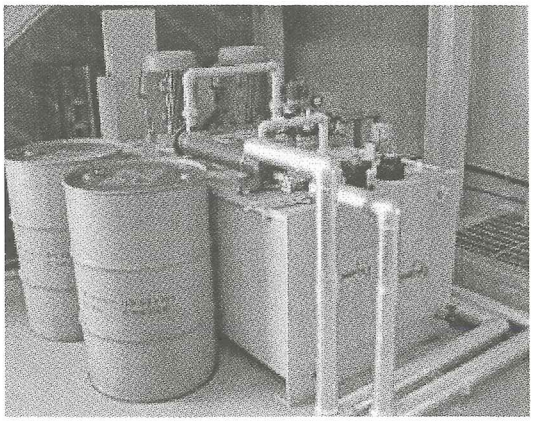


写真-2.3　油圧源

表-2.1　載荷実験装置の設備仕様

設備名	構成部品	仕様・内容
油圧ユニット	油圧ユニット	使用圧力：最大 35Mpa
	油圧配管	油圧源～サーボ弁マニホールド間：高圧用鋼管 サーボ弁マニホールド～油圧ジャッキ間：高圧ゴムホース
	サーボ弁	使用油圧：最大 35Mpa
	サーボ弁マニホールド	入出口配管：鋼管接続 分岐数：最大 6 系統
油圧ジャッキ	油圧ジャッキ	両動型 500kN×300mm(st)×36 台 ピストン径：125mm ピストン面積：122.7cm^2
制御装置	制御装置	制御方式：電気油圧サーボ式 制御範囲：0～100%(0～35MPa) 制御量：0～100%の整数値以内 制御精度：±1%以内

使用圧力の最大値が 35MPa であり、ピストン本体の断面積が 122.7cm^2 であることから、これらを乗じた約 430kN がジャッキ 1 本の載荷可能な最大荷重となる。上段部のピットを用いた実験では、ジャッキは 10 度ピッチの 17 断面で 1 断面あたり 2 台設置、すなわちする場合は 34 台のジャッキを使用する。

(2)ジャッキの制御方法

ジャッキ 6 台を 1 ポートで制御、合計 6 ポートで荷重を制御する構造で、1 ポート 6 ジャッキのすべてを使用しない場合は該当ジャッキのバルブを閉じることや、ジャッキを取り外すことで対応する。

また、本研究では後述する載荷形式により載荷を行ったが、その中で変位を制御する実験ケースがある。この場合は載荷に必要とされるジャッキを変位で制御が可能な装置に付け替えることにより実験を実施している。

(3)載荷板および支承

写真-2.4 に載荷板を示す。実際にはジャッキによる載荷では頭部からの点載荷と見なすことになるが、それを実際の地山の条件である面載荷の状態に近づけるために、ストローク等を考慮した結果、高さ 1000mm、幅 300mm、厚さ 30mm の鋼板を供試体とジャッキの間に挟み、載荷を行うこととした。

写真-2.5 に支承を示す。変位を固定、曲げモーメントを自由とする支承である。

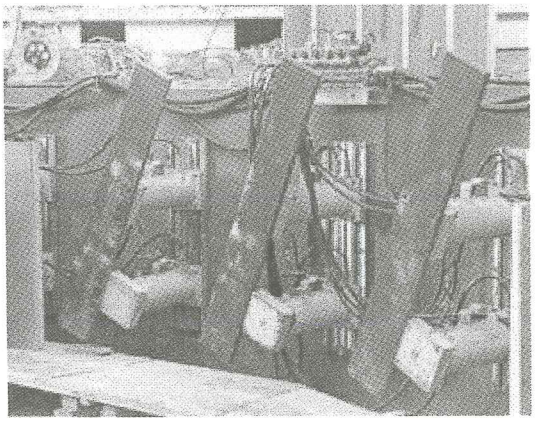


写真-2.4　載荷板

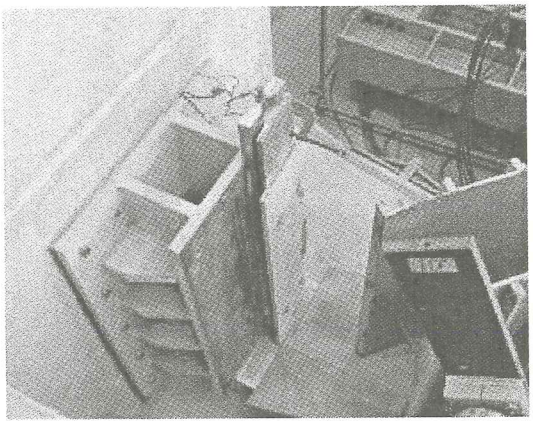


写真-2.5　支承

2.2　実験条件

本節ではトンネル覆工の設計手法を確立するために、覆工に使用する材料、荷重条件、供試体諸元を考慮した場合の実験を通し、覆工の力学的特性を把握することとした。本節では実験条件について述べる。

2.2.1　検討項目

従来の道路トンネルの覆工は施工地域によって若干の差違があるものの、道路トンネル技術基準(構造編)・同解説に基づき、表-2.2 に示す配合を基本として設計・施工が行われている。

表-2.2　現在の道路トンネルの覆工材料諸元(通常部)

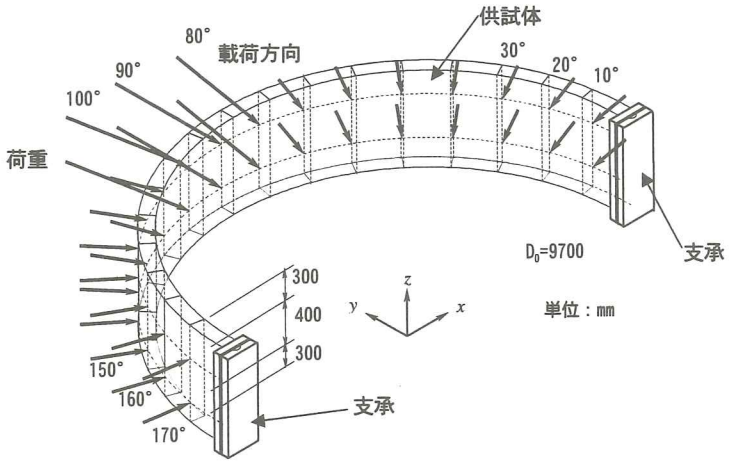
覆工厚 (cm)	セメントの種類	σ_c (N/mm²)	C(kg/m³)	スランプ (機械)(cm)	空気量 (%)	W/C(%)	粗骨材の最大寸法 Gmax(mm)
30	普通/高炉	18 以上	270 程度	12～15	4 程度	60 以下	40 以下

これを踏まえ、実験では、表-2.3 の①～④に示したパラメータに関して検討を行った。

表-2.3　支配パラメータ

パラメータ	数値および形態	その他
①覆工に作用する荷重状態	A)　軸力が卓越する荷重 B)　曲げモーメントが卓越する荷重 C)　全断面で圧縮状態となる荷重	・荷重は面載荷または面載荷に近い状態を基本とする
②覆工の厚さ	A)　20cm B)　30cm	
③覆工の強度	A)　18N/mm² B)　13.5N/mm²	・粗骨材最大寸法、W/C も付随的に決定される ・B)は、A)の強度で実験を実施した場合、供試体が破壊しないことが予想されたため、最終状態を把握するために強度を下げて実験を実施した場合に使用する
④覆工に使用する材料	A)　プレーンコンクリート B)　鋼繊維補強コンクリート C)　樹脂繊維補強コンクリート	

また、図-2.1 に実験に使用した供試体の概要図を示す。供試体は 2 車線断面トンネルを模擬した形で半円形で、外径は 9.7m である。供試体は図-2.1 に示すように設置し、トンネル中心方向に載荷した。また、荷重の載荷位置やひび割れの発生等について説明を加えるため、図-2.1 に示すように座標系を設定した。すなわち、トンネル覆工を内面側から見て、右側の脚部を 0 度、天端部を 90 度、左側の脚部を 180 度とした。



図－2.1　覆工供試体の概要図

2.2.2　覆工に作用する荷重状態

実験では荷重状態を 4 通り定義した。定義された荷重状態は「載荷形式」と称することとし、それぞれ載荷形式Ａ、載荷形式Ｂ、載荷形式Ｂ’および載荷形式Ｃと定義した。以下にその内容を記す。

(1) 載荷形式Ａ

図-2.2 に載荷形式Ａのイメージを示す。載荷形式Ａは山岳トンネルにおいて、長期の緩みに起因するような上部からの荷重等に代表される緩み荷重が作用したと想定される場合で、全体的に軸力の影響が大きく表れ、覆工の肩部分の一部で曲げモーメントが集中して発生する載荷形式である。

載荷は図-2.1 の座標系において、10 度ピッチの 17 断面で、20kN/本の荷重を全ジャッキより作用させ軸力を導入した後、80～100 度部分のジャッキのみで載荷を継続し、残りはジャッキのバルブを閉めることによりジャッキ自体を地盤反力ばねに模擬した。載荷は供試体の下部より 30cm と 70cm にジャッキ中心部が配置されるように、1 断面に 2 本のジャッキを設置し、供試体が破壊に達するまで継続した。表-2.4 に載荷形式Ａの載荷の過程を示す。

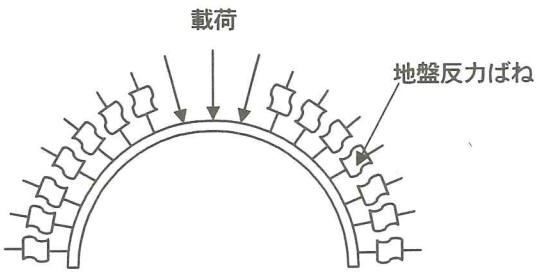


図-2.2　載荷形式Ａのイメージ

表-2.4　載荷の過程（載荷形式Ａ）

載荷ステップ	使用ジャッキ	載荷目標値 (kN/本)
1	10～170 度	5
2	10～170 度	10
3	10～170 度	15
4	10～170 度	20
5～	80～100 度	5 毎継続

(2) 載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'

図-2.3 に載荷形式Ｂおよび載荷形式Ｂ' のイメージを示す。これらは覆工の天端および肩部背面に空洞が発生した状態で上部から荷重が作用したと想定される場合で、肩部で曲げの影響が大きく現れる形式である。

載荷は図-2.1 の座標系において、10～40 度、90 度および 140～170 度の 9 断面で行った。載荷形式Ｂと載荷形式Ｂ' の違いは、ジャッキは同一角度の部分を用いたが、供試体の厚さにより軸力導入の過程を変えたものである。表-2.5 (a) ～ (b) に載荷形式Ｂと載荷形式Ｂ' の載荷の過程を示す。ジャッキは載荷形式Ａの場合と同様の配置とした。載荷は載荷可能な最大荷重を越えたと判断できるまで継続し、軸力導入後はジャッキのバルブを閉めることにより 10～40 度および 140～170 度のジャッキ自体を地盤反力ばねに模擬した。

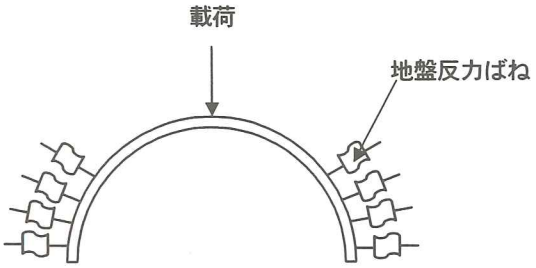


図-2.3　載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ' のイメージ

表-2.5 (a)　載荷の過程 (載荷形式Ｂ)

載荷ステップ	使用ジャッキ	載荷目標値 (kN/本)
1	90 度	5
2	10 度、170 度	5
3	90 度	15
4	10 度、170 度	10
5	90 度	20
6	20 度、30 度、150 度、160 度	2.5
7	90 度	22.5
8	20 度、30 度、150 度、160 度	5
9	90 度	25
10	20 度、30 度、150 度、160 度	7.5
11	90 度	27.5
12	20 度、30 度、150 度、160 度	10
13	90 度	30
14	90 度	32.5
15	40 度、140 度	2.5
16	90 度	35
17	40 度、140 度	5
18	90 度	37.5
19	40 度、140 度	7.5
20	90 度	40
21	40 度、140 度	10
22～	90 度	変位制御

表-2.5 (b)　載荷の過程 (載荷形式Ｂ')

載荷ステップ	使用ジャッキ	載荷目標値 (kN/本)
1	90 度	4
2	10 度、170 度	4
3	20 度、30 度、150 度、160 度	4
4	10 度、170 度	8
5	40 度、140 度	4
6	90 度	16
7～	90 度	変位制御

(3) 載荷形式C

図-2.4 に載荷形式Cのイメージを示す。載荷形式Cはトンネルに等方的に土圧が作用することを想定した場合で、全周から同一の荷重が作用し、全断面で圧縮となり、圧縮破壊を招くと考えられる。図-2.1 の座標系において、10～170 度の 17 断面のジャッキを用いて載荷を行った。表-2.6 に載荷形式Cの載荷の過程を示す。

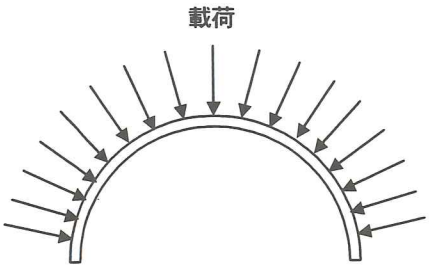


図-2.4 載荷形式Cのイメージ

表-2.6 載荷の過程(載荷形式C)

載荷ステップ	使用ジャッキ	載荷目標値(kN/本)
1	10～170 度	5 毎継続

2.2.3 覆工の厚さ・強度・使用材料

覆工の厚さは現状の 2 車線程度のトンネルでは 30cm が標準である。本研究では、30cm の場合の実験に加え、覆工の薄肉化を検討する目的で厚さを 20cm とした場合の実験を行った。

覆工の強度は現状の 2 車線程度のトンネルでは 18N/mm^2 が標準である。本研究では、目標とするコンクリート強度を 18N/mm^2 とした。ただし、載荷形式Cの実験では 18N/mm^2 のコンクリートを用いると現状の載荷装置で供試体が破壊に達しないと予想されたため、目標とする強度を 13.5N/mm^2 とした実験を行った。

覆工の使用材料は現状の 2 車線程度のトンネルでは特殊地山等の場合を除いてプレーンコンクリートを用いる。本研究では、建設コストの縮減を図るための覆工の薄肉化、および構造の耐久性向上を図るための覆工からの剥離・剥落の防止方策を検討するため、鋼繊維または樹脂繊維を混入したコンクリートを用いて実験を行った。

2.2.4 供試体諸元

表-2.7 に 2.2.2～2.2.3 に基づいて決定した合計 10 ケースの供試体の諸元を示す。

表-2.7 実験に使用した供試体の仕様

使用材料(コンクリート)	ケース番号	厚さ(mm)	外径(mm)	目標 28 日強度(N/mm^2)	繊維直径(mm)	繊維長さ(mm)	載荷の制御方法	載荷形式
プレーンコンクリート	A-1	300	9700	18	－	－	荷重制御	A
鋼繊維補強コンクリート	A-2	300	9700	18	0.8	60	荷重制御	A
プレーンコンクリート	A-3	200	9700	18	－	－	荷重制御	A
プレーンコンクリート	B-1	300	9700	18	－	－	変位制御	B
鋼繊維補強コンクリート	B-2	300	9700	18	0.8	60	変位制御	B
鋼繊維補強コンクリート	B-3	300	9700	18	0.8	30	変位制御	B
樹脂繊維補強コンクリート	B-4	300	9700	18	0.8	50	変位制御	B
鋼繊維補強コンクリート	B'-1	200	9700	18	0.8	60	変位制御	B'
プレーンコンクリート	C-1	300	9700	13.5	－	－	荷重制御	C
鋼繊維補強コンクリート	C-2	300	9700	13.5	0.8	60	荷重制御	C

載荷形式Aの実験に用いた諸元として、ケースA-1では道路トンネル技術基準に基づき、供試体の材料をプレーンコンクリート、厚さを30cmとした。ケースA-2では鋼繊維による補強効果を把握するために、日本道路公団試験研究所による材料試験や施工実績を踏まえ、長さが60mm、直径が0.8mmの鋼繊維を鋼繊維混入率(鋼繊維補強コンクリート1m³中に占める鋼繊維の容積百分率)0.5%(40kg/m³)で混入した鋼繊維補強コンクリートを用い、厚さを30cmとした。ケースA-3では薄肉化の影響を検討するためにケースA-1と同一の材料を用い、厚さを20cmとした。

載荷形式Bの実験に用いた諸元として、ケースB-1ではケースA-1と同一の諸元、ケースB-2ではケースA-2と同一の諸元とした。ケースB-3では鋼繊維長さの影響を把握するために、繊維長を30mmにした以外はケースB-2と同一の諸元を持つ鋼繊維補強コンクリートとした。ケースB-4では樹脂繊維による影響を把握するために、長さが50mm、直径が0.8mmの樹脂繊維を混入率0.5%(6.5kg/m³)で混入したものとした。また、載荷形式B'として、ケースB'-1では鋼繊維補強コンクリートにおける薄肉化の影響を把握するために、厚さを20cmにした以外はケースB-2と同一の諸元を持つ鋼繊維補強コンクリートとした。

載荷形式Cの実験に用いた諸元として、ケースC-1は圧縮破壊を生じる場合のプレーンコンクリートを用いた覆工の状態を把握するために、厚さを30cm、強度を13.5N/mm²とした。ケースC-2は同様の条件で鋼繊維補強コンクリートを用いた。

実験に当たっては供試体の強度の管理を行い、目標とした強度に達した時点で実験を実施した。供試体のスランプは打込み時を12cmとし、鋼繊維や樹脂繊維を混入させたケースでは混入前で15cmないしは18cmとして、混入後で12cmとなるようにした。表-2.8にそれぞれのケースで用いたコンクリートの配合を示す。

表-2.8　実験に使用した供試体のコンクリートに関する諸元

コンクリート種類	単位	配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
		プレーン	鋼繊維	鋼繊維	プレーン	鋼繊維	樹脂繊維
呼び強度	N/mm²	18	18	18	13.5	13.5	18
スランプ	cm	12	18(混入後12)	18(混入後12)	12	15(混入後12)	18(混入後12)
粗骨材の最大寸法	mm	40	20	20	20	20	20
セメントの種類		普通	普通	普通	普通	普通	普通
W/C	(%)	57.5	65	65	75.5	75.5	50
s/a	(%)	43.8	52	52	47.6	48.6	54.5
空気量	(%)	4.0	4.5	4.5	4.5	4.0	4.5
単位量(kg/m³)	セメント	270	280	280	223	230	280
	水	156	183	183	168	173	175
	細骨材	822	927	927	890	900	951
	粗骨材	1091	886	886	1012	983	810
	混和剤	2.86	2.97	2.97	2.36	2.44	4.72
鋼繊維・樹脂繊維の諸元	長さ(mm)	−	60	30	−	60	50
	直径(mm)	−	0.8	0.8	−	0.8	0.8
	混入率	−	0.5% (40kg/m³)	0.5% (40kg/m³)	−	0.5% (40kg/m³)	0.5% (6.5kg/m³)
実験ケース		A-1 A-3 B-1	A-2 B-2 B'-1	B-3	C-1	C-2	B-4
備考		混和剤=AE減水剤標準形(I種)、C×1.0(%)×ρ					

2.3　実験の準備

2.3.1　供試体の作成および設置

(1) 型枠

型枠は写真-2.6 に示すように木製の型枠とし、コンクリートの打設圧に耐えうるように十分に補強した構造とした。供試体の精度を確保するために、側板は事前に所定の曲率に加工した合板を補強して使用した。

(2) コンクリート打設および養生

近隣の工場より購入したレディミクストコンクリートをポンプ車を用いて打設した。コンクリートの打設状況を写真-2.7 に示す。なお、鋼繊維や樹脂繊維の混入は、現場にて打設前にミキサー車に投入し混合した。打設後、表面の乾燥を防ぐために養生シートで養生し、脱型は材令 5 日以上とした。強度は実験条件を統一できるように強度管理を行い、予め規定していた強度に達した時点で実験を実施した。

(3) 供試体の設置

供試体の設置は覆工の軸方向が鉛直方向と平行になる向きで設置し、供試体下部にはテフロン板およびテフロンシートで摩擦を除去した支承を配置し、覆工アーチ支点は回転のみを自由とする支承を配置して拘束した。

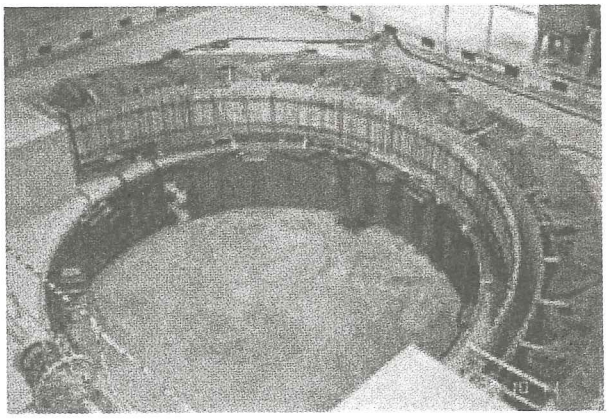


写真-2.6　型枠の全体図

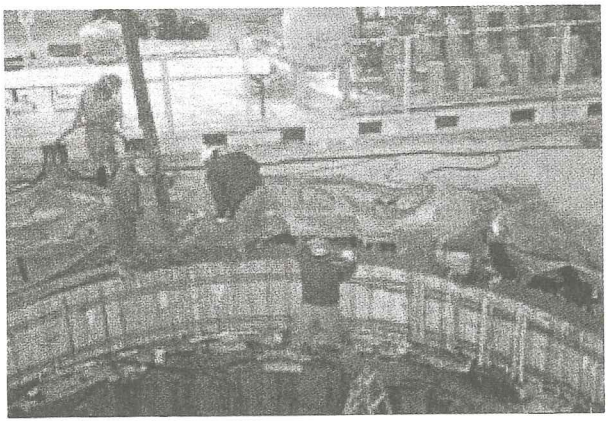


写真-2.7　コンクリートの打設状況

2.3.2　管理供試体

実験の供試体に用いたコンクリートの特性値を把握するために、圧縮供試体と曲げ供試体の管理供試体を製作し、原則として実際の試験を実施した材令で強度試験を実施した。また、実際に実験に用いた供試体から可能なものについてはコアリングを行い、コンクリートの特性値の把握を行った。圧縮強度試験においては原則としてヤング率、一軸圧縮強度およびポアソン比、曲げ試験については曲げ強度および曲げタフネスを算定した。

2.3.3　計測項目

表-2.9 に本実験で計測した項目を示す。なお、ひずみゲージが実験前に損傷したり、供試体の厚さの関係で荷重計が設置できないことがあり、計測位置がケースによっては異なっていることがある。また、種々の検討を加えていった過程において測定位置を変更する必要が生じたため、ひずみゲージの貼付位置はケースによって異なる場

合がある。図-2.5 にこれらの計測システムの概要を示す。さらに図-2.6 にケース A-1、およびケース A-2 のひずみゲージの貼付位置を示す。それ以外のケースにおけるひずみゲージの貼付位置は表-2.10 に示すとおりである。

表-2.9　測定項目および数量

測定項目	測定機器	計測点数	備考
載荷重	油圧計	6	載荷装置に示された圧力 (載荷形式A・Cで測定)
作用変位	載荷装置ストローク計	2	載荷装置に示された変位 (載荷形式B・B'で測定)
ジャッキ反力	ロードセル	10	
ジャッキストローク	変位計	17	
変位	変位計	11	
ひずみ	ひずみゲージ	168～188	
ひび割れ	目　視	－	

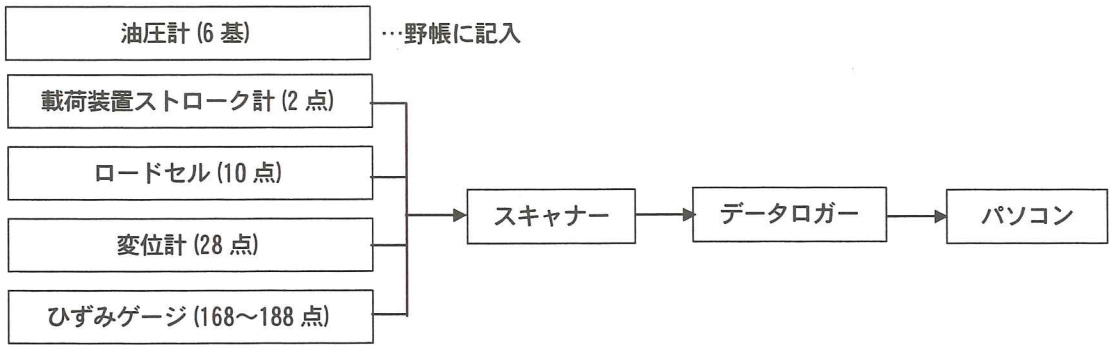


図-2.5　計測システムの概要

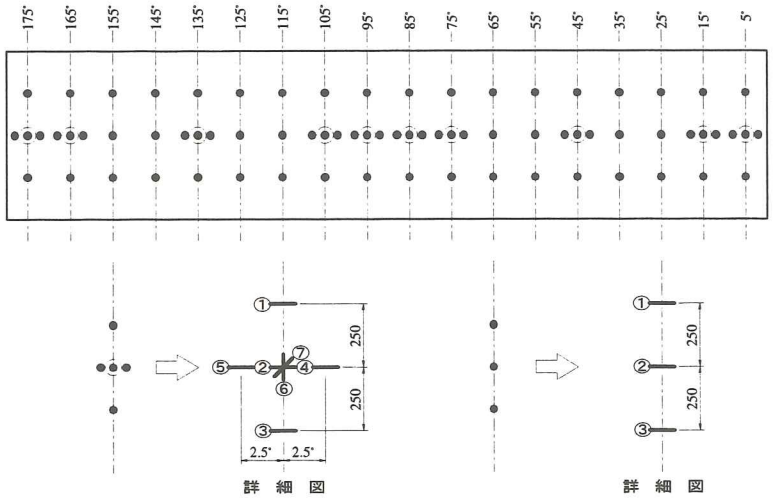


図-2.6　ひずみゲージ貼付位置

表-2.10　ひずみ測定箇所一覧表

(注) 空欄は測定実施

測定角度(度)		測定側	測定高さ(cm)	該当ケース		
位置	対称位置			A-1 A-2	A-3 B-2 B'-1 B-3	B-1 B-4 C-1 C-2
2.5	177.5	内縁・外縁	50		未測定	未測定
5	175	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50		未測定	未測定
7.5	172.5	内縁・外縁	50		未測定	未測定
12.5	167.5	内縁・外縁	50			
15	165	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50			未測定
17.5	162.5	内縁・外縁	50			
25	155	内縁・外縁	75/50/25			
35	145	内縁・外縁	75/50/25			
42.5	137.5	内縁・外縁	25		未測定	未測定
45	135	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50		未測定	未測定
47.5	132.5	内縁・外縁	50		未測定	未測定
52.5	127.5	内縁・外縁	50	未測定		
55	125	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50	未測定		未測定
57.5	122.5	内縁・外縁	50	未測定		
62.5	117.5	内縁・外縁	75/50/25	未測定		
65	115	内縁・外縁	75/50/25			
67.5	112.5	内縁・外縁	75/50/25	未測定		
72.5	107.5	内縁・外縁	75	未測定	未測定	
		内縁・外縁	50		未測定	
		内縁・外縁	25	未測定	未測定	
75	105	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50		未測定	未測定
77.5	102.5	内縁・外縁	75	未測定	未測定	
		内縁・外縁	50		未測定	
		内縁・外縁	25	未測定	未測定	
82.5	97.5	内縁・外縁	50			
85	95	内縁・外縁	75/50/25			
		内縁・外縁、鉛直向き・斜め向き	50			未測定
87.5	92.5	内縁・外縁	75	未測定		
		内縁・外縁	50			
		内縁・外縁	25	未測定		

また、荷重計を用いての変位測定や変位計を用いての供試体の変位、およびジャッキのストロークは、実験状況を確認しながら載荷形式毎に調整した。ケース A-1 とケース A-2 の場合を図-2.7 に示す。また、実際に測定した箇所を表-2.11 に示す。

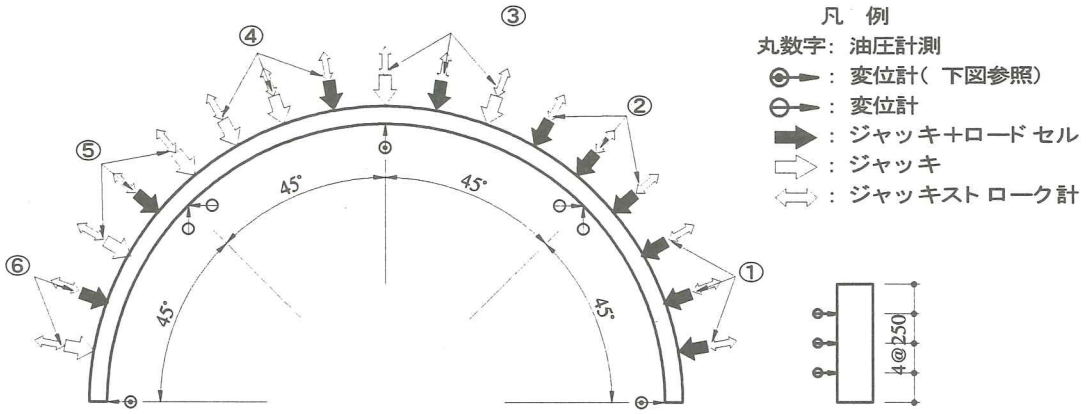


図-2.7　計測位置（ケースA-1、A-2）

表-2.11　変位・反力測定箇所一覧表

（注）　空欄は測定実施

測定角度（度）	測定対象	該当ケース		
		載荷形式 A	載荷形式 B・B'	載荷形式 C
0	供試体変位（水平3点）			
10、20、30、40	ジャッキストローク			
	ジャッキ反力			
45	供試体変位（水平、鉛直）			
50、60、80	ジャッキストローク		未測定	
	ジャッキ反力		未測定	
70	ジャッキストローク		未測定	
	ジャッキ反力	未測定	未測定	
90	供試体変位（鉛直3点）			
	ジャッキストローク			
	ジャッキ反力	未測定		未測定
100	ジャッキストローク		未測定	
	ジャッキ反力		未測定	未測定
110、120、130	ジャッキストローク		未測定	
	ジャッキ反力	未測定	未測定	未測定
135	供試体変位（水平、鉛直）			
140、160	ジャッキストローク			
	ジャッキ反力			
150、170	ジャッキストローク			
	ジャッキ反力	未測定		未測定
180	供試体変位（鉛直3点）			

2.4 実験結果

2.4.1 管理供試体試験結果

実験にあたり、供試体の基本的な特性を把握するための材料試験を実施した。材料試験はプレーンコンクリートについては一軸圧縮強度試験、繊維補強コンクリートについては一軸圧縮強度試験および曲げ試験を実施した。一軸圧縮強度試験を実施した場合は各ケース毎のヤング係数、一軸圧縮強度およびポアソン比、また曲げ試験を実施した場合は曲げ強度および曲げタフネスを算定した。また、参考としてケースC-2においてのみ引張試験を実施した。

一軸圧縮強度試験は一軸圧縮試験機を用い、図-2.8に示すような荷重とひずみの関係を測定した。圧縮強度は、ひずみが 2000×10^{-6} を越え、荷重が概ね一定値と見なすことが可能な場合の荷重Pより強度を算定した。ヤング係数は、文献1)等に従って、図-2.8に示したP/3、すなわち圧縮強度の1/3の点とひずみが 50×10^{-6} の点とを結ぶ線分の傾きである割線弾性係数として算定した。また、ポアソン比はその場合のひずみの差を供試体の縦方向と横方向について測定し、その比として算定した。

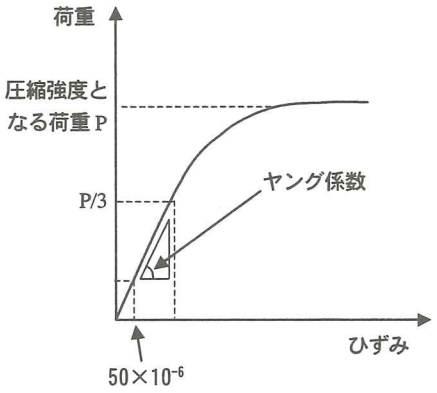


図-2.8 一軸圧縮強度試験の荷重-ひずみ関係

曲げ試験は変位制御による4等分点載荷により実施し、得られた結果から曲げ強度および曲げタフネスを次式によって求めた。曲げ強度は管理供試体に発生した曲げ引張応力の最大値として算定した。

$$\text{曲げ強度}\quad \sigma_b = \frac{Pl}{bh^2} \qquad \cdots(2.1)$$

$$\text{曲げタフネス}\quad \overline{\sigma_b} = \frac{T_b}{\delta_{tb}}\frac{l}{bh^2} \qquad \cdots(2.2)$$

ここで、σ_b : 曲げ強度 (N/mm²)
P : 試験機の示す最大荷重 (N)
l : スパン長 (mm)
b : 破壊断面の幅 (mm)
h : 破壊断面の高さ (mm)
$\overline{\sigma_b}$: 曲げタフネス係数 (N/mm²)
T_b : 図-2.9に示す δ_{tb} までの面積 (N・mm)
δ_{tb} : スパンの1/150のたわみ (mm)

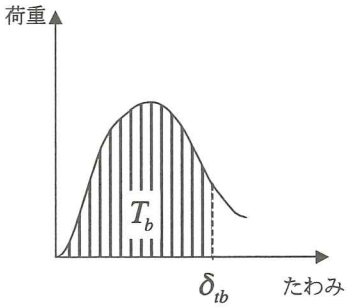


図-2.9 荷重-たわみ曲線

表-2.12に圧縮強度試験結果から得られた各ケース毎の圧縮強度、ヤング係数およびポアソン比、曲げ試験結果から得られた曲げ強度および曲げタフネスの平均値について示す。表中の横線で示されているところでは強度を算

定しなかった。また、ケースB-4では一軸圧縮試験のうち、管理供試体については実験実施時(材令14日)に合わせて試験を行うことが出来たが、コア抜き供試体については実施できず、材令21日で行った。それによると、材令14日で行った管理供試体による圧縮強度よりも小さいといった結果が得られたため、材令22日で残されていた管理供試体を用い、再び圧縮試験を実施した。また、さらにコア抜き供試体による一軸圧縮試験を材令30日においても実施した。この強度が大きく異なる理由として、打設後から数日間、実際の覆工供試体の置かれていた環境で著しく気温の低下が見られ、管理供試体との養生過程で若干の気温差があったと予想される。

また、ケースC-2においては直接引張試験により引張強度を算定した。

表-2.12　実験に使用した供試体の平均強度

使用材料	ケース番号	配合	供試体の平均強度												
			一軸圧縮試験								引張試験		曲げ試験		
			管理供試体				コア抜き供試体				管理供試体		管理供試体		
			圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比	材齢	圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比	材齢	引張強度	材齢	曲げ強度	曲げタフネス	材齢
			N/mm²	kN/mm²		日	N/mm²	kN/mm²		日	N/mm²	日	N/mm²	N/mm²	日
プレーン	A-1	①	26.29	20.65	0.20	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
鋼繊維補強	A-2	②	19.86	16.85	0.16	21	20.24	17.80	0.18	22	-	-	3.88	3.61	22
プレーン	A-3	①	20.05	14.43	0.14	13	20.63	-	-	13	-	-	-	-	-
プレーン	B-1	①	26.89	21.57	0.22	13	25.70	-	-	14	-	-	-	-	-
鋼繊維補強	B-2	②	21.80	19.60	0.11	14	19.70	-	-	14	-	-	4.88	7.52	16
鋼繊維補強	B-3	③	23.67	17.17	0.15	17	19.07	-	-	18	-	-	3.51	2.48	21
樹脂繊維補強	B-4	⑥	28.33	20.50	-	14	20.54	18.87	-	21	-	-	4.43	4.00	14
			28.30	20.43	-	22	20.50	-	-	30	-	-	-	-	-
鋼繊維補強	B'-1	②	22.80	18.30	0.25	14	20.57	-	-	14	-	-	5.20	4.55	28
プレーン	C-1	④	14.43	14.42	0.10	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
鋼繊維補強	C-2	⑤	12.77	13.17	-	13	9.00	-	-	14	1.71	20	3.95	3.67	20

2.4.2　載荷形式Ａの結果

(1) 荷重と変位の関係

①天端

図-2.10(a)に天端部(90 度)の内縁側の荷重変位曲線を示す。各ケースとも供試体が破壊し、供試体が破壊したときの天端の作用荷重はケースA-1では390kN/本、ケースA-2では330kN/本、またケースA-3では175kN/本となった。破壊時の荷重は異なるが破壊時の天端変位は各ケースとも概ね40㎜となった。

②脚部

図-2.10(b)に0度および180度部分、すなわち脚部の荷重変位曲線を示す。ケースA-1およびケースA-2では天端からの載荷荷重が50kN/本を超えた付近から0度については右方向に、180度については左方向の変位が生じた。変位値は0度の方が若干大きく供試体が開く形となったが、全体的な変形は小さかったと考えられる。また、ケースA-3では180度で載荷初期に変位が発生していることから軸力導入時で供試体に若干の移動が生じたと考えられるが、その後は大きな変形は生じなかった。以上より、軸力導入時には左右からの載荷荷重で微妙なアンバランスがあったり、また、ひび割れの発生が左右対称に発生せず載荷の継続につれて挙動が左右対称ではなくなることもあったが、それらの差は小さく、各ケースとも概ね左右対称の挙動を示していたと考えられる。

③45度・135度部分

図-2.10(c)に45度部分の水平方向の荷重変位曲線を示す。なおケースA-1とケースA-2では135度においての計測を実施しなかった。ケースA-1とケースA-2では、変位の値は概ね同様の挙動を示していたと考えられる。また、ケースA-3では、45度で載荷荷重が50kN/本の時に変位が大きく変化しているものの、傾きについては45度と135度で概ね等しいことから、概ね左右対称に挙動したと考えられる。

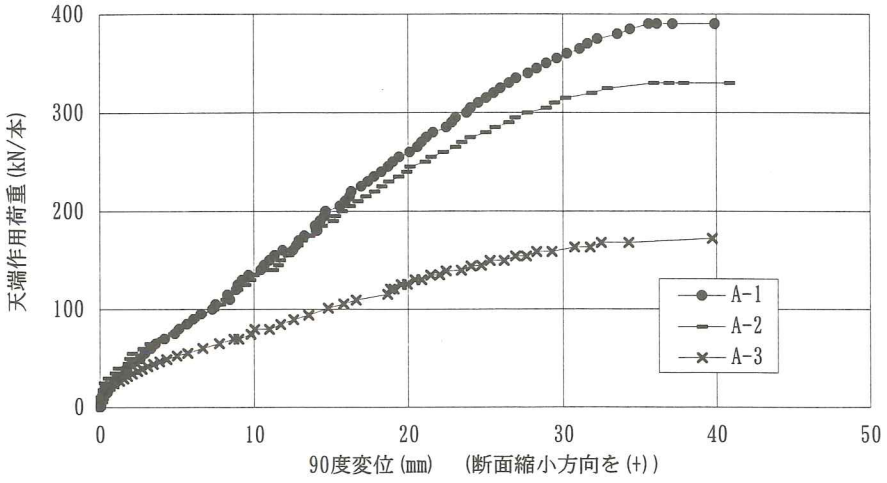


図-2.10 (a)　荷重変位曲線 (載荷形式Ａ，90度，高さ50cm)

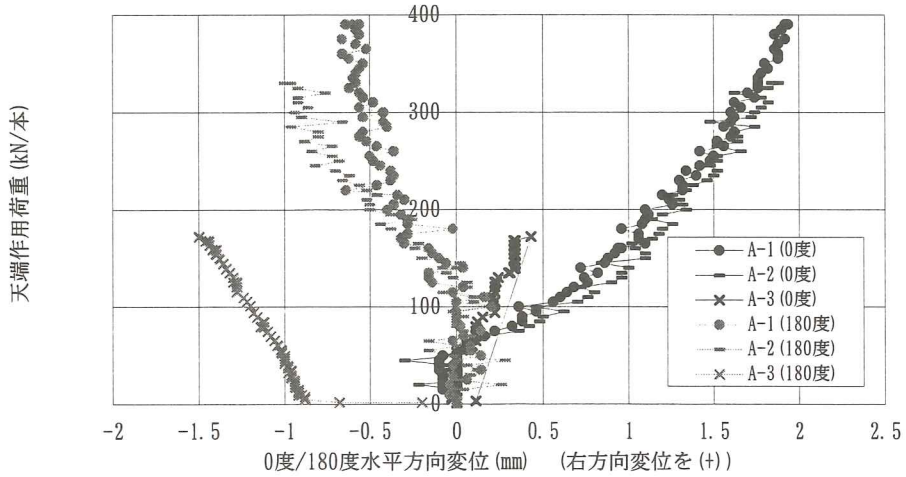


図-2.10 (b)　荷重変位曲線 (載荷形式Ａ，0度/180度，高さ50cm)

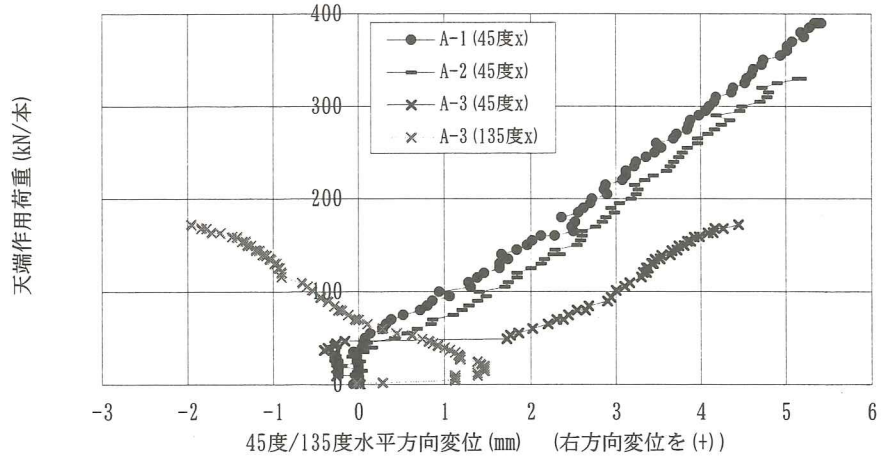


図-2.10 (c)　荷重変位曲線
(載荷形式Ａ，45・135度水平方向，高さ50cm)

(2) 破壊状況とひび割れ

ケース A-1、A-2、および A-3 のひび割れ図を図-2. 11 (a) ～ (d) 、図-2. 12 (a) ～ (c) 、および図-2. 13 (a) ～ (d) に示す。ひび割れ図は内縁側、すなわちトンネル覆工を内側から見た状態を基準 (図の右側が角度が 0 度、左側が 180 度) とし、それに対応した部分の外縁側の図を示した。図中の上部は供試体の上側、下部は下側として示した。また、各ケースにおける最終の破壊状況を写真-2. 8 (a) ～ (h) 、写真-2. 9 (a) ～ (h) 、および写真-2. 10 (a) ～ (f) に示す。さらに、それらのケースにおける発生したひび割れ発生荷重とひび割れの状況について表-2. 13 (a) ～ (c) に示す。

ケース A-1 では、表-2. 13 (a) より第 1 ひび割れが 80kN/本 (天端変位 9. 00mm) で天端部の内縁側にひび割れ幅が 0. 15mm 程度で確認された。また、第 2 ひび割れが 160kN/本 (天端変位 16. 6mm) で 65 度および 115 度の外縁側で確認された。ひび割れの発生状況は、図-2. 11 (a) および (b) より供試体の上下方向にひび割れが進展する形状が多かった。その理由として、第一に載荷板を挿入した面的な載荷を行っているため、ひび割れ発生直後は供試体の上から下にわたって進展すると考えられる。第二にプレーンコンクリートを用いたことからひび割れ発生直後は 1 本に集中して進展していくものと考えられる。なお、図-2. 11 (c) に見られるように、載荷荷重が非常に大きくなるにつれて複数本のひび割れを生じた。載荷荷重が 390kN/本で供試体は破壊し、写真-2. 8 (g) および 2. 8 (h) に示すように供試体の左肩部分 (115° 付近) の内縁側から供試体の一部が崩れ落ちる現象が観察された。その後、段階的に天端部、右肩部分 (65 度付近) の順に破壊が発生した。写真-2. 8 (c) および 2. 8 (d) に 90 度付近の最終状態を、また写真-2. 8 (e) および 2. 8 (f) に 65 度付近の最終状態を示す。写真-2. 8 (c) より 90 度の外縁側でも圧縮による破壊が生じたと考えられるが、実際には最初に 115 度の内縁側で破壊が生じた。その理由として 90 度の外縁側の破壊は載荷板により拘束され、外にはらみ出す形の破壊が抑制されていたと考えられる。

ケース A-2 では、表-2. 13 (b) より第 1 ひび割れが 60kN/本 (天端変位 2. 80mm) で天端部の内縁側にひび割れが確認された。また、第 2 ひび割れが 240kN/本 (天端変位 19. 9mm) で 62～68 度および 114 度の外縁側で確認された。ひび割れの発生状況は、プレーンコンクリートとは異なり、図-2. 12 (b) および (c) より載荷荷重が低い段階から複数本の細かなひび割れが観察され、横方向にも進展する様子が観察された。ひび割れの開口幅は、ひび割れが細かく多数発生しており定量的な計測が不可能な場合が多かった。供試体の破壊は、写真-2. 9 (f) および (g) より 65 度付近や 115 度付近で圧縮の限界に達したと考えられる破壊が生じたが、内縁側から崩れ落ちる現象は観察されなかった。このことから、剥落の抑制に鋼繊維補強の効果が現れていることが分かった。

さらにケース A-3 では、表-2. 13 (c) より第 1 ひび割れが 50kN/本 (天端変位 4. 30mm) で天端部の内縁側にひび割れが確認された。また、第 2 ひび割れが 92kN/本 (天端変位 13. 6mm) で 110 度の外縁側で確認された。ひび割れの発生状況は、図-2. 13 (a) および (b) より、供試体の上下方向にひび割れが進展する形状が多く、ケース A-1 と類似していた。また、図-2. 13 (c) に示された破壊時のひび割れ図から考えると、破壊直前でもひび割れが複数本は発生しておらず、1 本に集中して進展したと考えられる。載荷荷重が 176kN/本で供試体は破壊し、写真-2. 10 (e) および 2. 9 (f) に示すように供試体の左肩部分 (115 度付近) の内縁側から崩れ落ちるように破壊した。その後、天端部、右肩部分 (65 度付近) の順に破壊が発生する様子が確認され、破壊の様子はケース A-1 と類似していた。写真-2. 10 (c) および (d) に 90 度付近の最終状態を示す。ケース A-1 と同様に 90 度の外縁側では圧縮による破壊が生じていたと考えられるが、覆工の厚さが A-1 と比較して小さく、破壊時に急速にひび割れが進展することが観察された。

各ケースに共通して、第 1 ひび割れの発生と供試体の破壊との荷重の差は大きいことが分かった。

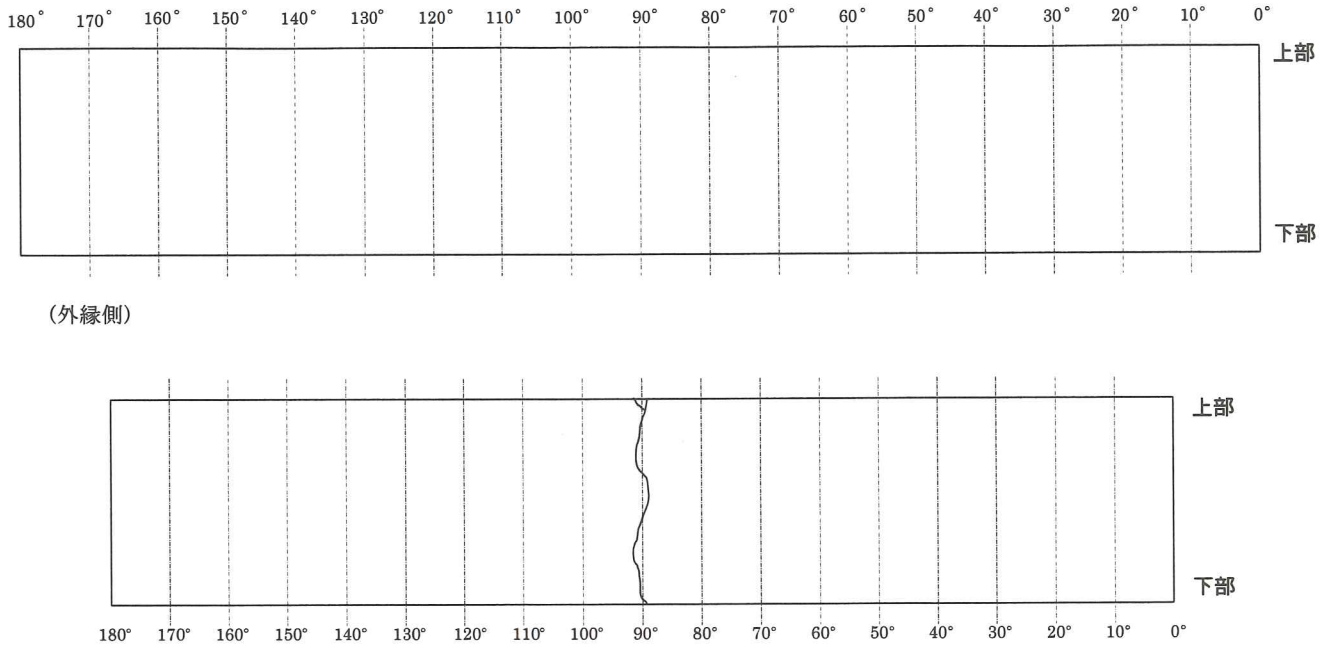


図-2.11(a)　ひび割れ図　(ケースA-1　100kN/本載荷時(天端変位＝7.30mm))

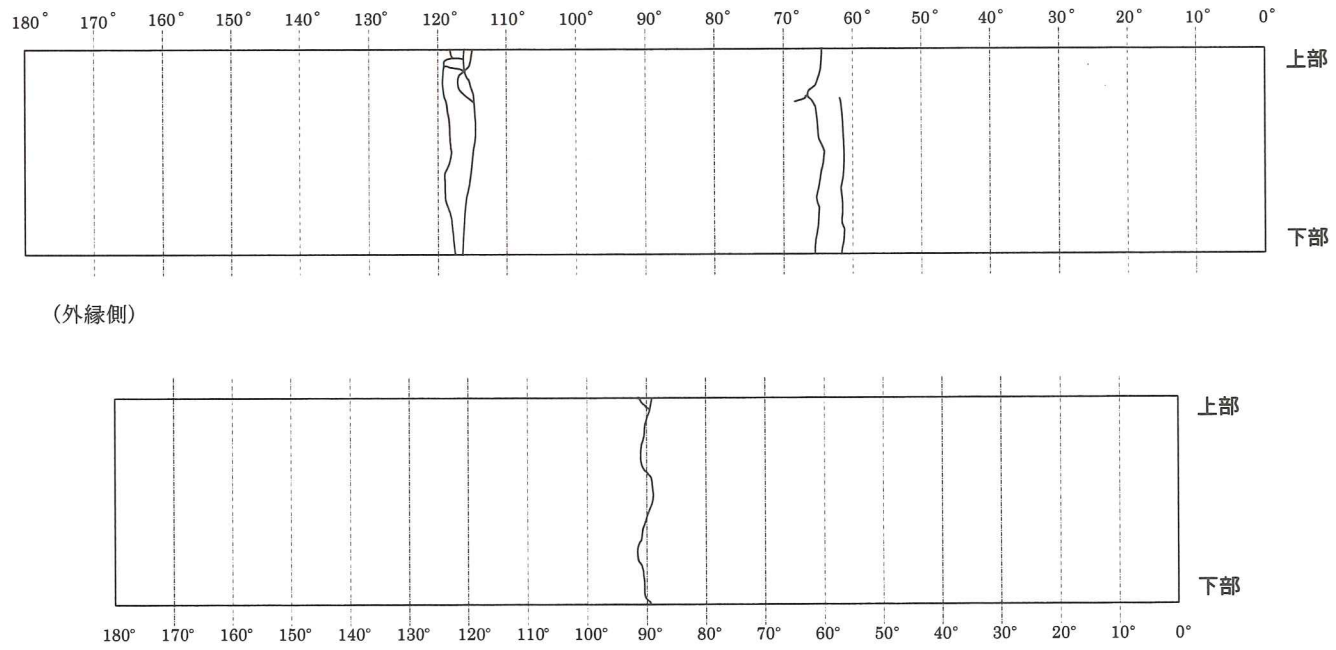
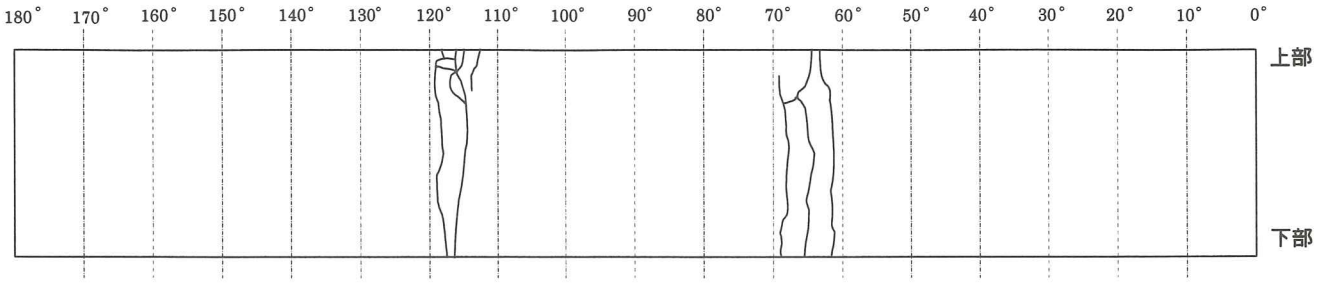
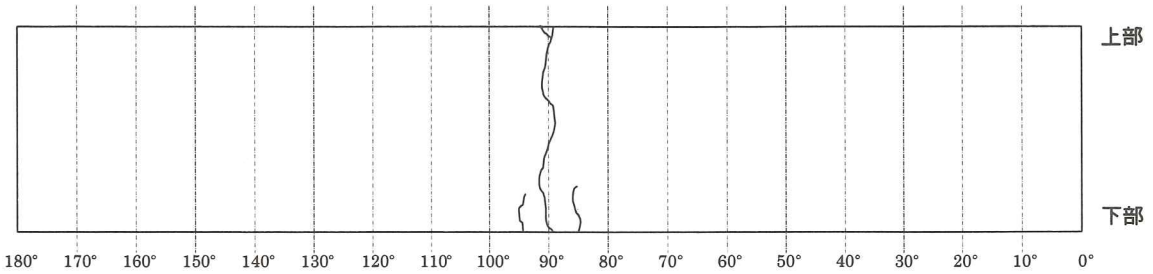


図-2.11(b)　ひび割れ図　(ケースA-1　200kN/本載荷時(天端変位14.68mm))

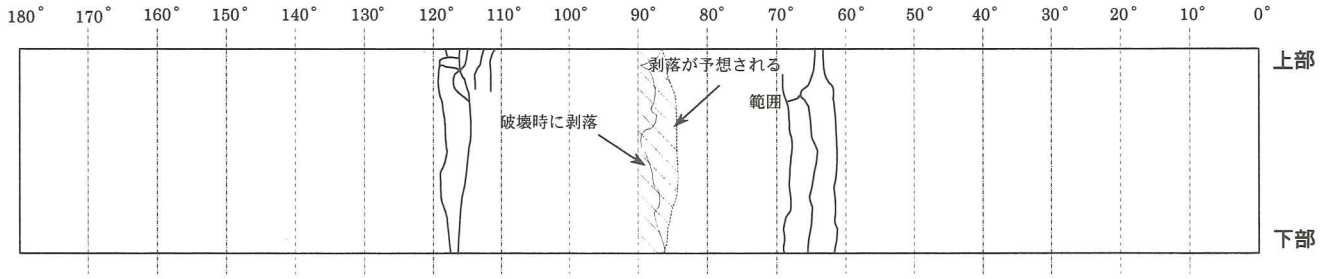


（外縁側）

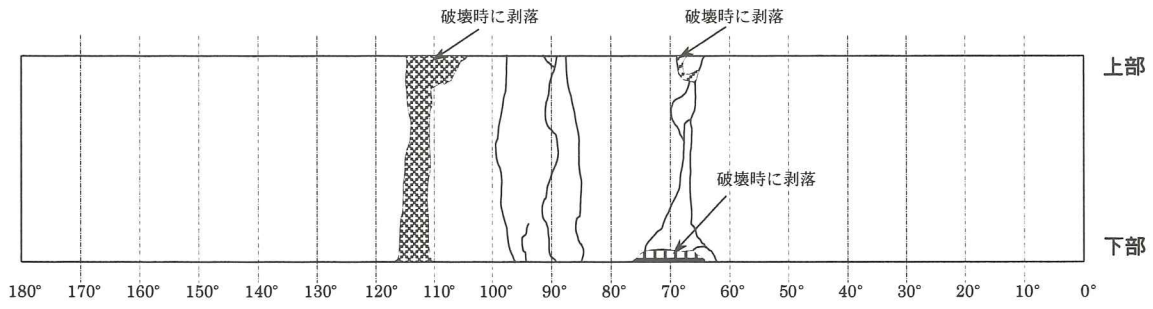


（内縁側）

図-2.11(c)　ひび割れ図　(ケースA-1　300kN/本載荷時(天端変位23.80mm))



（外縁側）



（内縁側）

図-2.11(d)　ひび割れ図　(ケースA-1　最終状態(390kN/本載荷時)(天端変位39.92mm))

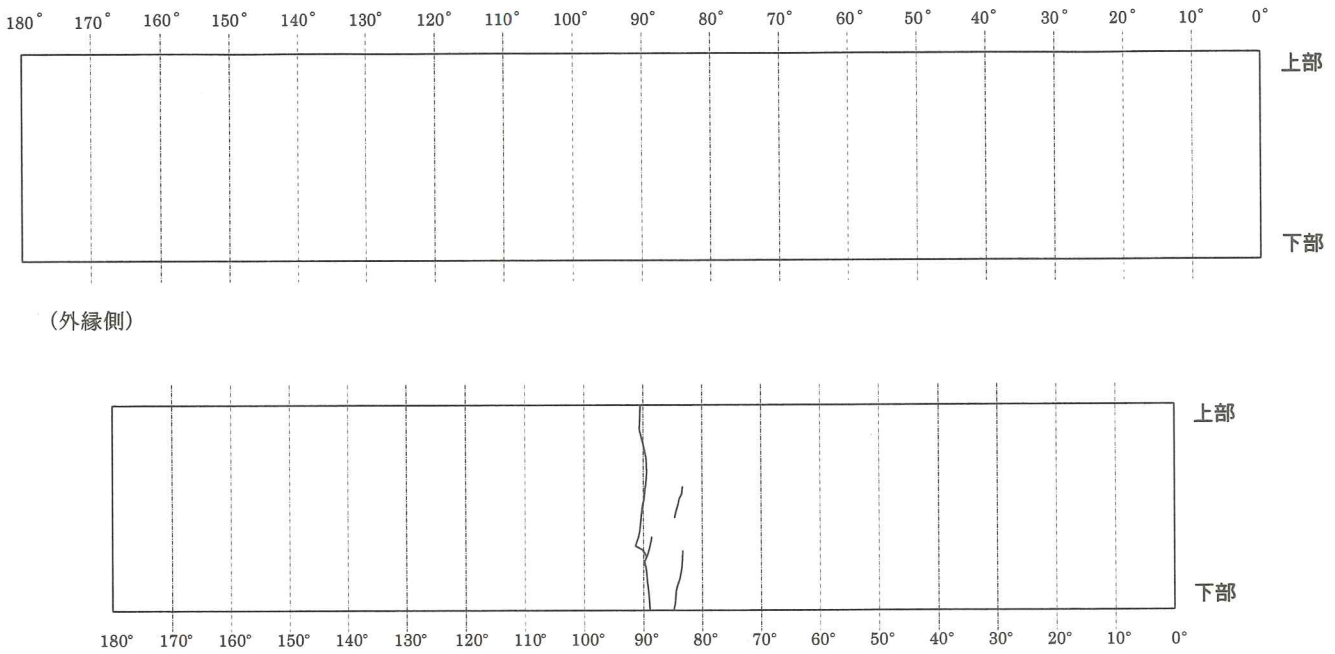


図-2.12(a)　ひび割れ図　(ケースA-2　100kN/本載荷時(天端変位7.36mm))

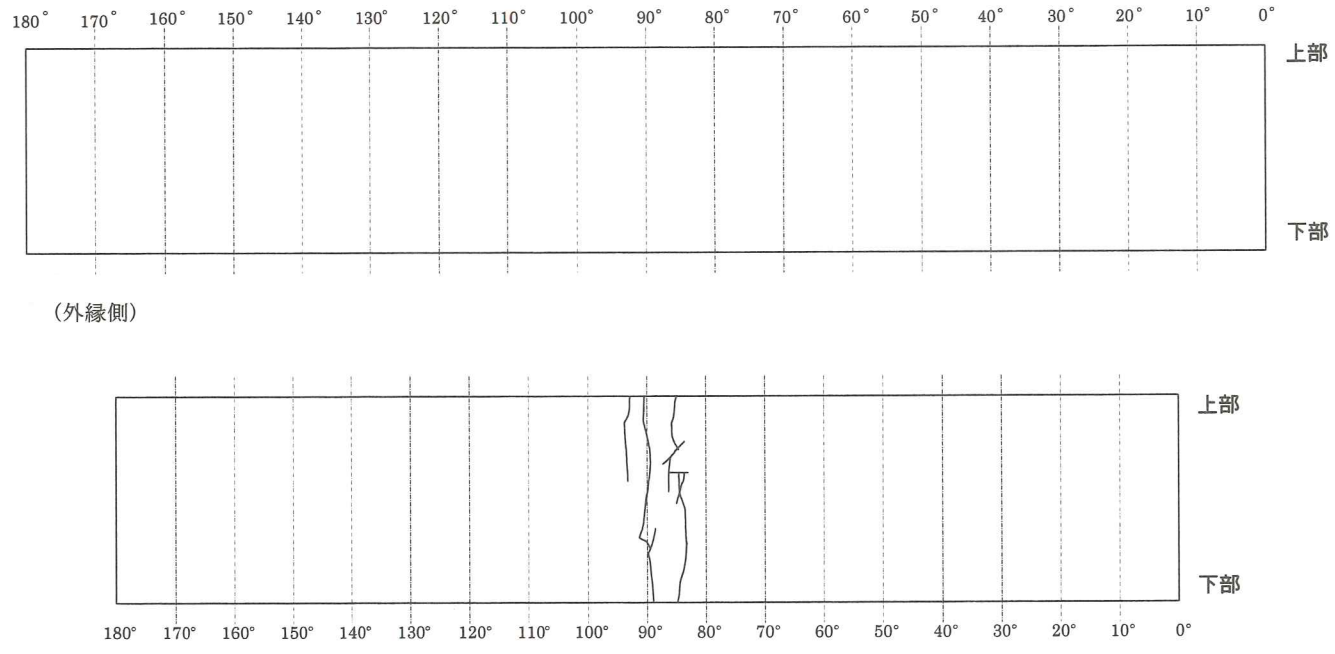
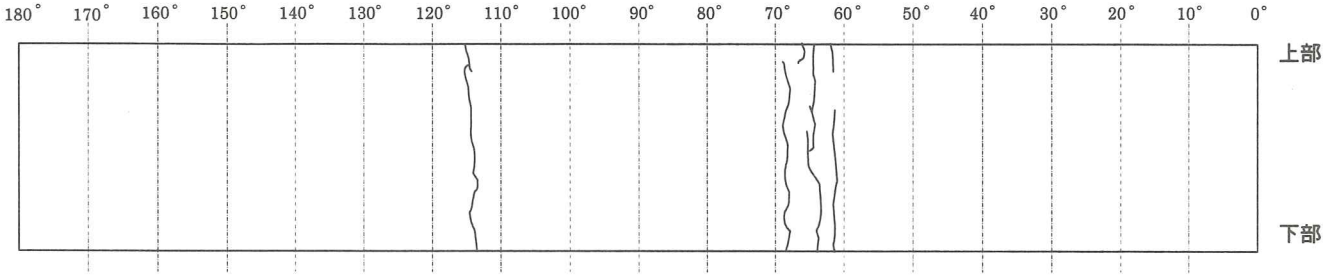
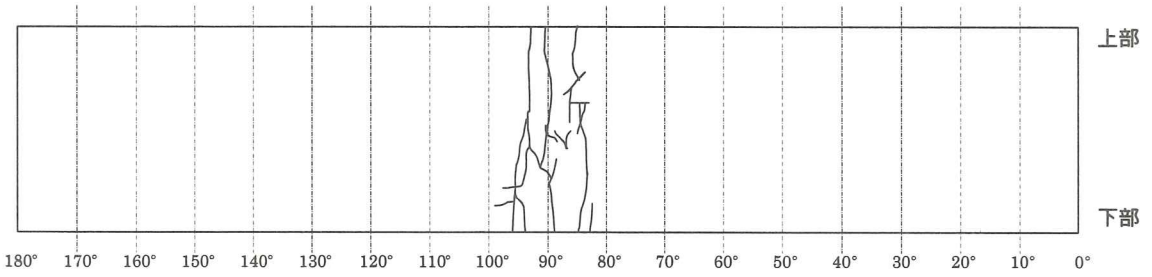


図-2.12(b)　ひび割れ図　(ケースA-2　200kN/本載荷時(天端変位15.76mm))

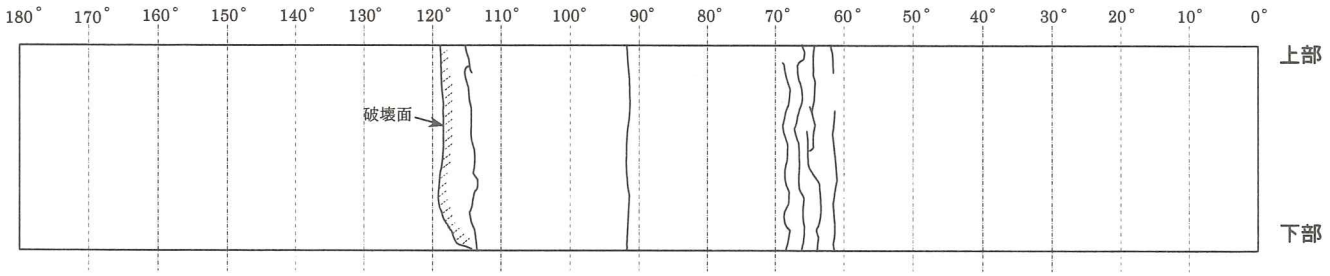


（外縁側）

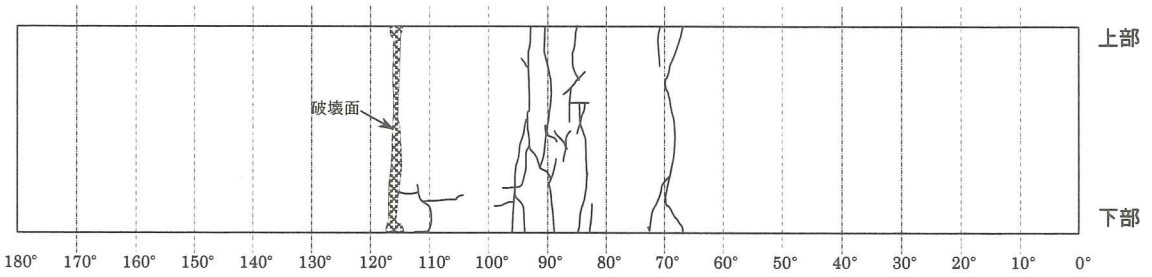


（内縁側）

図-2.12(c)　ひび割れ図　(ケースA-2　300kN/本載荷時(天端変位27.70mm))



（外縁側）



（内縁側）

図-2.12(d)　ひび割れ図　(ケースA-2　最終状態(330kN/本載荷時(天端変位40.88mm)))

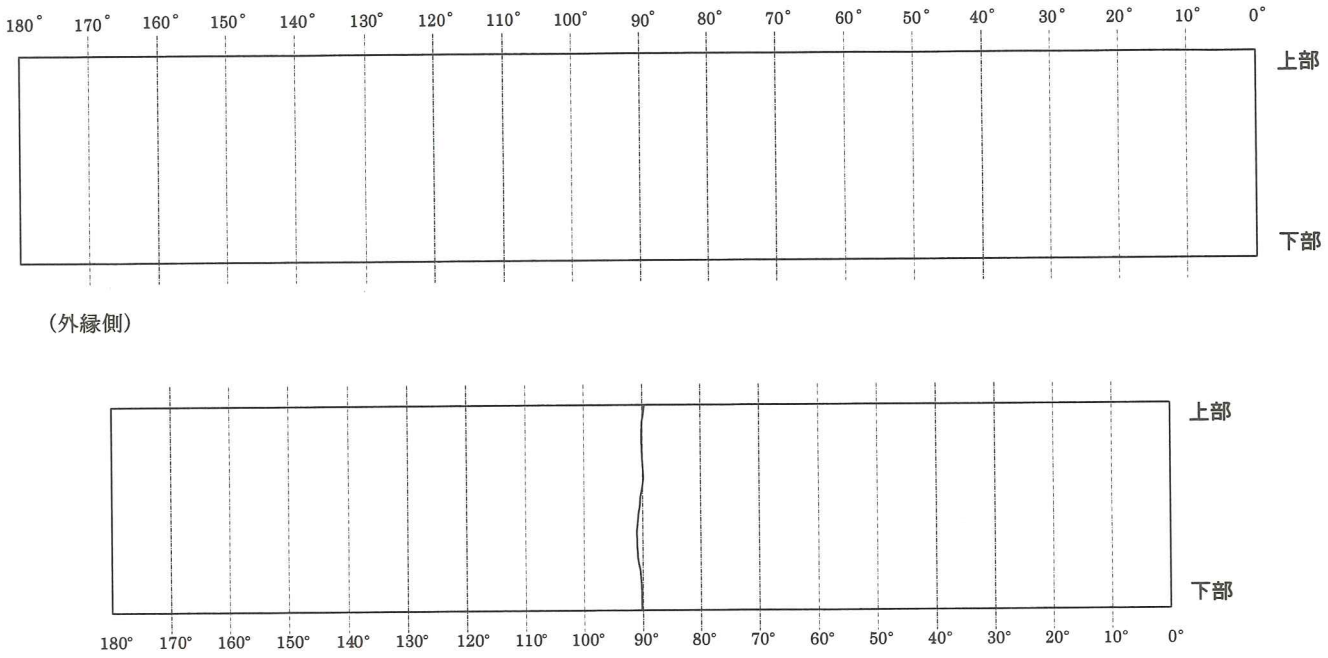


図-2.13(a)　ひび割れ図　(ケースA-3　50kN/本載荷時(天端変位4.30mm))

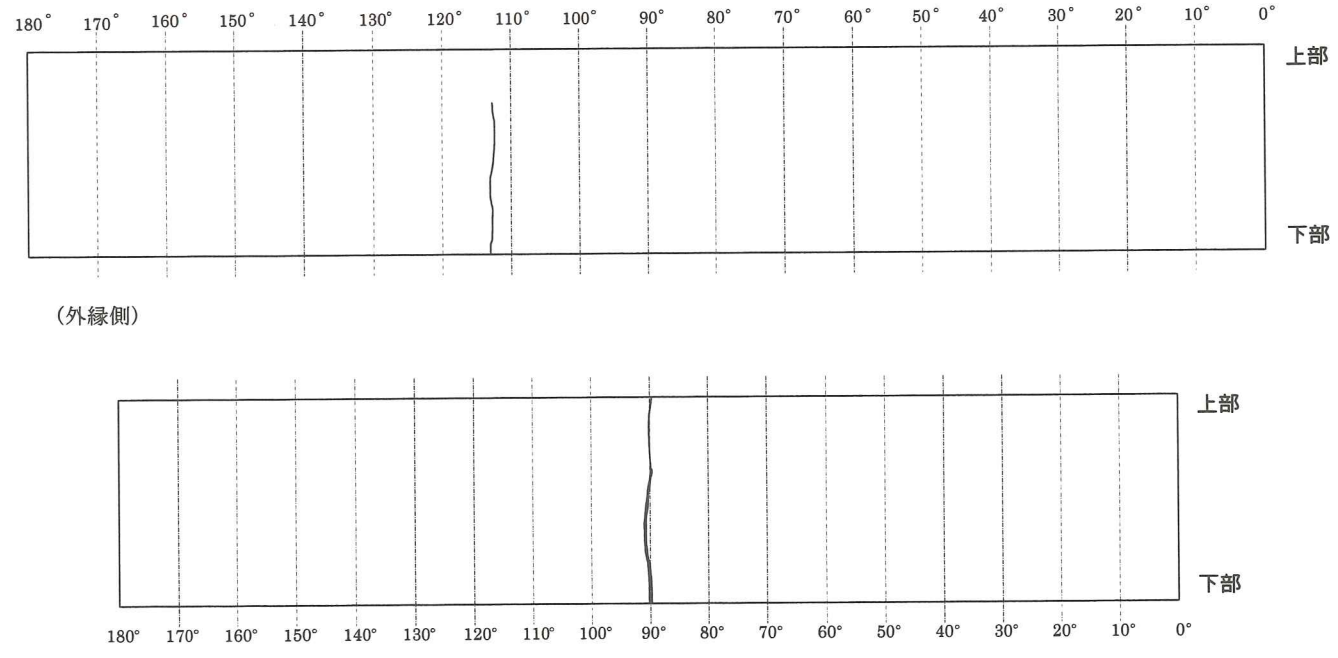


図-2.13(b)　ひび割れ図　(ケースA-3　100kN/本載荷時(天端変位14.25mm))

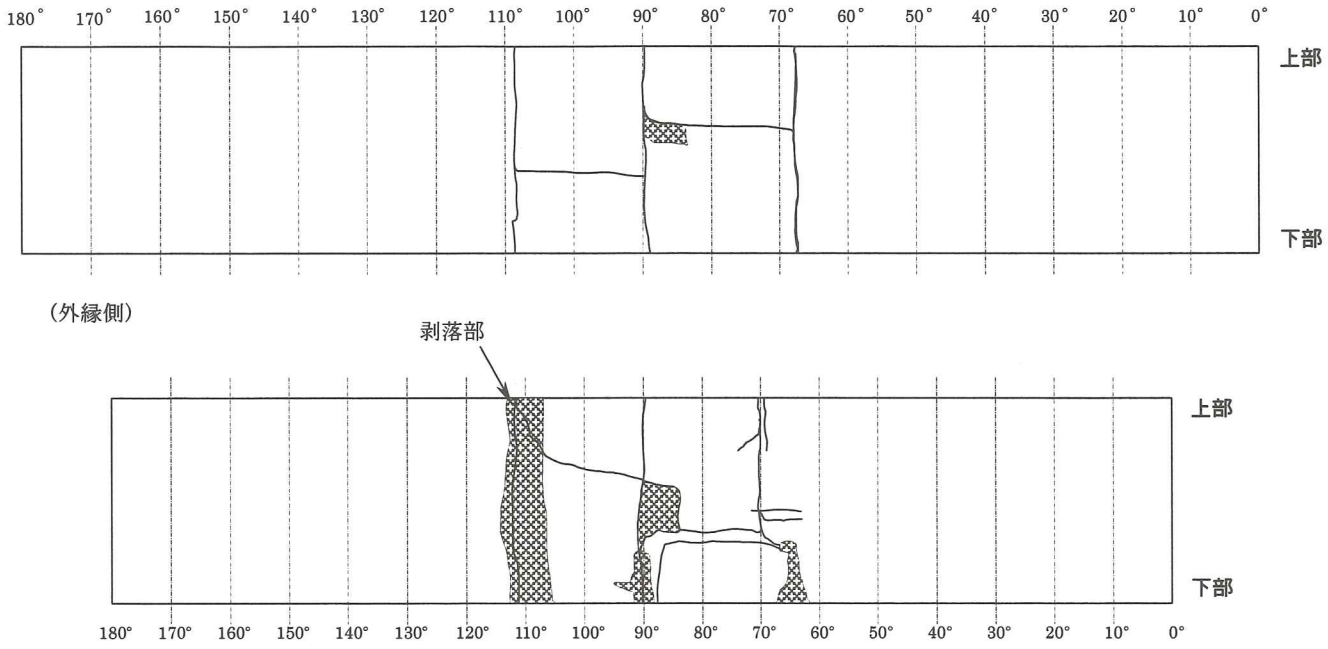


図-2.13(c)　ひび割れ図　(ケースA-3　最終状態(176kN/本載荷時(天端変位39.72mm))

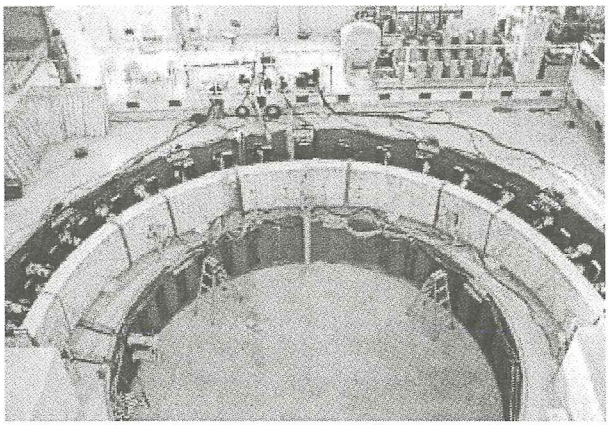


写真-2.8(a)　供試体全体(ケース A-1)

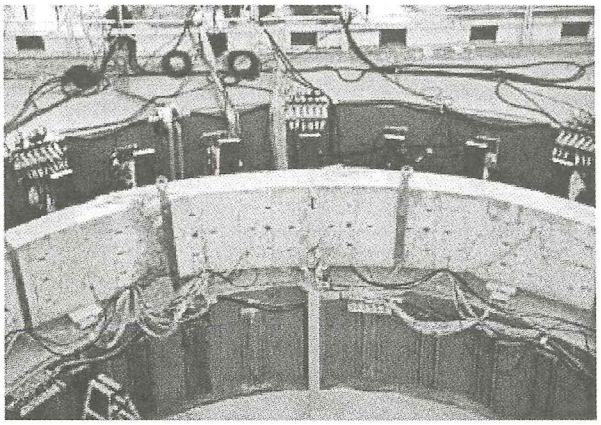


写真-2.8(b)　肩部～天端付近の内側(ケース A-1)

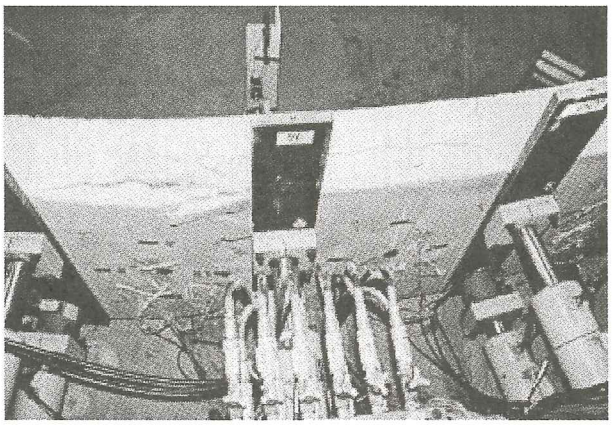


写真-2.8(c)　90 度付近上側～外側(ケース A-1)

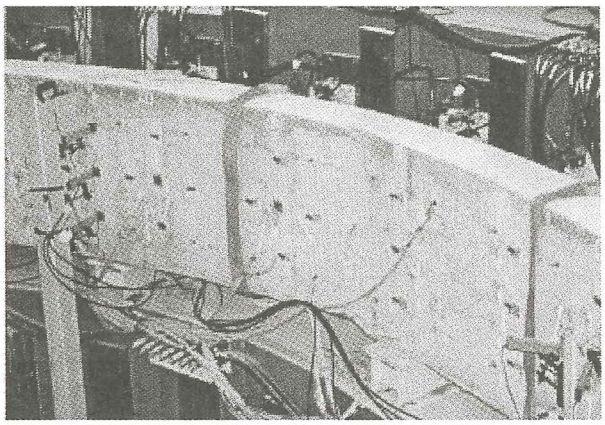


写真-2.8(d)　90 度付近内側(ケース A-1)

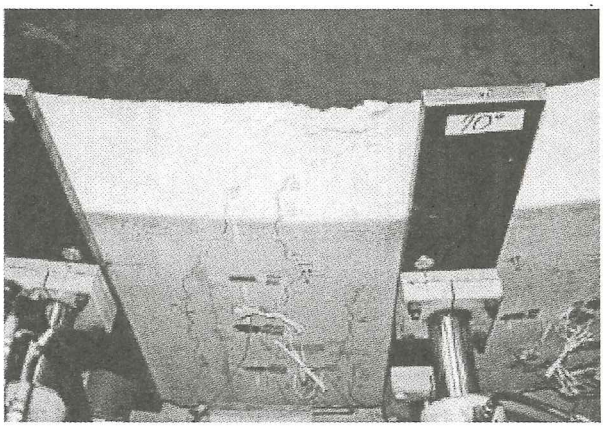


写真-2.8(e)　65 度付近上側～外側(ケース A-1)

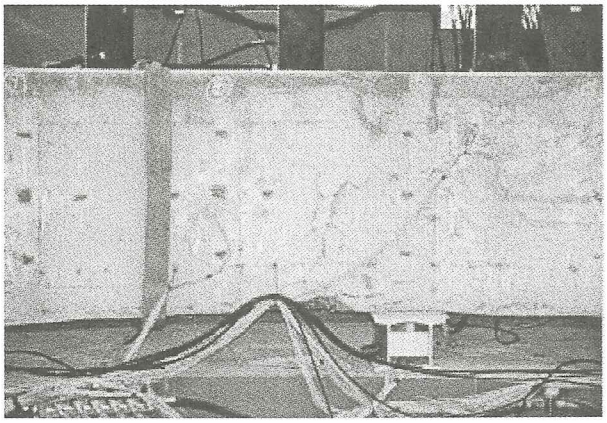


写真-2.8(f)　65 度付近内側(ケース A-1)

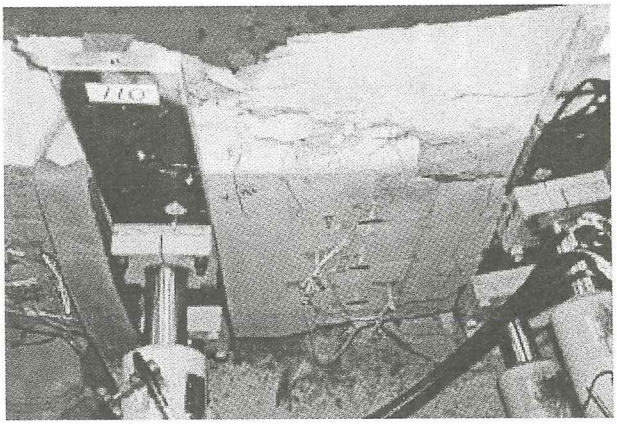


写真-2.8(g)　115 度付近上側～外側(ケース A-1)

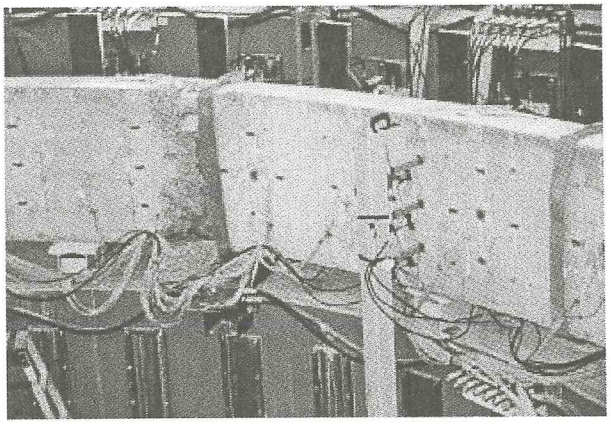


写真-2.8(h)　115 度付近内側(ケース A-1)

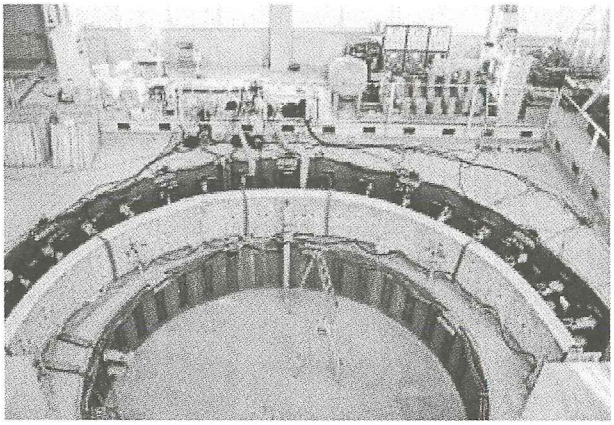


写真-2.9(a)　供試体全体(ケース A-2)

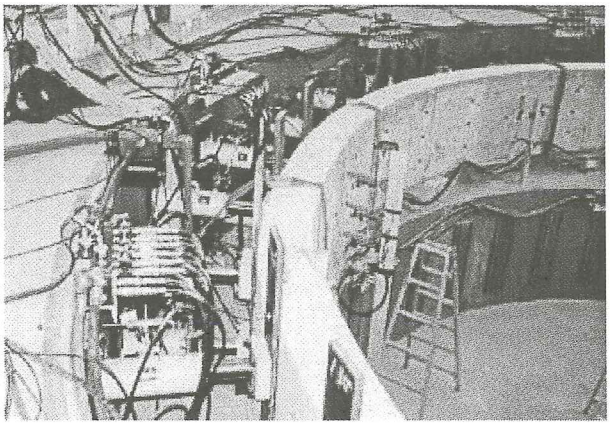


写真-2.9(b)　肩部～天端付近の内側(ケース A-2)

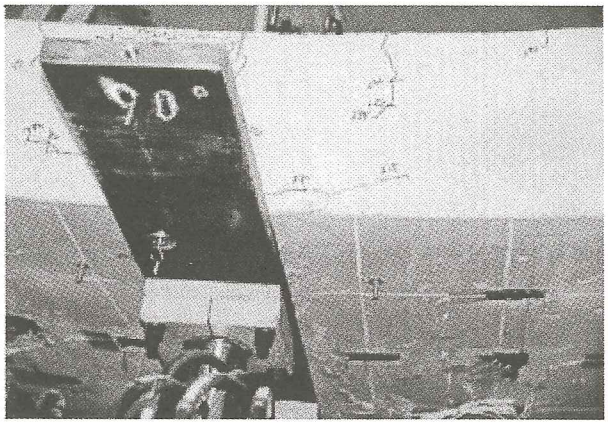


写真-2.9(c)　90 度付近上側～外側(ケース A-2)

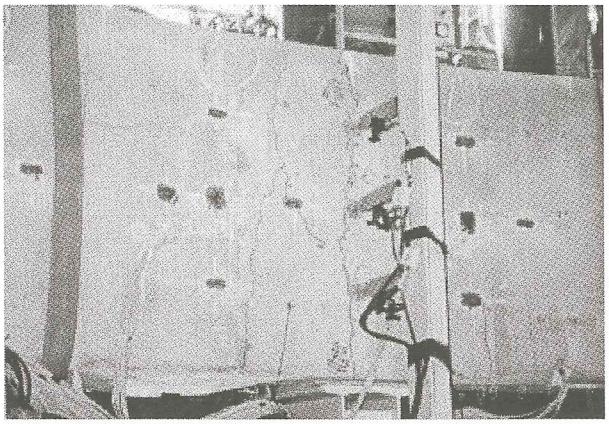


写真-2.9(d)　90 度付近内側(ケース A-2)

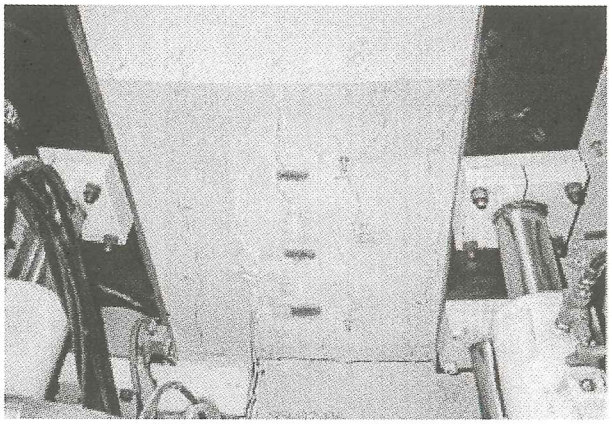


写真-2.9(e)　65 度付近上側～外側(ケース A-2)

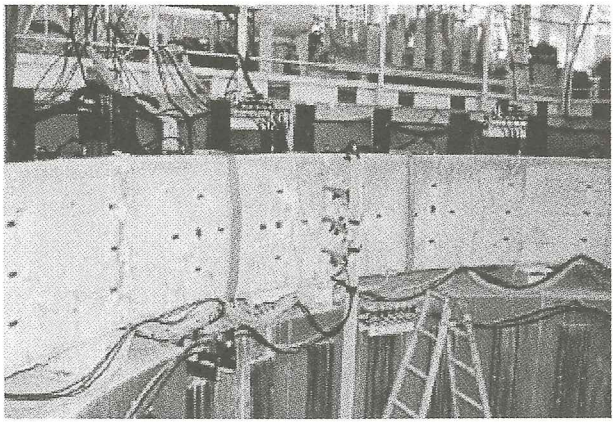


写真-2.9(f)　65 度付近内側(ケース A-2)

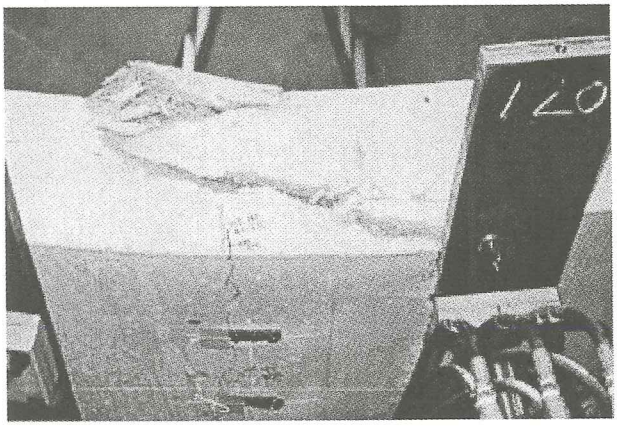


写真-2.9(g)　115 度付近上側～外側(ケース A-2)

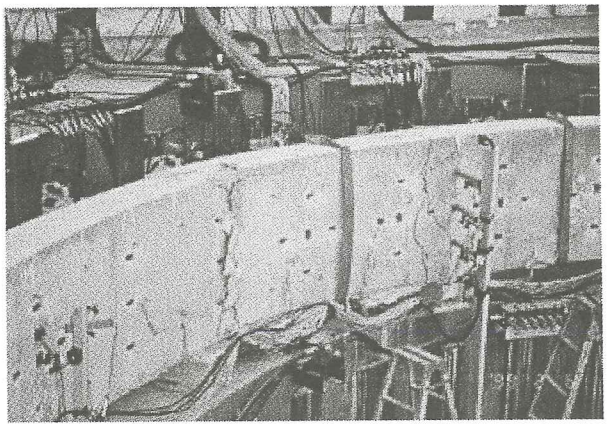


写真-2.9(h)　115 度付近内側(ケース A-2)

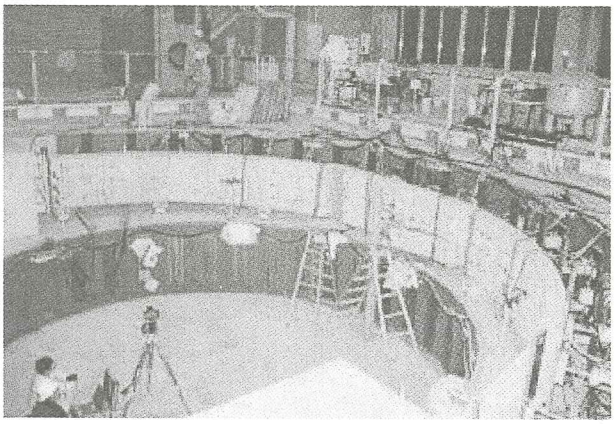


写真-2.10(a)　供試体全体(ケース A-3)

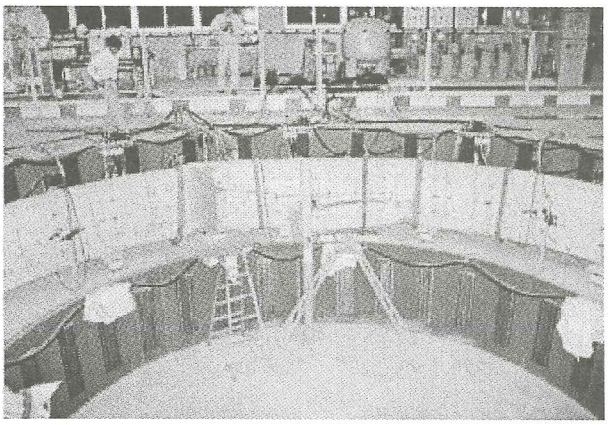


写真-2.10(b)　肩部～天端付近の内側(ケース A-3)

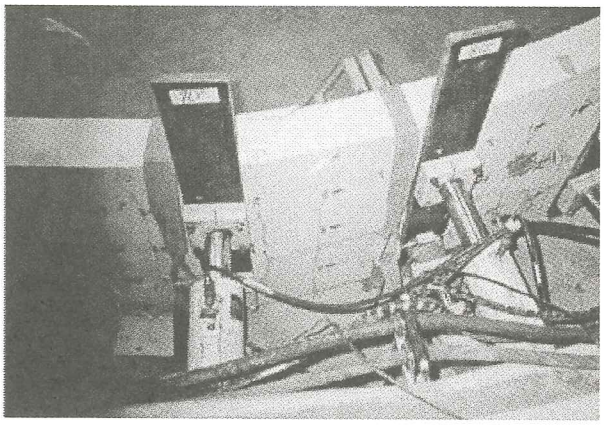


写真-2.10(c)　90 度付近上側～外側(ケース A-3)

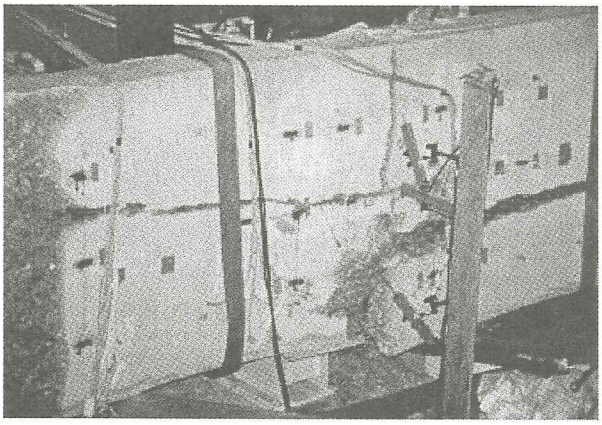


写真-2.10(d)　90 度付近内側(ケース A-3)

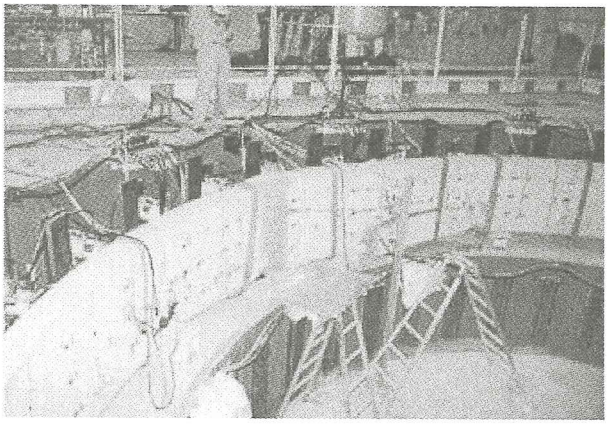


写真-2.10(e)　115 度付近上側～外側(ケース A-3)

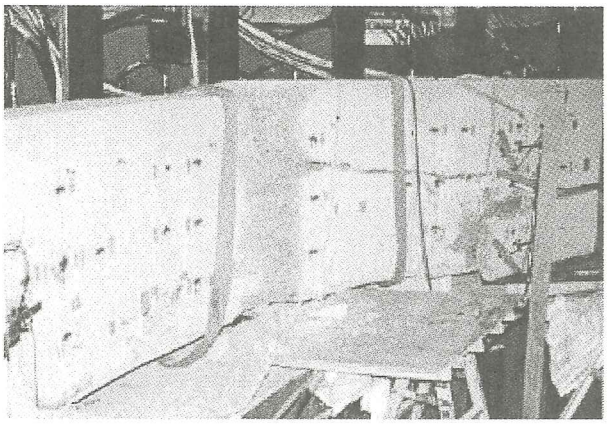


写真-2.10(f)　115 度付近内側(ケース A-3)

表-2.13　ひび割れ発生荷重とひび割れの状況　(載荷形式A)

(a)　ケースA-1

ケース	90度荷重(kN/本) (ロードセル測定)	特記事項	ひび割れ状況(ひび割れ位置：ひび割れ部位：ひび割れ幅(mm))			ひび割れ深さ
			内縁側	外縁側(右側)	外縁側(左側)	上面
A-1	80	70度・110度のジャッキが離れた	90度：上～下：0.15			90度：内縁側15cm
	120		90度：上～下：上面部0.15，最大1.0			
	140		90度：上～下：上面部0.4，最大1.2			
	160		90度：上～下：上面部0.5，最大1.5	62～67度：上～下：0.1	120度：上～下：0.1	65度：外縁側10cm
	220			62～67度：上～下：0.2		
	240		90度：上～下：上面部0.8，最大2.5			
	260		90度：上～下：上面部1.2，最大2.5	69度：上～下：0.1		65度：外縁側20cm
	270					113度：外縁側15cm
	280		95度：発生		113度：上～下：0.3 120度：上～下：0.15	
	290					63度：外縁側10cm
	310					63度：外縁側15cm
	380	90°付近外縁側でコンクリート剥落発生				
	390	供試体の破壊				

(b)　ケースA-2

ケース	90度荷重(kN/本) (ロードセル測定)	特記事項	ひび割れ状況(ひび割れ位置：ひび割れ部位：ひび割れ幅(mm))			ひび割れ深さ
			内縁側	外縁側(右側)	外縁側(左側)	上面
A-2	60		90度：上～下：目視初確認			90度：内縁側10cm弱 (86～98°では筋状)
	125	70度・110度のジャッキが離れた				
	240			62～68度：上下に4本：0.1	114度：上～下：0.1	114度：外縁側10cm
	260			62～68度：上下に6本：0.1		
	280			62～68度：上～下：0.15	114度：上～下：0.15	
	300	90度外縁側でコンクリート剥離		62～68度：上～下：0.3		
	320			62～68度：上～下：0.4		
	335	供試体の破壊				

(c)　ケースA-3

ケース	90度荷重(kN/本) (ロードセル測定)	特記事項	ひび割れ状況(ひび割れ位置：ひび割れ部位：ひび割れ幅(mm))			ひび割れ深さ
			内縁側	外縁側(右側)	外縁側(左側)	上面
A-3	50		90度：上～下：目視初確認			
	54		90度：上～下：0.1			
	62		90度：上～下：上部0.4，中央部0.3			
	71		90度：上～下：上部0.7，中央部0.4～0.5			
	82		90度：上～下：上部0.7			
	92		90度：上～下：上部1.0，中央部0.9～1.0		110度：上部：0.1	
	103		90度：上～下：1.2		110度：下部：0.04	
	112		90度：上～下：1.3			
	162			70度：上部：0.04		
	172.5	供試体の破壊				

(3) ひずみの変化

図-2.14(a)～(f)に供試体の右側半分の代表的な地点、すなわち5度、35度、45度、65度、75度、87.5度の荷重とひずみの関係を示す。また、左側半分については、実際に破壊が生じやすいと想定される92.5度(87.5度の対称位置)、115度(65度の対称位置)、135度(45度の対称位置)についての荷重とひずみの関係を図-2.14(g)～(i)に示す。

載荷形式Aの場合は、図-2.14(f)より87.5度付近では内縁側で引張ひずみが、また図-2.14(d)より65度付近では外縁側で引張ひずみが発生していた。実験よりこの付近でひび割れが生じていることと一致し、引張ひずみの値自体は引張ひずみの限界(概ね 100～200μと考えられる)を超えた以降では有意な値となっていないと考えられる。87.5度について考えると、図-2.14(f)より外縁側では圧縮ひずみが概ね3000μに達している場合があった。そのため、天端付近の外縁側では圧縮の限界に達していると考えられる。また、図-2.14(d)より65度付近では内縁側で圧縮ひずみが概ね3000μに達している場合があった。実際の破壊は65度(対称の位置であれば115度)付近から先に発生しており、載荷板の影響により供試体外縁部の破壊が拘束されていることがひずみの値を比較することによっても明らかとなった。また、図-2.14(a)～(c)および(i)より、5度、35度、45度および135度については、全断面圧縮となっている場合がほとんどであり、ひずみの値から考えても破壊をもたらすと考えられるひずみの値には達していなかった。

次にひずみの高さ方向の影響を考えるため、図-2.15(a)～(b)に65度とその対称の位置である115度の天端作用荷重とひずみの関係を示す。計測は高さ方向で75cm、50cmおよび25cmで測定を実施した点について示した。同一のケースの同一荷重で高さ方向でのひずみを比較すると値自体のばらつきは小さく、特に荷重が小さいときはばらつきが小さいことが分かった。また、図-2.15(c)～(d)にケースA-3における87.5度とその対称の位置である92.5度の荷重と圧縮ひずみの関係を示す。これについても、高さ方向でのひずみのばらつきは小さいことが分かった。

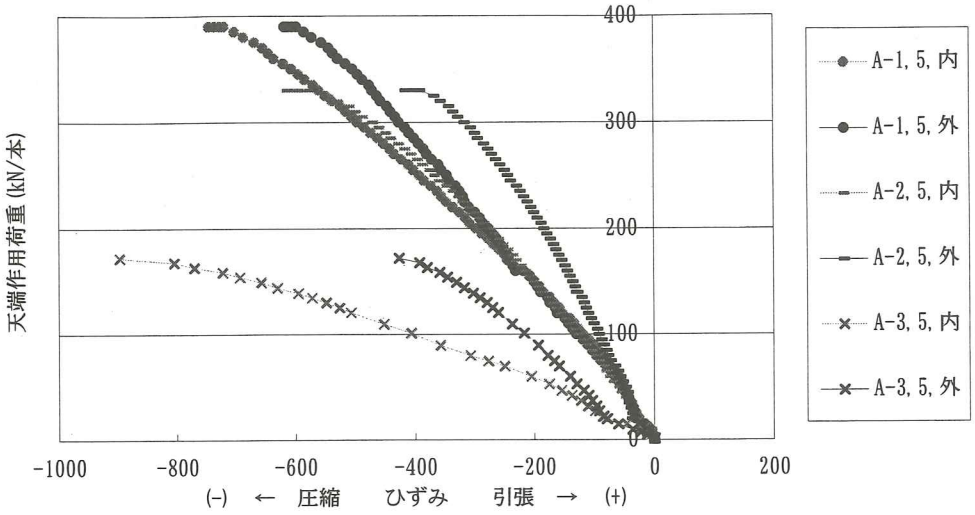


図-2.14(a) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 5度, 高さ50cm)

