共同研究報告書
整理番号第341号

FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書

－表面疵を有する引抜成形GFRP厚板の静的及び疲労強度特性－

平成18年4月

独立行政法人土木研究所
旭硝子マテックス（株）
石川島播磨重工業（株）

Copyright © (2006) by P. W. R. I.

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

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

共同研究報告書
第341号2006年4月

FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書

－表面疵を有する引抜成形GFRP厚板の静的及び疲労強度特性－

独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ 橋梁チーム
上席研究員　村越　潤
主任研究員　田中　良樹
研　究　員　長屋　優子
旭硝子マテックス(株) 提案企画部
渡辺　哲也
石川島播磨重工業(株) 橋梁事業部基本計画部
課　　長　小川　潤一郎
鈴木　統

要旨

繊維強化プラスティクス(FRP)の道路橋床版(車道部)への適用性検討の一環として，板厚12 mmの引抜成形GFRP厚板(ガラス繊維／ビニルエステル)を対象材料として，建設現場や供用下で起こり得る表面疵が静的強度及び疲労強度に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果，引張破断荷重は表面疵深さ(断面欠損)に応じて低下することが確認された。特にみかけの疵深さが約3 mmの場合の引張破断荷重は，ロービング層の繊維が外見で確認できない内部損傷を受けていたために，みかけの疵深さで推定される破断荷重よりも顕著な低下が見られた。また，疲労試験において，表面疵の断面欠損による応力の増加は疲労強度の低下をもたらすが，応力集中による局部応力は疲労強度にほとんど影響しないことがわかった。

キーワード：引抜成形GFRP，押込み損傷，表面疵，応力集中，疲労，水中浸漬

目　次

1．はじめに …… 1

2．既往の研究 …… 2

2.1　GFRP の概要 …… 2

2.2　GFRP の吸水性 …… 2

2.3　GFRP の静的強度・時間依存変形と水の影響 …… 3

2.4　GFRP の疲労挙動 …… 4

2.4.1　FRP の一般的な疲労挙動 …… 4

2.4.2　GFRP への水分浸透が疲労強度に及ぼす影響 …… 5

2.4.3　GFRP の表面疵がその疲労挙動に及ぼす影響 …… 5

2.5　GFRP の疲労試験方法 …… 6

3．試験方法 …… 8

3.1　試験計画 …… 8

3.2　試験片 …… 9

3.3　人工疵 …… 13

3.4　水中浸漬 …… 15

3.5　静的載荷試験 …… 17

3.6　疲労試験 …… 18

4．表面疵と内部損傷 …… 19

4.1　表面疵の外観観察 …… 19

4.2　表面疵深さの測定結果 …… 20

4.3　押込み荷重と表面疵深さ …… 25

5．静的引張試験結果 …… 27

5.1　引張挙動と破壊状況 …… 27

5.2　破断状況 …… 28

5.3　引張強さ …… 30

5.4　弾性係数 …… 33

5.5　表面疵近傍のひずみ …… 35

5.6　貫通孔を有する試験片の破断状況とひずみ分布 …… 39

6．疲労試験結果 …… 48

6.1　疲労試験前静的載荷の結果 …… 48

6.2　疲労試験時の弾性係数 …… 52

6.3　破壊状況 …… 54

6.4 S-N 線 …… 63
7．考察 …… 66
7.1 GFRP 厚板の応力集中 …… 66
7.2 GFRP 厚板の線形性と静的挙動 …… 72
7.3 表面疵が静的破断強度に及ぼす影響 …… 87
7.4 疲労過程と表面疵の影響 …… 92
7.5 表面疵が疲労強度に及ぼす影響 …… 97
7.6 水中浸漬の影響 …… 103
7.7 測定した表面ひずみの有効性 …… 105
7.8 表面疵の影響に関する鋼材との比較 …… 109
8．まとめ …… 110

参考文献 …… 112

付録 疲労試験における頻度測定データ …… 115

1．はじめに

米国では 1960 年代に交通量の著しい増加とともに凍結防止剤の散布量が急増したことが原因で，建設後数年で州間道路などの主要幹線道路の橋梁で著しい鉄筋腐食によるコンクリート床版(主として路面側)のひび割れや剥離が頻発した [1.1)-1.3)]。この損傷は，走行性・走行安全性への悪影響，工事に伴う渋滞，補修費の増大などの点で社会問題となり，今なお多くの損傷橋梁を抱えて維持管理の大きな負担になっている。1970 年代以降，コンクリートのかぶり厚の増加，水セメント比の低減，エポキシ樹脂塗装鉄筋(ECR)の使用などのコンクリート床版の塩害対策が施され，以降のコンクリート床版の耐久性が改善された。しかし，一部において ECR の早期劣化が見られたことと，将来の維持管理費の軽減のためのさらなる耐久性向上が望まれるようになったことから，1990 年代以降，ステンレス鉄筋やそれに類似した高耐食性鋼材を用いた鉄筋，電気防食など，さまざまな対策の適用性の検討と試験的導入が行われている [1.1)-1.3)]。その代替工法の一つとして，繊維強化プラスティクス(FRP)を部分的あるいは全面的に床版材料に採用するための研究と試験施工事例が報告されている [1.4)]。FRP は，比較的高価であるが，塩化物に対する耐腐食性に優れた材料であることからライフサイクルコストの軽減が期待されるとともに，従来の材料に比べて軽量であることから床版取替えなどにおける施工時間の短縮が期待される。1960 年代に建設されたコンクリート床版はかぶりが比較的小さく，床版取替え時に現行基準に適したかぶり厚の適用は死荷重の過大な増加を招くことから，既設床版の取替えにおいては FRP の適用機会が得られる可能性がより大きいと考えられる。

日本では，これまでの鉄筋コンクリート床版の損傷のほとんどが大型車の繰返し載荷に起因した疲労によるものであった [1.5),1.6)]。このため，国内では，総 FRP 歩道橋の適用事例が 1 件あるが，一般の交通に供する車道橋床版に FRP を適用した事例はこれまでにない [1.7)]。しかし，1990 年代のスパイクタイヤの禁止以降，凍結防止剤の散布量が急増しており，米国と同様の塩害劣化が懸念される [1.8)]。

道路橋の床版に FRP を適用した場合，大型車の輪荷重が版上に直接載荷されることとなるので，輪荷重の繰返し載荷による疲労に対する十分な耐久性があることを確認する必要がある。また，床版に限らず，土木工事の現場では，材料表面にへこみやひっかき傷などの損傷が生じることが想定されることから，どの程度の外力により表面に損傷が生じるかを把握するとともに，表面疵が GFRP の機械的性質に及ぼす影響を把握しておく必要がある。床版の場合には，供用後においても表面に損傷が生じる可能性があると考えられる。表面疵を有する GFRP の疲労挙動について研究された事例は散見されるが [1.9)]，鋼材の試験データに比べると明らかにデータ数が少ないと考えられる。また，既往の研究では 1～5mm 程度の比較的薄い GFRP 板を対象としたものであり，土木構造物に使用されるような厚板の引抜成形 GFRP 材について，表面疵を有する場合の機械的性質について検討された事例は見られない。

本共同研究では，平成 14～16 年度にかけて，FRP の道路橋床版への適用性を明らかにするため，道路橋床版に FRP を適用する場合の力学的特性を把握するとともに，施工性，経済性も考慮に入れてその適用性について検討を行うこととした [1.10)-1.12)]。本報告書は，そのうち，現場で生じ得る表面疵が引抜成形 GFRP 厚板の静的挙動及び疲労挙動に及ぼす影響について検討した結果をとりまとめたものである。

2．既往の研究

2.1　GFRP の概要 [2.1)-2.3)]

ガラス繊維強化プラスティクス（GFRP）は，炭素繊維強化プラスティクス（CFRP）に比べると密度が大きく，比強度，比弾性率が小さい傾向にあるが（CFRP に対して比強度で 1/2 程度，比弾性率で 1/4 程度，それぞれ密度に対する比），コストが 1/10 程度であることから，一般的な強度部材として広い用途に適用されている。米国では 1990 年代後半より FRP を道路橋に適用する事例が少しずつ増えており，その多くは GFRP が用いられている。日本では，1998 年に沖縄県に総 FRP の歩道橋が建設され，2000 年には道路橋の試験施工が実施された [2.4)]。

FRP は，鋼材に対しては，比強度が高いとともに，塩化物に対する耐腐食性が優れていると言われる。GFRP の場合，比強度は対鋼材で 10 倍程度であるが，比弾性率は 0.8 程度とやや低い傾向にあり，構造部材として用いる場合にたわみが制約になる傾向にある。FRP は引抜成形による製造技術により，長い部材でもガラス繊維に均等に張力を加えることができるとともに，比較的均質な断面を形成することができる。ただし，引抜成形 FRP は既存の設備の規模から断面の大きさが限定される(1 部材の最大幅 300 mm 程度)。FRP の接合は，接着剤による継手やボルト継手があるが，鋼材の溶接のような融着による接合技術がないため，設計上の自由度は鋼材に比べて限定される。

FRP はガラス，炭素などの強化繊維とマトリックス樹脂で構成され，繊維，マトリックスそれぞれの性質と配合，製造方法，断面構成(繊維の方向を含む)などによって性能に大きな幅がある。GFRP に関して，ガラス繊維には用途に応じて E ガラス，S2 ガラス，M ガラスなどのタイプがあり，E ガラスが最も一般的に使用されている。E ガラスは直径 8～12 μm，密度 2.6 g/cm^3，引張強さ 3500 MPa，引張弾性率 75 GPa であり，ロービング（数百から数万本の素線の束），ロービングクロス（ロービングの織物），チョップドストランド（1.5～25 mm 程度の長さに切断したもの）などの形態で供給されている。マトリックスに用いられる熱硬化性樹脂には，もっとも一般的な不飽和ポリエステル樹脂の他，強度特性に優れたエポキシ樹脂，耐食性，強度特性に優れたビニルエステル樹脂などがある。本共同研究では，床版材料としてコストパフォーマンスに優れた引抜成形 GFRP 材（E ガラス／ビニルエステル)を用いることとした。

2.2　GFRP の吸水性

FRP は一般に水中に浸漬した場合に吸水する性質がある。Benmokrane らは数種類の GFRP のコンクリート補強材(ϕ 9.3～12.4 mm, W_f = 63～78 %)を対象に吸水試験(ASTM D543-87, 水温 60℃)を実施した [2.5)]。その結果，マトリックスの種類(ポリエステル樹脂，ビニルエステル樹脂など)に関係なく，浸漬直後から吸水が明確に見られ時間とともに横ばいになること，1600 時間(約 2 ヶ月)での質量増が 0.2～0.3%程度であったこと，水温が高いほど吸水がやや速いことなどがわかった。また，ガラス繊維自身の吸水は無視し得ることから，これらの吸水はマトリックスの部分に依存しており，ファイバーの含有率が増加するほど吸水の程度は低下した [2.5)]。Shao らは引抜成形 GFRP 矢板(ガラス繊維，ポリエステル樹脂)のフランジ(板厚 4.7 mm,

V_f = 58 %)及びウェブ(板厚 3.2 mm, V_f = 37 %)から切り出した試験片(10 mm×194 mm, 切断面は防水のためエポキシ樹脂を塗布)を 23℃の水中に 260 日間浸漬した結果, 吸水による質量増が 1.3～1.8 %であったと報告している [2.6]。樹脂マトリックス中には湿潤大気中であっても水分が拡散浸透する [2.7]。西崎らの引抜成形 GFRP 箱断面部材(ガラス／ビニルエステル)から切り出した試験片(板厚 3～4 mm, 幅 15 mm, V_f = 70 %)の水中浸漬試験(水温 60℃)では 20 日程度で 0.4～0.5 %の質量増が見られた [2.7]。また, 60℃, 65～85 %RH の気中に暴露した場合, 60 日程度で 0.15～0.3 %程度であった。なお, ビニルエステル樹脂単体を 60℃水中浸漬した場合, 20 日程度で質量増は約 0.8 %, 60℃, 85 %RH の気中に暴露した場合, 20 日程度で 0.5～0.6 %程度であった [2.7]。

2.3 GFRP の静的強度・時間依存変形と水の影響

(1) 静的強度

ガラス繊維の材料劣化は, 応力の有無に関わらず生じるもので, 短期間では変化は見られないが, ある程度の期間, 腐食環境（ガラス繊維にとっては水中または多湿な気中などの環境）に暴露されることによって静的強度が徐々に低下する(無応力劣化, Zero-stress aging)[2.8]。低下が生じる時期は, 主として繊維の置かれる環境条件に依存する。厳しい環境下での静的疲労試験では, 無応力劣化も生じており相互に作用する。

ガラス繊維がマトリックスで覆われている GFRP であっても, マトリックス中に水分が浸透することによって静的強度が低下する。例えば, Hayes らは, 30 日間, 45℃水中に浸漬した GFRP(ガラス／ビニルエステル)試験片の引張強さが水浸なしに比べて 25%の低下をもたらすことを確認した [2.9]。引抜成形 GFRP 材(ガラス／ビニルエステル)を 440 日間, 60℃の水中に浸漬した場合, 試験時の吸水率 0.12 %(吸水後 20 日で最大 0.45 %に達した後減少した)で, 曲げ強度は水浸前の 60 %以下に低下した [2.7]。また, 常温での水中浸漬試験(吸水率 1.7 %)でも引張強さが 60 %低下した [2.6]。この低下は剛性の低下も伴っていた。Shao らは, 強度, 剛性の低下は水分の浸透によって繊維とマトリックスの付着力が低下することに起因すると述べている [2.6]。これらの試験では, ガラス繊維の無応力劣化も含まれていたものと推察されるが, いずれもこの点について言及されていない。吸水により強度低下が見られた試験片を乾燥させると, ある程度の強度回復が見られるものの, 完全には戻らない [2.9), 2.7]。この原因について, Hayes らは初期の水浸は樹脂の膨張と繊維の拘束に起因して微細ひび割れが生じるなどの不可逆的な損傷が生じるためと述べている [2.9]。

(2) クリープ変形と応力腐食

FRP は一定応力下で時間とともに変形が生じる(クリープ変形)。その原因の一つとして, ガラス繊維の応力腐食 (Stress corrosion)がある [2.10]。応力作用下でガラス繊維は水に化学的に侵食される。ガラス繊維に作用する応力は, ガラスの膨張とタイトな隙間(微細な初期欠陥)からのナトリウムイオンの遊離をもたらす [2.10]。水分はガラス繊維に浸入拡散するとともに, このナトリウムイオンとの反応によりガラス組織が分解され, 透過性(Coherency)の低下, ひび割れ, 剥離などの劣化が生じる [2.10]。GFRP の場合, 水分などの腐食因子が樹脂中に拡散浸透した後にガラス繊維の応力腐食が生じると考えられるが, 板の端部処理や表面疵の存在によっては, 直接繊維とマトリックスの界面に水分が浸透することもあり得る。

(3) クリープ破断及び静的疲労

FRP に作用する持続応力が比較的大きい場合，クリープ変形が過度に進行して静的強度よりも低い応力で自然に破断する。この現象をクリープ破断(Creep rupture)という。また，これと類似しているが，静的疲労(Static fatigue／Delayed failure)は，一定応力下で時間の関数で表される破断強度の低下である[2.8]。ガラス繊維単体の静的疲労は，繊維内の微細な欠陥(主として初期欠陥)とひび割れの伸展に依存しているとされる[2.10]。

(4) 水の影響

以上(1)～(3)より，GFRP は，作用力の有無にかかわらず，ガラス繊維に水分が浸透した後にガラス繊維自体の劣化と強度，弾性係数の低下をもたらすことがわかる。また，マトリックス樹脂自身は，水分の浸透によりガラス転移点(T_g)を低下させ，樹脂の可塑剤のような働きをする[2.9]。これにより，弾性係数，強度，限界ひずみ，タフネスが顕著に変化して，マトリックスのひび割れ，変質(劣化)，マトリックスと繊維間の剥離をもたらす。GFRP の構造設計においては，部材の置かれる環境条件(湿気，温度，作用応力)に応じて，静的強度の低下，一定応力作用下でのクリープ変形・クリープ破断といった水分の影響に十分配慮する必要がある。

2.4 GFRP の疲労挙動

2.4.1 FRP の一般的な疲労挙動

自動車荷重の繰返し載荷を受ける道路橋の床版に FRP を適用する場合に，その疲労耐久性を明らかにする必要がある。

FRP の疲労試験結果は鋼材と同様に S-N 線で整理され，繰返し作用力が大きいほど破断までの寿命が短くなる疲労特性が明確に見られる。FRP の疲労試験結果は，他の複合材料と同様，応力レベルを繰返し載荷応力 σ_f の静的強度 σ_B に対する比($SR = \sigma_f / \sigma_B$)で整理されることが多い。FRP は鋼材のような疲労限が確認されていないことから，材料間の疲労強度特性の比較等において，10^7 回（または 10^6 回）での疲労強度で表されることがある。材料構成や試験条件によって異なるが，主な FRP の 10^7 回疲労強度(気中)は σ_B に対する比で 0.14～0.25 程度である[2.2]。ただし，FRP は，普通鋼材と異なり，材料構成や試験条件によって S-N 線の傾きが異なっているので，このような特定の繰返し数での相対比較は参考程度のものである(cf. 鋼材の引張作用下での S-N 線(両対数)の傾き m は概ね 3 で一定している)。既往の文献では，S-N 線の縦軸 SR は普通軸で整理されたものと対数軸で整理されたものが見られ，S-N 線の傾きについて十分に言及されていないようである。

FRP の疲労試験では一般に剛性の低下が見られ，疲労破断直前は静的試験で得られる剛性の約 70%に低下する[2.11]。Bhat らは，剛性の変化は概ね 3 段階に区別され，最初の段階ではマトリックスの微細ひび割れ(段階 I)，次に繊維とマトリックスの剥離(段階 II)，さらにこれらの損傷の連結と剥離の伸展が続き(段階 III)，最後に繊維の破断，抜け出しを伴って破壊に至るとしている[2.12]。倉舗らは，GFRP(ガラス繊維マット／CP レジン)の疲労試験における試験片の温度上昇率の変化から疲労試験の挙動を 3 段階に分類して，繰返し数比(N/N_f，N_f : 破壊までの繰返し数)が 0.0～0.15 を領域 I，0.15～0.8 を領域 II，0.8～1.0 を領域 III としている[2.13]。領域 I では材料の変形に伴う摩擦熱による激しい温度上昇が生じ，領域 II から破断直前までは損傷

伸展に伴う伸びの増加と温度上昇が生じていた。AE の観測結果から，領域 I までは樹脂割れ，樹脂と繊維の界面剥離に相当する AE 振幅の低振幅域，中振幅域でのカウントが多いが，領域 II では低中振幅域のカウントは減少し徐々に増加する程度となった。また，繊維破断に相当する高い AE 振幅域は領域 I ではほとんど観測されず，領域 II から徐々に増加し，領域 III の特に破断直前に急激に増加した。

吉野らが行った GFRP の疲労試験では，曲げ，引張の載荷方法によって，疲労挙動(剛性低下)に相違が見られた [2.14]。曲げの場合，剛性率の低下は表面疵が大きいほど早い時期に発生したが，引張の場合には剛性率の低下が破壊直前に発生した。引張疲労の場合は主としてガラス繊維が主体的に働くが，曲げ疲労の場合はマトリックスがせん断抵抗に大きく寄与しており，樹脂のせん断疲労特性が影響するとしている。

倉鋪らは，応力レベルを 2 段階に分けて疲労試験を行った結果，GFRP の疲労破壊はマイナーの累積疲労被害則(線形累積損傷則)が適用できるとしている [2.15]。

2.4.2 GFRP への水分浸透が疲労強度に及ぼす影響

中西の研究では，水中の疲労強度が気中での結果よりも明らかに小さく，水中浸漬の時間の経過とともにその低下の割合が大きくなった [2.16]。Liao らの研究でも，GFRP(ガラス／ビニルエステル)の 4 点曲げ疲労試験(室温)の結果，低い応力レベルの場合に水中での疲労強度は気中での結果より低い傾向が見られた [2.17]。

Hayes らは，疲労試験前の 30 日間，45℃水中浸漬による水分浸透(0.8%)が GFRP(ガラス／ビニルエステル)の引張疲労強度の低下をもたらすことを実験で確認した(疲労試験中はウェットペーパータオルで乾燥を防いだ)[2.9]。その低下の割合は静的強度の水浸による低下の程度(気中強度に対して 26%減)と同程度であり，疲労強度を湿潤・乾燥それぞれ同じ環境条件の下での静的強度で除した場合に，湿潤・乾燥に関係なく一つの S-N 線で表せることがわかった。水分侵入(に伴う応力腐食)によってガラス繊維表面に応力集中をもたらすことが静的引張強さの低下の主因であり，それは疲労試験結果にも現れるが，疲労破壊の機構は水分の存在による影響を受けないとされた [2.9]。

一方，駒井らの研究では，CFRP 及び AFRP(いずれもマトリックスはエポキシ樹脂)について，気中・水中でそれぞれ引張疲労試験を行った結果，水中での疲労寿命が気中で行った結果よりも長くなる傾向が認められた [2.18]。これらの疲労寿命(あるいは疲労強度)の改善は，水分の浸透がエポキシ樹脂のダクティリティを改善するとともに，補強繊維の局所での直線性の回復を可能したためによると考察された。

中西の研究では，4 %または 9 %の塩水中でも GFRP の疲労試験を行ったが塩分量による顕著な違いは見られなかった [2.16]。GFRP の気中での疲労試験では繊維がばらばらになってほうき状に破断するが，水中ではそのような破壊は見られなかったとしている。

2.4.3 GFRP の表面疵がその疲労挙動に及ぼす影響

鋼材の疲労と同様に GFRP の場合も貫通孔や表面疵の存在は断面欠損による平均応力の増加と応力集中をもたらす [2.19]。鋼材の疲労強度は貫通孔などの大きさ(断面欠損率)や形状(応力集中による局部応力の程度)に強く依存する。しかし，GFRP は，鋼材に比べて均質でなく，繊維，マトリックスのいずれも微細な欠陥を有しているとともに [2.20), 2.21)]，材料構成や繊維の方向に依存した異方性の強い材料であることから，貫通

孔や表面疵による応力集中の程度や疲労に及ぼす影響が鋼材と異なるかもしれない。表面疵を有するGFRPの疲労挙動の検討では，これらの点を明らかにする必要がある。

吉野らは，表面に深さ0.2～0.6 mmの直線溝を加工した幅7 mm，厚さ3 mmの平織GFRP積層板の曲げ疲労試験及び引張疲労試験を実施して，曲げ，引張ともにアスペクト比(溝の長さ(板の軸直角方向)／板幅)及び溝深さごとにS-N線(SR－log N)が得られること，疲労強度はアスペクト比が大きくなるに従って直線的に低下すること，溝深さについては直線的な低下ではないが，深いほど疲労強度が低下することを明らかにした[2.14]。

また，吉野らは，球状または円錐状の鋼材で表面に押込み損傷を入れた幅7 mm，厚さ3 mmのGFRP積層板の曲げ疲労試験を実施した[2.22]。ブリネル硬さ試験機を用いて押し込み時間30秒一定で試験片中央に荷重をかけることによって種々の押込み損傷を加え，その押込み荷重と内部損傷深さを試験パラメータ(球状の場合，最大4.9 kN)とした。表層の残留へこみ量(0.1 mm以下)は軽微であっても内部で損傷が生じており（損傷深さは横断面写真の白色化の範囲で判定），例えば押込み荷重2 kNで内部損傷深さは約1 mmであった。その結果，押込み損傷の種類(載荷点の先端が球状または円錐状)及び押込み荷重ごとにS-N線(σ －log N)が得られ，損傷を有する試験片の10^6回疲労強度を損傷なしの結果で除した応力比は，損傷の種類(球か円錐か)に関わらず内部損傷深さに応じて直線的に低下することが明らかにされた。

吉野らの一連の研究では，Whitney-Nuismerら[2.19]の一点応力破壊基準(Point stress モデル)に基づき三次元FEMを用いて表面の損傷が疲労強度に及ぼす影響を定量的に評価できることを明らかにした。「一点応力破壊基準とは応力集中部から一定の距離d_oにおける局部応力が，平滑材の破壊応力と等しくなった時に破壊が起こるという破壊発生基準で，このd_oのことを特性寸法という」[2.22]としている。特性寸法d_oはその決定方法が必ずしも明確でないが，吉野らの実験の範囲では0.6 mmが最も実験結果と一致した。この値は縦繊維束の幅に相当しており材料固有の値であるとされた。なお，亀裂伸展による剛性低下は，欠陥部から引張方向に対して直角に伸展する表面亀裂が0.6 mmを超えた時点で開始して，その後の剛性低下も繊維束の損傷の伸展時期と概ね一致していた。

2.5 GFRPの疲労試験方法

JIS K 7118「硬質プラスチック材料の疲れ試験方法通則」はFRPの疲労試験を行う上で参考となるが，試験片の形状寸法は特に規定されていない。JIS K 7054「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法」では試験片の形状寸法が規定されているが，板厚が2～10 mmの範囲とされている。また，疲労試験は対象とされていないようである。

FRPの引張疲労試験方法について検討された事例はあるが[2.23]，既往の研究を見る限り，GFRPの疲労試験における供試体の形状寸法や載荷方法，計測項目などはほとんど統一されていない。試験計画に際して，以下の点に留意が必要である。

(a) 引張疲労と曲げ疲労

これまでのFRPの疲労試験は，軸引張，軸圧縮，曲げ，せん断（層間剥離，層間ずれせん断，曲げせん断），ねじりなど，用途や研究目的に応じてさまざまな載荷方法で行われている。引張疲労の場合，JIS K 7054

に類似してフライス加工(試験片中心の幅をつかみ位置より小さくする)や板厚を変化させた事例，試験片のつかみ部両面に厚さ1～2 mm程度のアルミ板またはGFRP板のタブを接着する事例が見られた。ある程度の大きさの欠陥を有する試験片の場合には，省略される場合があった[2.14]。曲げ疲労の場合は3点曲げで行われた事例が多い。曲げ疲労でもフライス加工する事例が見られた。

(b) 試験片の温度上昇と載荷速度

疲労試験において，繰り返し数の増加に伴い試験片の温度が上昇する[2.13]。このとき，周波数は試験片の温度上昇と比例関係にある。これらの試験片温度の上昇は樹脂割れ，界面剥離，繊維破断といった損傷の過程に伴うものであり，弾性係数の低下(試験中の伸びの増加)とも関連する。

野口は2 Hzでの疲労試験結果(S-N線)は5 Hzまたは10 Hzの結果と比べてやや低かったとしているが[2.23]，2～15 Hzの範囲では疲労試験結果に影響しなかったとする報告もある[2.3]。

(c) 応力比

疲労試験の載荷条件として，上限応力度に対する下限応力度の比(応力比 R)は，引張－引張疲労試験の場合に$R = 0.1$で行われた試験事例が多い(文献2.12では$R = 0.2$)。曲げに伴う層間せん断疲労破壊について，内部に層間剥離欠陥を有する場合には応力比0.1と-0.1で差は見られなかったが[2.24]，層間剥離欠陥がないものについて応力比を0.5, 0.1, -0.5, -1とした場合，応力比が大きいほどひび割れ発生後の伸展が速い(亀裂伝播速度が高くなる)傾向が見られた[2.25]。

(d) 試験中のモニタリング

疲労試験におけるFRPの損傷程度を観察する方法として，伸びの観察，剛性低下の観察，試験片温度の観察，AEによる破壊の観察(弾性振動を捕らえることにより微細な破壊音の強度と頻度を測定)[2.26]がある。伸びの観察としては，一定荷重載荷の下でクロスヘッド間の変位計測やパイ型変位計による直接的な伸びの計測が考えられる。剛性低下の観察としては，伸びの値から算出する方法や，所定の回数の繰返し載荷後に静的載荷を行い応力ひずみ関係から弾性係数を算出する方法がある。試験片温度の観察としては，赤外線サーモグラフィによる試験体の表面温度の測定による事例がある[2.13]。倉鋪らは，試験片の温度上昇の変化は伸びの変化よりも明確に現れていたことから，伸びの観察よりも損傷過程の観察に適していると述べている[2.13]。

3．試験方法

3.1 試験計画

本研究では，床版の輪荷重走行試験の供試体に用いる箱断面の引抜成形 GFRP 材（ガラス／ビニルエステル）からロービング材の繊維方向に平行に試験片を切り出し，押込み荷重負荷及びエンドミル加工により表面疵を人工的に設けた上で，静的引張載荷試験及び引張疲労試験を実施した。一部の試験片は，試験前に 1 週間水中に浸漬した後，3 週間以上室内で自然乾燥させた。載荷試験は静的，疲労のいずれも気中で行った。

試験片サイズ：　50 mm×12 mm×600 mm　（箱断面から切り出し）
ただし，表面疵のない引張疲労試験には JIS K 7054-1995 に準じてフライス加工を施した(A 形の変形)†。

表面疵：　押込み荷重負荷：深さ(へこみ量)　0*, (0.5*, 1*, 2*,) 3* mm
(残存深さの目標値，以下，*を付して表す，カッコ内は静的載荷試験のみ)
エンドミル加工：20 mm×2 mm(引張方向長さ)×5 mm(疵深さ)，端部半径 1 mm

表面疵の評価：　レーザー変位計による表面疵深さの測定
別途用意した試験片で表面疵を含む断面を顕微鏡により観察

引張疲労試験：　応力比(上限応力度／下限応力度の比) 0.1，サイン波 5 Hz

測定項目：　疲労試験中，ひずみゲージによる表面ひずみ，レーザー変位計によるクロスヘッド間の変位をヒストグラムレコーダで監視・記録する。

表-3.1.1　試験の種類と試験片数（本）

疵種類	疵深さ (mm)	静的試験		疲労試験	
		水浸なし	水浸あり	水浸なし	水浸あり
押込み荷重負荷	0	5	5	7(2)	—
	0.5*	5	5	—	—
	1*	5	5	1(1)	—
	2*	5	5	—	—
	3*	5	5	5	1
エンドミル加工	5	3	3	9	1
	計	28	28	22(3)	2

注 1) カッコ内はフライス加工なしの試験片本数(内数)†。
2) この他，SP250 の応力集中の特性を把握するため，貫通孔を有する試験片 3 本の静的載荷試験を行った。

† 表面疵のない試験片 SDN-1, SDN-2, SD1-1 の 3 本は，当初，フライス加工なしで疲労試験できるか試してみたが，いずれも早期にチャック切れした。

3.2　試験片

静的載荷試験及び疲労試験の試験片は，いずれも同じロットのガラス繊維，ビニルエステル樹脂で構成された中空箱型断面(250 mm×250 mm，板厚 12 mm)の引抜成形 GFRP 材 SP250(図-3.2.1)から，ロービングの繊維方向に平行に(載荷方向が引抜方向と一致するように)切り出した。各試験片の幅，厚さの計測はノギスを用いて行った。図-3.2.2～3 に静的載荷試験及び疲労試験に用いた試験片の形状寸法を示す。疲労試験に用いる疵なしの試験片は，チャック部で早期に破断することから，JIS K7054，A 形に準じてフライス加工した試験片とした(図-3.2.3)。また，フライス加工した疵なしの試験片は，つかみ部のチャック圧力を緩和するため，アルミタブを利用して両端に補助材を付加した(図-3.2.4)。

表-3.2.1 に SP250 の材料諸元と材料試験結果を示す。また，図-3.2.5 に SP250 の層構成を示す。SP250 は厚さ 12 mm と比較的厚板であるとともに，主要部分の一方向ロービング層の両面の表層に 0/90 のクロス材とマット層(ガラス繊維がランダムに入った表面保護層)が配置された。

GFRP 厚板の応力集中の性状を把握するため，φ20 mm の円孔，20 mm×2 mm，端部半径 1 mm の長孔及び 20 mm×1 mm，端部半径 0.5 mm の長孔の 3 種類の貫通孔を開けた試験片各 1 本ずつ 3 体を用意した(図-3.2.6)。孔周辺のひずみの測定には，応力集中用ゲージ(FYV-1-11-002LE，ゲージ長 1 mm，ベース 5 mm×12 mm)を用いた。

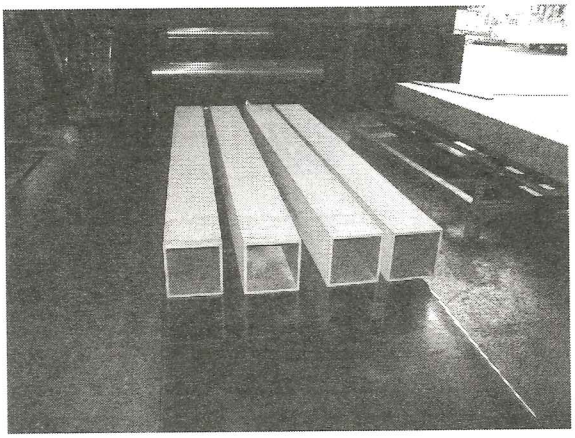
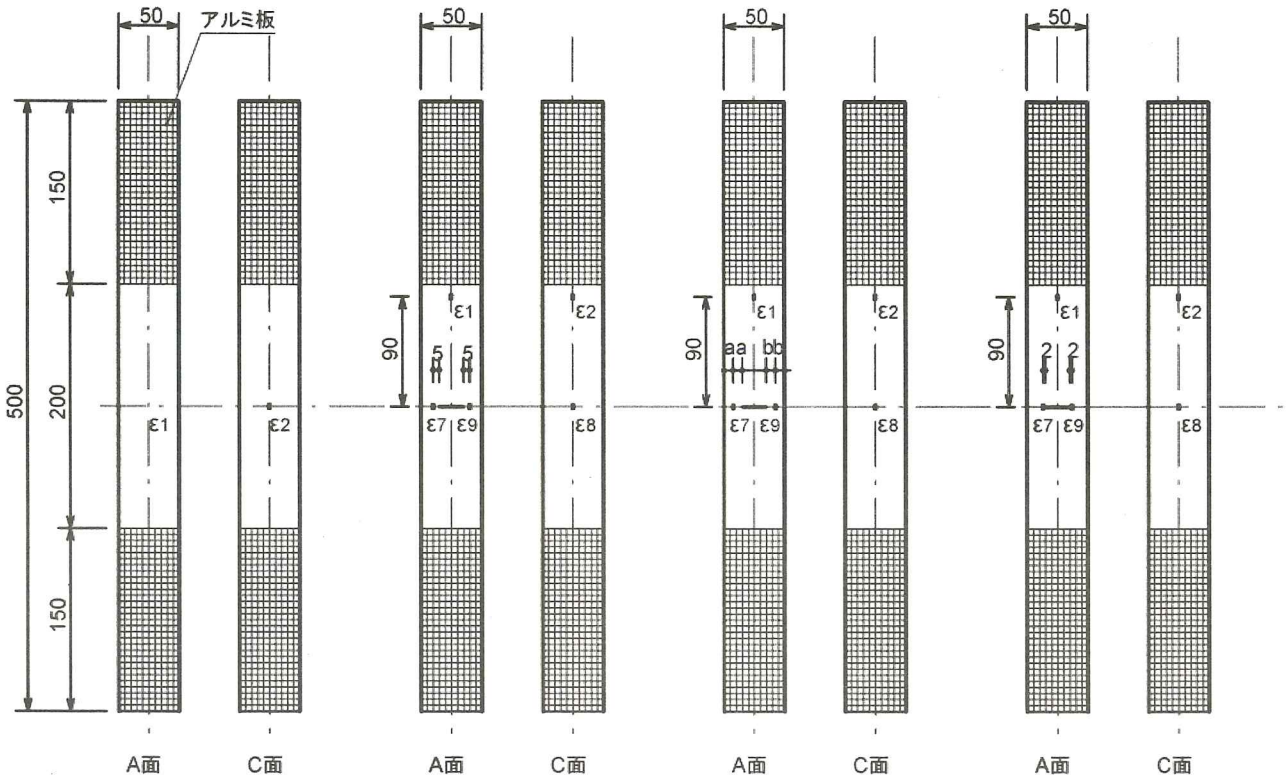


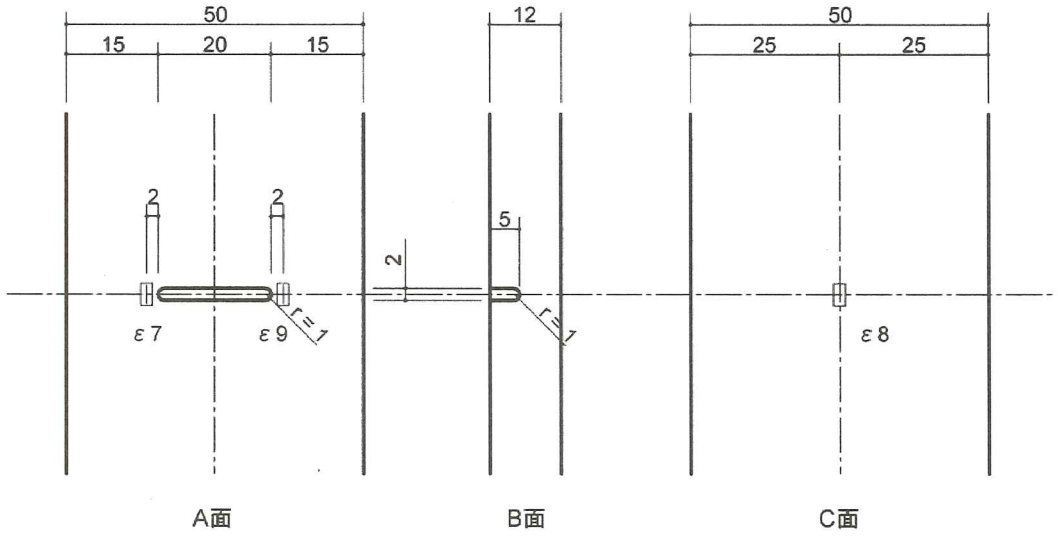
図-3.2.1　SP250 の外観

表-3.2.1　試験に用いた GFRP の材料諸元

名　称			SP250	
形状寸法		mm	250H × 250W × 12t	
繊維含有率 V_f		%	57	
層構成		%	CSM / RH / ROV / RH / CSM = 7.2 / 6.6 / 72.5 / 6.6 / 7.2	
繊維方向			0	90
強度	引張	MPa	495	54
	圧縮	MPa	478	(60)
	曲げ	MPa	559	168
	面内せん断	MPa	(30 ～ 50)	
	層間せん断	MPa	(30)	
	横せん断	MPa	(150)	(30)
弾性係数	引張	GPa	38.3	13.8
	圧縮	GPa	40.8	-
	曲げ	GPa	25.1	12.9

(注 1)　CSM：マット層，RH：クロス層(0/90)，ROV：ロービング層
(注 2)　市販の SP250 はさまざまな材料構成があるので注意する
(注 3)　(　)内数値は既往のデータに基づく参考値
(参考)　ビニルエステル樹脂単体の引張強さ　70～90 MPa

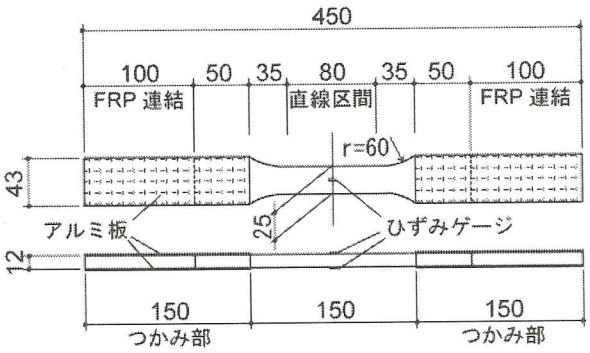




エンドミル加工拡大図

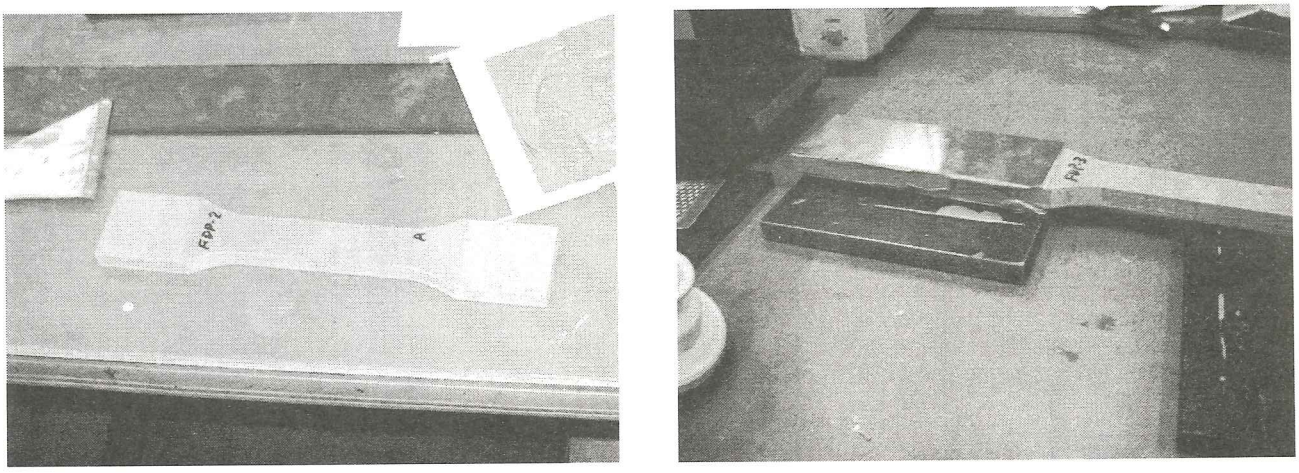
単位:mm

図-3.2.2　静的載荷試験及び疲労試験(疵あり)に用いた試験片の形状寸法及びゲージ貼り付け位置



単位:mm

図-3.2.3　疲労試験(疵なし)に用いた試験片の形状寸法及びゲージ貼り付け位置



(a) 切り出した試験片　　(b) つかみ部延長

図-3.2.4　静的載荷試験前の欠陥なし試験片

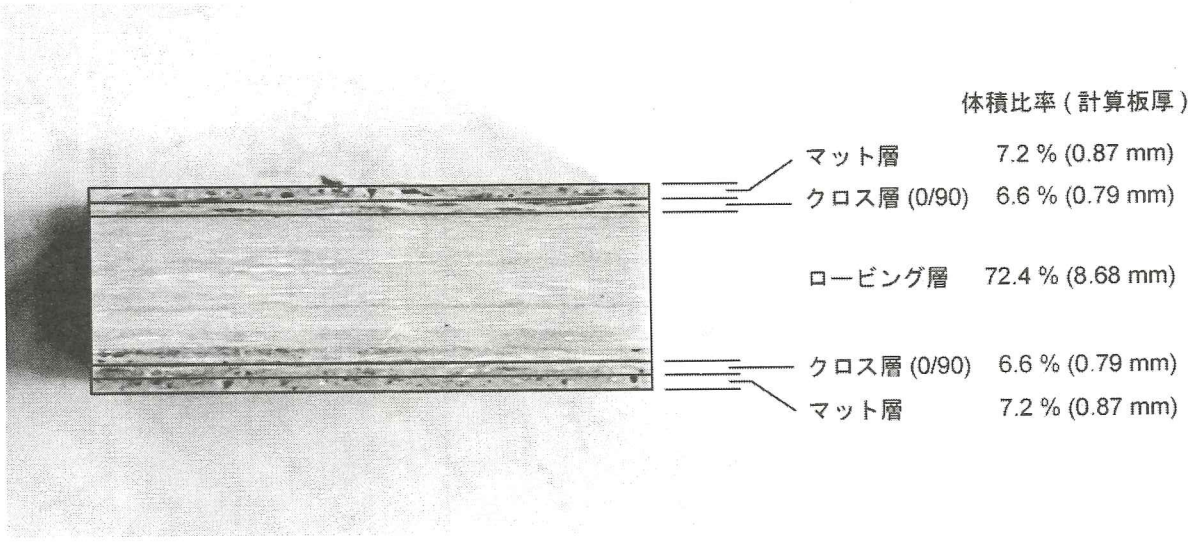
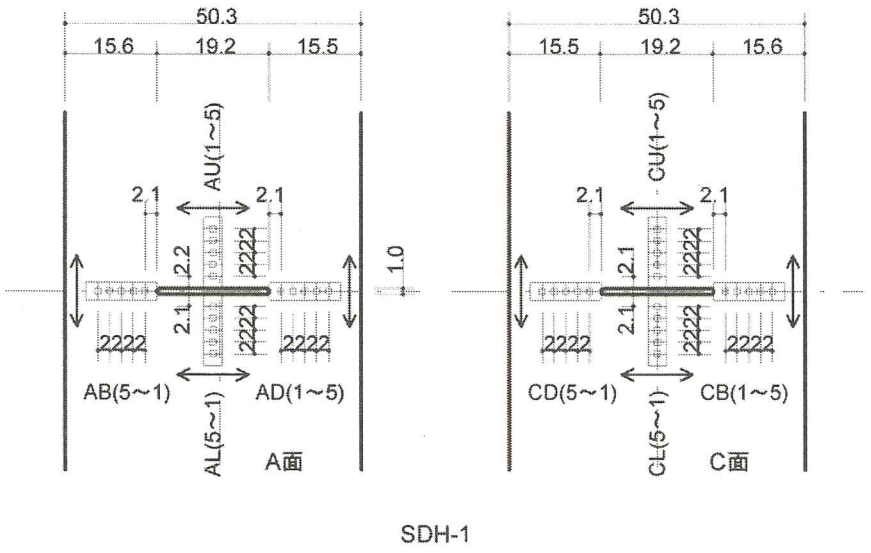
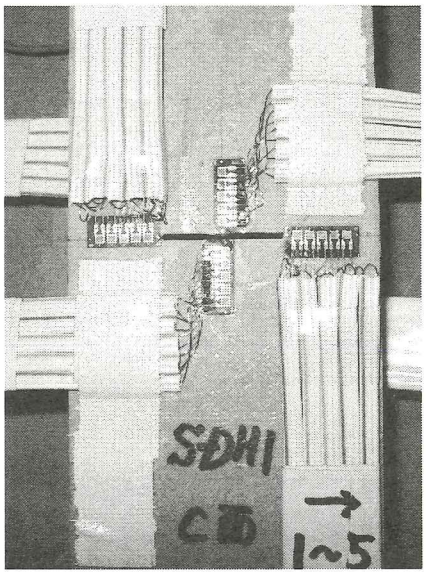
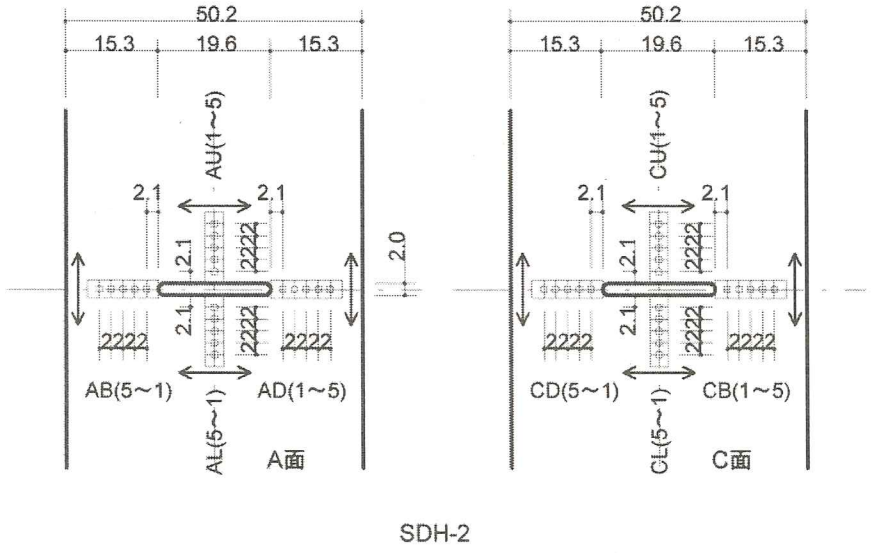


