

繊維シートによる RC 部材の補強における
定着方法に関する研究

土木工学専攻

9765026 古谷 嘉康

主旨

本研究は炭素繊維シート(Carbon Fiber Sheet 以後 CFS)、アラミド繊維シート(Alamid Fiber Sheet 以後 AFS)を用いた鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete 以後 RC)構造物の角部への定着方法を考案し、その有効性を実験的、解析的に検討するものである。

この種の耐震補強を目的とした研究は、RC 構造物に著しい被害を生じさせた十勝沖地震や宮城県沖地震を契機に始められ、その後の示方書の改定に伴い、活発に行われてきた。この様な背景にあって、兵庫県南部地震で生じた今までの常識を覆す被害は、それまで危惧されていた主鉄筋段落し部の曲げ耐力不足、せん断耐力の不足などの RC 構造物のもつ問題点を露呈するばかりか従来の設計の根本を覆すものとなり、緊急な現実問題として耐震補強・補修がなされた。また震害を受けていない既存構造物に対しても十分な補強の必要性が一層明確なものとなり、耐震補強対策がとられている。

既存の RC 構造物、特に橋脚への補強では、耐力の増加だけではなく、じん性を向上させねばり強くすることが重要である。単に耐力を向上させた構造物は大規模な地震時に橋脚から構造物全体に伝達される部材力が大きくなり、そのために大規模な補強が必要となってくる。また、曲げ耐力を上げる事により作用せん断力が増加してせん断破壊に至ることもある。従って、曲げ耐力を過度に上げることなく、じん性を向上させることが重要である。もちろん、じん性のみを十分に向上させたとしても兵庫県南部地震クラスの地震には耐えられない場合が想定されるため、所要の耐力とじん性の向上をはかったバランスの良い補強工法が望ましい。そのような条件を満たす工法として、RC 巻き立て工法^{1),2)}、鋼板巻き立て工法^{3),4)}及び炭素繊維巻付け工法^{5)~8)}等が提案または、実施工されている。このうち、RC 巻き立て工法や鋼板巻き立て工法は断面積、自重の増加が懸念されている^{7),8)}。また、今後様々な条件での耐震補強施工が予想され、新しい補強工法の提案が待たれている⁷⁾。

一方、橋脚への繊維シート(Fiber Sheet 以後 FS)を用いた補強の多くはせん断耐力の向上、じん性の向上を目的とし、それらの研究^{4),5),9),10)}は多く、実施例も少なくない。また、曲げ耐力の向上を目的とした研究⁷⁾、実施例もある。繊維

シートによる補強は軽量で施工性が良いことから利用される機会は増えると思われる。しかし、実際にはせん断補強または、鉄筋段落し部の曲げ補強への利用に限定されており、橋脚基部の補強に利用した例は少ない。これは、繊維シートを角部に定着する適当な方法が開発されていないことによるところが大きい。

そこで本研究では、繊維シートを補強材として用いる場合の角部への定着方法を新たに考案すると共に、その応用例として、RC 橋脚の曲げ補強におけるフーチング部への定着において、この工法が有効であることを実験と数値解析により検証した。

表紙	P. 1
主旨	P. 2
目次	P. 3
第 1 章 序論	P. 6
1. 1 大地震による構造物の地震被害	
1. 2 過去の論文発表による繊維補強に関する傾向の調査	
1. 3 繊維による補強	
1. 4 繊維シート補強方法の特徴	
1. 5 論文調査結果	
1. 6 本研究の目的	
第 2 章 提案した補強工法の概要	P. 22
第 3 章 提案する補強工法の施工方法	P. 23
3. 1 炭素繊維シートの施工方法	
3. 2 アラミド繊維シートの施工方法	
第 4 章 要素実験概要	P. 28
4. 1 繊維シート引張り実験	
4. 2 アンカーボルト引き抜き実験	
第 5 章 要素実験結果・考察	P. 34
5. 1 繊維シート引張り実験	
5. 2 アンカーボルト引き抜き実験	
第 6 章 橋脚モデルの載荷実験	P. 36

6.1 橋脚モデルの基本的設計	
6.2 各部材の設計	
6.3 実験装置	
6.4 供試体の設置	
6.5 計測器の設置	
6.6 実験方法	
6.7 実験手順	
第7章 橋脚モデルの実験結果・考察	P. 41
第8章 橋脚モデルの解析	P. 43
8.1 解析方法	
第9章 橋脚モデルの解析結果と考察	P. 44
第10章 隅角部モデル実験概要	P. 45
10.1 隅角部モデルの基本的設計	
10.2 各部材の設計	
10.3 実験装置	
10.4 供試体の設置	
10.5 計測器の設置	
10.6 実験方法	
10.7 実験手順	
10.8 結果の表示	
第11章 隅角部モデル実験結果・考察	P. 50
第12章 隅角部モデル解析の概要	P. 51
第13章 解析モデル結果・考察	P. 54

13.1 CFS により補強された供試体

13.2 AFS により補強された供試体

13.3 隅角部モデル実験と解析との比較

第 14 章 結論 P. 56

付録 P. 57

参考文献 P. 127

謝辞 P. 129

第1章 序論

1.1 大地震による構造物の地震被害

1995年1月17日（火）午前5時46分、兵庫県淡路島の北端付近を震源とするマグニチュード7.2の地震が発生し、近畿地方を中心に西日本から東日本にかけて広い範囲で強いゆれを記録した。この地震による被害は、死者6,000人以上、負傷者26,000人以上、家屋破損100,000件以上に達しており、戦後最悪の大震災といえる。都市機能が高度に集中した近代的都市圏を襲った初めての大地震といわれ、建物の損壊だけでなく、都市の中枢をなす多くの土木関連施設に致命的な打撃を与え、それまで危惧されてきたRC構造物の持つ問題点を露呈し、更に従来の設計の根本を覆すものであった。それにより現実問題として耐震補強・補修の必要が明確になった。土木関連施設の多くの被害は、活断層に囲まれ、地層的に六甲山系からの風化岩（マサ土）が堆積した地域に見られると指摘され、その被害の中には今まで地震に強いといわれた高速道路、鉄道、新交通などの橋梁や高架橋の橋脚に崩壊も見られた。中でも、コンクリート構造物は壊滅的な被害を受けた。橋脚を例にとって被害を大別すると道路施設に関するもの、鉄同施設に関するものに分けられる。鉄道施設の代表的なRC橋脚の被害例として、TVで、多く報道された阪神高速道路の3号神戸線、深江出入路付近での635mにも及ぶ、ピルツPC高架橋の橋脚の倒壊についてみる。

（なお、ピルツPC橋は、地震時の水平力を各橋脚に分散できるころなどの利点がある。また、当該当区は昭和43年9月に下部工、12月に上部工が着工され、昭和44年11月に完工されている。）この被害は、一本中の橋脚の18基が中央から根元まで折れて倒壊している。その破壊形態の多くは、柱全体がせん断破壊している場合と提灯座屈している場合であった。このRC柱の倒壊の被害は、作用せん断力が大きく働く個所でせん断破壊をし、圧壊を引き起こしている。

次に、鉄道施設の代表的なRC橋脚の被害例として、JR山陽新幹線の新大阪から姫路間での落橋について見てみる。この辺りの高架橋はラーメン構造を基本としていて、4柱式のラーメン橋脚に単版桁やPC桁を載せた構造である。（当該工区は昭和47年に完工されている。）落橋したのは8ヶ所であり、高架橋が見るも無残に倒壊し、レールが宙づりになった。落橋した原因は、橋脚や高架橋

の RC 柱が倒壊したためであった。この RC 柱の倒壊の被害は、作用せん弾力が大きく働く個所でせん断破壊をし、圧壊を引き起こしている。

よって補強に関しても、せん断補強に対する研究がより多く、より早く進んできている。その反面、曲げ補強に関する研究は、あまり盛んに行われてきていない。

この兵庫県南部地震による外力は想定した地震力よりも、その立地条件によって、その差がかなり大きかった（場所によっては 818gal を超える）ことによる。しかし、同じような立地条件でも、被害の大きい構造物とほとんど影響を受けない構造物が見られたこと、比較的古い既存構造物に大きな被害が多かったことなどから、その地震力の差だけではないと考えられる。その点を踏まえて以上の被害を考察する。

RC 橋脚の被害は、せん断破壊をしているものが多かった。この破壊の要因は、コンクリートおよび配合材料の材料自身の問題や道路交通量、輪荷重の増加、列車のスピードアップ等設計値を超えた構造物の負荷の増加、空気中の塩分や汚染物質による化学変化の促進などの影響による RC 橋脚の劣化による指摘もあるが、それ以上に、せん断力に対し過大評価と考えるのが必然的である。

従来の RC 橋脚の設計では、作用せん断力の少ない柱中央部の帯鉄筋の配置間隔は、柱端部の帯鉄筋のそれに比べ、作用せん断力に耐えうる限り配置間隔を広くしてもかまわないとされていた。これだけがせん断破壊の要因ではないが、大きく影響したと考えられる。この点については、1968 年の十勝沖地震、1978 年の宮城地震の被害において RC 構造物にせん断ひび割れが見られたことから、昭和 55 年度版「コンクリート標準示方書」で、せん断に対する設計基準の改定が行われるなど、既存 RC 構造物に対するせん断力不足が懸念された。今回の被害は、作用地震力が想像を超えたものであったことも考慮しなければならないが、特に改定以前の構造物に対するせん断耐力不足が明確になった。せん断破壊は、脆性的な破壊であるため通常絶対に引き起こされないように設計段階で照査するものであるが、実際の現象として多く見られたことは非常に残念である。

また、曲げ破壊が起こった要因は、鉄筋の断落し部や鉄筋圧接部などが破壊してしまったため、主筋が降伏する前に力を伝達しなくなったためである。こ

の点も過去の地震被害により懸念されており、十分検討する必要があったと考えられる。

阪神大震災より、約4年を経過しようとしている。震災直後の原因解明、設計基準の改定といったあわただしい動きも落ち着きを見せ、各機関の対応も定まりつつある。このような中、古い基準で設計された構造物の耐震補強が急ピッチで行われた。

本来、古い基準で設計され、新しい基準に適応しない構造物は、速やかに補強が行われなければならないが、努力とは裏腹に予算上の問題もあり、これが遅れているのが現状である。阪神大震災が契機となり、この状況が見直されてきたことは不幸中の幸いである。

既存のRC柱の補強では、耐力の増加だけでなく、靱性を向上させ粘り強くすることが重要である。それは、大規模な地震時に、橋脚から構造物全体へ伝達される地震力は大きくなるため、大規模な補強が必要な場合がある。よって、構造物全体への影響を小さくするために、できる限り橋脚の靱性を向上させ、耐力を限界以上にあげてはならない。

現在、主に用いられている補強方法は、RC巻きたて補強・鋼板巻きたて補強・繊維巻きたて補強がある。しかし、阪神大震災の教訓から、耐震補強への関心が高まりさまざまな条件の耐震補強が予想され、新しい補強方法の提案が待たれている。RC柱の新しい補強方法では、補強材として炭素繊維シート・アラミド繊維シートを用いた補強が注目されている。炭素繊維は、高強度・高弾性、腐食の心配がなく軽量であるため重機が不要という抜群の施工性を持つ。また複雑な形状にも柔軟に対応できるという利点がある。しかし、炭素繊維は高弾性であり降伏域がほとんどなく、補強したことによる靱性率の向上があまり見られない。靱性率の向上を目的としたうえで、高弾性な炭素繊維に比べ、鉄筋より弾性率が低く高強度を有するアラミド繊維に特に着目して、連続繊維シートのRC柱補強に対する有効性の研究を比較検討していく。

しかし、現在行われている補強工法の中でどれくらい炭素繊維シート、アラミド繊維シートが注目されているのか、実際のところはわからない。そこで今回は各種の論文集を調べることから始めることにする。これにより、連続繊維シートに関する論文がどの程度の頻度で発表されているのか、せん断補強に対し

てなのか、それとも曲げ補強に対してなのか、構造物中に入っているのか、既存構造物の外に巻いているのかといったような違いについても調べてみた。

1.2 過去の論文発表による繊維補強に関する傾向の調査

1.2-1 背景

平成7年におきた兵庫県南部地震の被害により、従来の基準で設計された構造物は大きな被害を受けた。耐震補強設計法の制定により、耐震補強に対する注目はより一層高まったといえる。これまで主に行われてきたRC巻立て工法や鋼板巻立て工法のみでは多様化した現在の建築様式に対応しきれない部分や時間的制約により、施工性・耐震性能・施工時間の条件を兼ね備えた技術の開発が望まれることとなった。

震災後、特に注目を浴びている工法に連続繊維を用いた補強方法がある。繊維の特長である高強度・高弾性・軽量といった特長の他に、その施工性の高さから、今後様々な部分での活用が見込まれている。

本節では、連続繊維に関する論文発表を調査し、その傾向を調べ、連続繊維による耐震補強の有効性を確認することを目的とする。

1.2-2 補強の基本方針

先の兵庫県南部地震の被災状況を見ると、橋脚に対する被害は主に柱部・特に段落し部への被害が甚大であった。そのため、現在行われている補強・補修もそういう箇所に対するものが多い。

既設RC橋脚の耐震性向上は大きく以下の2つに大別される。

- A) 躯体のじん性を向上させ、耐力を変えずにエネルギー吸収を大きくする方法
- B) 橋脚の耐力を大きくし、大きな地震力に対して、耐力（と変形性能）により抵抗する方法

Aの方法はRC巻立てや鋼板巻立て工法等による拘束効果により可能になると考えられており、米国では実績の多い工法である。この方法では、橋脚の保有水平耐力が大きく変わらないため、想定以上の地震が生じた場合でも基礎への負担が少ないメリットがあるといわれている⁶⁾。しかし、実際は、帯鉄筋や鋼板

等の拘束効果によるコンクリート強度の向上及びRC巻立てによる断面増加による耐力の向上はある。

Bの方法は、RC巻立てや鋼板巻立てとフーチングへのアンカー定着を併用することで、橋脚の耐力を向上させる方法である。この方法は、塑性率の改善だけではエネルギー吸収に限界があり、十分な補強効果が得られない場合に有効であるが、橋脚の耐力を大きく増す必要がある場合には基礎の照査が必要となる。

1.2-4 調査論文

調査対象として以下の論文集を挙げる

- 1) 土木学会年次学術講演会（1987～1998）
- 2) 土木学会論文集（1987～1998）
- 3) コンクリート工学年次学術講演会報告集（1987～1998）

1.2-5 RC 構造物の補強方法

一般に補強工法の選定は、工法の選定及び現場の施工条件に大きく影響を受けるため、事前に設計・施工の制約条件を検討する必要がある。そういった制約条件がない場合は、各工法の補強効果・経済性・施工性等を比較検討して補強工法の選定を行なう。

RC柱の補強方法は主に2種類に大別される

- ①. 前補強：構造物制作時に行う補強方法
- ②. 後補強：既存構造物に対して行う補強方法

前補強の種類では以下のようなものが上げられる。

a) 鉄筋の配置による補強

設計段階で曲げ・せん断による補強を考慮するもので、鉄筋の配置・量・形状を変化させることで、より効果的な補強を行う方法

b) 繊維混入による補強

コンクリート打設時に鋼繊維や炭素繊維などを混入し、コンクリートの強度向上をはかる方法

c) FRP (Fiber Reinforced Plastic) による補強

炭素繊維や鋼繊維・アラミド繊維等を棒状に加工して鉄筋の代わりに

使用したり，PC 鋼棒と同じように緊張材として用いる方法
次に後補強の種類についてまとめる．また，各工法の利点・欠点を列挙する．

1) RC 巻立て工法

これまでのコンクリート橋脚の耐震補強として最も一般的に行われてきた工法である．この工法は，既設橋脚の断落し部の補強のみでなく，橋脚躯体全体の耐力の向上を目的としており，橋脚全体に鉄筋コンクリートを巻立てる．橋脚躯体を鉄筋コンクリートで巻き立てるとともに，断面を貫通して巻立て断面内の帯鉄筋を中間帯鉄筋で拘束した構造であり，曲げ耐力とじん性の両者を向上できる補強工法である．経済性については，鋼板巻立て・繊維巻立てと比較して，RC 巻立てが最も有利となる場合が多い．また，RC 巻立て工法は将来的な維持管理面でも，他工法と比較して有利と考えられている．欠点としては，RC 増し打ちによる断面積・自重の増加があげられる．断面が増加すると伝達される地震力は増加されてしまう．また，構造物全体の自重増加により，基礎工の支持力に余裕が無い場合には適用できない．補強により美観を損ねる場合があることや，工事が大掛かりになったり，施工時間がかかる事が問題とされている．

2) 鋼板巻立て工法

橋脚の外周に鋼板を巻立てる工法で，鋼板は溶接その他の方法で橋脚を取り囲んで一体化させる．この工法では，鋼板によってせん断力が大きく向上するうえ，塑性変形態が大きく進んだ後に生ずるコンクリートの圧壊および軸鉄筋の座屈を防止する効果もある程度期待できる．よってこの工法では曲げ耐力はほとんど変化しないが，塑性変形態は大きく向上するのである．また，補強効果に対する評価法もほぼ確立されているといえる．このような理由により，現在この工法は盛んに行われている．欠点としては，RC 巻立てと同様に断面積・自重の増加とそれによる地震力の増加や基礎工の地盤が限定されることあげられる．また，施工時に大型機材が必要になるため，そういったスペースが確保できる場所できなければならない．既設橋脚と鋼板との間に隙間が生じてしまい，この隙間を埋めなければならない．加えて，断落とし部の補強時の効果は定かではなく，曲げ耐力を向上させようとすると定着方法の検討が必要となる．

3) 繊維シート巻立て工法

連続繊維による補強工法は、従来の工法に見られた、施工が大規模になるという欠点を克服し、手軽な施工を可能にした。特に、繊維をシート状に加工して躯体に貼り付ける方法はコンクリート床板などの補強が国内外で、耐震補強にたいしては米国を中心として用いられてきた。また、繊維シートを用いて壁付き柱を補強する工法(図 1-2-1)も開発された⁸⁾。繊維は軽量で、施工も貼り付けるだけなので重機も必要なく、きわめて高強度であるため、せん断耐力を効果的に向上させることができる。また、繊維方向を変えることにより、段落とし部の補強も可能であり、曲げ補強に対しても対応可能である。しかし、炭素繊維シートの場合剛性がなく、脆性であるためコンクリート拘束を必要とする領域まで部材の塑性変形性能を大きくしようとするとは言い難い。このため施工容易である分を考慮しても経済的とは言い難い。また設計規準類に示された耐力向上の評価式は、特定の構造物を対象とした実験式であり、汎用性については、今後検討課題が残されている。

炭素繊維シートのほかに、耐震補強用に開発されたアラミド繊維シートがあり、適用に向けて動きが活発になっている。炭素繊維の研究・データを受けたこともあって開発の足は速く、すでに設計基準が作成される段階に入っている。この繊維の特徴は、ほぼ炭素繊維と同じであるが有機繊維であることから、紫外線が耐久性に与える影響に注意しなければならない。また、弾性係数が炭素繊維と比較して小さいため、せん断補強時にやや不利になる。

その他にも数多くの工法が提案・開発されている。その中で特徴的なものは鋼線巻付け工法及び FRP 吹き付け工法がある。いずれの工法も、せん断耐力向上及び塑性変形性能向上に適用できるが、特別な工夫をしない限り、断落し部や曲げ耐力向上には適用できないとされている。

4) 鋼線巻立て工法

主に円柱橋脚を適用対象としており、あらかじめ補強すべき部材の外形寸法にあわせて PC 鋼線をスパイラル状に加工、躯体に対して巻き付けた後にモルタルを吹き付けて鋼線を被覆することで補強を行う工法。

5) FRP 吹き付け工法

FRP 吹き付け工法は、材料費が繊維シート及びそれらの接着剤より高価なガラス繊維やポリエステル樹脂を用いて部材に対して吹き付けることで補強を行う工法。繊維は吹き付けノズル直前で樹脂と混合される。

1.3 繊維による補強

繊維補強は大きく分けて3つに分類される

- ① 打設前の段階から繊維を混入させる方法
- ② 繊維を棒状に加工し、鉄筋の役割を果たさせる方法
- ③ 繊維をシート状に加工、既存構造物に対して貼り付ける方法

①の主なものは、従来行われている鋼繊維補強である。コンクリート打設時に繊維を混入させることで強度の向上をはかる。最近では炭素繊維やアラミド繊維を混入させる研究も行われている。

②はコンクリート打設時に鉄筋の代わりとして、棒状に加工した繊維を用いる工法で、主に鋼繊維・炭素繊維を用いて行われてきたが、近年ではアラミド繊維を用いての研究も盛んである。

③は実際に行われている補強方法で、高速道路や鉄道等で用いられている。シート状に加工して用いられているのは、主に炭素繊維とアラミド繊維である。現在のRC補強は、耐力向上のみを目的としたものではなく、じん性を向上させて、部材を粘り強くさせる事が重要とされている。繊維シートは、高強度・高弾性を有し、腐食の心配がなく、軽量であるために重機が不要である。シート補強は施工に時間もかからず、細やかな個所での施工も可能であるために、都市部などの混み合った個所での施工や複雑化した現在の構造物にも対応可能である。しかし、炭素繊維は高弾性であり、降伏域がほとんど無く、補強したことによるじん性の向上があまり見られない。じん性の向上を目的とした上で、高弾性な炭素繊維に比べて、鉄筋より弾性率が低く、高強度を有するアラミド繊維は、より耐震補強に向いているという事が言える。

1.3-1 繊維シートの特徴

炭素繊維は、比重約 1.8, 引張強度 $3000\sim 7000\text{N/mm}^2$, 弾性係数 $2.35\times 10^5\sim 8.0\times 10^5\text{N/mm}^2$ と、軽量・高強度・高弾性と、一般の土木材料と比較して優れた特性を有している。種類としては高強度型・高弾性型など数種類あるが、橋脚の耐震補強には高強度型のものが主に使用される。高強度型の炭素繊維は、ポリアクリロニトリル (PAN) を原料とし、これを紡糸したものを不活性ガス中で 2000°C 以上の高温で焼成して製造される。繊維の直径は $7\sim 10\mu\text{m}$ 程度と極めて細く、これを $6000\sim 12000$ 本束ねたストランドを 1m 幅あたり数百本並べてシート状に成形したものである⁴⁾。

炭素繊維は、マトリックス樹脂と複合化して CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) を形成し、構造材料として優れた性能を発揮する。炭素繊維巻立て工法では、現場で炭素繊維シートにエポキシ樹脂を含浸させ、コンクリートに接着すると同時に複合材である CFRP を形成し、既設のコンクリート部材を補強するものである。

アラミド繊維は炭素繊維と比較して、より耐震補強に適した性能を期待して開発されたものである。

比重約 1.4, 引張強度 $2500\sim 3800\text{N/mm}^2$, 弾性係数 $0.80\times 10^5\sim 1.20\times 10^5\text{N/mm}^2$ となっており、炭素繊維と比較して引張強度・弾性係数が低くなっている。引張強度が炭素繊維と比較して小さいため、せん断補強材として用いた時の効果はやや劣ると言えるが、弾性係数も低く押さえられている⁵⁾。これにより、じん性向上については炭素繊維に比べて有用であるといえる。つまり、現在の耐震補強方法で重視されている躯体のじん性を向上させ、耐力を変えずにエネルギー吸収を大きくする方法として繊維シートを用いる場合は、炭素繊維よりもアラミド繊維の方が有用といえる。

1.3-2 繊維巻立て工法

繊維巻立て工法で期待する補強は、以下の2種類に大別することができる。

- 1) 橋脚の破壊形態を躯体下端の曲げ破壊へ移行させる補強
- 2) 橋脚全体のじん性を向上させる補強

従来より、1) については研究が進められ、載荷実験において補強効果が確認

されている，設計手法も確立されており，耐震補強工法として採用されていたが，2)については，載荷実験を実施して補強効果が確立され，設計手法が開発されたために採用された．なお，橋脚躯体下端でフーチング部に定着して，橋脚全体の曲げ耐力を向上させる補強については，未解明であるため現在研究が行われているが，まだ設計手法の採用には至っていない．

上記1)の補強は，既設橋脚の段落し部補強として用いられる補強で，躯体表面の軸方向に，繊維シートを貼り付ける方法で引張鉄筋を増設することと同様の機能を期待して，せん断耐力の向上をはかり，橋脚の破壊形態を躯体下端の曲げ破壊へと移行させるものである．

上記2)の補強は，橋脚の破壊形態が躯体下端の曲げ破壊であることを前提に，躯体下端で帯鉄筋方向に繊維シートを貼り付けることにより，帯鉄筋を増設させることと同様の効果を期待して，拘束効果の向上をはかり，橋脚全体のじん性を向上させるものである．

また，帯鉄筋の効果として，せん断耐力の向上と拘束効果の向上を目的として補強する場合には，炭素繊維ストランドを巻付ける工法も有効であるため，橋脚高さ等の施工性を吟味の上，採用することとなる．

ただし，繊維シート巻立て工法は，各種の実験をもとに確立されたものであるため，使用目的がことなったり，材料特性が実験条件とことなったりする場合は別途検討が必要である．特に拘束効果によるじん性向上を目指す補強は，橋脚断面寸法の辺長比が1:1.5以下，せん断スパン比が1:5以上の場合に適用するものとし，それ以外の場合，または引張鉄筋比が極端に小さい場合は別途検討の必要がある．

1.4 繊維シート補強方法の特徴

1.4-1 炭素繊維シートについて

- ① 高強度であるため，補強量が非常に少なくすむ．補強後のコンクリート躯体の形状変化がほとんど無い．
- ② 耐久性に優れており，ほとんどの環境で腐食・劣化に対して安定であり，特に塩害対策として最適である．
- ③ CFRP としての比重が鉄筋の約 1/5 であり，補強による重量増加はほとんど無

い.

- ④ 施工方法はシートの貼付けのみなので熟練を必要としない.
- ⑤ 複雑な形状に対しても柔軟に対応できる
- ⑥ 重機が不要で施工性が高い
- ⑦ 局部的な屈折により，その強度を十分に発揮する前に破断するため，隅角部への定着に工夫を要する.

1.4-2 アラミド繊維シートについて

- ① 高強度・高じん性により，優れた補強効果を発揮する．特に耐震補強における変形性能の向上に優れる.
- ② シートの大きな伸びは，大変形でも繊維破断が起きにくく，構造物の崩壊を防ぐ.
- ③ 貼付け方向の変更でせん断・曲げ・じん性向上のいずれにも対応可能.
- ④ 軽量・柔軟性・粘り強さ・接着性の良さから，良好な施工性を示す.
- ⑤ 柔軟なため，補強構造物の形状を選ばず，あらゆる場所での施工が可能.
- ⑥ 施工に費やす工期が従来のもものと比較してはるかに短い.
- ⑦ 電気絶縁性を示すため，電気系のトラブルが無い.
- ⑧ 樹脂による被覆のため，耐候性が向上し，信頼性が高い.

1.5 論文調査結果

1.5-1 各繊維の割合

図 1-1 は，1987 年から 1998 年までに行われた繊維に関する論文発表の中での，各繊維の割合である． 図 1-2 のグラフからわかるように，全体として見ると炭素繊維についての論文が一番多く，ついでアラミド繊維，鋼繊維となっている．1984 年から 1987 年までは，繊維補強に関する論文の総数は少ないものの，鋼繊維を用いた補強が主流となっていたが，1987 年以降鋼繊維から炭素繊維へとその研究対象が変わっていることがわかる．以後鋼繊維についての論文件数は年々減少する傾向にあると言える．それと対照的に炭素繊維の論文件数は 1987 年以降増加する傾向にあり，発表件数も最も多い物となっている．1995 年の阪神・淡路大震災以降は繊維シートとして後補教材としての使用も盛んになり現

在の繊維補強に関する標準となっている。

アラミド繊維に関しては、高じん性という耐震補強に適したその性質により、後補強材としての使用が注目されている。現在は炭素繊維と同様にシート状態で使用時の補強効果についての研究が進み、論文件数も年々増加傾向にある。

1.5-2 過去の論文における繊維補強に関する発表件数の変移

図 1-4 は、1984 年から 1998 年までの繊維補強に関する論文発表件数の変移をまとめた物である。図に見られるように、繊維補強に関する論文は年々増加傾向にあると言える。鋼繊維は炭素繊維が発表された 1987 年以前はほぼ全ての発表をしめていた。しかし、87 年以降は発表件数こそ、それほど減少しているとは言えないが、全体的な論文件数の増加の割合と比較すると、やはり減少傾向にあると言える。現在の主流と言える炭素繊維に関しては、やはり年度毎に僅かながらも増加傾向が見られる。また、近年盛んに研究されているアラミド繊維については阪神・淡路大震災のあった 1995 年以後に注目を集め、それに伴い論文発表も年々増加していることが見て取れる。現在は炭素繊維及びアラミド繊維共にシート状に加工しての後補強材としての研究が盛んに行われ、施工例もある。

1.5-3 震災及び示方書改定に伴う論文発表の変移

今回の調査では論文発表で炭素繊維が発表された 1987 年以降の物をその対象とした。繊維を用いた補強は比較的新しい部類に属し、それ以前は繊維に関する研究はそれほど行われてはおらず、全体の傾向をみるにあたりそれ程大きな影響を与えるものではないと思われる。現在の主流といえる炭素繊維は 1987 年に発表され、それ以前は発表件数・種類共にも非常に少ないため、比較的まとまった数の発表がなされた 1987 年以降のデータを用いて調査を行う。

図 1-4 を見ると繊維補強の発表件数は年々増加傾向にあるといえる。発表件数は震災後や示方書の改定された年に著しく増加する傾向がある。

最初に示方書の改定と重なるのは 1986 年で、それまでの繊維補強は鋼繊維を用いた補強コンクリートの生成が主流となっていた。また、この年の改定は既存構造物の耐久性についての問題で、示方書の改定はそれらに対する補強が中

心であった。この流れを受けて翌年の87年に炭素繊維補強が発表され、約半数の割合をしめた。この後、繊維補強の主流は炭素繊維が占めることとなり、鋼繊維は減少していくこととなる。この時点では、シート補強は行なわれておらず、前補強材としての研究が行われていた。91年には繊維を後補強材として使用する流れが出始めた。また、アラミド繊維に関する発表も出されはじめている。93年・94年には2年間で4回の地震が発生し、繊維補強も後補強に関する発表を多く見るようになったが、まだ主流は前補強であった。95年に起こった阪神・淡路大震災により、既存構造物に多大な被害が生じた。この被害によって設計示方書の大幅な見直し・改定が行なわれ、翌年には耐震設計法として独立・制定された。これを受け、翌96年から繊維シートを用いた後補強に関する発表が多数行なわれることとなった。この年より前補強と後補強に関する発表の割合が逆転することとなり、現在は後補強材として注目を集めている。また、これまで緊張材としての使用が多かったアラミド繊維は構造物の耐力を向上させた上に、靱性の増加に大きく貢献するという特性からシート状での補強が有用とされ、現在盛んに研究・実用化されている。昨年大手企業の共同研究により、炭素繊維シートによる耐震補強工法が建設大臣の一般認定を受けたことで今後更にシート補強は普及していくと予測され、98年の発表件数の増加はそれに関連したものと思われる。

1.5-4 前補強・後補強の変移とそれに伴う繊維補強の変化

繊維補強には、施工の前段階からコンクリート部材等に繊維を混入させたり、樹脂等で加工された繊維を鉄筋に代わる材料として扱ったりする補強方法（前補強）と、既存の構造物に繊維シートを巻付けたたりする補強方法（後補強）の2種類が大きく分けてあると言える

図1-6は今回調査した論文集での、前補強と後補強の発表件数の変化を各年度毎にまとめたものである。

これを見て分かるのが1996年以降、前補強と後補強の発表件数が逆転していることである。この前年である1995年には関東大震災以降最大規模の被害となった、阪神淡路大震災が起こっている。これを受けて既存構造物に対する耐震補強が急務となり、各種後補強の研究が進むこととなる。繊維補強に関してはシート状にして既存構造物に貼り付ける後補強材として用いる方法が、やはり

95年以降急激に増加し、主流となっている。これらのシート補強は主に炭素繊維・アラミド繊維を用いて行われており、今後もこの2種の繊維が主流となっていくと思われる。

1.5-5 繊維シートを用いたRC構造物の補強箇所及び補強効果

現在行われている補強は、1995年の兵庫県南部地震以降、耐震に関する補強が主なものとなっている。

図1-7を見てもわかるように、繊維シートの適用箇所は橋脚をその中心としていることが分かる。

繊維シートは貼り付ける方向により、その補強方向を変化させることができるという特性を持っている。

これまでの繊維シート補強は主にせん断補強材として用いられることが多かったが、98年度の発表を見ると、曲げ補強材として用いるための研究も盛んに行われている事が分かる。

1.6 本研究の目的

前述のように設計基準である示方書は、大地震が起こるたび、その被害状況に伴い厳しく改定されていることが多い。つまり、既存の構造物には、改訂された設計基準を用いて再計算し、必要に応じて耐震補強をする必要性がある。

また、地震による損傷の許容し得る程度は、構造物によって相違する。地震後に要求される構造物の健全度は、構造物の種類によって異なるが、多くの構造物は地震後も使用可能であることが期待されている。

そこで、地震の影響を考慮するにあたっては構造物の種類に応じて地震後に要求される使用性能を設定し、これに対応する損傷の程度を考慮する必要がある。更に構造物の耐震性を高めるには十分な塑性変形性能を確保する必要がある。

つまり、既存の RC 柱の補強では、耐力の増加だけでなく、じん性を向上させねばり強くすることが重要である。それは、大規模な地震時に、橋脚から構造物全体へ伝達される地震力は大きくなるため、大規模な補強が必要な場合がある。よって、構造物全体への影響を小さくするために、できる限り橋脚のじん性を向上させるが、耐力を限界以上に上げてはならない。しかし、橋脚のじん性の向上だけでは、兵庫県南部地震クラスの地震には耐えられないため、所用の耐力とじん性の向上をはかったバランスの良い補強工法が望ましいと考えられる。

前述のように、現在用いられている補強工法は、RC 巻きたて工法や鋼板巻きたて工法であるが、この工法にもそれぞれ利点、欠点がある。また、阪神大震災の教訓から、耐震補強への関心が高まり、今後は様々な条件の耐震補強施工が予想され新しい補強工法の提案が待たれている。現在、主に用いられている補強方法は、RC 巻きたて補強・鋼板巻きたて補強・繊維巻きたて補強がある。RC 柱の新しい補強方法では、補強材として炭素繊維シート・アラミド繊維シートを用いた補強が注目されている。炭素繊維は、高強度・高弾性、腐食の心配がなく軽量であるため重機が不要という抜群の施工性を持つ。また複雑な形状にも柔軟に対応できるという利点がある。

炭素繊維シート(以降 CFS)を用いた巻きたて補強工法は、従来のようにせん断補強材として CFS を用いるだけでなく、従来用いられなかった曲げ補強材として用いる補強工法である。補強材料として、CFS を用い RC 構造物の隅角部へ定

着する。CFS のみの定着だと補強強度は接着強度のみに依存される。そこで本研究では、CFS に定着用治具を載せ、ボルトを用いて供試体と圧着する。このことで剥離を抑制し、補強強度を上げる。しかし、必要以上に強度を上げてしまうと CFS が破断を起し、構造物全体の倒壊に至る。そこで定着用治具の形状、機械的性質による変化で補強強度を調節し、じん性の向上を目的としている。

また、CFS は高弾性であり降伏域がほとんどなく、補強したことによる靱性率の向上があまり見られないことから特に靱性率の向上を目的としたうえで、高弾性な CFS に比べ、鉄筋より弾性率が低く高強度を有するアラミド繊維シート(以降 AFS)に特に着目して、連続繊維シートの RC 柱補強に対する有効性を比較検討していく。

第2章 提案した補強工法の概要

本研究では、繊維シートを鉄筋コンクリート表面に定着する新たな方法を考案した。

シート状の材料を隅角部へ張り付けて定着をする場合、**図 2-1** に示すように、シートを直接定着部分に接着することが最も容易な定着方法である。シート状の曲げ耐力を有しない材料を固体に接着した状態から鉛直に均一に引き剥がす場合、シートと固体間の鉛直方向の接着強度に依存した定着強度が得られる。しかし、これは、接着面全体を均一に引き剥がす場合のことであって、シートの端部から順次鉛直に引き剥がした場合には、その接着強度はきわめて低くなる。その原因は、端部から順に引き剥がされる場合には、それに抵抗できる有効な接着面積がきわめて狭い領域に限られることにある。

そこで、本研究では、接着されたシートの引き剥がしにきわめて弱い性質を改善して定着効果を上げるために、**図 2-2** に示すような定着方法を考案した。この方法では、シートを定着部にまで延長して接着した後、その上から定着用治具を接着し、その治具を片持ちはり状態で支えるようにアンカーボルトを定着部に打ち込む。前述のように、シートに引張力が作用した場合、比較的初期にシートは接着面から引き剥がされるが、それと同時に、定着用治具の曲げ剛性によりシートに作用する引張力はアンカーボルトへ伝達される。

図 2-2 に示したように、定着用治具は L 字型とする。これはシートから定着用治具への応力伝達をスムーズにするため、ならびに、治具先端部でのシートの破断を避けるための処置である。また、隅角部のシートが直角に折れ曲がる部分については、適度の曲率を確保するように配慮する。

図-3 に、鉄筋コンクリート橋脚の曲げ補強材としてシートを用いた場合に、本定着方法を応用した場合の概念図を示す。鉄筋コンクリート橋脚の場合には前述のように、曲げ耐力を単純に上げることは必ずしも好ましくない場合がある。しかし、本方法で定着を行う場合、曲げ耐力を上げることはもちろん、定着用治具の材料特性、寸法を変えることによって、定着部に変形能を持たせることができる。したがって、耐力と変形能のバランスに配慮した定着工法として用いることができる。

第3章 提案する補強工法の施工方法

3.1 炭素繊維シートの施工方法³⁾

まず、標準的な施工手順は下記のようになる。今回行った実験の施工手順も下記の施工手順に沿って行った。

1. 下地処理工
2. プライマー塗布工
3. 炭素繊維シート貼り付け工
4. 治具による定着

3.1-1 下地処理工

下地処理工を行う主な理由は、CFSを貼付ける表面の突起、段差を除去し滑らかに仕上げる。隅角部に丸みをつける。等であるが、貼付け面のコンクリートが施工不良(レイタンス層の形成)を起こしている場合は必要に応じて修繕しなくてはならない。

施工手順は

1. 貼付け面をディスクサンダーを用いて研磨し段差を1mm以内にする。
2. アセトンを用いて研磨粉等の汚れを除去する。

また、隅角部はR=10の面取りを行った。

3.1-2 プライマー塗布工

プライマーを塗布する際の注意事項は、塗布するコンクリート表面は乾燥していること。塗布する際の気温は5℃以上であることが望ましい。プライマーは可使時間を越えたものを使わない。プライマーはコンクリート表面に十分に浸透させなくてはならない。

施工手順は

1. FPプライマーの主剤と硬化剤を所定の混合比で容器にとり、均一になるまで約2分間良く混ぜる。
2. ゴムベラを使って貼付け面に均一に塗布する。
3. 約半日おいて指触乾燥させる。

3.1-3 炭素繊維シート貼付け工

炭素繊維シートを貼付ける際の注意事項は、プライマー表面が指触硬化し、水分が付着していないこと。貼り付ける際の気温が 5°C 以上であること。含侵樹脂は可使時間を過ぎたものを使用しない。含侵樹脂は十分に炭素繊維シートに含侵させ、炭素繊維シートはコンクリートと密着させて貼付けなければならない。貼付けた CFS は十分に養生しなくてはならない。

施工手順は

1. 炭素繊維シートをハサミ、カッターなどを用いて所定の大きさにカットする。
2. 施工面のプライマーが指触乾燥したことを確認する。
3. FR レジンの主剤と硬化剤を所定の混合比で容器にとり、均一になるまで約 2 分間混合する。
4. FR レジンをゴムベラを使って貼付け面に均一に塗布する。
5. 炭素繊維シートを塗布面に貼付け離型紙を剥がす。
6. ゴムベラを使って表面を繊維方向に沿って強めに 5~6 回しごき、樹脂を含侵させ、気泡を除去する。
7. 貼付け後 30 分以上放置する。この際、浮きやずれが生じたらゴムベラで押しさえて修正する。
8. 樹脂を炭素繊維シート表面に再度塗布し、ゴムベラで繊維方向に沿って強めに 5~6 回しごき、樹脂を含侵させ、補充する。
9. 2 層以上の炭素繊維シートを積層するには 4~8 の工程を繰り返す。
10. 十分に養生する。

3.1-4 治具の定着

治具を定着する際の注意事項は、治具の形状がアンカーボルトの孔と一致しているか、定着体と被定着体に平行に面が出ていること。樹脂が指触乾燥していないこと。施工手順は

1. 治具の形状が供試体に対して妥当か確認する。
2. CFS に含侵させた樹脂が指触乾燥していないことを確認し、治具を CFS の上に載せる。

3. 高力ボルトを用いて CFS を介して冶具を定着体に圧着する。

3.2 アラミド繊維シートの施工方法⁴⁾

まず、標準的な施工手順は下記のようになる。今回行った実験の施工手順も下記の施工手順に沿って行った。

1. 下地処理工
2. プライマー塗布工
3. アラミド繊維シート貼り付け工

3.2-1 下地処理工

下地処理工を行う主な理由は、CFS を貼付ける表面の突起、段差を除去し滑らかに仕上げる。隅角部に丸みをつける。等であるが、貼付け面のコンクリートが施工不良(レイタンス層の形成)を起こしている場合は必要に応じて修繕しなくてはならない。

施工手順は

1. 貼付け面をディスクサンダーを用いて研磨し段差を 1mm 以内にする。
2. アセトンを用いて研磨粉等の汚れを除去する。

また、隅角部は R=10 の面取りを行った。

3.2-2 プライマー塗布工

プライマーを塗布する際の注意事項は、塗布するコンクリート表面は乾燥していること。塗布する際の気温は 5℃以上であることが望ましい。プライマーは可使時間を越えたものを使わない。プライマーはコンクリート表面に十分に浸透させなくてはならない。

施工手順は

1. FP プライマーの主剤と硬化剤を所定の混合比で容器にとり、均一になるまで約 2 分間良く混ぜる。
2. ゴムベラを使って貼付け面に均一に塗布する。
3. 約半日おいて指触乾燥させる。

3.2-3 アラミド繊維シート貼付け工

アラミド繊維シートを貼付ける際の注意事項は、プライマー表面が指触硬化し、水分が付着していないこと。貼り付ける際の気温が 5℃以上であること。含侵樹脂は可使時間を過ぎたものを使用しない。含侵樹脂は十分にアラミド繊維シートに含侵させ、アラミド繊維シートはコンクリートと密着させて貼付けなければならない。貼付けた CFS は十分に養生しなくてはならない。

施工手順は

1. アラミド繊維シートをハサミ、カッターなどを用いて所定の大きさにカットする。
2. 施工面のプライマーが指触乾燥したことを確認する。
3. AR レジンの主剤と硬化剤を所定の混合比で容器にとり、均一になるまで約 2 分間混合する。
4. AR レジンをゴムベラを使って貼付け面に均一に塗布する。
5. アラミド繊維シートを塗布面に貼付け離型紙を剥がす。
6. ゴムベラを使って表面を繊維方向に沿って強めに 5～6 回しごき、樹脂を含侵させ、気泡を除去する。
7. 貼付け後 30 分以上放置する。この際、浮きやずれが生じたらゴムベラで押しさえて修正する。
8. 樹脂をアラミド繊維シート表面に再度塗布し、ゴムベラで繊維方向に沿って強めに 5～6 回しごき、樹脂を含侵させ、補充する。
9. 2 層以上のアラミド繊維シートを積層するには 4～8 の工程を繰り返す。
10. 十分に養生する。

3.2-4 治具の定着

治具を定着する際の注意事項は、治具の形状がアンカーボルトの孔と一致しているか、定着体と被定着体に平行に面が出ていること。樹脂が指触乾燥していないこと。施工手順は

1. 治具の形状が供試体に対して妥当か確認する。
2. AFS に含侵させた樹脂が指触乾燥していないことを確認し、治具を AFS の上に載せる。

3. 高力ボルトを用いて AFS を介して冶具を定着体に圧着する。

第4章 要素実験概要

4.1 繊維シート引張り実験

4.1-1 供試体の材料

本研究に用いた炭素繊維シート，アラミド繊維シート(AT-40，AT-60)の3種類のFSを用意した。

4.1-2 繊維シートの加工

4.1-2-1 炭素繊維シートの加工(1回目)

炭素繊維シートの基本的性質を得るために行った。

- (1) 繊維シートを必要な大きさ(50*5.0cm)に切断する。
- (2) FP-E3P(レジン)の主剤・硬化剤を所定の重量配合比(2:1)で容器にとり，均一になるようにかき混ぜる。ゴムベラで均一に塗布し，しごきながら含浸させる。
- (3) 約30分放置する。
- (4) レジンを裏面にも塗布する。
- (5) チャック部で挟む部分を引張実験時に繊維シートの破断とずれを防ぐためにアルミ板を重ねて張る。
- (6) 指接乾燥まで待つ。(約1週間)
- (7) ひずみゲージを繊維シートの中央部分に張る。(写真4-1)

4.1-2-2 炭素繊維シートの加工(2回目)

- (1) FP-E3P(レジン)の主剤・硬化剤を所定の重量配合比(2:1)で容器にとり，均一になるようにかき混ぜる。ゴムベラで均一に塗布し，しごきながら含浸させる。
- (2) 30分放置する。
- (3) レジンを裏面にも塗布する。
- (4) 別に炭素繊維シートを用意し，チャック部で挟む部分を引張実験時に繊維シートの破断とずれを防ぐために本体シートを重ねて貼る。
- (5) 指接乾燥まで待つ。(約1週間)

(6) 乾燥した繊維シートを必要な大きさ(50*2.5cm)に切断する.

(7) ひずみゲージを繊維シートの中央部分に張る.

4.1-2-3 アラミド繊維シートの加工

4.1-2-2 で示した炭素繊維シートと同様の加工方法で行なう. ただし, レジンではなく AR ボンドの主剤・硬化剤を用いる. AT-40 と AT-60 の 2 種類を用いる. また, AT-40 は 1 枚のみのもの(AT-40-1)と 3 枚重ねたもの(AT-40-3)を, AT-60 は 1 枚のみのもの(AT-60-1)と 2 枚重ねたもの(AT-60-2)に加工する.

4.1-3 実験装置

4.1-3-1 アムスラー型 100 t 万能試験機

1 回目に行なった実験では, アムスラー型万能試験機を用いて, データロガーとパソコンを介してデータを収集する. (写真 4-2, 写真 4-3)

アムスラー型 100 t 万能試験機は, コントロール盤で荷重を制御する. まず, 試験台を地盤から約 1 cm 程度上げてから供試体を設置する.

4.1-3-2 サーボパルサー

2 回目に行なった実験では, サーボパルサーを用いてデータロガーとパソコンを介してデータを収集する.

(写真 4-4, 写真 4-5)

4.1-4 供試体の設置

供試体の設置は, まず, 供試体を試験機の上下チャックにあたらぬように下部チャックを下ろし, 上部チャックに供試体を挟み込む. その際, 水平機を用いて供試体が垂直になるようにチャックに挟む. 上部チャックに供試体を挟み込むと, 次は, 下部チャックを上げ, あらかじめ供試体にけがいておいた線に沿って挟み込む. 上下チャックに挟み込むと最後にシート破断時に試験機から供試体が飛び出さないように重りを乗せる.