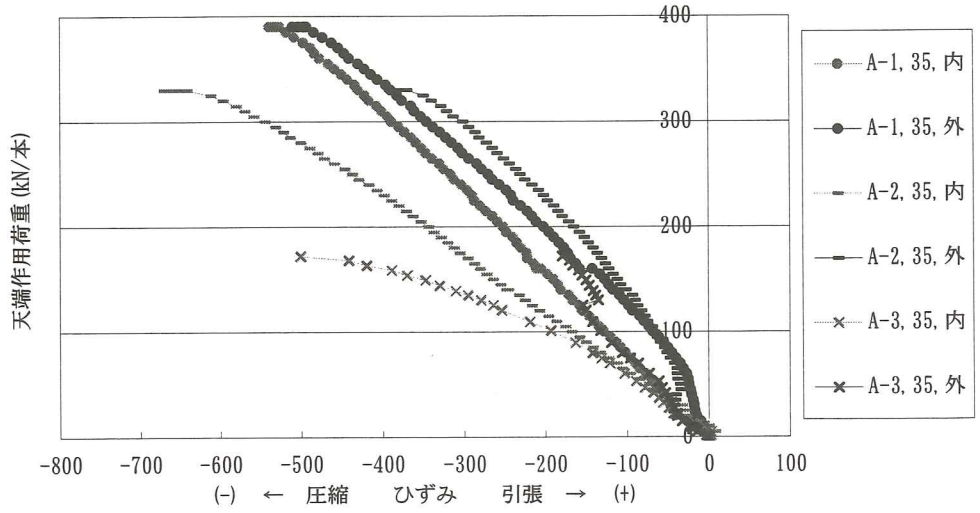


図-2.14(b) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 35度, 高さ50cm)

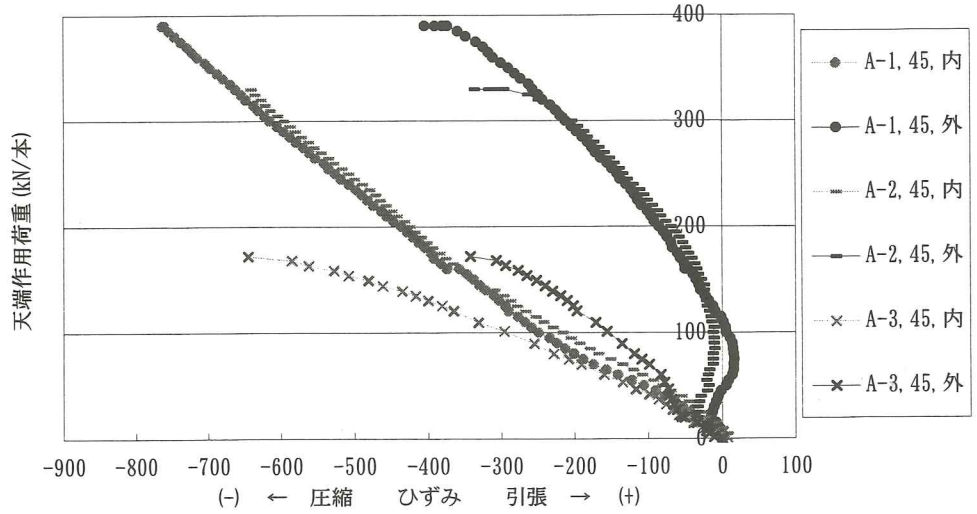


図-2.14(c) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 45度, 高さ50cm)

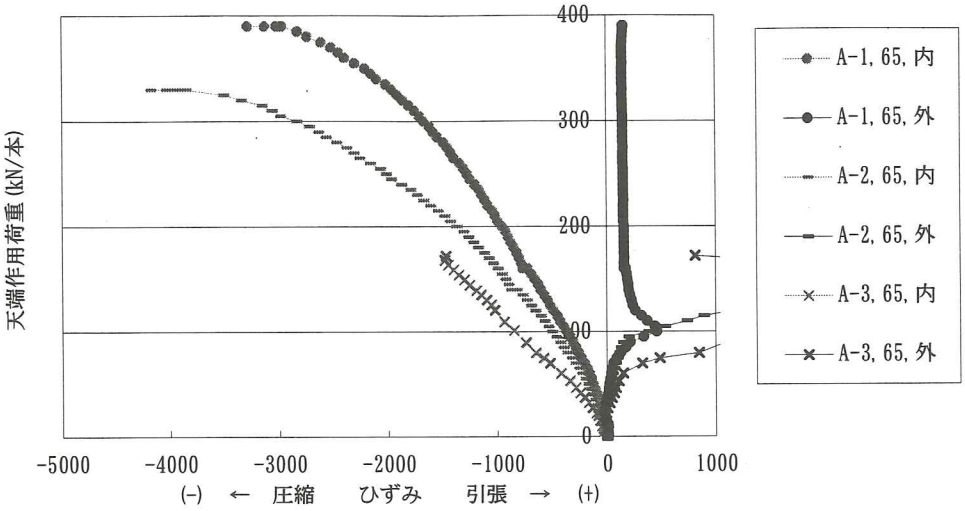


図-2.14(d) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 65度, 高さ50cm)

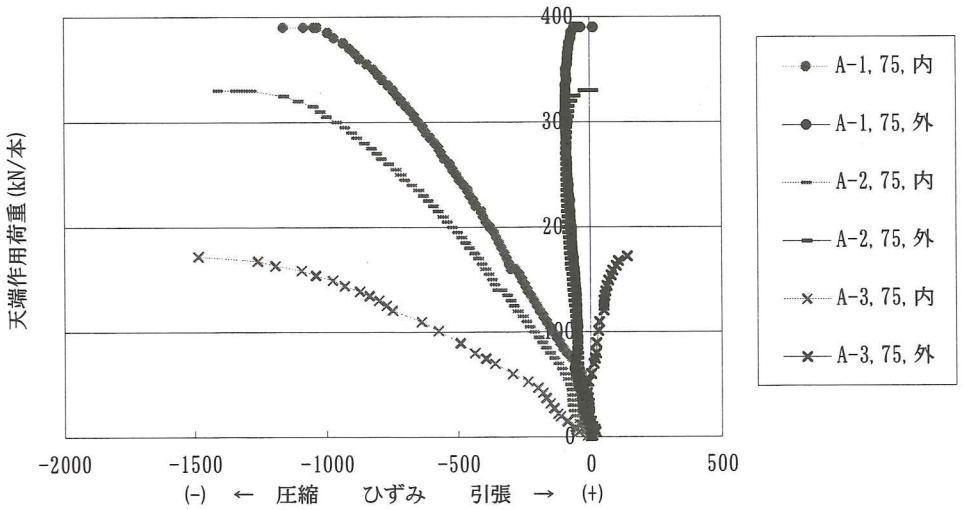


図-2.14(e) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 75度, 高さ50cm)

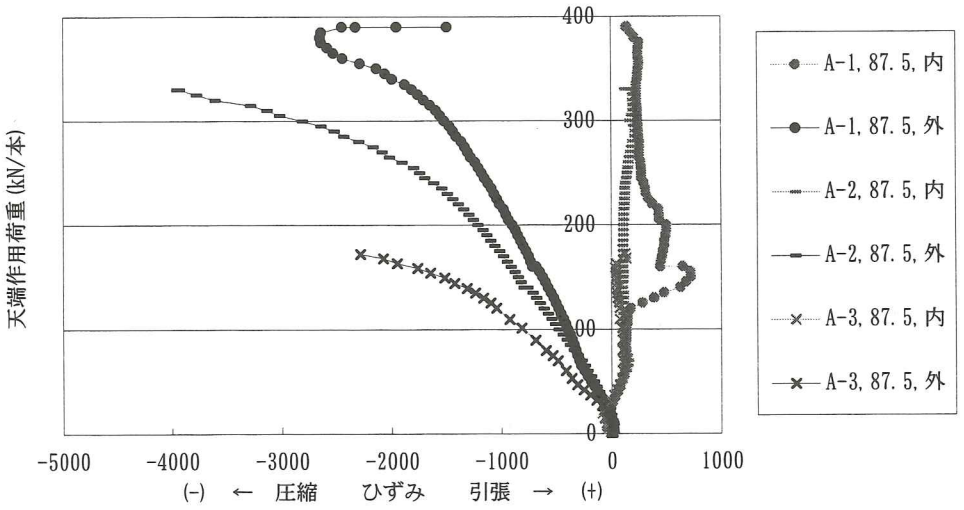


図-2.14(f) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 87.5度, 高さ50cm)

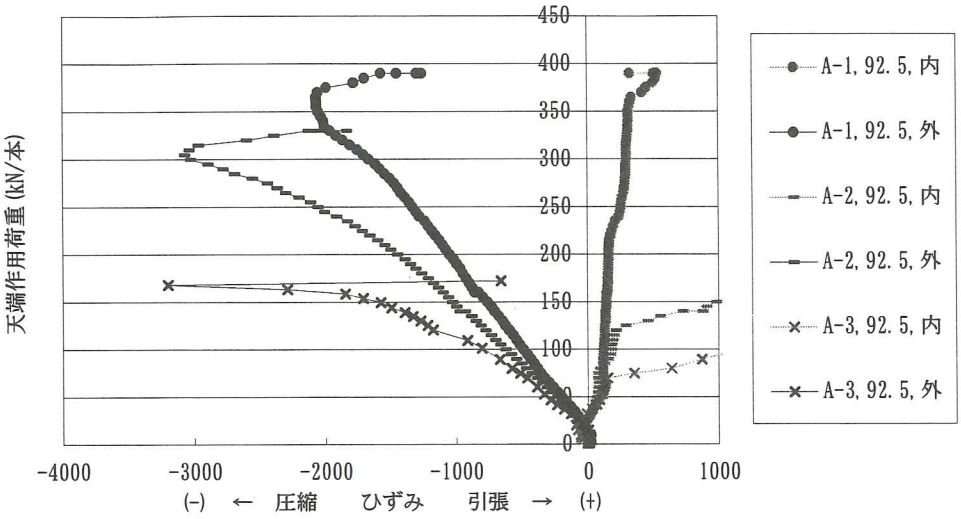


図-2.14(g) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 92.5度, 高さ50cm)

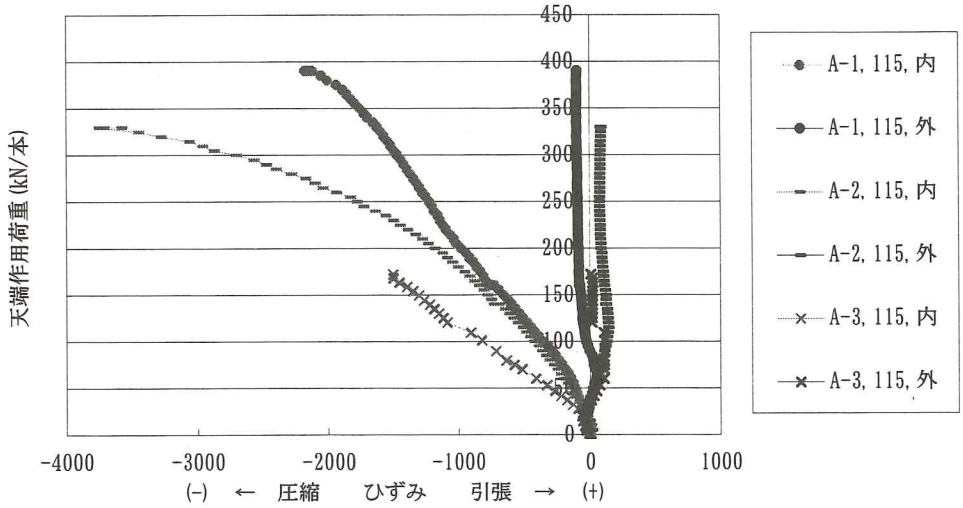


図-2.14(h) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 115度, 高さ50cm)

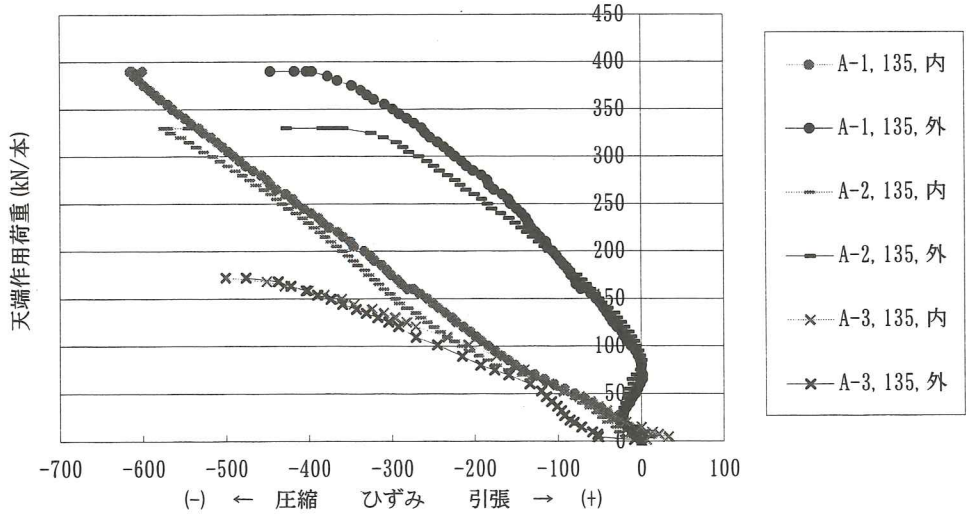


図-2.14(i) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式A, 135度, 高さ50cm)

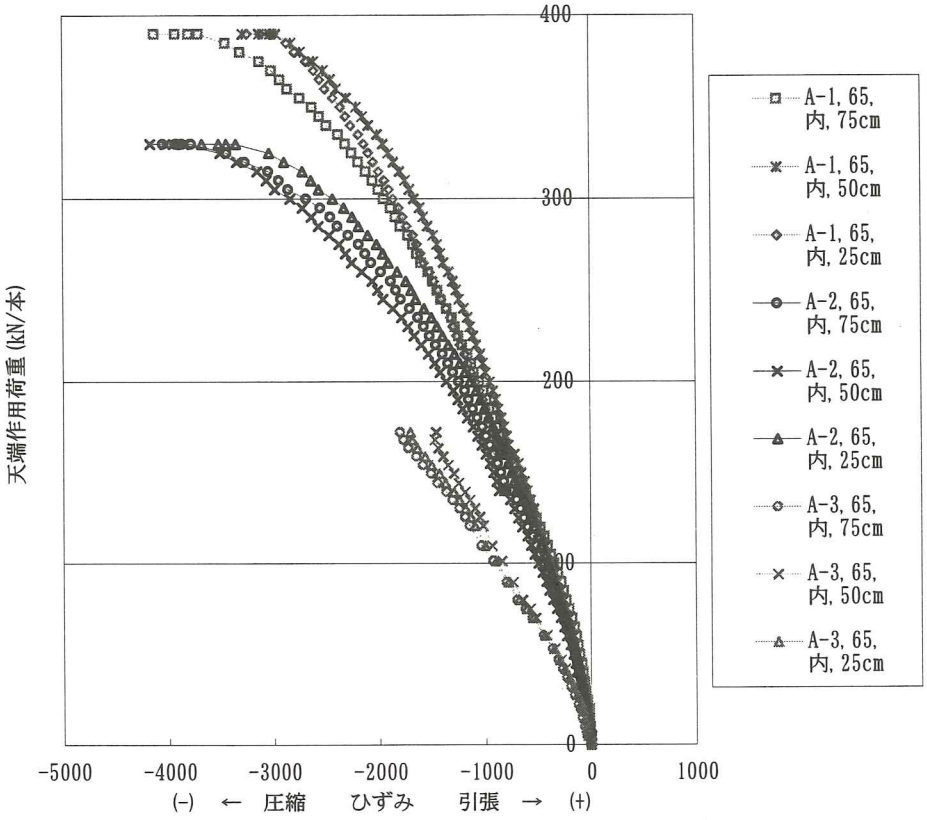


図-2.15(a) 荷重－ひずみ関係(載荷形式A, 65度, 高さ毎)

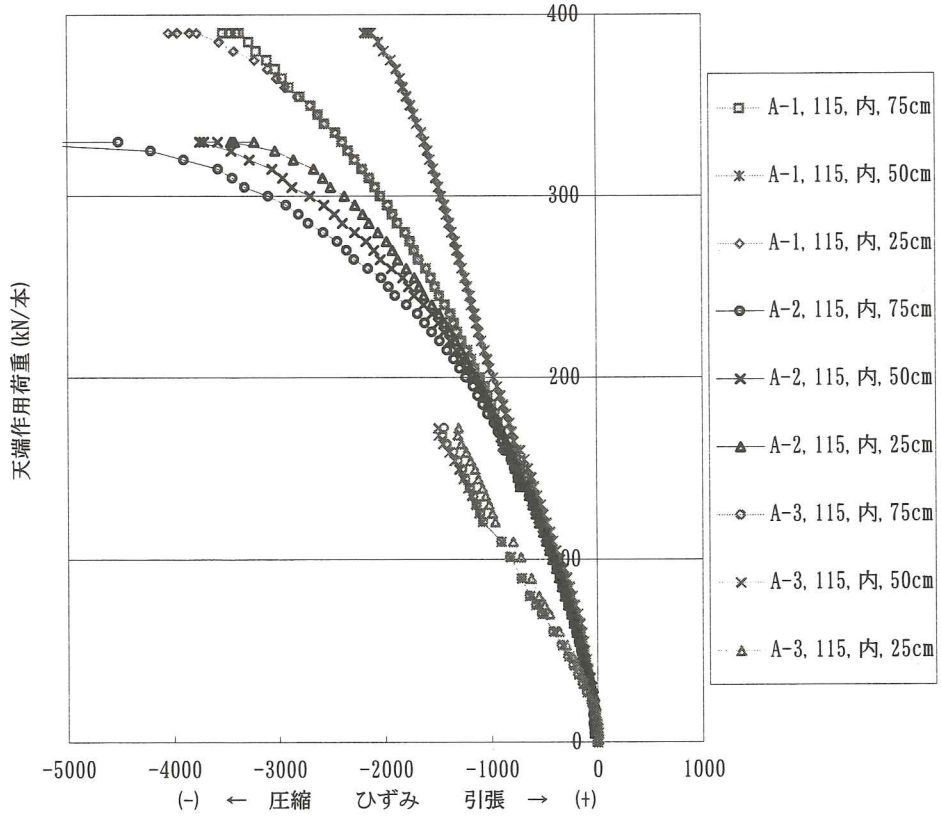


図-2.15(b) 荷重－ひずみ関係(載荷形式A, 115度, 高さ毎)

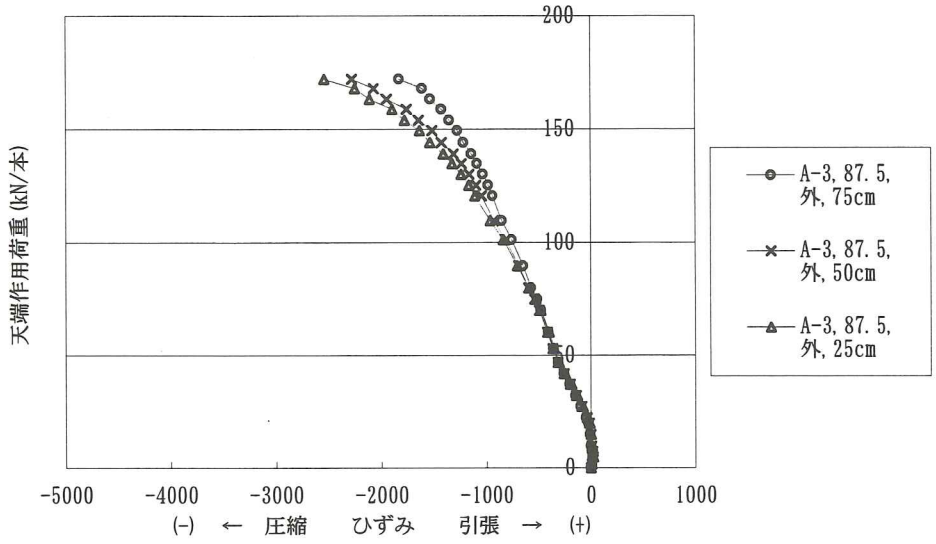


図-2.15(c) 荷重－ひずみ関係(ケースA-3, 87.5度, 高さ毎)

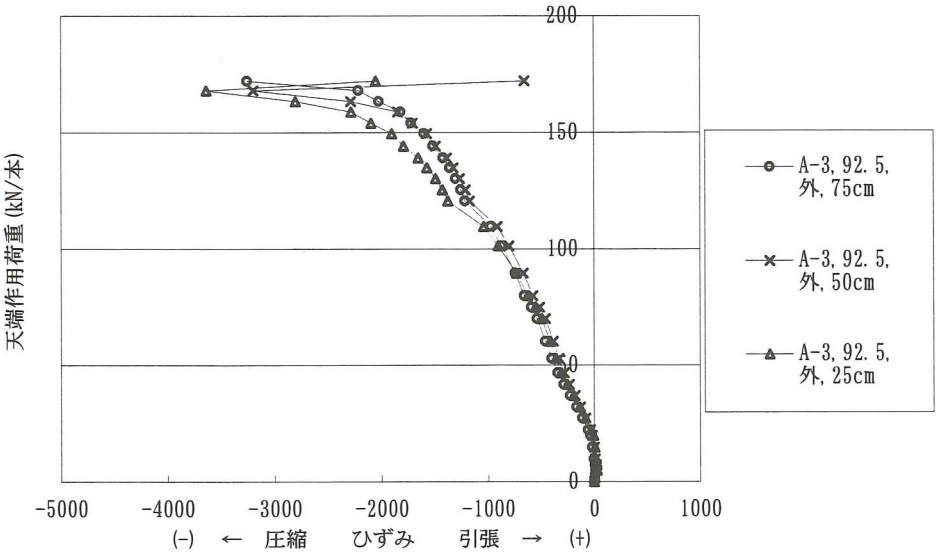


図-2.15(d) 荷重－ひずみ関係(ケースA-3, 92.5度, 高さ毎)

(4) ジャッキ反力とジャッキストロークの関係

供試体の変形に伴って発生するジャッキの反力とストロークの関係を測定し、整理した結果に基づいて油圧ジャッキの反力係数を算定した。

図-2.16 (a) ～ (h) にそれぞれ 10 度、20 度、30 度、40 度、50 度、60 度、140 度および 160 度のジャッキ反力とジャッキストロークの関係を示す。反力とジャッキストロークの関係は、それぞれの測定位置で傾向が異なることから、測定位置毎に算定するものとした。油圧ジャッキの反力係数は式 (2.3) によって算定した。

$$K = \Delta R / \Delta \delta_s \quad \cdots \quad (2.3)$$

ここに、K ：油圧ジャッキの反力係数 (MN/m)

ΔR ：油圧ジャッキに生ずる荷重 50kN 毎の反力増分 (MN)

$\Delta \delta_s$ ：油圧ジャッキに生ずる荷重 50kN 毎のストロークの変化量 (m)

表-2.14 (a) ～ (c) にケース A-1、ケース A-2 およびケース A-3 において、軸力を導入した以降の反力係数の算定結果を示す。なお、表中に－印で示したものはジャッキが伸びたことにより反力係数の算定が不可能であった部分である。

表-2.14 (a)　油圧ジャッキの反力係数 (MN/m) ～ケース A-1～

荷重 (kN) / 位置 (度)	20～50	50～100	100～150	150～200	200～250	250～300	300～350
10	26.25	31.51	64.38	44.71	82.64	71.43	110.94
20	47.42	116.90	302.19	128.47	188.33	85.94	139.78
30	37.44	46.45	84.24	2.13	－	104.61	166.40
40	39.59	38.42	96.14	156.69	197.18	204.67	182.32
50	83.27	57.06	116.31	44.41	125.29	135.44	151.44
60	37.44	48.61	44.57	102.96	143.04	202.56	186.01
140	82.43	90.78	187.77	194.60	206.48	193.60	221.49
160	32.12	58.29	246.68	89.40	143.19	101.79	146.37

表-2.14 (b)　油圧ジャッキの反力係数 (MN/m) ～ケース A-2～

荷重 (kN) / 位置 (度)	20～50	50～100	100～150	150～200	200～250	250～300	300～350
10	6.25	22.22	206.25	82.14	92.19	196.88	6.25
20	－	48.60	－	199.68	106.08	169.52	－
30	－	29.88	－	144.21	85.18	158.40	－
40	14.33	30.33	47.22	94.67	107.97	142.99	14.33
50	99.92	98.85	43.59	129.70	102.65	125.17	99.92
60	31.20	－	－	133.71	30.83	138.24	31.20
140	51.35	85.14	168.62	388.15	360.54	271.81	51.35
160	－	54.12	1252.12	225.44	155.39	255.42	－

表-2.14(c)　油圧ジャッキの反力係数(MN/m)～ケースA-3～

荷重(kN) 位置(度)	20～49	49～101	101～150
10	697.76	18.80	61.59
20	－	－	333.77
30	160.33	66.83	169.03
40	149.35	22.40	108.85
50	307.86	80.77	51.01
60	10.07	113.35	684.84
140	770.28	65.47	67.62
160	198.70	41.58	73.96

表-2.14(a)～(c)より各油圧ジャッキで反力係数のばらつきが大きい結果が得られたが、載荷形式Aのうち、ケースA-1やケースA-2では荷重が50kN/本以前ではジャッキ1本あたり20～30MN/m程度、50～100kN/本では50MN/m程度、100kN/本以降では100～200MN/m程度の反力係数であったと考えられる。ケースA-3ではばらつきが大きい傾向があったが、図 2.16(a)～(h)をジャッキ毎に比較してみると、各ケースで、傾きは概ね等しいと考えてよいことが分かった。

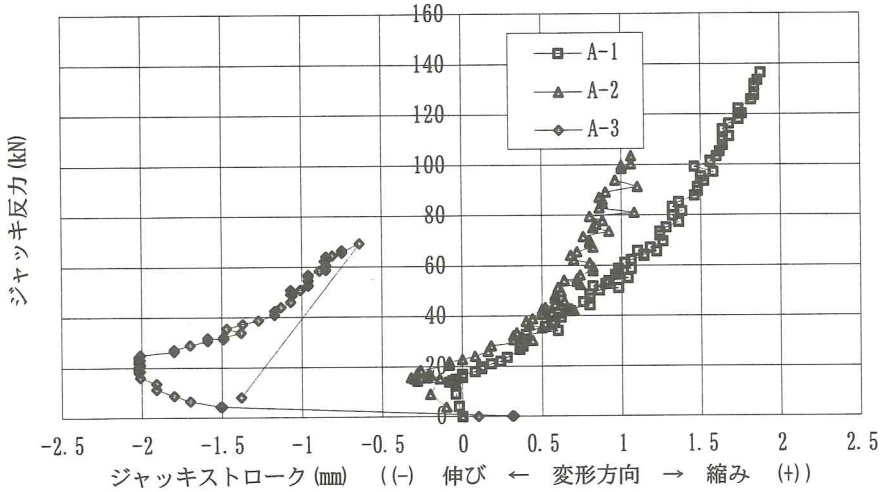


図-2.16 (a)　ジャッキ反力ーストローク関係 (載荷形式A，10度部)

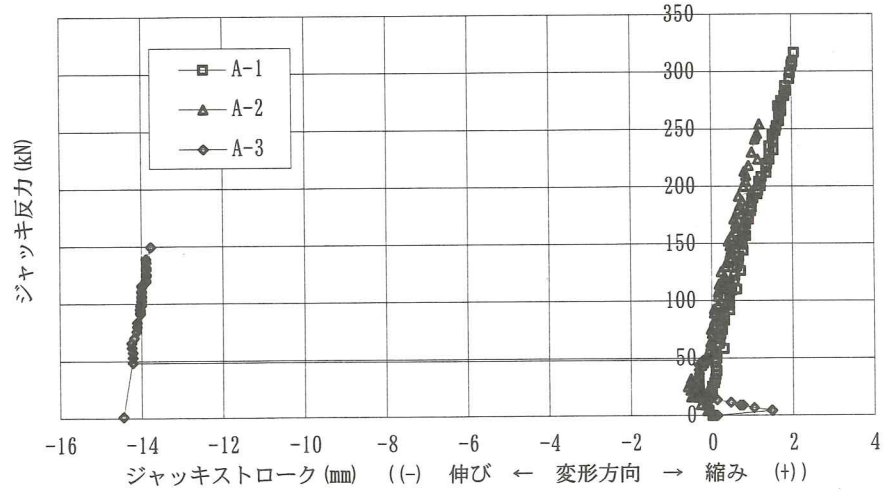


図-2.16 (b)　ジャッキ反力ーストローク関係 (載荷形式A，20度部)

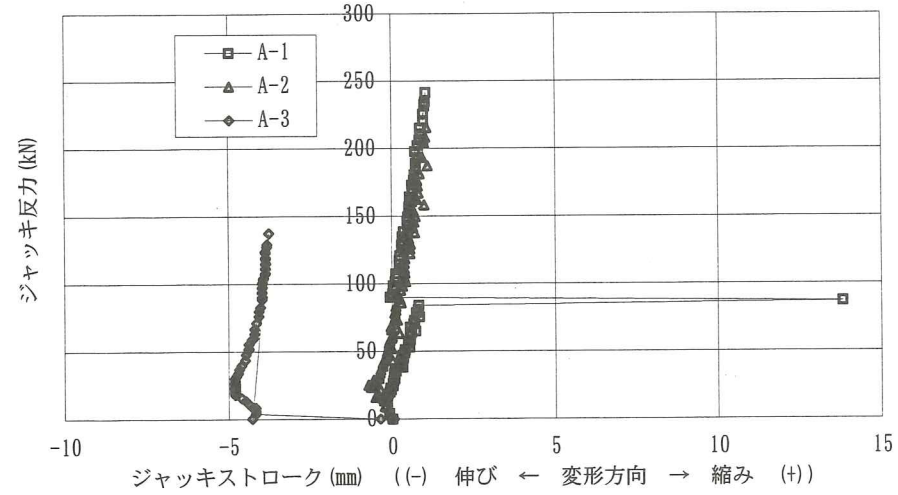


図-2.16 (c)　ジャッキ反力ーストローク関係 (載荷形式A，30度部)

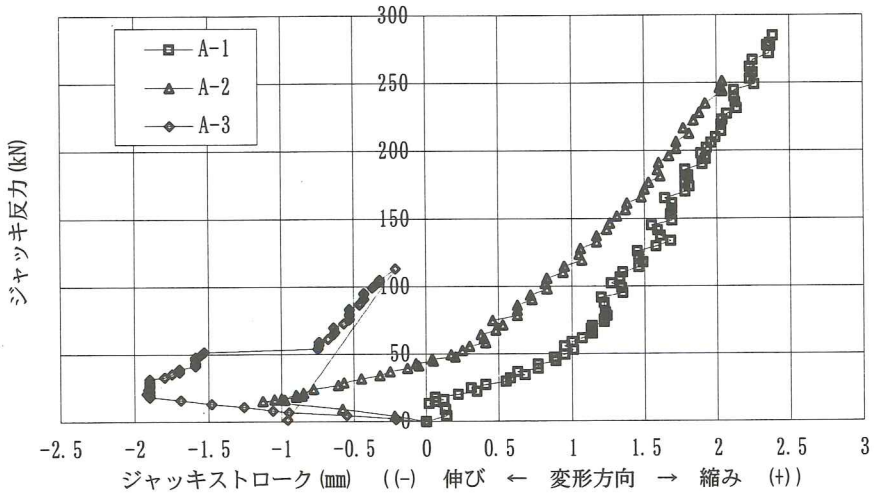


図-2.16 (d)　ジャッキ反力ーストローク関係 (載荷形式A，40度部)

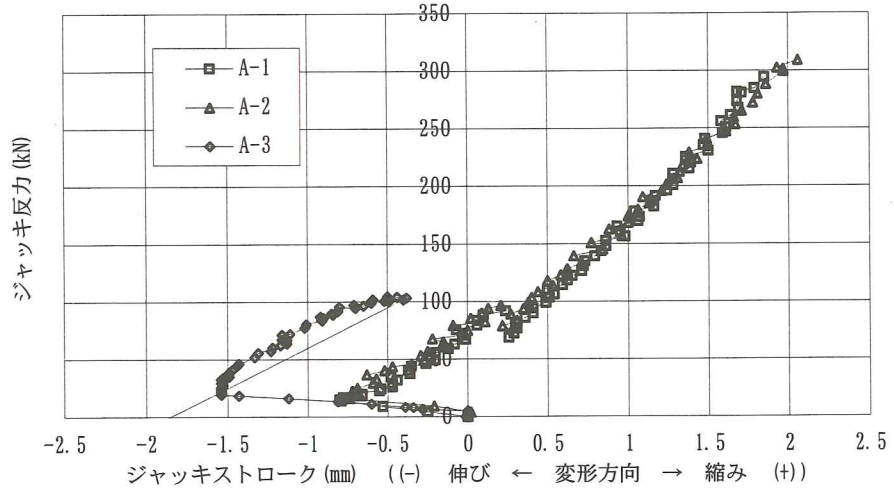


図-2.16 (e)　ジャッキ反力ーストローク関係 (載荷形式A，50度部)

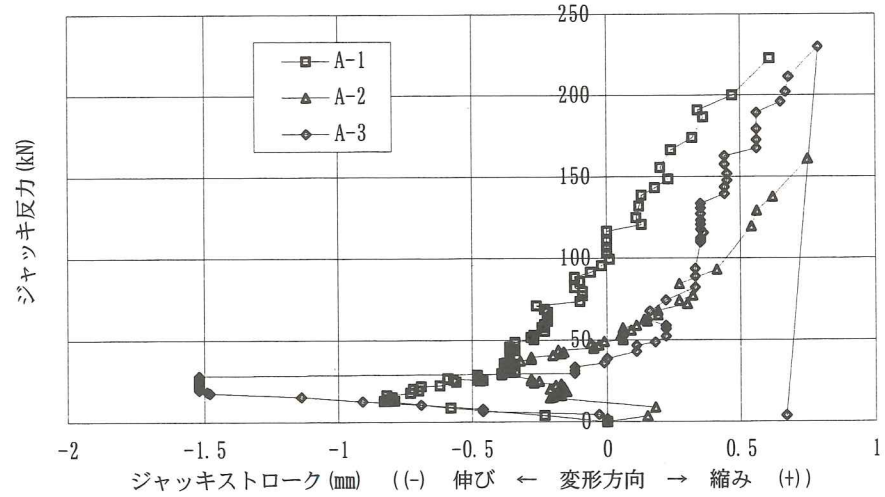


図-2.16 (f)　ジャッキ反力ーストローク関係 (載荷形式A，60度部)

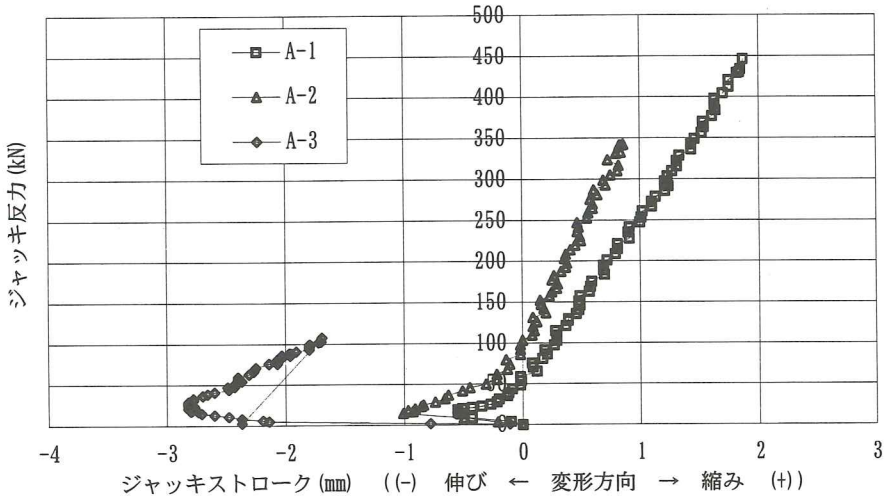


図-2.16 (g)　ジャッキ反力ーストローク関係 (載荷形式A，140度部)

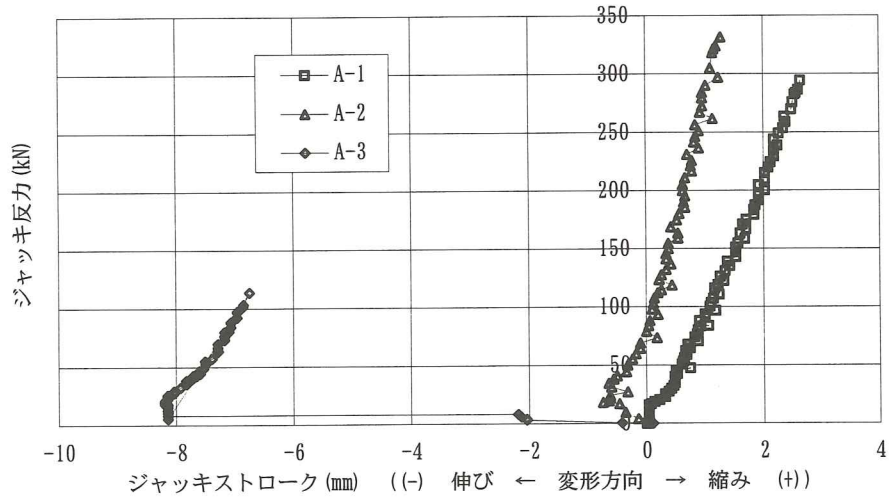


図-2.16 (h)　ジャッキ反力ーストローク関係 (載荷形式A，160度部)

(5) 断面力

供試体に発生する断面力は、全断面を有効として算定する方法と、引張側のコンクリートを無視する方法で算定する方法がある。本研究では引張側のコンクリートを無視する方法で算定した。なお、断面力の符号に関しては、図-2.17 に示すように軸力に関しては引張状態を正とし、曲げモーメントに関しては正曲げ状態を正とすることとした。



図-2.17　断面力の正負の定義

①全断面で圧縮状態となっている場合

この場合は、全断面が有効となり、以下の式によって断面に作用する軸力および断面の重心まわりの曲げモーメントを算定した。

$$N = \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_o}{2} EA \quad \cdots \quad (2.4)$$

$$M = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_o}{h} EI \quad \cdots \quad (2.5)$$

ここに、N　：　軸力

M　：　曲げモーメント

ε_i　：　内縁側のひずみ

ε_o　：　外縁側のひずみ

E　：　供試体 (コンクリート) のヤング率

A　：　供試体の断面積 (＝供試体の高さ×供試体の厚さ＝$b \times h$)

I　：　供試体の断面 2 次モーメント

h　：　供試体の厚さ (本研究においては、h=20cm または 30cm)

b　：　供試体の高さ (本研究においては、b=100cm)

②断面内に引張領域がある場合

本研究では引張領域にあるコンクリートを無視すると仮定したことから、断面内に引張ひずみが生じた場合には中立軸の位置を算定し、以下の式によって断面に作用する軸力および断面の重心まわりの曲げモーメントを算定した。中立軸の算定は、

$$x = \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_o - \varepsilon_i} h \quad \cdots \quad (2.6).$$

ここに、x　：　外縁から中立軸までの長さ

である。

正曲げの場合の軸力と曲げモーメントについては、

$$N = \frac{x}{2}\varepsilon_o bE \quad \cdots \quad (2.7)$$

$$M = -(\frac{h}{2} - \frac{x}{3})N \quad \cdots \quad (2.8)$$

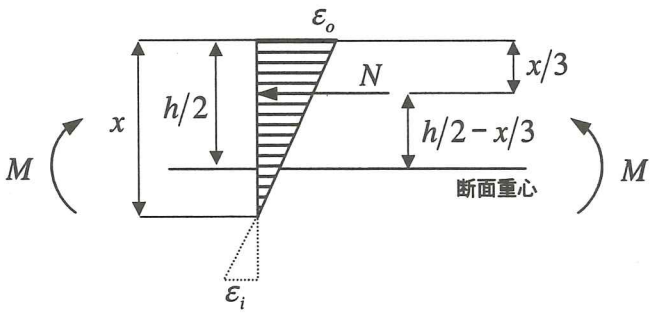


図-2.18 (a)　正曲げの場合のひずみ分布と断面力の方向

また、負曲げの場合は、

$$N = \frac{h-x}{2}\varepsilon_i bE \quad \cdots \quad (2.9)$$

$$M = (\frac{h}{6} + \frac{x}{3})N \quad \cdots \quad (2.10)$$

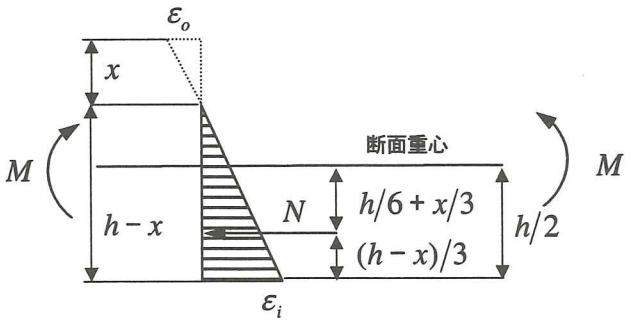


図-2.18 (b)　負曲げの場合のひずみ分布と断面力の方向

として算定した。

図-2.19 (a) ～ (f) に載荷形式Aの各ケース毎における代表的な載荷荷重での曲げモーメント図を示す。また、図-2.20 (a) ～ (f) に載荷形式Aの各ケース毎における代表的な載荷荷重での軸力図を示す。ひび割れ深さを定量的に求めることが不可能であるため、式 (2.6) に示される関係で引張領域を仮定し。その部分を無視して断面力を算定している。そのため、特に引張ひずみの値が真でないと考えられるひび割れが発生している断面近傍での断面力の値は参考程度の値として用いる必要がある。

初めに鋼繊維による補強の影響を見るために、ケース A-1 とケース A-2 を比較した。曲げモーメントについて比較すると、図-2.19 (a) に示した 25kN/本の場合では傾向を読みとることが出来ないが、図-2.19 (b) ～ (f) ではほとんどの断面で同様の傾向が得られていると考えられる。また、図-2.20 に示した軸力図より、ひび割れの発生していない断面では A-1 の方が若干軸力が高い傾向があるが、それはヤング率の差によるもの程度であり、覆工の材料による差はほとんどないと考えられる。ひび割れの発生点とその近傍では、実験で得られた引張ひずみ値にばらつきが多くなる。鋼繊維による補強の効果はひび割れ発生時の特性の改善にあることから、実験により得られたひずみ値を基に補強の効果を検討することは困難であった。

次に、薄肉化の影響を見るために、ケース A-1 とケース A-3 を比較した。図-2.19 の曲げモーメント図より、ひび割れ発生点近傍を除けばケース A-3 のほうがケース A-1 よりも曲げモーメントが小さくなる傾向があった。これはケース A-3 のほうがヤング率および断面 2 次モーメントが小さいことにより、式 (2.5) における EI が小さくなることから、見かけ上の曲げモーメントが小さく求められているためと考えられる。また、図-2.20 の軸力図より、ひび割れ発生点近傍を除いて、両ケース間での大きな差は見られなかった。

以上より、載荷形式Aでは断面力から鋼繊維の有無や薄肉化による影響を読みとることが困難であった。これらの比較を行う場合、剛性の差の影響と引張ひずみの精度良い測定が必要である。

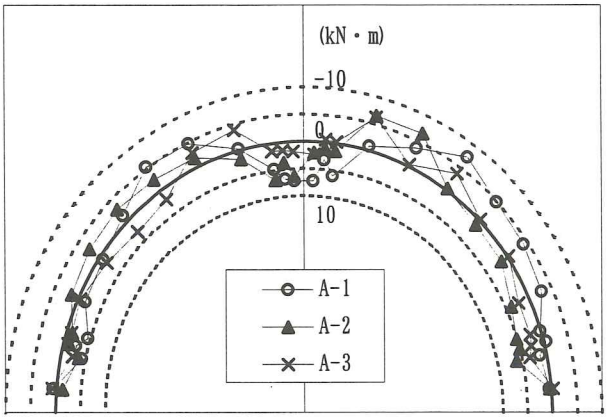


図-2.19(a)　曲げモーメント図　(25kN/本載荷時)

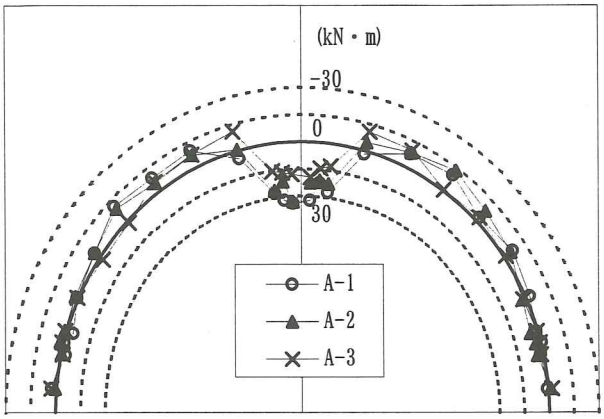


図-2.19(b)　曲げモーメント図　(50kN/本載荷時)

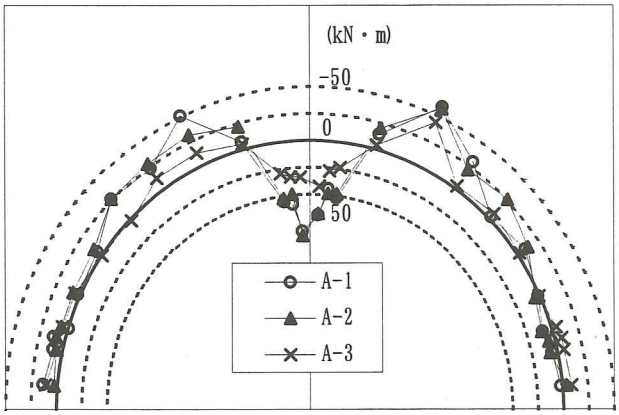


図-2.19(c)　曲げモーメント図　(100kN/本載荷時)

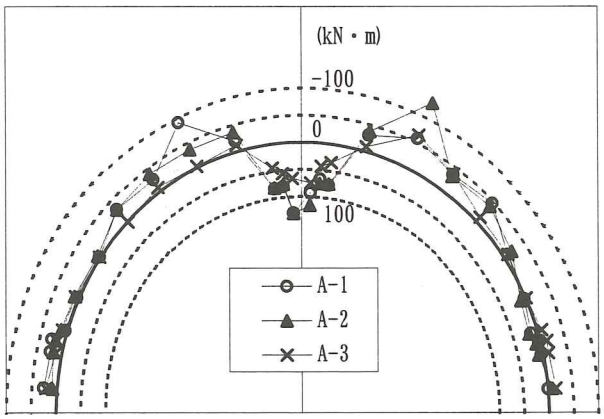


図-2.19(d)　曲げモーメント図　(150kN/本載荷時)

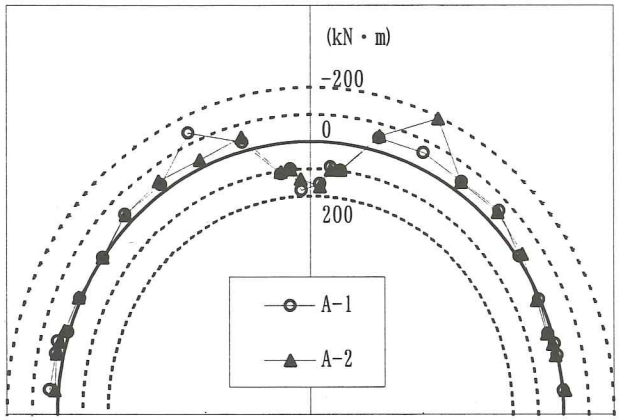


図-2.19(e)　曲げモーメント図　(200kN/本載荷時)

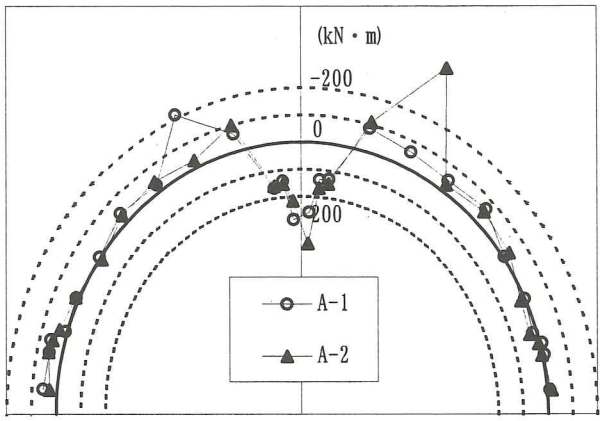


図-2.19(f)　曲げモーメント図　(300kN/本載荷時)

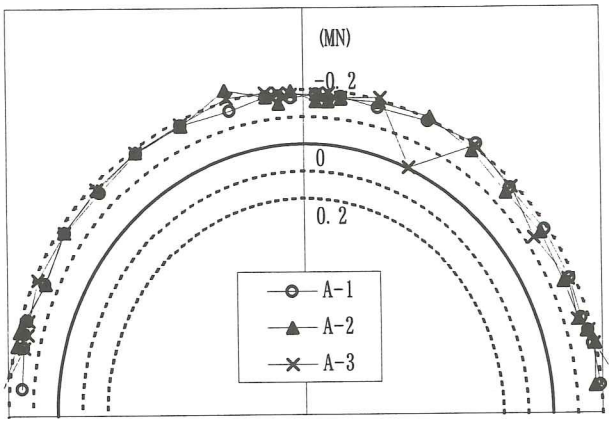


図-2.20(a)　軸力図　(25kN/本載荷時)

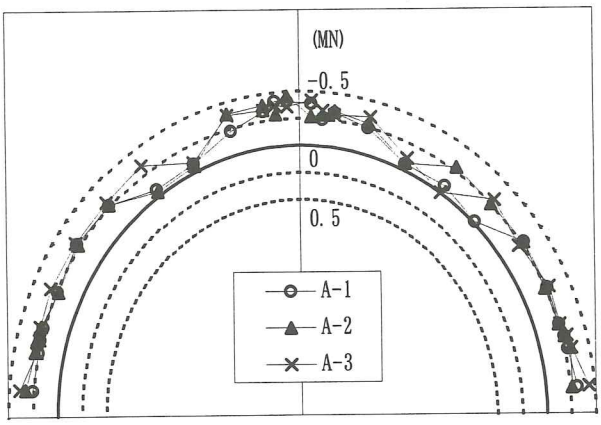


図-2.20(b)　軸力図　(50kN/本載荷時)

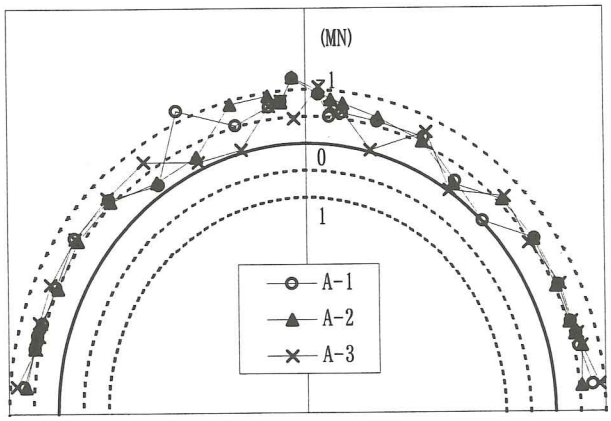


図-2.20(c)　軸力図　(100kN/本載荷時)

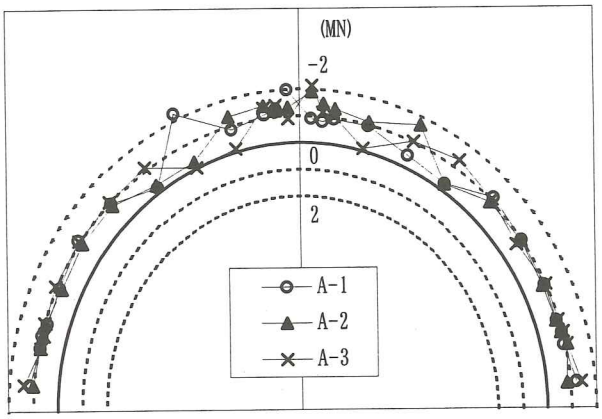


図-2.20(d)　軸力図　(150kN/本載荷時)

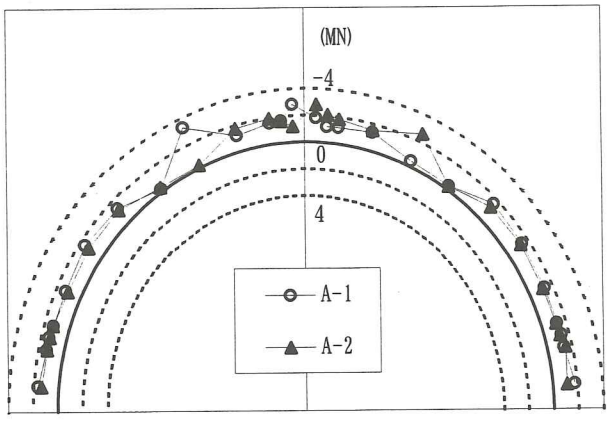


図-2.20(e)　軸力図　(200kN/本載荷時)

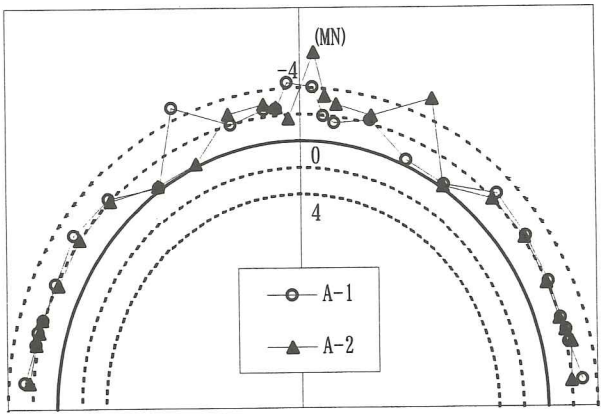


図-2.20(f)　軸力図　(300kN/本載荷時)

2.4.3　載荷形式Ｂ・載荷形式Ｂ'の結果

(1) 荷重と変位の関係

①天端

図-2.21(a)に天端部(90 度)の内縁側の荷重変位曲線を示す。また図-2.21(b)に図-2.21(a)に示した図のうち、変位が 20㎜まで、および荷重が 100kN/本までの範囲を拡大して示す。各ケースとも載荷形式Ａで観察されたような供試体の破壊は見られなかった。載荷可能な最大荷重はケース B-1 では 54.6kN/本、ケース B-2 では 152.6kN/本、ケース B-3 では 114.5kN/本、ケース B-4 では 99.7kN/本、およびケース B'-1 では 65.0kN/本となった。ケース B-4 については管理供試体の強度が高かったが、コア抜き供試体の強度は他と概ね同等であった。

初めに繊維の有無の影響について検討した。プレーンコンクリートを用いたケース B-1 では供試体の強度が他のケースより若干高いのにもかかわらず、繊維を用いた各ケースよりも載荷可能な最大荷重が小さい結果が得られた。また、繊維で補強したケースでは荷重の大幅な低下が見られなかったのに対し、ケース B-1 ではひび割れが発生したと考えられる荷重付近で大幅に低下した。その現象はケース B-1 では載荷可能な最大荷重に達した後でも見られ、繊維で補強されたケースでは、荷重は緩やかに減少した。

次に繊維自体の影響について検討した。鋼繊維の長さの影響を検討するためにケース B-2 とケース B-3 を比較したところ、鋼繊維の長さが半分であるケース B-3 ではケース B-2 の 4 分の 3 程度の最大荷重となっていた。また、最大荷重に達した後の荷重の低下の度合いについてもケース B-3 の方がケース B-2 よりも急に低下することが分かった。これよりケース B-2 の方がひび割れが発生した以降の変形に対する抵抗性が大きいと考えられる。また、鋼繊維と樹脂繊維の影響を検討するためにケース B-2 とケース B-4 を比較したところ、ケース B-4 では最大荷重が 40%程度低くなった。

さらに、鋼繊維補強コンクリートの薄肉化の影響については、ケース B-2 とケース B'-1 とでは導入した軸力が異なり、ケース B'-1 の方が軸力値としては小さいために単純な比較は困難であるが、ケース B'-1 の最大荷重はケース B-2 より 60%程度低くなった。また、荷重変位曲線の変化についてはケース B'-1 では非常に緩やかであった。

以上より、載荷形式Ｂではプレーンコンクリートと繊維補強コンクリートの挙動で異なる点が見られ、繊維補強の効果が載荷可能な最大荷重、すなわち構造物の耐荷力に表れた載荷形式であったと考えられる。

②脚部

図-2.21(b)に 0 度および 180 度部分、すなわち脚部の荷重変位曲線を示す。これより、ケース B-1 およびケース B-2 では載荷荷重が 20kN/本を超えた付近、すなわち軸力の導入が終了した付近から 0 度側で一時的に左方向へ変位した。また、ケース B-3 では軸力の導入が終了した付近から脚部が断面縮小の方向に向かうように変位した。載荷形式Ａと同様に軸力導入時からその終了時にかけて左右からの載荷荷重に微妙なアンバランスがあったりしたと考えられるが、軸力が導入されてからは荷重の増加とともに変位の変化量は小さいことから供試体の移動はほとんどなかったと考えてよく、各ケースともずれの値は小さいと考えられる。

③45 度・135 度部分

図-2.21(c)に載荷形式Ｂにおける 45 度部分および 135 度部分の水平方向の荷重変位曲線を示す。ケース B'-1 では 135 度側が、ケース B-4 では 45 度側がそれぞれの対称側に比較して若干大きな変位となっていたが、全体的には挙動に関しては概ね左右対称であったと考えられる。

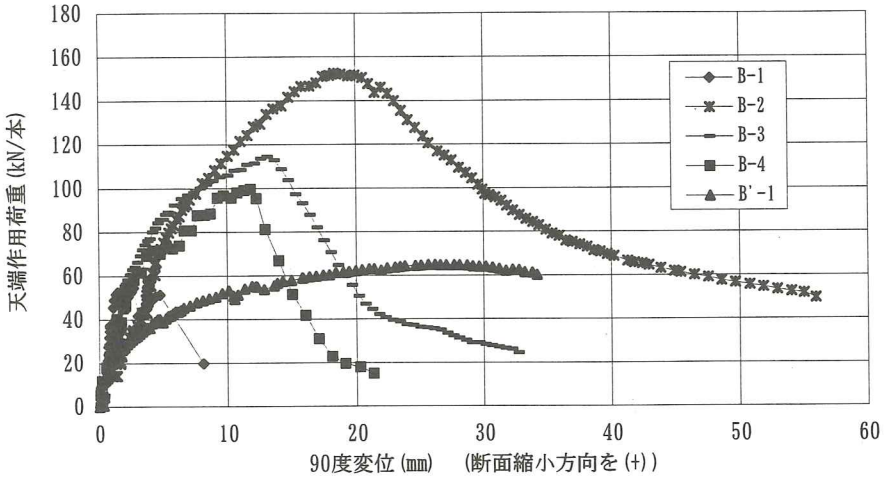


図-2.21 (a) 荷重変位曲線 (載荷形式Ｂ・Ｂ', 90度, 高さ50cm)

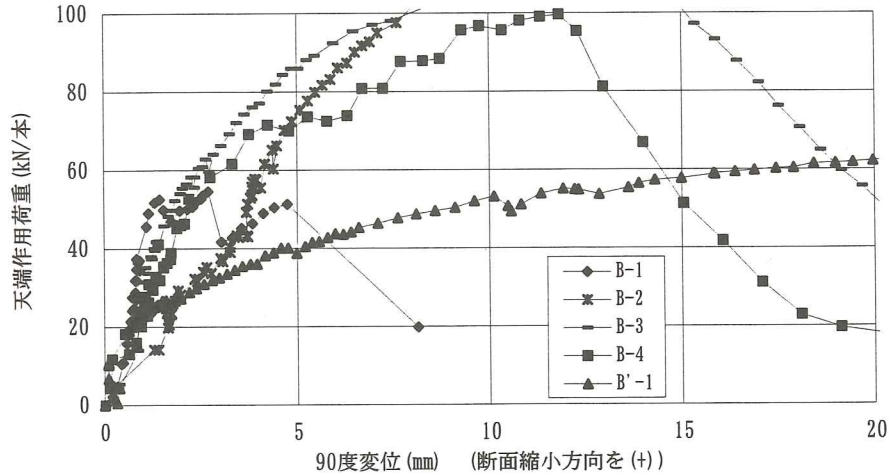


図-2.21 (b) 荷重変位曲線 (載荷形式Ｂ・Ｂ', 90度, 高さ50cm)

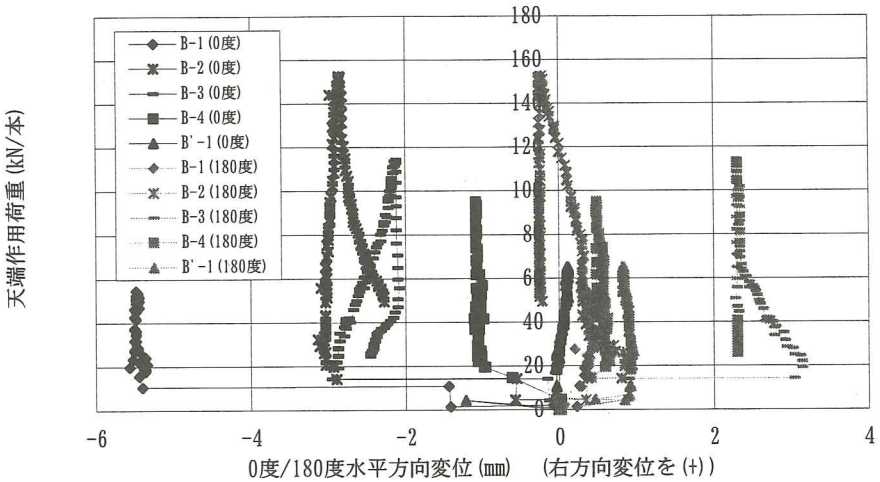


図-2.21 (c) 荷重変位曲線 (載荷形式Ｂ・Ｂ', 0度/180度, 高さ50cm)

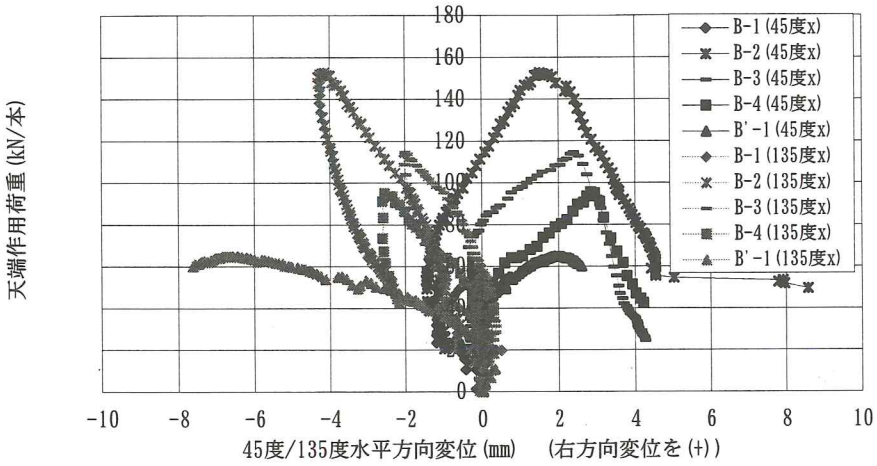


図-2.21(d) 荷重変位曲線
(載荷形式Ｂ・Ｂ', 45度/135度水平方向, 高さ50cm)

(2) 破壊状況とひび割れ

ケース B-1～B-4 および B'-1 の 5 つのケースのひび割れ図を図-2.22～図-2.26 に示す。ひび割れ図の記載は載荷形式Aの場合と同様に内面側から見た図を基準とした。また、各ケースにおける最終の破壊状況を写真-2.11～写真-2.15 に示す。さらに、ひび割れ発生荷重とひび割れの状況について表-2.15 (a) ～ (e) に示す。

ケース B-1 では、表-2.15 (a) より第 1 ひび割れが天端変位 1.74mm (変位制御による載荷装置の変位値 0.6mm、ロードセルの荷重値 47.0kN/本) で天端部の内縁側にひび割れ幅が 0.1mm 程度で確認された。また、第 2 ひび割れが天端変位が 3.04mm (1.8mm、41.7kN/本) で 65° の外縁側で確認された。さらに、第 3 ひび割れが天端変位 4.74mm (3.6mm、51.3kN/本) で 40 度の内縁側で確認された。本ケースではひび割れは左右対称に発生せず、内面側から向かって右側である 0 度～90 度の部分でのみ観察された。この理由として、図-2.21 (b) より 180 度の脚部変位は右方向に 1mm 以下に対して、0 度の脚部変位は左方向に 6mm 程度の移動を生じたように実験中にジャッキの微妙なアンバランス等といったことが考えられる。ひび割れの発生状況は、図-2.22 のひび割れ図や、写真-2.11 より、載荷形式Aにおけるケース A-1 の場合と同様に、供試体の上下方向にひび割れが進展する形状が多かった。供試体の破壊は観察されず、写真-2.11 (c) や写真-2.11 (e) などに見られるように、ひび割れが発生している縁の反対側でもコンクリートの圧縮の限界に達している現象は見られず、ひび割れ深さがかなり大きくなっている様子が観察された。

ケース B-2 では、表-2.15 (b) より第 1 ひび割れが天端変位 3.83mm (変位制御による載荷装置の変位値 0.5mm、ロードセルの荷重値 55.8kN/本) で天端部の内縁側にひび割れが確認された。また、第 2 ひび割れが天端変位 8.60mm (4.5mm、104.8kN/本) で 115° の外縁側で確認された。その後、対称の位置である 65 度の外縁側付近に発生し、第 3 ひび割れが天端変位 17.48mm (13.5mm、151.2kN/本) で 32.5～35 度付近および 140 度付近の内縁側に発生した。ひび割れの発生状況は、図-2.23 (d) および (f) より、ひび割れが 1 本に集中して発生するのではなく、ケース A-2 と同様にある程度分散して発生する傾向が見られた。写真-2.12 に最終状態での供試体の状況を示す。供試体の破壊は見られず、写真-2.12 (c) に見られるように、ひび割れ幅がかなり大きくなった状態でも、供試体からの剥落等は発生しなかった。

ケース B-3 では、表-2.15 (c) より第 1 ひび割れが天端変位 2.04mm (変位制御による載荷装置の変位値 0.6mm、ロードセルの荷重値 55.4kN/本) で天端部の内縁側にひび割れが確認された。また、第 2 ひび割れが天端変位 2.64mm (1.1mm、62.9kN/本) で 67.5 度の外縁側の上部に確認された。その後、概ね対称の位置である 125 度の外縁側付近に発生した。第 3 ひび割れが天端変位 11.60mm (10.0mm、110.9kN/本) で 32.5～40 度付近の内縁側に発生した。図-2.24 (d) および (e) よりひび割れは分散して発生するものの、ケース B-2 ほど分散する傾向は見られなかった。写真-2.13 に最終状態での供試体の状況を示す。供試体の破壊は見られず、供試体からの剥落等は発生しなかった。

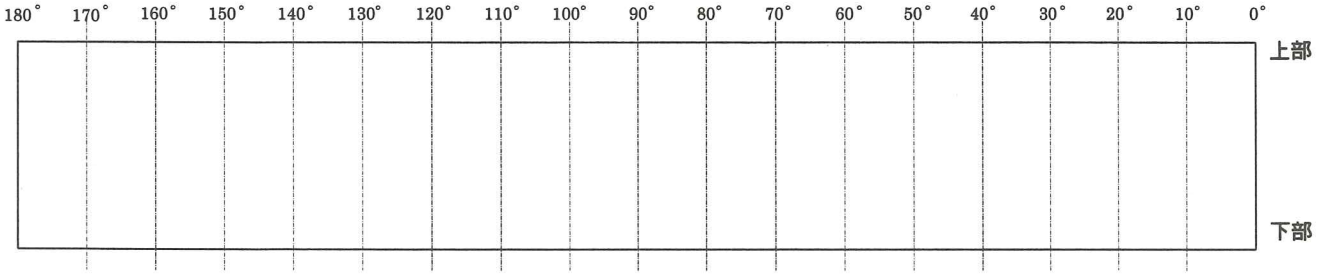
ケース B-4 では、表-2.15 (d) より第 1 ひび割れが天端変位 1.89mm (変位制御による載荷装置の変位値 0.2mm、ロードセルの荷重値 45.3kN/本) で天端部の内縁側にひび割れが確認された。また、第 2 ひび割れが天端変位 4.79mm (3.5mm、70.1kN/本) で 62 度および 117.5 度の外縁側の上部に確認された。さらに第 3 ひび割れが天端変位 10.80mm (9.5mm、98.1kN/本) で 40 度付近の内縁側に発生した。図-2.25 (d) および (e) より、繊維で補強したにもかかわらずひび割れが分散して発生したとは考えにくかった。写真-2.14 に最終状態での供試体の状況を示す。最終

的にも供試体からの剥落は発生しなかったが、ひび割れが集中して発生しており、プレーンコンクリートと比較的類似したひび割れの進展が見られた。

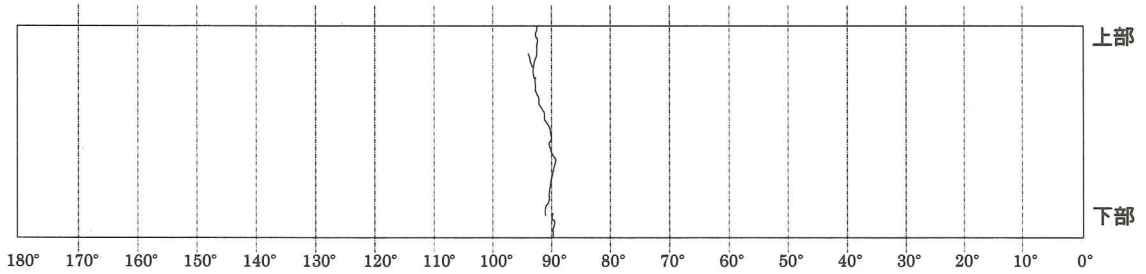
ケースB'-1では、表-2.15(e)より第1ひび割れが天端変位1.60mm(変位制御による載荷装置の変位値1.0mm、ロードセルの荷重値 26.9kN/本)で天端部の内縁側にひび割れが確認された。また、第 2 ひび割れが天端変位3.96mm(3.2mm、36.1kN/本)で70度の外縁側の上下にわたって確認された。その後、対称の位置である115度の外縁側付近に発生し、第3ひび割れが天端変位12.32mm(11.5mm、55.0kN/本)で150度付近の内縁側に発生した。なお、天端変位が1.98mm(1.4mm、27.9kN/本)の観察時に125度の外縁側の下側にひび割れを確認したが、非常に微細なひび割れであり、その後、載荷を継続して観察を続けたが、天端変位が6.18mmに達して125度付近全体にわたってひび割れが発生するまで、開口幅が大きくなることもなく、またそのひび割れが進展する様子も観察されなかった．そのため、外力に起因したひび割れではなく、乾燥収縮等による影響で発生したひび割れが天端変位が1.98mm の時に何らかの理由で目視できる程度になって確認できたものと考えられる。ひび割れの発生状況は、図-2.26(d)および(e)より、ひび割れが分散して発生する傾向に加え、厚さが30cmであったケースB-2よりもさらに広い範囲で分散する傾向が観察された。鋼繊維の混入率は同一で、供試体の強度も大きく変わらないことから、導入した軸力がケースB'-1ではケースB-2よりも小さかったため、ひび割れの発生本数自体は多くなり、その影響で細かく分散したことが考えられる。写真-2.15 に最終状態での供試体の状況を示す。供試体の破壊は見られず、供試体からの剥落等は発生しなかった。

第1ひび割れの発生したときの荷重と載荷可能な最大荷重の差を検討したところ、載荷形式Aで約3.5～5.6倍であったのに対し、載荷形式Bでは約1.0～2.7倍であり、載荷形式Bの方が小さい結果が得られた。最大荷重を構造物の耐荷力を表す代表値として考える場合は、第1ひび割れから最大荷重に達するまでの安全率が載荷形式により異なると考えられる。特に、載荷形式Bではプレーンコンクリートを用いたケースB-1についてはその差がほとんどないことが分かった。

また、各ケースに共通して第3ひび割れが発生した近傍付近の荷重で載荷可能な最大荷重が得られていることが分かった。

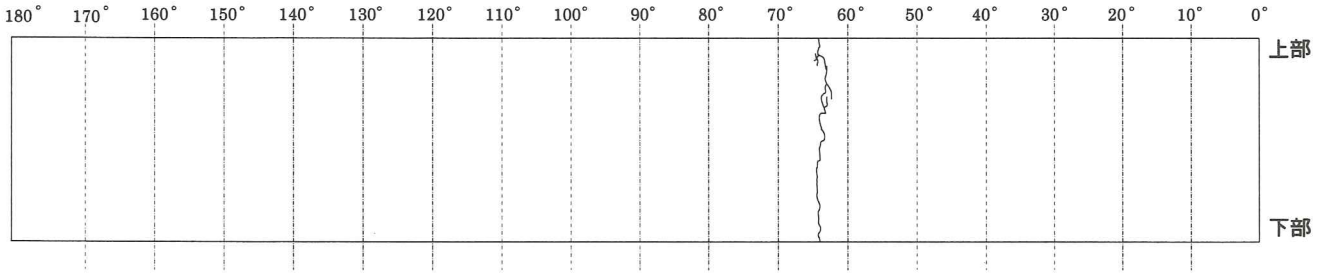


（外縁側）

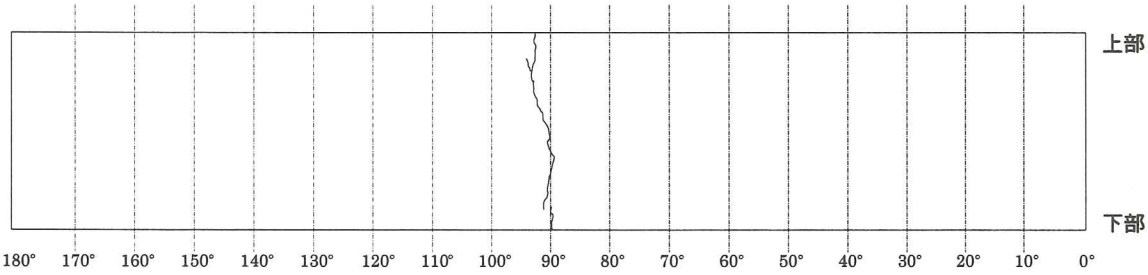


（内縁側）

図-2.22(a)　　ひび割れ図　(ケースB-1　変位制御の天端変位＝1.74㎜時)

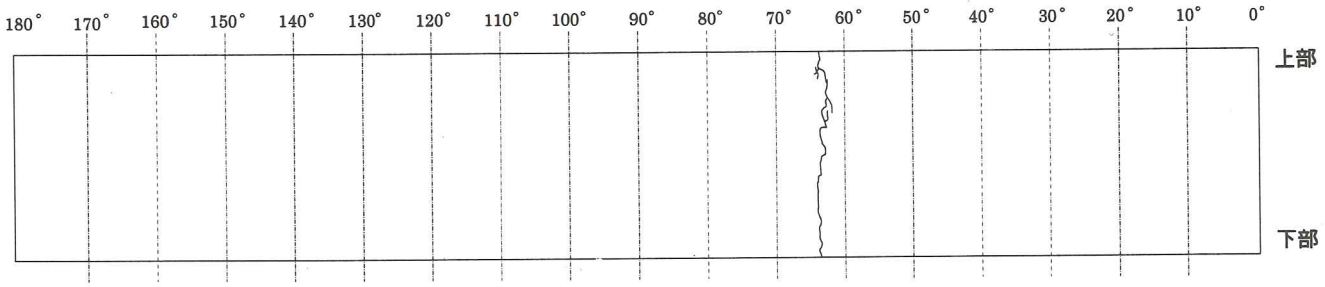


（外縁側）

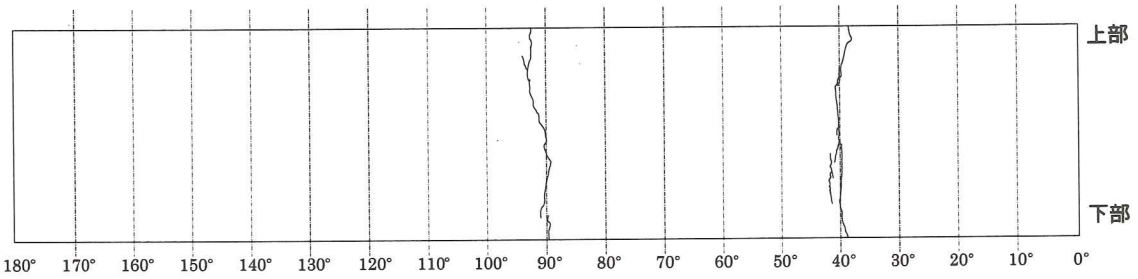


（内縁側）

図-2.22(b)　　ひび割れ図　(ケースB-1　変位制御の天端変位＝3.04㎜時)



（外縁側）



（内縁側）

図-2.22(c)　　ひび割れ図　(ケースB-1　変位制御の天端変位=4.74㎜時)

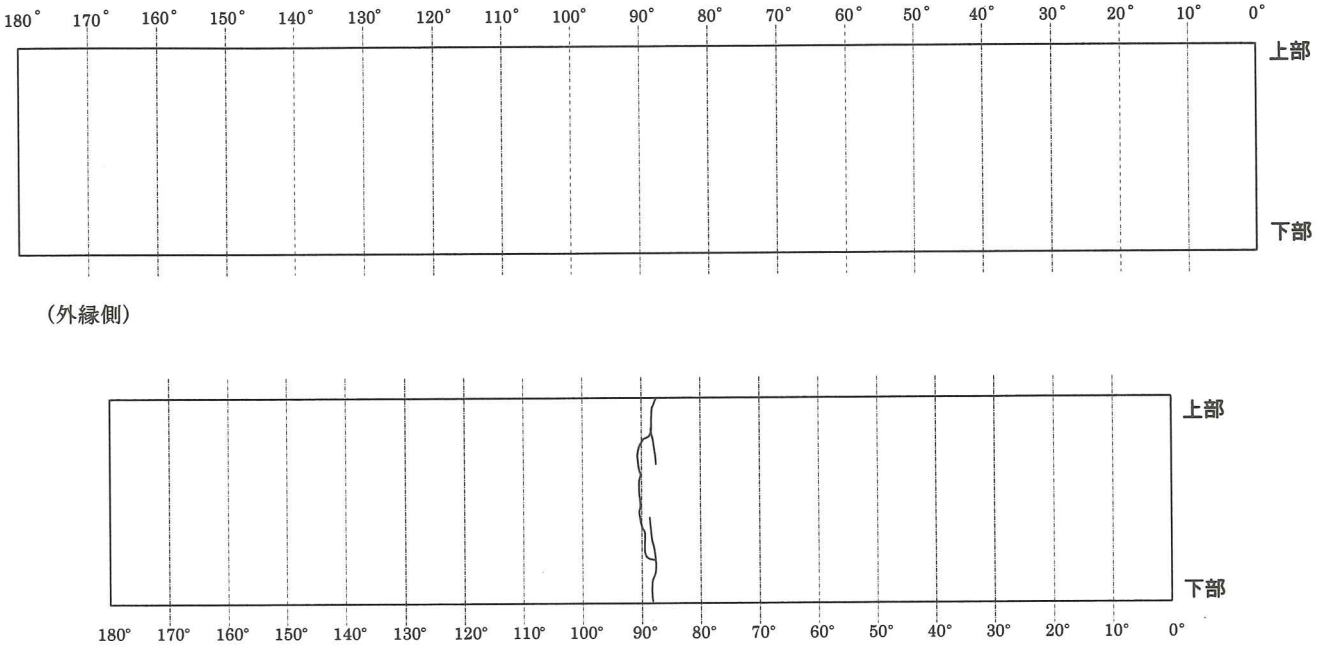


図-2.23(a)　　ひび割れ図　(ケースB-2　変位制御の天端変位＝2.4㎜時)

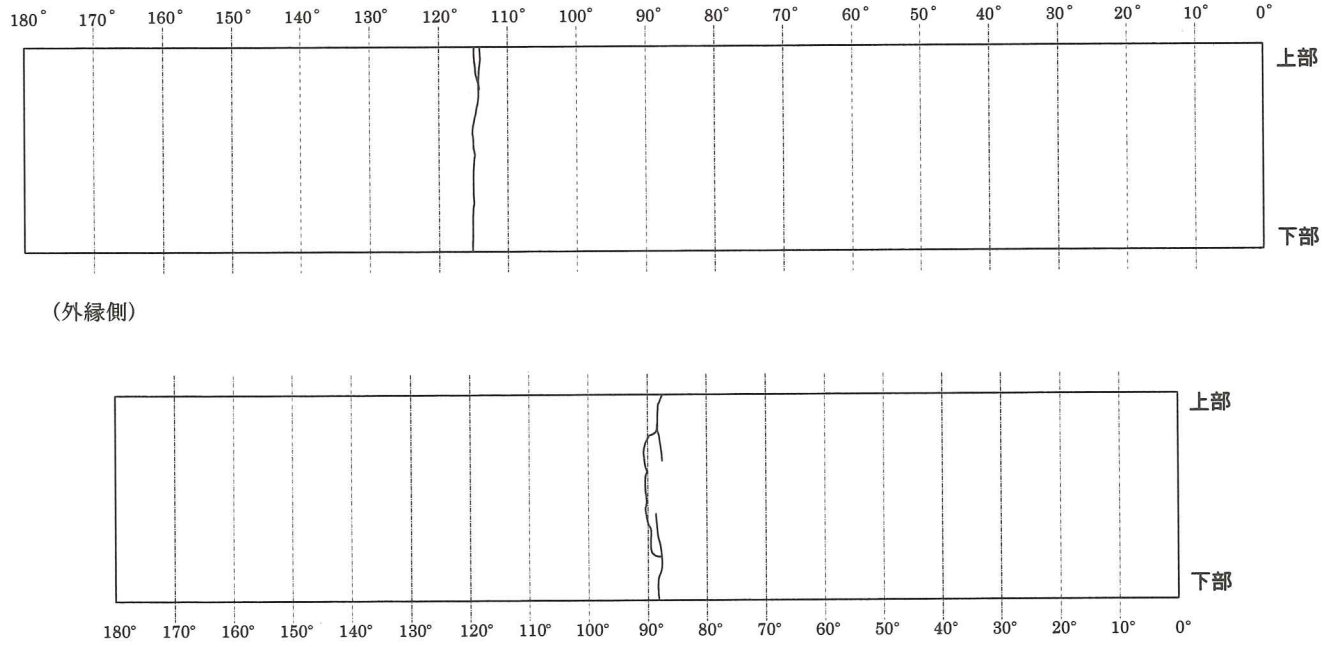


図-2.23(b)　　ひび割れ図　(ケースB-2　変位制御の天端変位＝4.5㎜時)

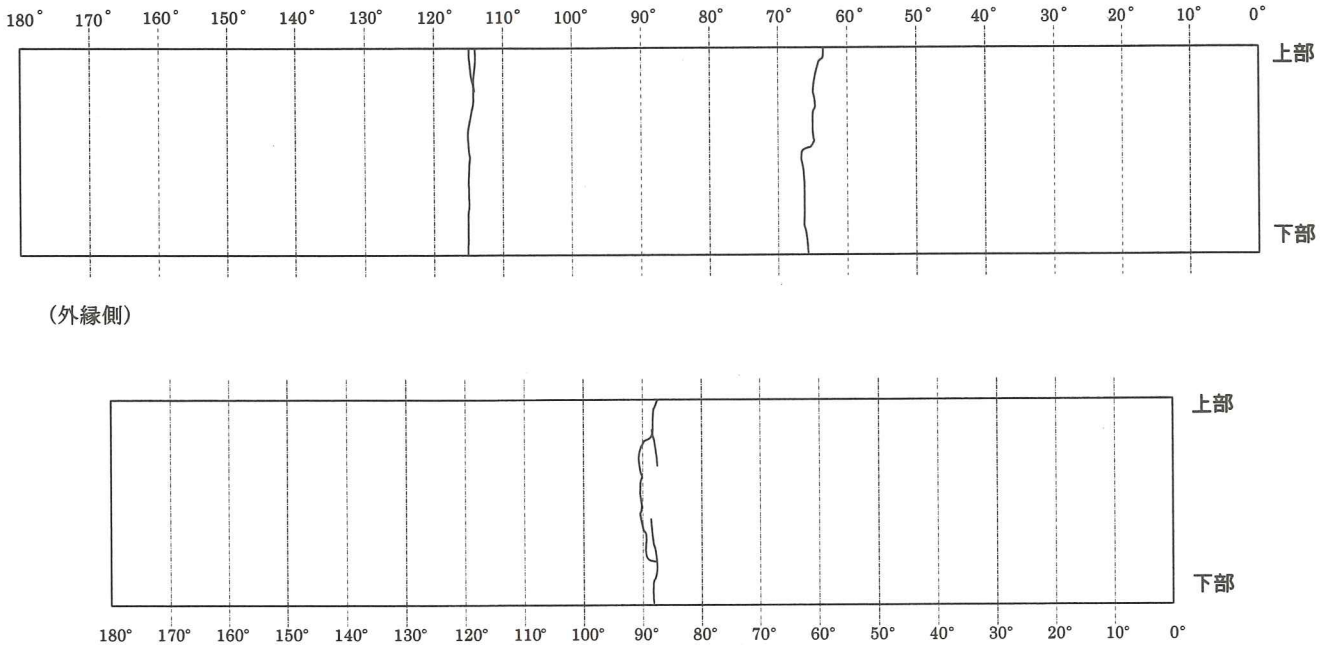


図-2.23(c)　　ひび割れ図　(ケースB-2　変位制御の天端変位＝6.5㎜時)

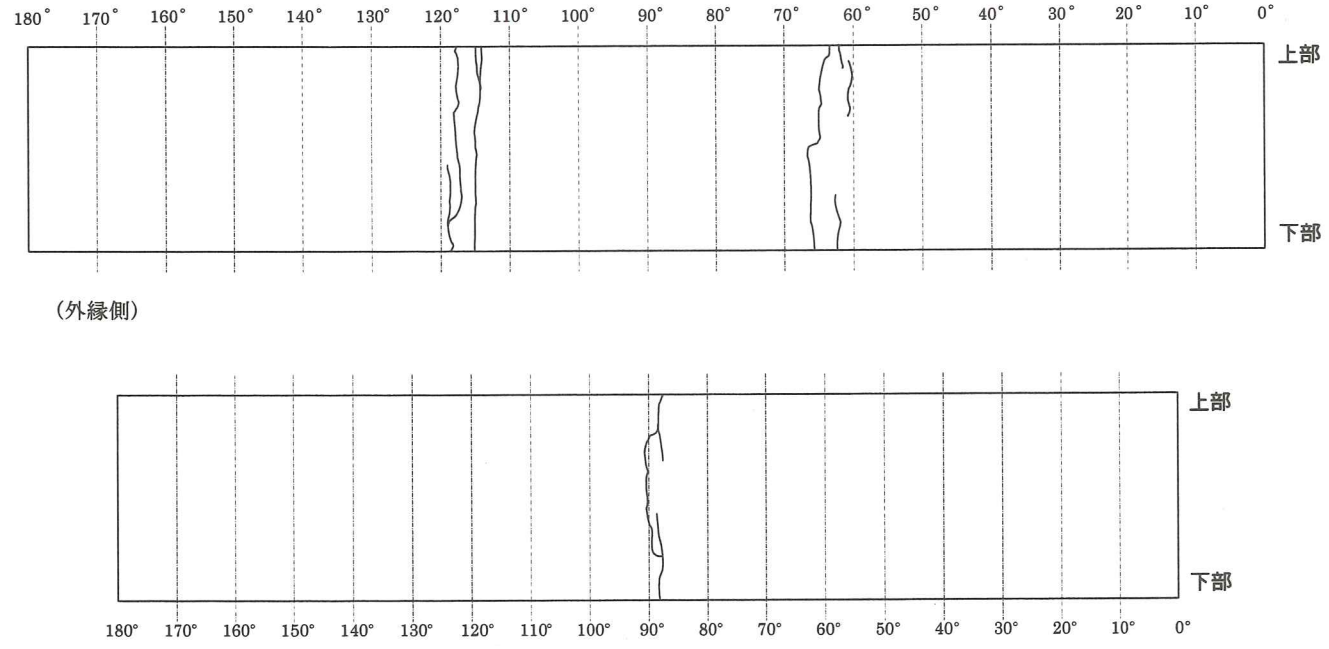


図-2.23(d)　　ひび割れ図　(ケースB-2　変位制御の天端変位＝8.5㎜時)

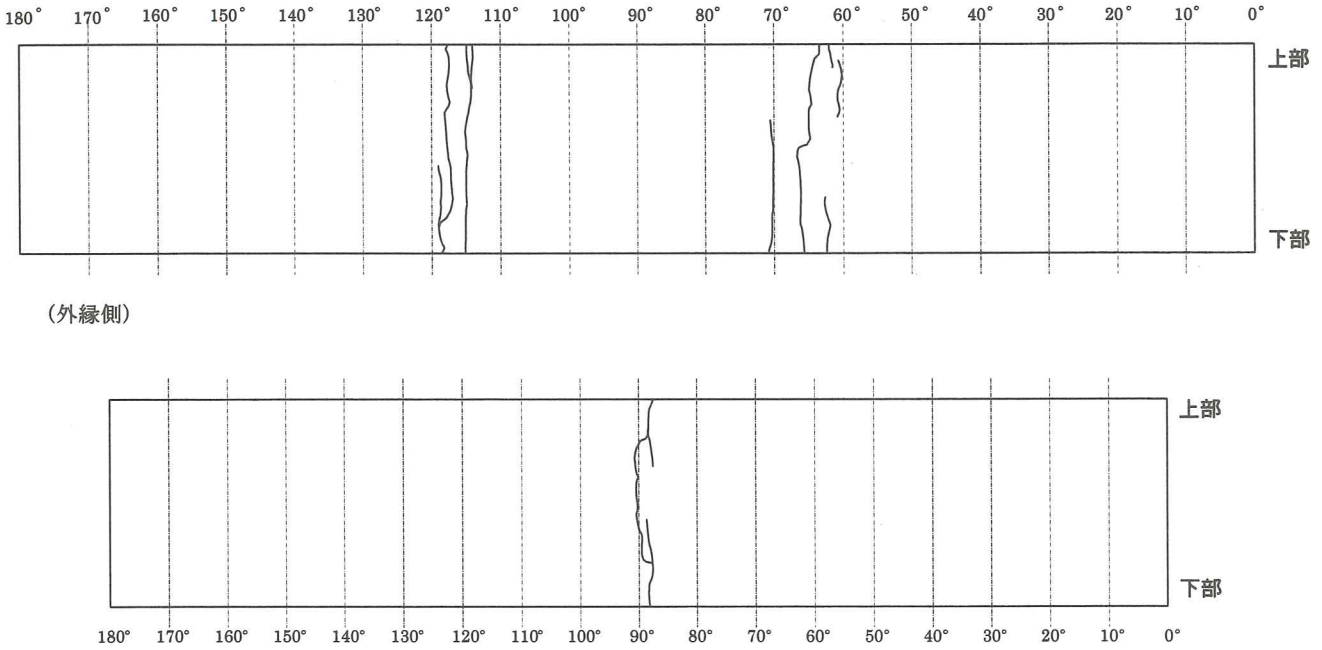


図-2.23(e)　　ひび割れ図　(ケースB-2　変位制御の天端変位＝12.0㎜時)

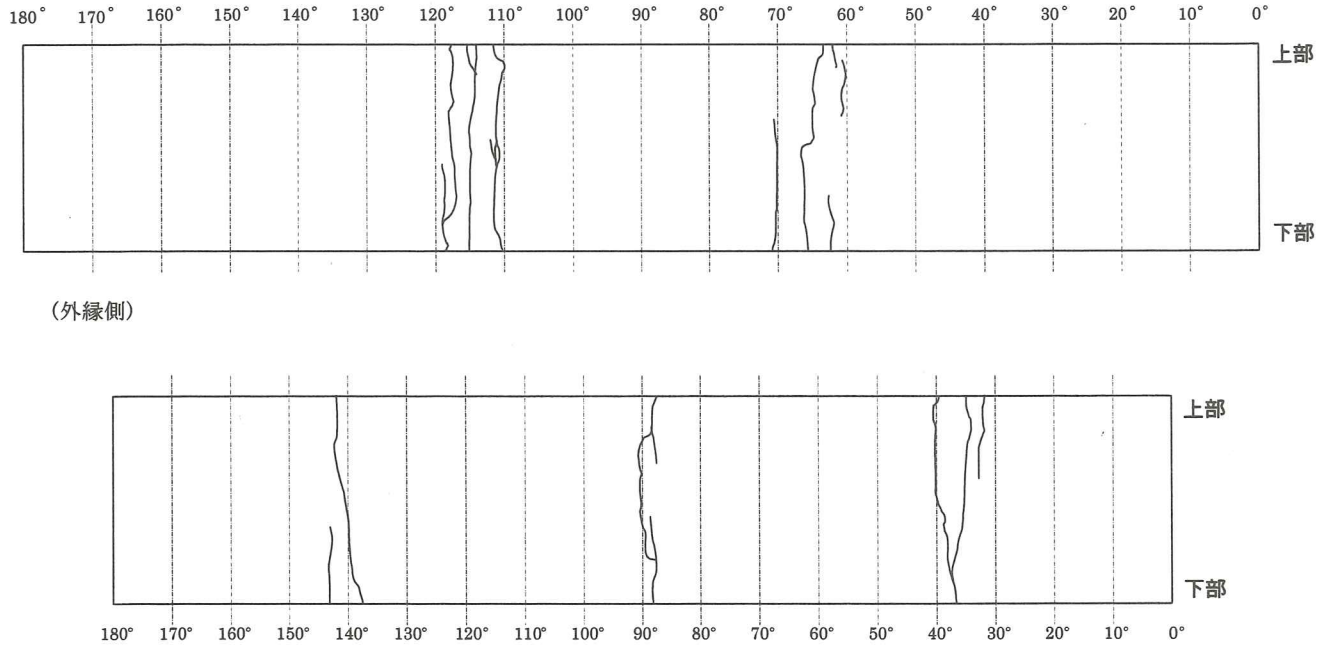


図-2.23(f)　　ひび割れ図　(ケースB-2　変位制御の天端変位＝13.5㎜時)

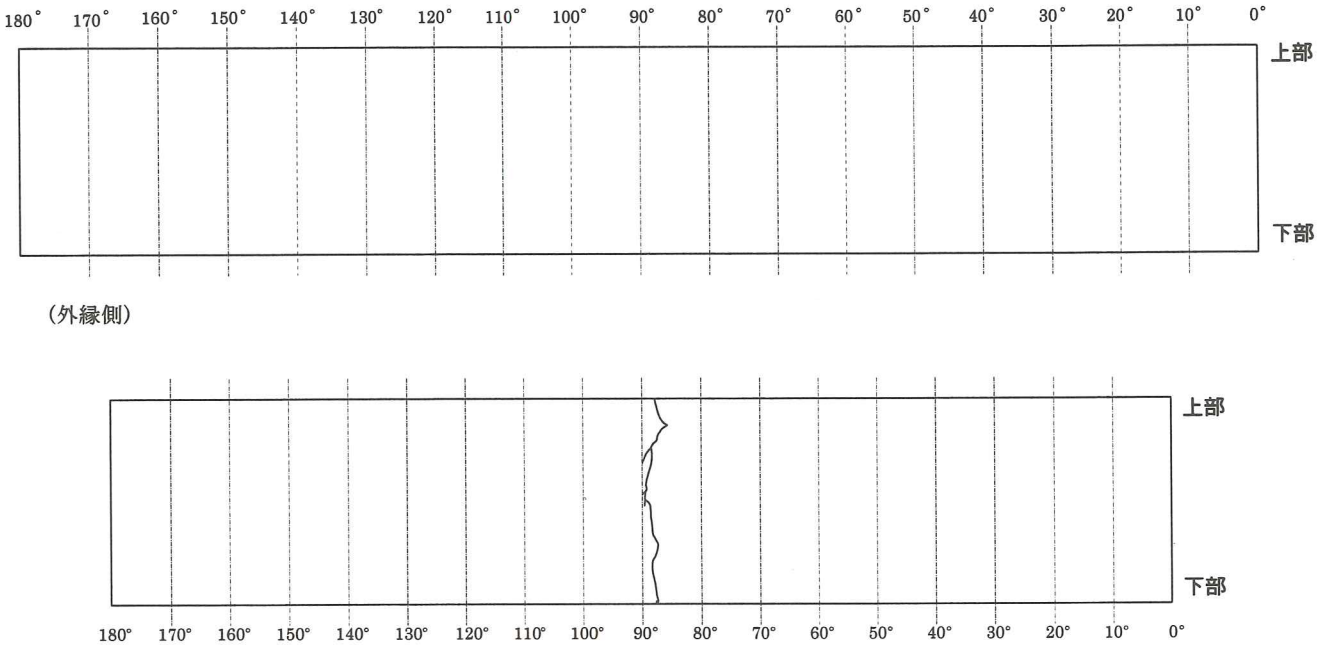


図-2.24(a)　　ひび割れ図　(ケースB-3　変位制御の天端変位＝2.0㎜時)

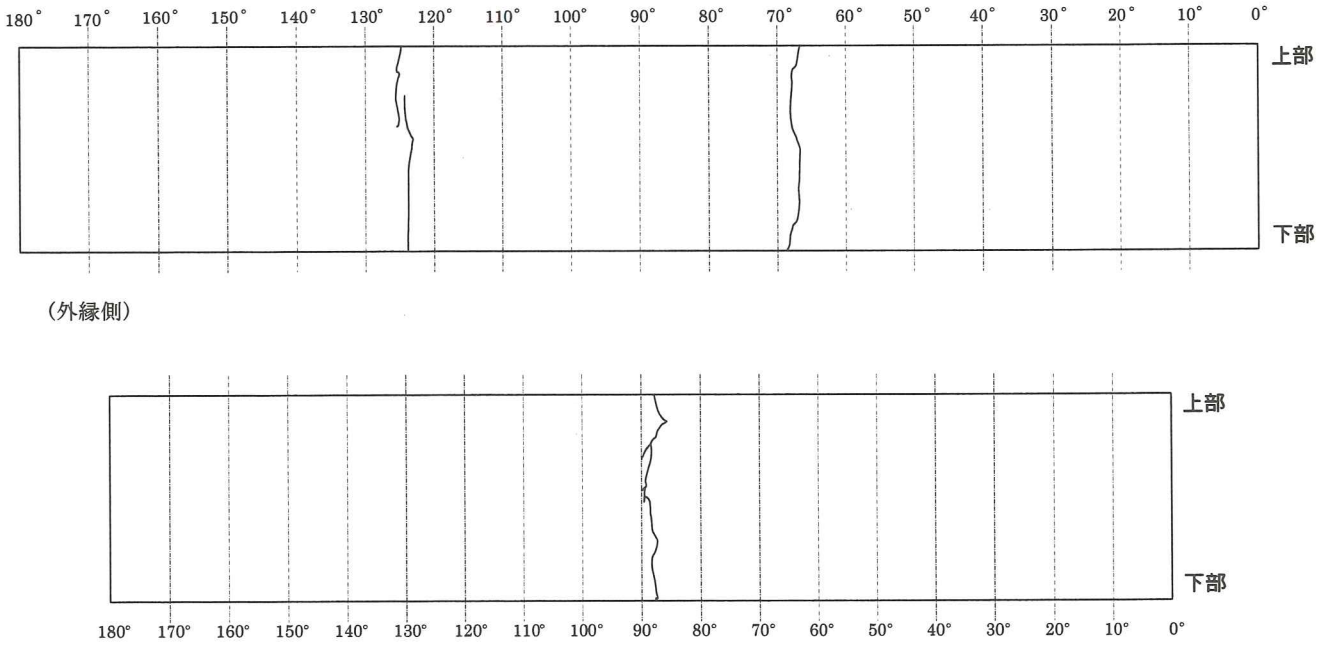


図-2.24(b)　　ひび割れ図　(ケースB-3　変位制御の天端変位＝4.0㎜時)

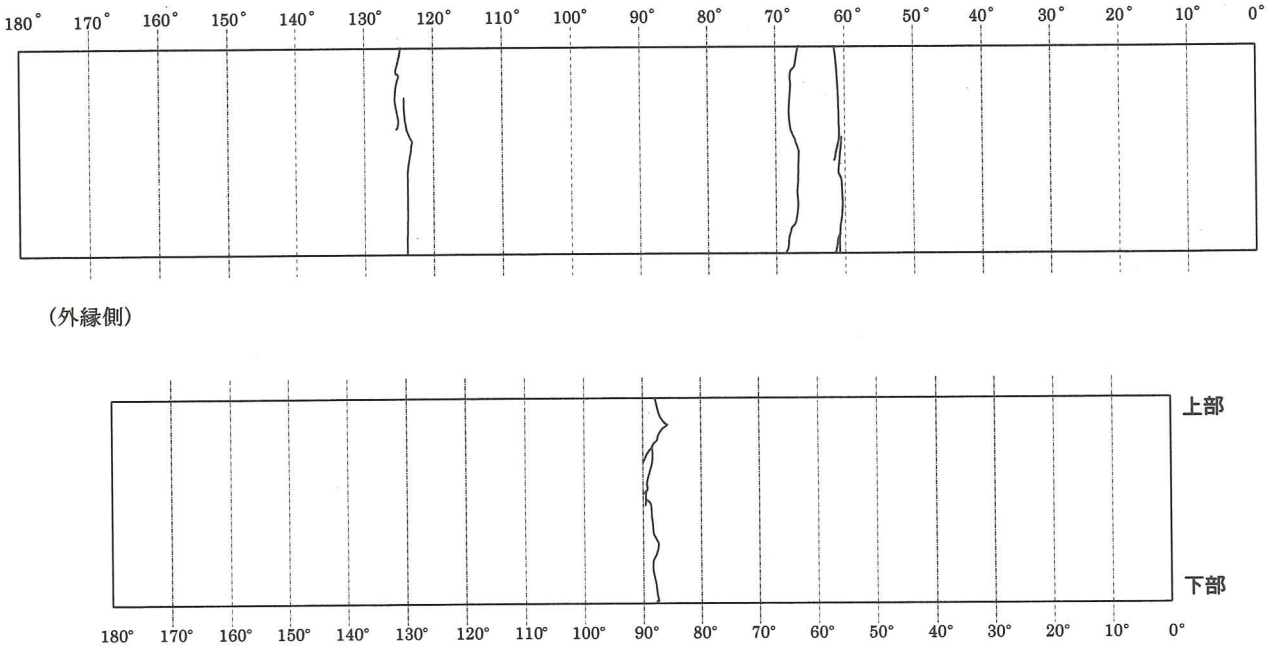


図-2.24(c)　　ひび割れ図　(ケースB-3　変位制御の天端変位＝6.0㎜時)

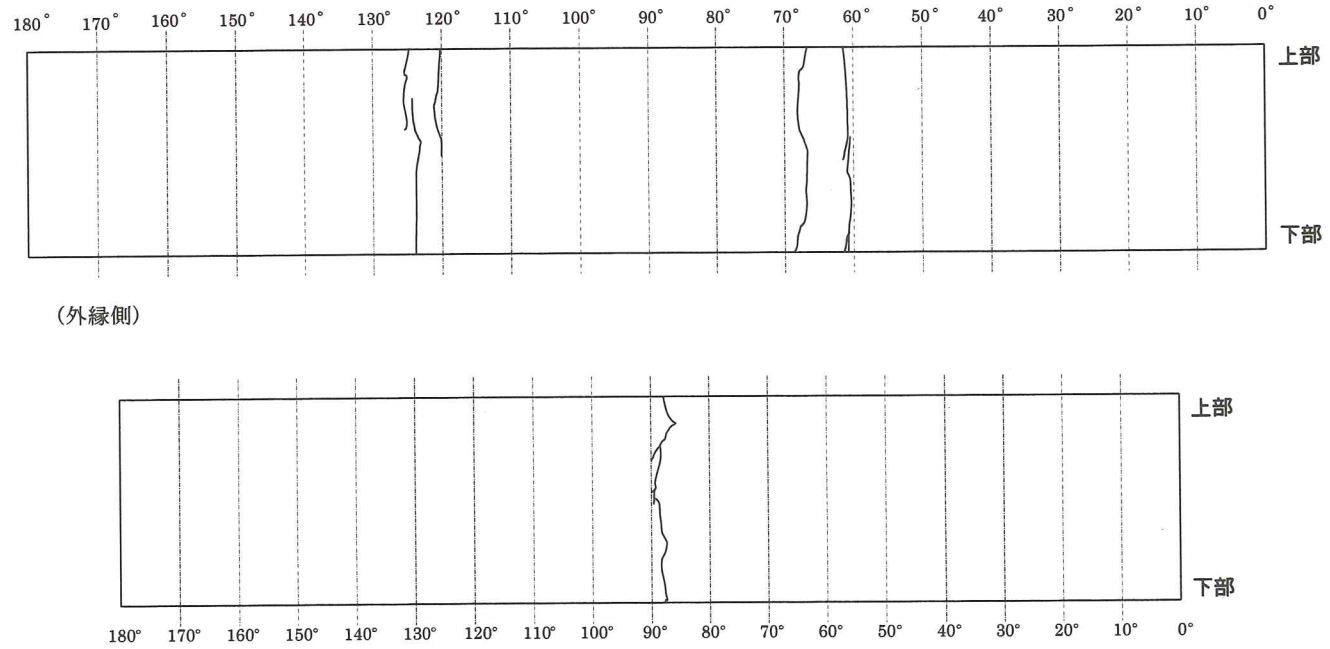


図-2.24(d)　　ひび割れ図　(ケースB-3´変位制御の天端変位＝8.0㎜時)