図-3.2.5　SP250 の層構成

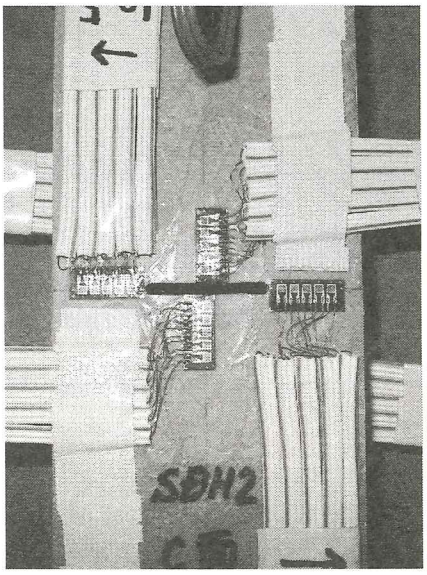


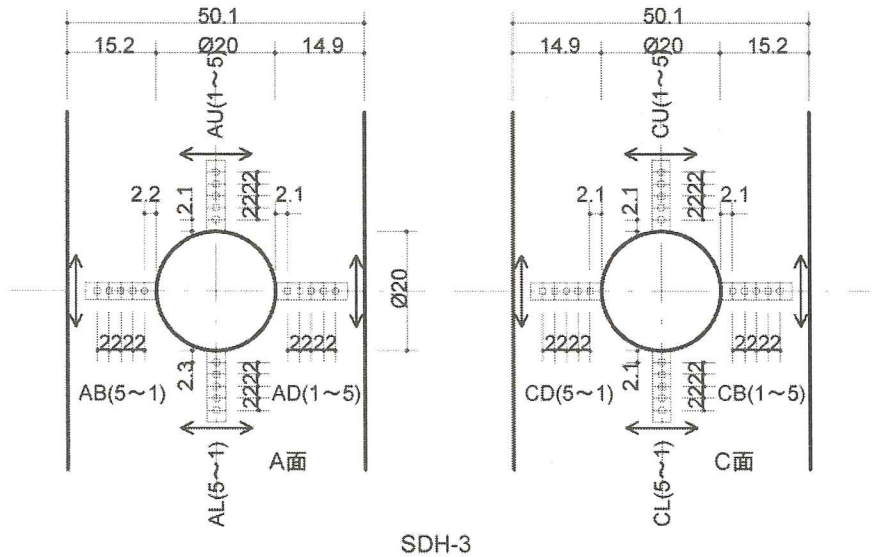
SDH-1



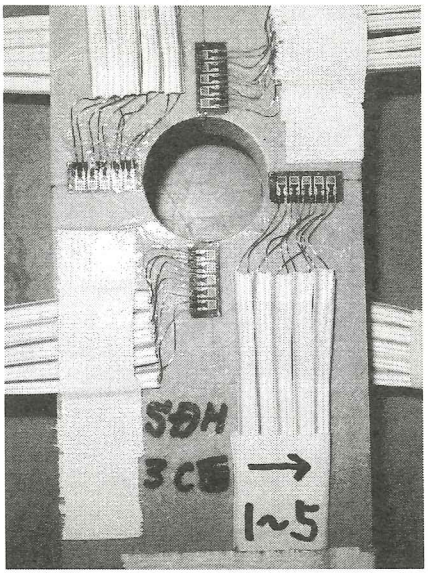


SDH-2





SDH-3



単位:mm

図-3.2.6　貫通孔を有する試験片の貫通孔形状寸法及びゲージ貼り付け位置

3.3　人工疵

表面疵作成は，マット層表面に直角に幅 20 mm，先端角度 90° の鋼製刃(図-3.3.1，合金工具鋼 SKS93, JIS G 4404-2000)を当てて，外見で確認できる範囲で所要の深さ 0.5*～3*mm の疵が残存するまで圧縮載荷することによった(図-3.3.2～3.3.3)。載荷にはアムスラー万能試験機(RU200tf)を使用した。図-3.3.4 に押込み荷重による表面疵の例を示す。

比較のため，疵のない試験片とエンドミルによる機械加工で 20 mm×2 mm×深さ 5 mm，端部半径 1 mm の表面疵を設けた試験片を用意した(図-3.3.5)。また，貫通孔のうち，円孔はドリルで，長孔はエンドミルによる機械加工で試験片の中央に削孔した(図-3.3.6)。

表面疵の深さはレーザー変位計により測定した(図-3.3.7)。また，疵の状態を把握するため，断面観察用に別途試験片を用意して，電子顕微鏡により疵の断面観察を行った。

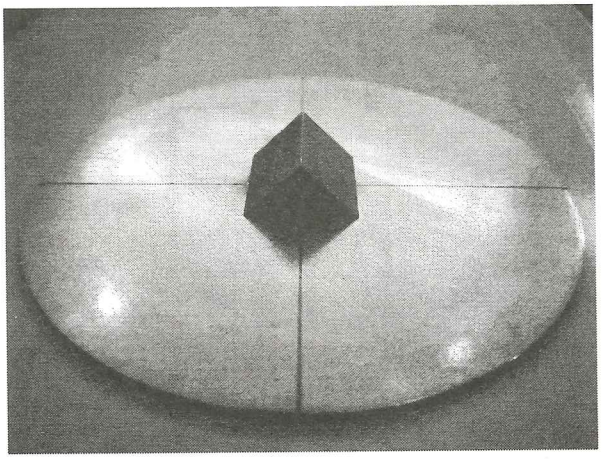


図-3.3.1　押込み荷重による表面疵導入冶具（鋼製刃）

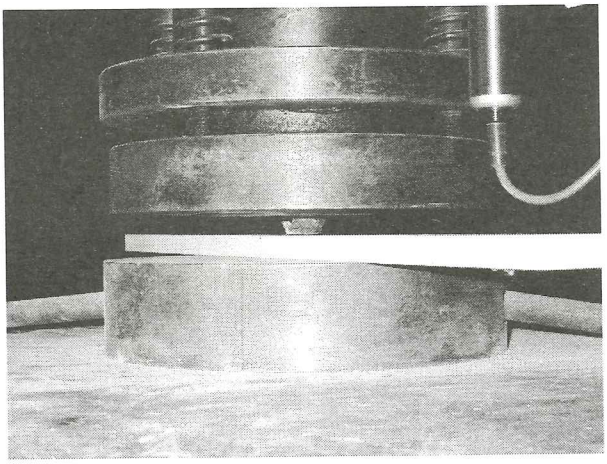
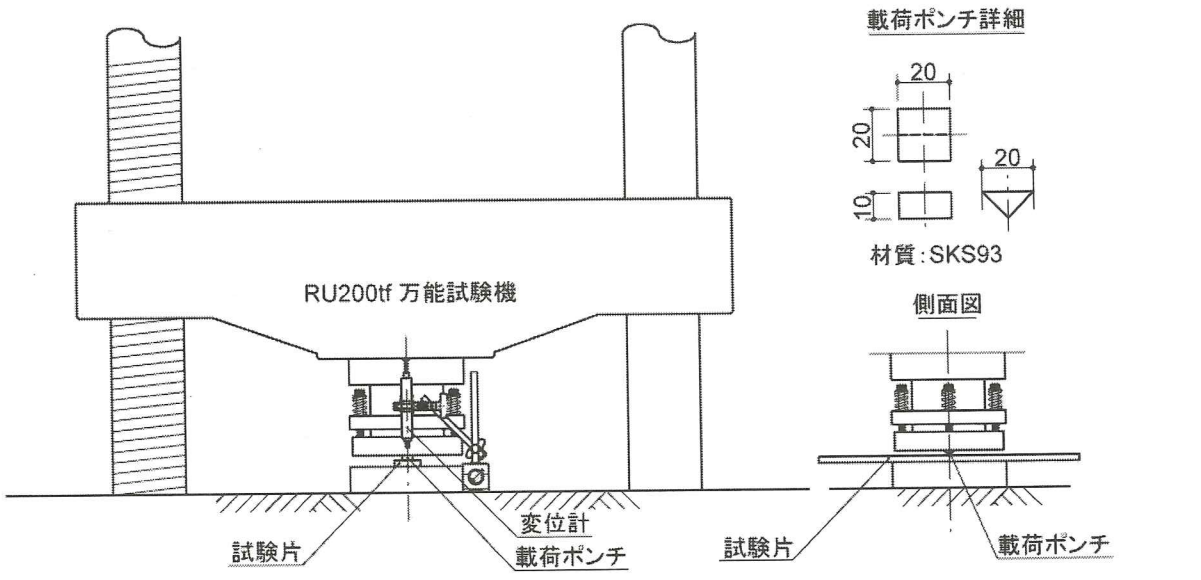


図-3.3.2　押込み荷重載荷状況



単位:mm

図-3.3.3　押込み荷重の載荷方法

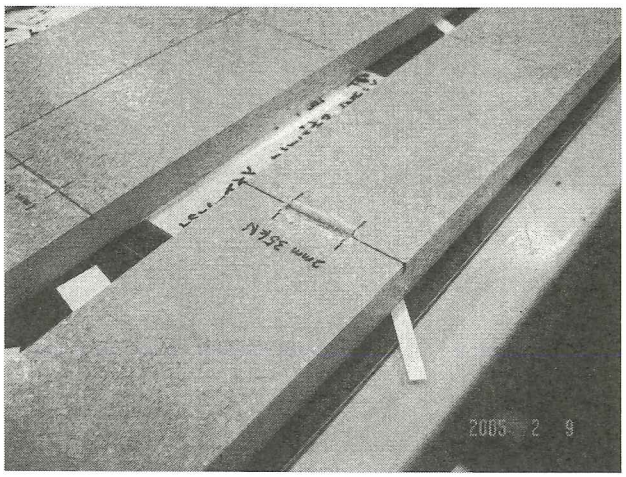


図-3.3.4　押込みによる表面疵(2*mm の例)

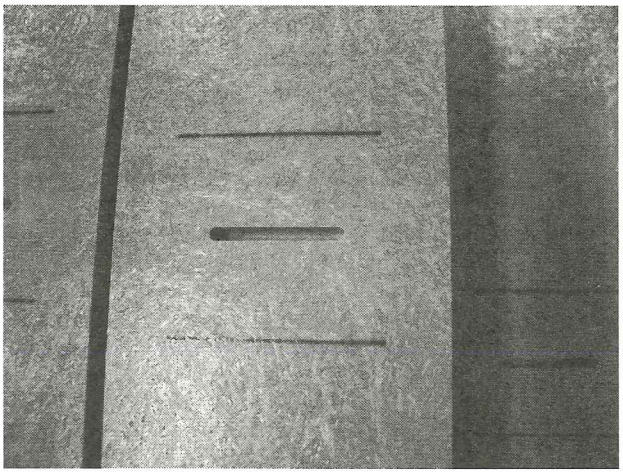
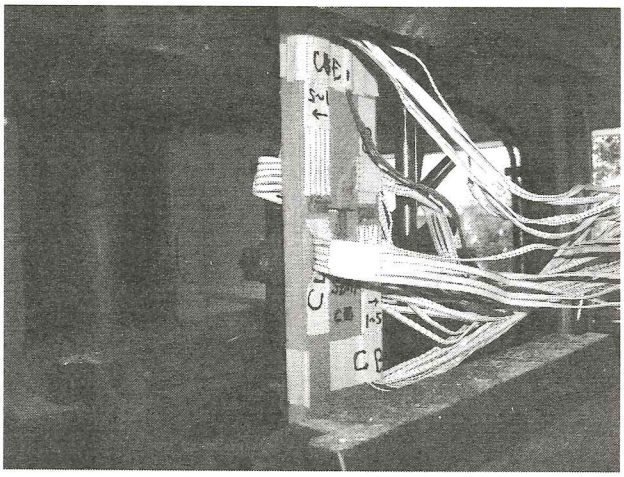


図-3.3.5　エンドミルにより加工した表面疵



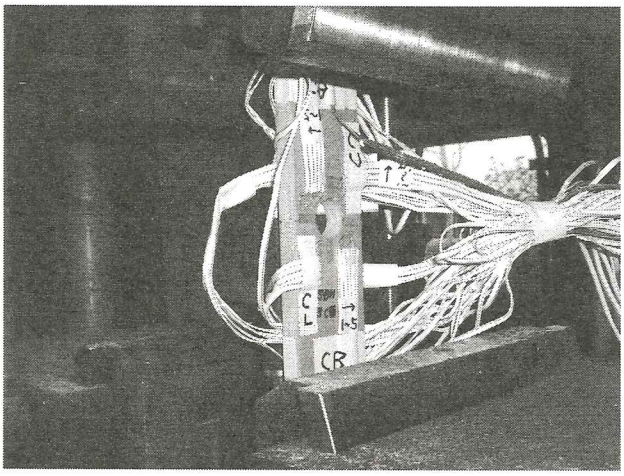
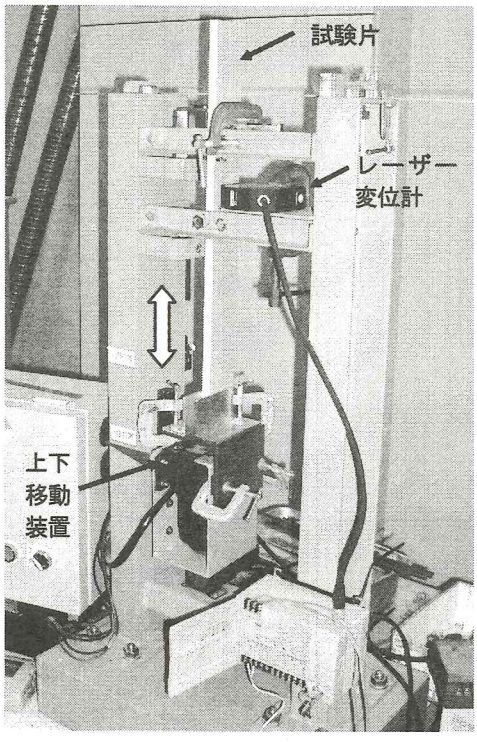
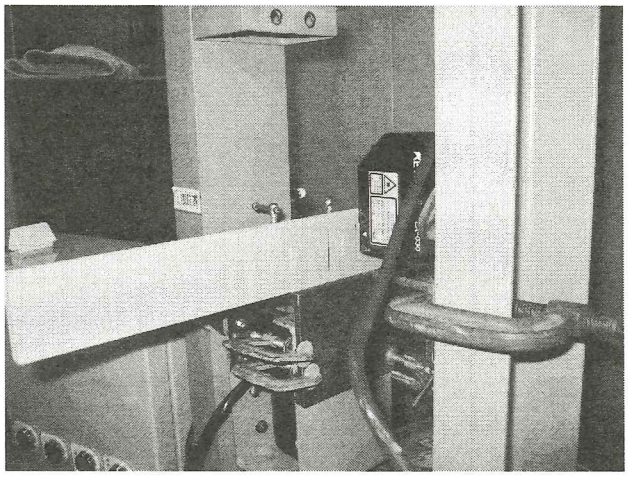


図-3.3.6　貫通孔を開けた試験片と設置状況（左：長孔，右：円孔）





(b) 繊維直角方向の測定

←(a) 繊維方向の測定

図-3.3.7　レーザー変位計による表面疵深さの測定状況

3.4 水中浸漬

静的載荷試験用試験片の 28 本と疲労試験用試験片の 2 本は，載荷試験前に 1 週間常温で水道水中に浸漬し，3 週間，室内で自然乾燥させた。水中浸漬した試験片は，浸漬前後及び乾燥後に質量を測定した。表-3.4.1 に水中浸漬した各試験片の吸水率測定結果を示す。表面疵のない試験片の場合，浸漬直後の吸水率は 0.05 %であったが，押込み荷重による表面疵のある試験片の吸水率は平均 0.11 %であり，疵なしの場合の 2 倍程度吸水していた。エンドミル加工による表面疵の吸水率(0.07 %)は表面疵のない試験片よりもやや大きく，押込み荷重による表面疵がある場合よりも小さい傾向にあった。いずれの試験片も水中浸漬終了後約 3 週間の乾燥によりほとんど浸漬前の質量にもどっていた。

表-3.4.1　水中浸漬による吸水率測定結果

表面疵の種類	試験種別	試験体	浸漬前質量 (g)	浸漬後質量 (g)	吸水量 (g)	乾燥後質量 (g)	乾燥後吸水量(g)	浸漬後吸水率(%)	乾燥後吸水率(%)
			A	B	B - A	C	C - A	(B - A)/A	(C - A)/A
なし	—	SDN-6	587.95	588.24	0.29	587.99	0.04	0.05	0.01
		SDN-7	560.74	561.03	0.29	560.76	0.02	0.05	0.00
		SDN-8	566.84	567.19	0.35	566.86	0.02	0.06	0.00
0.5*mm	静的	SW0.5-1	586.66	587.21	0.55	586.68	0.02	0.09	0.00
		SW0.5-2	567.22	568.02	0.80	567.18	-0.04	0.14	-0.01
		SW0.5-3	576.51	576.90	0.39	576.54	0.03	0.07	0.01
		SW0.5-4	581.08	581.37	0.29	581.08	0.00	0.05	0.00
		SW0.5-5	600.03	600.47	0.44	600.00	-0.03	0.07	0.00
1*mm	静的	SW1-1	573.88	574.40	0.52	573.87	-0.01	0.09	0.00
		SW1-2	582.54	583.13	0.59	582.54	0.00	0.10	0.00
		SW1-3	571.36	572.16	0.80	571.39	0.03	0.14	0.01
		SW1-4	565.03	565.63	0.60	565.04	0.01	0.11	0.00
		SW1-5	568.93	569.75	0.82	568.92	-0.01	0.14	0.00
2*mm	静的	SW2-1	588.70	589.89	1.19	588.67	-0.03	0.20	-0.01
		SW2-2	580.36	581.20	0.84	580.33	-0.03	0.14	-0.01
		SW2-3	566.48	567.44	0.96	566.50	0.02	0.17	0.00
		SW2-4	591.04	591.42	0.38	591.02	-0.02	0.06	0.00
		SW2-5	565.96	566.57	0.61	565.94	-0.02	0.11	0.00
3*mm	静的	SW3-1	570.04	570.53	0.49	570.04	0.00	0.09	0.00
		SW3-2	577.86	578.28	0.42	577.82	-0.04	0.07	-0.01
		SW3-3	582.77	583.54	0.77	582.74	-0.03	0.13	-0.01
		SW3-4	581.29	582.02	0.73	581.28	-0.01	0.13	0.00
		SW3-5	570.17	570.90	0.73	570.19	0.02	0.13	0.00
エンドミル (5*mm)	静的	SWE-1	577.62	577.86	0.24	577.59	-0.03	0.04	-0.01
		SWE-2	573.91	574.36	0.45	573.95	0.04	0.08	0.01
		SWE-3	585.76	586.04	0.28	585.75	-0.01	0.05	0.00
3*mm	疲労	FW3-1	576.41	576.88	0.47	576.39	-0.02	0.08	0.00
エンドミル (5*mm)	疲労	FWE-1	584.52	585.10	0.58	584.53	0.01	0.10	0.00

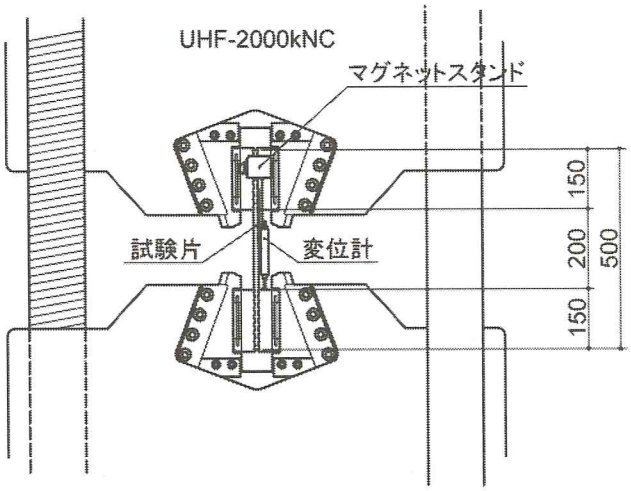
注) SWN-1～5 は水中浸漬したが吸水率を測定しなかったため，参考値として予備の欠陥なしの試験片 SDN-6～8 で測定を行った。

表-3.4.2　水浸中の温度

日	室温(℃)	水温(℃)
0	20.6	17.7
1	–	–
2	–	–
3	21.5	19.2
4	22.7	19.7
5	23.3	20.5
6	23.5	20.7
7	23.5	21.2
平均	22.5	19.8

3.5　静的載荷試験

静的載荷試験は 2000kN 万能試験機(UH－F2000kNC)を使用した。図-3.5.1～3.5.2 に試験片の設置状況を示す。試験片の両端 150 mm をチャックで固定した。つかみ部両面に厚さ 1 mm のアルミタブをエポキシ樹脂接着剤により貼り付けた(疵の深いものは一部省略した)。静的載荷は変位制御で行った。静的載荷中は，荷重，ひずみ，クロスヘッド間変位を測定した。ひずみ測定にはゲージ長 3 mm のプラスチック用単軸塑性ゲージ(GFLA-3-50)を用いた。ただし，応力集中ゲージはゲージ長 1 mm の普通鋼材用単軸 5 素子ゲージ(FYV-1-11)を用いた。クロスヘッド間変位は高感度変位計(CDP-25)を用いた。試験時の気温及び湿度は試験開始時に記録した。



単位:mm

図-3.5.1　試験片の設置図

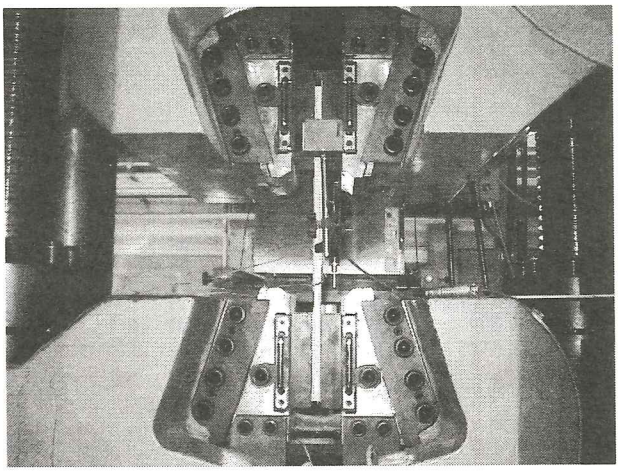
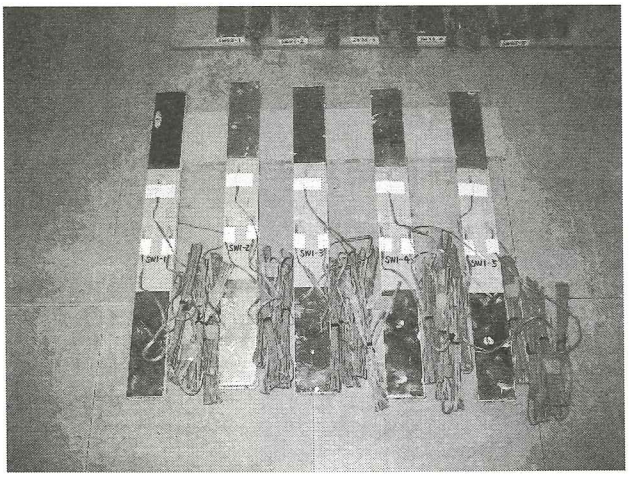
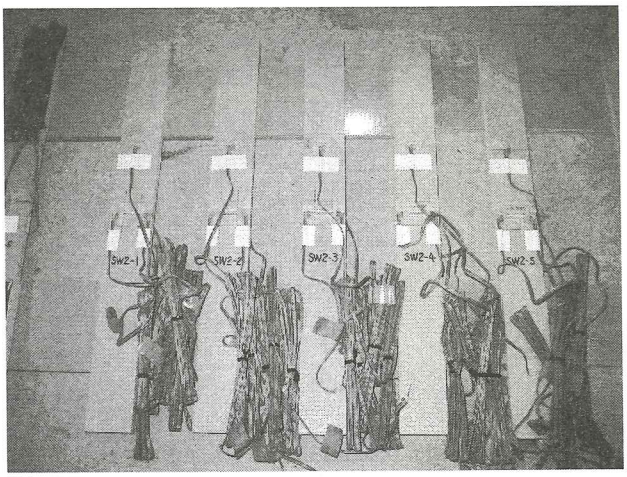


図-3.5.2　試験片の設置状況



(a) タブ付き

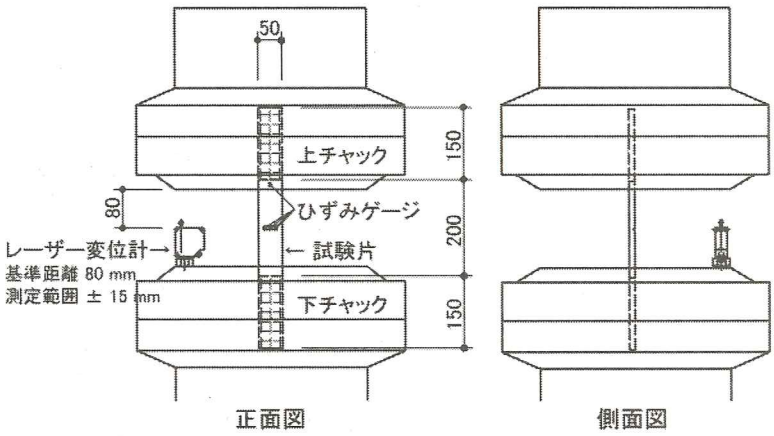


(b) タブなし

図-3.5.3　静的載荷試験前の試験片

3.6　疲労試験

疲労試験は 60/90tf 疲労試験機(最大荷重振幅 600kN)を使用した。図-3.6.1～3.6.2 に試験片の設置状況を示す。試験片は静的載荷試験と同様に両端 150 mm をチャックで固定した。各試験片ともに，疲労試験前に繰返し載荷の上限荷重まで静的載荷を行い，ひずみの測定を行った。疲労試験は荷重制御，上限／下限の応力比 0.1，サイン波，周波数 5 Hz で行った。疲労試験中は，試験片の挙動と破断回数の確認を行うため，ヒストグラムレコーダ(レインフロー法)を用いて，荷重，ひずみ，クロスヘッド間変位を監視した(図-3.6.3)。ひずみゲージは静的載荷試験と同じゲージ長 3 mm の塑性ゲージを用いた。また，クロスヘッド間変位はレーザー変位計により非接触で測定した。試験中の気温及び湿度は，開始時を起点として約 24 時間ごとに記録した。



単位:mm

図-3.6.1　試験片の設置図

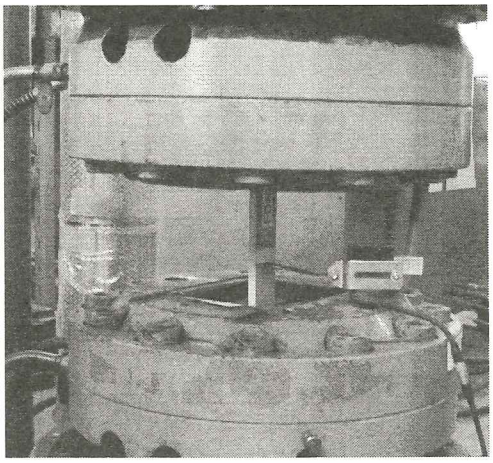


図-3.6.2　試験片の設置状況

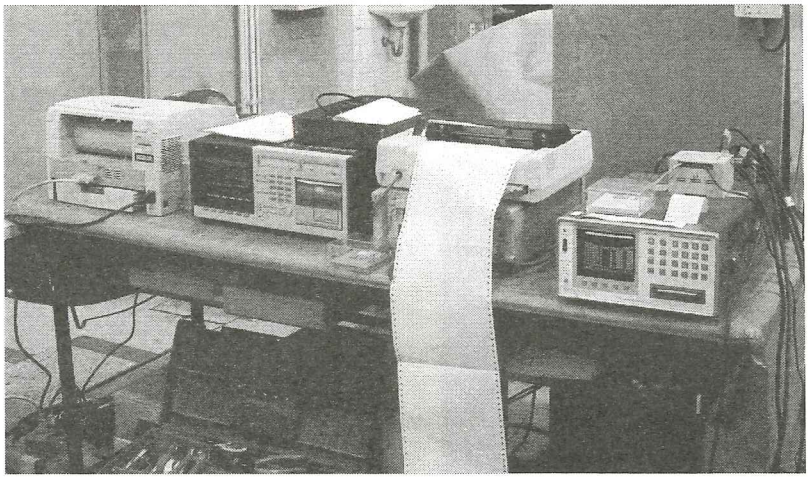


図-3.6.3　疲労試験における計測機器類

4．表面疵と内部損傷

4.1　表面疵の外観観察

図-4.1.1～4.1.5 に，押込み荷重による表面疵の外観を示す。押込みの刃先が 90° であったことから，疵深さが深いほど周囲のマット層，クロス層が押し潰されて，疵の周囲に盛り上がりが見られた。図-4.1.6 にエンドミル加工による表面疵の外観を示す。

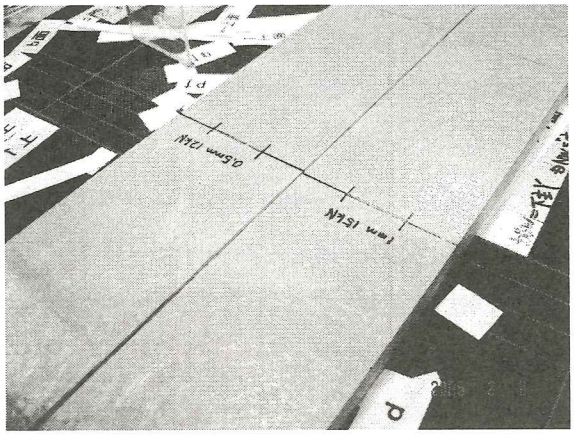


図-4.1.1　表面疵 0.5*, 1*mm の例

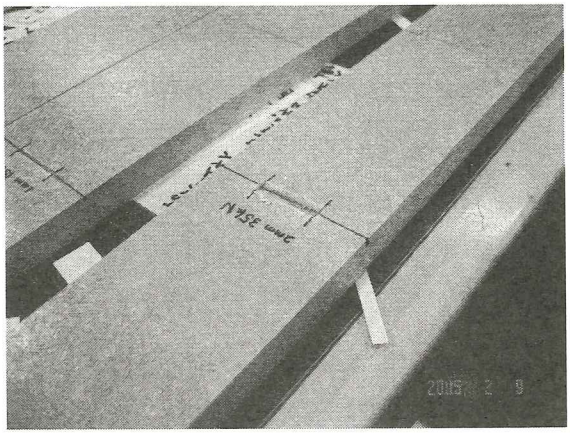


図-4.1.2　表面疵 2*mm の例

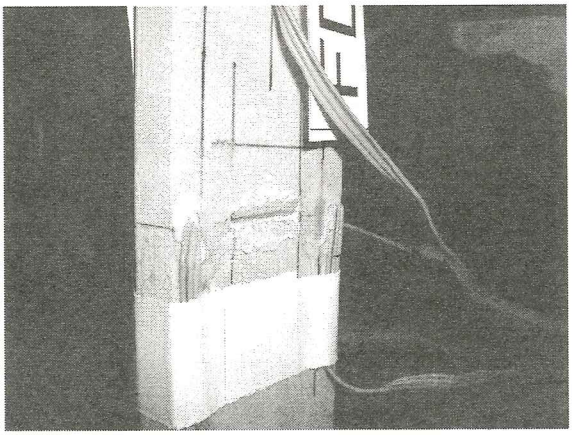


図-4.1.3　表面疵 3*mm の例（試験片 FD3-1）

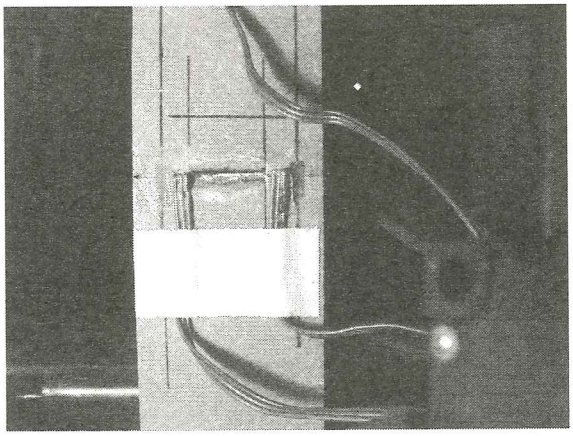


図-4.1.4　表面疵 3*mm の例（試験片 FD3-4）

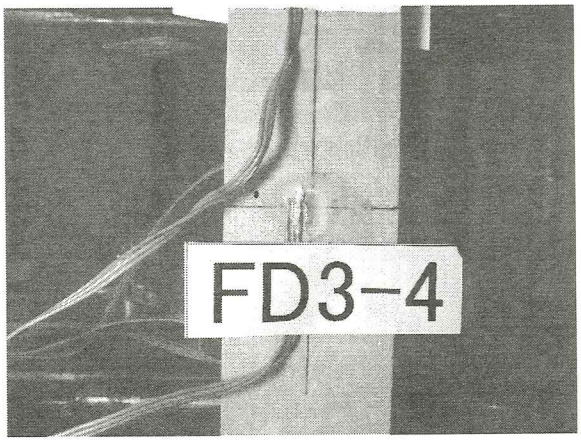


図-4.1.5　表面疵 3*mm の例（試験片 FD3-4，裏面）

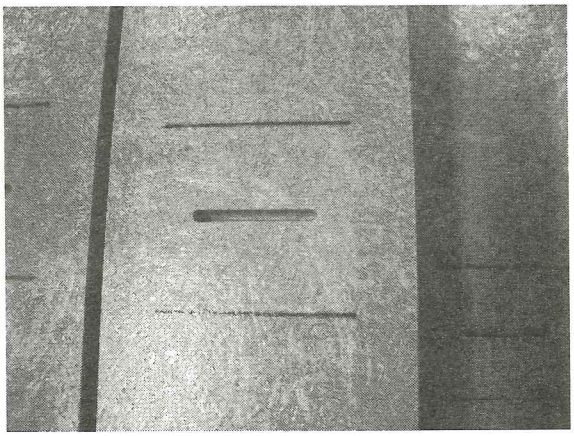


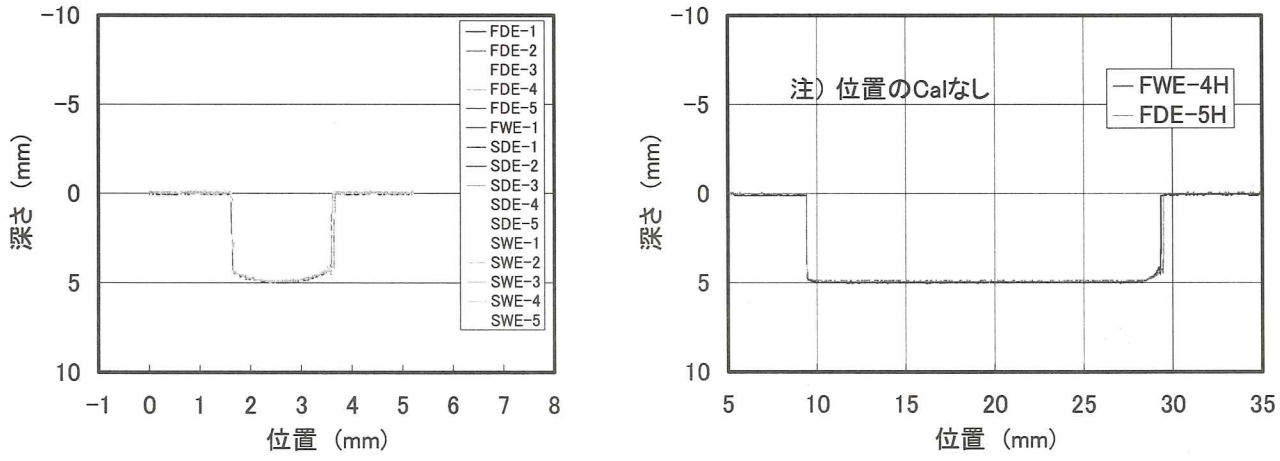
図-4.1.6　エンドミル加工(深さ 5*mm)の例

4.2　表面疵深さの測定結果

レーザ変位計による測定結果のうち，長さのデータは測定時間と試験片の移動速度から算出する必要がある。ここでは，比較的形状が明確なエンドミルの測定結果に基づき移動速度を求めることとした。図-4.2.1にエンドミル加工した試験片の軸方向及び軸直角方向の測定結果を示す。これらの図の横軸は，軸方向に 2 mm，軸直角方向に 20 mm が既知として，移動速度をそれぞれ算出した後，それらの平均値 5.21 mm/sec をすべての試験片に適用した結果を示す。押込み荷重による表面疵の場合もこの値を用いて，データを整理することとした。

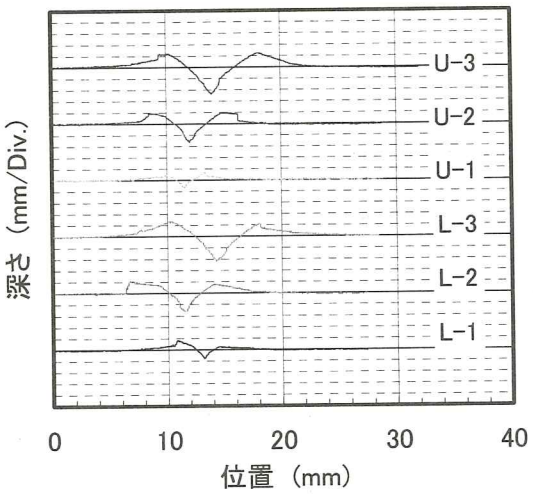
図-4.2.2 は，後述する顕微鏡による断面観察のために別途用意した試験片の各深さごとの測定結果を示す。この試験片では，軸方向と軸直角方向の両方を測定した。記号中の数値は目標とした疵深さ(mm)をそれぞれ示す。本文では，疵の深さは疵周囲の盛り上がった部分以外の元の板表面を基準深さ 0 としてそこからの深さをいう。疵深さは目標値よりもやや小さい傾向にあった。また，軸直角方向の分布を見ると，1*～2*mm の結果は幅方向に概ね均一であったが，3*mm の結果は疵中央で最も深く，両方の縁に向かってやや浅くなる傾向が見られた。深さ 2 mm 程度を超えると，ローピング層に到達するため，横せん断強度(ローピング層繊維に直角方向のせん断強度)が高くなり，刃先角部の弾性変形が大きくなる傾向にあるとともに，試験片の疵周囲の弾性体に連動して除荷後のもどりが大きくなることが要因して挙げられる。

静的載荷試験及び疲労試験に用いた試験片の表面疵深さは，軸方向のみを同様の方法で 1 回ずつ測定した。それらの結果を図-4.2.3～4.2.4 及び表-4.2.1 に示す。

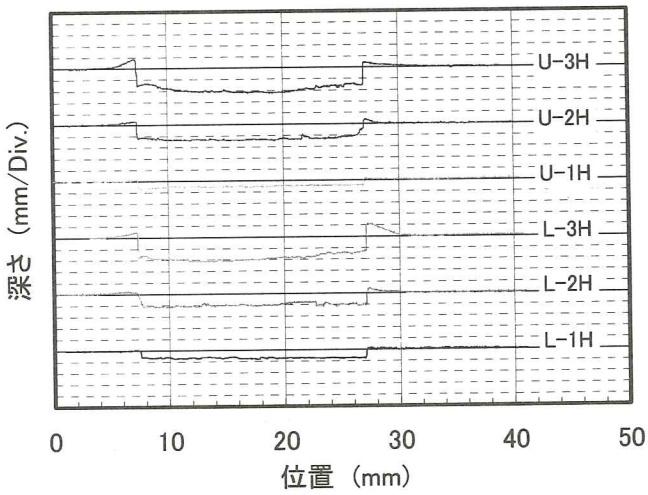


(a) 軸方向　5.21 mm/sec　　(b) 直角方向　6.48 mm/sec

図-4.2.1　エンドミル加工試験片の表面疵深さ測定結果

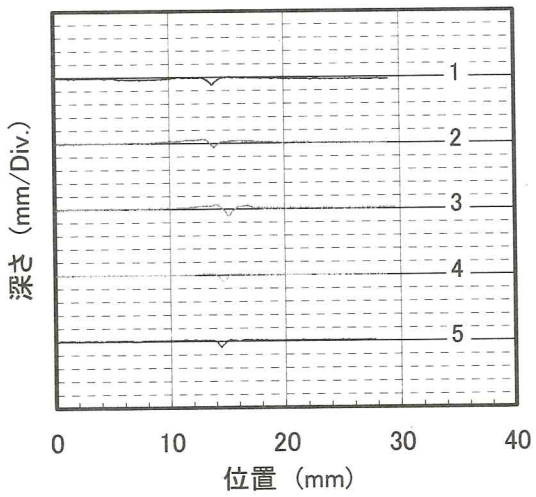


(a) 軸方向

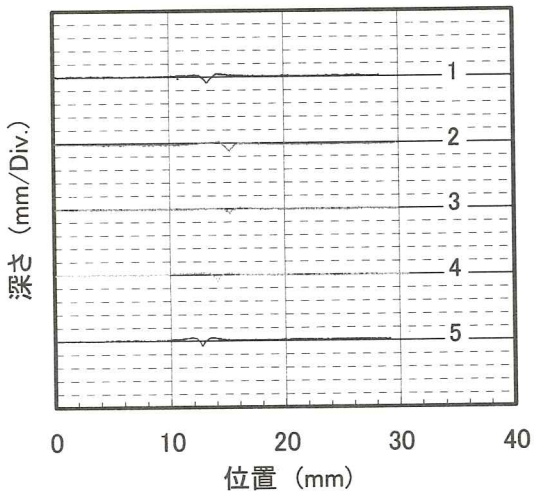


(b) 直角方向

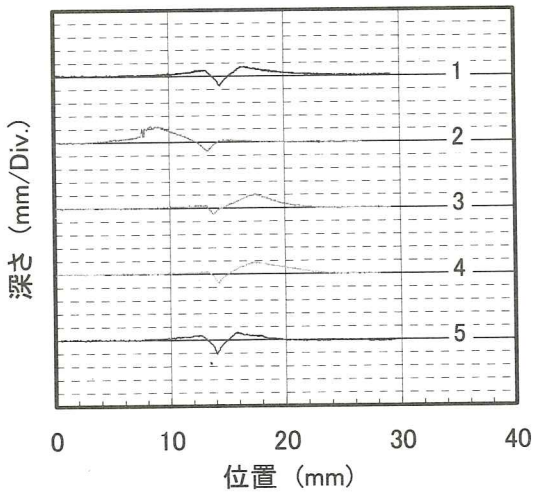
図-4.2.2　顕微鏡観察用サンプル試験片の表面疵深さ測定結果



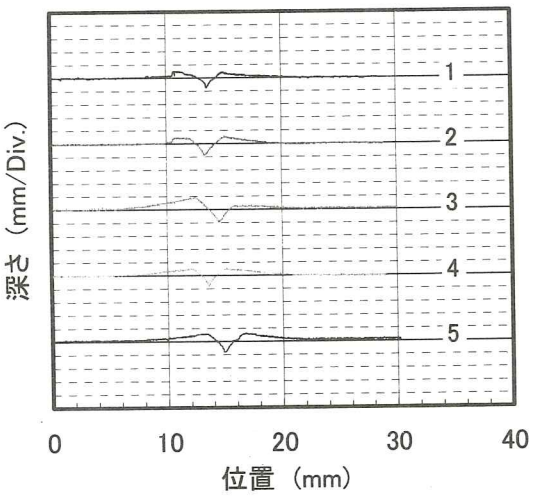
(a) 0.5*mm (SD0.5)



(b) 0.5*mm (SW0.5)

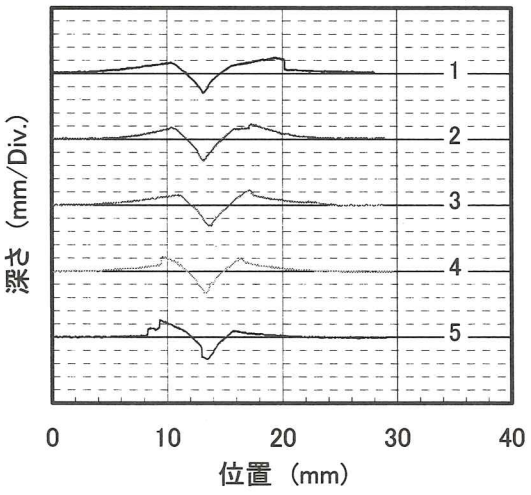


(c) 1*mm (SD1)

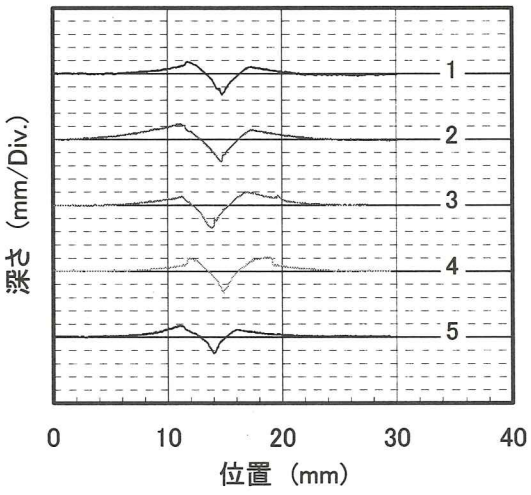


(d) 1*mm (SW1)

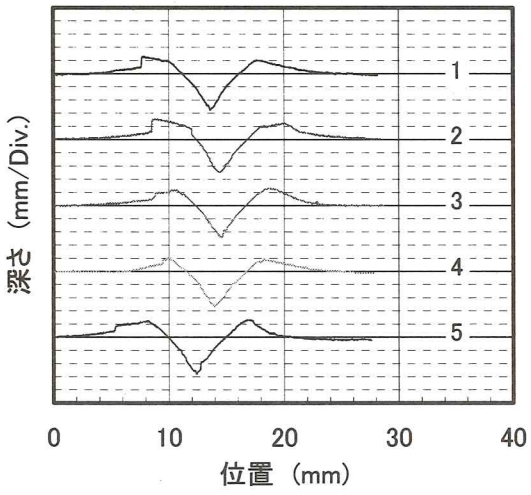
図-4.2.3 押込み荷重による表面疵深さ測定結果（静的載荷試験用試験体）



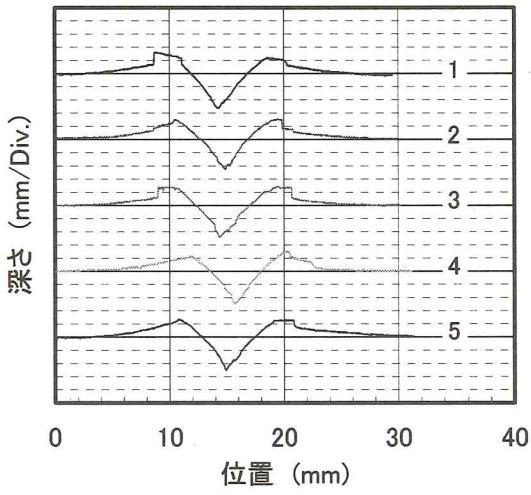
(e) 2*mm (SD2)



(f) 2*mm (SW2)

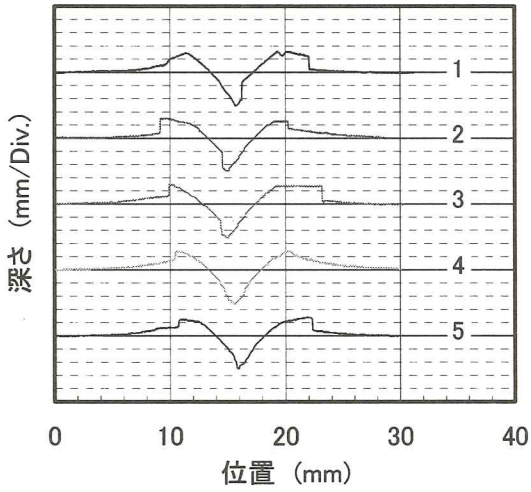


(g) 3*mm (SD3)

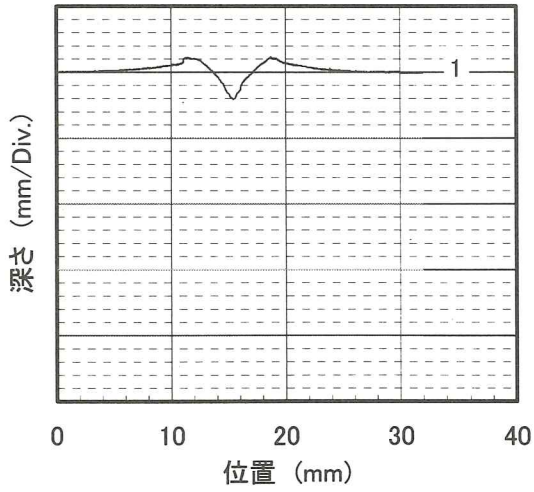


(h) 3*mm (SW3)

図-4.2.3 押込み荷重による表面疵深さ測定結果（静的載荷試験用試験体，つづき）



(a) 3*mm (FD3)



(b) 3*mm (FW3)