4.1-5 ひずみゲージの取り付け

ひずみゲージは、ゲージの先端に少量の接着剤をつけた後にアセトンで磨いた炭素繊維シートに貼り付け、15分養生させる。

4.1-6 各ひずみゲージのリード線の結線

ひずみゲージの3本に加工されたリード線をデータロガーにつなげる。

4.1-7 実験概要

本研究は、静的引張試験である。

4.1-8 測定位置

供試体の中央部分に表裏とも3箇所ずつひずみゲージを取り付けた。

4.1-9 測定項目

実験時に測定する項目は、荷重とCFRPの破断するときの荷重、CFRPのひずみゲージにて計測する。これらのデータは、データロガーからプリントアウトし、さらにパソコンでも記録する。

4.1-10-1 実験手順(1)

1回目の実験準備、実験中及び実験終了時の操作手順を以下に示す。

- (1) アムスラー型100t 万能試験機の電源を入れ、試験台を地面から1cm程度上げる。
- (2) 実験準備
 1. まず、コントロール盤にてチャックを下げるボタンを押して、供試体が上下チャック間に入るまでチャックを下げる。
 2. 上部チャックを開き、供試体を挟む。チャックを閉める(ノブを中まで押し込む)。
 3. コントロール盤にてチャックを上げるボタンを押して、あらかじめけがいておいた線にチャックが合うように微調整する。
 4. ひずみゲージとデータロガーをつなぐ。

(3) データロガー，パソコンの電源を入れる。

1. ひずみゲージのデータが送られてきているか確認する。

(4) 荷重載荷開始

1. 下部チャックのノブを出し，いっぱいまで閉めながらコントロール盤の荷重制御レバーを徐々に荷重を上げていき 100kg まであげ，データロガーの START キーを押す。

2. チャックのノブを中に押し込む。荷重を制御し，100kg 毎に START キーを押してデータを集める。

(写真 4-6)

(5) 荷重載荷終了

集めたデータに名前をつけて保存する。

4.1-10-2 実験手順(2)

2 回目の実験準備，実験中及び実験終了時の操作手順を以下に示す。

(1) サーボパルサーの電源を入れ，試験台を地面から 1cm 程度上げる。

(2) 実験準備

1. まず，コントロール盤にてチャックを下げるボタンを押して，供試体が上下チャック間に入るまでチャックを下げる。

2. 上部チャックを開き，供試体を挟む。

3. 圧力をかけチャックを閉める。

4. コントロール盤にてチャックを上げるボタンを押して，あらかじめけがいておいた線にチャックが合うように微調整する。

5. ひずみゲージとデータロガーをつなぐ。

(3) データロガー，パソコンの電源を入れる。

ひずみゲージのデータが送られてきているか確認する。

(4) 荷重載荷開始

1. 下部チャックのノブを出し，圧力をかけいっぱいまで閉めながらコントロール盤の荷重制御レバーを徐々に荷重を上げていき 100kg まであげ，データロガーの START キーを押す。

2. チャックのノブを中に押し込む。荷重を制御し，データを集める。

(5) 荷重載荷終了

集めたデータに名前をつけて保存する。

4.2 アンカーボルト引き抜き実験

4.2-1 供試体の材料

供試体には、主鉄筋・帯鉄筋として D10 を使用。打込むアンカーボルトの内径は $\phi 16$ とする。

4.2-2 供試体の製作

(1) 図のような供試体を作製した。(図 4-2-1, 図 4-2-2, 図 4-2-3)

(2) 供試体にハンマードリルで穴を開ける。

ドリル径は $\phi 22$ とする。

(3) 2種類の接着剤を開けた穴に流し込む。

3箇所ずつコンクリメント・セメントメンダを流す。

残り2箇所は何も接着剤を使用しないものとし、計8箇所で行う。

(4) アンカーボルトを打ち込む。

4.2-3 実験装置

センターホールジャッキ

本研究ではセンターホールジャッキとデータレコーダーとロードセルにて実験を行うものとする。

4.2-4 供試体の設置

センターホールジャッキを供試体の上に設置し、図 4-2-4 のように設置する。

また、高感度変位計も取り付ける。

4.2-5 実験概要

本実験は静的載荷試験とする。

4.2-6 測定位置

高感度変位計を供試体上部に取り付けた。

4.2-7 測定項目

実験時に測定する項目は、荷重とアンカーボルトが引き抜かれたときの荷重を高感度変位計にて計測する。これらのデータは、データロガーからプリントアウトし記録する。

4.2-8 実験手順

実験準備、実験中及び実験終了時の操作手順を以下に示す。

4.2-9 実験準備

- (1) まず、設置したセンターホールジャッキの下に高感度変位計を置くために鋼板の置ける空間を設ける。
- (2) センターホールジャッキと連結したボルトとアンカーボルトをつなげる。
- (3) 高感度変位計とデータロガーとロードセルを接続する。
- (4) センターホールジャッキに圧力をかける。
- (5) 荷重載荷開始

センターホールジャッキ圧力をかけはじめたら10kg毎にデータロガーのSTARTキーを押す。

- (6) 荷重載荷終了
集めたデータを保存する。

第5章 要素実験結果・考察

5.1 繊維シート引張り実験

実験結果のグラフを炭素繊維シートは、図 5-1、図 5-2 及び図 5-3 にアラミド繊維シートの実験結果のグラフを図 5-4、図 5-5、図 5-6 及び図 5-7 に示す。炭素繊維シートのひずみに比べ、アラミド繊維シートのひずみが大きいことが分かる。これは、炭素繊維シートに比べアラミド繊維シートの高じん性の性質によるものである。図 5-4 と図 5-5 とでは AT-40-1 と AT-40-3 を、図 5-6 と図 5-7 とでは AT-60-1 と AT-60-2 を比較した場合にはひずみに大きな差がなく、積層枚数にかかわらず応力が均一に伝達されたことを示している。ひずみの大きさが全体的に材料特性値より低かった。この誤差には、いろいろな原因が考えられる。原因の一つとして繊維シートの下地処理の段階において誤差が含まれている可能性がある。これは、レジンを塗布する段階で均一に含浸できなかった可能性がある。また、アムスラー型万能試験機による誤差があることもある。それは、試験機のチャック部が繊維シートのアルミ板を抑えれず、荷重が増加していく過程で、ずれを生じているからである。しかしこの原因は、アルミ板を使用するかわりに繊維シートを重ねることで誤差が少なくなった。

5.2 アンカーボルト引き抜き実験

実験結果のグラフを図 5-8、図 5-9 及び図 5-10 に示す。アンカーボルトの引き抜き実験で荷重—変位のグラフからもわかるように、荷重 40kN 近くで変位が徐々に増加し始めているものと、セメントメンダを使用した場合とアンカーボルトのみの場合には 25kN 位から徐々に増加しているものがある。これに対し接着剤を使用しない場合、荷重は同じく 40kN 近くでアンカーは一気に抜け変位は下がったまま戻らなかった。引き抜く速さがまちまちになり荷重—変位グラフに誤差が生じた。これは、同じ接着剤を使った3つのポイントでも荷重—変位グラフのずれからもわかる。また、誤差の原因として考えられることはアンカーがコンクリートに垂直に打ち込まれていないことも考えられる。これは、アンカーを打ち込む前にハンマードリルで穴を空ける際、すでに斜めになっていたためである。垂直に打ち込まれていないアンカーは、センターホールジャッ

キで引き抜く際に力をうまく伝達できない。

本体実験のときにアンカーにより繊維シートを固定する鋼板が繊維シートの強度にかかわらずアンカーが抜けてしまっただけでは本体実験の意図することが薄れてしまうので少しでもアンカーの強度を上げるために接着剤の使用も考えられた。しかし、結果から結局は繊維シートを貼り付ける際に鋼板を固定するアンカーに接着剤は使用しない。これは、実験結果から強度の上昇が見られなかったことが理由である。これは、アンカーを引抜く時センターホールジャッキが手動のために起きた誤差と考えられる。また、1回目使用した供試体の裏面を使用したということで実験による表面の破壊により供試体自体の強度が低下したのではないかということも考えられたがアンカーを引抜くのに十分な大きさを持っていたことからこの事は、誤差の原因として考えるにはふさわしくない。

接着剤の使用は強度の上昇には特に関係してないと考えられる。この事はデータ数を増やしてもいえ、より信頼性のある結果を得られた。また、接着剤の使用がない方がデータにばらつきが少ないことがグラフから分かる。接着剤の使用量により生じる誤差でありこの事を考慮すると、これから行う本体実験には接着剤を使用しない方が解析を行う上でもばらつきを少なくさせることができ正確な結果を得るのに良い方法と考えられる。本体実験では接着剤を使用しないこととする。

第6章 橋脚モデルの載荷実験

6.1 橋脚モデルの基本的設計

第4,5章では使用する各材料についてまとめた。その結果を利用して後述の実験を行う。

本研究で扱う補強に使用する無補強供試体の基本的設計計画についてまとめる。この無補強供試体は、一般的な既存 RC 橋脚の 1/6~1/8 程度の大きさとした。使用した材料の詳細は後述するが、基本的に曲げ破壊先行型の供試体を想定した。

次に、本研究で使用した新素材を用いた巻き立て補強工法の基本的設計計画についてまとめる。

FS を用いた巻き立て補強についてまとめる。FRP を補強筋として用いた補強であり、FRP の繊維方向を柱帯鉄筋にあわせて貼付すること得せん断補強を目的とした補強と、FRP の繊維方向を柱主鉄筋にあわせて貼付する事で曲げ補強を目的とした補強の2種類が考えられるが本研究では後述の曲げ補強を検討した。

既存の研究においては、せん断補強材として FRP は用いられ、その有効性は示されている。通常、鉄筋や FRP のような補強筋を用いて曲げ補強する際、その補強筋末端部はフーチング基部に定着しなければ、その補強効果は得られない。そのため、補強筋末端部はフーチング基部に定着孔を設け、その孔に定着している。しかし、FRP は、他の補強筋の様にフーチング基部に設けた定着孔に固定することは不可能であるため、従来用いられてはいなかった。

しかし、FS は複雑な形状にも柔軟に対応ができ、軽量であるため重機を必要としていないという抜群の施工性を持つことから、この点で他の補強に比べ圧倒的に優れている。このような利点を生かすため、本研究では通常の補強筋の定着方法とは別の方法で、FS 末端部をフーチング基部に定着し、FRP を曲げ補強材として用いる。この FS 末端部が十分に定着できれば曲げ補強筋として用いることができると考えられる。

その他 FRP は鉄筋と比較して弾性係数、引張強度が高いという特徴を持つ。ただし、10cm 以上の定着長がなければ、その強度は保証されない。また、隅角部では局所的な屈折による強度低下が見られるので隅角部では最短でも 10mm 以上

の半径を持つように施工する必要がある。

FRPは施工前はシート状であるため、FSを何枚も重ねて貼付することで、弾性係数は変わらないが引張強度を増加させることができる。他の巻き立て補強工法に比べ、簡単に補強効果を調節できるため、汎用性があると考えられる。

また、補強する柱面に接着剤を用いて直接固定するため、巻き立て補強材を用いて固定する他の補強筋に比べ、その補強効果は顕著に現れると考えられる。

さらにこの点は、本研究では取り扱わないが、柱中間部に存在する断落とし部など断面力の劣る部分だけの補強もできるため、非常に便利である。

6.2 各部材の設計

6.2-1 RC柱モデル供試体

無補強試験体の柱部は、主鉄筋としてD10を12本、帯鉄筋としてD6を90mm間隔で配置し、フーチング部は主鉄筋としてD13を4本、帯鉄筋としてD10を6本配置した。かぶりは、柱部で60mm、フーチング部で50mmとした。またクレーン移動用のフックをD22の鉄筋を用いて、フーチング部に付けた。各材料特性を表6-1に示す。

(図6-1-1, 図6-1-2, 図6-1-3, 図6-1-4, 図6-1-5, 図6-1-6)

6.2-2 鋼板

定着用鋼板としては、平板とL型鋼板を使う。ともにボルト用孔を開け、さらに炭素繊維シートの破断を防ぐために、鋼板のかどが接する部分に $R=10\text{mm}$ の面取りを行った。また、寸法は $300\text{mm}\times 150\text{mm}$ で供試体をクレーンで吊るためにつけた鉄筋と重なる部分は切断した。ボルト用孔の直径は 20mm とした。しかし、場所により微妙に違うので微調整を行いつつ穴をあけた。

(図6-2-1, 図6-2-2, 図6-2-3, 図6-2-4)

6.3 実験装置

サーボパルサー型アクチュエーター

本研究には、サーボパルサー型アクチュエーターを用いて、パソコンを介してデータを収集する。

このサーボパルサー型アクチュエーターは、荷重制御においては、静的に引張、圧縮側ともに 440kN、動的に引張、圧縮側ともに 292kN の載荷が可能であり、変位制御においては、30cm の可動範囲を持つ。また、外部信号による制御も可能であり、本実験では、柱先端に上下振幅させるサーボパルサー型アクチュエーターは、柱先端に設置した高感度変位計を用いてサーボパルサー型アクチュエーターを制御した。

6.4 供試体の設置

設置状況を図 6-4-1 及び写真 6-1 に示す。供試体を横方向から一定の荷重で載荷するためサーボパルサー型アクチュエーターを 1 台、また柱先端を上下振動させるためにもう 1 台用いる。

供試体には、フーチング基部には 60Φ の孔が 4 点、柱先端部には柱基部から 100cm の位置に 26Φ の孔が 2 点あらかじめ開けてある。フーチング部の孔は、アンカーボルトにてジグを介して床に固定するためのものである。設置方法は、鋼はり等を用いて作成したジグと床をアンカーボルトで固定し、更に供試体フーチング部に貫通させたアンカーボルトで供試体ジグを固定する。このフーチング部は、実験条件では固定端なので、その条件を満足するように床に完璧に固定しなければならない。

柱先端部の孔は、2本の PC 鋼棒を用いて柱先端を上下振動させるサーボパルサー型アクチュエーターに固定する。

設置上の注意点としては、供試体の柱の先端が平坦でない場合は、応力の集中を避けるためならず必要がある。また柱のセンターと軸方向サーボパルサー型アクチュエーターのセンターを一致させる。また、フーチング側面が僅かに膨らんでいたためのジグとの隙間を、金属片を詰め込んで埋める

6.5 計測器の設置

6.5-1 変位計の設置

本実験には、高感度変位計を 6 台用いた。CDP-25、CDP-50 は、先端の軸が伸縮することにより変位を測定できる。写真 6-2 のように上下の鋼板に 2 台ずつ、柱の中央部に 1 台、そして柱先端部に 1 台用いた。これらの変位計を、マグネ

ット付き固定台の固定孔を介して取り付ける。その際、変位計を硬く固定しないと荷重載荷時に残留ひずみとして測定されてしまうので十分気をつける。

6.5-2 ひずみゲージの取り付け

ひずみゲージは、ゲージの先端に少量の接着剤をつけた後アセトンで拭いておいた繊維シートに張り付けた。

ひずみゲージを貼る場所としては供試体の基部に取り付けてある定着用鋼板から50mm、100mmの所に各5カ所貼り付けた。(写真6-2) また、鋼板のアンカーボルト付近にも貼る。

6.5-3 各ひずみゲージのリード線の結線

ひずみゲージのリード線を、データロガーで測定するために3本に加工する。

6.6 実験方法

6.6-1 実験概要

本研究は、準静的繰り返し載荷試験を行う。実験条件としては、まず死荷重を想定した一定荷力化で、柱先端での上下振幅をさせる。その際の死荷重は、設計軸方向耐力の6%相当する44kNを載荷する。また、この実験は、変位制御で載荷を行う。その柱先端での上下振幅させる変位振幅は降伏変位 δ_y を基準とし、上下方向に $0.5\delta_y$ 、 $1.0\delta_y$ (以後 $0.5\delta_y$ 刻み)、 $4.0\delta_y$ 、 $6.0\delta_y$ 、 $8.0\delta_y$ 、 $10.0\delta_y$ と変化させ、各3回ずつ載荷した。なお降伏変位は、供試体の降伏時における先端での変位を降伏荷重とする。

6.6-2 測定項目

実験時に測定する項目としては、サーボパルサー型アクチュエーターを制御するために設置した高感度変位計と、サーボパルサー型アクチュエーターの先端に接続したロードセルにて、それぞれの供試体に載荷した変位、および荷重を測定した。この測定値は、パソコンを用いて記録した。

鋼板のひずみ・繊維シートのひずみ・鋼板の変位・供試体先端の変位であり、前2つはひずみゲージで、後ろの2つは高感度ひずみ測定器を用いて測定した。また供試体先端の変位は、非接触型ひずみ測定器でも測った。これらのデータ

は、データロガーからプリントアウトし、なおかつパソコンでも記録する。

6.7 実験手順

実験準備，実験中および実験終了時の操作手順を付録-1 に記す。

第7章 橋脚モデルの実験結果・考察

荷重振幅は、荷重-変位関係から1ループを載荷回数1回と考え、各載荷回数の上
下最大変位時での荷重の絶対値を平均化したものである。また、無次元化荷重振
幅は荷重振幅を更に無補強供試体の降伏荷重実験値で除した値である。なお変
位値は柱先端部での値を用いた。また、無補強供試体の荷重-変位関係を図7-1
に示す。

7.1 CFSにより補強された供試体

CP-Typeの荷重-変位関係を図7-2にCL-Typeの荷重-変位関係を図7-3に示す。
また、それぞれの無次元化荷重振幅-載荷回数関係を図7-4に示す。CP-Typeと
CL-Typeの無次元化荷重振幅を比べると $\delta_y=2.0$ までは有意な差はないが、 $\delta_y=3.0$
以上になると徐々に差が生じCL-Typeのほうが大きな値となった。また、CP-Type
では $\delta_y=2.5$ 以降緩やかな上昇となり、 $\delta_y=3.0$ を過ぎると変化がな
くなり、CFSが破断するのに対し、CL-Typeでは $\delta_y=3.0$ 以降は上昇していきCFS
が破断を起こし、載荷は終了した。最大荷重は、CP-typeが約56kN、CL-typeが約
81kN、N-typeが約43kNとなっており、CL-typeの最大荷重はCP-type及びN-type
の約1.5倍となった。

次に、CL-Typeの載荷荷重とCFSのひずみの関係を図7-5に示す。載荷荷重が
33kNを超えたところでひずみが増加し始めた。また、測定されたひずみは最大で
破断ひずみの60%をわずかに超えた値となり、CFSが塑性変形を繰り返し受けて
いることがわかる。

これらの結果より、L字形治具を用いてCFSを定着することにより曲げ耐力が
確実に上昇すること、治具の塑性変形により定着部でエネルギー吸収がなされ
ていることがわかる。

7.2 AFSにより補強された供試体

AP-Typeの荷重-変位関係を図7-6にAL-Typeの荷重-変位関係を図7-7に示す。
また、それぞれの無次元化荷重振幅-載荷回数関係を図7-8に示す。AP-Typeと
AL-Typeについて無次元化荷重振幅を比較すると $\delta_y=2.5$ までは大きな差がなく

$\delta_y=2.5$ を超えたところから徐々に AL-Type のほうは上昇し $\delta_y=2.5$ をピークとして弧を描くように下降した。また, AP-Type も弧を描くような形になったがそのピークは, $\delta_y=3$ となった。最終的には無次元化荷重振幅の差は約 1.2 倍となった。

最大荷重は AL-Type では 79kN, AP-Type は 66kN となり, N-Type の場合の 1.5 倍, 1.2 倍の強度であった。また, 図には示していないが治具のひずみは最大でも 150μ とごく微小なことから治具が変形することなく柱の崩壊を迎えたことが分かる。

第8章 橋脚モデルの解析

前章の実験結果により示された補強効果を数値解析により検証するために、2次元有限要素解析を実施した。補強効果の影響を見るため、無補強(N-Type)、CFSのみによる補強(CFS-Type)、冶具によりCFSを定着した補強(CL-Type)の3種類の供試体について解析を行う。

8.1 解析方法

CFSの材料特性、冶具の材料特性は表6-1に示したものと同様である。各要素はすべてシェル要素とした。無補強の場合、要素数は360、節点数は595である。鉄筋コンクリート部分の材料は平均応力による降伏応力の減少を考慮した弾塑性材料とし、鋼板は移動硬化を考慮した等方弾塑性体、シートは等方弾塑性破壊モデルとしており、シートが破断した場合には要素が消去される。また、シートと鋼板、シートとRC試験体の間には接触面への法線方向とせん断方向について破壊応力を設定する接触要素を挿入している。これによりシートの剥離が考慮できる。剥離は次式により判定される。

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{sf}}\right)^2 \geq 1$$

σ_{nf} ：垂直破壊応力

σ_{sf} ：せん断破壊応力

σ_n ：結合部に実際に作用している垂直応力

σ_s ：結合部に実際に作用しているせん断応力

定着体、被定着体とFSの間には垂直破壊応力 3.43N/mm^2 、せん断破壊応力 102.5N/mm^2 とする接触要素を挿入し、定着用冶具とFSの間には垂直破壊応力 2N/mm^2 、せん断破壊応力 60N/mm^2 とする接触要素を挿入した。コンクリートとFSとの間の垂直破壊応力は参考資料¹¹⁾の値を用いた。なお、FSの補強枚数を2枚にしたものはそのFS間に接触要素を挿入せず、剛結とした。

拘束条件は、フーチング基部を完全固定とした。载荷条件については、先端に 91kN の一定軸力を载荷した状態で 400mm/sec での動的単調载荷とした。

第9章 橋脚モデルの解析結果と考察

各供試体について相当応力分布図，相当塑性ひずみ分布図をそれぞれ図 9-1 及び図 9-2 に示す．定量的な結果を得るには至らなかったが，各分布図より FS のみによる補強では，その効果はほとんど見られないのに対して，本稿で提案した定着工法を用いることで補強効果が顕著に向上することが明らかとなった．

第 10 章 隅角部モデル実験概要

10.1 隅角部モデルの基本的設計

本研究で扱う隅角部モデルの基本的設計計画についてまとめる。第 6 章では、橋脚の $1/6 \sim 1/8$ のモデルを用いて FS を施し、その有効性を確認した。本章では橋脚への補強を含めた RC 構造物の隅角部として補強することとする。また、既存構造物の性状に影響することなく補強強度のみを計測する意味で定着体分(以降 定着体)と載荷される被定着体分(以降 被定着体)とを別々に設け、それらの間の摩擦はないものとする。

次に、本研究で使用した新素材を用いた巻き立て補強工法の基本的設計計画についてまとめる。

FS を用いた巻き立て補強についてまとめる。FRP を用いた補強としては大別してせん断補強と曲げ補強との 2 つの補強効果が得られる。既存の研究においては、せん断補強材として FRP は用いられ、その有効性は示されている。通常、鉄筋や CFRP のような補強筋を橋脚などに用いて曲げ補強する際、その補強筋末端部はフーチング基部に定着しなければ、その補強効果は得られない。そのため、補強筋末端部はフーチング基部に定着孔を設け、その孔に定着している。しかし、FS は、他の補強筋の様にフーチング基部に設けた定着孔に固定することは不可能であるため、従来用いられてはいなかった。これは土木構造物以外の構造物にも同様のことが言える。さらに、壁面など十分な定着長を確保できない箇所へ CFS を固定する際にも同様のことがいえることから CFS による補強が懸念されてきた要因である。

しかし、FS は複雑な形状にも柔軟に対応ができ、軽量であるため重機を必要としていないという抜群の施工性を持つことから、この点で他の補強に比べ圧倒的に優れている。このような利点を生かすため、本研究では通常の補強筋の定着方法とは別の方法で、FS を隅角部に定着することにより様々な箇所への補強を可能にさせることを考えている。

その他 CFS は鉄筋と比較して弾性係数、引張強度が高いという特徴を持つ。ただし、10cm 以上の定着長がなければ、その強度は保証されない。また、隅角部では局所的な屈折による強度低下が見られるので隅角部では最短でも 10mm 以上

の半径を持つように施工する必要がある。

FS は、何枚も重ねて貼付することで、弾性係数は変わらないが引張強度を増加させることができる。他の巻き立て補強工法に比べ、簡単に補強効果を調節できるため、汎用性があると考えられる。

また、変形能の向上を目的として AFS も補強材として用いることとする。AFS は鉄筋より弾性率が低く高強度を有している。また、温度による影響にも強く施工の面では CFS と同様に接着剤により貼り付けるだけで重機を必要としない。また、補強に用いるシートの枚数やシート幅などの貼付け条件などにより変形能、補強強度をある程度自由に設定できる利点もある。さらにこの点は、本研究では取り扱わないが、柱中間部に存在する断落とし部など断面力の劣る部分だけの補強もできるため、非常に便利である。

10.2 各部材の設計

10.2-1 隅角部モデル供試体

供試体の配筋図を図 10-1 に示す。無補強試験体の定着体は、主鉄筋として D13 を 4 本、帯鉄筋として D10 を 4 本、被定着体は無筋構造物とした。かぶり厚は、すべて 30mm とした。また、各部材の材料係数を表 4-1 及び表 6-1 に示す。

10.2-2 治具

定着用治具の形状を図 10-2 に示す。定着用治具としては、L 型鋼板を使う。ボルト用孔を開け、さらに FRP の定着長を確保することと破断を防ぐために、治具のかどに $R=10\text{ mm}$ の面取りを行った。また、寸法は $100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ とした。ボルト用孔の直径は 18 mm とした。しかし、場所により微妙に違うので微調整を行いつつ穴をあけた。

10.3 実験装置

アクチュエーター

本研究では、アクチュエーターを用いて、パソコンを介してデータを収集する。このアクチュエーターは、荷重制御においては、静的に引張、圧縮側とも似 98 kN の载荷が可能であり、変位制御においては、上下 100mm の可動範囲をもつ。

また、外部信号による制御も可能であり、本実験では、付属のソフトを用いて制御用のパソコンにより制御した。

10.4 供試体の設置

供試体の設置状況を図 10-4 に示す。図 10-3 の供試体を逆さにし、台座に載せ被定着体を上方向から載荷する事で被定着体に変位を生じさせる。設置方法は、手動により供試体を台座部に載せ被定着体に載荷板を載せる。定着体は、実験条件では、固定端なのでその条件を満たすように台座との隙間をなくすため写真 9-8 に示すようにあらかじめ石膏により面出しを行った。

10.5 計測器の設置

10.5-1 変位計の設置

本実験には、高感度変位計を 5 台用いた。また、非接触型の変位計を用いた。CDP-50 は非接触型の変位計と併用して、被定着体の変位を測定できるように 1 台ずつ設置し、鋼板に 2 台ずつ用いた。これらの変位計を、マグネット付き固定台の固定孔を介して取り付ける。その際、変位計を硬く固定しないと荷重載荷時に残留ひずみとして測定されてしまうので十分気をつける。

10.5-2 ひずみゲージの取り付け

本研究で用いたひずみゲージの設置個所については図 10-5 に示しておく。

10.5-3 各ひずみゲージのリード線の結線

ひずみゲージのリード線を、データロガーで測定するために 3 本に加工する。

10.6 実験方法

10.6-1 実験概要

本研究は、静的載荷試験を行う。また、測定個所が多いことから 1 回の測定に時間を有する事から十分に載荷速度の検討を行った。載荷方法は供試体被定着体に載荷板を介して変位制御により載荷を行う。載荷終了はシートの破断を確認するか、載荷不可能時までとする。

10.6-2 測定項目

実験時に測定する項目としては、アクチュエーターを制御するために設置した高感度変位計と、アクチュエーターの先端に接続したロードセルにて、それぞれの供試体に載荷した変位、および荷重を測定した。この測定値は、パソコンを用いて記録した。また、鋼板のひずみ・繊維シートのひずみ・鋼板の変位・供試体先端の変位であり、前2つはひずみゲージで、後の2つは高感度変位計を用いて測定した。また供試体先端の変位は、非接触型変位計でも測った。これらのデータは、データロガーからプリントアウトし、なおかつパソコンでも記録する。

10.7 実験手順

実験準備、実験中および実験終了時の操作手順を付録-2に記す。

10.8 結果の表示

全ての結果は無次元化することで評価を安易にさせた。縦軸に載荷荷重を無次元化した値を用いた。以下に無次元化の定義を示す。

1. 荷重

$$\bar{P} = \frac{P}{P_Y}$$

$$P_Y = \frac{w\sigma_Y}{l}$$

但し

\bar{P} : 無次元化荷重

$w = \frac{bh^3/12}{h/2}$: 断面係数

σ_Y : 定着用治具の降伏応力

l : 治具のボルト先端から被定着体までの距離

b : 治具の幅

h : 治具の高さ

2. ひずみ

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y}$$

$$\varepsilon_Y = \frac{P_Y l}{3EI}$$

但し

$\bar{\varepsilon}$: 無次元化ひずみ

1. 応力

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_T}$$

2. 変位

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_y}$$

δ_y = 治具の降伏変位

第 11 章 隅角部モデル実験結果・考察

被定着体の無次元化荷重-変位関係を図 11-1 に、治具の無次元化荷重-変位関係を図 11-2 に示す。CFS は治具の先端(写真 9-12)やボルト付近(写真 9-13)で破断して載荷終了になったものがほとんどだったのに対し、AFS では破断する前に被定着体と剥離(写真 9-14)を起こすものが多かった。これは AFS に比べ CFS のほうが脆性的に破断してしまう特徴を有しているからである。

被定着体の最大無次元化変位と治具の最大無次元化変位の差は C1-12 では約 0.8, C2-15 では約 0.6, A1-12 では約 1.4, A2-15 では約 1.5 となった。このことより CFS により補強された供試体に比べ AFS により補強された供試体の方が最大無次元化変位の差が開くことがわかる。これは、AFS の特徴である変形能の高さが現れたためである。アンカーボルト付近のひずみと荷重の関係を各供試体毎に図 11-3, 4, 5, 6 に示す。ボルトにより治具を定着する際に用いるワッシャー付近で無次元化ひずみが大きくなり、それから離れる程無次元化ひずみは減少している。また、図からはわかりにくい剥離を生じ始めた時にはワッシャー付近より被供試体に近いほうが無次元化ひずみが大きい場合がある。これは FS が徐々に剥離をしていくためである。

第12章 隅角部モデル解析の概要

本章では、定着用治具等の細部の挙動を調べるために解析を行った。前章で述べた隅角部モデル実験を参考にモデルを制作し、解析を行った。今回行った解析では定着部の挙動に的を絞り、図 12-1 のようなモデルを作成した。定着用治具の厚みは 12mm または 15mm とし、材質は、SS400 とした。FS は CFS と AFS とし、枚数は 1 枚または 2 枚とした。また、定着用治具の材質による違いを見るために治具の材質のみ変えたモデルも加えて解析を行った。

12.1 隅角部モデル

12.1-1 解析モデル

解析対象は、一般的な既存 RC 構造物の隅角部を想定した。隅角部モデル実験の結果を参考に以下に示す 8 タイプのモデルを用いて解析を行った。要素数 266、節点数 958 である。要素はすべてソリッド要素とした。コンクリート部は剛体とし、FS と定着用治具は、ひずみによる破壊と応力による破壊をそれぞれ判断できるバイリニア形の弾塑性材料とした。FS の材料特性及び治具の材料特性は表 4-1 及び表 6-1 に示したものと同様である。

拘束条件は、定着用治具のボルトによる固定部分を完全固定とし、移動部を Z 軸方向以外の変位を拘束した。また全節点は Y 軸方向への移動を拘束することで X-Z 平面に対して対象要素とした。載荷方法に付いては、被定着体の正方向に荷重を載荷した。また、各々の性質は各材料の試験から求めた係数(表 4-1)を参考にした。定着用治具の厚みは 12mm または 15mm とし、材質は、SS400 とした。FS は CFS と AFS とし、枚数は 1 枚または 2 枚とした。それぞれの組み合わせは

AFS-SS400:以下の 4TYPE の総称

A1-12:AFS1 枚, 治具の材質を SS400 とし, その厚みを 12mm

A1-15:AFS1 枚, 治具の材質を SS400 とし, その厚みを 15mm

A2-12:AFS2 枚, 治具の材質を SS400 とし, その厚みを 12mm

A2-15:AFS2 枚, 治具の材質を SS400 とし, その厚みを 15mm

CFS-SS400:以下の4TYPEの総称

C1-12:CFS1枚, 治具の材質をSS400とし, その厚みを12mm

C1-15:CFS1枚, 治具の材質をSS400とし, その厚みを15mm

C2-12:CFS2枚, 治具の材質をSS400とし, その厚みを12mm

C2-15:CFS2枚, 治具の材質をSS400とし, その厚みを15mm

12.1-2 接触条件

定着体及び被定着体とFSの間には垂直破壊応力 3.43N/mm^2 ,せん断破壊応力 102.5N/mm^2 とする接触要素を挿入し, 定着用治具とFSの間には垂直破壊応力 2N/mm^2 ,せん断破壊応力 60N/mm^2 とする接触要素を挿入した. これらの破壊応力のうちコンクリートと炭素繊維シートとの間の垂直破壊応力は参考資料¹⁾の値を用いた. せん断破壊応力は垂直破壊応力の30倍と仮定した. しかし, FSの補強枚数を2枚にしたものはそのFS間に接触要素を挿入せず, 剛結とした.

$$\left(\frac{\sigma_n}{NFLF}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{SFLF}\right)^2 \geq 1$$

NFLF: 垂直破壊応力

SFLF: せん断破壊応力

δ_n : 結合部に実際に作用している垂直応力

δ_s : 結合部に実際に作用しているせん断応力

第 13 章 解析モデル結果・考察

13.1 CFS により補強された供試体

被定着体の無次元化荷重-無次元化変位関係を図 13-1 に、治具の荷重-変位関係を図 13-3 に示す。C1-15 は治具を固定するボルト付近で CFS が破断したため十分な変位が生じる前に解析を終了した。また、C2-12 は変位は生じるものの無次元化変位が約 20 の時にボルト付近から治具が破壊をしたため解析を終了した。C1-12 及び C2-15 は被定着体の変形後、被定着体と CFS が剥離し解析を終了した。

CFS において隅角部での応力の伝達をスムーズにするために $R=10$ となるように面取りを施した。被定着体と定着用治具に挟まれている要素(以後 R 部)の無次元化荷重に対する無次元化応力を図 11-5, 7, 9 に示す。図から CFS が供試体や治具と剥離を起こし、応力が伝達される様子がわかる。C1-15 や C2-12 に比べ C1-12 や C2-15 が無次元化ひずみが減少している。C1-15 は、治具の強度が高く、治具により定着した CFS がすり抜けたためである。また、C2-12 は、C1-15 とは逆に治具の強度が低く、CFS から伝わる引張力により治具の変形が大きくなるためである。これは、治具の無次元化荷重-無次元化変位からもわかる。

定着用治具についてはその主応力が一番大きく出た点での無次元化荷重に対する無次元化応力と無次元化塑性ひずみをそれぞれ図 13-11 及び図 13-13 に示す。無次元化応力については、急激にぶれるところがある。これは CFS の剥離と対応している。次に治具の無次元化塑性ひずみでは、先ほど述べた応力がぶれる時と無次元化塑性ひずみが対応しているのがわかる。C1-12, C1-15, C2-12, C2-15 のそれぞれ CFS の破断、剥離または治具の破壊する直前の応力分布図(応力がもっとも大きい時)を図 13-15 に示した。これより、C2-15 で応力が広く分布しつついて C1-12, C2-12, C1-15 の順となる。

13.2 AFS により補強された供試体

被定着体の荷重-変位関係を図 13-2 に、治具の荷重-変位関係を図 13-4 に示す。A1-15 は治具を固定するボルト付近で AFS が破断したため十分な変位が生じる前に解析を終了した。また、A2-12 は変位は生じたものの変位が約 5 の時にボルト付近で AFS が破断したため解析を終了した。A1-12 は十分な変形後、被定着

体と CFS が剥離し解析を終了した。また、A2-12 は十分な変位を生じるが AFS の強度に対して治具の強度が低いため無次元化荷重は A2-15 の約半分となった。R 部の荷重-ひずみ関係を図 13-6, 8, 10 に示す。A2-12 や A2-15 では荷重が約 0.2 で、A1-12 では約 0.5, A1-15 では約 0.8 で AFS に引張力が伝わる。しかし、A1-12 や A1-15 では急激に引張力が伝わるため無次元化ひずみでは A1-12 や A1-15 のほうが大きな値を示す。定着用治具の無次元化荷重に対する無次元化応力を図 13-12 に、塑性ひずみを図 13-14 に示す。まず、無次元化応力を見ると急激にぶれるところがある。AFS が 1 枚のタイプと 2 枚のタイプは無次元化応力が全体的に 1.2 倍近く大きくなった。この事から治具の無次元化応力が同値ならば補強枚数に比例して耐荷力も増加することが解る。

A1-12, A1-15, A2-12, A2-15 のそれぞれの AFS の破断または剥離、治具の破壊する直前の応力分布図を図 13-16 に示した。図より、C2-15 と A2-15 が似た分布を示し、その分布も広範囲になった。

13.3 隅角部モデル実験と解析との比較

隅角部モデル載荷実験で得られた結果と隅角部モデル解析の結果を比較する。被定着体の無次元化荷重-無次元化変位関係を図 13-17~20 に示す。C1-12 は無次元化変位が 4.5 までには有意な差が認められないが解析で得られた結果は変位が 4.5 の時に CFS が被定着体と剥離を起こした。C2-15 は無次元化荷重が約 2 で定着体と CFS との間で剥離を起こし被定着体の無次元化変位が急激に増加したため実験結果との差も増加した。A1-12 も同様に無次元化荷重が約 2.7 で定着体と AFS との間で剥離を起こしたため変位が急激に増加し、実験結果との間に差が生じた。しかし、無次元化変位が 20 を超えたところから実験結果に沿うようになった。A2-15 は実験結果と解析結果に有意な差が見られなかった。また、ボルト付近の無次元化荷重と無次元化ひずみ関係を図 13-21~24 に示す。C1-12 は解析では約 2.5 で CFS が定着体から剥離したため解析不能となった。しかし、2.5 までの荷重-ひずみ関係は類似している。C2-15 は荷重-変位関係と同様に実験結果と解析結果に差が生じた。同様のことが A1-12 でも言える。A2-15 は無次元化ひずみが 10 以前は実験結果と解析結果に差が生じているがひずみが約 10 以降は類似した軌跡を描いた。

第14章 結論

繊維シートを補強材として用いる場合の角部への定着方法を新たに考案すると共に、その応用例として、RC 橋脚の曲げ補強におけるフーチング部への定着において、この工法が有効であることを実験と数値解析により検証した。本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- (1) 橋脚モデルの実験と解析により、考案した定着工法は、耐力及びじん性の確保に有効であることが分かった。また、その際に用いる定着用治具の形状はL-Typeとすることで定着長を確保し、FSの破損を防ぐことができる。
- (2) 隅角部モデル実験より考案した定着工法の有効性を示した。破壊形態はCFSでは破断する供試体が多いのに対し、AFSでは剥離を生じるという特徴がでた。
- (3) 本研究で提案した定着方法を採用することにより、CFS、AFSを有効な曲げ補強材として用いることが可能である。また、FSの枚数、治具の寸法によりその補強目的に合わせた利用方法を選択することが可能である。

実験で得た結果と解析で得た結果との比較から本稿で用いたモデル及び力学特性は、隅角部定着工法の解析に有効であることを示した。

付録

要旨 (in English)

付録-1

付録-2

写真

表

設計図等

実験結果

参考文献

謝辞

In this paper, the author present a new method of fixative to reinforced concrete members that make use of Carbon Fiber Sheet or Alamid Fiber Sheet and investigates by experimental and analysis.

Earthquake at Offing of Tokachi and earthquake at Offing of Miyagi started a study of Earthquake-proof reinforcement. And

It is important thing that was a balance of the resistance against earthquakes and tough to RC structure. The method to longitudinally support Steel or Reinforced concrete or Carbon fiber sheet covering reinforced concrete members is a method under those conditions. But those methods have defect points that is an excess cross-section area and weight. And we can forecast the different condition, so a new method is waited.

On the other hand Fiber Sheet has become to be applied for the shearing supplement and the bending supplement for reinforced concrete column.

So New method is fixing to reinforced concrete that it is the proposed method is effective to anchor fiber sheet fabric to footing of column members as well as to longitudinally support fiber sheet fabric.

It is experimentally confirmed that the proposed method is effective to anchor fiber sheet fabric to footing of column members as well as to longitudinally support fiber sheet fabric through quasi-static cyclic loading tests of column members and monotonous loading tests of small specimens. Nonlinear dynamic fracture analyses show that the mechanical properties of the proposed supporting system can be predicted accurately.

We conclude from the experiment and the analyses described above that;
(1) Fiber Sheet is used in the bending supplement for reinforced concrete member. (2) Style of Steel hopes L-type. (3) The Reinforced concrete member's resistance against earthquakes and tough is improved by this method.

付録-1 橋脚モデルの実験手順

(1) サーボパルサー型アクチュエーターに油圧を送る

1. 油圧源室の制御盤を ON 間でまわして、緑のスイッチを押す.
2. 制御盤上で以下の操作を行う
 - a. HYD. CONTROLLER が, OFF であることを確認する
 - b. ALARM:RESET のレバーを上げて, 下げる
 - c. PUMP RUN を押す
 - d. PUMP:SELECTOR NO.1 , NO.2 の2つ押し LORD を押す
3. 制御盤上の HYD. CONTROLLER NO.1 , NO.2 の LOW SOL. を押し, その10秒後に HIGH SOL を押し油圧を送る.

(2) 実験準備

1. まず, サーボパルサー型アクチュエーターNO.2 のシーベルベースと供試体の間にゴム板を挟み, クレーンにより供試体中央にあわせる. また, 供試体柱先端をサーボパルサー型アクチュエーターNO.1 のシーベルベースに PC 鋼棒により固定する.
2. 制御盤上 (NO.2) で以下の操作を行い, 油圧を20まで下げて3t くらいの軸力をかける.
 - a. SUB ERR が0になっているか確認する (この場合 TENS 側で可). 0になっていなければ, SUB CONTROL で調整.
 - b. SUB CONTROL のスイッチを切る.
 - c. MEAN で, 荷重を20%ぐらいにする. 500 (中立)から数字を下げる
と圧縮, 上げると引張の荷重がかかる.
3. 供試体の支えをはずし, サーボパルサー型アクチュエーターNO.2 のネジを緩める.
4. 先程の制御盤 NO.2 の MEAN で, 軸方向荷重を9.3t (62%) かける.

(1) 実験のプログラム始動

3. パソコン上で変位計(2.5or5cm)とパソコンの表示が一致しているか確認する.
4. 制御盤上でサブコントロールにより荷重を00.0にあわせる.
5. 変位表示に切り換えて外部変位計と初期設定(バランス)する. 但し00.0

にならない場合、Teac データレコーダの Input (ZERO) で調整する。

(2) 外部変位計の初期値, CAL 値を入力する。

1. パソコン上で計算上初期値(2048)に同調する。但し、2048 にならない場合 Teac データレコーダの OUTPUT (ZERO) で調整する。
2. 動的計測部で、外部変位計の変位較正值 (CAL 値) を表示する。
3. 計算上変位較正值を下に記す値に同調する。但し、下に示す値にならない場合、Teac データレコーダの OUTPUT (LEVEL) で調整する。

(値) = (変位較正值) × 2048 / 2.5 + 2048 軸力を 3 t 位まで下げ、サーボパルサー型アクチュエーターNO.2 をクレーンで吊る。

(3) 制御信号をパソコンからアクチュエーターに送る準備をする。

1. 制御盤上でサブコントロールのスイッチを切る。
2. FORWARDGAIN を 3 から 4.7 に変える
3. 制御を荷重から変位に変える。
4. パソコン上で INITIAL を押す。

(4) 载荷開始

それぞれの δy ごとに 0.1 (cm) 刻み (6.0 δy は 0.2cm, 8.0 δy 以降は 0.4 cm 刻み) で正負の最大値の値まで MEADUR を押し 3 往復計測する。

(5) 载荷終了

1. 軸力を 3 t 位まで下げ、サーボパルサー型アクチュエーターNO.2 をクレーンで吊る。

2. ジャッキにより供試体を支える。
4. 緊急停止スイッチを押し、すべて停止する。
5. FORWARDGAIN を 4.7 から 3 に下げる。
6. SUB ERR を 0 に調整する。
7. SUB CONTROL のスイッチを ON にする。

(6) パソコンを止めデータのバックアップをとる。

試験終了

付録-2 隅角部モデルの実験手順

(1)アクチュエーターに油圧を送る

1. 制御盤を ON にし，アクチュエーターに油圧を送る．
2. 油圧が 7 になるまでバルブを開ける．

(2)実験準備

1. まず，アクチュエーター中央部に供試体の中央がくるように位置を調整する．
2. 試験機の変位が 0 になるようにサブコントローラーにより調整する．
3. 試験機を載荷板まで下げる．この際，荷重が加わらないように注意する．
4. 試験機被定着体を柱に固定する．

(3)実験のプログラム始動

変位制御を選択し，三角波の一部を利用し載荷するので三角波を選択する．周期を 0.00007Hz とし，最大変位を-45mm，サイクル数を 1 回に設定する．これは，1 時間で 45mm の変位を与える事になる．

(4)載荷開始

測定用パソコンで自動計測を設定し，テスト開始ボタンを押す．約 0.1mm ごとに計測する．

(5)載荷終了

1. 給油を一時停止させる．
2. もう一度起動し直してサブコントローラーにより変位を 0 に戻す．
3. 試験機被定着体の固定を解除する．
4. 余裕を持った位置まで試験機を上昇させる．

(6)パソコンを止めデータのバックアップをとる．

試験終了



写真 4-1 ひずみゲージの貼り付け



写真 4-2 アムスラー型 100t 万能試験機



写真 4-3 制御盤



写真 4-5 パソコンと TDS-301



写真 4-4 サーボパルサー

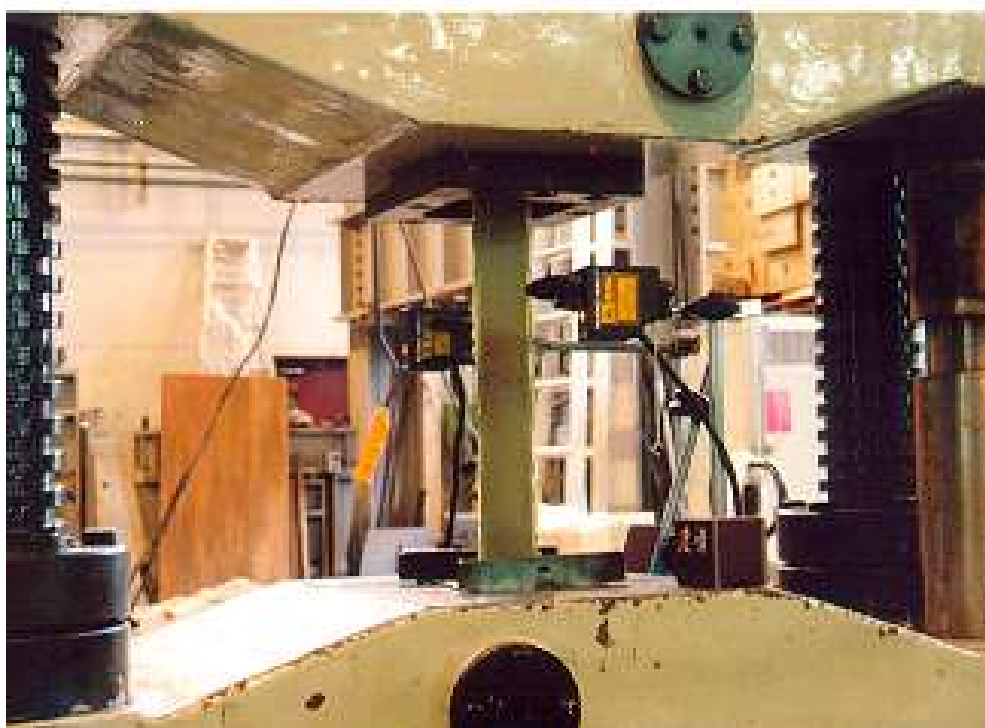


写真 4-6 アラミド繊維引張試験



写真 6-1 本体設置時のサーボパルサー



写真 6-2 基部の変位測定器

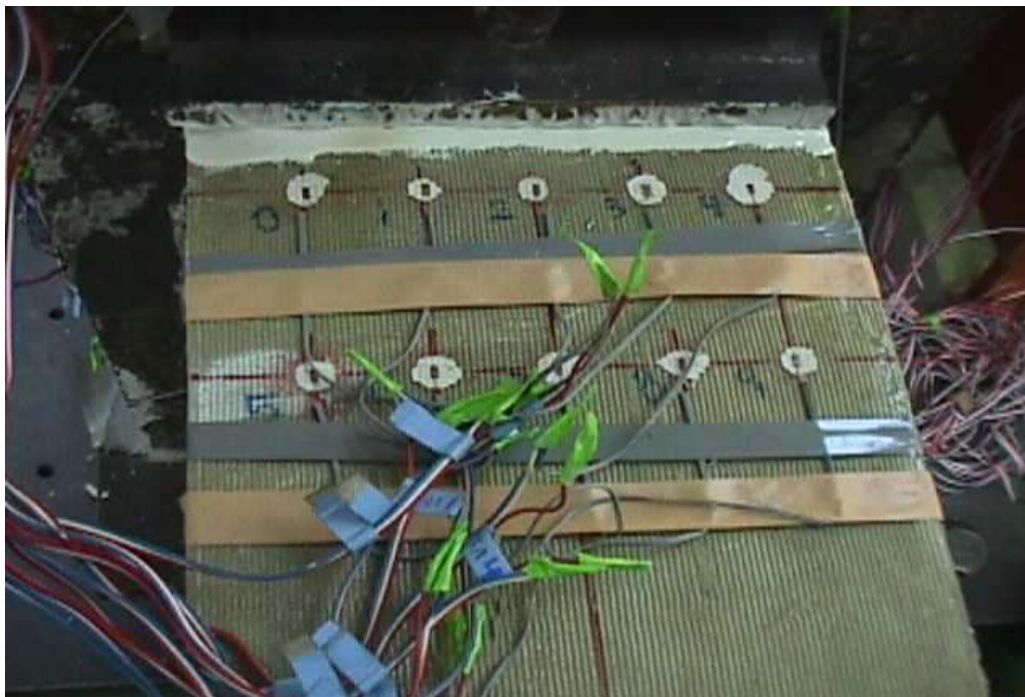


写真 6-3 ひずみゲージ

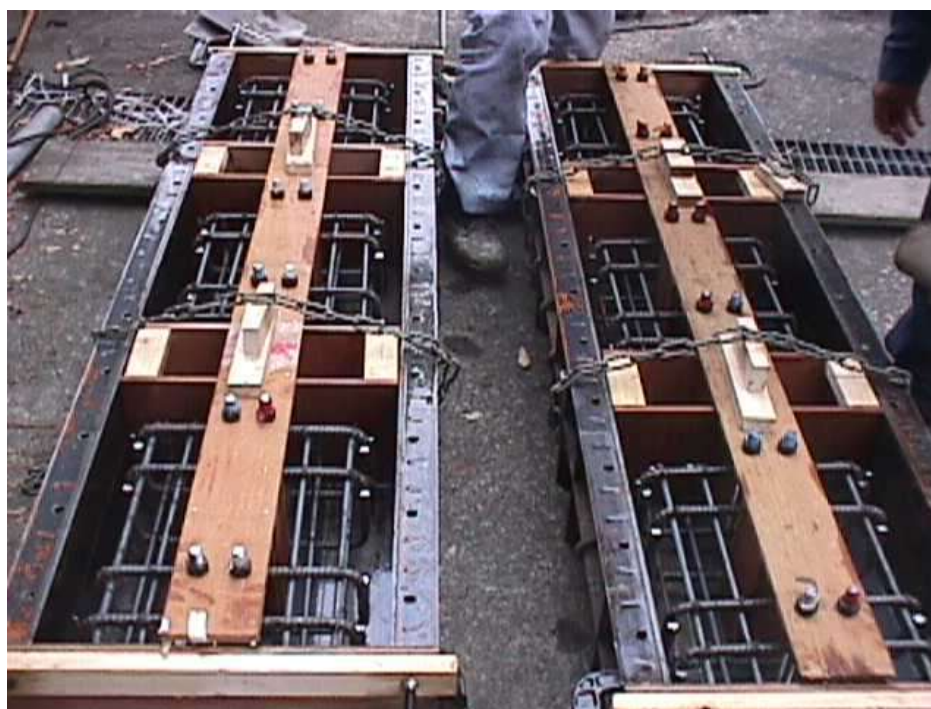


写真 9-1 台座部型枠 (1)

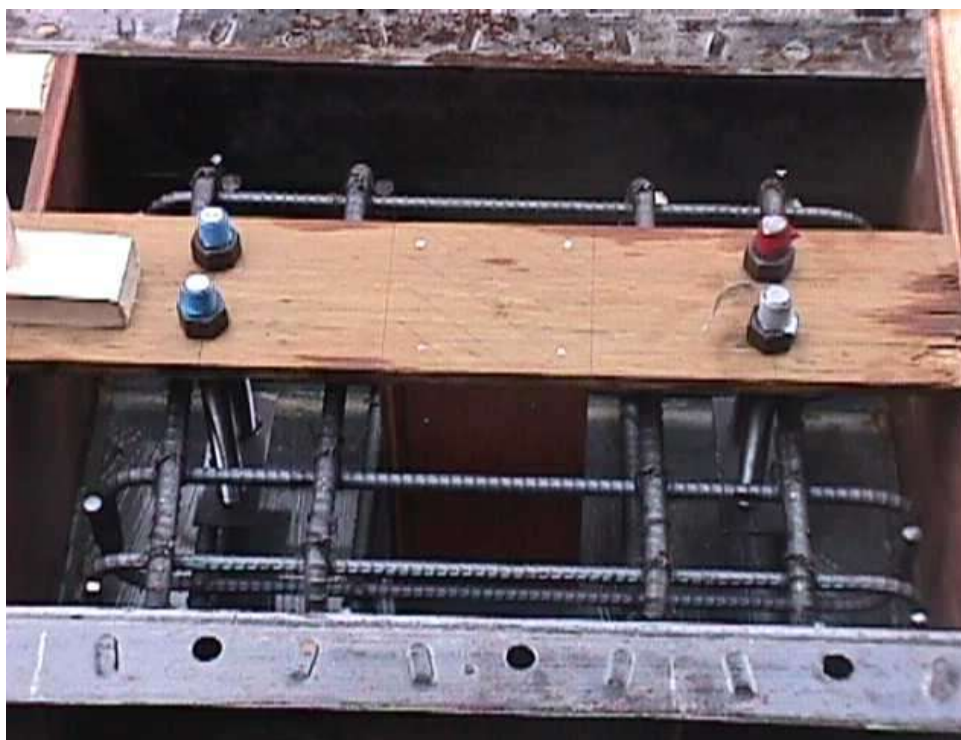


写真 9-2 台座部型枠 (2)



写真 9-3 柱部型枠



写真 9-4 台座部打設



写真 9-5 柱部打設



写真 9-6 台座部脱型



写真 9-7 台座部研磨後（下地処理工）



写真 9-8 石膏による面出し



写真 9-9 ゲージ張り付け



写真 9-10 パソコンと TDS-301



写真 9-11 載荷状況



写真 9-12 載荷終了後（R 部でのシートの破断）



写真 9-13 載荷終了後（ボルト付近でのシートの破断）



写真 9-14 載荷終了後（シートの剥離）

表 1-1 戦後に起きた大地震

年月日	災害名	震度	主な被災地
1968.5.16	十勝沖地震	M7.9	青森県・北海道南部・東北地方
1978.6.12	宮城県沖地震	M7.4	宮城県
1984.9.14	長野県西部地震	M6.8	長野県西部
1987.12.17	千葉県東方沖地震	M6.7	千葉県
1993.1.15	釧路沖地震	M7.8	釧路市
1993.7.12	北海道南西沖地震	M7.8	北海道
1993.10.12	東海道はるか沖地震	M7.1	東京都
1994.12.28	三陸はるか沖地震	M7.5	青森県
1995.1.17	阪神・淡路大震災	M7.2	兵庫県

表 1-2 近年の示方書改定とその内容

年月日	改定項目の変移
1949	コンクリート構造物・施工法の改定
1956	極限強度設計法の採用
1967	高強度異形鉄筋の考慮・鉄筋の許容応力度向上
	スラブ・梁設計条項の改定
1980	鉄筋コンクリート部材のせん断主条項が改定
1986	限界状態設計法
	既存コンクリート構造物の耐久性に対する問題提起
1991	前回改定の実用性の向上
1996	耐震設計編の制定

表 4-1 繊維シートの特性値

		CFS	AT-40	AT-60
材料特性	引張強度(N/mm ²)	3432.328	2353.596	2353.596
	弾性率(N/mm ²)	16.0 × 10 ⁴	7.85 × 10 ⁴	7.85 × 10 ⁴
	伸び率(%)	1.5	3	3
	設計厚さ(mm)	0.165	0.169	0.252
	繊維目付量(g/m ³)	300	235	350

表 6-1 各部材の材料係数

	弾性係数 (N/mm ²)	断面積 (cm ²)	降伏荷重 (N/本)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
主鉄筋D13	196 × 10 ³	1.267	4.25 × 10 ⁴	335	485
主鉄筋D10	190 × 10 ³	0.713	2.52 × 10 ⁴	353	526
帯鉄筋D6	173 × 10 ³	0.317	1.18 × 10 ⁴	371	541
定着用治具	206 × 10 ³	4500		314	450

●CFストランドアンカーによる耐震補強の概念図

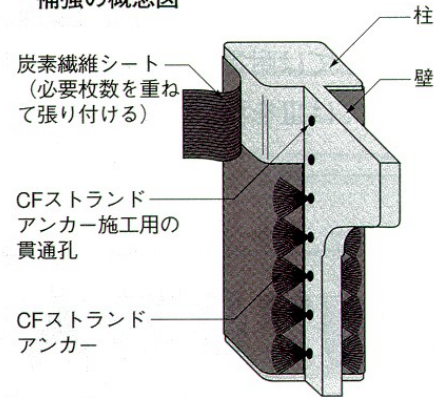


図 1-2-1

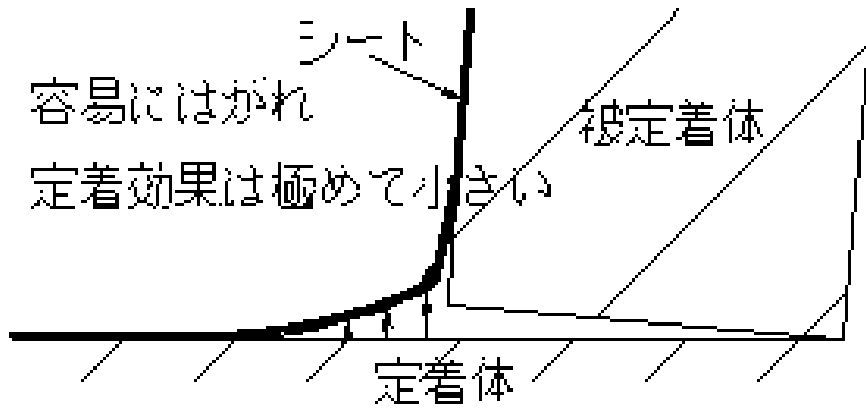


図 1-1 FS のみによる定着方法

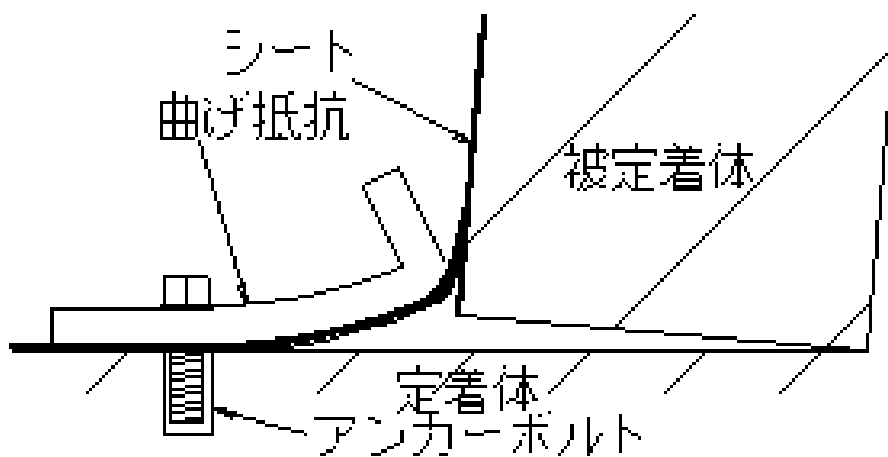


図 1-2 提案する定着方法

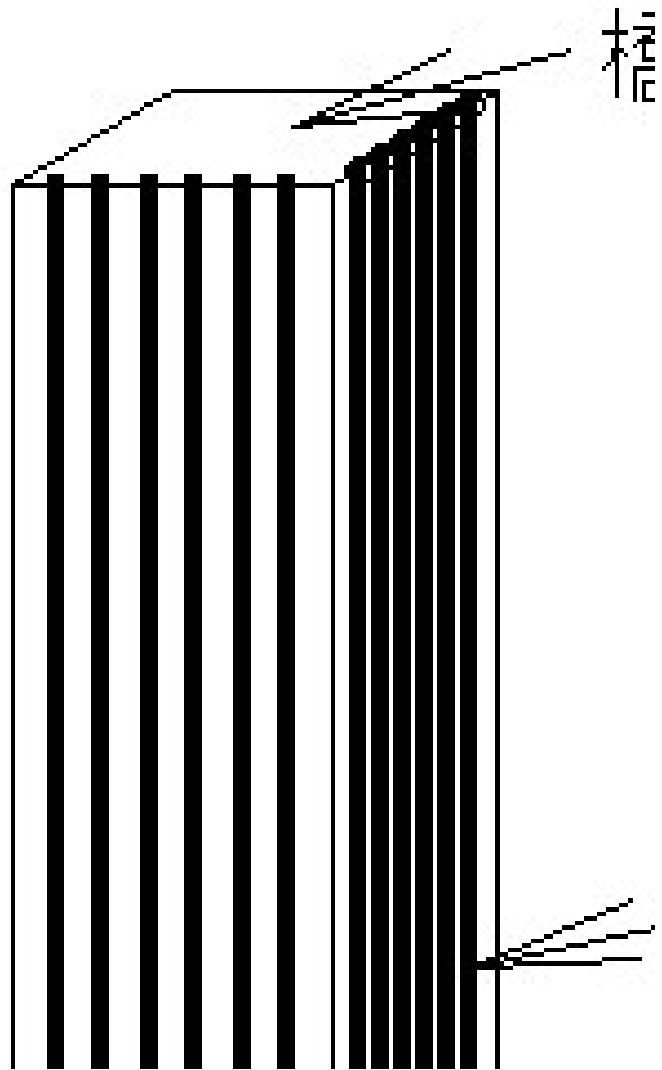


図 1-3 橋脚への施工例

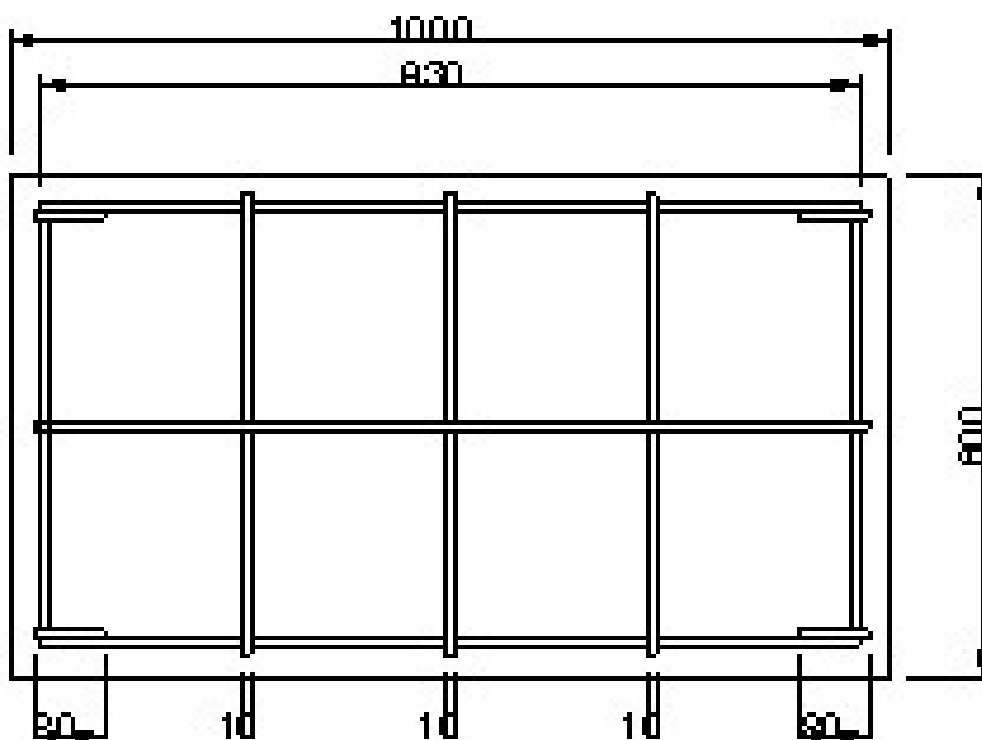


図 4-1 アンカー配筋図 (上面図)