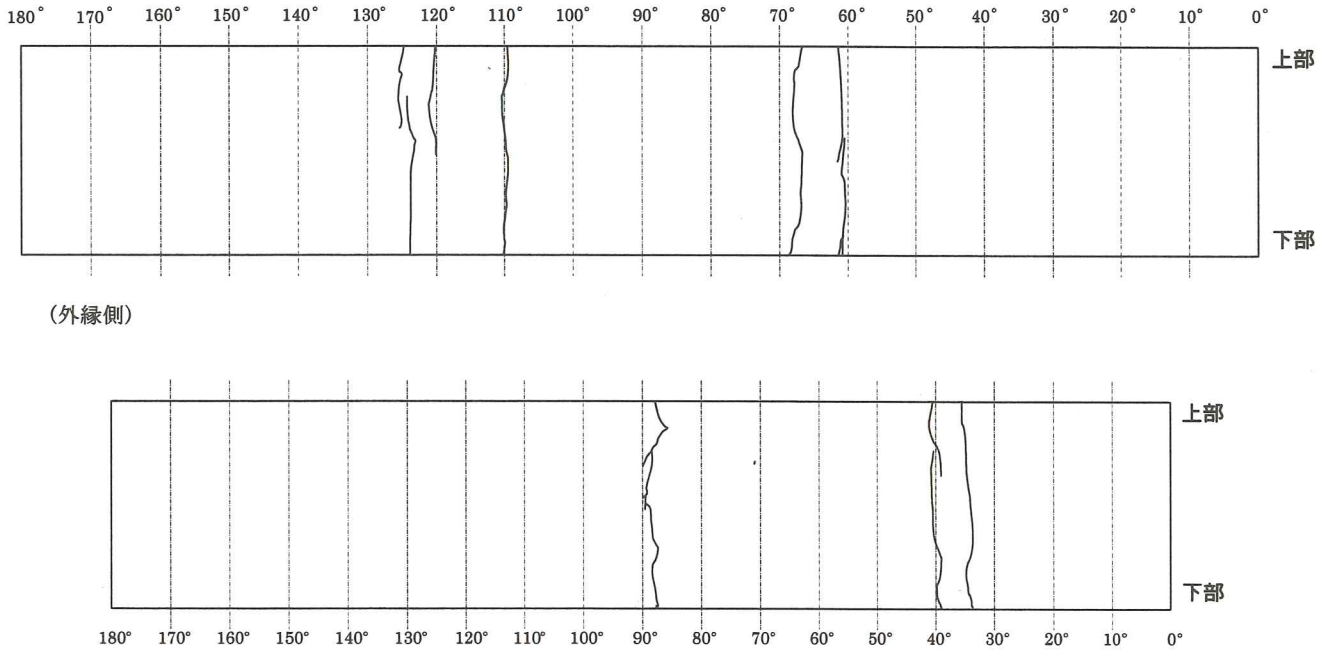


図-2.24(e)　　ひび割れ図　(ケースB-3　変位制御の天端変位＝10.0㎜時)

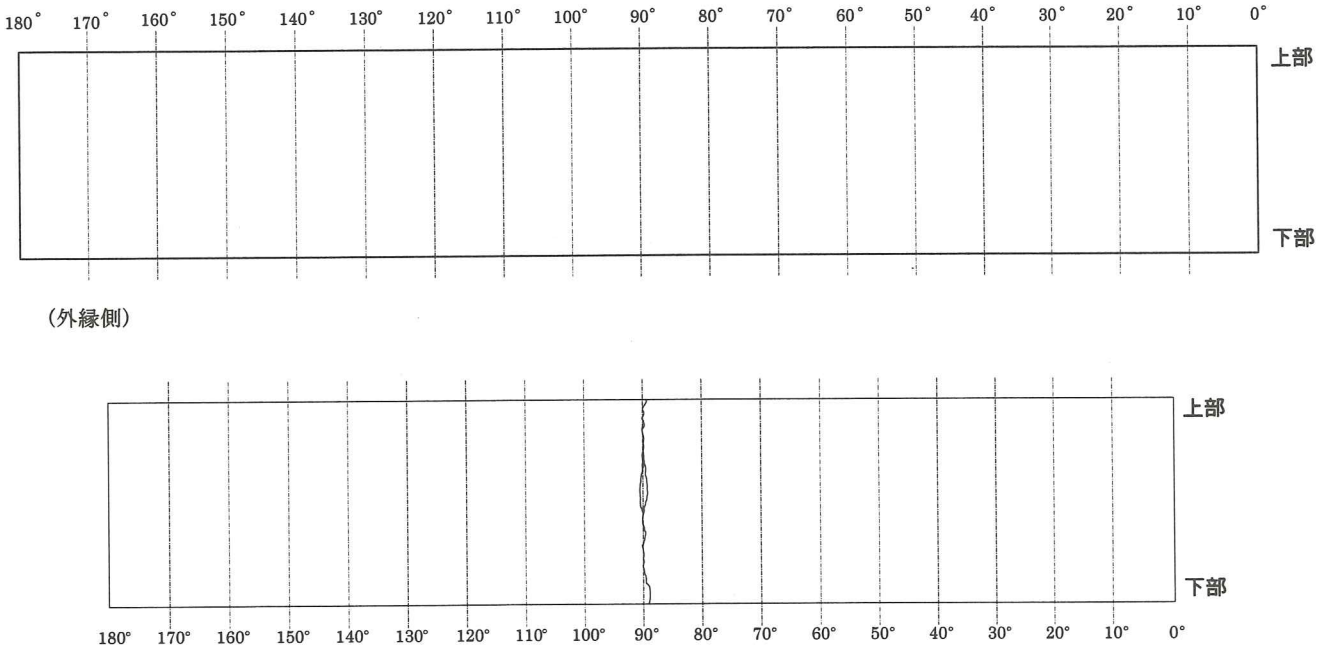


図-2.25(a)　　ひび割れ図　(ケースB-4　変位制御の天端変位＝0.2㎜時)

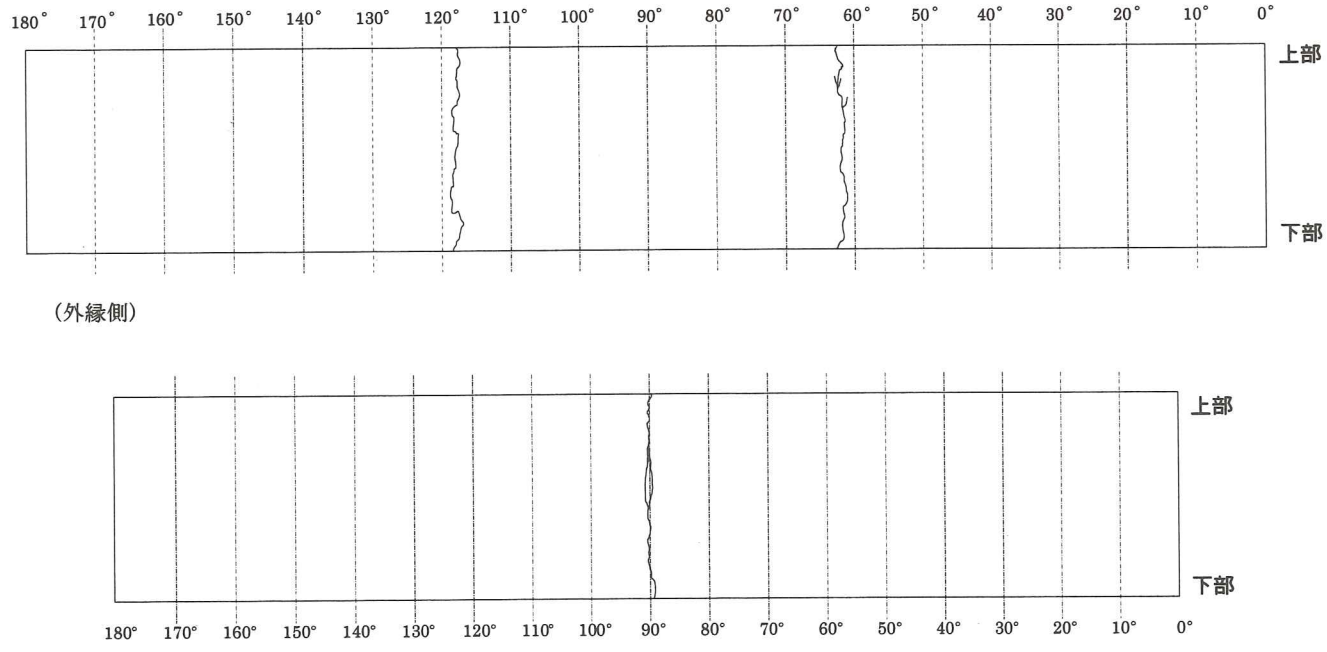


図-2.25(b)　　ひび割れ図　(ケースB-4　変位制御の天端変位＝3.5㎜時)

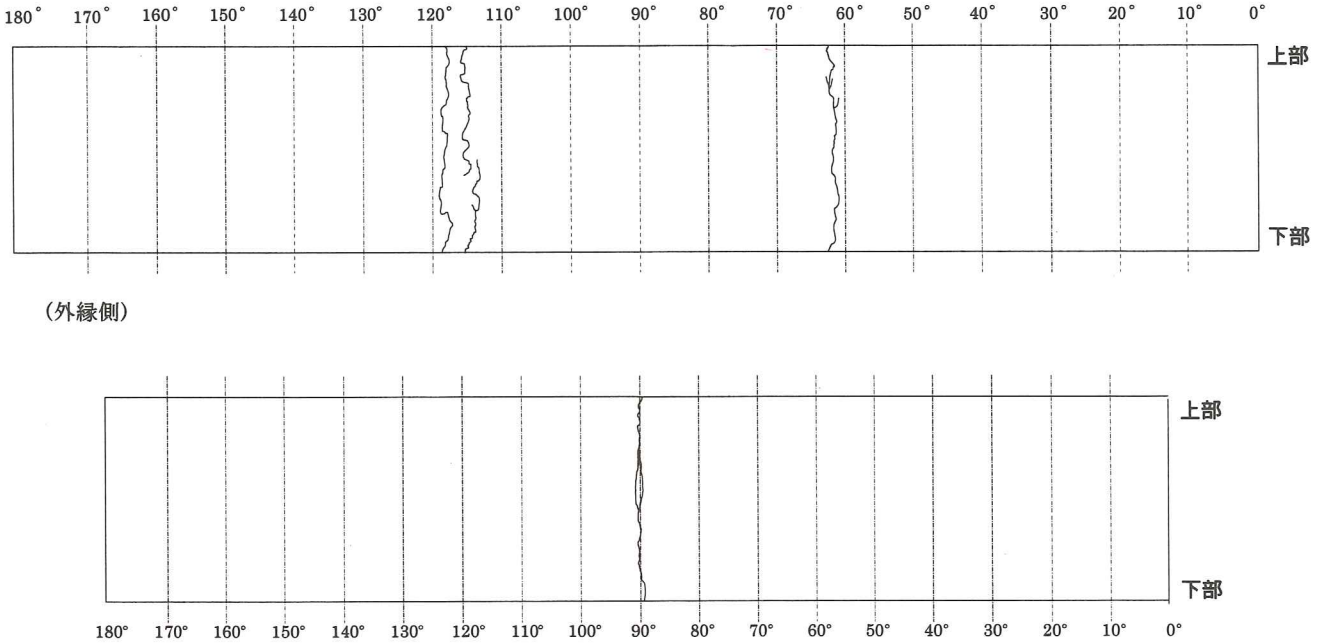


図-2.25(c)　　ひび割れ図　(ケースB-4　変位制御の天端変位＝8.5㎜時)

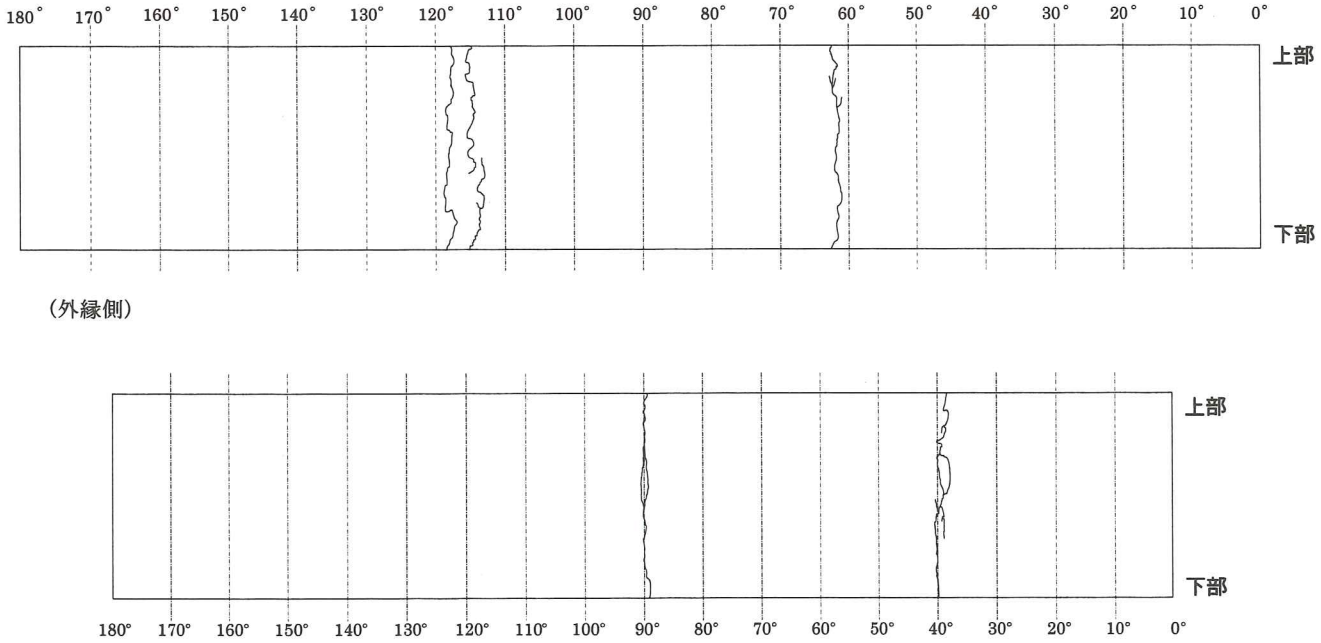
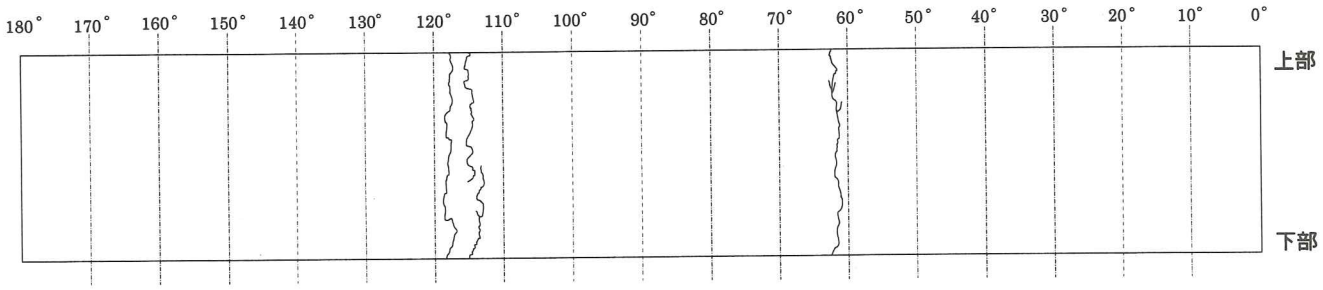
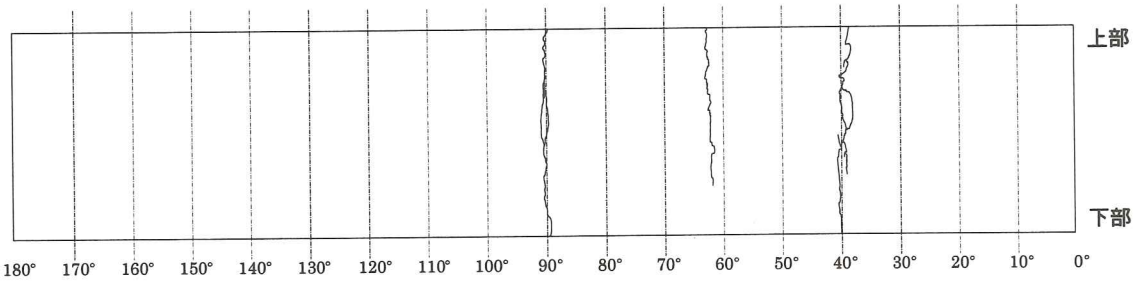


図-2.25(d)　　ひび割れ図　(ケースB-4　変位制御の天端変位＝9.5㎜時)



（外縁側）



（内縁側）

図-2.25(e)　　ひび割れ図　（ケースB-4　変位制御の天端変位＝20.0㎜時）

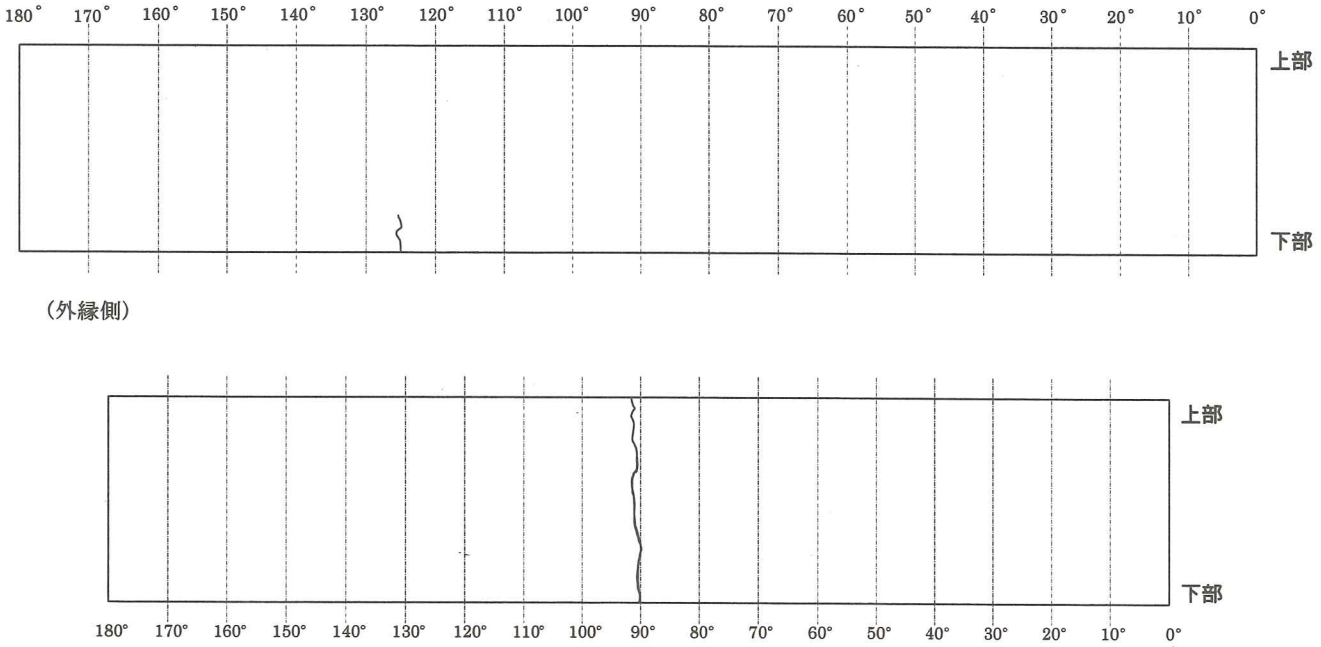


図-2.26(a)　　ひび割れ図　(ケースB'-1　変位制御の天端変位＝2.0㎜時)

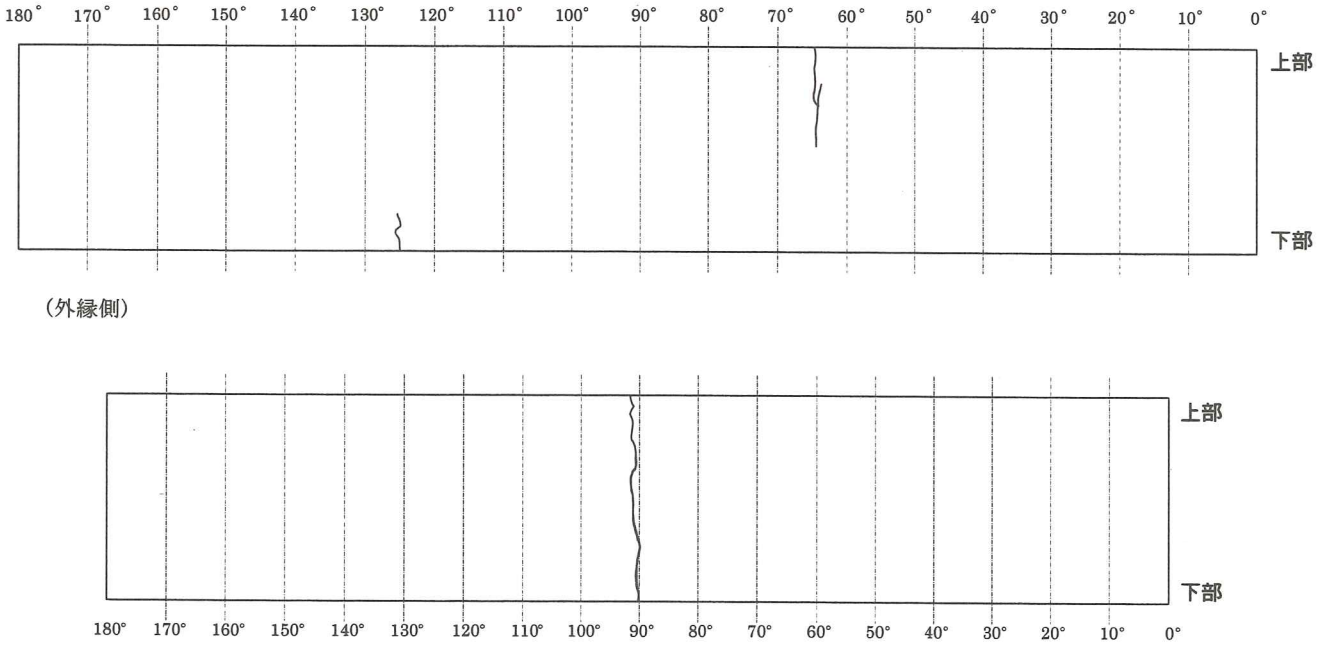
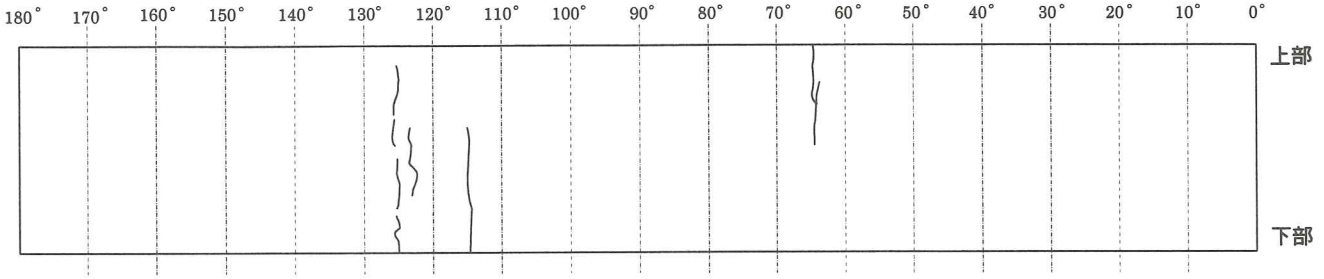
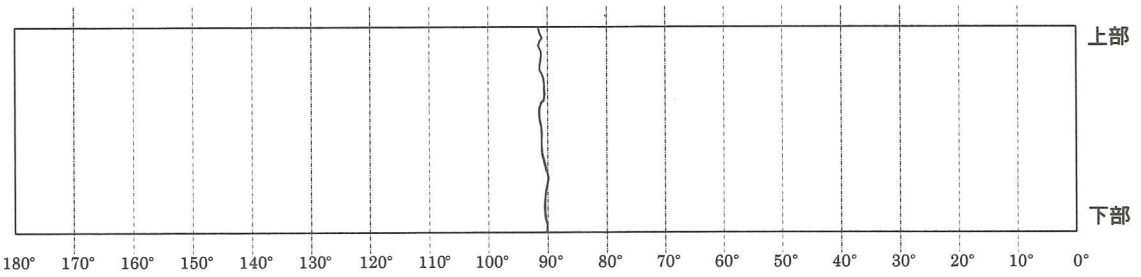


図-2.26(b)　　ひび割れ図　(ケースB'-1　変位制御の天端変位＝4.0㎜時)

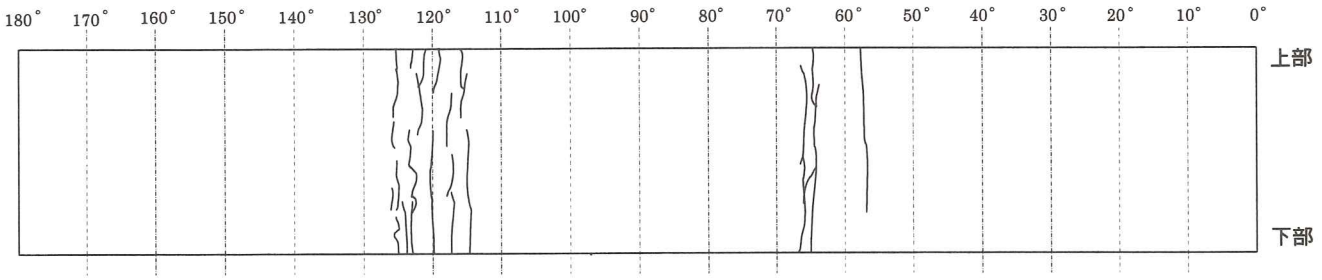


（外縁側）

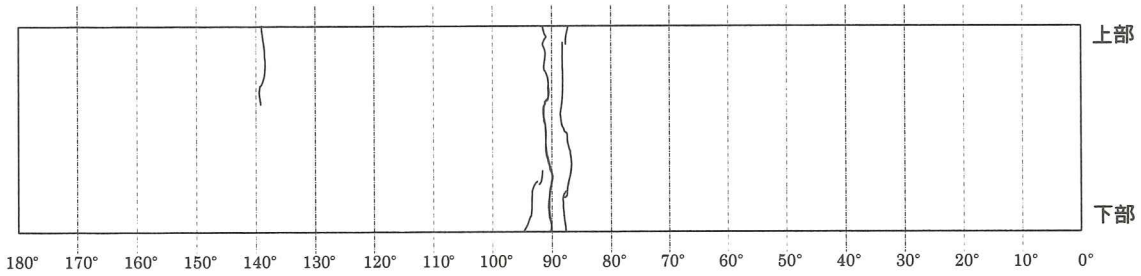


（内縁側）

図-2.26(c)　　ひび割れ図　（ケースB'-1　変位制御の天端変位＝6.0㎜時）



（外縁側）



（内縁側）

図-2.26(d)　　ひび割れ図　（ケースB'-1　変位制御の天端変位＝8.0㎜時）

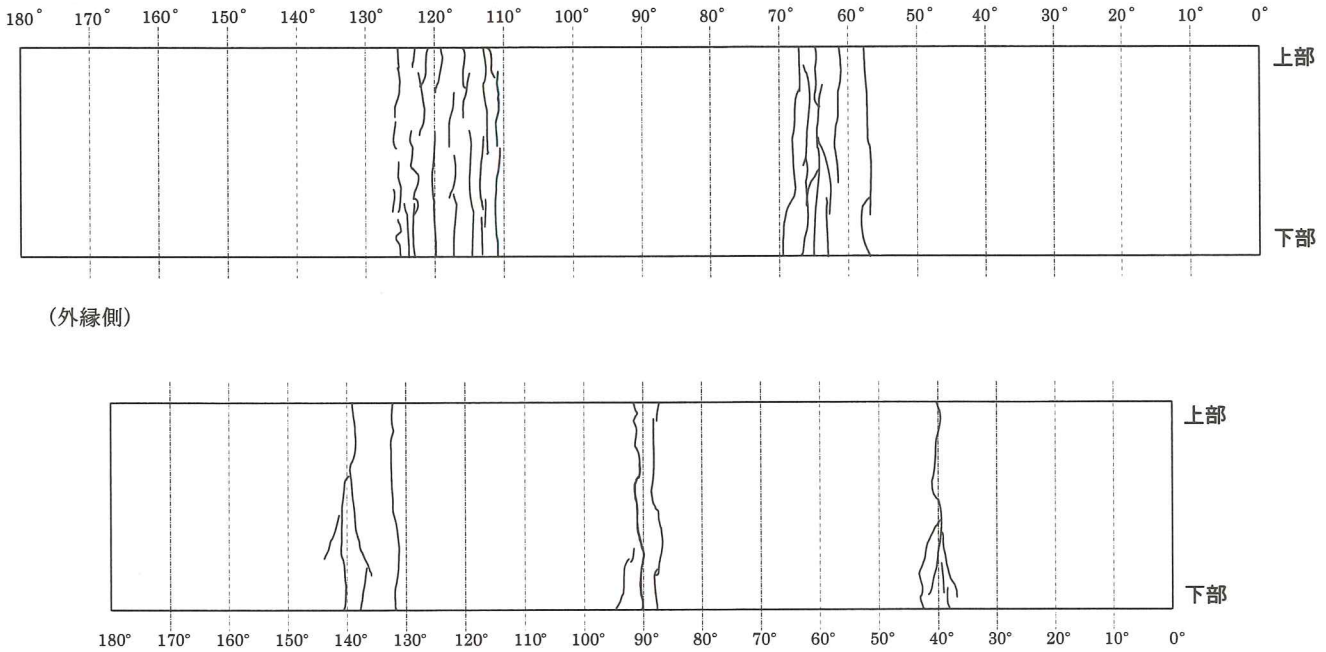


図-2.26(e)　　ひび割れ図　(ケースB'-1　変位制御の天端変位＝11.5㎜時)

表-2.15　ひび割れ発生荷重とひび割れの状況　(載荷形式B)

(a)　ケースB-1

ケース	90度内縁変位 (mm) (ストローク計(高さ50cm)測定値)	90度荷重 (kN/本) (ロードセル測定値)	制御変位値 (mm) (載荷装置による制御値)	荷重値 (kN/本) (載荷装置による読み値)	特記事項	ひび割れ状況(ひび割れ位置：ひび割れ部位：ひび割れ幅(mm)) 内縁側	外縁側(右側)	外縁側(左側)
B-1	1.44	52.6	0.5	51.5		(90度のひび割れ発生直前)		
	1.74	47.0	0.6	41.9		90度：上～下：目視初確認：上部0.15，中央0.08，下部0.06		
	2.16	50.1	1.0	49.1		90度：上～下：上部0.35，中央0.30，下部0.30		
	2.52	52.8	1.4	51.1		90度：上～下：上部0.45，中央0.40，下部0.40		
	2.70	54.6	1.7	53.5			(65度のひび割れ発生直前)	
	3.04	41.7	1.8	40.9		90度：上～下：上部0.80，中央0.60，下部0.65	65度：上～下：目視初確認	
	3.56	45.2	2.5	44.3		90度：上～下：上部0.90，中央0.90，下部0.85		
	4.74	51.3	3.6	50.3		90度：上～下：上部4.0，中央3.5，下部4.0	40度：上～下：目視初確認	

(b)　ケースB-2

ケース	90度内縁変位 (mm) (ストローク計(高さ50cm)測定値)	90度荷重 (kN/本) (ロードセル測定値)	制御変位値 (mm) (載荷装置による制御値)	荷重値 (kN/本) (載荷装置による読み値)	特記事項	ひび割れ状況(ひび割れ位置：ひび割れ部位：ひび割れ幅(mm)) 内縁側	外縁側(右側)	外縁側(左側)
B-2	3.83	55.8	0.5	57.0		90度：目視初確認		
	6.06	86.1	2.4	83.4		90度：上～下：上部0.35，中央0.40，下部0.15		
	6.50	90.2	2.8	87.9		90度：上～下：上部0.45，中央0.45，下部0.20		
	8.60	104.8	4.5	99.6		90度：上～下：上部0.55，中央0.60，下部0.25		115度：上～下：目視初確認
	10.56	117.7	6.5	113.8		90度：上～下：上部1.4，中央1.0，下部0.55	65度：上～下：0.2	115度：上～下：0.1～0.15
	12.62	129.5	8.5	126.9		90度：上～下：上部2.0，中央1.4，下部0.55	60度：上～下：0.06 65度：上～下：0.35	115度：上～下：0.2～0.25 117.5度：上～下：0.1
	13.62	136.4	10.0	132.2		90度：上～下：上部3.1，中央1.5，下部1.5	65度：上～下：0.55	115度：上～下：0.3 117.5度：上～下：0.15
	15.83	146.6	12.0	144.7		90度：上～下：上部4.0，中央2.0，下部4.0	60度：上～下：0.08 65度：上～下：1.2 70度：上～下：0.08	115度：上～下：0.25～0.35 117.5度：上～下：0.45
	17.48	151.2	13.5	149.8		32.5度：上～下：上部0.08 90度：上～下：上部5.0，中央3.0，下部5.0 140度：上～下：上部0.15	65度：上～下：2.8 70度：上～下：0.10	115度：上～下：0.40～0.70
	19.43	151.4	15.0	155.8		90度：上～下：上部5.5，中央4.5，下部6.0	60度：上～下：0.1	
	22.00	146.2	17.0	150.8		40度：上～下：中央0.3		

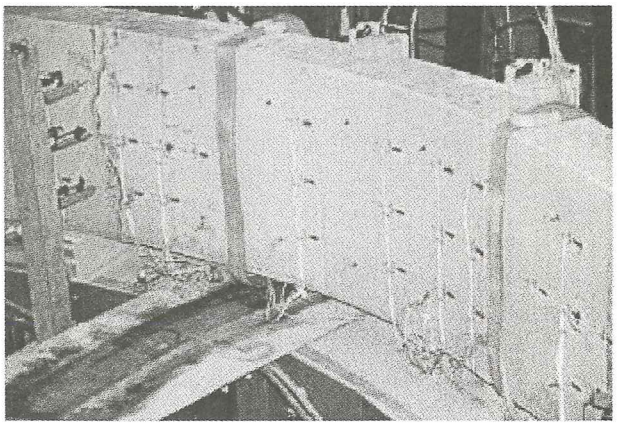


写真-2.12(a)　90 度付近内側(ケース B-2)

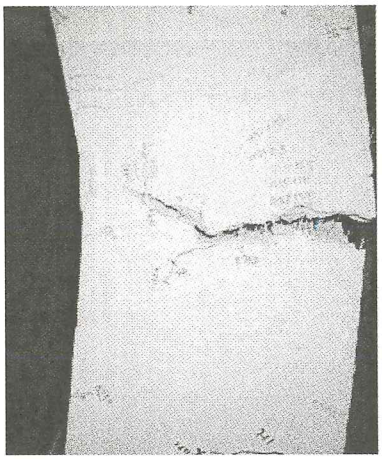


写真-2.12(b)　65 度付近上側(ケース B-2)

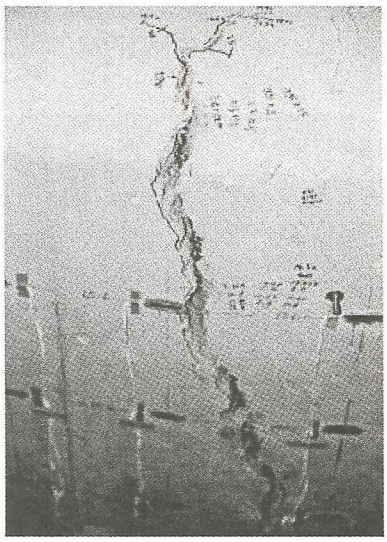


写真-2.12(c)　65 度付近上側～外側(ケース B-2)

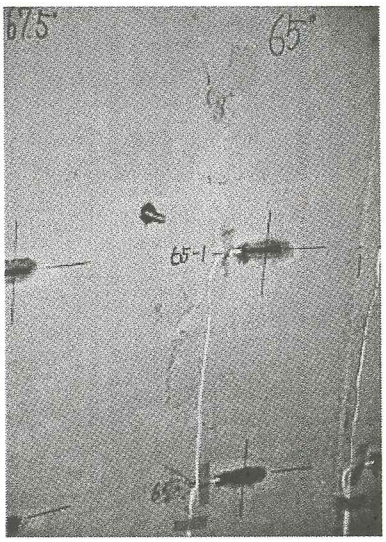


写真-2.12(d)　65 度付近内側(ケース B-2)

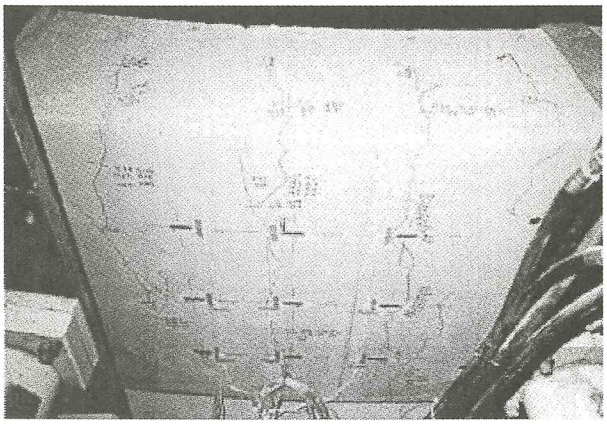


写真-2.12(e)　115 度付近上側～外側(ケース B-2)

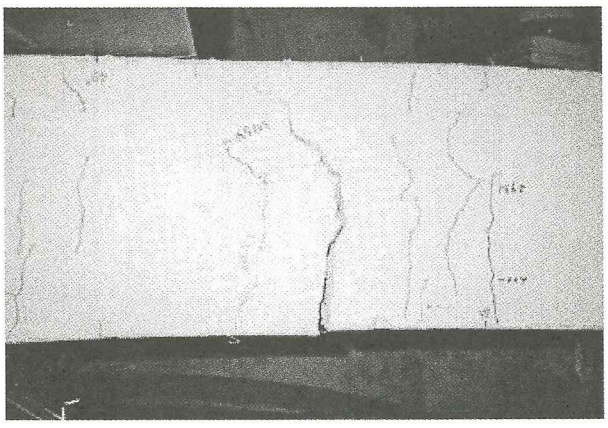


写真-2.12(f)　40 度付近外側(ケース B-2)

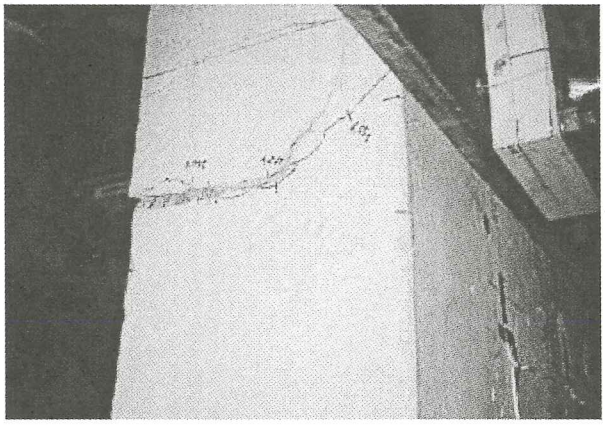


写真-2.13(a)　90 度付近上側～外側(ケース B-3)

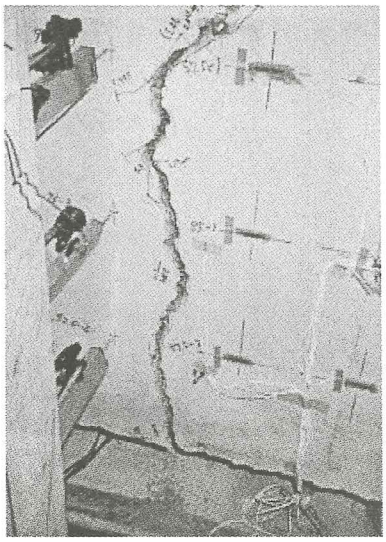


写真-2.13(b)　90 度付近内側(ケース B-3)

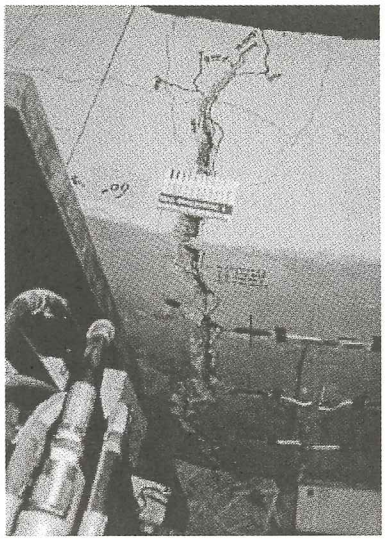


写真-2.13(c)　65 度付近上側～外側(ケース B-3)

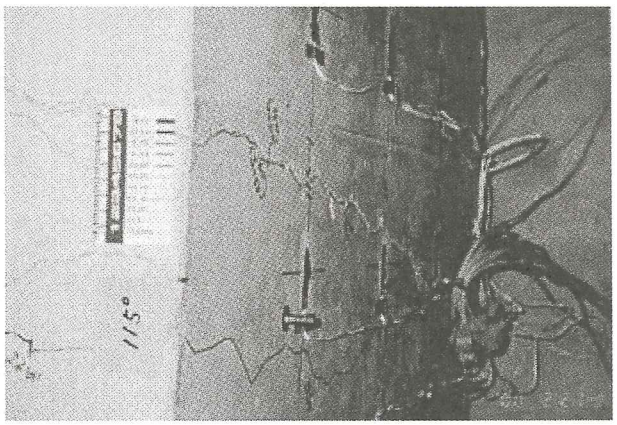


写真-2.13(d)　115 度付近内側(ケース B-3)

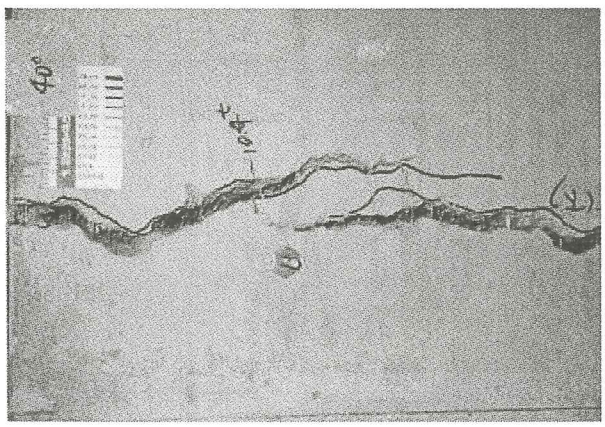


写真-2.13(e)　40 度付近内側(ケース B-3)

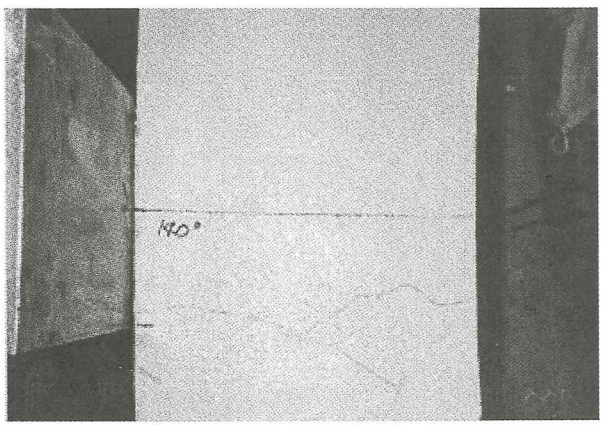


写真-2.13(f)　115 度付近内側(ケース B-3)

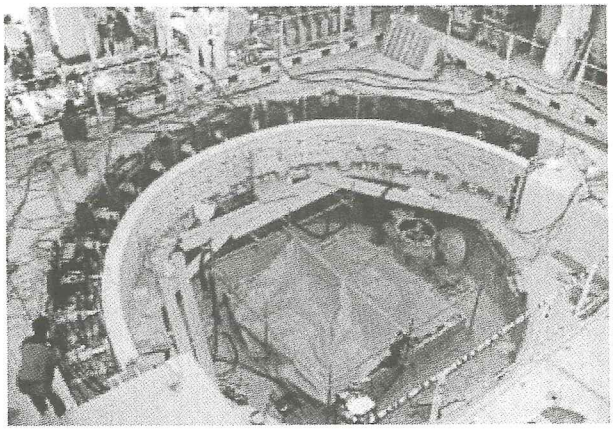


写真-2.14(a)　全体図(ケース B-4)

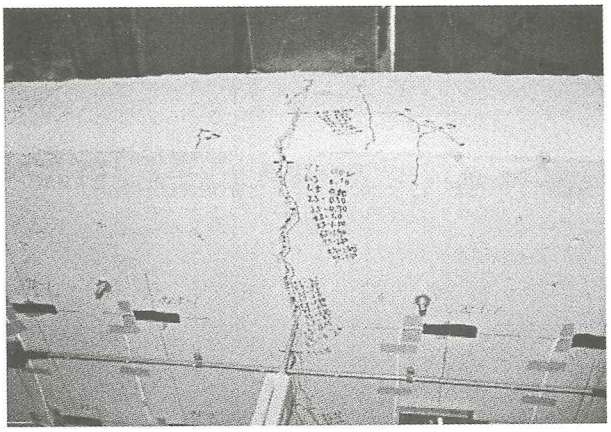


写真-2.14(b)　90 度付近内側～上側(ケース B-4)

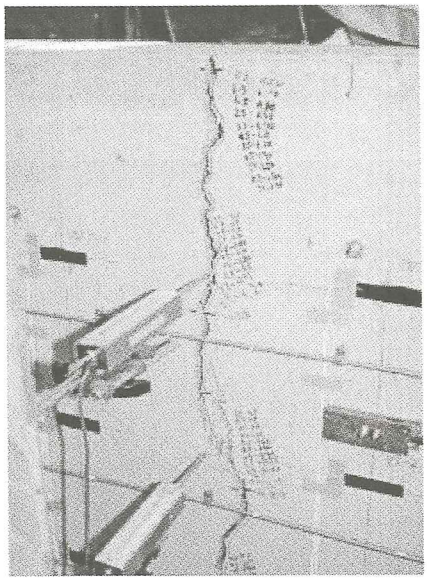


写真-2.14(c)　90 度付近内側(ケース B-4)

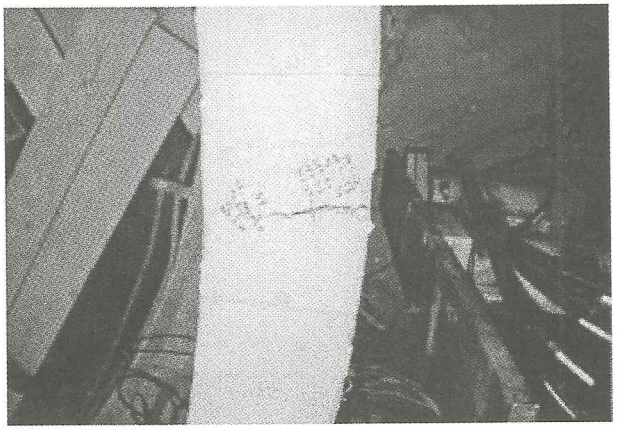


写真-2.14(d)　65 度付近上側(ケース B-4)

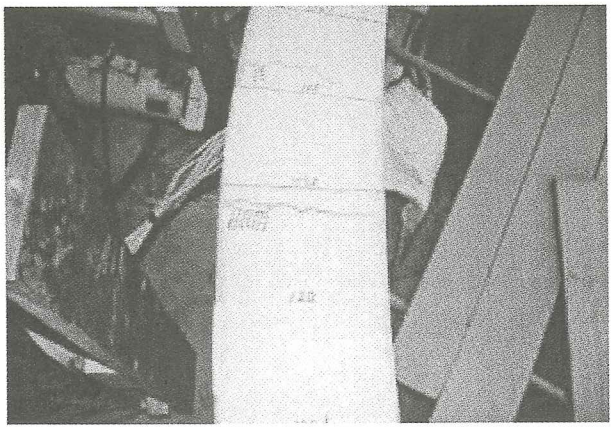


写真-2.14(e)　115 度付近内側(ケース B-4)

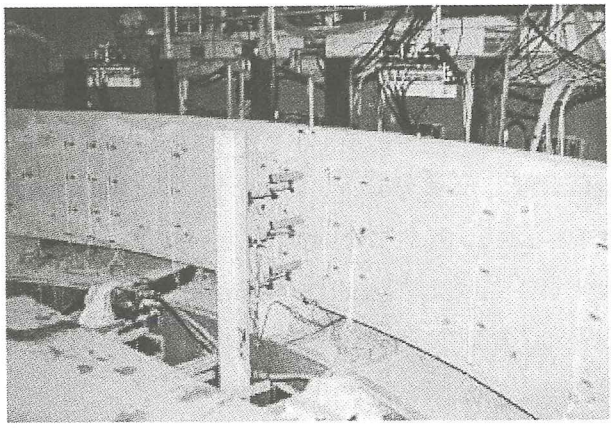


写真-2.15(a)　70～120 度付近内側(ケース B'-1)

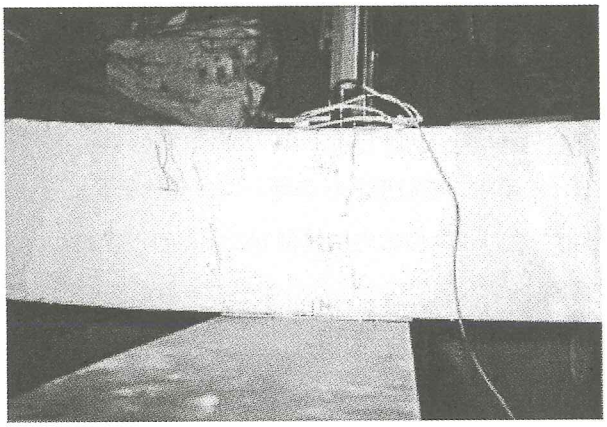


写真-2.15(b)　90 度付近上側～外側(ケース B'-1)

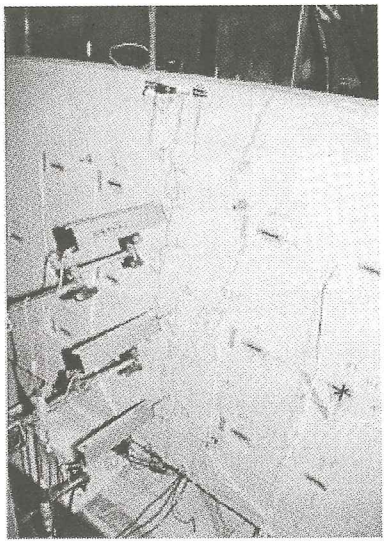


写真-2.15(c)　90 度付近内側(ケース B'-1)

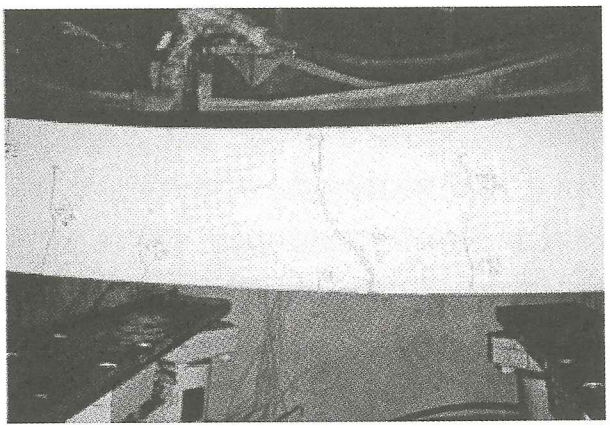


写真-2.15(d)　115 度付近上側(ケース B'-1)

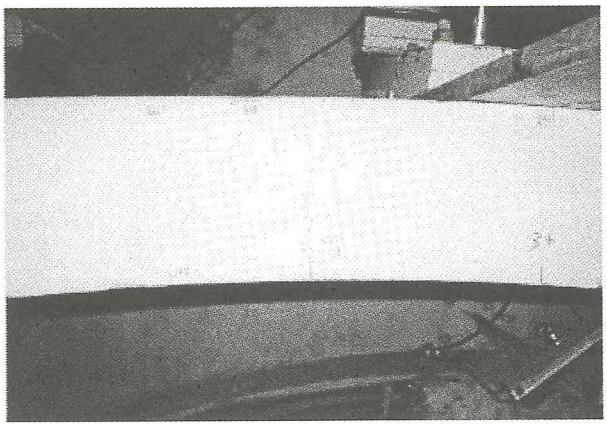


写真-2.15(e)　150 度付近内側(ケース B'-1)

(3) ひずみの変化

図-2.27 (a) ～ (f) に供試体の右側半分の代表的な地点、すなわち 5 度、35 度、45 度、65 度、75 度、87.5 度の荷重とひずみの関係を示す。また、左側半分については、実際にひび割れが生じやすいと想定される 92.5 度 (87.5 度の対称位置)、115 度 (65 度の対称位置)、135 度 (45 度の対称位置) についての荷重とひずみの関係を図-2.27 (g) ～ (i) に示す。載荷形式Ｂの場合は、実験結果より 90 度の内縁側付近、65 度および 115 度の外縁側付近、そして 40 度および 140 度の内縁側付近の順にひび割れが発生したと考えられる。図-2.27 (f) より 87.5 度付近では内縁側で引張ひずみが生じていた。引張ひずみの値としては若干小さいが、これは実際にひび割れが生じたのが 90 度付近であり、位置が若干ずれているためと考えられる。圧縮ひずみは、載荷可能な最大荷重に達した後、そのまま同一の傾きでひずみ値が 0 に向かった。次に、図-2.27 (d) より 65 度付近では外縁側で引張ひずみが発生し、引張ひずみの値自体は引張ひずみの限界 (概ね 100～200 μ) を超えた。また、62.5 度、65 度および 67.5 度の内縁側の圧縮ひずみを図-2.27 (j) ～ (l) に示す。載荷形式Ｂでは 62.5～70 度の外縁側に第 2 ひび割れが発生していることから、内縁側の圧縮ひずみについても、局部的にその影響を受けていると考えられ、圧縮ひずみが大きくなっている場合もあると考えられる。実験の観察結果から併せて考えると圧縮による破壊は発生していないと考えられる。

次に第 3 ひび割れの発生した 40 度近傍の値として、35 度と 45 度のひずみを考えた。これらのひずみの変化を図-2.27 (b) および図-2.27 (c) に示す。図-2.27 (b) より 35 度では載荷可能な最大荷重付近では外縁側で圧縮状態、内縁側では引張状態となっていた。図-2.27 (m) に 35 度での内縁側のひずみ変化の拡大図を示す。これより内縁側においても軸力導入時から第 2 ひび割れ発生時程度までは圧縮ひずみが生じていたにもかかわらず、第 2 ひび割れ発生後は内縁側のひずみが正の方向、すなわち引張ひずみを発生する側に転じたことが分かる。それによりこの近傍では第 3 ひび割れが内縁側に生じ、最終的に構造物が不安定状態に達し、載荷可能な最大荷重に達することになったと考えられる。このことは、ひび割れがある断面に発生し、それによって構造系の変化が生じた状況下で、別のある断面のひずみの傾向が変化することで引張ひずみを生じることがある現象も発生しうると考えられるが、定性的に判断するためには載荷条件や地山条件の影響も大きいと考えられることからさらに検討を要する。また、図-2.27 (n) に 45 度の内縁側のひずみ変化の拡大図を示す。これより 45 度においては明らかに圧縮ひずみとなっていたが、構造系の変化に伴い、第 2 ひび割れが発生した以降でひずみの発生傾向が変化し、内縁側で引張状態になるモードに変化したと考えられる。

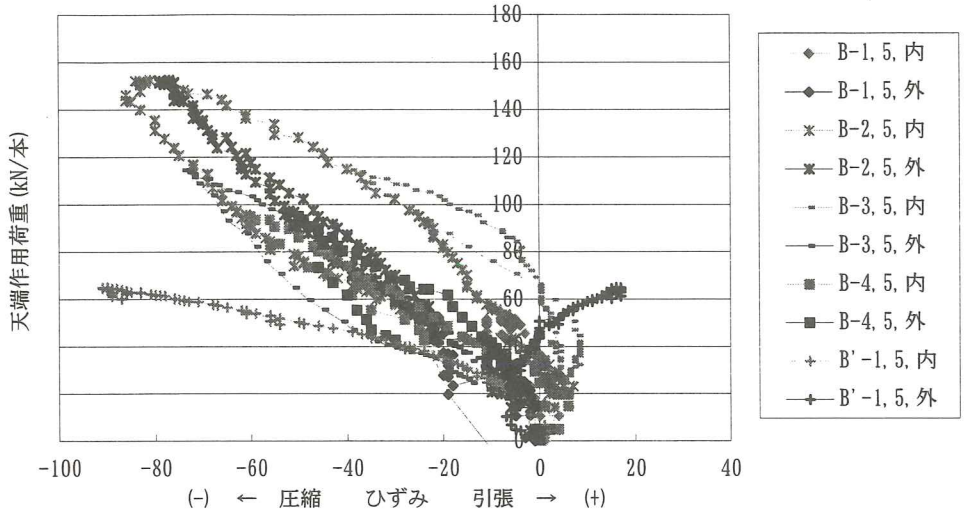


図-2.27(a) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 5度, 高さ50cm)

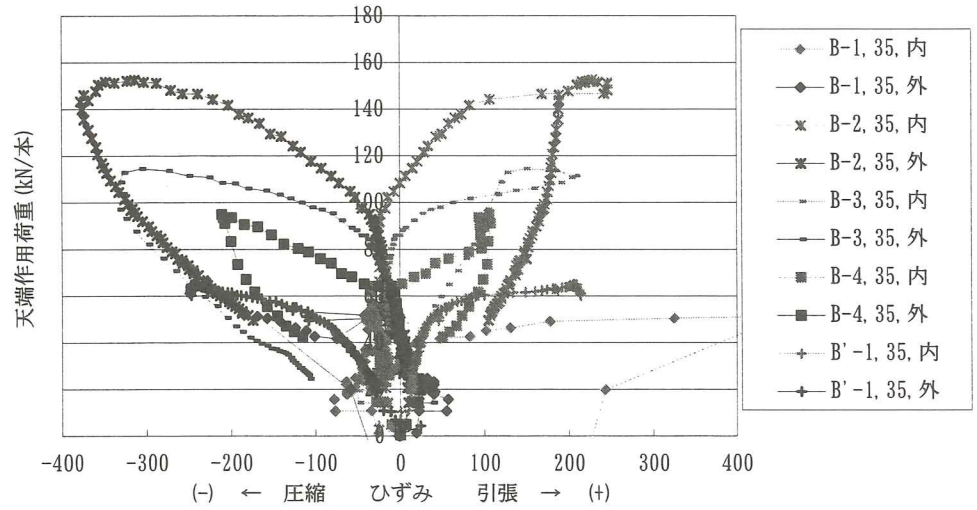


図-2.27(b) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 35度, 高さ50cm)

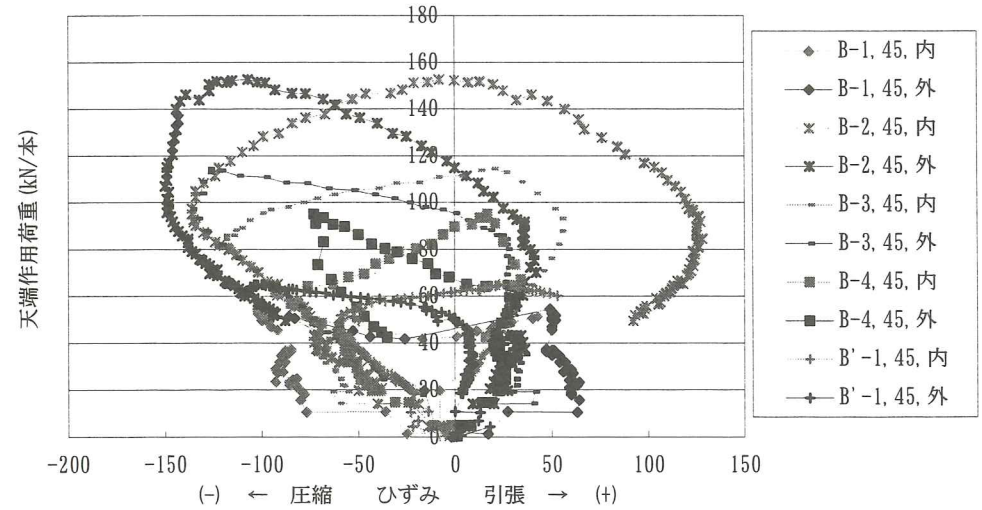


図-2.27(c) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 45度, 高さ50cm)

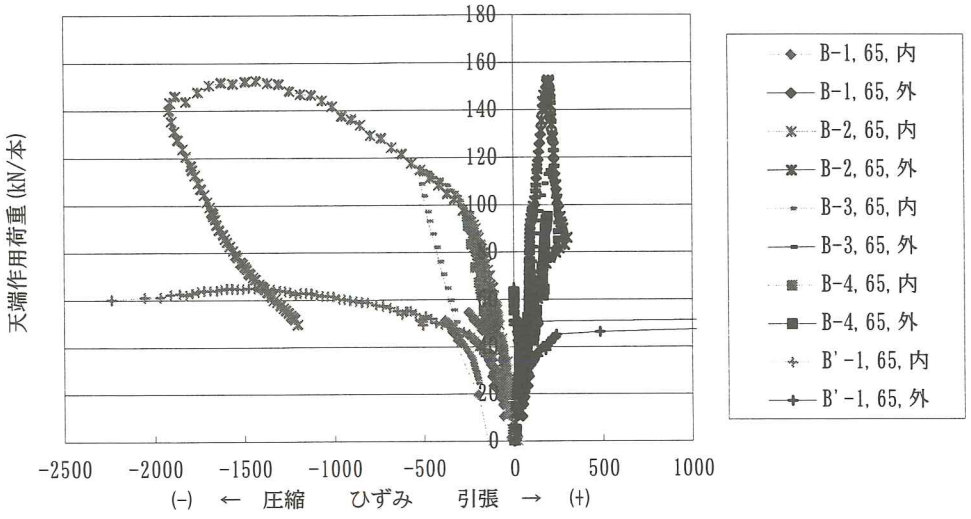


図-2.27 (d) 荷重-ひずみ曲線 (載荷形式B, 65度, 高さ50cm)

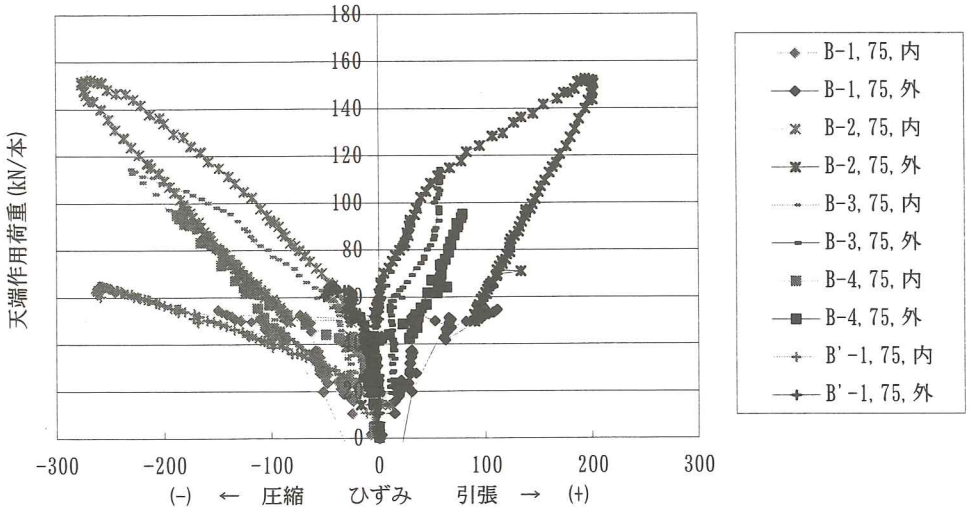


図-2.27 (e) 荷重-ひずみ曲線 (載荷形式B, 75度, 高さ50cm)

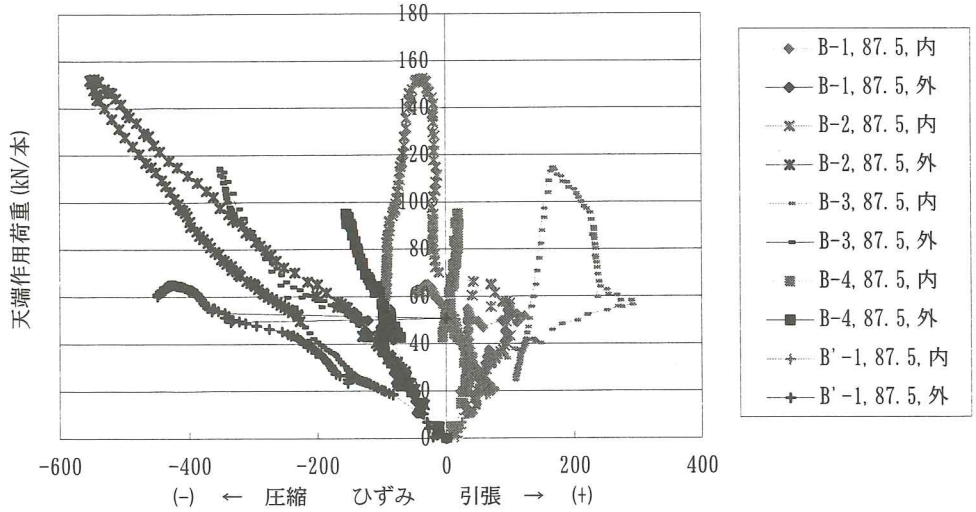


図-2.27 (f) 荷重-ひずみ曲線 (載荷形式B, 87.5度, 高さ50cm)

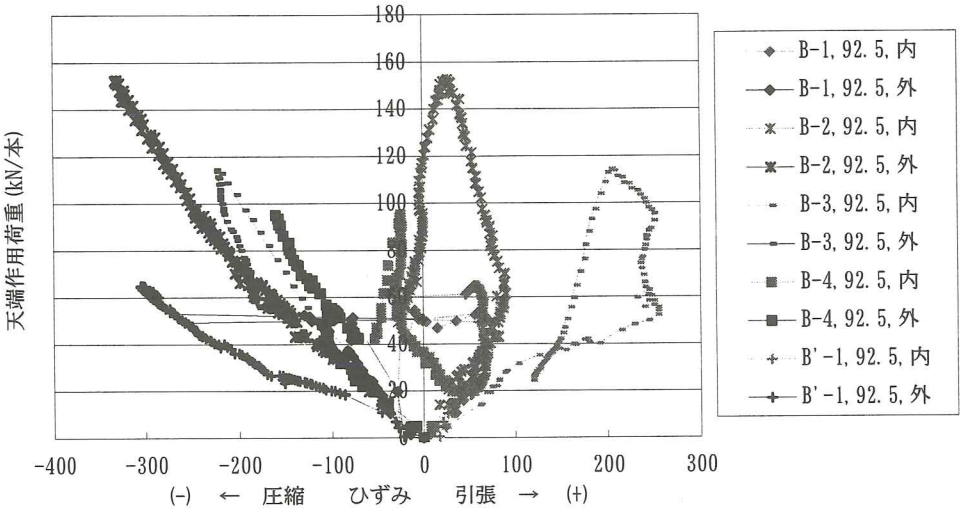


図-2.27(g) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 92.5度, 高さ50cm)

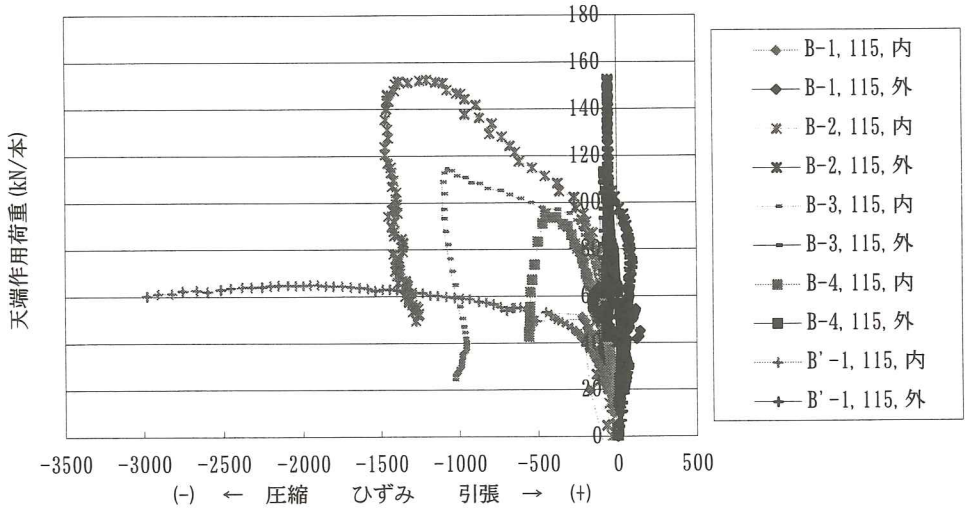


図-2.27(h) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 115度, 高さ50cm)

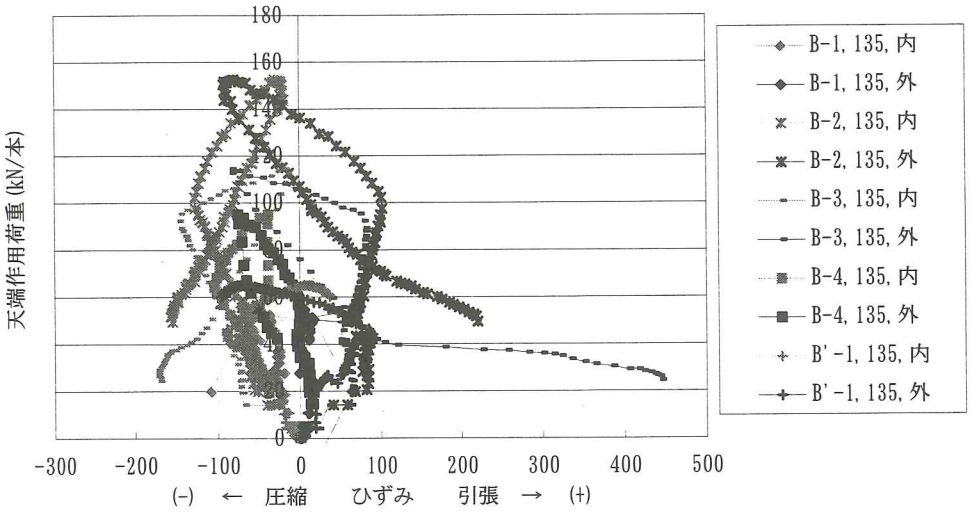


図-2.27(i) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 135度, 高さ50cm)

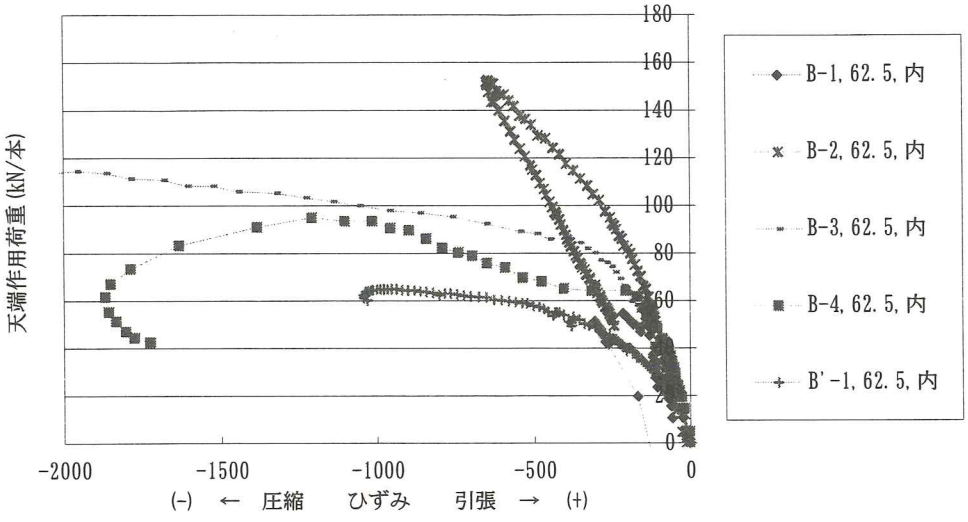


図-2.27(j) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 62.5度, 内縁側, 高さ50cm)

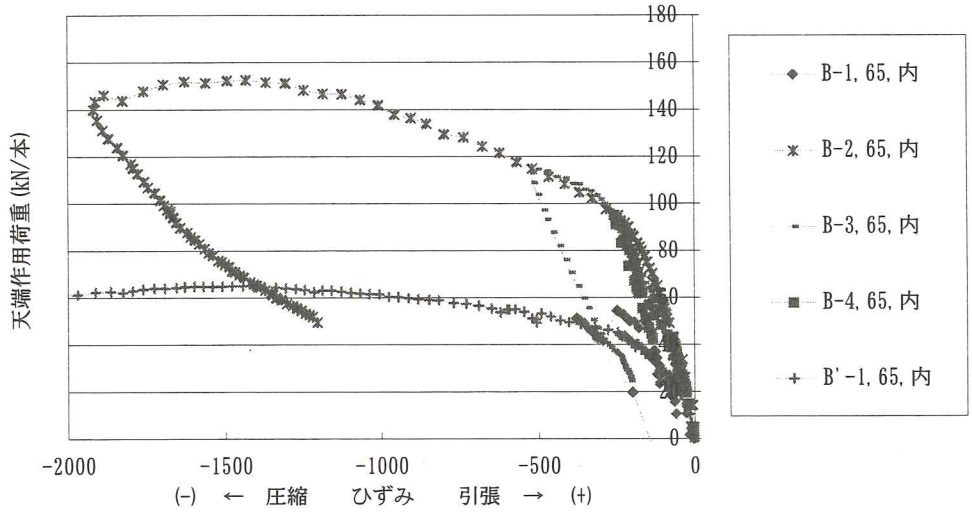


図-2.27(k) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 65度, 内縁側, 高さ50cm)

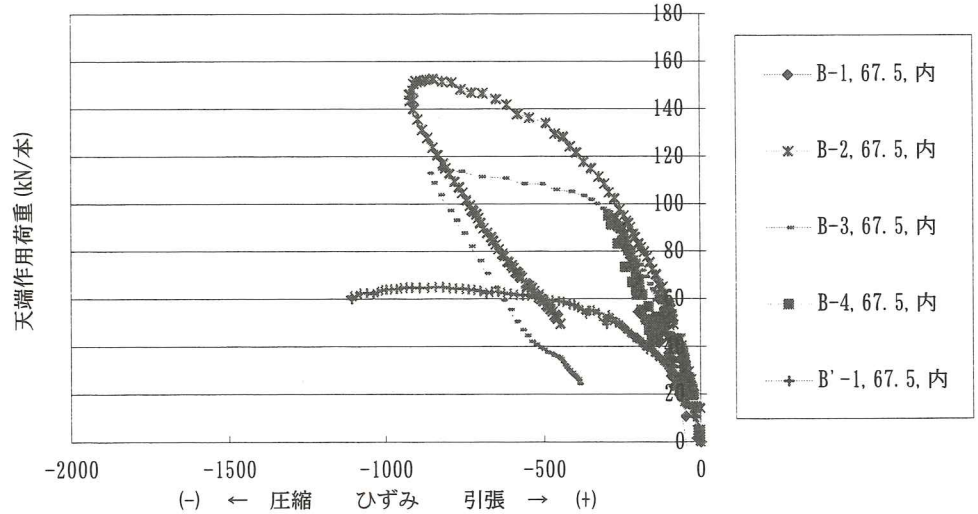


図-2.27(l) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 67.5度, 内縁側, 高さ50cm)

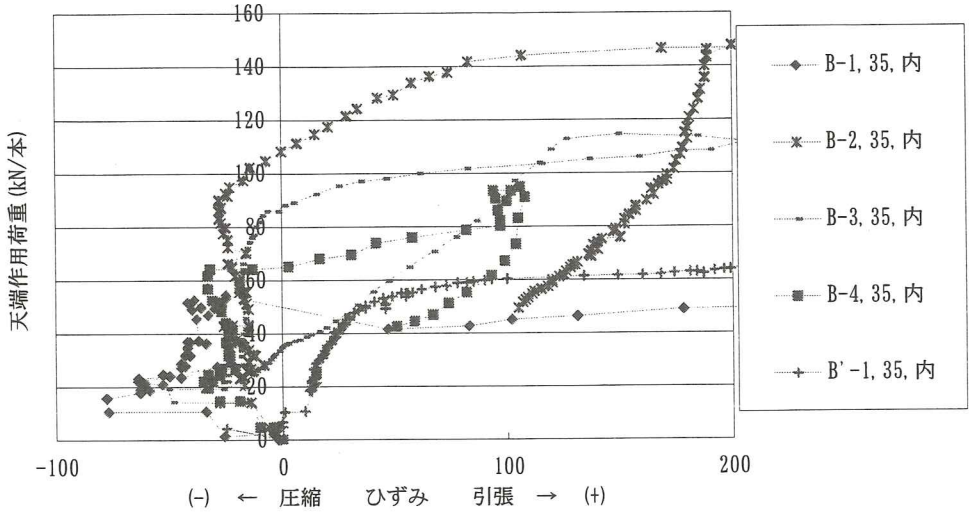


図-2.27(m) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 35度, 高さ50cm)

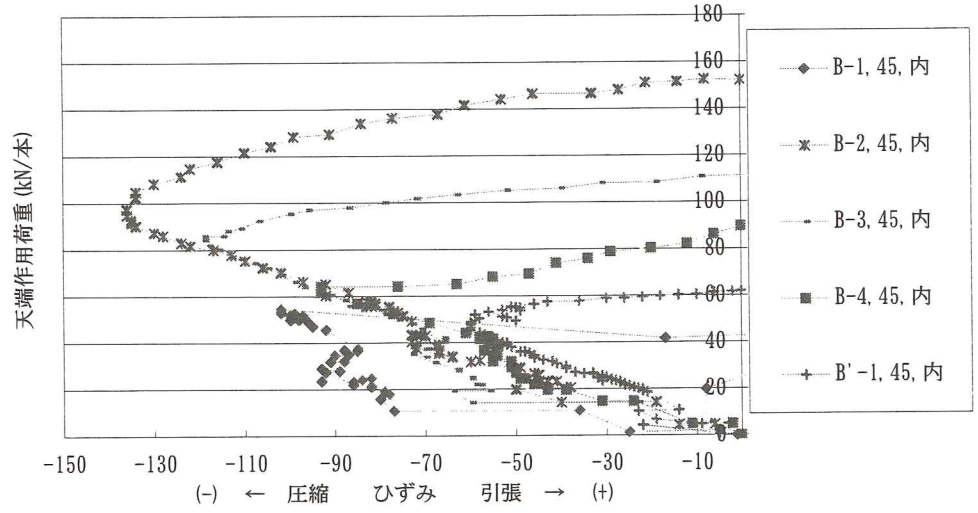


図-2.27(n) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式B, 45度, 高さ50cm)

(4) ジャッキ反力とジャッキストロークの関係

載荷形式Aの場合と同様にジャッキの反力とストロークの関係を測定した。図-2.28 (a) ～ (h) に 10 度、20 度、30 度、40 度、140 度、150 度、160 度および 170 度のジャッキ反力とジャッキストロークの関係を示す。40 度および 140 度以外の 6 断面では、軸力導入時やひび割れ発生時にジャッキが移動することが多く、また、天端より載荷を継続している段階では荷重は上昇するが、ストロークや反力の値は小さい結果が得られた。また、載荷の開始時点でストロークが負、すなわちジャッキが伸びる挙動を示したものがあるが、これは軸力導入の過程で位置によって伸びるジャッキがあるためと考えられる。

表-2.16 (a) ～ (e) に載荷形式Bの各ケースにおける反力係数の算定結果を示す。なお、表中の－印はジャッキが伸びた場合や、ジャッキのストローク移動がなかったことにより反力係数の算定が不可能であった部分である。

表-2.16 (a)　油圧ジャッキの反力係数 (MN/m) ～ケース B-1～

荷重 (kN) / 位置 (度)	37～53 (ひび割れなし)	47～55 (第 1 ひび割れ)	42～51 (第 1～2 ひび割れ)
10	60.76	－	37.50
20	55.37	－	129.17
30	122.50	38.93	97.07
40	33.56	17.50	253.76
140	61.09	－	339.50
150	281.26	－	－
160	9.15	－	105.60
170	55.37	－	－

表-2.16 (b)　油圧ジャッキの反力係数 (MN/m) ～ケース B-2～

荷重 (kN) / 位置 (度)	40～56 (ひび割れなし)	56～118 (第 1 ひび割れ)	118～151 (第 1～2 ひび割れ)	151～152 (第 1～3 ひび割れ)	152～50 (荷重低下時)
10	－	27.17	3.43	－	2.99
20	－	10.26	－	3.50	6.14
30	－	－	7.13	－	－
40	－	20.31	42.53	24.77	36.16
140	－	25.48	30.52	－	36.72
150	－	23.20	－	7.35	－
160	－	10.73	－	－	25.97
170	7.25	18.02	－	2.94	328.30

表-2.16 (c)　油圧ジャッキの反力係数 (MN/m) ～ケース B-3～

荷重 (kN) / 位置 (度)	40～55 (ひび割れなし)	55～63 (第 1 ひび割れ)	63～111 (第 1～2 ひび割れ)	111～115 (第 1～3 ひび割れ)	115～25 (荷重低下時)
10	32.67	－	18.11	－	18.09
20	－	－	－	－	－
30	－	－	－	－	35.72
40	－	－	38.21	92.55	66.53
140	158.76	－	35.52	52.02	48.13
150	－	－	116.23	－	184.98
160	－	－	－	－	－
170	－	－	－	－	－

表-2. 16 (d)　油圧ジャッキの反力係数 (MN/m) ～ケース B-4～

荷重 (kN) / 位置 (度)	45～72 (第 1 ひび割れ)	70～98 (第 1～2 ひび割れ)	99～15 (荷重低下時)
10	119. 22	79. 81	－
20	53. 08	588. 00	143. 94
30	30. 44	113. 66	105. 67
40	23. 50	31. 10	60. 24
140	30. 36	25. 97	－
150	－	－	－
160	19. 93	1. 02	－
170	140. 40	－	－

表-2. 16 (e)　油圧ジャッキの反力係数 (MN/m) ～ケース B'-1～

荷重 (kN) / 位置 (度)	19～27 (ひび割れなし)	25～36 (第 1 ひび割れ)	36～60 (第 1～2 ひび割れ)	61～60 (荷重低下時)
10	－	49. 00	5. 97	－
20	－	－	－	－
30	－	－	－	－
40	245. 00	49. 89	32. 90	－
140	－	12. 60	5. 18	3. 63
150	－	200. 90	25. 39	－
160	－	－	－	－
170	107. 80	－	35. 93	－

表-2. 16 (a) ～ (e) より各油圧ジャッキで反力係数のばらつきが大きい結果が得られ、また荷重のレベルによっても大きく異なった。図-2. 28 に示したストロークの関係とあわせて考えると、反力係数が比較的同一の値として考えられる断面は 40 度と 140 度であると考えられる。

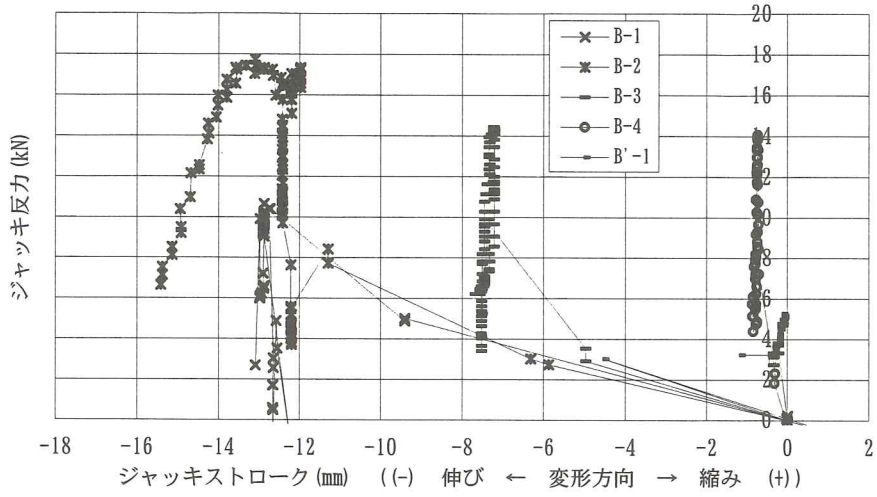


図-2.28(a)　ジャッキ反力ーストローク関係(載荷形式B，10度部)

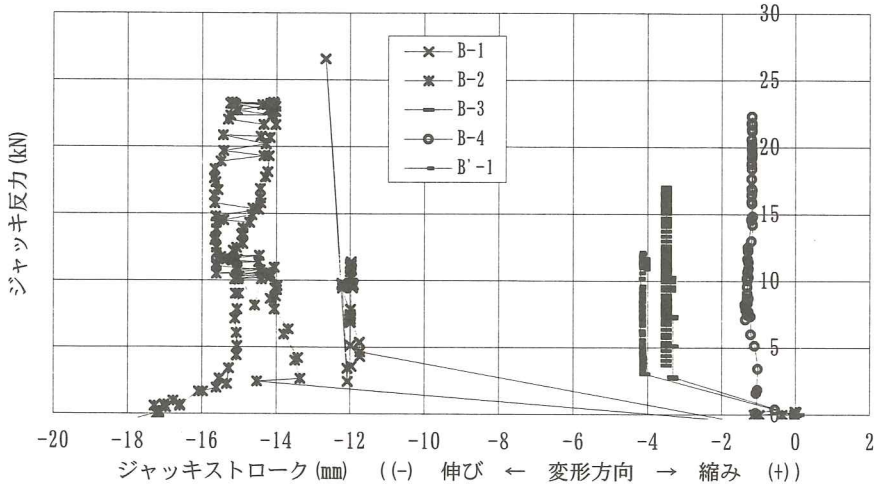


図-2.28(b)　ジャッキ反力ーストローク関係(載荷形式B，20度部)

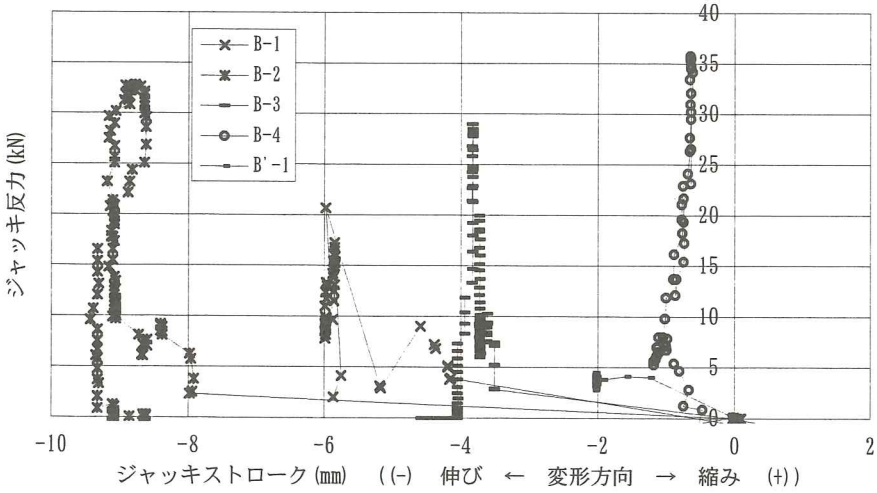


図-2.28(c)　ジャッキ反力ーストローク関係(載荷形式B，30度部)

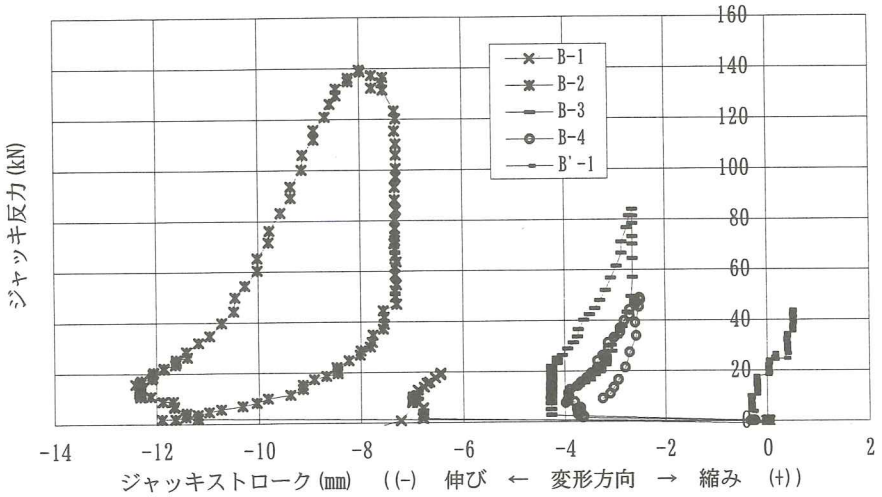


図-2.28(d)　ジャッキ反力ーストローク関係(載荷形式B，40度部)

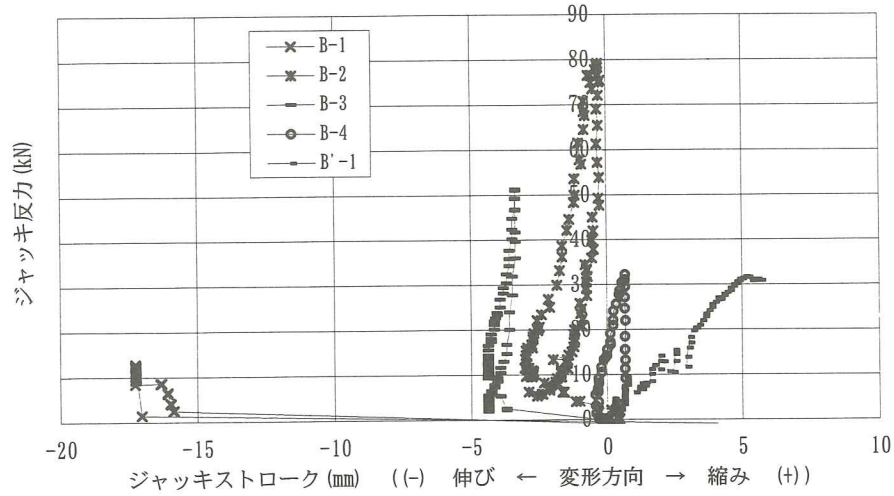


図-2.28(e)　ジャッキ反力ーストローク関係(載荷形式B，140度部)

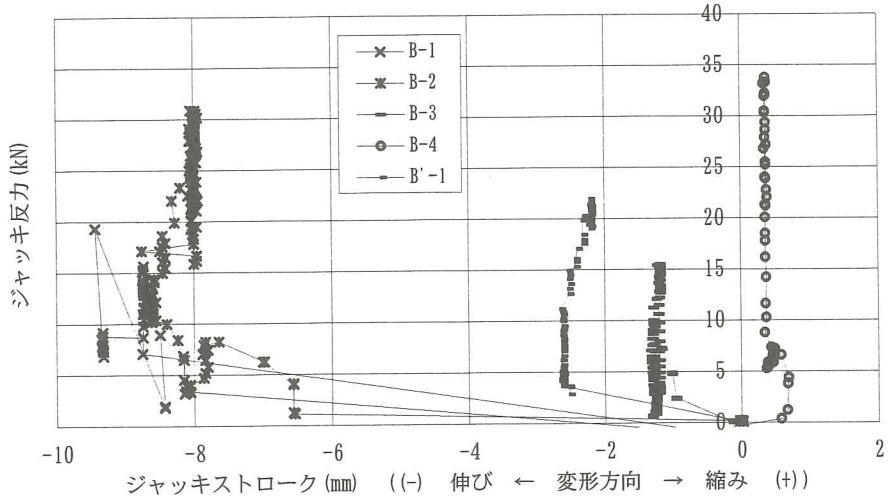


図-2.28(f)　ジャッキ反力ーストローク関係(載荷形式B，150度部)

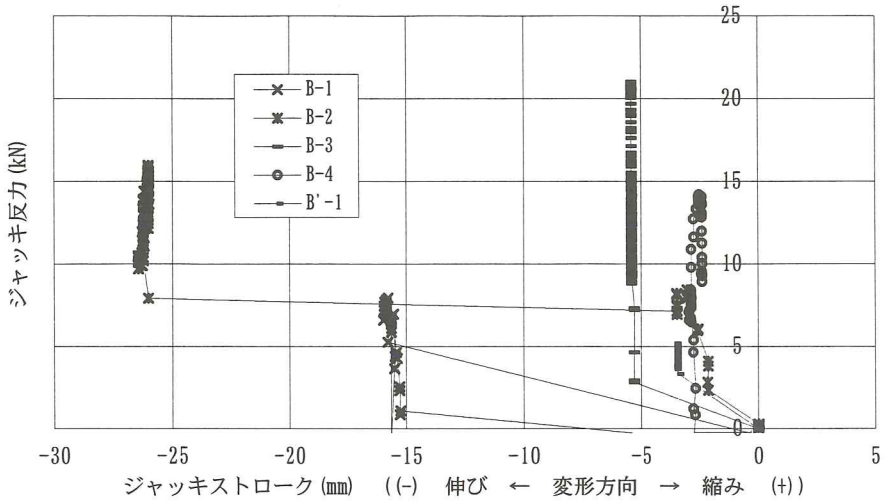


図-2.28(g)　ジャッキ反力－ストローク関係(載荷形式B，160度部)

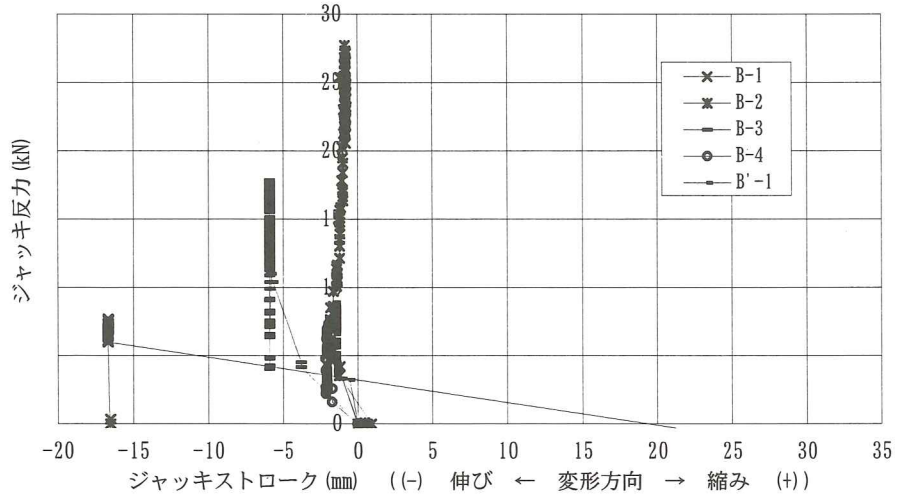


図-2.28(h)　ジャッキ反力－ストローク関係(載荷形式B，170度部)

(5) 断面力

図-2.29 (a) ～ (f) に天端変位が 2.0mm、4.0mm、6.0mm および 10.0mm、そして載荷荷重が最大になった場合および 50kN/本での曲げモーメント図を示す。なお、載荷荷重が 50kN/本の場合は載荷を開始してから初めて 50kN/本に達した場合の断面力である。また、図-2.30 (a) ～ (f) に同様の条件におけるでの軸力図を示す。ひび割れ深さが定量的に求めることが不可能であるため、式 (2.6) に示される関係で引張領域を仮定し、さらに引張応力の影響を無視して断面力を算定した。そのため、引張ひずみの値が真でないと考えられるひび割れが発生している断面近傍での値は参考程度の値として用いる必要がある。

鋼繊維による補強の影響を検討するために、ケース B-1 とケース B-2 を比較した。なお、ヤング係数はケース B-1 の方が 10%程度大きい値となっていた。図-2.29 (b) の曲げモーメント図より、肩部付近や脚部付近ではケース B-1 のほうがケース B-2 よりも大きく、天端付近ではケース B-1 のほうがケース B-2 よりも小さい値となった。また、図-2.30 (b) の軸力図より、軸力に関してはケース B-1 のほうがケース B-2 よりも大きい値となった。両ケース間の剛性の差と、ひび割れ発生に伴って引張ひずみの値の妥当性の判断が難しいことから、鋼繊維の補強効果による断面力へ与える影響の把握は困難であった。

次に、鋼繊維の繊維長による影響を検討するために、ケース B-2 とケース B-3 を比較した。図-2.29 (d) の曲げモーメント図より、ケース B-3 のほうがケース B-2 よりも曲げモーメントが大きく発生していると考えられる。また、図-2.30 (d) に示した軸力図を比較すると、両ケースにおける大きな差は見られなかった。

次に、繊維の種類の影響を検討するために、ケース B-2 とケース B-4 を比較した。図-2.29 (d) の曲げモーメント図より、ケース B-4 のほうがケース B-2 よりも肩部で曲げモーメントの値が若干大きく発生する傾向があった。また、図-2.30 (d) の軸力図を比較すると、これについても大きな差は見られなかった。

なお、薄肉化による影響については、軸力の導入の過程が異なっており、同一の変位を生じる場合の荷重が異なることから、単純な比較をすることは困難であった。

以上より、載荷形式Aの場合と同様で、断面力から鋼繊維の有無や用いた繊維の種類による影響を定量的に読みとることは困難であった。

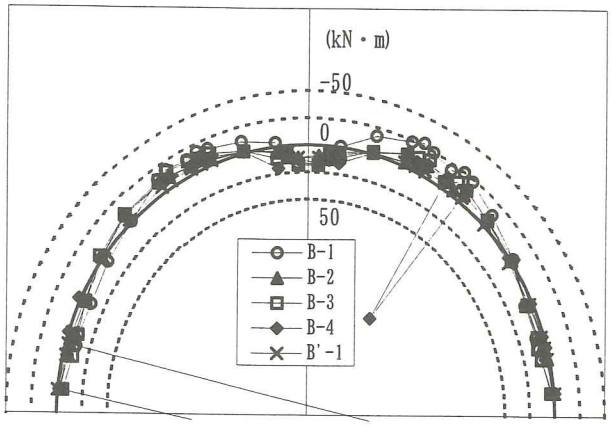


図-2.29(a)　曲げモーメント図(天端変位2.0mm)

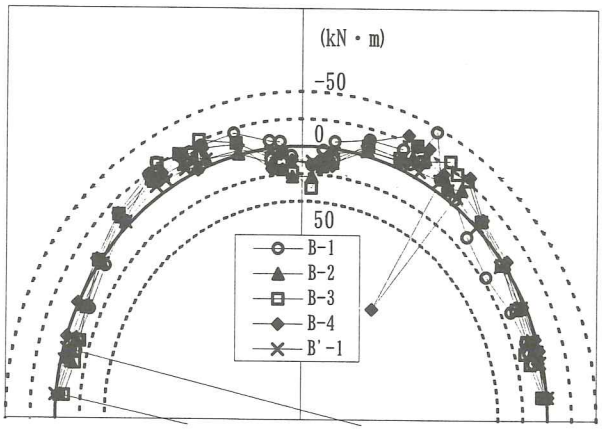


図-2.29(b)　曲げモーメント図(天端変位4.0mm)

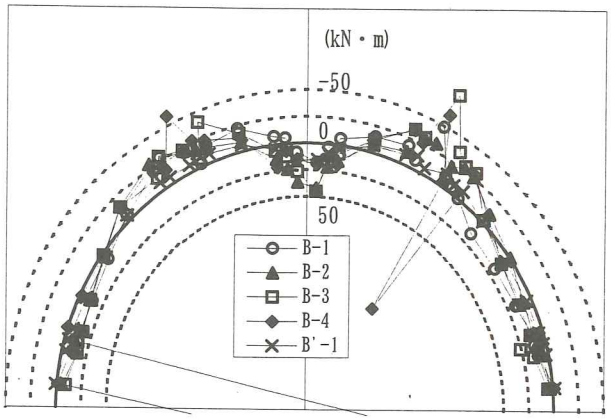


図-2.29(c)　曲げモーメント図(天端変位6.0mm)

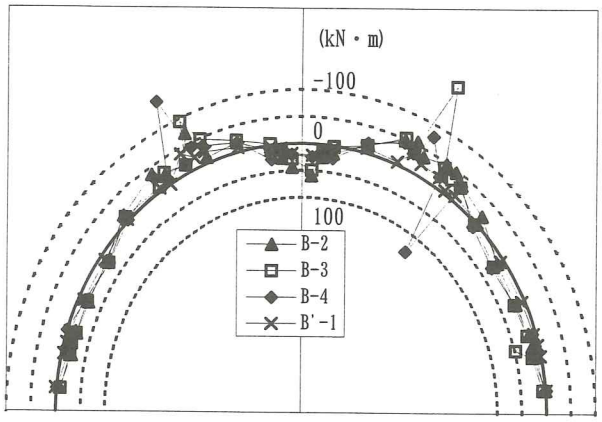


図-2.29(d)　曲げモーメント図(天端変位10.0mm)

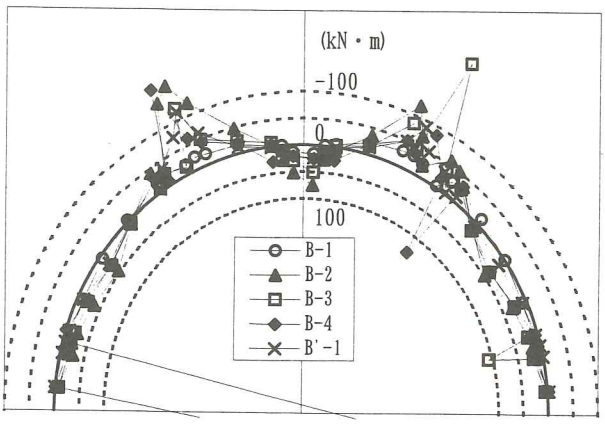


図-2.29(e)　曲げモーメント図(最大荷重時)

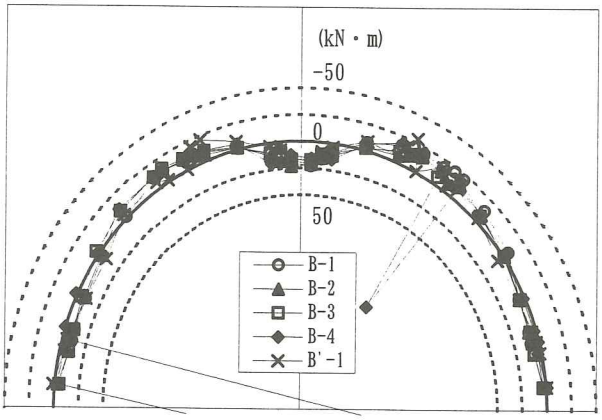


図-2.29(f)　曲げモーメント図
(載荷荷重50kN/本, ピーク前)

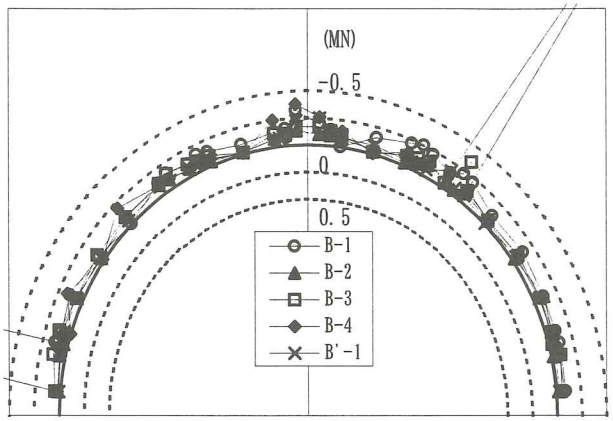


図-2.30(a)　軸力図(天端変位2.0mm)