図-4.2.4 押込み荷重による表面欠陥形状の測定結果（疲労試験用試験体）

表-4.2.1　レーザー変位計による表面疵深さ測定結果（静的載荷試験）

種　類		試験片	幅 (mm)	厚さ (mm)	総断面積 (mm^2)	表面疵深さ (mm)	表面疵長さ (mm)	最大押込み荷重 (kN)	欠損断面積 (mm^2)	純断面積 (mm^2)
疵なし	気中	SDN-1	50.20	11.87	596	-	-	-	-	-
		SDN-2	50.47	12.32	622	-	-	-	-	-
		SDN-3	50.00	11.97	598	-	-	-	-	-
		SDN-4	50.40	12.10	610	-	-	-	-	-
		SDN-5	49.97	11.93	596	-	-	-	-	-
	水浸	SWN-1	50.02	11.80	590	-	-	-	-	-
		SWN-2	50.21	11.94	600	-	-	-	-	-
		SWN-3	50.15	11.80	592	-	-	-	-	-
		SWN-4	50.28	12.06	607	-	-	-	-	-
		SWN-5	50.27	12.22	614	-	-	-	-	-
0.5*mm	気中	SD0.5-1	49.10	12.33	606	0.50	20	13.2	10.0	596
		SD0.5-2	49.10	12.05	592	0.31	20	13.2	6.3	585
		SD0.5-3	50.27	12.27	617	0.50	20	14.4	10.0	607
		SD0.5-4	50.10	12.20	611	0.50	20	14.8	10.0	601
		SD0.5-5	50.65	12.22	619	0.50	20	14.0	10.0	609
	水浸	SW0.5-1	49.98	12.17	608	0.44	20	13.4	8.8	599
		SW0.5-2	49.90	11.73	585	0.56	20	11.6	11.3	574
		SW0.5-3	50.28	11.85	596	0.31	20	13.0	6.3	590
		SW0.5-4	50.18	11.89	596	0.50	20	13.0	10.0	586
		SW0.5-5	50.30	12.10	608	0.38	20	12.0	7.5	601
1*mm	気中	SD1-1	50.30	11.79	593	0.81	20	24.6	16.3	577
		SD1-2	50.09	11.87	595	0.69	20	18.4	13.8	581
		SD1-3	49.59	11.86	588	0.50	20	21.9	10.0	578
		SD1-4	49.98	11.83	591	0.75	20	18.6	15.0	576
		SD1-5	50.46	11.84	597	1.06	20	20.8	21.3	576
	水浸	SW1-1	50.26	11.85	595	0.75	20	25.4	15.0	580
		SW1-2	50.14	11.90	597	0.81	20	26.0	16.3	581
		SW1-3	50.37	11.80	594	1.00	20	22.8	20.0	574
		SW1-4	50.11	11.89	596	0.81	20	25.9	16.3	580
		SW1-5	49.89	11.80	589	0.88	20	24.2	17.5	571
2*mm	気中	SD2-1	50.17	11.84	594	1.56	20	46.3	31.3	563
		SD2-2	49.55	12.07	598	1.69	20	45.9	33.8	565
		SD2-3	50.05	11.81	591	1.56	20	44.7	31.3	560
		SD2-4	49.98	11.99	599	1.63	20	52.2	32.5	567
		SD2-5	50.11	11.94	598	1.69	20	44.7	33.8	565
	水浸	SW2-1	50.16	12.17	610	1.63	20	39.0	32.5	578
		SW2-2	50.33	12.10	609	1.69	20	51.5	33.8	575
		SW2-3	50.47	11.84	598	1.69	20	47.3	33.8	564
		SW2-4	50.36	12.18	613	1.63	20	43.0	32.5	581
		SW2-5	49.70	11.70	582	1.31	20	35.0	26.3	555

表-4.2.1　レーザー変位計による表面疵深さ測定結果（静的載荷試験，つづき）

種　類		試験片	幅 (mm)	厚さ (mm)	総断面積 (mm^2)	表面疵深さ (mm)	表面疵長さ (mm)	最大押込み荷重 (kN)	欠損断面積 (mm^2)	純断面積 (mm^2)
3*mm	気中	SD3-1	50.07	11.82	592	2.75	20	84.6	55.0	537
		SD3-2	50.80	11.91	605	2.56	20	89.9	51.3	554
		SD3-3	50.04	11.93	597	2.44	20	76.0	48.8	548
		SD3-4	50.40	12.15	613	2.69	20	78.3	53.8	559
		SD3-5	49.93	11.82	590	2.81	20	84.2	56.3	534
	水浸	SW3-1	50.54	11.67	590	2.56	20	87.6	51.3	539
		SW3-2	50.51	11.81	596	2.38	20	79.1	47.5	549
		SW3-3	50.63	12.11	613	2.44	20	78.8	48.8	564
		SW3-4	50.37	12.09	609	2.50	20	78.6	50.0	559
		SW3-5	49.92	11.98	598	2.44	20	81.8	48.8	549
エンドミル	気中	SDE-1	50.38	11.92	601	4.88	20	-	97.5	503
		SDE-2	50.10	12.11	607	5.00	20	-	100	507
		SDE-3	49.98	11.96	598	4.94	20	-	98.8	499
	水浸	SWE-1	50.21	11.74	589	4.94	20	-	98.8	491
		SWE-2	50.04	12.10	606	5.00	20	-	100	506
		SWE-3	50.14	12.21	612	4.94	20	-	98.8	513
円孔	気中	SDH-1	50.33	11.89	598	(11.89)	(20)	-	240	358
		SDH-2	50.26	11.81	594	(11.81)	(20)	-	240	354
		SDH-3	50.23	11.93	599	(11.93)	(20)	-	240	359

表-4.2.2　レーザー変位計による表面疵深さ測定結果（疲労試験）

種　類		試験片	幅 (mm)	厚さ (mm)	総断面積 (mm^2)	表面疵深さ (mm)	表面疵長さ (mm)	最大押込み荷重 (kN)	欠損断面積 (mm^2)	純断面積 (mm^2)
疵なし	気中	FDP-1	24.91	12.31	307	-	-	-	-	-
		FDP-2	24.88	12.32	307	-	-	-	-	-
		FDP-3	24.96	11.78	294	-	-	-	-	-
		FDP-4	25.61	12.10	310	-	-	-	-	-
		FDP-5	25.50	12.35	315	-	-	-	-	-
3*mm	気中	FD3-1	50.60	12.11	613	2.50	20.13	75.6	50.3	562
		FD3-2	50.40	12.01	605	2.50	20.16	79.4	50.4	555
		FD3-3	50.27	11.98	602	2.56	20.22	77.8	51.8	550
		FD3-4	50.55	12.00	606	2.63	20.20	81.8	53.0	553
		FD3-5	49.88	12.43	620	2.50	20.15	75.0	50.4	570
	水浸	FW3-1	50.67	12.16	616	2.06	20.25	67.0	41.8	574
エンドミル	気中	FDE-1	50.45	12.12	611	4.94	19.71	-	97.3	514
		FDE-2	50.62	12.08	611	5.00	19.84	-	99.2	512
		FDE-3	50.35	11.96	602	4.94	19.95	-	98.5	504
		FDE-4	50.55	12.13	613	4.94	19.88	-	98.2	515
		FDE-5	50.17	12.24	614	4.94	19.89	-	98.2	516
		FDE-6	50.34	12.11	610	4.94	19.97	-	98.7	511
		FDE-7	50.39	11.81	595	5.00	19.97	-	99.9	495
		FDE-8	50.47	12.27	619	5.00	19.99	-	100	519
		FDE-9	50.04	11.72	586	4.94	20.03	-	99.0	487
	水浸	FWE-1	49.97	11.94	597	4.94	19.85	-	98.0	499

4.3　押込み荷重と表面疵深さ

図-4.3.1 に押込み荷重と表面疵深さの関係を示す。疵深さ約 2 mm までは押込み荷重と概ね比例関係が見られるが，刃先がロービング層に到達する深さ約 2 mm を超えると，75～90 kN の押込み荷重を負荷しても表面疵は 2*mm までの相関から推定される深さよりも小さくなる傾向が見られた。これはロービング層の横せん断強度が，表面付近のマット層，クロス層よりも高いためと考えられる。

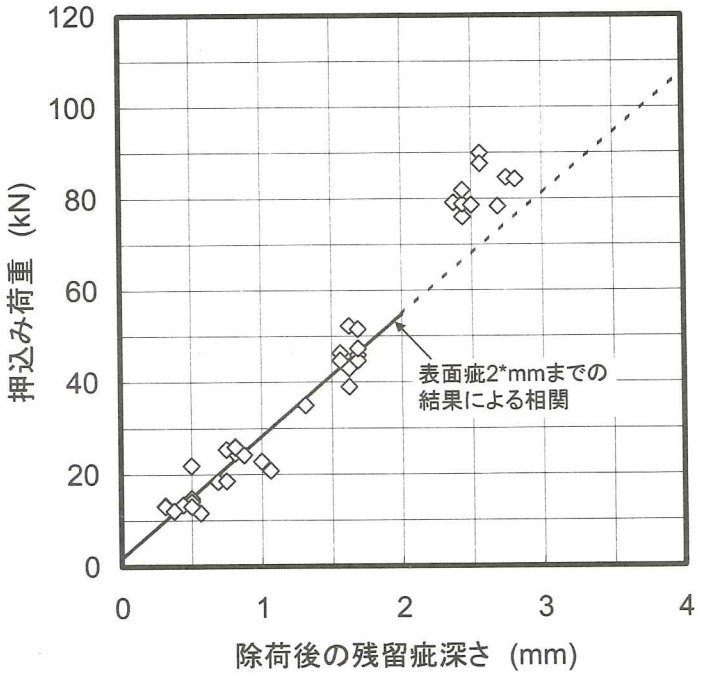


図-4.3.1　押込み荷重と表面疵深さの関係

図-4.3.2～4.3.4 に深さ 1*mm～3*mm の表面疵の断面写真を示す。また，図-4.3.5 に予備試験で行った深さ 5*mm の表面疵の断面写真を示す。表面疵深さが 3*mm，5*mm の写真より，表面から観察できる疵の先端からさらにロービング層内部に約 45° のひび割れが生じていたことがわかる。また，その周囲に押しつぶされたことによる環状の損傷(繊維の折曲げ箇所が環状に分布していた)が見られた。吉野らの研究における厚さ 3 mm の GFRP 材の押込み疵の場合，疵先端周囲の樹脂に微細なひび割れが発生していたが [4.1)]，45° のひび割れはこれまで見られなかった。SP250 のように比較的厚い材料を用いた場合，押込み荷重によっては局所的なせん断変形により繊維の破断を伴うひび割れが発生することがわかった。予備試験の深さ 5*mm の場合は，疵が裏面までほぼ貫通して，裏面に膨れが確認された。一方，表面疵深さが 2*mm，押込み荷重 50 kN 程度ではロービング層にわずかに到達する程度であり，ロービング層のひび割れは見られなかった。

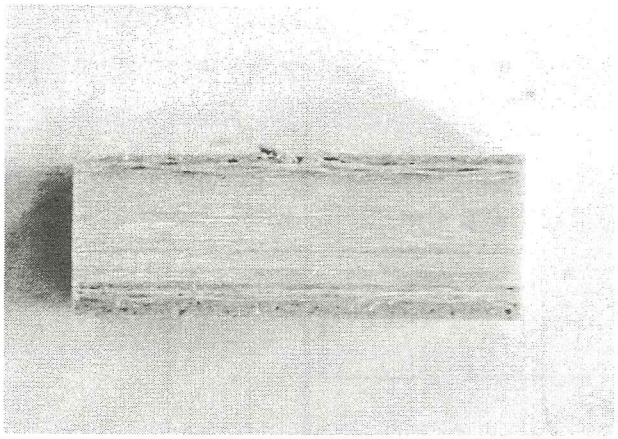


図-4.3.2　深さ 1*mm の表面疵の断面

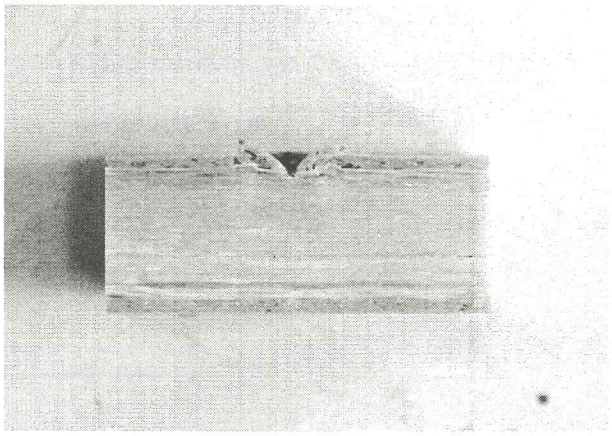


図-4.3.3　深さ 2*mm の表面疵の断面

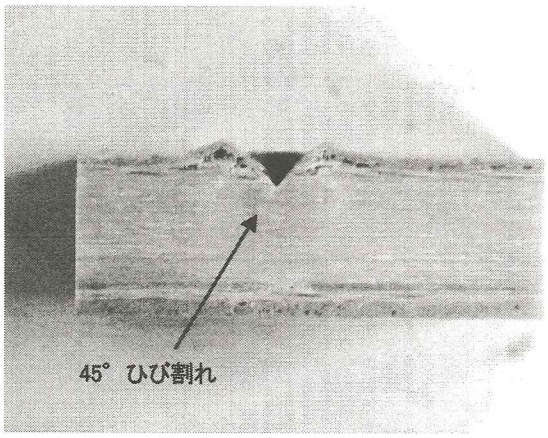


図-4.3.4　深さ 3*mm の表面疵の断面

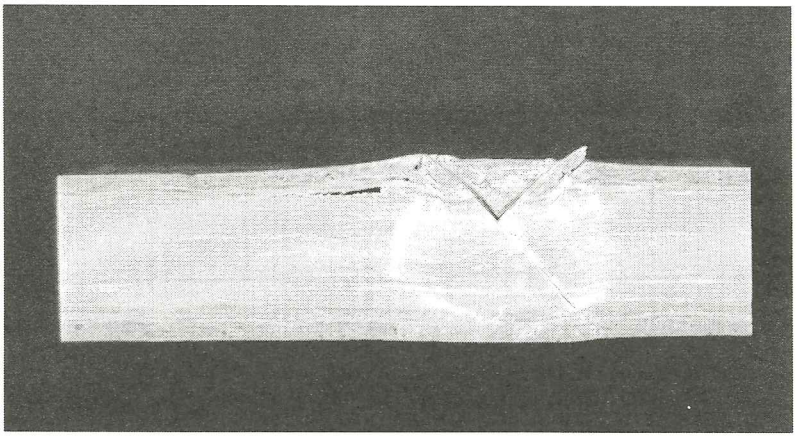
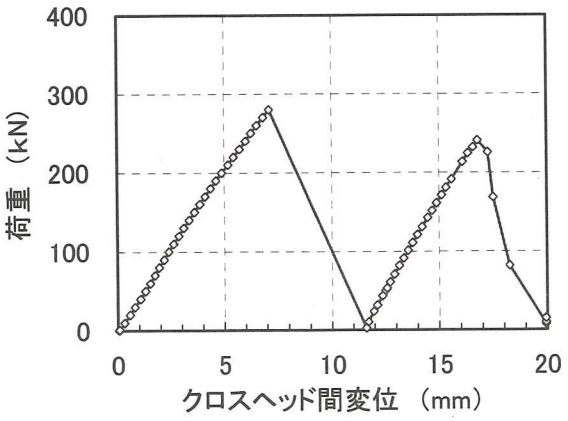


図-4.3.5　深さ 5*mm の表面疵の断面

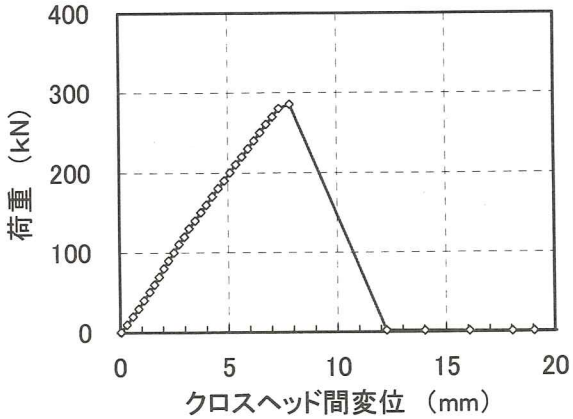
5．静的引張試験結果

5.1　引張挙動と破壊状況

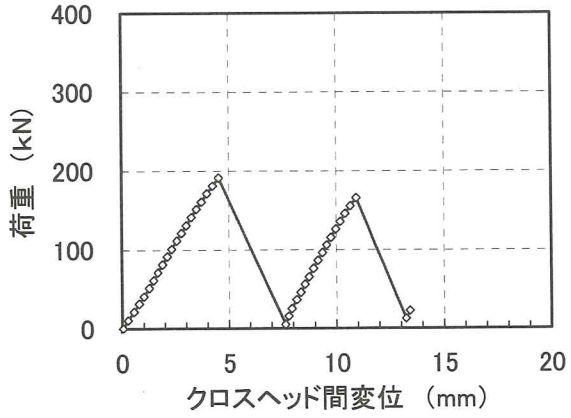
図-5.1.1 に SP250 の静的引張試験から得られた荷重とクロスヘッド間の変位の関係を示す。SP250 のような断面構成の場合，表層(マット層，クロス層)とロービング層で明らかに弾性係数が異なることから，表層が破断したことにより一旦荷重が低下した後も，念のため引張変位を増加させた。その結果，一旦，表層と一部のロービング層の破断，あるいはそれにロービング層の一部の層間ずれなどが生じて，変位は 3～5 mm 程度急激に増加し荷重が 0 付近まで低下するが，図-5.1.1a に示した SDN-5 のように，一部の試験片では，その後さらに変位制御のまま載荷を続けると再び荷重は上昇した。試験片によっては一度目の載荷荷重とほとんど同じ程度まで荷重が増加するものが見られた。二度目の荷重上昇が見られる場合の傾きは，耐荷性能に有効な断面が現象しているにもかかわらず，いずれも一度目よりも大きくなる傾向があった。図-5.1.1b に示すように，同じ試験条件でも，二度目の荷重上昇が生じない場合もあった。表面疵が深くなるほど二度目の荷重上昇の事例が減少したが，表面疵深さが 3*mm の場合でも 1 体のみ二度目の荷重上昇が見られた(図-5.1.1c)。また，水中に浸漬した試験片では，二度目の上昇は疵の深さに関係なく，全く見られなかった(図-5.1.1d)。



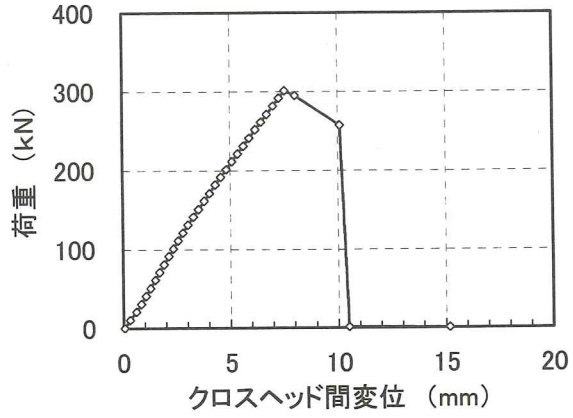
(a)　表面疵なし，水浸なし（SDN-5）



(b)　表面疵なし，水浸なし（SDN-3）



(c)　表面疵 3*mm，水浸なし（SD3-1）



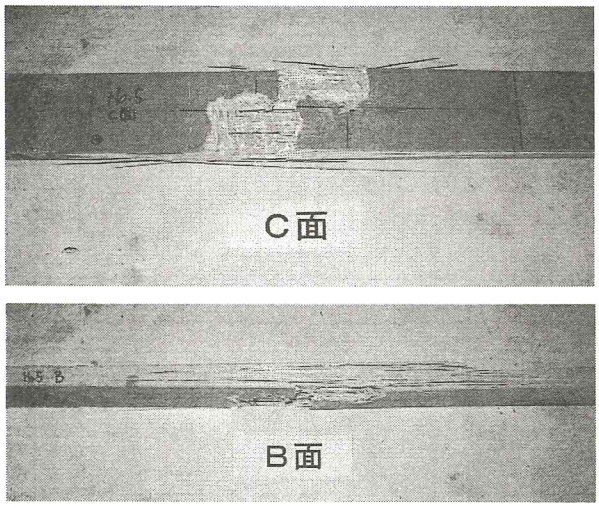
(d)　表面疵なし，水浸あり（SWN-2）

図-5.1.1　荷重－クロスヘッド間変位の関係

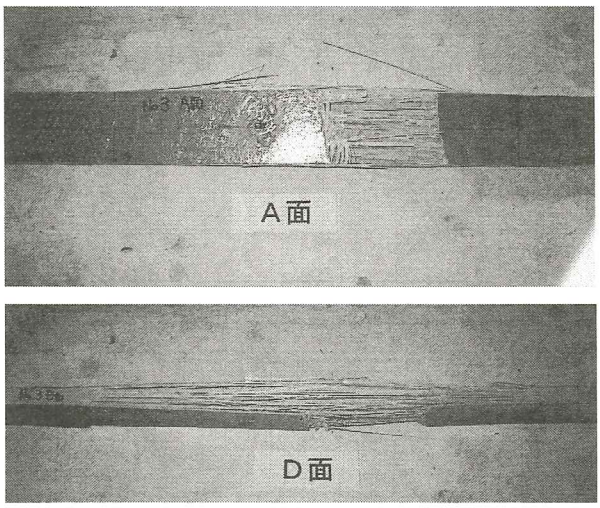
5.2　破断状況

図-5.2.1 に，静的引張試験の破断状況を示す。ほとんどの場合は最大荷重時に表層及びロービング層の一部または全部が破断した。静的引張試験の場合，すべての試験片のロービング層がほうき状にガラス繊維が拡がった状態となった。また，一部の試験片では，つかみ部分も含めてロービング層間のすべりが生じ，片方のロービング層はクロス層ともすべりが生じていた。このとき，マット層表面に軸方向のひび割れが生じていた(図-5.2.2)。

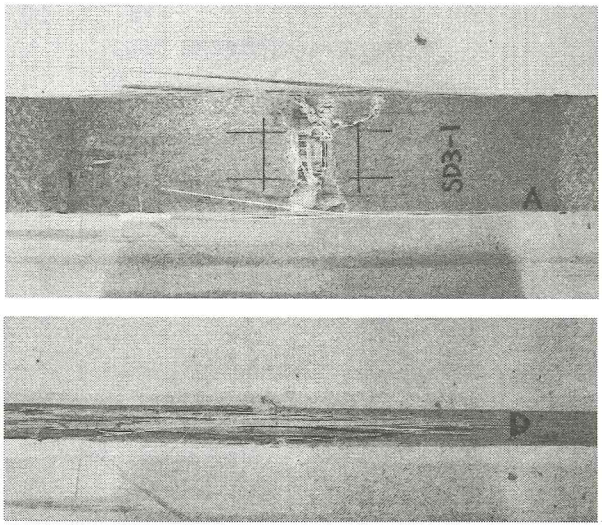
図-5.2.3 に，各試験片の破断位置を示す。表面疵が 1*mm 以下では，試験片の中央に表面疵が入っていたにもかかわらず，この位置での破断がほとんど見られなかった。表面疵 2*mm の試験片では，疵の入っている面の表層は試験片の中央で破断したが，裏面はチャック付近での破断が多かった。表面疵 3*mm の試験片では，ほとんどの場合に両面ともに試験片の中央で破断した。エンドミルの場合は，疵の入っている面の表層は試験片の中央で破断したが，裏面はチャック付近ではないが，試験片の中央での破断でもなかった。



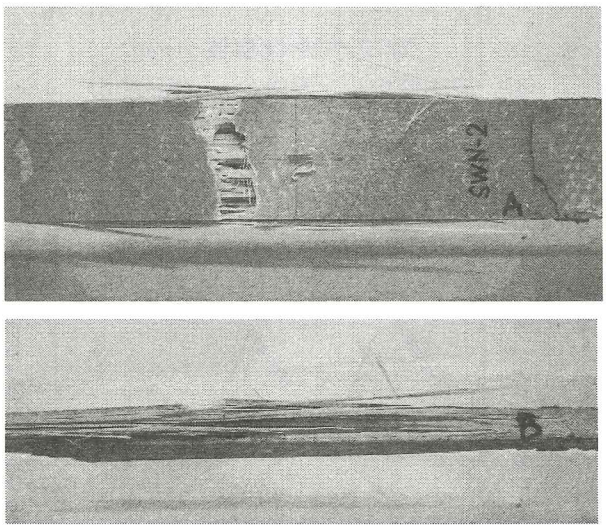
(a)　表面疵なし，水浸なし（SDN-5）



(b)　表面疵なし，水浸なし（SDN-3）



(c)　表面疵 3*mm，水浸なし（SD3-1）



(d)　表面疵なし，水浸あり（SWN-2）

図-5.2.1　破断状況

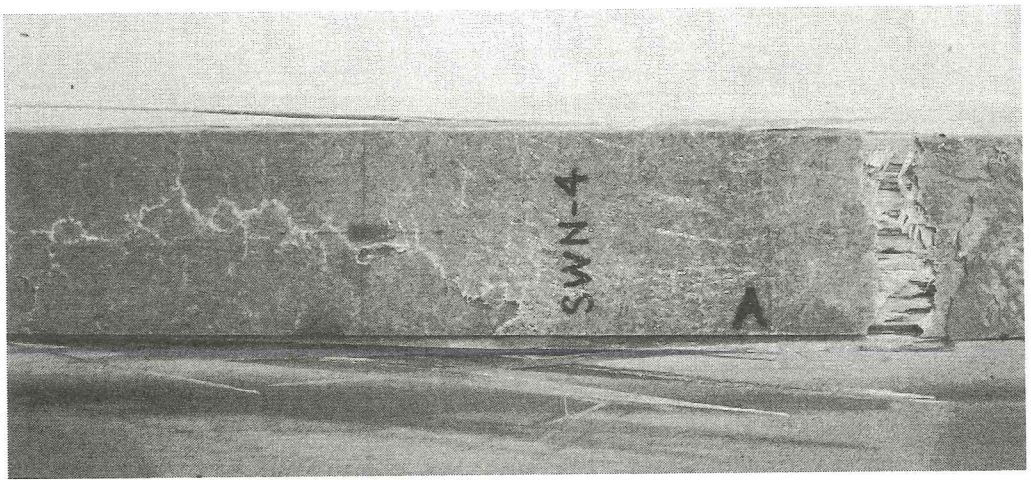


図-5.2.2　ロービングのすべり

※ロービング層のすべりに伴いマット層に軸方向のひび割れが生じていた。

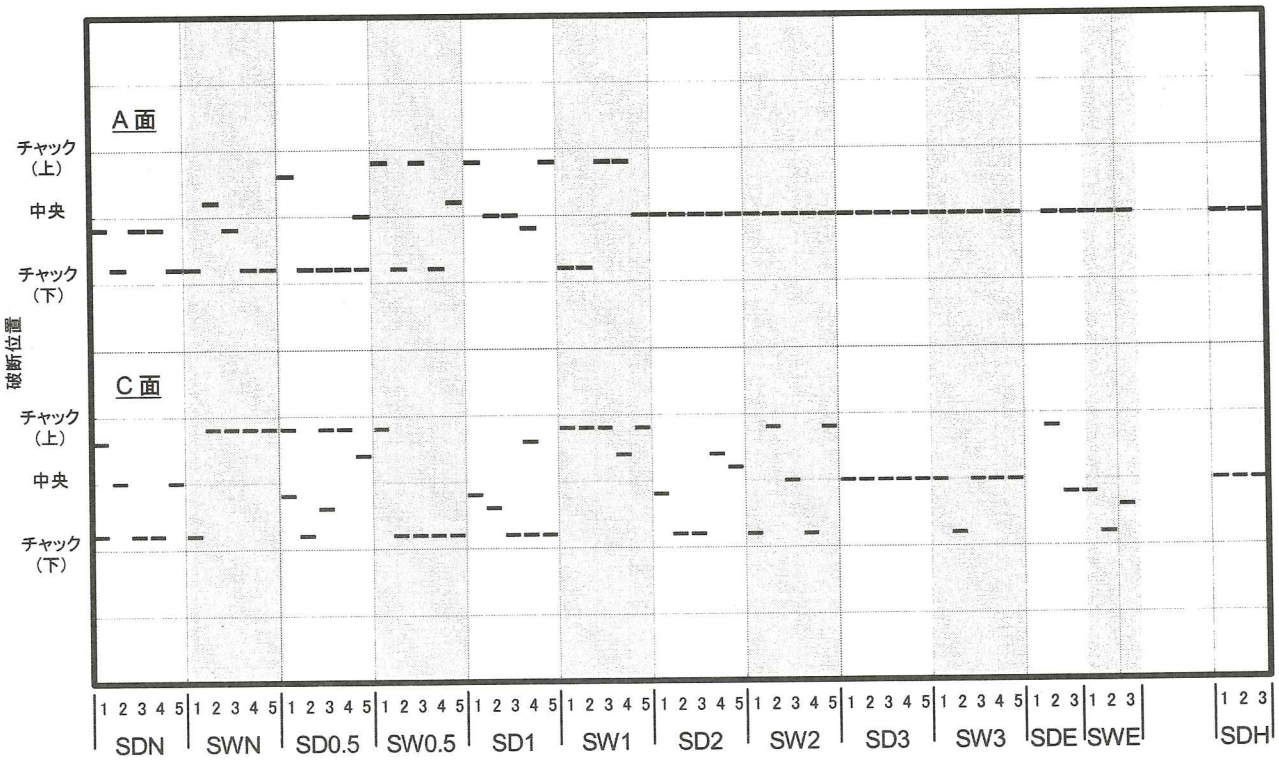


図-5.2.3　破断位置

5.3 引張強さ

表-5.3.1 及び図-5.3.1 に引張試験結果を示す。気中と水浸の差は顕著ではないが，水浸の方が気中よりもわずかに高い傾向が見られた。同表及び図-5.3.2 に引張試験時の室内の温度，湿度を示す。意図したものではないが，水浸した試験片の引張試験時の湿度は，多くの水浸なしの試験時に比べて高かった。

表-5.3.1 引張試験結果一覧

種類		試験体	最大荷重 P_u (kN)	総断面積 A_g (mm²)	引張強さ σ_g P_u/A_g (MPa)	σ_g 平均 (MPa)	表面疵深さ (mm)	純断面積 A_n (mm²)	σ_n P_u/A_n (MPa)	σ_n 平均 (MPa)	試験時温度 (℃)	試験時湿度 (%)
疵なし	気中	SDN-1	289	596	486	492	—	—	—	—	—	—
		SDN-2	297	622	478		—	—	—		—	—
		SDN-3	288	598	482		—	—	—		—	—
		SDN-4	323	610	530		—	—	—		—	—
		SDN-5	287	596	482		—	—	—		—	—
	水浸	SWN-1	301	590	509	499	—	—	—	—	17	59
		SWN-2	306	600	509		—	—	—		17	58
		SWN-3	253	592	427		—	—	—		19	51
		SWN-4	308	607	507		—	—	—		16	57
		SWN-5	332	614	540		—	—	—		22	50
0.5*mm	気中	SD0.5-1	283	606	467	475	0.50	596	474	482	17	71
		SD0.5-2	280	592	472		0.31	585	477		20	60
		SD0.5-3	320	617	519		0.50	607	527		20	52
		SD0.5-4	237	611	388		0.50	601	394		22	35
		SD0.5-5	328	619	530		0.50	609	538		21	36
	水浸	SW0.5-1	307	608	504	491	0.44	599	512	499	17	60
		SW0.5-2	312	585	534		0.56	574	544		18	53
		SW0.5-3	269	596	451		0.31	590	456		20	50
		SW0.5-4	285	596	478		0.50	586	486		17	55
		SW0.5-5	297	608	488		0.38	601	494		23	49
1*mm	気中	SD1-1	274	593	463	489	0.81	577	476	502	20	48
		SD1-2	281	595	472		0.69	581	483		20	42
		SD1-3	286	588	486		0.50	578	495		20	42
		SD1-4	300	591	508		0.75	576	521		21	36
		SD1-5	308	597	516		1.06	576	535		22	35
	水浸	SW1-1	279	595	469	467	0.75	580	481	481	16	64
		SW1-2	314	597	526		0.81	581	541		19	53
		SW1-3	294	594	495		1.00	574	512		20	50
		SW1-4	210	596	352		0.81	580	362		18	54
		SW1-5	290	589	493		0.88	571	508		23	48

σ_B = 495 MPa (疵なしの試験片 SDN, SWN 計 10 本の引張強さの平均値)

表-5.3.1　引張試験結果一覧（つづき）

種　類		試験体	最大荷重 P_u (kN)	総断面積 A_g (mm^2)	引張強さ σ_g P_u/A_g (MPa)	σ_g 平均 (MPa)	表面疵深さ (mm)	純断面積 A_n (mm^2)	σ_n P_u/A_n (MPa)	σ_n 平均 (MPa)	試験時温度 (℃)	試験時湿度 (%)
2*mm	気中	SD2-1	260	594	438	474	1.56	563	463	501	19	41
		SD2-2	306	598	512		1.69	565	542		16	44
		SD2-3	267	591	452		1.56	560	477		17	41
		SD2-4	297	599	496		1.63	567	524		22	37
		SD2-5	282	598	470		1.69	565	499		22	35
	水浸	SW2-1	299	610	490	478	1.63	578	518	504	16	63
		SW2-2	299	609	491		1.69	575	519		19	52
		SW2-3	277	598	464		1.69	564	492		20	50
		SW2-4	274	613	447		1.63	581	472		18	54
		SW2-5	289	582	497		1.31	555	520		23	48
3*mm	気中	SD3-1	196	592	331	382	2.75	537	365	419	19	40
		SD3-2	222	605	367		2.56	554	401		19	40
		SD3-3	254	597	426		2.44	548	464		19	38
		SD3-4	268	613	437		2.69	559	479		22	33
		SD3-5	205	590	347		2.81	534	384		22	31
	水浸	SW3-1	236	590	400	402	2.56	539	438	438	16	62
		SW3-2	266	596	446		2.38	549	485		19	52
		SW3-3	242	613	394		2.44	564	429		20	50
		SW3-4	254	609	417		2.50	559	455		19	53
		SW3-5	212	598	354		2.44	549	385		23	47
エンドミル	気中	SDE-1	228	601	380	405	4.88	501	455	485	18	41
		SDE-2	255	607	421		5.00	507	504		20	38
		SDE-3	248	598	414		4.94	498	497		23	35
	水浸	SWE-1	238	589	405	408	4.94	490	487	488	20	52
		SWE-2	228	606	377		5.00	506	451		24	44
		SWE-3	270	612	441		4.94	512	527		24	45
貫通孔	気中	SDH-1	160	598	267	—	11.9	370	431	—	26	40
		SDH-2	148	594	249		11.8	361	408		27	39
		SDH-3	142	599	236		11.9	359	394		27	42

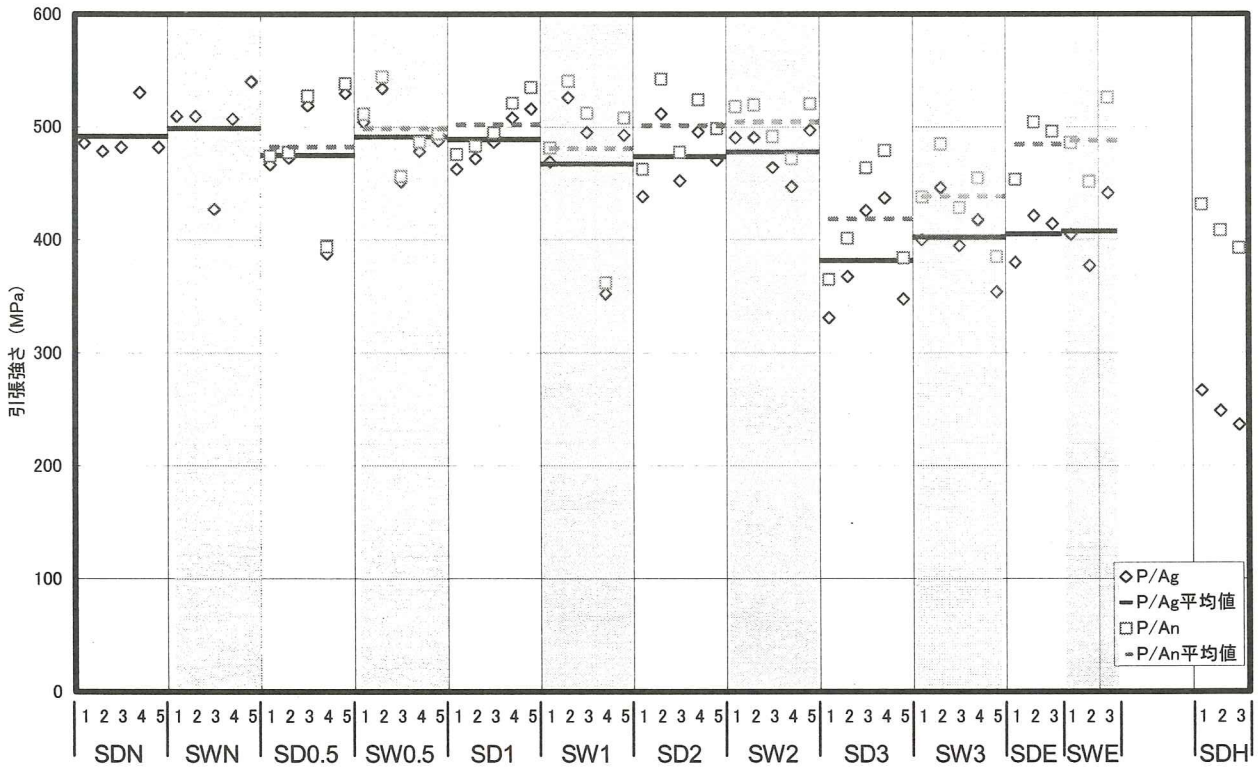


図-5.3.1　引張強さ

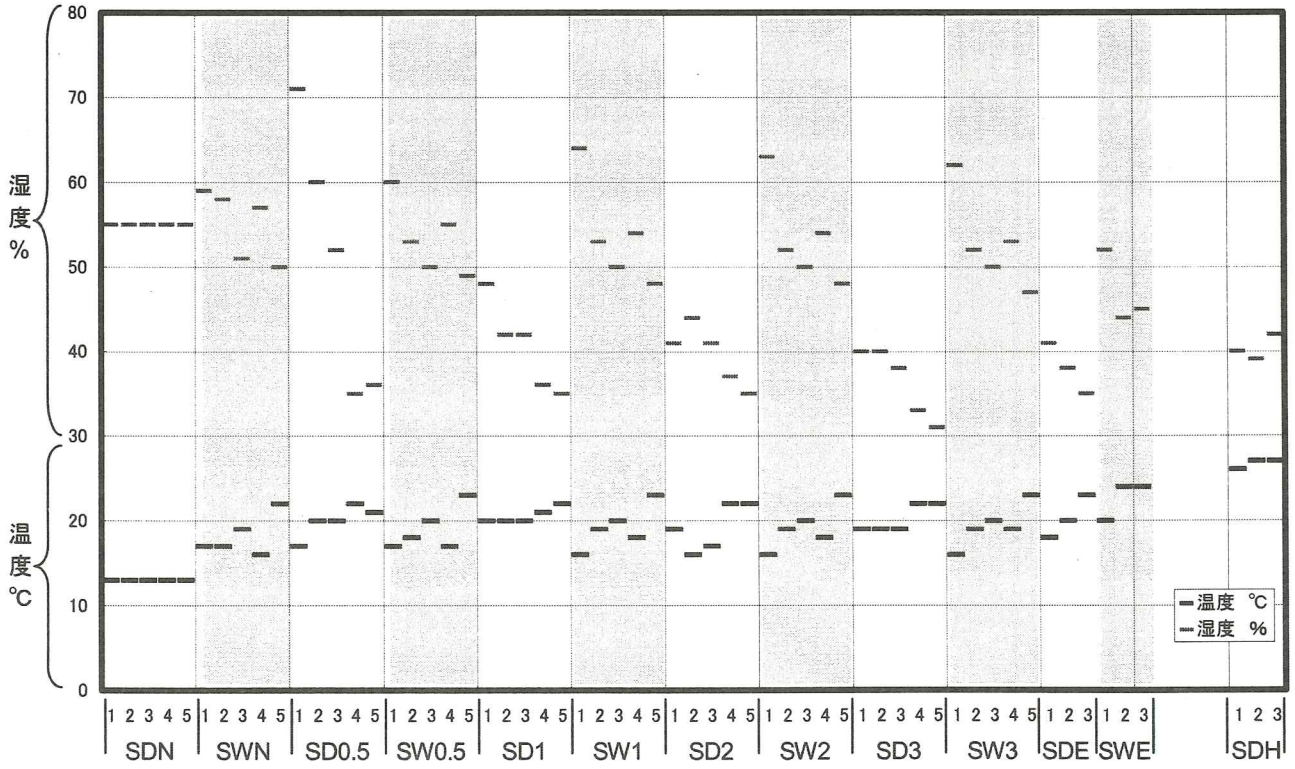
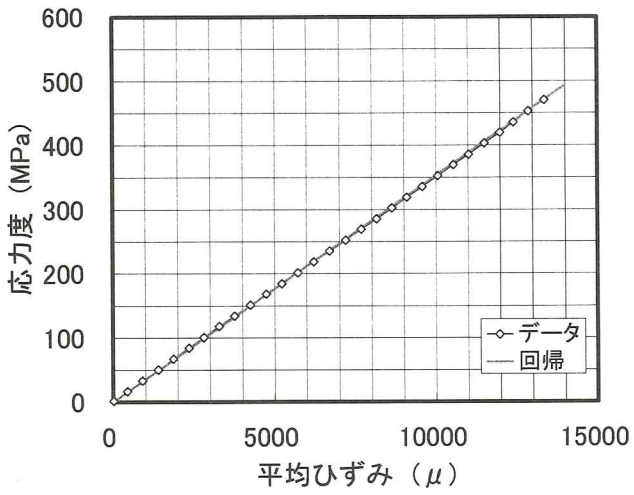


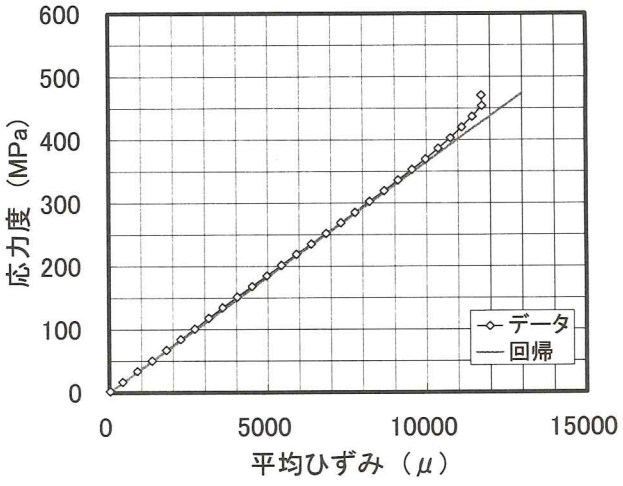
図-5.3.2　引張試験時の温度，湿度

5.4　弾性係数

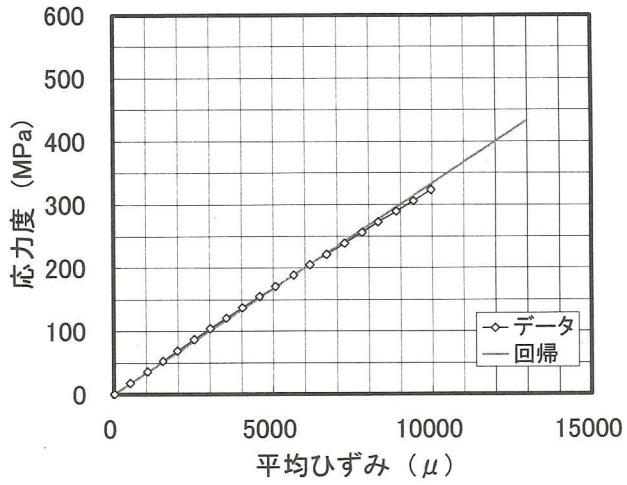
図-5.4.1 に応力－ひずみ図を示す(全試験片データは 7 章図-7.2.1～13 に示す)。これらの図に用いたひずみは表面疵から離れた箇所，板の両面で測定した値(ε 1，ε 2)の平均値 ε 。である。ひずみゲージは貼り付け位置にクラックが発生した場合を除いては，いずれも最大荷重まで追従していた（参考：ひずみゲージは疵の近傍で最大 25000 μ 程度まで追従しているものが見られた)。疵なしの試験片の場合，応力－ひずみの関係は最大荷重に至るまでほとんど直線的であるが，厳密にはひずみの増加とともに弾性係数が徐々に増加するものと，逆に徐々に減少するものが見られた。表-5.4.1，図-5.4.2 に各試験片の弾性係数を示す。ここでは，応力度で 50～150 MPa の範囲のデータで弾性係数を算出した。水浸した試験片の弾性係数は水浸なしに比べてやや小さい傾向が見られる。



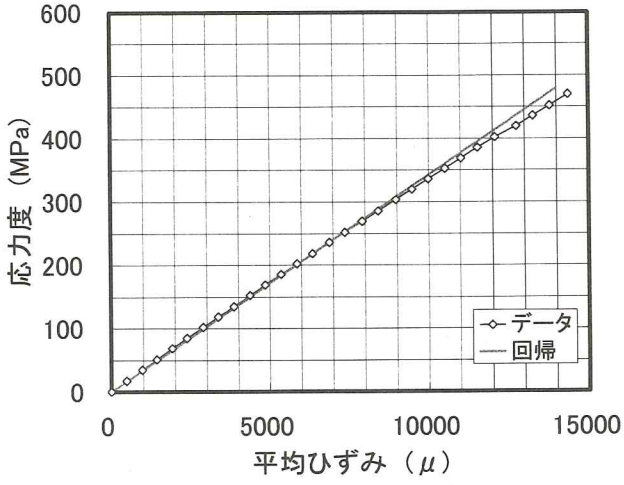
(a)　表面疵なし，水浸なし（SDN-5）



(b)　表面疵なし，水浸なし（SDN-3）



(c)　表面疵 3*mm，水浸なし（SD3-1）



(d)　表面疵なし，水浸あり（SWN-2）

図-5.4.1　応力－ひずみの関係

表-5.4.1　引張試験における各試験片の弾性係数

種類		試験体	弾性係数 (GPa)	平均値 (GPa)
疵なし	気中	SDN-1	36.5	36.6
		SDN-2	37.0	
		SDN-3	38.5	
		SDN-4	35.8	
		SDN-5	35.3	
	水浸	SWN-1	35.6	35.6
		SWN-2	34.2	
		SWN-3	34.4	
		SWN-4	35.3	
		SWN-5	38.6	
0.5*mm	気中	SD0.5-1	34.2	35.2
		SD0.5-2	38.6	
		SD0.5-3	35.9	
		SD0.5-4	33.0	
		SD0.5-5	34.2	
	水浸	SW0.5-1	33.1	33.4
		SW0.5-2	33.8	
		SW0.5-3	31.8	
		SW0.5-4	33.2	
		SW0.5-5	35.2	
1*mm	気中	SD1-1	33.7	35.9
		SD1-2	36.6	
		SD1-3	37.6	
		SD1-4	36.1	
		SD1-5	35.3	
	水浸	SW1-1	36.3	35.4
		SW1-2	35.6	
		SW1-3	37.4	
		SW1-4	31.4	
		SW1-5	36.5	

種類		試験体	弾性係数 (GPa)	平均値 (GPa)
2*mm	気中	SD2-1	34.8	37.5
		SD2-2	37.3	
		SD2-3	36.2	
		SD2-4	41.6	
		SD2-5	37.5	
	水浸	SW2-1	39.6	37.7
		SW2-2	36.6	
		SW2-3	34.5	
		SW2-4	37.7	
		SW2-5	40.1	
3*mm	気中	SD3-1	33.3	35.3
		SD3-2	29.9	
		SD3-3	37.7	
		SD3-4	38.8	
		SD3-5	36.9	
	水浸	SW3-1	31.7	33.9
		SW3-2	36.6	
		SW3-3	33.3	
		SW3-4	34.7	
		SW3-5	33.4	
エンドミル	気中	SDE-1	37.4	37.1
		SDE-2	36.1	
		SDE-3	37.9	
	水浸	SWE-1	31.7	33.4
		SWE-2	34.2	
		SWE-3	34.3	
貫通孔	気中	SDH-1	39.6	—
		SDH-2	35.4	—
		SDH-3	36.7	—