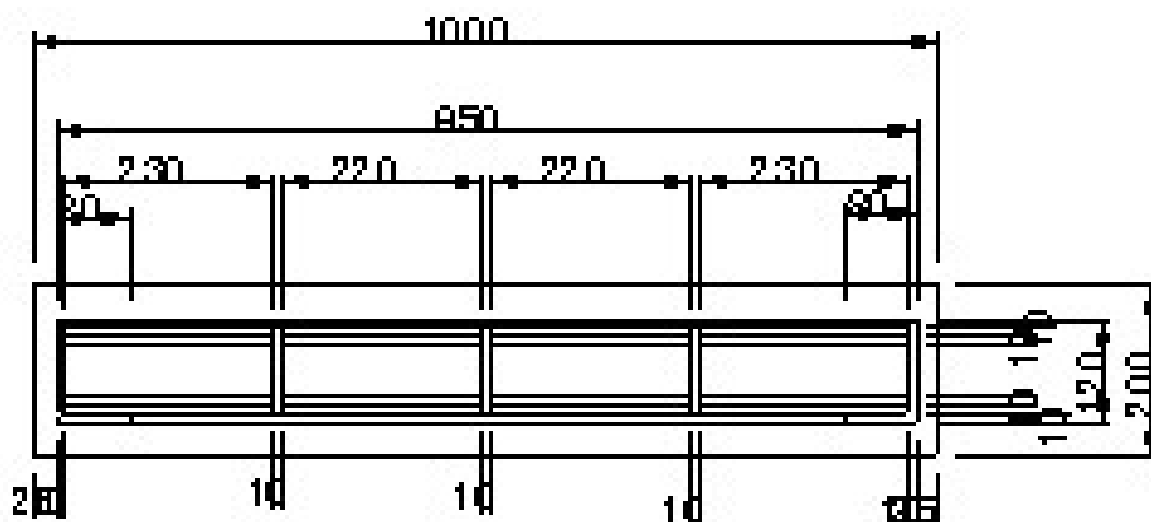


図 4-2 アンカー配筋図 (正面図)

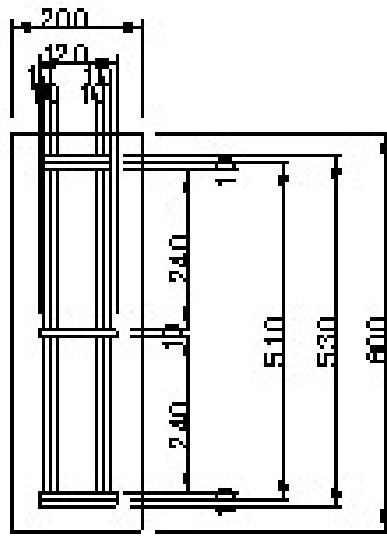


図 4-3 アンカー配筋図 (側面図)

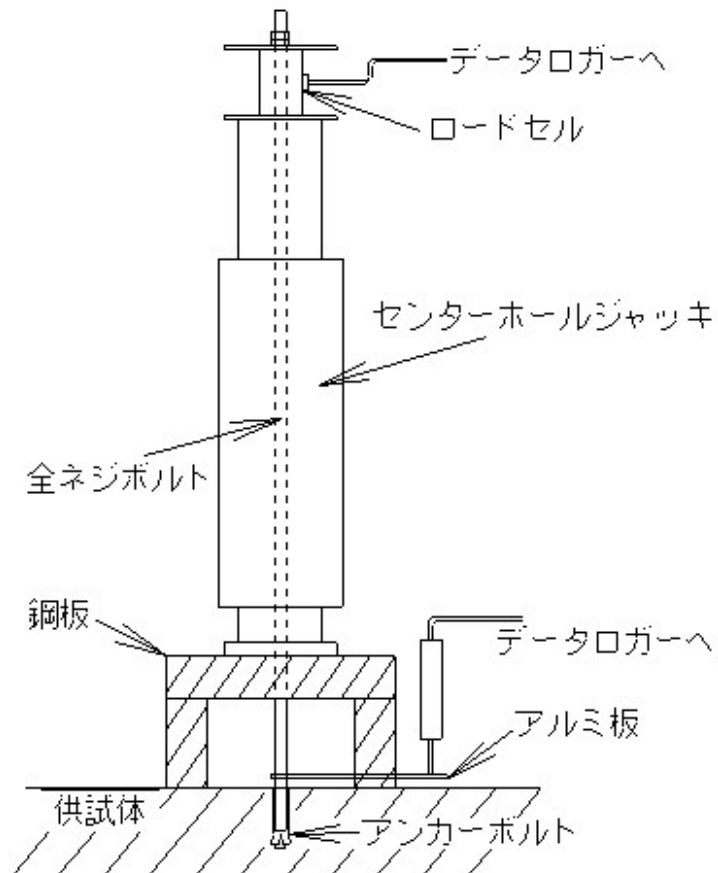
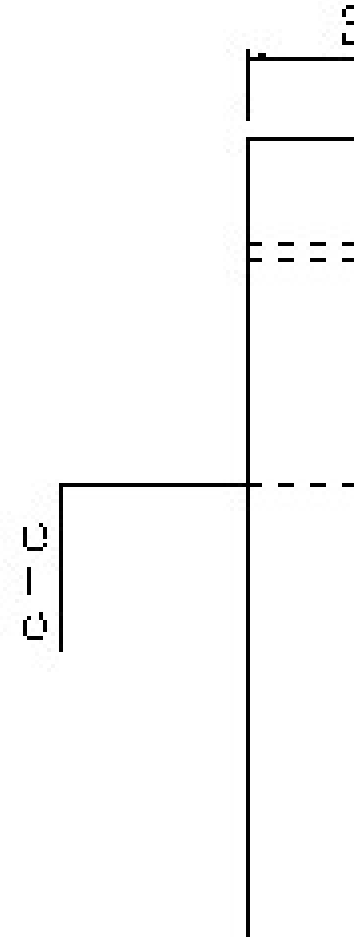
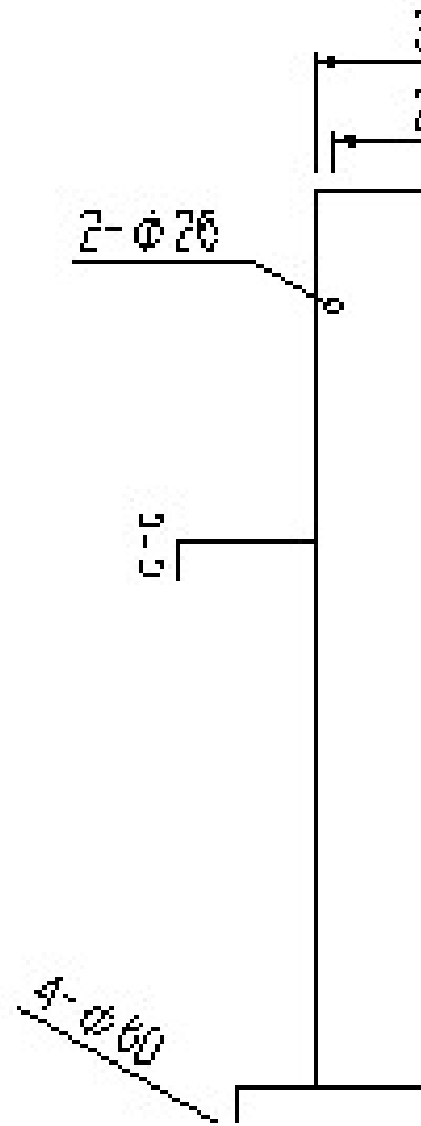
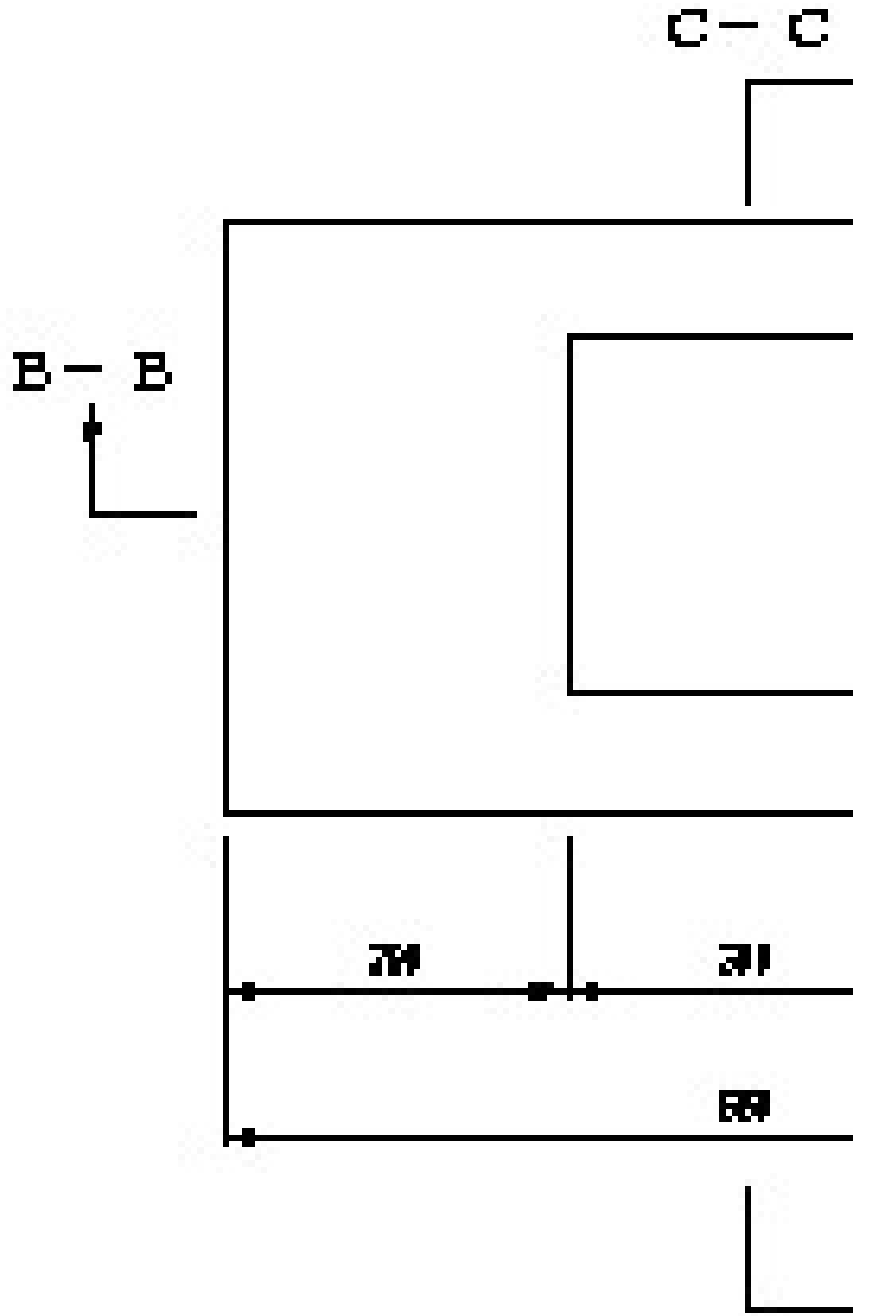
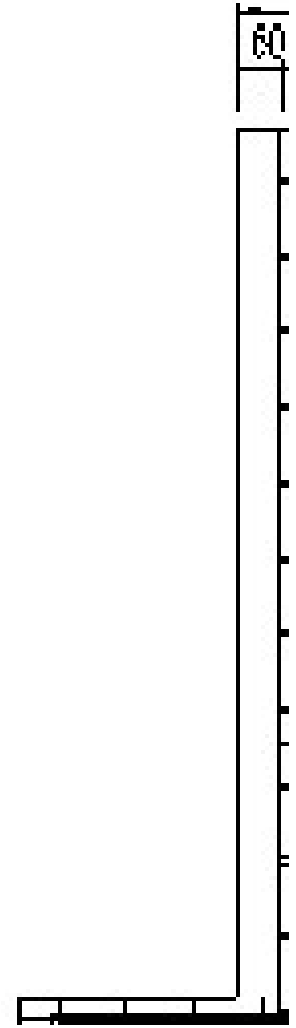
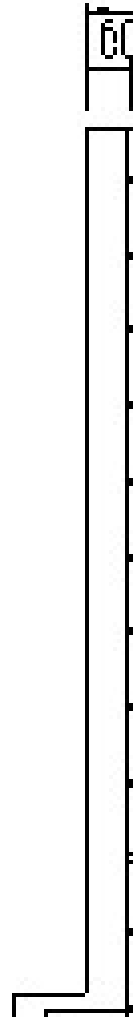


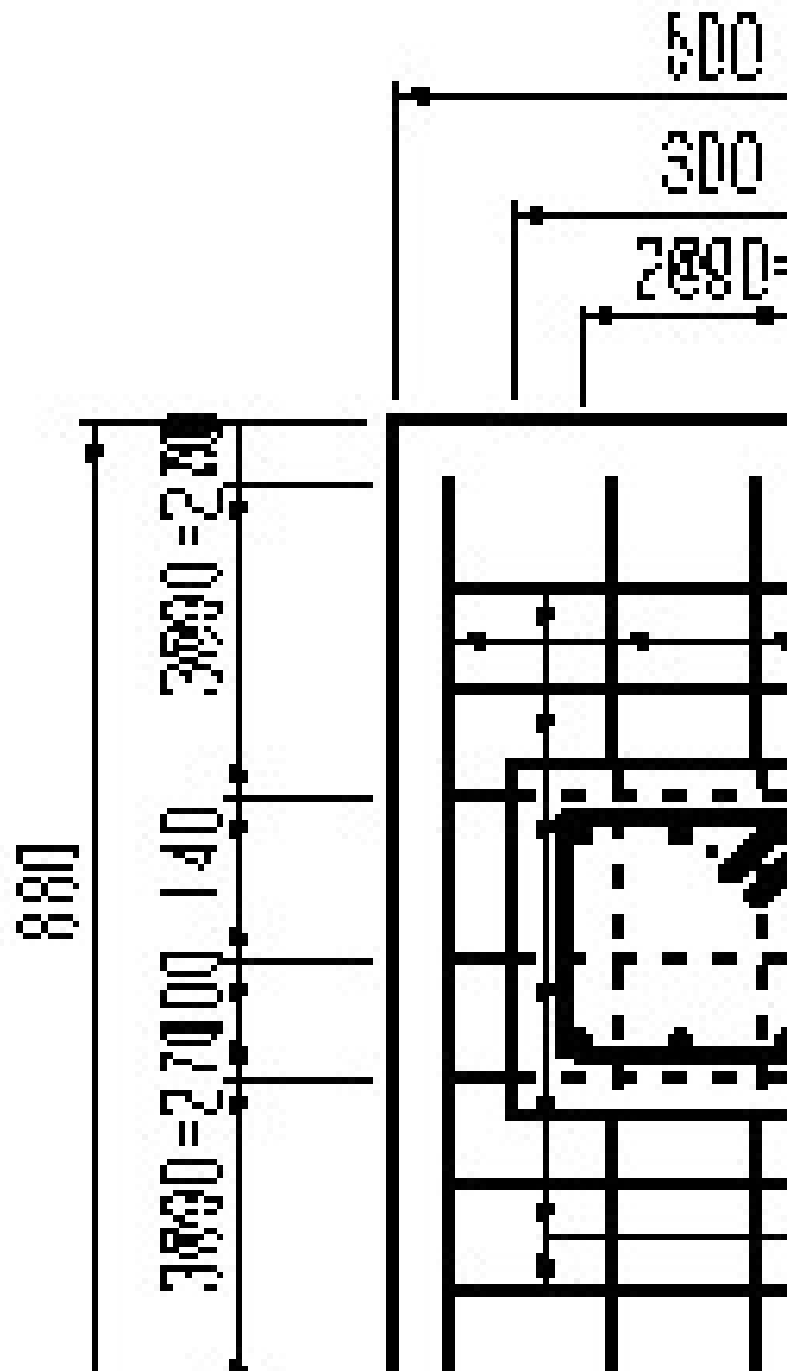
図 4-2-4 センターホールジャッキ設置図

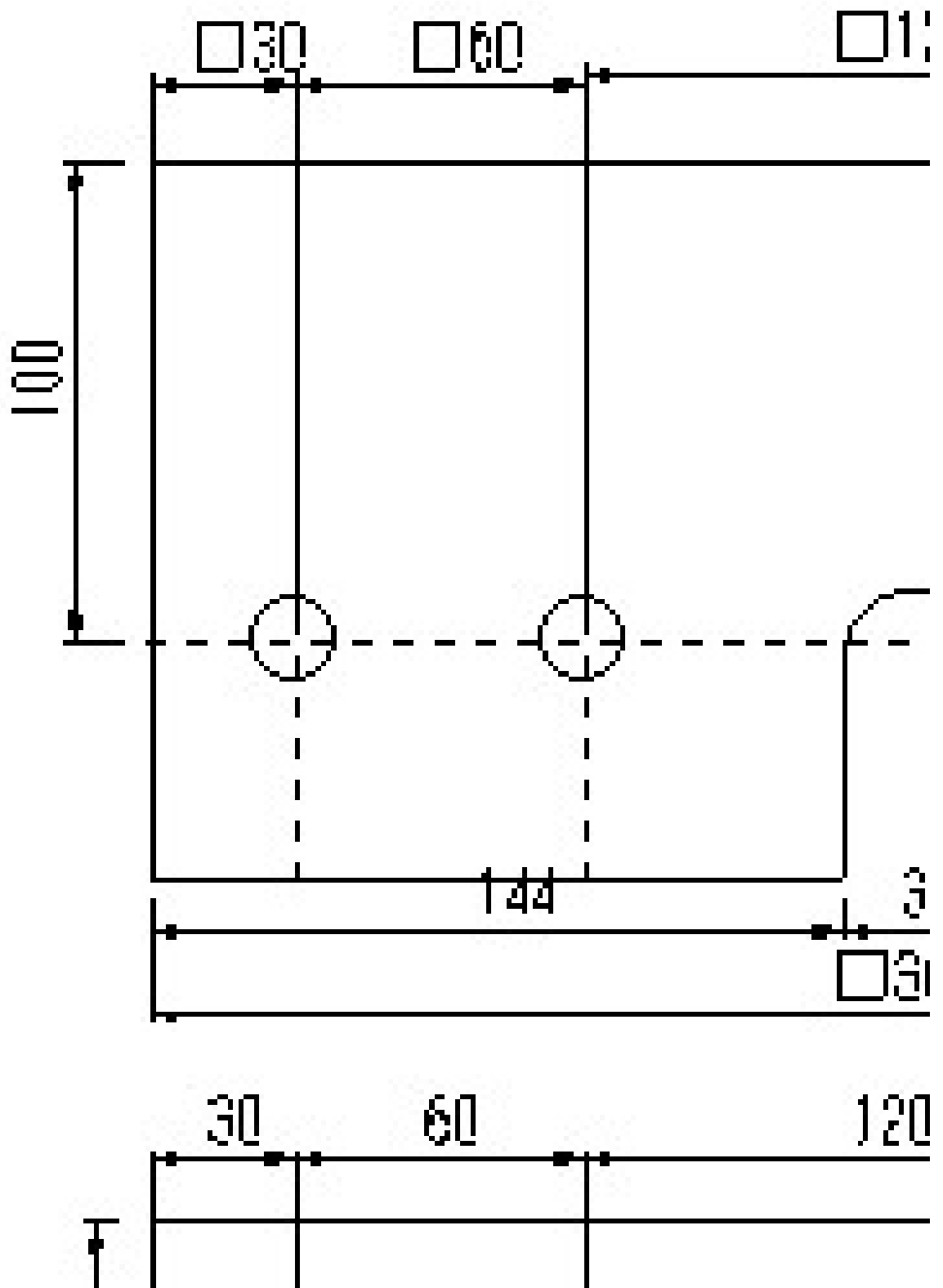


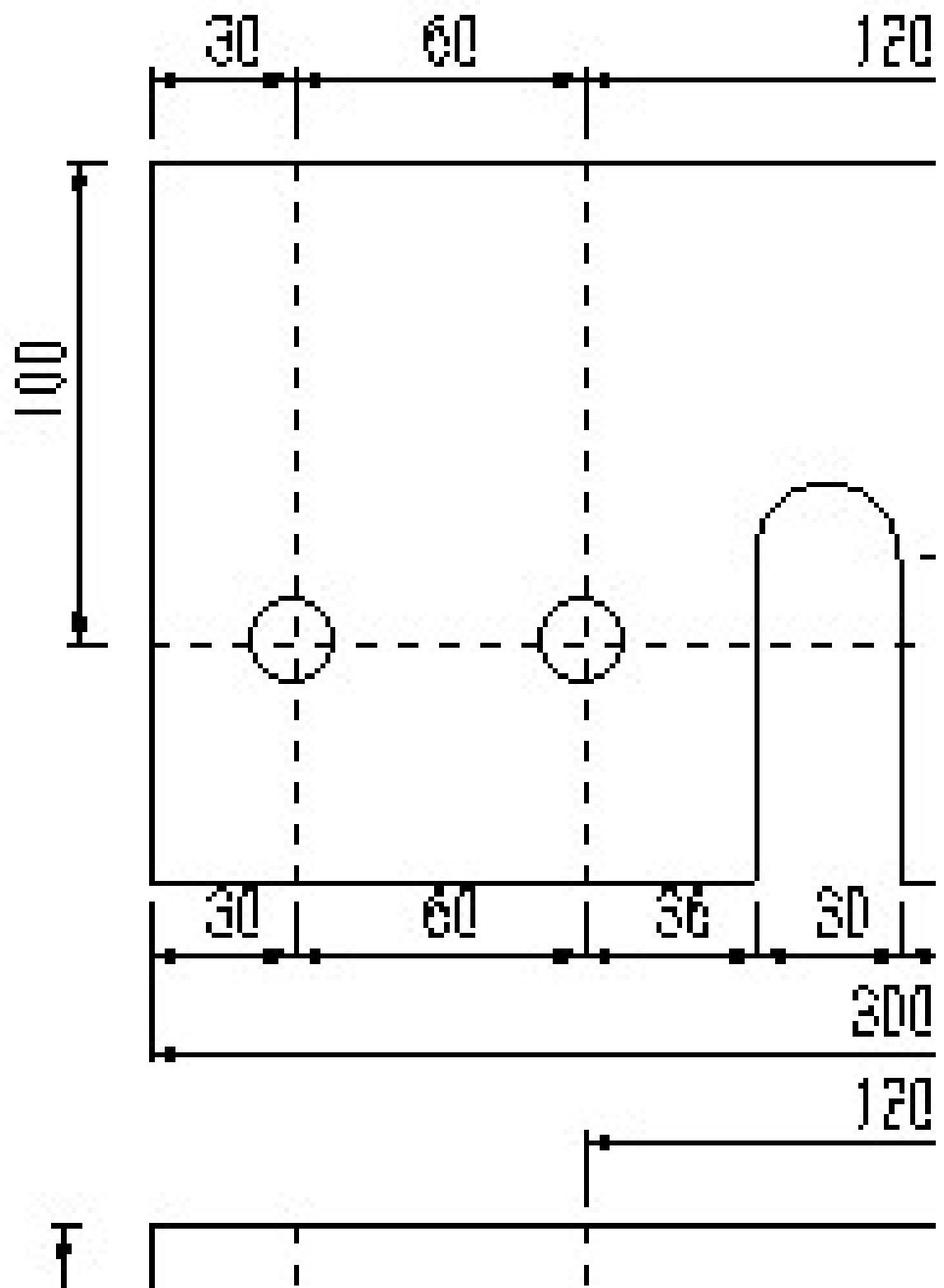


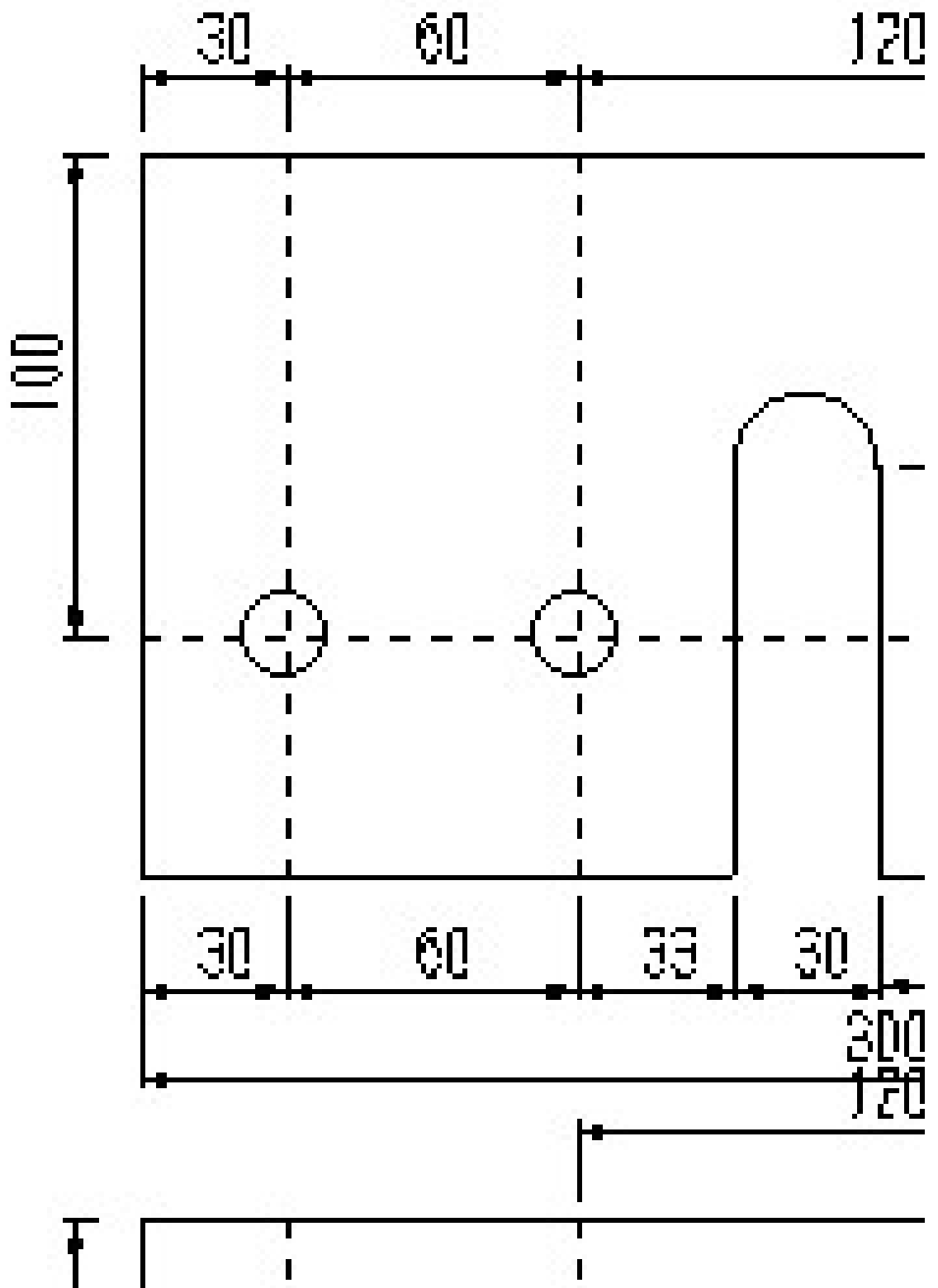
上面図
C-C

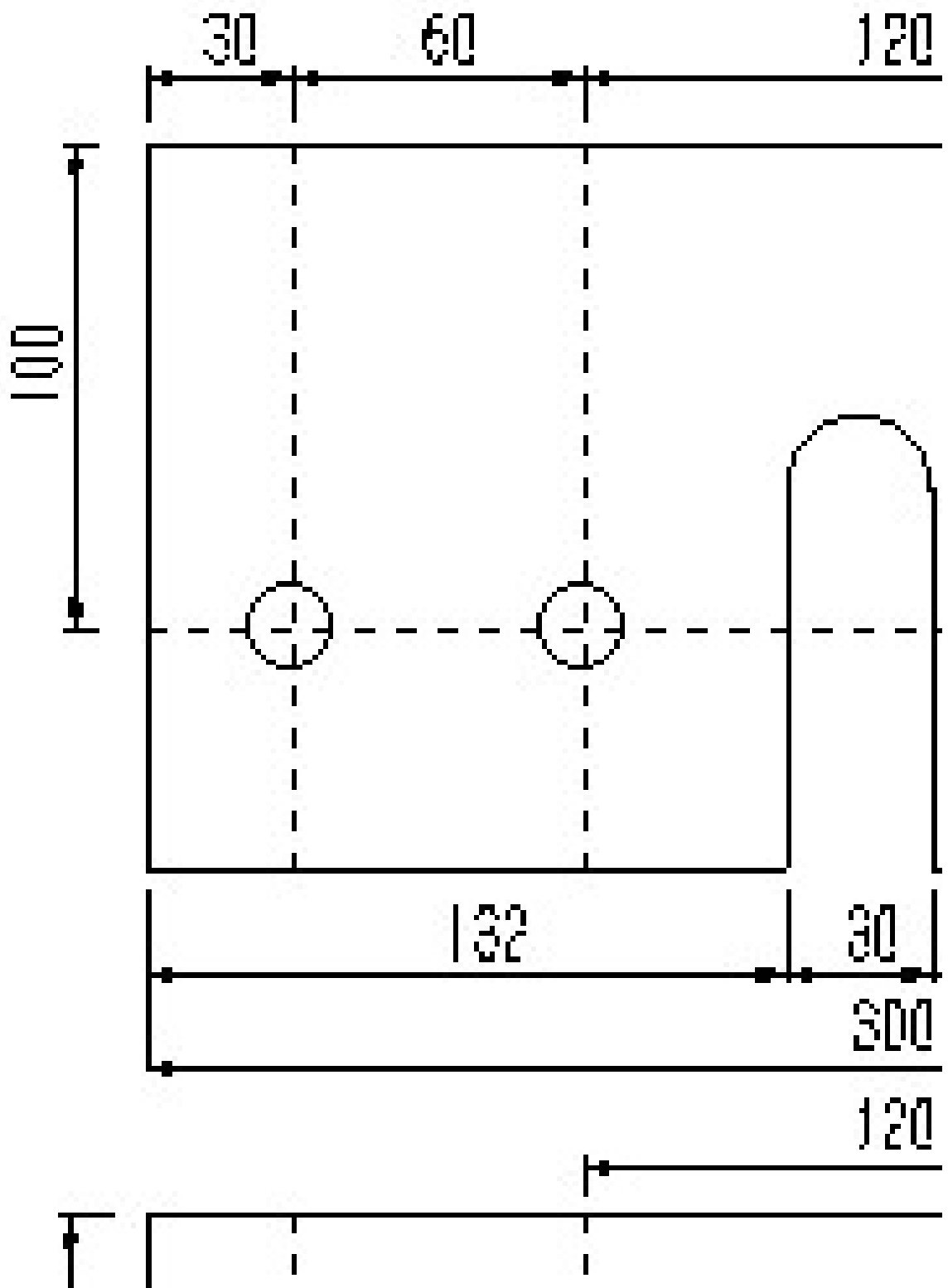












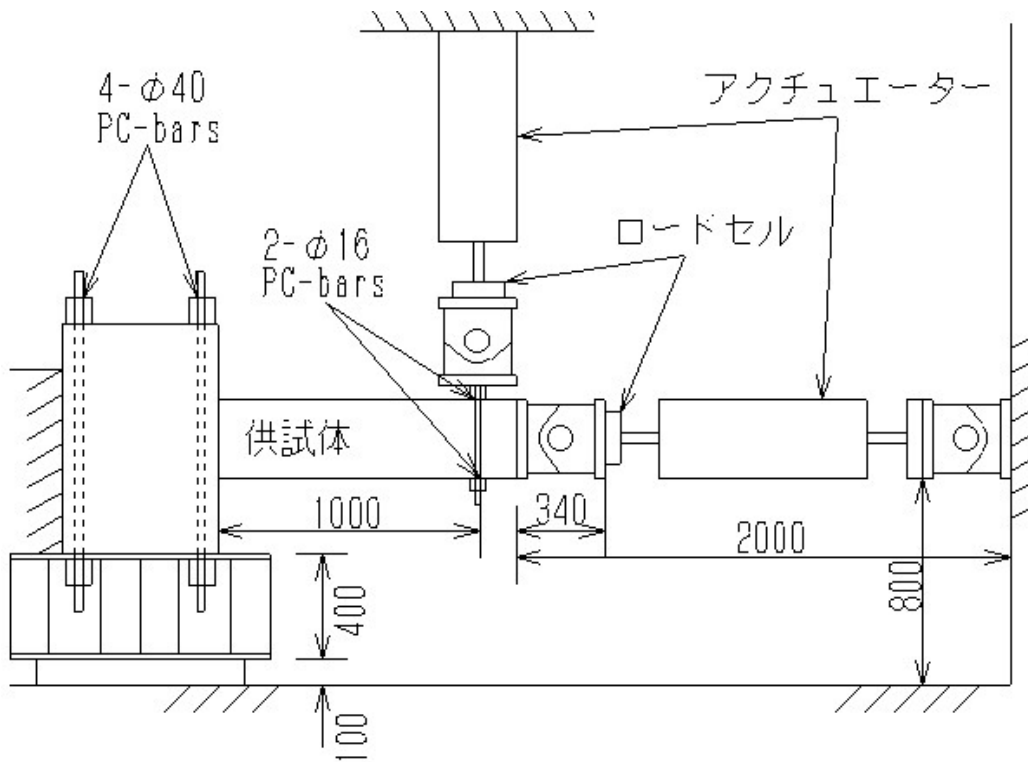


図 6-4-1 供試体設置図

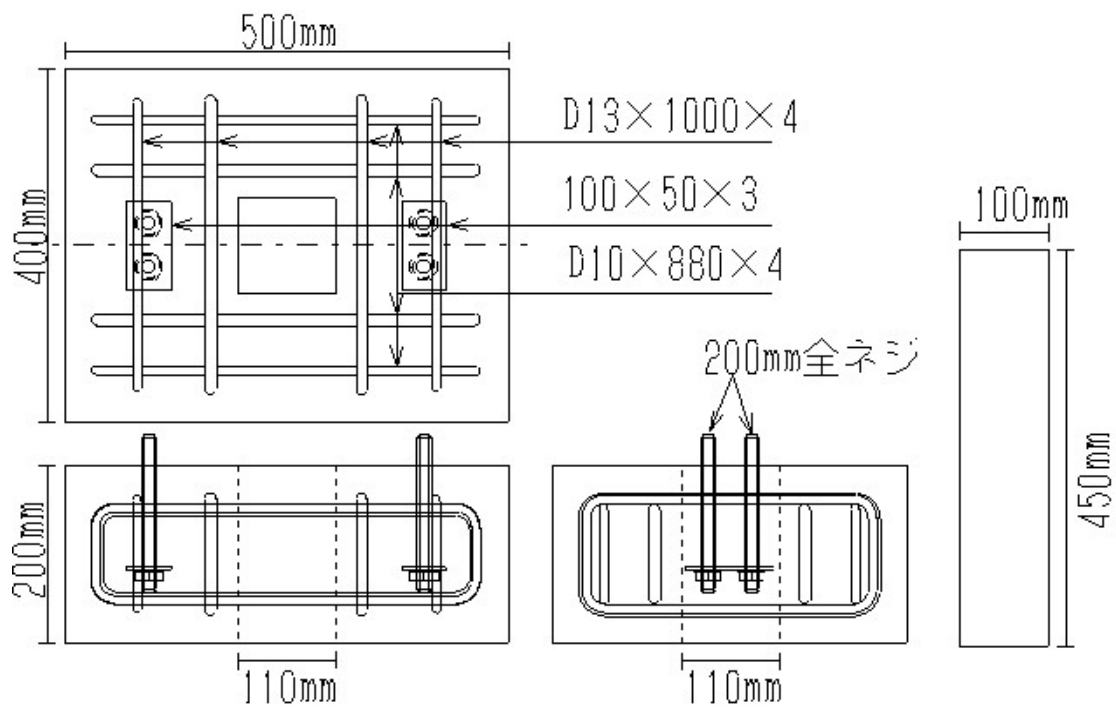


図 10-1 隅角部モデル配筋図

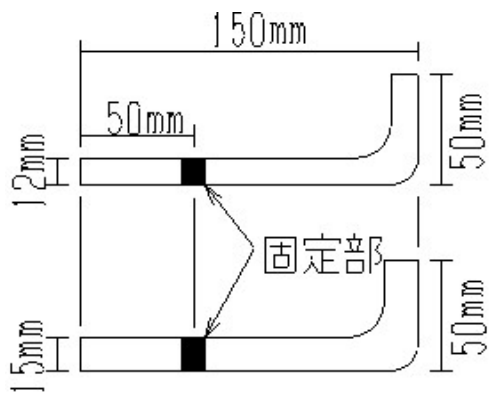


図 10-2 治具の形状

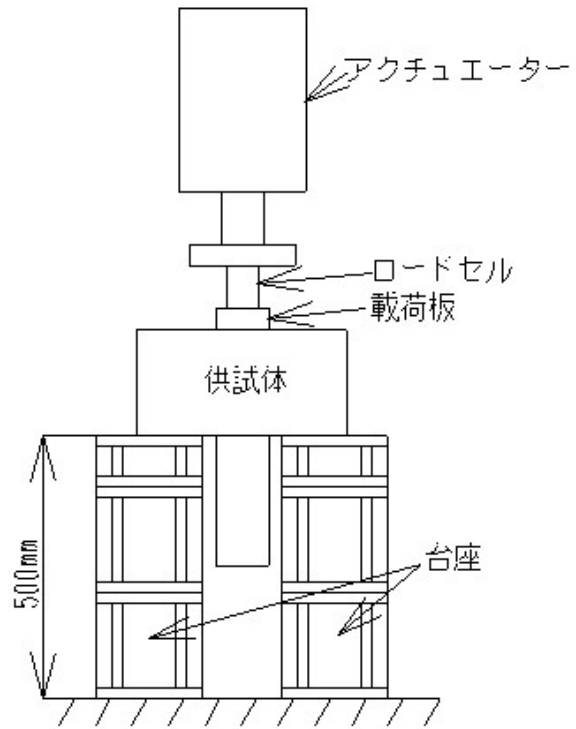


図 10-3 供試体の設置状況

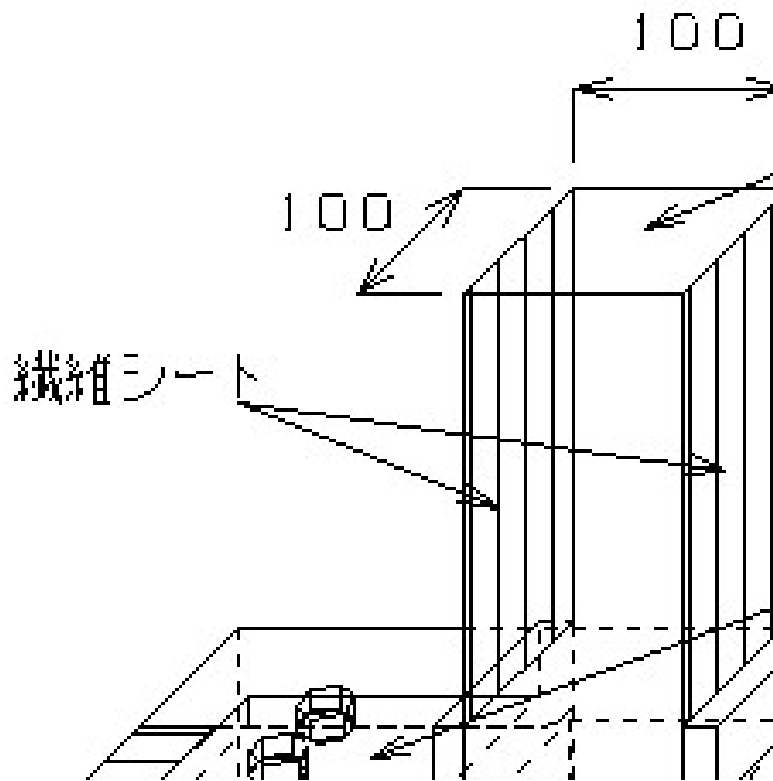


図 10-4 供試体の概要

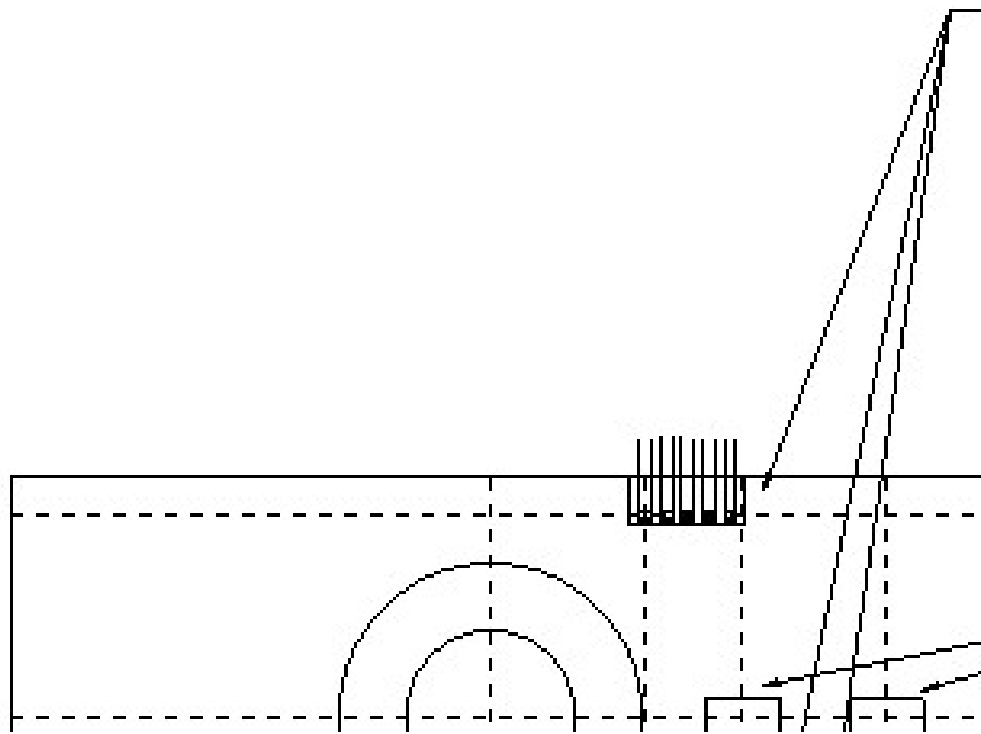


図 10-5 治具のゲージ設置箇所

アラミドFS ———

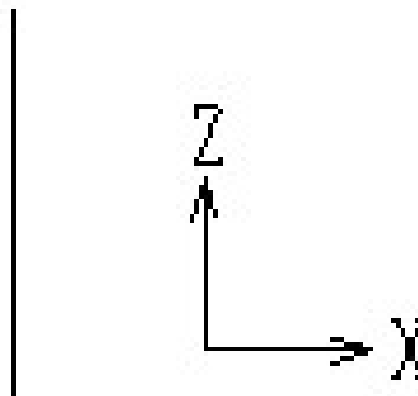


図 12-1 隅角部モデルの概要

論文件数	403 件
使用した繊維数	500 件
炭素繊維	203 件
アラミド繊維	99 件
鋼繊維	81 件
ガラス繊維	30 件
その他	87 件

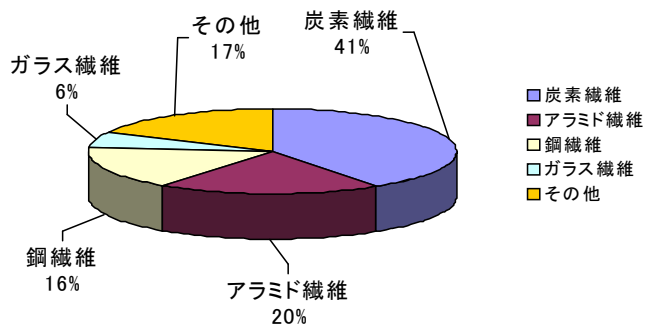


図 1-1 全論文中の各繊維の割合¹⁾²⁾³⁾

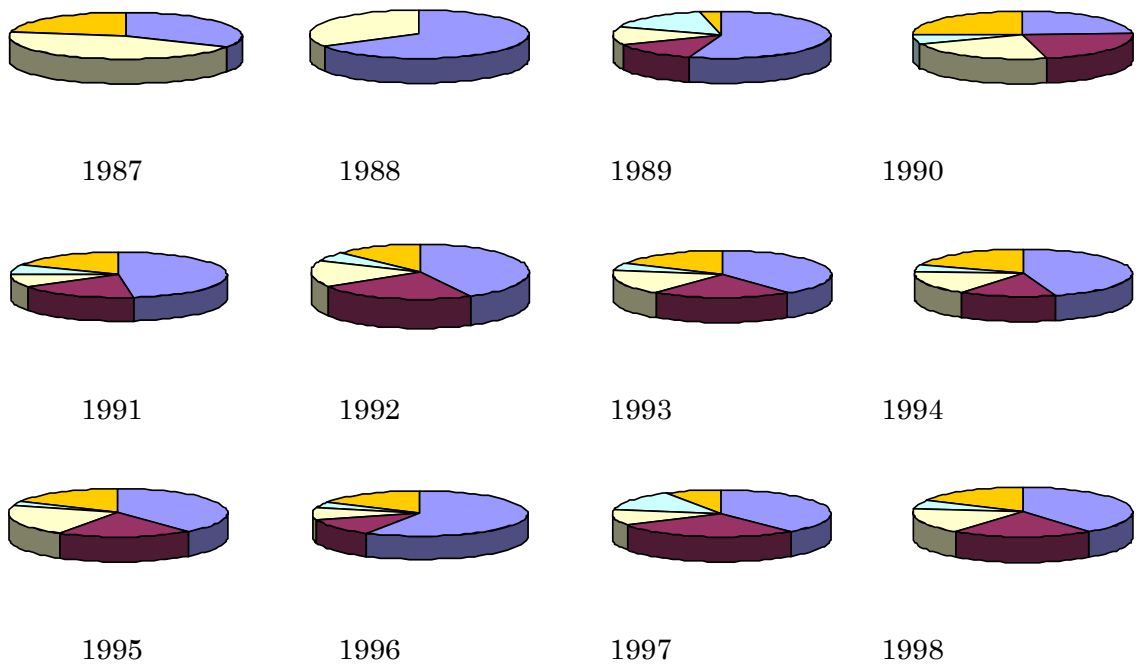


図 1-2 各年度毎の論文における繊維の割合¹⁾²⁾³⁾

件数

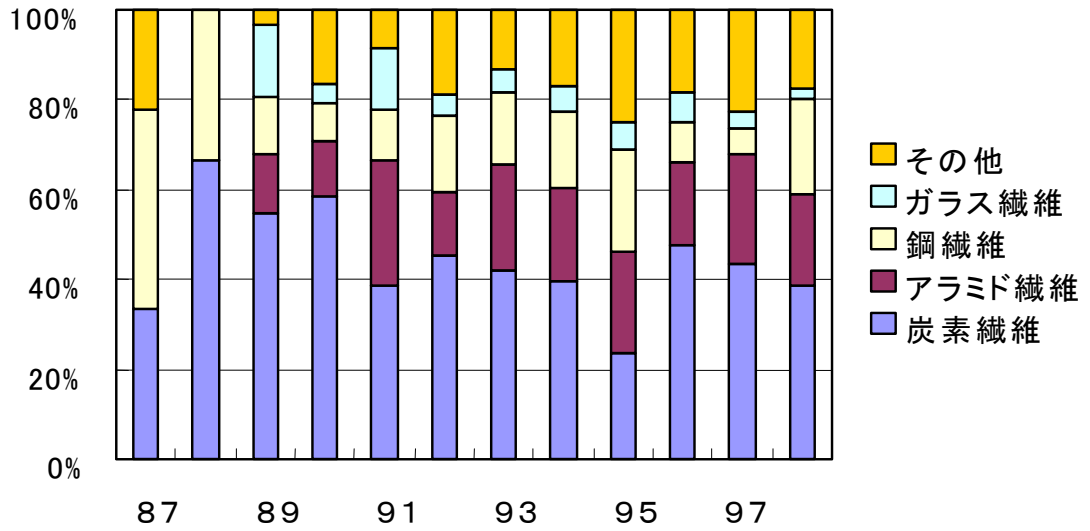


図 1-3.年代別発表論文に占める各繊維の割合 1)2)3)

件数

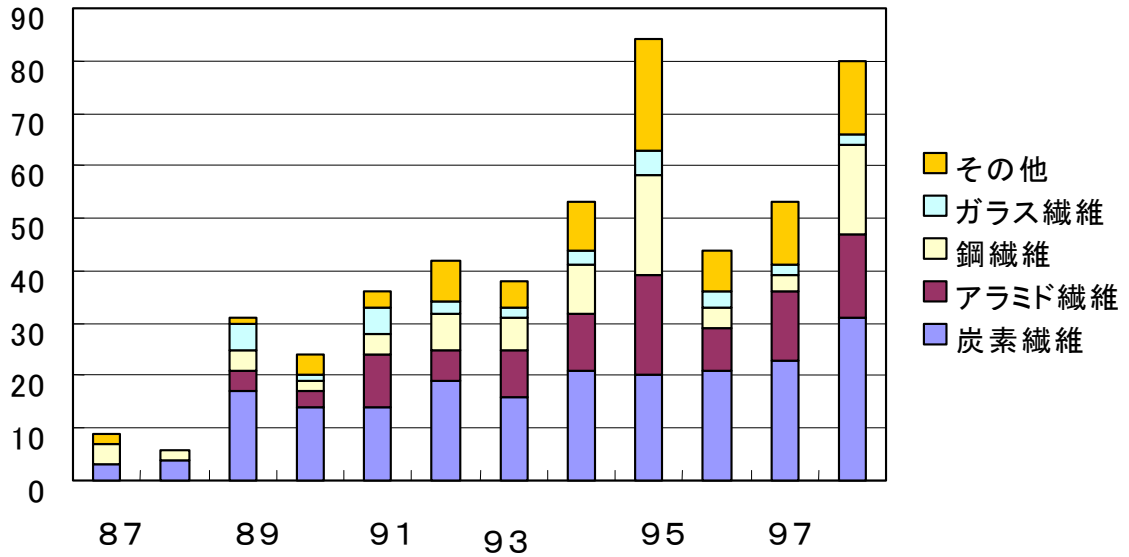


図 1-4. 各年代別の繊維補強に関する論文件数の変移 1)2)3)