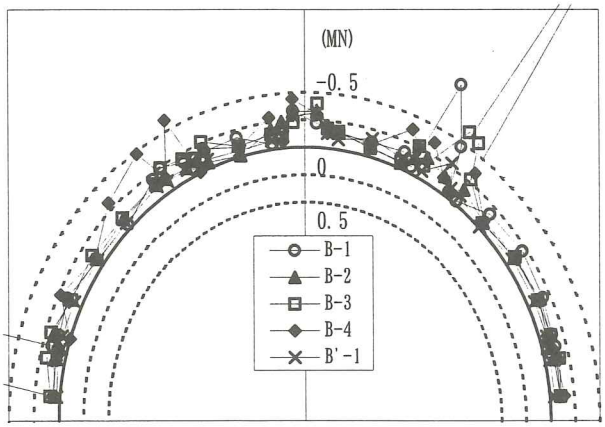


図-2.30(b)　軸力図(天端変位4.0mm)

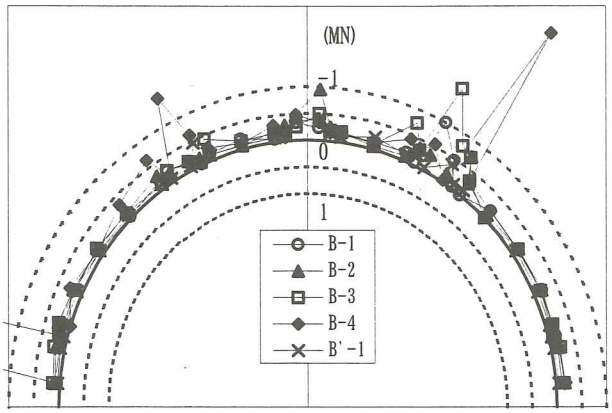


図-2.30(c)　軸力図(天端変位6.0mm)

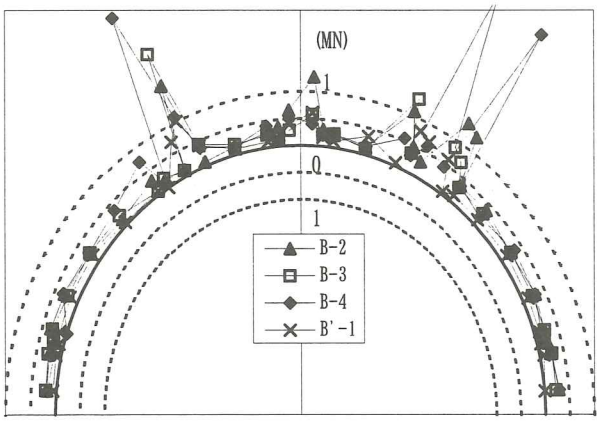


図-2.30(d)　軸力図(天端変位10.0mm)

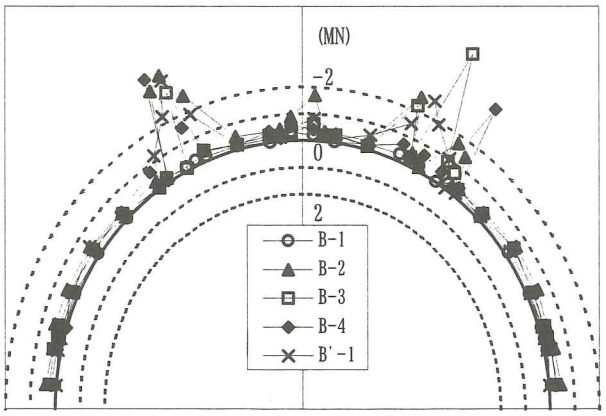


図-2.30(e)　軸力図(最大荷重時)

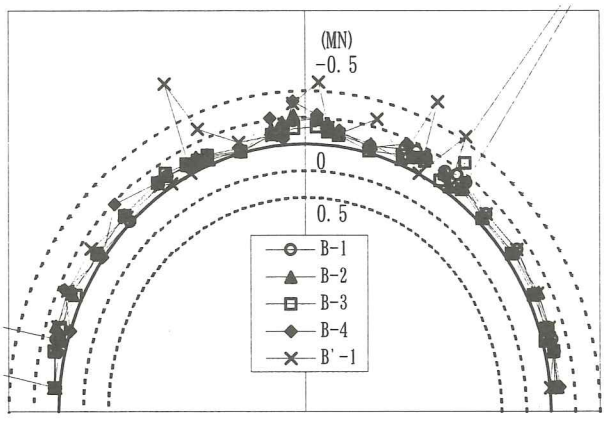


図-2.30(f)　軸力図(載荷荷重50kN/本, ピーク前)

2.4.4　載荷形式Cの結果

(1) 荷重と変位の関係

①天端

図-2.31(a)に天端部(90度)の内縁側の荷重変位曲線を示す。ケースC-1では290kN/本、ケースC-2では250kN/本で最終的に破壊に至った。両ケースで載荷の初期では天端の変位にばらつきが見られるものの、これは載荷の初期段階ではジャッキの押し出す速度や油圧値が全く同一とは必ずしもならないことから、ジャッキ間で若干荷重のアンバランスがあったためと考えられる。また、両ケースとも195～200kN/本の時に、破壊後に供試体が落下することの危険防止のためにナイロンスリングを供試体に取り付けるために、載荷をホールドしていたところ、その間に若干のクリープが生じることにより変位が横滑りする現象が見られた。

ケースC-1とケースC-2の両ケースの結果より荷重変位曲線に対する大きな差は見られなかった。また、最終的な破壊の荷重の差は、ケースC-1はケースC-2の1.16倍程度であった。表-2.12より一軸圧縮強度を比較すると、ケースC-1はケースC-2の1.13倍程度であったことから、全断面で圧縮となるような載荷条件では鋼繊維の混入による耐荷力への改善効果は小さいと考えられる。また、図-2.32(a)～(f)にケースC-1およびケースC-2で実際に供試体に作用した荷重を載荷断面毎に示す。縦軸は90度に作用する荷重をロードセルで計測した値であり、横軸はそれぞれグラフに示されている各点のロードセルで計測した値である。ケースC-1については各断面で概ね均等に荷重が作用していると考えることができる。ケースC-2については、各グラフにおいて天端の荷重が各点それぞれの荷重よりも高く、天端においては高い荷重で載荷された可能性があるもののその差はわずかであり、全断面で概ね同一の荷重で載荷したと見なすことが可能である。

②脚部

図-2.31(b)に0度および180度部分、すなわち脚部の荷重変位曲線を示す。これより、両ケースとも載荷の初期で荷重のアンバランスによるものと思われる供試体の移動、および195～200kN/本の時に、破壊後の供試体の落下防止措置時の荷重のホールド状態を除けば、脚部の変位はなかったものと考えられる。

③45度・135度部分

図-2.31(c)に45度部分および135度部分の水平方向の荷重変位曲線を示す。これについても、両ケースとも載荷の初期で荷重のアンバランスによるものと思われる供試体の移動、および195～200kN/本の時に、破壊後の供試体の落下防止措置時の荷重のホールド状態を除けば、全体的に挙動は概ね左右対称であったと考えられる。

(2) 破壊状況とひび割れ

載荷形式Cでは、載荷途中でひび割れの発生は観察されず、供試体の破壊を生じた。ケースC-1およびC-2における最終の破壊状況を写真-2.16～写真-2.17に示す。

破壊の状況について考えると、ケースC-1では写真-2.16(b)に示すように5度付近で生じ、供試体が崩れ落ちる様子が観察され、その際に供試体の高さ 50cm 程度に横方向のひび割れが発生した。また、ケース C-2 では写真-2.17(d)に示すように175度付近で生じた。供試体はケースC-1で見られたような塊として崩れ落ちることはなかったが、表面が剥がれ落ちる様子は観察された。破壊に伴うひび割れは170～180度付近で生じたものの、それ以外の部分についてひび割れや破壊は観察されなかった。

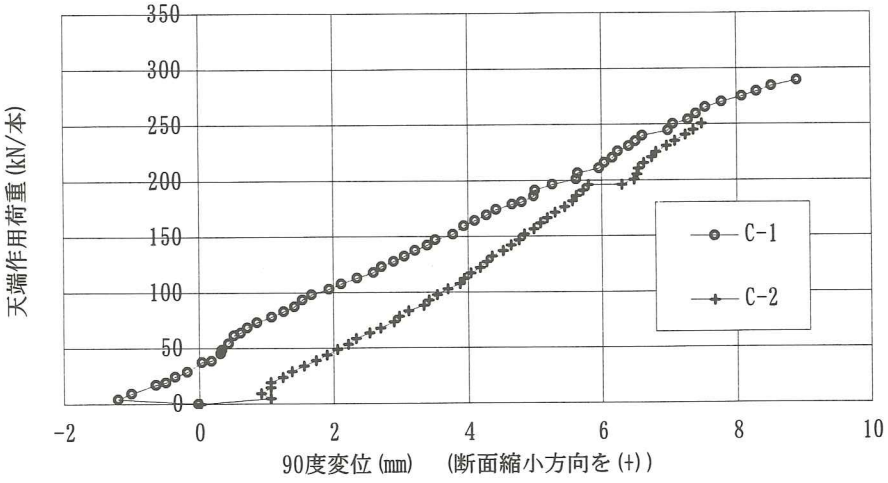


図-2.31 (a)　荷重変位曲線 (載荷形式C，90度，高さ50cm)

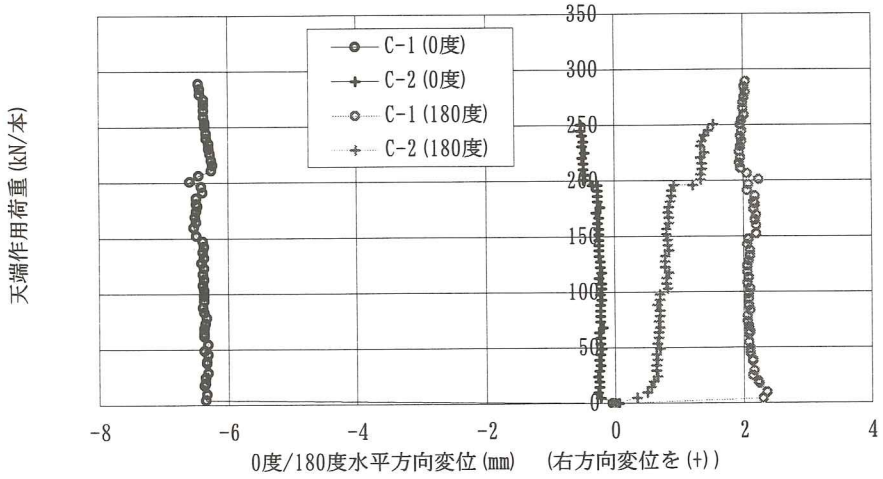


図-2.31 (b)　荷重変位曲線 (載荷形式C，0度/180度，高さ50cm)

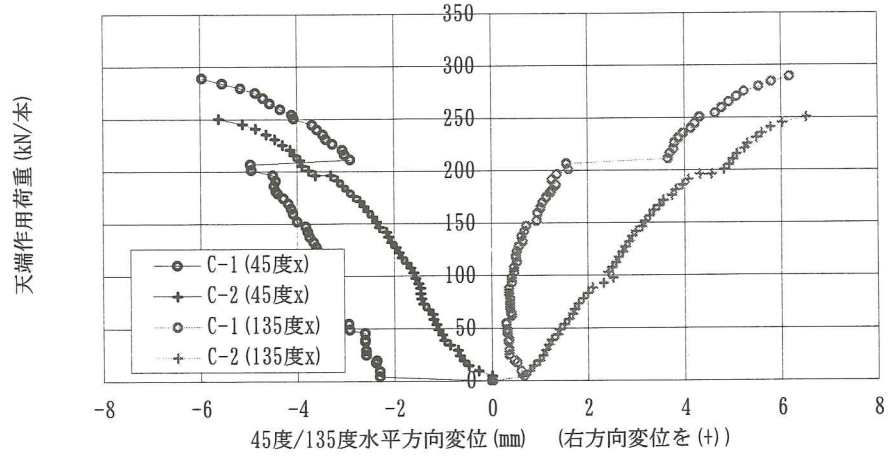


図-2.31 (c)　荷重変位曲線
(載荷形式C，45度/135度水平方向，高さ50cm)

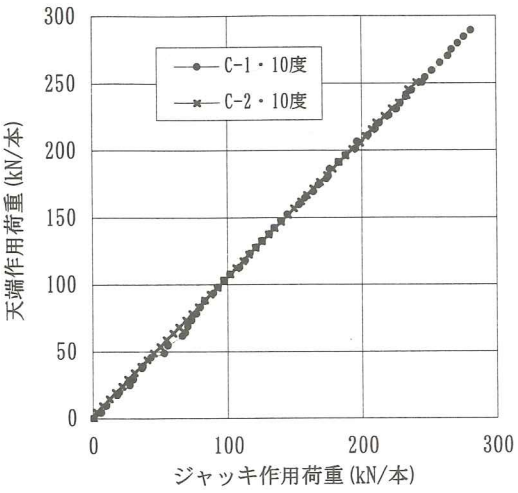


図-2.32(a)　荷重ージャッキ反力関係
(載荷形式C，10度)

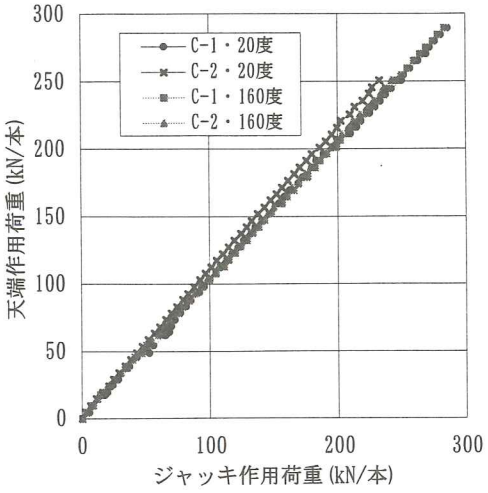


図-2.32(b)　荷重ージャッキ反力関係
(載荷形式C，20度・160度)

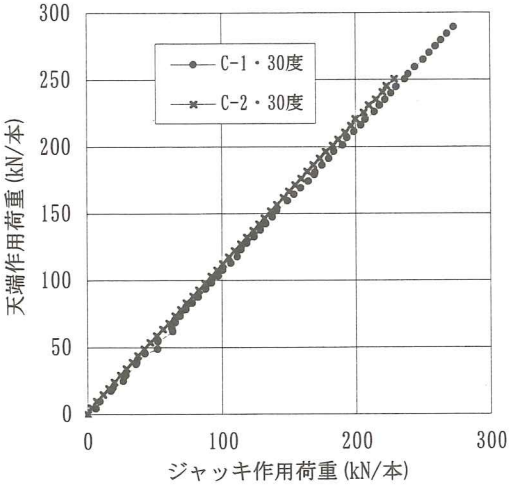


図-2.32(c)　荷重ージャッキ反力関係
(載荷形式C，30度)

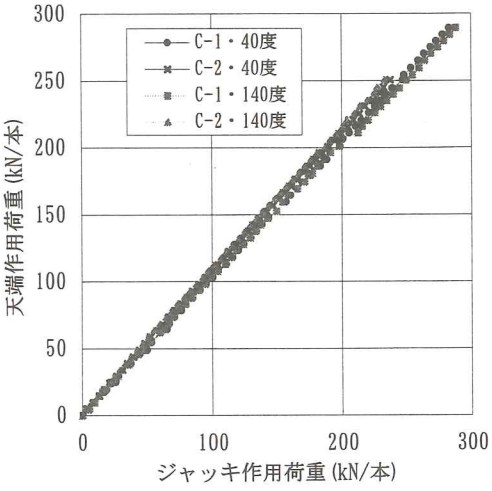


図-2.32(d)　荷重ージャッキ反力関係
(載荷形式C，40度・140度)

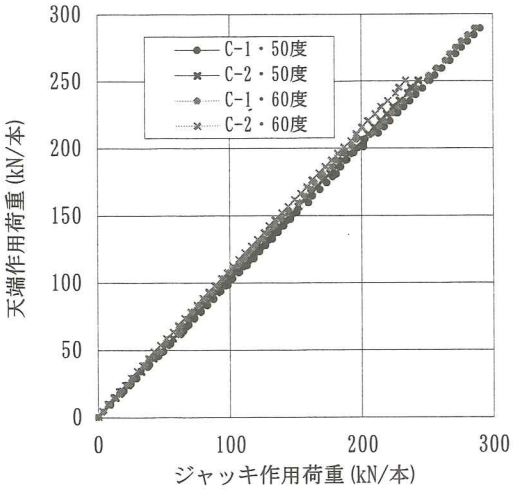


図-2.32(e)　荷重ージャッキ反力関係
(載荷形式C，50度・60度)

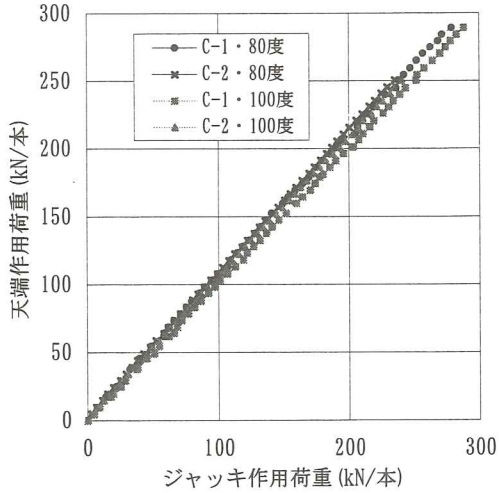


図-2.32(f)　荷重ージャッキ反力関係
(載荷形式C，80度・100度)

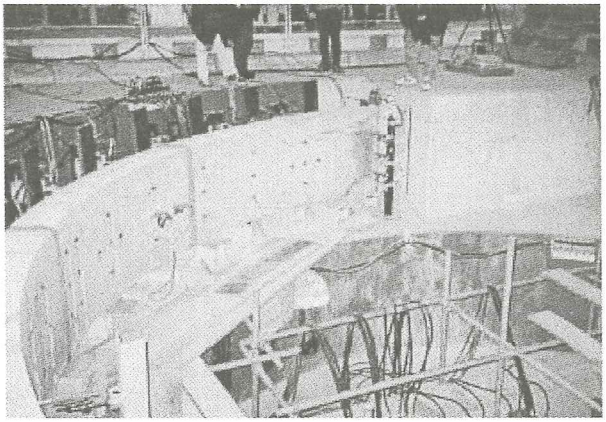


写真-2.16(a)　0～60 度内側(ケース C-1)

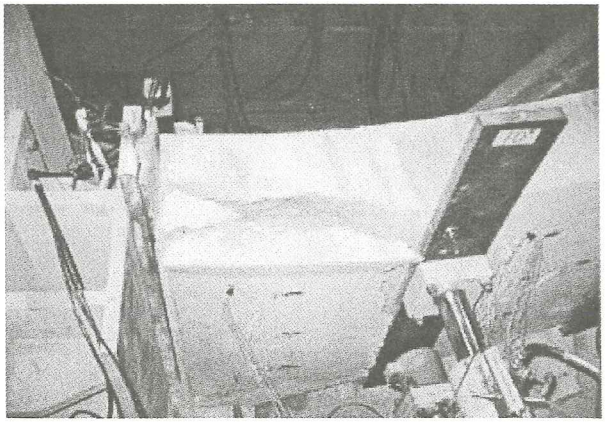


写真-2.16(b)　5 度付近上側～外側 (ケース C-1)

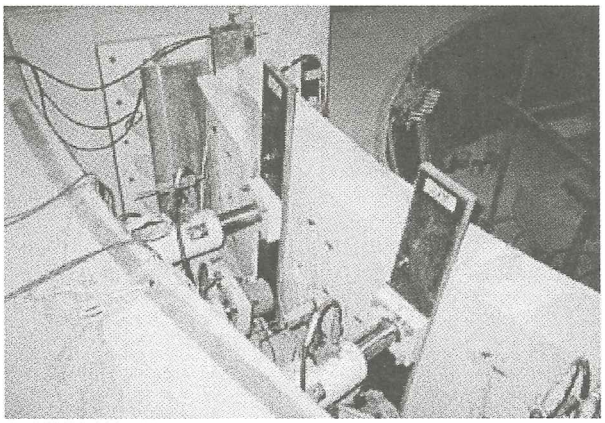


写真-2.16(c)　5 度付近外側(ケース C-1)

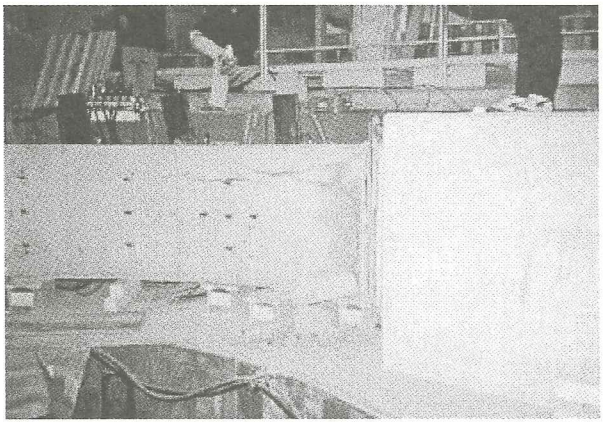


写真-2.16(d)　5 度付近内側(ケース C-1)

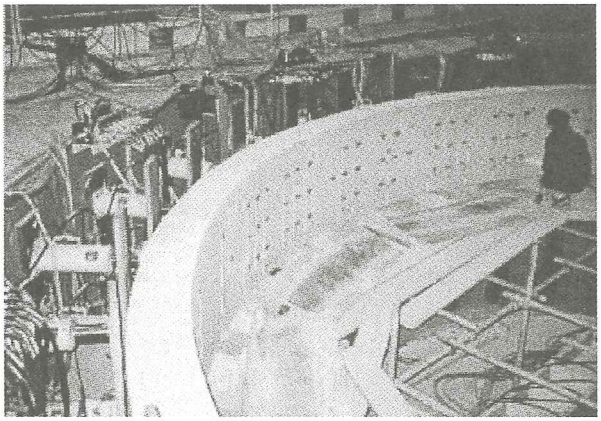


写真-2.16(e)　60～120 度付近内側(ケース C-1)

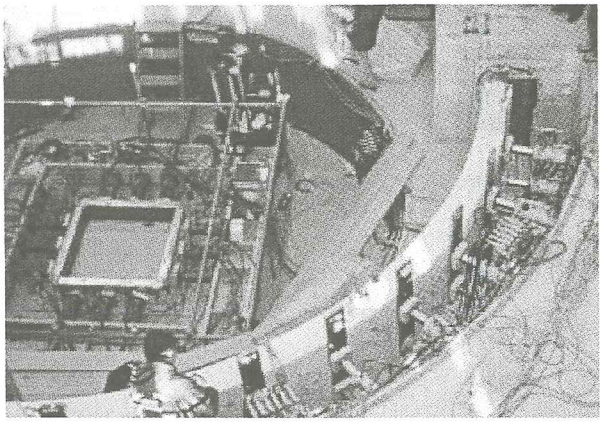


写真-2.17(a)　120～180 度外側(ケース C-2)

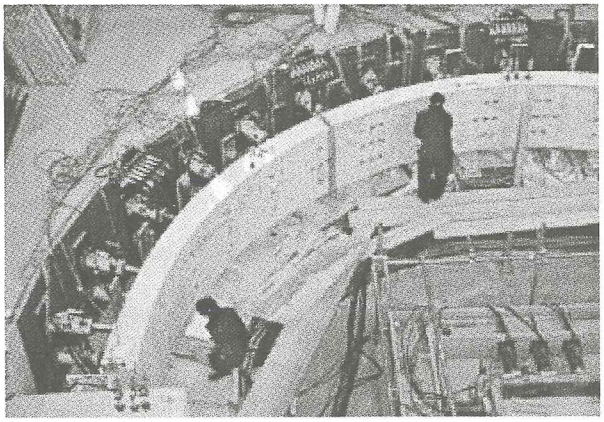


写真-2.17(b)　120～180 度内側 (ケース C-2)

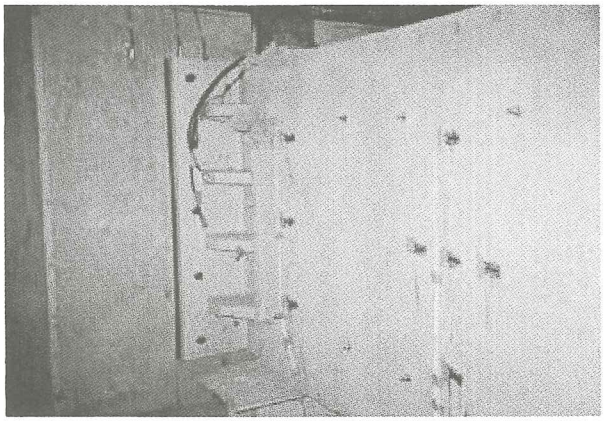


写真-2.17(c)　180 度付近内側(ケース C-2)

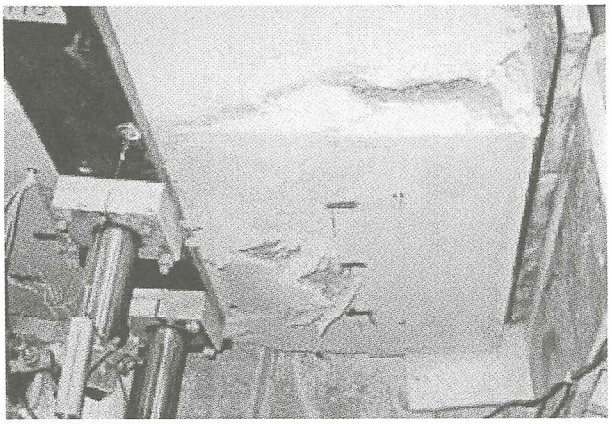


写真-2.17(d)　180 度付近外側(ケース C-2)

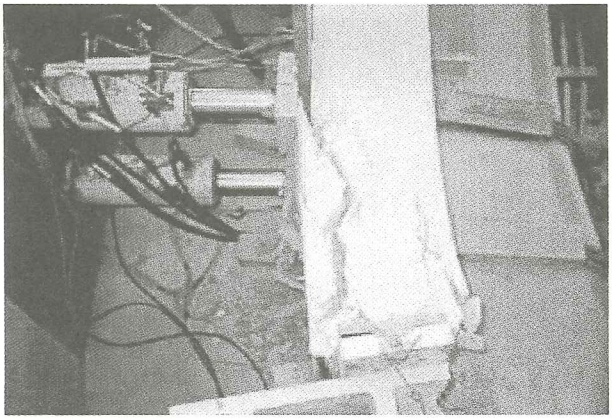


写真-2.17(e)　180 度付近上側(ケース C-2)

(3) ひずみの変化

図-2.33 (a) ～ (f) に供試体の右側半分の代表的な地点、すなわち 5 度、35 度、45 度、65 度、75 度、87.5 度の荷重とひずみの関係を示す。また、左側半分について、それらと対称の位置となる 92.5 度、105 度、115 度、135 度、145 度、175 度の荷重とひずみの関係を示す。ひずみの傾向は全断面で圧縮状態になっていたと考えられる。その中でも特に圧縮ひずみの大きい断面は、図-2.33 (a) に示される脚部の 5 度 (対称位置は 175 度) の内縁側であり、続いて図-2.33 (e) に示される肩部の 75 度 (対称位置は 105 度) であった。実際の破壊はケース C-1 では 5 度付近、ケース C-2 では 175 度付近から生じたことから、圧縮ひずみの傾向と一致していた。同一断面で見た場合は内縁側の方でひずみが大きく、ひずみの変化は左右断面で概ね対称であった。

(4) 断面力

図-2.34 (a) ～ (f) に載荷形式Ｃの各ケースにおける代表的な載荷荷重での曲げモーメント図を示す。また、図-2.35 (a) ～ (f) に載荷形式Ｃの各ケースにおける代表的な載荷荷重での軸力図を示す。

各ケースを比較すると、曲げモーメントは大きく発生しておらず、最大でも載荷形式Ａの最大値の約 10 分の 1 程度であった。また、断面部位によっては載荷板による拘束の影響等が若干あり、曲げモーメントが部材にわたって滑らかに変化していない部分もあると考えられる。また軸力については、全体的にほぼ一様の軸力値になっていたが、脚部の軸力の値が他の部分より高く、圧縮破壊を生じた断面であったことと一致した。本ケースにおいても、載荷形式Ａの場合と同様に、耐荷力の観点からのみ考えた場合、鋼繊維の補強効果が現れにくい載荷形式であったと考えられる。

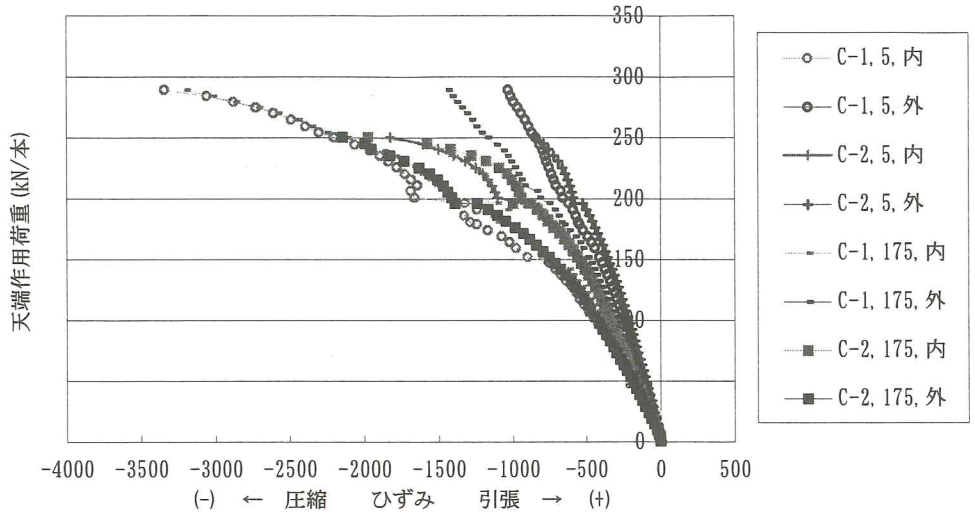


図-2.33(a) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式C, 5度・175度, 高さ50cm)

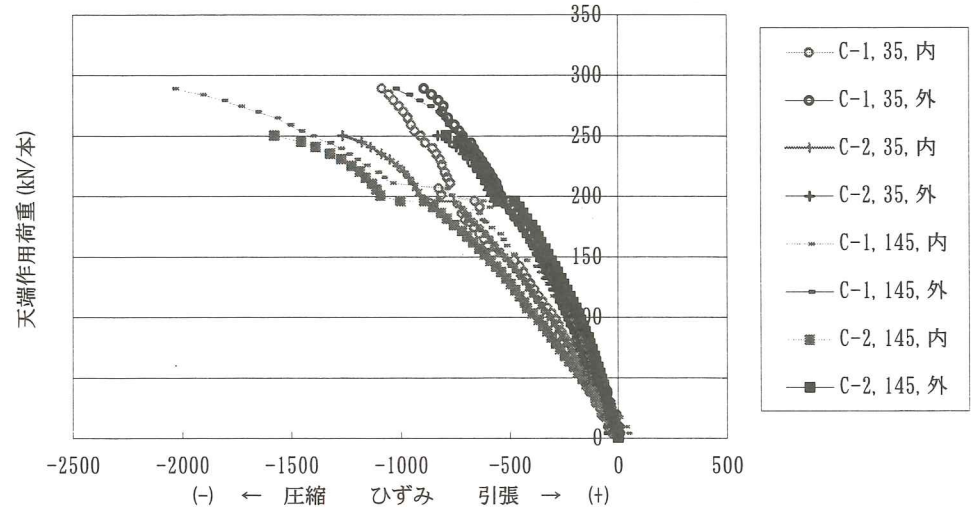


図-2.33(b) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式C, 35度・145度, 高さ50cm)

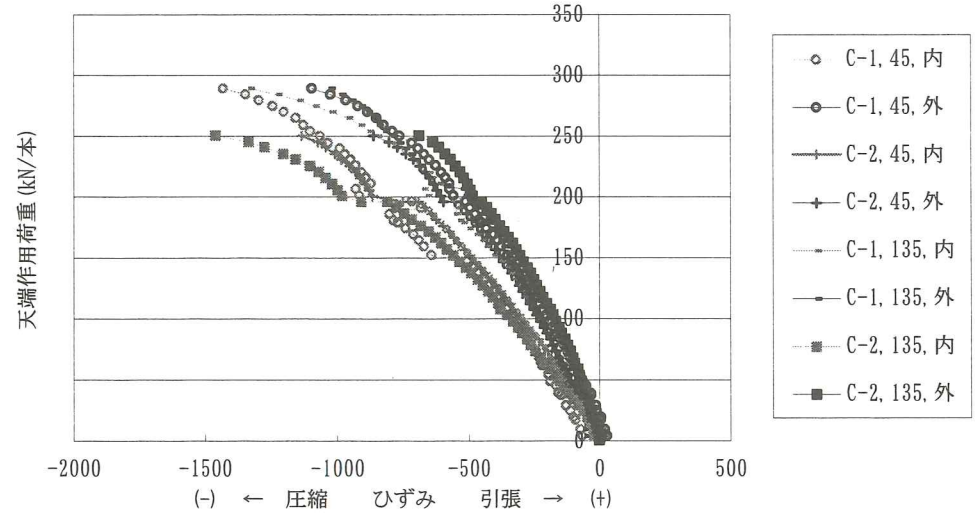


図-2.33(c) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式C, 45度・135度, 高さ50cm)

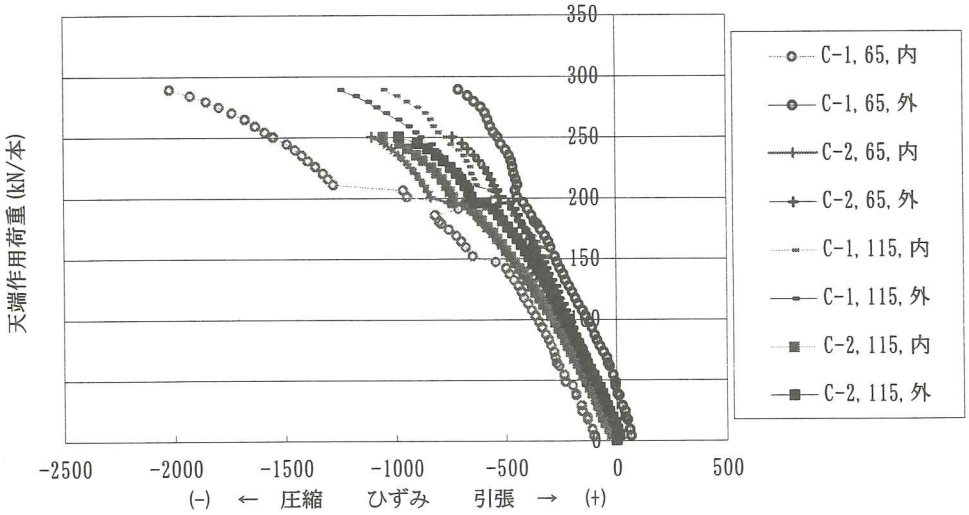


図-2.33(d) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式C, 65度・115度, 高さ50cm)

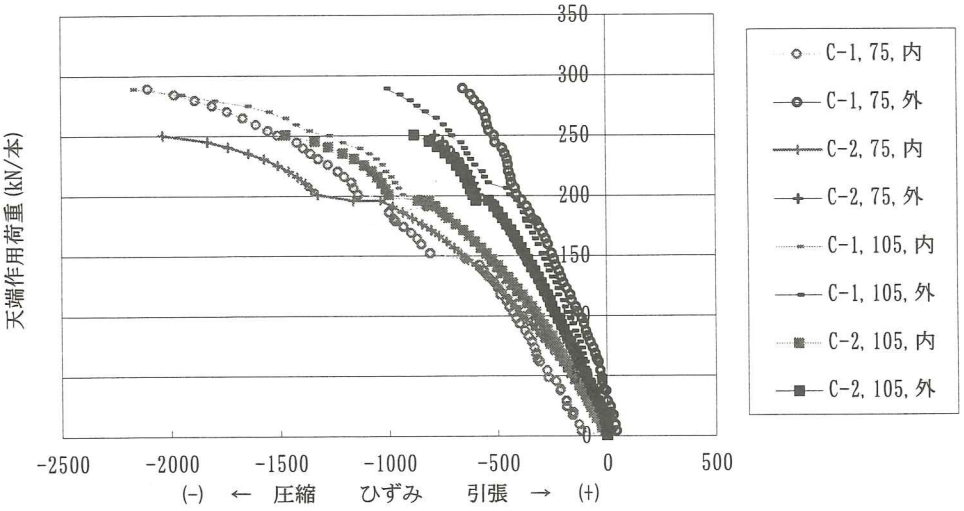


図-2.33(e) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式C, 75度・105度, 高さ50cm)

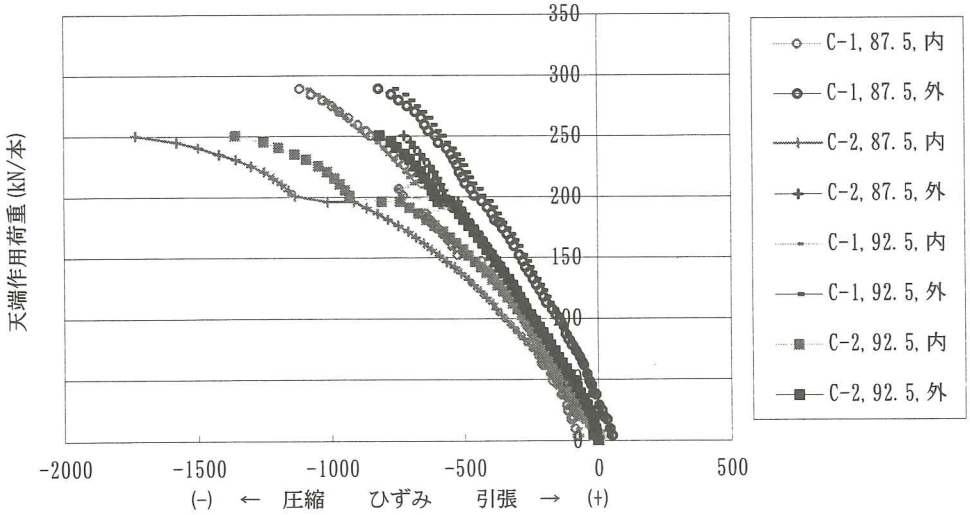


図-2.33(f) 荷重-ひずみ曲線(載荷形式C, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

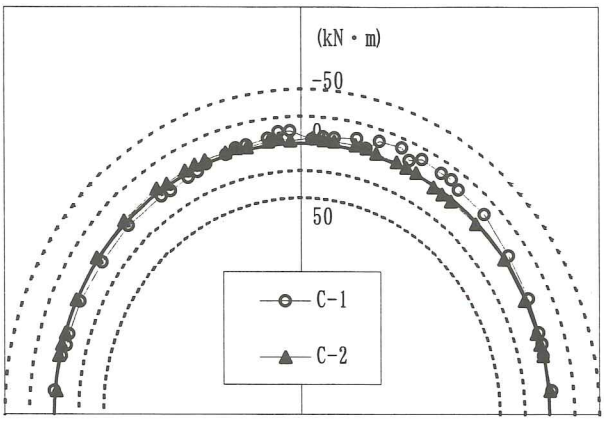


図-2.34(a)　曲げモーメント図　(25kN/本載荷時)

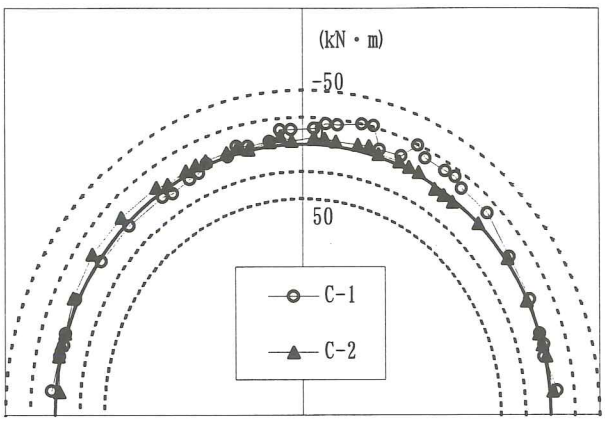


図-2.34(b)　曲げモーメント図　(50kN/本載荷時)

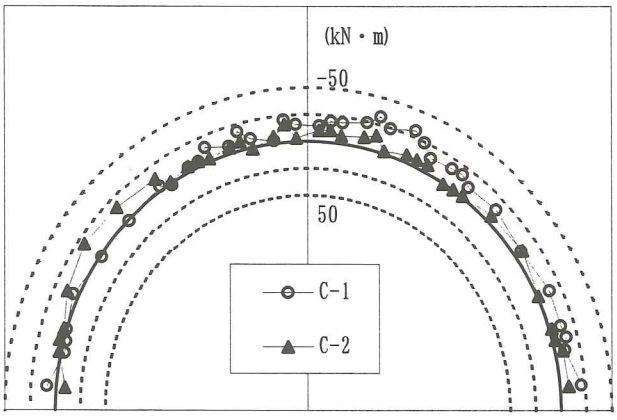


図-2.34(c)　曲げモーメント図　(100kN/本載荷時)

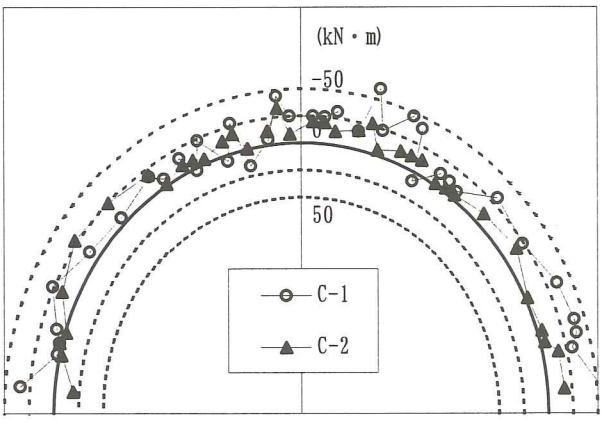


図-2.34(d)　曲げモーメント図　(150kN/本載荷時)

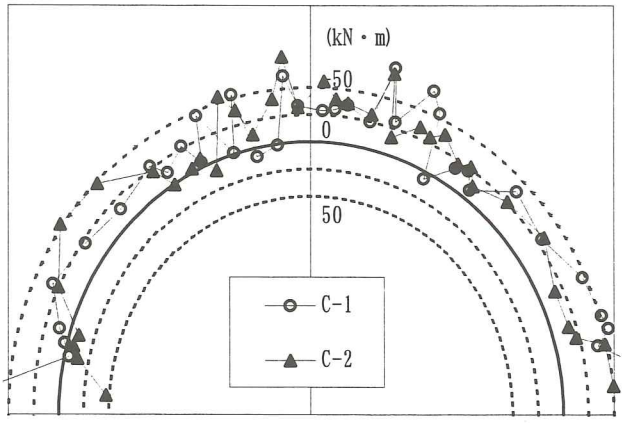


図-2.34(e)　曲げモーメント図　(200kN/本載荷時)

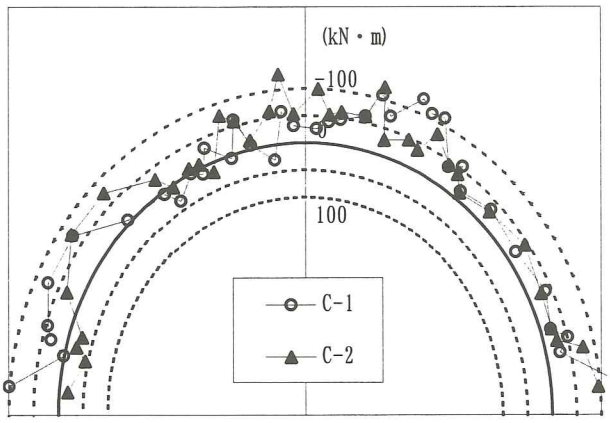


図-2.34(f)　曲げモーメント図　(250kN/本載荷時)

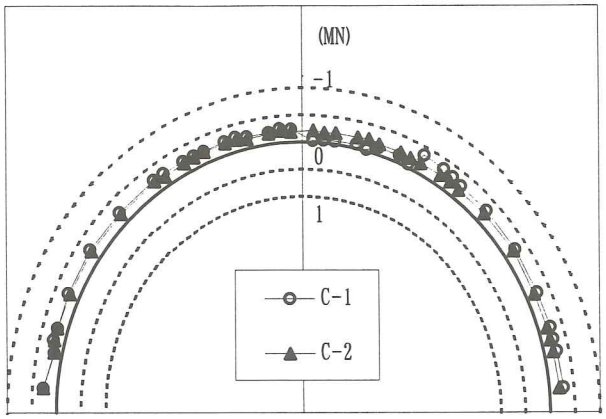


図-2. 35 (a)　軸力図　(25kN/本載荷時)

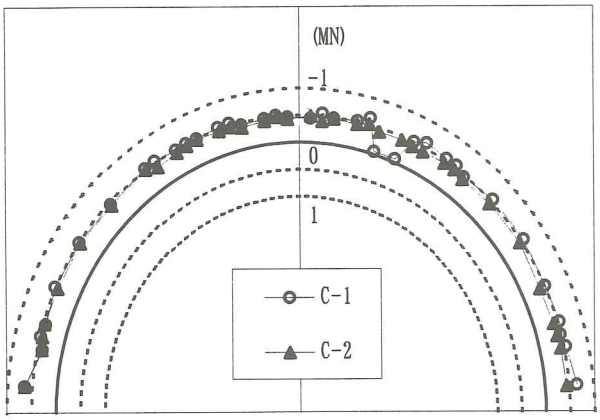


図-2. 35 (b)　軸力図　(50kN/本載荷時)

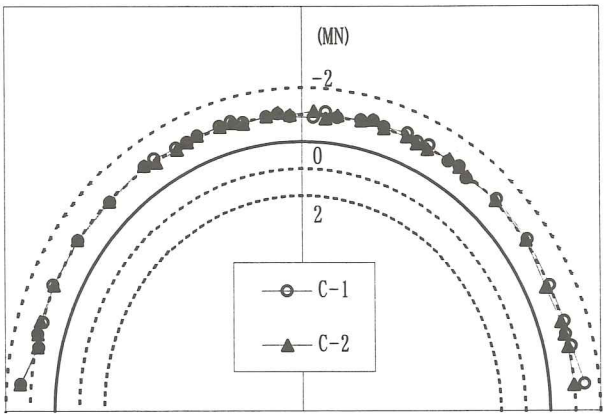


図-2. 35 (c)　軸力図　(100kN/本載荷時)

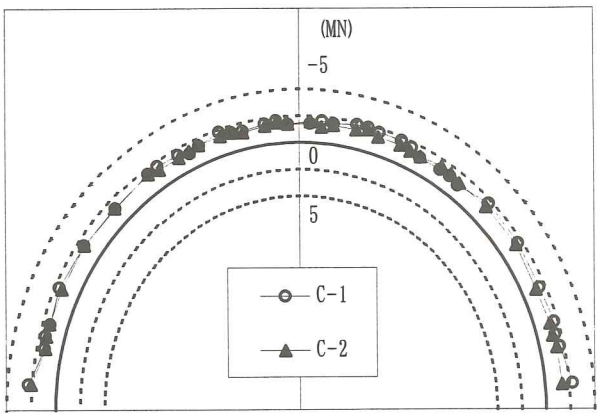


図-2. 35 (d)　軸力図　(150kN/本載荷時)

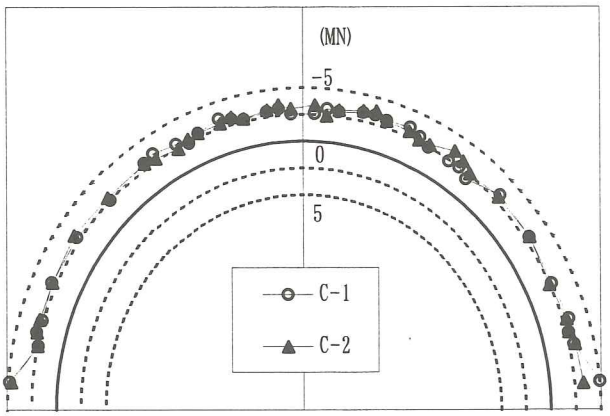


図-2. 35 (e)　軸力図　(200kN/本載荷時)

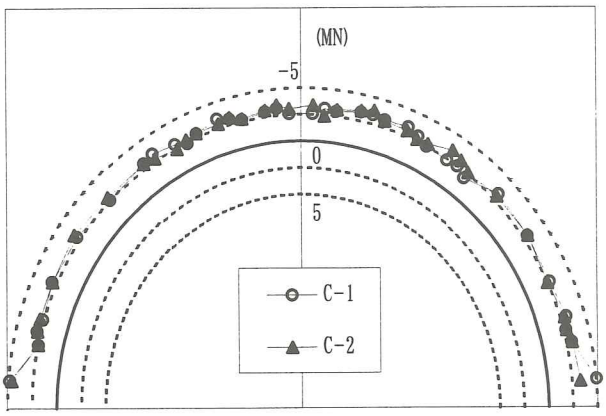


図-2. 35 (f)　軸力図　(250kN/本載荷時)

2.4.5　実験結果のまとめ

これまでの実験結果についてまとめると以下のようなことが分かった。

初めに、載荷形式Ａの結果については、

- 供試体が肩部から破壊に至り、破壊荷重は異なるものの、それは圧縮強度の差の影響であると考えられ、また破壊時の天端の変位は各ケースで概ね 40㎜ となった。
- 第 1 ひび割れは天端部の内縁側に、第 2 ひび割れは肩部である 65° および 115° の外縁側で確認された。ひび割れの発生状況は、プレーンコンクリートでは供試体の上下方向にひび割れが 1 本に集中して進展する形状が多く、鋼繊維補強コンクリートでは複数本の細かなひび割れが網状に進展した。
- 供試体の破壊時には、プレーンコンクリートでは供試体の一部が剥落し、鋼繊維補強コンクリートの場合には剥落は発生しなかったことから、剥落の抑制に関して鋼繊維による補強効果が確認された。
- 破壊は 90 度付近や肩部のひずみの値から判断して、初めに肩部での圧縮破壊が生じた。実際には 90 度の外縁側のひずみが肩部の内縁側のひずみよりも大きい値を示していたが、破壊は載荷板により拘束され、外にはらみ出す形の破壊が抑制された。
- 第 1 ひび割れが発生してから供試体が破壊するまでの荷重の差は約 3.5～5.6 倍であった。
- 断面力の値は、材料の影響は実験で使用した供試体のヤング率の差が若干表れた程度と考えられ、実験で得られたひずみ値を基に算出した断面力から補強の効果を定量的に判断することは困難であった。また、薄肉化についても定量的に判断することは困難であった。
- 鋼繊維による補強の影響については、変位、ひずみ等の差がケースによって明確に見られず、覆工の耐荷力の観点から考えれば、載荷形式Ａに類似する荷重が作用した場合は、鋼繊維の補強効果が現れにくいことが分かった。

また、載荷形式Ｂ・Ｂ’の結果については、

- 供試体の破壊は見られず、ひび割れ発生後も載荷を継続していくと、載荷が可能な最大荷重に達した後、緩やかに荷重は減少した。
- 第 1 ひび割れは天端部である 90 度の内縁側、第 2 ひび割れは 65 度および 115 度の外縁側、第 3 ひび割れは 40 度および 140 度の内縁側で発生した。
- 供試体に対する載荷が可能な最大荷重は、第 3 ひび割れが発生した付近で得られた。最大荷重が得られた時においても、圧縮の限界に達するようなひずみは計測されなかった。
- 第 2 ひび割れが生じたことにより構造系が変化し、圧縮方向に変化していた断面が引張方向に変化が転じ、その断面で第 3 ひび割れが生じ、最終的には載荷可能な最大荷重に達した。
- 第 1 ひび割れが発生してから載荷可能な最大荷重が得られるまでの荷重の差は約 1.0～2.7 倍であった。
- 載荷形式Ａの場合と同様に、鋼繊維を用いることでひび割れがある程度分散して発生する傾向が見られた。また、載荷形式Ｂ・Ｂ’についてはひび割れの進展が抑制され、載荷可能な最大荷重が大きく増加した。
- 鋼繊維の長さを 30㎜ とした場合は、鋼繊維の長さを 60㎜ とした場合と比較して最大荷重が 25%程度低くな

った。また、最大荷重に達した後の荷重の低下の度合いは、長さが短い場合は急に低下し、外力に対しての安全マージンが減少してしまう可能性があることが分かった。

- 樹脂繊維を用いた場合は、鋼繊維を用いた場合と比較して最大荷重が 40%程度低くなった。また、ひび割れが発生した場合、供試体からの剥落は発生しなかったが、鋼繊維補強コンクリートよりはひび割れが集中して発生した。

さらに、載荷形式Cの結果については、

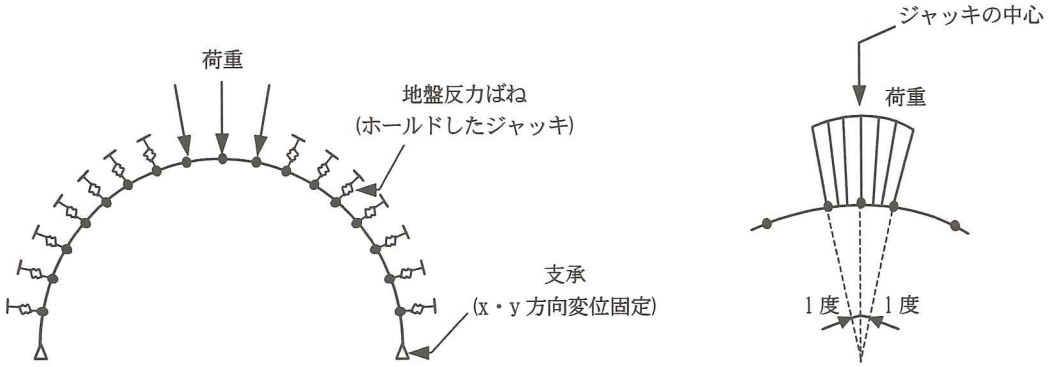
- 供試体が脚部から破壊に至り、破壊荷重は異なるものの、載荷形式Aの場合と同様にそれは圧縮強度の差の影響であった。
- 明確なひび割れは供試体が破壊するまでに目視によって観察されなかった。
- 供試体の破壊時には、プレーンコンクリートでは脚部で供試体の比較的大きな塊が剥落したが、鋼繊維補強コンクリートの場合には小さな剥落が見られわずかに落下しただけであった。このことから、剥落の抑制に関して鋼繊維による補強効果が確認された。
- ひずみの値は、全断面で圧縮状態と見ることができ、脚部と 70 度付近でほぼ同一の値であった。

3．解析結果との比較

3.1　解析手法

本研究では、2 次元のフレーム解析により実験結果の検証を行った。解析では直線の梁部材を節点毎に結合することとした。フレーム解析の全体モデルを図-3.1 (a) に示す。節点は、0 度から 180 度にわたって 2.5 度間隔で配置することとし、その中で特に 10 度、20 度、30 度、…といったジャッキの存在する 10 度毎の節点においてのみ、その前後の 1 度で節点を配置した。すなわち、0 度、2.5 度、5 度、7.5 度、9 度、10 度 (ジャッキあり)、11 度、12.5 度、15 度、17.5 度、19 度、…と配置した。

載荷形式Ａや載荷形式ＢおよびＢ’ではジャッキをホールドした断面があり、その断面の節点には地盤反力ばねを配置し、その地盤反力ばねは引張剛性を 0 と仮定するものとした。なお、地盤反力ばねを考慮した断面では、導入した軸力に相当する荷重はそのまま載荷し続けるものとした。また、載荷自体が載荷板を介して行われたことを再現するために、載荷板の幅が 30cm であり、供試体の外径は 970cm であることから、載荷幅を 2 度相当分と考え、図-3.1 (b) に示すように 9 度～11 度にわたって分布荷重を載荷させた。脚部の支承部分の境界条件は x 方向と y 方向の変位を固定した。



(a)　フレーム解析の全体モデル (載荷形式Ａ)　　(b)　載荷モデル

図-3.1　フレーム解析のモデル

解析を行う際に用いる梁部材のヤング係数とポアソン比は原則として管理供試体を用いて材料試験を行った場合に得られた諸定数を用いた。なお、ケース B-4 については、コア抜き供試体と管理供試体の強度が著しく異なっていたことから、コア抜き供試体のヤング係数を用いることとした。また、その際にポアソン比を測定することができなかったため、ケース B-4 のポアソン比は、コンクリート標準示方書に記されている 0.20 を用いた。また、ケース C-2 についてもポアソン比を測定することができなかったため、同様に 0.20 と仮定して解析を行った。

ひび割れが発生した場合のモデル化は、ひび割れの確認後にひび割れの発生位置近傍に回転ばねを配置することとした。

本解析では以下の手順で回転ばね定数と断面力の算定を実施した。なお、ケース B-1 については、プレーンコン

クリートを用いた変位制御による実験を実施したことにより、ひび割れの発生に伴って載荷荷重が低下する現象が見られた。そのため、断面力の算定については別の方法に依った。

○ケース B-1 を除いた全てのケースの手順

① あらかじめ設定した地盤反力ばね定数と材料定数をもとに、線形の解析要素で 90 度部の変位を荷重毎に算定する。また、併せて断面力を算定する。

② 実験により得られた第 1 ひび割れが発生したと考えられる荷重での第 1 ひび割れ発生箇所近傍における曲げモーメント M_1 を算定する。

③ M_1 以降では第 1 ひび割れが発生した地点に回転ばね定数 Kr1 を持つ回転ばねが配置されるものとして解析を継続し、変位と断面力を算定する。なお、Kr1 の値はひび割れ発生後、すなわち回転ばね配置後で、実験による変位と解析による変位が比較的一致する場合の Kr1 を繰り返し計算を行って決定する。図-3.2 に回転ばね定数の特性を示す。回転ばね定数はバイリニアと仮定し、図-3.2 中で曲げモーメントが M_1 以下では、回転ばねを考慮したモデルを用いて解析を実施したが、回転ばね定数 Kr1 は回転ばねを考慮していないと見なせる値を確認した上で用いた。

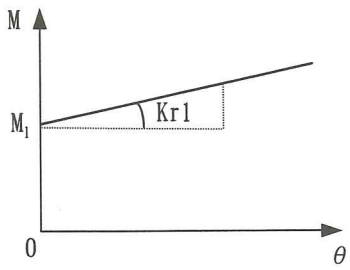


図-3.2　回転ばね定数の特性 (Kr1 の例)

④ 同様に第 2 ひび割れや第 3 ひび割れが発生したと考えられる荷重に達した場合に、それぞれ Kr2 や Kr3 を算定し、変位と断面力を算定する。

○ケース B-1 の手順

① あらかじめ設定した地盤反力ばね定数と材料定数をもとに、90 度部の変位を荷重毎に算定する。また、併せて断面力を算定する。

② 荷重の増加にともない、第 1 ひび割れが発生したと考えられる荷重 P_1 に達する。その場合の軸力 N_1 と曲げモーメント M_1 を算定する。

③ N_1 および M_1 以降ではいったん荷重が低下し、構造系が変化する。そのため、新たに回転ばね定数 Kr1 を備えたモデルにより解析を実施する。荷重は P_1 から低下した荷重 P_1'から、第 2 ひび割れが発生したときの荷重 P_2 までの解析を行う。また、P_1'から P_2 までの解析で得られた断面力の増分を N_1 および M_1 に加え、N_2 および M_2 とする。なお、Kr1 の採用は回転ばねを配置したモデルの P_1'から P_2 までの実験による変位と解析による

変位の傾きが比較的一致するKr1を繰り返し計算により決定する。

④ 同様に第2ひび割れや第3ひび割れが発生したと考えられる荷重に達した場合に、それぞれKr2やKr3を算定し、変位と断面力を算定し、断面力についてはその増分を加える。

すなわち、B-1を除いた載荷形式Aおよび載荷形式Bのケースでは、

(a) ひび割れを考慮しない解析

→ (b) 第1ひび割れを考慮した解析

→ (c) 第1および第2ひび割れを考慮した解析

→ (d) (場合によって) 第1、第2および第3ひび割れを考慮した解析

の順番で同一のモデルで行い、あるひび割れが生じたと考えられる曲げモーメントに達した以降で回転ばねが作用するように設定して断面力を算定した。

ケースB-1においては、

(i) ひび割れを考慮しない解析

(ii) 第1ひび割れのみを考慮した状態

(iii) 第1および第2ひび割れを考慮した状態

といった、それぞれ別のモデルを考え解析を実施し、断面力を(i)の状態のモデルで算出し、第1ひび割れが発生した後は、(ii)のモデルにおいての断面力の増分を、また、第2ひび割れが発生した後は、(iii)のモデルにおいての断面力の増分を、それぞれ従前のモデルで解析して得られた断面力に加えることで算出した。

このように回転ばねの影響を考慮した解析を行い、所定の断面に発生すると考えられる軸力と曲げモーメントを算定した。表-3.1(a)～(c)に本章の解析で使用した供試体の仕様、解析に使用したヤング係数およびポアソン比を載荷形式毎に示す。また、参考としてその場合の一軸圧縮強度を示す。また、解析上で仮定した回転ばねの位置とそれを作用させたときの荷重、および実験で得られたひび割れの発生位置と発生時荷重を示す。

表-3.1(a)　解析時の材料諸元・ひび割れ発生荷重の仮定(載荷形式A)

ケース			A-1	A-2	A-3
供試体仕様	厚さ		30cm	30cm	20cm
	材料		プレーン	鋼繊維	プレーン
	繊維長		−	60mm	−
材料諸元	一軸圧縮強度	(N/mm^2)	26.29	19.86	20.05
	ヤング係数	(kN/mm^2)	20.65	16.85	14.43
	ポアソン比		0.20	0.16	0.14
第1ひび割れ	発生場所(度)	解析の仮定	90	90	90
		実験結果	90	90	90
	発生時荷重(kN/本)	解析の仮定	70	60	50
		実験結果	80	60	54.1
第2ひび割れ	発生場所(度)	解析の仮定	65, 115	65, 115	65, 115
		実験結果	62-67, 120	62-68, 114	110
	発生時荷重(kN/本)	解析の仮定	150	240	90
		実験結果	160	240	91.46

表-3.1(b)　解析時の材料諸元・ひび割れ発生荷重の仮定(載荷形式B)

ケース			B-1	B-2	B-3	B-4	B'-1
供試体仕様	厚さ		30cm	30cm	30cm	30cm	20cm
	材料		プレーン	鋼繊維	鋼繊維	樹脂繊維	鋼繊維
	繊維長		−	60mm	30mm	50mm	60mm
材料諸元	一軸圧縮強度	(N/mm²)	26.10	21.80	23.67	20.54	22.80
	ヤング係数	(kN/mm²)	21.57	19.60	17.17	***18.87	18.30
	ポアソン比		0.22	0.11	0.15	****0.20	0.25
第1ひび割れ	発生場所(度)	解析の仮定	90	90	90	90	90
		実験結果	90	90	91	90	90
	発生時荷重(kN/本)	解析の仮定	53	56	55	45	27
		実験結果	*52.6>47.0	55.8	55.4	45.3	26.9
第2ひび割れ	発生場所(度)	解析の仮定	65, 115	65, 115	65, 115	65, 115	65, 115
		実験結果	65	65, 115	67.5, 125	62, 117.50	70
	発生時荷重(kN/本)	解析の仮定	55	105	63	70	36
		実験結果	**54.6>41.7	104.8	62.9	70.1	36.1
第3ひび割れ	発生場所(度)	解析の仮定	40, 140	40, 140	40, 140	40, 140	40, 140
		実験結果	40	32.5, 140	40	40	150
	発生時荷重(kN/本)	解析の仮定	−	151	111	−	55
		実験結果	51.3	151.2	110.9	98.1	55.0

(備考)　*：第1ひび割れ発生時に51.5kN/本から41.9kN/本にひび割れ発生とともに荷重が低下した現象を示す
**：第2ひび割れ発生時に53.5kN/本から40.9kN/本にひび割れ発生とともに荷重が低下した現象を示す
***：コア抜き供試体による値
****：材料試験を実施実施せず、コンクリート標準示方書に基づき仮定

表-3.1(c)　解析時の材料諸元・ひび割れ発生荷重の仮定(載荷形式C)

ケース			C-1	C-2
供試体仕様	厚さ		30cm	30cm
	材料		プレーン	鋼繊維
	繊維長		−	60mm
材料諸元	一軸圧縮強度	(N/mm²)	14.43	12.79
	ヤング係数	(kN/mm²)	14.42	13.23
	ポアソン比		0.10	*0.20
ひび割れ	発生場所(度)	解析の仮定	−	−
		実験結果	なし	なし
	発生時荷重(kN/本)	解析の仮定	−	−
		実験結果	なし	なし

(備考)　*：材料試験を実施せず、コンクリート標準示方書に基づき仮定

地盤反力ばね定数は、ジャッキストロークとジャッキ反力の関係から反力係数の算出が可能であるが、本実験では、ジャッキが1断面あたり2つ存在し、それらが載荷板によって拘束されていることから、ジャッキストロークとジャッキ反力の関係のみから断面としてのばね定数を算出することは困難であった。さらにジャッキの反力係数は表-2.14(a)～(c)に示したように、各ケースの各ジャッキの位置、また荷重のレベルによっても大きく値が異なることが予想された。そのため、本研究におけるフレーム解析上のジャッキの反力係数は、

①　すべてのジャッキおよび断面において同一の値とする

②　すべての荷重レベルで同一の値とし、ジャッキが圧縮されている場合の非線形性は考慮しない

と仮定して解析を行った。そこで、ケースA-1の荷重と変位の関係を用いて試計算を行い、概略値を把握することで、ジャッキの反力係数の設定を試みた。

図-3.3に第1ひび割れが発生するまでの荷重が30～70kN/本における半径方向のジャッキの反力係数、すなわち地盤反力ばね定数Kx毎の天端変位の変化を示す。

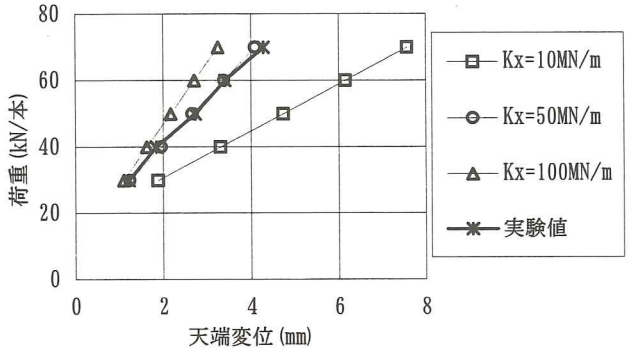


図-3.3　Kx毎の荷重と天端変位の関係

これよりKx=50MN/mの解析結果と実験による天端変位の値が概ね一致すると考えることが可能である。なお、これ以降の荷重で反力係数に関する議論を行わなかった理由としては、実験の結果より80kN/本でひび割れが天端に発生するため、その影響が生じるためである。また、載荷荷重が50kN/本における曲げモーメント図を図-3.4(a)、軸力図を図-3.4(b)に示す。曲げモーメントは天端部分で解析値よりも実験値の方が若干小さい値となっているものの、これについてもKx=50MN/mの場合で概ね実験値と一致したと考えられる。また、軸力は脚部に近いほど解析値より実験値の方が小さいが、地盤反力ばね定数の差による影響は小さかった。以上からケースA-1におけるフレーム解析では地盤反力ばね定数は50MN/mとして解析を行った。

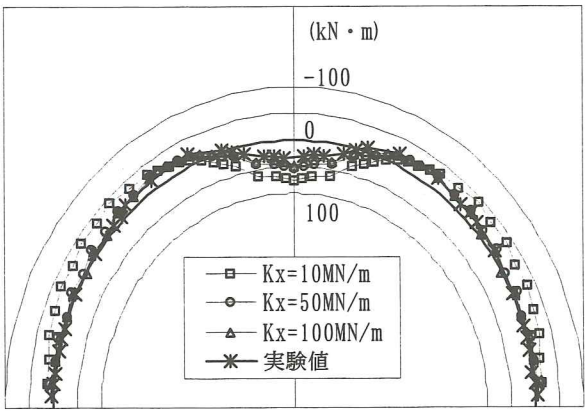


図-3.4(a)　Kx毎の曲げモーメント図
(ケースA-1、50kN/本)

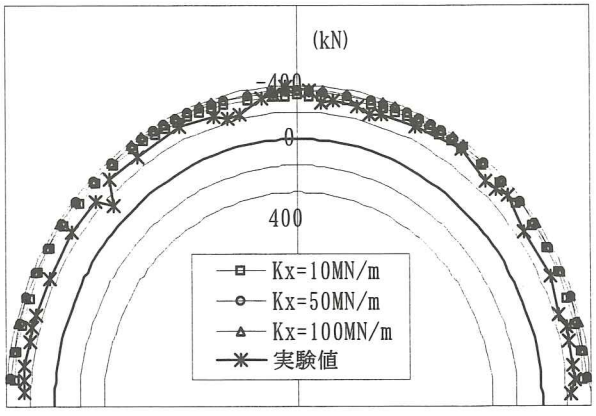


図-3.4(b)　Kx毎の軸力図
(ケースA-1、50kN/本)

これらと同様の手法で、および表-2.14(b)～(c)と表-2.16(a)～(e)に示した油圧ジャッキの反力係数算定結果を参考にして地盤反力ばね定数の設定を行った。用いた地盤反力ばね定数を表-3.2に示す。

また、断面力の算定はひび割れが発生する荷重とその間の代表的な荷重で解析を行った。表-3.2 に載荷荷重を示す。なお、表-3.2 中のケース B-1 における①はひび割れが生じていない状態、②は第 1 ひび割れのみを考慮した状態、③は第 1 および第 2 ひび割れを考慮した状態における荷重値を示す。なお、表-3.2 中で*を記した値が第 1 ひび割れの発生時、**を記した値が第 2 ひび割れの発生時、および***を記した値が第 3 ひび割れの発生時を模擬した荷重である。

表-3.2　地盤反力ばね定数と解析を行った載荷荷重

ケース番号	地盤反力ばね定数(MN/m)	解析を行った載荷荷重(kN/本)
A-1	50	50、70*、100、150**、200、250、300、350、400
A-2	50	30、60*、100、150、200、240**、300、330
A-3	50	30、50*、70、90**、110、130、150、170
B-1	50	①：30、40、46、53* ②：42、48、55** ③：41、46、51
B-2	10	50、56*、80、105**、125、151***、156
B-3	25	50、55*、63**、80、100、111***、117
B-4	25	30、45*、50、70**、80、98
B'-1	10	20、27*、30、36**、40、55***、66
C-1	-	50、100、150、200、250、290
C-2	-	50、100、150、200、250

(備考)　*：第 1 ひび割れ発生を考慮した時の荷重を示す
**：第 2 ひび割れ発生を考慮した時の荷重を示す
***：第 3 ひび割れ発生を考慮した時の荷重を示す

3.2 断面耐力曲線

フレーム解析から得られた軸力と曲げモーメントに関しては、軸力と曲げモーメントを用いて表現される断面耐力曲線で検討することとした。

断面耐力曲線の算定に当たっては、プレーンコンクリートと繊維補強コンクリートとで分けて考えることとした。なお、プレーンコンクリートの耐力曲線の算定にあたっては文献 1)、繊維補強コンクリートの耐力曲線の算定にあたっては文献 2) を参考とした。

3.2.1 プレーンコンクリートの断面耐力曲線

プレーンコンクリートの耐力曲線を算定するにあたっては、種々の限界状態で断面耐力の関係を考慮し、曲げ耐力と圧縮耐力を算定する必要がある。本研究では式 (3.1) および式 (3.2) により算定した。

曲げ耐力 $$M = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot y \cdot b dy}{\gamma_b} \qquad \cdots (3.1)$$

圧縮耐力 $$N = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot b dy}{\gamma_b} \qquad \cdots (3.2)$$

ここに、M : 曲げ耐力
N : 圧縮耐力
h : 供試体の厚さ (本研究においては、h =20cm または 30cm)
b : 供試体の高さ (本研究においては、b =100cm)
y : 供試体の厚さ方向に対する距離 (本研究においては、断面中心を原点と仮定)
$\sigma(y)$: 供試体の厚さ方向の応力
γ_b : 部材係数

限界状態を検討するにあたっては、断面に生じるひずみの状態から検討し、そのひずみと $\sigma(y)$ との関係を決定し、耐力曲線を算定する必要がある。応力とひずみの関係については式 (3.3) および式 (3.4) に示すものとした [1)]。

$$\sigma(y) = k_1 \cdot f_{cd}^{'} \times \frac{\varepsilon_c^{'}}{0.002} \times (2 - \frac{\varepsilon_c^{'}}{0.002}) \quad (0 \le \varepsilon_c^{'} \le 0.002) \qquad \cdots \quad (3.3)$$

$$\sigma(y) = k_1 \cdot f_{cd}^{'} \quad (0.002 \le \varepsilon_c^{'} \le 0.0035) \qquad \cdots \quad (3.4)$$

ここに、k_1 : コンクリートの引張強度の寸法効果を表す係数

$f_{cd}^{'}$　：　コンクリートの設計圧縮強度

$\varepsilon_{c}^{'}$　：　コンクリートの圧縮ひずみ

プレーンコンクリートの場合はコンクリートの引張強度および引張領域は考慮しないこととし、断面耐力を算定する際に用いられる安全係数等、すなわちγ_bおよびk_1は1.0とした。また、設計軸圧縮耐力の上限値については設定しないものとした。

プレーンコンクリートを使用した覆工の断面に生じるひずみの状態を考えると、

① 全断面がコンクリートの終局圧縮ひずみ$\varepsilon_{cu}^{'}$となる状態

② 部材の一端が終局圧縮ひずみ$\varepsilon_{cu}^{'}$に達し、別の一端が$\varepsilon_{c}^{'}$=0となる状態

③ 部材の一端が終局圧縮ひずみ$\varepsilon_{cu}^{'}$に達し、断面高さの2分の1の点で$\varepsilon_{c}^{'}$=0となる状態

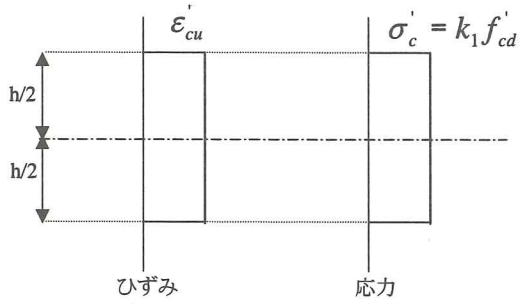
④ 全断面で$\varepsilon_{c}^{'}$=0となる状態

$\varepsilon_{cu}^{'}$の4つが考えられる[3)]。ここで③については、プレーンコンクリートに許容されるひび割れ深さが断面高さの2分の1としている。本研究における実験において、ひび割れ深さを定量的に計測することは困難であったこと、および考察を加えるために、上記の4つの限界状態の他に、

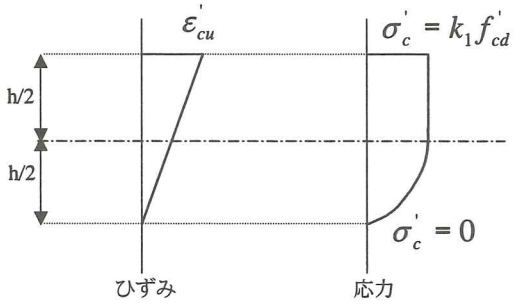
⑤ 全断面で圧縮を保持しつつも、部材の一端で$\varepsilon_{c}^{'}$=0となる状態

⑥ ひび割れ深さに無関係で部材の一端が終局圧縮ひずみ$\varepsilon_{cu}^{'}$に達する状態

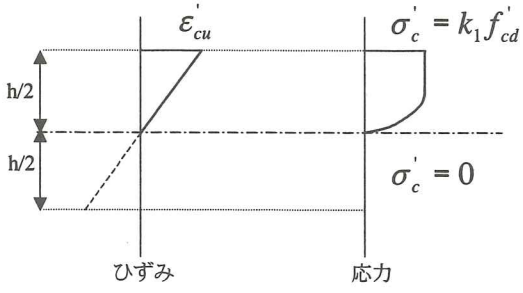
といった、2つの状態を含めて、耐力を考慮することとした。これらのひずみの状態と、それに基づいた応力の分布形状を図-3.5 (a) ～ (f) に示す。



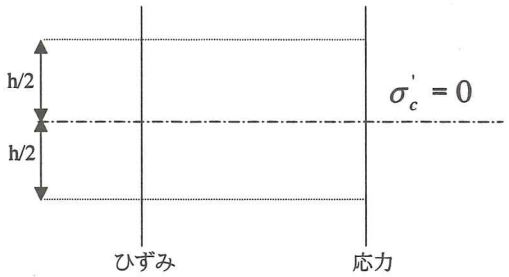
(a)　全断面がコンクリートの終局圧縮ひずみ$\varepsilon_{cu}^{'}$となる状態 (状態①)



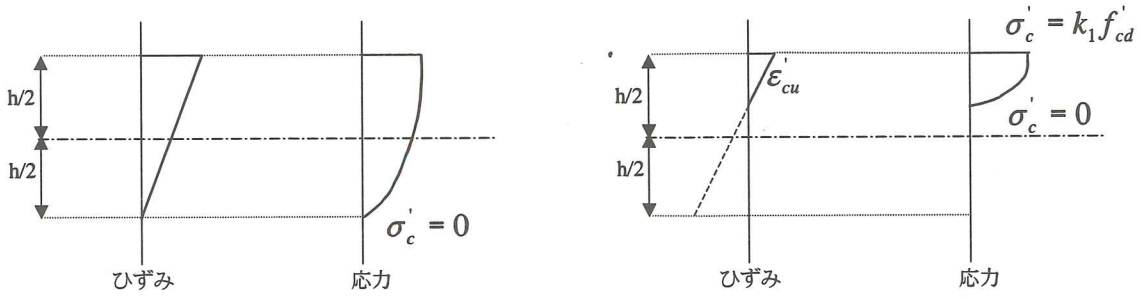
(b)　部材の一端が終局圧縮ひずみ$\varepsilon_{cu}^{'}$に達し、別の一端が$\varepsilon_{c}^{'}$=0となる状態 (状態②)



(c)　部材の一端が終局圧縮ひずみ$\varepsilon_{cu}^{'}$に達し、断面高さの2分の1の点で$\varepsilon_{c}^{'}$=0となる状態 (状態③)



(d)　全断面で$\varepsilon_{c}^{'}$=0となる状態 (状態④)



(e) 全断面で圧縮を保持しつつも、部材の一端で $\varepsilon_c' = 0$ となる状態(状態⑤)

(f) ひび割れ深さに無関係で部材の一端が終局圧縮ひずみ ε_{cu}' に達する状態(状態⑥)

図-3.5 プレーンコンクリートの各限界状態等における応力とひずみの分布

③の仮定により得られた耐力曲線は「ひび割れ深さを断面高さの50%まで許容した場合の曲線」と言い換えることが出来る。また、⑤の仮定により得られた耐力曲線は「引張領域を許容しない場合の曲線」、⑥の仮定により得られた耐力曲線は「ひび割れによらず、圧縮破壊を生じると仮定した場合の曲線」と言い換えることが出来る。上記の仮定を元にして得られた断面耐力曲線の概要を図-3.6に示す。

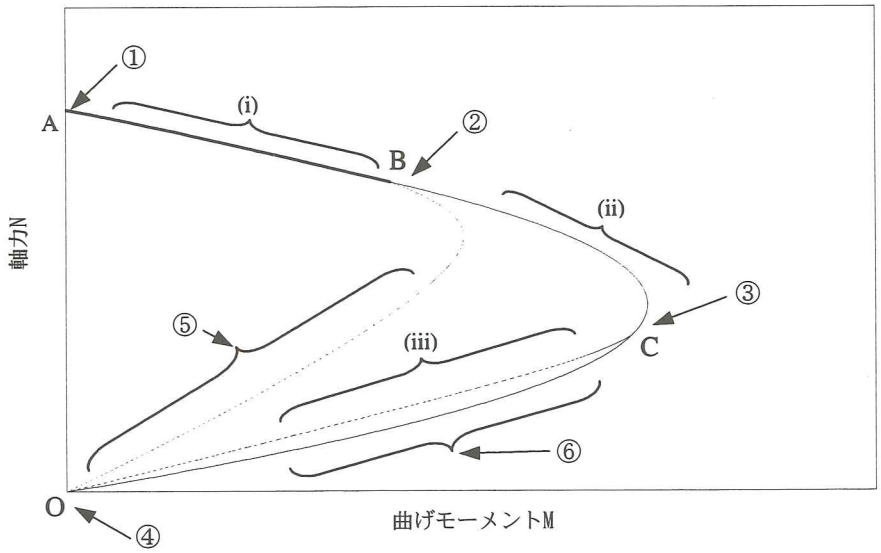


図-3.6 断面耐力曲線

図-3.6に示した①～⑥は仮定した各限界状態等を表している。構成される曲線については、曲線AB、すなわち(i)の部分は、全断面圧縮状態であるが、部材の一端が終局圧縮ひずみ ε_{cu}' を保持しながら別の一端が ε_{cu}' から0に変化するまでの状態を表す。曲線BC、すなわち(ii)の部分は部材の一端が終局圧縮ひずみ ε_{cu}' を保持しながら、引張領域が断面の半分にまで達するまでの状態を表す。また、曲線COのうち、点線で示した(iii)の部分は引張領域が断面の半分にまで達している状態を保持したまま、別の一端が ε_{cu}' から0に変化するまでの状態を表す。曲線BO、すなわち⑤については部材の一端のひずみが0を保持しながら、別の一端が ε_{cu}' から0に変化するまでの状態を表す。曲線COのうち、⑥は部材の一端が終局圧縮ひずみ ε_{cu}' を保持しながら、引張領域が断面の全体にまで達するまでの状態を表す。

3.2.2　繊維補強コンクリートの断面耐力曲線

繊維補強コンクリートの耐力曲線を算定するにあたっても、プレーンコンクリートの場合と同様に種々の限界状態で断面耐力の関係を考慮し、耐力曲線を算定する必要がある。文献 2) によると、鋼繊維補強コンクリートについては、

① 全断面がコンクリートの終局圧縮ひずみ $\varepsilon_{cu}^{'}$ となる状態

② 部材の一端が終局圧縮ひずみ $\varepsilon_{cu}^{'}$ に達し、別の一端が $\varepsilon_{c}^{'}=0$ となる状態

③ 部材の一端が終局圧縮ひずみ $\varepsilon_{cu}^{'}$ に達し、別の一端の引張応力が設計引張強度 f_{tfd} で、かつひび割れ深さが 0.7h となる状態

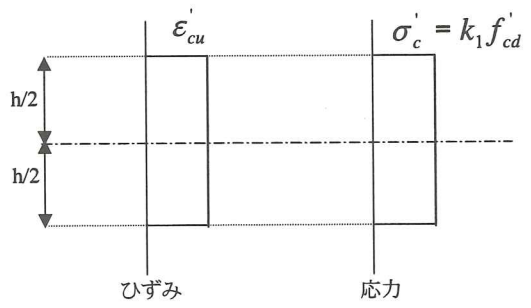
④ 設計軸圧縮力 0 となる状態

となっている。ここで③については、鋼繊維補強コンクリートに許容されるひび割れ深さが断面高さの 70%と考えている。また、プレーンコンクリートの場合と同様に、

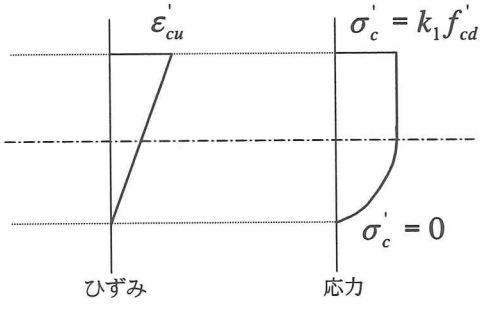
⑤ 断面で圧縮を保持しつつも、部材の一端で $\varepsilon_{c}^{'}=0$ となる状態

⑥ ひび割れ深さに無関係で部材の一端が終局圧縮ひずみ $\varepsilon_{cu}^{'}$ に達する状態

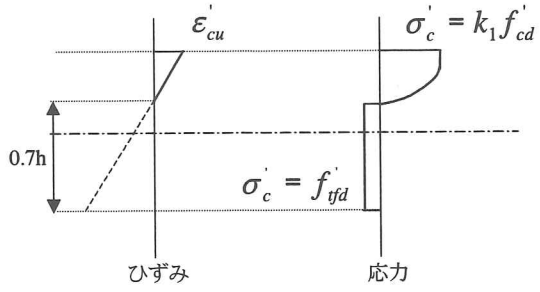
といった、2 つの状態を含めて、耐力を考慮することとした。すなわち、プレーンコンクリートの場合と異なる点は許容されるひび割れ深さと繊維の受け持つ引張強度を考慮する点である。これら繊維補強コンクリートにおけるひずみの状態と、それに基づいた応力の分布形状を図-3.7 (a) ～ (f) に示す。



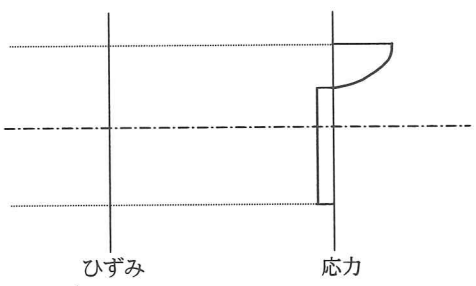
(a)　全断面がコンクリートの終局圧縮ひずみ $\varepsilon_{cu}^{'}$ となる状態 (状態①)



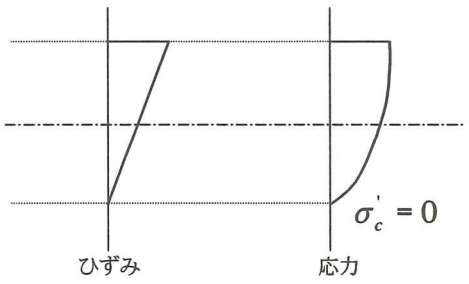
(b)　部材の一端が終局圧縮ひずみ $\varepsilon_{cu}^{'}$ に達し、別の一端が $\varepsilon_{c}^{'}=0$ となる状態 (状態②)



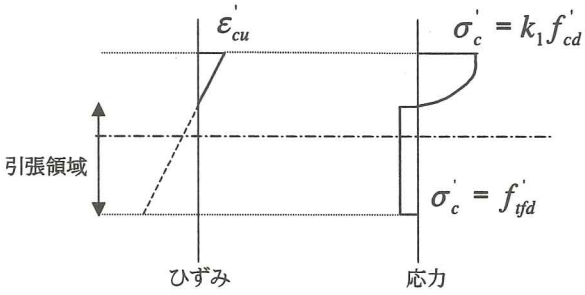
(c)　部材の一端が終局圧縮ひずみ $\varepsilon_{cu}^{'}$ に達し、断面高さの 70%の点で $\varepsilon_{c}^{'}=0$ となる状態 (状態③)



(d)　設計軸圧縮力が 0 となる状態 (状態④)



(e)　全断面で圧縮を保持しつつも、部材の一端で ε_c'=0 となる状態(状態⑤)



(f)　ひび割れ深さに無関係で部材の一端が終局圧縮ひずみ ε_{cu}' に達する状態(状態⑥)

図-3.7　繊維補強コンクリートの各限界状態等における応力とひずみの分布

本研究で用いた引張強度とは、コンクリートの引張強度とは異なり、図-3.7 中にも示されているとおり、繊維の受け持つ設計引張強度 f_{tfd} のことを示す。文献 2)では、この f_{tfd} を用いて耐力曲線を算定することとされているが、現段階においては鋼繊維の受け持つ引張強度 f_{tf} については算定基準が明確になっておらず、また、f_{tfd} と f_{tf} との関係についても明確ではない。

また、文献 4)では、曲げ試験によって曲げ引張応力とひび割れ開口幅曲線を算定し、その曲線勾配から引張軟化曲線を求め、限界開口幅や残留強度率を求めることが可能であるとされている。しかしながら、耐力曲線の算定の際に用いるに f_{tf} ついては、現段階では算定できる根拠が示されていない。

そこで、本研究では、限界開口幅や残留強度率については文献 4)により求めることとし、f_{tf} の算定については文献 2)の考え方を準用することで耐力曲線を決定する場合の f_{tf} を算出することとした。また、本研究では f_{tfd} と f_{tf} は等しいと仮定することとした。具体的な方法については以下のとおりである。

(1)　コンクリートの引張強度の特性値を圧縮強度を用いた式(3.5)に示す式で算定した。

引張強度の特性値　$f_{tk} = 0.23 f_{ck}'^{2/3}$　　…(3.5)

ここに、f_{ck}'　　：　圧縮強度の特性値(N/mm²)

(2)　式(3.6)に示されるように残留強度率を 0.55 とし、限界ひび割れ開口幅を式(3.7)に基づいて算定した[4]。それにより、引張応力とひび割れ開口幅との関係を得た。

残留強度率　$\mu = 0.55$　　…(3.6)

ひび割れ開口幅の限界幅　$w_k = 1.4 + 100 / f_{ck}'$　　…(3.7)

(3)　本研究で実験を行った部材厚が 30cm および 20cm の場合でそれぞれ限界ひび割れを式(3.8)に基づき[2]、

1.715mm、1.143mm と算定した。

ひび割れ幅　$W_{II}= 0.0035 \times \frac{0.7}{0.3} l_s$　　…(3.7)

なお、式(3.7)中のl_sについては0.7hを採用した。

(4)　この1.715mmと1.143mmを(1)で得られた式に置き戻し、f_{tf}を算定した。

図-3.8 にこれらの算定される各定数の関係のイメージを示す。また、この手順に従った場合の繊維補強コンクリートにおける繊維の受け持つ引張強度は表-3.3 に示す。なお、樹脂繊維補強コンクリートについては、繊維の受け持つ引張強度の設定が現段階では不明確であることから、鋼繊維補強コンクリートの場合同様の手法で算定した。

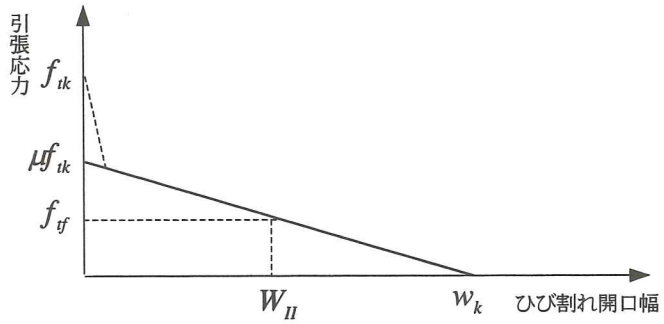


図-3.8　引張応力とひび割れ開口幅の関係

表-3.3　繊維の受け持つ引張強度

ケース番号	圧縮強度	引張強度の特性値 f_{tk}	部材厚	限界開口幅 w_k	限界ひび割れ幅 W_{II}	限界ひび割れ時の繊維の受け持つ引張応力 f_{tf}
	(N/mm²)	(N/mm²)	(cm)	(mm)	(mm)	(N/mm²)
A-2	19.86	1.69	30	6.44	1.715	0.247
B-2	21.80	1.79	30	5.99	1.715	0.283
B-3	23.67	1.90	30	5.62	1.715	0.318
B-4	20.54	1.73	30	6.27	1.715	0.260
B'-1	22.80	1.85	20	5.79	1.143	0.201
C-2	12.77	1.26	30	9.23	1.715	0.128

また、プレーンコンクリートの場合と同様に、断面耐力を算定する際に用いられる安全係数等はすべて1.0とした。また、設計軸圧縮耐力の上限値については設定しないと仮定した。

3.3 解析結果

解析結果では、初めに回転ばね定数を変化させた場合の荷重－変位の関係を算定し、実験を再現していると考えられる回転ばね定数の値を算定した。その際、参考として回転ばねを全く考慮しないと仮定した場合(図中では「回転ばね考慮なし」と表記)と、回転ばねをすべてヒンジと仮定した場合(図中には「回転ばね=ヒンジ」と表記)について併せて結果を示した。第1ひび割れが発生した地点の回転ばね定数をKr1と表記し、同様に第2ひび割れではKr2、第3ひび割れではKr3とし、単位はMN・m/radである。また、参考として実験により得られたひずみを基にして算定した断面力についても図中に示した。

3.3.1 載荷形式Aによる各ケースの解析結果

載荷形式Aの場合は、第1ひび割れが90度付近の内縁側、第2ひび割れが60度～70度の外縁側およびそれらの対称の位置に発生することが多かった。そこで、第1ひび割れを模擬した回転ばねを90度に、第2ひび割れを模擬した回転ばねを65度に配置し解析を行った。なお、回転ばねを作用させた時点の荷重は表-3.1(a)に示したとおりで、その荷重は実験時の観察によりひび割れの発生を確認した荷重である。断面力の変化の関係は、ひび割れが発生した付近の断面の軸力と曲げモーメントの関係に着目し、90度の近傍である87.5度と65度の断面力の変化図を解析値と実験値について示した。

(1) ケースA-1の結果

図-3.9(a)の回転ばね定数と荷重-変位の関係から、供試体が破壊した荷重付近を除いてKr1=50MN・m/rad、Kr2=20MN・m/radで実験と解析の変位が概ね一致すると考えられる。この回転ばね定数を用いて、断面の軸力と曲げモーメントの関係を表わす曲線(以下、「MN曲線」とする)と耐力曲線の関係を算定し、検討を行った。

図-3.9(b)に87.5度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、載荷荷重が約50～70kN/本の場合に、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られた。実験においては、図-2.14(f)より87.5度の外縁側で345kN/本の場合で圧縮の限界と考えられる程度の2000μの圧縮ひずみを超え、87.5度の内縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じていた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、載荷荷重が275kN/本の場合に断面の一端が圧縮の限界に達することにより決定される耐力曲線と交差した。

図-3.9(c)に65度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、Kr1=50MN・m/rad、Kr2=20MN・m/radの場合では耐力曲線と交差することはなかった。回転ばねをすべてヒンジと仮定した場合では、第2ひび割れを考慮した段階で曲げモーメントの増加がなくなり、軸力だけが増加する結果が得られた。実験においては、図-2.14(d)より65度の内縁側で335kN/本で圧縮の限界と考えられる2000μの圧縮ひずみを超え、65度の外縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じていた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、載荷荷重が235kN/本の場合にひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られた。

(2) ケースA-2の結果

図-3.10(a)の回転ばね定数と荷重-変位の関係から、供試体が破壊した荷重付近を除いてKr1=50MN・m/rad、

Kr2=20MN・m/rad の場合で実験と解析の変位が概ね一致すると考えられる。

図-3.10(b)に87.5度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、載荷荷重が約60～100kN/本の場合に、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られた。実験においては、図-2.14(f)より87.5度の外縁側で265kN/本で圧縮の限界と考えられる2000μの圧縮ひずみを超え、87.5度の内縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じていた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、載荷荷重が 210kN/本の場合に、断面の一端が圧縮の限界に達することにより決定される耐力曲線と交差した。

図-3.10(c)に65度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、Kr1=50MN・m/rad、Kr2=20MN・m/rad の場合では耐力曲線と明確に交差することはなかった。実験においては、図-2.14(d)より65度の内縁側で250kN/本で圧縮の限界と考えられる2000μの圧縮ひずみを超え、65度の外縁側ではひび割れが発生すると考えられる数 100μの引張ひずみが生じていた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、載荷荷重が 220kN/本の場合に、断面の一端が圧縮の限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られた。

(3) ケースA-3の結果

図-3.11(a)の回転ばね定数と荷重-変位の関係から、供試体が破壊した荷重付近を除いて Kr1=5MN・m/rad、Kr2=5MN・m/rad の場合で実験と解析の変位が概ね一致すると考えられる。

図-3.11(b)に87.5度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、第1ひび割れが発生したと考えられる載荷荷重が50kN/本の場合の直前で、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られた。実験においては、図-2.14(f)より87.5度の外縁側で168kN/本で圧縮の限界と考えられる2000μの圧縮ひずみを超え、87.5度の内縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じていた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、載荷荷重が90kN/本の場合に、断面の一端が圧縮の限界に達することにより決定される耐力曲線と交差した。

図-3.11(c)に65度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、耐力曲線と明確に交差することはなかった。なお、実験で得られたひずみは、図-2.14(d)や図-2.15(a)より65度の内縁側で圧縮の限界と考えられる2000μの圧縮ひずみに達することはなかったが、65度の外縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じていた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、載荷の開始付近からひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差している状態であった。

(4) 載荷形式Aの解析結果のまとめ

87.5 度については、解析から得られたMN曲線は各ケースでひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られたが、実験によるひずみの値からは各ケースで断面の一端が圧縮の限界に達すると考えられる結果が得られ、、解析結果と実験結果とで相違が見られた。また、引張ひずみの評価方法に課題は残るものの、実験によるひずみの値を基に算定したMN曲線についても、断面の一端が圧縮の限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られた。87.5 度でこのような相違が見られる理由として以下の点が考えられる。

① 回転ばね定数を一定としたため、構造系の変化を忠実に再現できていないことが考えられる。本来は回転ばねをヒンジとした解析結果が示すように、回転ばね定数がひび割れの進展に伴って小さくなっていく

ことが考えられる。これに伴い、軸力は増加しても、曲げモーメントの増加の程度が小さくなることから、MN曲線の傾きがさらに大きくなる。よって、断面の一端が圧縮の限界に達することによって耐力に達することが再現できると考えられる。

② 解析によるMN曲線と耐力曲線は小さい荷重、例として第1ひび割れが発生する直前で交差している場合がある。その時点では構造体としての健全性は保たれている状態で、明らかに耐力には達していないと考えるべきであることから、コンクリートの引張領域や引張強度を考慮する必要があると考えられる。

65 度については、荷重－変位の関係より実験を再現していると考えられる回転ばね定数の値を用いて解析を行った場合、解析により得られたMN曲線は耐力曲線と明確に交差する結果は得られなかった。実験によるひずみの値からはケースA-1およびA-2で断面の一端が圧縮の限界に達すると考えられる結果が得られた。また、実験によるひずみの値を基に算定したMN曲線については、ケース毎でばらつきが多く、傾向を見出すことは困難であった。65 度の結果についても87.5度の結果と同様に、回転ばね定数の適切な算定や引張強度等を考慮することで、より実験結果と解析結果とが高い精度で現象を再現できると考えられる。

表-3.4(a)に載荷形式Aの各ケースにおいて得られた回転ばね定数の値を示す。これよりケースA-1およびケースA-2では値が同一となっていることから、鋼繊維を混入したことに対する影響が解析上において表現されなかったと考えられる。また、ケースA-3では解析によって得られた回転ばね定数がケースA-1およびA-2に比較して小さいことから、供試体厚さが薄いことに伴う回転しやすい、すなわち変形しやすい構造であったと考えられる。

表-3.4(a) 回転ばね定数の解析結果(載荷形式A)

ケース		A-1	A-2	A-3
Kr1結果	(MN・m/rad)	50	50	5
Kr2結果	(MN・m/rad)	20	20	5

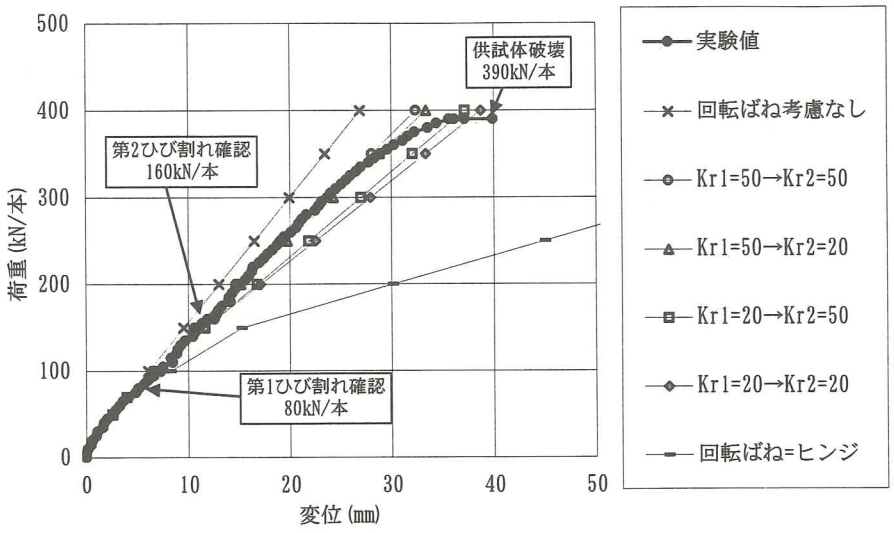


図-3.9(a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係(ケースA-1)

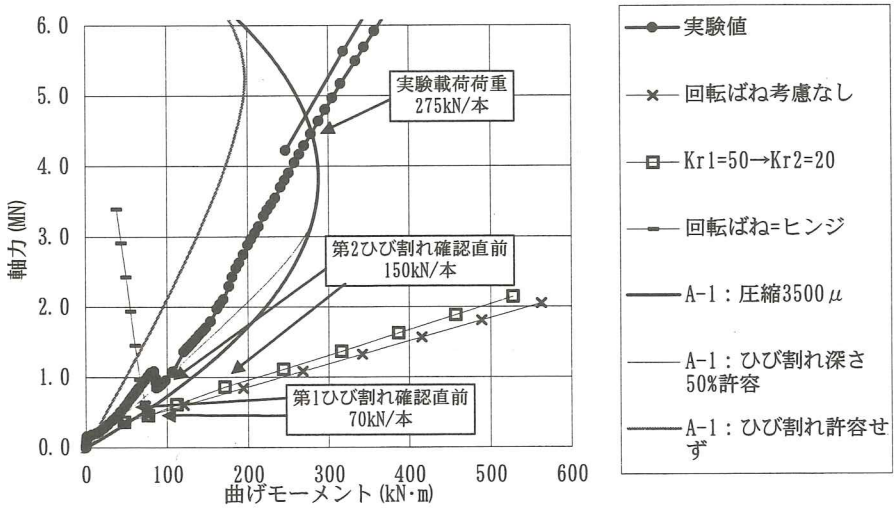


図-3.9(b)　断面力変化図(87.5度，ケースA-1)

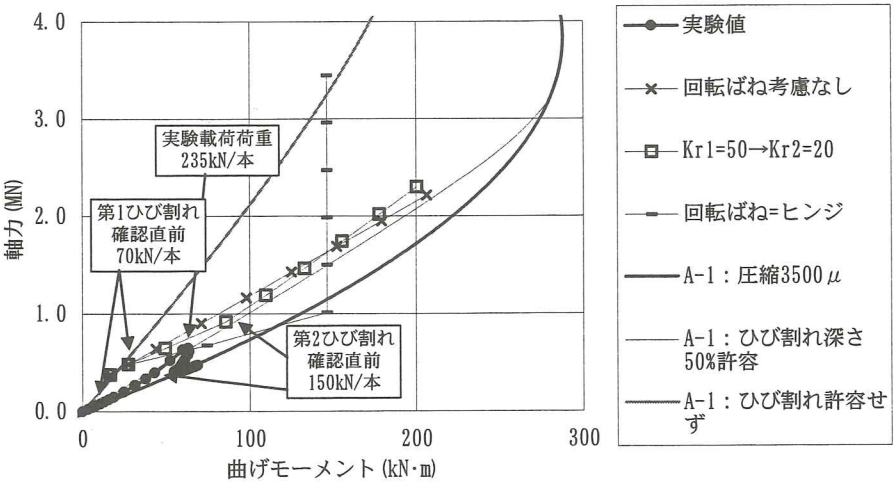


図-3.9(c)　断面力変化図(65.0度，ケースA-1)