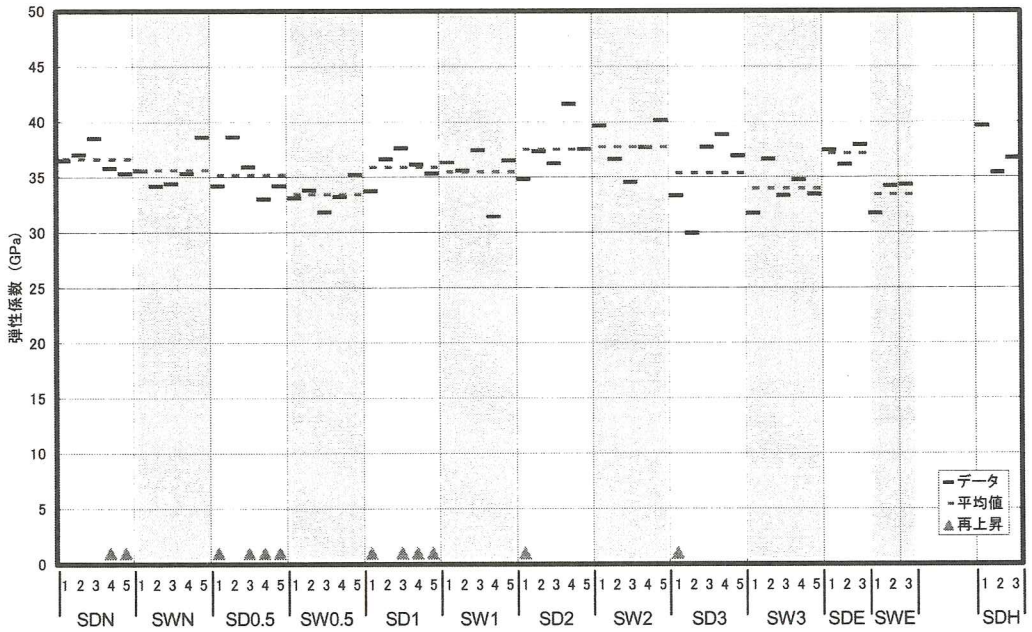


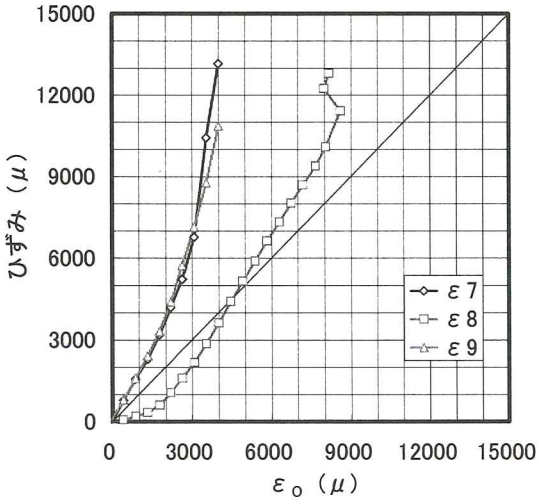
図-5.4.2　引張試験における各試験片の弾性係数

5.5　表面疵近傍のひずみ

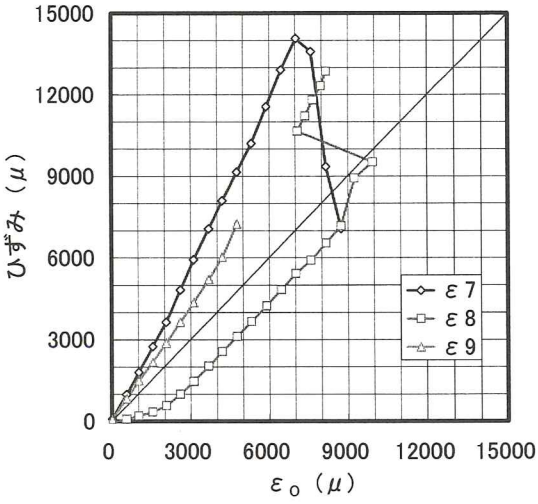
図-5.5.1 にエンドミルによる表面疵直近(ε7，ε9 は表面疵から約 2mm，ε8 は表面疵の真裏)の軸方向ひずみを一般部の軸方向ひずみ ε_0 との関係で示す。図-5.5.2～3 に深さ 3*mm の表面疵直近(ε7，ε9 は表面疵から 5～10mm，ε8 は表面疵の真裏)の軸方向ひずみを一般部の軸方向ひずみ ε_0 との関係で示す。押込みによる表面疵の場合，疵周囲に表層の盛り上がりが認められた。特に，表面疵 3*mm では，表層の盛り上がりが疵から 5～10mm 程度の範囲で生じていたため，ひずみゲージの貼り付け位置を貫通孔やエンドミルの場合と同じ表面疵から約 2mm とすることができず，貼り付け位置も試験片によって異なっていた。このため，3*mm の表面疵の ε7，ε9 の値は，貫通孔やエンドミルの場合よりも小さく，ε_0 と大差ないとともに，試験片によって異なっていた。

表面疵(エンドミル，3*mm の両方)の真裏の軸方向ひずみ ε8 は，偏心による曲げ圧縮が生じるため，ε_0 に比べてひずみの増加が小さかった。影響が見られた。エンドミルの場合，偏心の影響に関して試験片間の差は見られなかったが，押込み荷重による 3*mm の表面疵の場合，試験片によって大きく異なっていた。

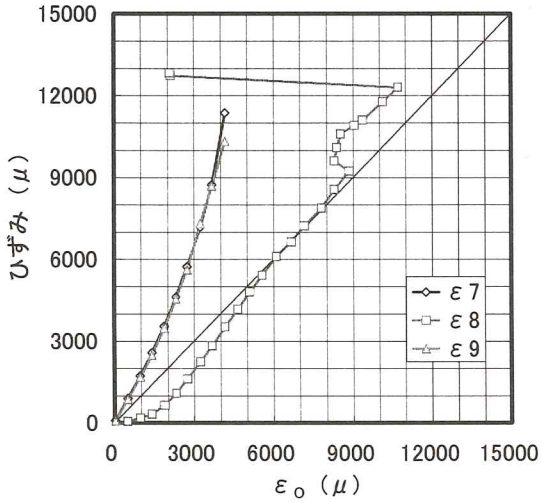
水浸試験片の静的挙動は，表面疵近傍のひずみに関して，水浸なしの試験片の結果と明確な違いが見られなかった。



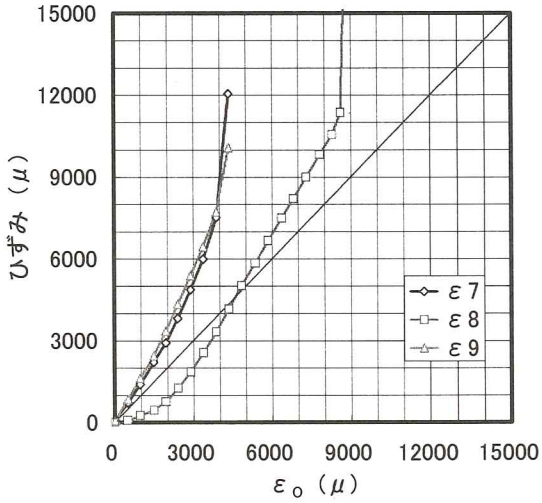
(a) SDE-1



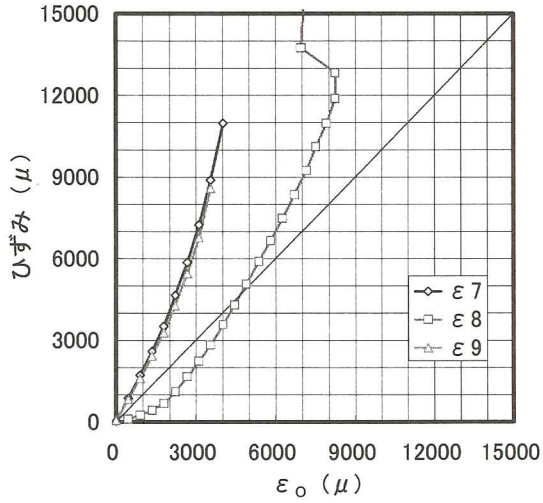
(d) SWE-1



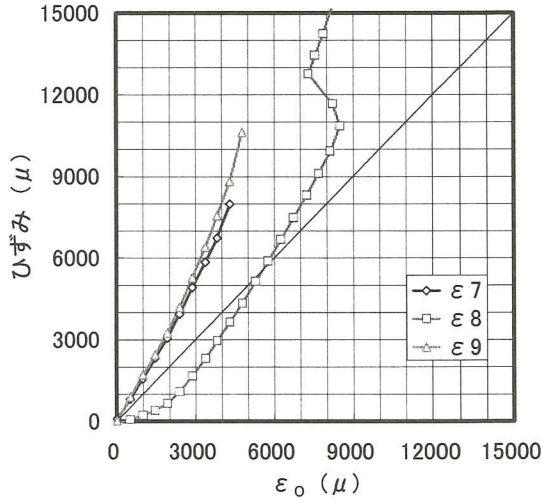
(b) SDE-2



(e) SWE-2

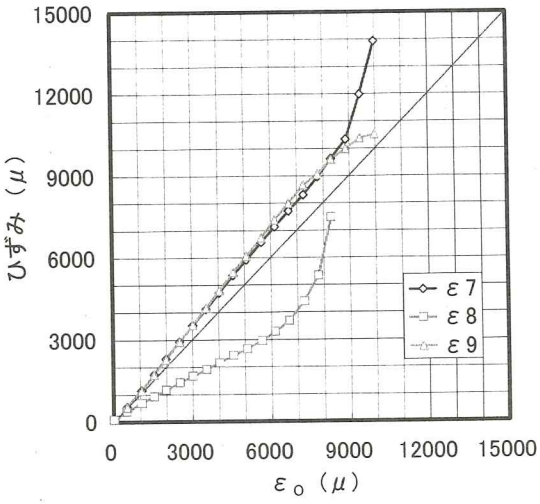


(c) SDE-3

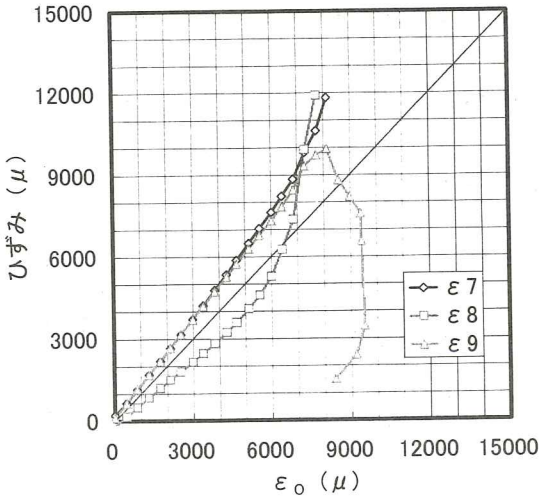


(f) SWE-3

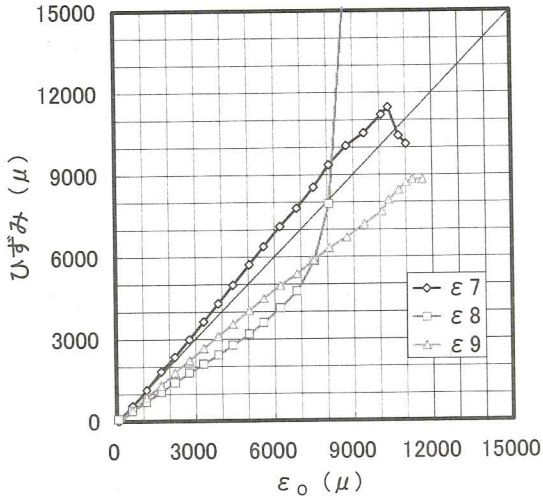
図-5.5.1 表面疵近傍のひずみ（エンドミル加工，SDE，SWE）



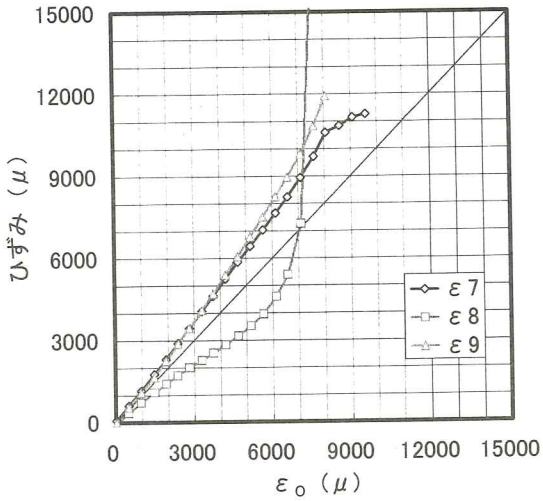
(a)　SD3-1



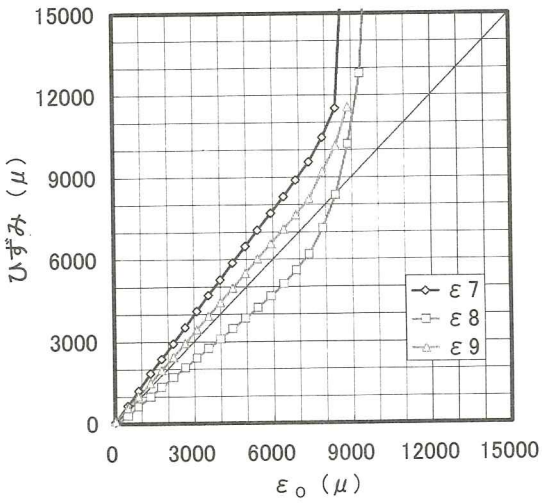
(d)　SD3-4



(b)　SD3-2

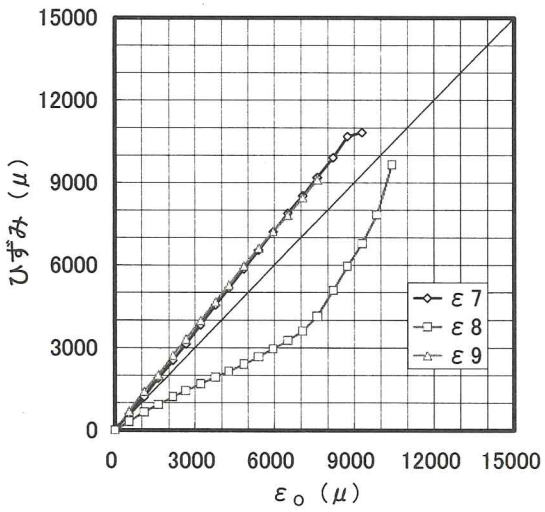


(e)　SD3-5

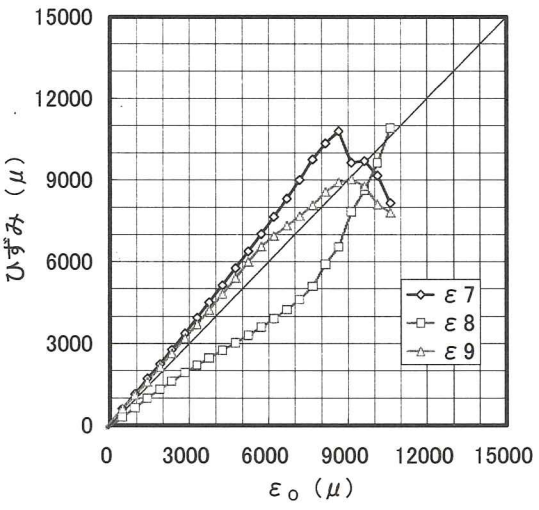


(c)　SD3-3

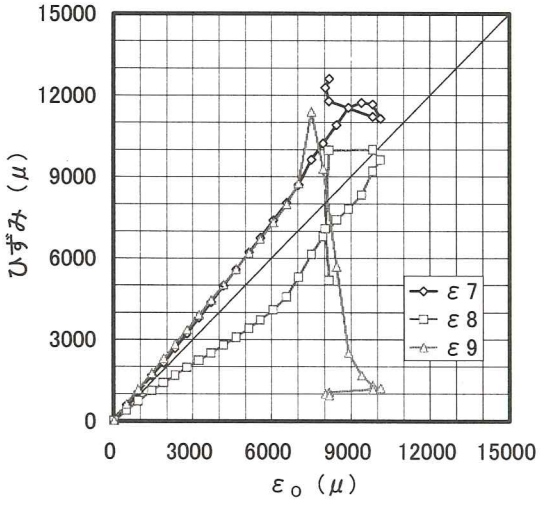
図-5.5.2　表面疵近傍のひずみ（押込み荷重負荷，水浸なし，SD3）



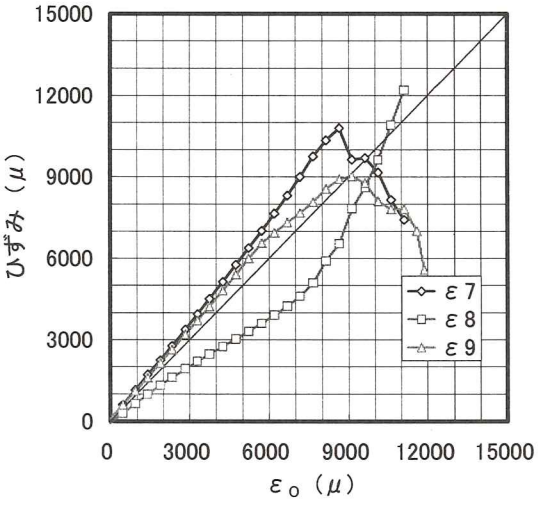
(a)　SW3-1



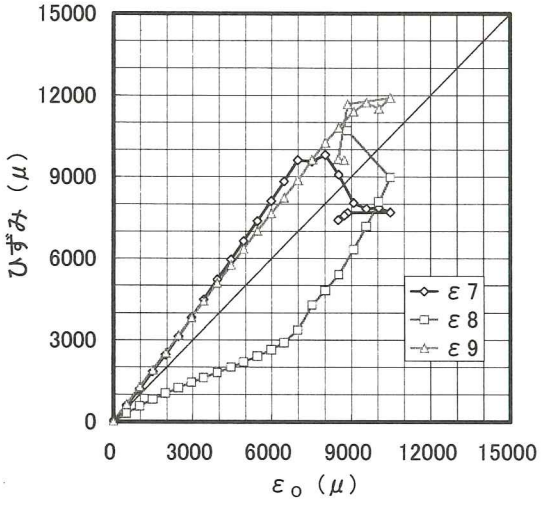
(d)　SW3-4



(b)　SW3-2



(e)　SW3-5



(c)　SW3-3

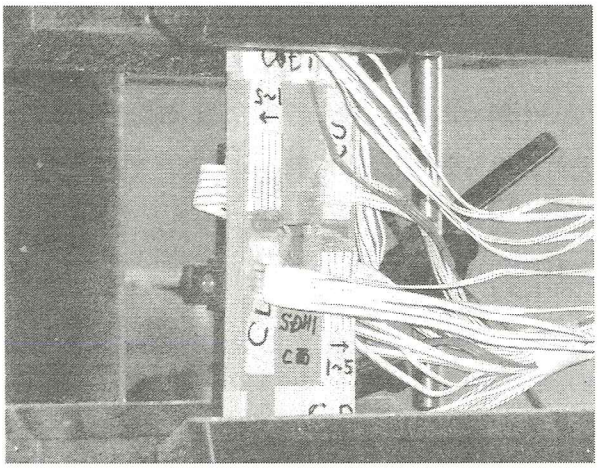
図-5.5.3　表面疵近傍のひずみ（押込み荷重負荷，水浸あり，SW3）

5.6　貫通孔を有する試験片の破断状況とひずみ分布

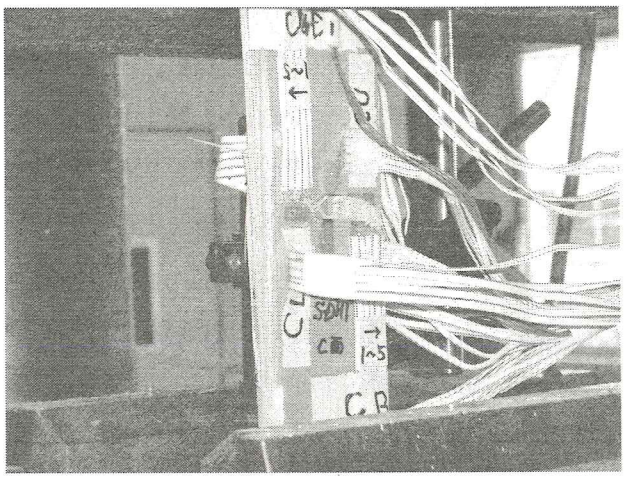
図-5.6.1～3 に貫通孔を有する試験片の引張載荷中のひび割れ発生時，伸展時の状況を示す。長孔の場合，表層のひび割れは貫通孔の両端から発生して両縁端に向けてやや斜めに伸展した。円孔の場合は，表層のひび割れは最も断面欠損が大きい位置よりもやや上方に離れた位置から発生した後，両縁端に向けて斜め 30° 程度の方向に伸展した。さらに荷重を上げると，最も断面欠損が大きい位置よりも下方に離れた位置からも下方に向かってひび割れが発生した。(FRP の貫通孔からのひび割れの発生位置や伸展方向は，孔の形状の他，繊維の方向及び層構成によっても異なる[5.1)]。)

図-5.6.4～6 に貫通孔を有する試験片の引張載荷後の破壊状況を示す。3 本ともに，ロービング層の破断と層間すべり，ロービング層間のすべり(スプリット破壊)を伴って終局破壊に至った。ロービング層はほうき状になる傾向は見られたが，表面疵の試験片(前掲図-5.2.1)に比べると繊維の拡がりが軽微であった。

図-5.6.7 に貫通孔直近(いずれも貫通孔から約 2 mm)の軸方向ひずみを一般部の軸方向ひずみ ε_0 との関係で示す。また，図-5.6.8～5.6.10 に幅 1 mm の長孔を有する試験片 SDH-1～3 それぞれの引張応力下における貫通孔周囲のひずみ分布を示す。

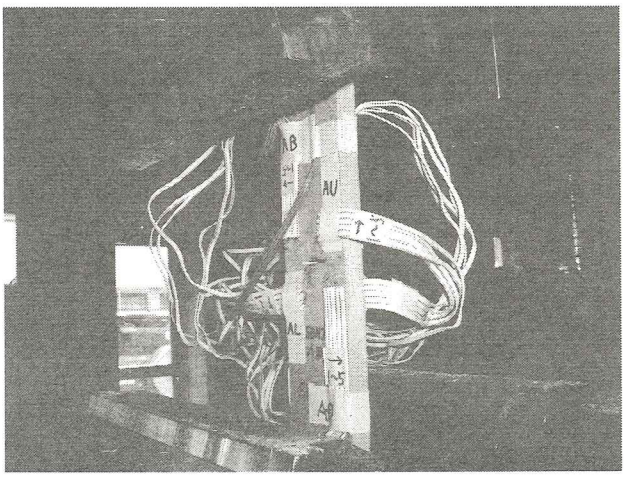


(a) ひび割れ発生時

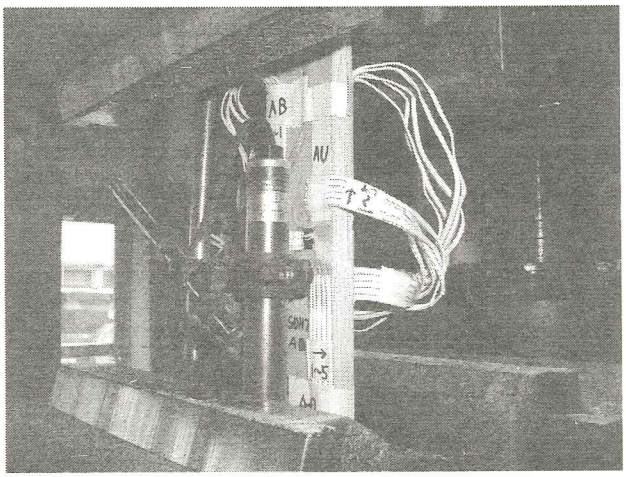


(b) ひび割れ伸展時

図-5.6.1　幅 1 mm の溝型貫通孔を有する試験片のひび割れ発生状況 (SDH-1)

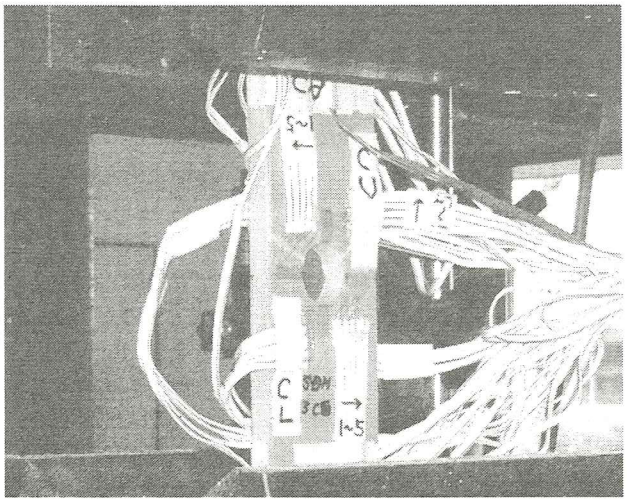


(a) 載荷前

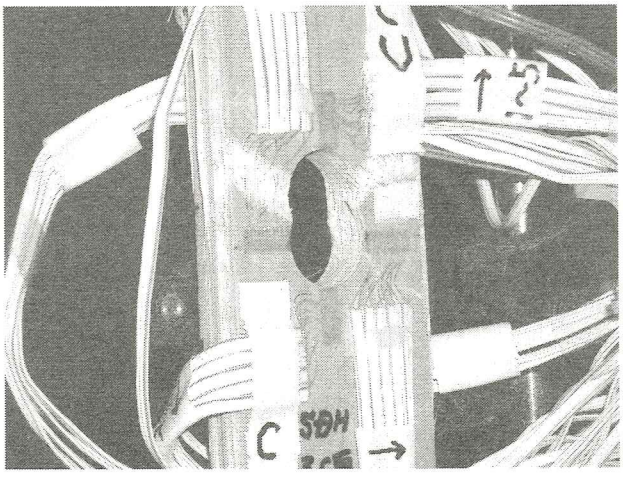


(b) ひび割れ伸展時

図-5.6.2　幅 2 mm の溝型貫通孔を有する試験片のひび割れ発生 (SDH-2)

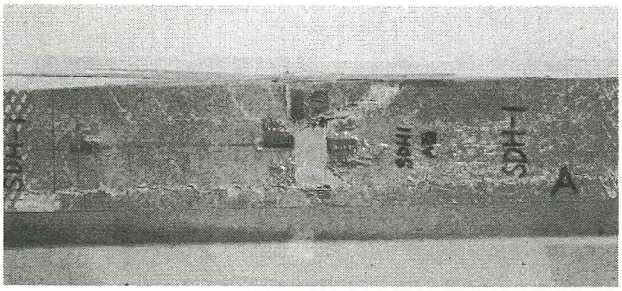


(a) ひび割れ発生時

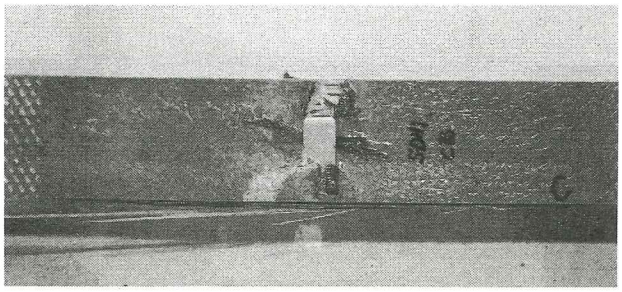


(b) ひび割れ伸展時

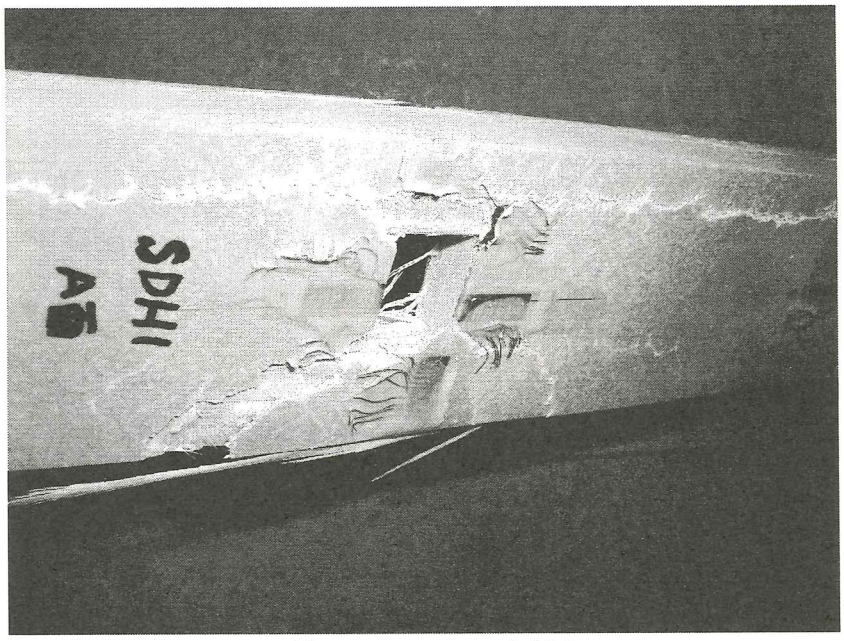
図-5.6.3　貫通円孔を有する試験片のひび割れ発生 (SDH-3)



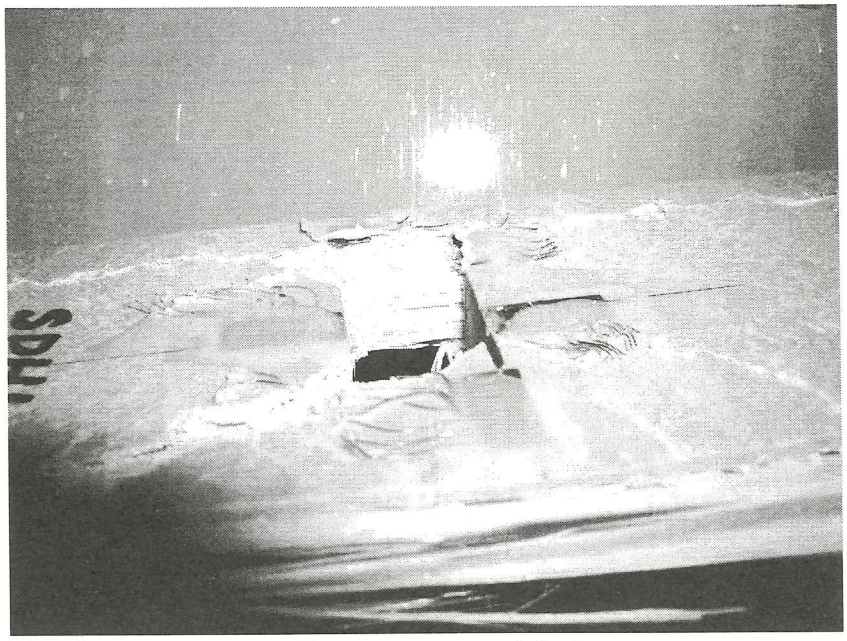
(a) A 面



(b) C 面

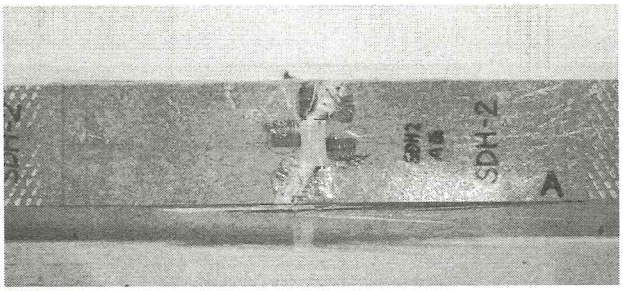


(c) A 面，貫通孔部拡大

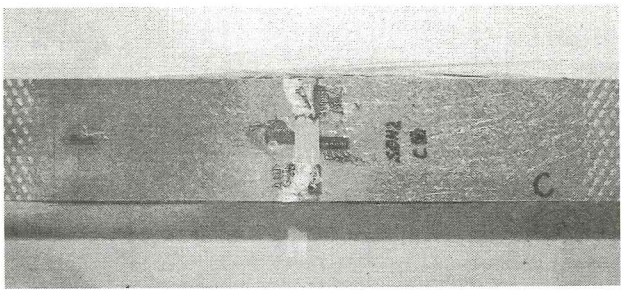


(d) A 面，貫通孔部拡大

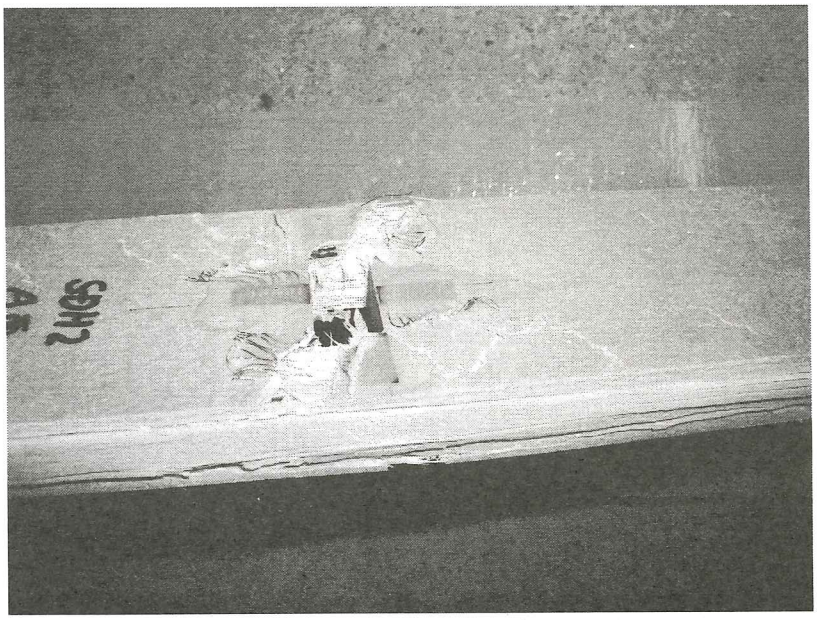
図-5.6.4 幅 1 mm の溝型貫通孔を有する試験片の破壊状況 (SDH-1)



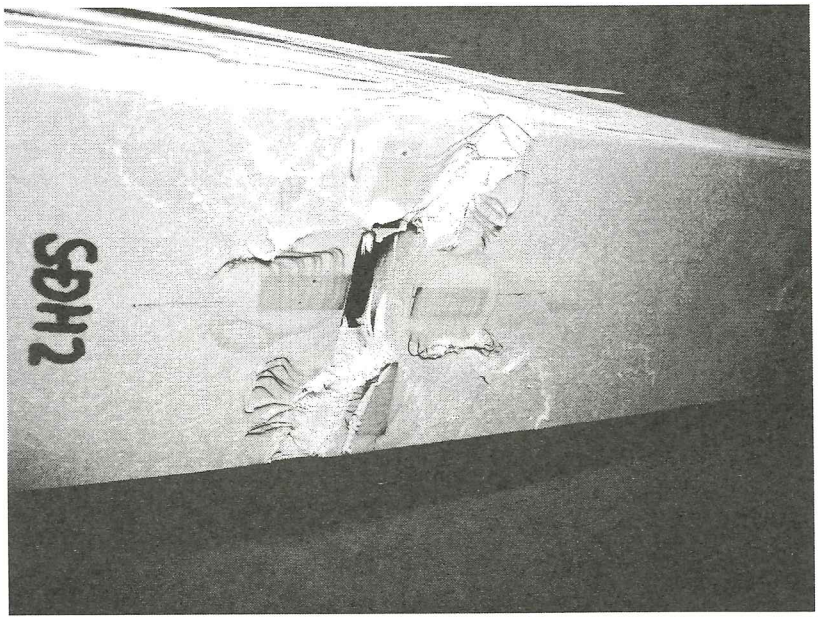
(a) A 面



(b) C 面

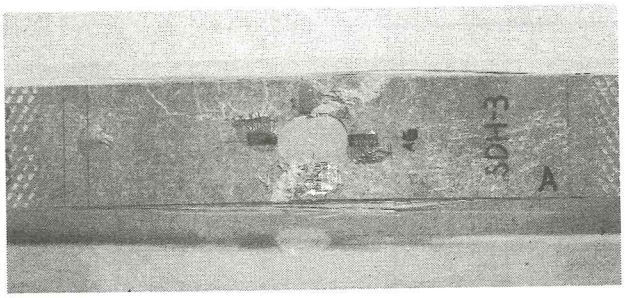


(c) A 面，貫通孔部拡大

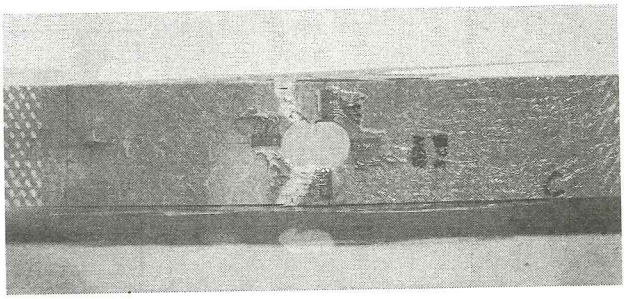


(d) A 面，貫通孔部拡大

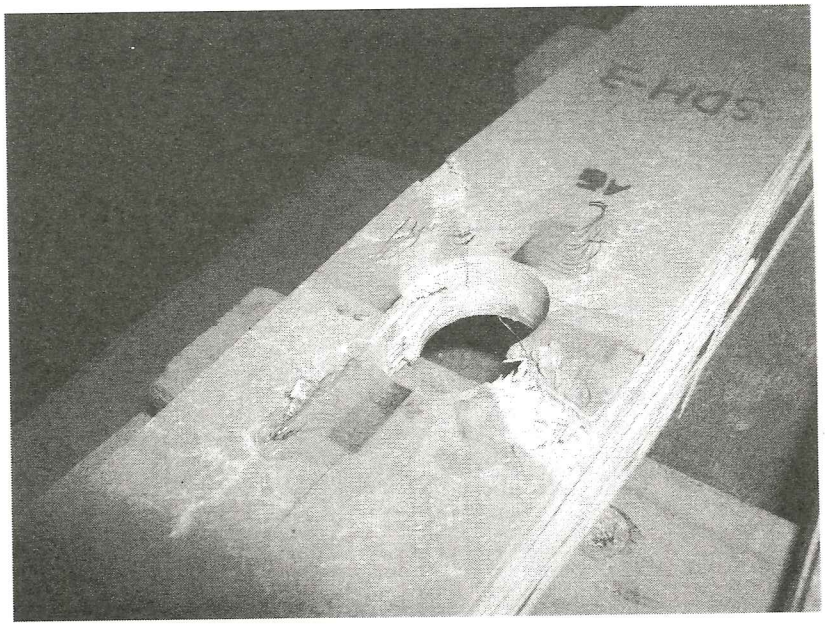
図-5.6.5　幅 2 mm の溝型貫通孔を有する試験片の破壊状況 (SDH-2)



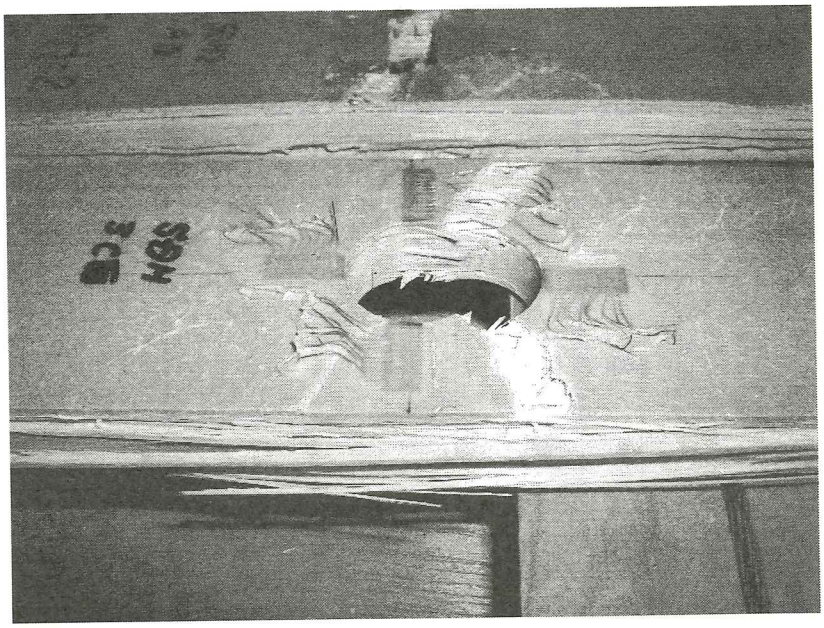
(a) A 面



(b) C 面

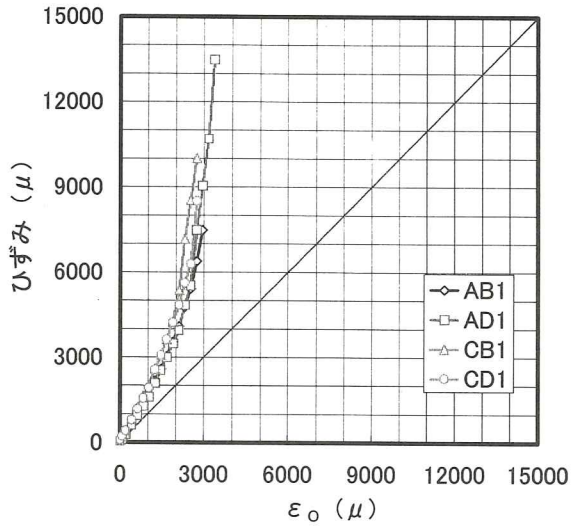


(c) A 面，貫通孔部拡大

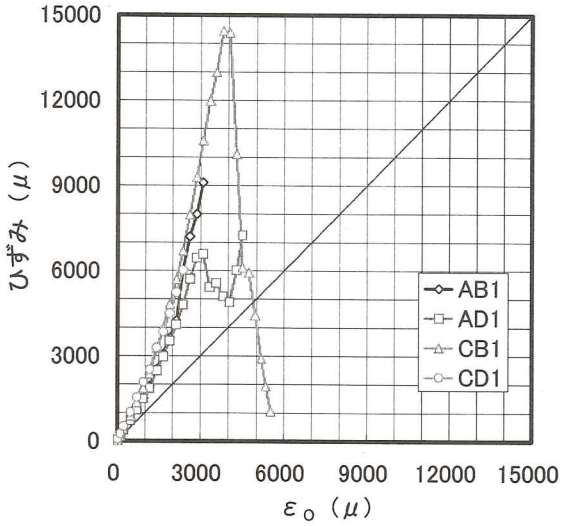


(d) A 面，貫通孔部拡大

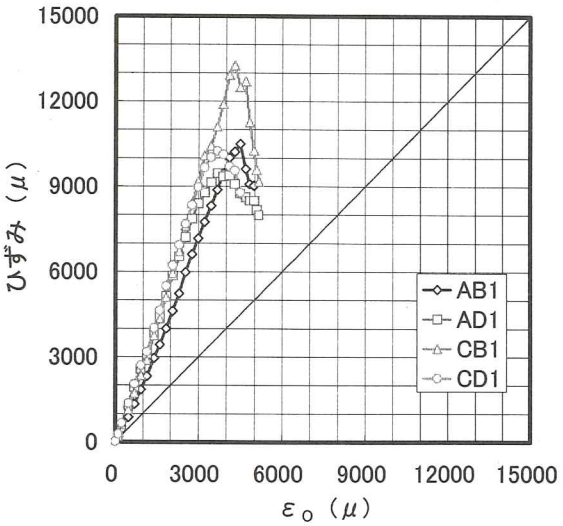
図-5.6.6 貫通円孔を有する試験片の破壊状況 (SDH-3)