件数

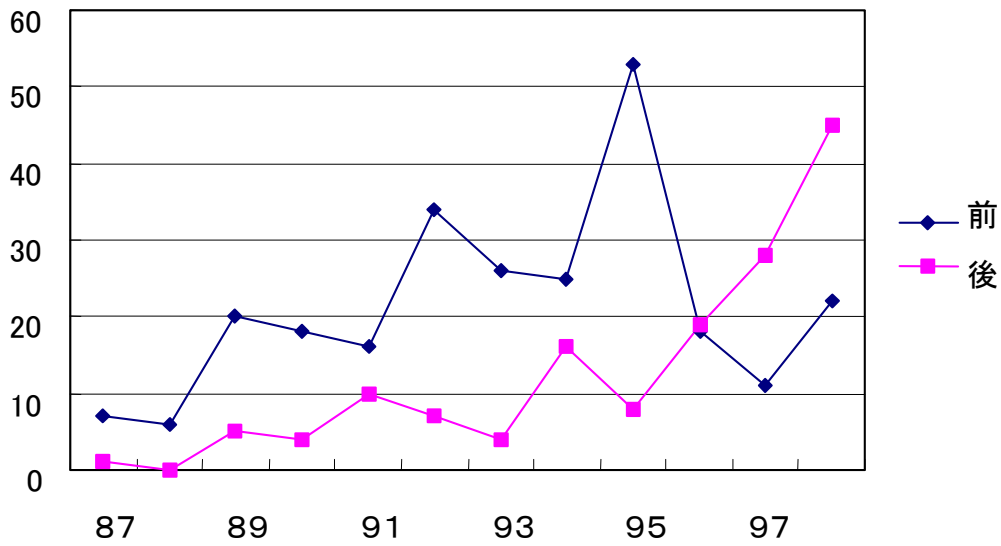


図 1-5 前補強と後補強の論文件数の変移¹⁾²⁾³⁾

件数

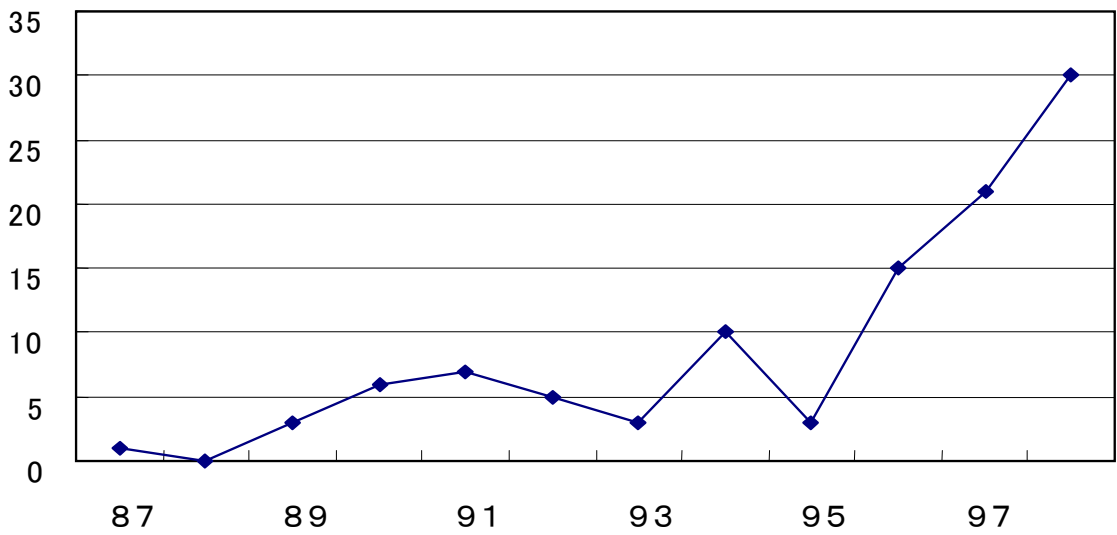


図 1-6 繊維シートに関する論文発表件数の変移¹⁾²⁾³⁾

件数

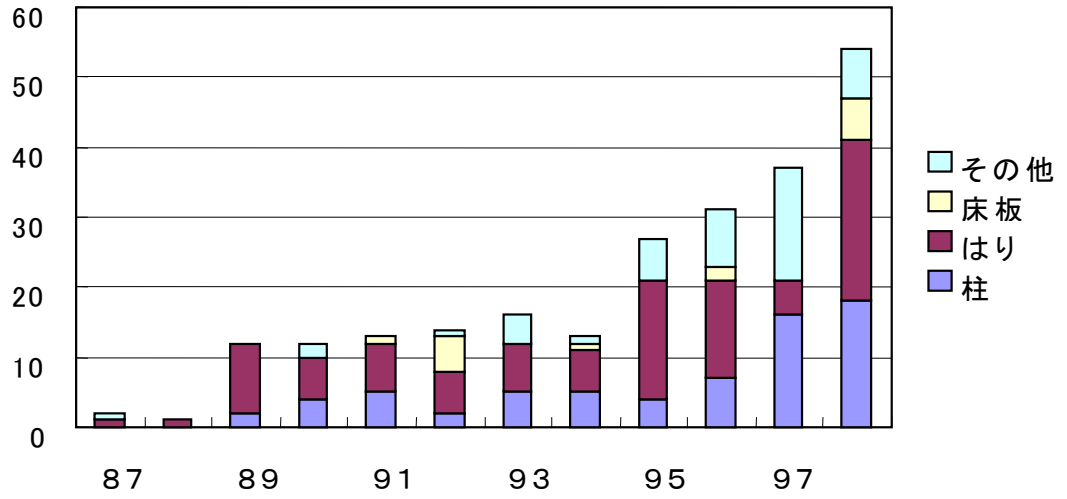


図 1-7 繊維シートの適用箇所¹⁾²⁾³⁾

炭素繊維シート単純引き張り実験

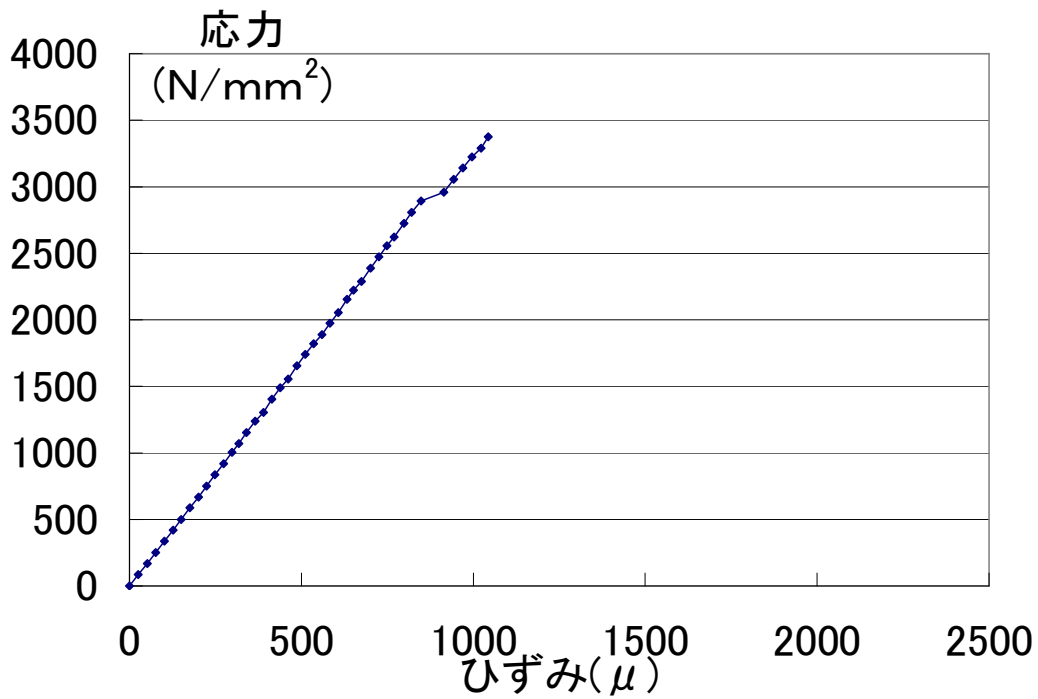


図 5-1 炭素繊維シートの応力-ひずみ関係

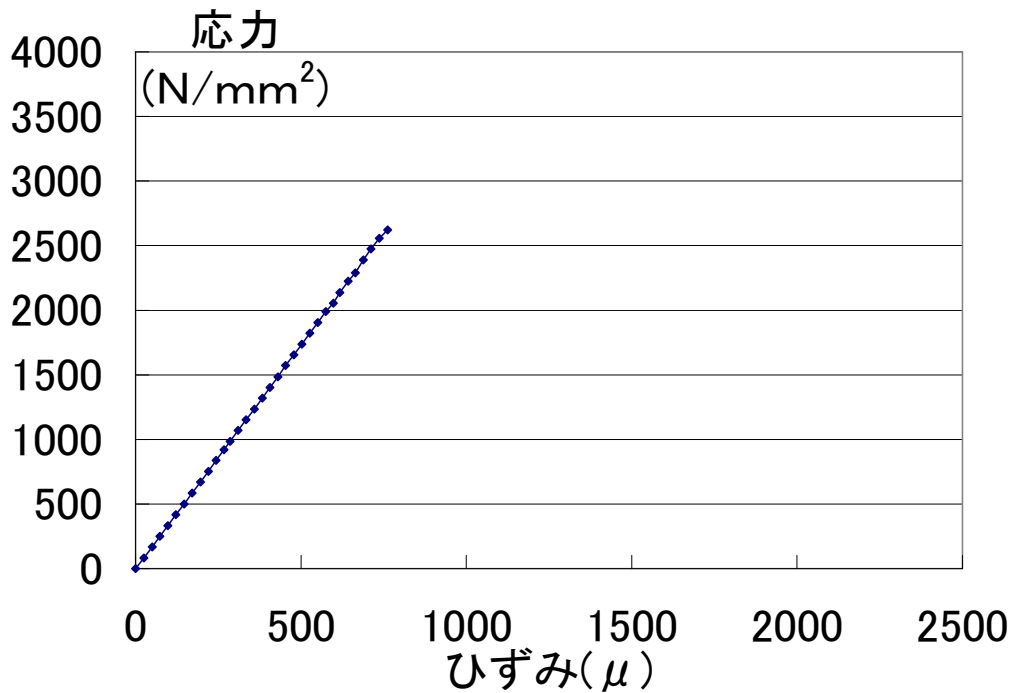


図 5-2 炭素繊維シートの応力-ひずみ関係

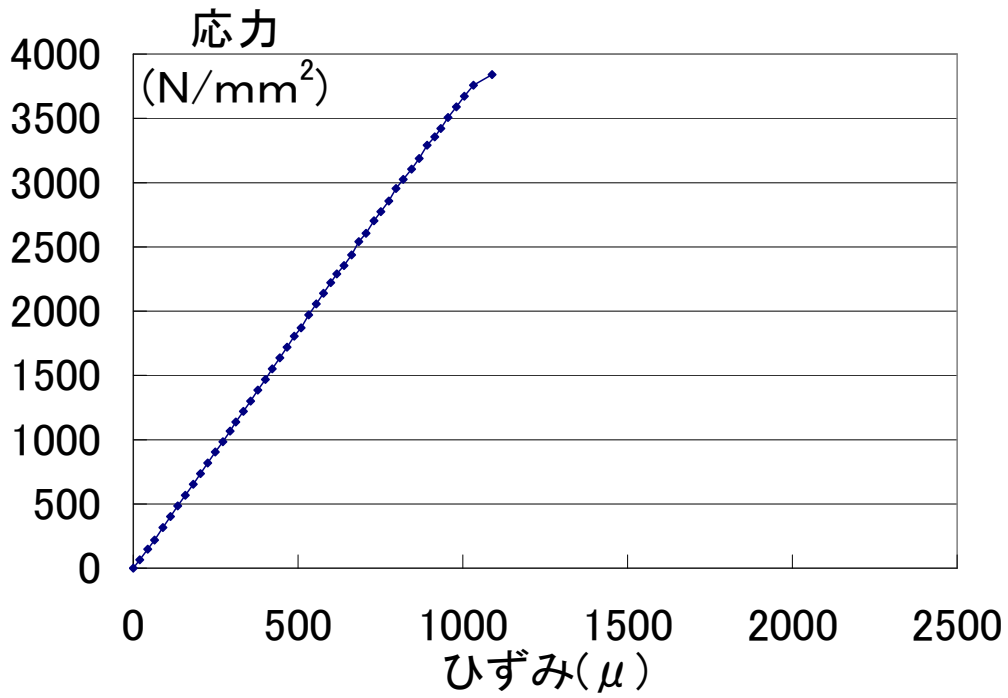


図 5-3 炭素繊維シートの応力-ひずみ関係

アラミド繊維シート単純引き張り実験

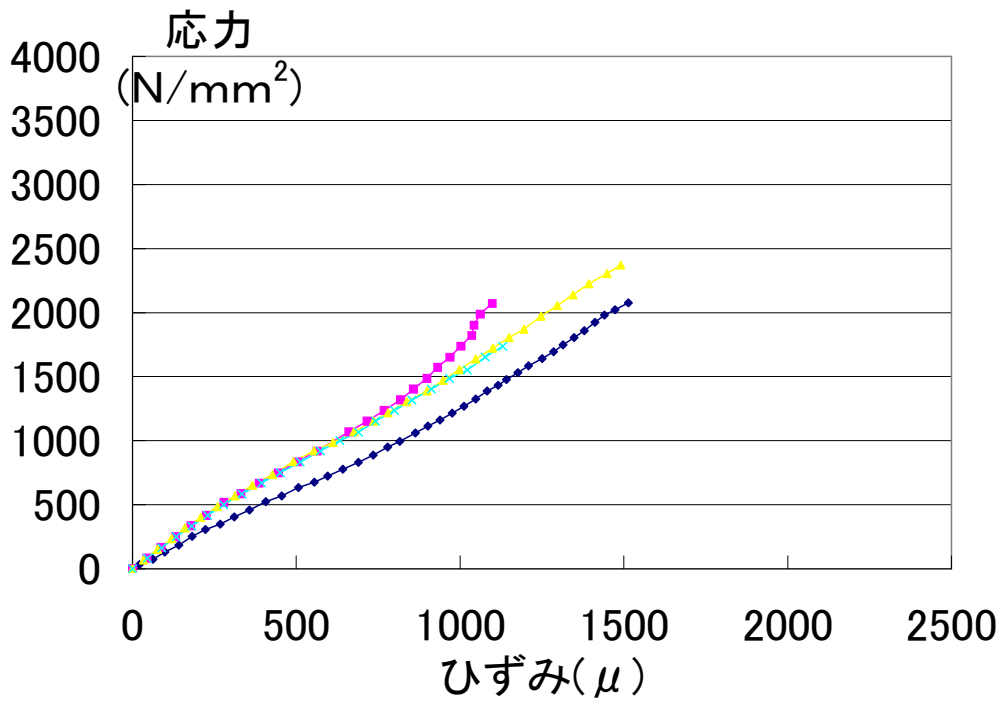


図 5-4 アラミド繊維シート (A T-40-1) 応力-ひずみ関係

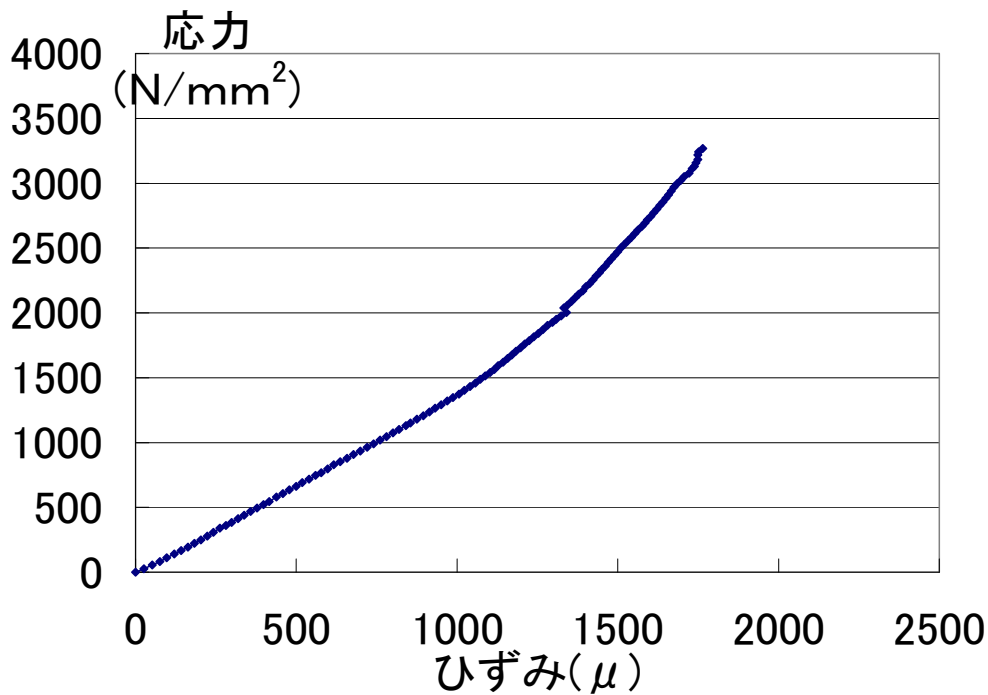


図 5-5 アラミド繊維シート (A T-40-3) 応力-ひずみ関係

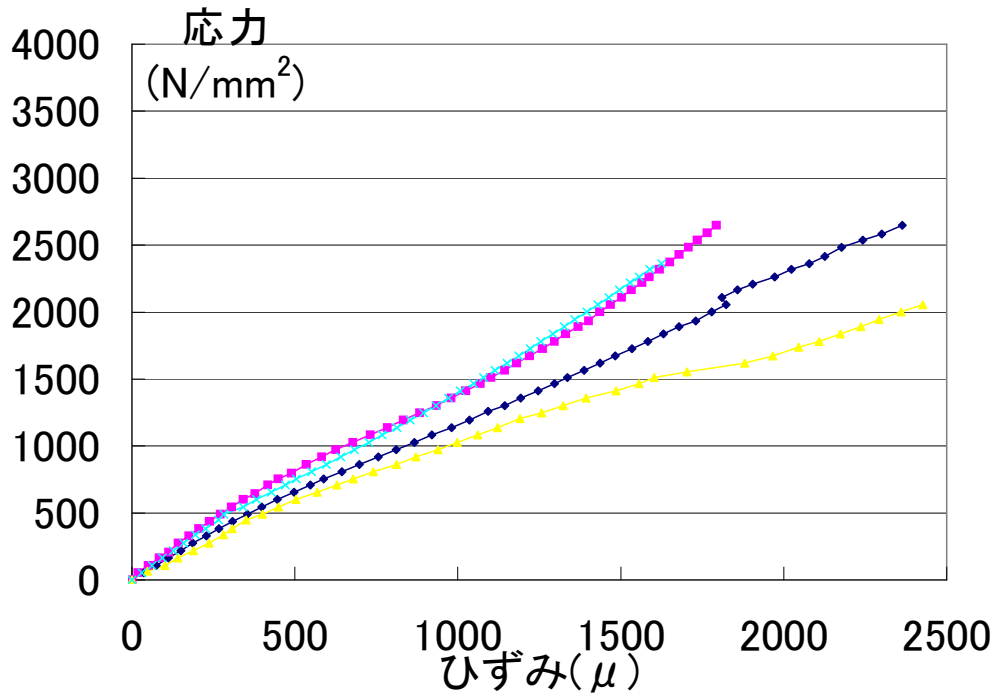


図 5-6 アラミド繊維シート (A T-60-1) 応力-ひずみ関係

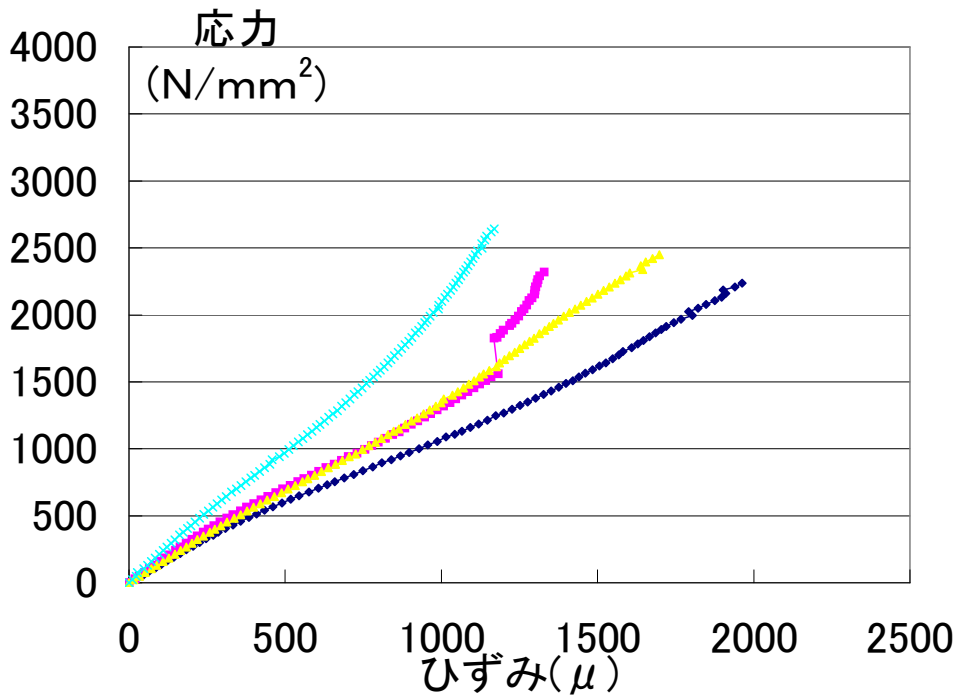


図 5-7 アラミド繊維シート (A T-60-2) 応力-ひずみ関係

アンカーボルト引き抜き実験

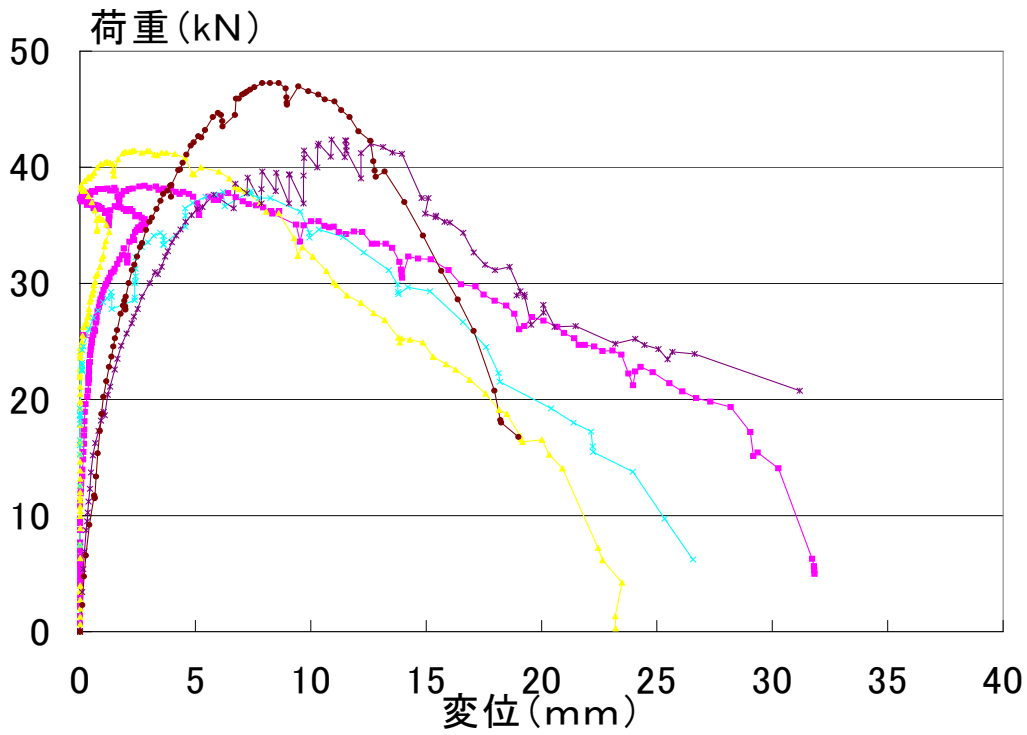


図 5-8 アンカーボルトの荷重-変位関係
(コンクリメントを用いた場合)

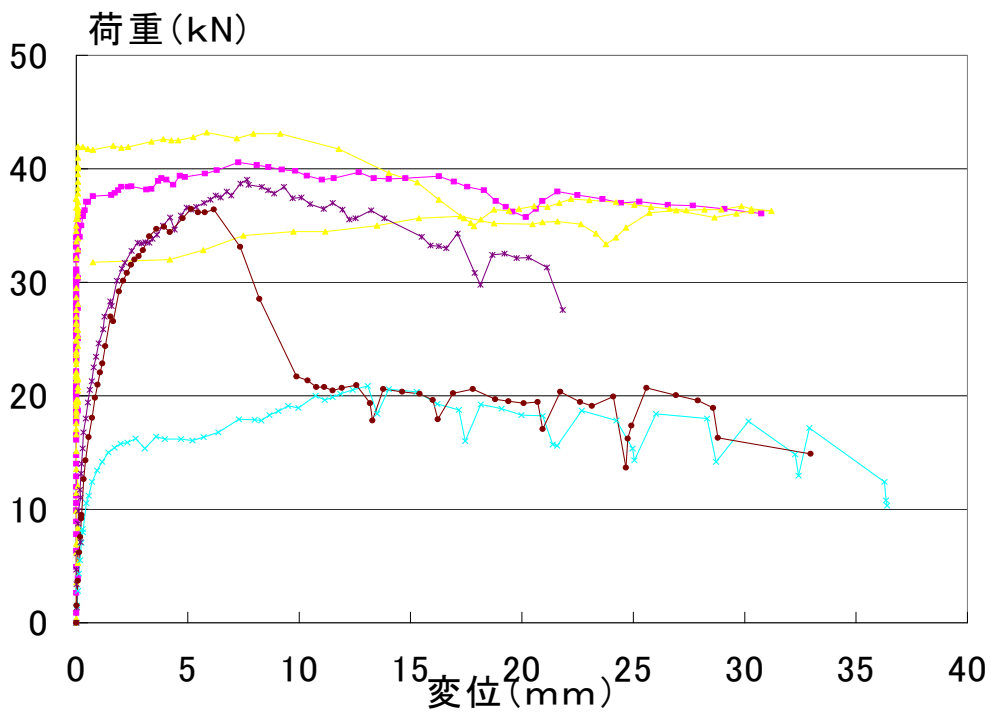


図 5-9 アンカーボルトの荷重-変位関係
(セメントメンダを用いた場合)

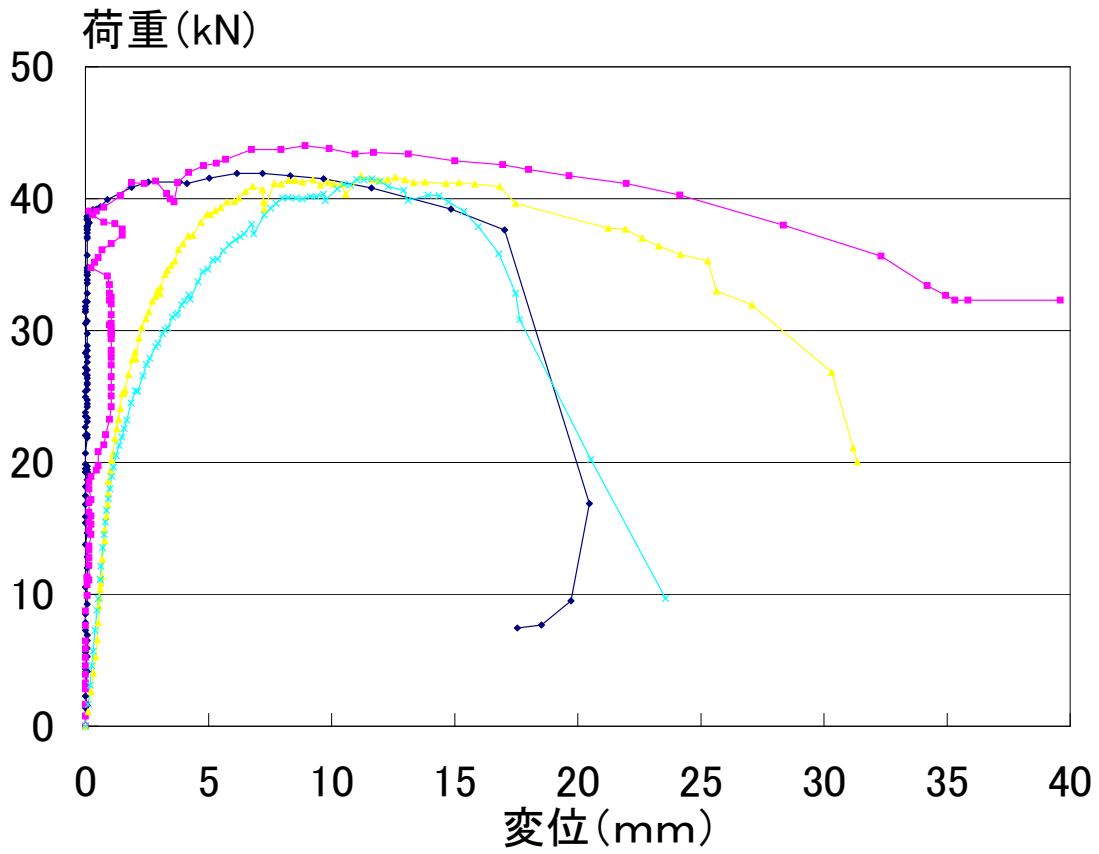


図 5-10 アンカーボルトの荷重-変位関係
(アンカーボルトのみの場合)

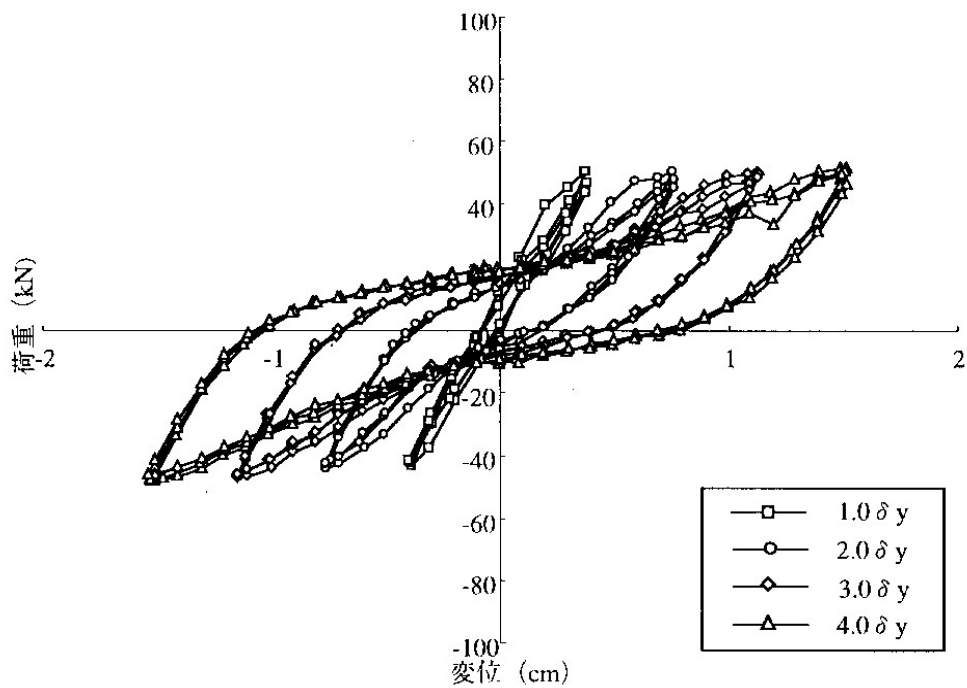


図 7-1 荷重—変位関係 (N-type)

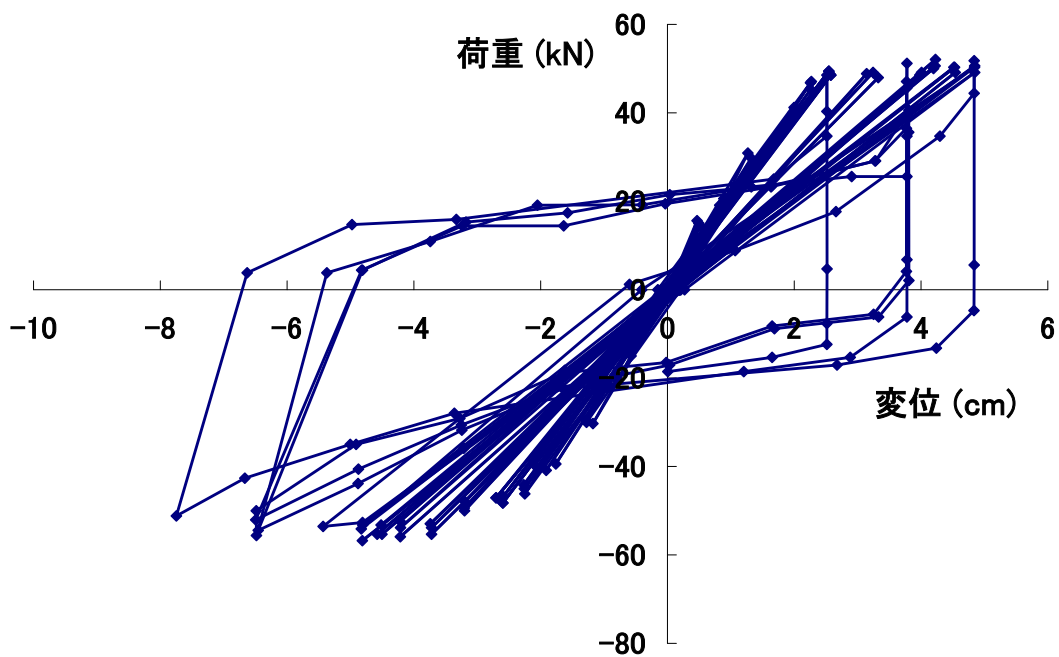


図 7-2 橋脚先端の荷重-変位関係 (CP-type)

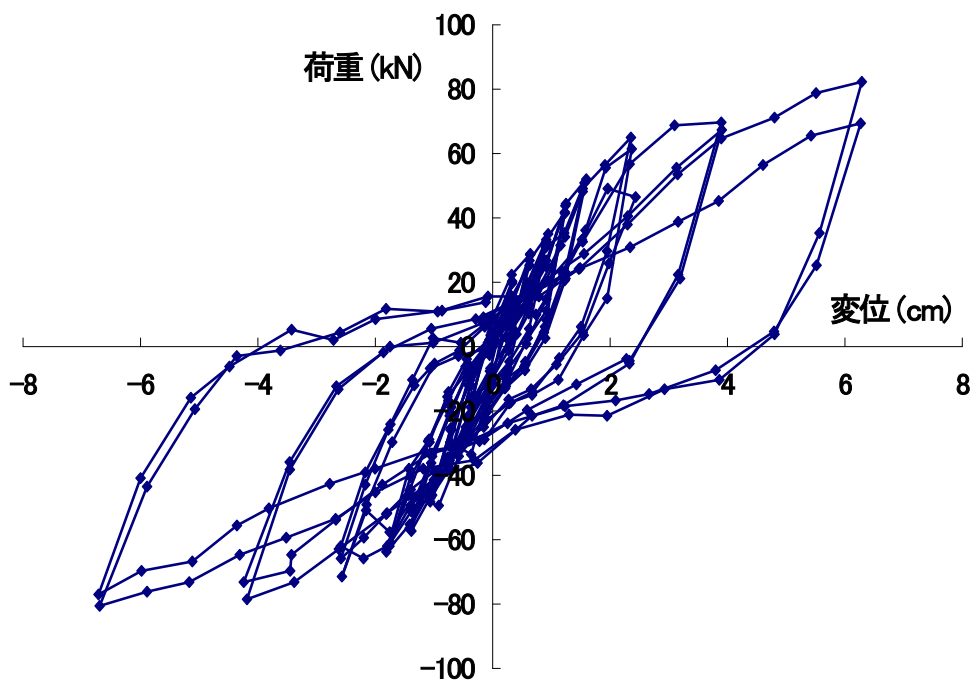


図 7-3 橋脚先端の荷重-変位関係 (CL-type)

無次元化荷重振幅

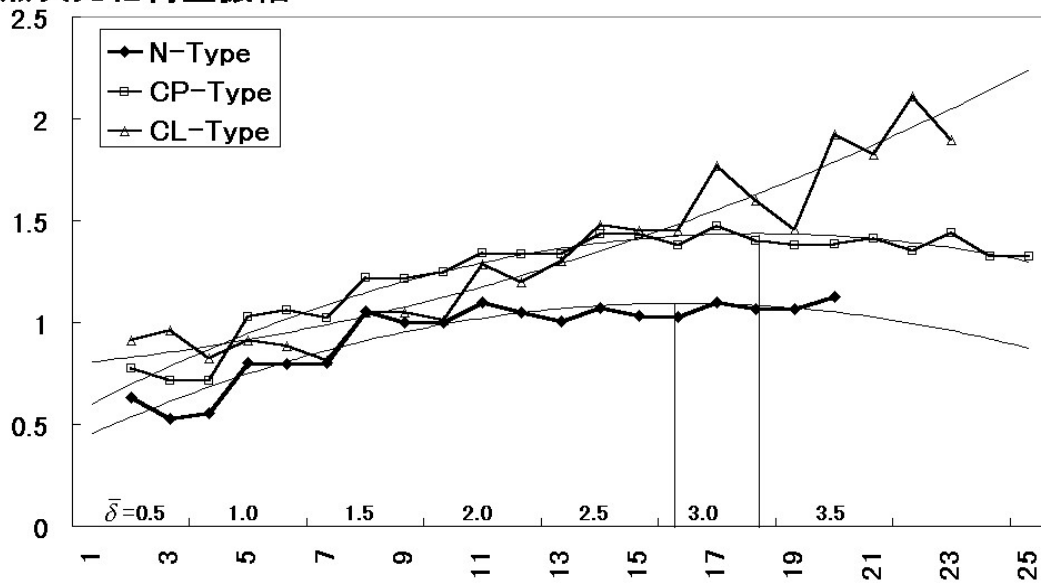


図 7-4 無次元化荷重振幅-載荷回数 (CFS)

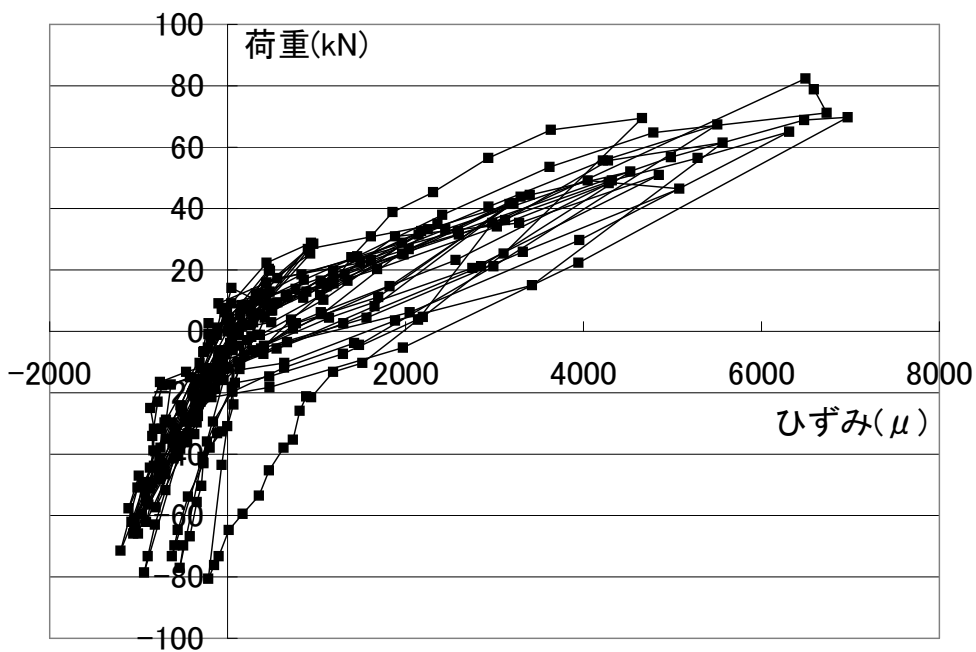


図 7-5 繊維シートの載荷荷重-ひずみ関係 (CL-type)

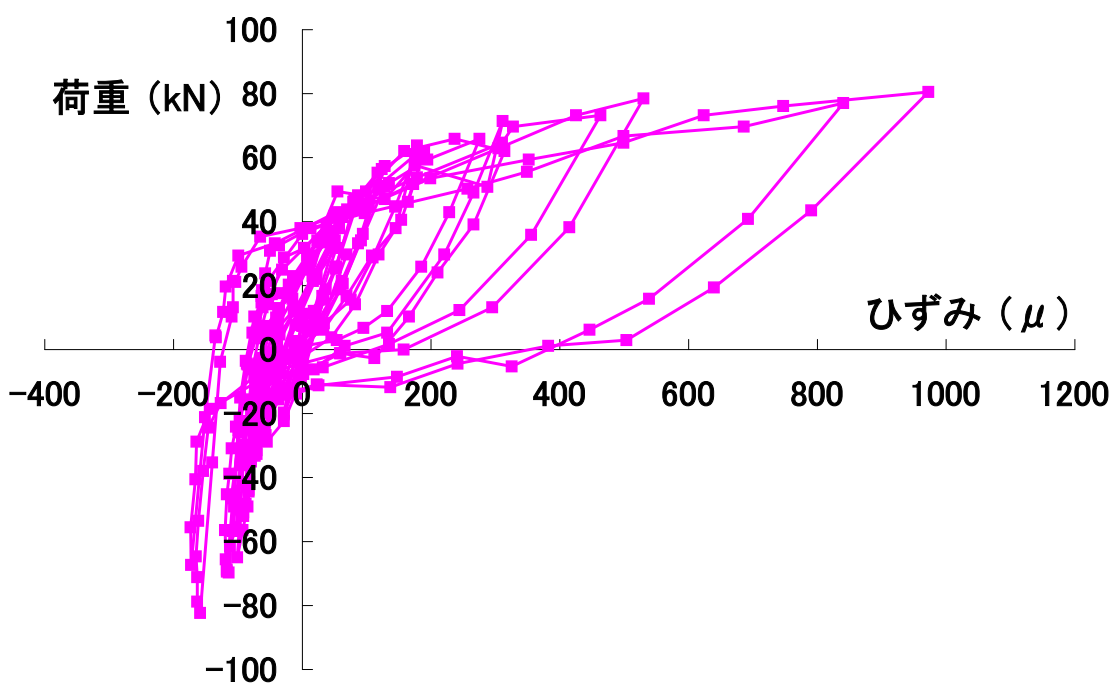


図 7-6 鋼板底辺の荷重-ひずみ関係 (CL-type)

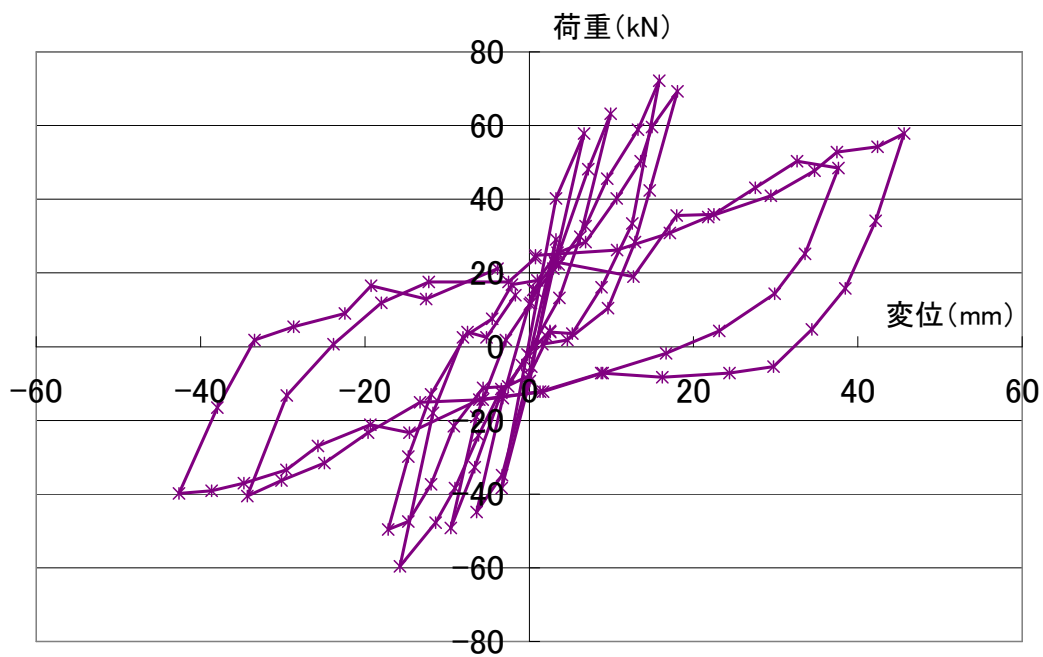


図 7-7 橋脚先端の載荷荷重-変位関係 (AP-type)

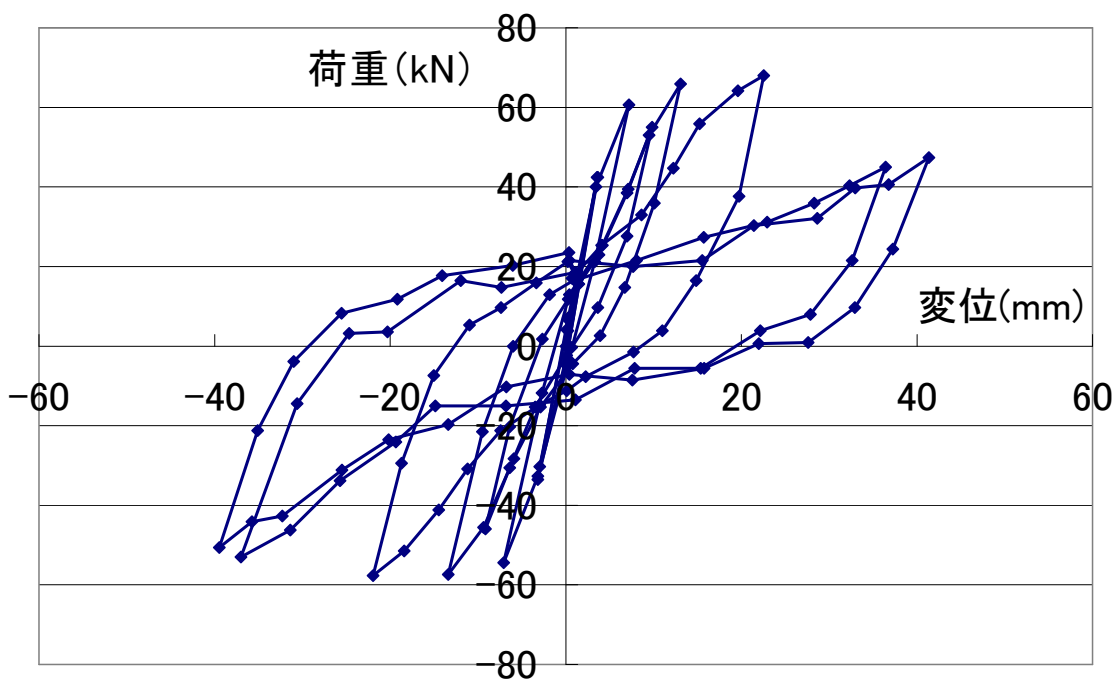


図 7-8 橋脚先端の載荷荷重-変位関係 (AL-Type)

無次元化荷重振幅

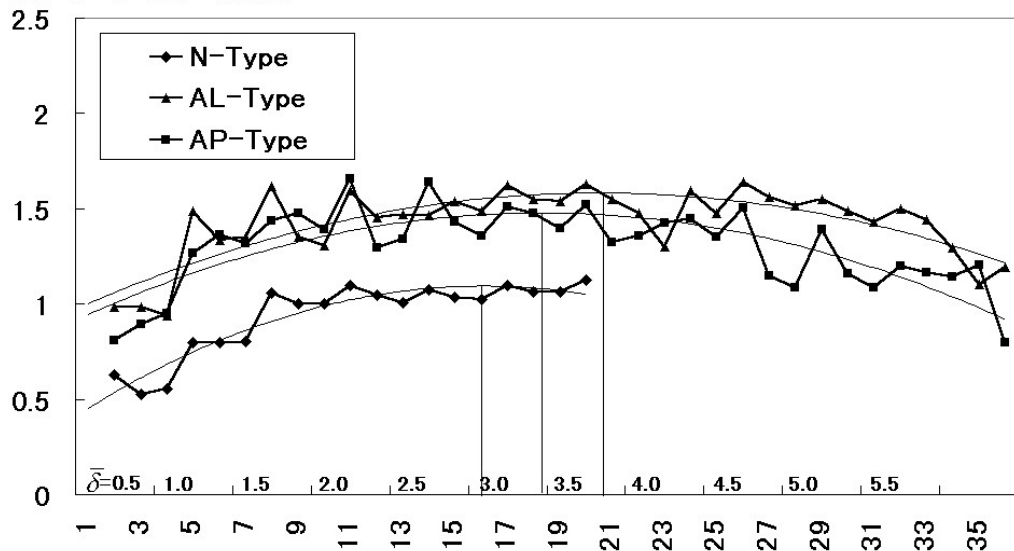


図 7-9 無次元化荷重振幅-載荷回数 (AFS)

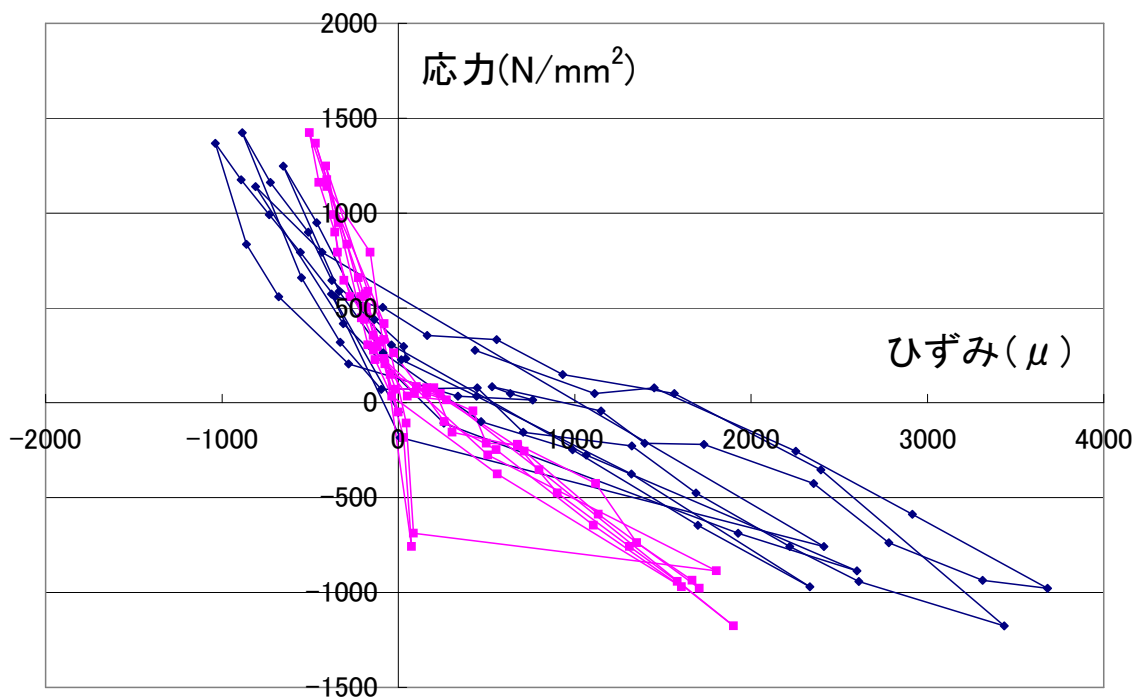


図 7-10 繊維シートに貼り付けた繊維シート (AP-type)

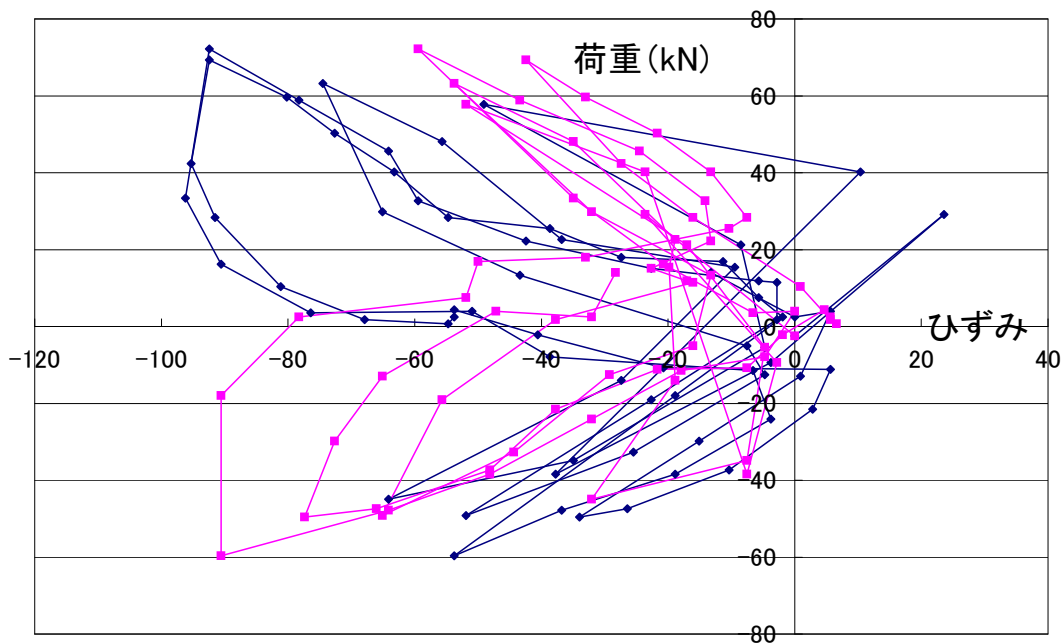


図 7-11 鋼板に貼り付けたひずみゲージ (AP-type)

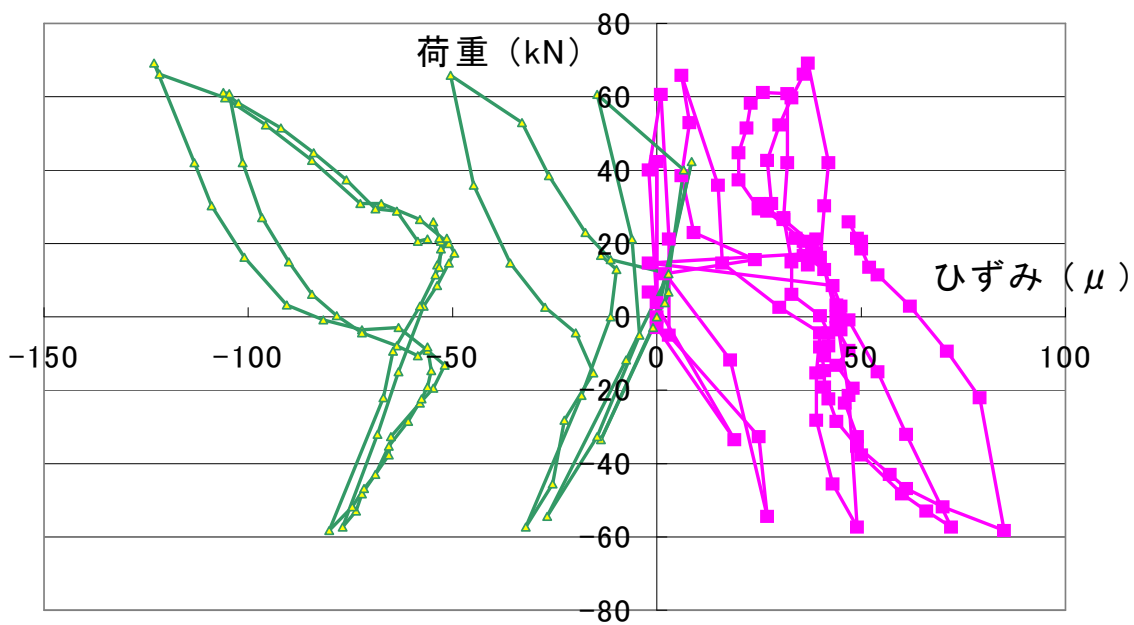


図 7-12 鋼板に使用したひずみゲージ (AL-type)

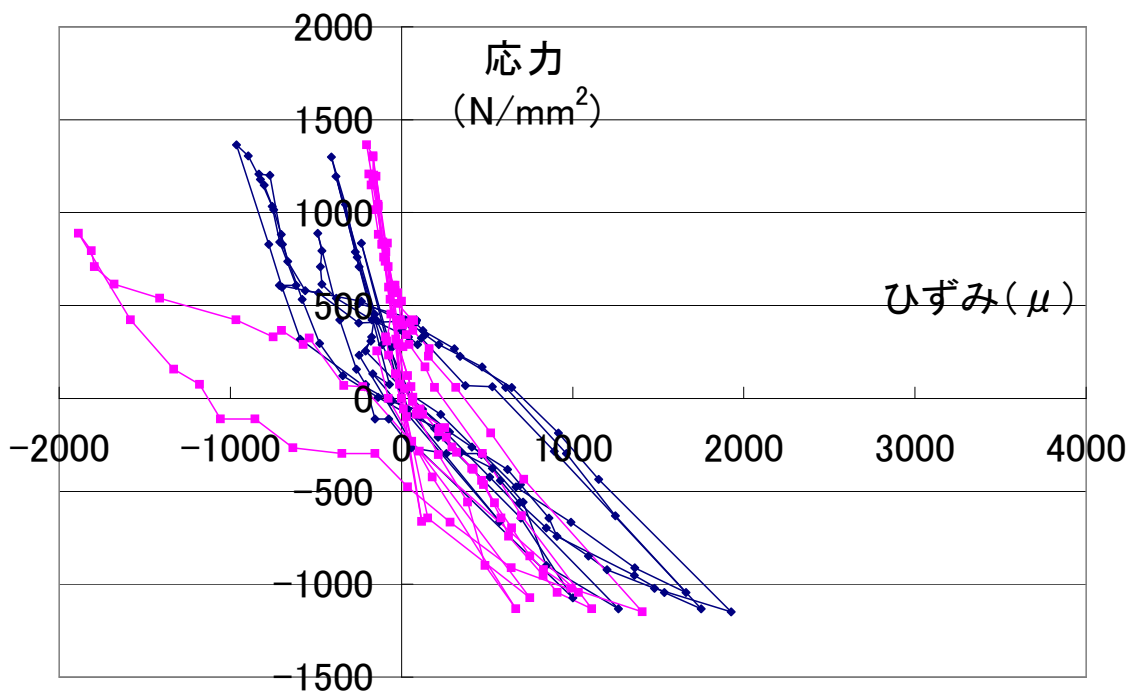


図 7-13 繊維シートに貼り付けたひずみゲージのグラフ (AL-type)