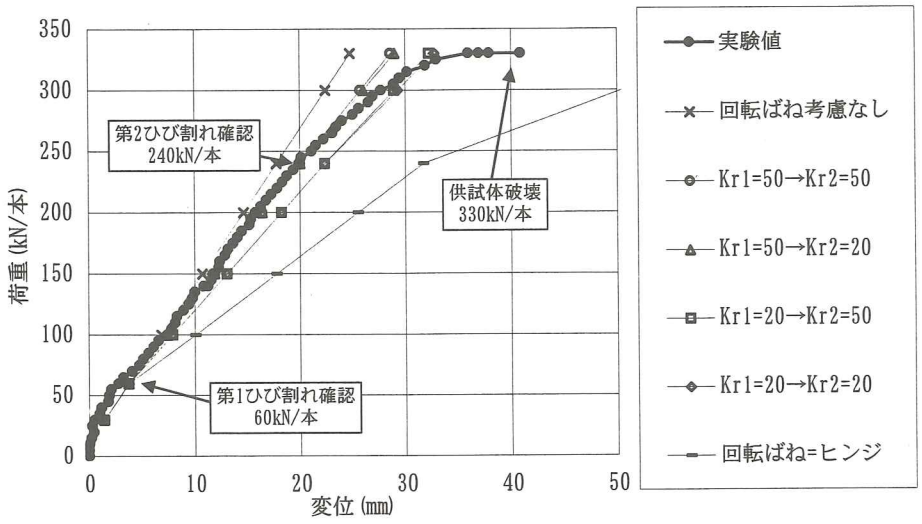


図-3.10(a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係(ケースA-2)

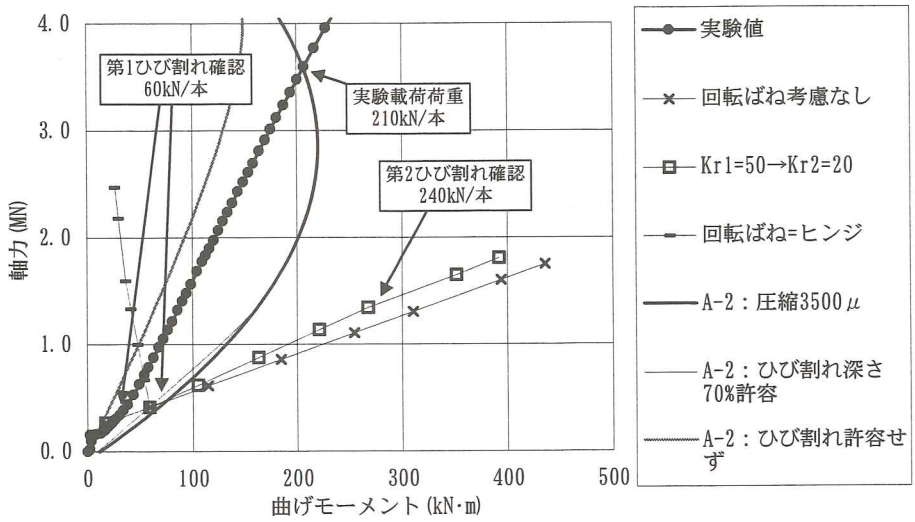


図-3.10(b)　断面力変化図(87.5度，ケースA-2)

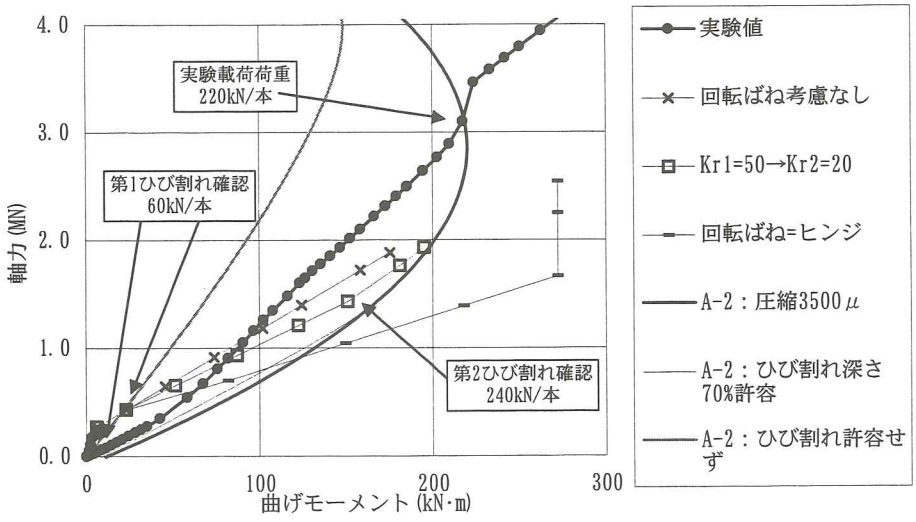


図-3.10(c)　断面力変化図(65.0度，ケースA-2)

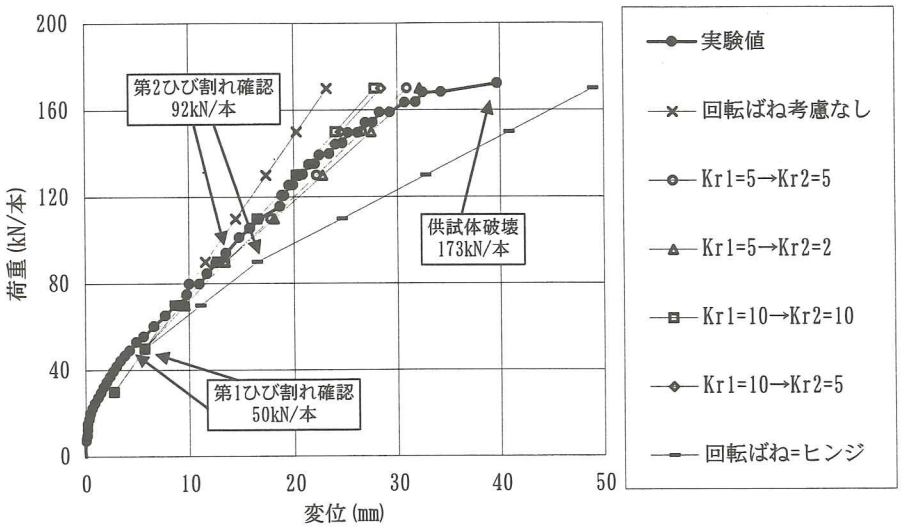


図-3.11 (a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係 (ケースA-3)

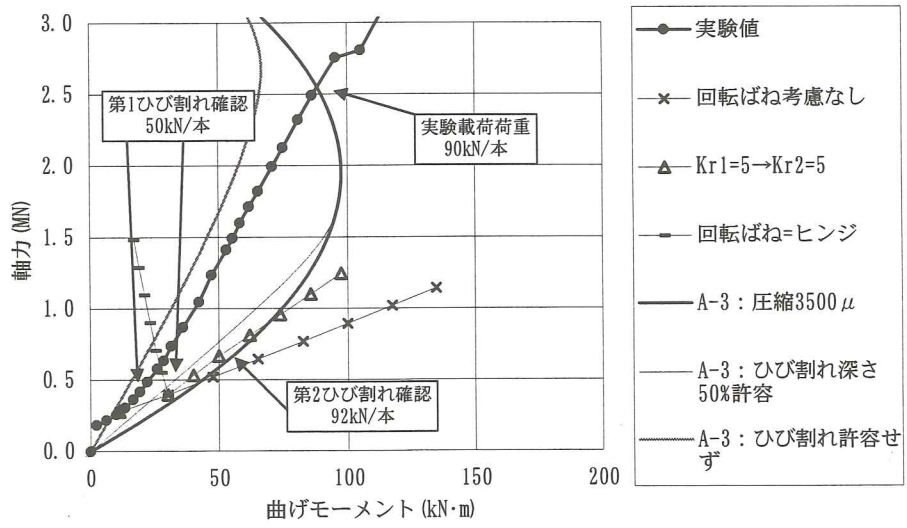


図-3.11 (b)　断面力変化図 (87.5度，ケースA-3)

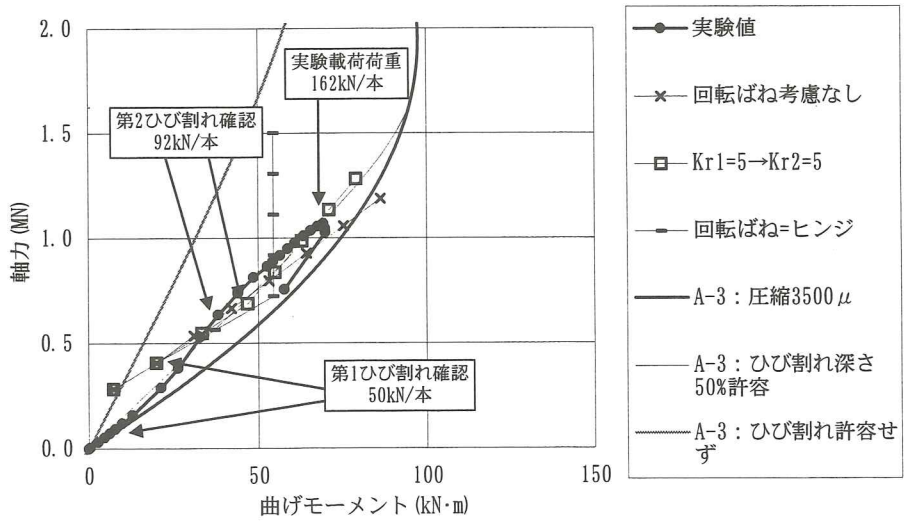


図-3.11 (c)　断面力変化図 (65.0度，ケースA-3)

3.3.2　載荷形式B・載荷形式B'による各ケースの解析結果

載荷形式B・載荷形式B'の場合は、第1ひび割れが90度付近の内縁側、第2ひび割れが60度～70度の外縁側、そして第3ひび割れが40度の内縁側に発生することが多かったため、解析では第1ひび割れを模擬した回転ばねを90度に、第2ひび割れを模擬した回転ばねを65度に配置し、第3ひび割れを模擬した回転ばねを40度に配置した。なお、回転ばねを作用させた時点の荷重は表-3.1(b)に示したとおりで、実験結果におけるひび割れの確認荷重は実験時の観察によって確認された荷重、またはひび割れの発生に伴う荷重の低下が確認された時の値である。断面力の変化の関係は、載荷形式Aの場合と同様にひび割れが発生した付近の軸力と曲げモーメントの関係に着目し、90度の近傍である87.5度と65度、および第3ひび割れが発生することが多かった40度に関して示した。なお、40度では載荷板の存在により実験でひずみの測定を実施しなかったために、解析値のみで検討した。

(1) ケースB-1の結果

本ケースはプレーンコンクリートを使用し、変位制御によって実験を実施したため、ひび割れの発生と同時に荷重が低下した。ひび割れの発生位置は第1ひび割れが天端の内縁側、第2ひび割れが65度付近の外縁側、そして第3ひび割れが40度付近の内縁側の順であった。荷重の低下があったことから回転ばね定数を算定では、荷重-変位の関係の傾きがひび割れが発生しているそれぞれの段階で比較的合致する定数を採用した。

図-3.12(a)の回転ばね定数と荷重-変位の関係から、Kr1=10MN・m/rad、Kr2=10MN・m/radの場合で実験と解析の変位が概ね一致すると考えられる。ケースB-1では第3ひび割れが発生した以降は荷重の載荷が不可能となったことでそれ以降の挙動を把握できず、Kr3の値を算定しなかった。この回転ばね定数を用いて、MN曲線と耐力曲線の関係を解析的に算定した。なお、断面力については3章1節で記述したように、ケースB-1に限ってはひび割れ発生の状態が異なっている構造系毎に解析を実施し、断面力の増分を従前の系までの値に加えることで評価した。

図-3.12(b)に87.5度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、軸力を導入する以前で、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差している結果が得られた。しかし、実験の観察によると軸力の導入時においてひび割れは発生しておらず、断面の耐力に達している状態であるとは言い難く、載荷形式Aの結果と同様、コンクリートの引張強度等を考慮したうえで耐力曲線を評価する必要があると考えられる。実験においては、図-2.27(f)より87.5度の外縁側で最大で200μ程度の圧縮ひずみを生じ、内縁側でひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と載荷の開始時付近から交差した。

図-3.12(c)に65度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、87.5度の解析結果と同様、軸力を導入する以前で、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と既に交差している結果が得られた。解析結果より、第2ひび割れが発生した時点で軸力と曲げモーメントの関係を表す線分の傾きが第1ひび割れを考慮している時点に比較して若干増加した。これはひび割れの発生に伴い回転しやすい構造となり、軸力が増加するのに対して曲げモーメントの増加が抑制されたことを再現していると考えられる。また、参考として算定した実験によるMN曲線はひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差した。

図-3.12(d)に40度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、最も小さい荷重の場合でのみ、耐力曲線と交差した領域にあったが、荷重の増加により耐力曲線と交差しない領域に変化した。40度付近では回転ばね定数の値により曲げモーメントの変化傾向が特に第2ひび割れが発生した以降で異なる結果が得られた。

(2) ケース B-2 の結果

図-3.13(a)の回転ばね定数と荷重-変位の関係から、Kr1=5MN・m/rad、Kr2=5MN・m/rad、Kr3=1MN・m/rad の場合で実験と解析の変位が概ね一致すると考えられる。なお、回転ばねのすべてをヒンジとした場合の解析結果を示したが、Kr1 と Kr2 がヒンジの場合は解析が可能であったが、Kr1、Kr2 および Kr3 をヒンジとした場合は解析が不可能であった。

図-3.13(b)に 87.5 度における MN 曲線と耐力曲線を示す。解析による MN 曲線は、回転ばねをすべてヒンジとした以外のケースでは、軸力導入以前の時点でひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と既に交差している結果が得られた。しかし、実験の観察によると軸力の導入時の段階ではひび割れが発生していなかった。実験においては、図-2.27(f)より 87.5 度の外縁側で最大で 550μ程度の圧縮ひずみを生じ、内縁側ではひび割れが発生すると考えられる数 100μの引張ひずみが生じた。また、参考として算定した実験による MN 曲線は、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差することはなかった。

図-3.13(c)に 65 度における MN 曲線と耐力曲線を示す。解析による MN 曲線は、回転ばね定数を Kr1=5MN・m/rad、Kr2=5MN・m/rad、Kr3=1MN・m/rad とした場合で、第 1 ひび割れが発生した直後にひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と既に交差する結果が得られた。また、第 2 ひび割れが発生した時点で軸力と曲げモーメントの関係を表す線分の傾きが若干大きくなった。これはひび割れの発生に伴い回転しやすい構造となり、その分だけ曲げモーメントの増加が抑制されたことを再現していると考えられる。実験においては、図-2.27(d)より 65 度の内縁側では最大荷重の時に 1500μ程度の圧縮ひずみを生じ、さらに 1900μ程度まで増加した。また、外縁側ではひび割れが発生すると考えられる数 100μの引張ひずみが生じた。また、参考として算定した実験による MN 曲線は第 3 ひび割れが発生した荷重でひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差した。

図-3.13(d)に 40 度における MN 曲線と耐力曲線を示す。解析による MN 曲線は、第 2 ひび割れが確認された付近の荷重で、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差した。なお、回転ばねをヒンジとした場合について、第 2 ひび割れの発生後～第 3 ひび割れの発生前で曲げモーメントが急激に変化しているが、解析では、105kN/本の載荷までは負の曲げモーメントが増加、すなわち負方向に曲げモーメントが変化していたのに対し、125kN/本の載荷以降では正の曲げモーメントが増加、すなわち正方向に曲げモーメントが変化しており、変形モードが異なった結果が得られたためである。

(3) ケース B-3 の結果

図-3.14(a)の回転ばね定数と荷重-変位の関係から、第 1 ひび割れが発生する程度であれば Kr1=5MN・m/rad、Kr2=5MN・m/rad、Kr3=1MN・m/rad 程度で実験と解析の変位が概ね一致すると考えられるが、載荷が進むにつれて Kr2 が若干低くなった場合のモードが一致しやすいことから、Kr1=5MN・m/rad、Kr2=1MN・m/rad、Kr3=1MN・m/rad についても結果を示した。本ケースでは第1ひび割れ発生時の荷重と第2ひび割れ発生時の荷重の差が小さかった。

図-3.14(b)に 87.5 度における MN 曲線と耐力曲線を示す。解析による MN 曲線は、回転ばねをすべてヒンジとした以外のケースでは、ケース B-2 と同様に軸力導入以前の時点で、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と既に交差している結果が得られた。しかし、実験の観察によれば軸力の導入時ではひび割れは発生していなかった。実験においては、図-2.27(f)より 87.5 度の外縁側で最大で 350μ程度の圧縮ひずみを生じ、内縁側ではひび割れが発生すると考えられる数 100μの引張ひずみが生じている状態であった。また、参考として

算定した実験によるMN曲線は、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差することはなかった。

図-3.14(c)に65度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、Kr2=5MN・m/radの場合はひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差したが、Kr2=1MN・m/radの場合には交差しなかった。実験においては、図-2.27(d)より65度の内縁側では最大荷重の時に500μ程度の圧縮ひずみを生じ、外縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は耐力曲線と交差しなかった。

図-3.14(d)に40度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は回転ばねをヒンジと仮定した場合以外では耐力曲線と交差しなかった。またKr2の差によって、MN曲線の変化の傾向に若干の差が見られた。

(4) ケースB-4の結果

ケースB-4の実験では最大荷重が得られたと同時に荷重が低下したことにより、解析上でKr3の影響を検討することが出来なかったため、Kr2までの解析を行った。図-3.15(a)の回転ばね定数と荷重-変位の関係から、Kr1=5MN・m/rad、Kr2=1MN・m/radの場合で実験と解析の変位が概ね一致すると考えられるが、載荷が進むにつれてKr1が若干低くなった場合のモードが一致しやすいことから、Kr1=1MN・m/rad、Kr2=1MN・m/radについても結果を示した。

図-3.15(b)に87.5度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、回転ばねをすべてヒンジとした以外のケースでは、ケースB-2やB-3と同様に軸力導入以前の時点でひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と既に交差している結果が得られた。しかし、実験の観察によると軸力の導入時の段階ではひび割れが発生していなかった。実験においては、図-2.27(f)より87.5度の外縁側で最大で150μ程度の圧縮ひずみを生じ、内縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差することはなかった。

図-3.15(c)に65度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、回転ばねを考慮しない場合を除いて、第1ひび割れが発生した後にひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差した。実験においては、図-2.27(d)より65度の内縁側では最大荷重の時に300μ程度の圧縮ひずみを生じた。また、65度の外縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じている状態であった。また、参考として算定した実験によるMN曲線は耐力曲線と交差しなかった。

図-3.15(d)に40度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、回転ばねをヒンジと仮定した場合以外では耐力曲線と交差しなかった。ケースB-3の場合と同様に、Kr2の値によって、MN曲線の変化の傾向に若干の差が見られた。

(5) ケースB'-1の結果

図-3.16(a)の回転ばね定数と荷重-変位の関係から、Kr1=1MN・m/rad、Kr2=1MN・m/rad、Kr3=1MN・m/rad程度で実験と解析の変位が概ね一致すると考えられるが、Kr1=1MN・m/radのみを考慮した場合の結果についても記した。本ケースでは変位の実験値の変化が緩やかであったが、ひび割れの発生が変位結果に顕著に表れたケースであった。

図-3.16(b)に87.5度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、回転ばねをすべてヒンジとした以外のケースでは、ケースB-2やB-3と同様に軸力導入以前の時点でひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と既に交差する結果が得られた。しかし、実験の観察によると軸力の導入時の段階ではひび割

れが発生していなかった。実験においては、図-2.27(f)より87.5度の外縁側で最大でも450μ程度の圧縮ひずみを生じ、内縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は、ひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差することはなかった。

図-3.16(c)に65度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、回転ばねを考慮しない場合を除いて、第1ひび割れが発生した直前にひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差した。実験においては、図-2.27(d)より65度の内縁側では緩やかに圧縮ひずみが増加する結果が得られていたが、外縁側ではひび割れが発生すると考えられる数100μの引張ひずみが生じた。また、参考として算定した実験によるMN曲線は耐力曲線と交差しなかった。

図-3.16(d)に40度におけるMN曲線と耐力曲線を示す。解析によるMN曲線は、回転ばねをヒンジと仮定した場合以外では耐力曲線と交差することはなかった。

(6)載荷形式B・載荷形式B'の解析結果のまとめ

87.5度については、解析値はケースB-4を除いてひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られた。しかし、その耐力曲線と交差したのが第1ひび割れの発生する以前であり、解析結果と実験の観察結果には差異が認められた。よって、コンクリートの引張強度や、回転ばね定数の設定といった点で、載荷形式Aの結果と同様、検討を加える必要がある。65度については、解析値は、各ケースで同一の結果は得られず、第1ひび割れ確認前～第2ひび割れ確認後にひび割れ深さが限界に達することにより決定される耐力曲線と交差する結果が得られた。コンクリートの引張強度を考慮すれば、グラフ上に示した耐力曲線が現在の状態よりも右、すなわち軸力が0の場合で曲げモーメントが現在より大きい値で得られると考えられる。よって、ひび割れ深さが限界に達したと評価されるのは第2ひび割れが確認される以降程度になると考えられ、耐力の判定の精度が向上すると考えられる。さらに、40度については解析値のみ算定したが、特に回転ばねをヒンジとしたケースでは曲げモーメントの正負が変わる傾向が見られた。

表-3.4(b)に載荷形式Bの各ケースにおいて得られた回転ばね定数の値を示す。これよりプレーンコンクリートであるケースB-1と供試体の厚さが薄いケースB'-1以外については概ね同一の回転ばね定数となった。回転ばね定数が小さいことは、ひび割れが発生した構造系が回転しやすい、すなわち変形しやすいことを示すと考えられることから、供試体の厚さが薄いケースB'-1の回転ばね定数が低いことは実際の現象と比較的再現できていると考えられる。ただし、繊維長や繊維の種類の差を回転ばね定数で再現することは困難であった。ケースB-1では、回転ばね定数の算定にあたって他のケースと方法が異なることや、他の4ケースに比較して地盤反力ばね定数が大きいこと、さらに、ひび割れ発生時に荷重が低下しており、その荷重の低下の度合いは周囲のジャッキの拘束や材料のばらつきによる影響を受けやすいと考えられることから比較には注意を要する。

表-3.4(b)　回転ばね定数の解析結果(載荷形式B)

ケース		B-1	B-2	B-3	B-4	B'-1
Kr結果	(MN・m/rad)	10	5	5	5or1	1
Kr2結果	(MN・m/rad)	10	5	5or1	1	1
Kr3結果	(MN・m/rad)	-	1	1	-	1

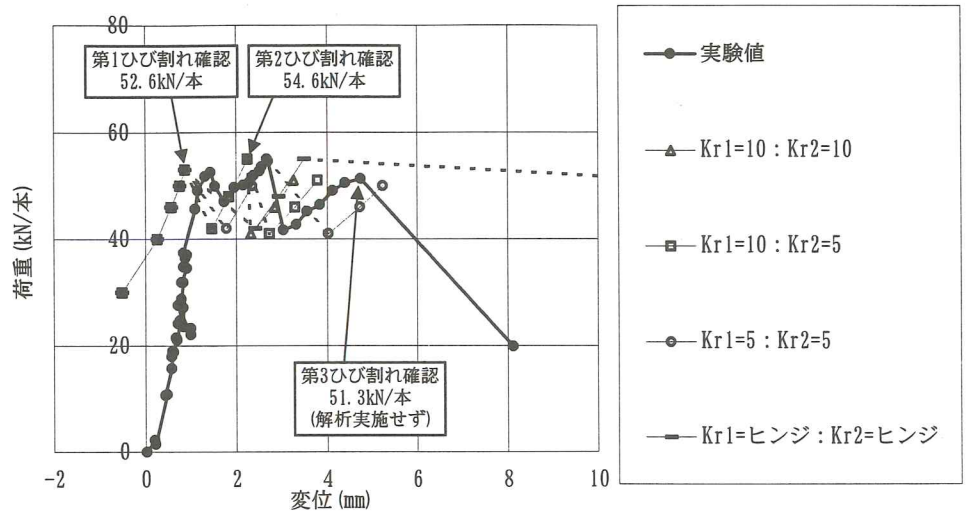


図-3.12(a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係(ケースB-1)

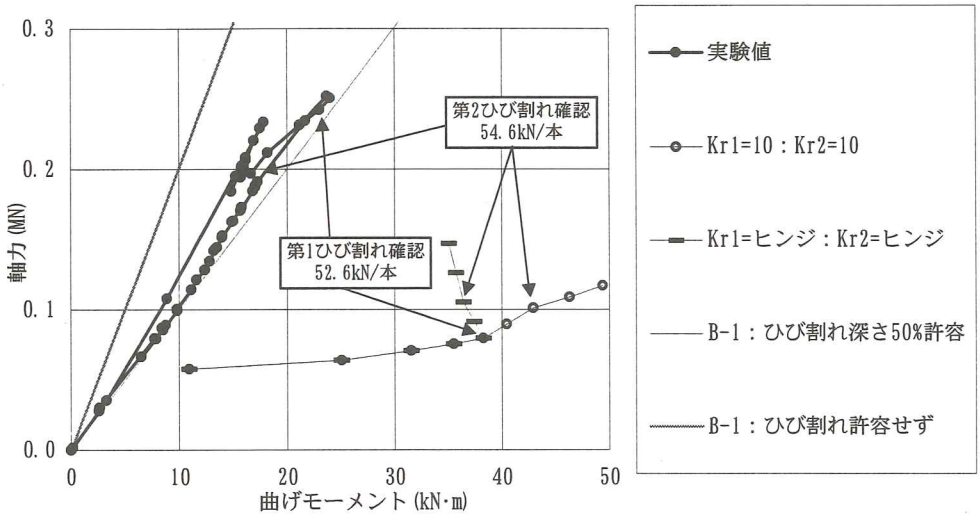


図-3.12(b)　断面力変化図(87.5度，ケースB-1)

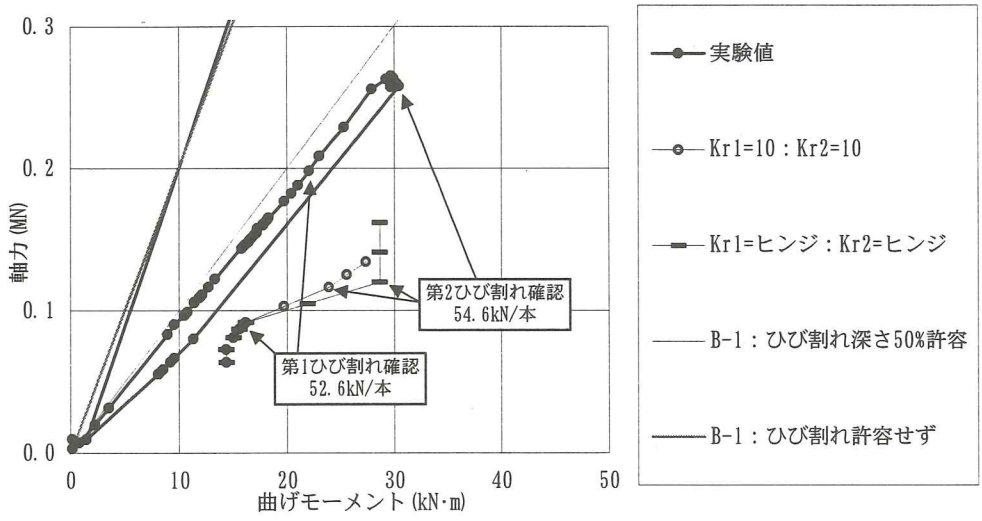


図-3.12(c)　断面力変化図(65.0度，ケースB-1)

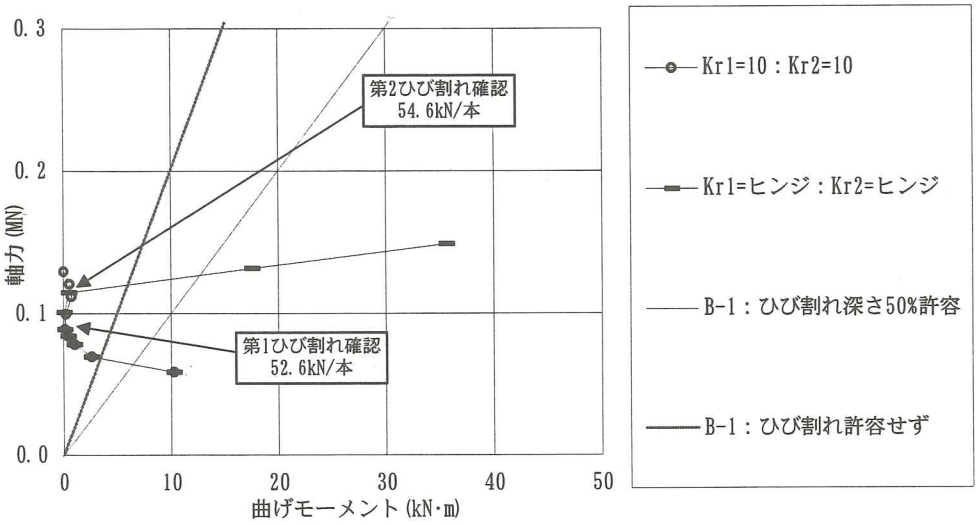


図-3.12(d)　断面力変化図(40.0度，ケースB-1)

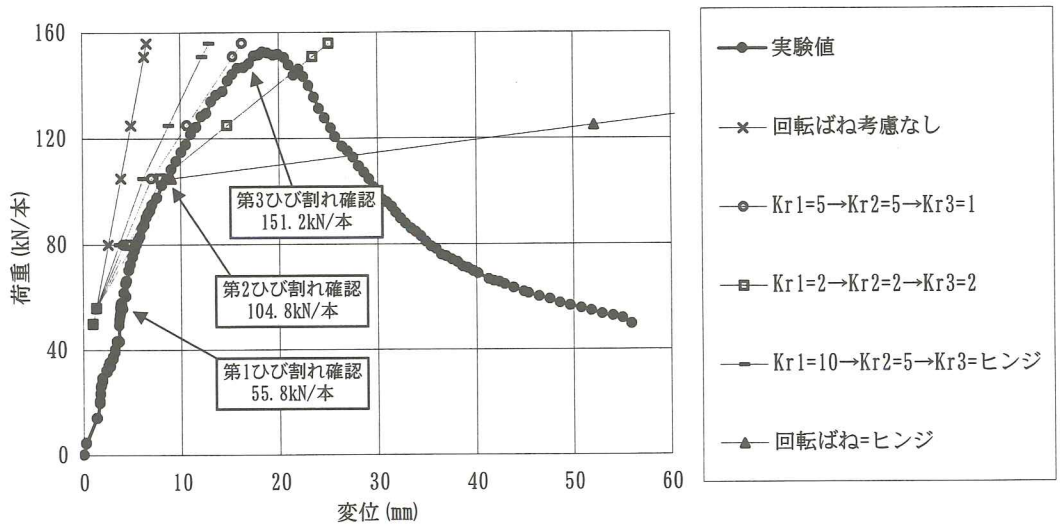


図-3.13(a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係(ケースB-2)

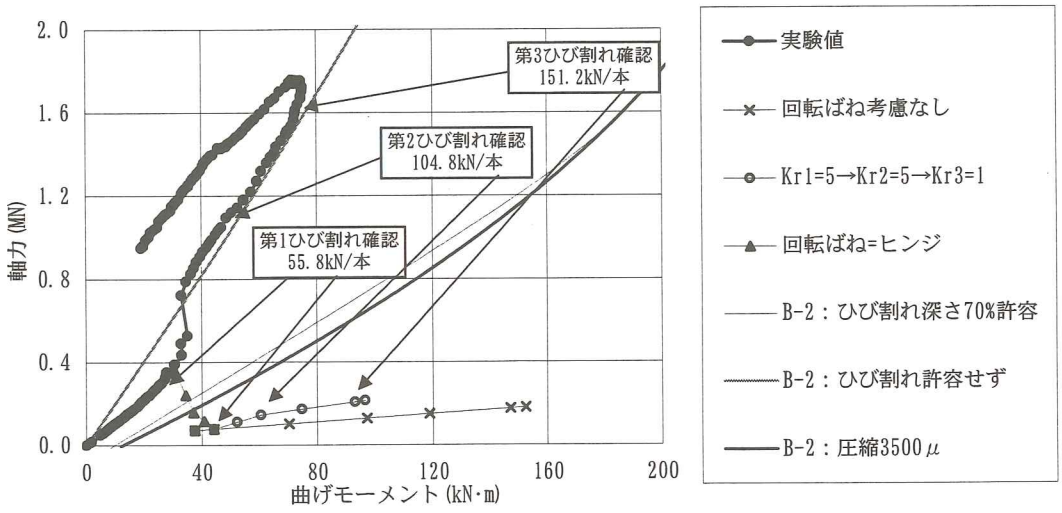


図-3.13(b)　断面力変化図(87.5度，ケースB-2)

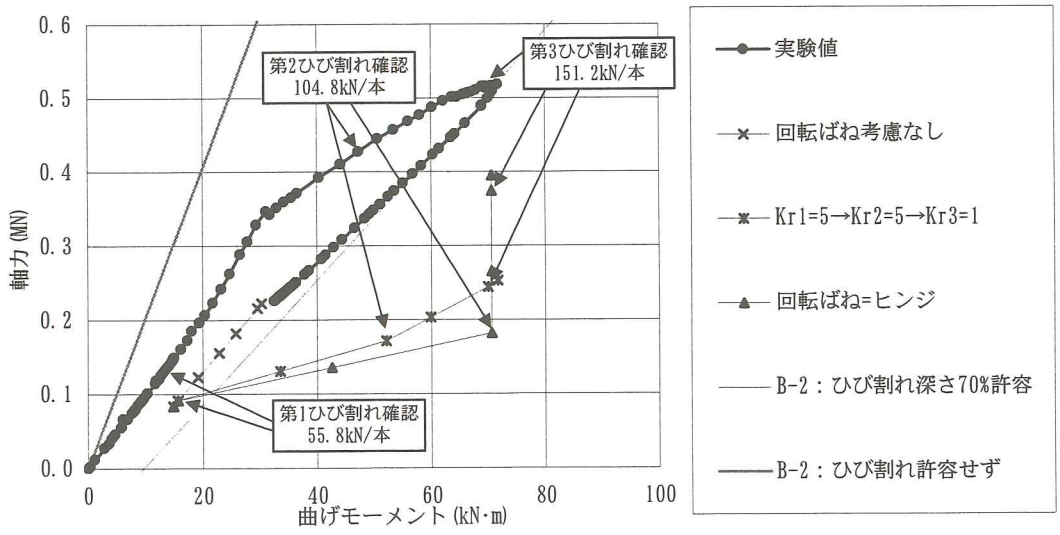


図-3.13(c)　断面力変化図(65.0度，ケースB-2)

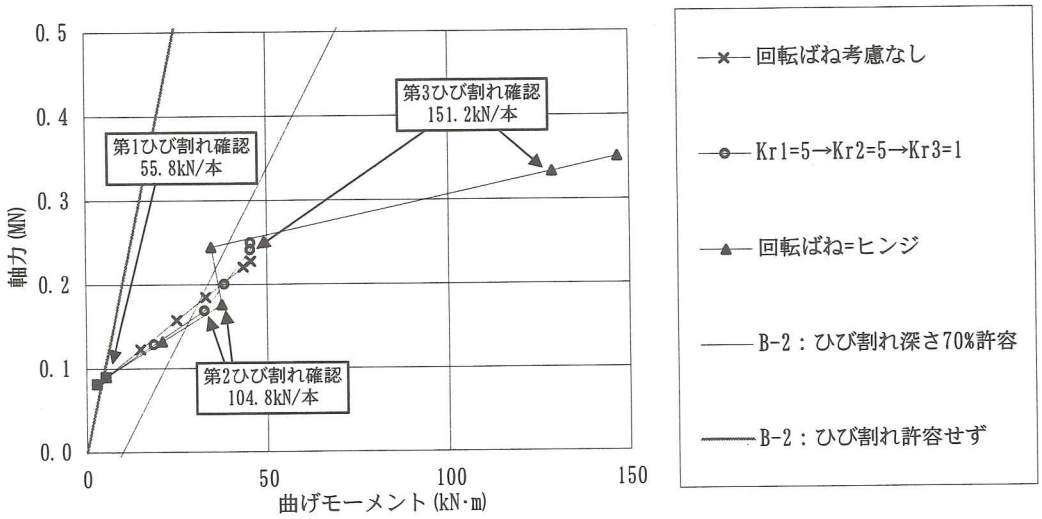


図-3.13(d)　断面力変化図(40.0度，ケースB-2)

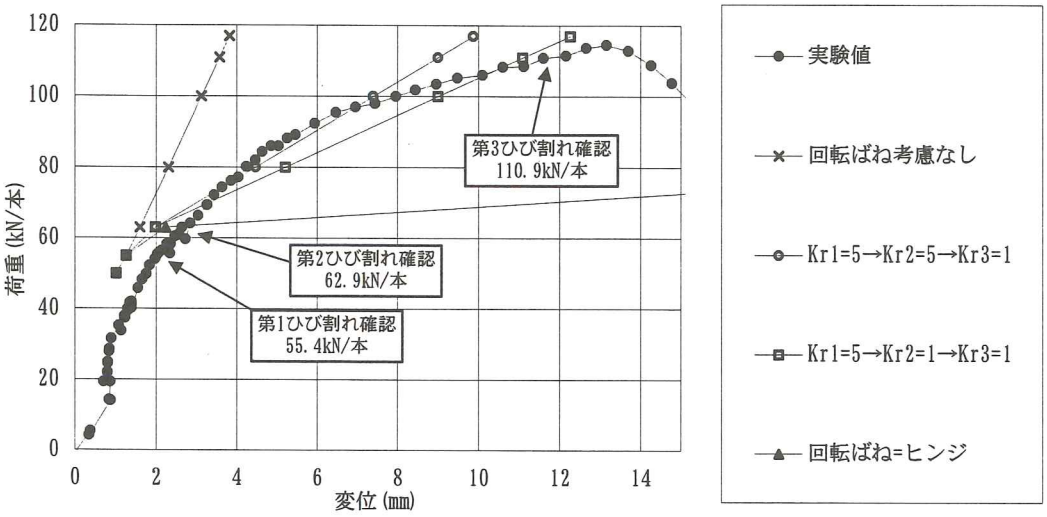


図-3.14(a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係(ケースB-3)

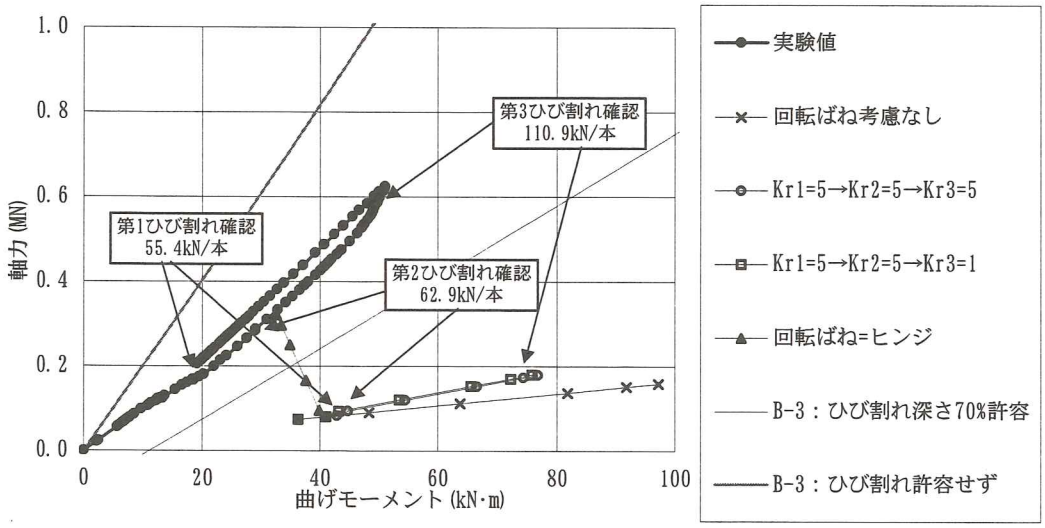


図-3.14(b)　断面力変化図(87.5度，ケースB-3)

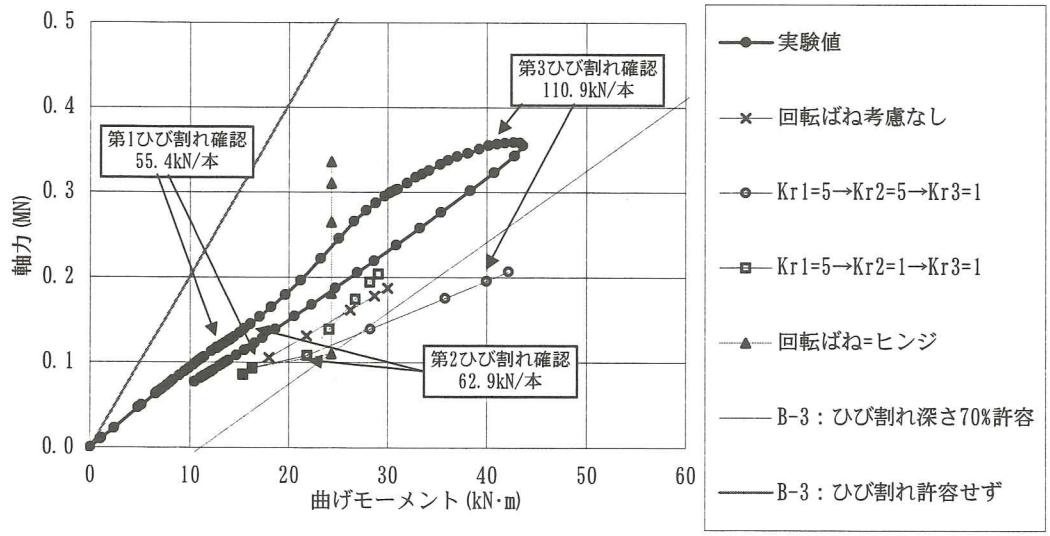


図-3.14(c)　断面力変化図(65.0度，ケースB-3)

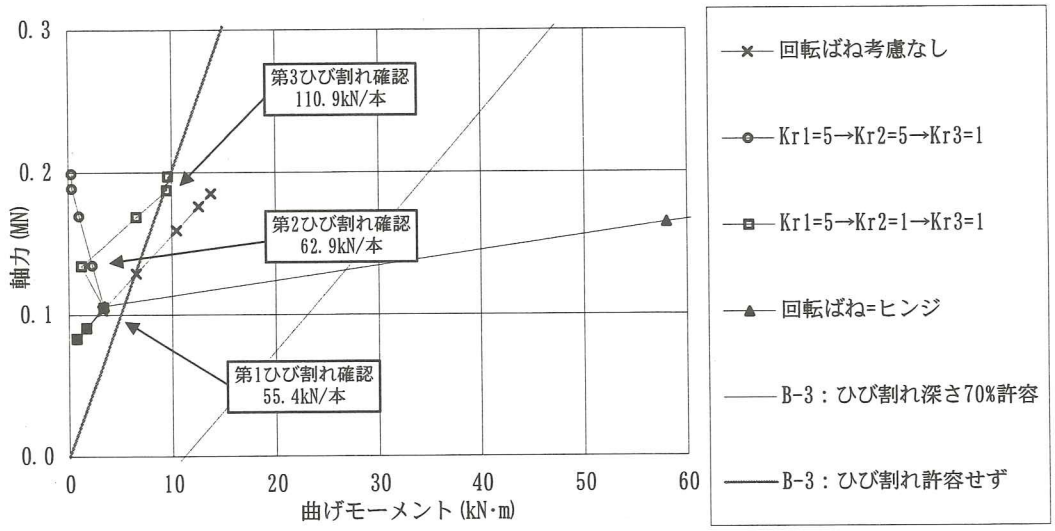


図-3.14(d)　断面力変化図(40.0度，ケースB-3)

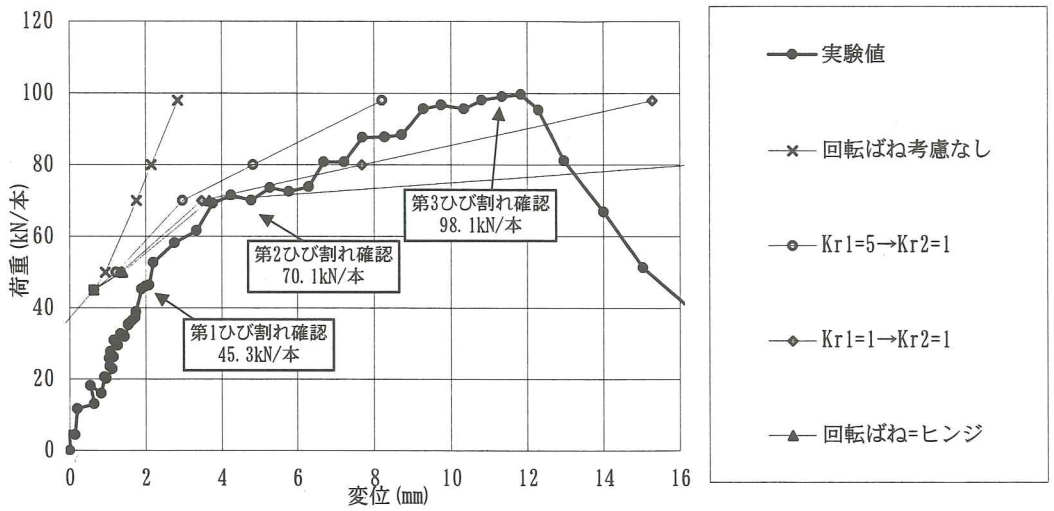


図-3.15(a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係(ケースB-4)

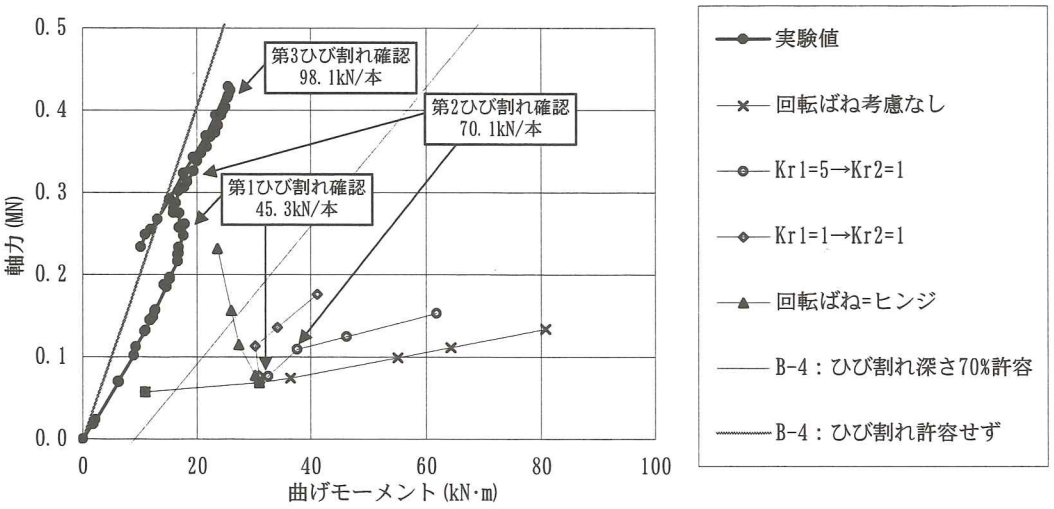


図-3.15(b)　断面力変化図(87.5度，ケースB-4)

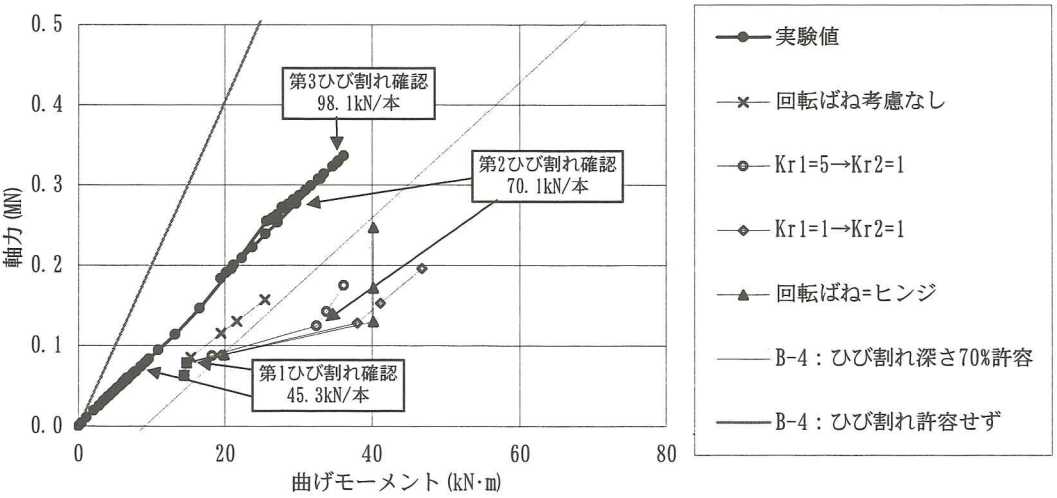


図-3.15(c)　断面力変化図(65.0度，ケースB-4)

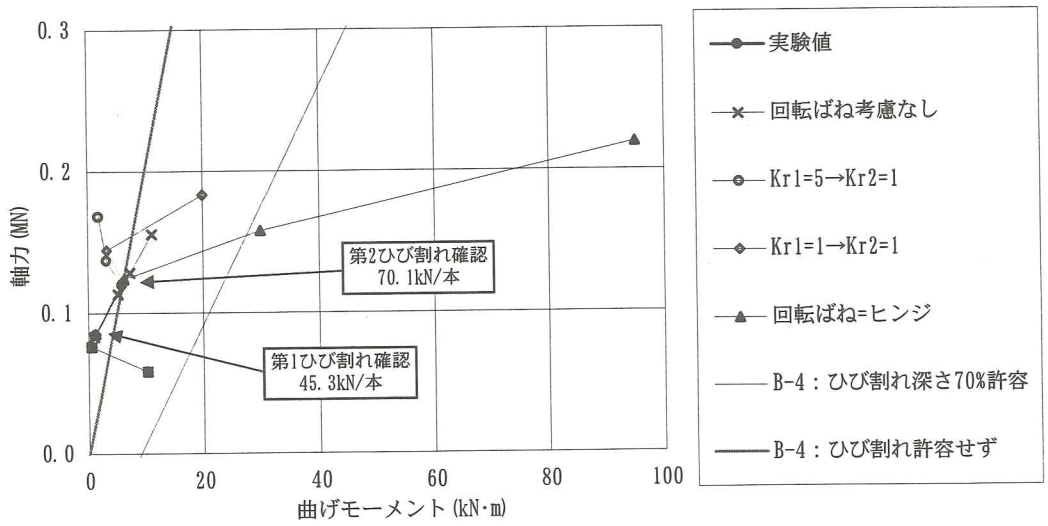


図-3.15(d)　断面力変化図(40.0度，ケースB-4)

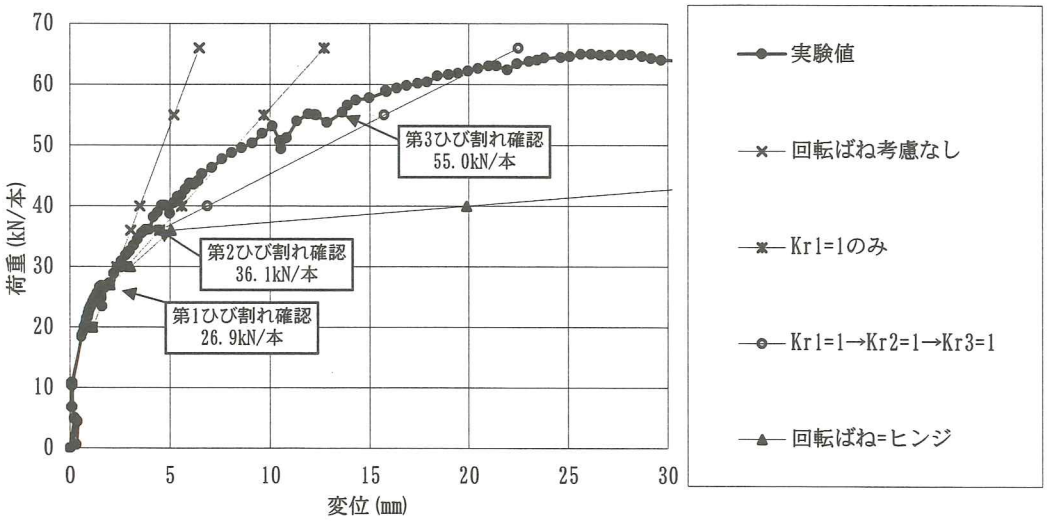


図-3.16 (a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係 (ケースB'-1)

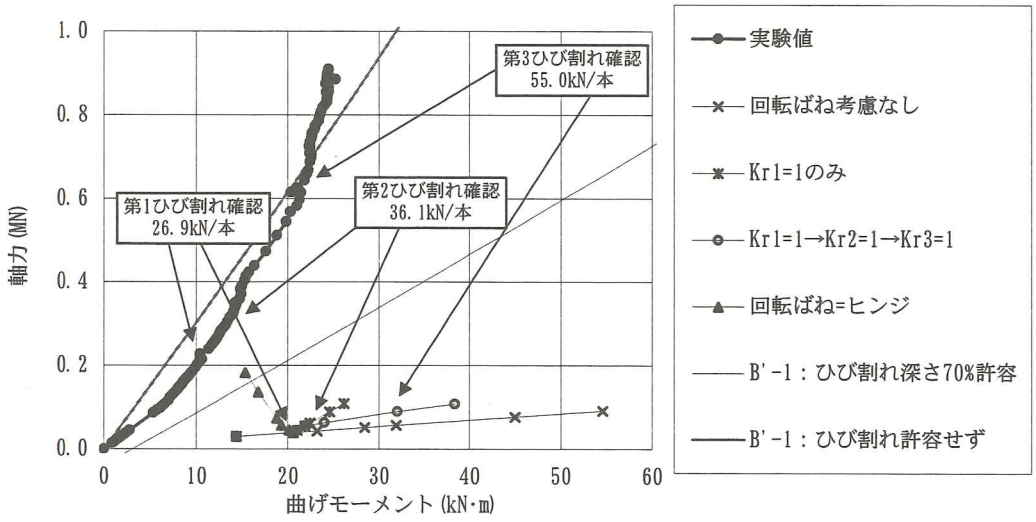


図-3.16 (b)　断面力変化図 (87.5度，ケースB'-1)

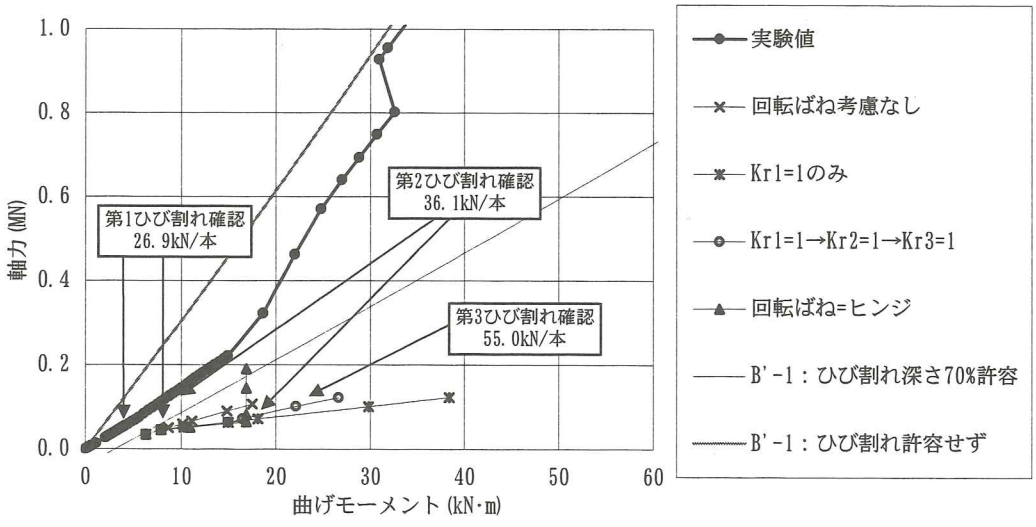


図-3.16 (c)　断面力変化図 (65.0度，ケースB'-1)

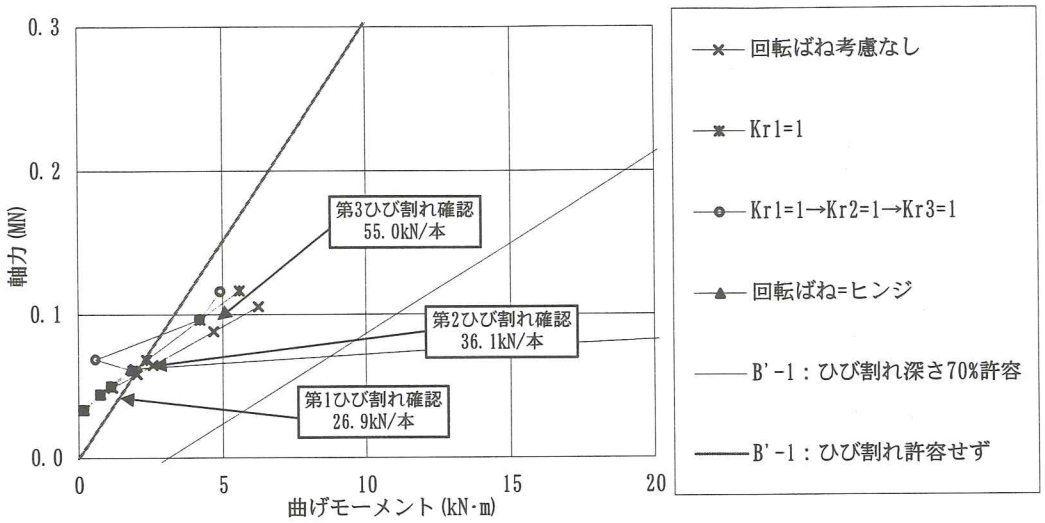


図-3.16(d)　断面力変化図(40.0度，ケースB'-1)

3.3.3　載荷形式Cによる各ケースの解析結果

載荷形式Cの場合は、供試体のひび割れが観察されず、全断面で圧縮の状態になっていたと考えられる。そのためひび割れを考慮した回転ばねは考慮しない解析値と実験値との比較を行った。断面力の変化の関係については、載荷形式Aで比較に用いた87.5度と65度、それに加えて載荷形式B・B'で用いた40度、さらに載荷形式Cで実際に破壊が発生した5度の断面力変化図を示した。

(1) ケースC-1の結果

図-3.17(a)より実験値の方が傾きが若干小さい結果が得られた。傾向は概ね一致したが、解析に用いた供試体のヤング係数と載荷実験を実施した時のヤング係数にずれがあったものと考えられる。また、実験値と解析値による断面力を比較すると、傾向は概ね一致したが、解析値よりも実験値で断面力が大きい傾向が全体的に見られた。特に脚部では実験値が解析値よりも断面力が非常に大きく算定された。これについては荷重の微妙なアンバランスに加えて、支承の影響などがあると考えられる。供試体の破壊の状態については圧縮の限界による破壊であることを解析によっても再現が可能であった。

(2) ケースC-2の結果

図-3.18(a)より、解析値が実験値よりも若干小さい値が得られたが、荷重-変位曲線の傾きは概ね等しいと考えられ、実験時での載荷初期の供試体のわずかなずれによる影響であると考えられる。また、実験値と解析値による断面力を比較すると、ケースC-1と同様に傾向は概ね一致したものの、解析値よりも実験値で断面力が大きい傾向が全体的に見られた。ただし、供試体の破壊の状態については圧縮の限界による破壊であることを再現できた。

3.4　解析結果のまとめ

これまでの解析結果についてまとめると以下のようなことが分かった。

- 供試体の材料の差はひび割れを考慮した回転ばね定数の差に与える影響は小さいことが分かった。
- 載荷形式Cのような全断面圧縮でひび割れが発生しない場合、断面の一端の縁が圧縮の限界に達して耐力が決定されることが再現できることが分かった。
- 実験等によるデータの存在や、覆工に作用している軸力等の把握を行うことが必要であるが、回転ばね定数の設定が可能であれば、断面が耐力に達するモードを再現できることが分かった。

また、以下に解析を踏まえた課題を示す。

- 構造の変形を忠実に再現するためには回転ばね定数の算定方法を検討する必要がある。
- 耐力曲線を算定する場合のコンクリートの引張領域・引張強度等の設定について検討する必要がある。

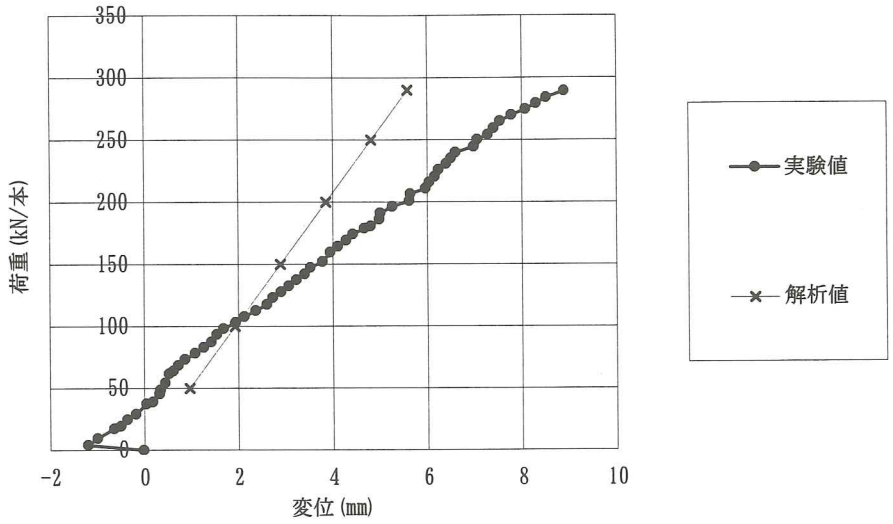


図-3.17 (a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係 (ケースC-1)

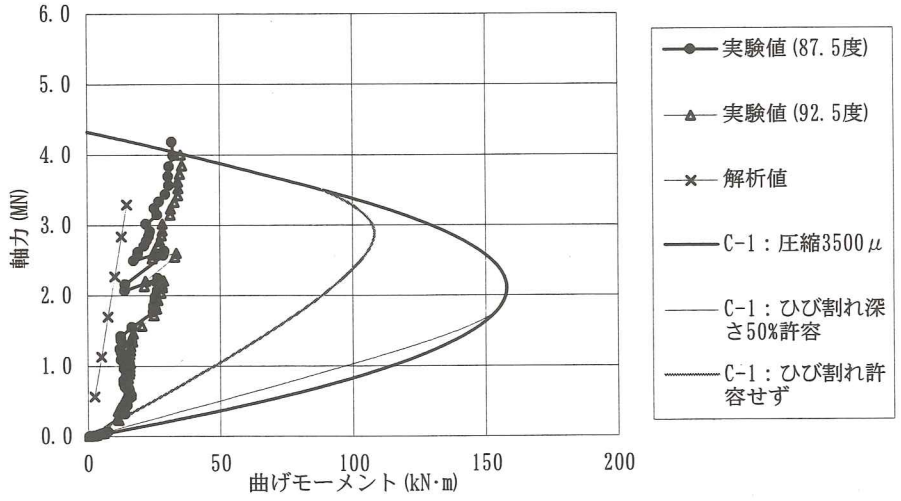


図-3.17 (b)　断面力変化図 (87.5度/92.5度，ケースC-1)

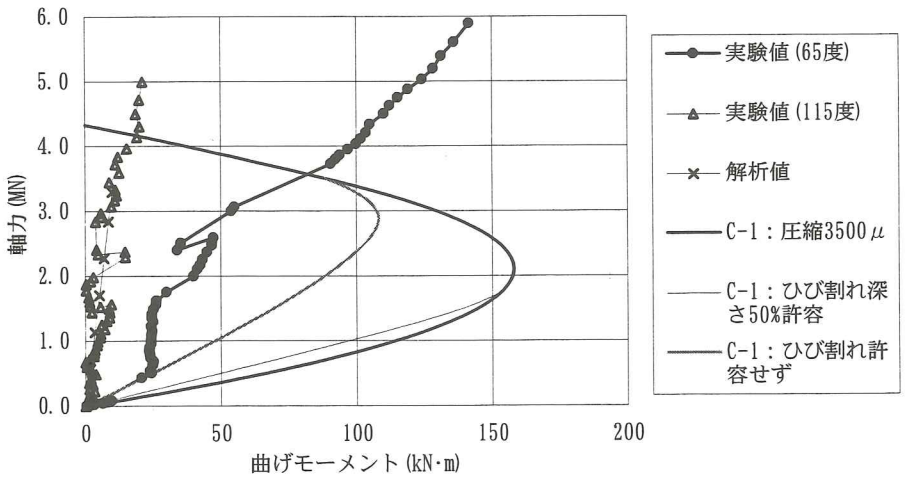


図-3.17 (c)　断面力変化図 (65度/115度，ケースC-1)

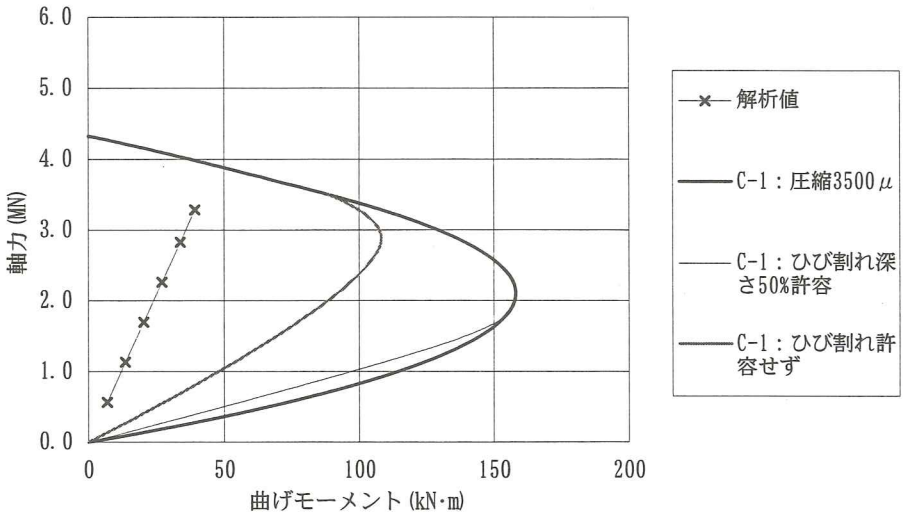


図-3.17 (d)　断面力変化図 (40.0度，ケースC-1)

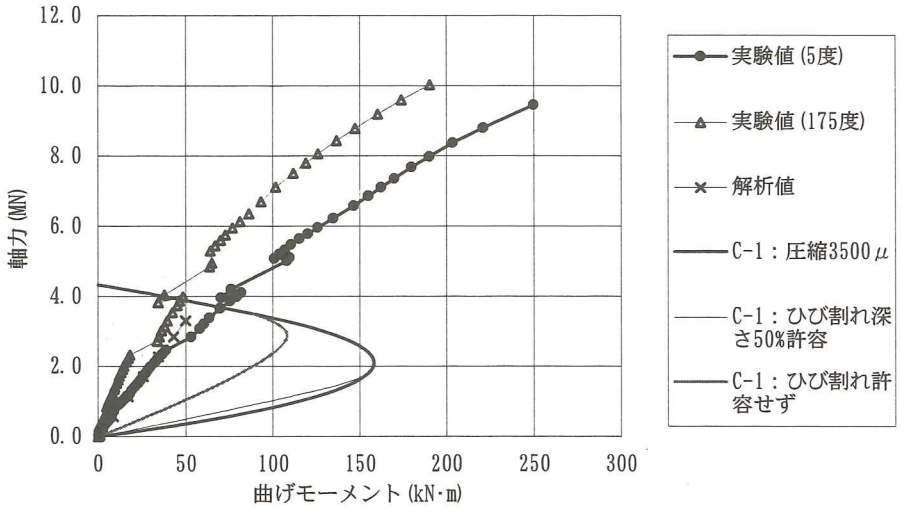


図-3.17 (e)　断面力変化図 (5度/175度，ケースC-1)

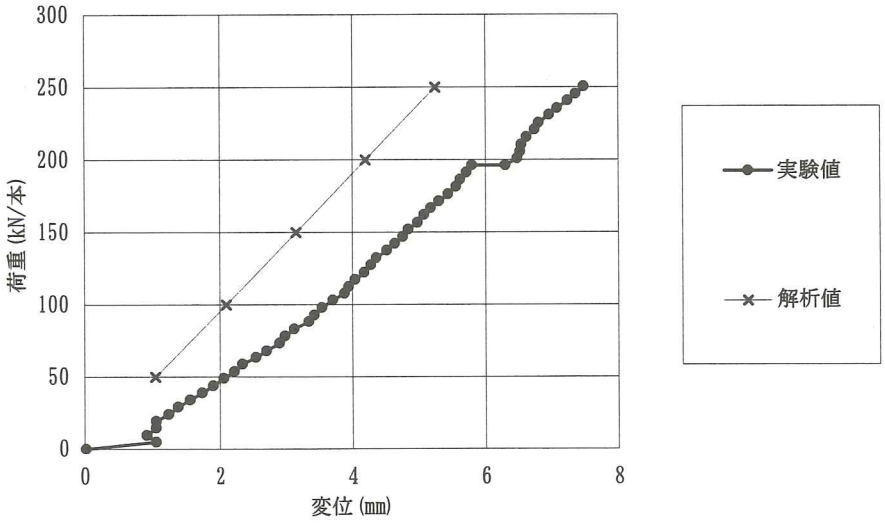


図-3.18 (a)　回転ばね定数と荷重-変位の関係 (ケースC-2)

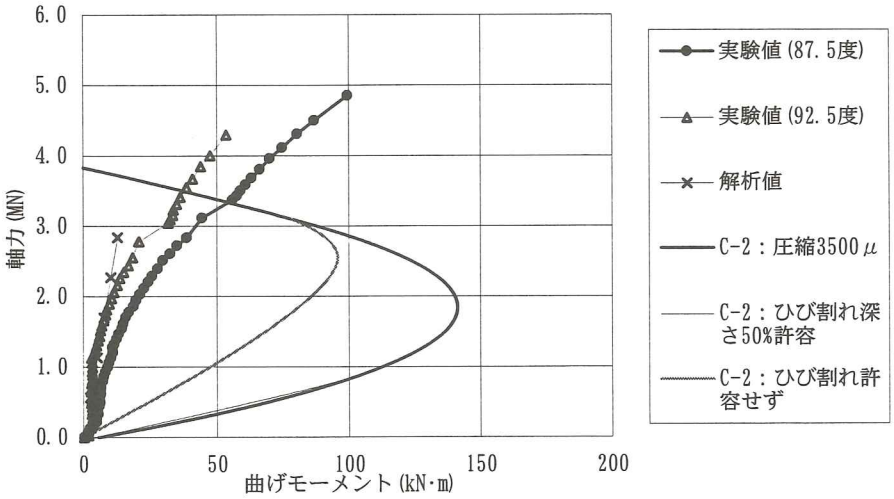


図-3.18 (b)　断面力変化図 (87.5度，ケースC-2)

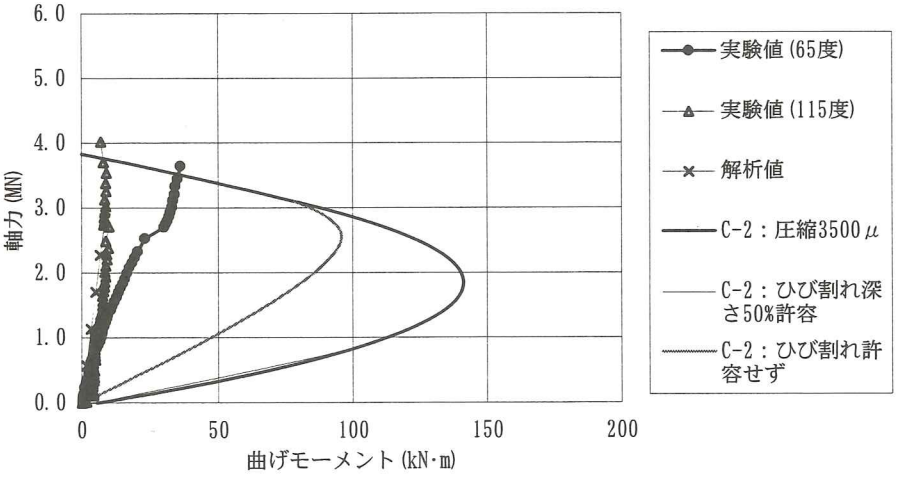


図-3.18 (c)　断面力変化図 (65.0度，ケースC-2)

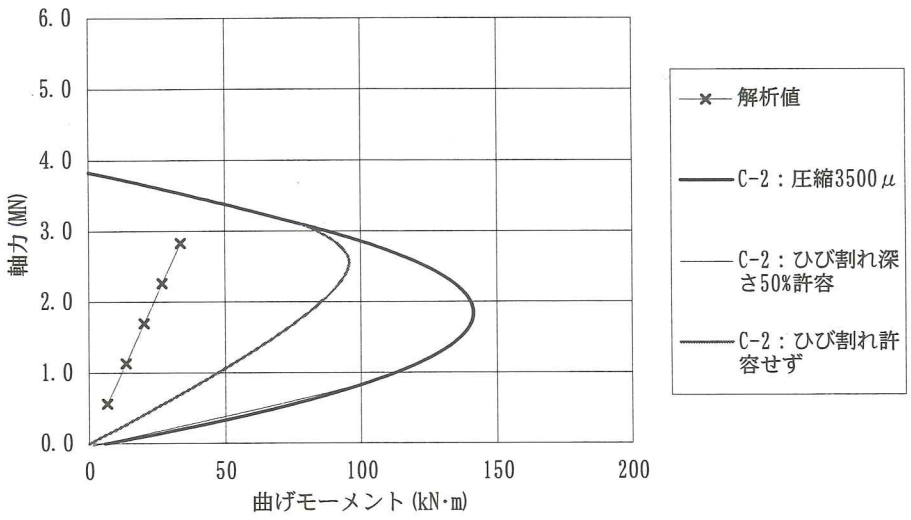


図-3.18 (d)　断面力変化図 (40.0度，ケースC-2)

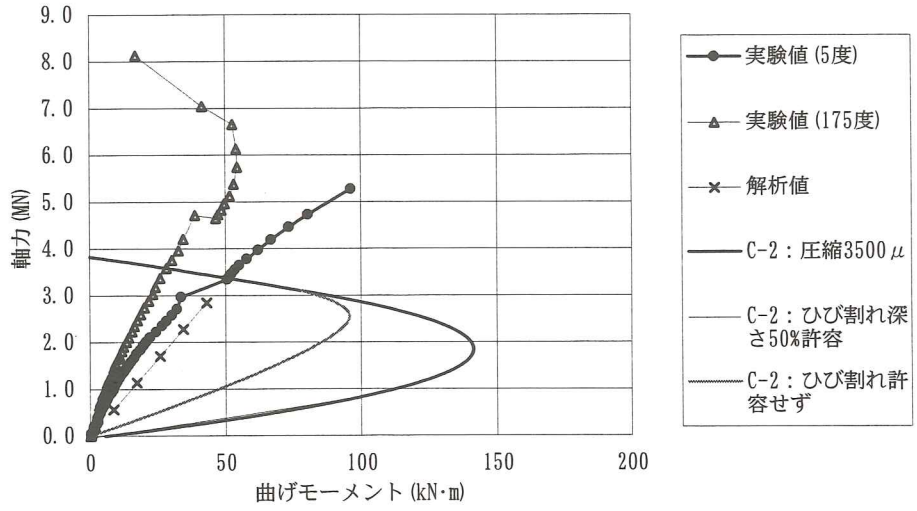


図-3.18 (e)　断面力変化図 (5.0度，ケースC-2)

4．結論と今後の課題

本研究では主としてトンネル覆工の薄肉化に関する検討を行うために、実大規模のトンネル覆工載荷実験を行い、基礎データの収集を行った。また、その実験結果に基づきフレーム解析を行い、覆工の挙動に関する検討を加えた。本実験および解析の結果から得られた結論は以下のとおりである。

(1)　供試体に初めてひび割れが入ってから実際にトンネルが破壊、もしくは載荷可能な最大荷重に達するまでの荷重の差は大きい場合もあり、その傾向は荷重条件によって異なることが分かった。

(2)　供試体が破壊するとき、プレーンコンクリートを用いた供試体では材料の剥落が見られたのに対し、鋼繊維補強コンクリートを用いた供試体では、供試体の剥落は見られなかった。

(3)　鋼繊維補強コンクリートではプレーンコンクリートの場合と異なり、ひび割れが分散して発生した。

(4)　鋼繊維による補強効果が明確に表れやすい載荷形式と表れにくい載荷形式があることが分かった。すなわち、曲げモーメントが卓越する載荷形式の場合では鋼繊維補強コンクリートではプレーンコンクリートの場合よりも載荷が可能な最大荷重が大きくなることが実験的に分かった。軸力が卓越する載荷形式の場合では鋼繊維の混入を行っても載荷が可能な最大荷重は増加せず、構造物の耐荷力の観点からは特性は改善されないが、剥落抑制の効果はあると判断された。

(5)　構造の耐荷力は載荷形式Ａでは肩部の第２ひび割れが発生した付近で軸力が大きくなることによる圧縮破壊によって決定されたが、載荷形式Ｂおよび載荷形式Ｂ'では40°付近に発生した第３ひび割れ以降で荷重が上昇せず、構造の不安定により耐荷力が決定された。さらに載荷形式Ｃでは断面の圧縮破壊により耐荷力が決定されることが分かった。

(6)　鋼繊維の長さを短くした場合は、耐荷力が低下するとともに耐荷力に達した後の荷重の低下が急になることから、ひび割れ発生後の抵抗力が小さくなることが分かった。

(7)　同じ混入率の樹脂繊維を用いた場合は鋼繊維を用いた場合と比較して、耐荷力が低下するとともに耐力に達した後の荷重の低下が急になることが分かった。

(8)　ひび割れを回転ばねに模擬したフレーム解析では、解析によって得られた断面力と耐力曲線の関係より種々の載荷条件下での断面の破壊状態や構造物が不安定になる状態を再現できた。

また、本実験および解析結果に基づく今後の課題は以下のとおりである。

①　覆工の断面の耐荷力と覆工の系全体としての耐荷力との関連性が荷重状態により異なることが考えられるため、種々の荷重条件を考慮した実験および解析による検証が必要である。すなわち、覆工への作用が可能な最大荷重と破壊およびひび割れの状況との関連性を検証する必要がある。

②　実験で得られたひずみを元にした軸力と曲げモーメントの値は解析値とは合致していないことから、実験により得られた断面力から耐荷力を算定するためには検討が必要である。

③　解析でひび割れの影響を考慮する場合は、ひび割れ自体の挙動が系全体の挙動に影響を及ぼすため、その適切な把握が重要である。特にフレーム解析では、構造の変形を断面力の観点からも再現でき、軸力や地山条件

の影響を考慮した回転ばね定数の算定方法を検討する必要がある。

④　ひび割れの発生後の、構造系としての最終耐力を求める方法を検討する必要がある。

⑤　断面の耐力曲線を算定する際のコンクリートの引張領域・引張強度の設定について検討する必要がある。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)、1996

2) 鋼材倶楽部 SFRC 構造設計施工研究会：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル(トンネル編)、1995

3) 併進工法設計施工研究委員会：併進工法設計施工法(都市トンネル編)、1992

4) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案)、1999

謝辞

本報告は、トンネル研究室に交流研究員として在籍している義永茂司氏(在籍期間平成 12 年度)に実験および解析の際のアドバイスおよび解析に協力いただいた。ここに謝意を表する。

参考資料

１．各断面の荷重－ひずみデータ

２．各ケースの材料試験結果

参考資料１．各断面の荷重－ひずみデータ

各ケースにおける各断面の荷重－ひずみデータを以下のとおり示す。

図-参. 1 (a) ～ (r) ：ケース A-1

図-参. 2 (a) ～ (r) ：ケース A-2

図-参. 3 (a) ～ (r) ：ケース A-3

図-参. 4 (a) ～ (r) ：ケース B-1

図-参. 5 (a) ～ (r) ：ケース B-2

図-参. 6 (a) ～ (r) ：ケース B-3

図-参. 7 (a) ～ (r) ：ケース B-4

図-参. 8 (a) ～ (r) ：ケース B'-1

図-参. 9 (a) ～ (r) ：ケース C-1

図-参. 10 (a) ～ (r) ：ケース C-2

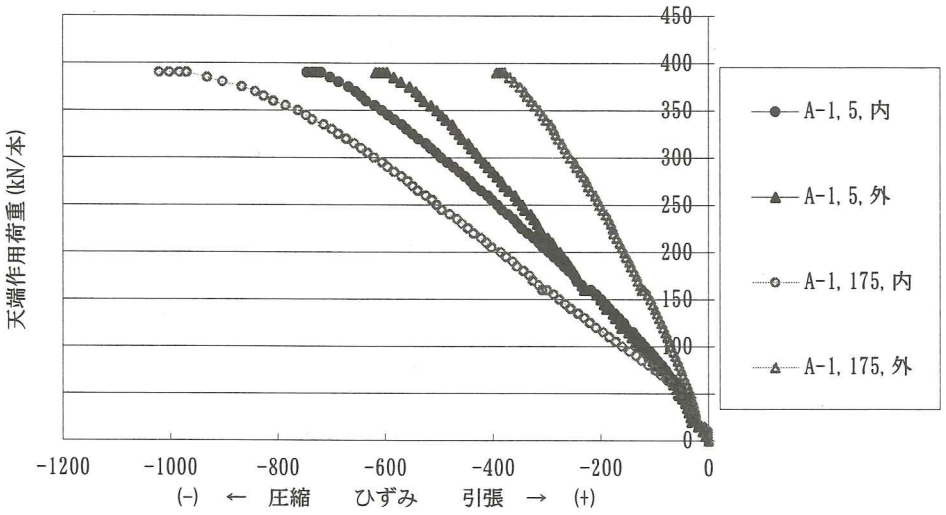


図-参. 1 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 5度・175度, 高さ50cm)

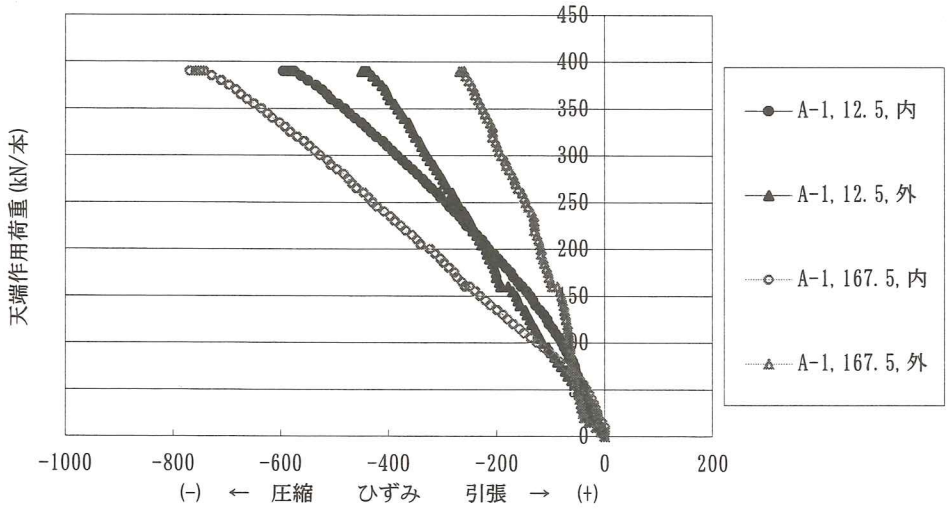


図-参. 1 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 12. 5度・167. 5度, 高さ50cm)

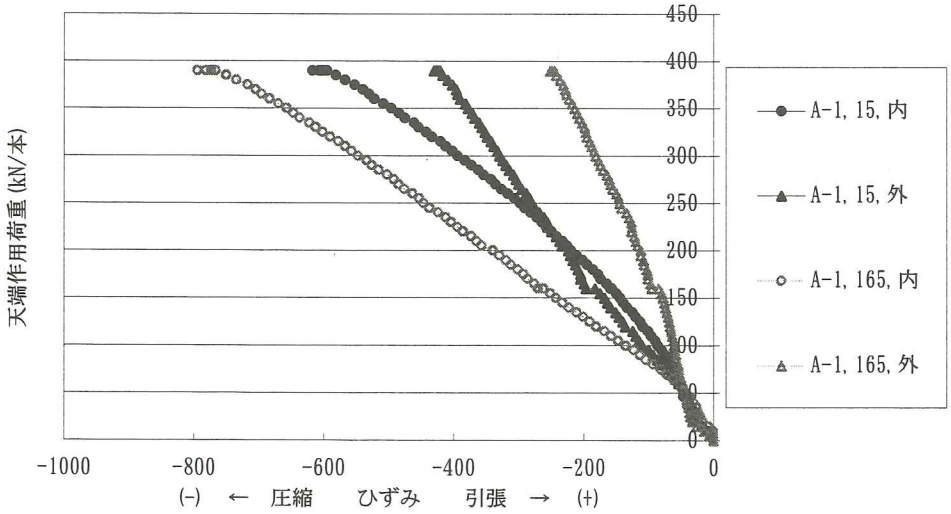


図-参. 1 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 15度・165度, 高さ50cm)

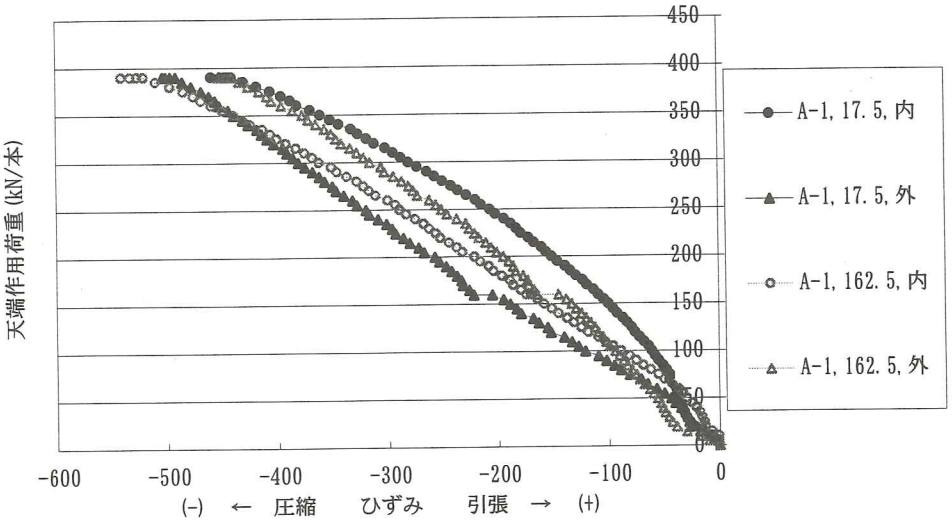


図-参. 1 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

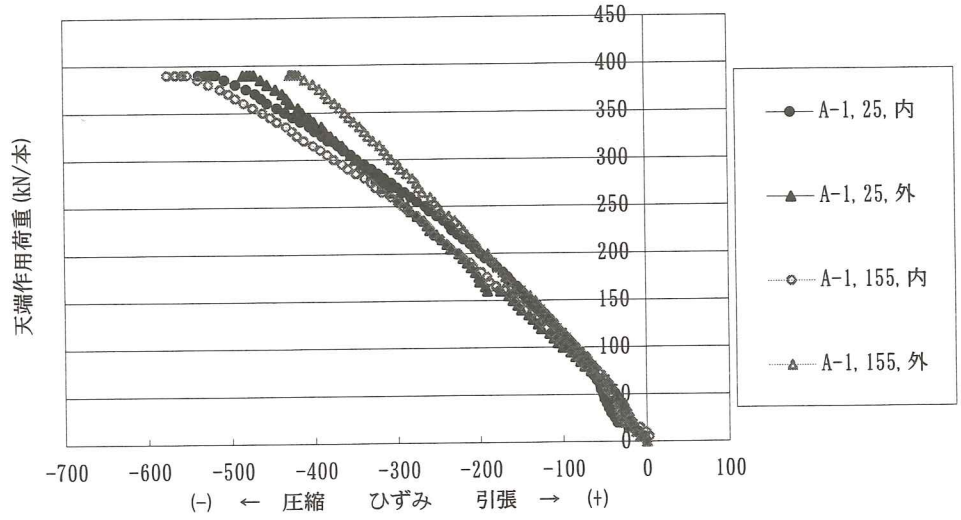


図-参. 1 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 25度・155度, 高さ50cm)

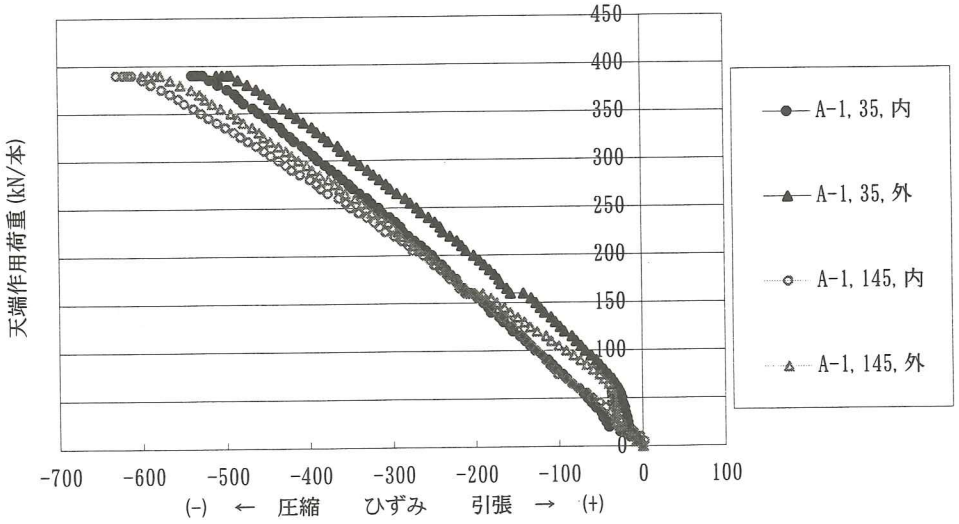


図-参. 1 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 35度・145度, 高さ50cm)

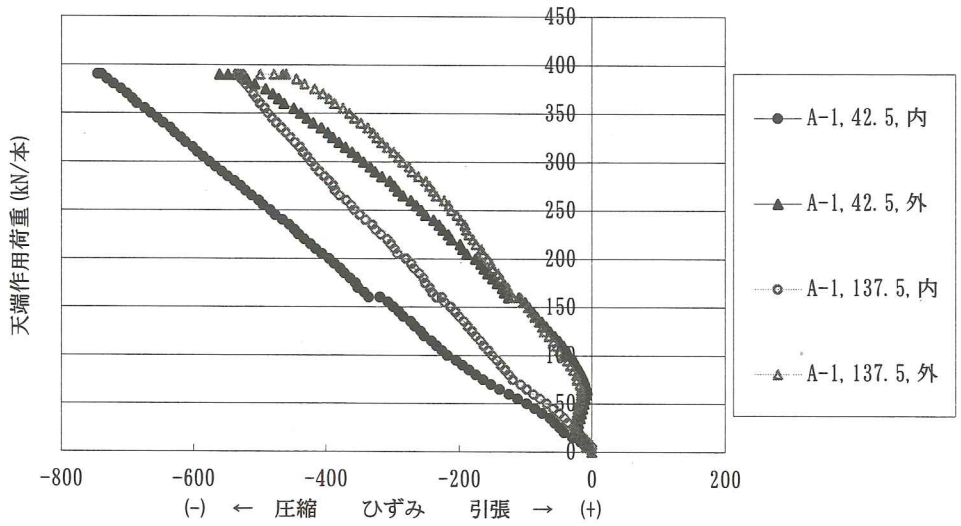


図-参. 1 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 42.5度・137.5度, 高さ50cm)

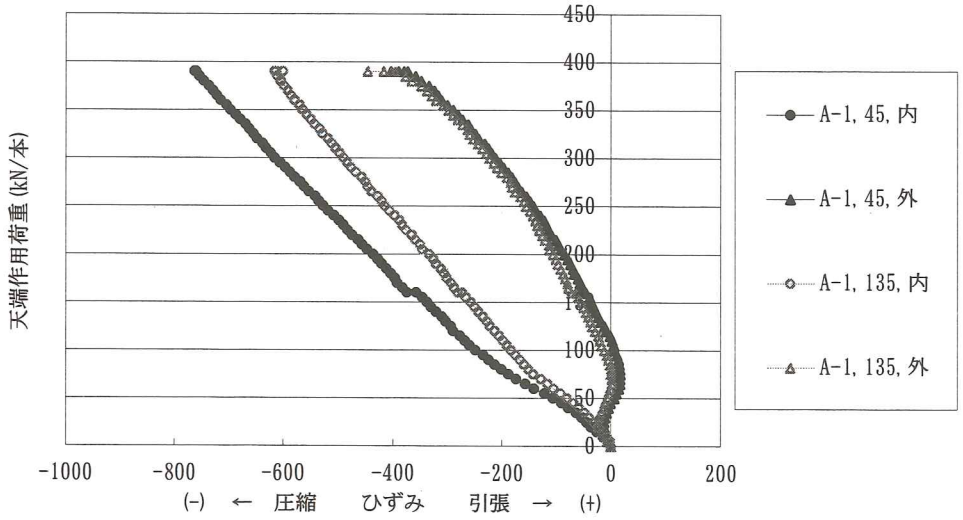


図-参. 1 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 45度・135度, 高さ50cm)

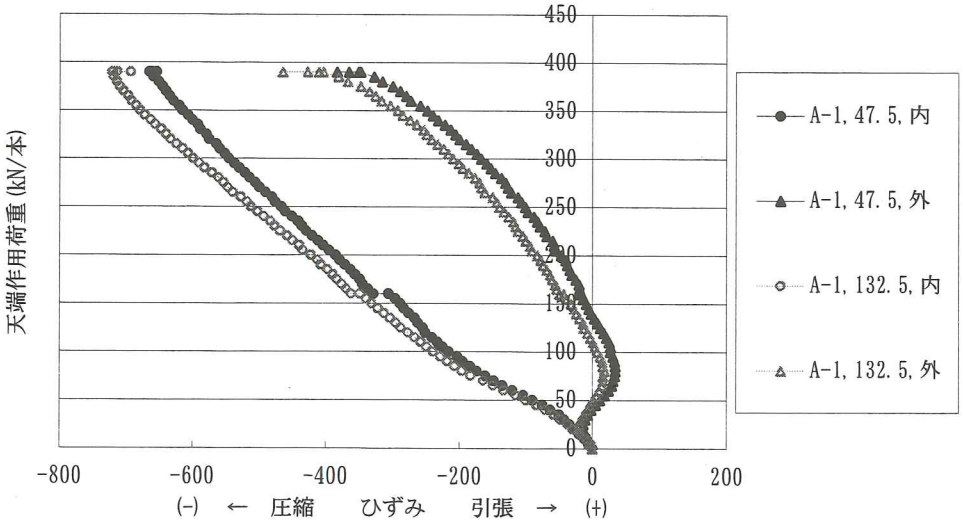


図-参. 1 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 47.5度・132.5度, 高さ50cm)

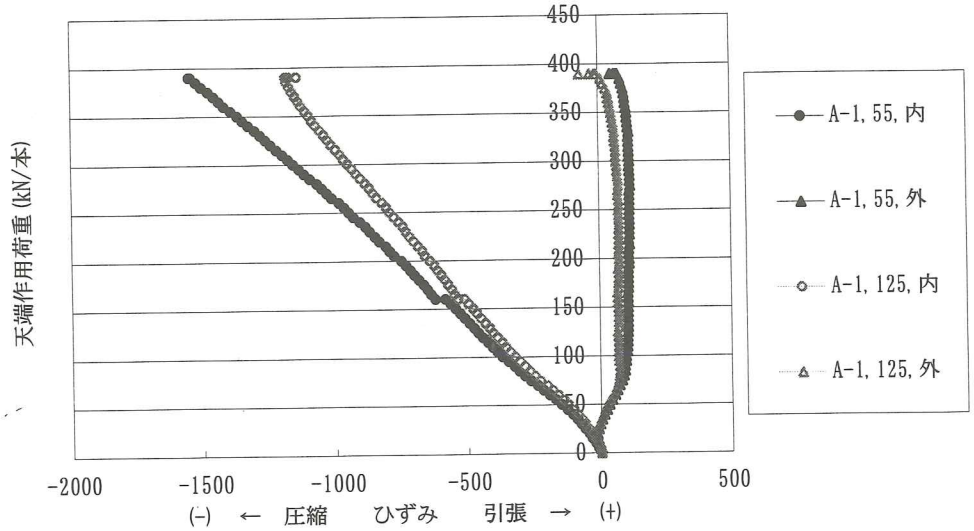


図-参. 1 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 55度・125度, 高さ50cm)

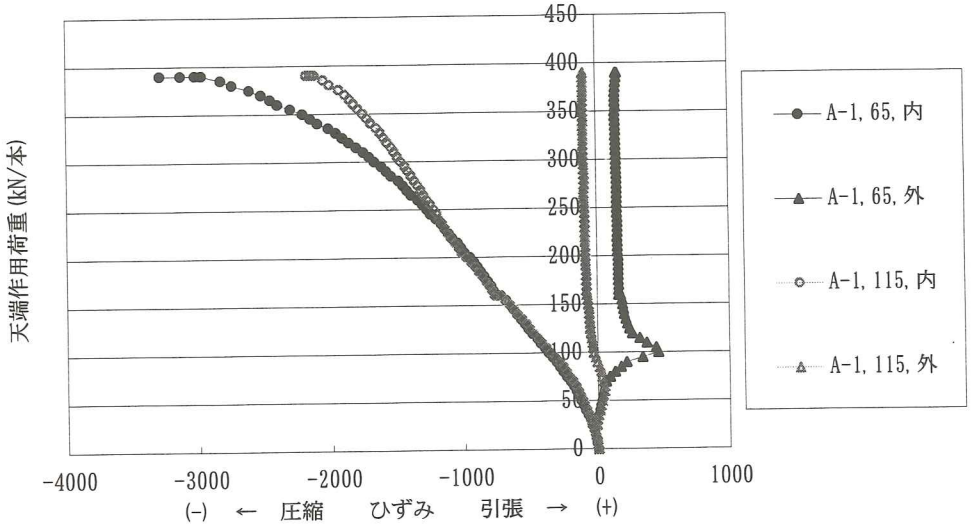


図-参. 1 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 65度・115度, 高さ50cm)

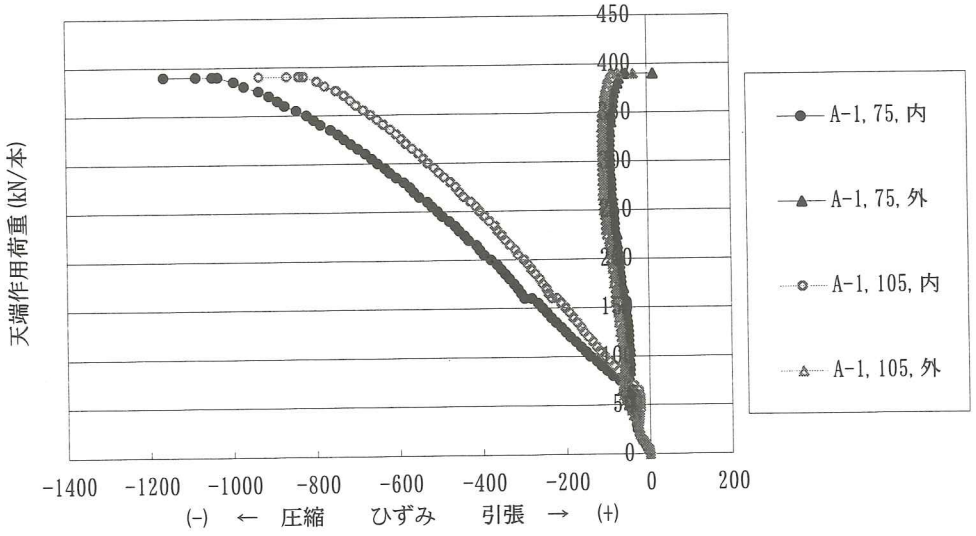


図-参. 1 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 75度・105度, 高さ50cm)

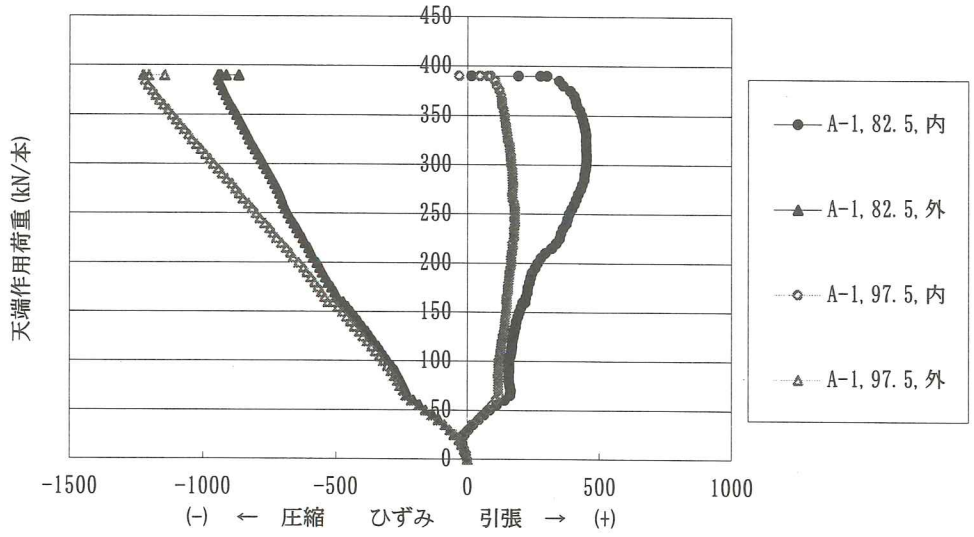


図-参. 1 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

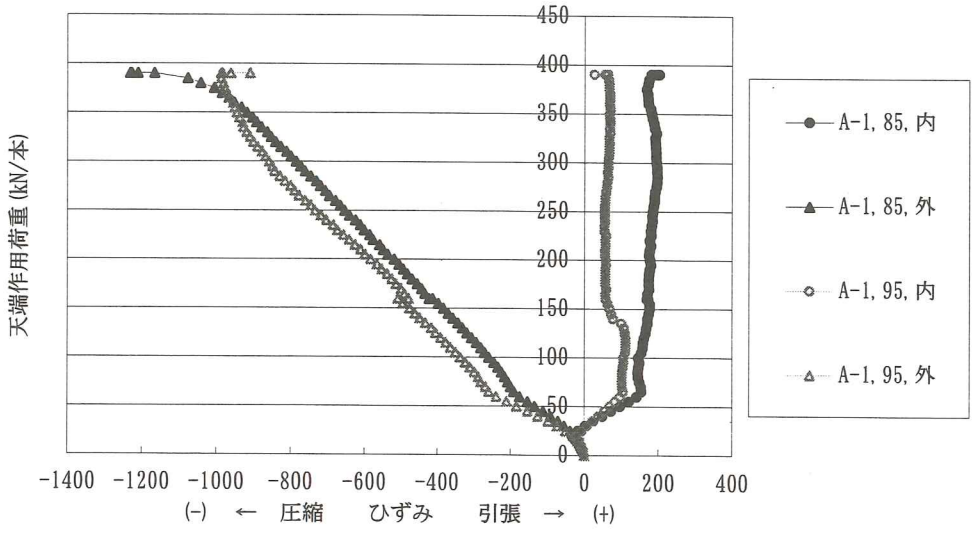


図-参. 1 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 85度・95度, 高さ50cm)