(a) SDH-1



(b) SDH-2



(c) SDH-3

図-5.6.7　貫通孔直近のひずみ

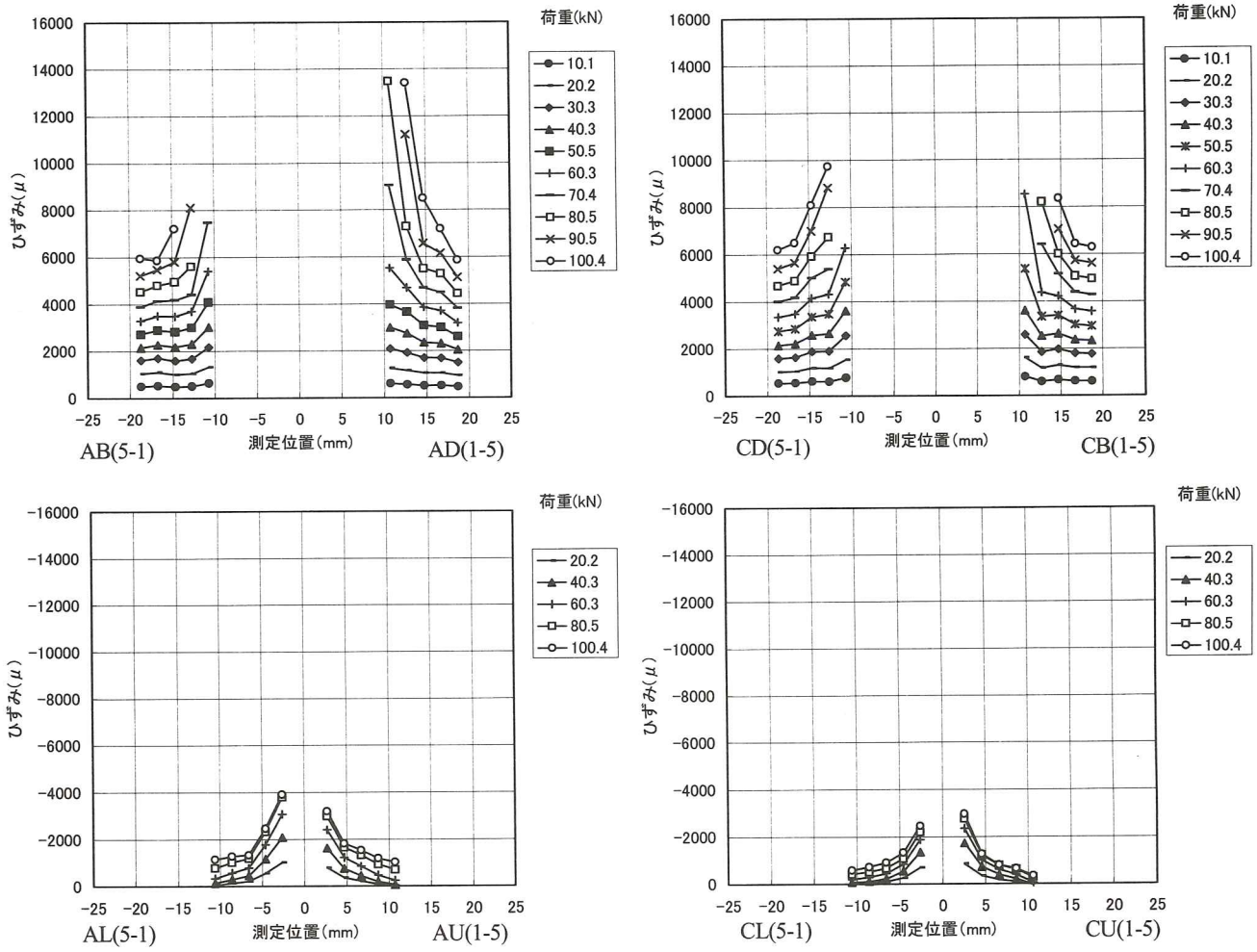


図-5.6.8　引張応力下における貫通孔周囲のひずみ分布（SDH-1，幅 1 mm の長孔）

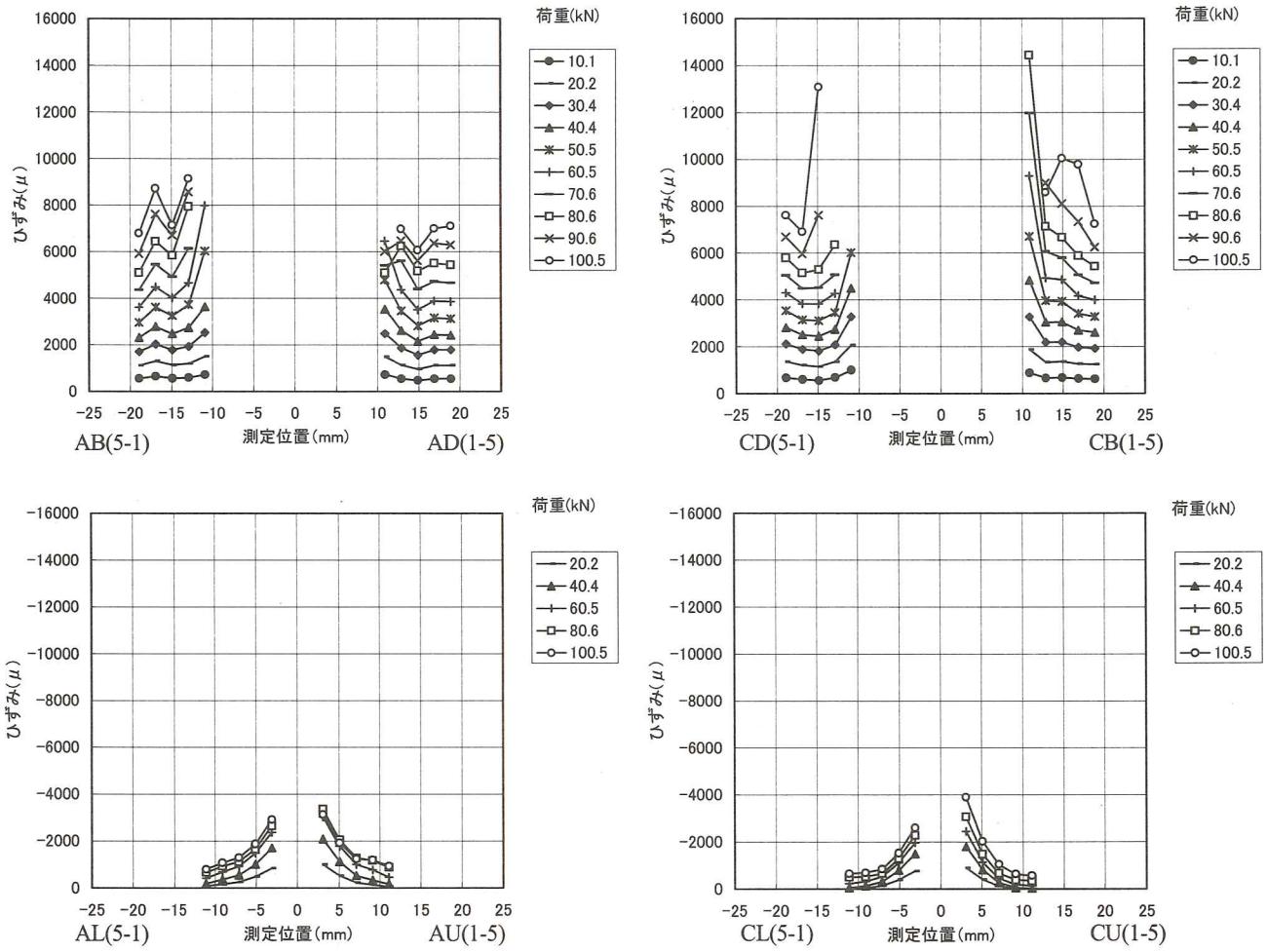


図-5.6.9　引張応力下における貫通孔周囲のひずみ分布（SDH-2，幅 2 mm の長孔）

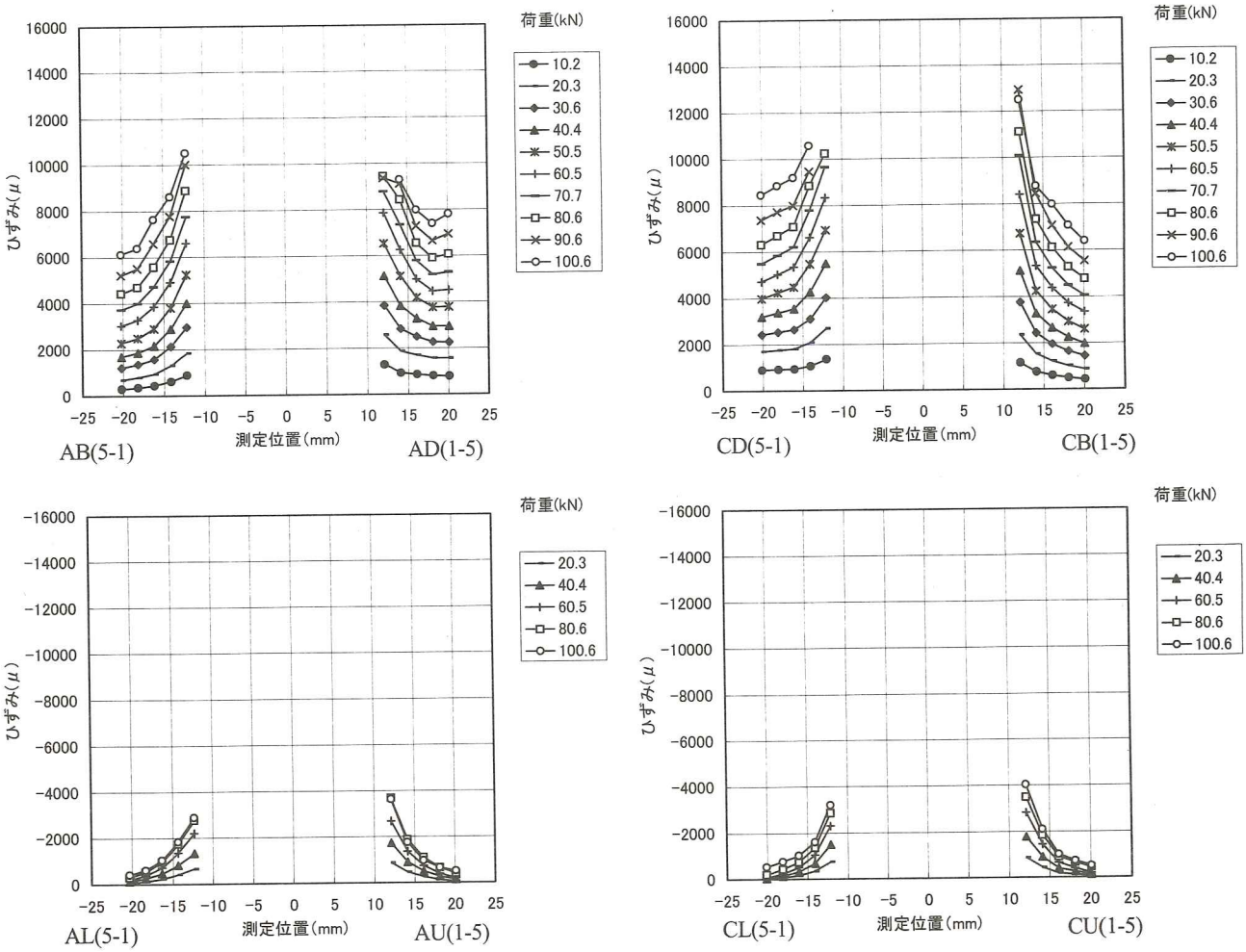


図-5.6.10　引張応力下における貫通孔周囲のひずみ分布（SDH-3，直径 20 mm の円孔）

6．疲労試験結果

6.1　疲労試験前静的載荷の結果

図-6.1.1～6.1.15 に 3*mm の表面疵を有する試験片 FD3 及びエンドミルによる表面疵を有する試験片 FDE の表面疵近傍のひずみ ε 7～ ε 9 を一般部のひずみ ε ₀との関係で示す。静的挙動は静的試験のときと同様であった。FD3 の表面疵の裏面で測定したひずみ ε 8 は ε ₀と概ね直線関係にあったが，FDE の場合は上昇時にひずみの増加とともに傾きが大きくなっていたが，下降時には傾きの変動は少なく，概ね直線的なものも見られた。

図-6.1.16～6.1.17 に，疲労試験前に水中浸漬を経験した 3*mm の表面疵を有する試験片 FW3-1 及びエンドミルによる表面疵を有する試験片 FWE-1 の表面疵近傍のひずみ ε を一般部のひずみ ε ₀との関係で示す。

図-6.1.18 に，1*mm の表面疵の試験結果を示す。 ε 8 は ε 7， ε 9 よりもやや小さく，わずかではあるが偏心の影響が現れていたことがわかる。（疲労試験ではチャック切れした）

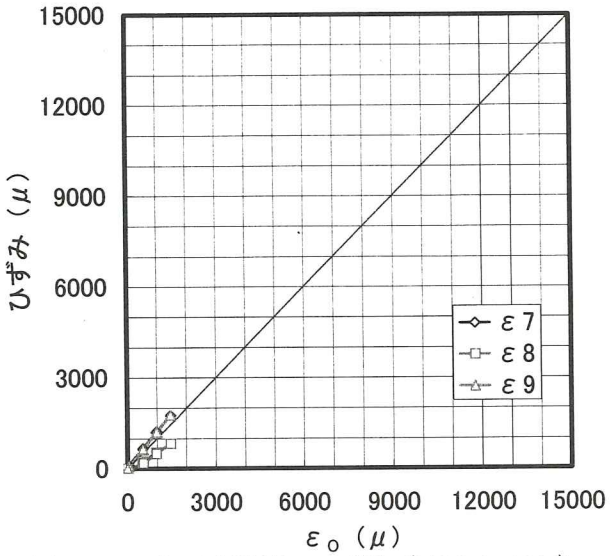


図-6.1.1　表面疵近傍のひずみ（FD3-1, 10%）

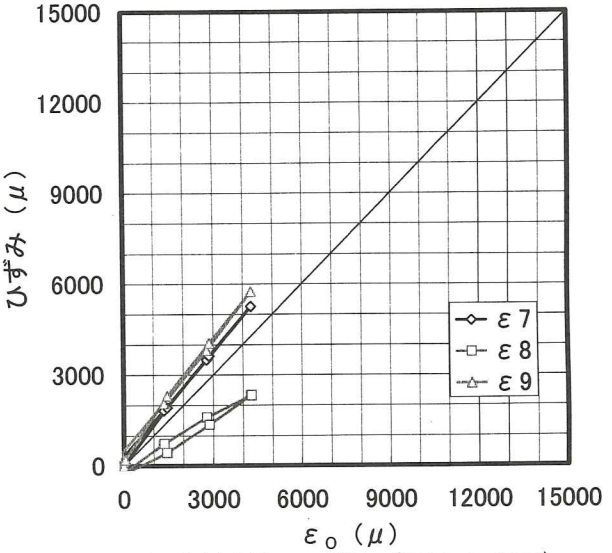


図-6.1.2　表面疵近傍のひずみ（FD3-1, 30%）

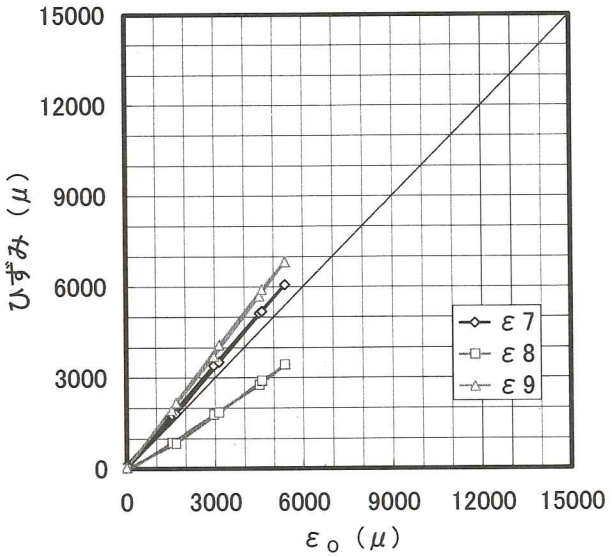


図-6.1.3　表面疵近傍のひずみ（FD3-2）

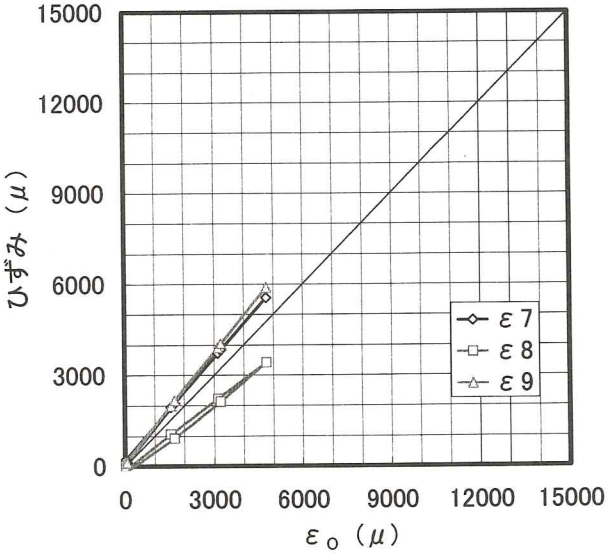


図-6.1.4　表面疵近傍のひずみ（FD3-3）

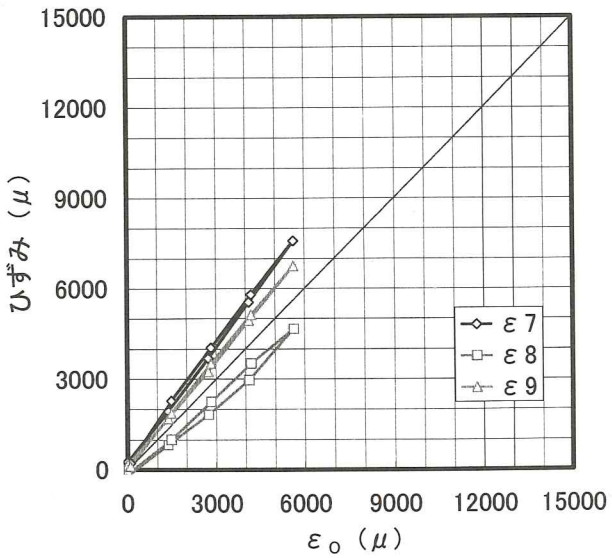


図-6.1.5　表面疵近傍のひずみ（FD3-4）

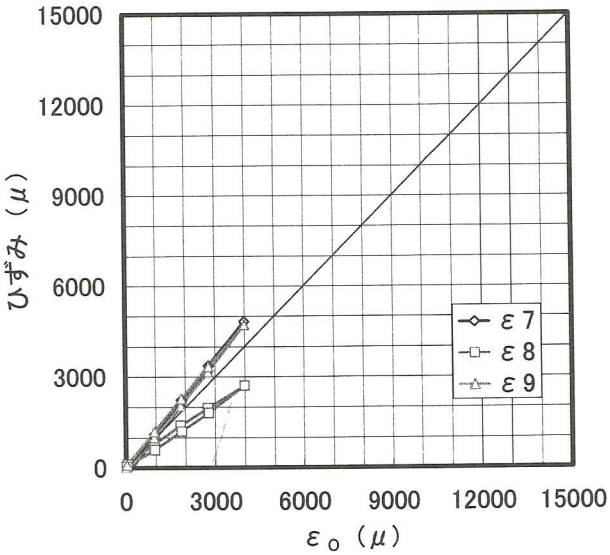


図-6.1.6　表面疵近傍のひずみ（FD3-5）

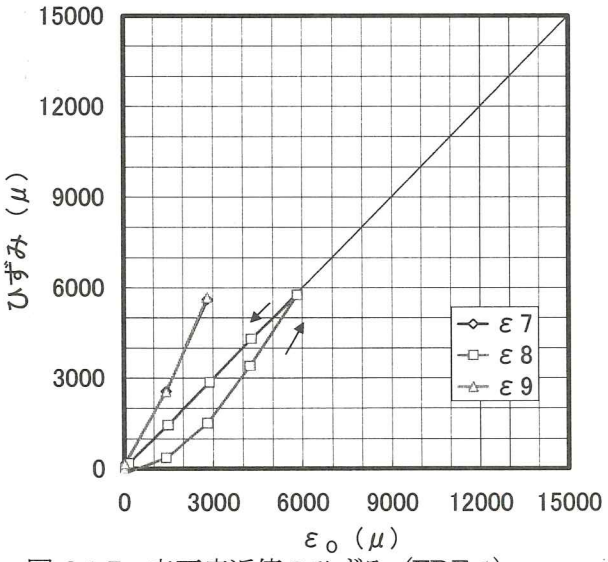


図-6.1.7　表面疵近傍のひずみ（FDE-1）

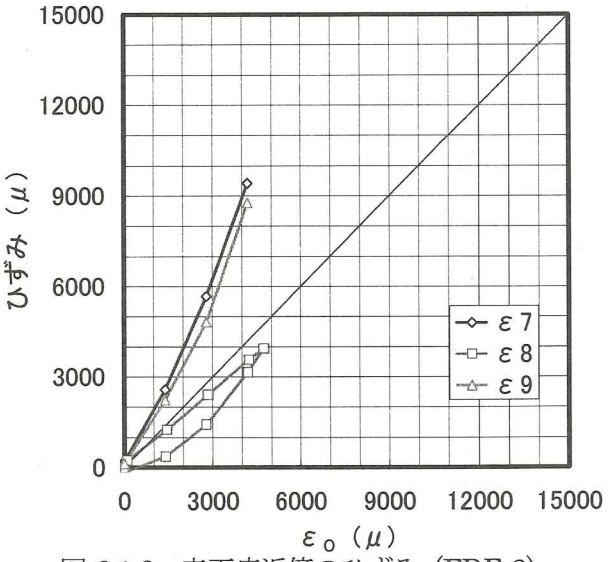


図-6.1.8　表面疵近傍のひずみ（FDE-2）

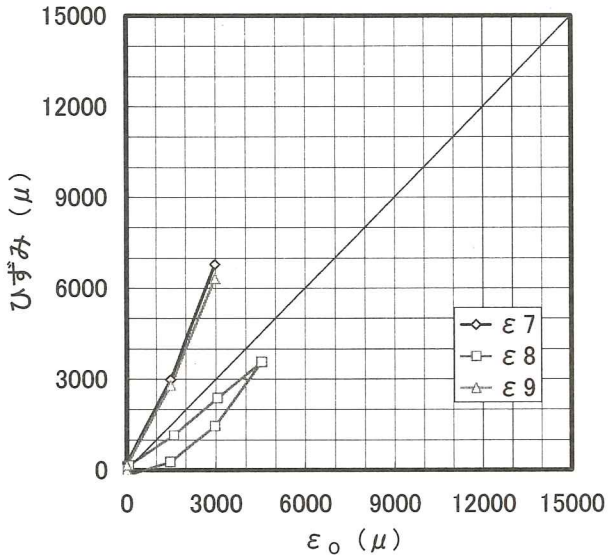


図-6.1.9　表面近傍のひずみ（FDE-3）

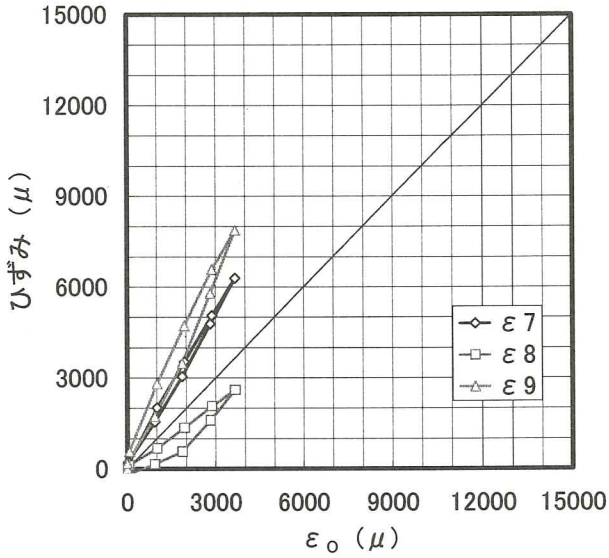


図-6.1.10　表面疵近傍のひずみ（FDE-4）

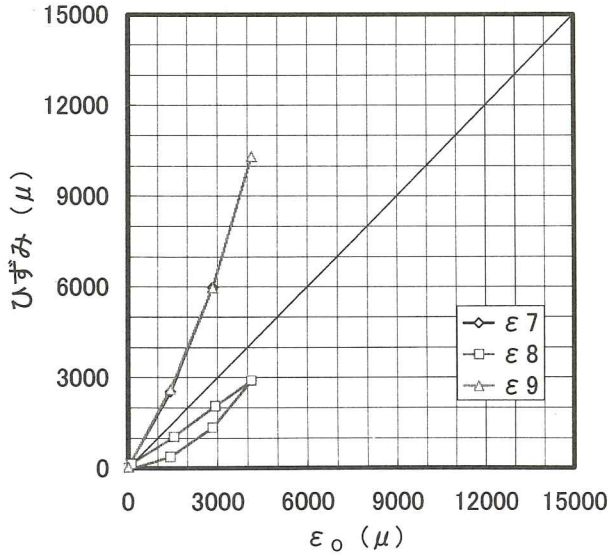


図-6.1.11　表面疵近傍のひずみ（FDE-5）

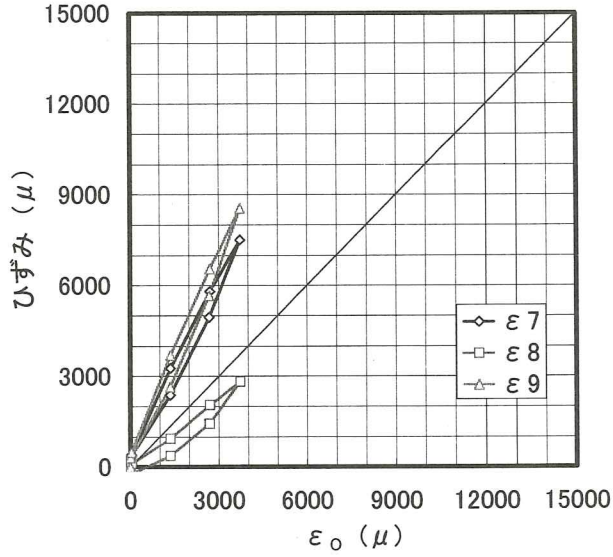


図-6.1.12　表面疵近傍のひずみ（FDE-6）

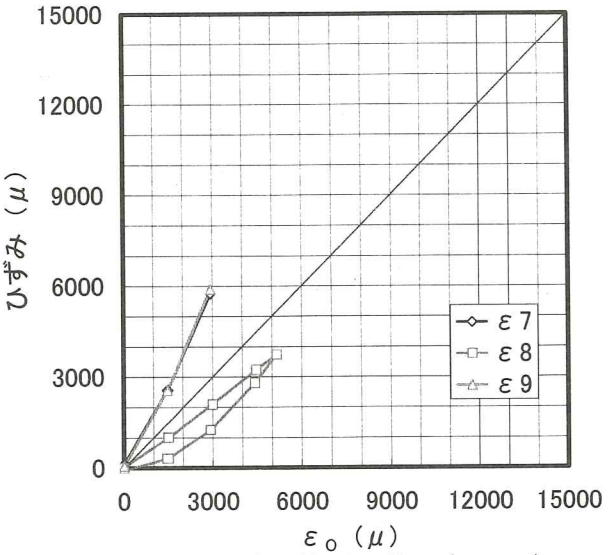


図-6.1.13　表面疵近傍のひずみ（FDE-7）

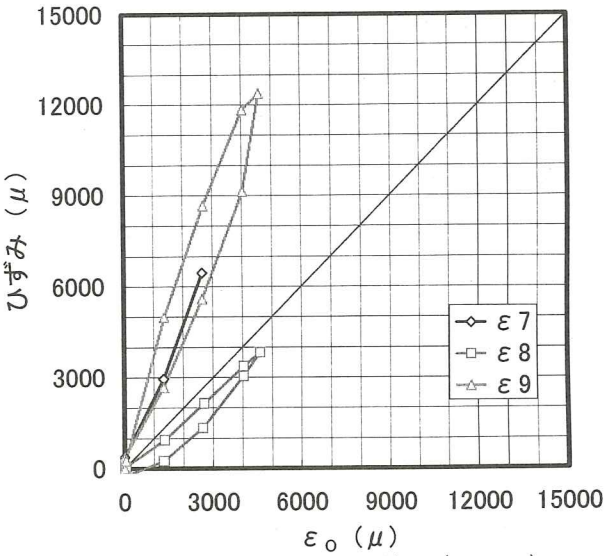


図-6.1.14　表面疵近傍のひずみ（FDE-8）

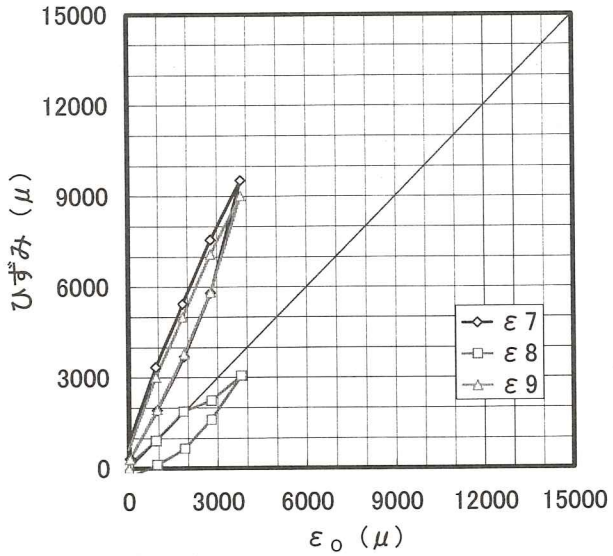


図-6.1.15　表面疵近傍のひずみ（FDE-9）

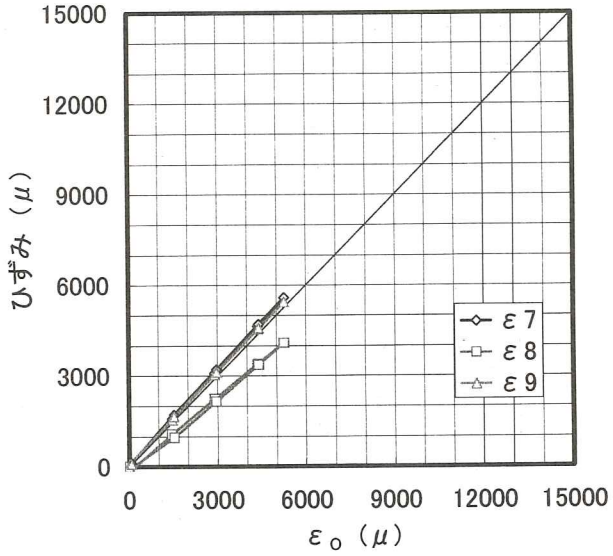


図-6.1.16　表面疵近傍のひずみ（FW3-1）

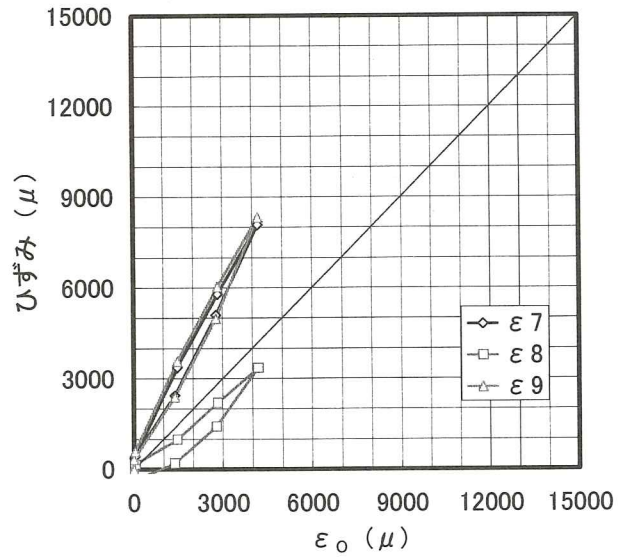


図-6.1.17　表面疵近傍のひずみ（FWE-1）

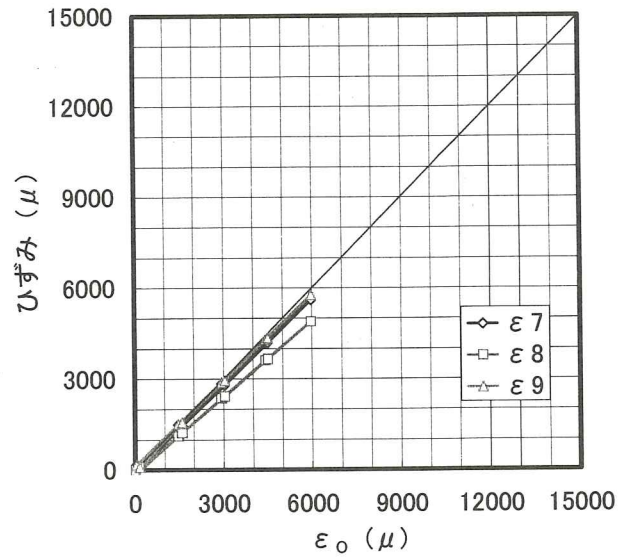


図-6.1.18　表面疵近傍のひずみ（FD1-1）

6.2 疲労試験時の弾性係数

表-6.2.1 に，疲労試験前静的載荷で得られた弾性係数を示す。ここでは，上限荷重までの全データを用いた平均値と最小値の両方を示す。疲労試験用試験片は疲労試験前に静的載荷を行っているが，そのときの静的載荷の上限荷重は疲労試験の上限荷重までとした。図-6.2.1 に弾性係数と上限ひずみの関係を示す。上限荷重時のひずみが大きいほど，弾性係数が小さくなる傾向が見られた。前述のとおり，今回の試験片の弾性係数は作用しているひずみ(応力度)に応じて徐々に変化することから，疲労試験時の弾性係数は，上限ひずみの影響を受ける可能性がある。

表-6.2.1 疲労試験用試験片の弾性係数

試験片名	総断面積 A_g (mm^2)	静的載荷時最大応力度 $\sigma_{g,max}$ (MPa)	静的載荷時最大ひずみ ε_{max} (μ)	弾性係数 E_{avg} (GPa)	弾性係数 E_{min} (GPa)	疲労試験時平均室温 (℃)	疲労試験時平均相対湿度 (%R.H.)
FDN-1	591.76	196.7	5494	35.8	32.4	20	34
FDN-2	623.18	188.5	5035	38.3	36.7	15	48
FDP-1	306.64	195.7	5895	31.9	29.1	20	54
FDP-2	306.56	147.1	4178	35.5	35.1	23	48
FDP-3	293.98	181.8	5093	35.9	35.0	21	68
FDP-4	309.93	162.3	4628	35.3	34.8	26	66
FDP-5	314.93	156.3	4333	36.2	35.0	27	64
FD3-1(10%)	612.56	49.3	1446	35.2	34.5	24	46
FD3-1(30%)	612.56	144.6	4279	33.4	32.4	24	52
FD3-2	605.26	172.4	5388	31.8	30.3	25	57
FD3-3	602.27	147.5	4768	31.1	30.2	19	61
FD3-4	606.43	196.8	5634	35.0	34.0	22	58
FD3-5	620.17	137.6	3995	34.8	34.6	28	63
FDE-1	611.49	196.8	5832	33.9	32.8	26	65
FDE-2	611.49	162.1	4740	34.1	33.1	25	58
FDE-3	602.35	147.5	4537	32.6	31.6	25	66
FDE-4	613.38	122.9	3659	33.6	32.7	24	56
FDE-5	614.25	137.5	4140	33.3	32.3	28	54
FDE-6	609.62	132.7	3730	35.6	34.6	25	58
FDE-7	595.23	172.3	5152	33.5	33.4	26	60
FDE-8	619.39	162.6	4594	35.5	35.4	28	56
FDE-9	586.30	138.5	3803	36.8	36.5	27	58
FW3-1	615.94	172.1	5262	32.9	32.2	21	54
FWE-1	596.77	147.6	4200	35.2	34.3	20	62
FD1-1	602.95	196.3	5980	33.1	32.1	25	57

注 1) 弾性係数 E_{avg}：静的載荷時(荷重上昇時)の平均弾性係数
2) 弾性係数 E_{min}：静的載荷時(荷重上昇時)の最小弾性係数(概ね応力度が高いほど小さい傾向にある)
3) 室温，相対湿度(1 日 1 回計測)は疲労試験期間中の平均値

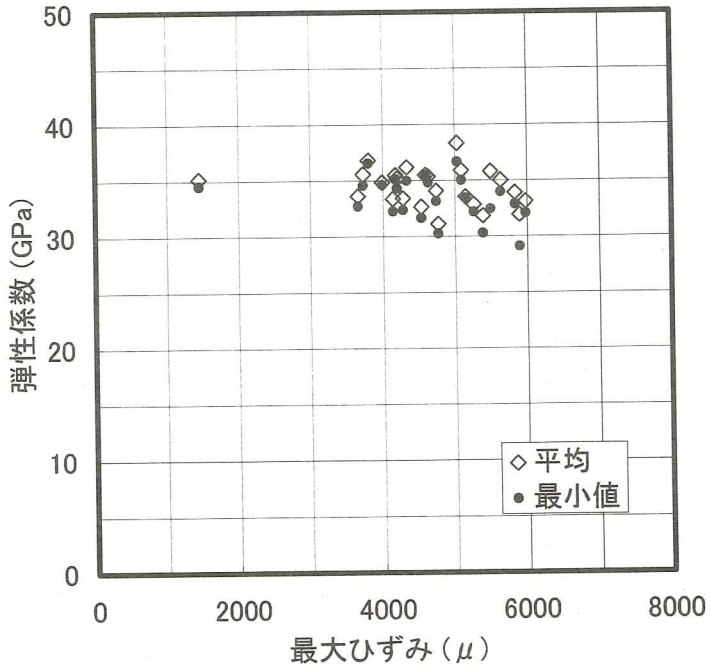


図-6.2.1　疲労試験における弾性係数

(注) 最大ひずみは静的載荷時の最大荷重(概ね疲労試験の上限荷重)時のひずみ

6.3　破壊状況

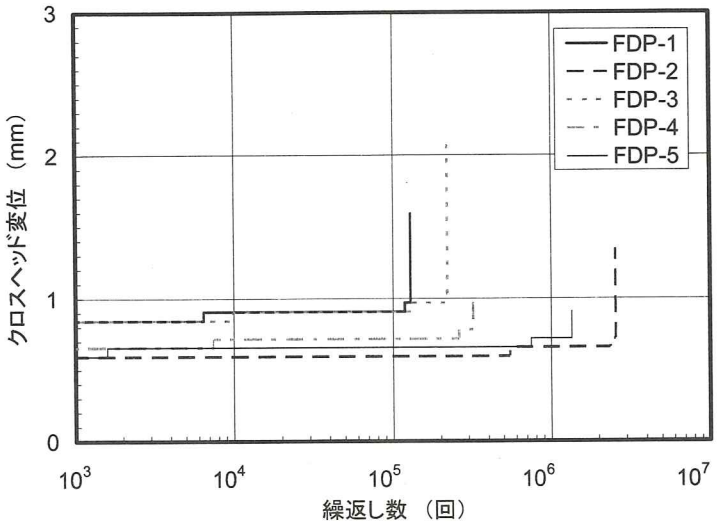
(1)　表面疵のある試験片の破壊状況

図-6.3.1 に，クロスヘッド変位(振幅)の測定結果を示す。クロスヘッドの変位の振幅は，応力頻度測定器の結果(各スライスの中央値)から読み取ったものである。試験開始時のクロスヘッド間距離は，FD3，FDE の場合に 200 mm，FDP の場合に 150 mm であった。これらの結果より，いずれの試験片も繰返し載荷回数が増加するにつれて，変位が徐々に増加していたことがわかる。また，概ね初期の変位振幅が大きいほど短期間で破断に至ることが確認できる。

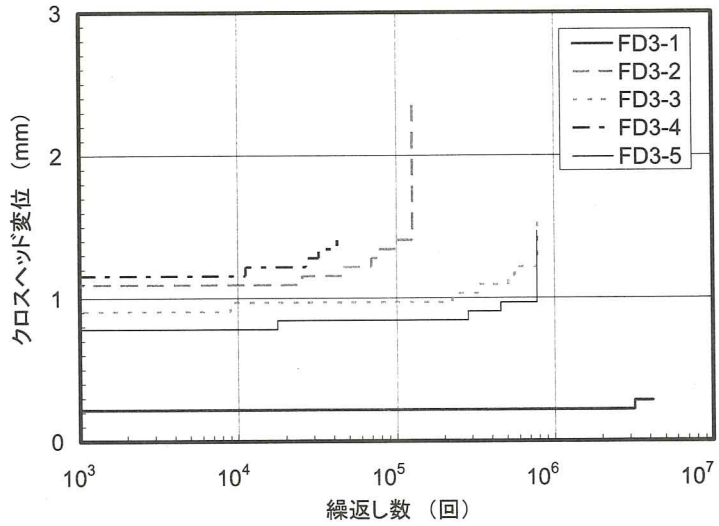
図-6.3.2 に，応力集中部のひび割れ状況の例を示す。3*mm の表面疵近傍では，押込み荷重により疵周囲の表層がつぶれているため，初期のひび割れが判別し難かったが(図-6.3.2a)，損傷は徐々に進行して表層のひび割れが明確に現れた。外観で見る限り，ひび割れは断面欠損の最も大きいところから斜め方向に伸展した(図-6.3.2b)。エンドミルによる表面疵の場合も，ごく初期の段階で断面欠損の最も大きい表面疵の端部からひび割れが見られ(図-6.3.2c)，その後斜め方向のひび割れが進行した(図-6.3.2d)。FDE では，表面疵の中にマトリックスが粉砕されたものと思われる白い粉が溜まっていた(図-6.3.2e)。表面疵のない試験片 FDP はチャック付近の R 部で表層にひび割れが見られた(図-6.3.2f)。

図-6.3.3 に，疲労試験中に見られた層間剥離の例を示す。FD3-2，FDP-1 ともにクロス層とロービング層の間で剥離が見られた。

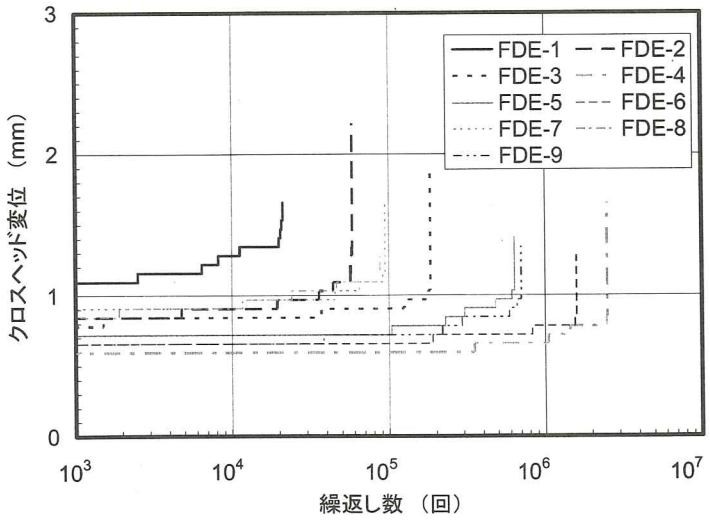
図-6.3.4 に，表面疵のある FD3，FDE の試験片の破断状況を示す。表層は表面疵付近で破断しているが，ロービング層は，表面疵周辺の押込み荷重による損傷が生じていたと考えられる範囲(深さ)に鋭利な破断面が見られた。しかし，ロービング層は断面欠損部で全面的に破壊することはなく，ロービング間のすべりを伴ってチャックつかみ部で破断している部分と，それらの破壊によって生じた断面欠損によって部分的な静的破壊(ほうき状の破壊)が生じた部分が見られた。表層の破壊はクロス層とロービング層の間ですべりが生じる場合と，マット層とクロス層の間ですべりが生じる場合があった。



(a) 疵なし (FDP シリーズ)

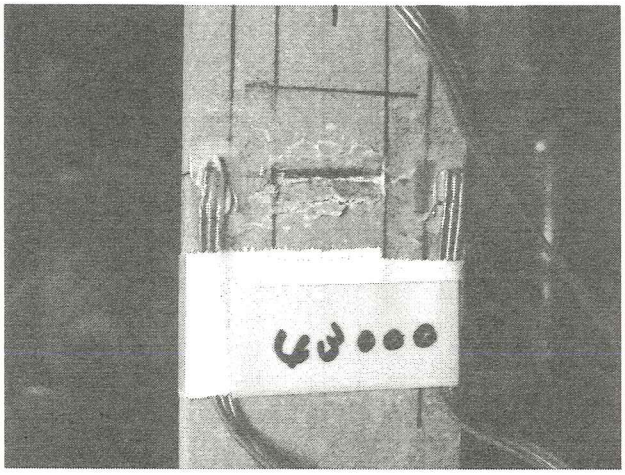


(b) 表面疵 3*mm (FD3 シリーズ)



(c) エンドミル (FDE シリーズ)

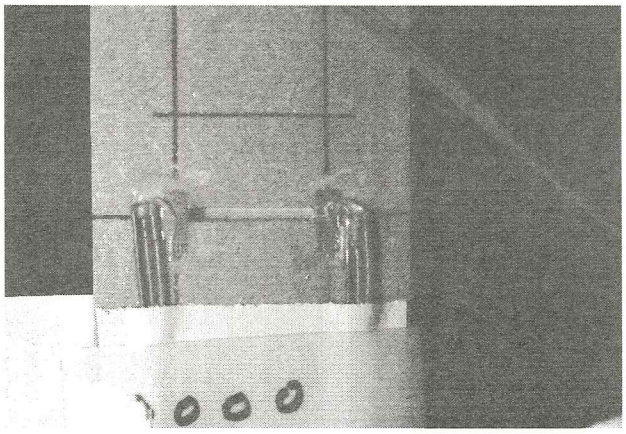
図-6.3.1　クロスヘッド変位(振幅)の経時変化



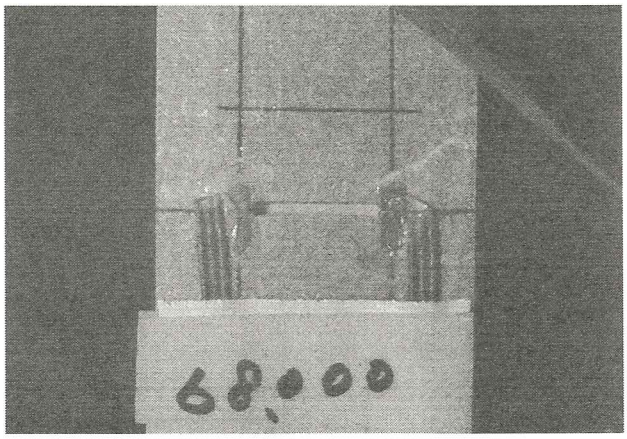
(a) 3*mm の表面疵近傍 (FD3-1)



(b) 3*mm の表面疵近傍 (FD3-1)



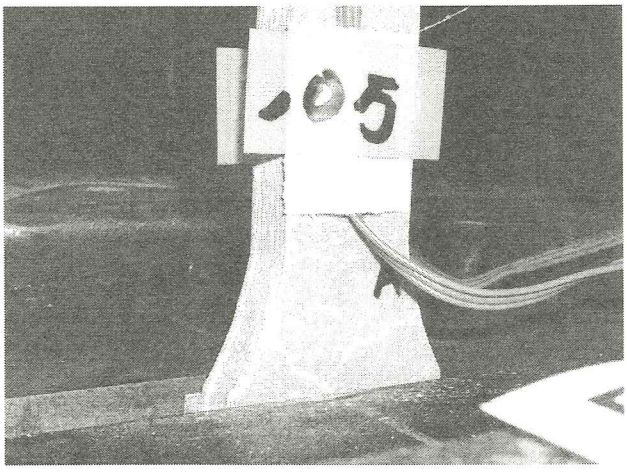
(c) エンドミルの表面疵近傍 (FDE-3)



(d) エンドミルの表面疵近傍 (FDE-3)

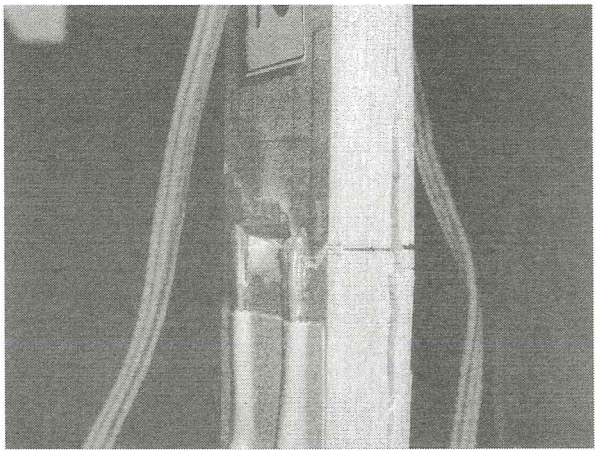


(e) エンドミルの表面疵近傍 (FDE-4)

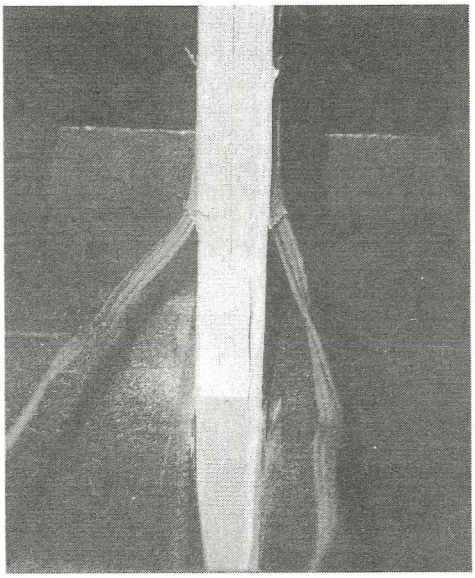


(f) FDP の R 部 (FDP-1)

図-6.3.2 応力集中部のひび割れ

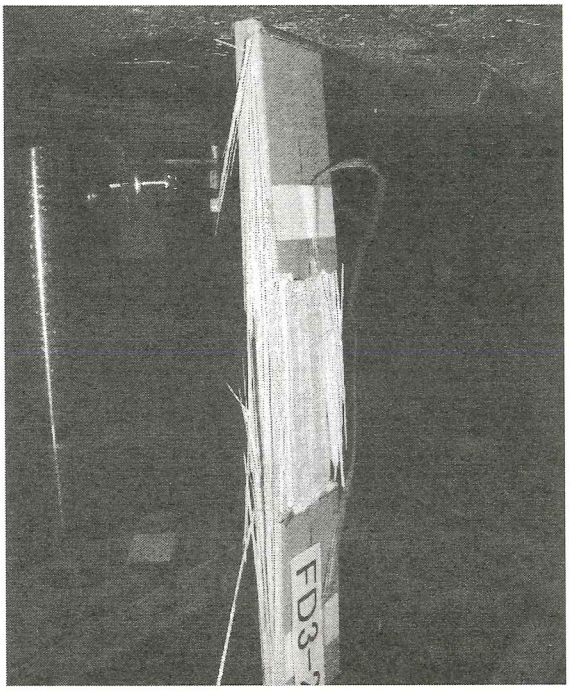


(a) FD3-2

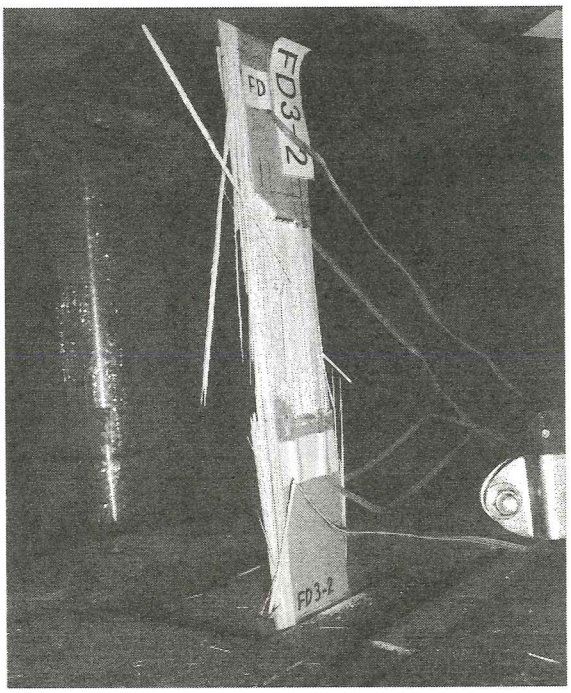


(b) FDP-1

図-6.3.3 層間剥離の事例



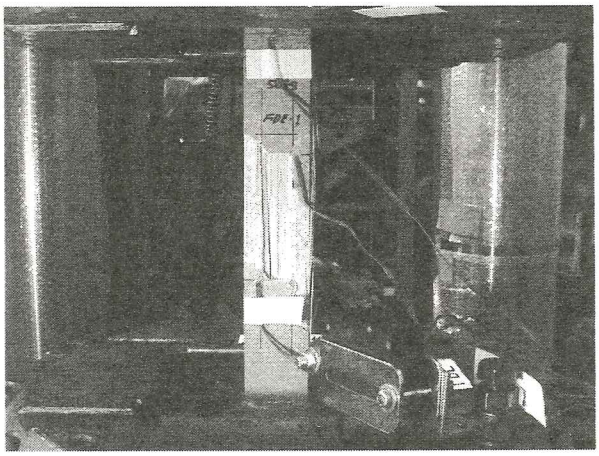
(a) FD3-2



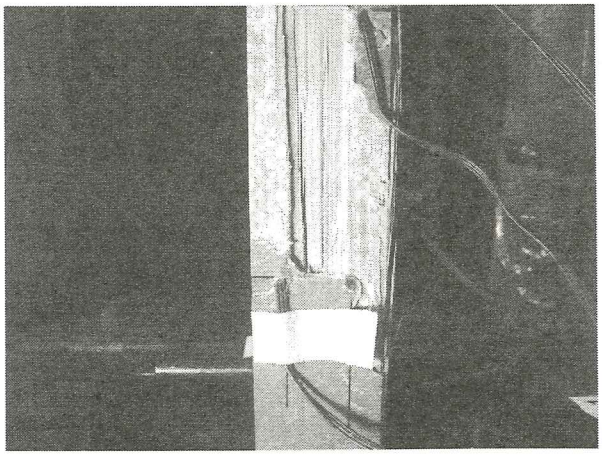
(b) FDE-1



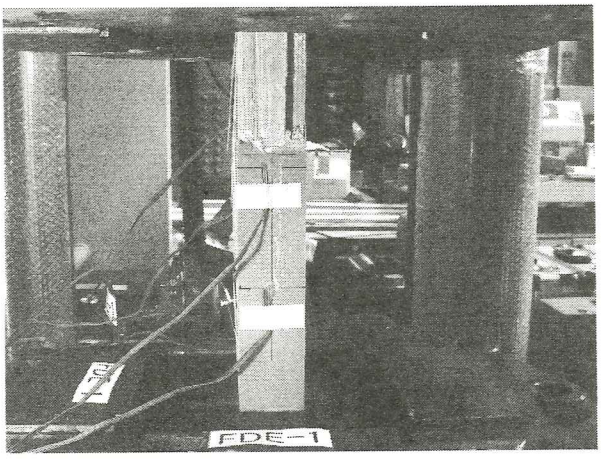
(c) FD3-2



(d) FDE-1



(e) FDE-1



(f) FDE-1

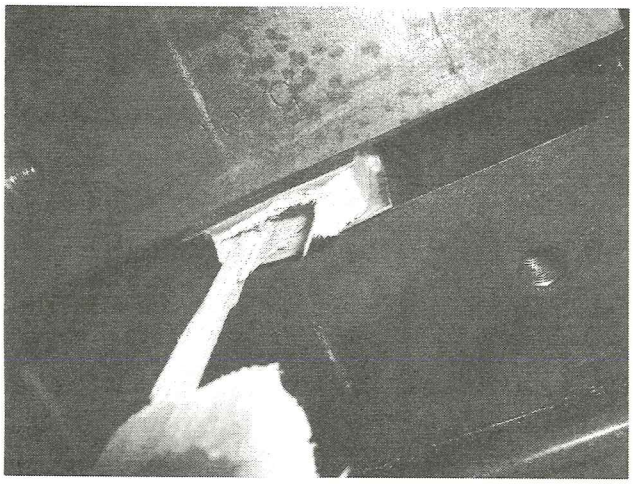
図-6.3.4 破断（疲労破断，層間すべり，ローピング間すべり，静的破断の複合）