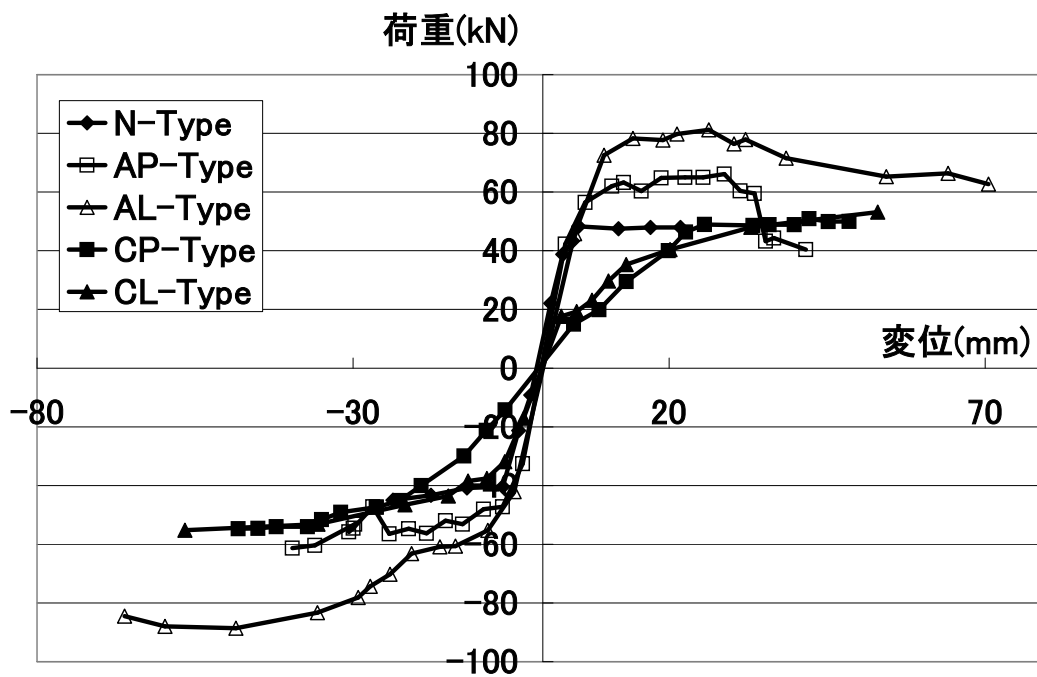
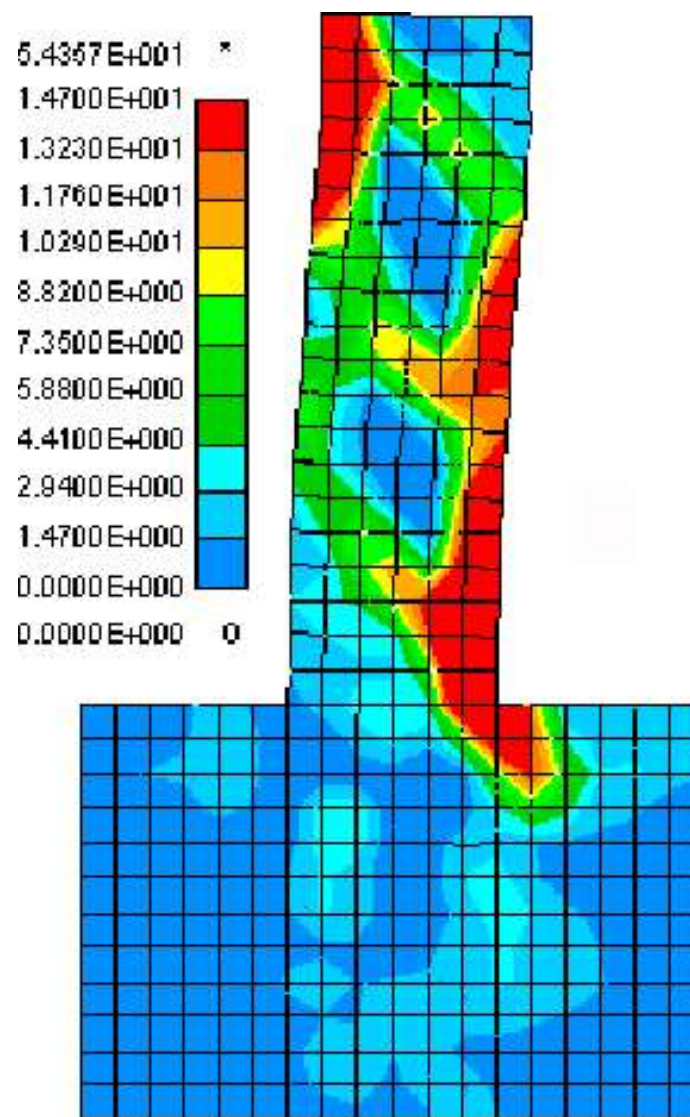
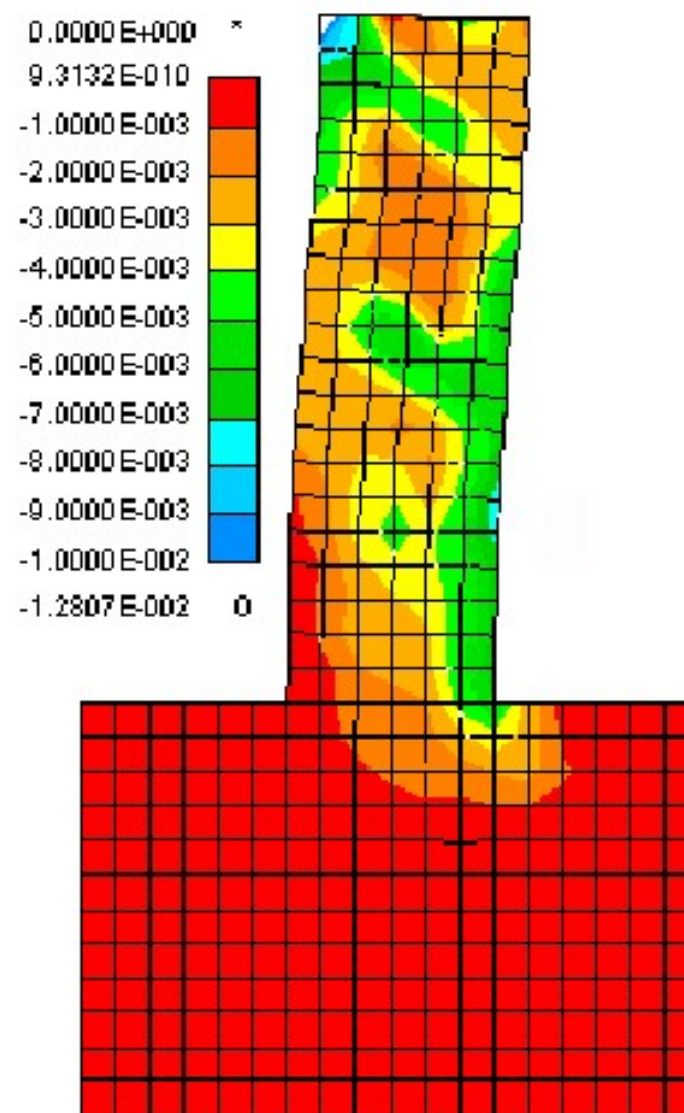


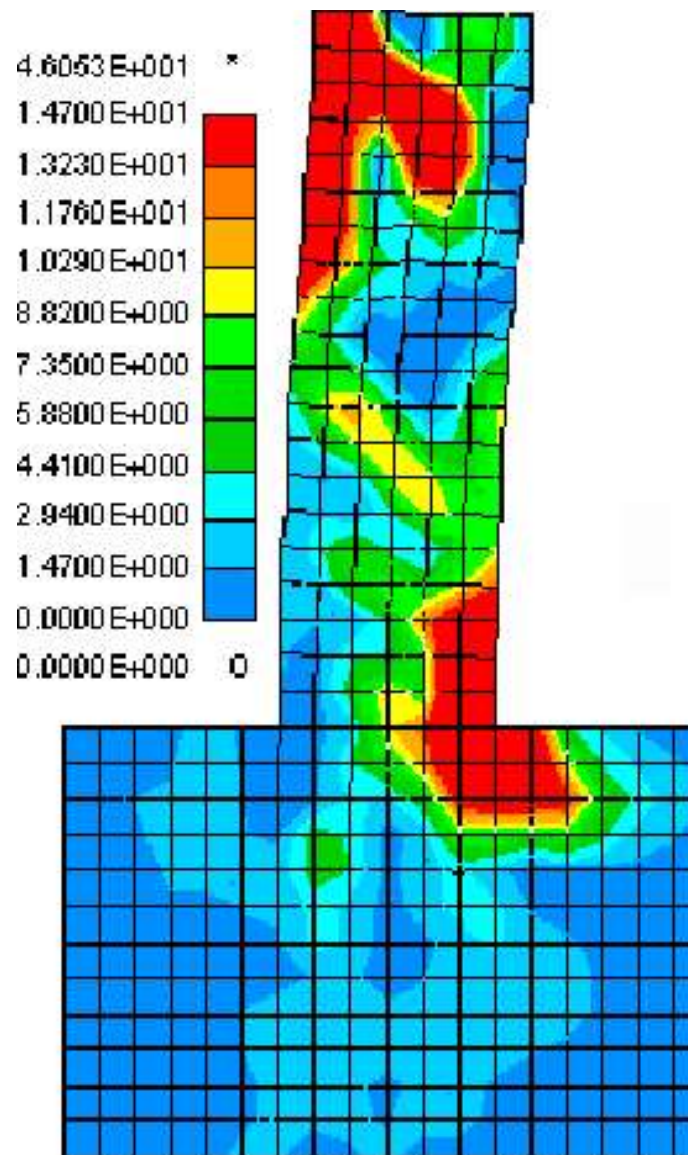
図 7-14 履歴曲線



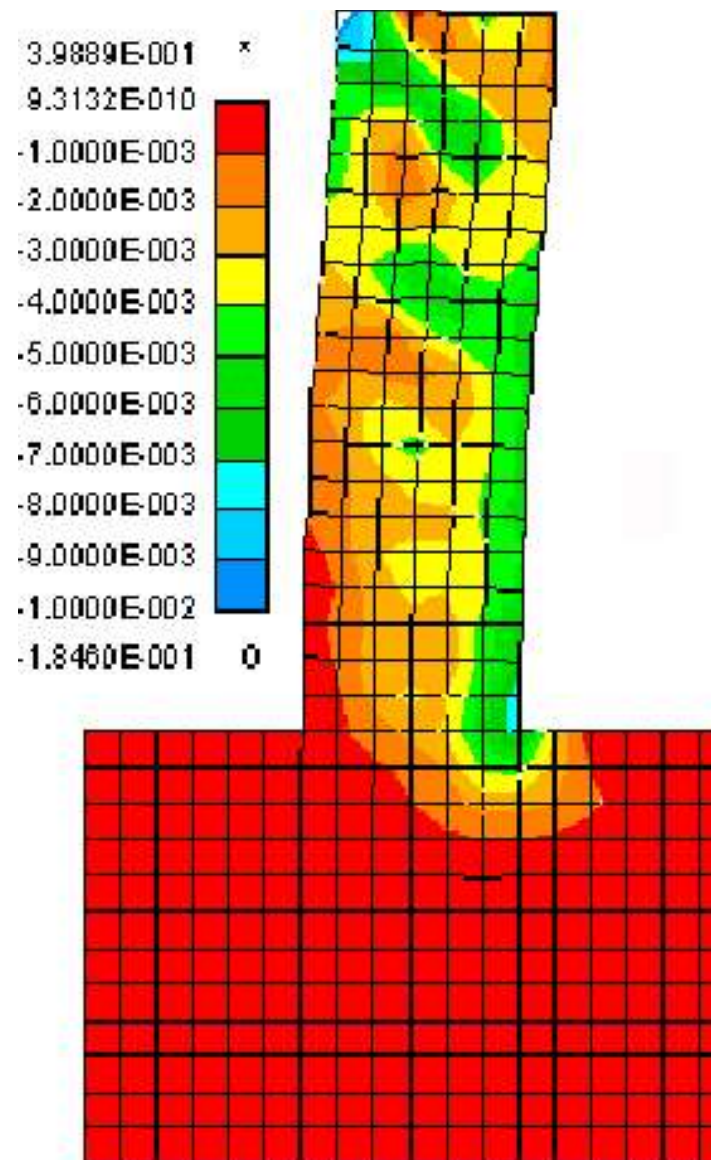
(a) 無補強供試体



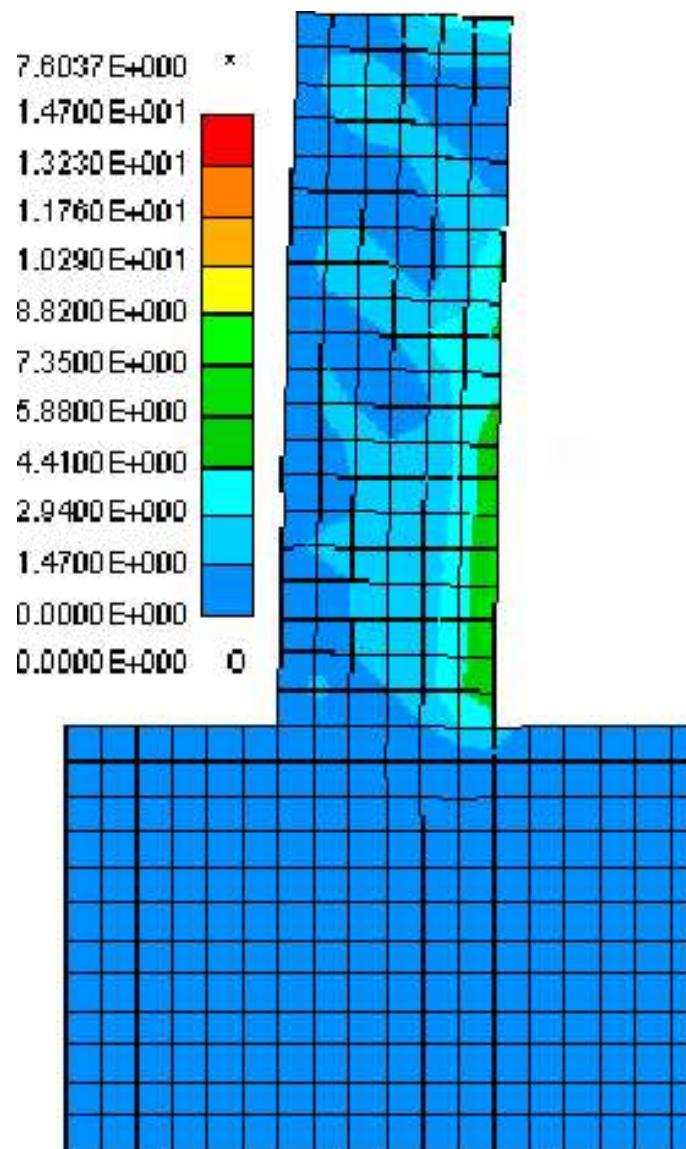
(b) 無補強供試体



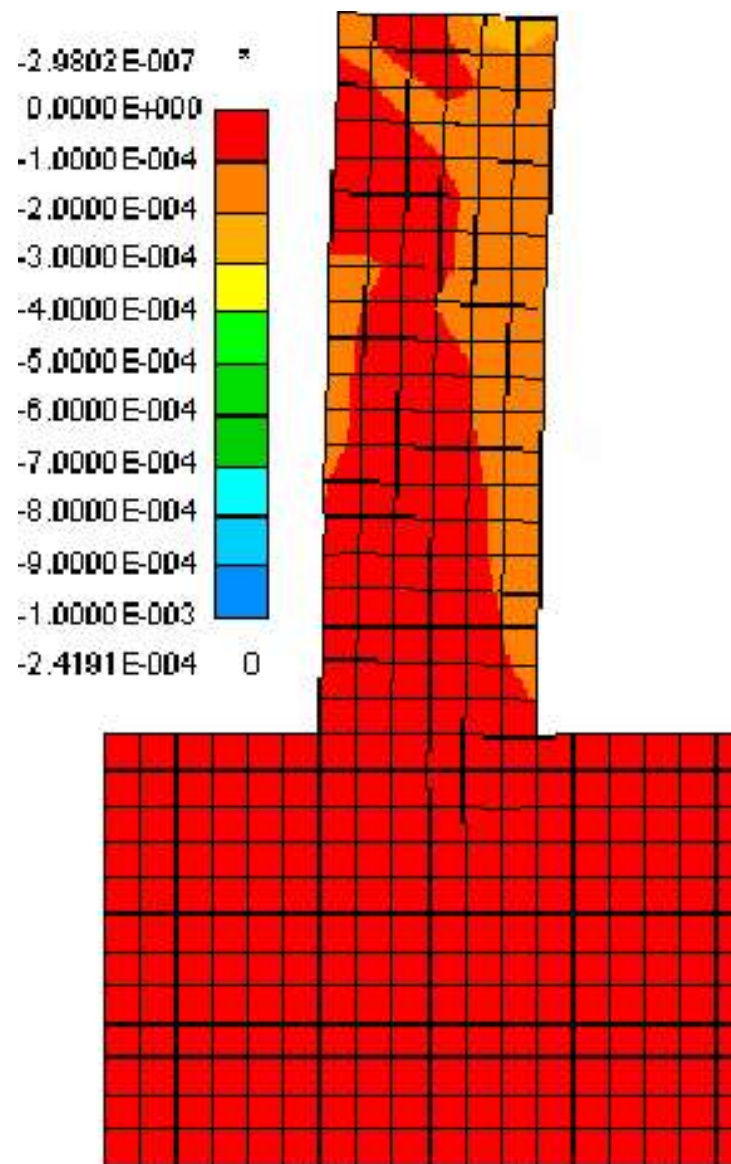
(b) CFS のみの補強



(b) CFS のみの補強



(c) 考案した定着工法による補強
 図 9-1 橋脚モデル相当応力分布図



(c) 考案した定着工法による補強
 図 9-2 橋脚モデル相当塑性ひずみ分布図

無次元化荷重

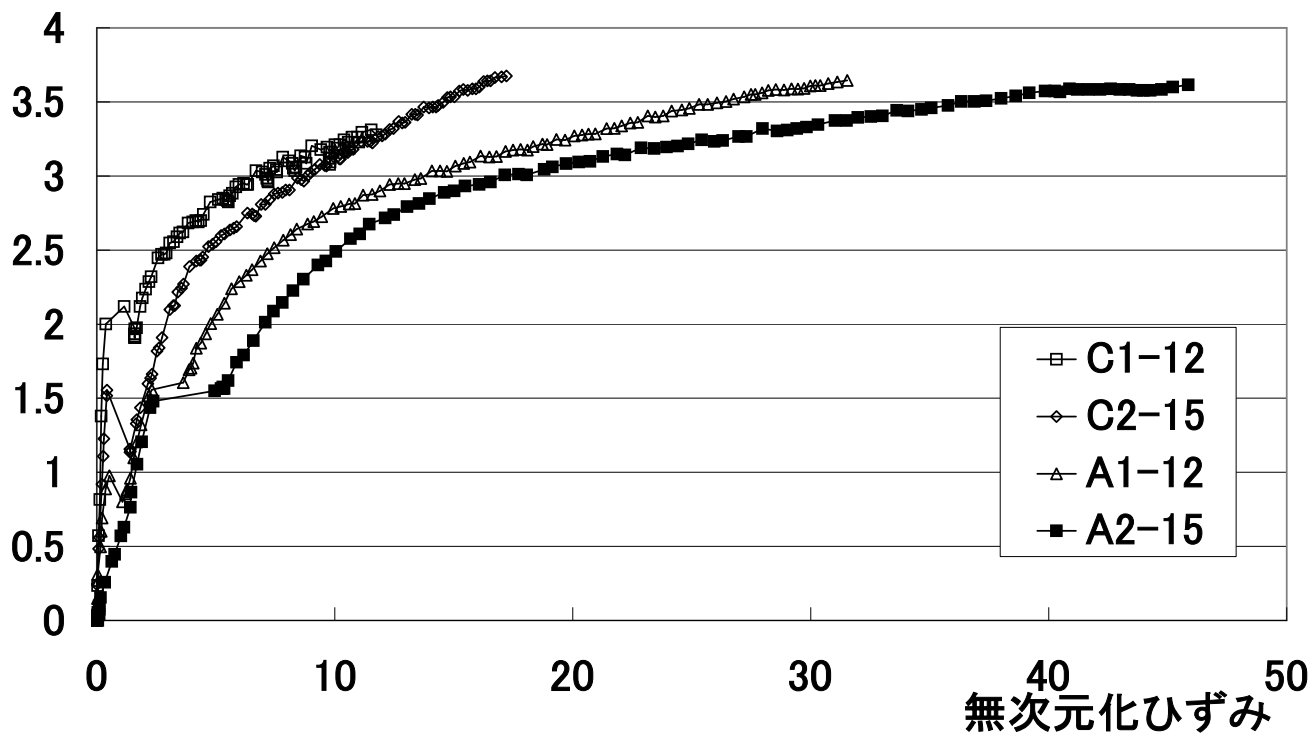


図 11-1 被定着体の荷重-変位関係

無次元化荷重

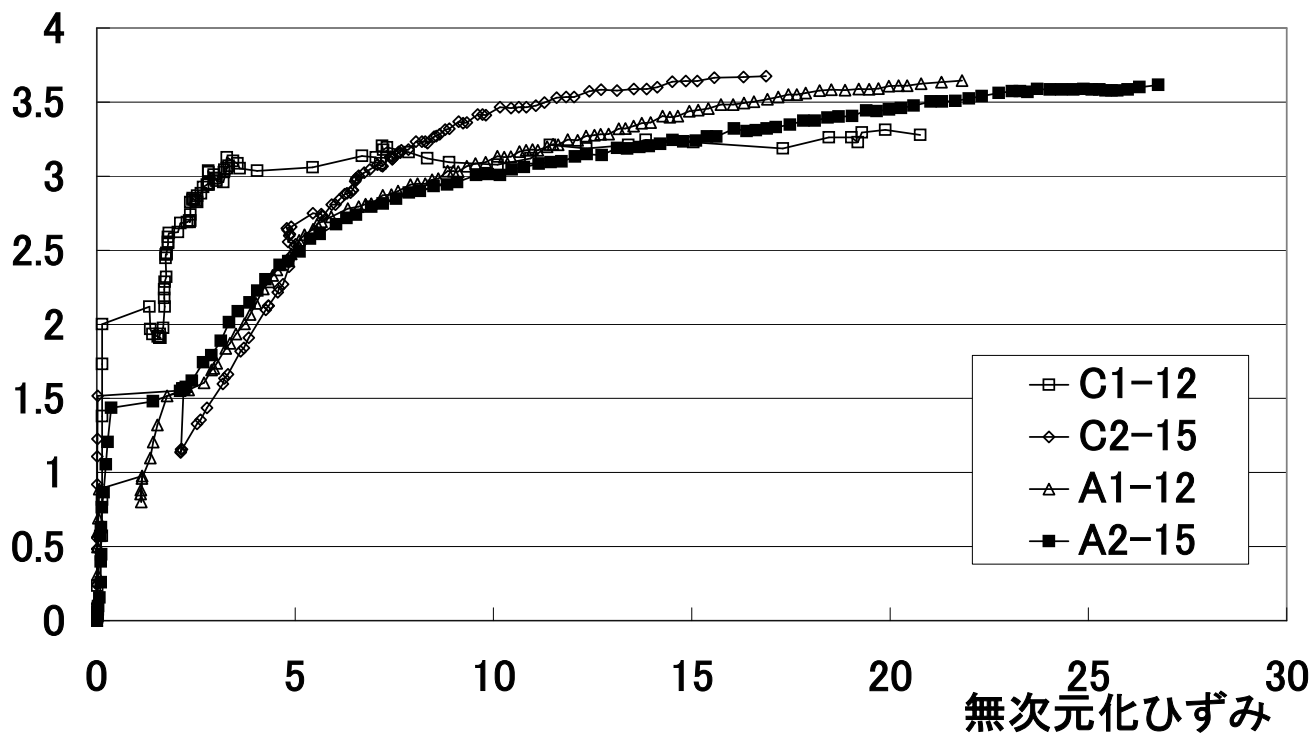


図 11-2 治具の荷重-変位関係

無次元化荷重

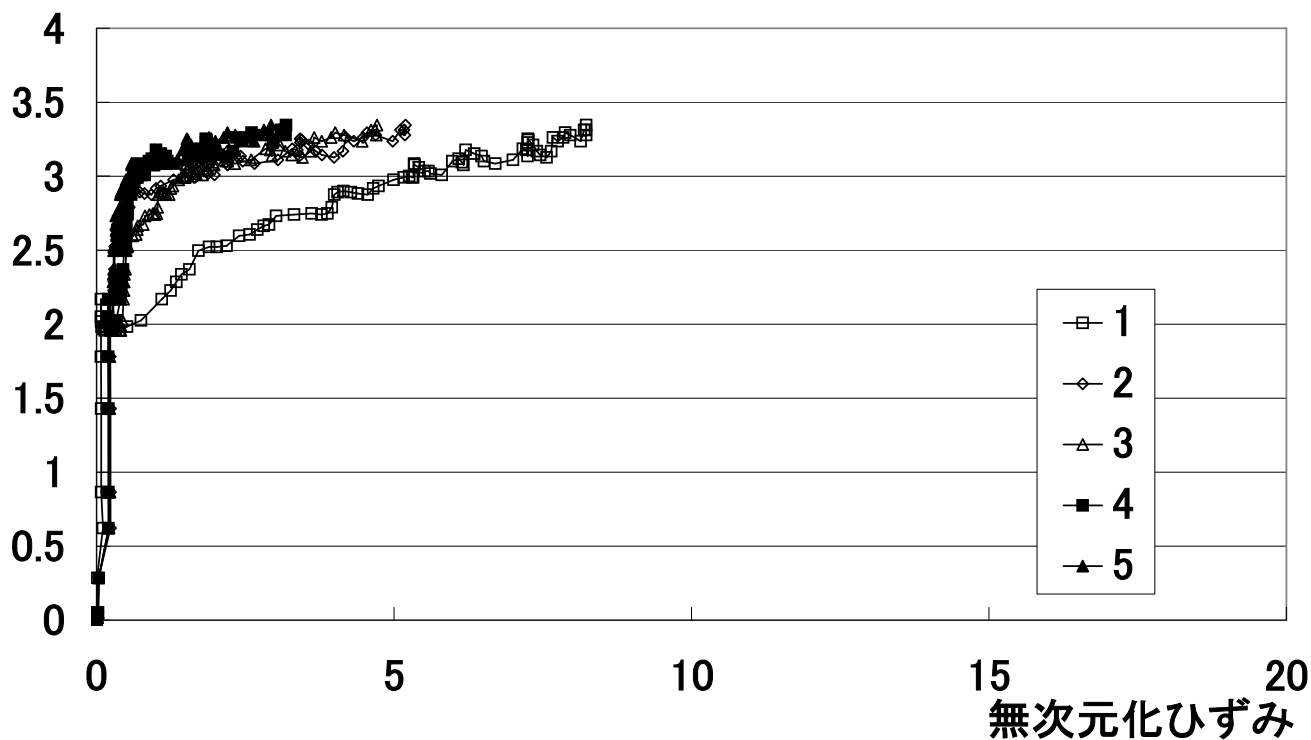


図 11-3 治具の応力集中ゲージ (C1-12)

無次元化荷重

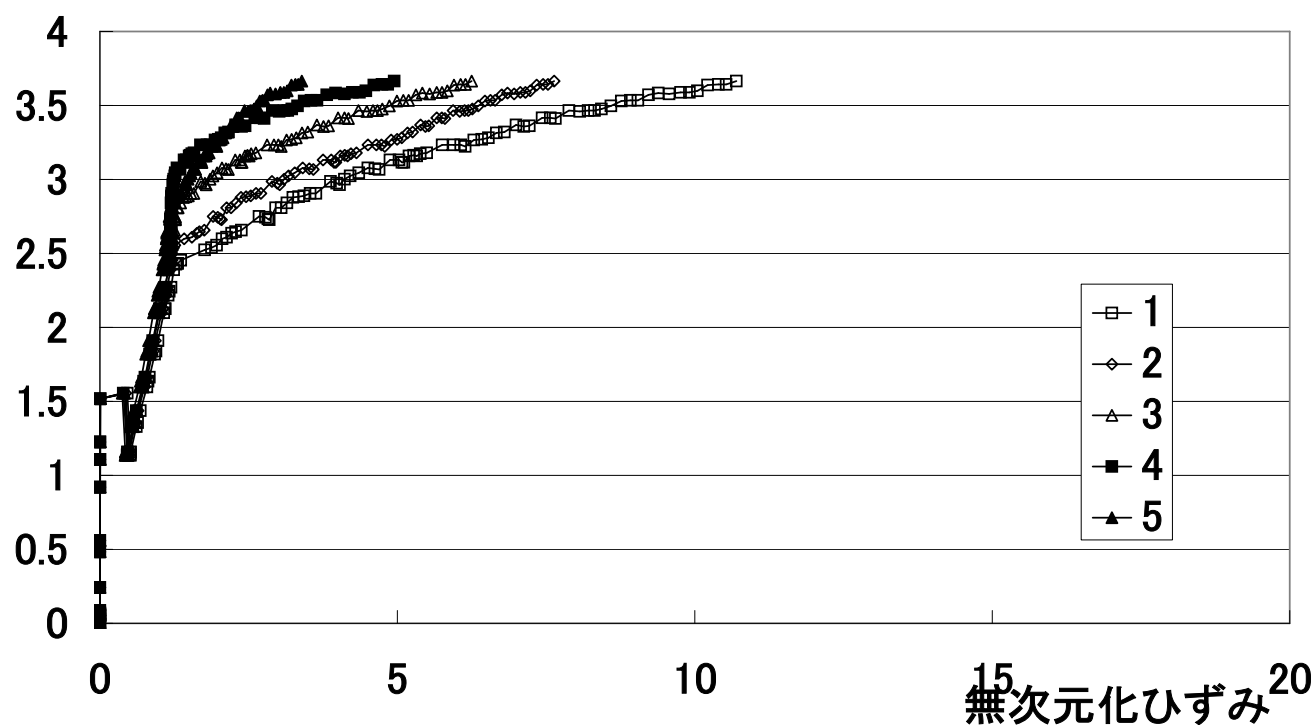


図 11-4 治具の応力集中ゲージ (C2-15)

無次元化荷重

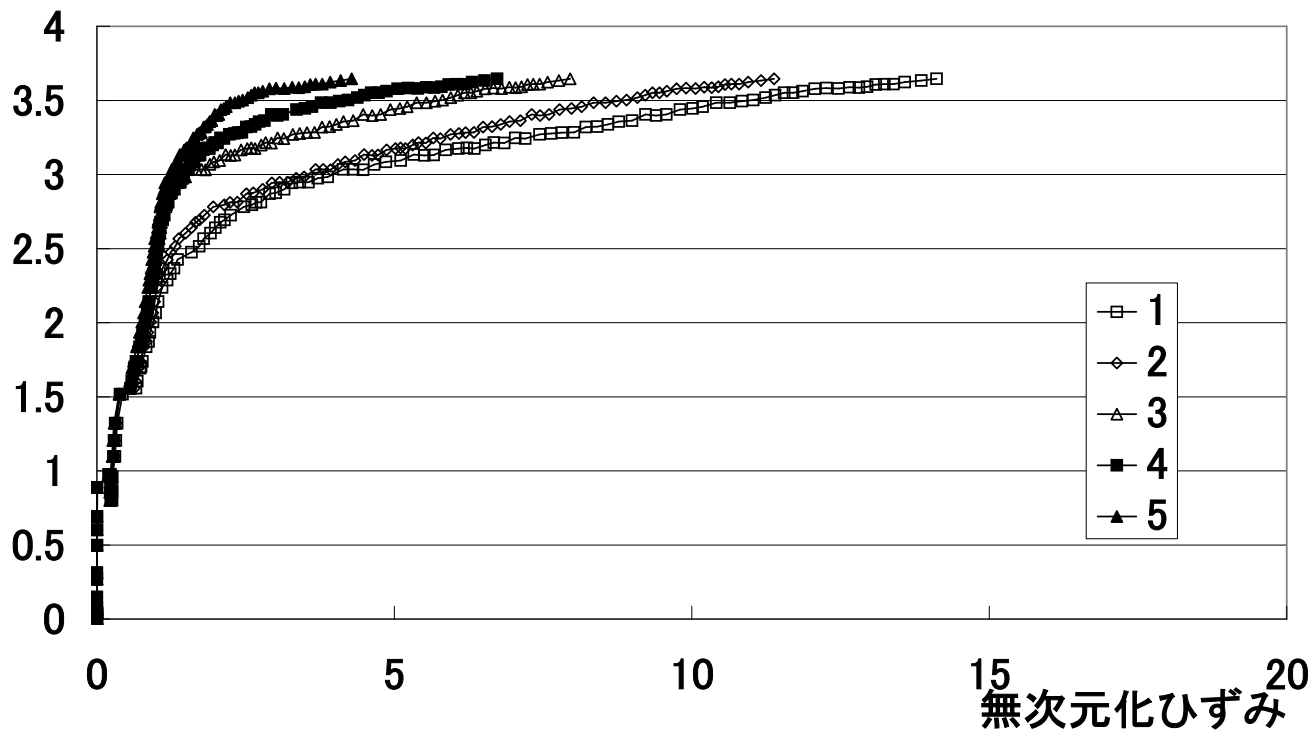


図 11-5 治具の応力集中ゲージ (A1-12)

無次元化荷重

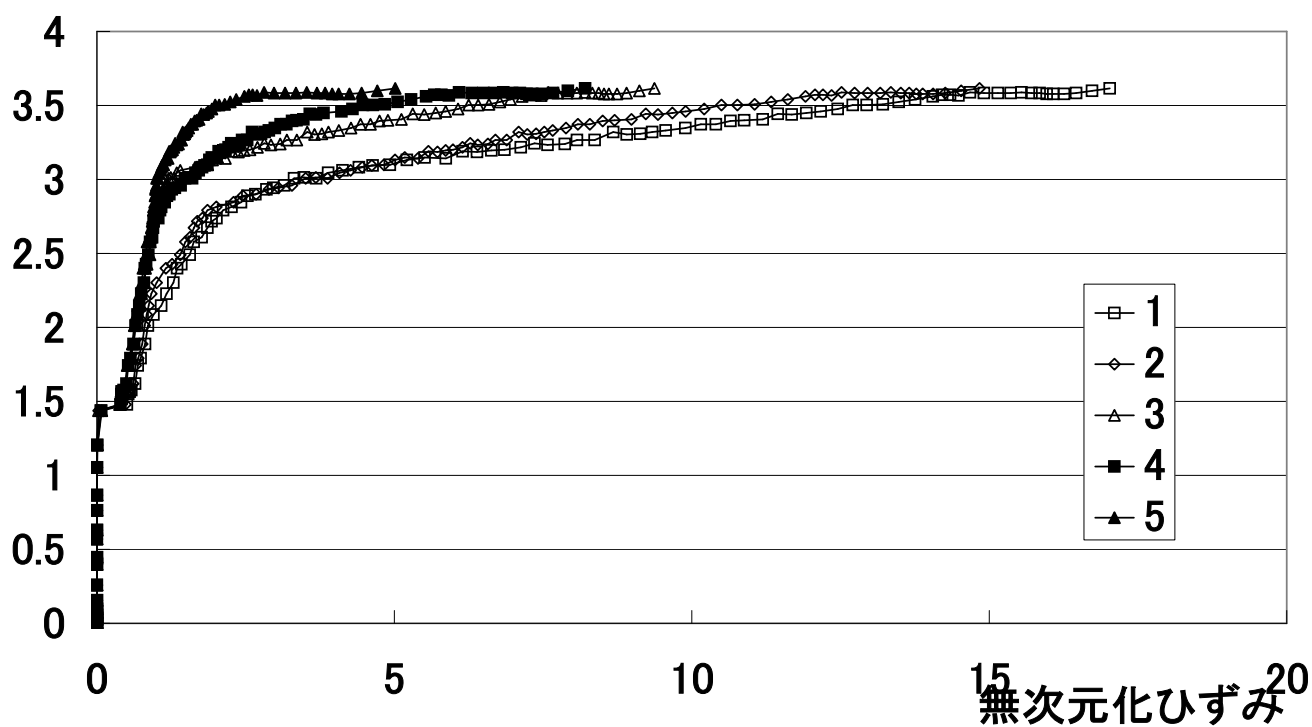


図 11-6 治具の応力集中ゲージ (A2-15)

無次元化荷重

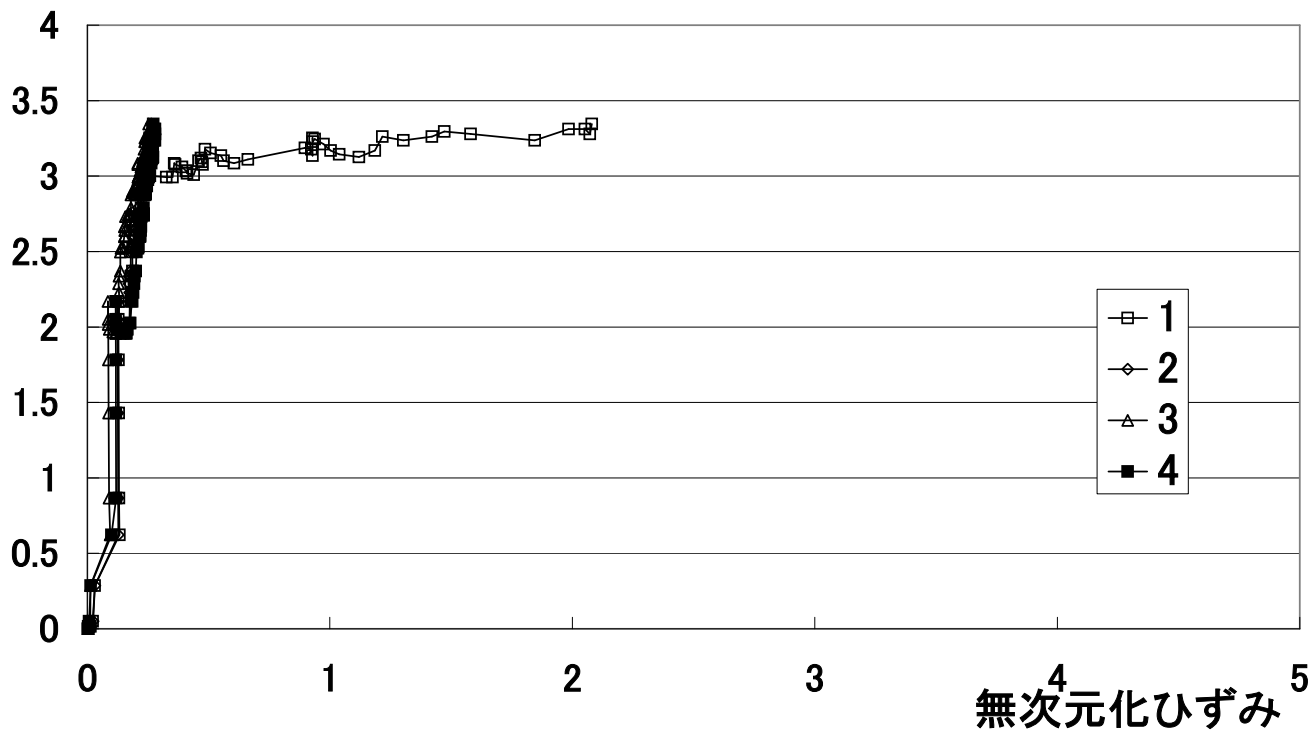


図 11-7 治具の塑性ひずみ (C1-12)

無次元化荷重

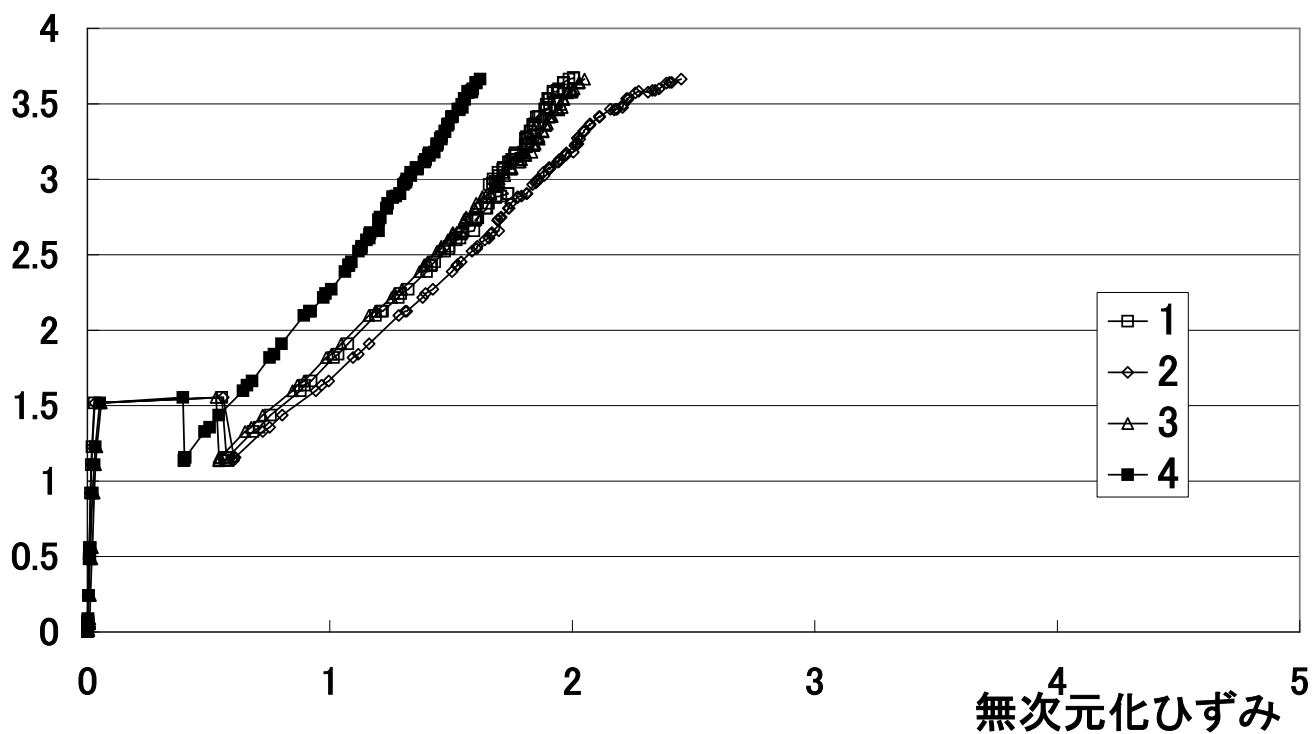


図 11-8 治具の塑性ひずみ (C2-15)

無次元化荷重

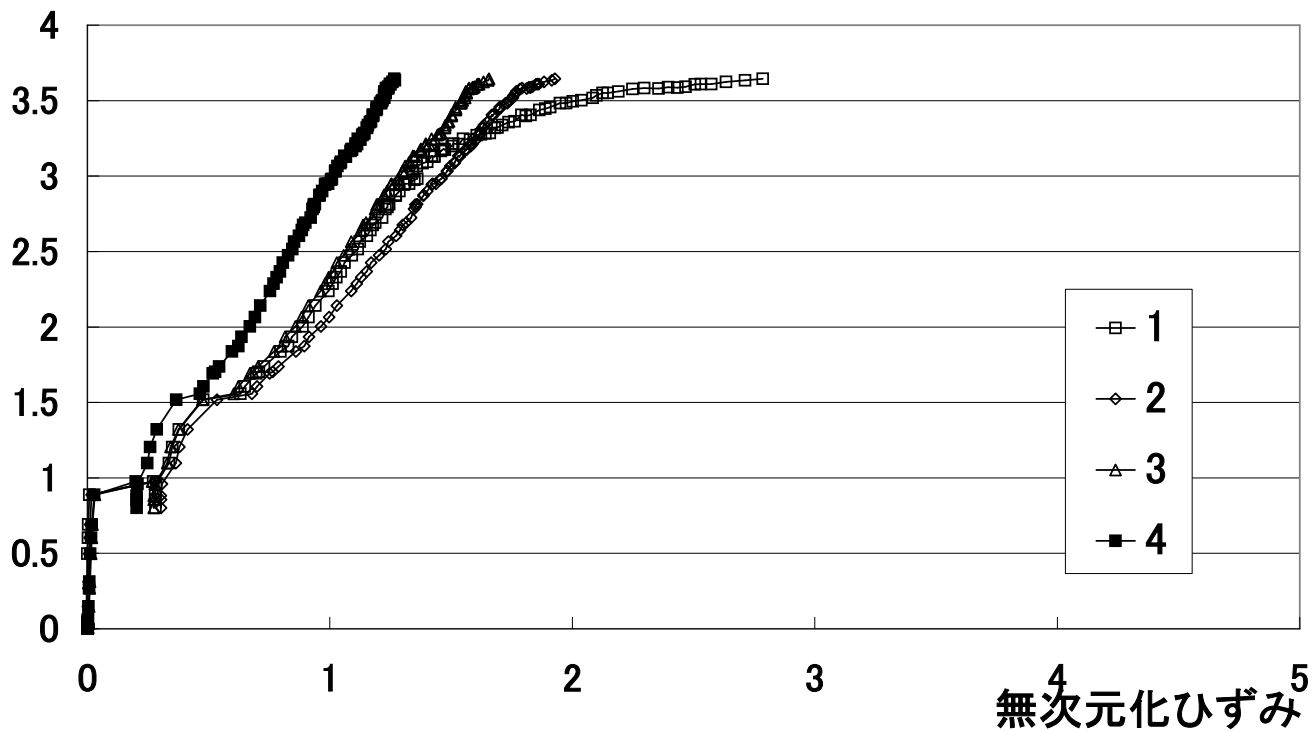


図 11-9 治具の塑性ひずみ (A1-12)

無次元化荷重

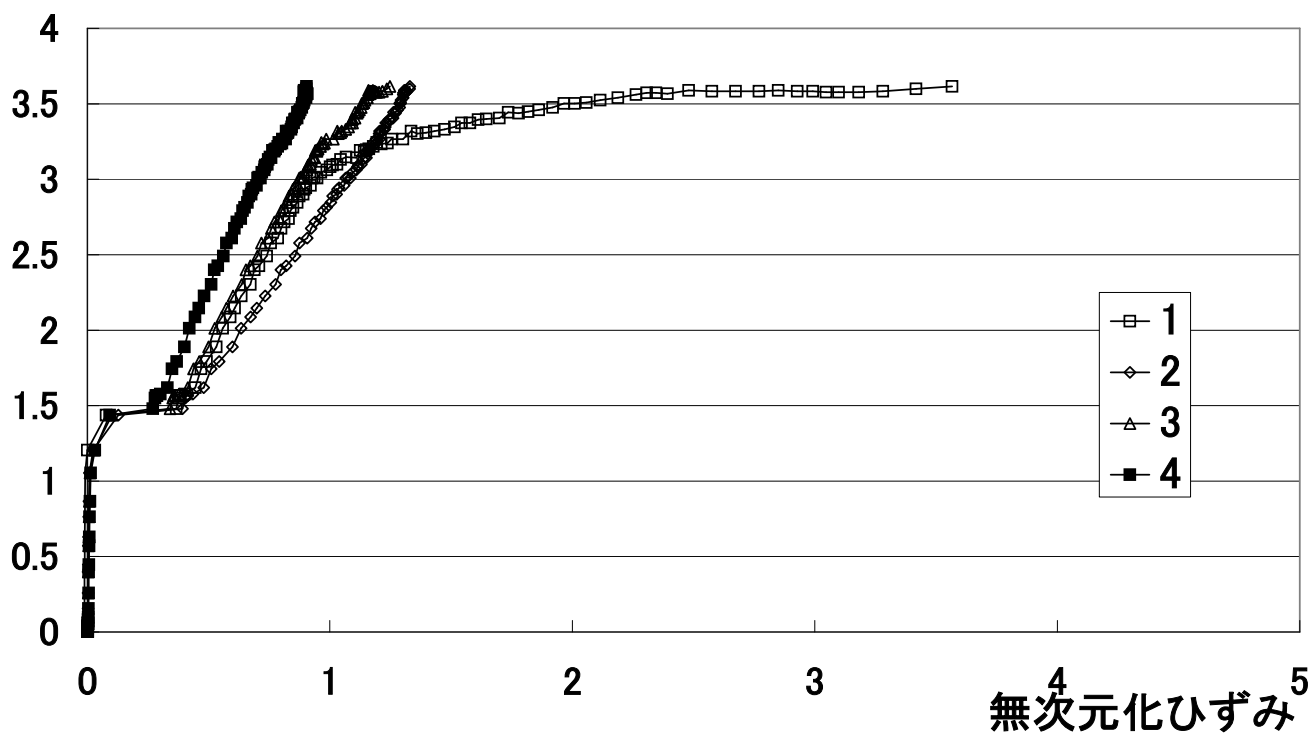


図 11-10 治具の塑性ひずみ (A2-15)

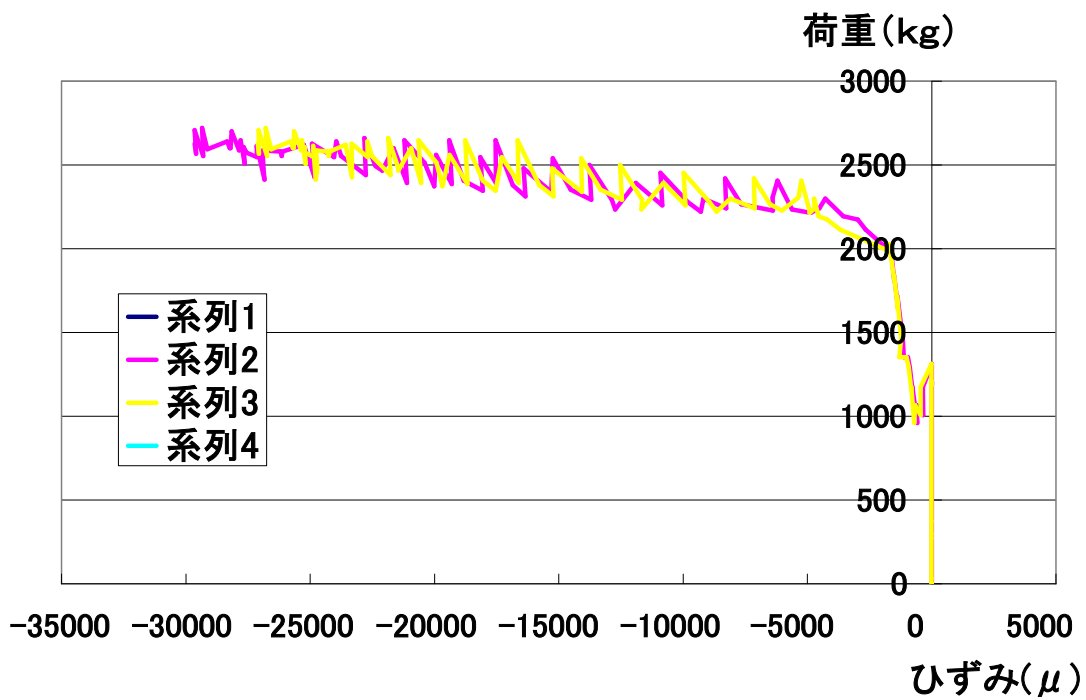


図 11-11 治具のひずみ (C1 の応力集中 1)

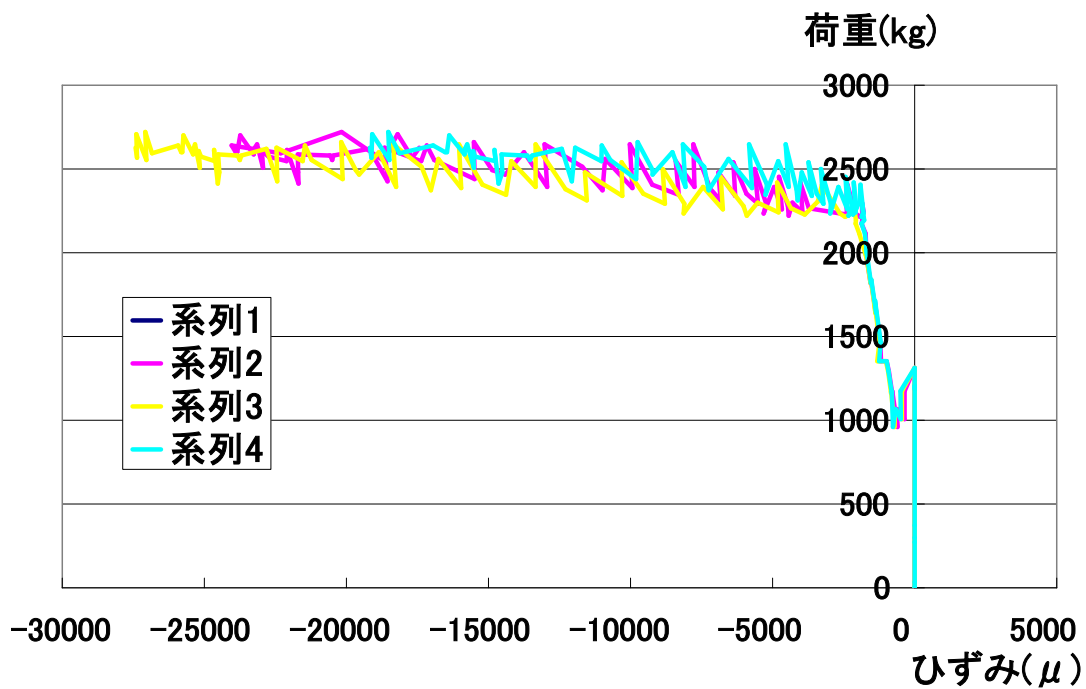


図 11-12 治具のひずみ (C1 の応力集中 2)

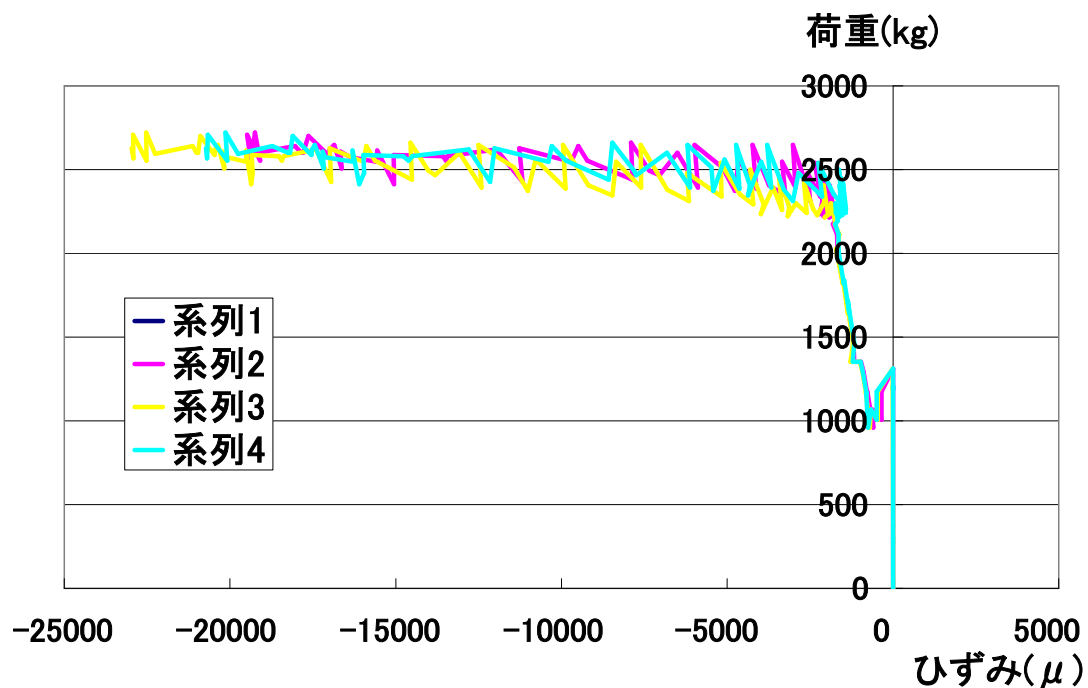


図 11-13 治具のひずみ (C1 の応力集中 3)