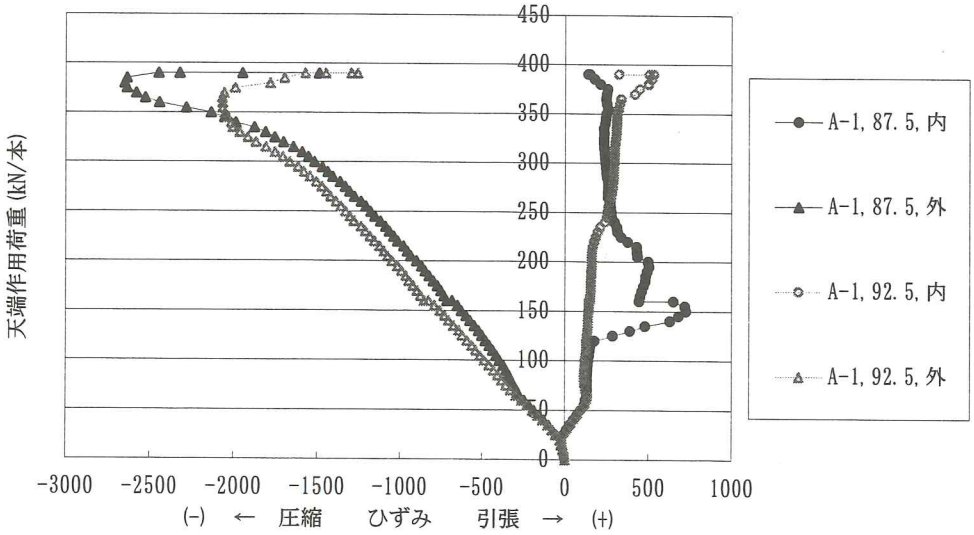


図-参. 1 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

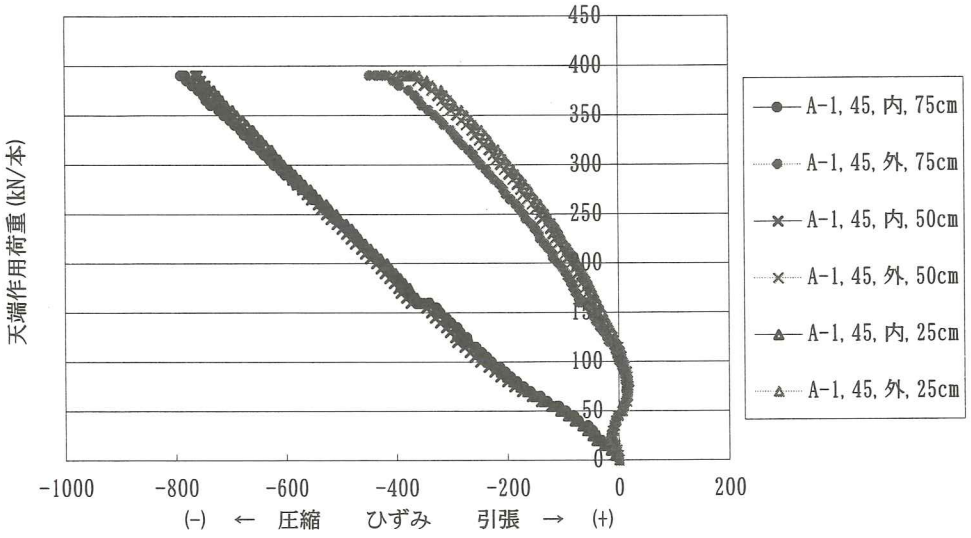


図-参. 1 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 45度, 高さ毎)

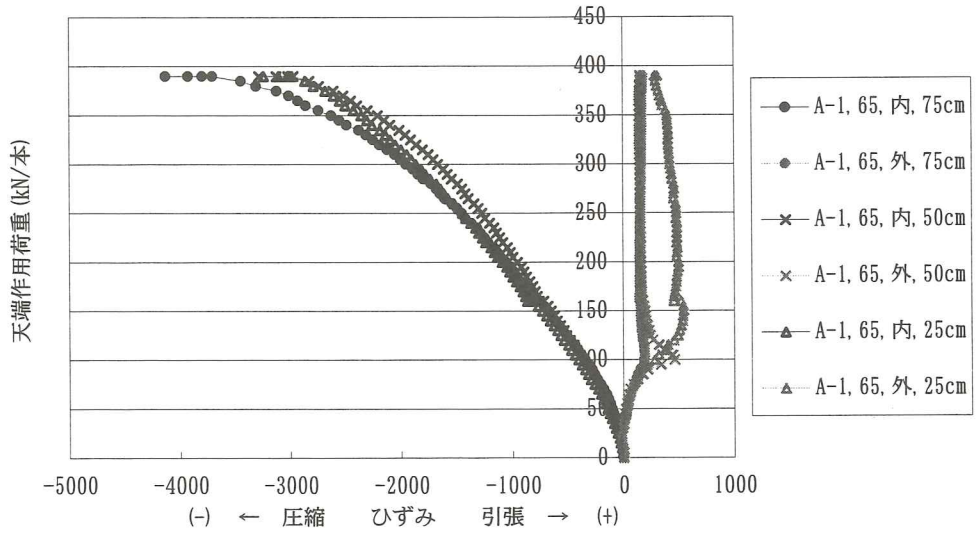


図-参. 1 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 65度, 高さ毎)

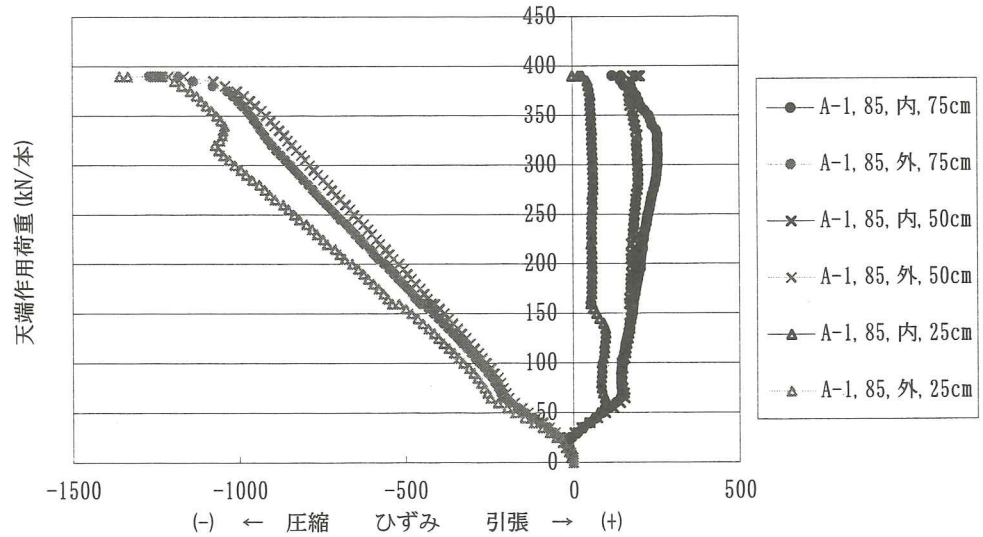


図-参. 1 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-1, 85度, 高さ毎)

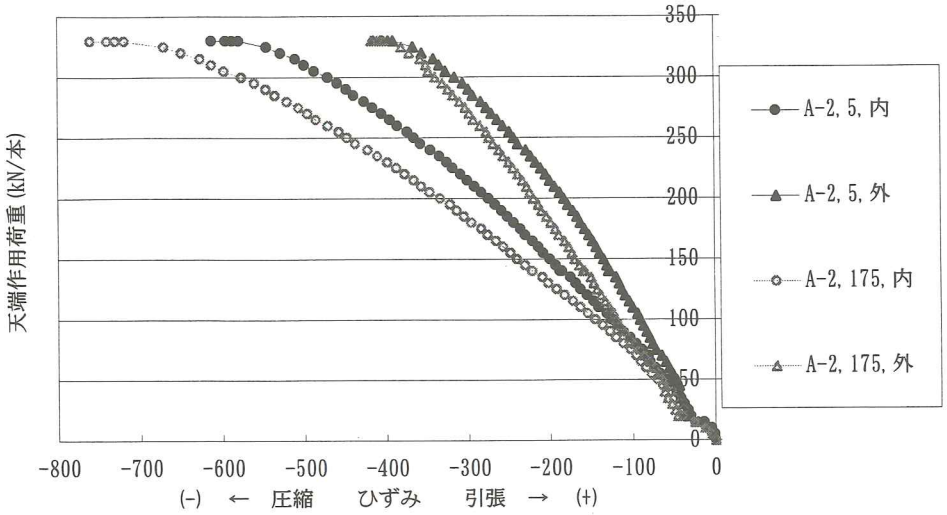


図-参. 2 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 5度・175度, 高さ50cm)

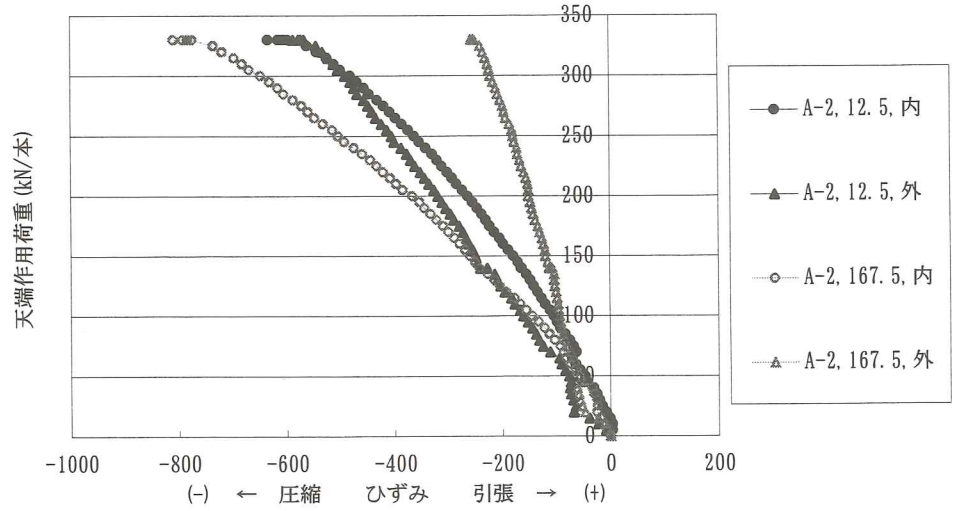


図-参. 2 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 12.5度・167.5度, 高さ50cm)

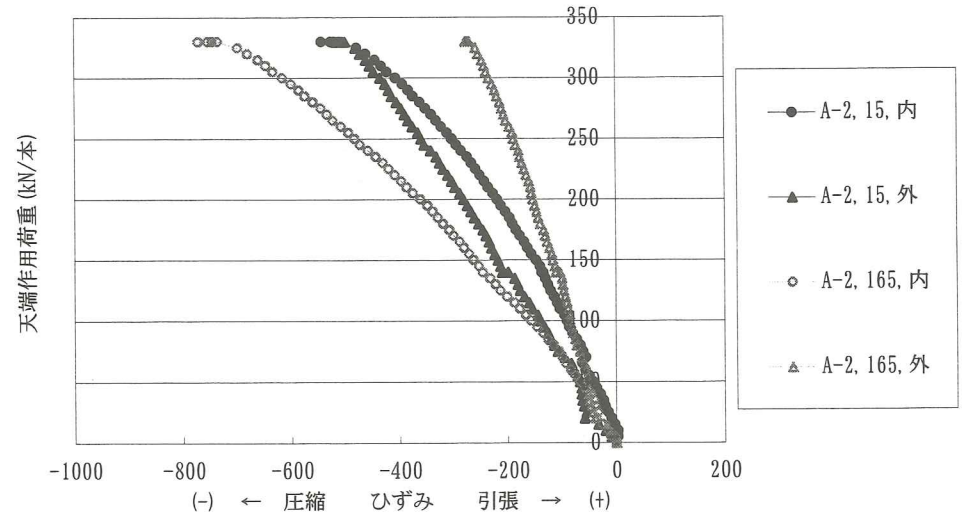


図-参. 2 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 15度・165度, 高さ50cm)

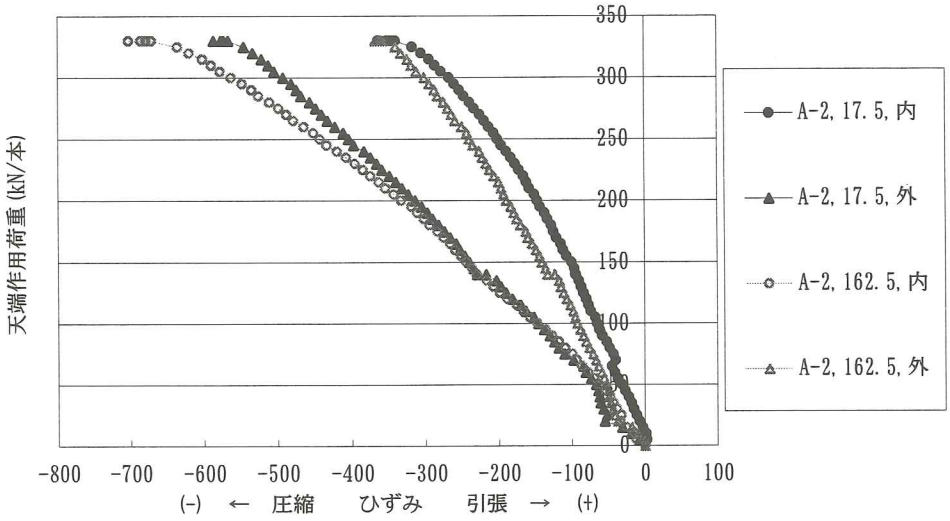


図-参. 2 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

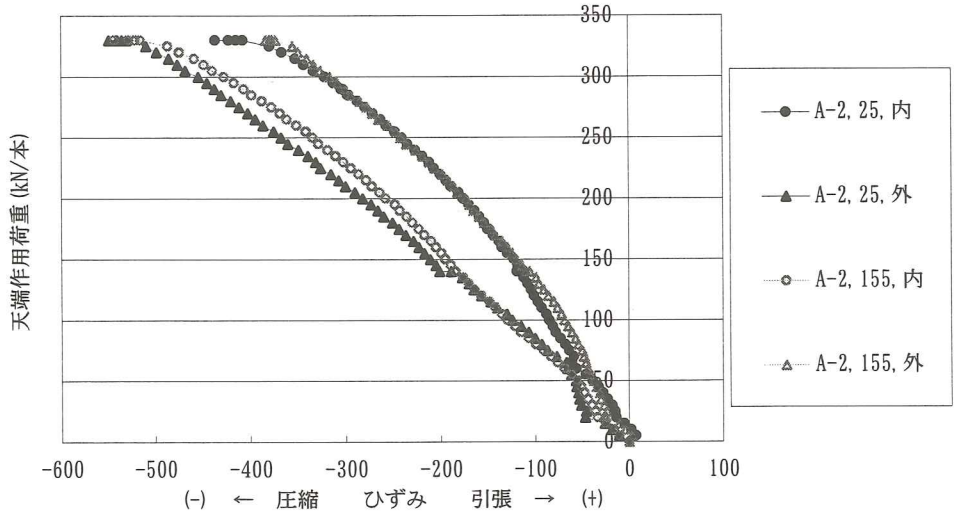


図-参. 2 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 25度・155度, 高さ50cm)

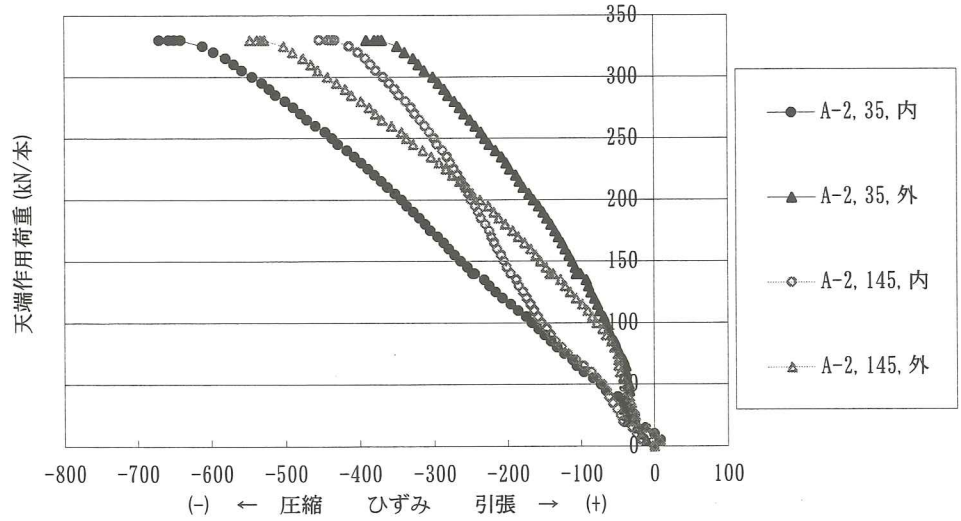


図-参. 2 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 35度・145度, 高さ50cm)

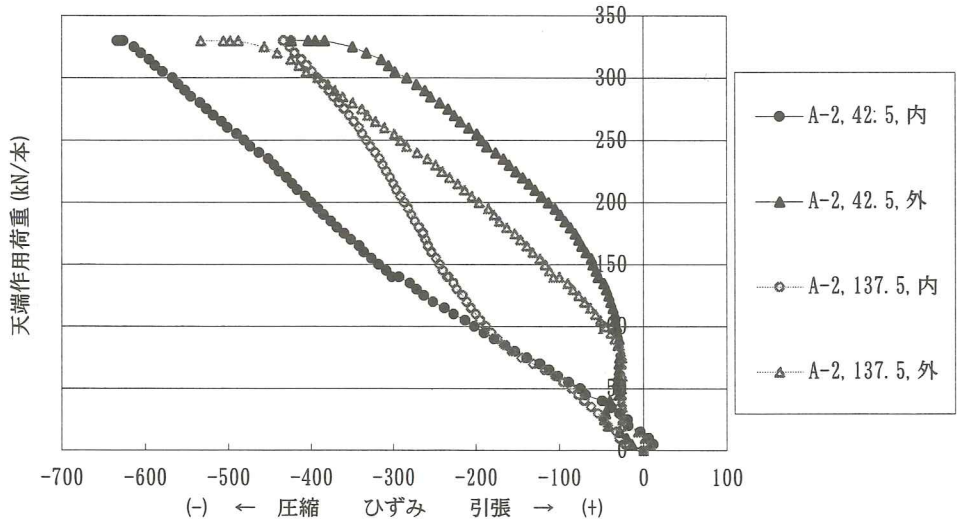


図-参. 2 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 42. 5度・137. 5度, 高さ50cm)

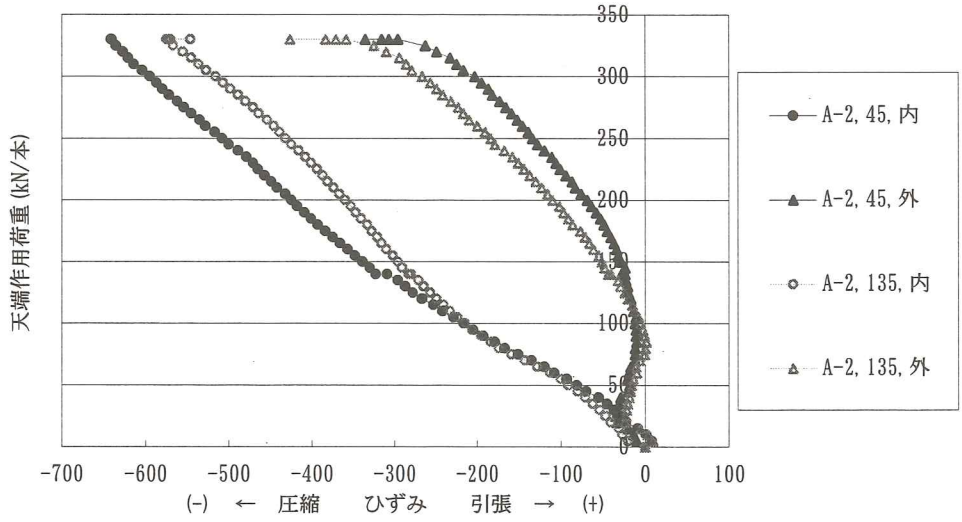


図-参. 2 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 45度・135度, 高さ50cm)

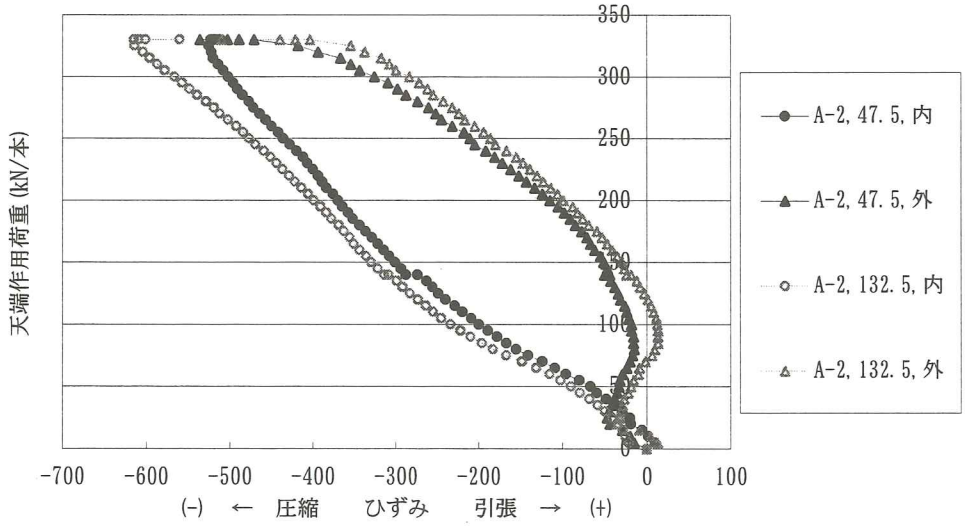


図-参. 2 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 47. 5度・132. 5度, 高さ50cm)

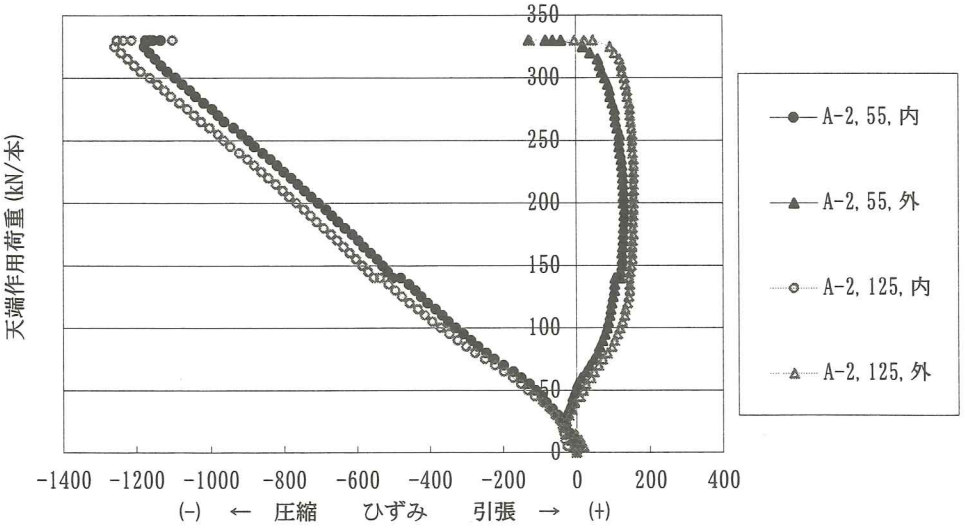


図-参. 2 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 55度・125度, 高さ50cm)

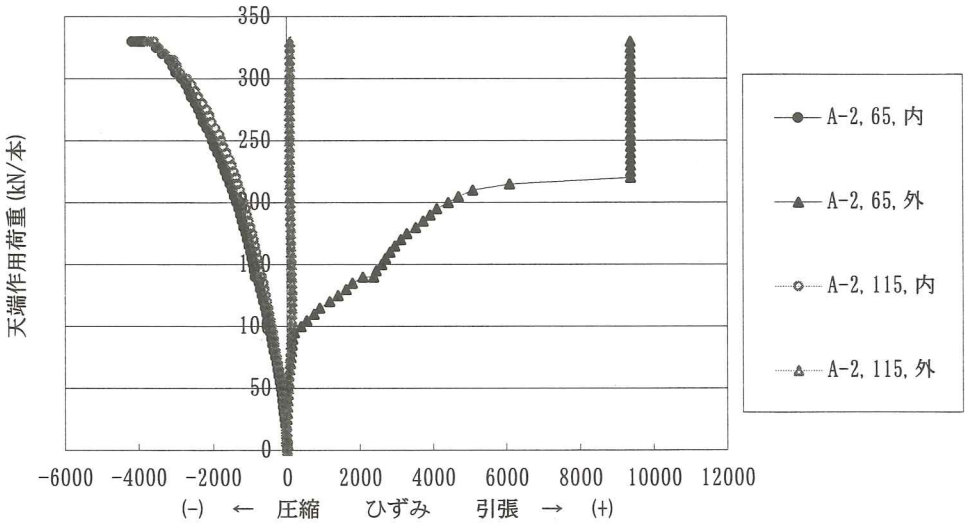


図-参. 2 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 65度・115度, 高さ50cm)

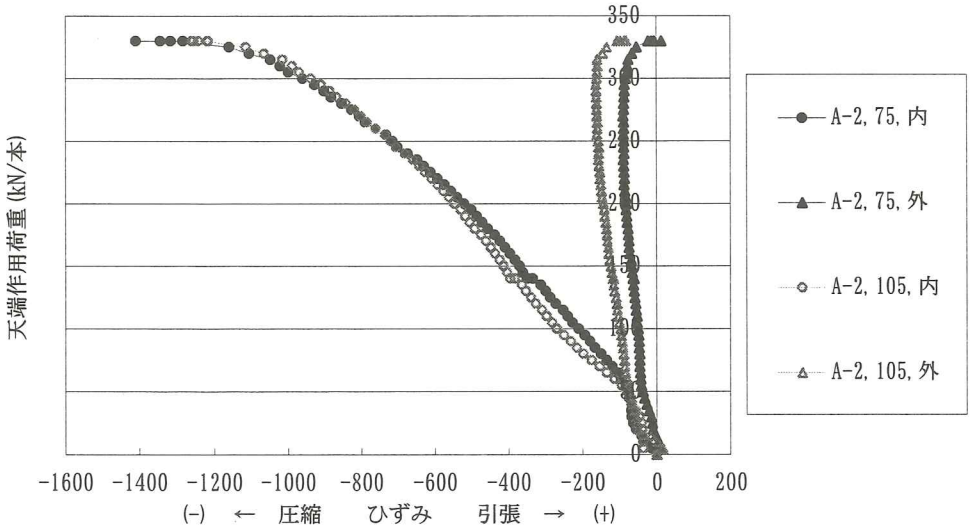


図-参. 2 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 75度・105度, 高さ50cm)

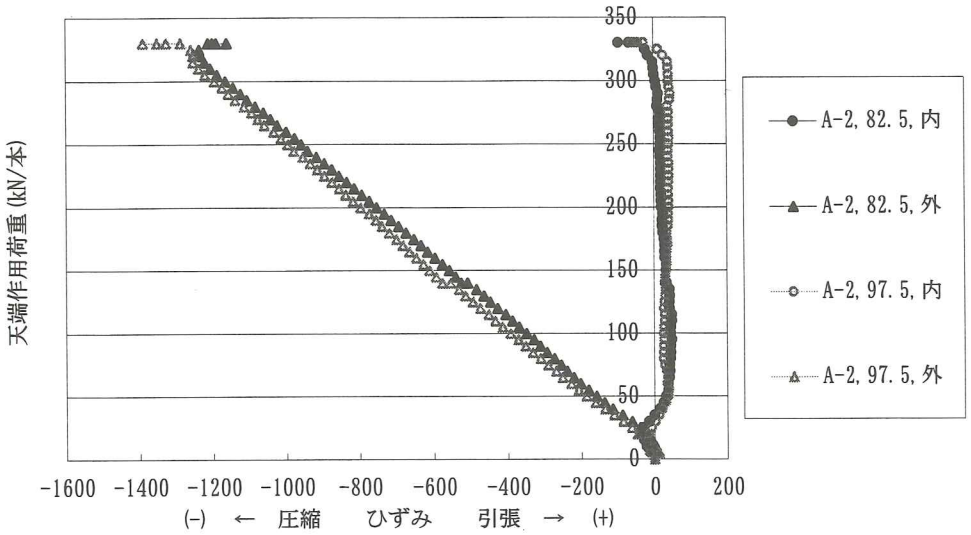


図-参. 2 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

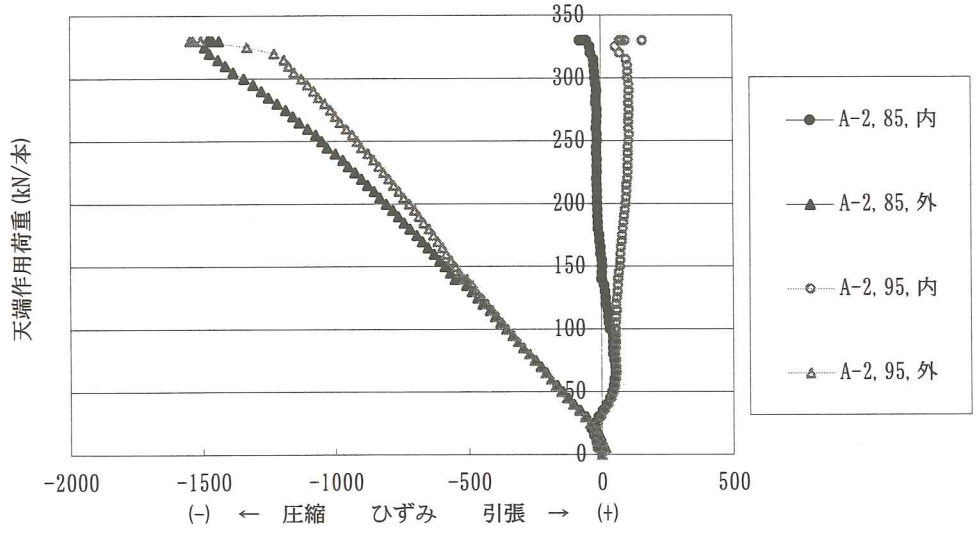


図-参. 2 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 85度・95度, 高さ50cm)

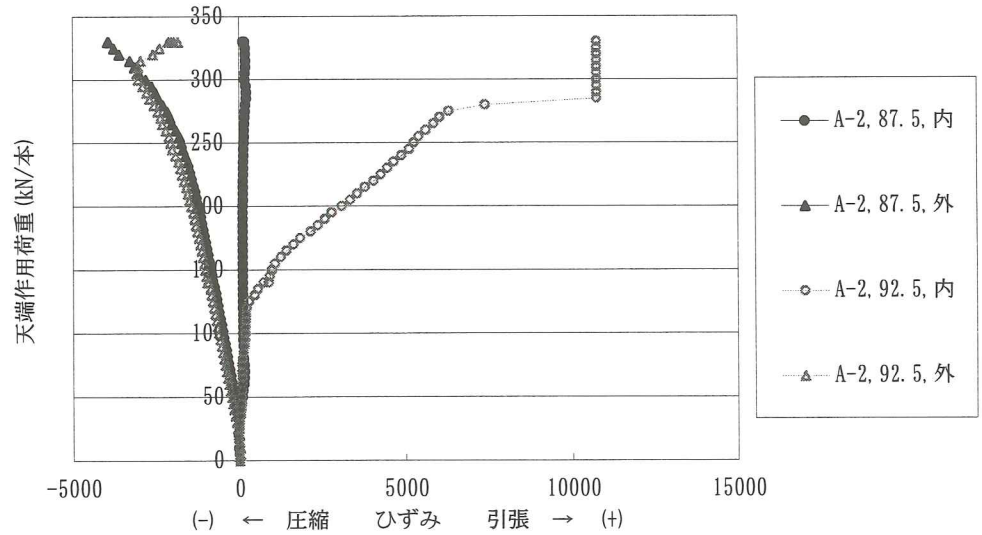


図-参. 2 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

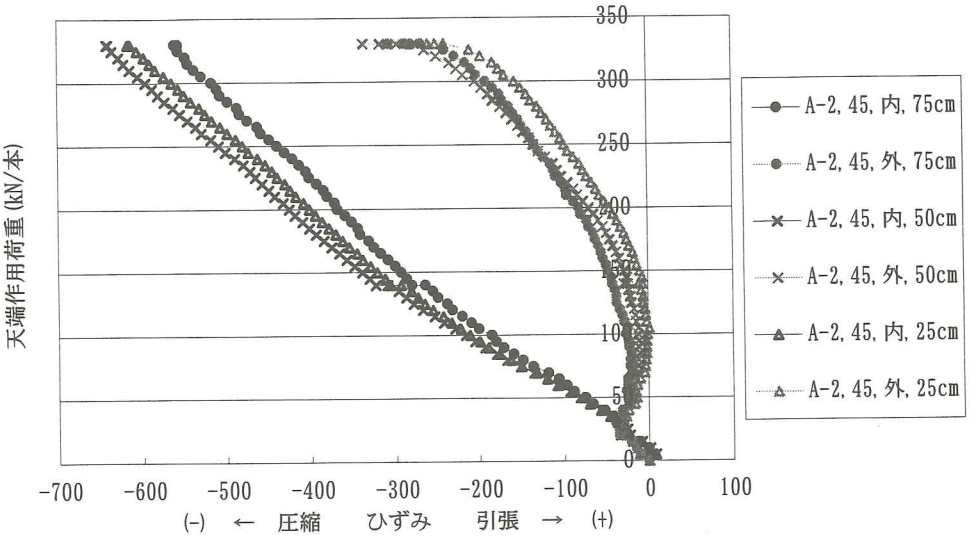


図-参. 2 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 45度, 高さ毎)

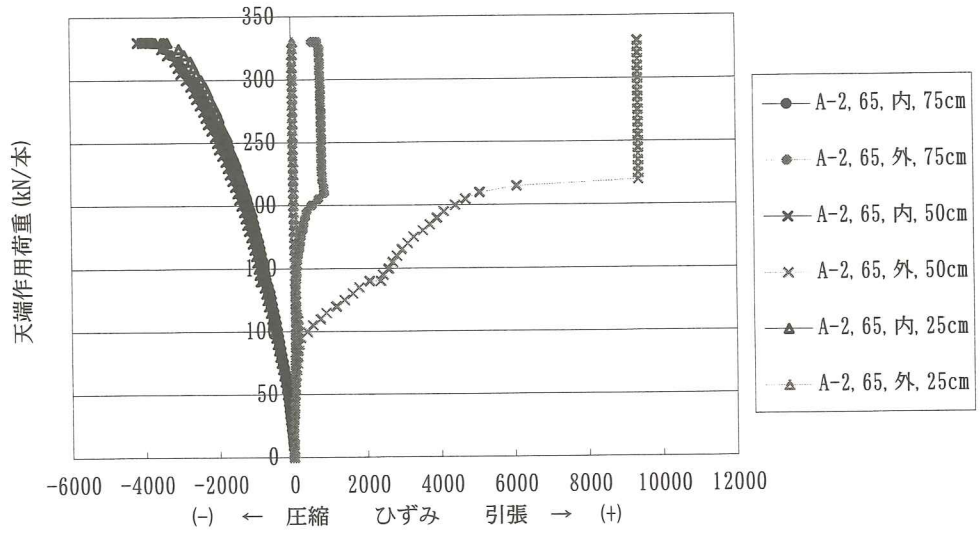


図-参. 2 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 65度, 高さ毎)

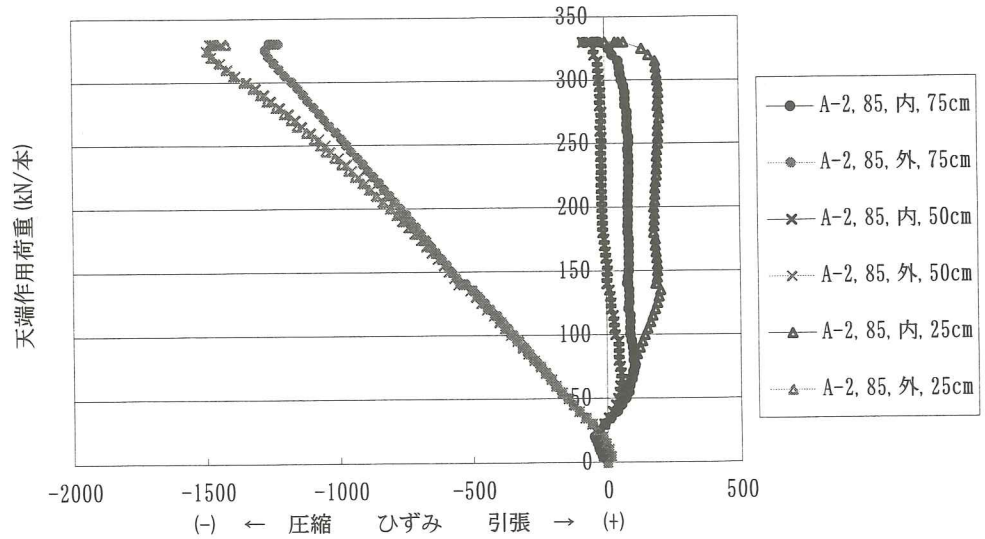


図-参. 2 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-2, 85度, 高さ毎)

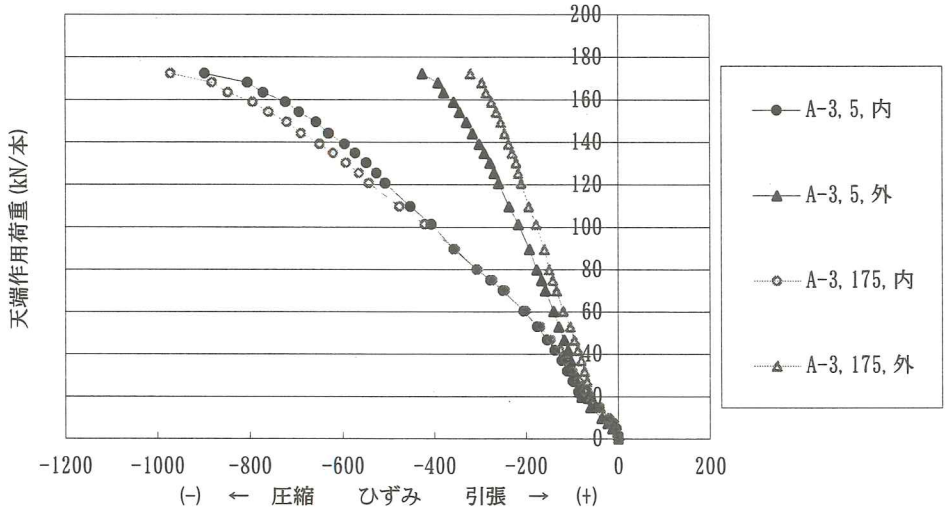


図-参. 3 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 5度・175度, 高さ50cm)

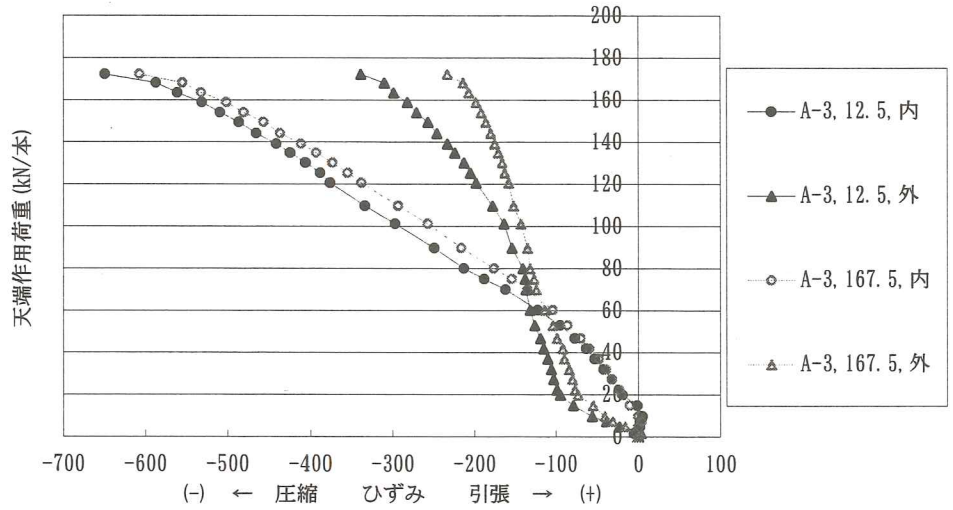


図-参. 3 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 12.5度・167.5度, 高さ50cm)

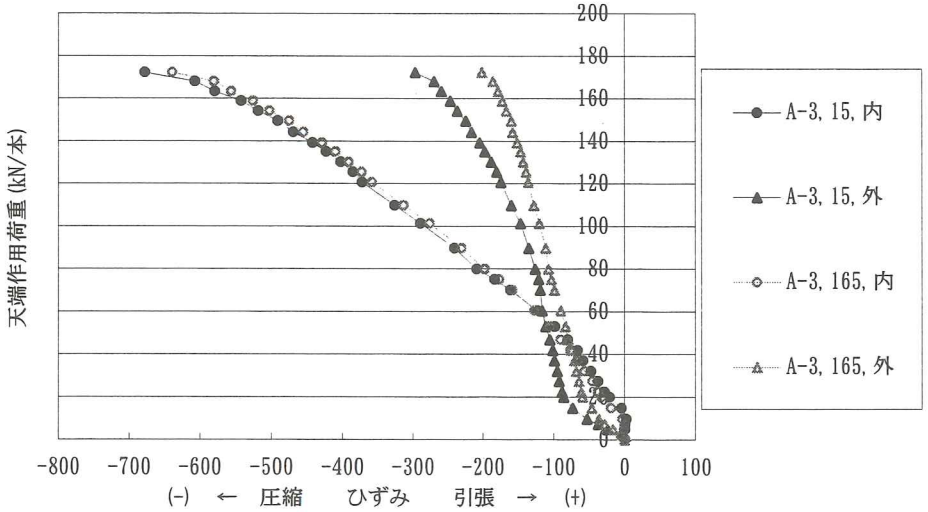


図-参. 3 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 15度・165度, 高さ50cm)

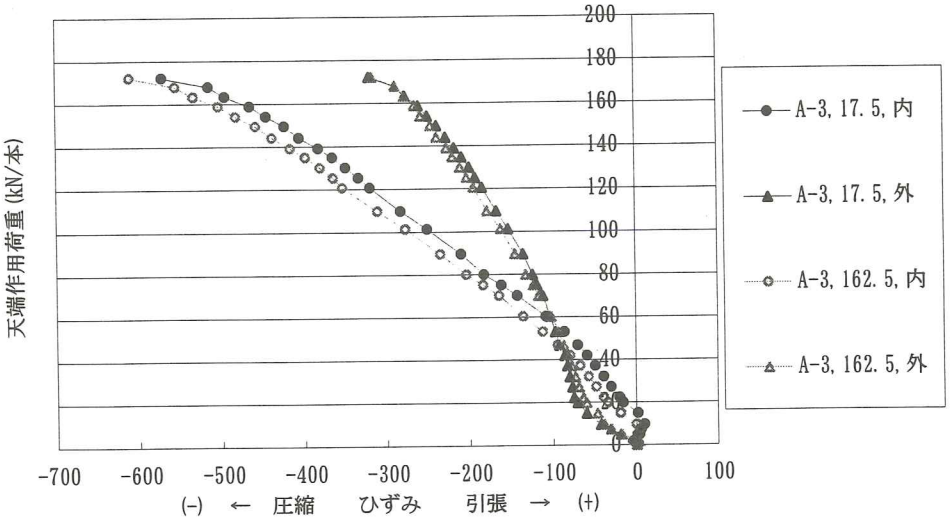


図-参. 3 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

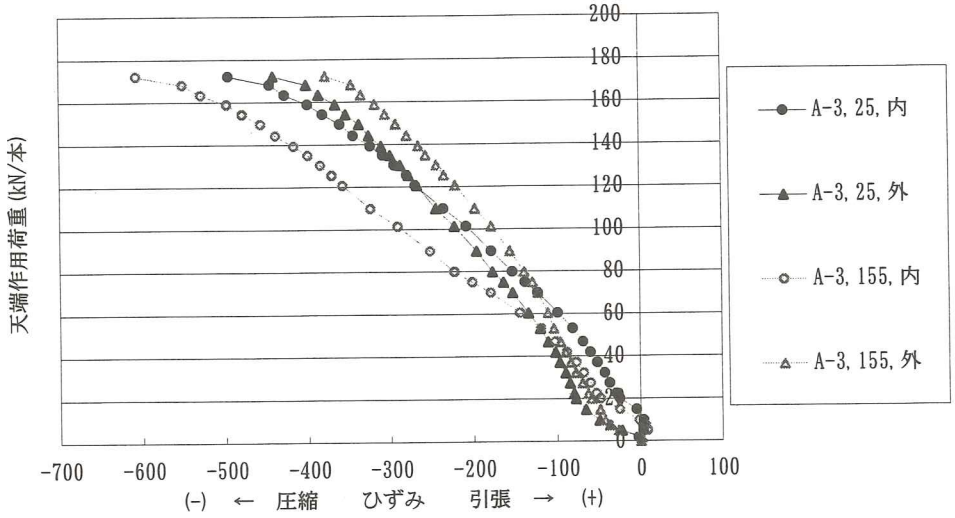


図-参. 3 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 25度・155度, 高さ50cm)

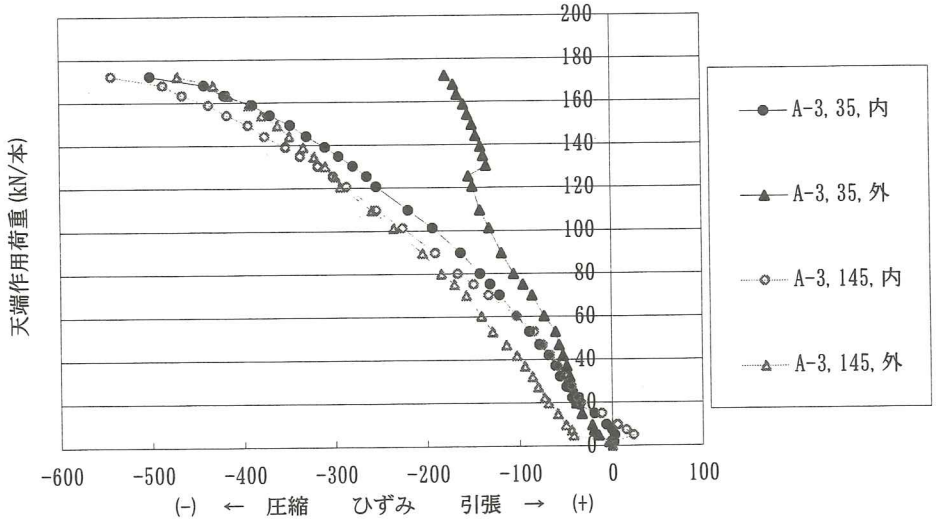


図-参. 3 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 35度・145度, 高さ50cm)

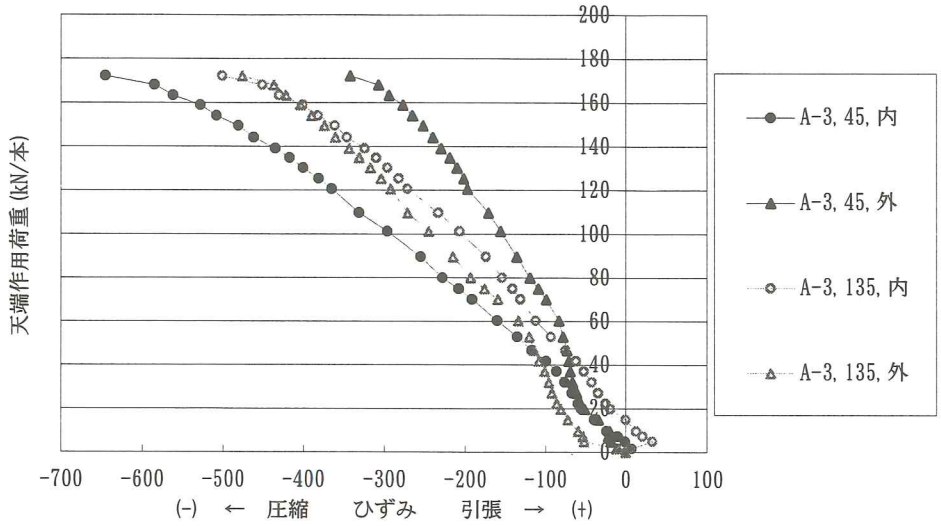


図-参. 3 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 45度・135度, 高さ50cm)

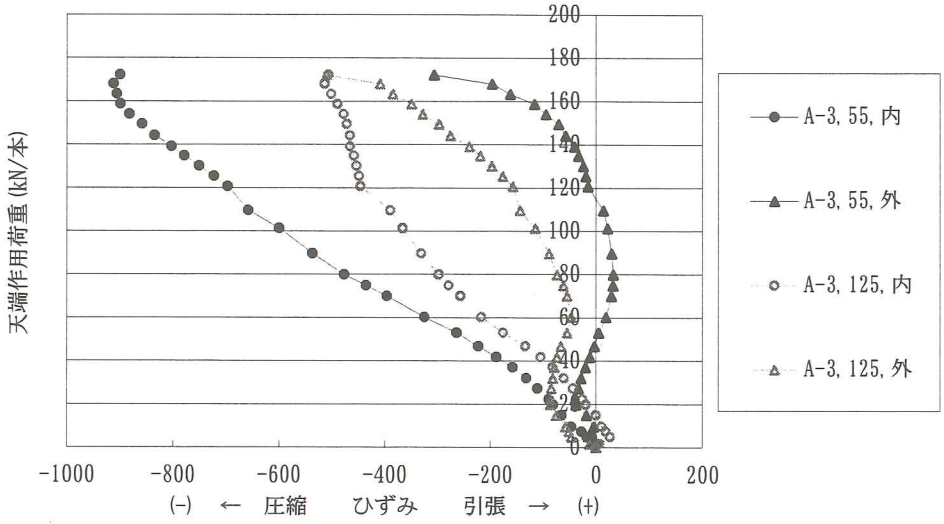


図-参. 3 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 55度・125度, 高さ50cm)

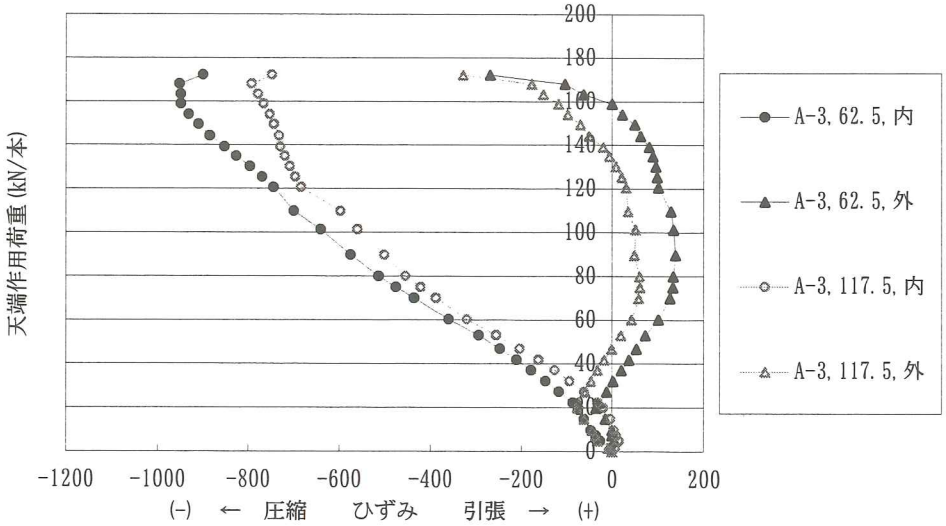


図-参. 3 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 62.5度・117.5度, 高さ50cm)

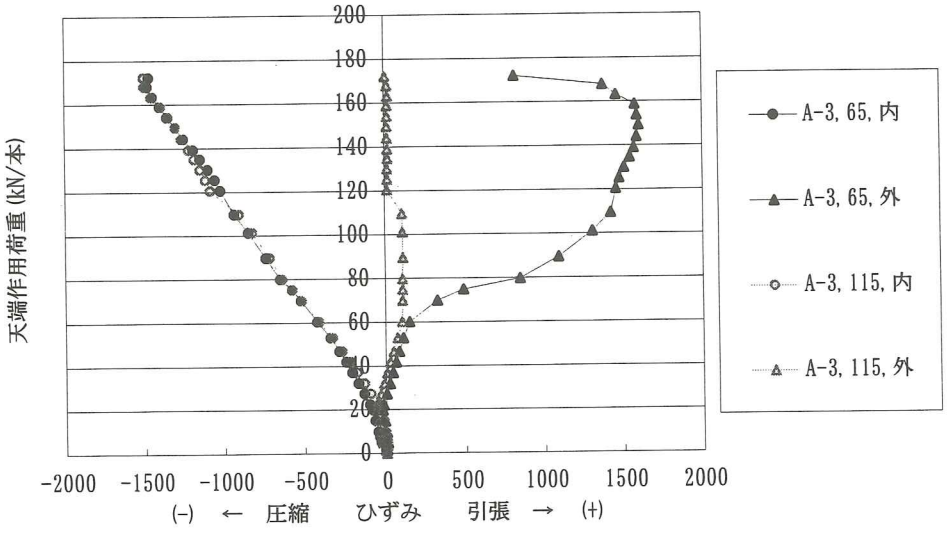


図-参. 3 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 65度・115度, 高さ50cm)

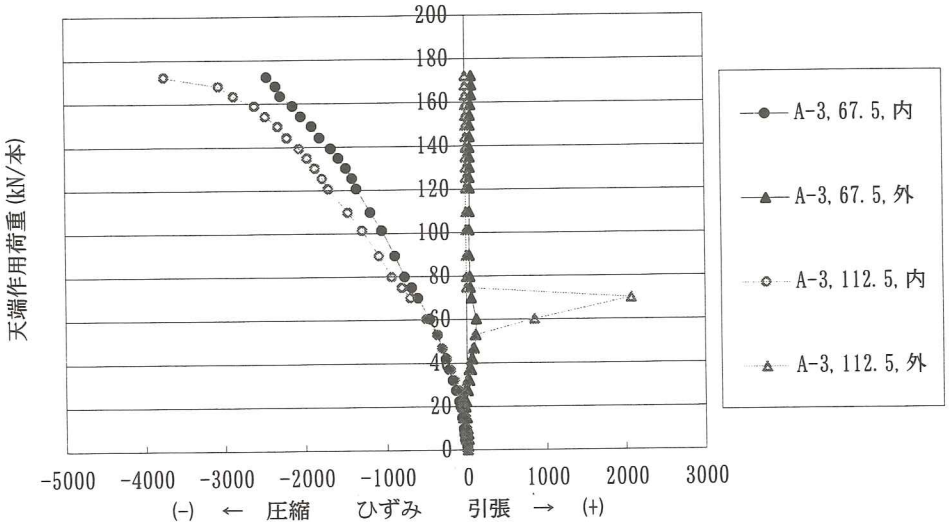


図-参. 3 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 67.5度・112.5度, 高さ50cm)

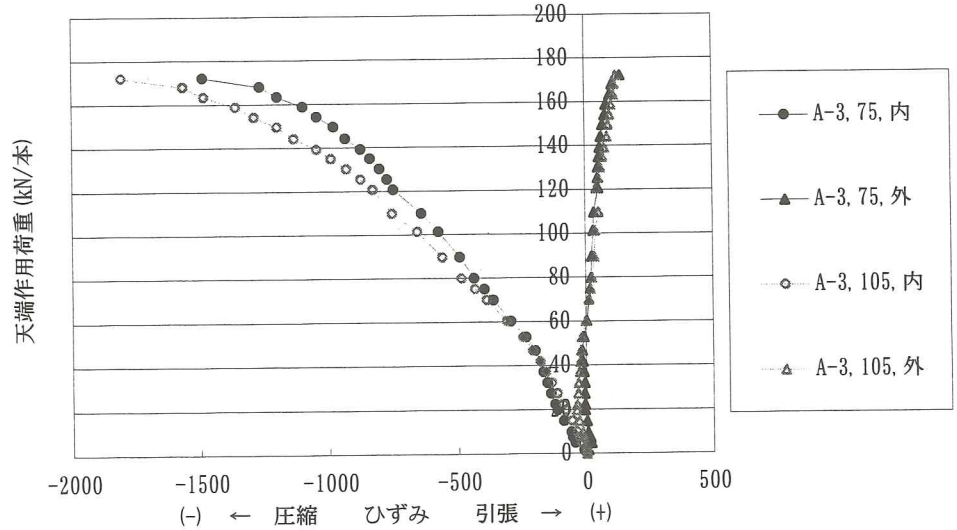


図-参. 3 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 75度・105度, 高さ50cm)

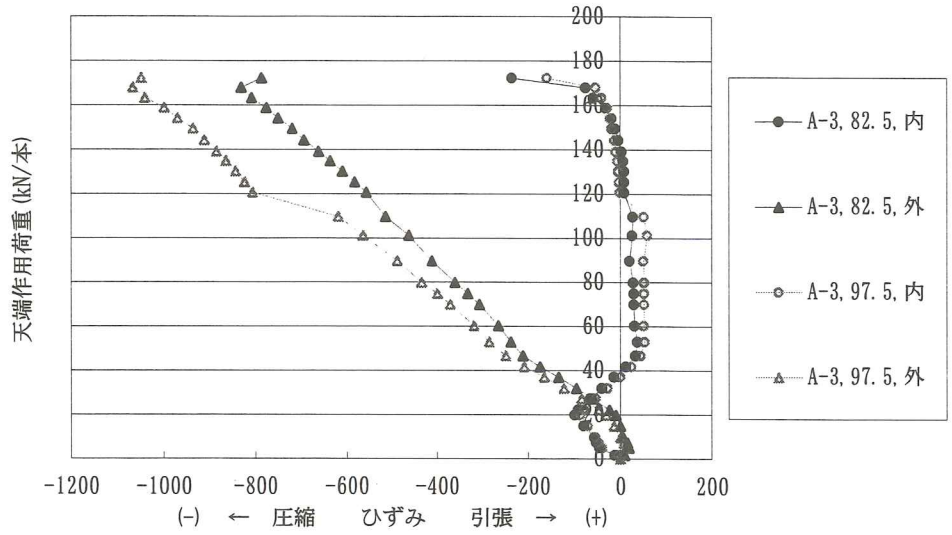


図-参. 3 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

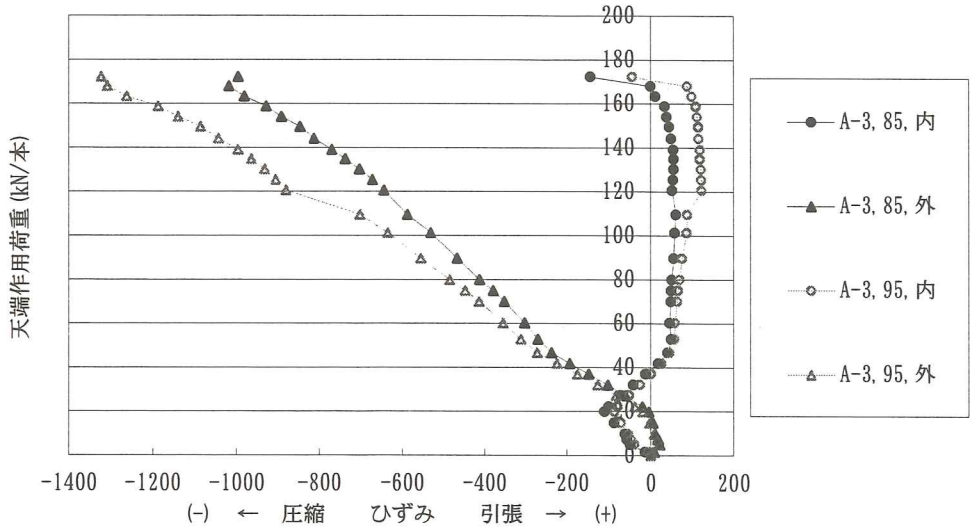


図-参. 3 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 85度・95度, 高さ50cm)

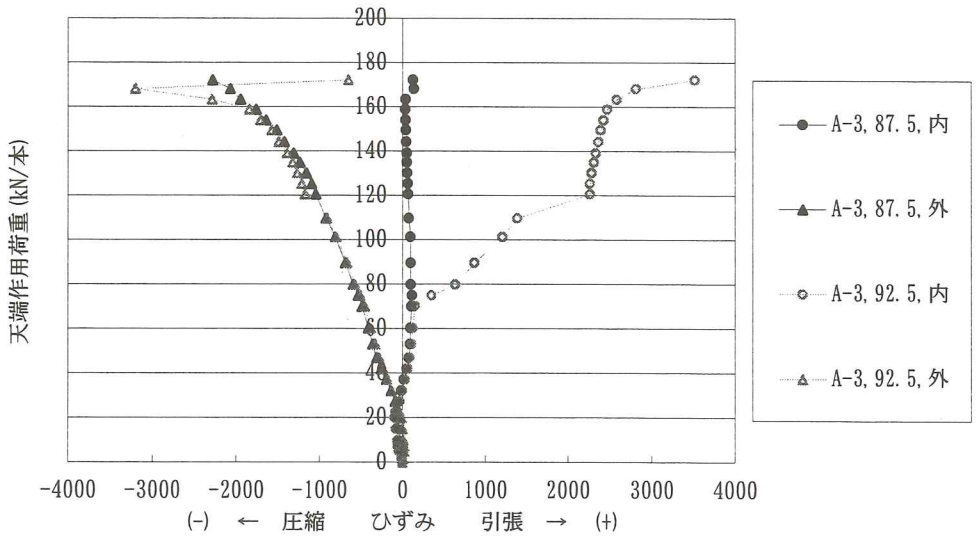


図-参. 3 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

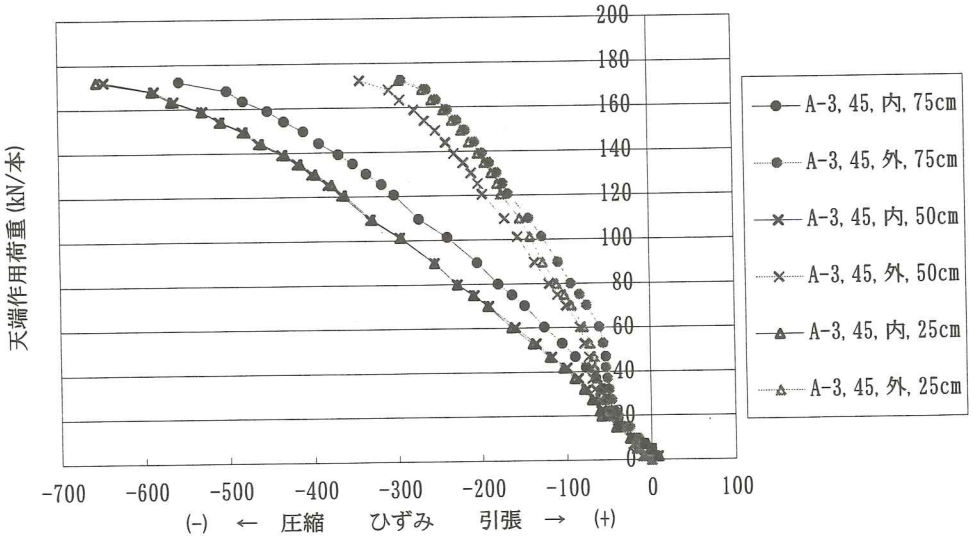


図-参. 3 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 45度, 高さ毎)

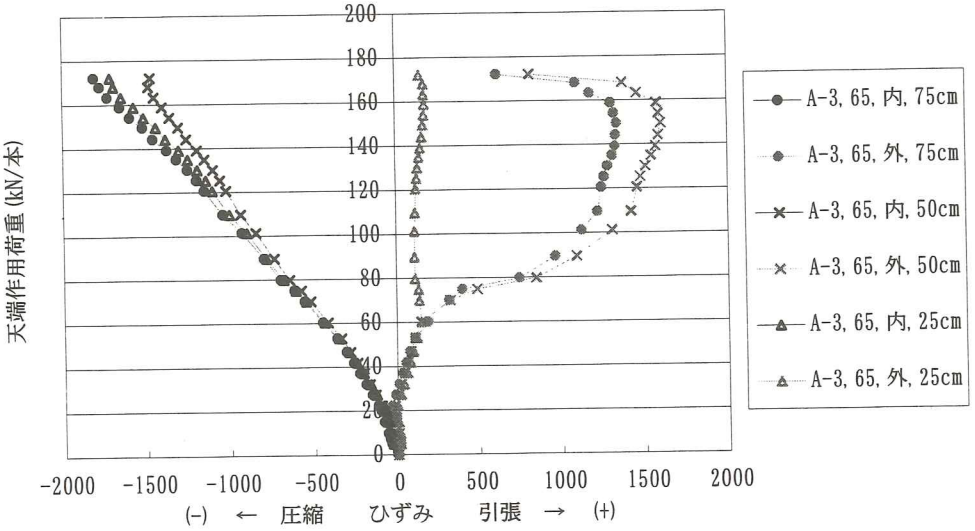


図-参. 3 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 65度, 高さ毎)

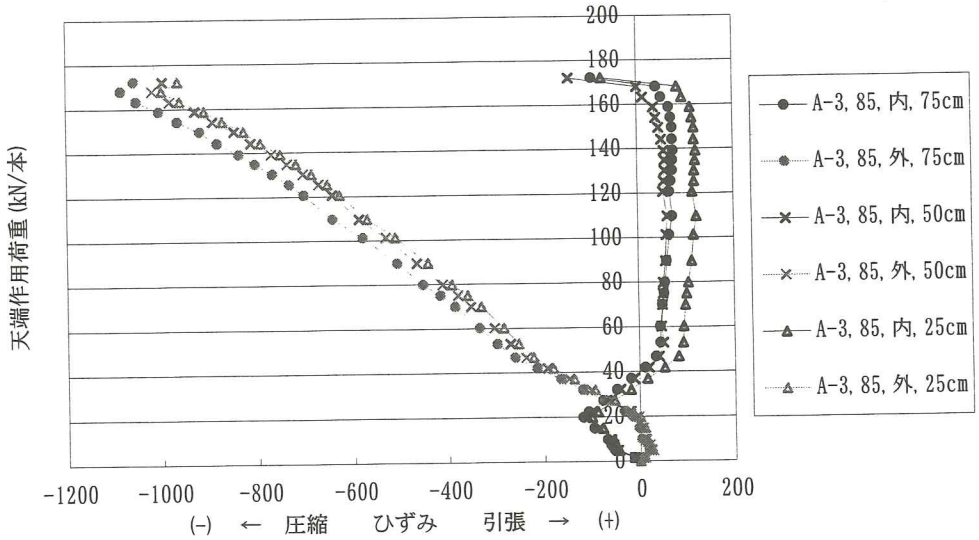


図-参. 3 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースA-3, 85度, 高さ毎)

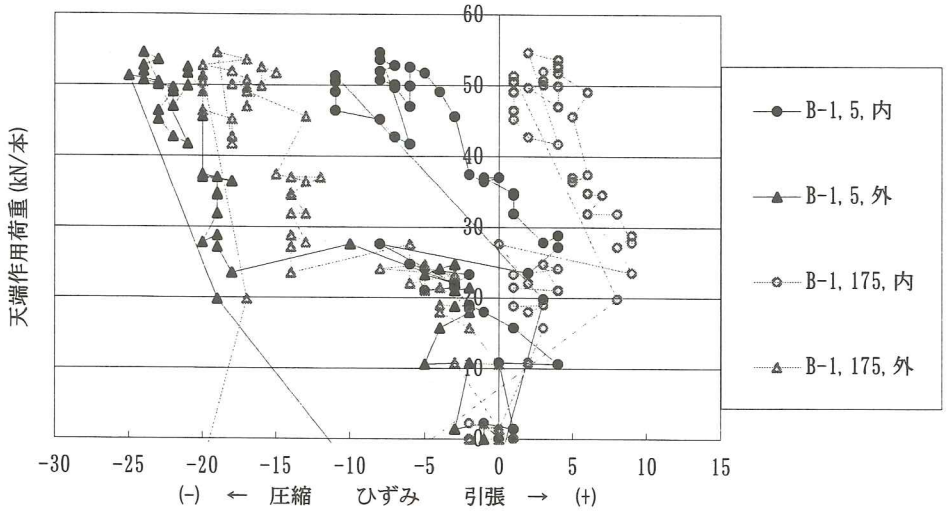


図-参. 4 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 5度・175度, 高さ50cm)

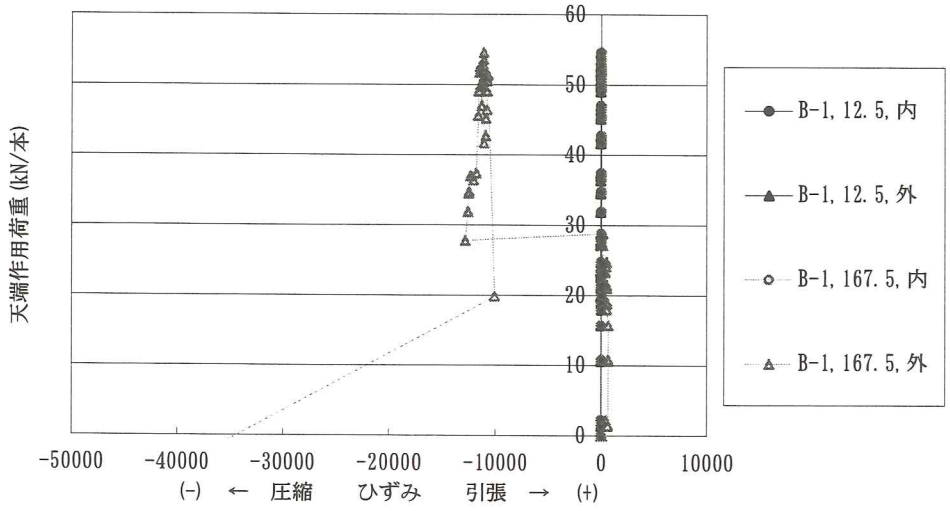


図-参. 4 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 12. 5度・167. 5度, 高さ50cm)

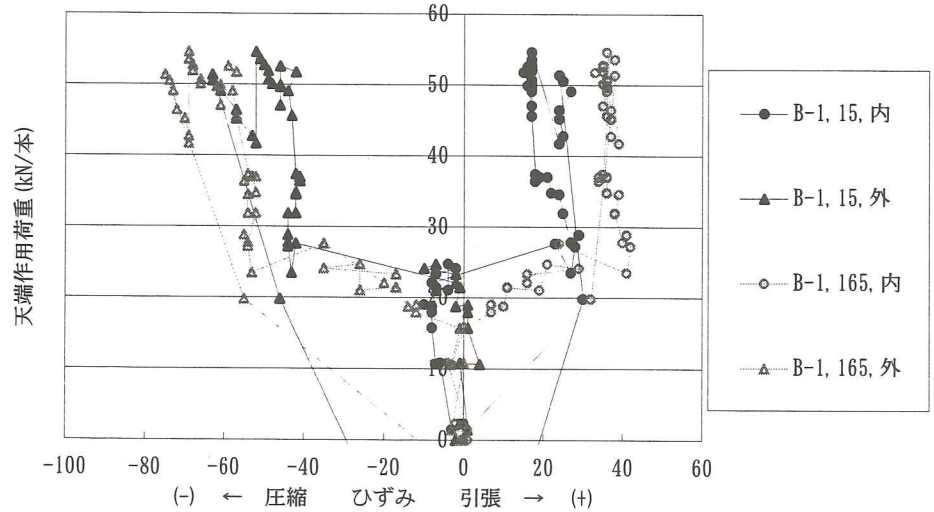


図-参. 4 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 15度・165度, 高さ50cm)

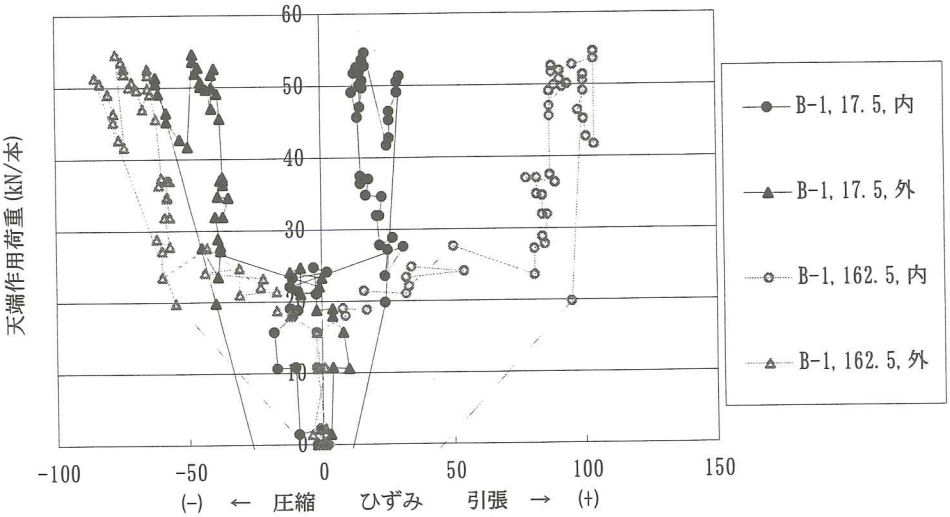


図-参. 4 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

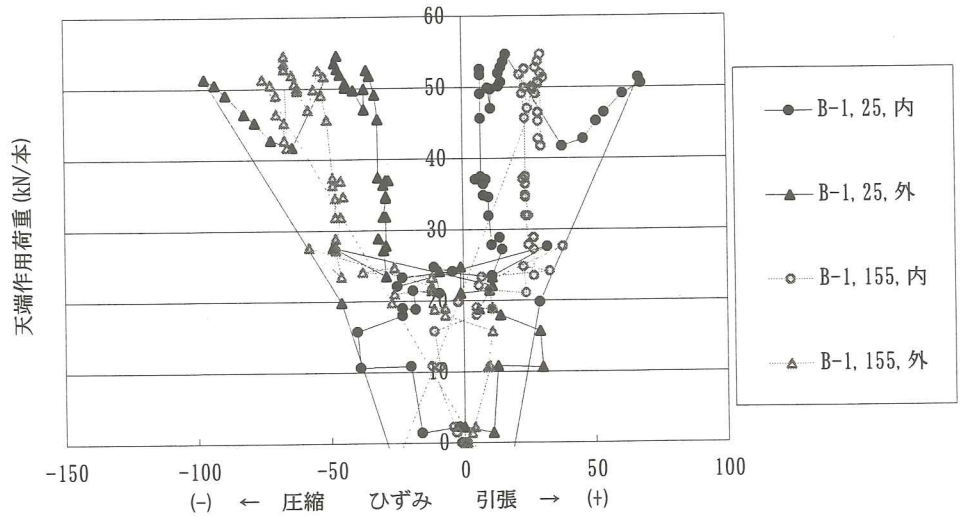


図-参. 4 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 25度・155度, 高さ50cm)

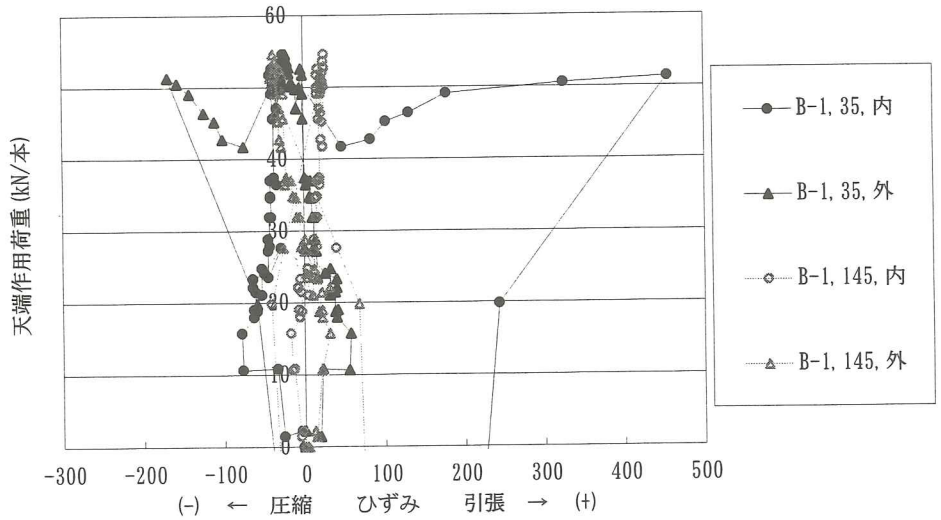


図-参. 4 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 35度・145度, 高さ50cm)

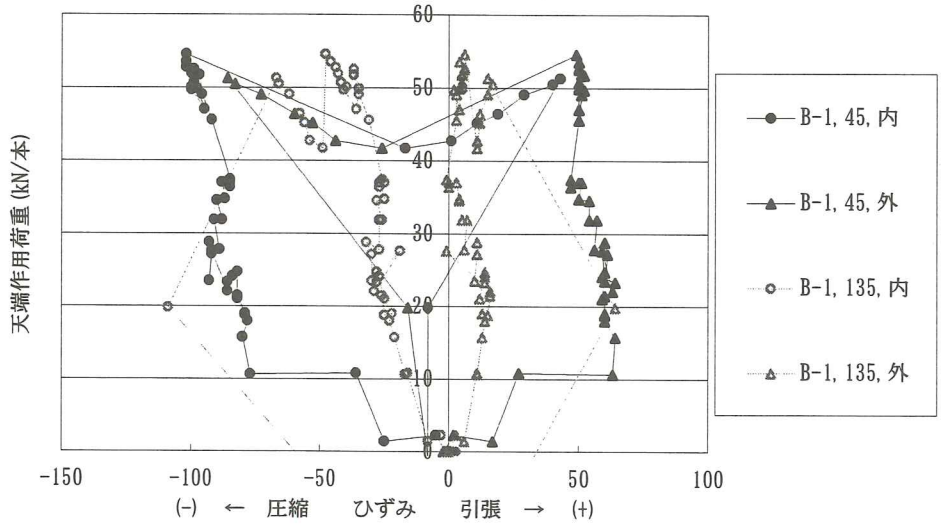


図-参. 4(g) 荷重-ひずみ曲線(ケースB-1, 45度・135度, 高さ50cm)

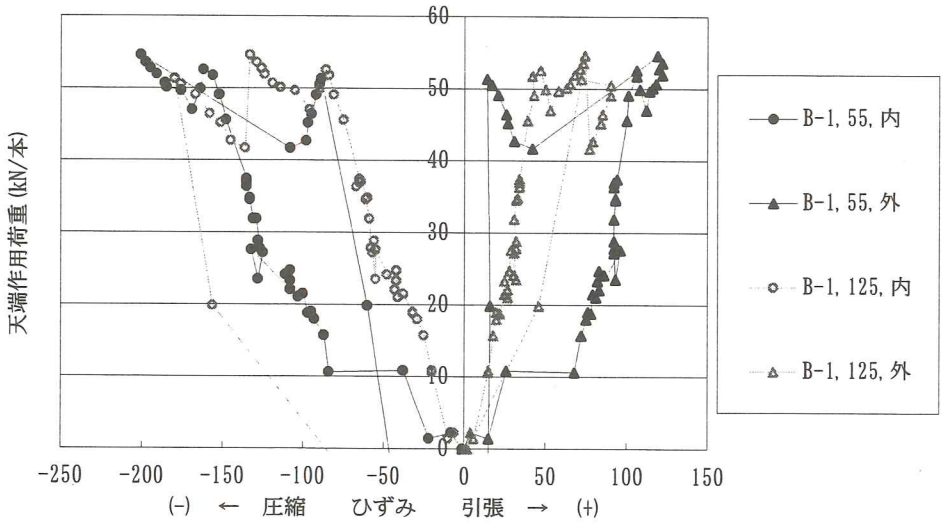


図-参. 4(h) 荷重-ひずみ曲線(ケースB-1, 55度・125度, 高さ50cm)

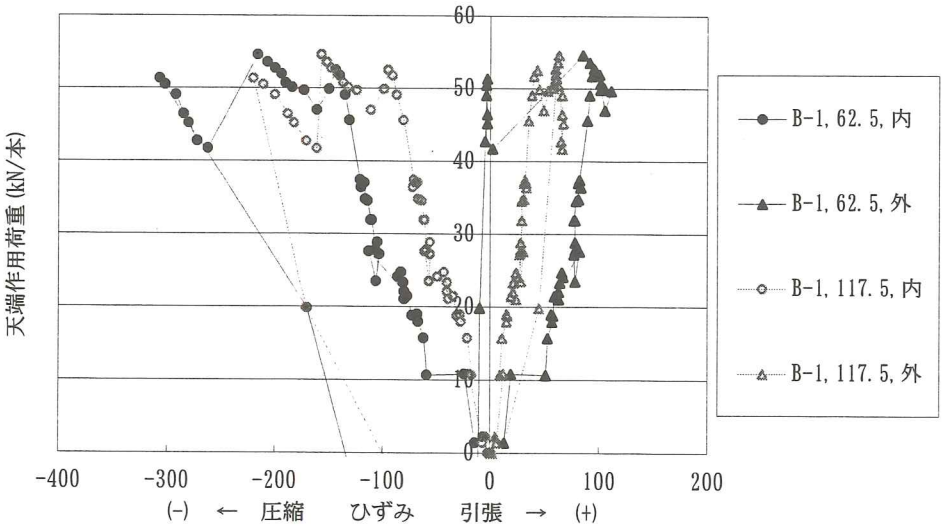


図-参. 4(i) 荷重-ひずみ曲線(ケースB-1, 62.5度・117.5度, 高さ50cm)

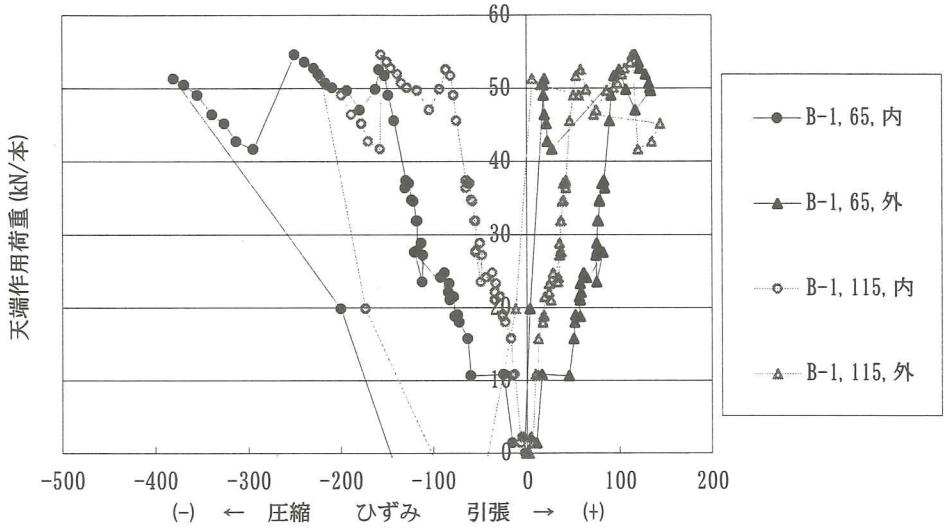


図-参. 4 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 65度・115度, 高さ50cm)

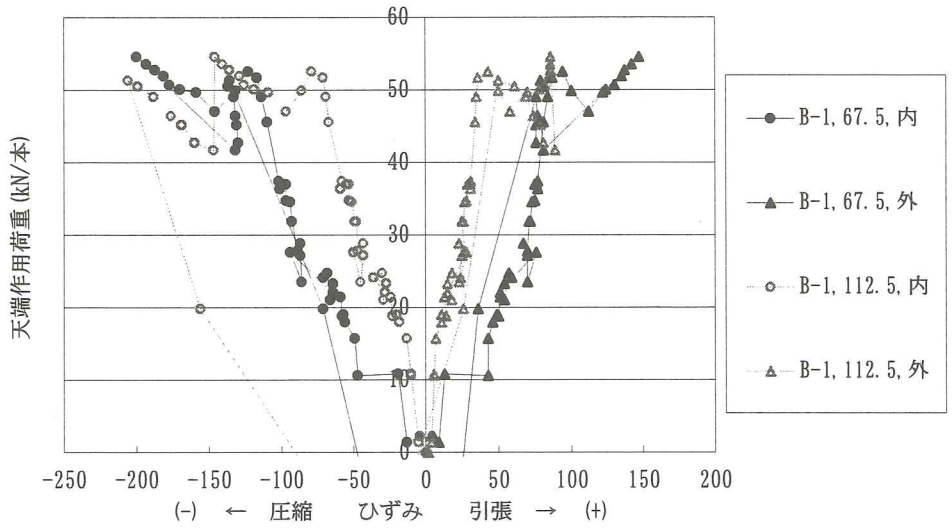


図-参. 4 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 67. 5度・112. 5度, 高さ50cm)

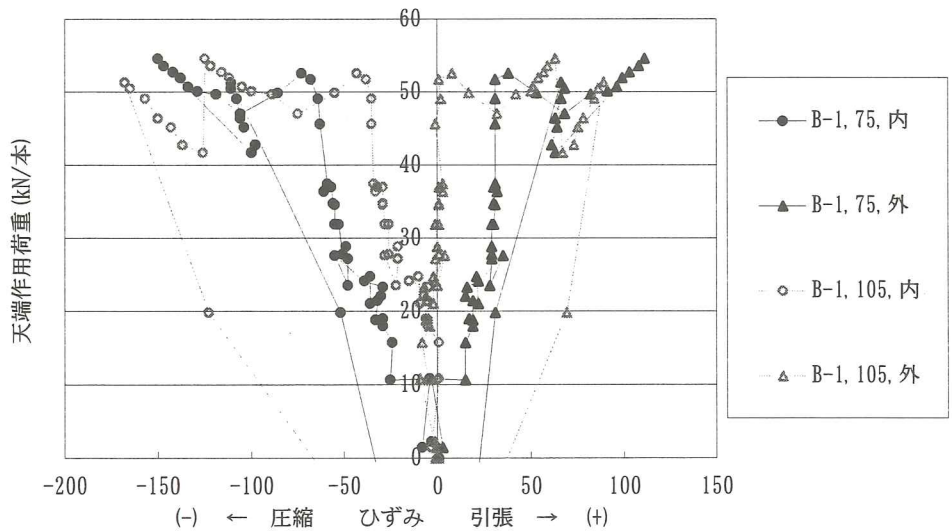


図-参. 4 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 75度・105度, 高さ50cm)

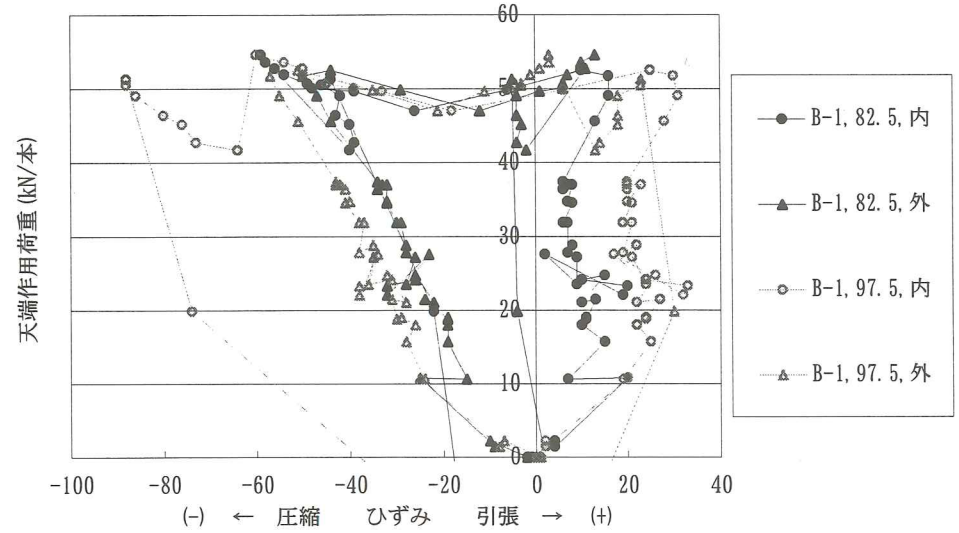


図-参. 4 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

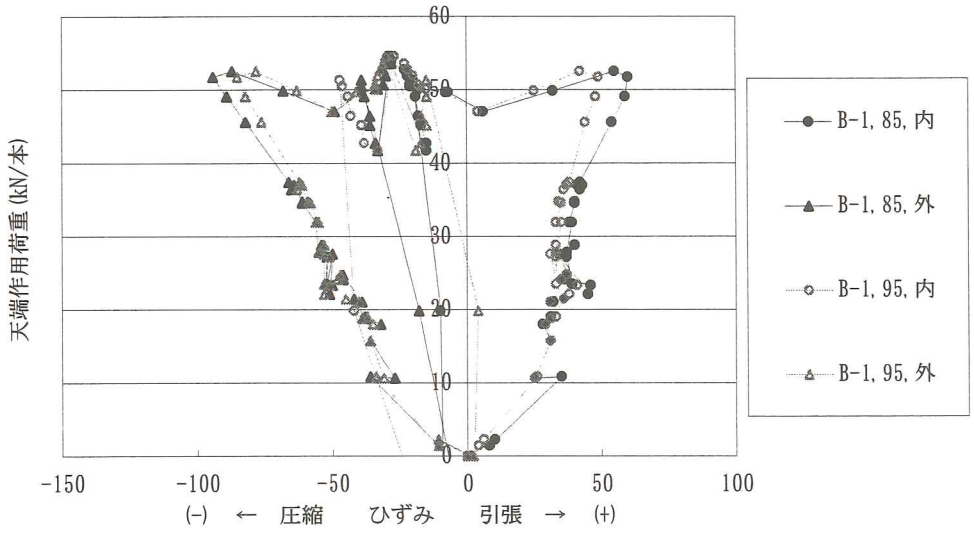


図-参. 4 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 85度・95度, 高さ50cm)

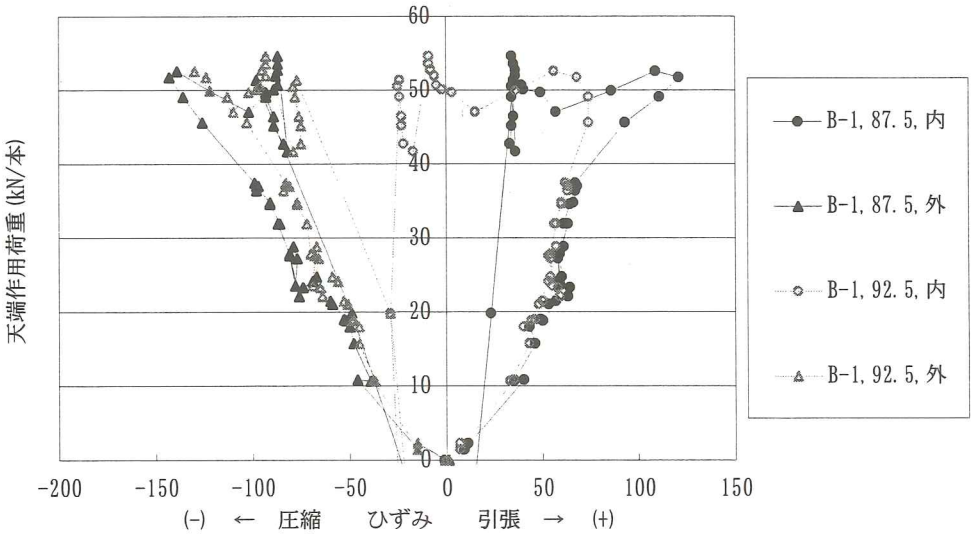


図-参. 4 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

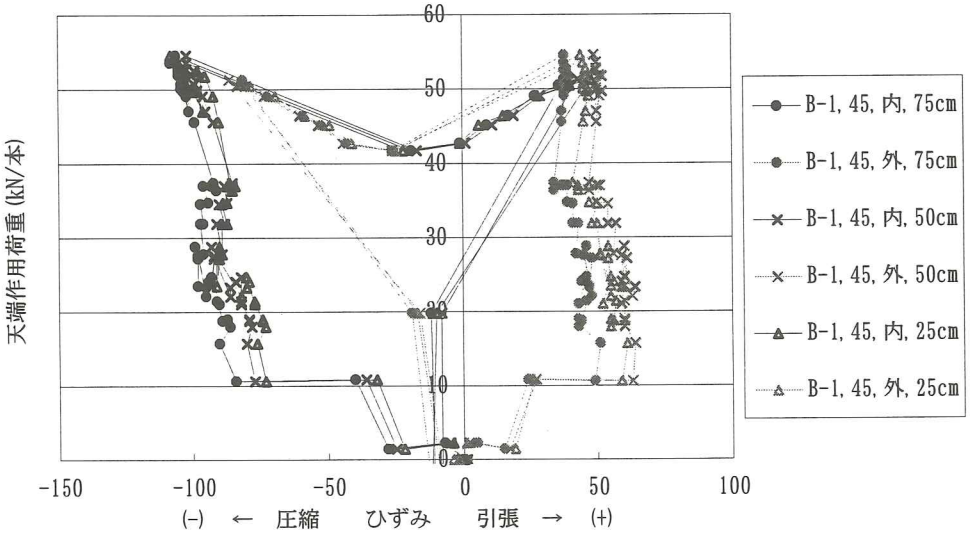


図-参. 4 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 45度, 高さ毎)

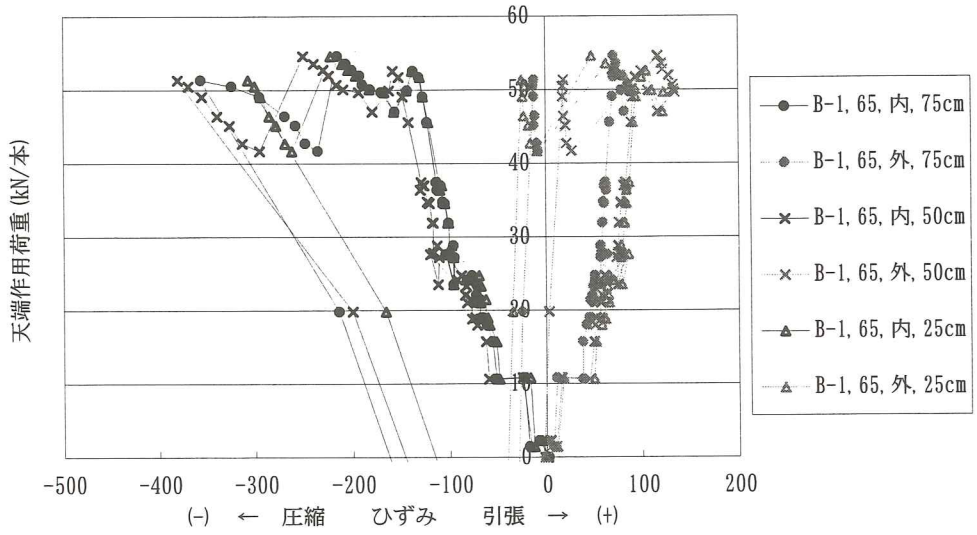


図-参. 4 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 65度, 高さ毎)

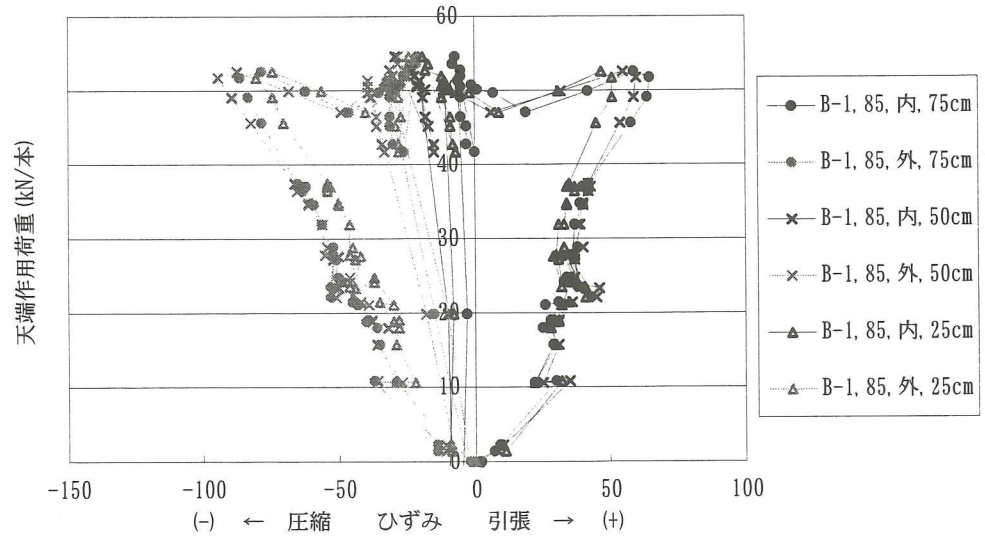


図-参. 4 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-1, 85度, 高さ毎)

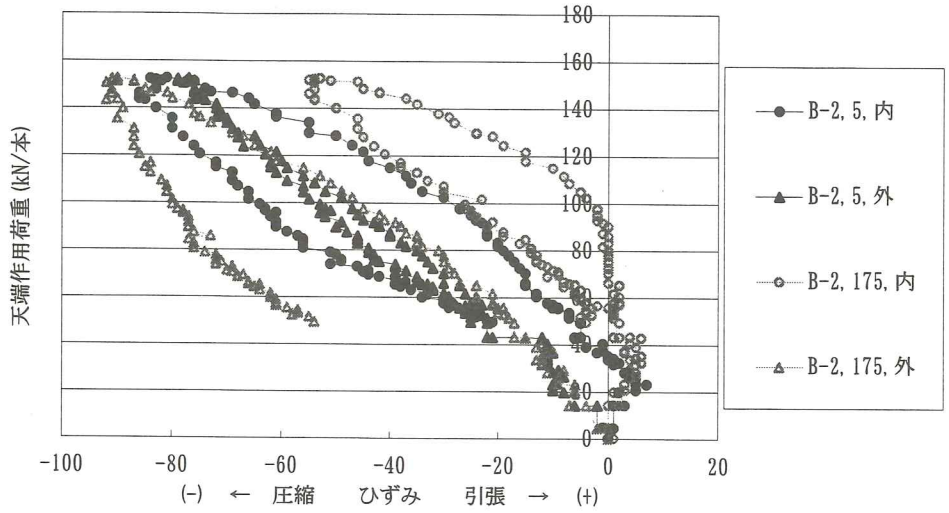


図-参. 5 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 5度・175度, 高さ50cm)

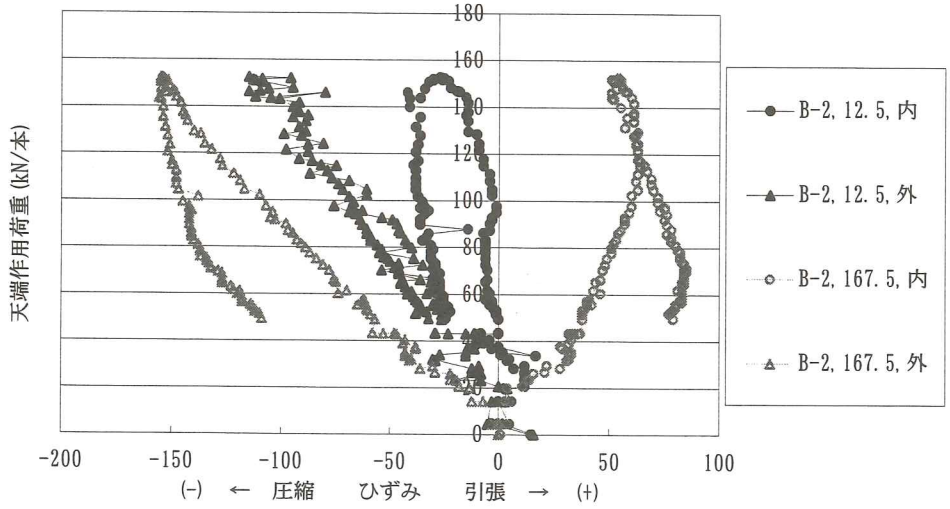


図-参. 5 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 12. 5度・167. 5度, 高さ50cm)

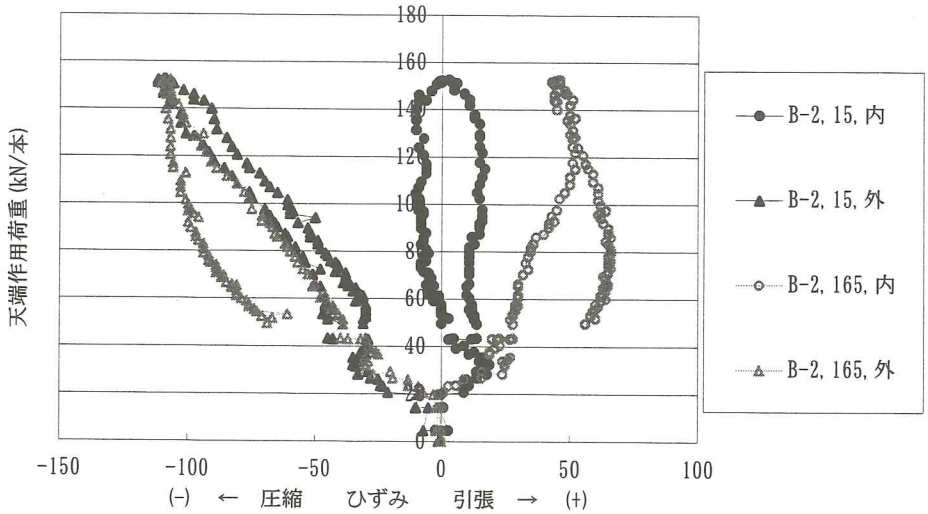


図-参. 5 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 15度・165度, 高さ50cm)

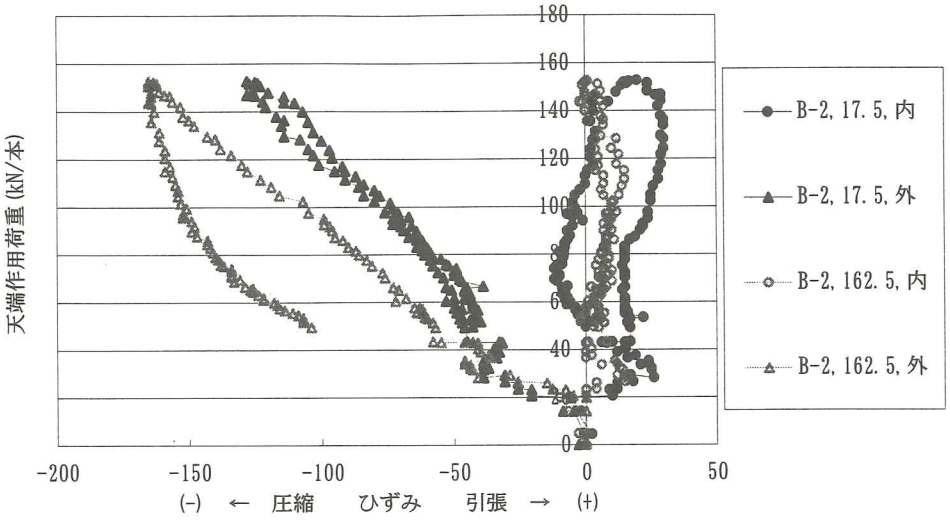


図-参. 5 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

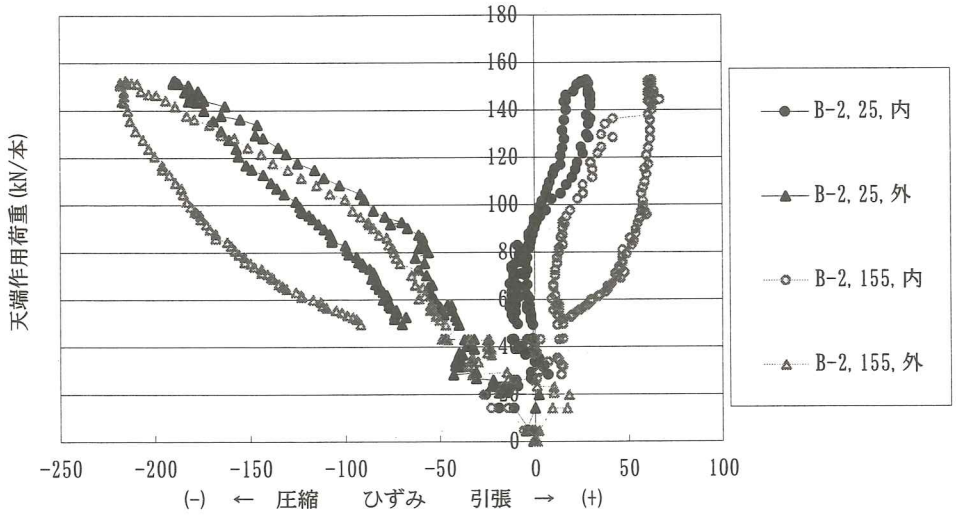


図-参. 5 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 25度・155度, 高さ50cm)