(2) 表面疵のない試験片の破壊状況

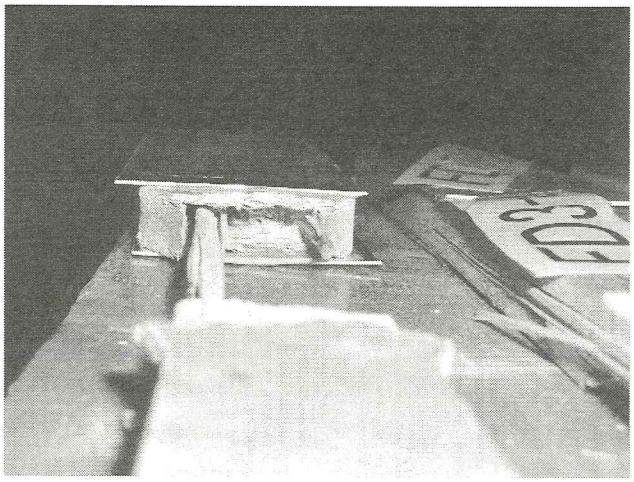
図-6.3.5～6 に表面疵のない，フライス加工した FDP シリーズの破断状況を示す。前掲図-6.3.2f，6.3.3b に示したように FDP は応力集中による高いひずみが生じていたと考えられる R 部近傍で表層のひび割れや層間剥離が見られたが，終局破壊はロービング層のチャックつかみ部での脆性的な破壊であった。FDP-1，FDP-2 の場合は，一部ロービングの抜け出しも伴っていた。

図-6.3.7 に，FD3 や FDE と外形寸法が同じもので疵なしの試験片 FDN-1，FDN-2(試しに実施したもの)の破壊状況を示す。両試験片ともアルミタブを介してチャックで掴んでいたが，比較的早期にチャックつかみ部で脆性的な破壊が生じた。同様の外形寸法で表面疵 1*mm の試験片 FD1-1(試しに実施したもの)でも破壊形態は同様であった。図-6.3.8 に，FDN-1，FDN-2 及び FD1-1 のクロスヘッド変位の経時変化を示す。比較のため，FDP シリーズの結果も示す。FDP では破断までにクロスヘッド変位が徐々に増加したが，FDN-1，FDN-2 及び FD1-1 はそのような変位の増加なしに突然破断した。また，FDP では，初期のクロスヘッド変位(すなわち荷重振幅)が大きいほど破断までの繰返し数が少ない傾向が見られたが，表面疵のない FDN-1 が，初期変位振幅が小さいにもかかわらず，表面疵のある FD1-1 よりも少ない繰返し数で破断した。FDP シリーズでも終局破壊はチャック部の破壊であったが，フライス加工により，試験片形状を工夫したことで，疲労強度は FDN よりも改善されたことがわかる。

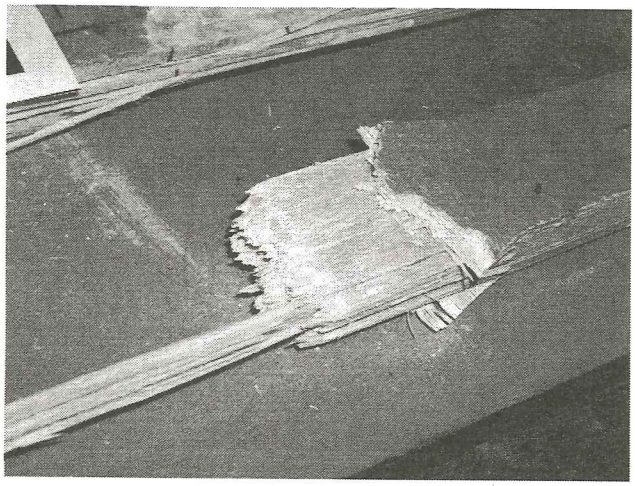
損傷のない無垢材の疲労試験では，フライス加工によってチャック部での破壊を回避する必要があるが，FRP の場合は，普通鋼材に比べて，チャックのつかみ方が試験結果により影響し易いものと考えられる。今回用いた試験機は，チャックのつかみ強さが特に強かったこと(チャックの油圧を低減させたが十分でなかった)がチャック部の破壊の一因であると考えられ，材料に適したチャックを用意する必要がある。



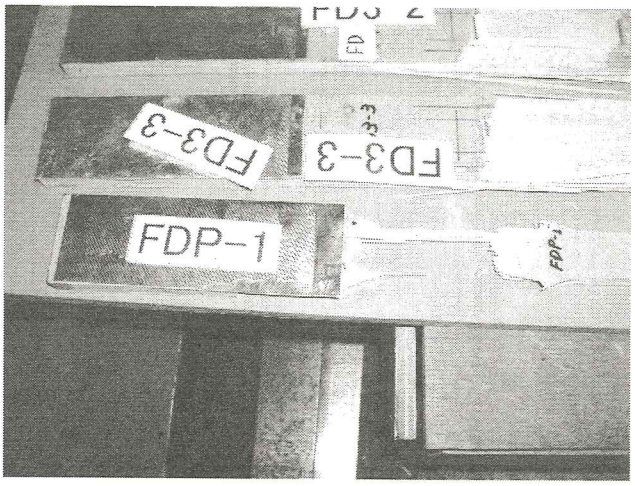
(a)　上チャックつかみ部の状況



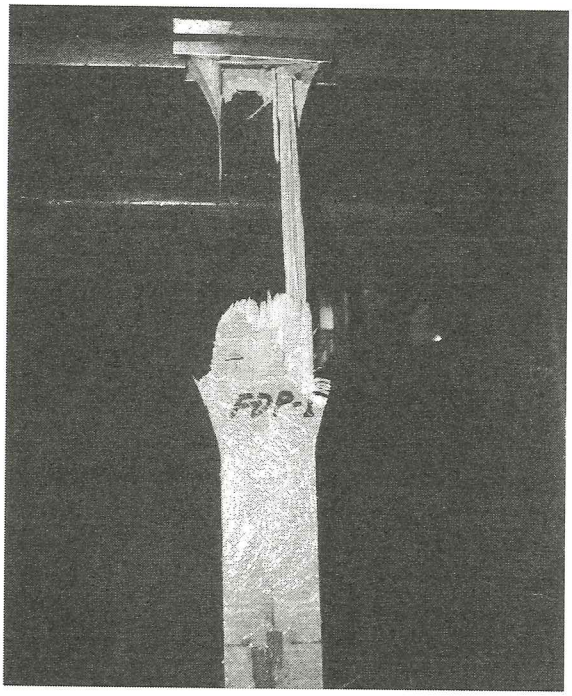
(b)　上側破断面



(c)　下側破断面

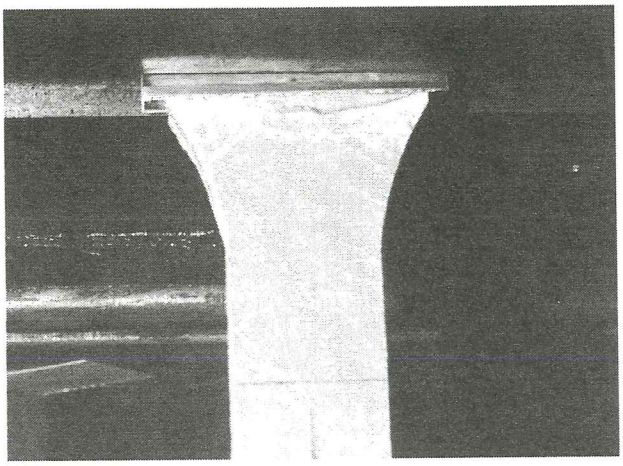


(d)　破断位置突合せ状況

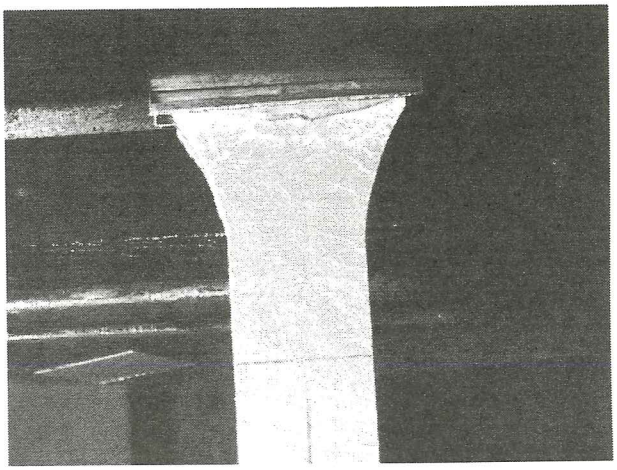


(e) 破断時

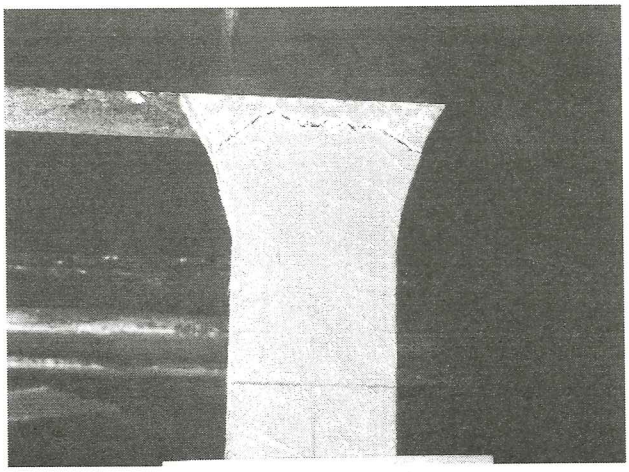
図-6.3.5　FDP シリーズの破断状況（FDP-1 の例）



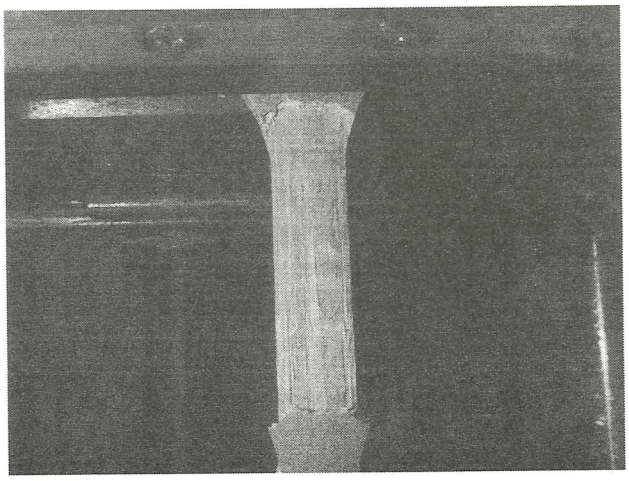
(a)　FDP-2, 繰返し数 142000 回



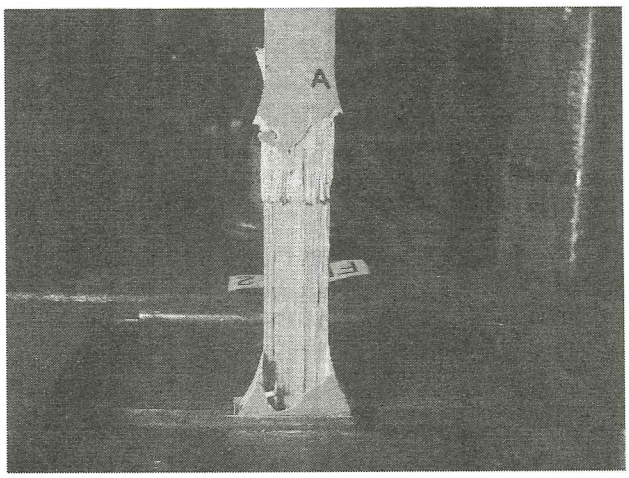
(b)　FDP-2, 繰返し数 156000 回



(c)　FDP-2, 繰返し数 2550000 回

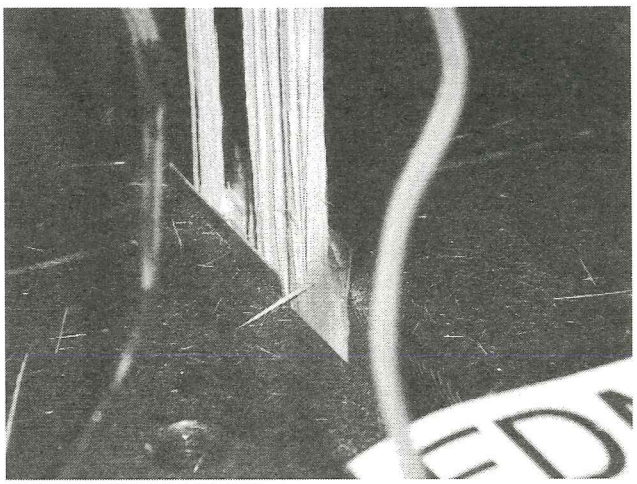


(d)　FDP-2, 破断時, 繰返し数 2556160 回

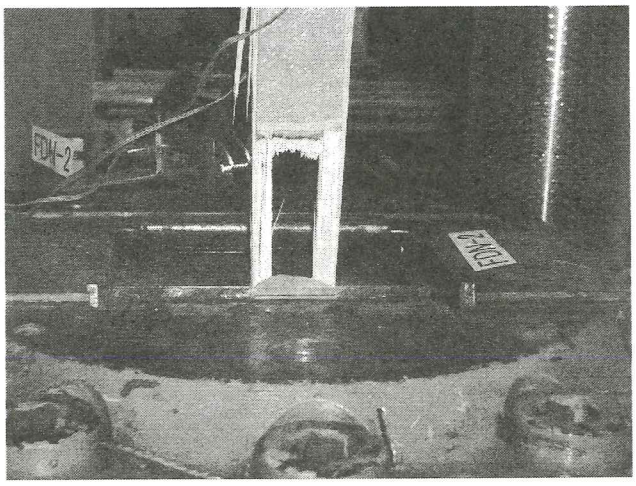


(e)　FDP-2, 破断時, 繰返し数 2556160 回

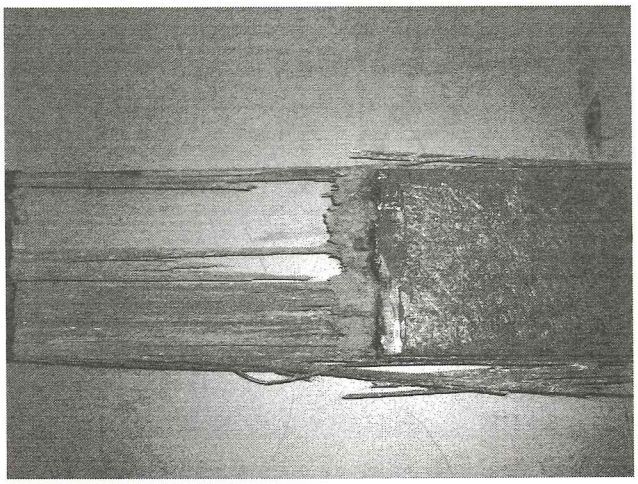
図-6.3.6　FDP シリーズの破断状況（FDP-2 の例）



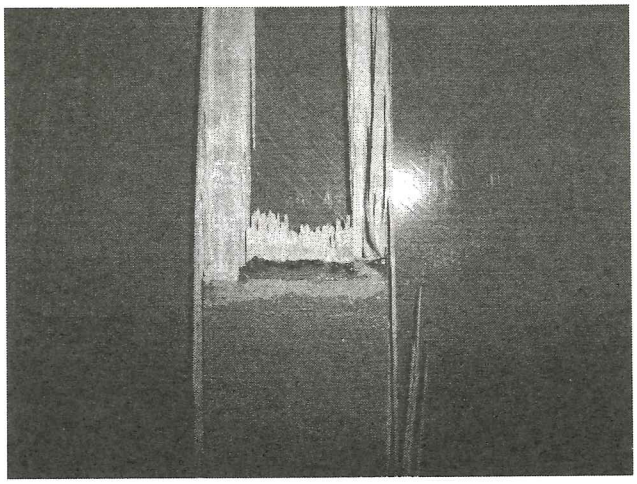
(a)　FDN-1 の破断とつかみ状況



(b)　FDN-2 の破断とつかみ状況



(c)　FDN-1 の破断面



(d)　FDN-2 の破断状況

図-6.3.7　FDN のチャック部の破断

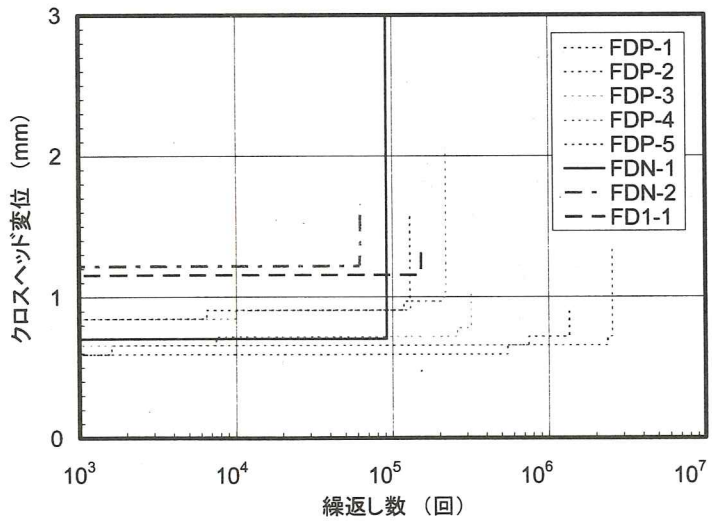


図-6.3.8　チャック部で破断した場合のクロスヘッド変位の経時変化

6.4　S-N 線

(1)　応力範囲と繰返し数

表-6.4.1 に疲労試験結果の一覧を示す。また，図-6.4.1 に応力比と破断までの繰返し数の関係を示す。縦軸は，各試験片の上限荷重 P_1 を健全部の断面積 A_g で除した応力度を欠陥のない健全な試験片の引張強さ σ_B (495 MPa)で除した応力比 SR_g である。応力比 SR_g で比較した場合，表面疵 3*mm の試験片 FD3 の疲労強度は疵のない FDP よりも明らかに低くなっており，応力比で 0.05 程度低下していた。エンドミルによる表面疵の試験片 SDE の静的破断強度は表面疵 3*mm の SD3 の結果と同程度かむしろ低くなるものが見られたが，エンドミルによる表面疵の試験片 FDE の疲労強度は表面疵 3*mm の FD3 よりも明らかに低かった。

FDP の 10^7 回疲労強度を外挿すると応力比で概ね 0.25 であった。既往の研究でも，健全な引抜成形 GFRP 材の 10^7 回疲労強度は応力比 0.14～0.25 程度[6.1]であることから，FDP は，最後にチャック部で破断したが，その疲労試験結果は既往の結果と同程度であり，概ね妥当なものであったと考えられる。

FD3-1 は 400 万回を越えても破断の兆候が見られなかったので，荷重範囲を高くして再度疲労試験を行った(FD3-1R)。その結果，同じ応力レベルで試験した FD3-3 よりは少ない繰返し数で破断したが，図-6.4.1 の S-N 線上で見る限りは，SD3 シリーズの回帰式から大きく乖離するほど明確な差は見られなかった(7 章で考察を加える)。

(2)　ひずみ範囲と繰返し数

図-6.4.2 に静的載荷試験時に健全部で測定したひずみ測定結果 ε_0 に基づき算定したひずみ範囲と破断までの繰返し数の関係を示す。この場合，FD3，FDE の試験結果は図-6.4.1 の応力比 SR_g で整理した結果と概ね同様で，FDP＞FD3＞FDE の順に疲労強度が高い傾向が見られた。

表-6.4.1　疲労試験結果一覧

試験片	総断面積 A_g (mm^2)	純断面積 A_n (mm^2)	上限荷重 P_1 (kN)	下限荷重 P_2 (kN)	応力度 $\sigma_g = P_1/A_g$ (MPa)	応力度 $\sigma_n = P_1/A_n$ (MPa)	応力比 SR_g σ_g/σ_B	応力比 SR_n σ_n/σ_B	ひずみ範囲 (μ)	繰返し数 (回)	
										破断時	目視による亀裂確認
FDP-1	307	—	60.3	6.0	197	—	0.40	—	4865	129760	15000
FDP-2	307	—	45.2	4.5	148	—	0.30	—	3649	2556160	15000
FDP-3	294	—	53.5	5.4	182	—	0.37	—	4500	220490	—
FDP-4	310	—	50.3	5.0	162	—	0.33	—	4013	321700	—
FDP-5	315	—	49.6	5.0	157	—	0.32	—	3892	1356180	270000
FD3-1	613	564	30.1	3.0	49.2	53.4	0.10	0.11	1216	(4188320)	—
FD3-1 R	613	564	90.4	9.0	148	160	0.30	0.32	3648	493500	43000
FD3-2	605	557	104.2	10.4	172	187	0.35	0.38	4256	126800	45000
FD3-3	602	554	88.8	8.9	148	160	0.30	0.32	3649	784310	400000
FD3-4	606	552	119.3	11.9	197	216	0.40	0.44	4865	43320	12000
FD3-5	620	573	85.4	8.5	138	149	0.28	0.30	3405	780300	273000
FDE-1	611	517	120.3	12.0	197	233	0.40	0.47	4865	22070	1500
FDE-2	611	511	99.2	9.9	162	194	0.33	0.39	4013	59410	12000
FDE-3	602	502	88.9	8.9	148	177	0.30	0.36	3649	185140	1500
FDE-4	613	524	75.4	7.5	123	144	0.25	0.29	3040	2498170	11000
FDE-5	614	519	84.6	8.5	138	163	0.28	0.33	3405	640160	29000
FDE-6	610	512	80.9	8.1	133	158	0.27	0.32	3283	1591910	14500
FDE-7	595	495	102.4	10.2	172	207	0.35	0.42	4256	95990	3000
FDE-8	619	519	100.5	10.1	162	194	0.33	0.39	4013	88490	14600
FDE-9	586	488	80.7	8.1	138	166	0.28	0.33	3405	706130	278850
FW3-1	616	567	106.0	10.6	172	187	0.35	0.38	4256	325010	79000
FWE-1	597	497	88.0	8.8	148	177	0.30	0.36	3649	351890	1500

注）σ_B = 495 MPa

（ ）は破断なしで中断した際の繰返し数を示す。

ひずみ範囲 = 上限荷重時ひずみ − 下限荷重時ひずみ　（疲労試験前静的載荷試験結果より算出した値）

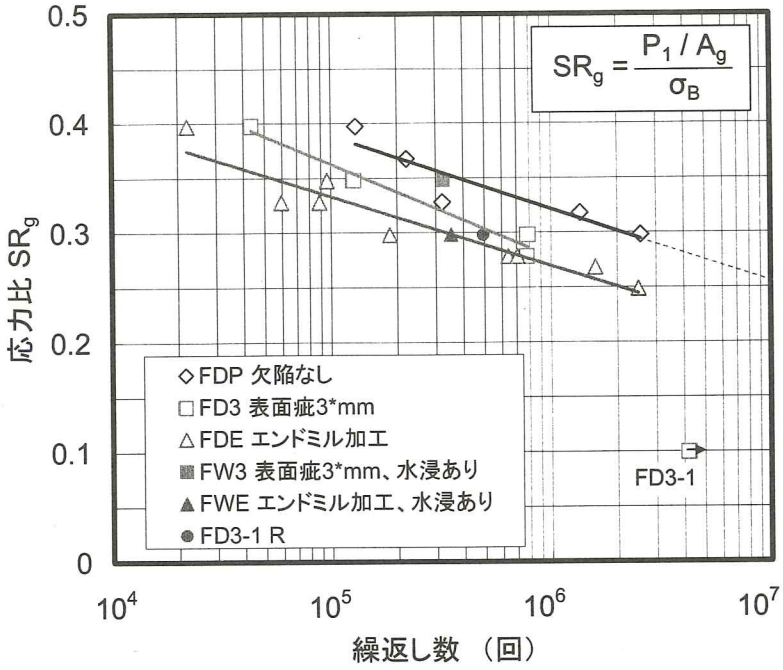


図-6.4.1　応力比 SR_g と破断までの繰返し数の関係

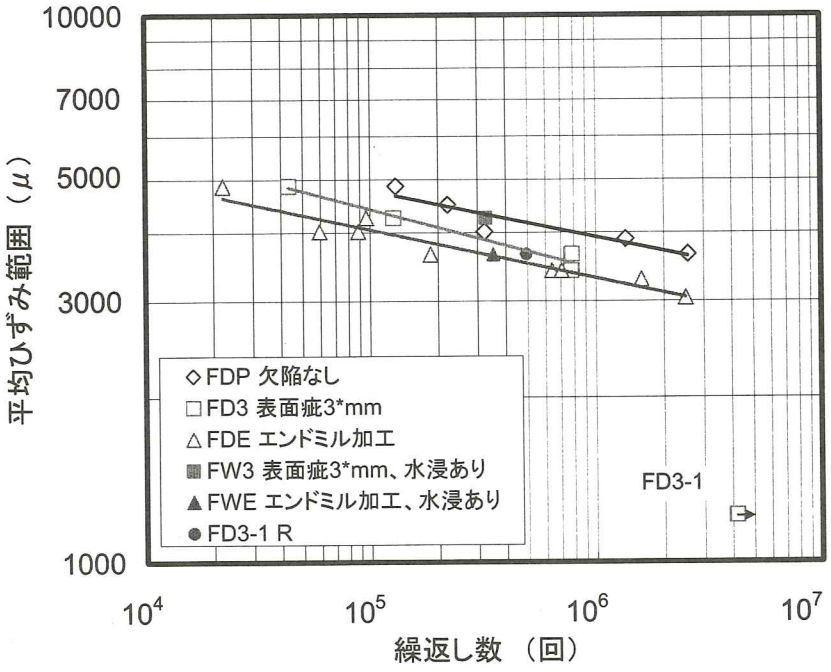


図-6.4.2　静的載荷試験時に健全部で測定したひずみ測定結果に基づき
算定したひずみ範囲と破断までの繰返し載荷回数の関係

7．考察

7.1　GFRP 厚板の応力集中

図-7.1.1 に円孔(貫通孔)を有する試験片 SDH-3 の円孔周辺，最小断面における軸方向ひずみ分布を示す。図中，Howland の厳密解 [7.1]に基づく計算値も示す。B 側(AB 側，CB 側)のひずみは計算値と同等かやや低く，D 側(AD 側，CD 側)のひずみは計算値と同等かやや高い傾向が見られ，左右の偏心が見られるが，ひずみ分布の計測結果は計算値と概ね同程度であったことがわかる。約 100 kN 時に達すると D 側のひずみ分布形状の変化やデータ欠損が認められた。応力集中の大きい円孔周辺で先行してマトリックスの微細なひび割れなどの変状が徐々に生じ始めたものと考えられる。荷重が約 90kN を超えたあたりから一般部のひずみに変化が現れたのは(図-7.1.2)，円孔周辺のこれらの変化と連動していたものと考えられる。

表-7.1.1 に貫通孔のある試験片の軸方向最大値が生じるところの応力集中率 α (計算値)を示す。長孔の応力集中率は西田の近似式である次式 [7.1]によった。この式において b / ρ =1 とすると，円孔の近似式(式(1)の下線部)となる。

$$\alpha = \{\underline{2+(1-b/B)^3}\}[1+(2/3)\{1-(b/B)^{1.6}\}\{(b/\rho)^{0.5}-1\}] \qquad (1)$$

ここに，2 B: 板幅

2 b: 欠損幅(長孔の軸直角方向長さ)

ρ : 長孔端部の半径

図-7.1.3 に，SDH シリーズの引張破断荷重 P_u(実験値)を応力集中率(計算値)との関係で示す。図中，貫通孔のない試験片の破断荷重の平均値 P_{uB} と，SDH の断面欠損を考慮した破断荷重の計算値 $P_{cal1} = P_{uB}(A_n / A_g)$ を示す。円孔を有する GFRP の破断荷重は計算値 P_{cal1} よりも低かった。山田らは，円孔を有する GFRP の静的引張試験(試験片板厚 3～4 mm)においてこれと同様の結果が得られ，破断荷重の低下の程度が円孔の直径と相関が見られたことから，円孔の直径を実際よりも大きく見積もる推定法を提案し，修正係数(仮想の円孔直径／実際の円孔直径)を 1.3 とすることで実験結果とよく一致するとした [7.2]。図-7.1.3 に，今回の結果に関して，円孔の修正係数 1.3 を考慮した破断荷重の計算値 $P_{cal2} = P_{uB}(1-1.3\,b/B)$ を点線で示す。円孔の場合の破断荷重は，実験値で 142kN であったの対して計算値 P_{cal2} は 143 kN であり，SP250 の場合も修正係数 1.3 がよく一致することがわかった。また，長孔の場合も，概ね一致する傾向が見られた。

普通軟鋼の場合，降伏後のひずみ硬化とともに応力が断面内で分散されるため，降伏前の応力集中の程度に差があっても純断面での静的破断強度 P_u / A_n はほとんど影響を受けない傾向にある [7.1]。伸び性能の高い PC 鋼材の場合，降伏前の応力集中に差があっても P_u / A_n はほとんど変わらなかった [7.3]。しかし，SP250 の場合は，3 本の結果ではあるが，貫通孔の存在により P_u / A_n の低下が見られた。

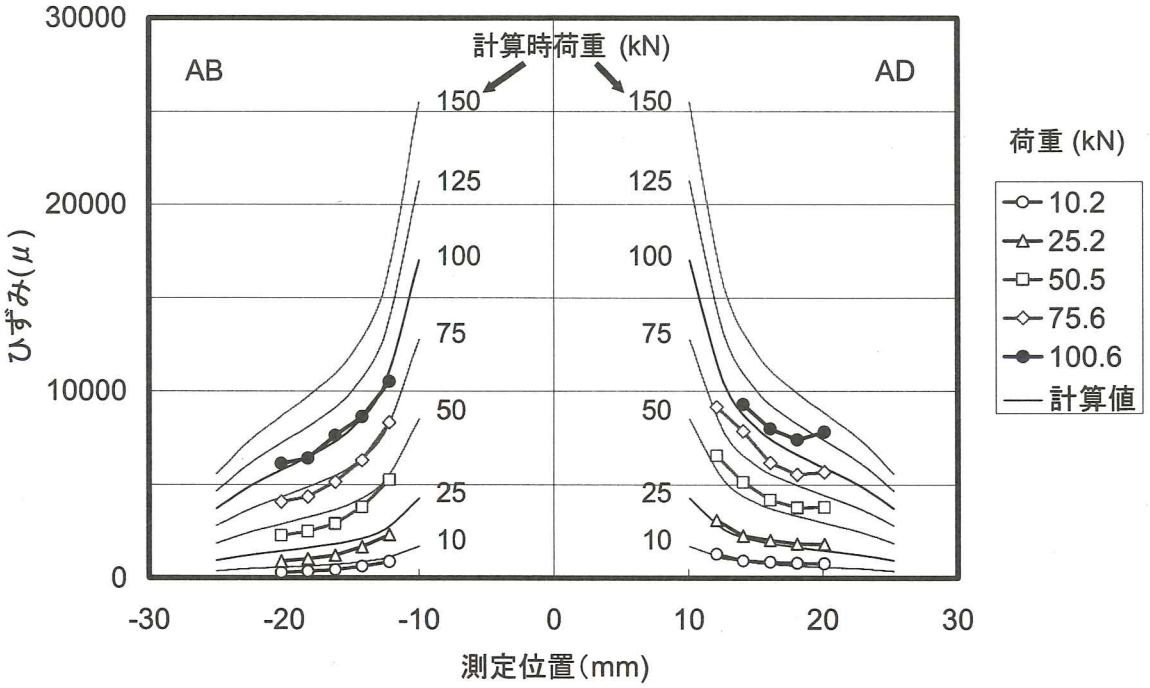
SDH シリーズの 3 本の試験片は，断面欠損の程度が概ね同じであるが，貫通孔の形状の影響を受けて，

応力集中率αは円孔の場合(SDH-3)に 2.2 と最も小さく，長孔の b / ρ が相対的に大きい SDH-1 が 6.2 と最も大きい。しかし，貫通孔のある試験片 3 本の破断荷重は，顕著な差が見られず，応力集中率の大きい長孔の方がむしろ破断荷重が P_{cal2} よりやや高い傾向(断面欠損面積のわずかな違いによるもの)が見られた。増田らの実験結果では，楕円貫通孔を有する GFRP において，貫通孔の幅 2b が一定で貫通孔の軸方向長さ 2a を変化させた場合に，a/b が大きいほど(応力集中率αが小さいほど)破断荷重が高い傾向が見られたとしており [7.4]，今回の実験結果は増田らの結果と異なった。

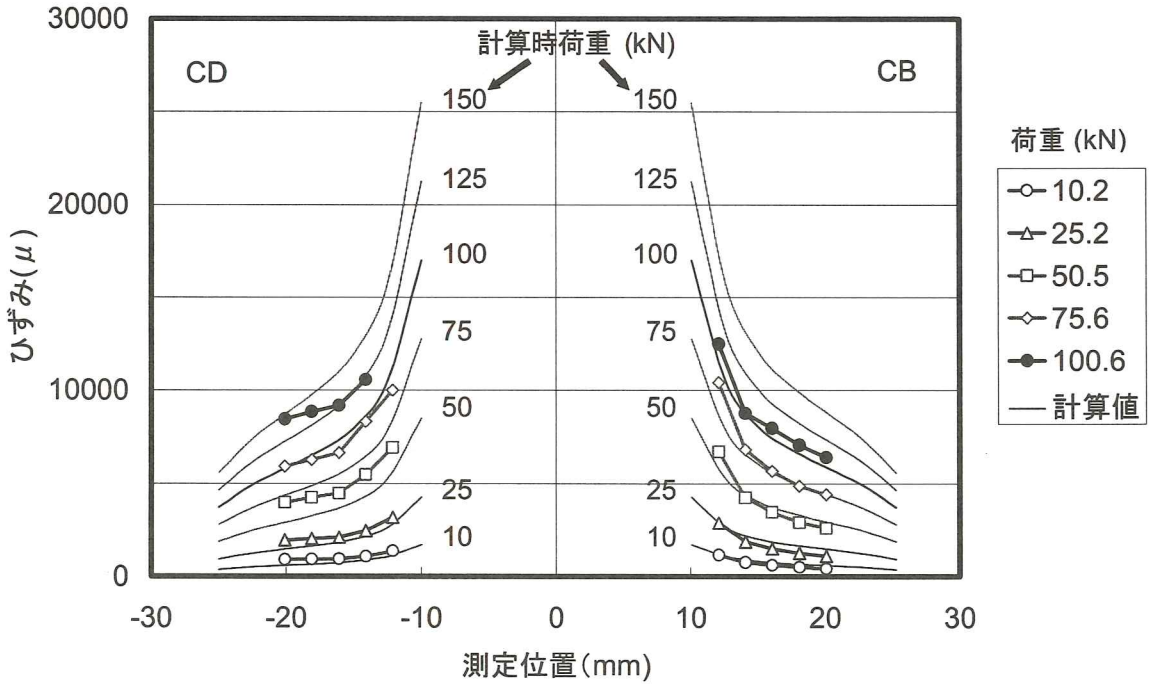
図-7.1.4 に円孔を有する試験片 SDH-3 のひずみゲージによる測定から得られた円孔近傍応力度(円孔から約 2 mm，軸方向応力)と断面欠損部の平均応力度(計算値)の関係を示す。図中，表-7.1.1 に示した最大縁応力度が生じる箇所の応力集中率α= 2.2 とした場合の計算値及びひずみゲージ測定位置である円孔から 2 mm の位置における応力集中率 1.6 (数表 [7.1]から直線補間した値)の場合の計算値を示す。実測応力度は左右表裏でばらつきはあるが，平均的にはα = 1.6 としたときの計算値と概ね一致した。

同様に，図-7.1.5 に長孔を有する試験片 SDH-1，SDH-2 の貫通孔近傍応力度と平均応力度(計算値)の関係を示す。図中，表-7.1.1 に示した最大縁応力度が生じる箇所の応力集中率αをそれぞれ 6.2，4.7 とした場合の計算値を示す。円孔の場合，低い応力の段階から応力集中が見られたが，SDH-1 は P/A_n が 100 MPa 程度までの低い応力の段階ではほとんど応力集中が見られず，100 MPa を超えてから応力集中の程度が徐々に増加した。SDH-2 の場合も概ね同様ではあるが，SDH-1 に比べると初期より若干の応力集中が認められ，応力集中の増加は P/A_n が約 80 MPa を超えてから見られた。一般に，長孔の応力集中は円孔の場合に比べて貫通孔近傍で急激に増加する傾向があり，b / ρ が大きい場合にその傾向は顕著である [7.1]。このことは，今回の結果(図-5.6.8～10)でも認められた。SDH-1 では，P/A_n が 100 MPa までは長孔から 2 mm の位置での応力集中率は平均応力度と大差なく，100 MPa を超えた後は長孔からひずみゲージ位置までのマトリックス内部に微細なひび割れ等の応力分布に影響するような変状が生じていたものと考えられる。なお，SDH-1 の P/A_n が 100 MPa 時の長孔縁での計算ひずみ値(応力集中率に基づき計算した値)，SDH-2 の P/A_n が 80 MPa 時の長孔縁での計算ひずみ値はいずれも約 16000 μ に達していた。

破断強度はもろい材料ほど応力集中の影響を受け易い [7.1]。SP250 の場合は，図-7.1.1 に示すように，一部に応力集中による損傷が見られた後に鋼材の応力再分配に類似した効果が見られたが，破断荷重は応力集中の影響を受けて，P_{cal1} よりも低い荷重で破断した。SP250 は，応力再分配の傾向を示すことから樹脂単体のようなもろい材料ではないが，鋼材ほど靭性のあるものでもないことがわかる。



(a) A 面



(b) C 面

全断面積 A = 599 mm²

純断面積 An = 359 mm²

弾性係数 E = 36.7 GPa

図-7.1.1　円孔試験片 SDH-3 の円孔周辺のひずみ分布

(最小断面における軸方向ひずみの計算値との比較)

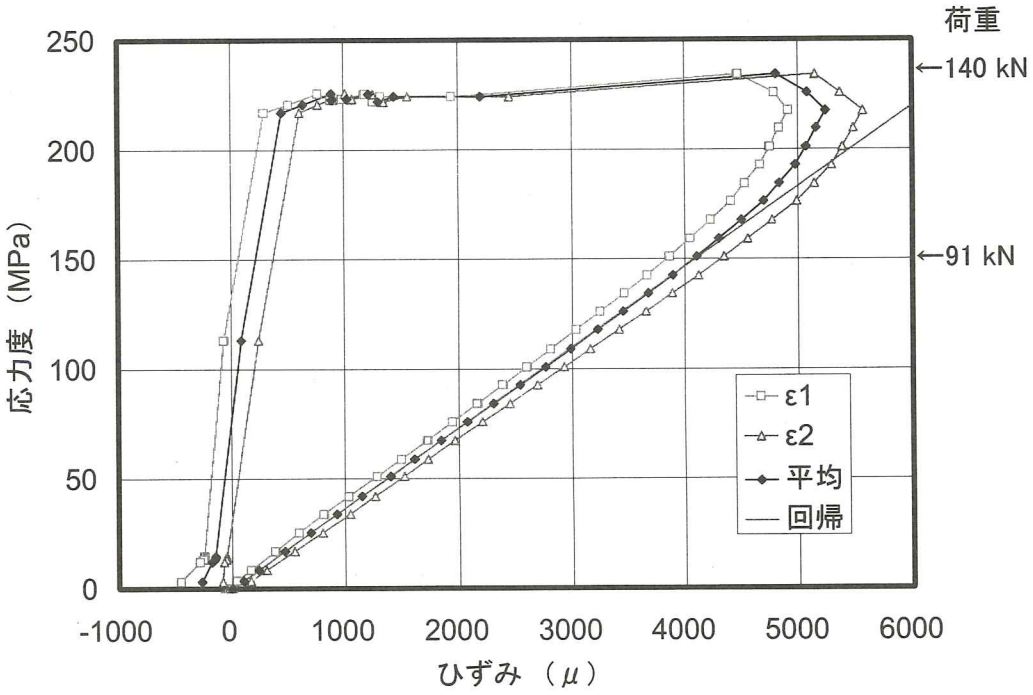


図-7.1.2　円孔試験片 SDH-3 の一般部における応力－ひずみ関係

表-7.1.1　応力集中率の算定

	試験片名		SDH-1	SDH-2	SDH-3
	貫通孔形状		長孔	長孔	円孔
	貫通孔寸法(呼び)	mm	1×20	2×20	φ20
形状寸法	総断面積 A_g	mm^2	598	594	599
	純断面積 A_n	mm^2	370	361	359
	弾性係数 E	GPa	39.6	35.4	36.6
	板厚 t	mm	11.9	11.8	11.9
	板幅 2B	mm	50.3	50.3	50.2
貫通孔寸法	半径 ρ	mm	0.5	1	10.1
	2 a	mm	1	2	20.1
	2 b	mm	19.2	19.7	20.1
	実測縁端距離 AB,CB	mm	15.6	15.3	15.2
	実測縁端距離 AD,CD	mm	15.5	15.3	14.9
応力集中	b / B		0.38	0.39	0.40
	b / ρ		19.2	9.83	1.00
	応力集中率 α		6.20	4.69	2.21 (2.24)
破断荷重	P_{cal1}	kN	184	181	179
	P_{cal2}	kN	150	146	143
備考	試験時温度	℃	26	27	27
	試験時湿度	%	40	39	42
	破断荷重 P_u	kN	160	148	142
	母材引張強さ σ_B	MPa	495	495	495
	P_u / A_g	MPa	267	249	236
	P_u / A_n	MPa	431	408	394
	σ_x	MPa	2670	1910	882
	ε_x	μ	67500	54100	24100

注) 応力集中率 α は式(1)による。カッコ内は数表(厳密解)[7.1)]による。

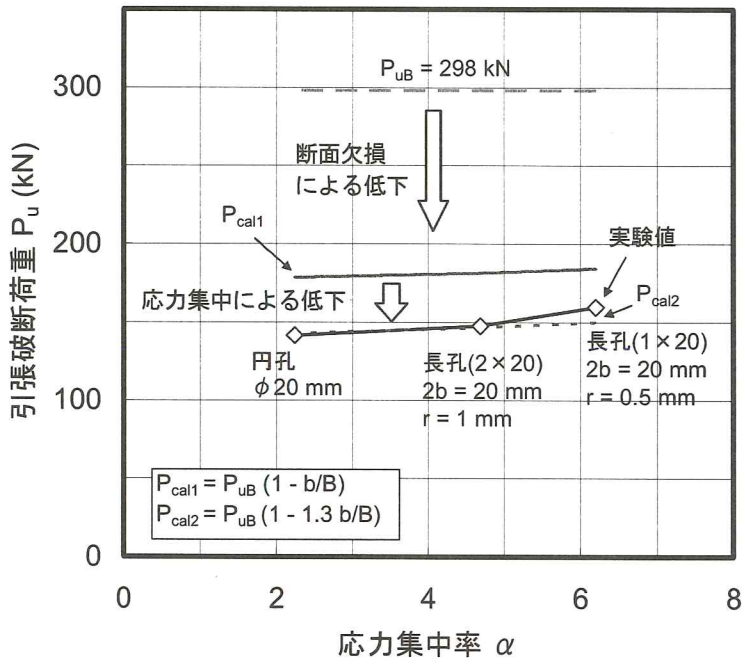
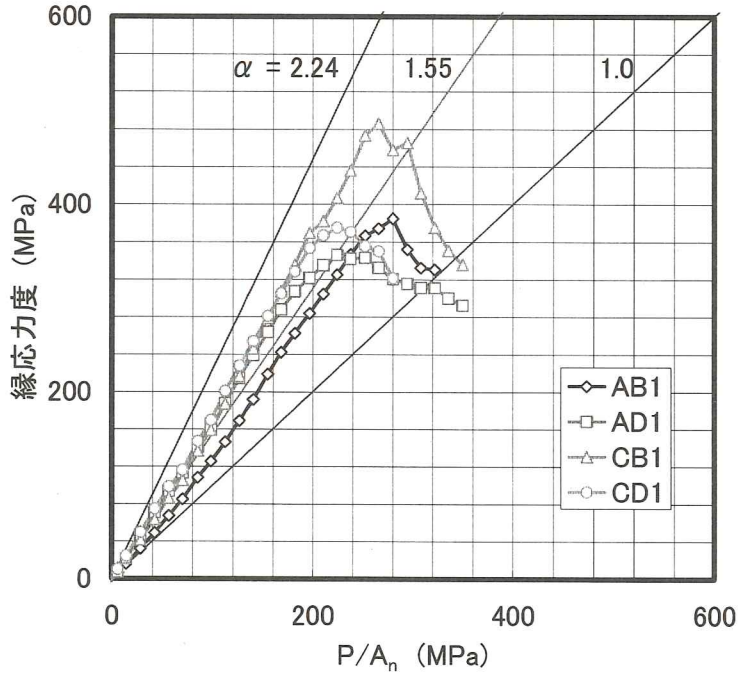
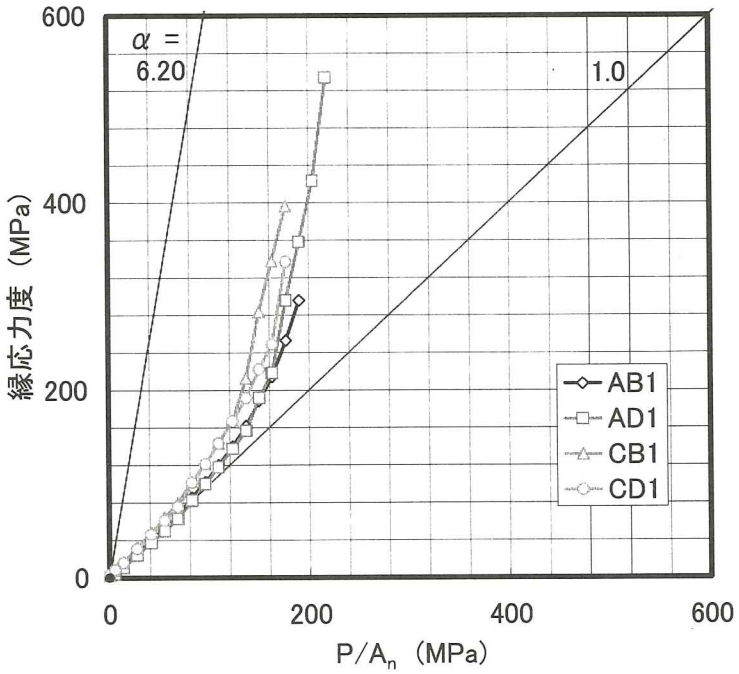