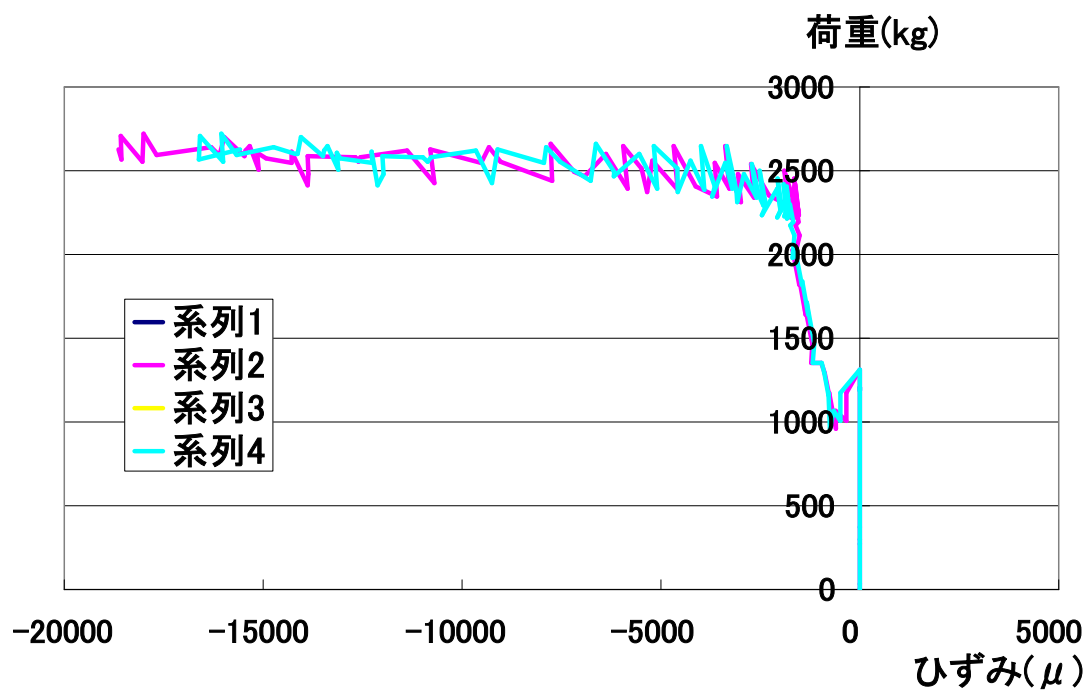


図 11-14 治具のひずみ (C1 の応力集中 4)

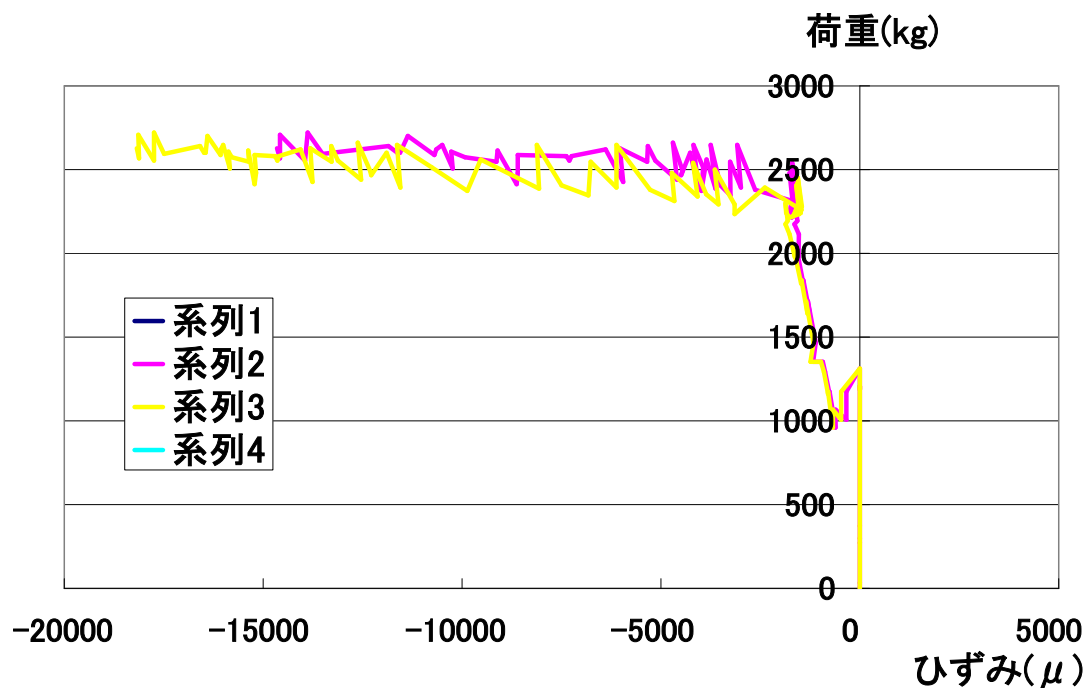


図 11-15 治具のひずみ (C1 の応力集中 5)

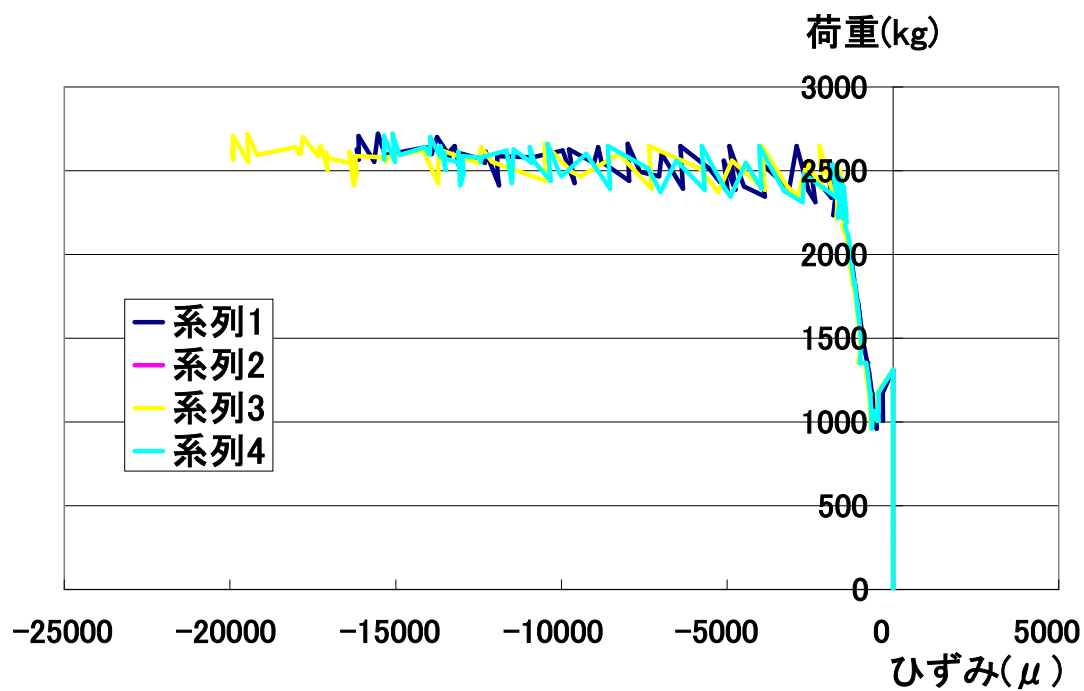


図 11-16 治具の塑性ひずみ (C1 の塑性 1)

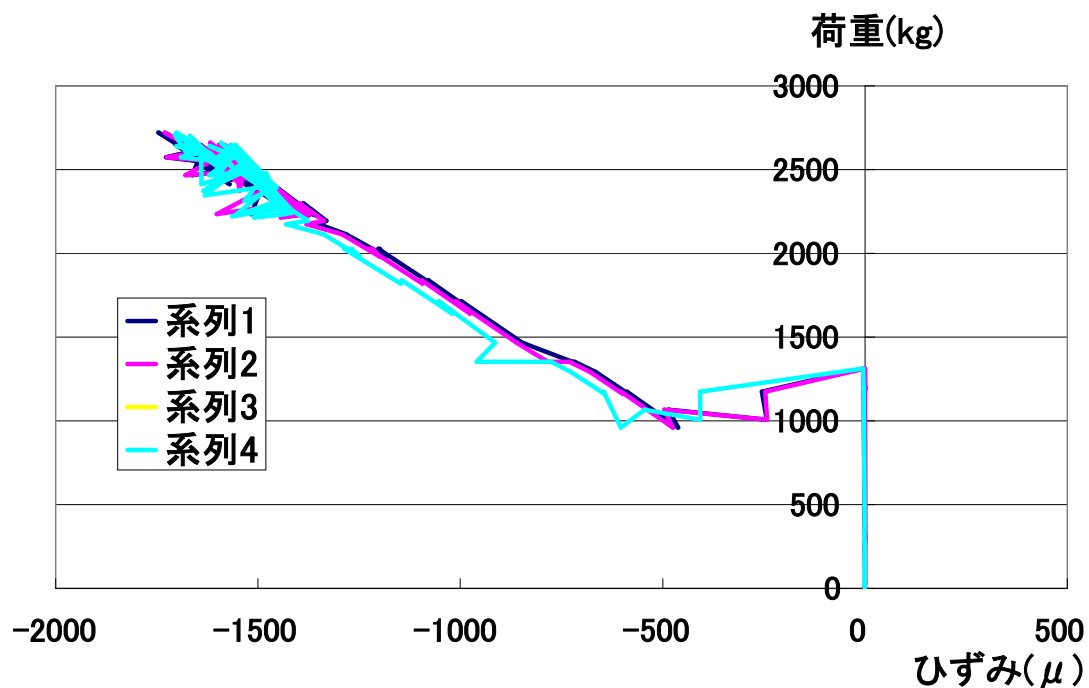


図 11-17 治具の塑性ひずみ (C1 の塑性 2)

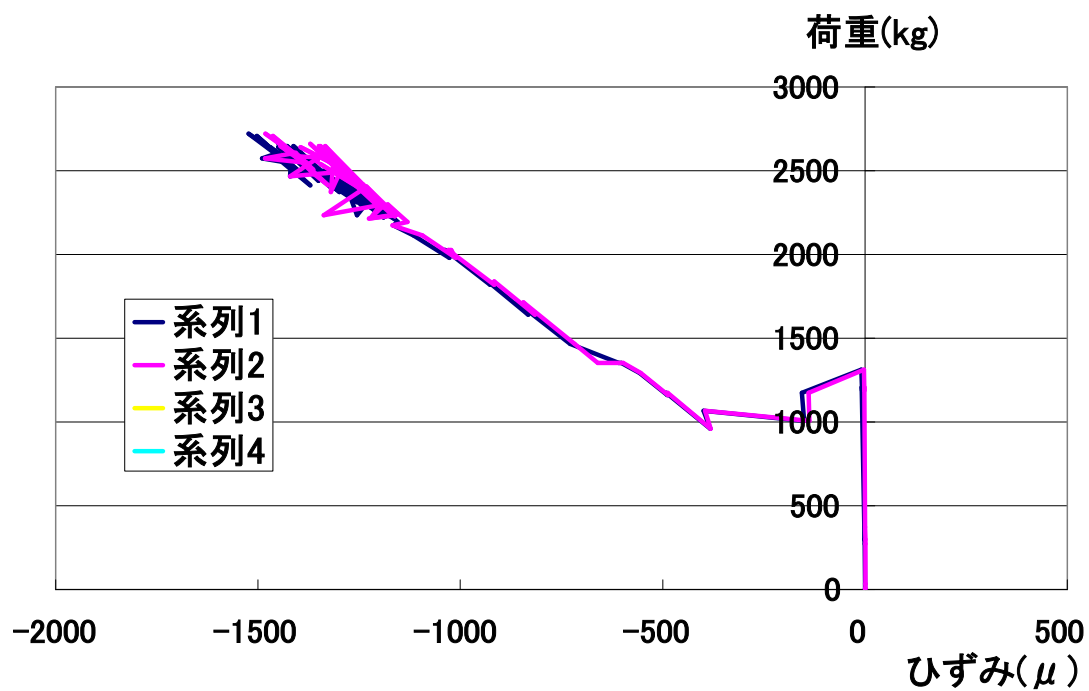


図 11-17 治具の塑性ひずみ (C1 の塑性 3)

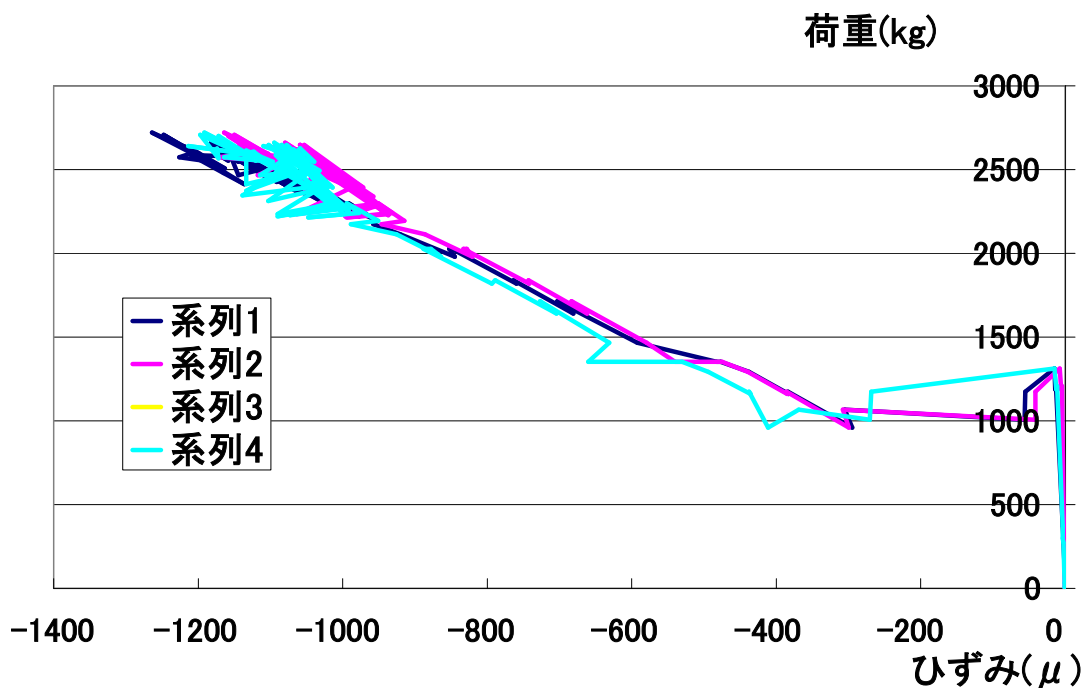


図 11-18 治具の塑性ひずみ (C1 の塑性 4)

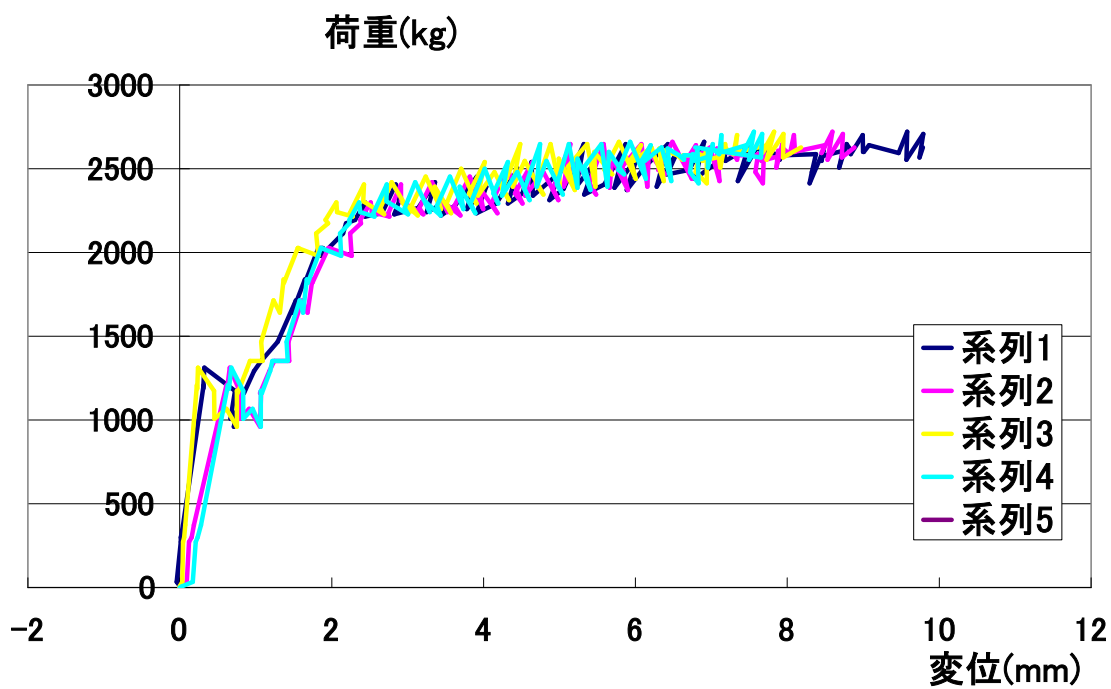


図 11-19 被定着体、定着体の荷重-変位関係 (C1)

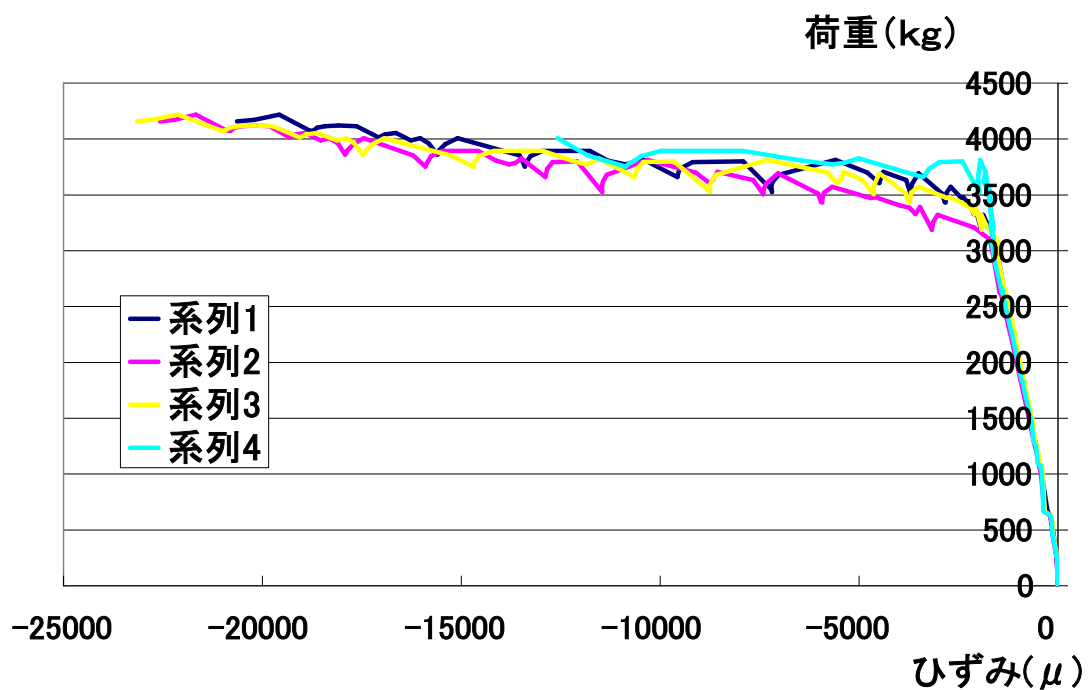


図 11-20 治具のひずみ (C2 の応力集中 1)

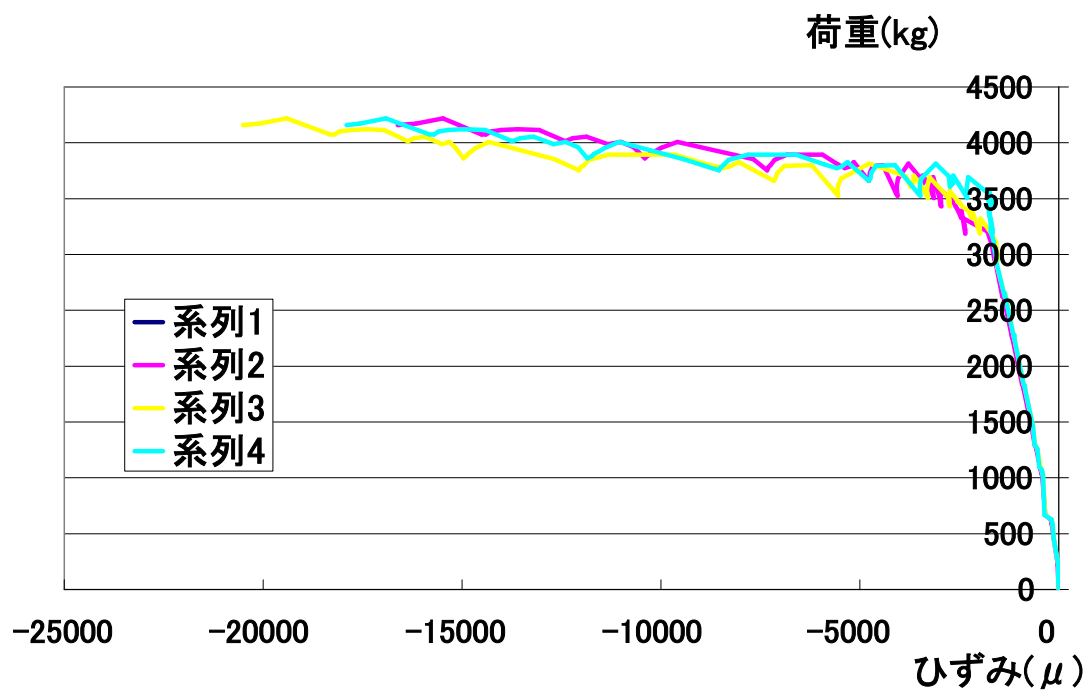


図 11-21 治具のひずみ (C2 の応力集中 2)

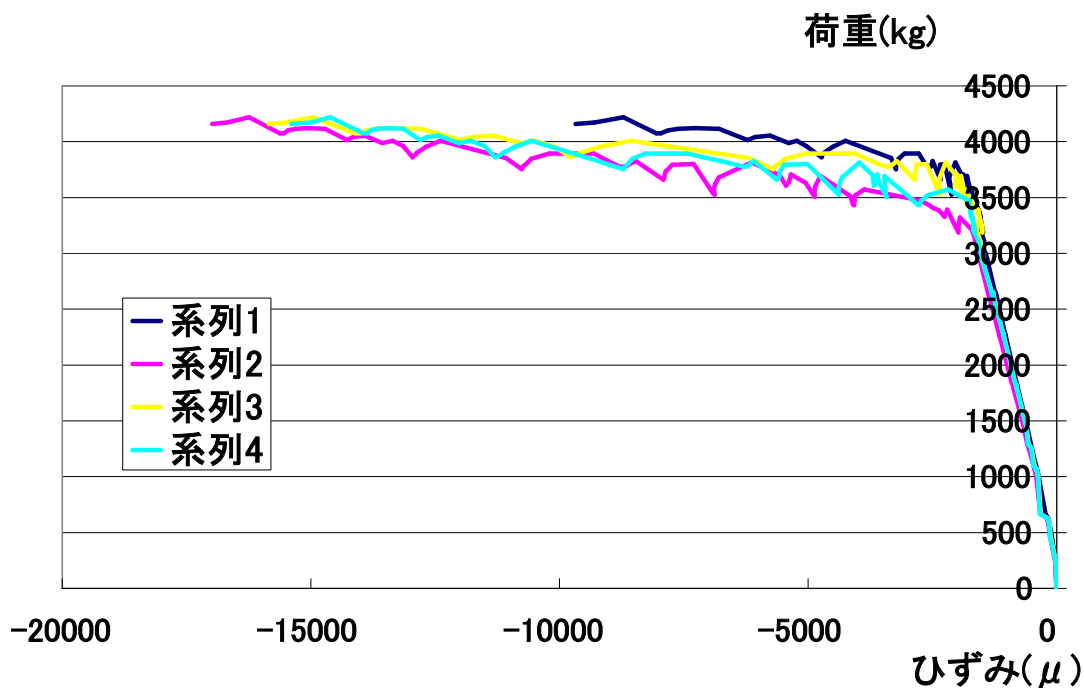


図 11-22 治具のひずみ (C2 の応力集中 3)

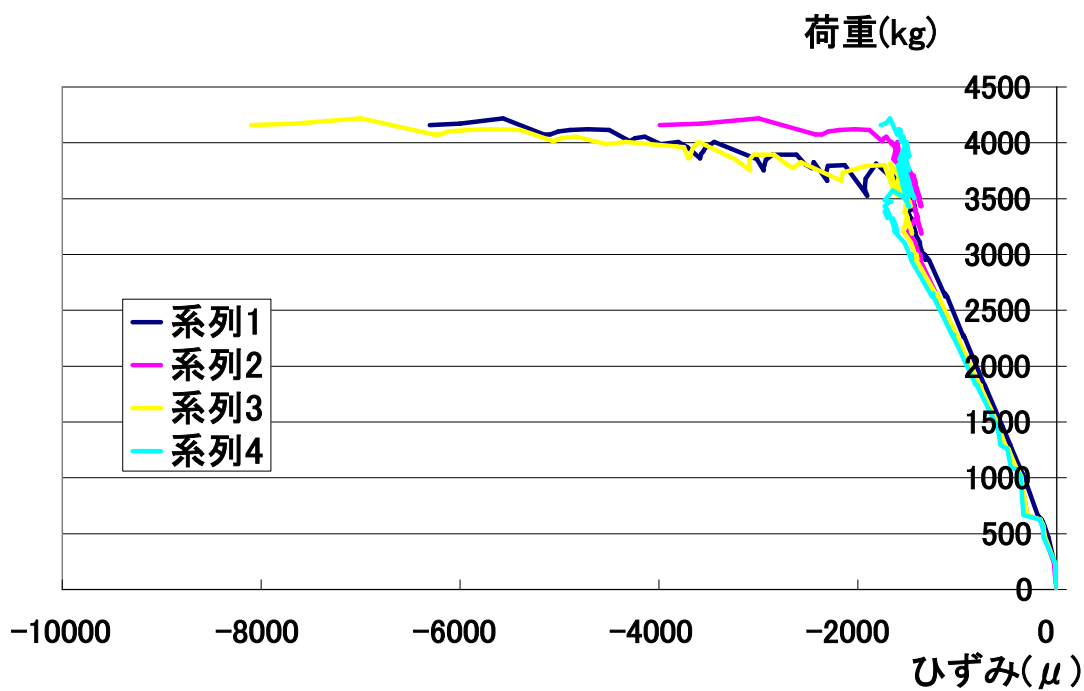


図 11-23 治具のひずみ (C2 の応力集中 4)

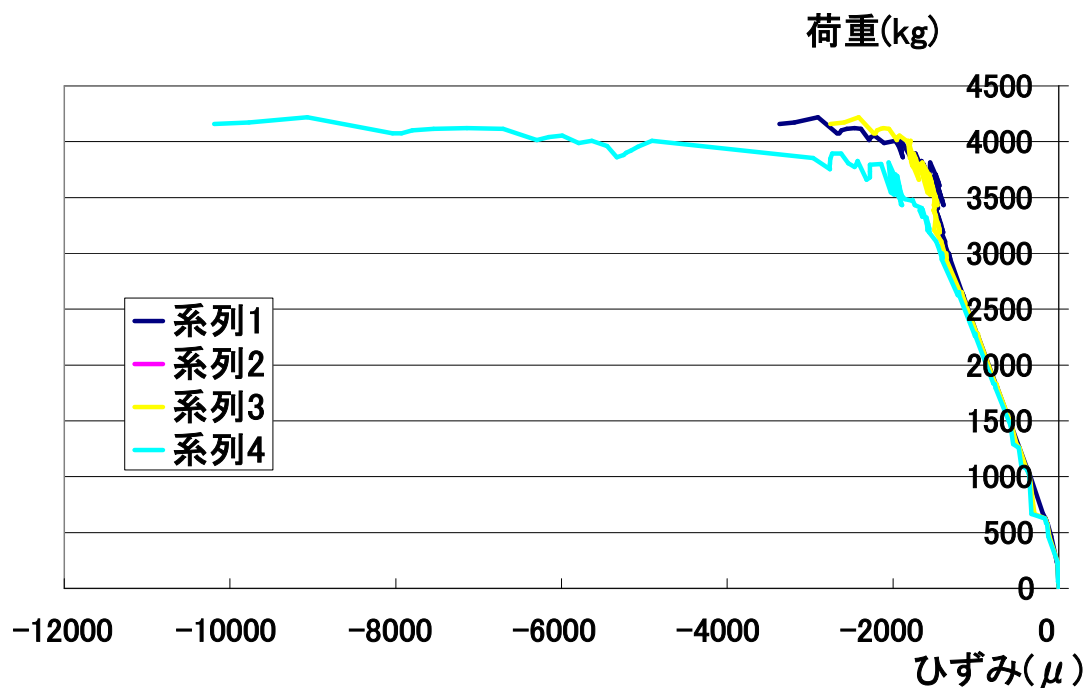


図 11-24 治具のひずみ (C2 の応力集中 5)

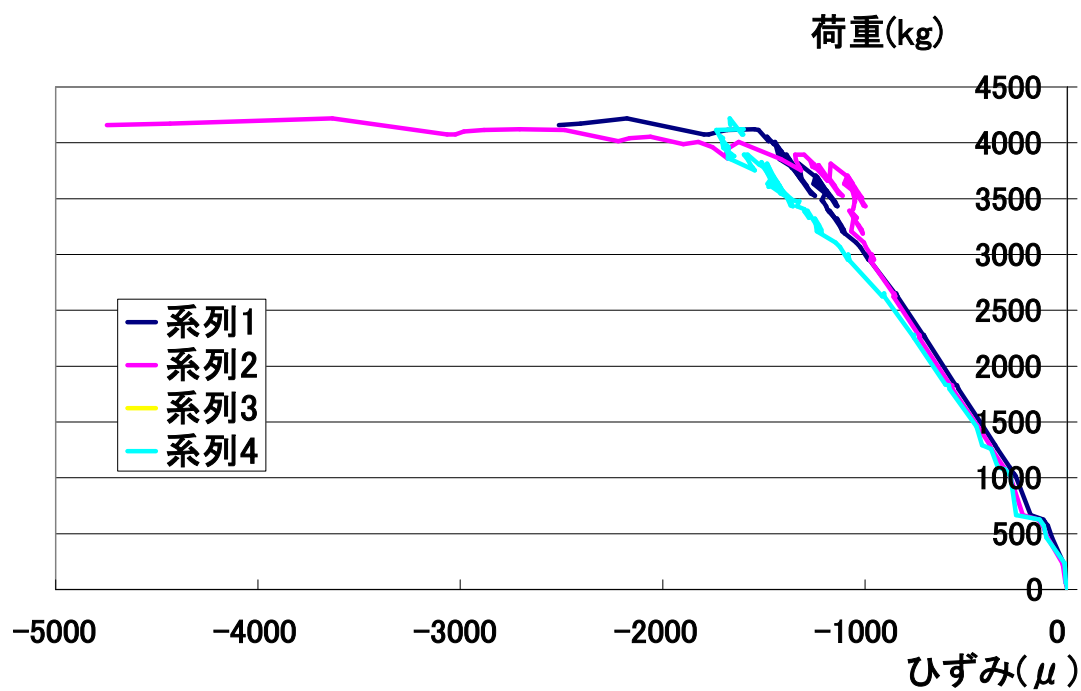


図 11-25 治具の塑性ひずみ (C2 の塑性 1)

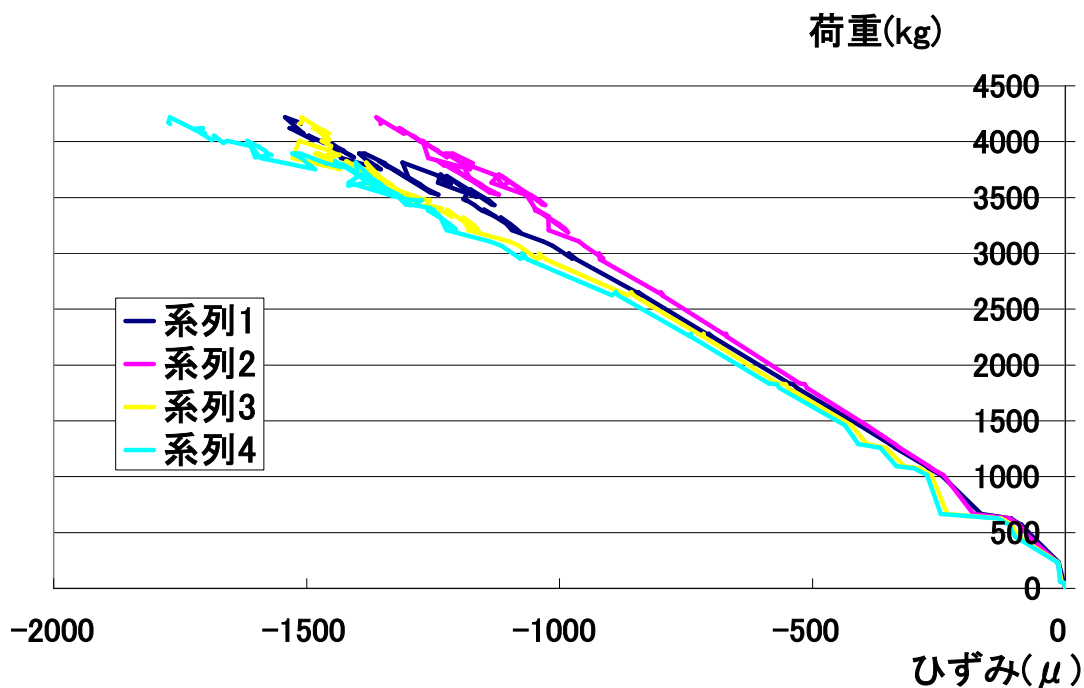


図 11-26 治具の塑性ひずみ (C2 の塑性 2)

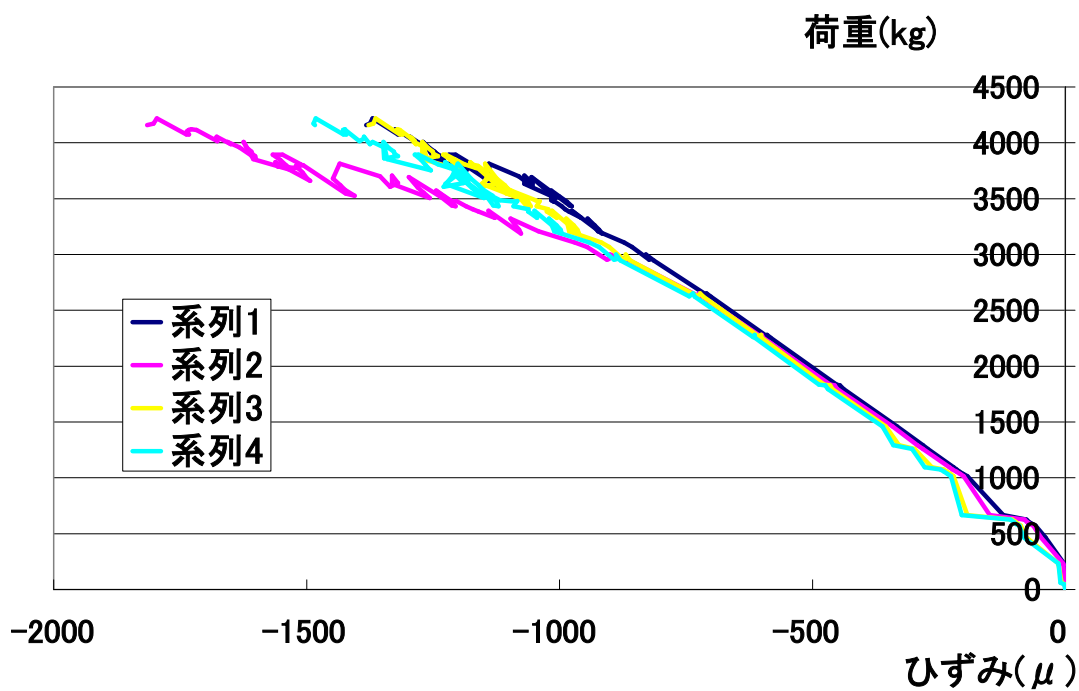


図 11-27 治具の塑性ひずみ (C2 の塑性 3)

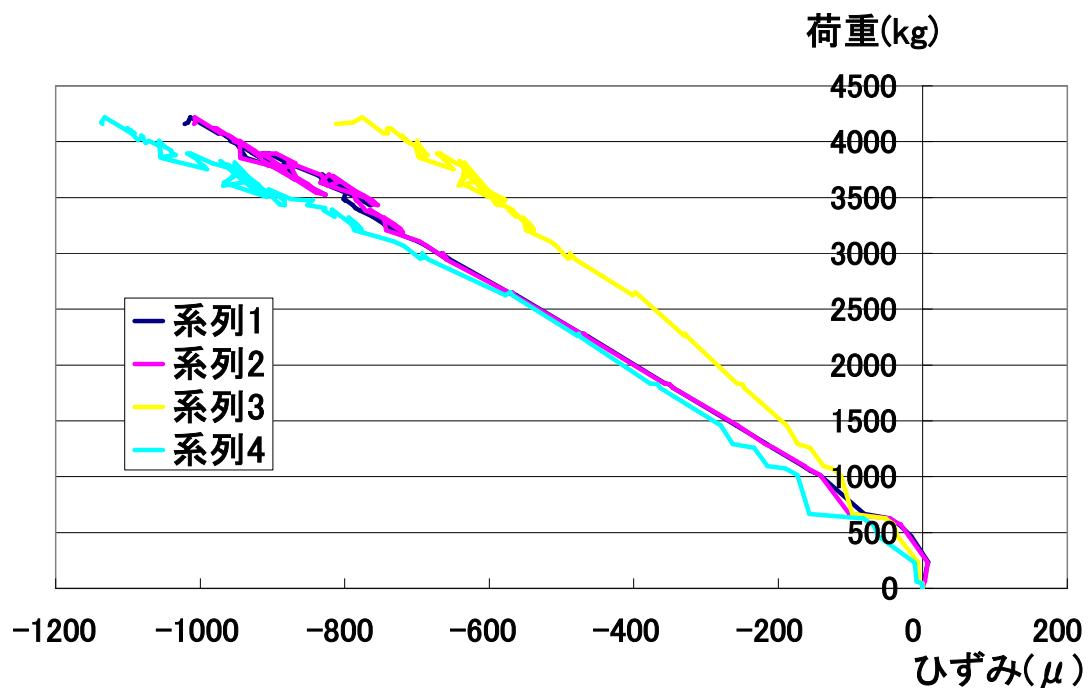


図 11-28 治具の塑性ひずみ (C2 の塑性 4)

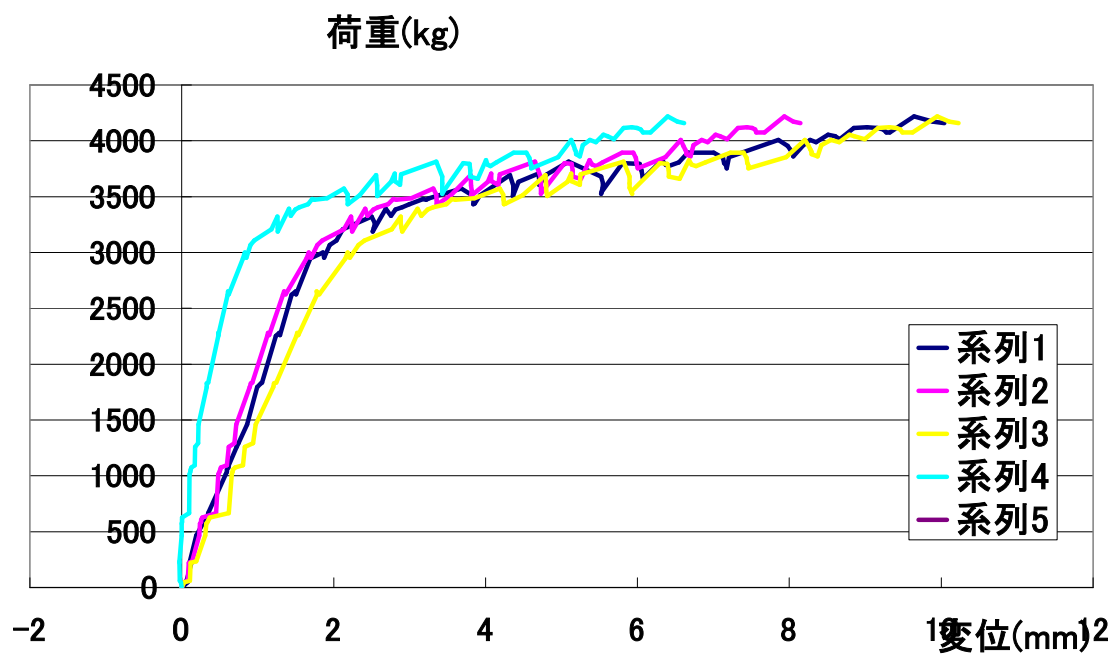


図 11-29 被定着体、定着体の荷重-変位関係 (C2)

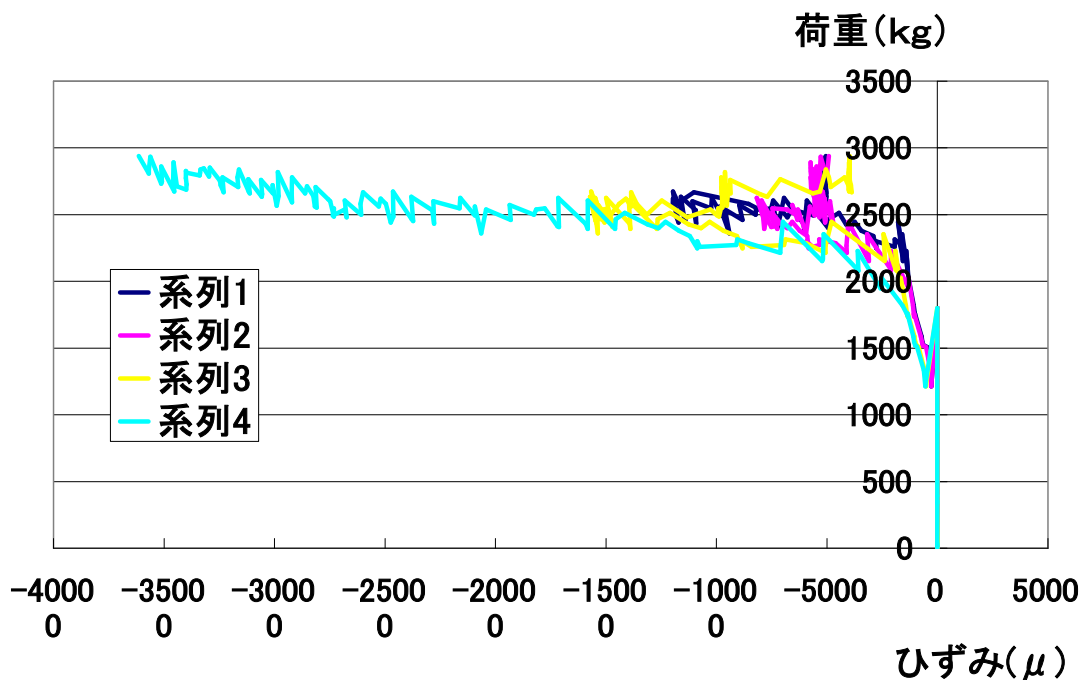


図 11-30 治具のひずみ (A1 の応力集中 1)

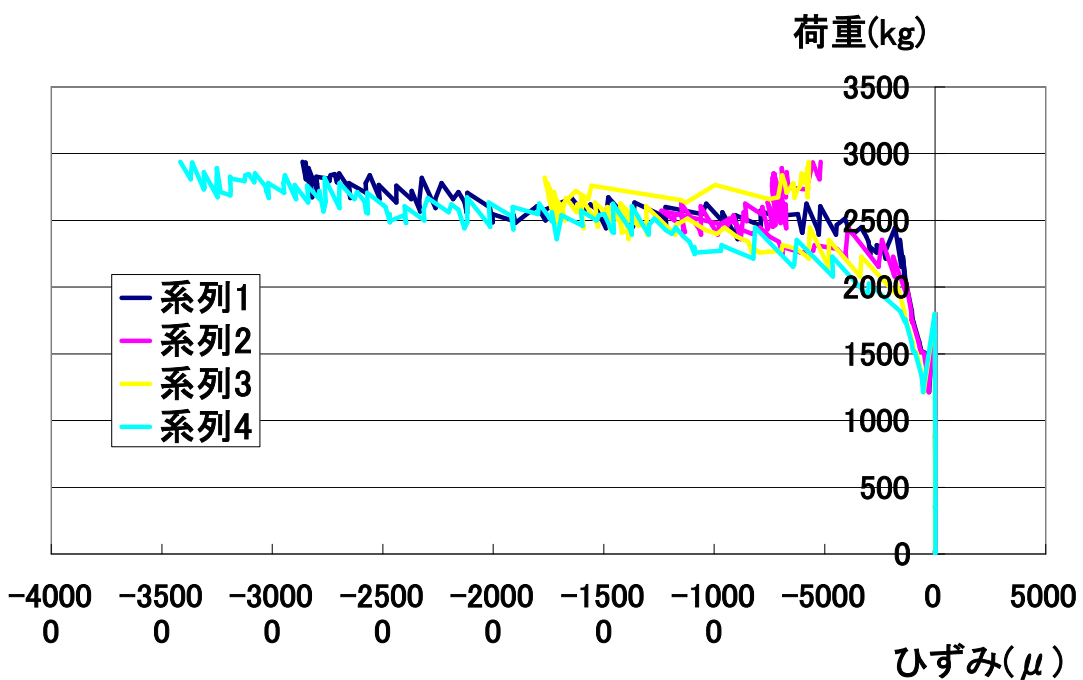


図 11-31 治具のひずみ (A1 の応力集中 2)

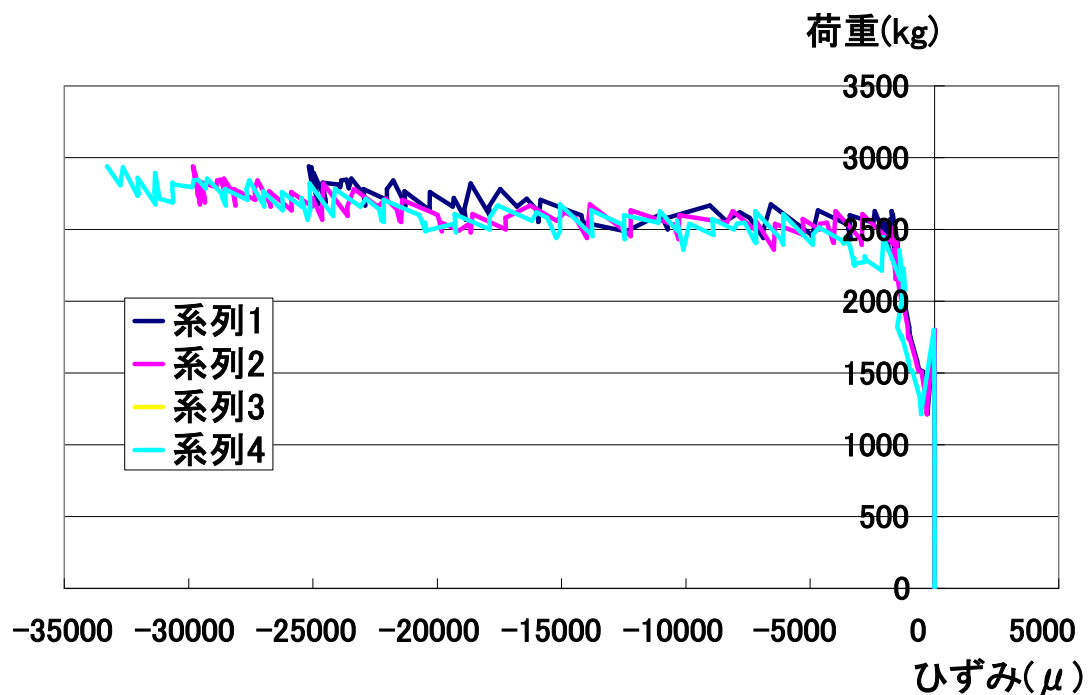


図 11-32 治具のひずみ (A1 の応力集中 3)

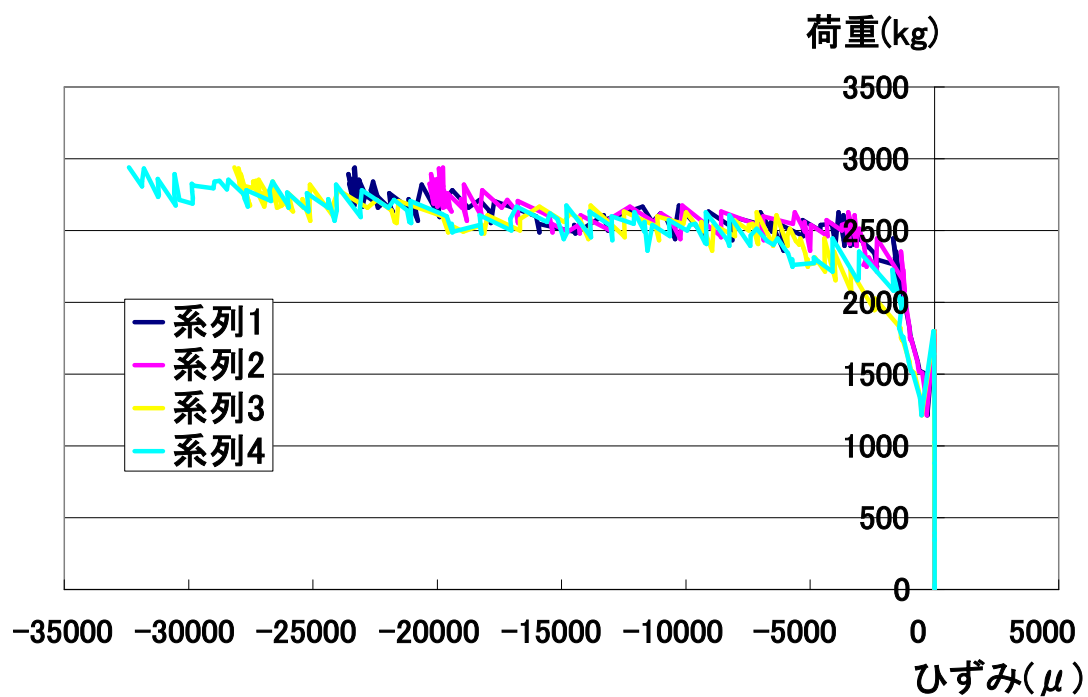


図 11-33 治具のひずみ (A1 の応力集中 4)

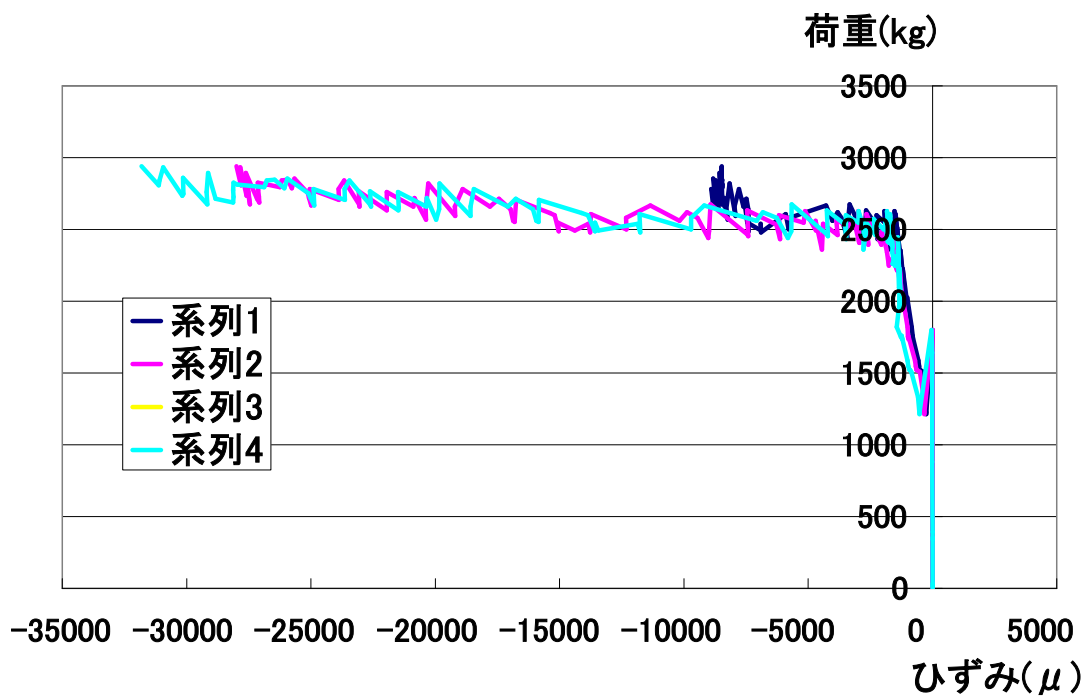


図 11-34 治具のひずみ (A1 の応力集中 5)

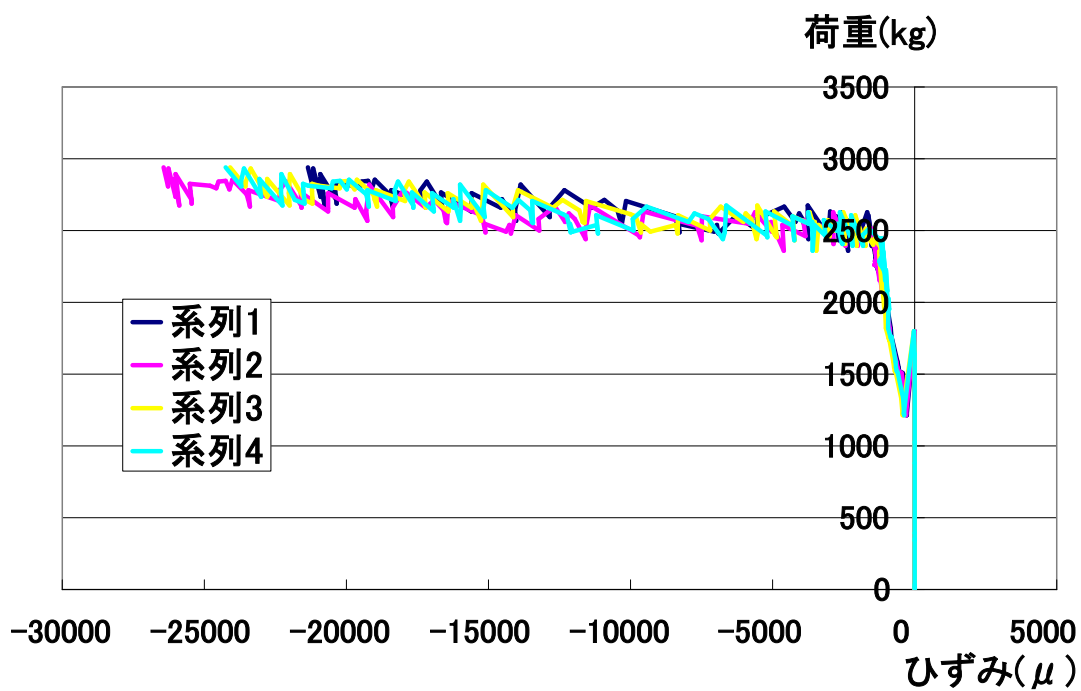


図 11-35 治具の塑性ひずみ (A1 の塑性 1)