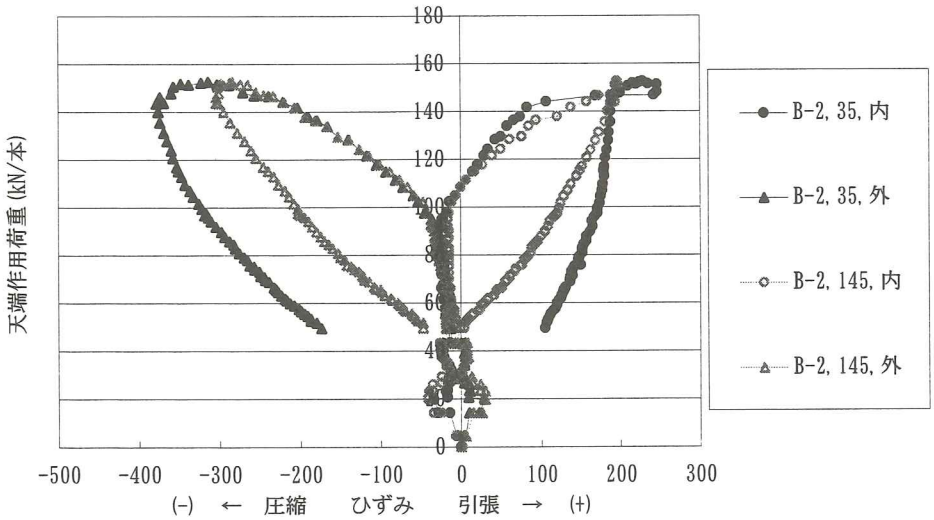


図-参. 5 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 35度・145度, 高さ50cm)

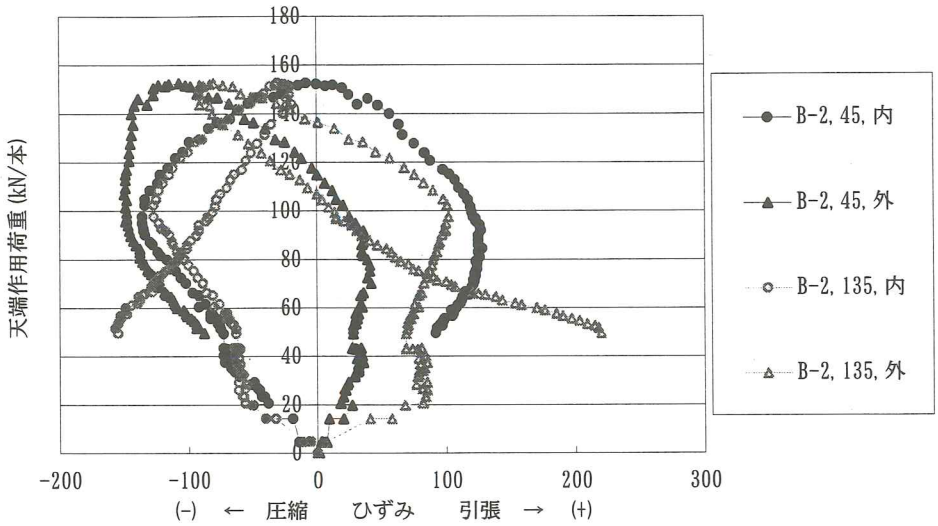


図-参. 5 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 45度・135度, 高さ50cm)

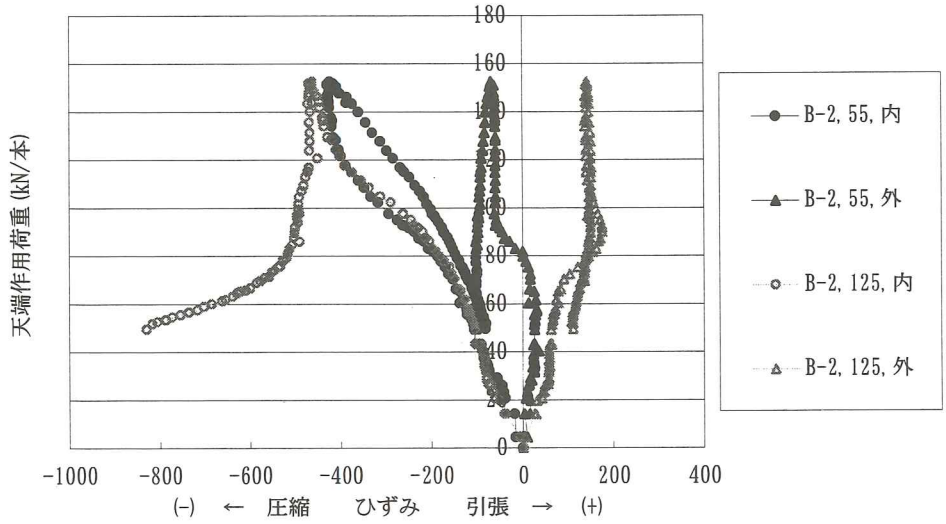


図-参. 5 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 55度・125度, 高さ50cm)

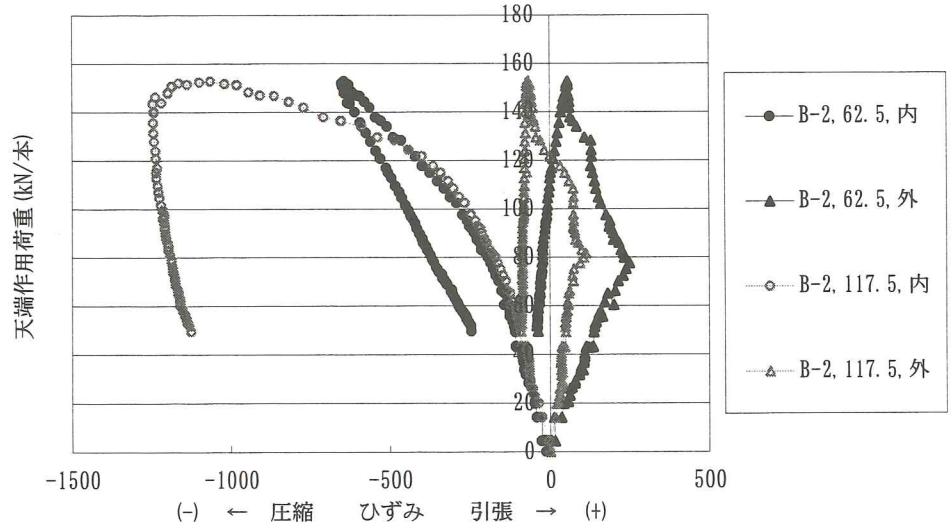


図-参. 5 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 62.5度・117.5度, 高さ50cm)

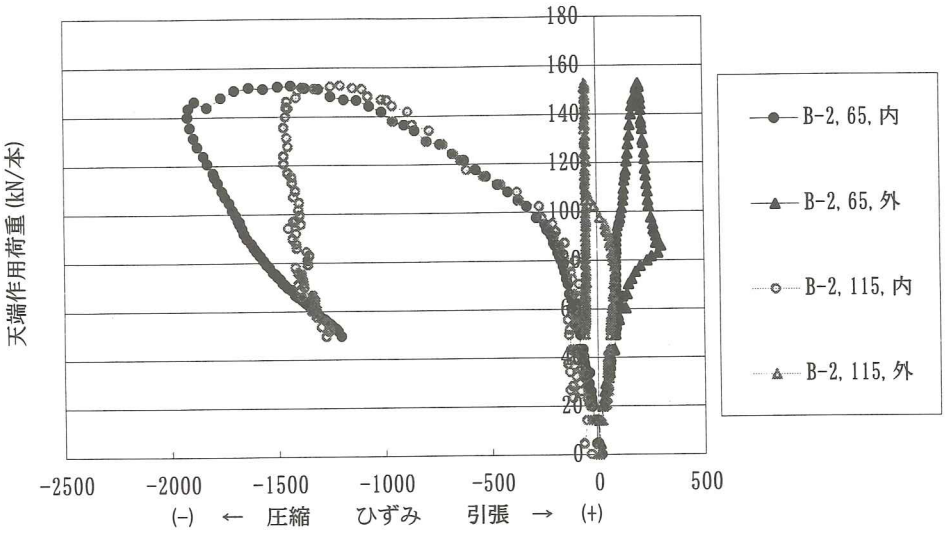


図-参. 5 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 65度・115度, 高さ50cm)

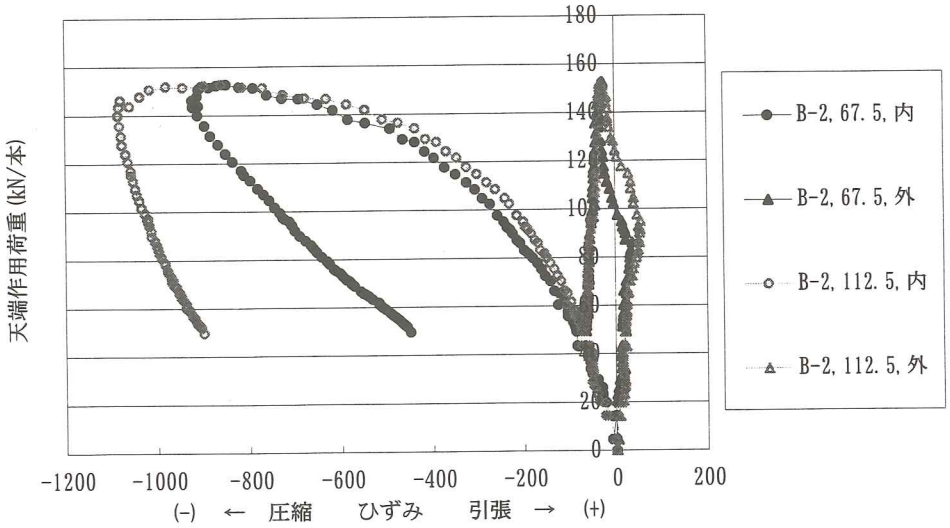


図-参. 5 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 67. 5度・112. 5度, 高さ50cm)

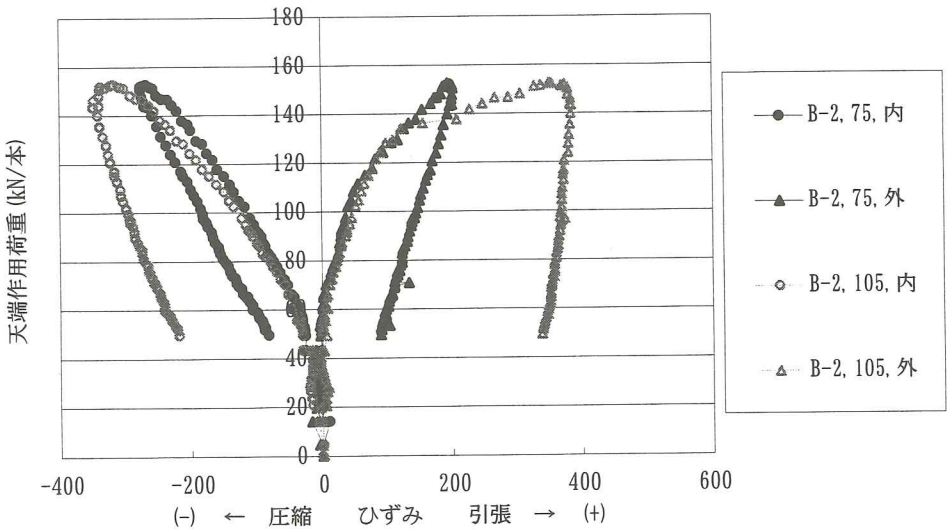


図-参. 5 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 75度・105度, 高さ50cm)

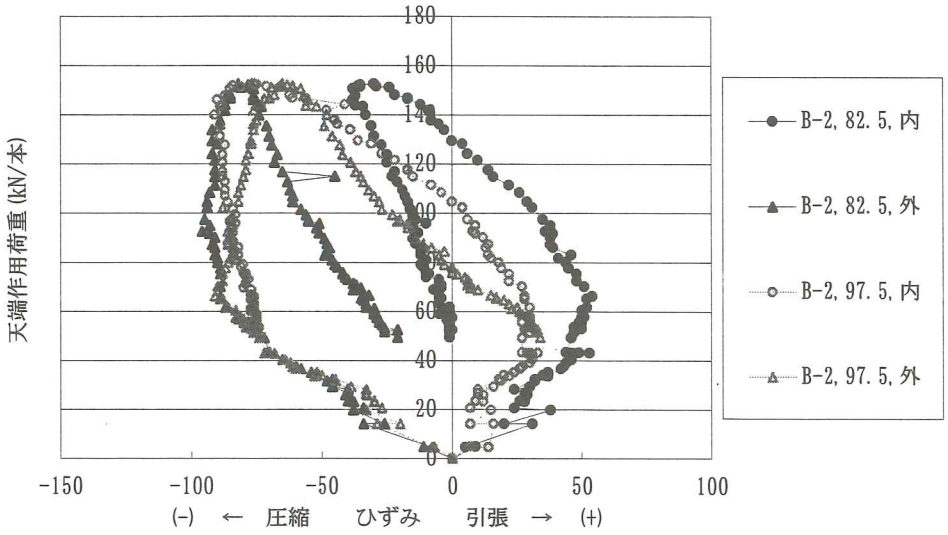


図-参. 5 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

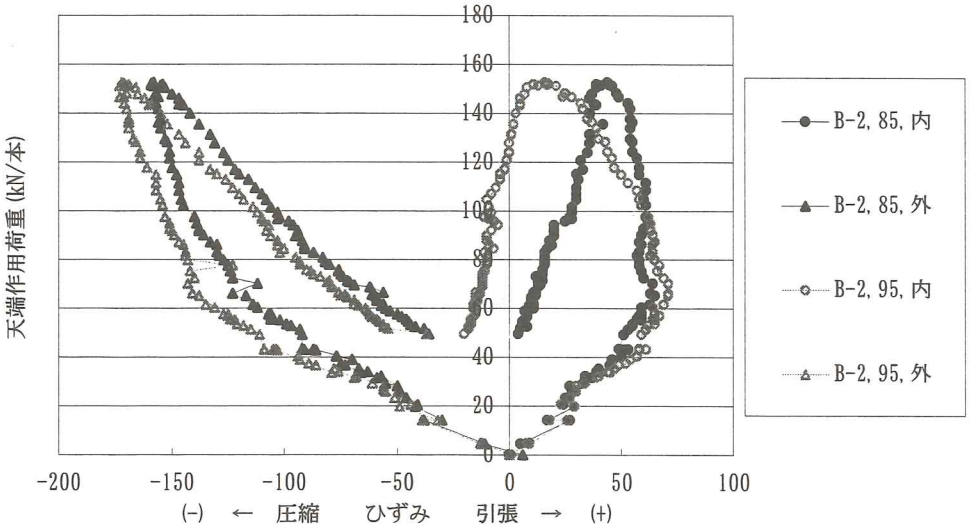


図-参. 5 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 85度・95度, 高さ50cm)

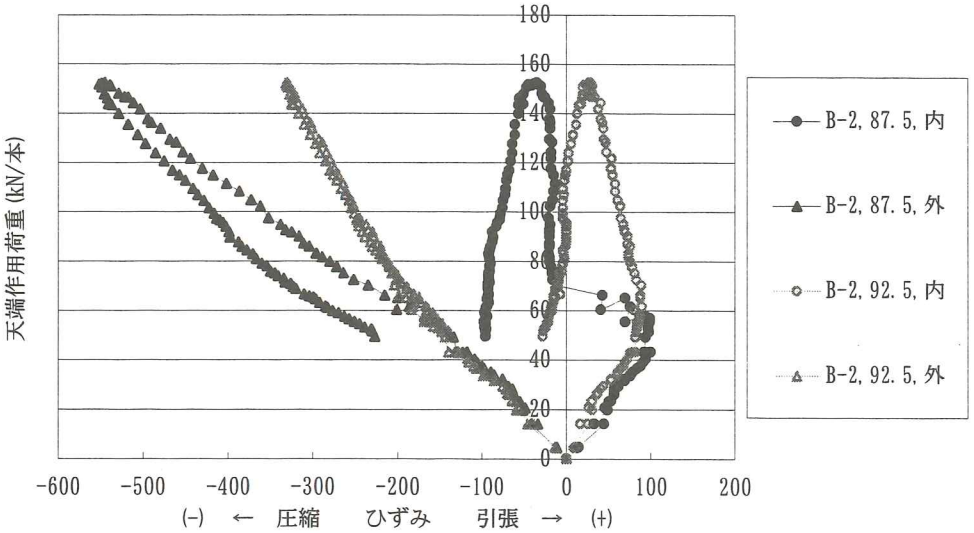


図-参. 5 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

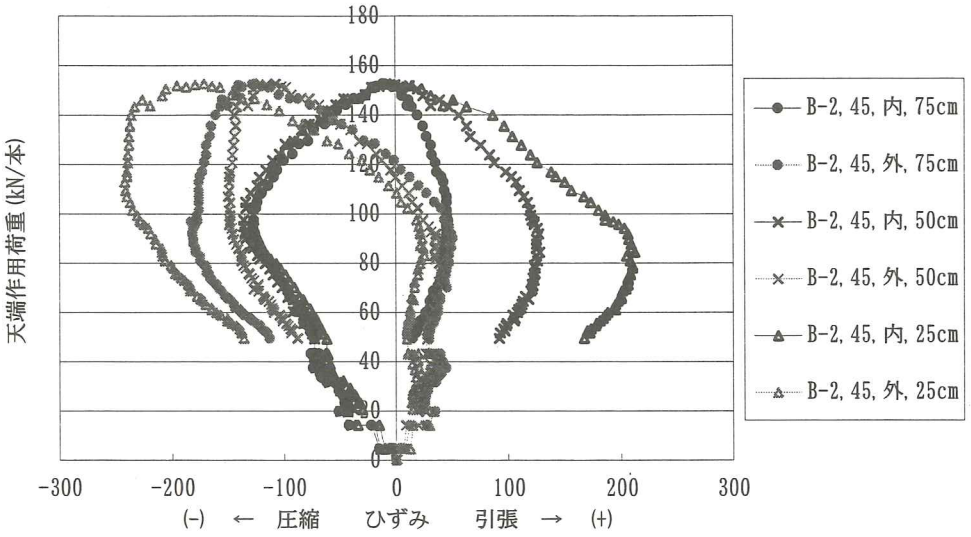


図-参. 5 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 45度, 高さ毎)

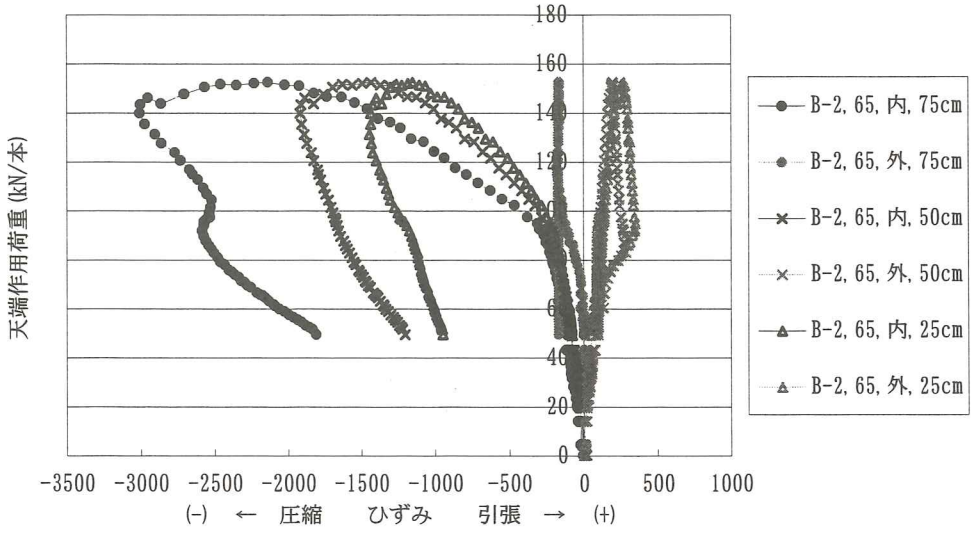


図-参. 5 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 65度, 高さ毎)

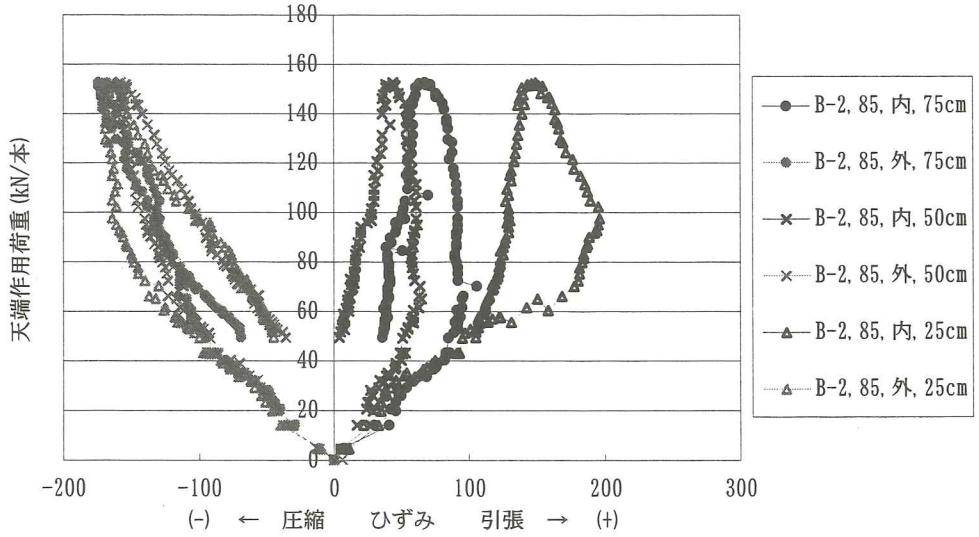


図-参. 5 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-2, 85度, 高さ毎)

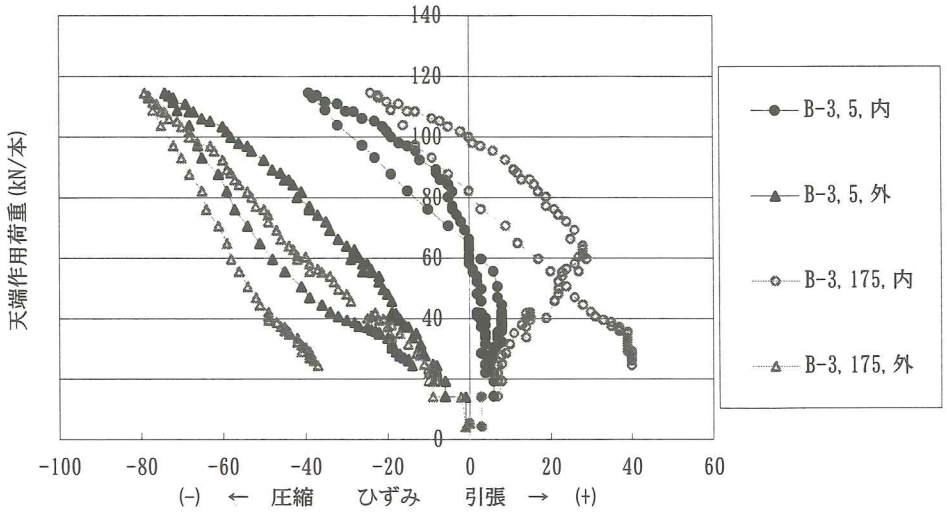


図-参. 6 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 5度・175度, 高さ50cm)

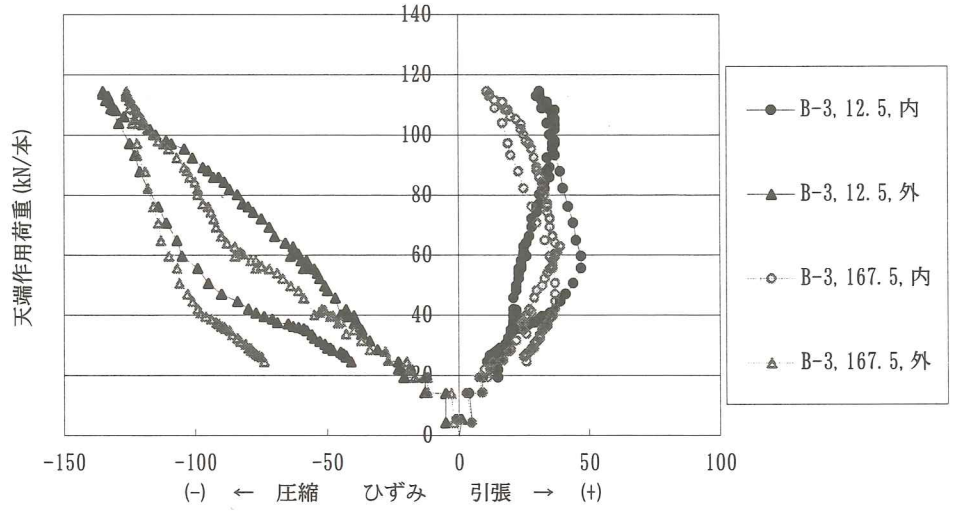


図-参. 6 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 12.5度・167.5度, 高さ50cm)

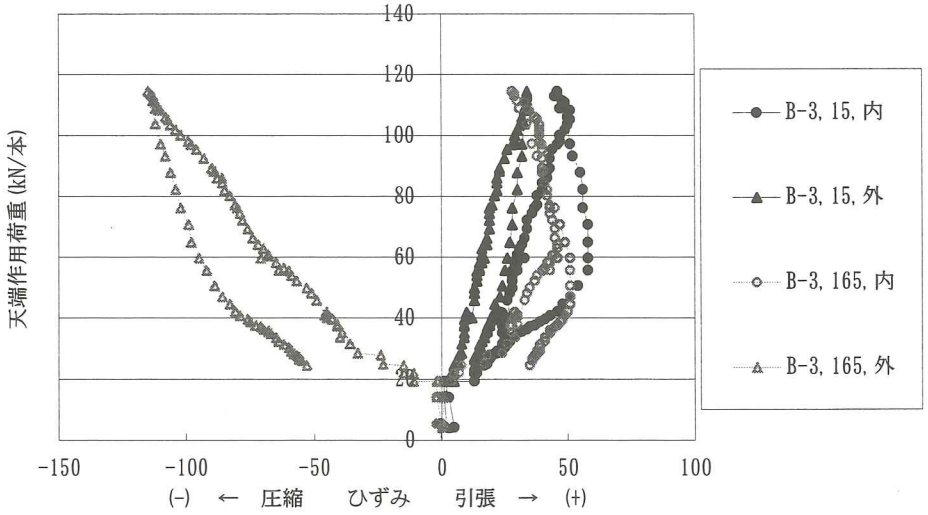


図-参. 6 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 15度・165度, 高さ50cm)

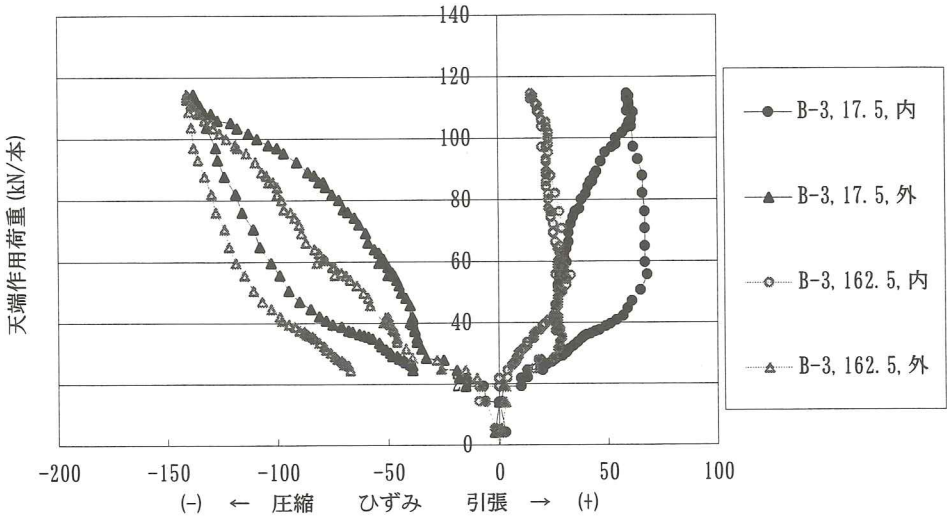


図-参. 6 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

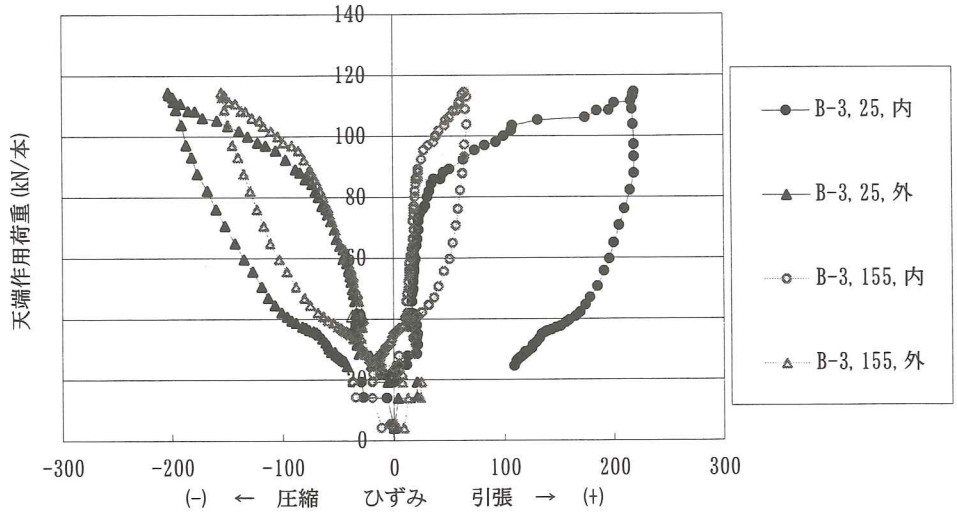


図-参. 6 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 25度・155度, 高さ50cm)

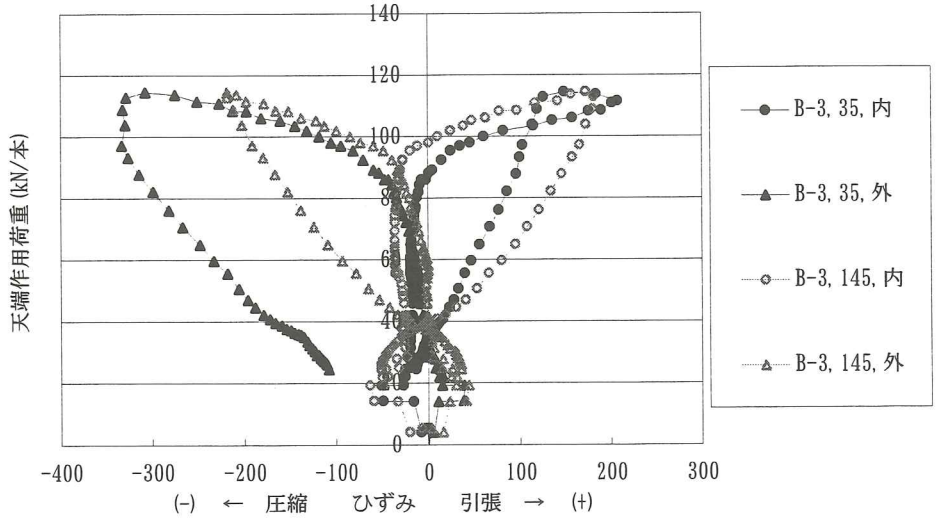


図-参. 6 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 35度・145度, 高さ50cm)

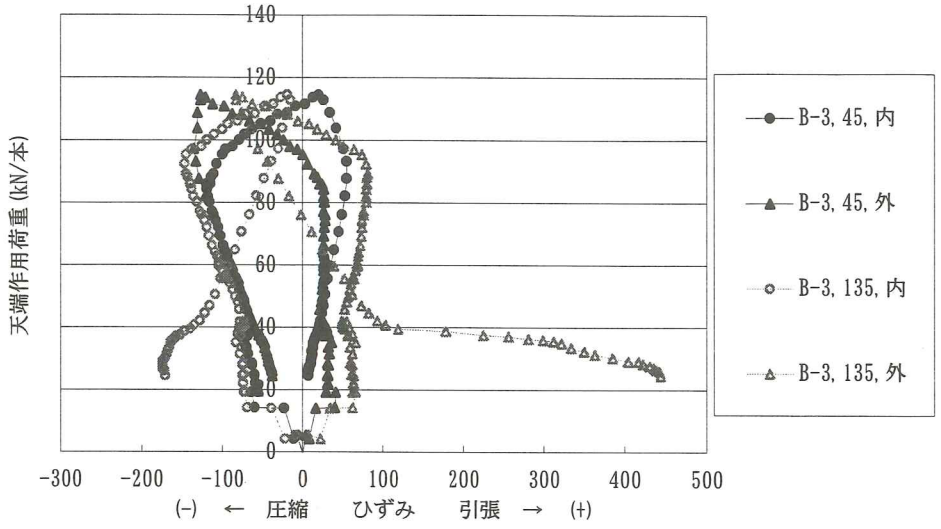


図-参. 6 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 45度・135度, 高さ50cm)

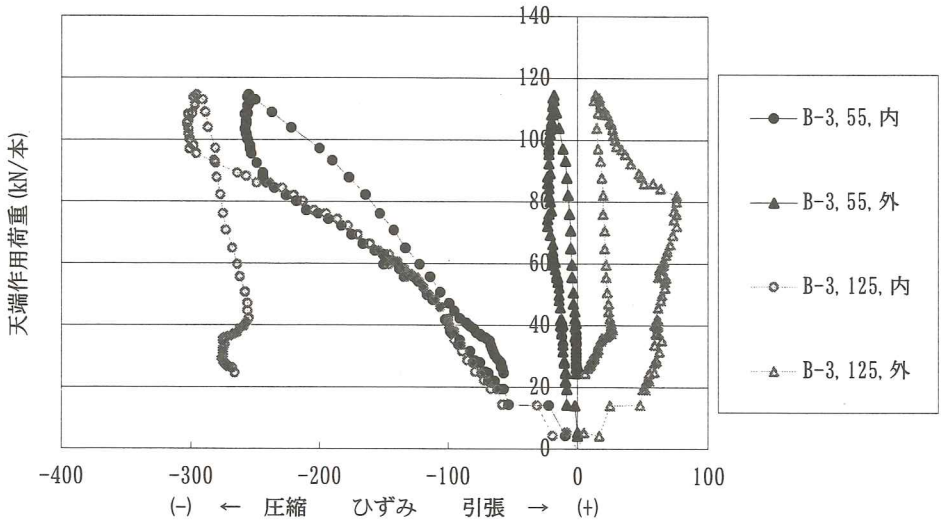


図-参. 6 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 55度・125度, 高さ50cm)

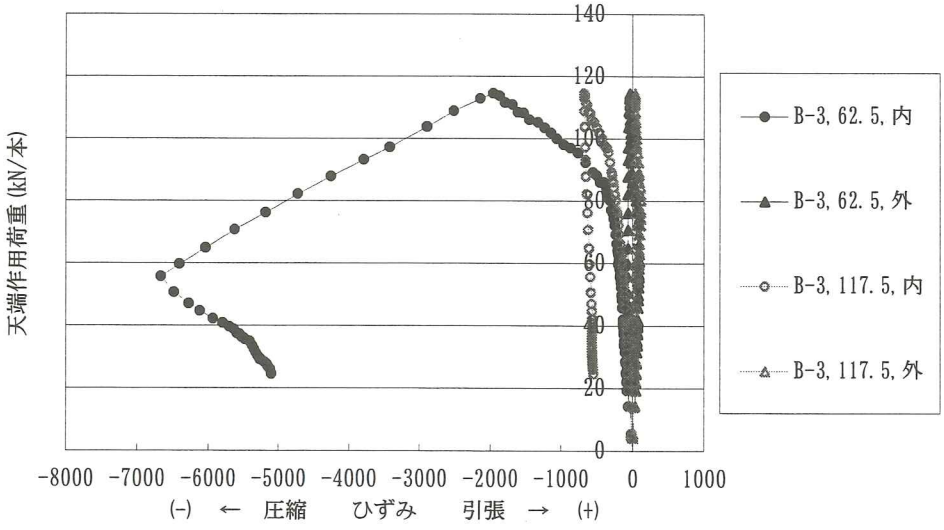


図-参. 6 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 62.5度・117.5度, 高さ50cm)

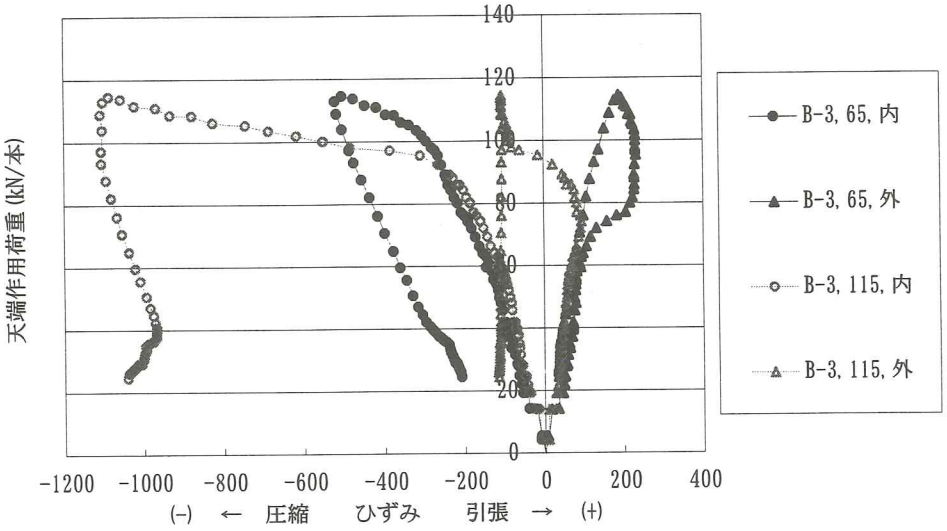


図-参. 6 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 65度・115度, 高さ50cm)

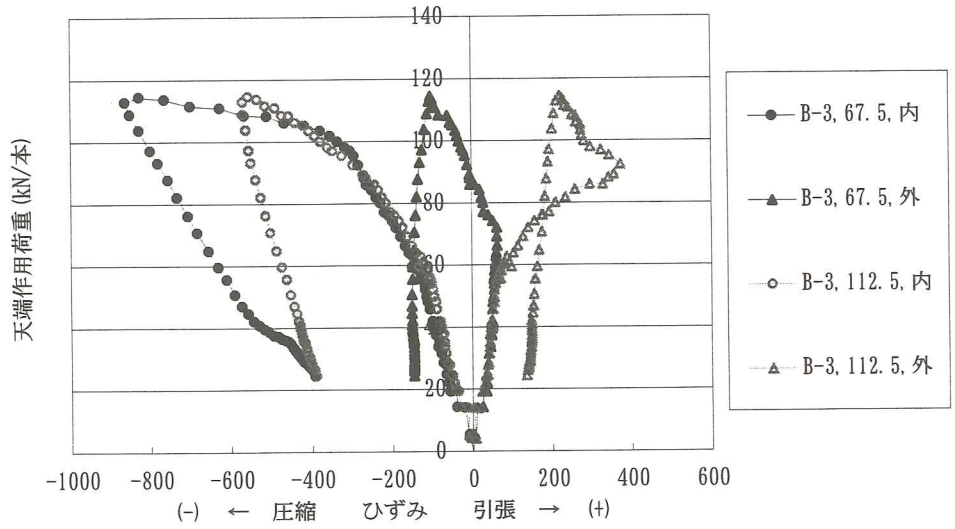


図-参. 6 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 67. 5度・112. 5度, 高さ50cm)

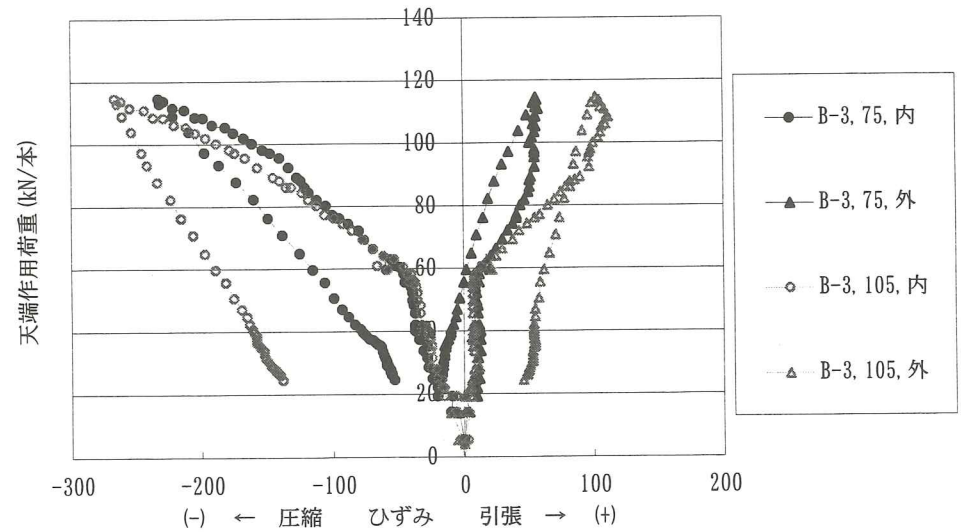


図-参. 6 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 75度・105度, 高さ50cm)

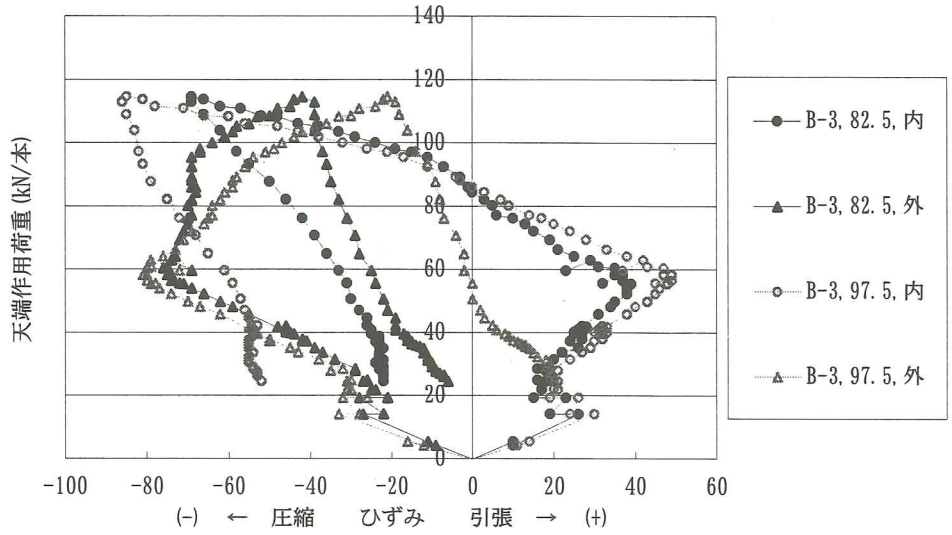


図-参. 6 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

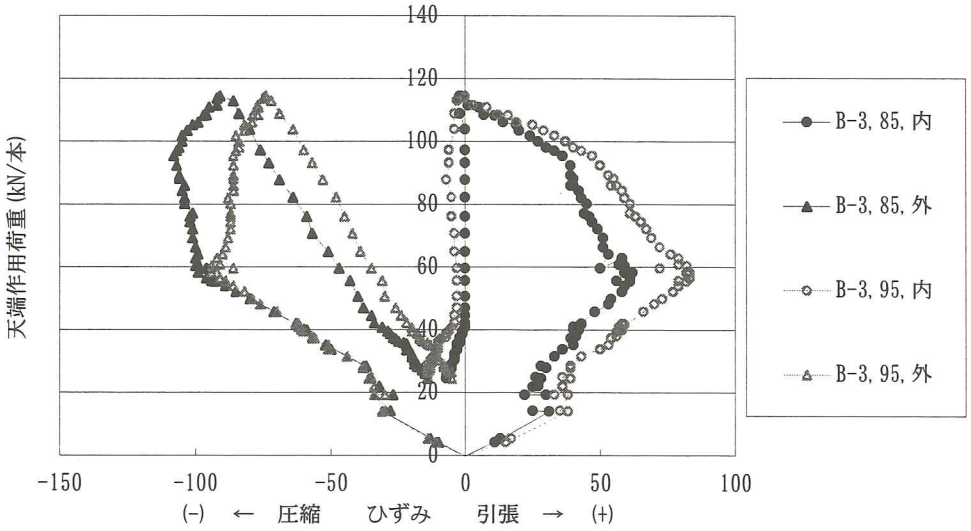


図-参. 6 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 85度・95度, 高さ50cm)

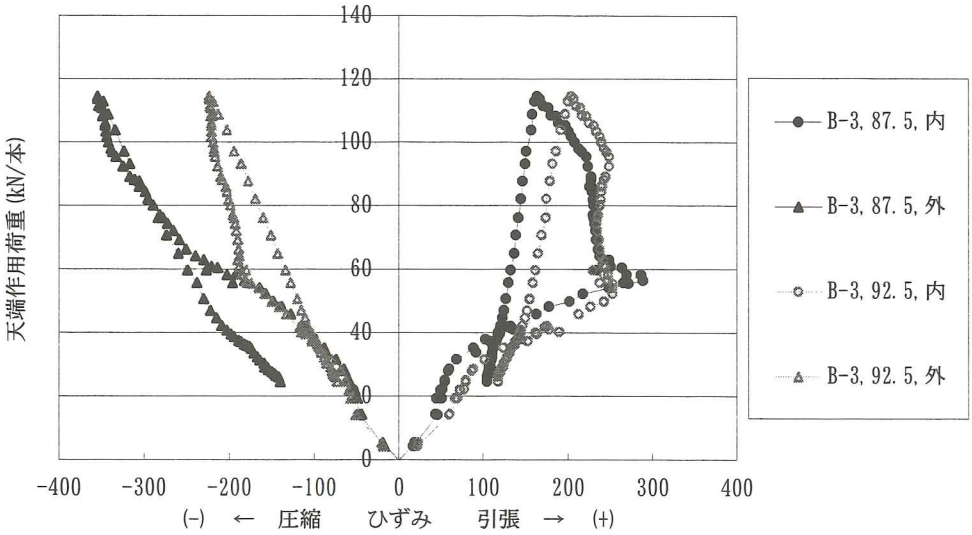


図-参. 6 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

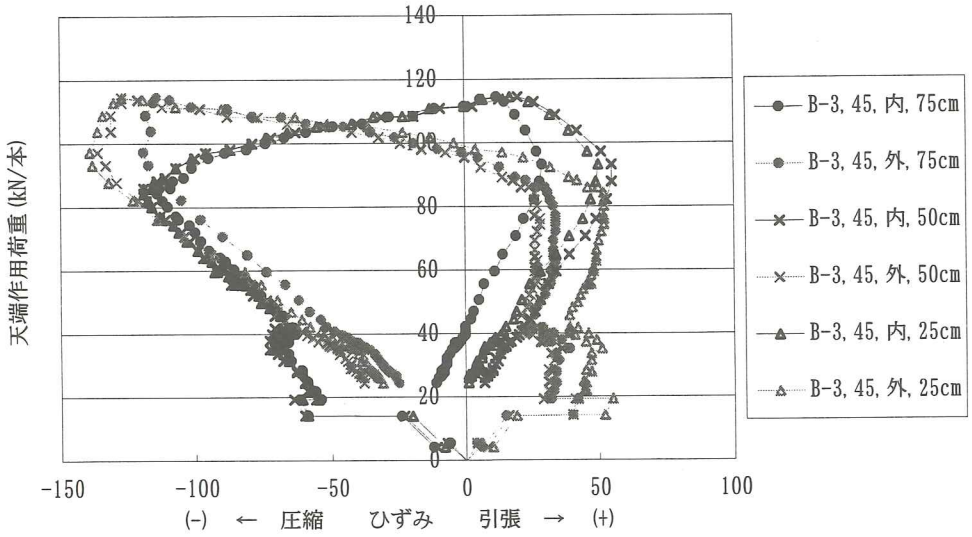


図-参. 6 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 45度, 高さ毎)

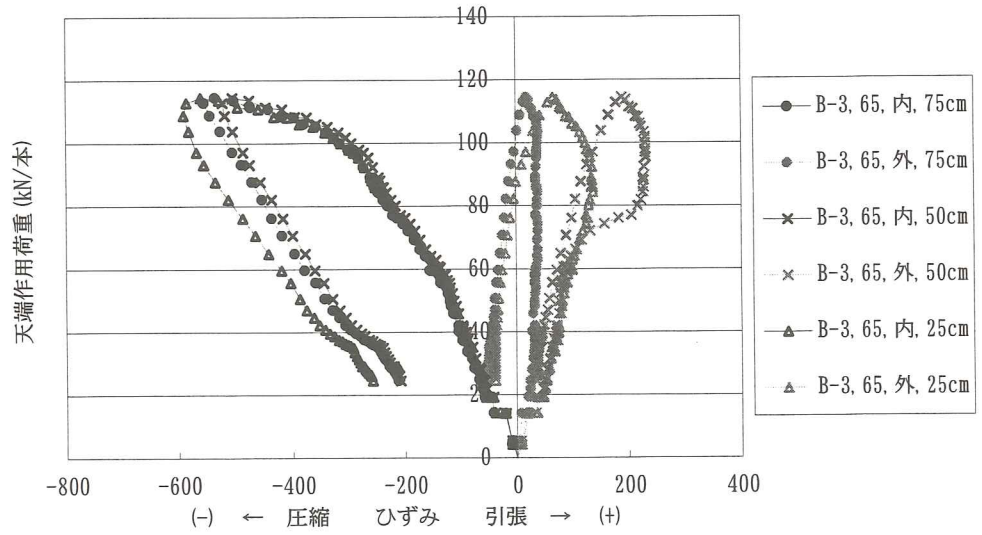


図-参. 6 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 65度, 高さ毎)

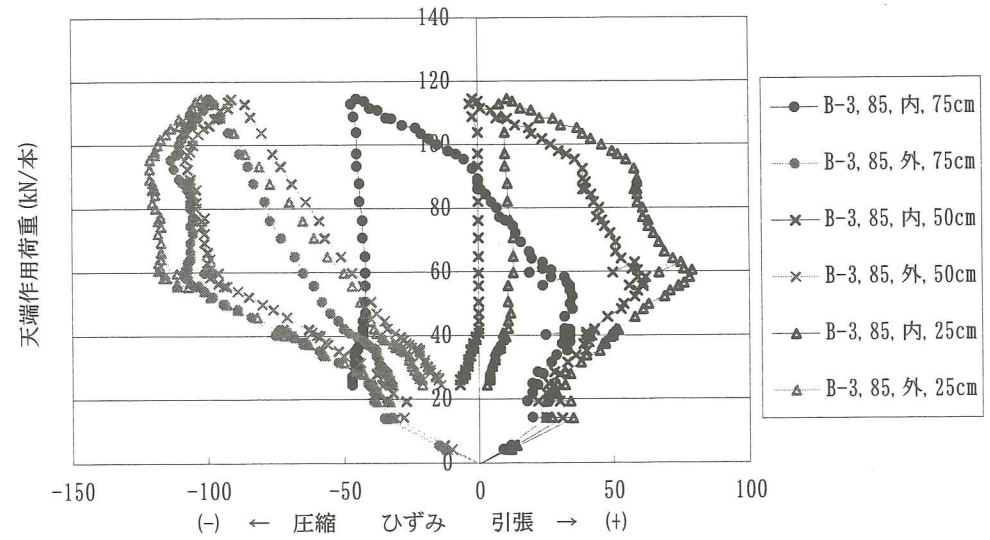


図-参. 6 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-3, 85度, 高さ毎)

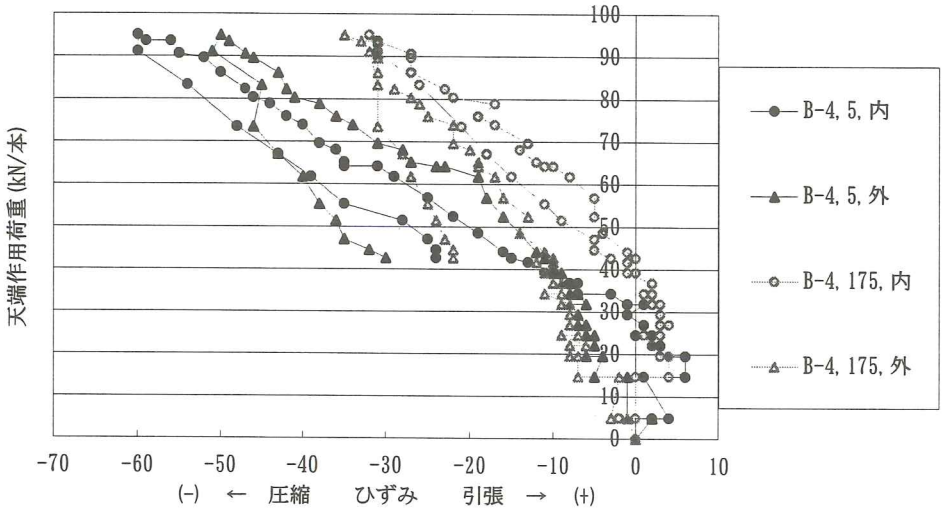


図-参. 7 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 5度・175度, 高さ50cm)

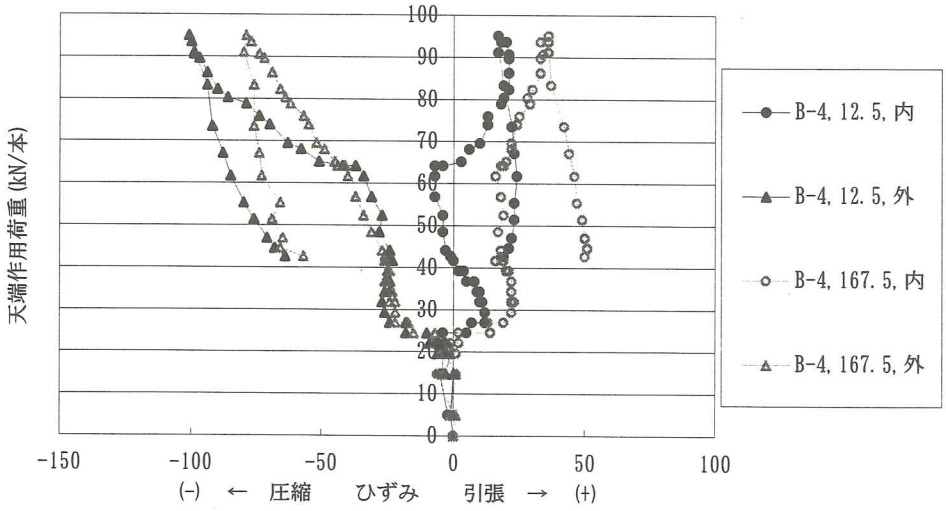


図-参. 7 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 12. 5度・167. 5度, 高さ50cm)

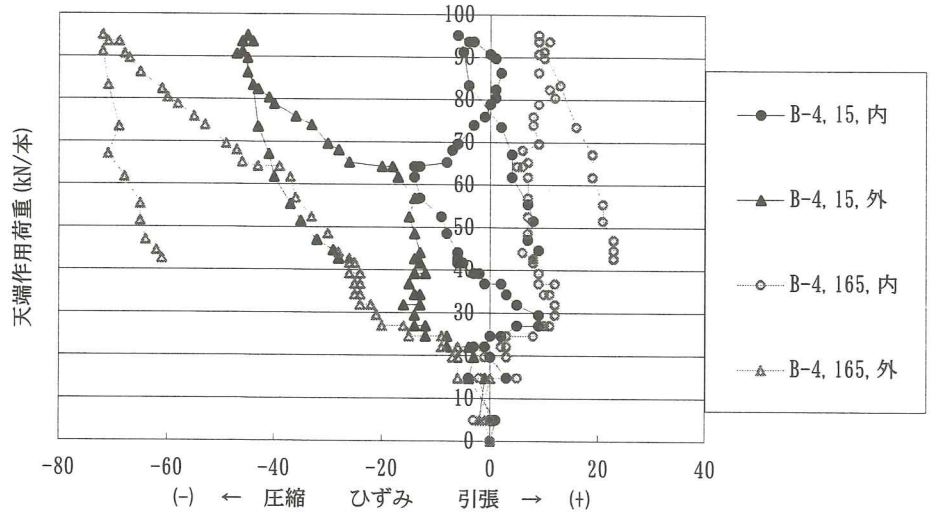


図-参. 7 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 15度・165度, 高さ50cm)

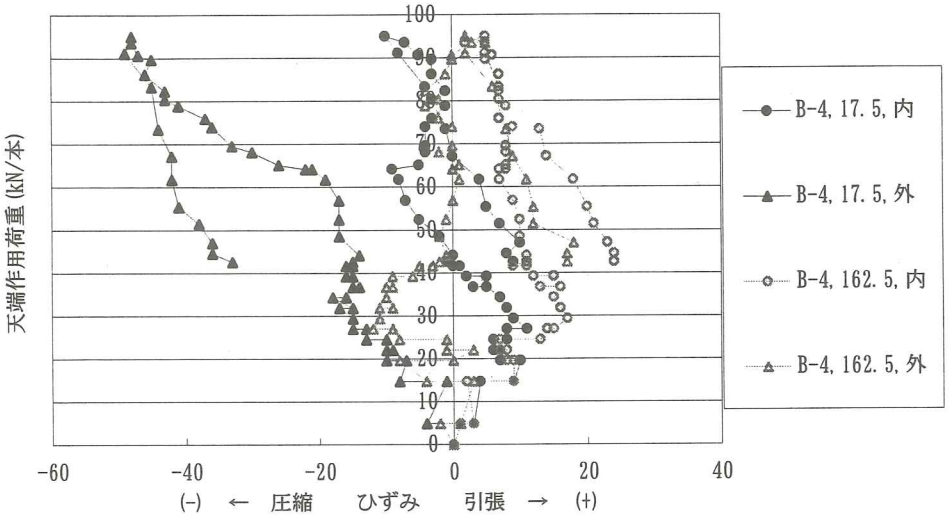


図-参. 7 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

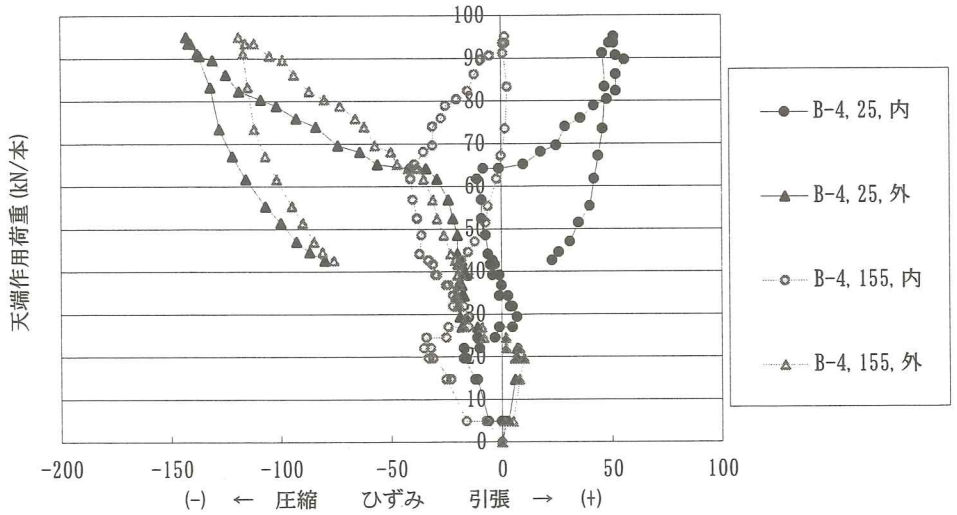


図-参. 7 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 25度・155度, 高さ50cm)

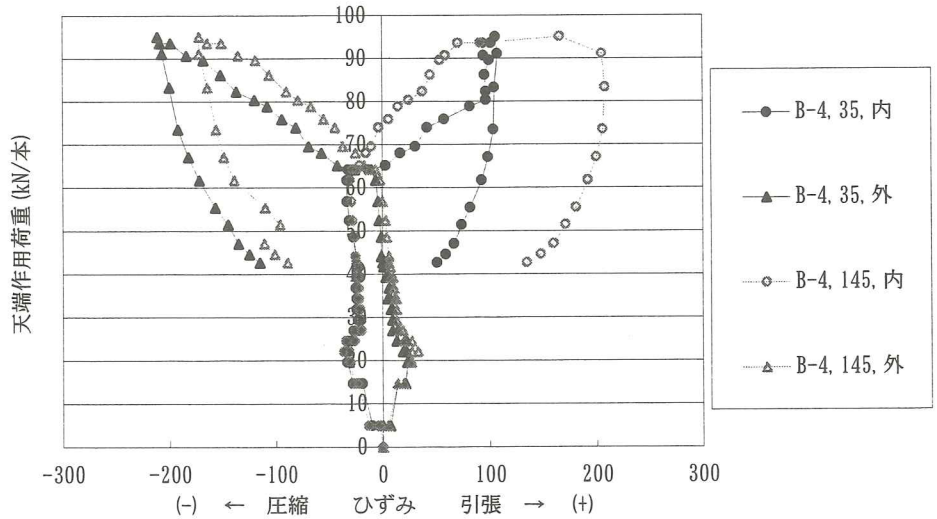


図-参. 7 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 35度・145度, 高さ50cm)

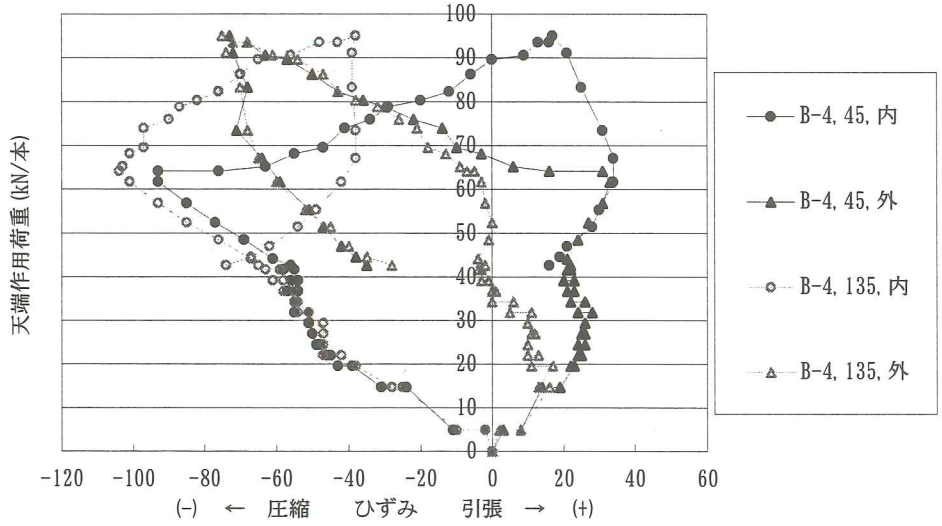


図-参. 7 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 45度・135度, 高さ50cm)

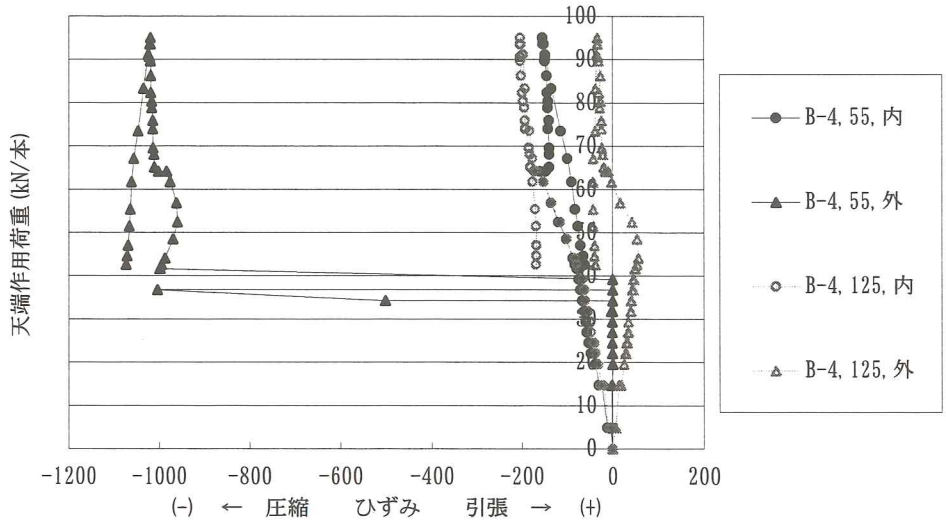


図-参. 7 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 55度・125度, 高さ50cm)

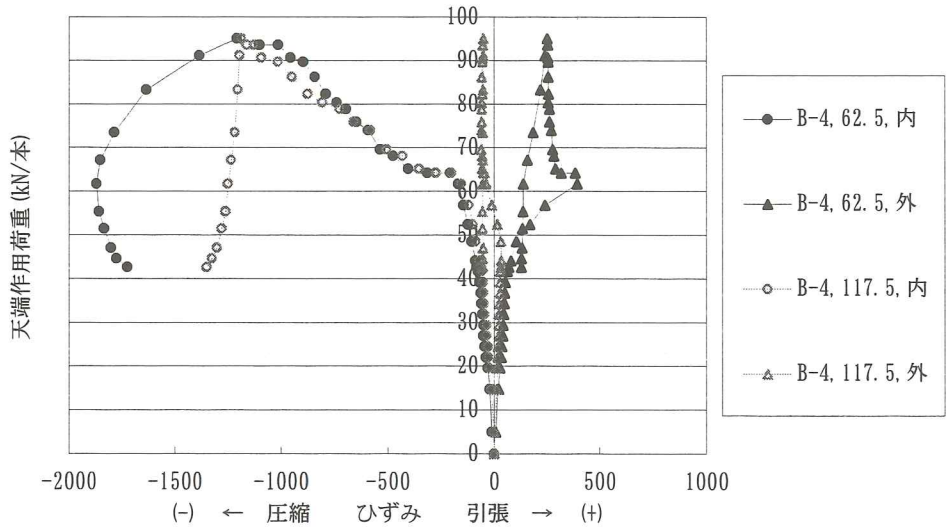


図-参. 7 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 62.5度・117.5度, 高さ50cm)

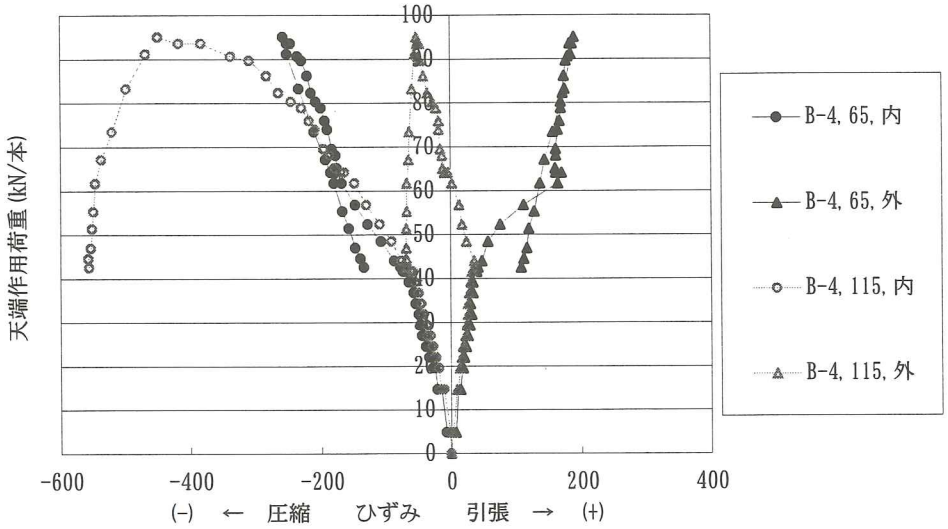


図-参. 7 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 65度・115度, 高さ50cm)

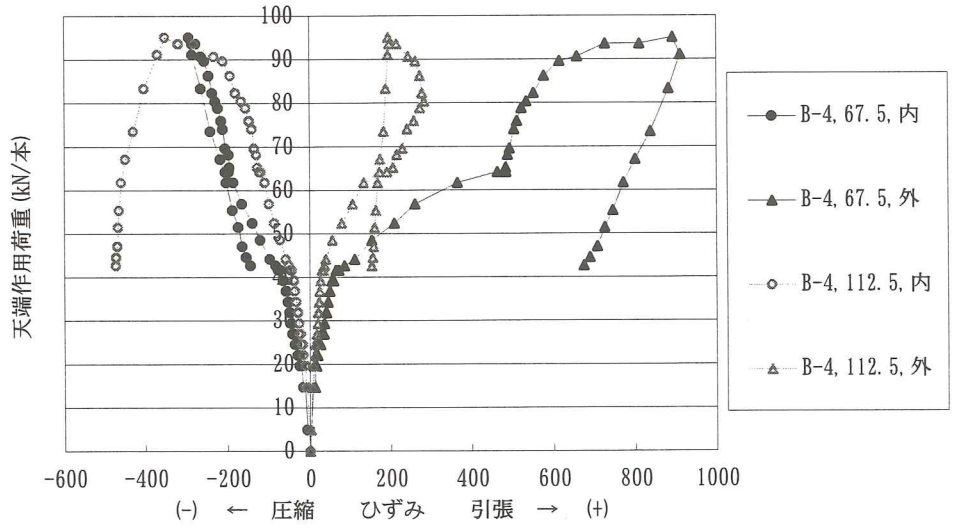


図-参. 7 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 67. 5度・112. 5度, 高さ50cm)

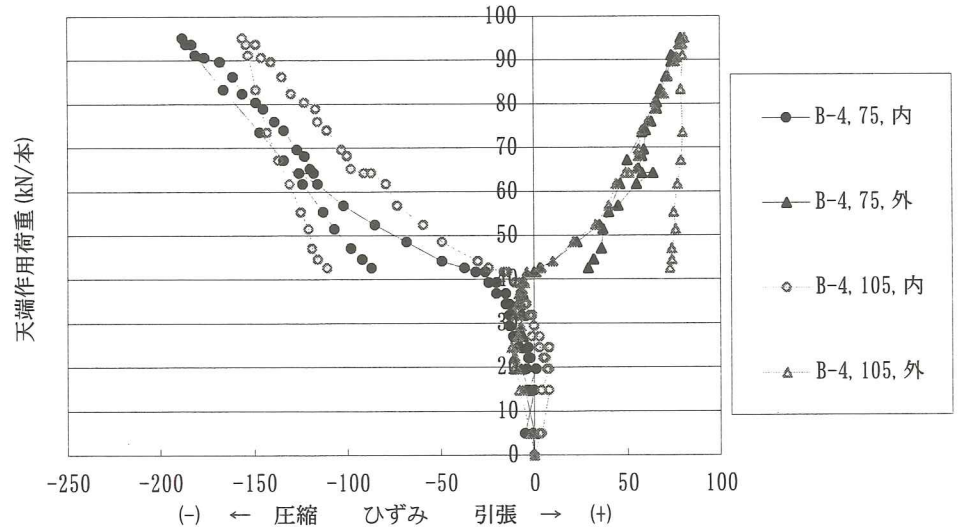


図-参. 7 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 75度・105度, 高さ50cm)

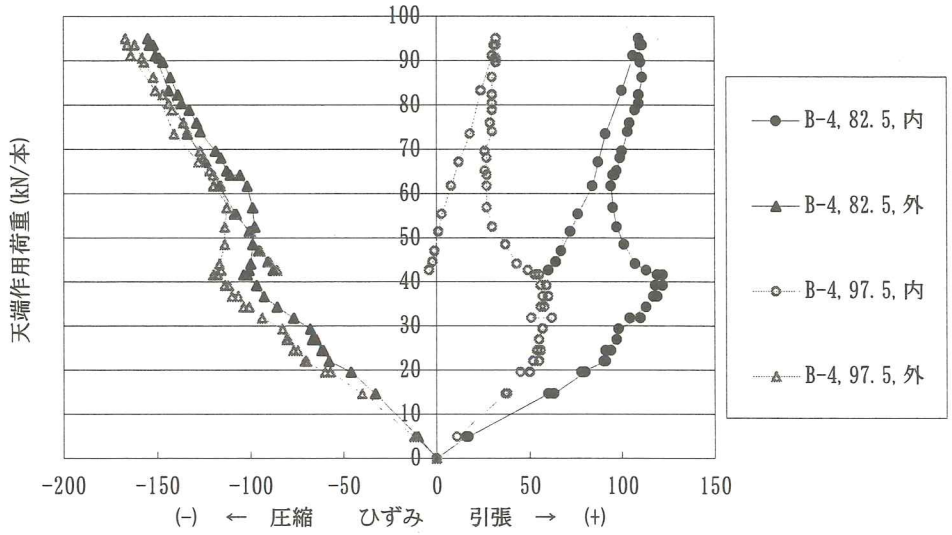


図-参. 7 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

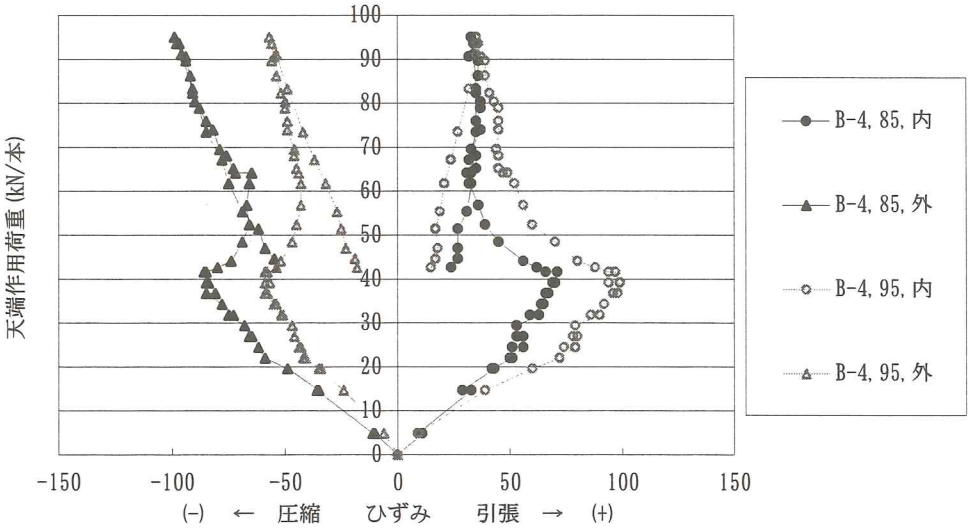


図-参. 7 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 85度・95度, 高さ50cm)

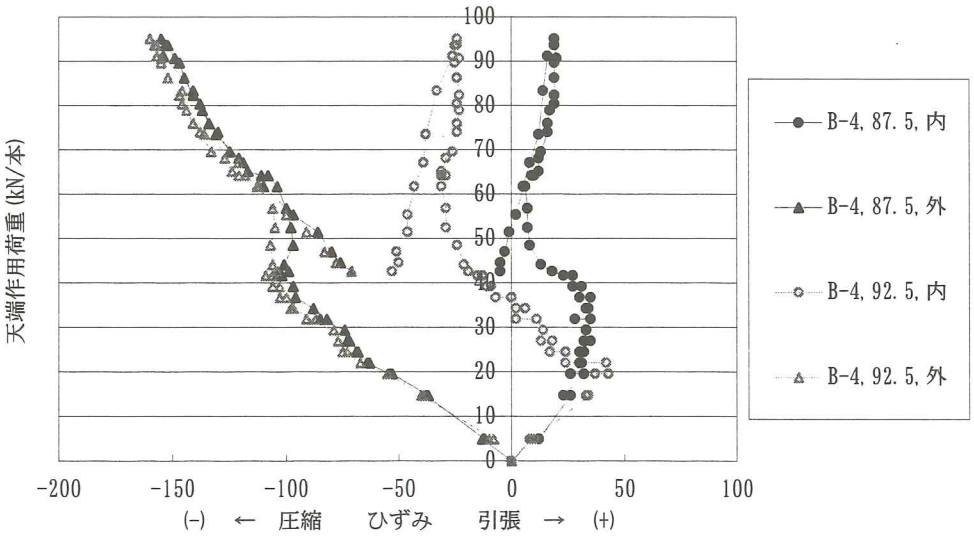


図-参. 7 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

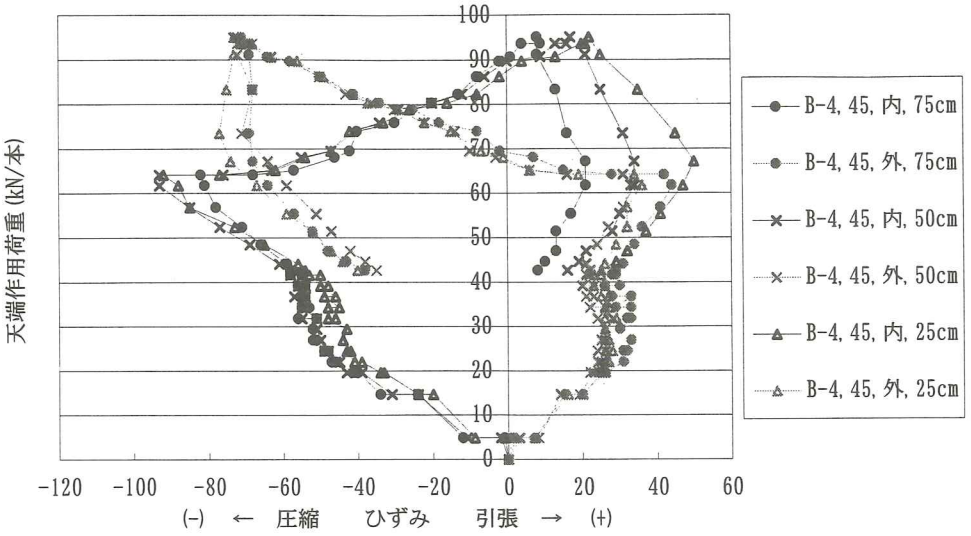


図-参. 7 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 45度, 高さ毎)

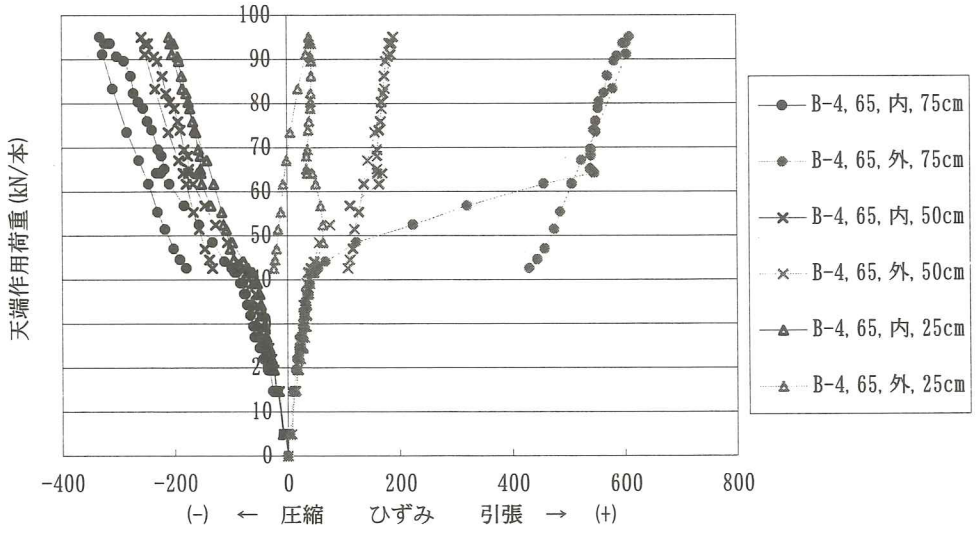


図-参. 7 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 65度, 高さ毎)

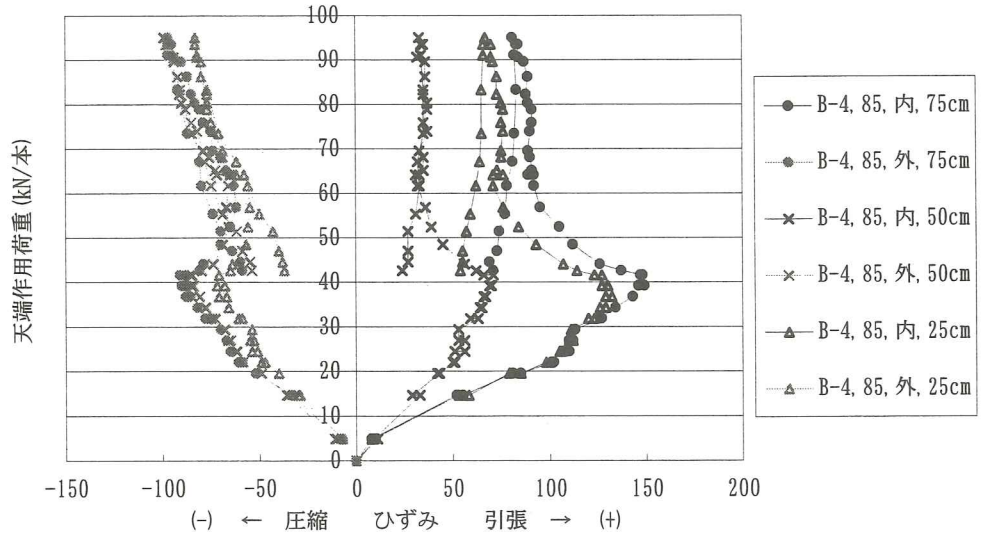


図-参. 7 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB-4, 85度, 高さ毎)

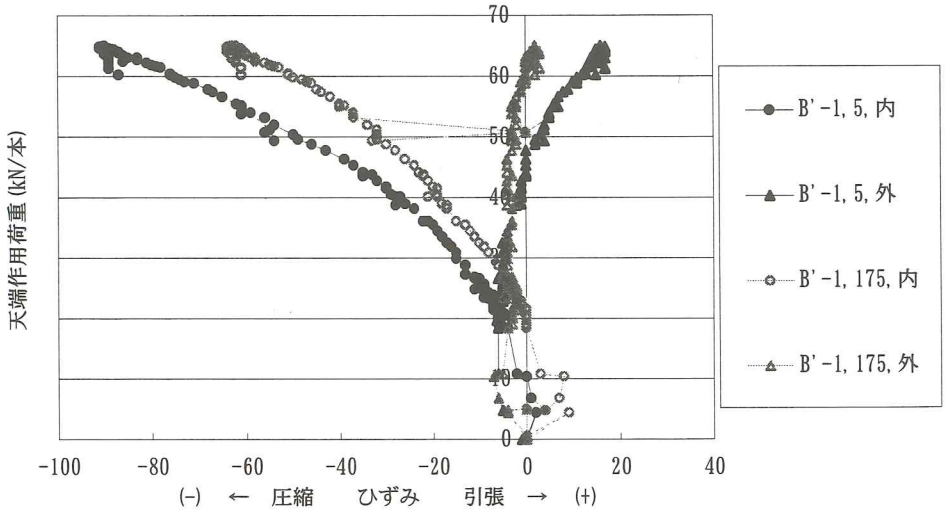


図-参. 8 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 5度・175度, 高さ50cm)

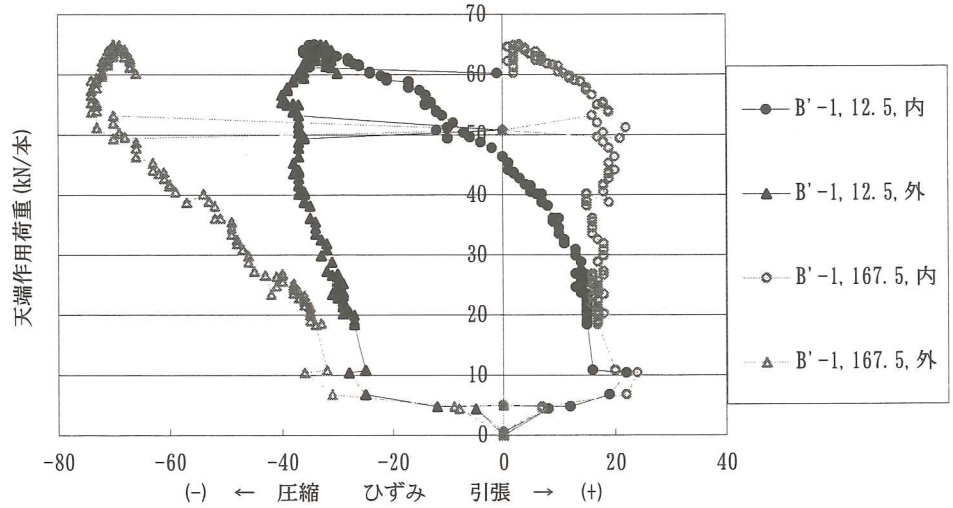


図-参. 8 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 12.5度・167.5度, 高さ50cm)

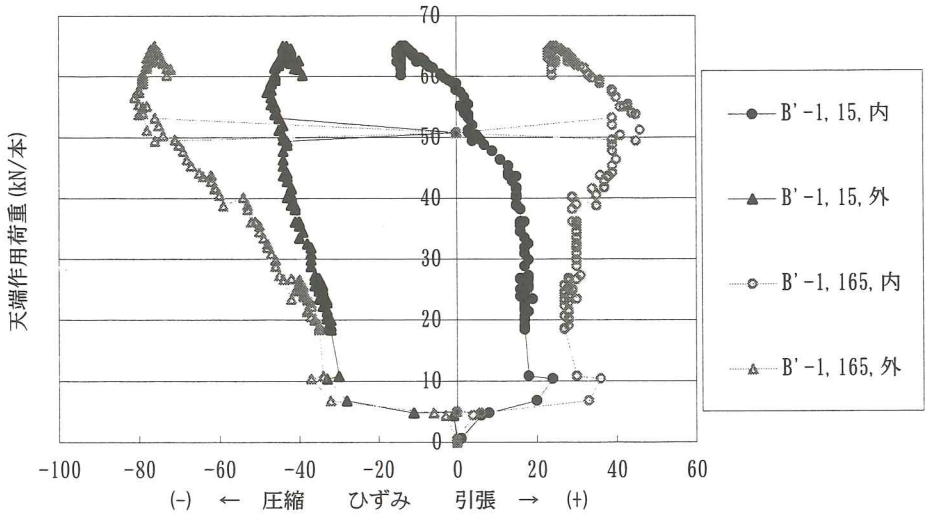


図-参. 8 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 15度・165度, 高さ50cm)

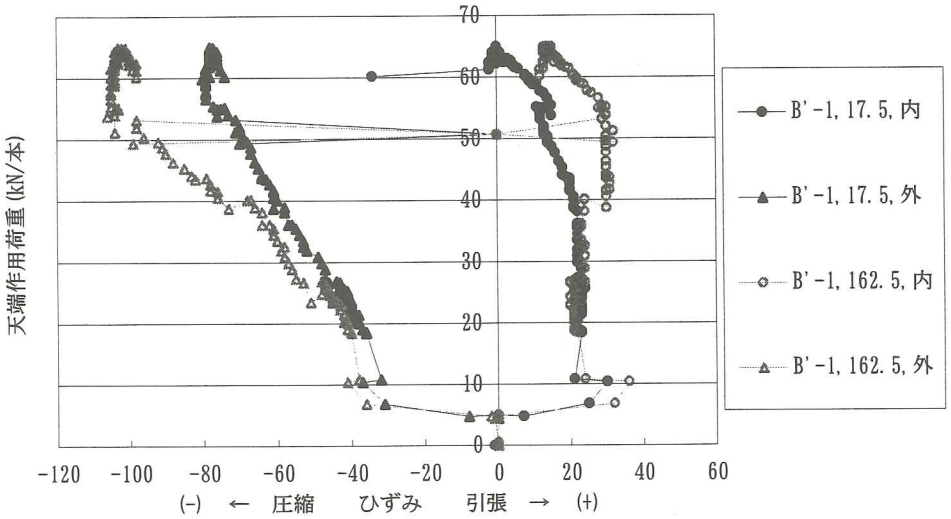


図-参. 8 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

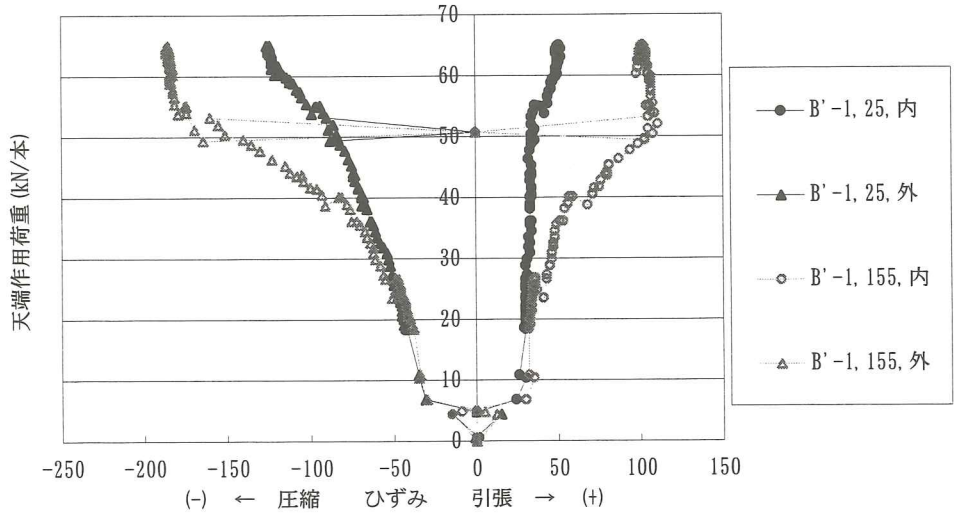


図-参. 8 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 25度・155度, 高さ50cm)

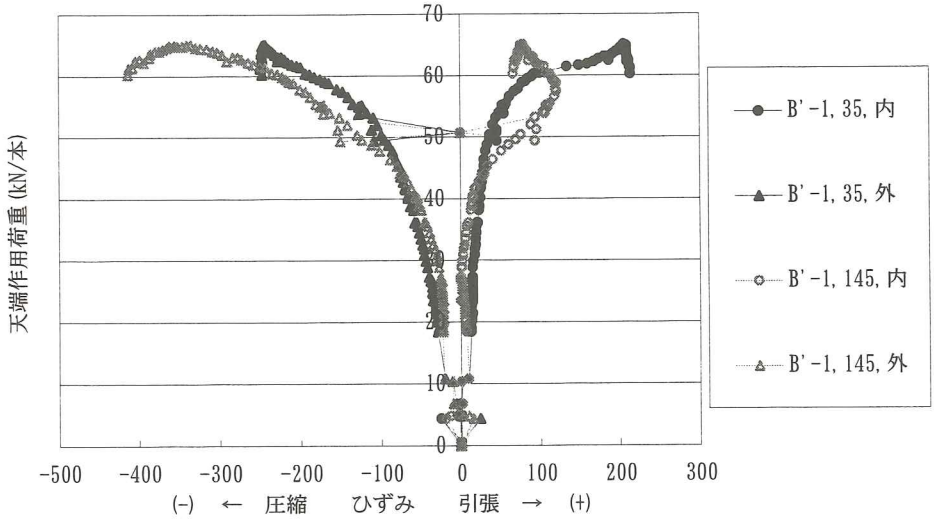


図-参. 8 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 35度・145度, 高さ50cm)

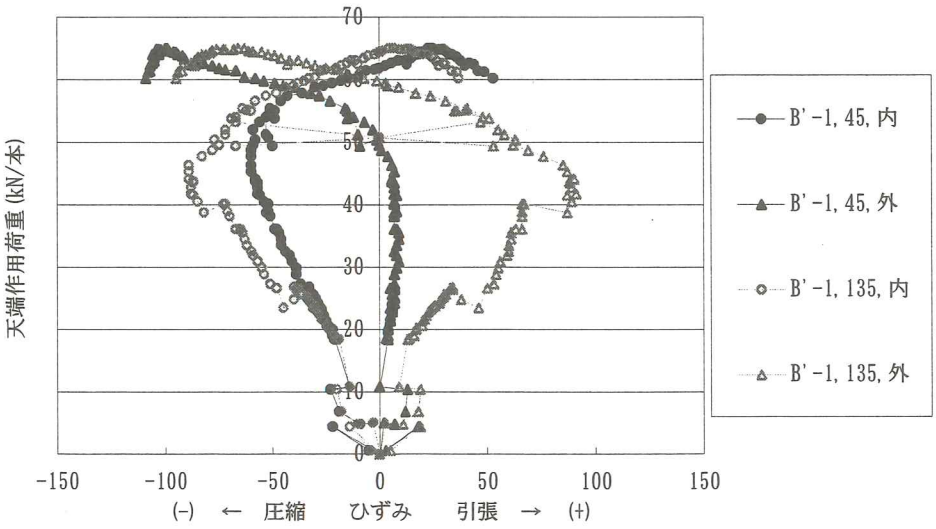


図-参. 8 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 45度・135度, 高さ50cm)

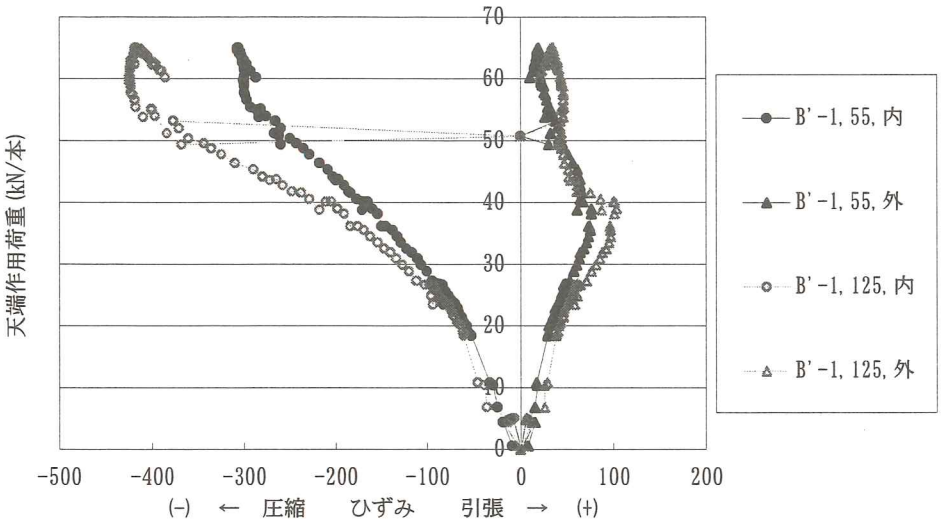


図-参. 8 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 55度・125度, 高さ50cm)

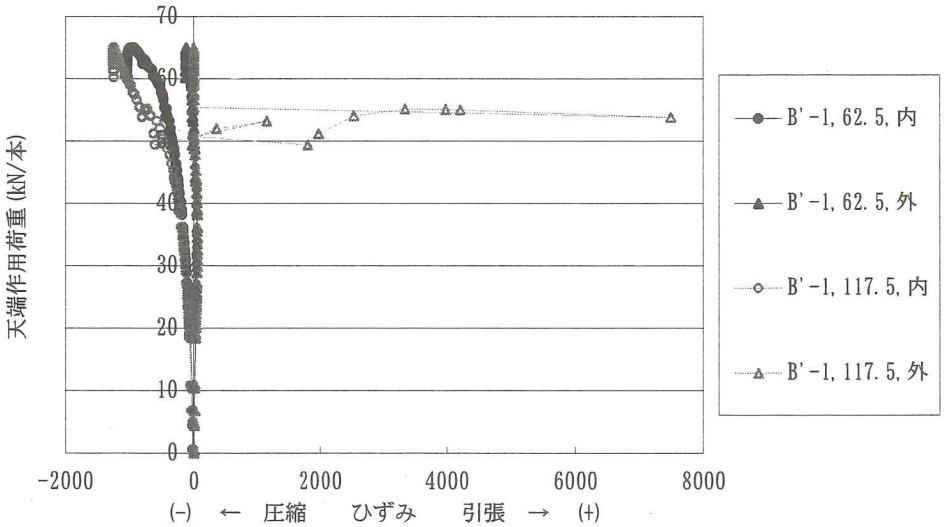


図-参. 8 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 62.5度・117.5度, 高さ50cm)

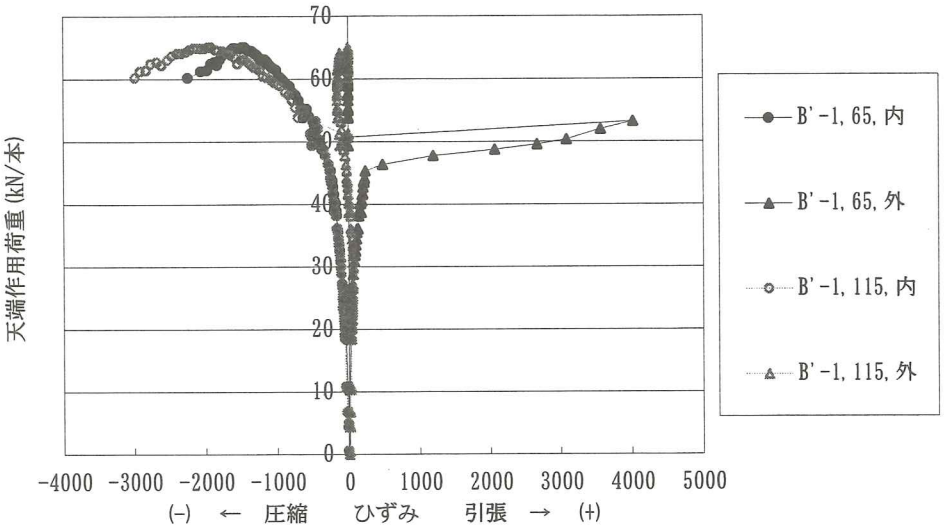


図-参. 8 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 65度・115度, 高さ50cm)

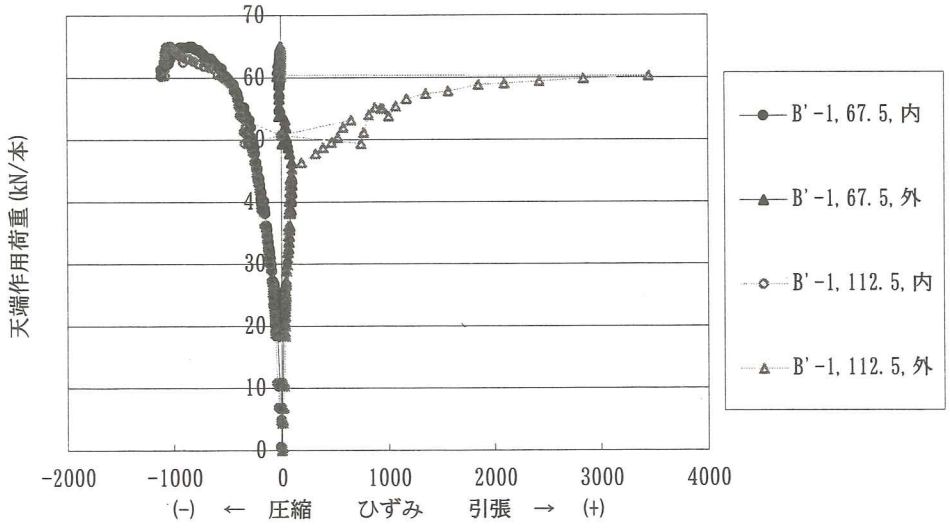


図-参. 8 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 67.5度・112.5度, 高さ50cm)

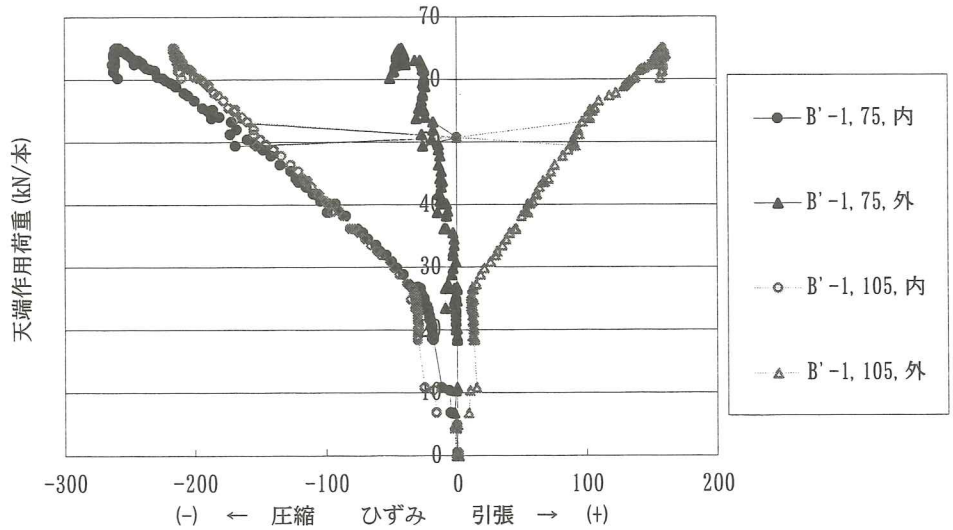


図-参. 8 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 75度・105度, 高さ50cm)

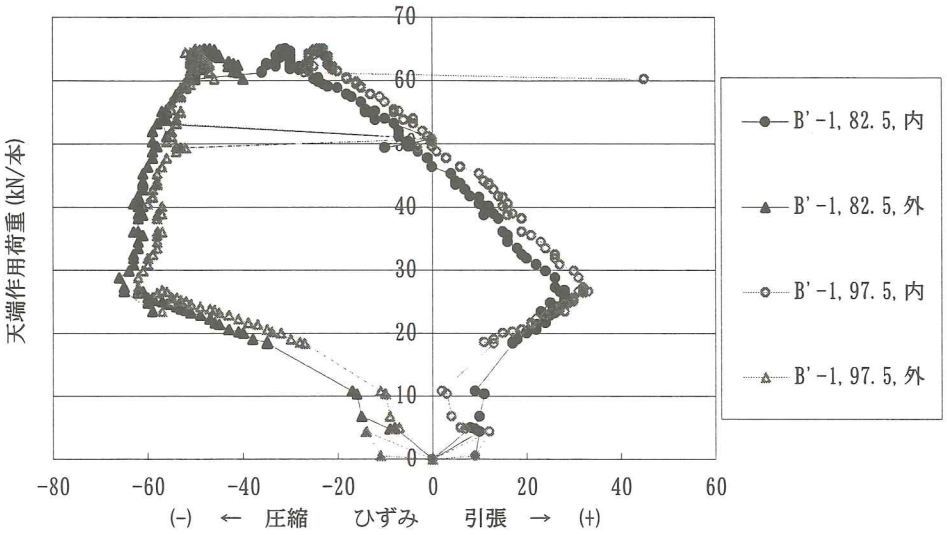


図-参. 8 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

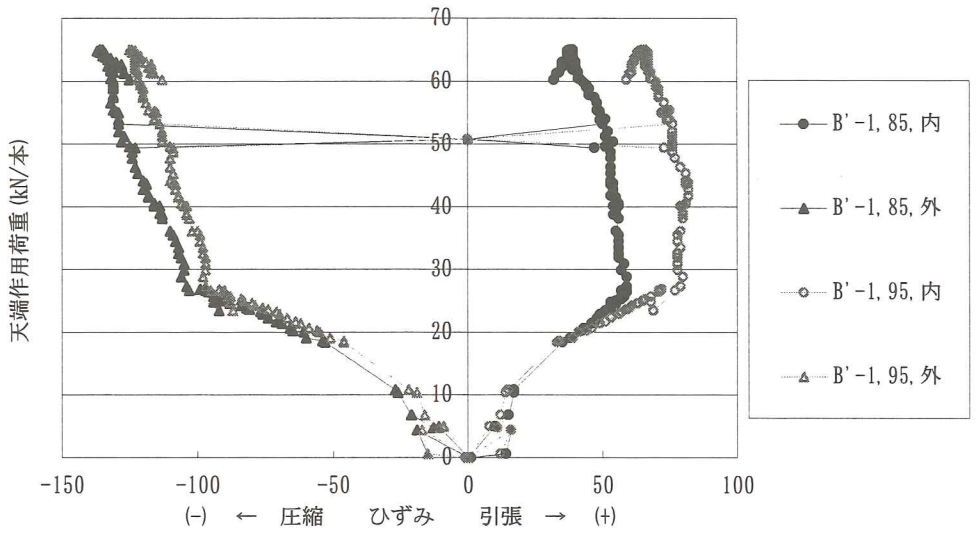


図-参. 8 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 85度・95度, 高さ50cm)