図-7.1.3　各貫通孔の破断強度と応力集中率

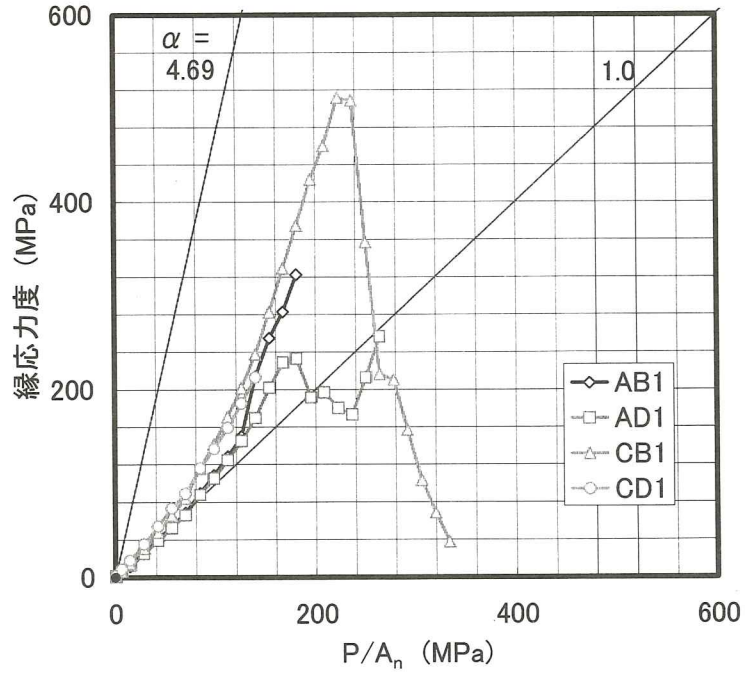


α = 1.55 はひずみゲージ位置(円孔から約 2 mm)における応力集中率

図-7.1.4　円孔試験片 SDH-3 の円孔近傍応力度(円孔から約 2 mm，軸方向応力)と断面欠損部の平均応力度の関係



(a) SDH-1 (長孔 20 mm×1 mm)



(b) SDH-2 (長孔 20 mm×2 mm)

図-7.1.5 長孔試験片の長孔近傍応力度(円孔から約 2 mm, 軸方向応力)と断面欠損部の平均応力度の関係

7.2 GFRP 厚板の線形性と静的挙動

図-7.2.1～7.2.13 に静的載荷試験で得られた GFRP 厚板の応力度と平均ひずみ(ε1, ε2 の平均)の関係を示すとともに，そのデータから求めたステップごとの応力ひずみ関係の傾き dE の変動をひずみとの関係で示す。dE の図には，前傾表-5.4.1 に示した 50～150 MPa の範囲のデータを用いて算定した弾性係数 E_0 も示す。

FRP の応力とひずみは一般に破断直前まで直線関係であるとされており，今回の結果においても概して見れば破断まで直線的な関係にあった。

荷重－クロスヘッド変位の関係が概ね直線かやや上に凸であった。応力ひずみ関係を詳細に見ると，作用応力度が高い場合にひずみの増分が大きくなる(応力ひずみ関係において上に凸となる)ものが見られた。理由としては，a)マトリックスの微細ひび割れなどの内部損傷による dE の低下によるものと，b)ゲージ貼り付け位置で局所的に損傷が進行したことによるものが考えられる。ちょうどゲージ位置で表層ひび割れが見られたのは 9 本(SDN-2，同-5，SD0.5-1，同-4，SW0.5-1，同-3，SD1-4，SW1-3，同-5)であり，他の多くは a)の理由によるものであったと考えられる。

逆に作用応力度が高い場合にひずみの増分が小さくなる(応力－ひずみ関係において下に凸)ものが見られた。理由としては，c)表層，ロービング層の層間剥離が徐々に進行したことによるものと，d)ゲージ貼り付け位置以外の部位で局所的な損傷が進行したことによるものが考えられる。d)の場合は，例えば SD0.5-4 のように急激なひずみの低下が生じることから，応力－ひずみ関係において徐々に下に凸となっていたのは，主として c)の理由によるものと考えられる。

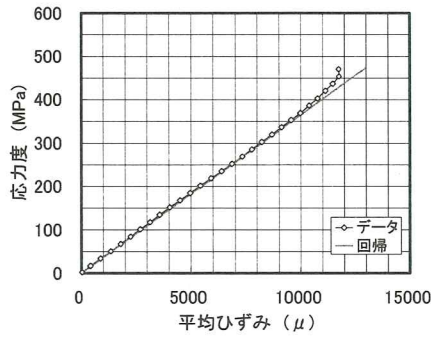
すべての試験片に共通ではないが，各ひずみレベル(応力レベル)で dE の変化に特徴が見られる。低いひずみの範囲でわずかではあるが変動が見られる段階 I，変動が落ち着く段階 II，変動幅が初期の変動に比べて明らかに変化が大きい段階 III の 3 段階の特徴が見られる。これらの dE の変動と試験パラメータの間に明確な関係は見られない。これらの過程は，既往のクリープや疲労破壊で見られる 3 段階の過程(2 章)と類似している。ここでは，直接的な関連付けができるような計測は行っていないが，SP250 の静的引張試験においても概ね以下の過程を得ていたものと考えられる。

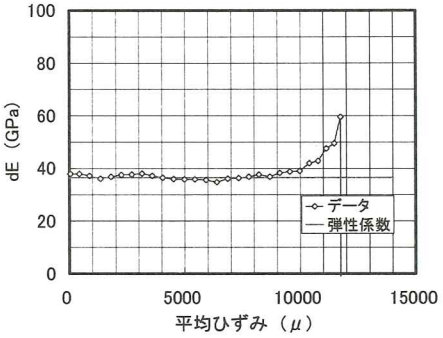
段階 I
　マトリックスのボイド等に起因した微細なひび割れ
　クロス層のマトリックスと直角方向繊維との剥離　←SP250 特有
段階 II
　マトリックスのひび割れの連結（連続化）
　表層(マット層，クロス層)，ロービング層間のひび割れ　←SP250 特有
段階 III
　マトリックスと繊維の付着切れ
　表層，ロービング層間のひび割れ(剥離)の連結(連続化)　←SP250 特有
破断時
　繊維の破断
　マトリックス，繊維間のすべり（繊維間，ロービング間のすべり）
　表層，ロービング層の層間すべり　←SP250 特有

マトリックスは微細なボイド(空隙)を包含しており[7.5]，その周囲に軽微なひび割れが生じ易い。特に，クロ

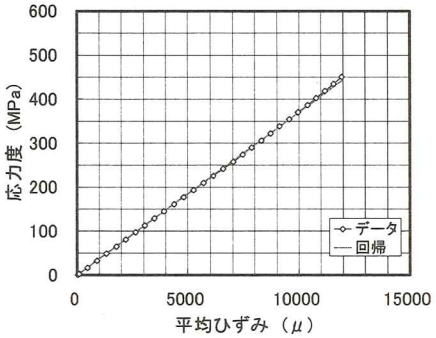
ス層があると，直角方向繊維の存在自体が応力集中をもたらすとともに[7.6]，繊維の交差部付近に比較的大きなボイドを形成し易い傾向にあるため[7.7]，マトリックス，繊維間のひび割れが早期に生じる可能性が高いと考えられる。

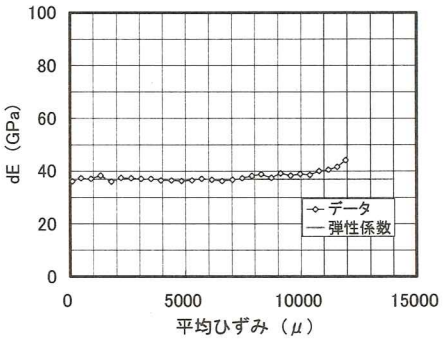
各段階の変化点の平均ひずみは試験片間で一定しない。段階IIでは，ステップごとの変化が落ち着いてはいるが，E_oから徐々に乖離するものが見られる。E_oの乖離が見られる平均ひずみも試験片によって異なるが，今回の試験の範囲では少なくとも平均ひずみで4000μ（応力度で150 MPa程度）を超えてから見られた。なお，E_oの算定は，これらの結果を踏まえて50～150 MPaの範囲のデータを用いることとしたが，応力ひずみ関係の図で見れば，設計実務上は支障ない範囲と考えられる。



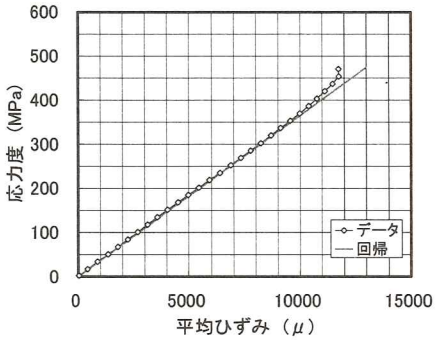


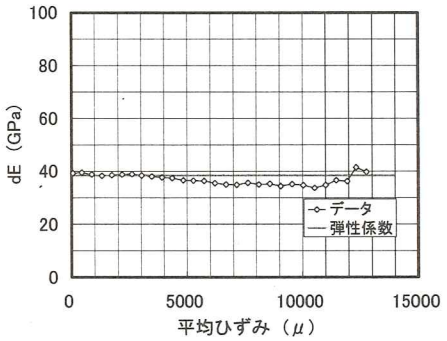
(a) SDN-1



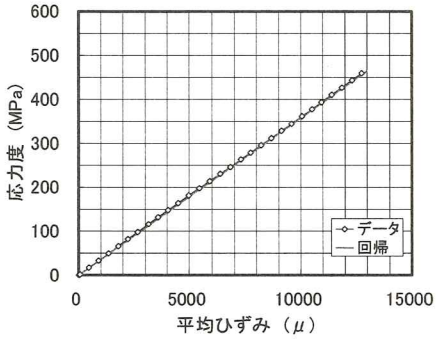


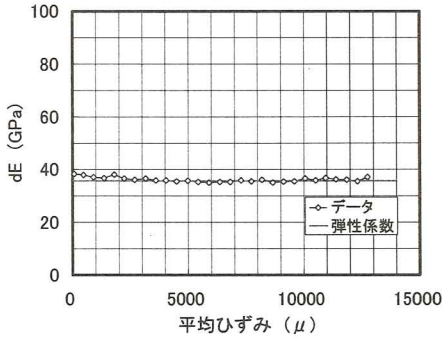
(b) SDN-2



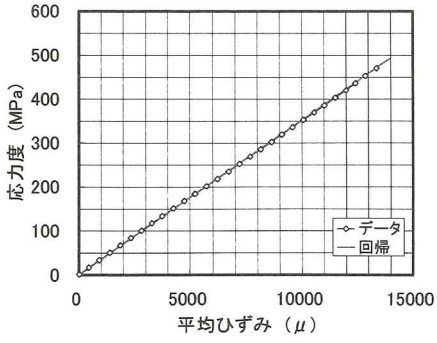


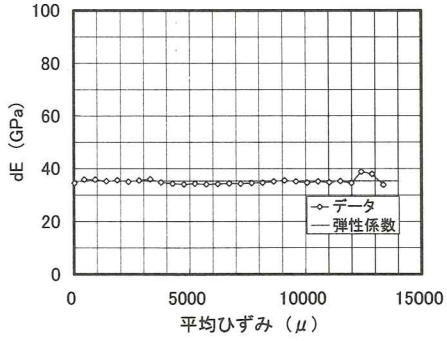
(c) SDN-3





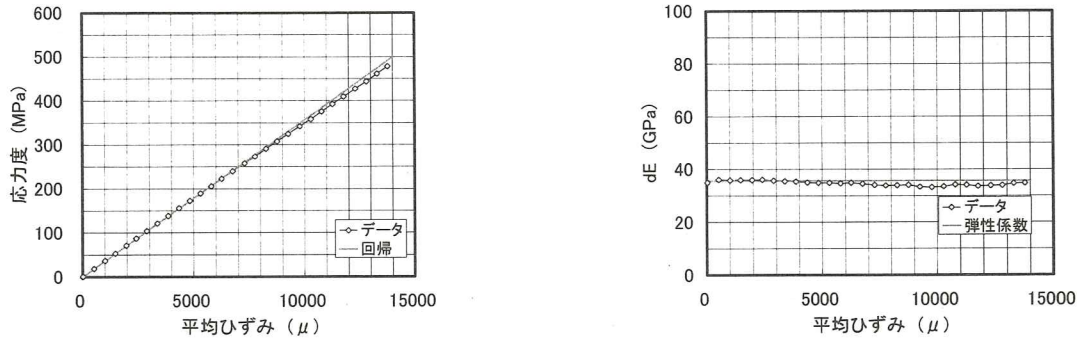
(d) SDN-4



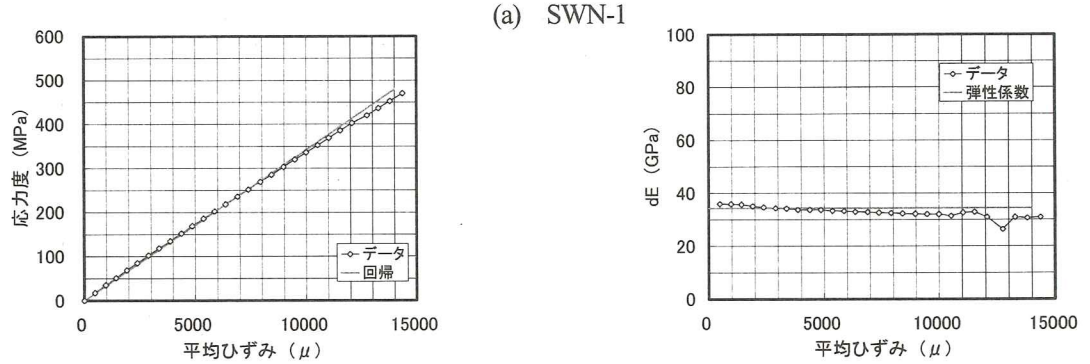


(e) SDN-5

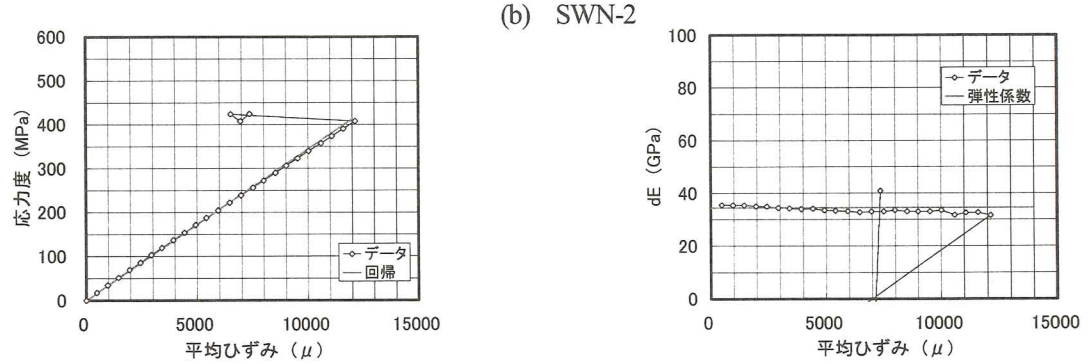
図-7.2.1 応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SDN）



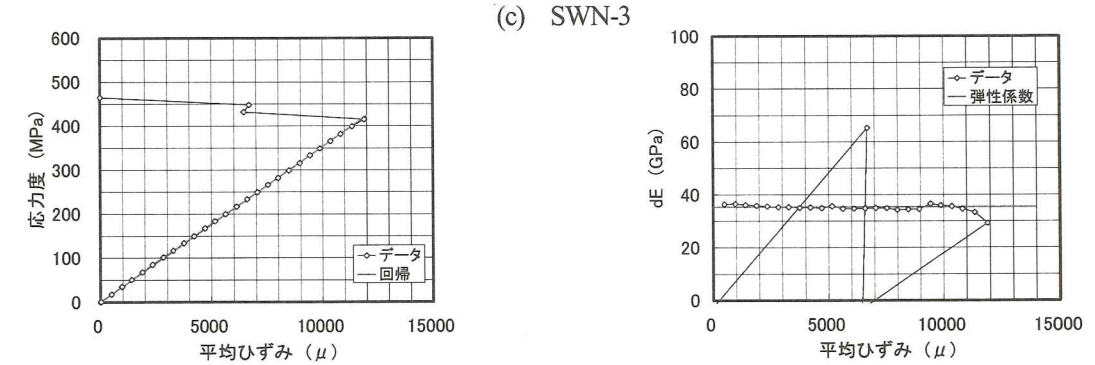
(a) SWN-1



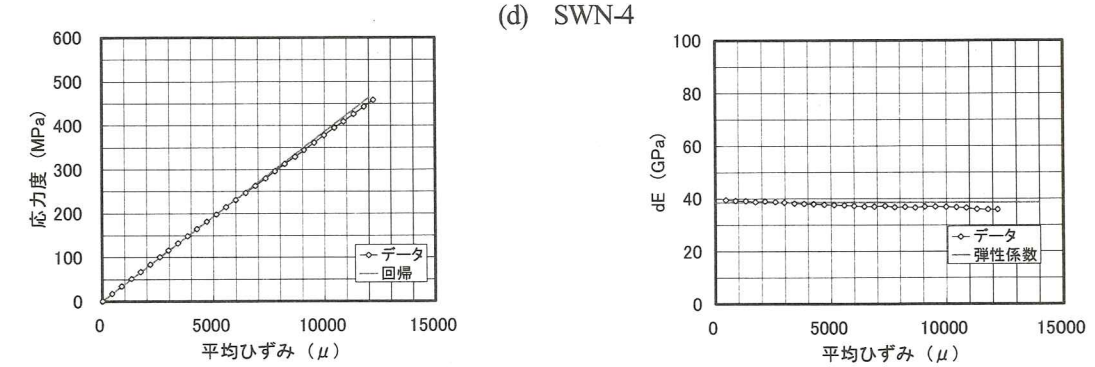
(b) SWN-2



(c) SWN-3

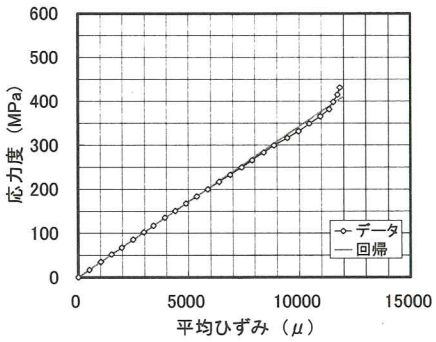


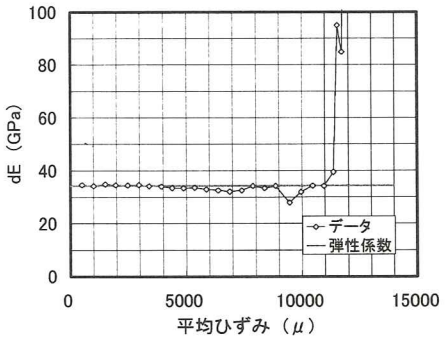
(d) SWN-4



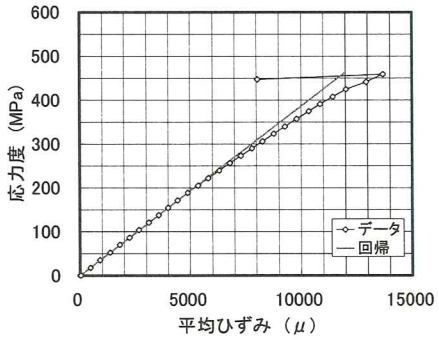
(e) SWN-5

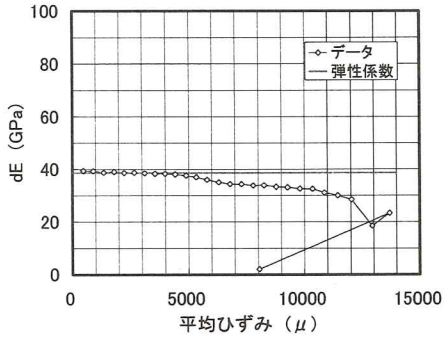
図-7.2.2 応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SWN）



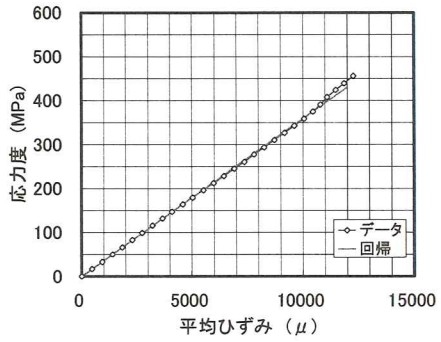


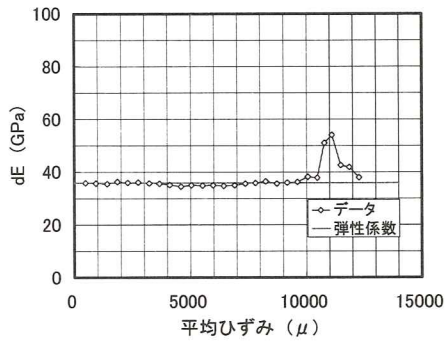
(a) SD0.5-1



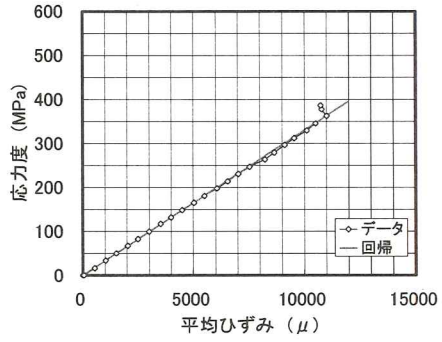


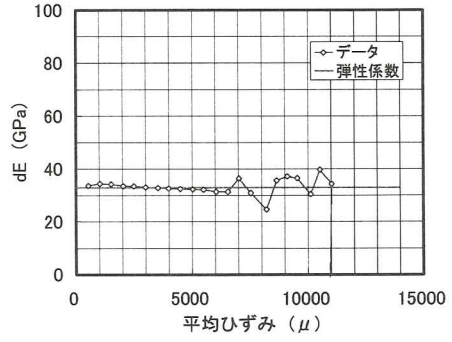
(b) SD0.5-2



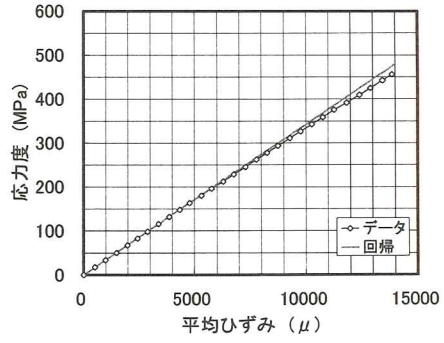


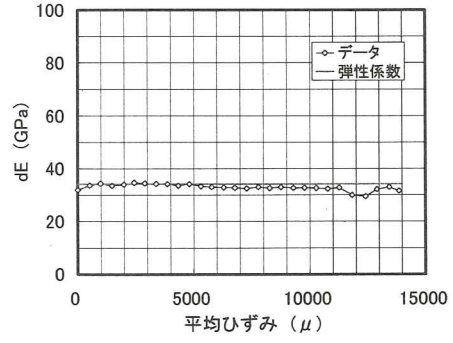
(c) SD0.5-3





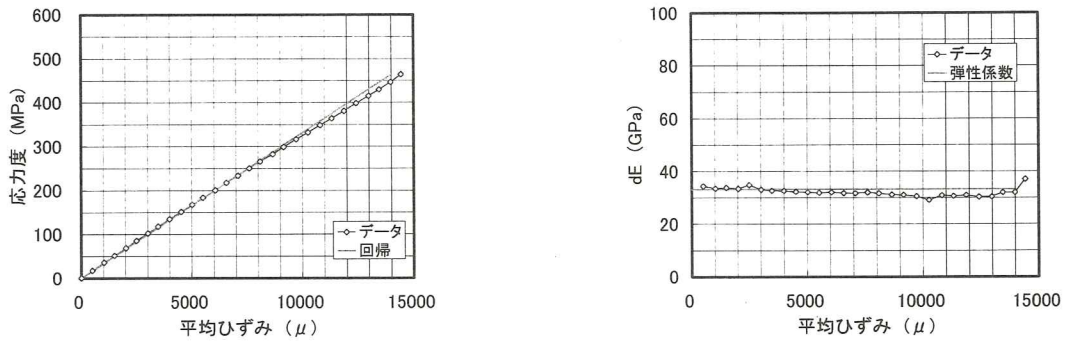
(d) SD0.5-4



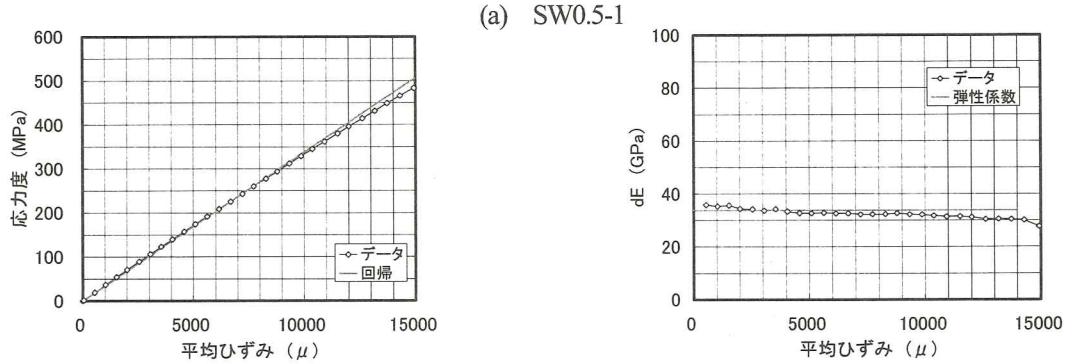


(e) SD0.5-5

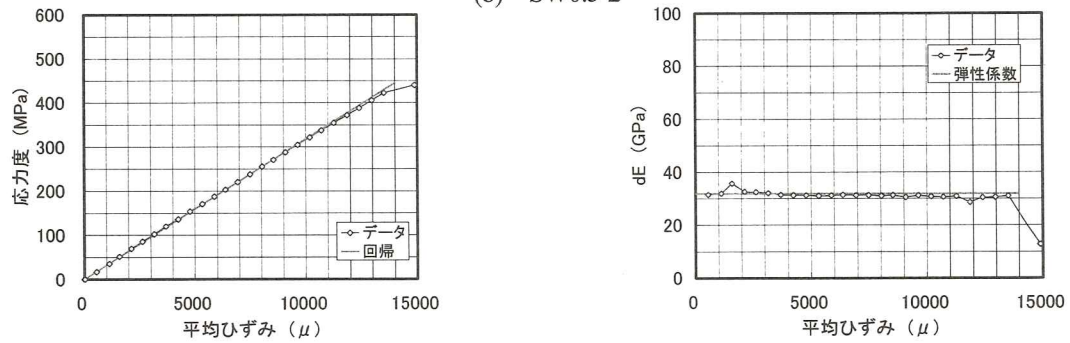
図-7.2.3　応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SD0.5）



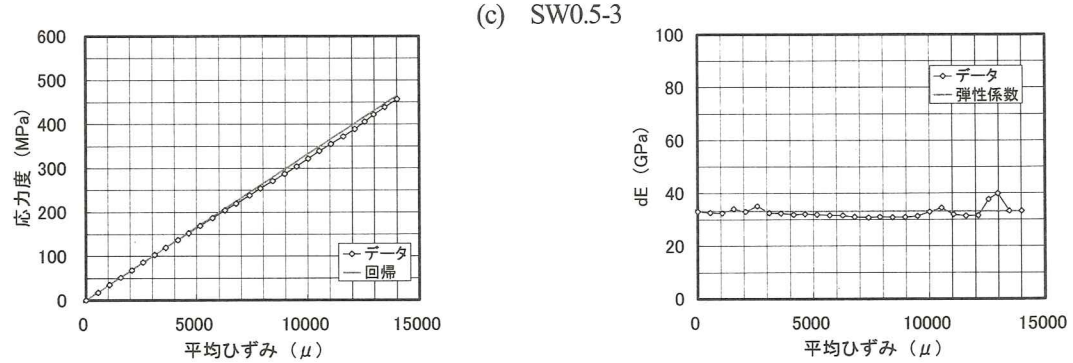
(a) SW0.5-1



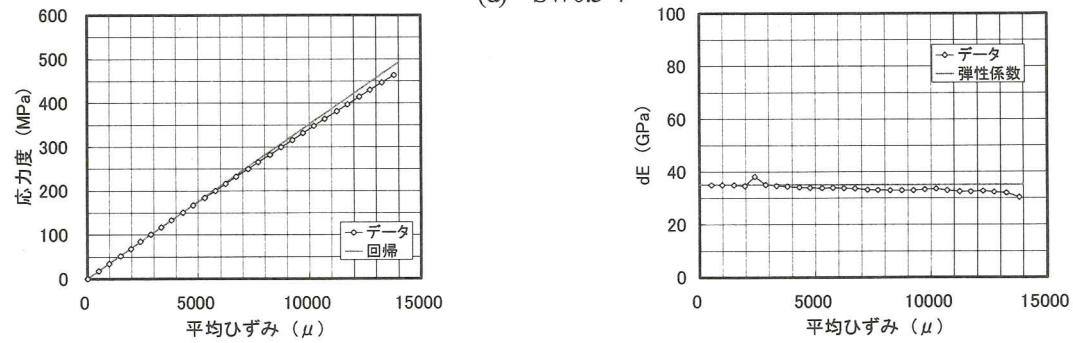
(b) SW0.5-2



(c) SW0.5-3

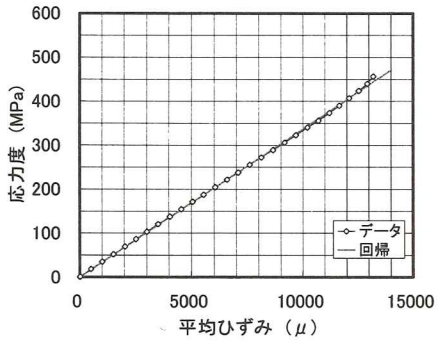


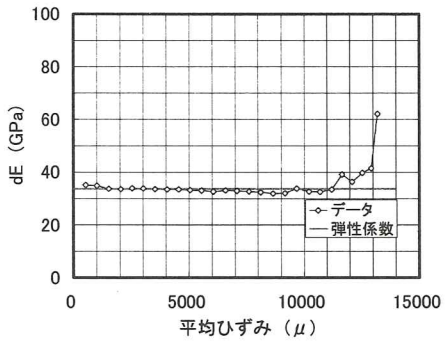
(d) SW0.5-4



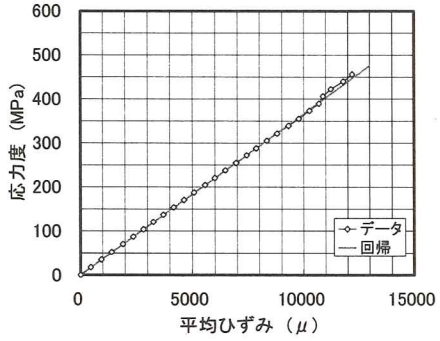
(e) SW0.5-5

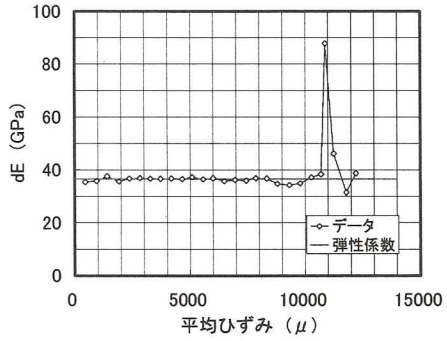
図-7.2.4　応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SW0.5）



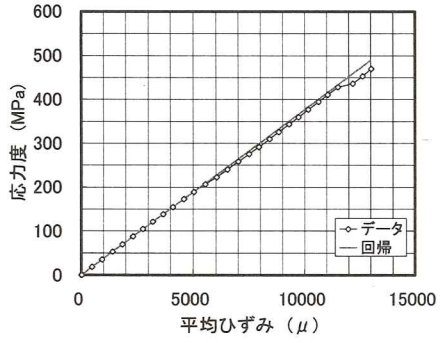


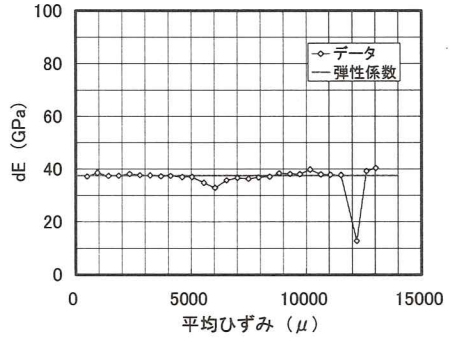
(a) SD1-1



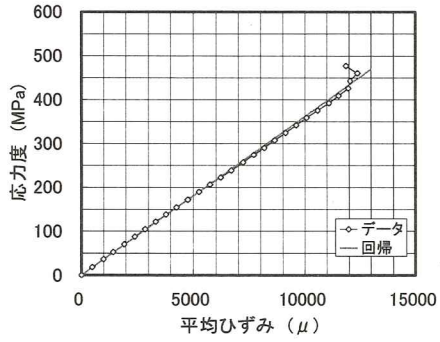


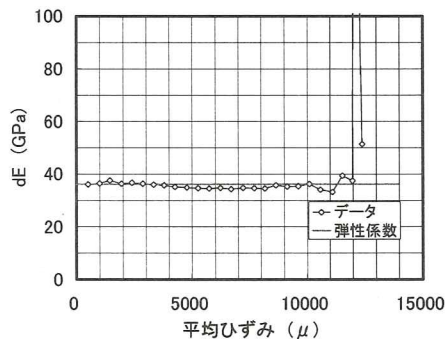
(b) SD1-2



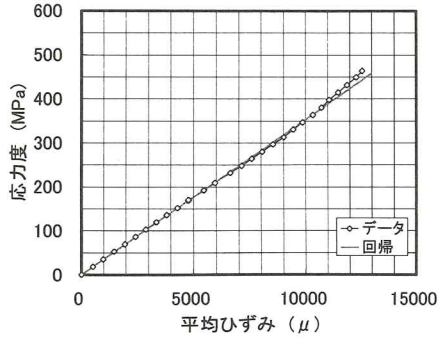


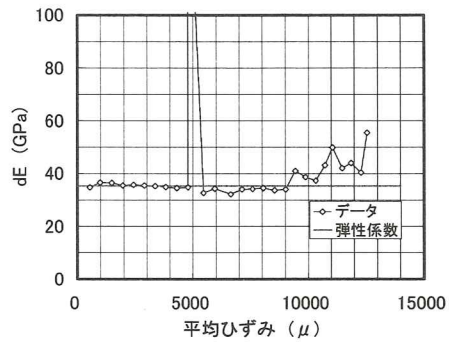
(c) SD1-3





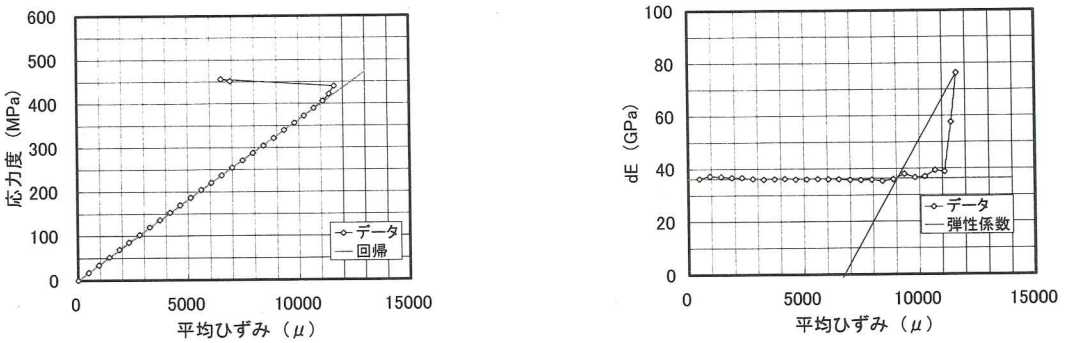
(d) SD1-4



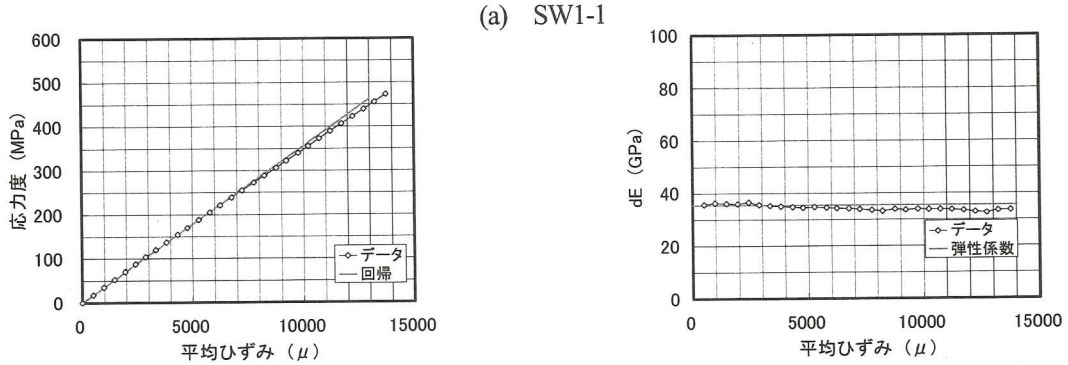


(e) SD1-5

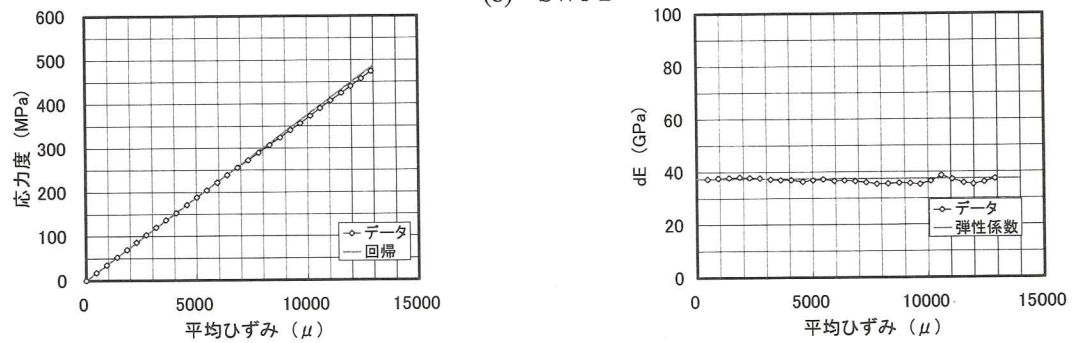
図-7.2.5　応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SD1）



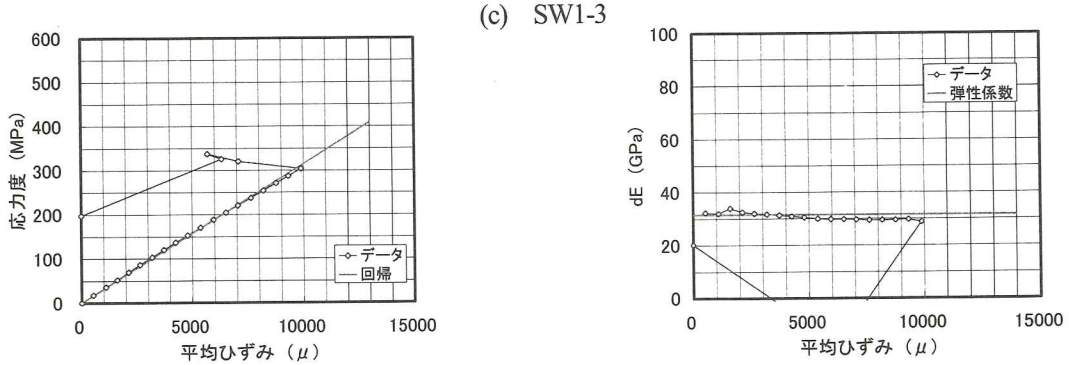
(a) SW1-1



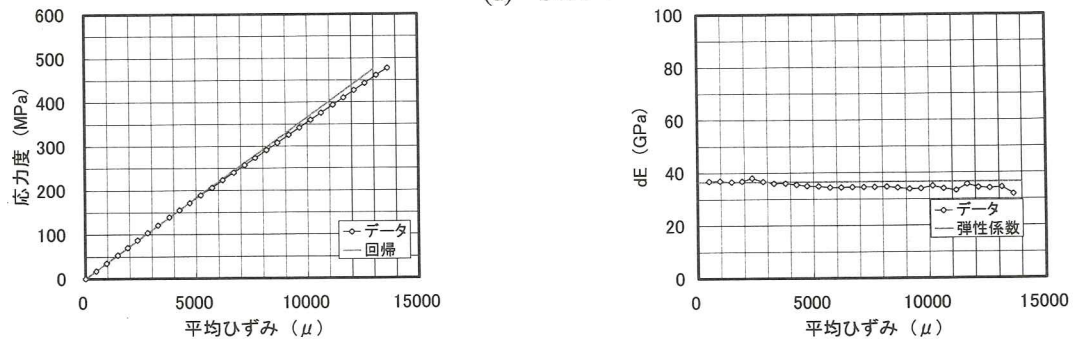
(b) SW1-2



(c) SW1-3

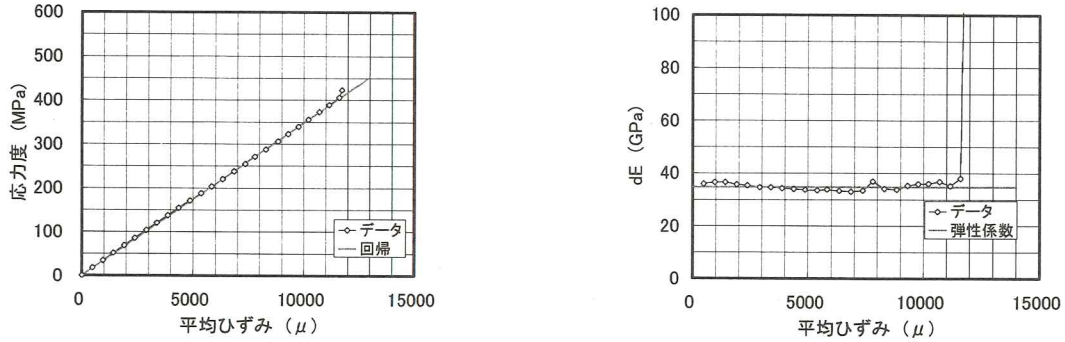


(d) SW1-4

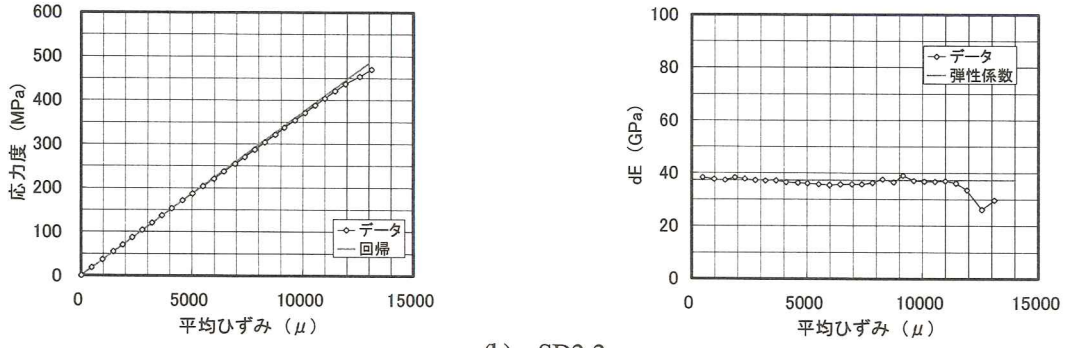


(e) SW1-5

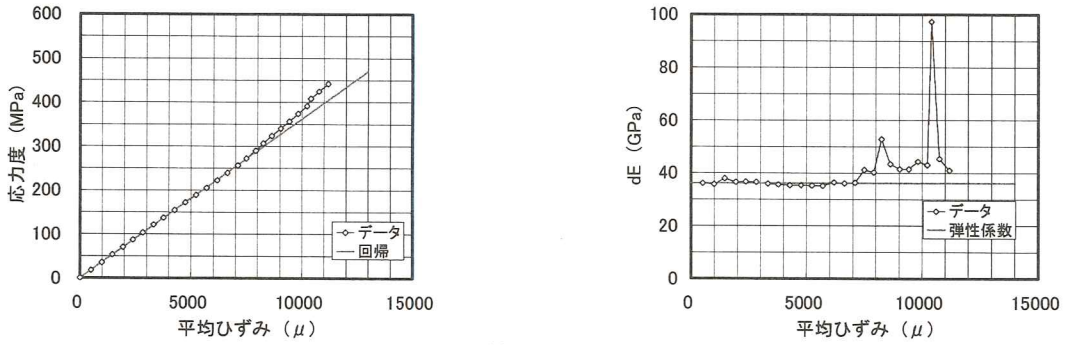
図-7.2.6　応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SW1）



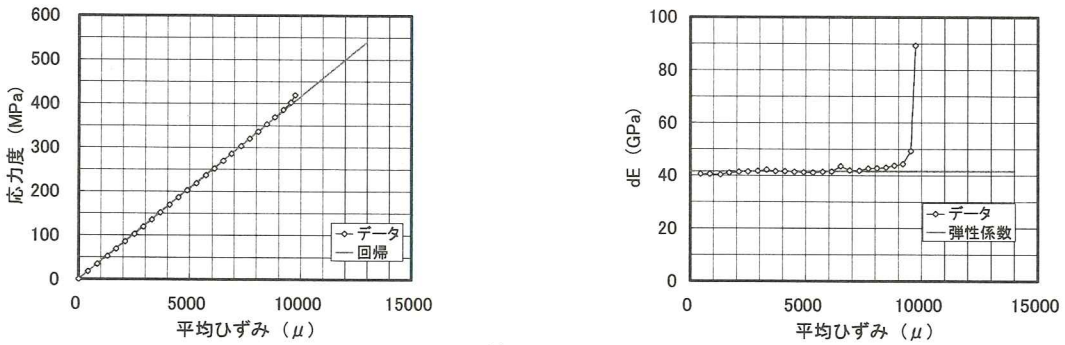
(a) SD2-1



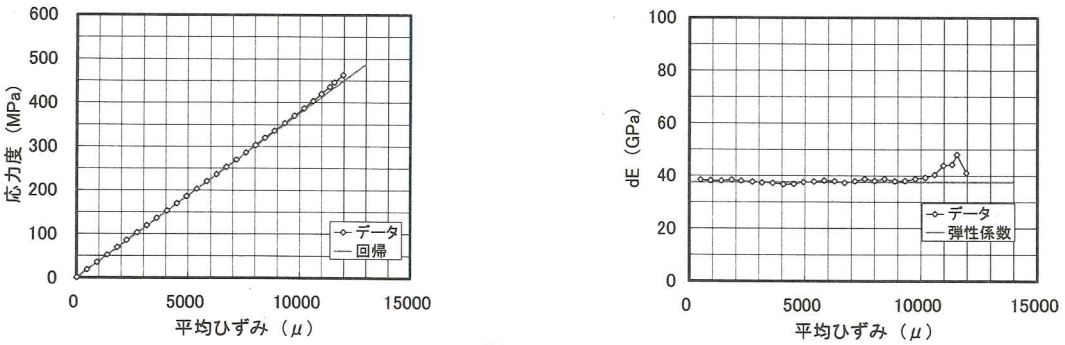
(b) SD2-2



(c) SD2-3

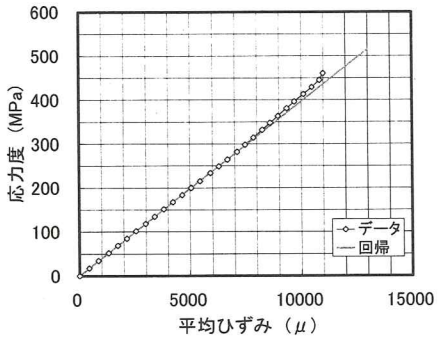


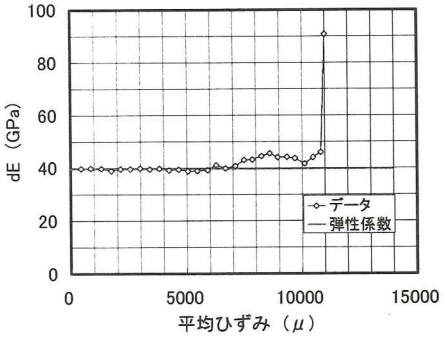
(d) SD2-4



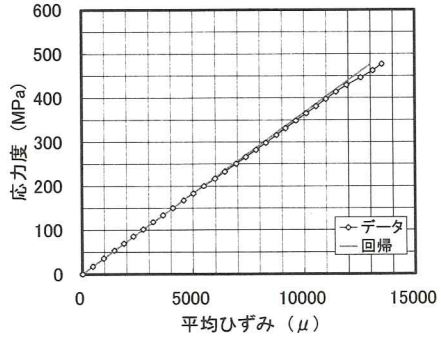
(e) SD2-5

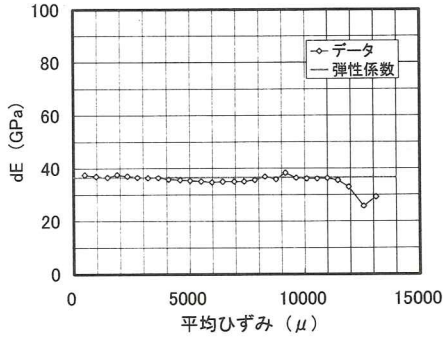
図-7.2.7 応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SD2）