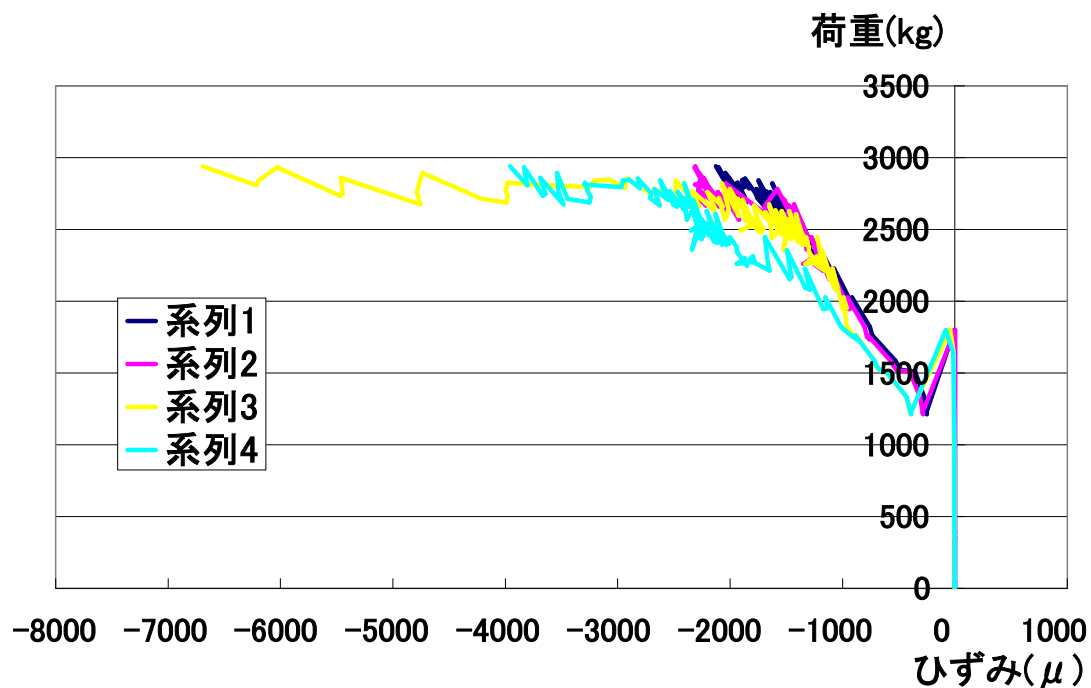


図 11-36 治具の塑性ひずみ (A1 の塑性 2)

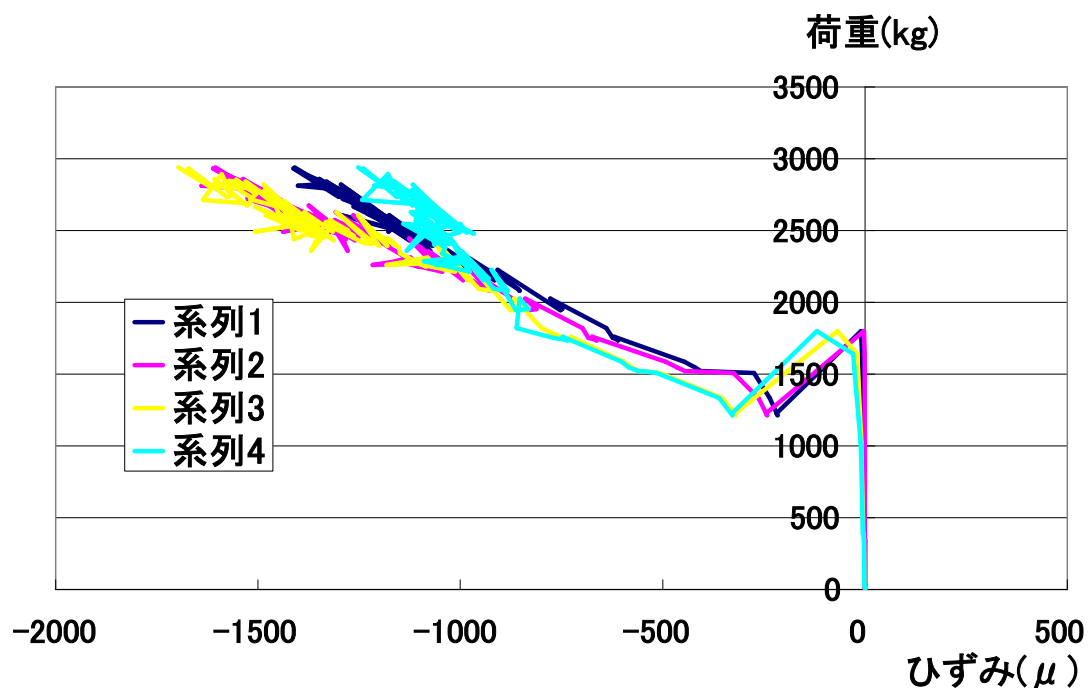


図 11-37 治具の塑性ひずみ (A1 の塑性 3)

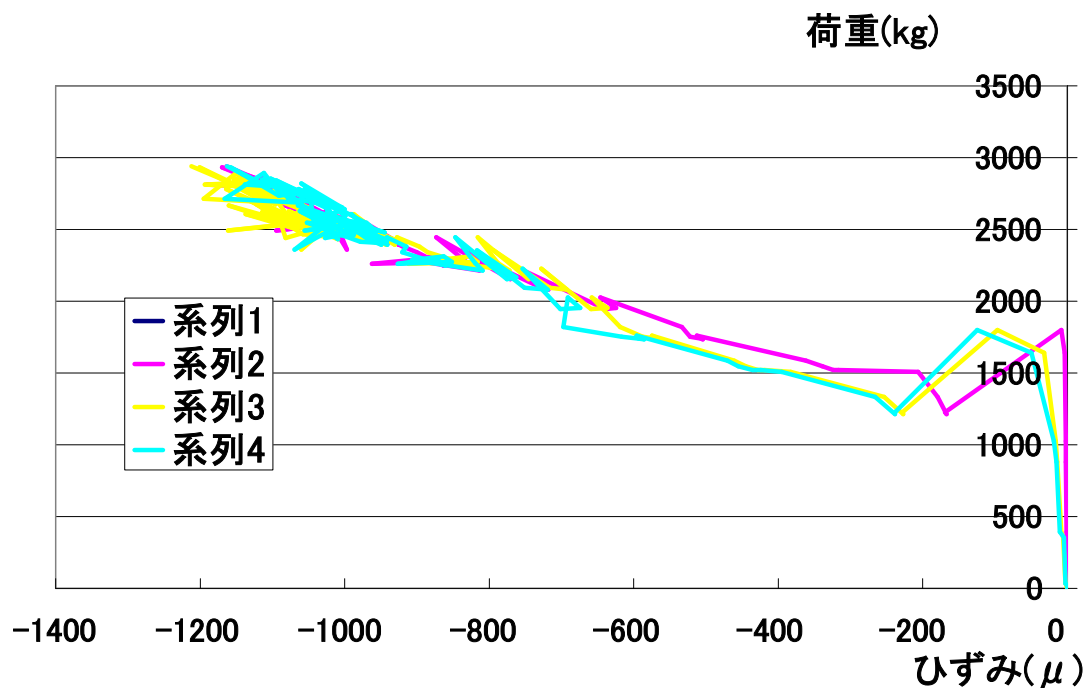


図 11-38 治具の塑性ひずみ (A1 の塑性 4)

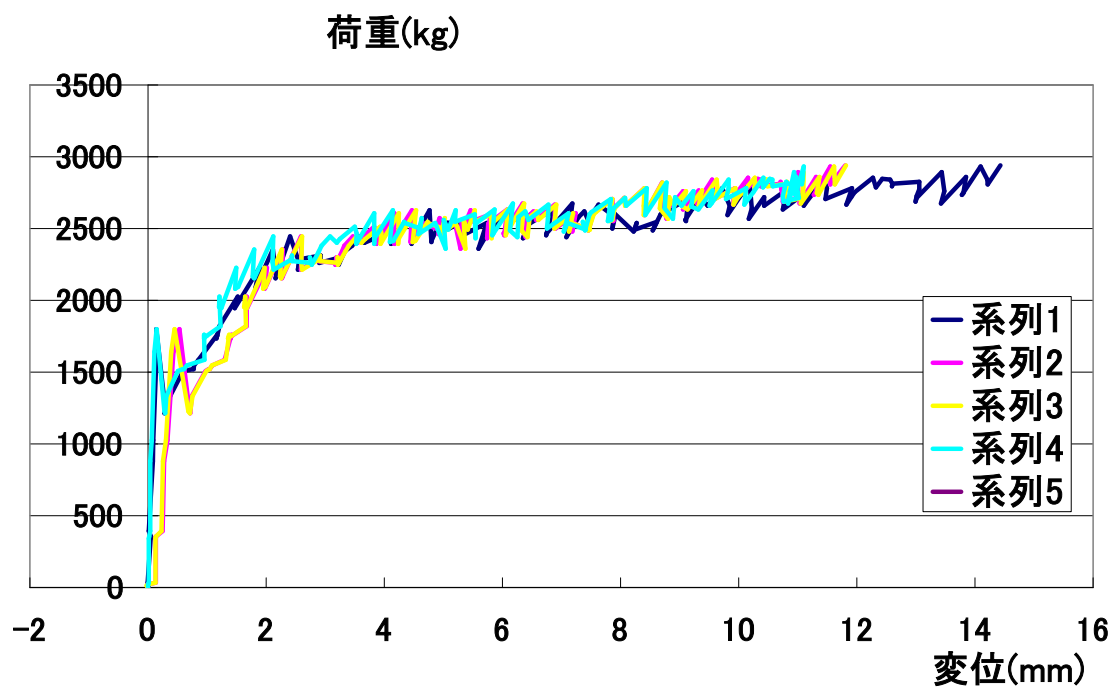


図 11-39 被定着体、定着体の荷重-変位関係 (A1)

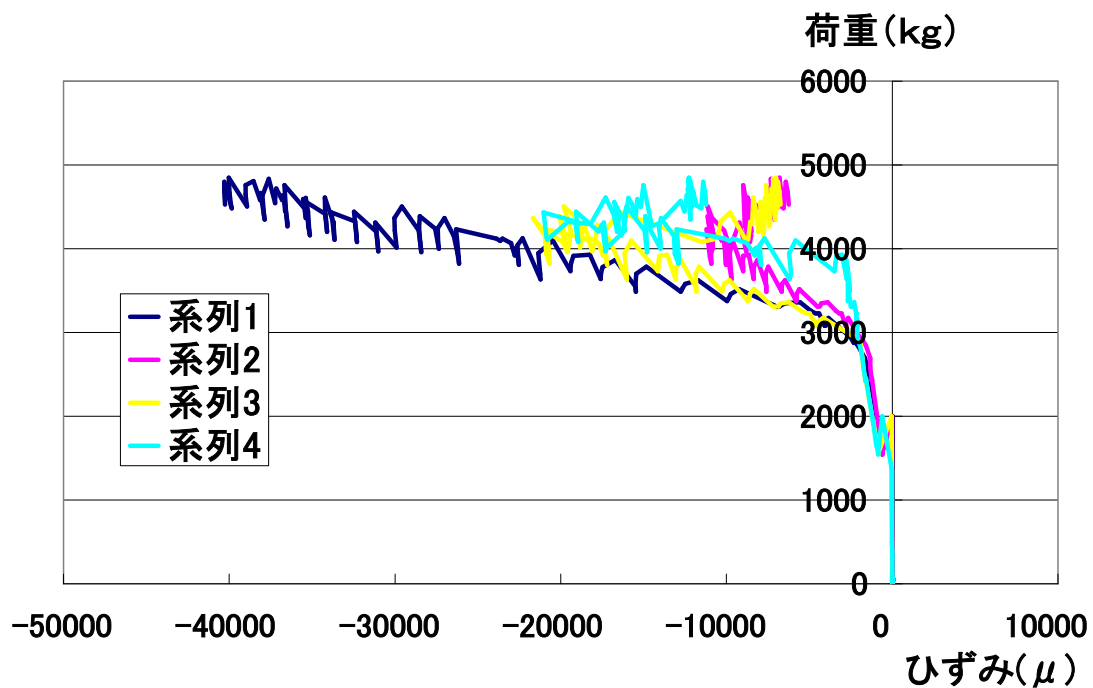


図 11-40 治具のひずみ (A2 の応力集中 1)

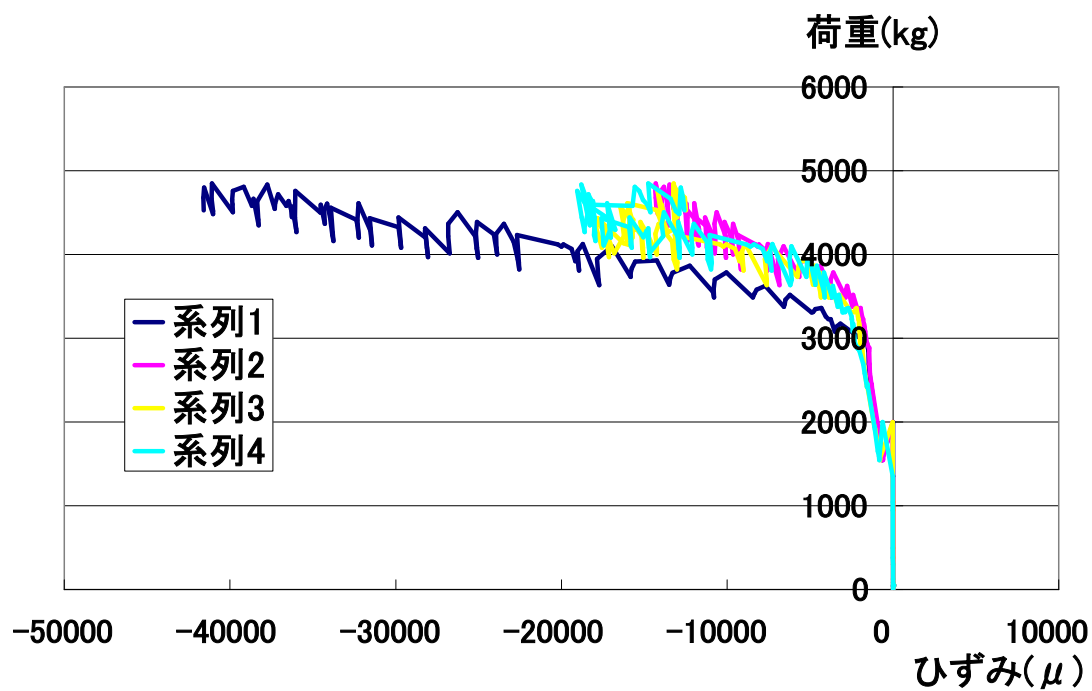


図 11-41 治具のひずみ (A2 の応力集中 2)

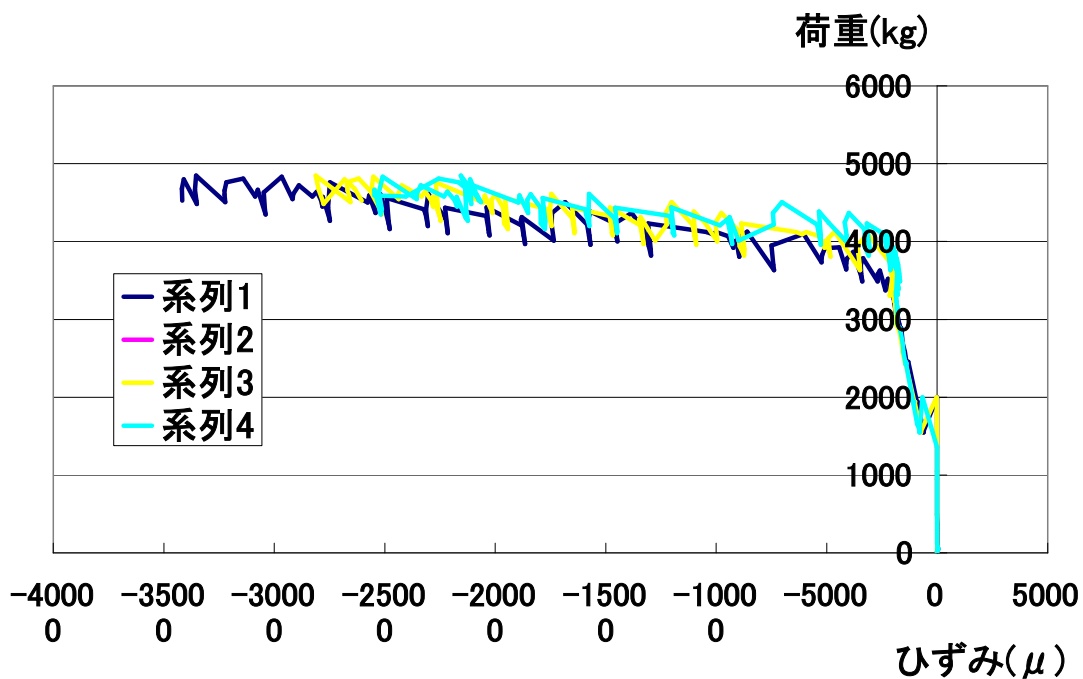


図 11-42 治具のひずみ (A2 の応力集中 3)

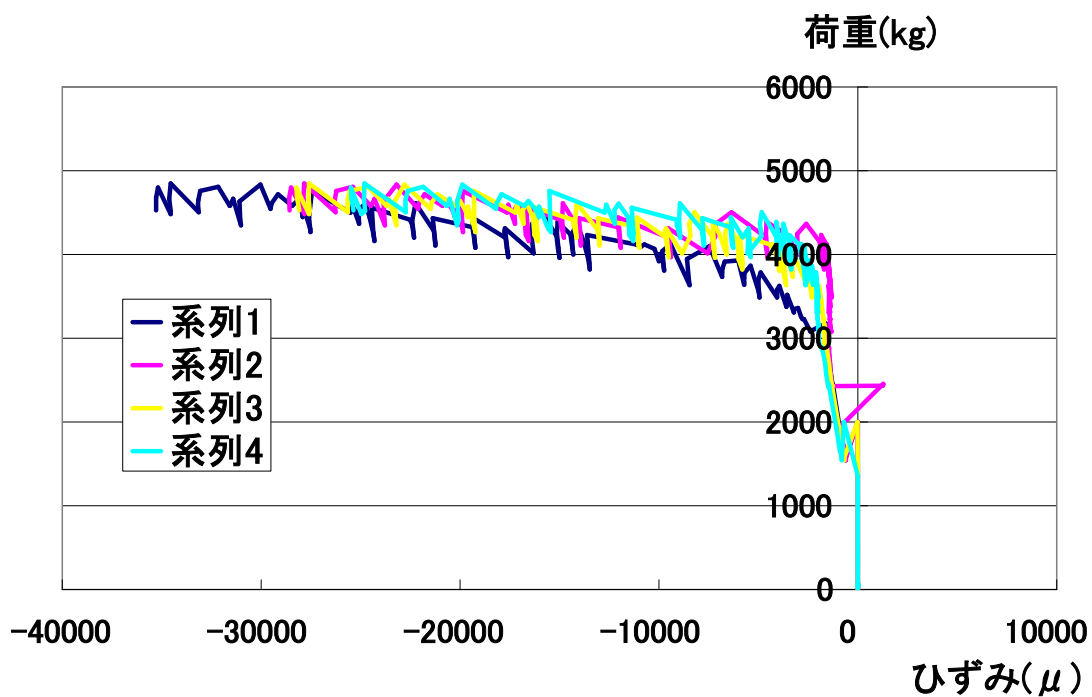


図 11-43 治具のひずみ (A2 の応力集中 4)

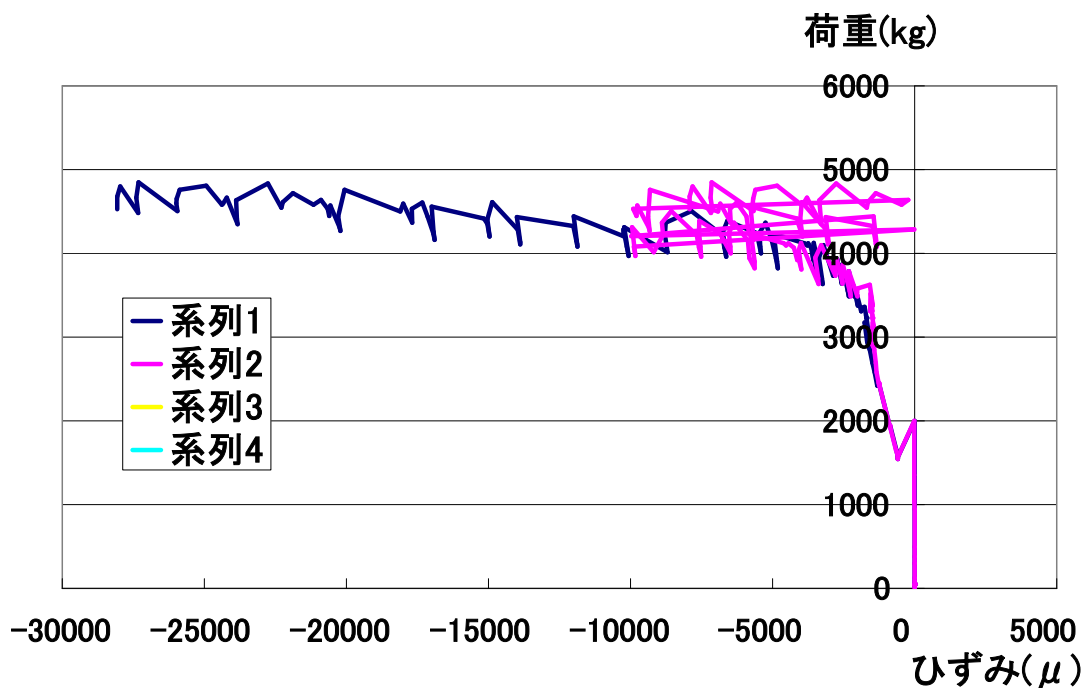


図 11-44 治具のひずみ (A2 の応力集中 5)

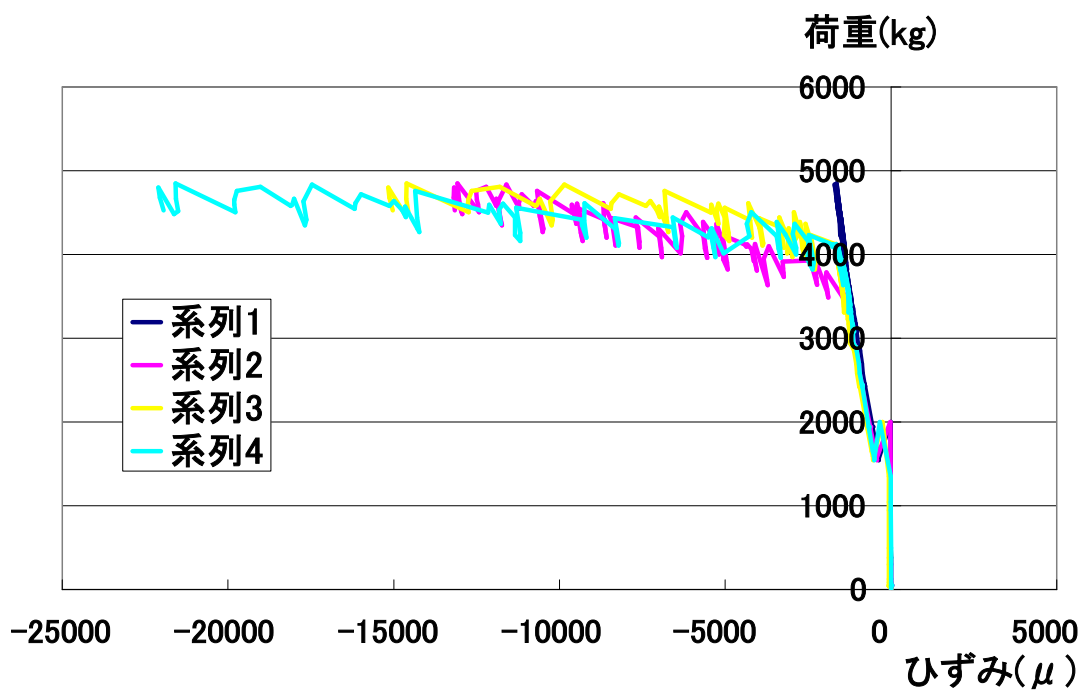


図 11-45 治具の塑性ひずみ (A2 の塑性 1)

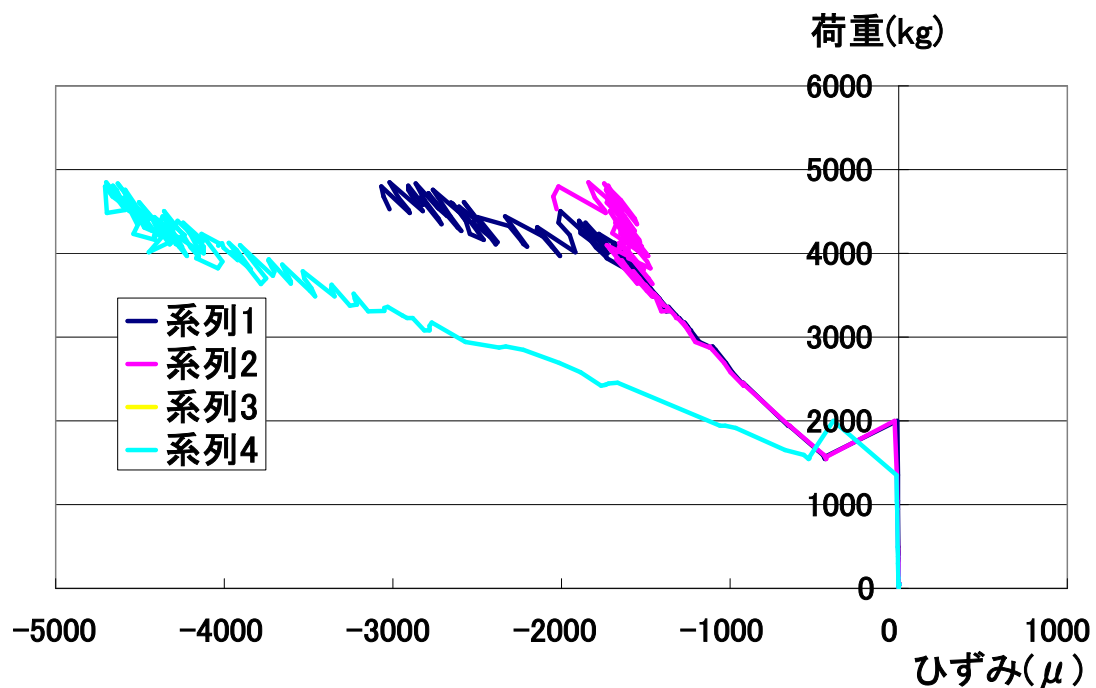


図 11-46 治具の塑性ひずみ (A2 の塑性 2)

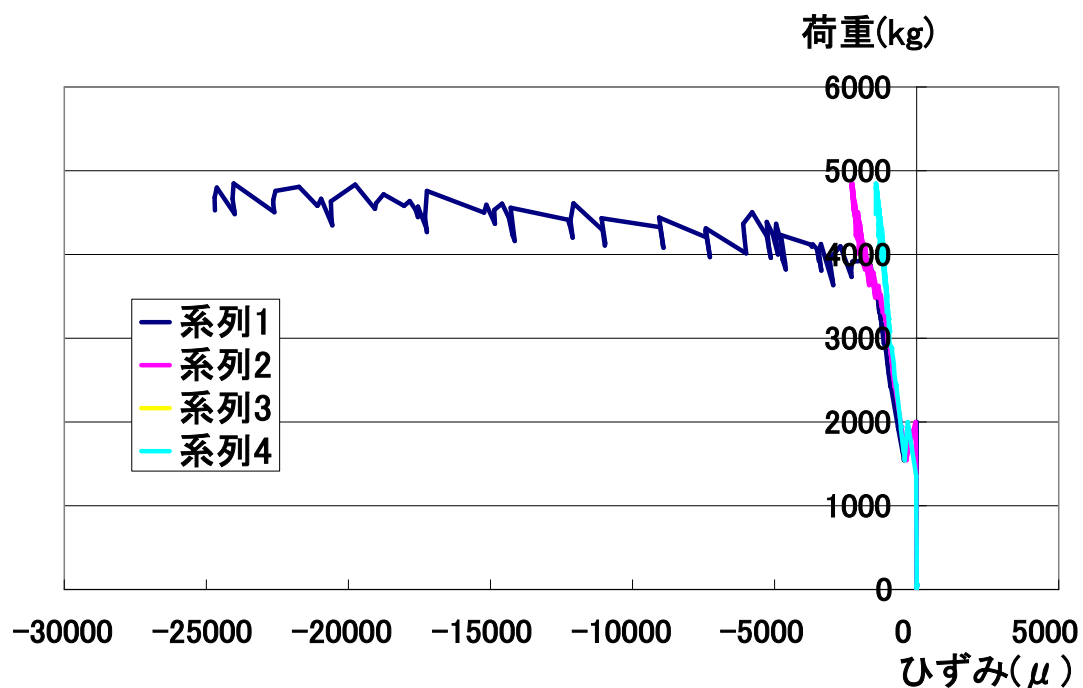


図 11-47 治具の塑性ひずみ (A2 の塑性 3)

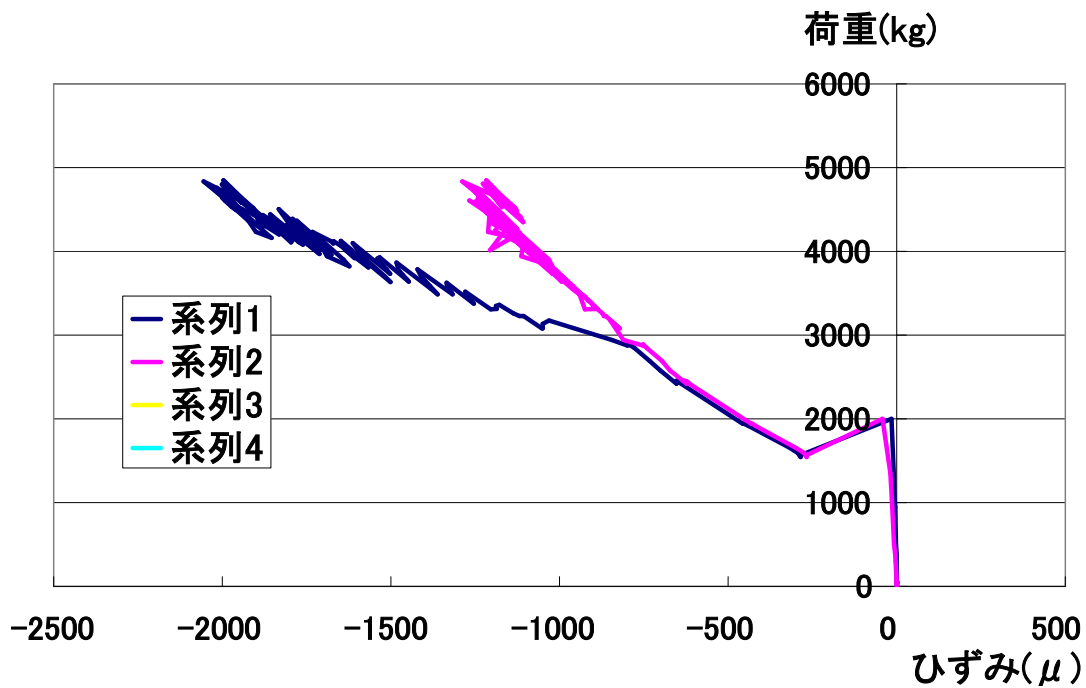


図 11-48 治具の塑性ひずみ (A2 の塑性 4)

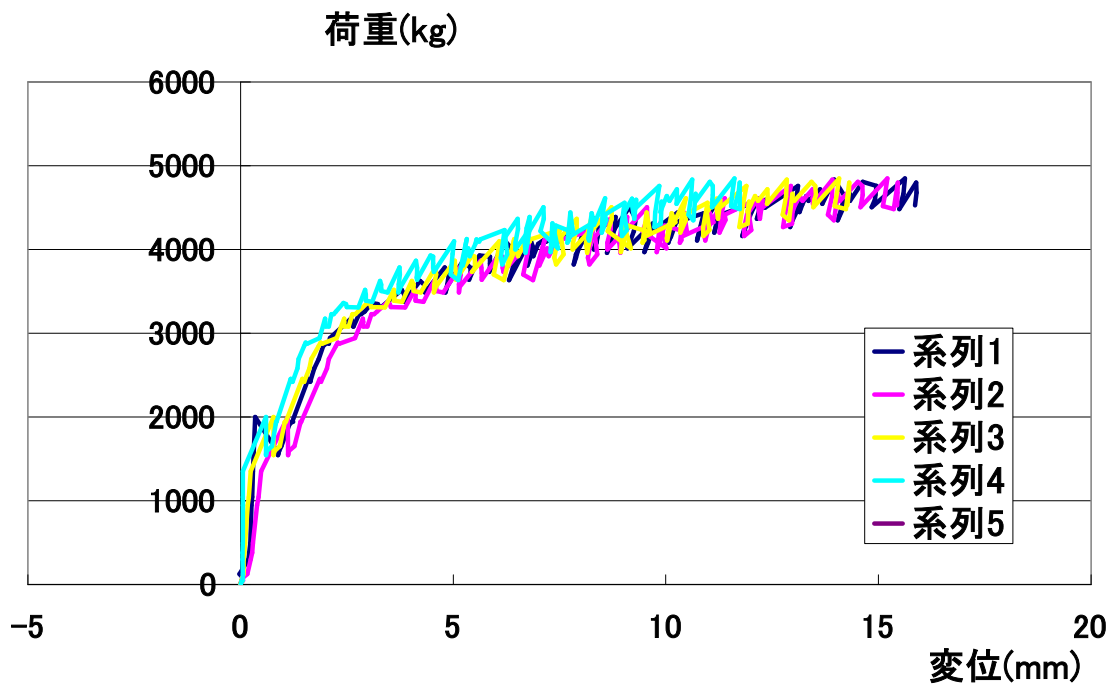


図 11-49 被定着体、定着体の荷重-変位関係 (A2)

無次元化荷重

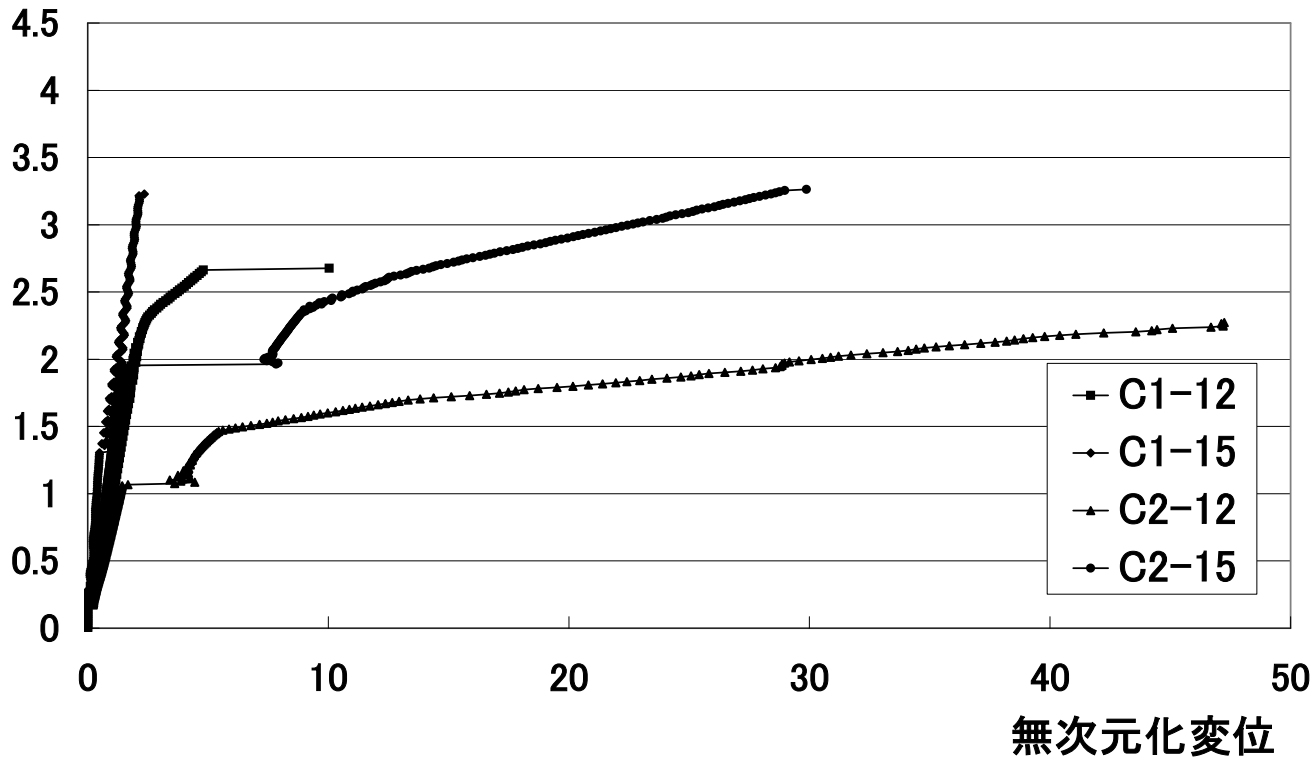


図 13-1 被定着体の荷重-変位関係 (CFS)

無次元化荷重

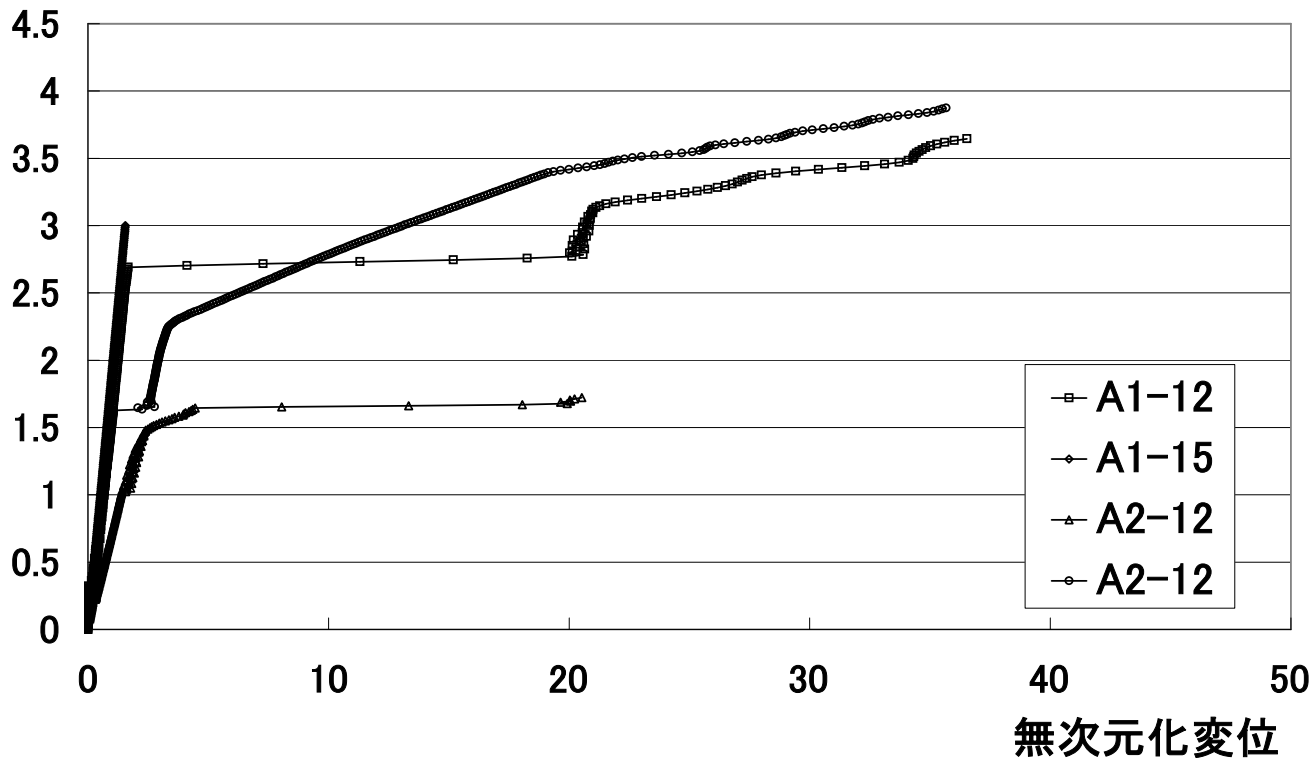


図 13-2 被定着体の荷重-変位関係 (AFS)

無次元化荷重

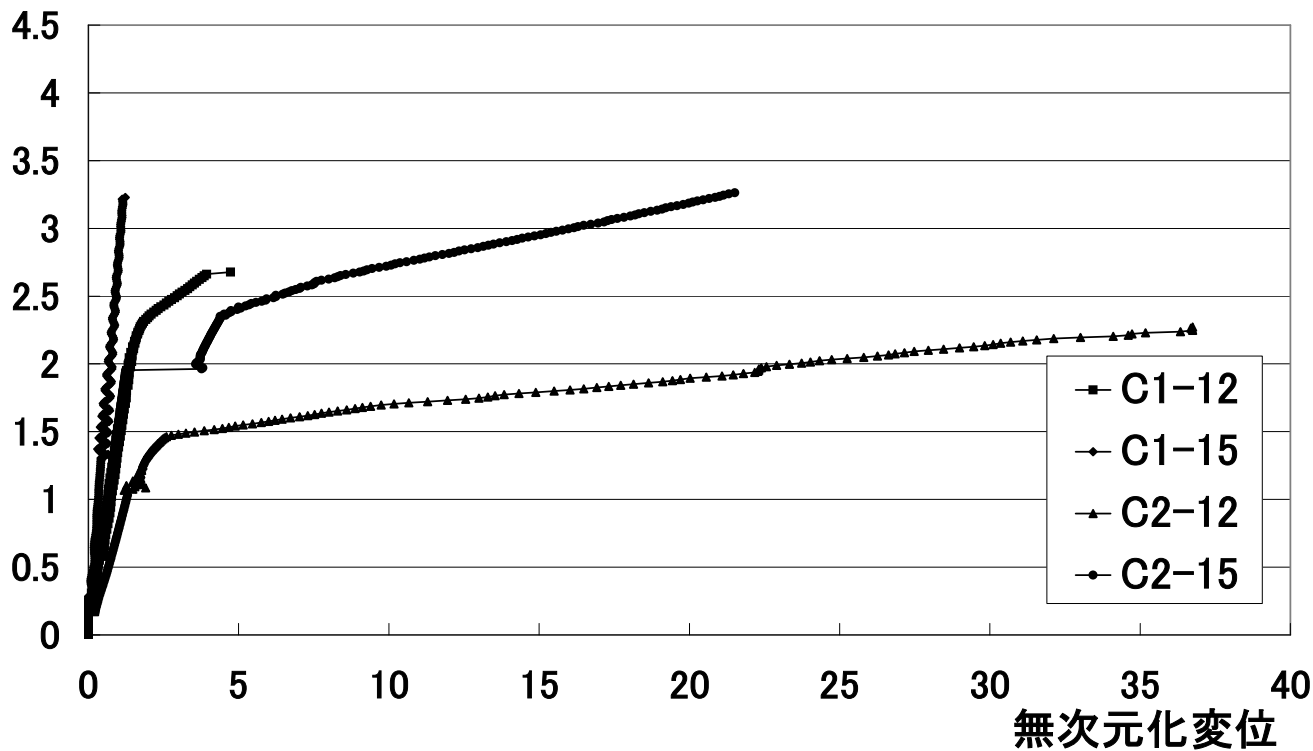


図 13-3 治具の荷重-変位関係 (CFS)

無次元化荷重

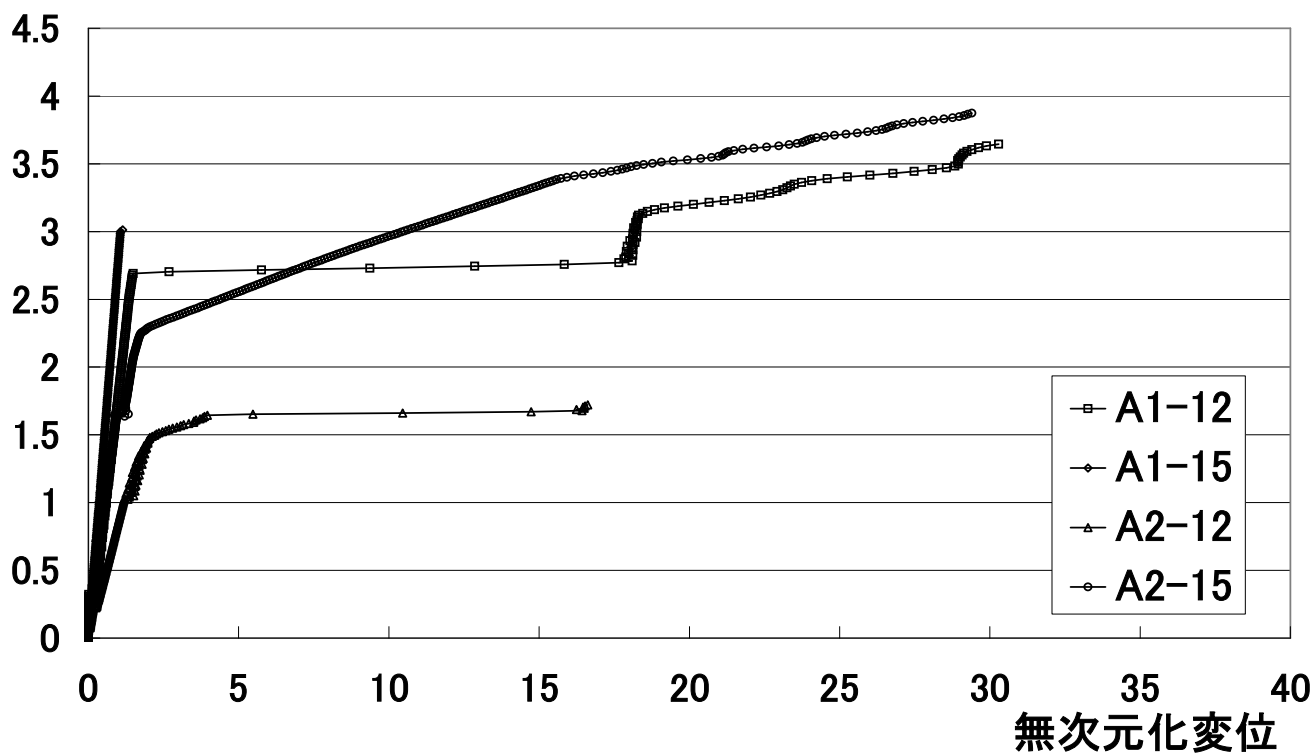


図 13-4 治具の荷重-変位関係 (AFS)

無次元化荷重

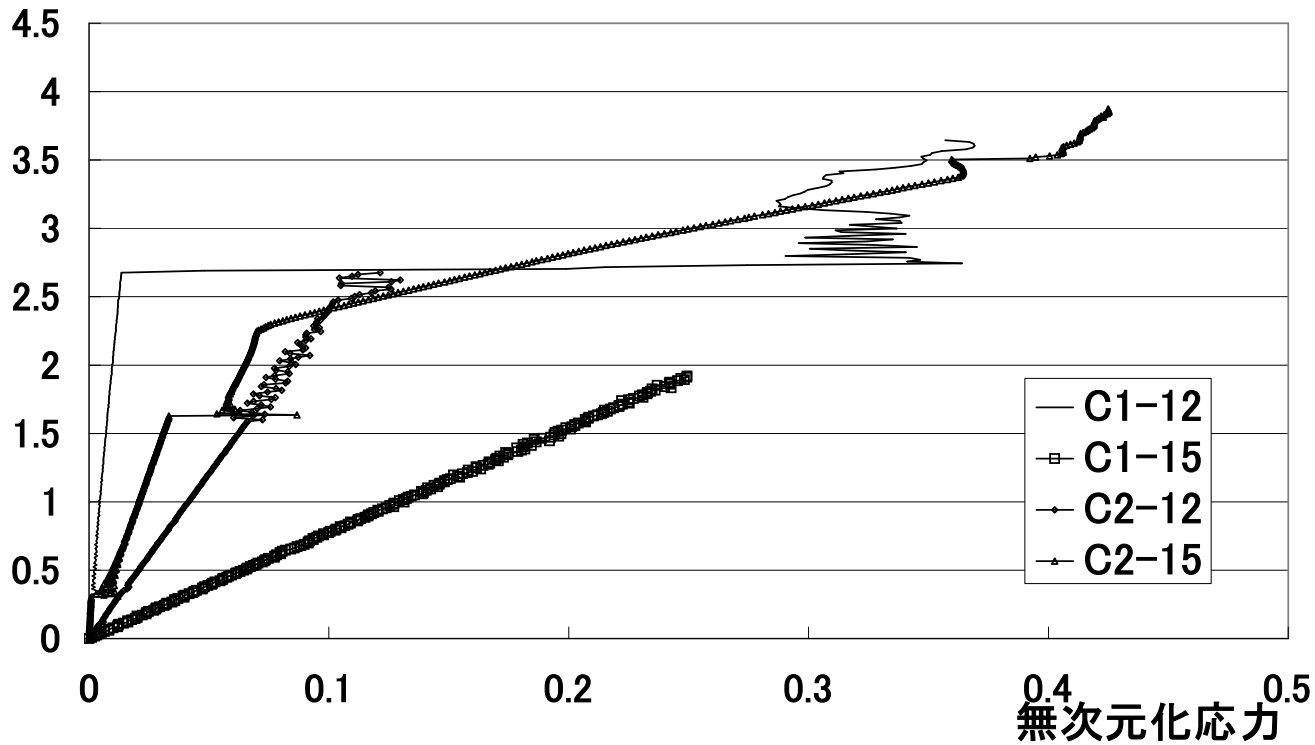


図 13-5 R 部の荷重-主応力関係 (CFS)

無次元化荷重

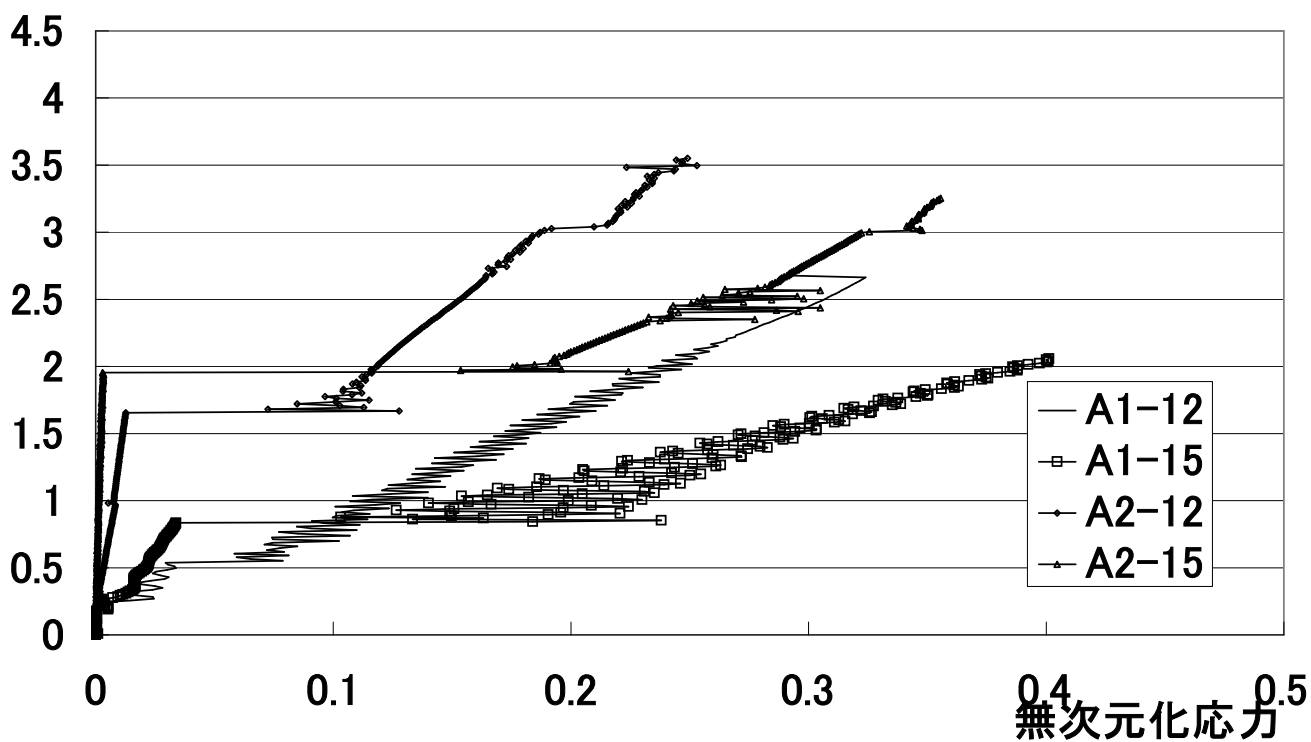


図 13-6 R 部の荷重-主応力関係 (AFS)

無次元化荷重

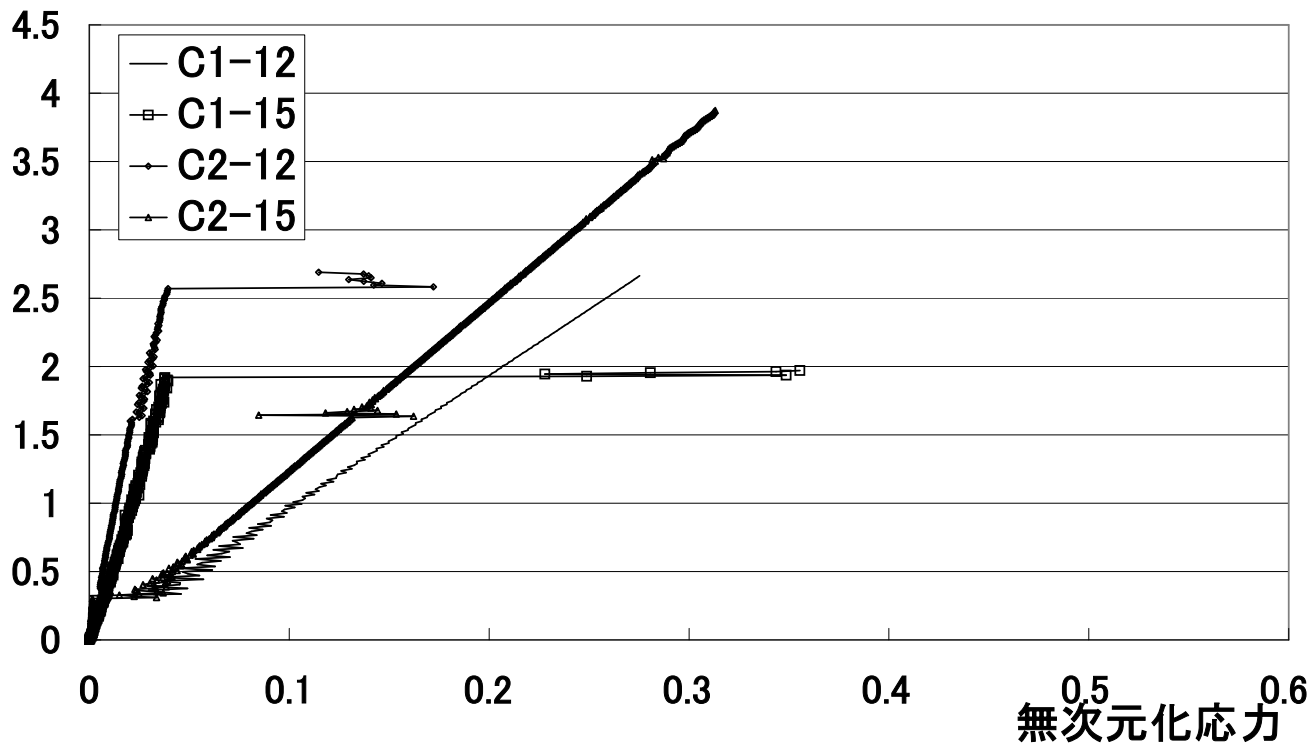


図 13-7 30 部の荷重-主応力関係 (CFS)