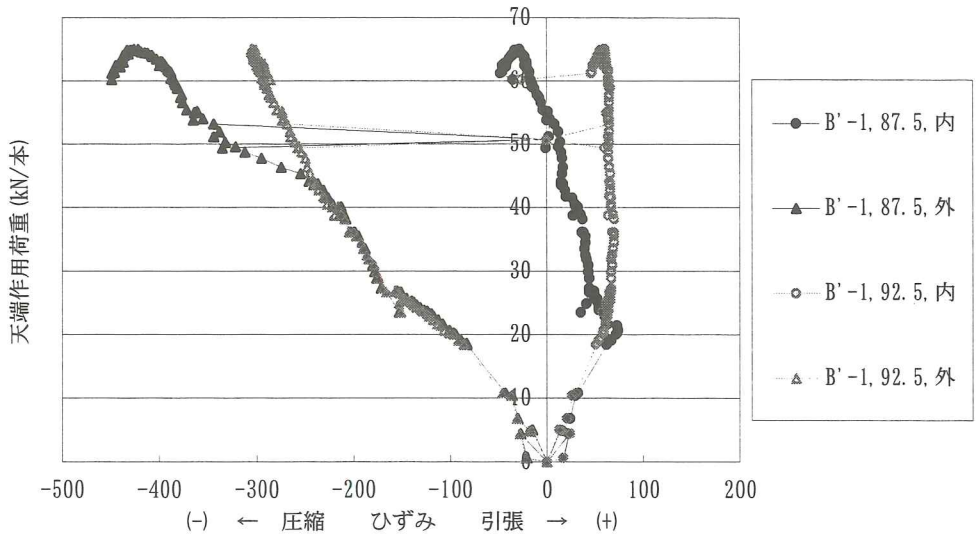


図-参. 8 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

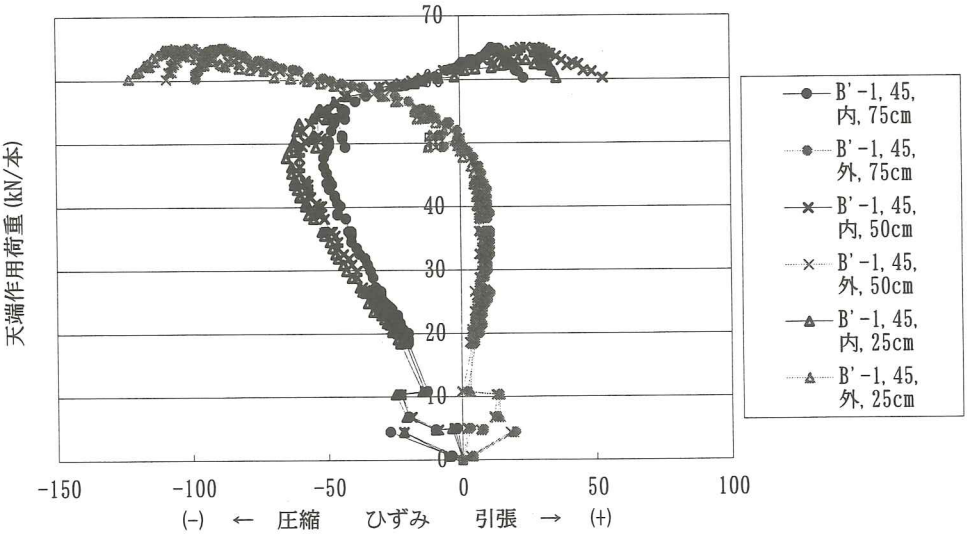


図-参. 8 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 45度, 高さ毎)

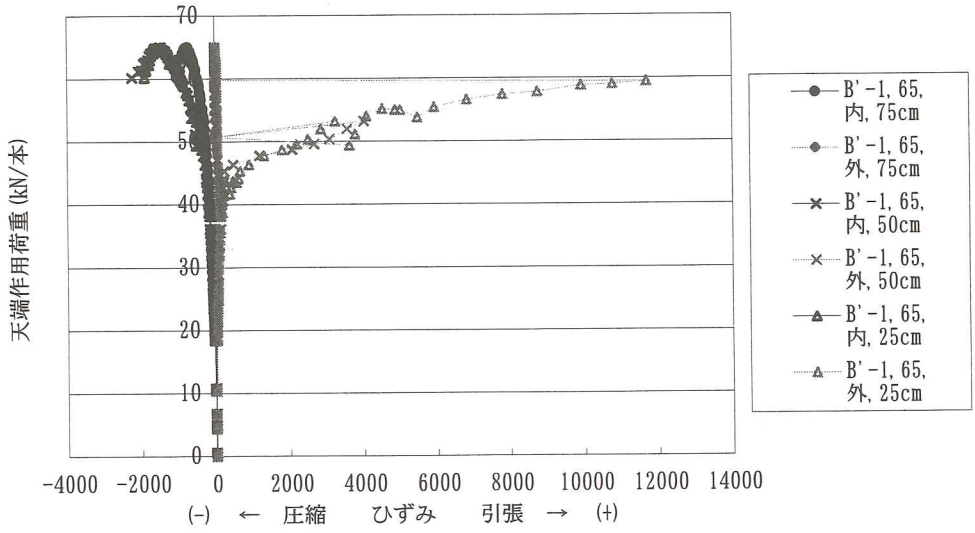


図-参. 8 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 65度, 高さ毎)

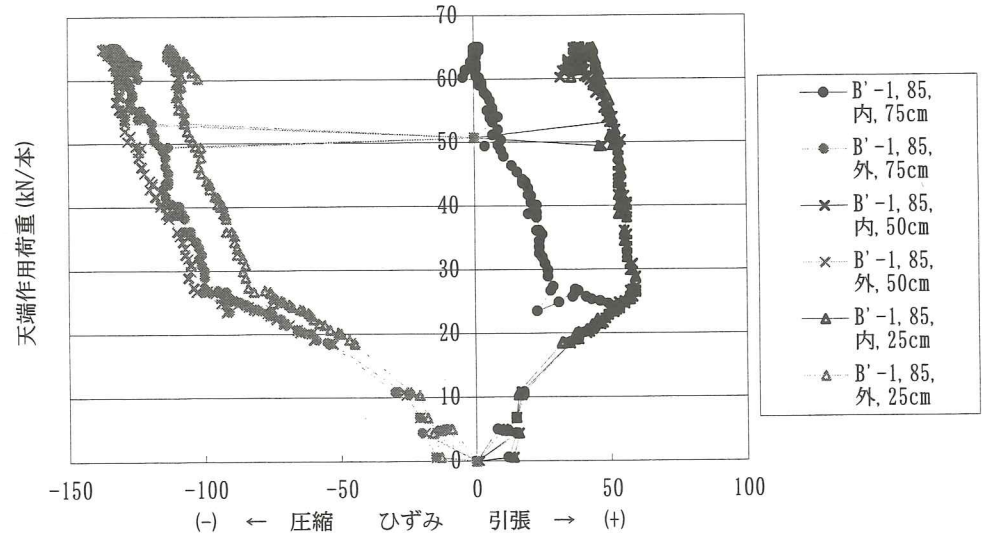


図-参. 8 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースB'-1, 85度, 高さ毎)

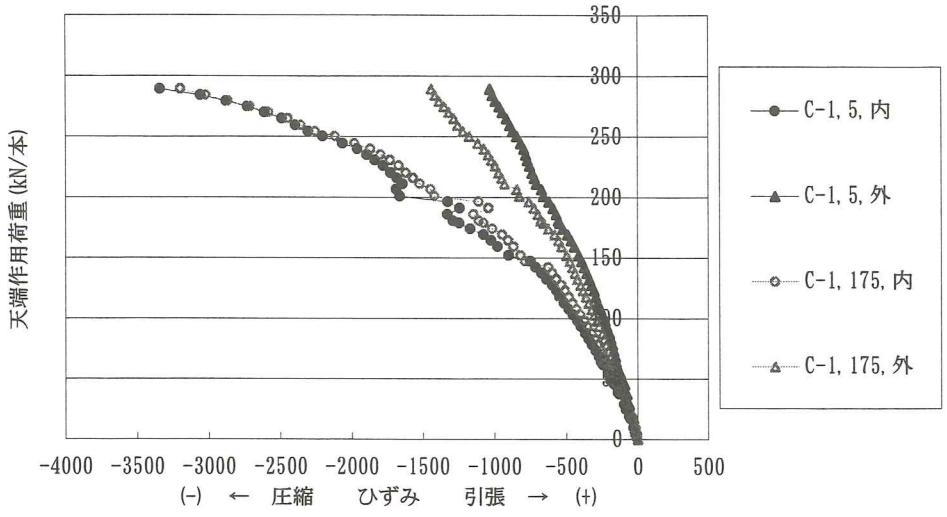


図-参. 9 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 5度・175度, 高さ50cm)

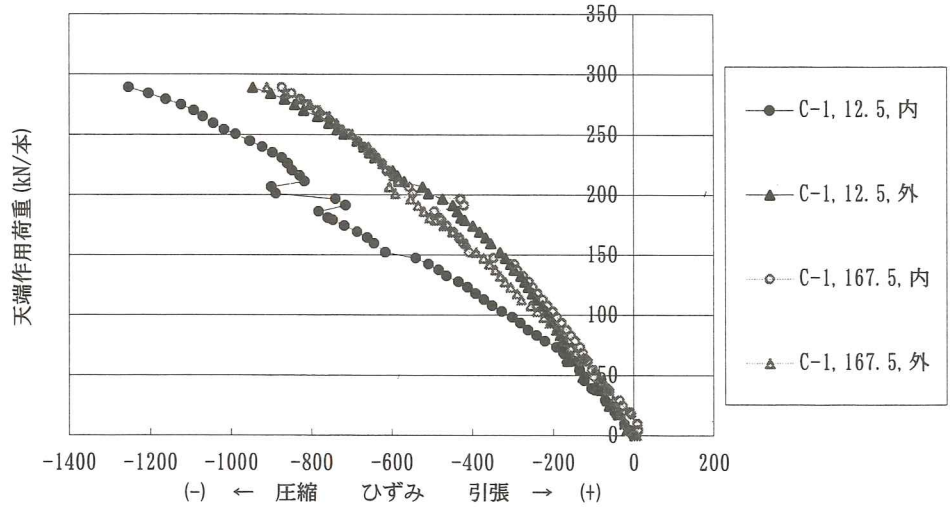


図-参. 9 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 12. 5度・167. 5度, 高さ50cm)

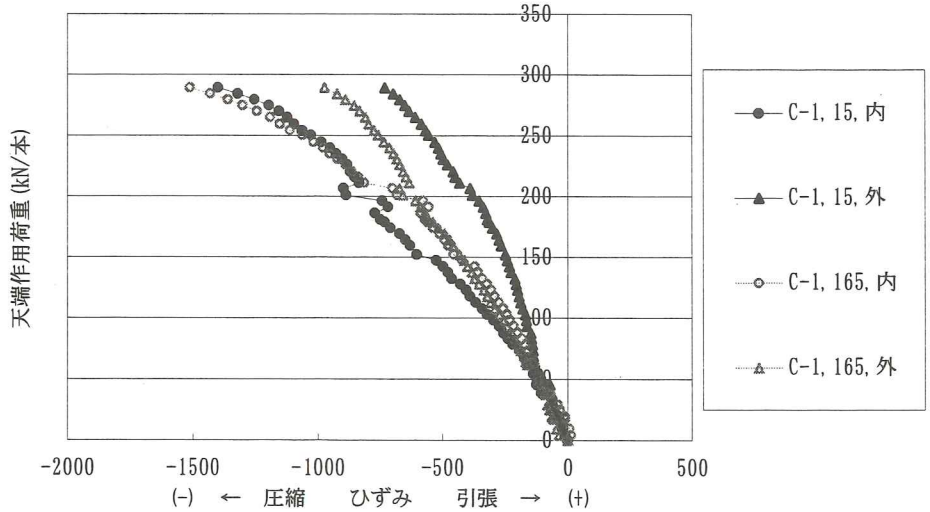


図-参. 9 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 15度・165度, 高さ50cm)

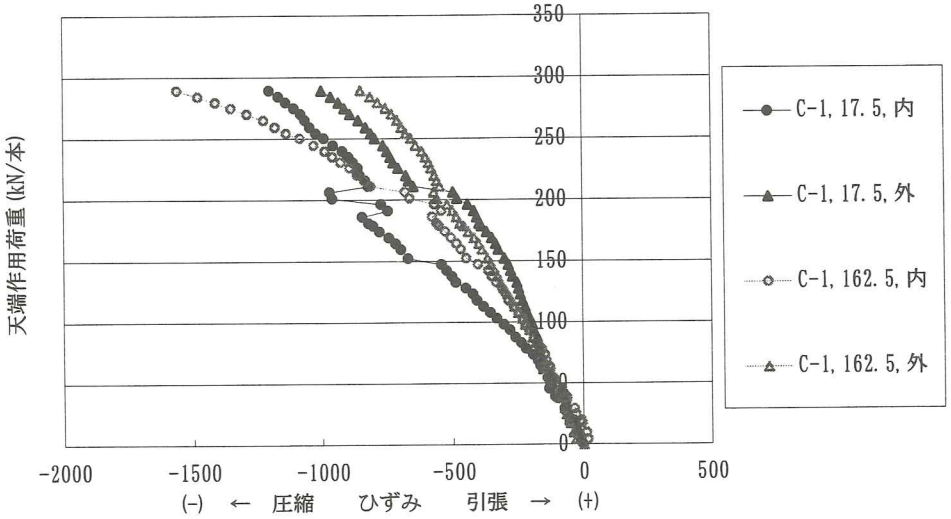


図-参. 9 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

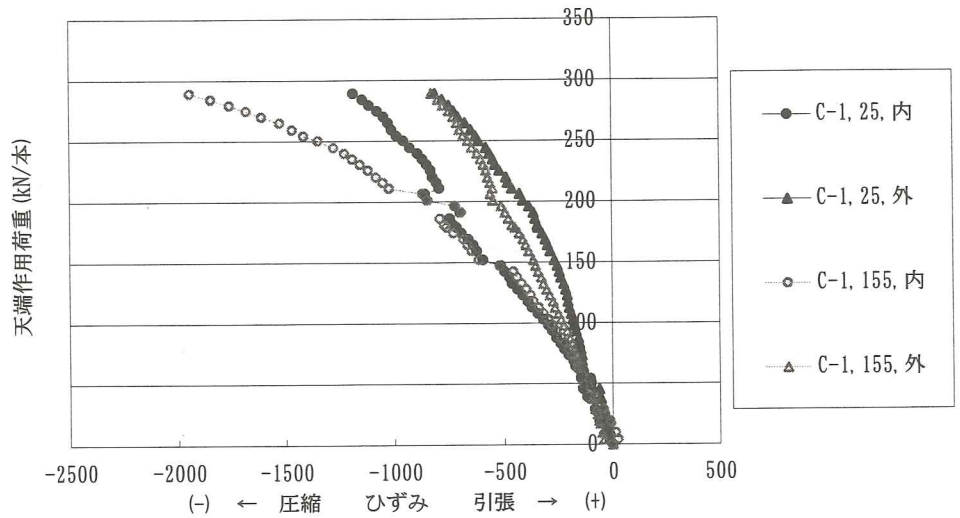


図-参. 9 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 25度・155度, 高さ50cm)

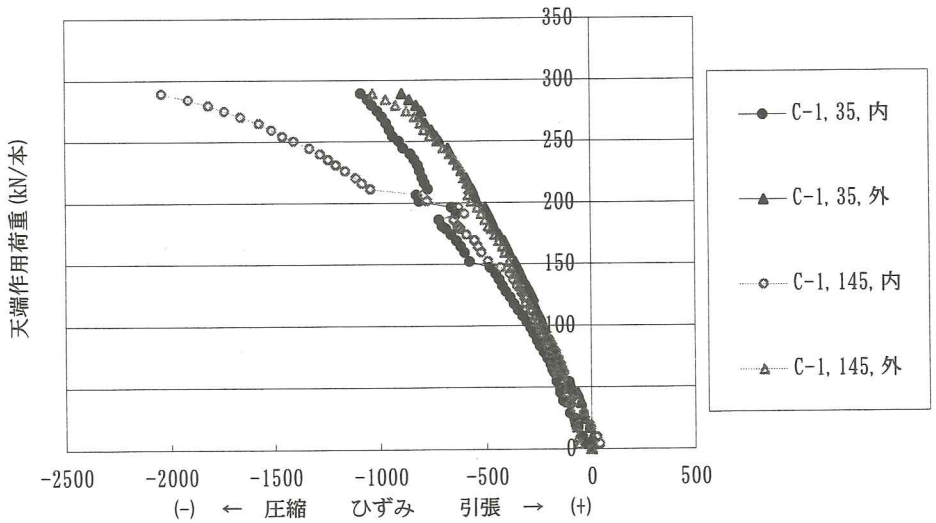


図-参. 9 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 35度・145度, 高さ50cm)

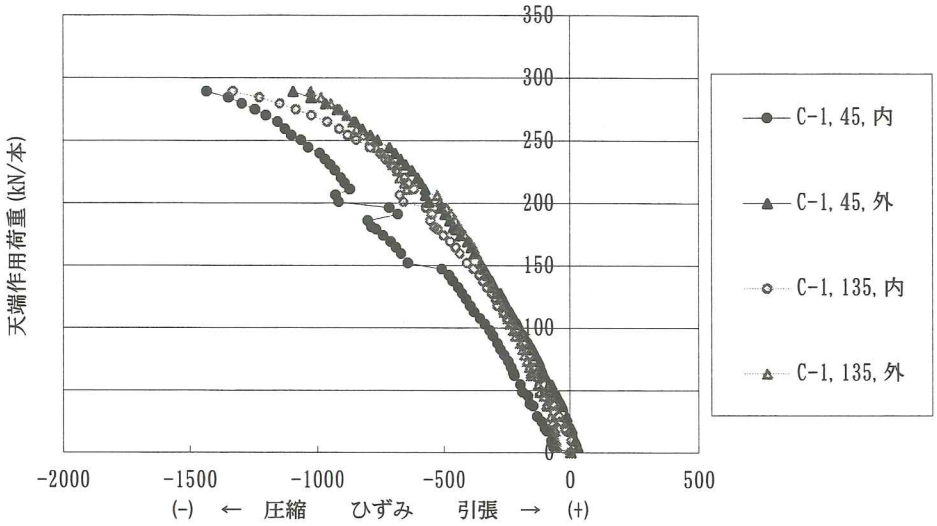


図-参. 9 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 45度・135度, 高さ50cm)

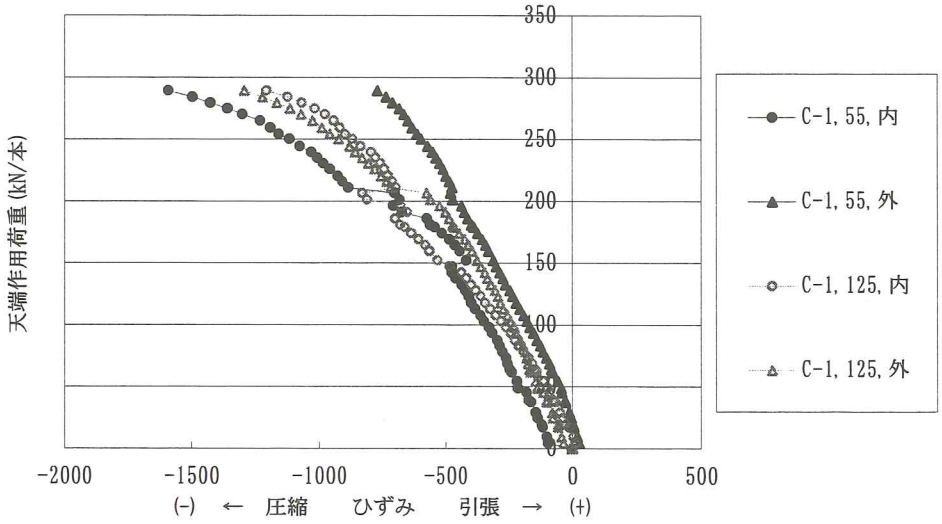


図-参. 9 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 55度・125度, 高さ50cm)

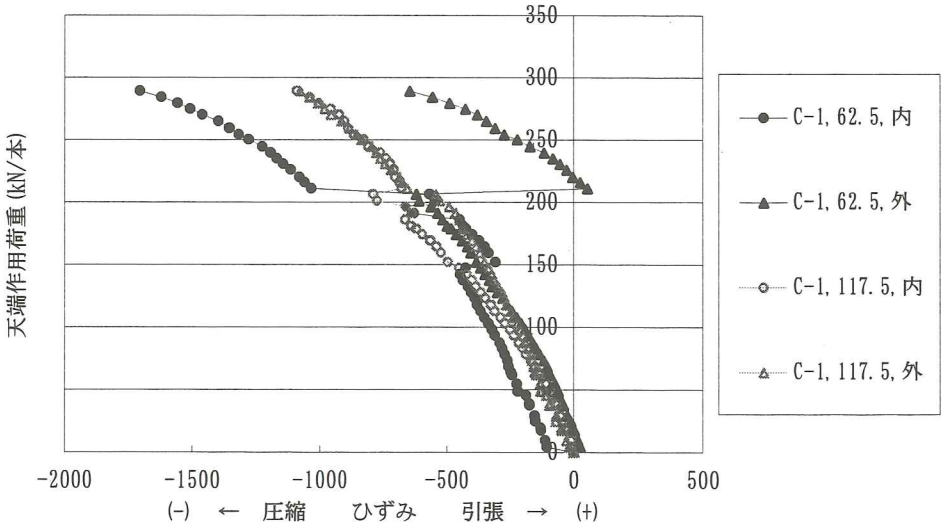


図-参. 9 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 62.5度・117.5度, 高さ50cm)

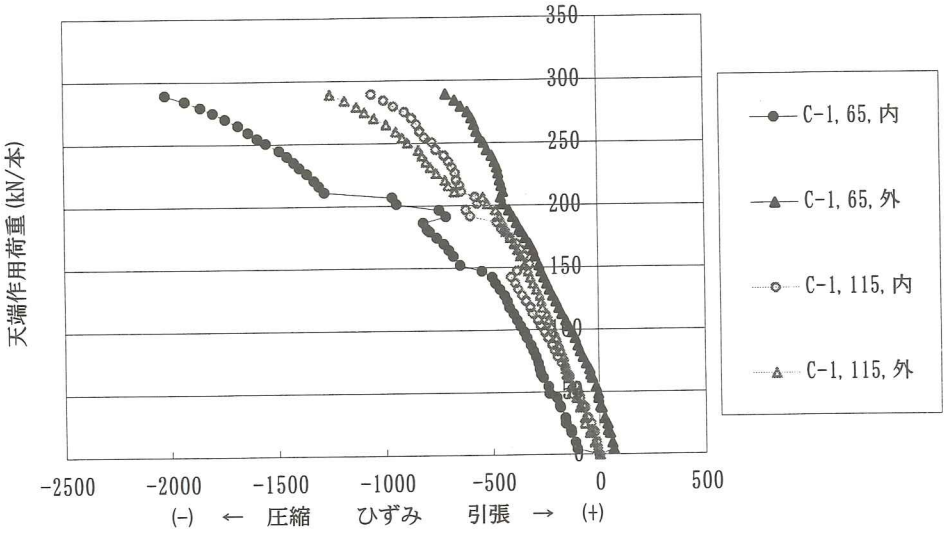


図-参. 9 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 65度・115度, 高さ50cm)

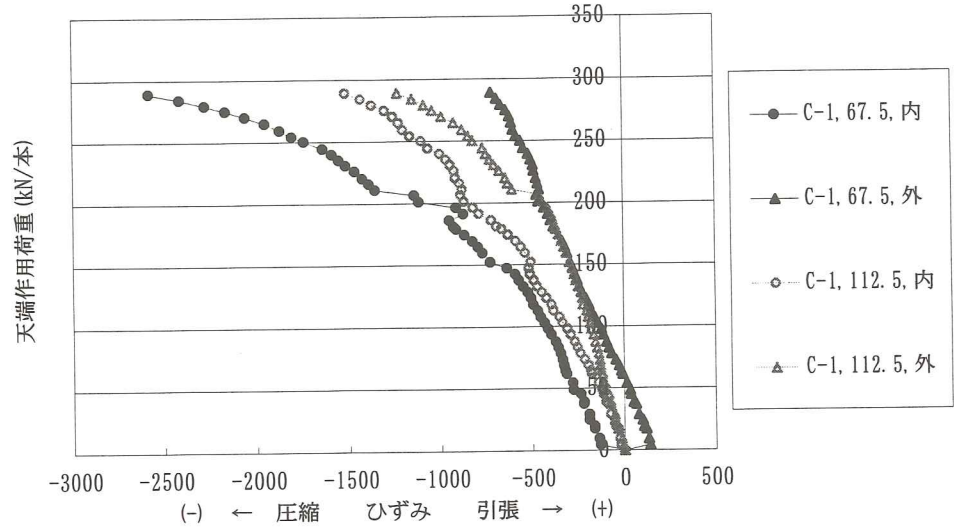


図-参. 9 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 67. 5度・112. 5度, 高さ50cm)

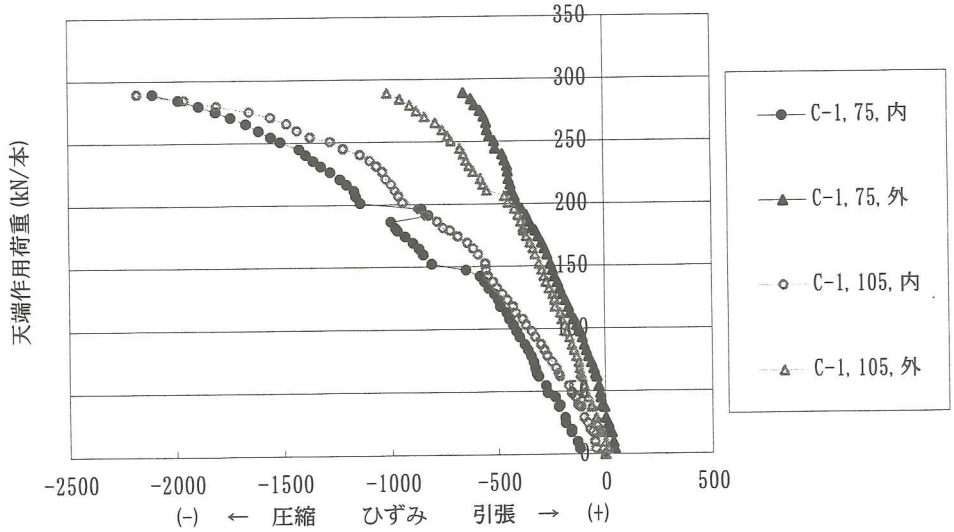


図-参. 9 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 75度・105度, 高さ50cm)

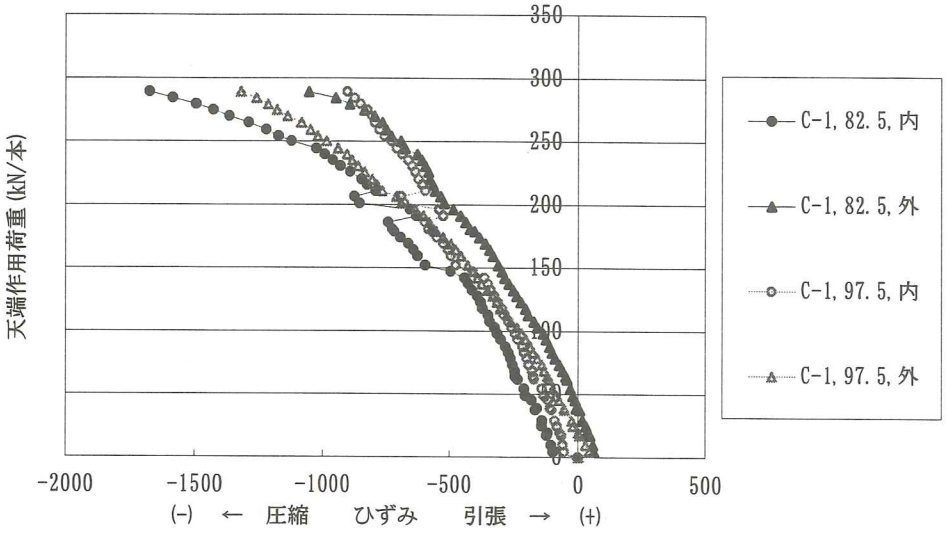


図-参. 9 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

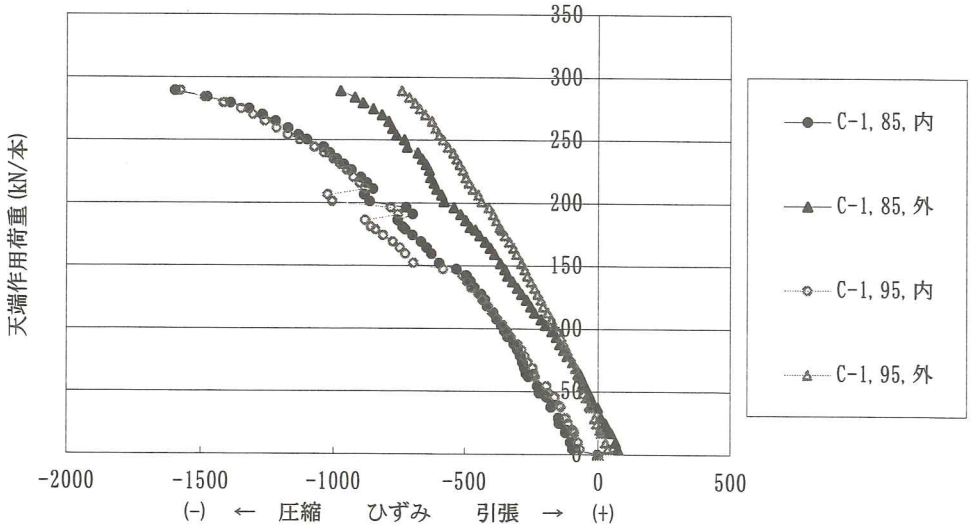


図-参. 9 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 85度・95度, 高さ50cm)

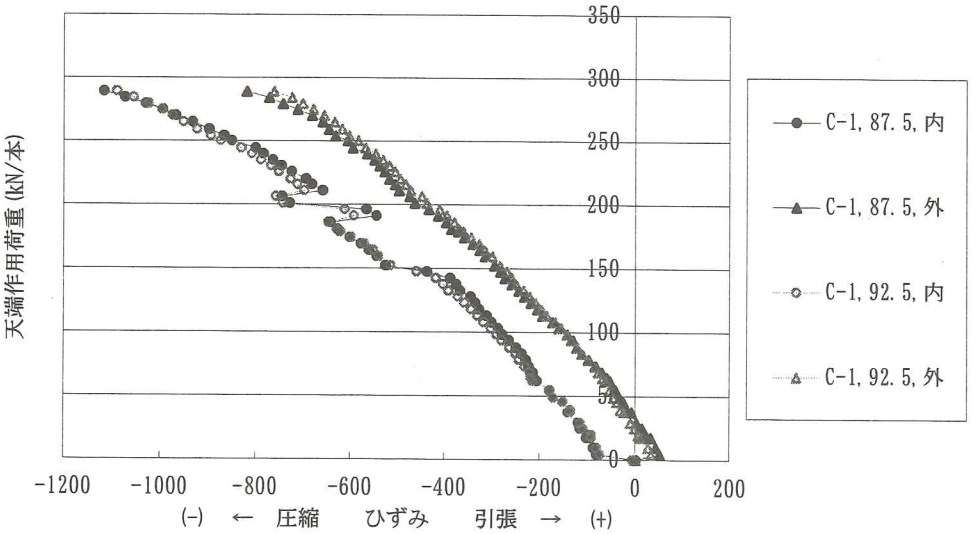


図-参. 9 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

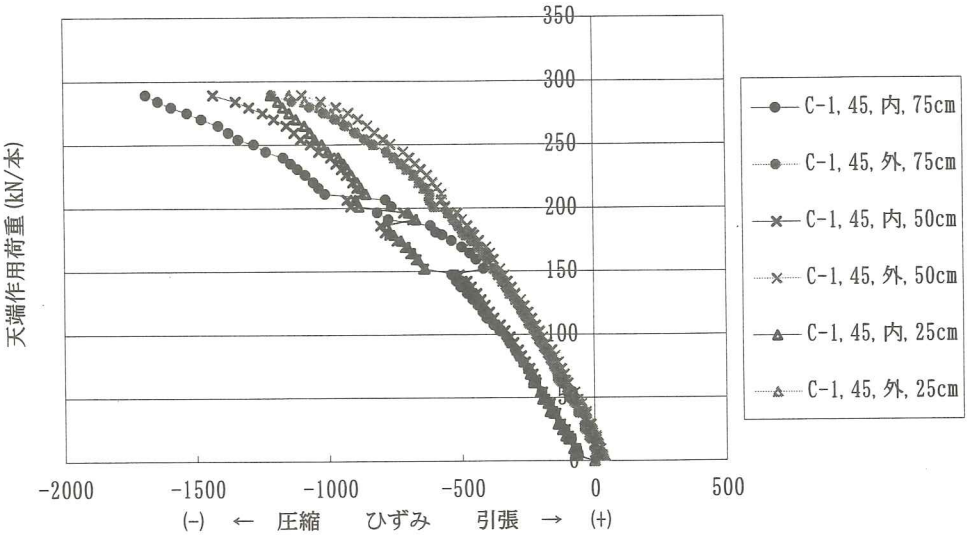


図-参. 9 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 45度, 高さ毎)

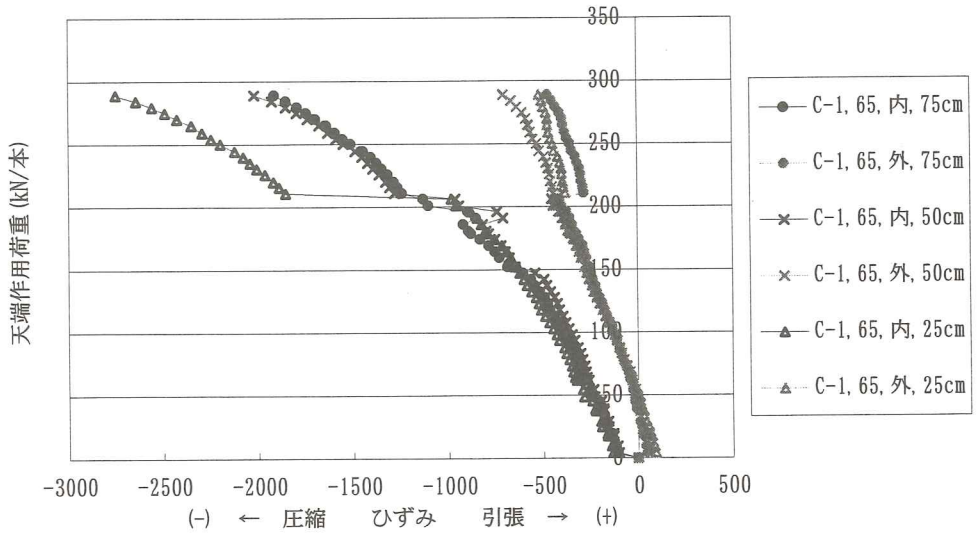


図-参. 9 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 65度, 高さ毎)

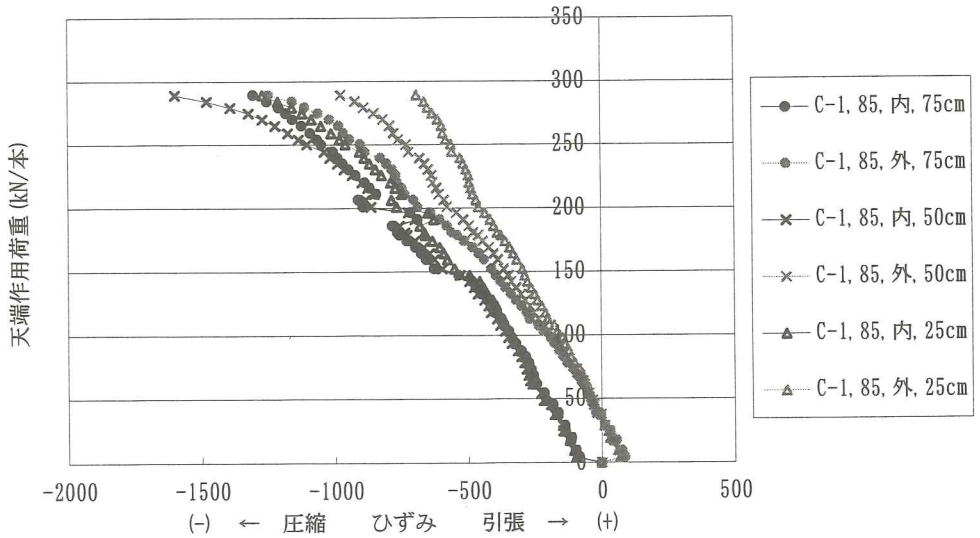


図-参. 9 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-1, 85度, 高さ毎)

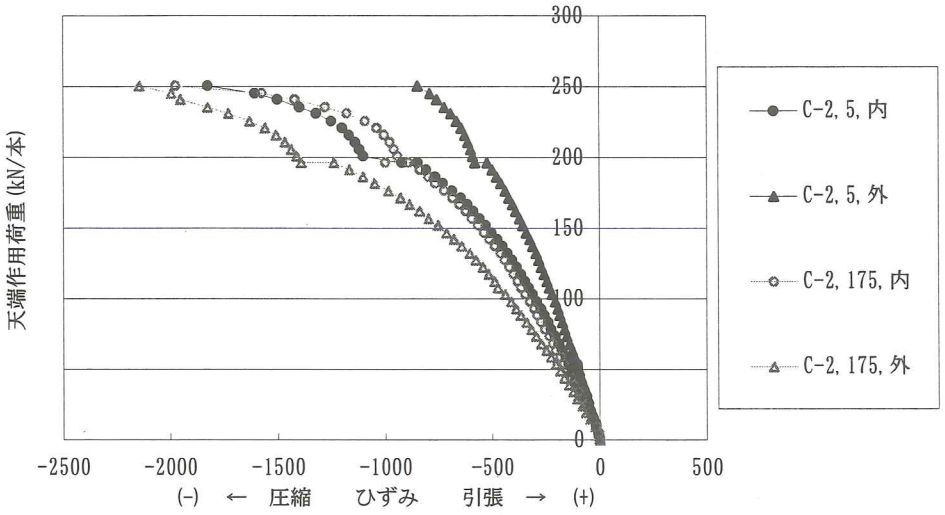


図-参. 10 (a) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 5度・175度, 高さ50cm)

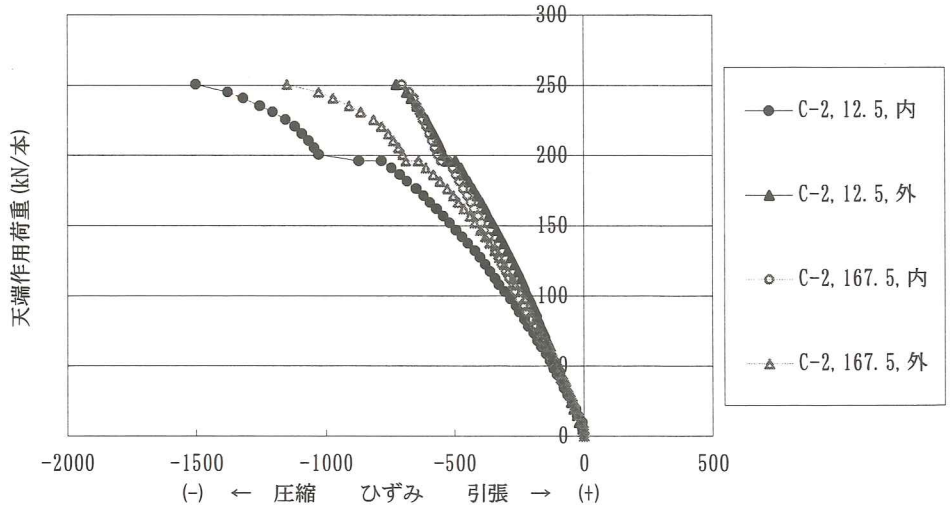


図-参. 10 (b) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 12. 5度・167. 5度, 高さ50cm)

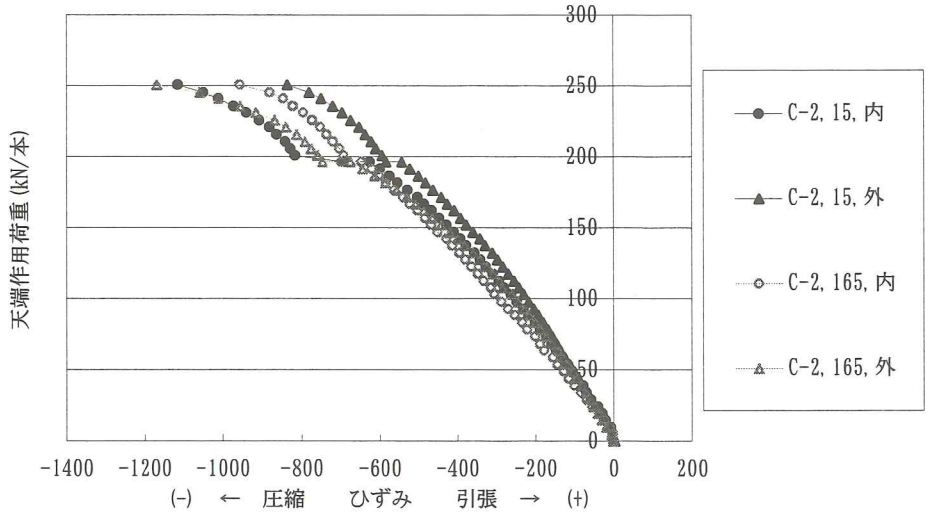


図-参. 10 (c) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 15度・165度, 高さ50cm)

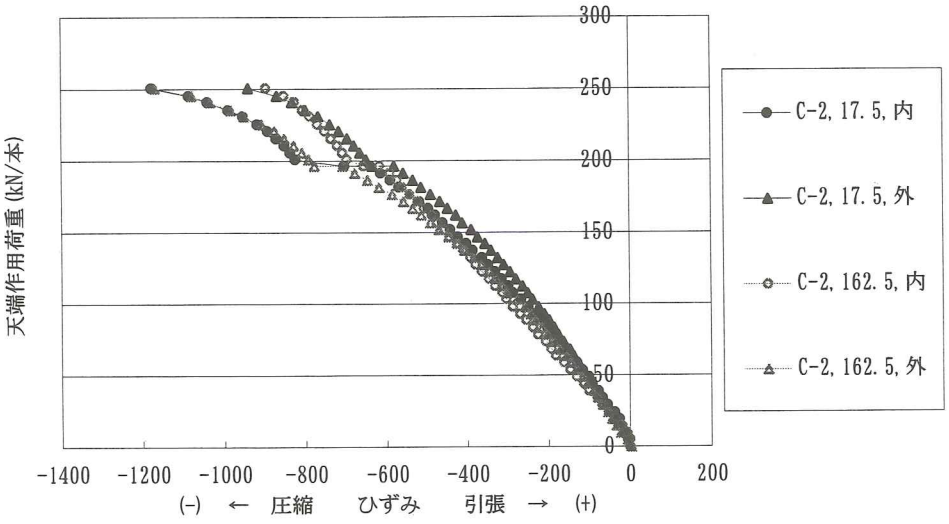


図-参. 10 (d) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 17.5度・162.5度, 高さ50cm)

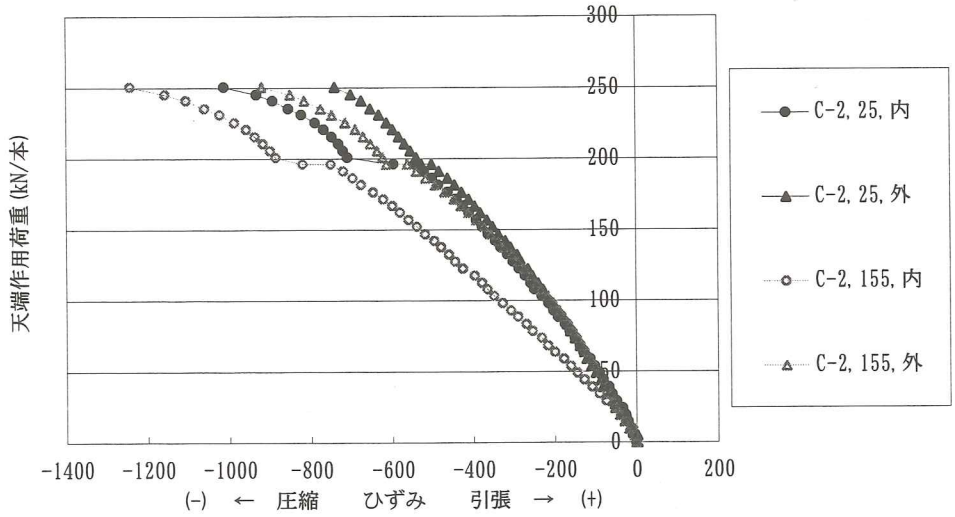


図-参. 10 (e) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 25度・155度, 高さ50cm)

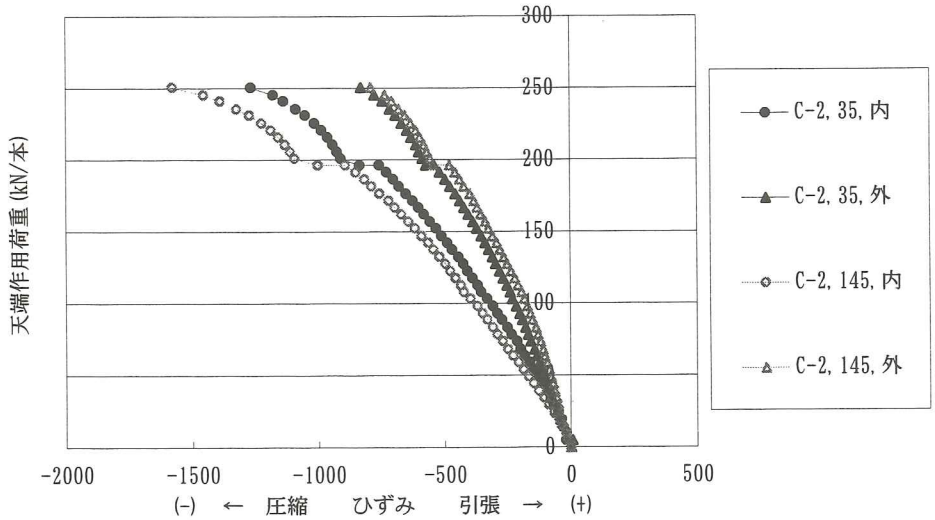


図-参. 10 (f) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 35度・145度, 高さ50cm)

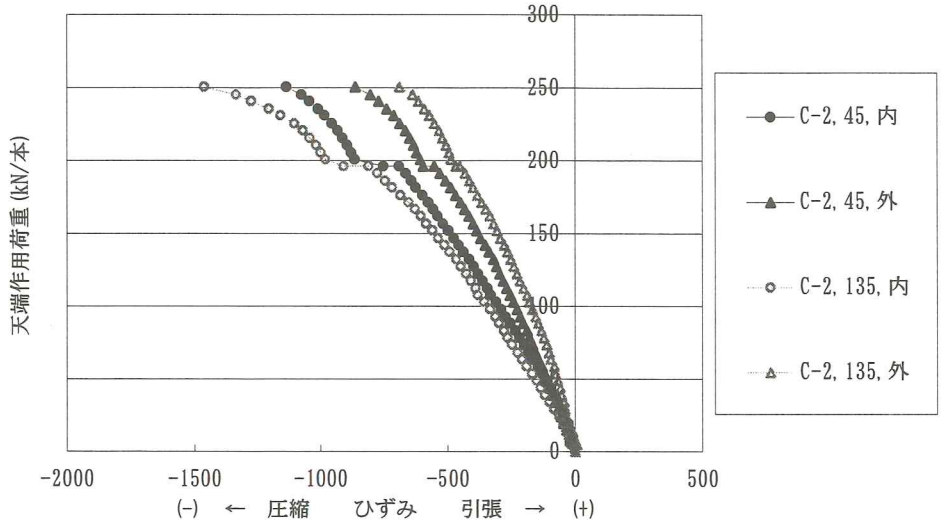


図-参. 10 (g) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 45度・135度, 高さ50cm)

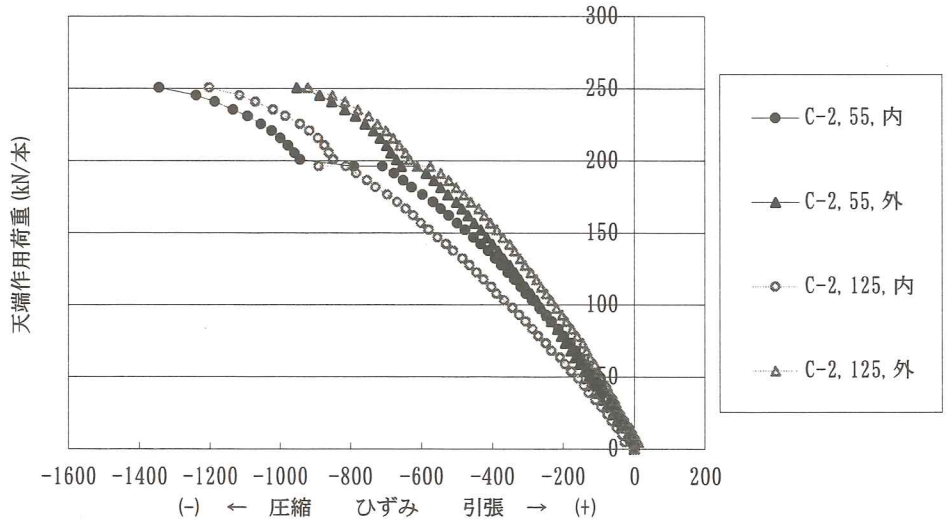


図-参. 10 (h) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 55度・125度, 高さ50cm)

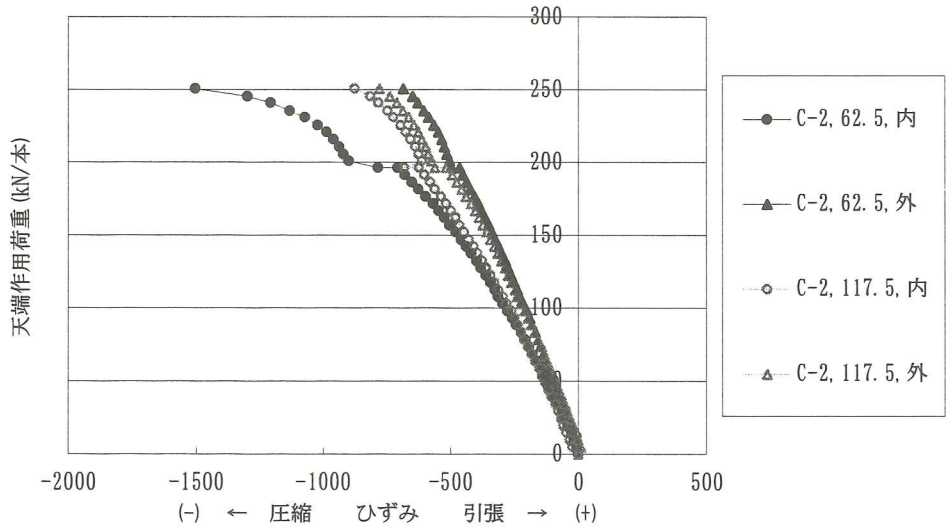


図-参. 10 (i) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 62.5度・117.5度, 高さ50cm)

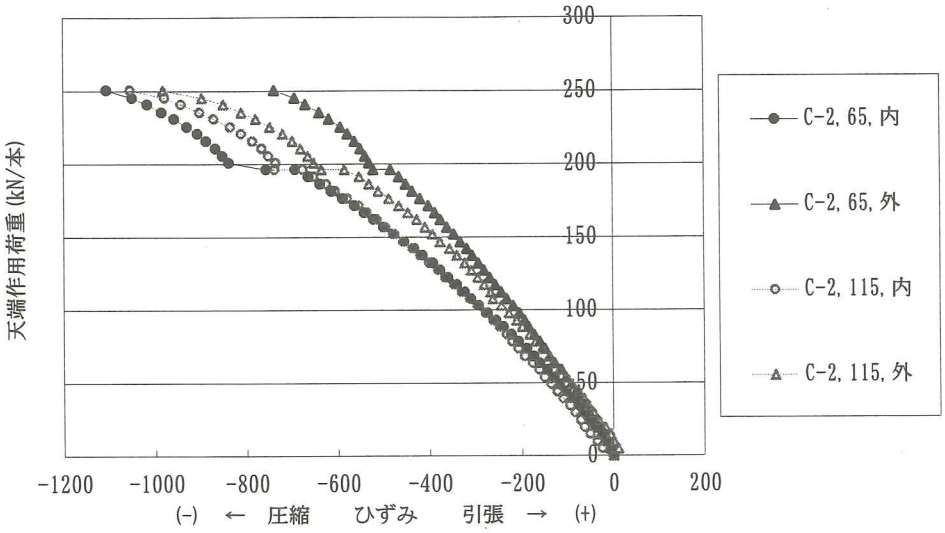


図-参. 10 (j) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 65度・115度, 高さ50cm)

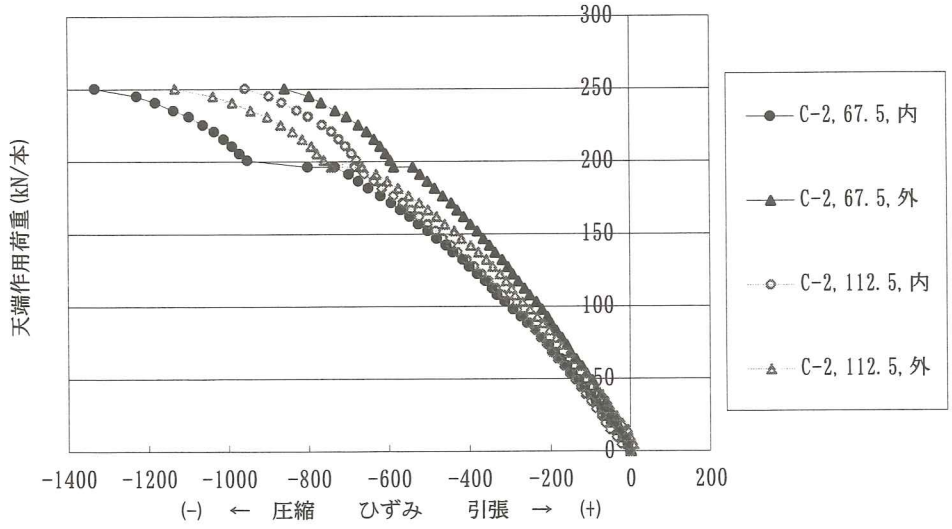


図-参. 10 (k) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 67. 5度・112. 5度, 高さ50cm)

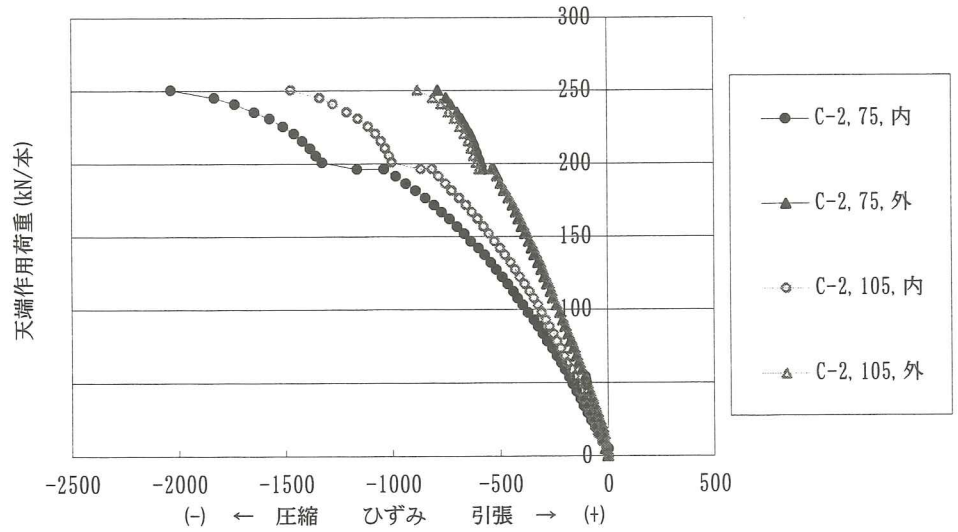


図-参. 10 (l) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 75度・105度, 高さ50cm)

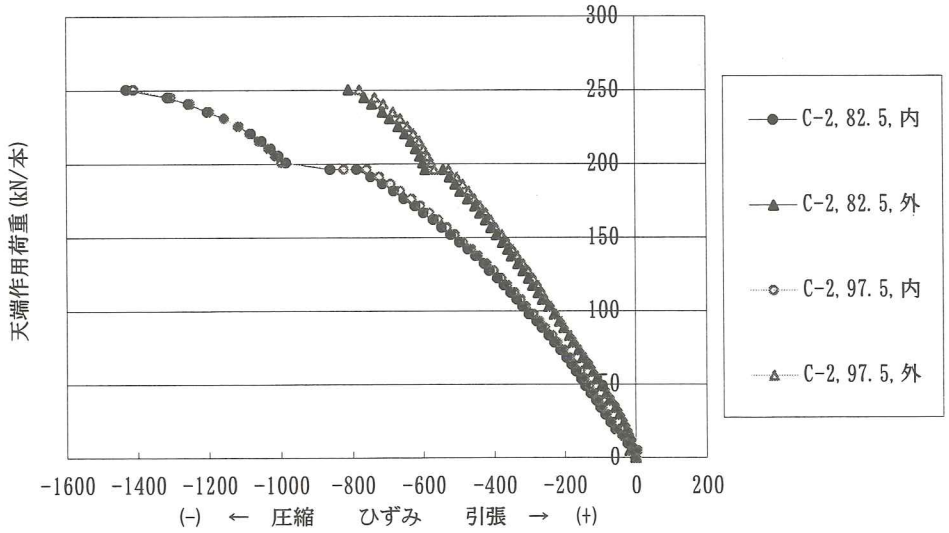


図-参. 10 (m) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 82.5度・97.5度, 高さ50cm)

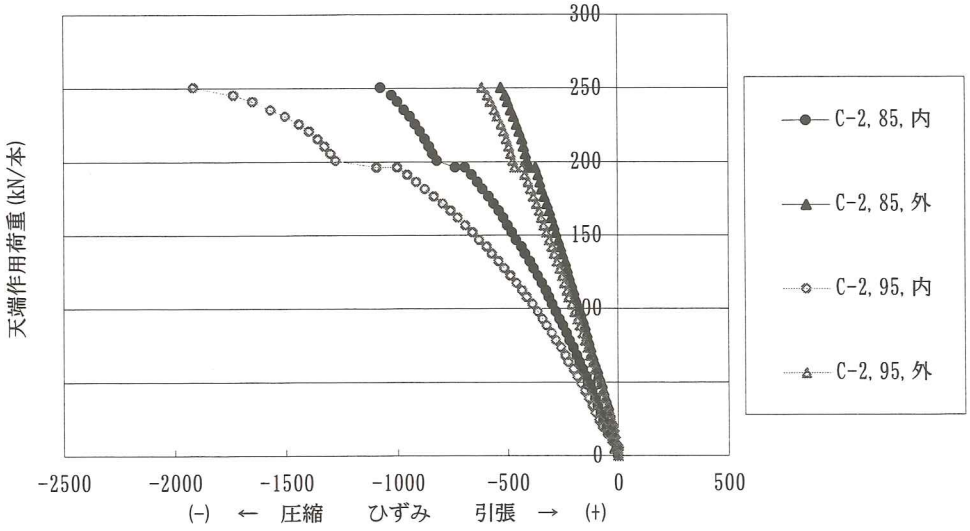


図-参. 10 (n) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 85度・95度, 高さ50cm)

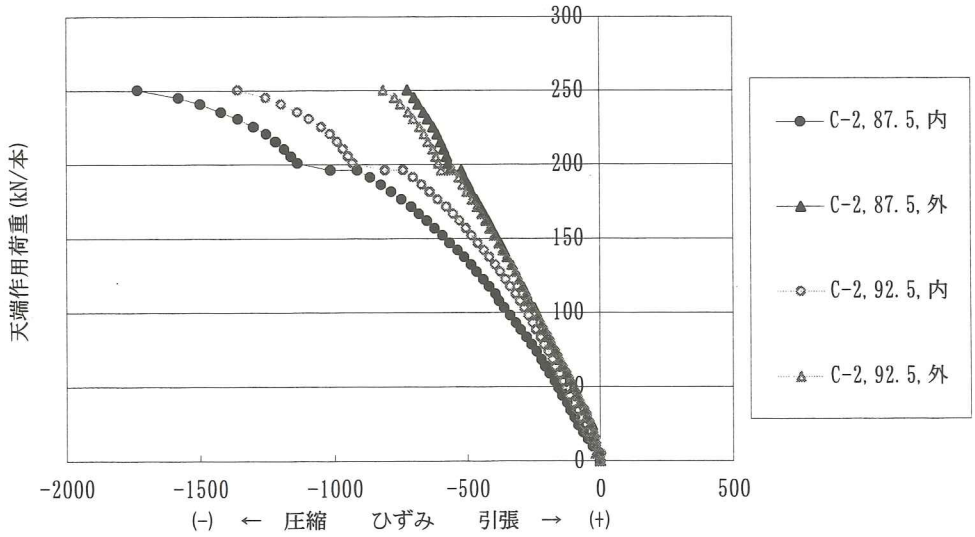


図-参. 10 (o) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 87.5度・92.5度, 高さ50cm)

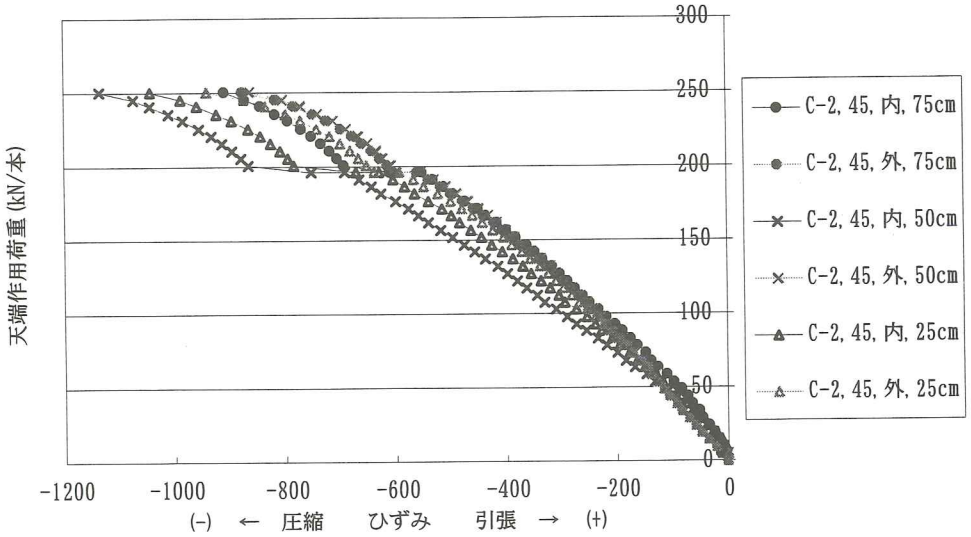


図-参. 10 (p) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 45度, 高さ毎)

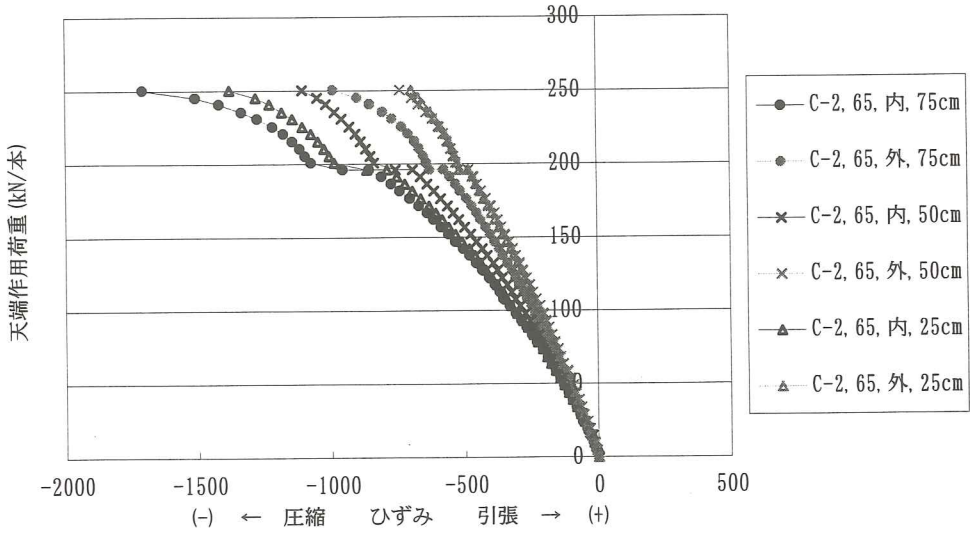


図-参. 10 (q) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 65度, 高さ毎)

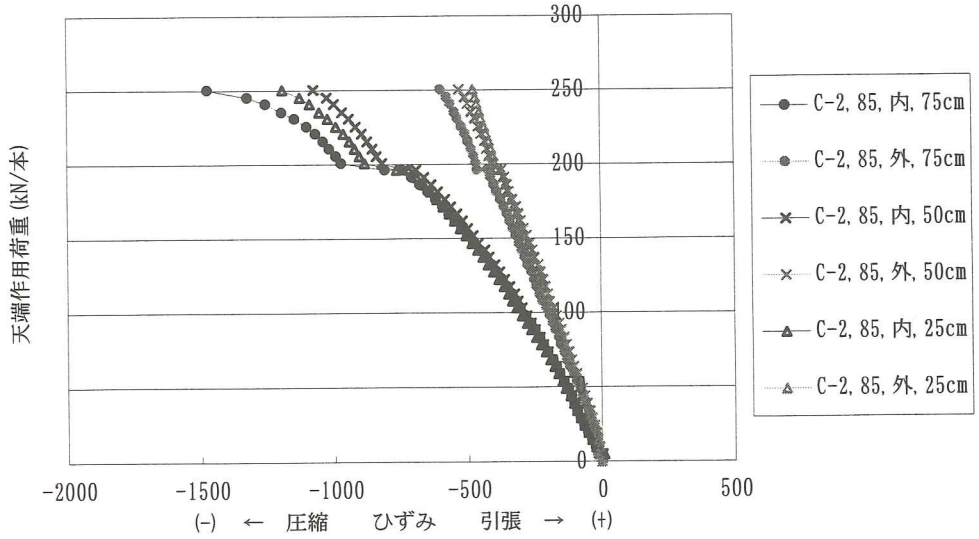


図-参. 10 (r) 荷重-ひずみ曲線 (ケースC-2, 85度, 高さ毎)

参考資料２．各ケースの材料試験結果

参 2.1　一軸圧縮強度試験結果

本研究のすべてのケースにおいて管理供試体による一軸圧縮試験を実施した。また、コアの切り出しが可能だった供試体についてはコア抜き供試体による一軸圧縮試験を実施した。それらの結果を表-参. 1 に示す。基本的には一軸圧縮試験により応力-ひずみ関係を算定し、一軸圧縮強度とともにヤング率やポアソン比を算定することとしたが、供試体によっては一軸圧縮強度のみを算定しているものもある。また、図-参 11. 1～11. 10 には表-参. 1 中で備考欄に記載のあるケースについて供試体の応力－ひずみ曲線を示す。平均縦ひずみとは供試体中央部の圧縮方向に貼付した表裏 2 枚のひずみゲージのひずみの平均であり、平均横ひずみとはそれらに対して 90 度回転させた方向の表裏 2 枚のひずみゲージのひずみの平均である。そのため、縦ひずみは圧縮ひずみ、横ひずみは引張ひずみが生じている。なお、平均縦ひずみについては-10000μまで記載し、平均横ひずみについては引張方向となることから 1000μまでを記載することとした。また、ケース A-2 のコア抜き供試体、ケース B-4 の管理供試体とコア抜き供試体、およびケース C-2 の管理供試体については、圧縮応力が最大に達してからもひずみの計測を継続した。

表-参. 1　一軸圧縮強度試験結果

ケース	材料	供試体の種類	材令	圧縮強度		静弾性係数		ポアソン比		備考
			日	fc' (N/mm2)		Ec (kN/mm2)		ν		
				供試体毎	平均値	供試体毎	平均値	供試体毎	平均値	
A-1	プレーン	円柱	16	25. 83	26. 29	18. 44	20. 65	0. 20	0. 20	図-参. 11. 1　No. 1
		円柱	16	26. 56		22. 13		0. 20		図-参. 11. 1　No. 2
		円柱	16	26. 48		21. 37		0. 19		図-参. 11. 1　No. 3
A-2	鋼繊維補強	円柱	21	19. 23	19. 86	16. 39	16. 85	0. 16	0. 16	図-参. 11. 2 (a)　No. 1
		円柱	21	20. 37		18. 16		0. 19		図-参. 11. 2 (a)　No. 2
		円柱	21	19. 97		16. 00		0. 14		図-参. 11. 2 (a)　No. 3
		コア抜き	22	19. 34	20. 24	18. 87	17. 80	0. 19	0. 18	図-参. 11. 2 (b)　No. 1
		コア抜き	22	20. 37		16. 49		0. 15		図-参. 11. 2 (b)　No. 2
		コア抜き	22	21. 01		18. 05		0. 18		図-参. 11. 2 (b)　No. 3
A-3	プレーン	円柱	13	19. 30	20. 05	19. 80	14. 43	0. 23	0. 14	図-参. 11. 3　No. 1
		円柱	13	20. 20		11. 70		0. 14		図-参. 11. 3　No. 2
		円柱	13	19. 90		11. 80		0. 14		図-参. 11. 3　No. 3
		コア抜き	13	22. 20	20. 63					
		コア抜き	13	19. 50						
		コア抜き	13	20. 20						
B-1	プレーン	円柱	13	26. 89	26. 89	21. 57	21. 57	0. 22	0. 22	図-参. 11. 4　No. 1
		~~円柱~~	~~13~~	~~37. 24~~		~~23. 46~~		~~0. 24~~		図-参. 11. 4　No. 2
		~~円柱~~	~~13~~	~~37. 24~~		~~24. 56~~		~~0. 16~~		図-参. 11. 4　No. 3
		コア抜き	14	24. 50	25. 70					
		コア抜き	14	26. 90						
		円柱	15	26. 30	26. 73	18. 37	18. 24			
		円柱	15	27. 17		18. 11				
		コア抜き	21	22. 40	15. 90					
		コア抜き	21	14. 10						
		コア抜き	21	11. 20						

B-2	鋼繊維補強	円柱	14	21.80	21.80	19.60	19.60	0.11	0.11	図-参.11.5 No.1
		~~円柱~~	~~14~~	~~20.60~~		~~24.00~~		~~0.19~~		図-参.11.5 No.2
		~~円柱~~	~~14~~	~~20.40~~		~~30.50~~		~~0.17~~		図-参.11.5 No.3
		コア抜き	14	19.00	19.70					
		コア抜き	14	19.60						
		コア抜き	14	20.50						
B-3	鋼繊維補強	円柱	17	24.50	23.67	15.30	17.17	0.20	0.15	図-参.11.6 No.1
		円柱	17	23.50		19.30		0.11		図-参.11.6 No.2
		円柱	17	23.00		16.90		0.14		図-参.11.6 No.3
		コア抜き	18	18.50	19.07					
		コア抜き	18	19.60						
		コア抜き	18	19.10						
B-4	樹脂繊維補強	円柱	14	28.09	28.33	21.26	20.50			図-参.11.7(a) No.1
		円柱	14	28.47		20.16				図-参.11.7(a) No.2
		円柱	14	28.42		20.06				図-参.11.7(a) No.3
		コア抜き	21	22.45	20.54	18.03	18.87			図-参.11.7(b) No.1
		コア抜き	21	19.14		19.55				図-参.11.7(b) No.2
		コア抜き	21	20.02		19.04				図-参.11.7(b) No.3
		円柱	22	28.00	28.30	21.20	20.43			
		円柱	22	28.50		20.10				
		円柱	22	28.40		20.00				
		コア抜き	30	22.40	20.50					
		コア抜き	30	19.10						
		コア抜き	30	20.00						
B'-1	鋼繊維補強	円柱	14	22.80	22.80	18.30	18.30	0.25	0.25	図-参.11.8 No.1
		~~円柱~~	~~14~~	~~23.40~~		~~28.50~~		~~0.16~~		図-参.11.8 No.2
		~~円柱~~	~~14~~	~~23.00~~		~~30.10~~		~~0.22~~		図-参.11.8 No.3
		コア抜き	14	21.00	20.57					
		コア抜き	14	20.00						
		コア抜き	14	20.70						
C-1	プレーン	円柱	13	14.01	14.43	14.86	14.42	0.14	0.10	図-参.11.9 No.1
		円柱	13	14.64		16.24		0.05		図-参.11.9 No.2
		円柱	13	14.64		12.16		0.11		図-参.11.9 No.3
C-2	鋼繊維補強	円柱	13	12.70	12.77	13.30	13.17			図-参.11.10 No.1
		円柱	13	12.70		13.40				図-参.11.10 No.2
		円柱	13	12.90		12.80				図-参.11.10 No.3
		コア抜き	14	8.80	9.00					
		コア抜き	14	8.20						
		コア抜き	14	10.00						
		円柱	20	12.76	12.79	13.50	13.23			
		円柱	20	12.70		13.28				
		円柱	20	12.91		12.92				

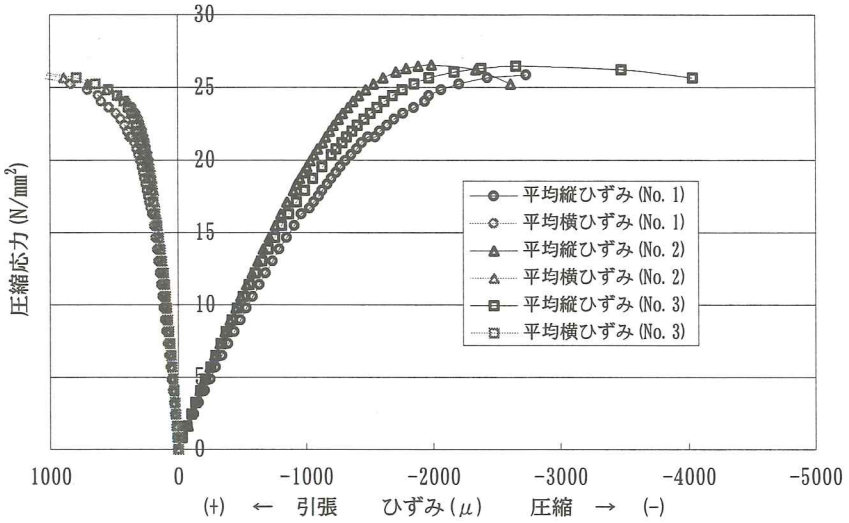


図-参11.1 応力-ひずみ曲線(ケースA-1、管理供試体)

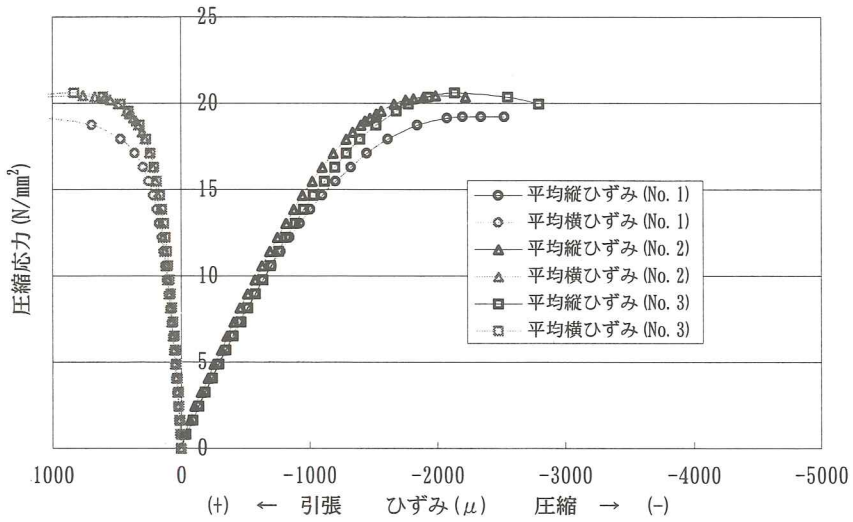


図-参11.2(a) 応力-ひずみ曲線(ケースA-2、管理供試体)

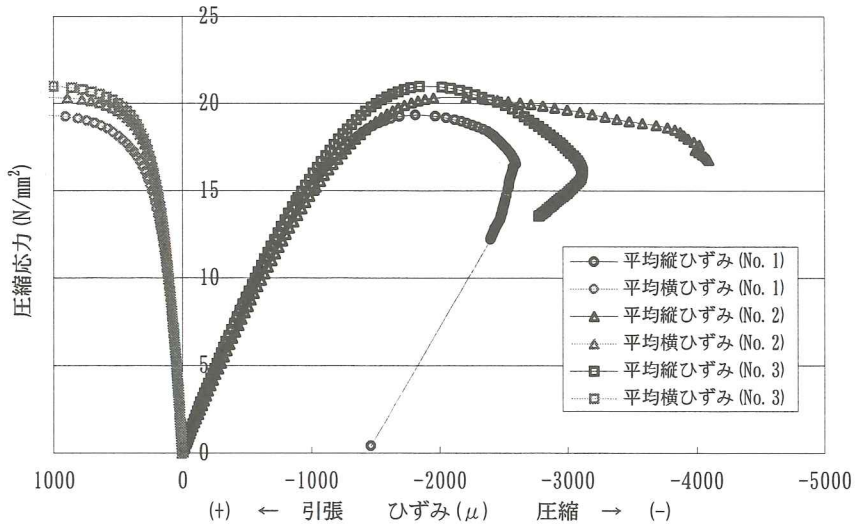


図-参11.2(b) 応力-ひずみ曲線(ケースA-2、コア抜き供試体)

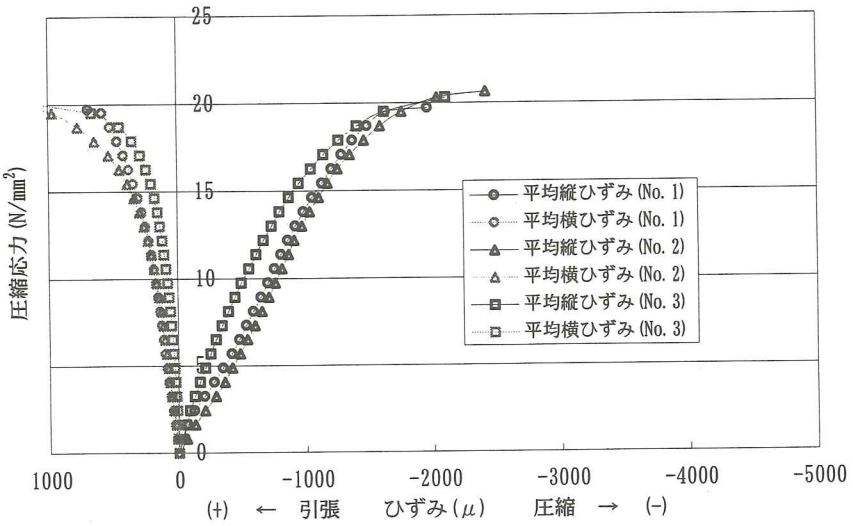


図-参11.3 応力-ひずみ曲線 (ケースA-3、管理供試体)

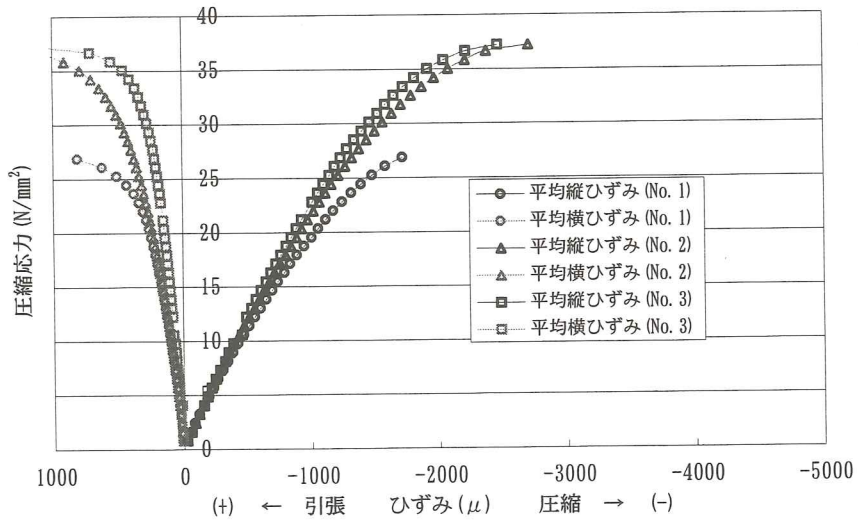


図-参11.4 応力-ひずみ曲線 (ケースB-1、管理供試体)

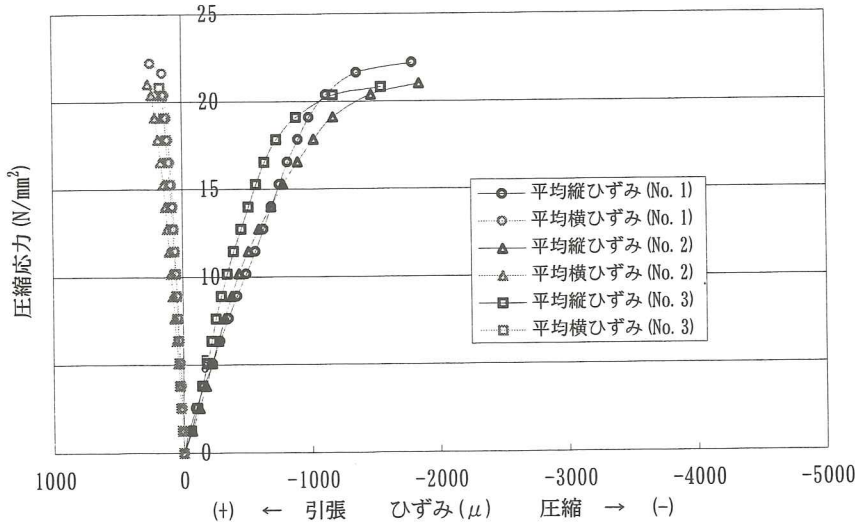


図-参11.5 応力-ひずみ曲線 (ケースB-2、管理供試体)

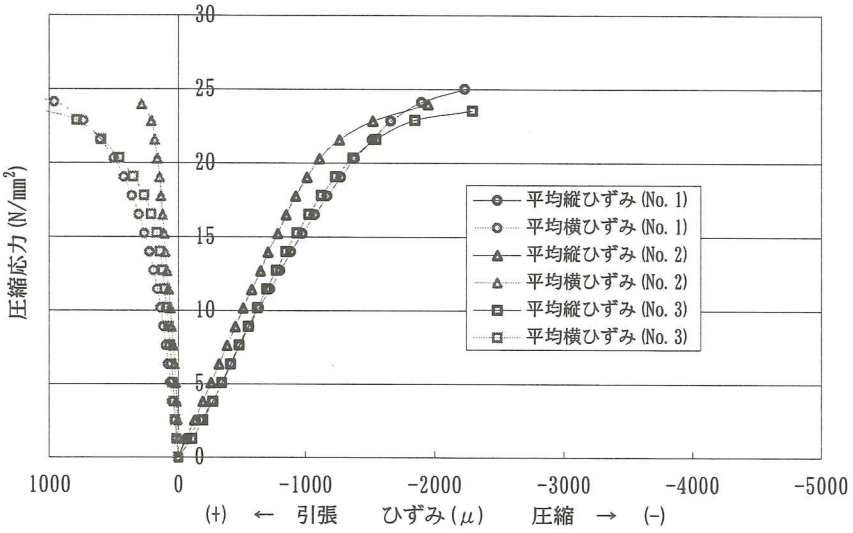


図-参11.6 応力-ひずみ曲線 (ケースB-3、管理供試体)

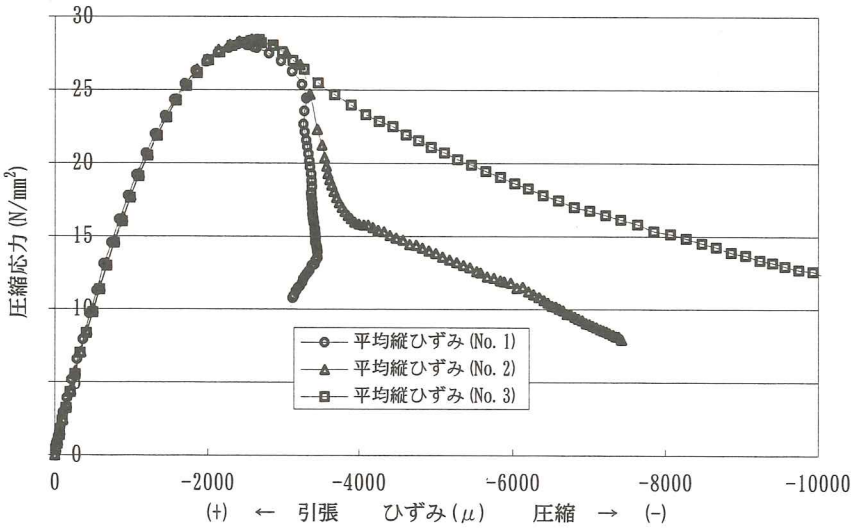


図-参11.7 (a) 応力-ひずみ曲線 (ケースB-4、管理供試体)

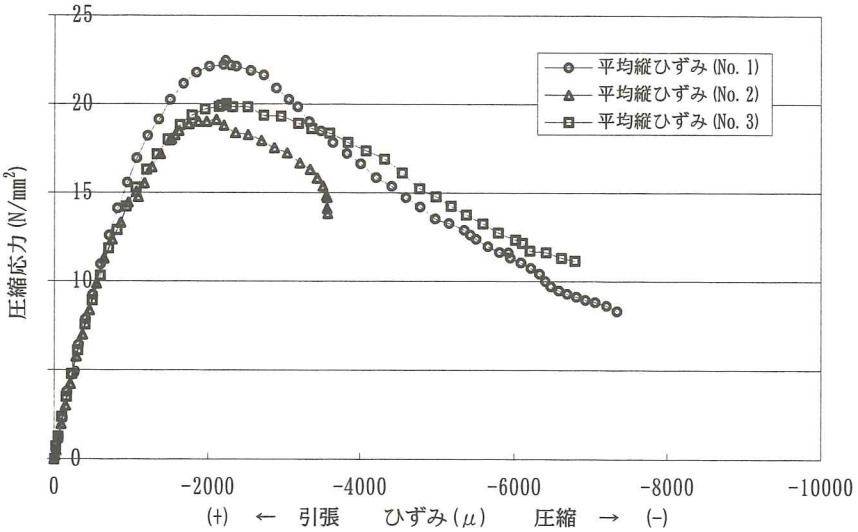


図-参11.7 (b) 応力-ひずみ曲線 (ケースB-4、コア抜き供試体)

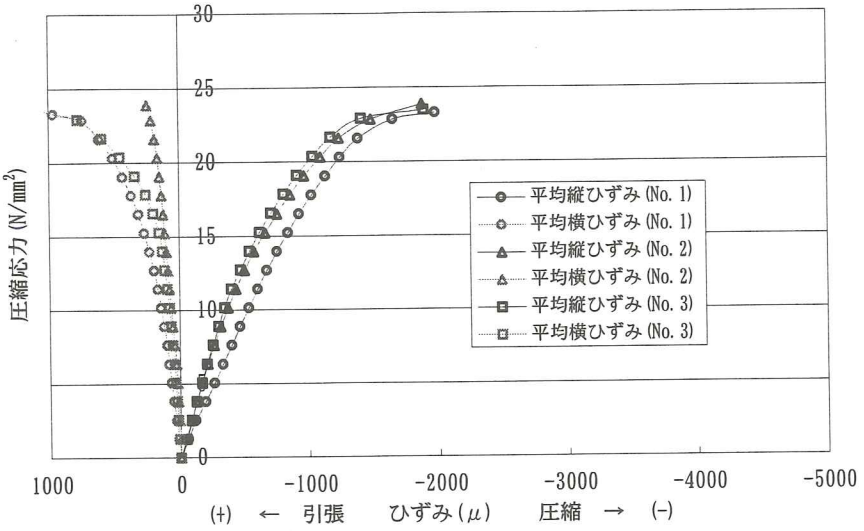


図-参11.8 応力-ひずみ曲線(ケースB'-1、管理供試体)

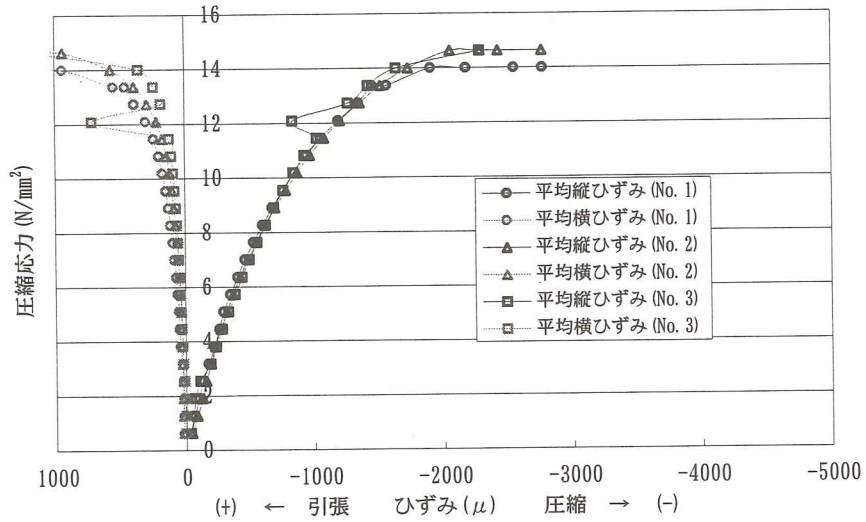


図-参11.9 応力-ひずみ曲線(ケースC-1、管理供試体)

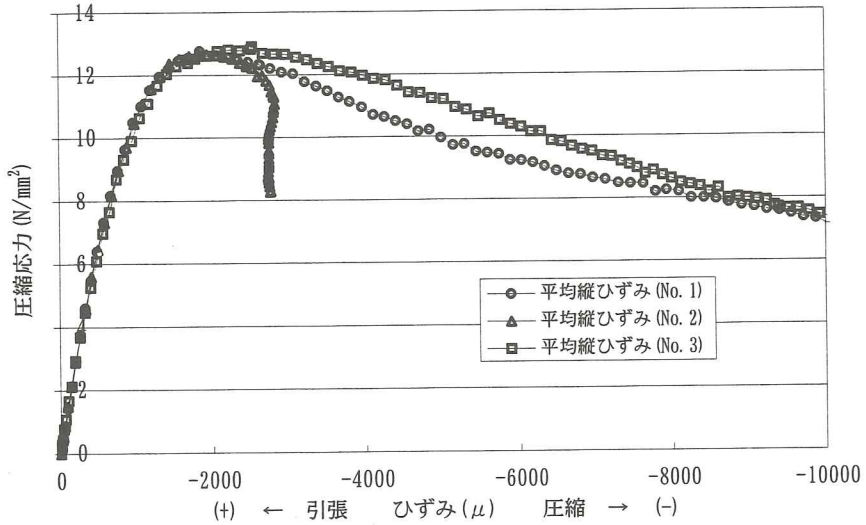


図-参11.10 応力-ひずみ曲線(ケースC-2、管理供試体)

参 2.2　曲げ試験結果

本研究では繊維補強コンクリートのケースにおいて管理供試体による曲げ試験を実施した。それらの結果を表-参. 2 に示す。また、図-参 12.1～12.6 にはそれらの曲げ試験において得られた曲げ引張強度とひび割れ開口幅の関係を示す。

表-参. 2　曲げ強度試験結果

ケース	コンクリートの種類	曲げ強度試験結果						
		供試体寸法 (cm)	供試体の種類	材令 (日)	曲げ強度 (N/mm^2)		曲げタフネス (N/mm^2)	
					供試体毎	平均値	供試体毎	平均値
A-2	鋼繊維補強	15×15×53	角柱	22	4.12	3.94	3.87	3.64
		15×15×53	角柱	22	4.29		4.04	
		15×15×53	角柱	22	3.33		2.95	
		15×15×53	角柱	22	4.00		3.68	
		15×15×53	角柱	22	3.66		3.49	
B-2	鋼繊維補強	10×10×40	切出し	16	3.34	5.05	3.52	9.09
		10×10×40	切出し	16	6.76		14.66	
		10×10×40	切出し	16	3.86		6.80	
		10×10×40	切出し	16	5.57		5.11	
B-3	鋼繊維補強	15×15×53	角柱	21	3.74	3.51	2.39	2.48
		15×15×53	角柱	21	3.16		2.30	
		15×15×53	角柱	21	3.94		2.94	
		15×15×53	角柱	21	3.21		2.28	
B-4	樹脂繊維補強	15×15×53	角柱	14	4.22	4.64	3.59	4.17
		15×15×53	角柱	14	4.68		4.27	
		15×15×53	角柱	14	4.44		4.03	
		15×15×53	角柱	14	5.04		4.54	
		15×15×53	角柱	14	4.83		4.42	
		15×15×53	角柱	14	3.39		3.17	
B'-1	鋼繊維補強	15×15×53	角柱	28	5.23	5.20	4.30	4.55
		15×15×53	角柱	28	5.32		4.63	
		15×15×53	角柱	28	4.93		4.49	
		15×15×53	角柱	28	5.30		4.78	
C-2	鋼繊維補強	15×15×53	角柱	20	4.22	4.15	3.88	3.85
		15×15×53	角柱	20	4.07		3.82	
		15×15×53	角柱	20	3.86		3.65	
		15×15×53	角柱	20	4.39		4.00	
		15×15×53	角柱	20	4.21		3.93	
		15×15×53	角柱	20	2.96		2.72	

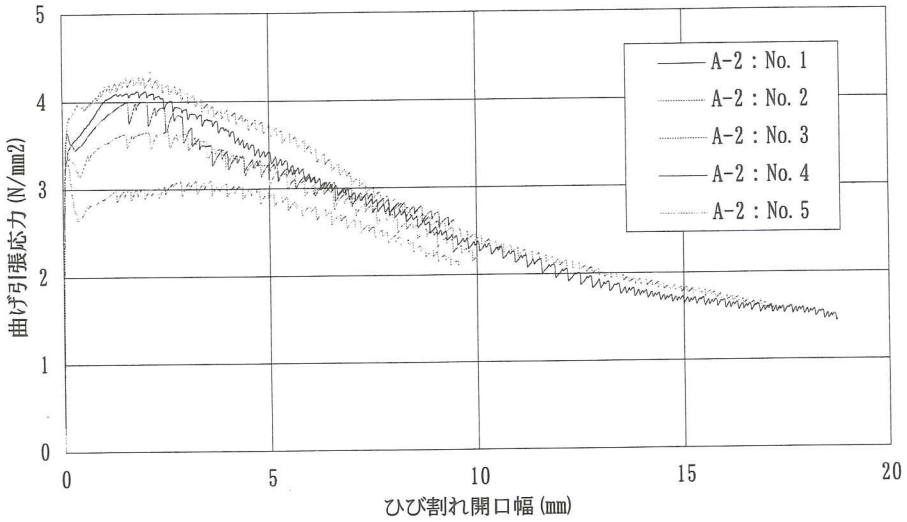


図-参12.1 曲げ引張応力－ひび割れ開口幅曲線 (ケースA-2)

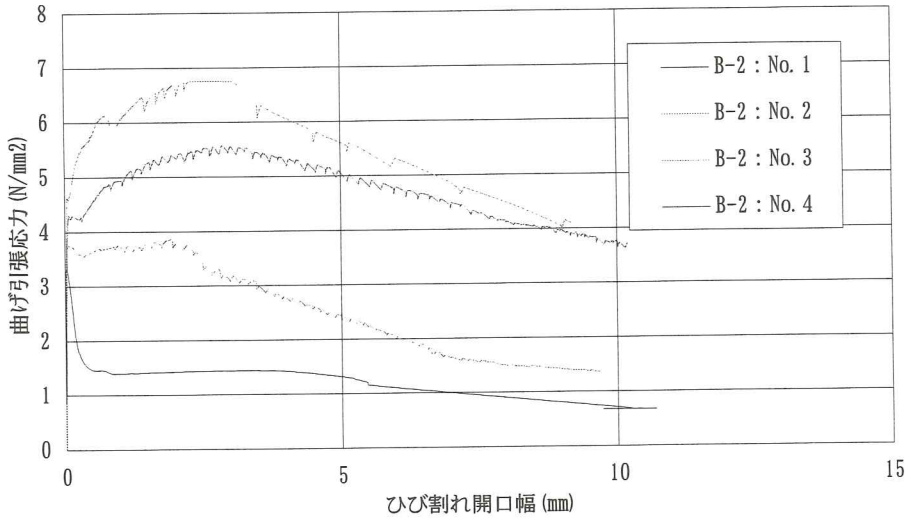


図-参12.2 曲げ引張応力－ひび割れ開口幅曲線 (ケースB-2)

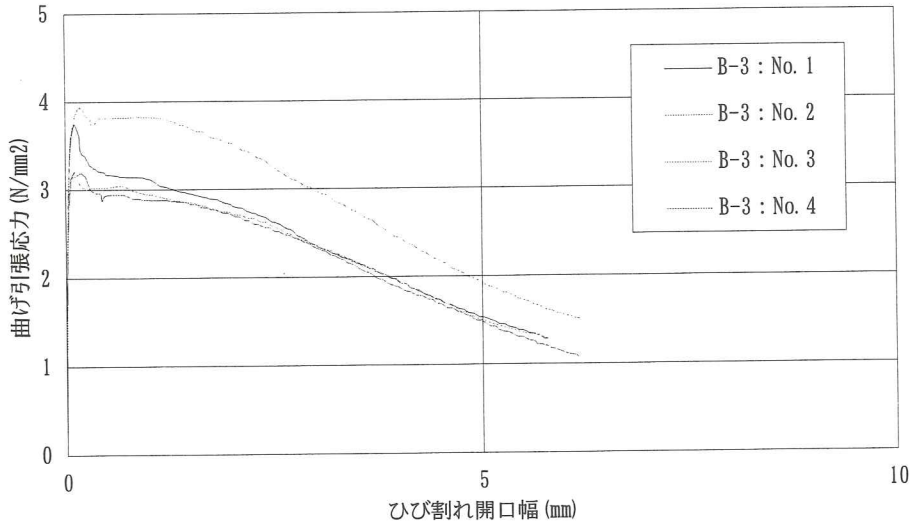


図-参12.3 曲げ引張応力－ひび割れ開口幅曲線 (ケースB-3)

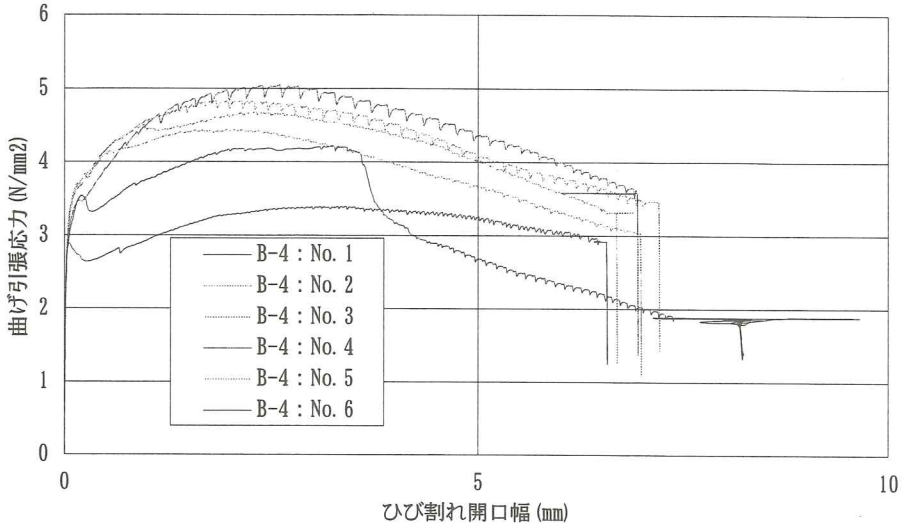


図-参12.4 曲げ引張応力－ひび割れ開口幅曲線 (ケースB-4)

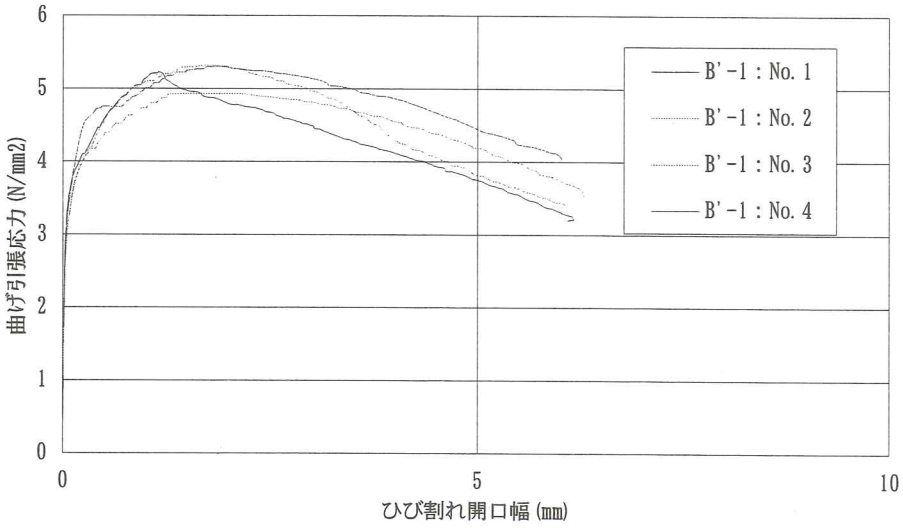


図-参12.5 曲げ引張応力－ひび割れ開口幅曲線 (ケースB'-1)

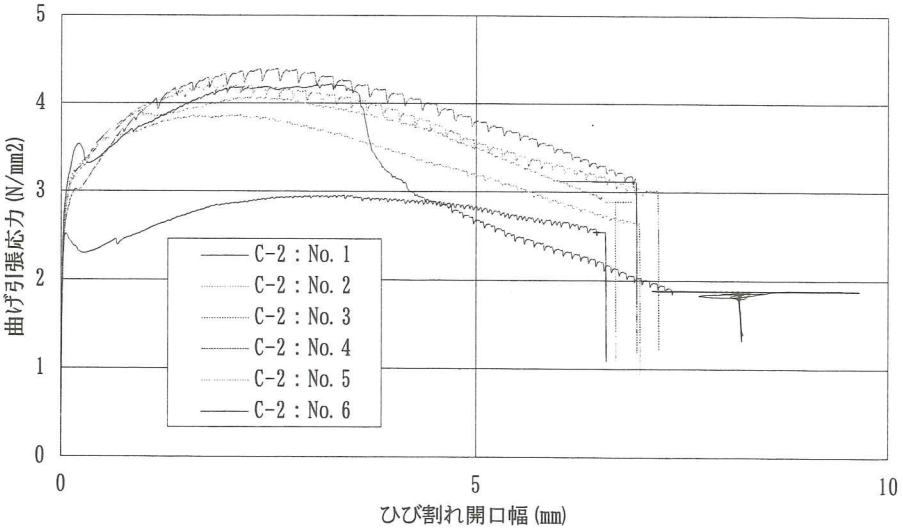


図-参12.6 曲げ引張応力－ひび割れ開口幅曲線 (ケースC-2)