無次元化荷重

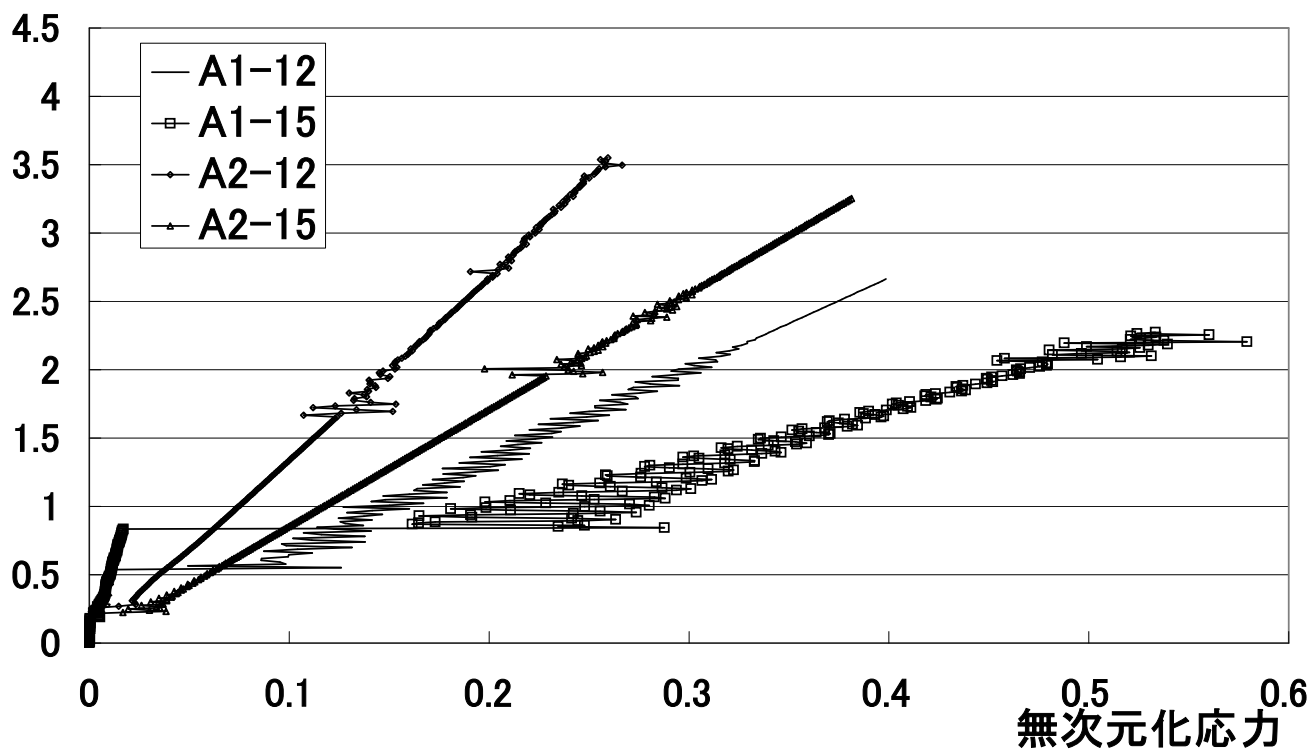


図 13-8 30 部の荷重-主応力関係 (AFS)

無次元化荷重

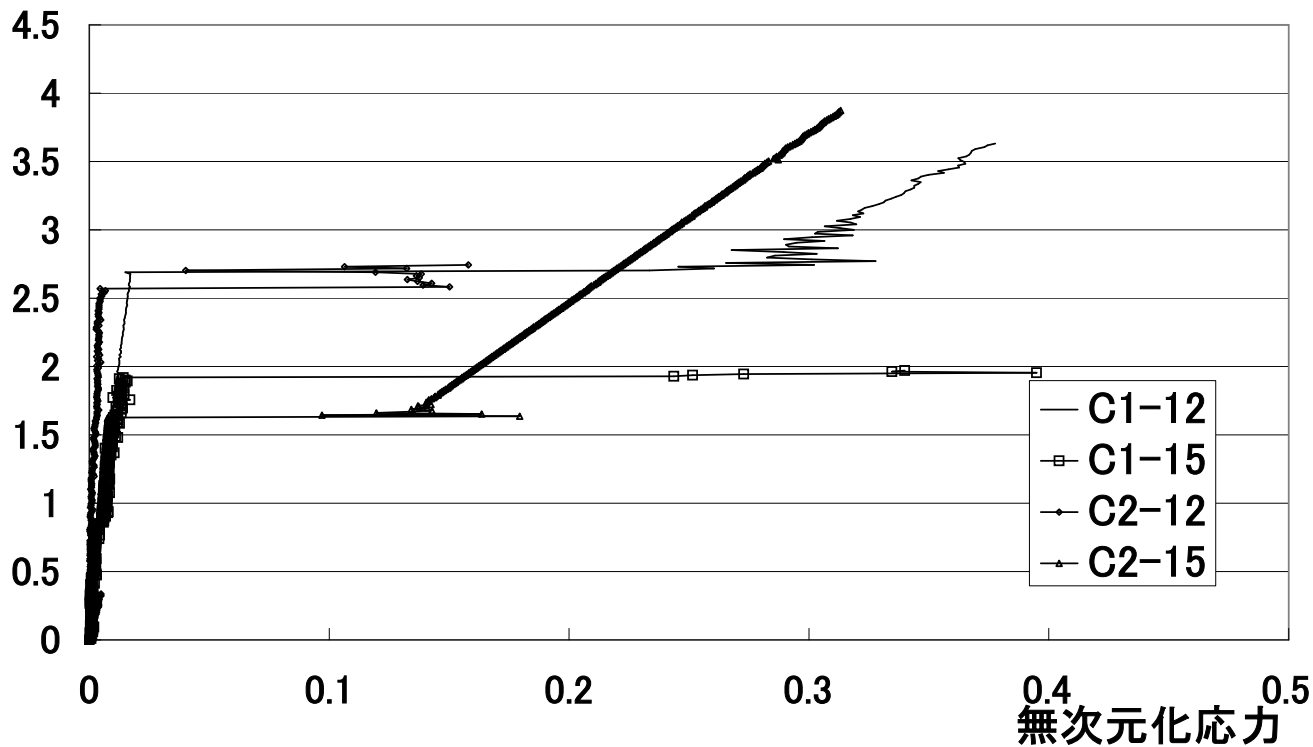


図 13-9 60 部の荷重-主応力関係 (CFS)

無次元化荷重

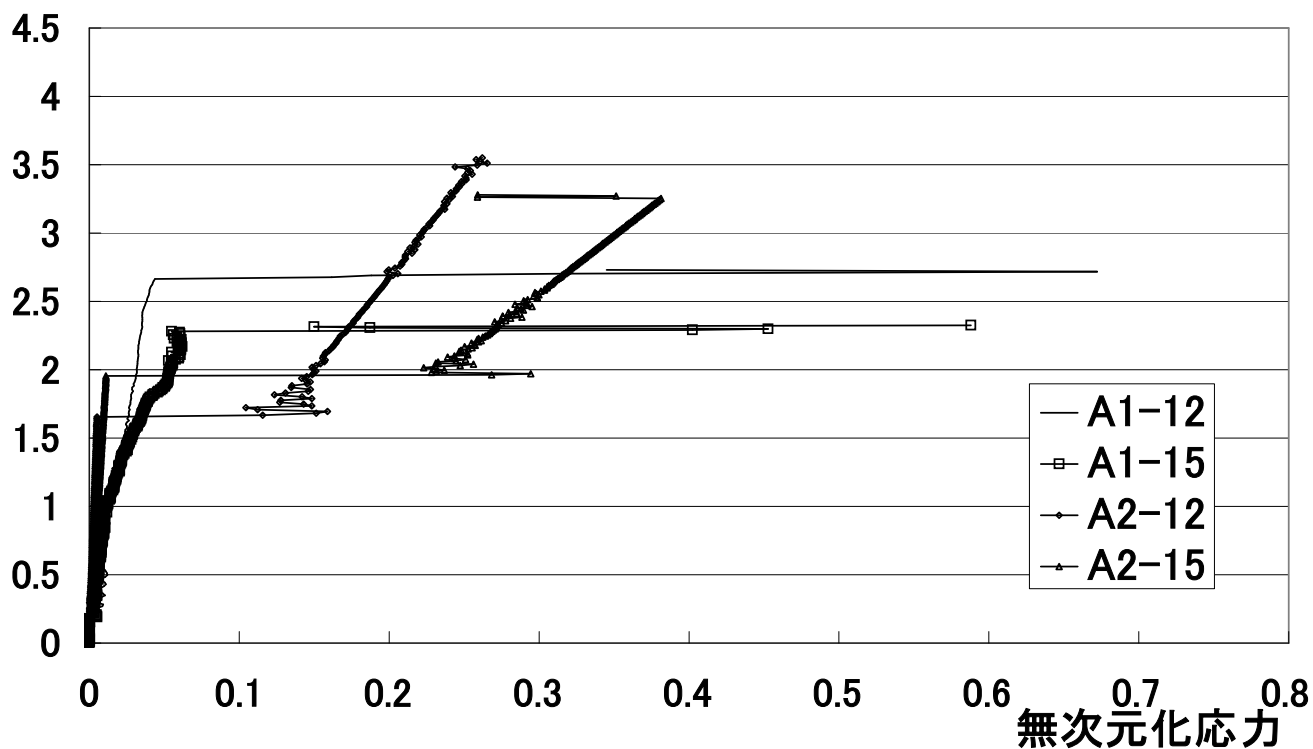


図 13-10 60 部の荷重-主応力関係 (AFS)

無次元化荷重

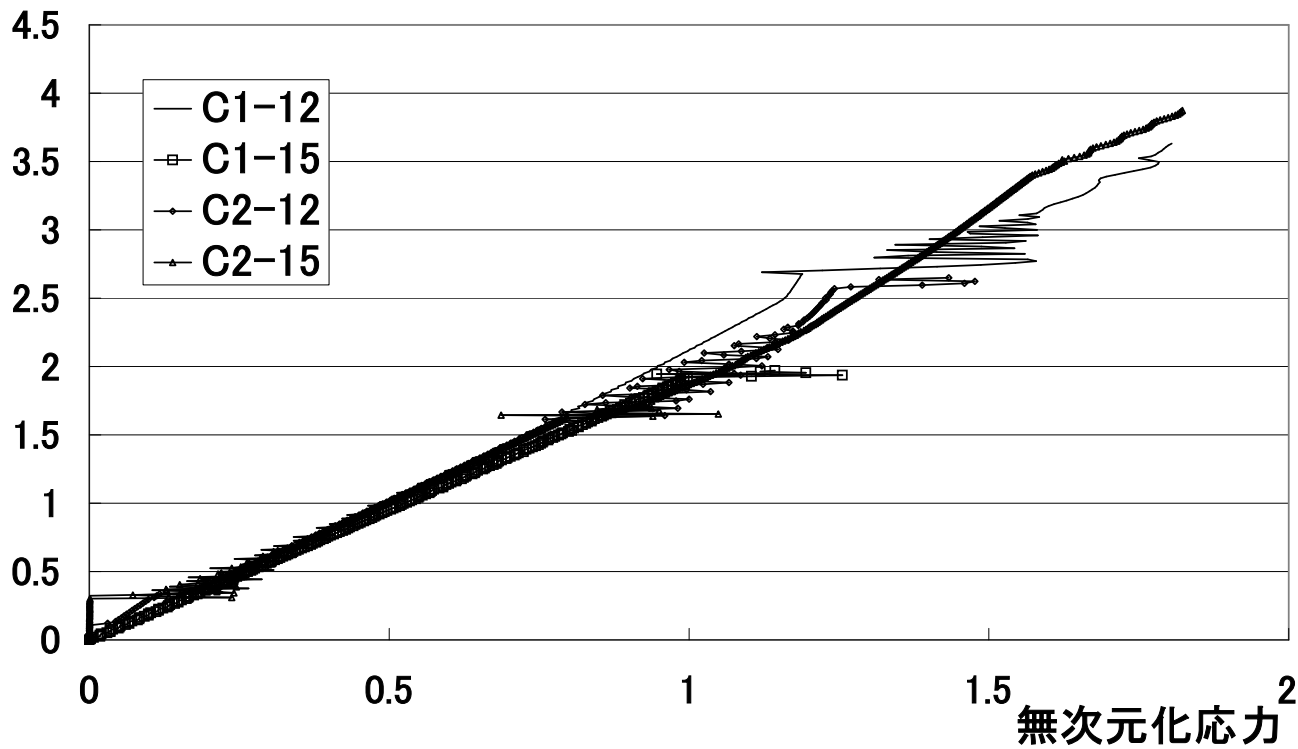


図 13-11 治具の荷重-応力関係 (CFS)

無次元化荷重

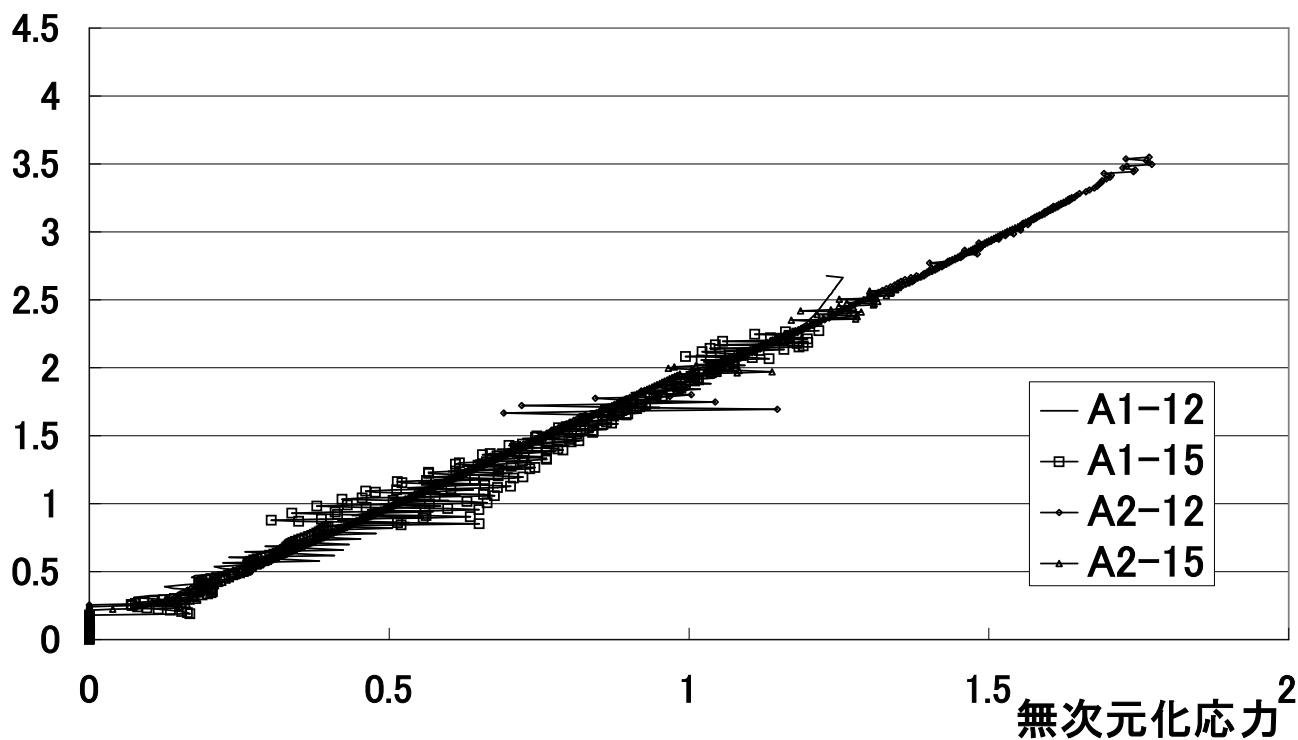


図 13-12 治具の荷重-応力関係 (AFS)

無次元化荷重

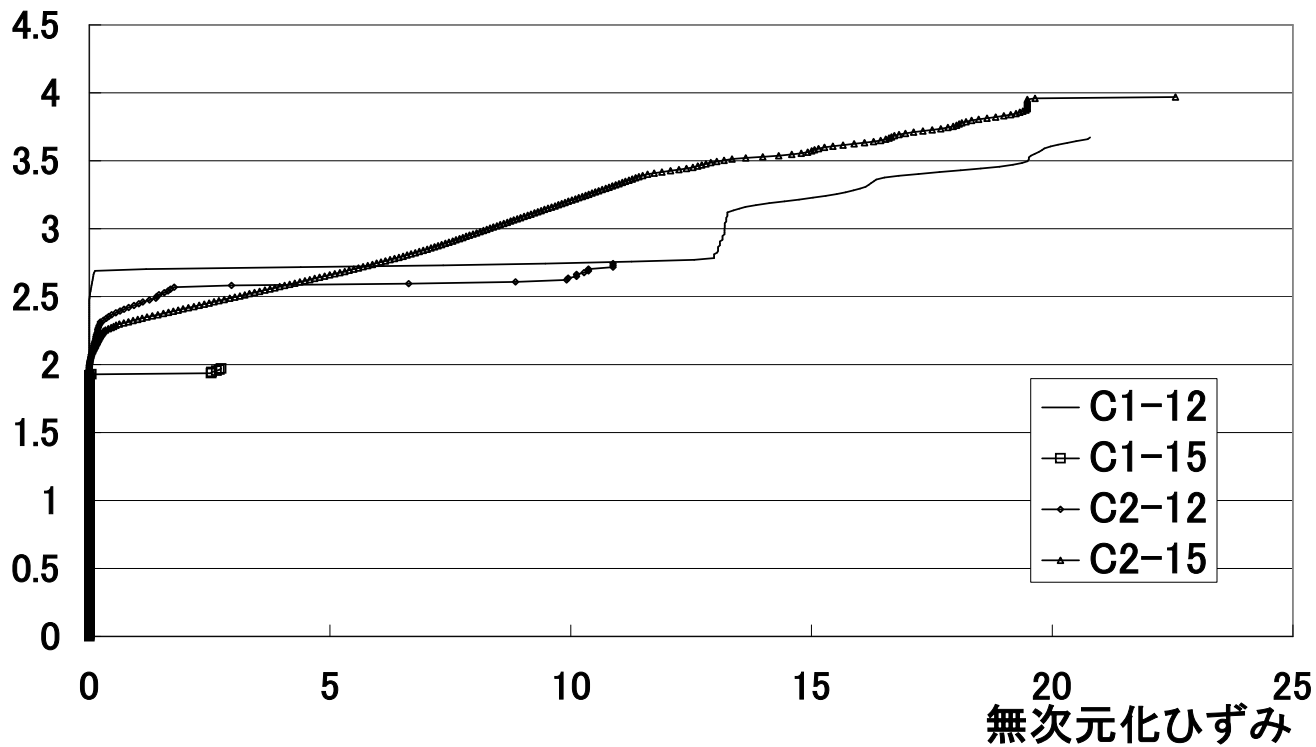


図 13-13 治具の荷重-ひずみ関係 (CFS)

無次元化荷重

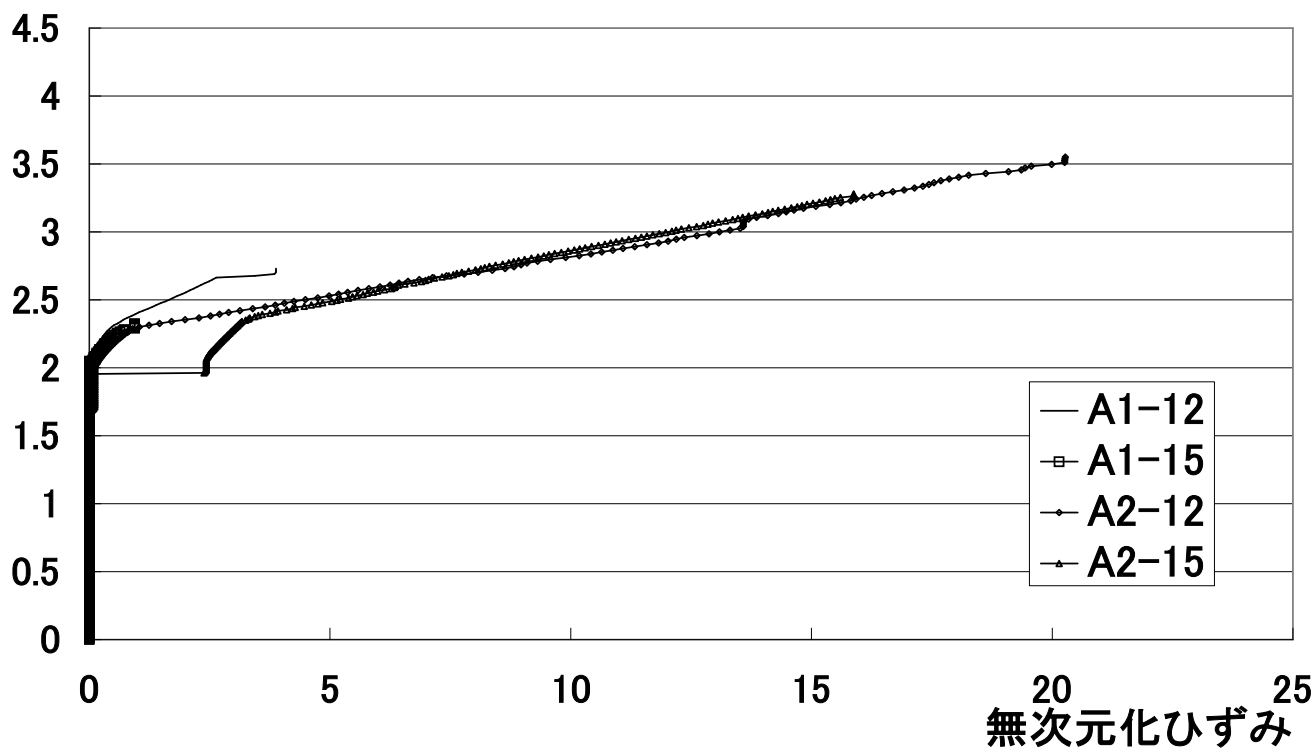
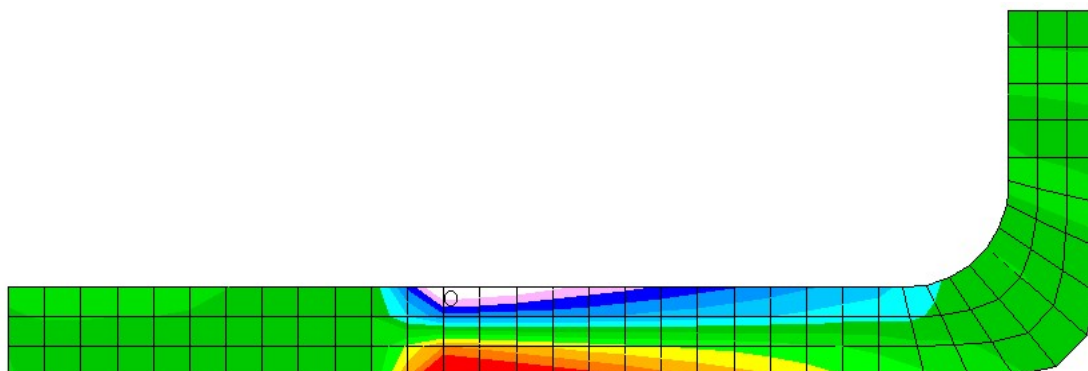
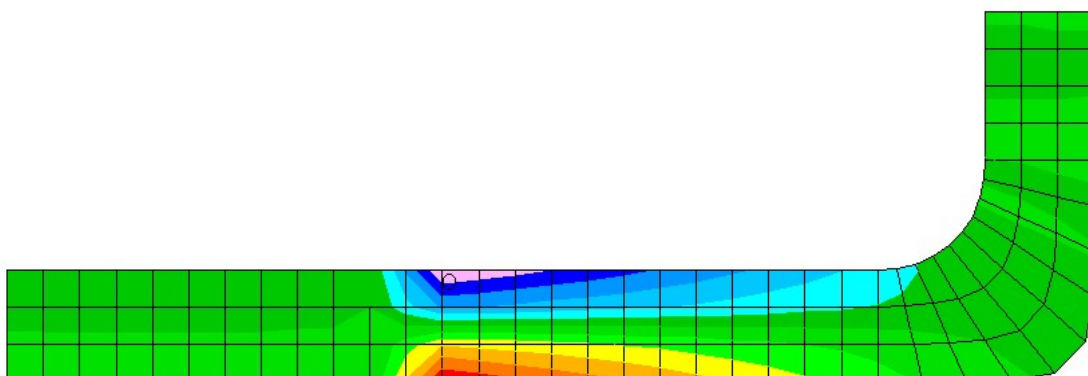


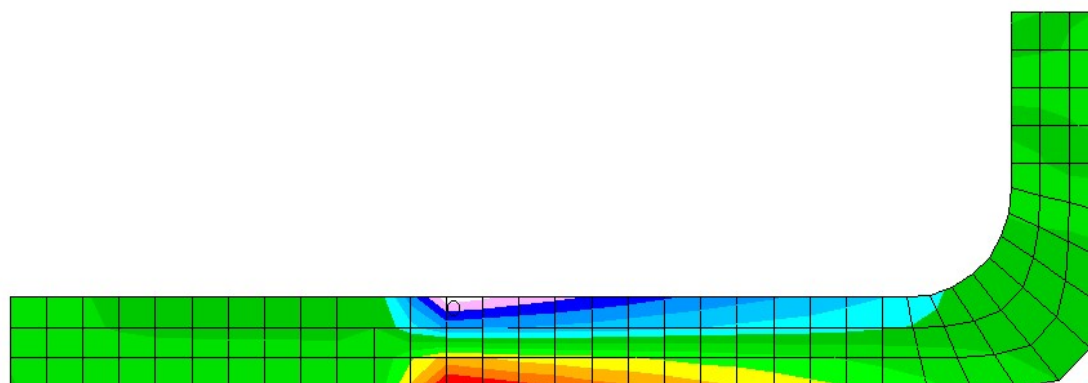
図 13-14 治具の荷重-ひずみ関係 (AFS)



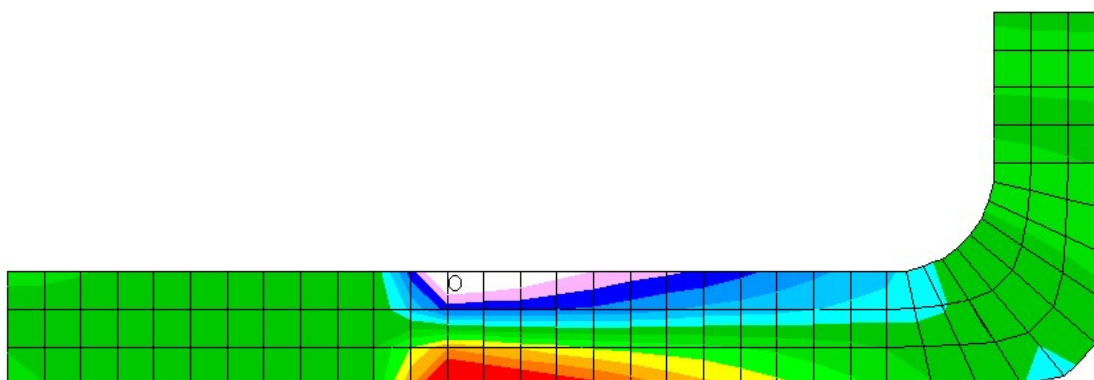
C1-12 アンカーボルト付近で CFS の破断



C1-15 被定着体と CFS の剥離

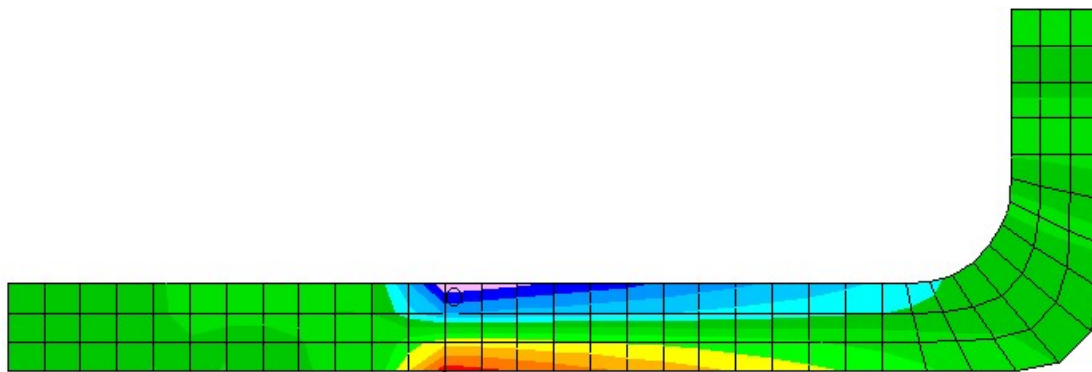


C2-12 治具の破壊

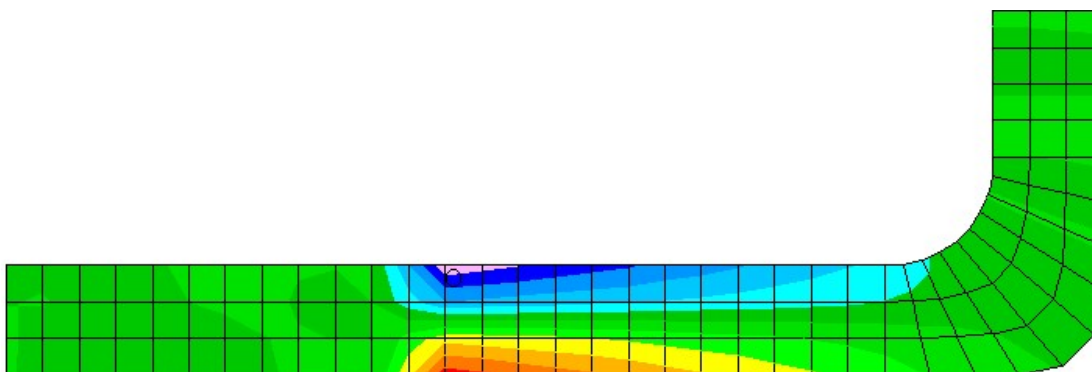


C2-15 アンカーボルト付近で CFS の破断

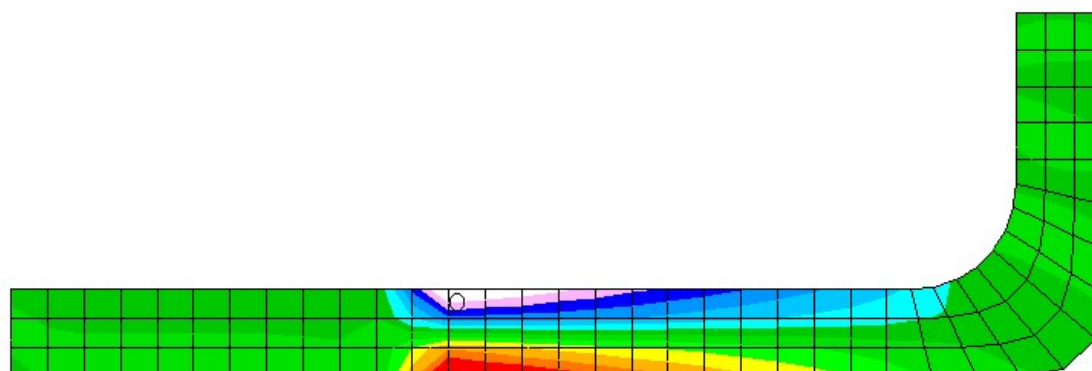
図 13-15 CFS を用いた定着用治具の応力分布



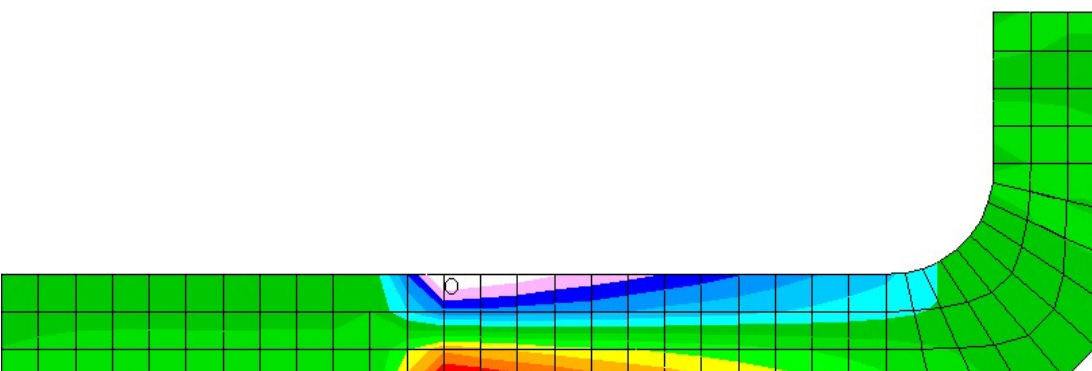
A1-12 アンカーボルト付近で AFS の破断



A1-15 被定着体と AFS の剥離



A2-12 被定着体と AFS の剥離



A2-15 アンカーボルト付近で AFS の破断

図 13-16 AFS を用いた定着治具の応力分布

無次元化荷重

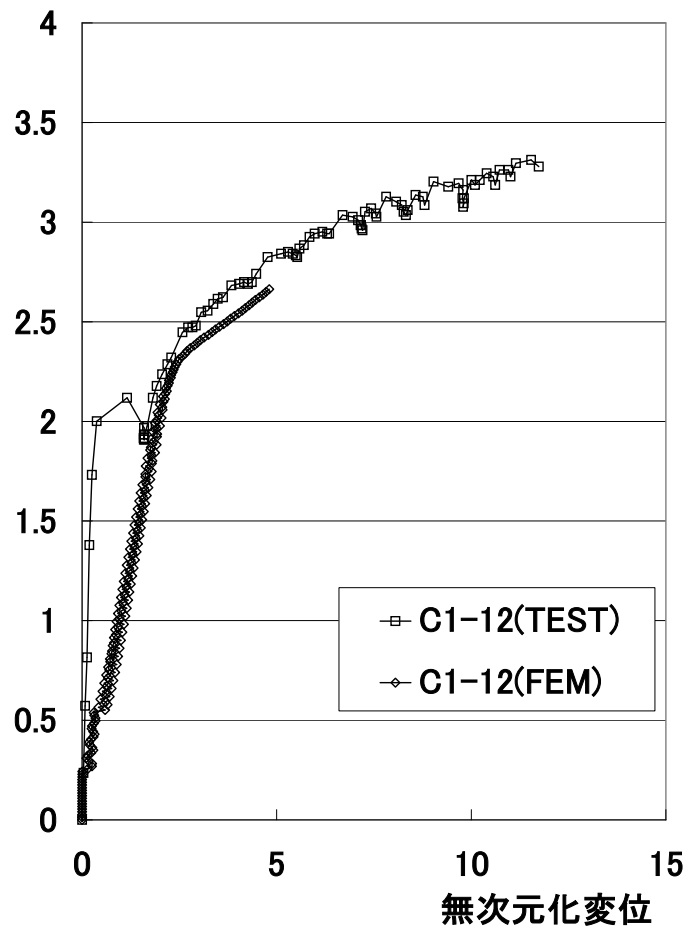


図 13-17 被定着体の荷重-変位比較図

無次元化荷重

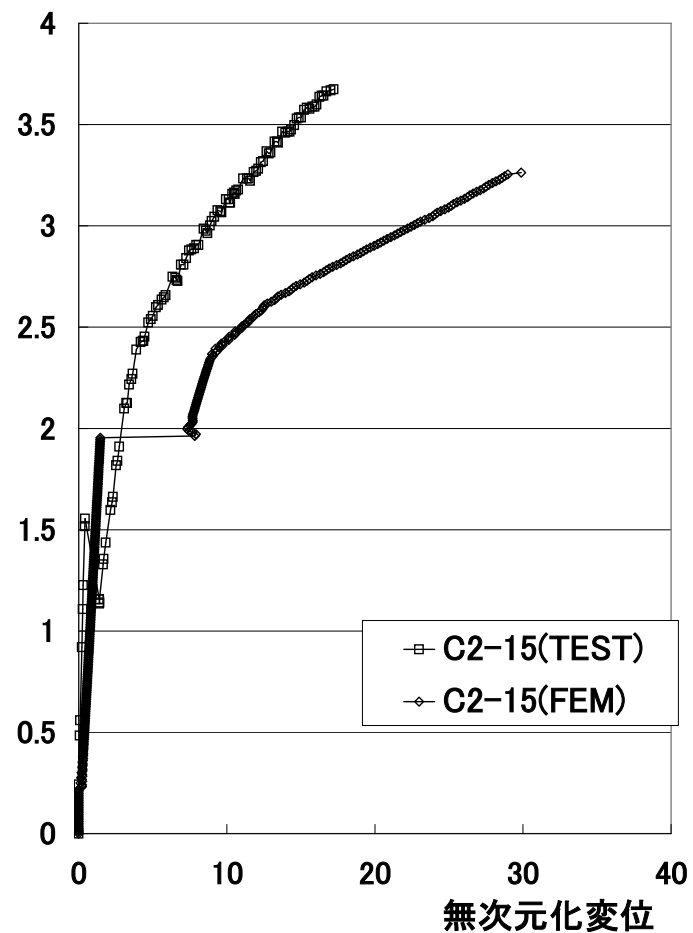


図 13-18 被定着体の荷重-変位比較図

無次元化荷重

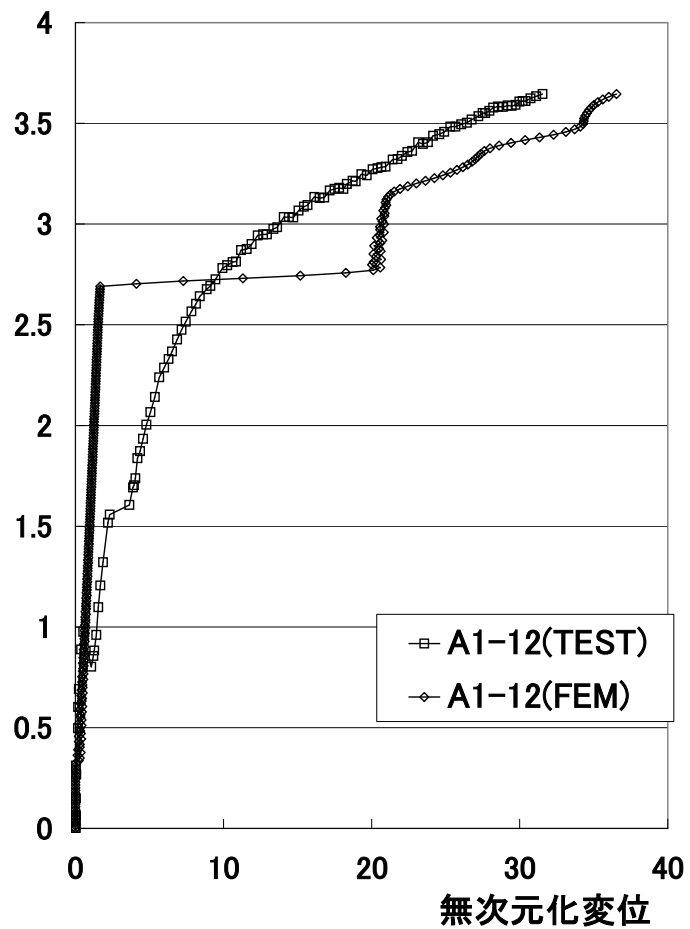


図 13-19 被定着体の荷重-変位比較図

無次元化荷重

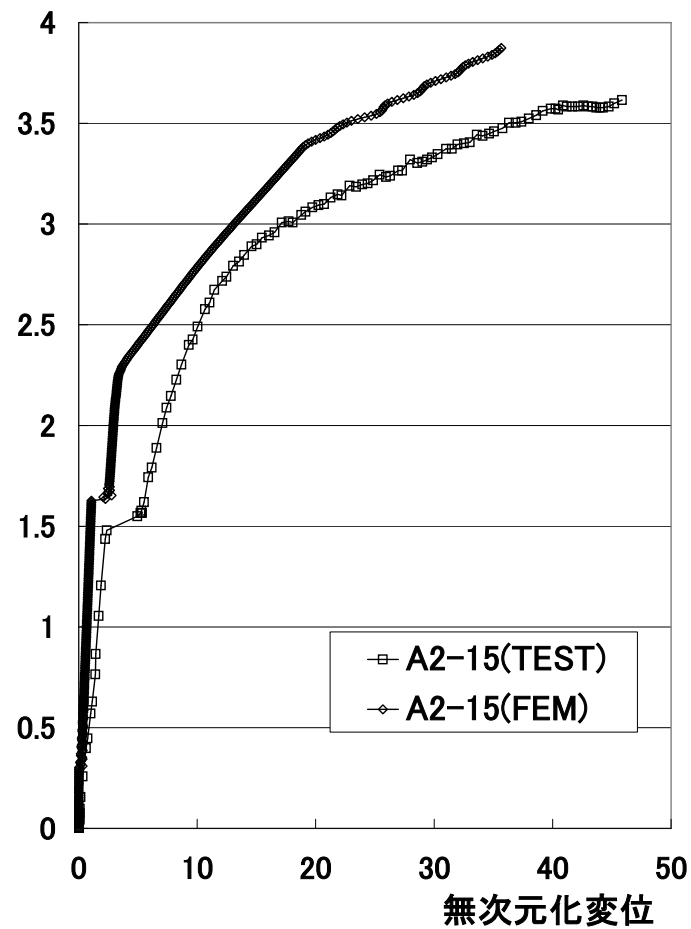


図 13-20 被定着体の荷重-変位比較図

無次元化荷重

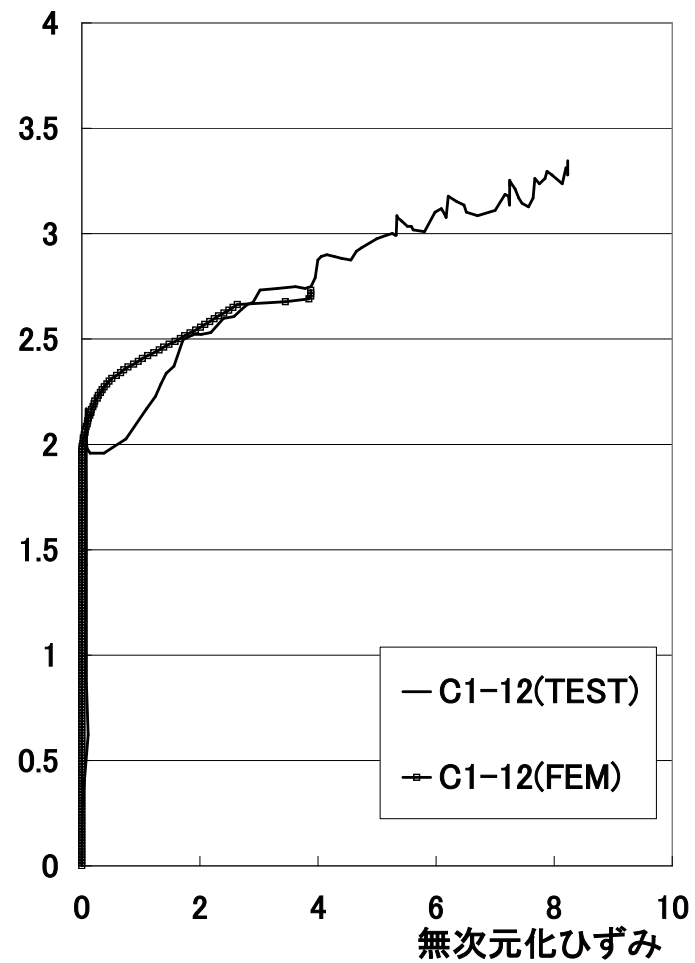


図 13-21 治具の荷重-ひずみ比較図

無次元化荷重

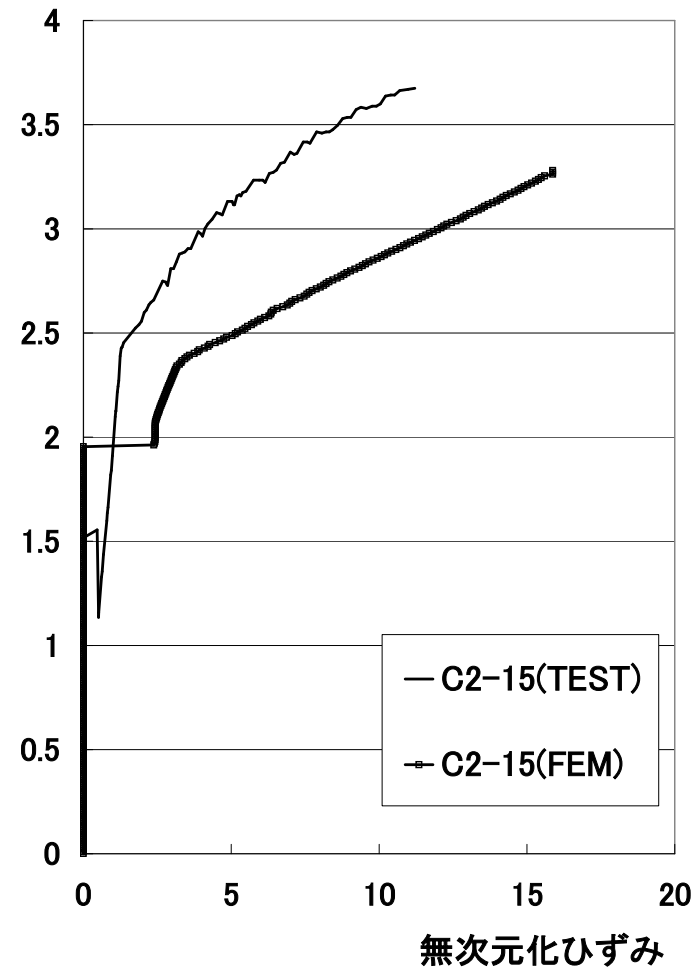


図 13-22 治具の荷重-ひずみ比較図

無次元化荷重

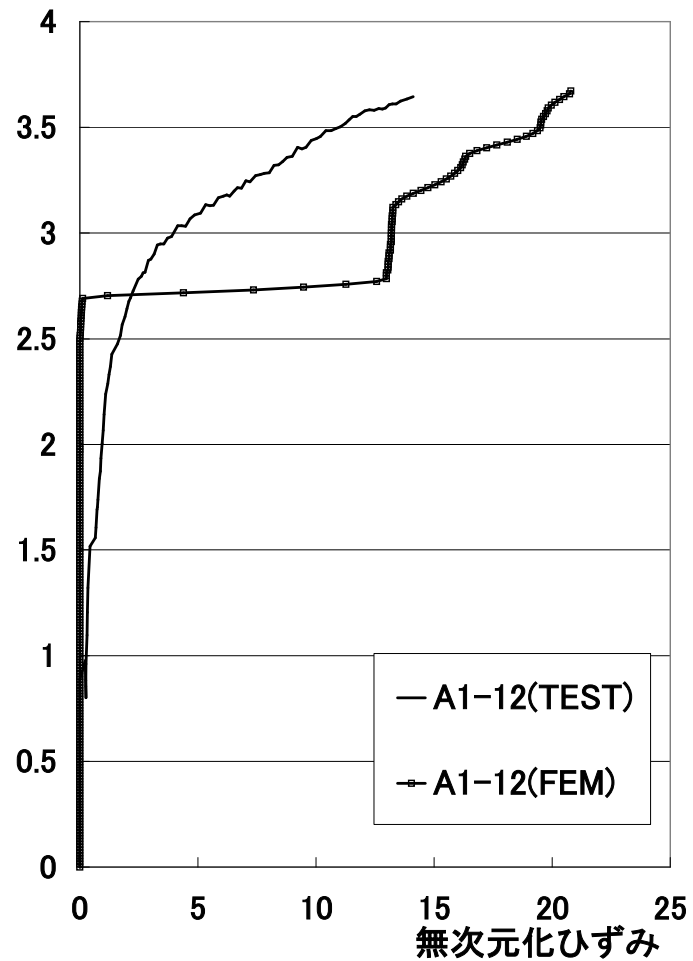


図 13-23 治具の荷重-ひずみ比較図

無次元化荷重

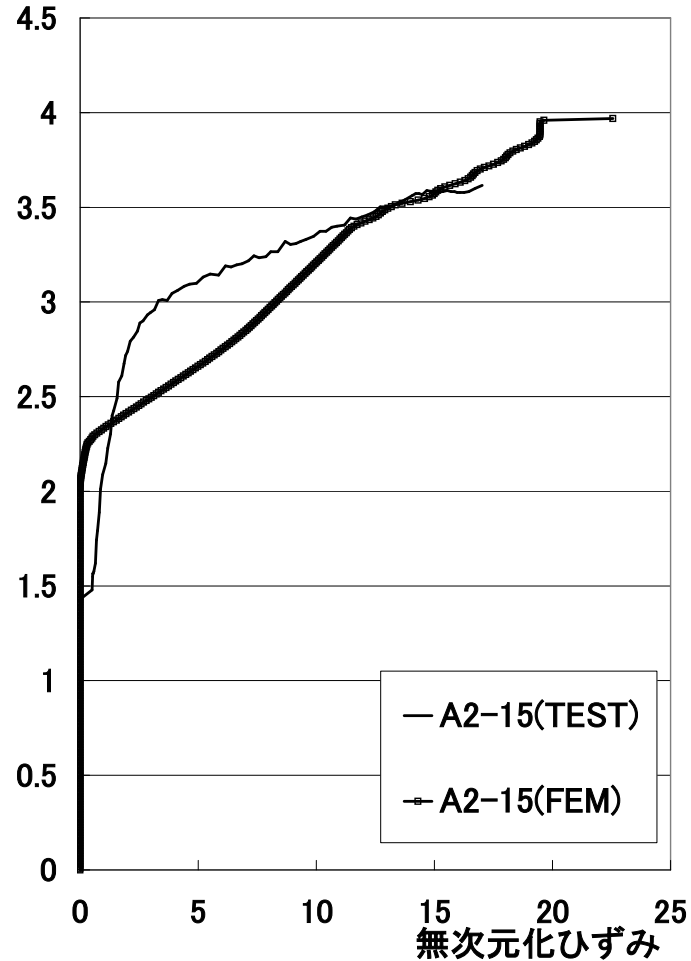


図 13-24 治具の荷重-ひずみ比較図

参考文献

- 1) 半野・大塚・藤本:既存 RC 橋脚の主基部の耐震補強に関する実験, 土木学会第 48 回年次学術講演会, I-97, pp. 342-343, 1993. 10.
- 2) 中野・佐々木・堤:鋼板補強した RC 橋脚の基部に着目した交番載荷試験, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-323, pp. 646-647, 1997. 9.
- 3) 在田・鎌田・海原:鋼板巻き補強を行った既存 RC 柱の鋼板の役割, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-325, pp. 650-651, 1997. 9.
- 4) 佐野・小俣・三浦:鋼板接着により補強された鉄筋コンクリート梁の曲げ性状, 構造工学論文集, Vol139A, pp. 1361-1368, 1993. 3.
- 5) 岡野・森山・松本・大内・涌井:炭素繊維シートによるせん断補強効果に関する解析, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-156, pp. 312-313, 1997. 9.
- 6) 前川・裾田:炭素繊維シートを用いた RC 補強橋脚実験結果の設計的考察, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-313, pp. 626-627, 1997. 9.
- 7) 篠原:新素材により巻き立て補強された RC 柱の耐震補強効果に関する研究, 武蔵工業大学修士論文, 1996. 3.
- 8) 日経コンストラクション:技術フラッシュ, pp. 26-27
- 9) 呉・田名部・松崎・神田・横山:FRP シート緊張接着によるコンクリート構造部材の補強法の提案, 構造工学論文集, Vol144A, pp. 1299-1308, 1998. 3.
- 10) 岡野・渡辺・渡邊・瀧口:RC 補強柱の変形性能に関する一考察, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-315, pp. 630-631, 1997. 9.
- 11) 西野・河津・松木・森・満木:アラミド繊維シートによる補強に関する一実験, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-158, pp. 316-317, 1997. 9.
- 12) 鉄道総合技術研究所:炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 1996.
- 13) 土木学会年次学術論文集
- 14) 土木学会論文集
- 15) コンクリート工学年次学術講演会報告集
- 16) 財団法人 鉄道総合技術研究所:炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針
- 17) 財団法人 鉄道総合技術研究所:アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の

耐震補強工法設計・施工指針

- 18) 半野・大塚・藤本:既存 RC 橋脚の主基部の耐震補強に関する実験、土木学会第 48 回年次学術講演会、I-97、pp342-343(1993)
- 19) 中野・佐々木・堤:鋼板補強した RC 橋脚の基部に着目した交番載荷試験、土木学会第 52 回年次学術講演会、v-323、pp646-647(平成 9 年)
- 20) 在田・鎌田・海原:鋼板巻き補強を行った既存 RC 柱の鋼板の役割、土木学会第 52 回年次学術講演会、v-325、pp650-651(平成 9 年)
- 21) 日本建築学会:鋼構造設計基準
- 22) 佐藤・西・三上・岸・谷本・松岡:アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の静的耐荷性状, アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の靱性能に関する実験的研究(コンクリート工学年次論文報告集、vol. 18, no. 2, pp. 1451-1462, 1996)
- 23) 服部・福本・嘉指・宮川・藤井:連続繊維シートによるコンクリートの補強とその耐酸性, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp. 938-939
- 24) 佐伯・志村・秦:アラミド繊維シートを緊張材として用いた PRC 桁の耐力, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp. 934-935
- 25) 東燃株式会社:FORCA トシート技術資料.
- 26) 帝人株式会社:AR システム技術資料
- 27) 株式会社 東京測器研究所:自動デジタルひずみ測定器 TDS - 301 取扱説明書

謝辞

皆川 勝助教授には学生生活の半分にあたる3年間もの間、不勉強な私を導いていただきました。公私ともども正しい道に導いていただきありがとうございます。常に熱心なご指導は非常に感謝しております。本当にありがとうございます。

また、ご多忙中にもかかわらず査読をしていただいた本大学の小玉克巳教授、吉川弘道教授には研究に対して貴重なご意見をいただきました。また、同大学の佐藤安雄技士、仲宗根茂技士には実験の実施についてご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。