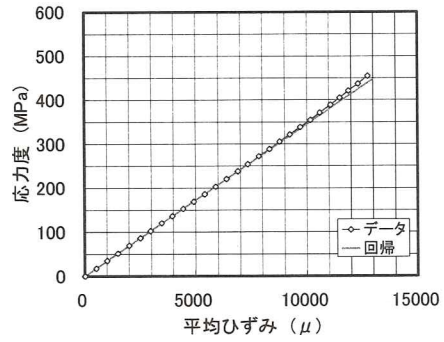


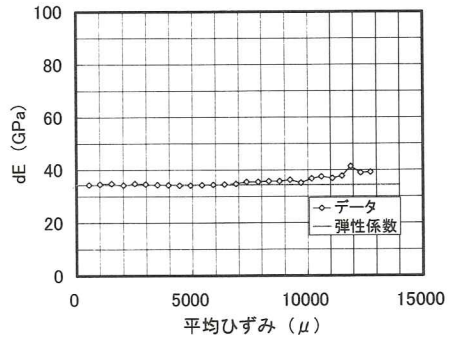
(a) SW2-1



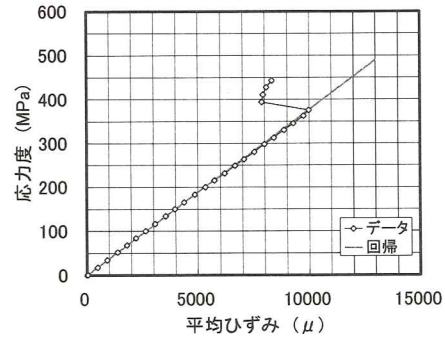


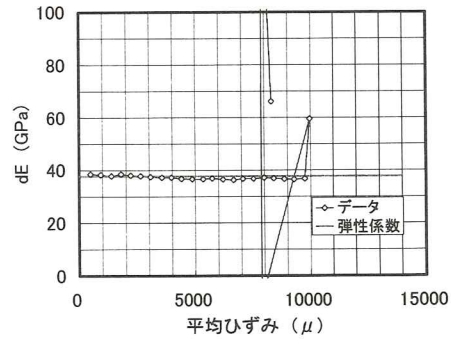
(b) SW2-2



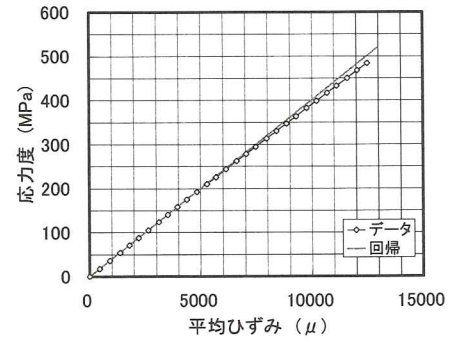


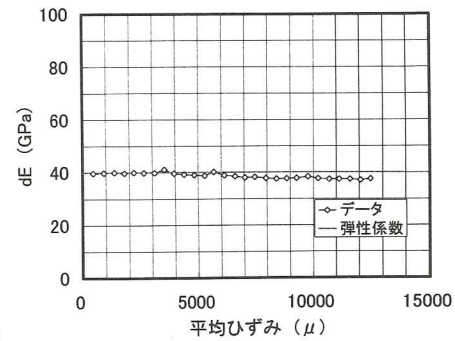
(c) SW2-3





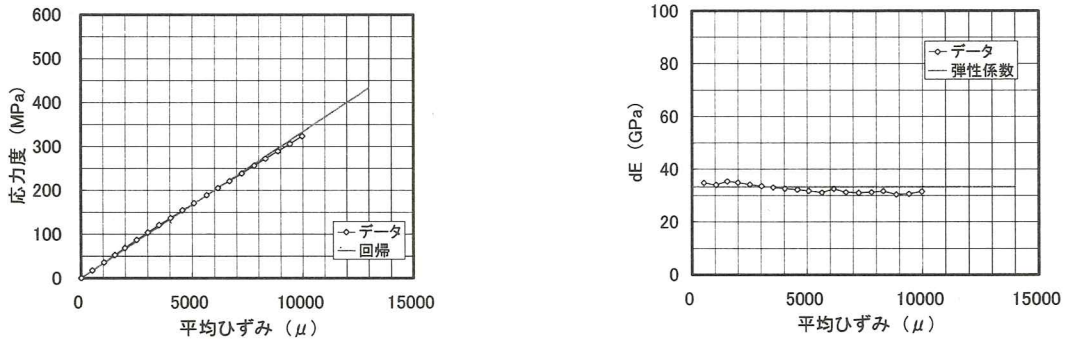
(d) SW2-4



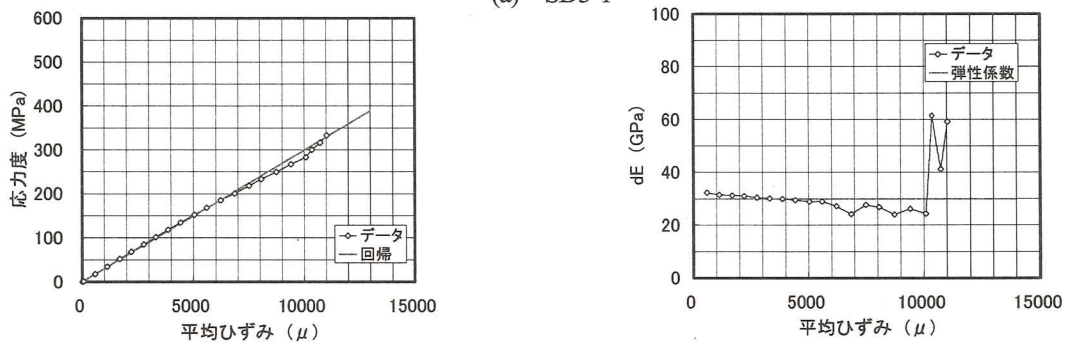


(e) SW2-5

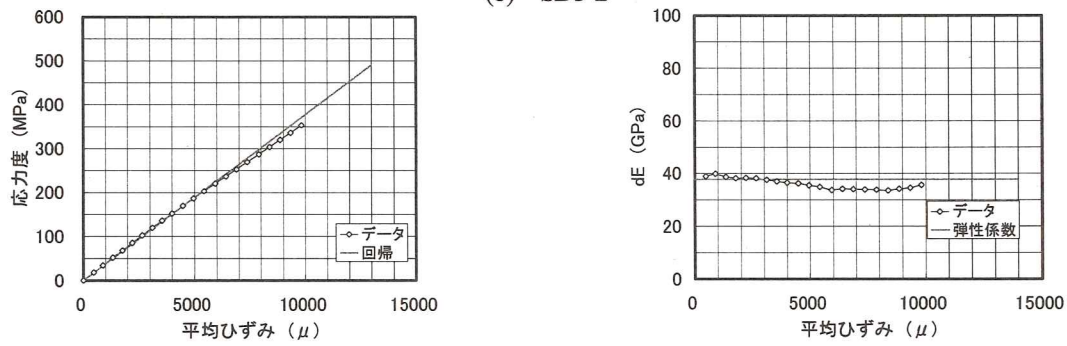
図-7.2.8　応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SW2）



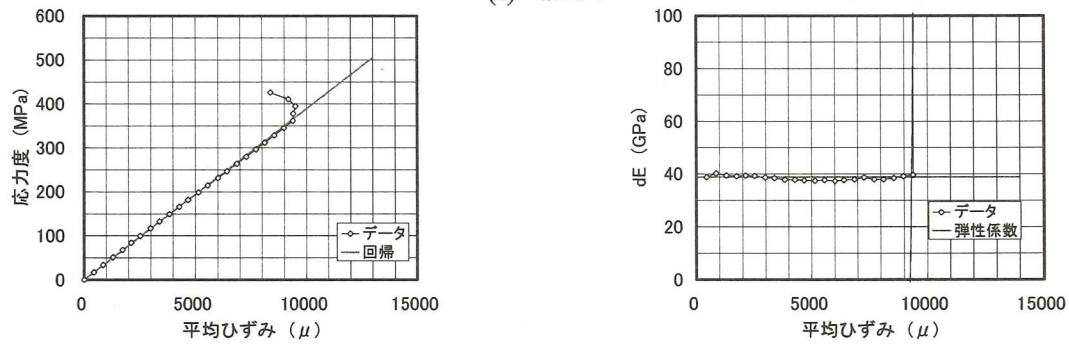
(a) SD3-1



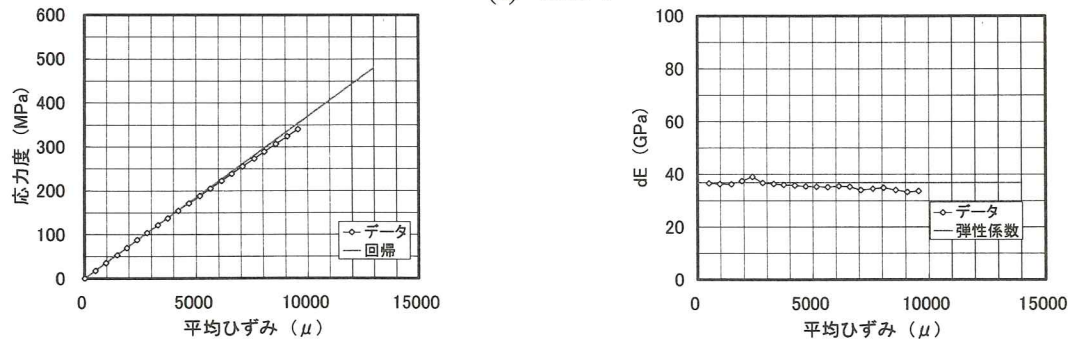
(b) SD3-2



(c) SD3-3

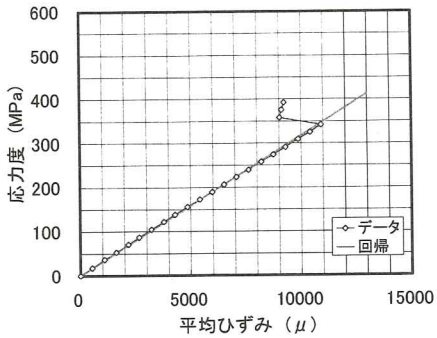


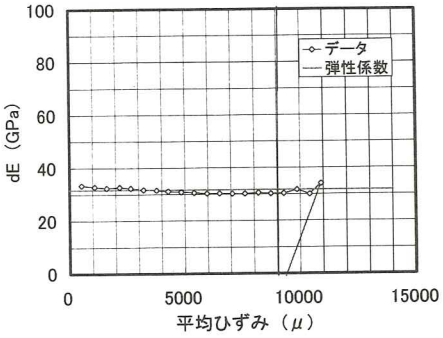
(d) SD3-4



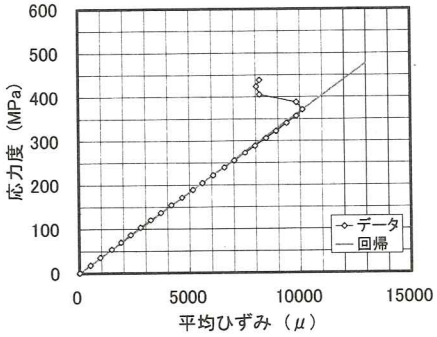
(e) SD3-5

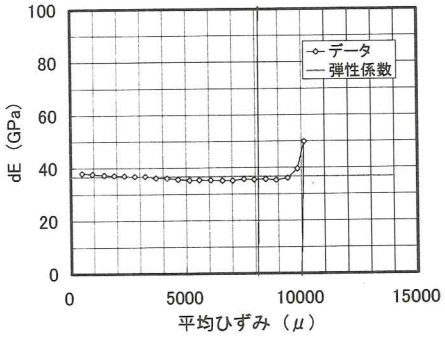
図-7.2.9　応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SD3）



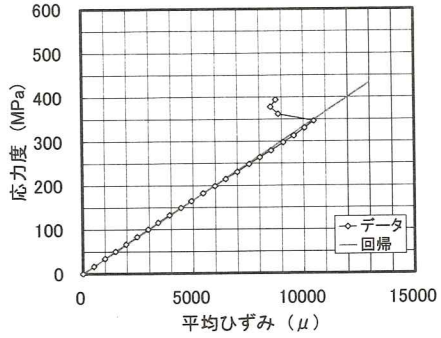


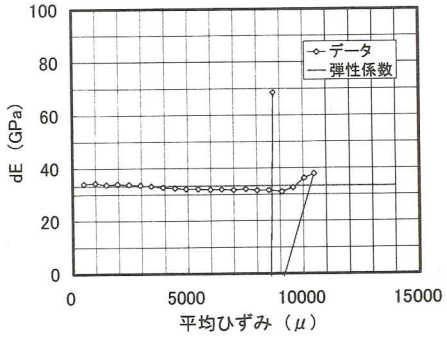
(a) SW3-1



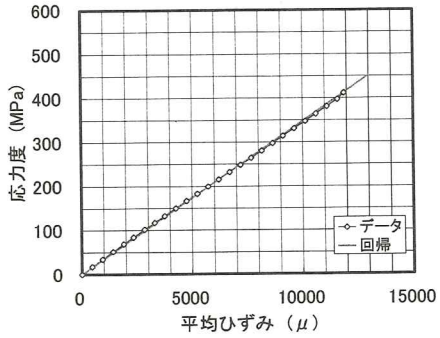


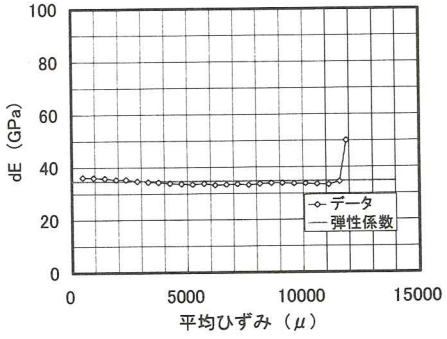
(b) SW3-2



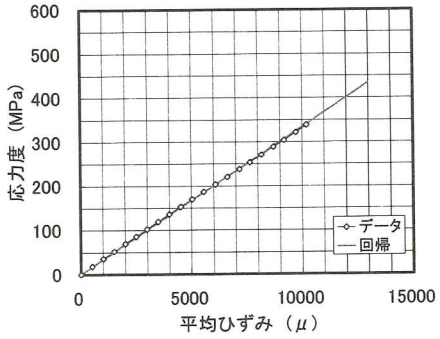


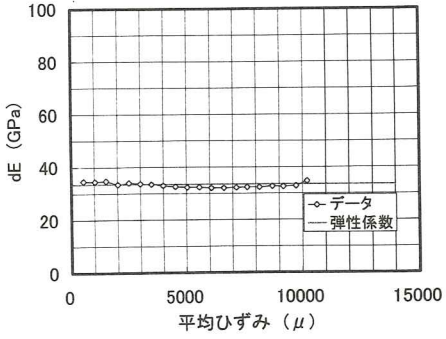
(c) SW3-3





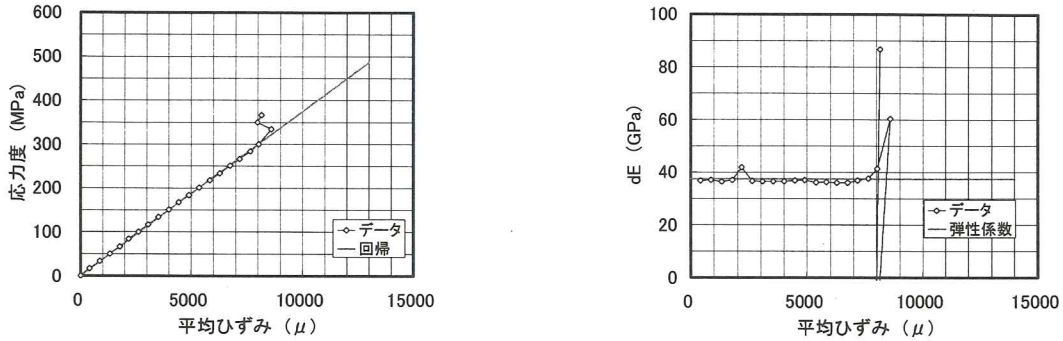
(d) SW3-4



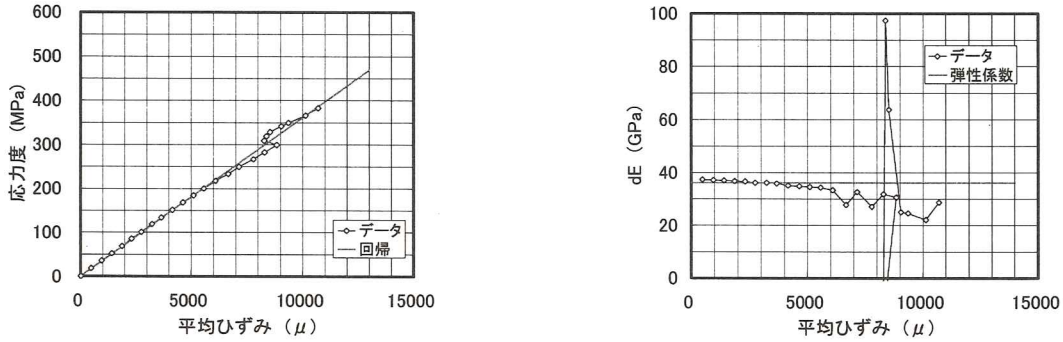


(e) SW3-5

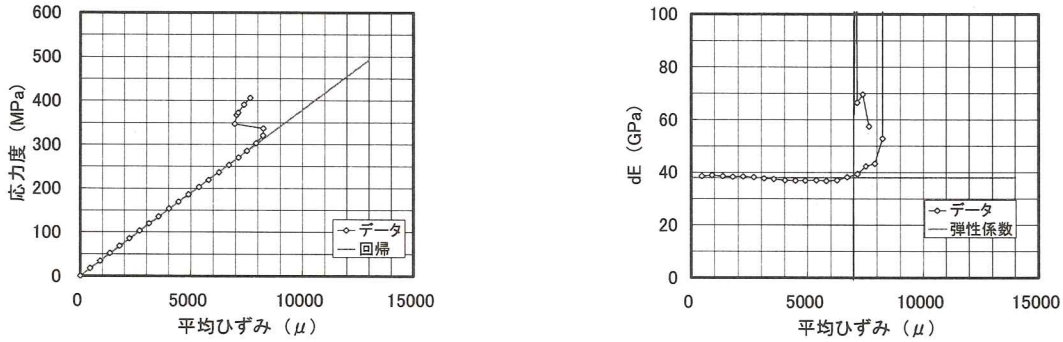
図-7.2.10　応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SW3）



(a) SDE-1

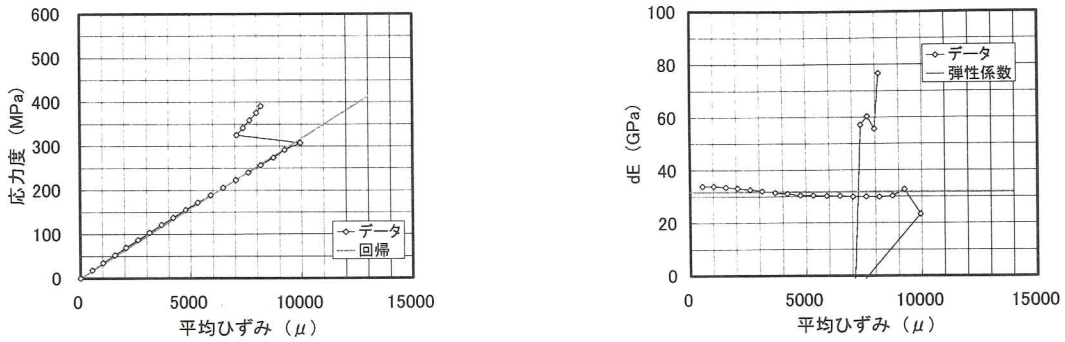


(b) SDE-2

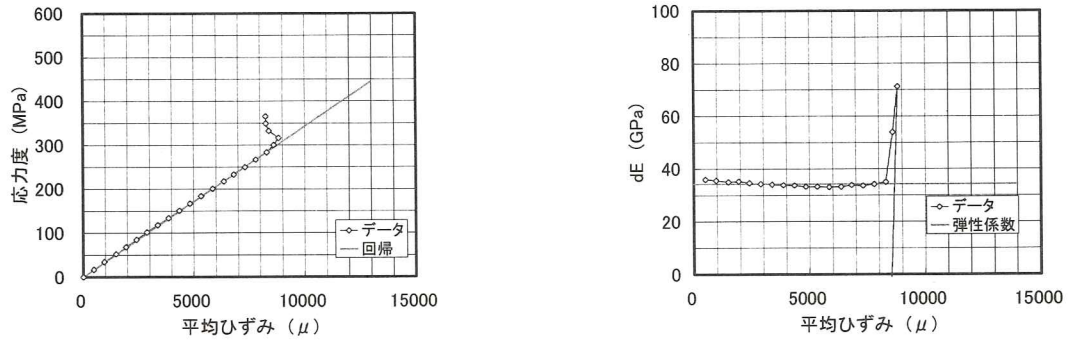


(c) SDE-3

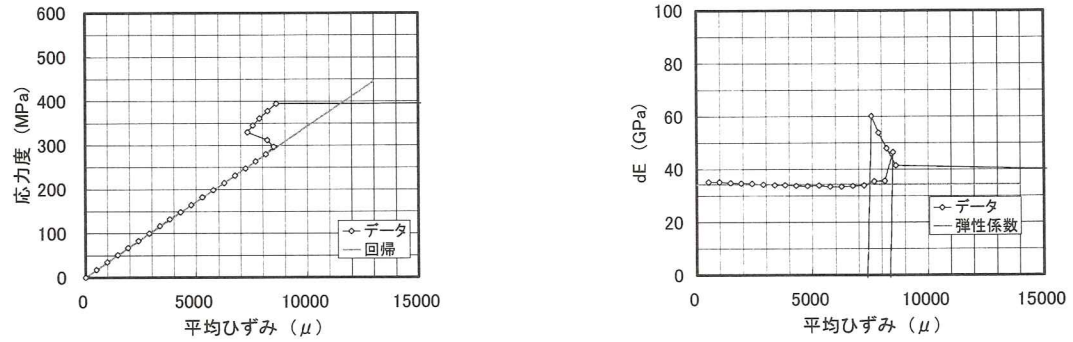
図-7.2.11 応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SDE）



(a) SWE-1

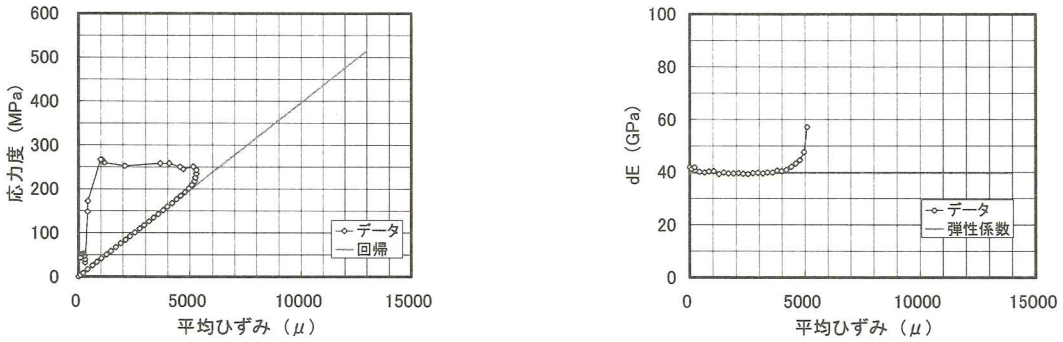


(b) SWE-2

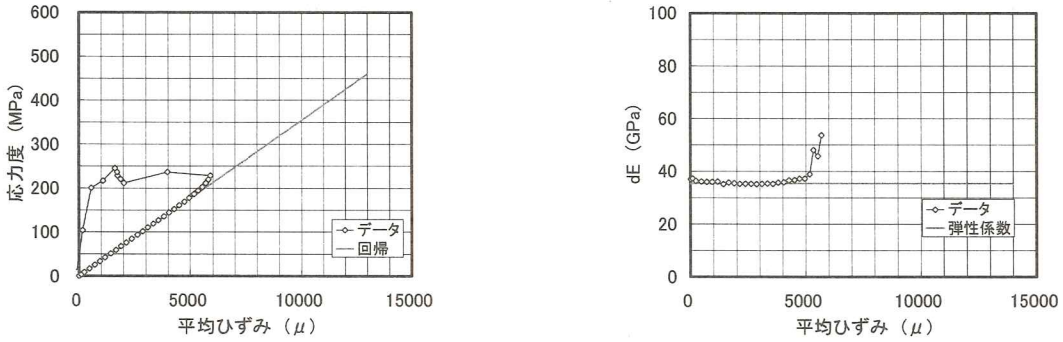


(c) SWE-3

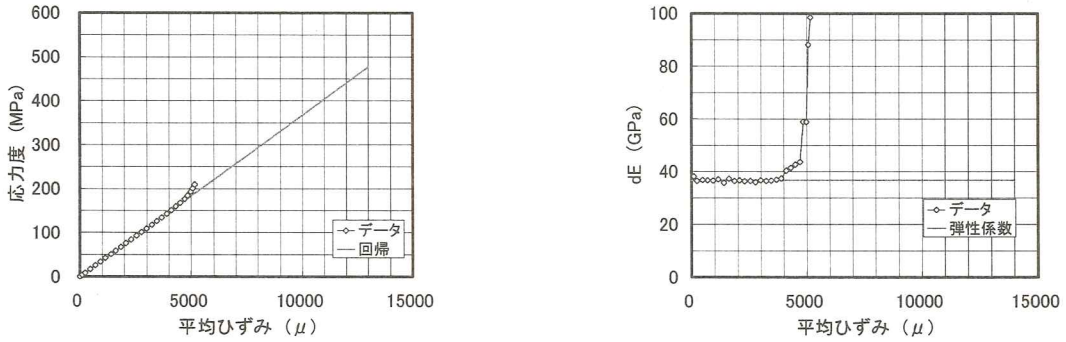
図-7.2.12 応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SWE）



(a) SDH-1



(b) SDH-2



(c) SDH-3

図-7.2.13 応力ひずみ関係及び弾性係数の変動（SDH）

7.3　表面疵が静的破断強度に及ぼす影響

図-7.3.1 に表面疵深さ(外見上の深さ)と引張破断荷重(一回目の破断，以下同じ)の関係を示す。図中，次式による断面欠損を考慮した引張破断荷重の計算値を破線で示す。

$$P_{cal1} = P_{uB} \cdot A_n / A_g \qquad (2)$$

ここに，

P_{cal1}：引張破断荷重（計算値，kN）

P_{uB}：表面疵のない試験片の破断荷重の平均値（298 kN）

A_n：純断面積

（表面疵による断面欠損部の最小断面積，表面疵の深さは目標値，幅は 20 mm とした）

A_g：総断面積

（表面疵深さが 0 mm 及び 12 mm のとき A_n/A_g はそれぞれ 1 及び 0.6 とした）

表面疵深さ 2*mm 以上の試験片は表面疵による断面欠損部で確実に破断したのに対して，表面疵なし及び表面疵深さ 1*mm の場合には破断位置が表面疵の存在に依存しなかった(前掲図-5.2.3)。しかし，図-7.3.1 より，引張破断荷重は概ね表面疵深さ（断面欠損）に応じて低下する傾向があることがわかる。特に，疵深さが 3*mm の場合に破断荷重の顕著な低下が見られた。このことは，疵深さ 2*mm まではロービング層の疵が軽微であるとともに，ロービング層のひび割れが生じていなかったことと関係しているようである。同図には，エンドミルで加工した表面疵の試験結果を合わせて示した。エンドミルで加工した疵深さは 5 mm であったが，疵深さ 3*mm の破断荷重はエンドミルの結果と同程度かそれよりも多少大きい値であった。これは，疵深さ 3*mm の結果は，ロービング層及び内部損傷のために，みかけの疵深さよりも破断荷重の低下が見られたものと考えられる。図-7.3.2 に疵深さ 3*mm の破断後の状況を示す。前掲図-4.3.4 で確認されたのと同様に，表面疵の先端のロービング層に約 45° の鋭利な切断面が認められた。図-7.3.2 よりひび割れ深さは板幅方向に均一でないことがわかる。

図-7.3.3 に，押込み荷重による表面疵を有する試験片の電子顕微鏡による断面観察写真を示す。疵深さが 1*mm の場合，外観で判別できる疵はマット層までであるが，断面観察ではクロス層のうち，直角方向繊維の上側の軸方向繊維が切断されていた。疵の先端はクロス層の直角方向繊維に達していたが，ロービング層には達していなかった。疵深さが 2*mm の場合，疵はマット層を貫通して，ロービング層のごく一部に変状(繊維の切断は明確でない)が認められた。疵深さ 3*mm の場合，外観でもロービング層まで損傷していることがわかった。図-7.3.3c より，ロービング層にも V 字型の損傷が明確に認められ，V 字の先端の下方にさらに 45° の損傷が 1 mm 程度の深さで生じていた。この写真では 45° の疵によって繊維が切断されているかどうかは明確でないが，前掲図-7.3.2 に見られたように，破断後の写真から切断されていたことがわかる。マット層は治具で押しつぶされ，一部は左右に押し出されていた。また，押込み荷重による圧縮負荷により，繊維の局部曲げ変形(ダウエル作用)を伴うマトリックスのせん断破壊が見られ，ロービング層に及んでいた。参考として，疵深さ 5*mm とした場合についても断面写真を示した。疵深さ 5*mm の場合もロービング層

のＶ字形の残留損傷深さは 3*mm のときと大差ないが，その下の 45° の損傷は明らかにひび割れであることが認められ，ロービング層の繊維の多くが切断されていた(前掲図-4.3.5)。また，押込みによる圧縮負荷により，層全体に渡って繊維の局部曲げ変形を伴うせん断破壊の層が確認された。

なお，図-7.3.1 に，貫通孔を設けた試験片 SDH-1～3 の結果を疵深さ 12 mm として示した。貫通孔の破断荷重は，計算値よりもさらに１割程度低い結果であった。前述のとおり，貫通孔の場合に引張破断荷重が断面欠損分以下に低下していたが，エンドミル加工による表面疵の試験片では，概ね断面欠損分の低下のみで説明できることがわかる。クロス層が片面だけでも健全であったことで，せん断強度が改善されたことが，応力再分配に寄与したものと考えられる。

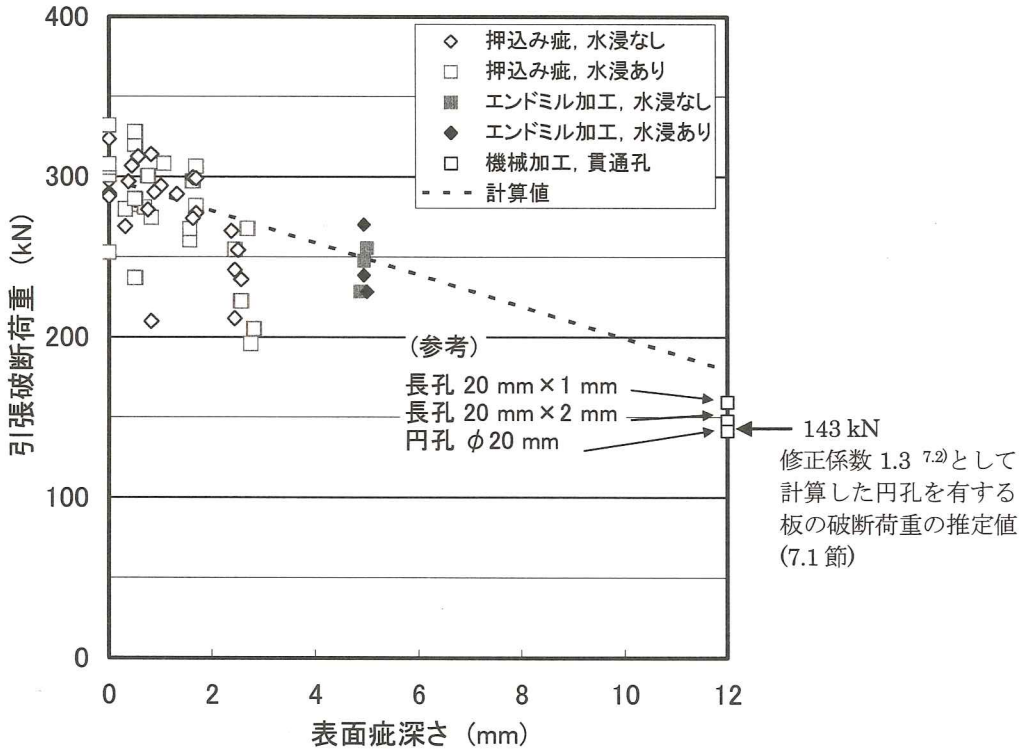
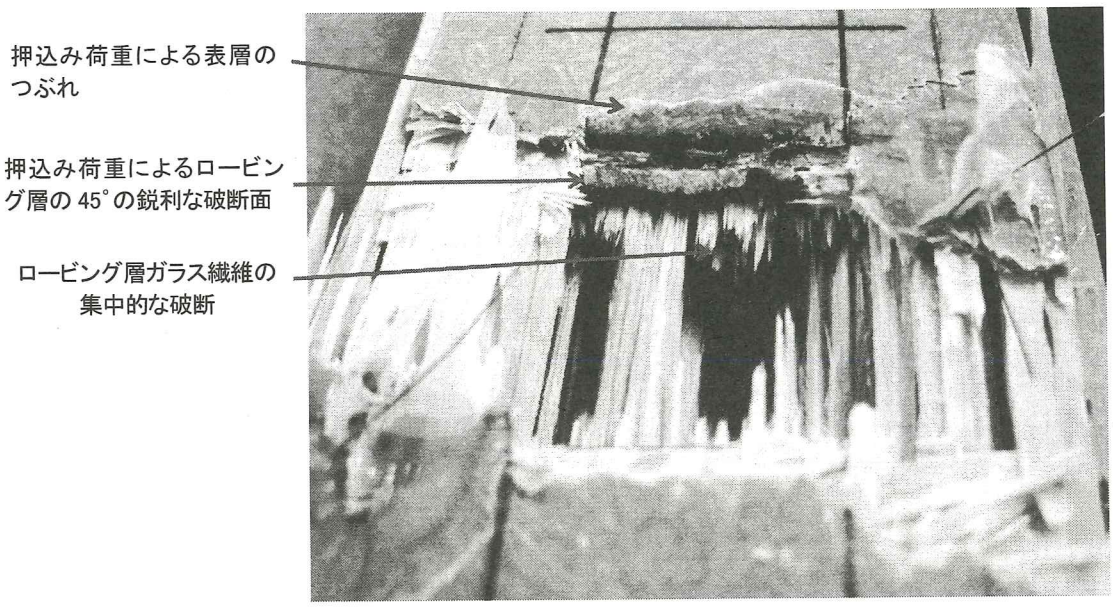
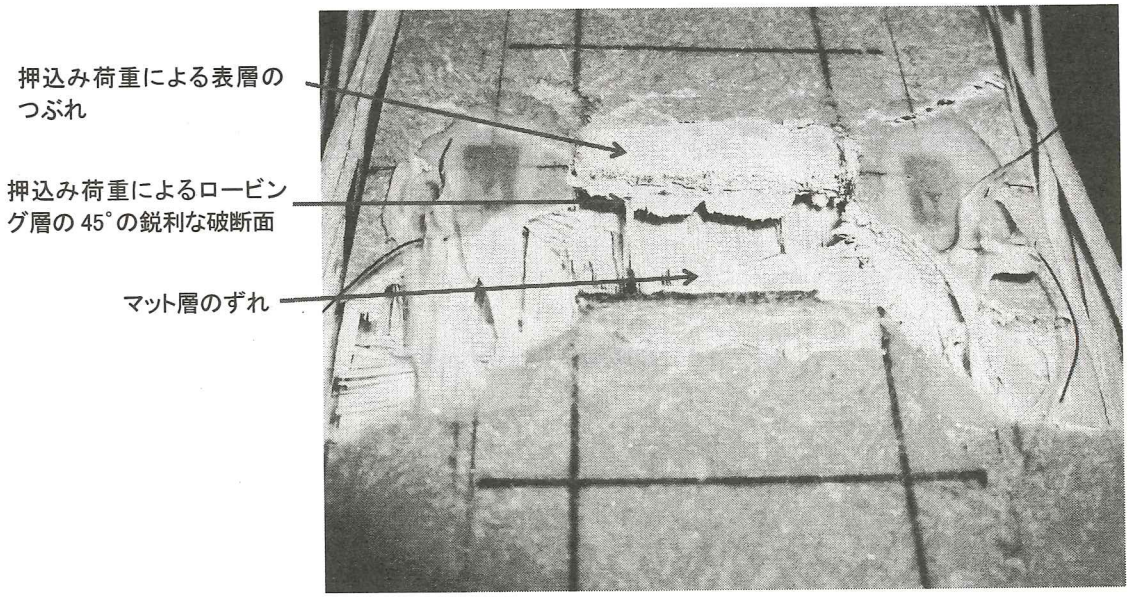


図-7.3.1　表面疵深さと引張破断荷重の関係

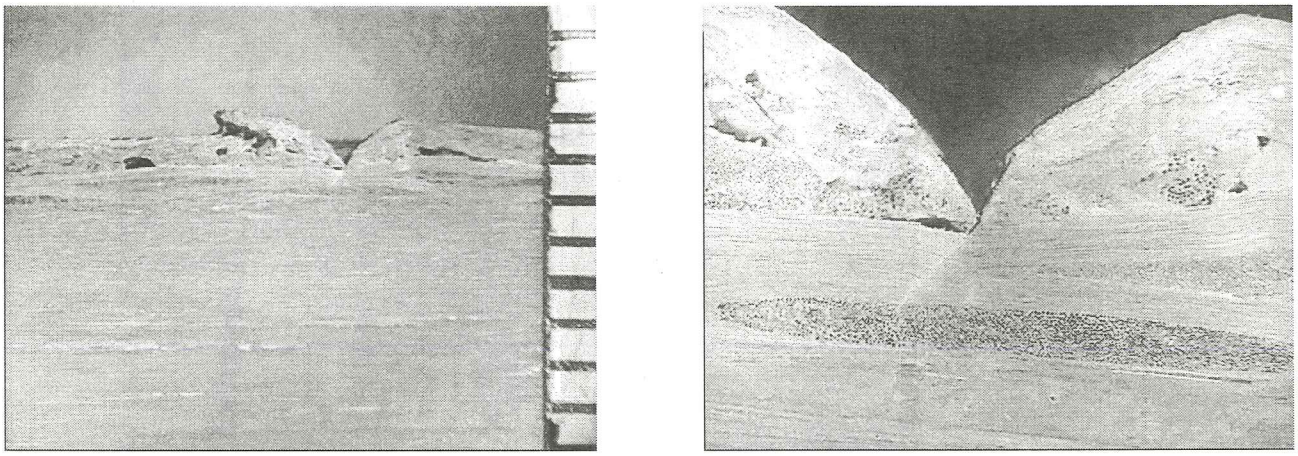


(a)　SD3-4 の例

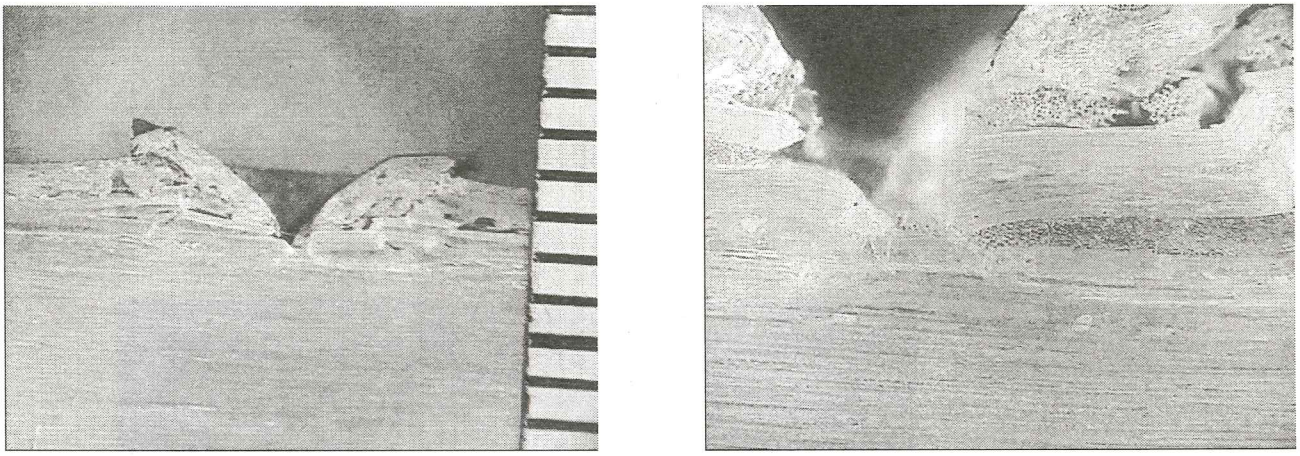


(b)　SW3-5 の例

図-7.3.2　疵深さ 3*mm の破断後の状況



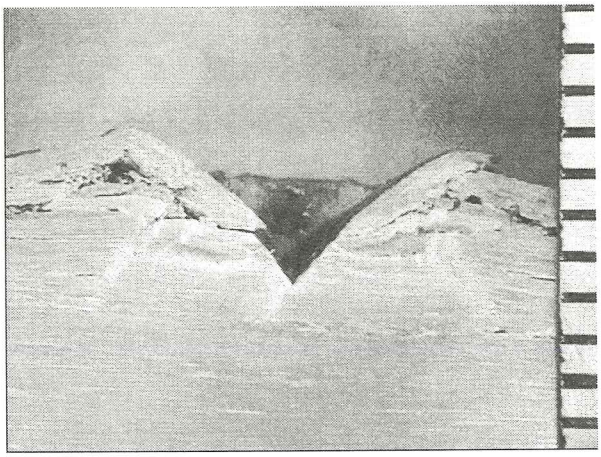
(a)　1*mm の表面疵　(左：×20，右：×100)



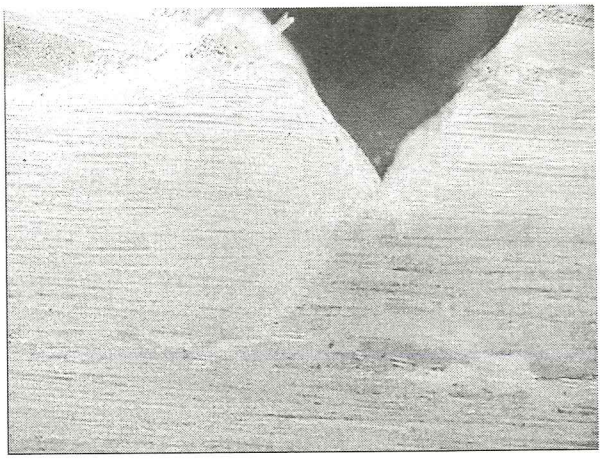
(b)　2*mm の表面疵　(左：×20，右：×100)

※倍率×20 の写真の右端目盛は 1 mm

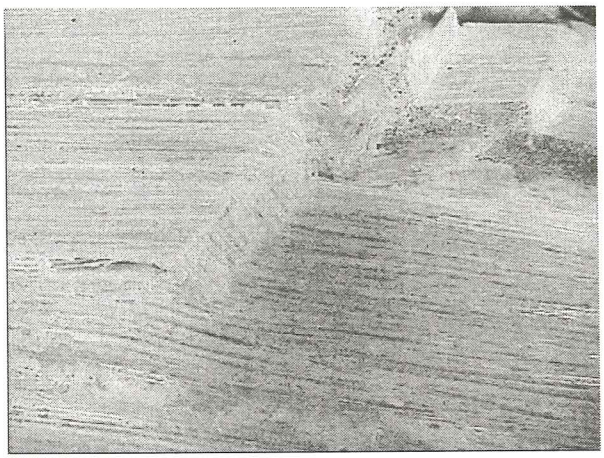
図-7.3.3　顕微鏡による断面観察



表面疵全体（×20）



中央拡大（×100）

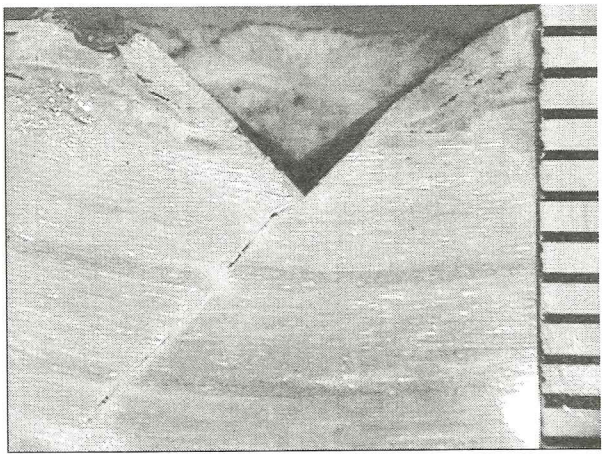


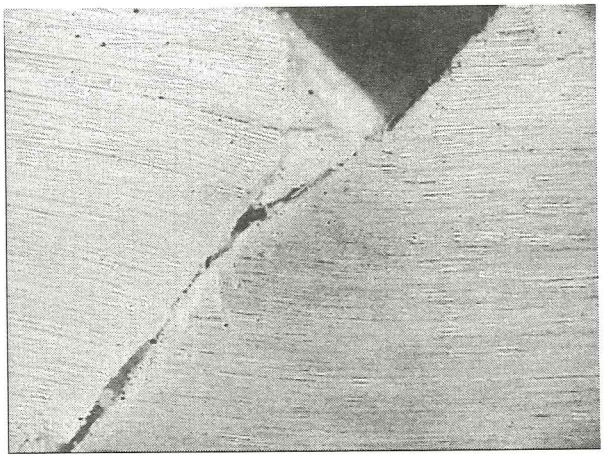
左側拡大（×100）



右側拡大（×100）

(c)　3*mm の表面疵





(d)　5*mm の表面疵（断面観察のみ，左：×20，右：×100）

※倍率×20 の写真の右端目盛は 1 mm

図-7.3.3　顕微鏡による断面観察（続き）

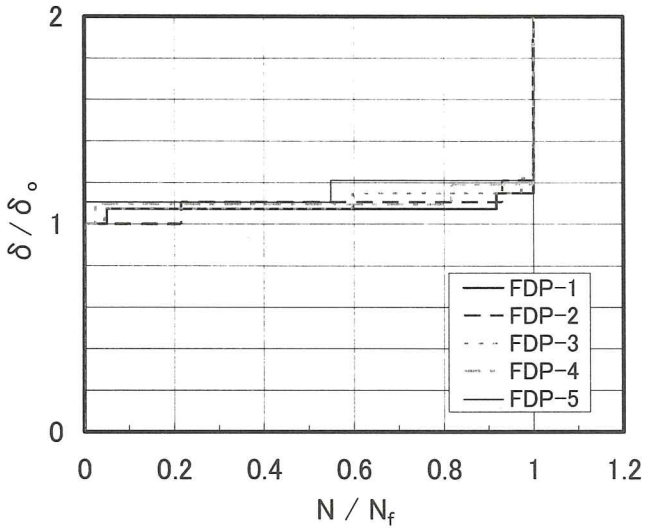
7.4　疲労過程と表面疵の影響

図-7.4.1 に疲労試験開始時の変位で無次元化したクロスヘッド変位(振幅)と破断時の繰返し数で無次元化した繰返し数の関係を示す。繰返し載荷とともに徐々に変位が増加して，初期の変位から概ね 2〜4 割増加したところで破断するという点では，FDP，FD3，FDE の各シリーズともに応力比に関係なく類似していた。FD3 の場合は，試験片ごとに破断までの挙動のばらつきが FDP，FDE に比べて大きい傾向が見られた。FD3 は疵深さのばらつきとそれに伴う内部損傷程度のばらつきが，これらの疲労挙動のばらつきに現れたものと考えられる。また，FDP は破断時の変位増加が 2 割程度で FD3，FDE よりもやや小さい傾向が見られた。

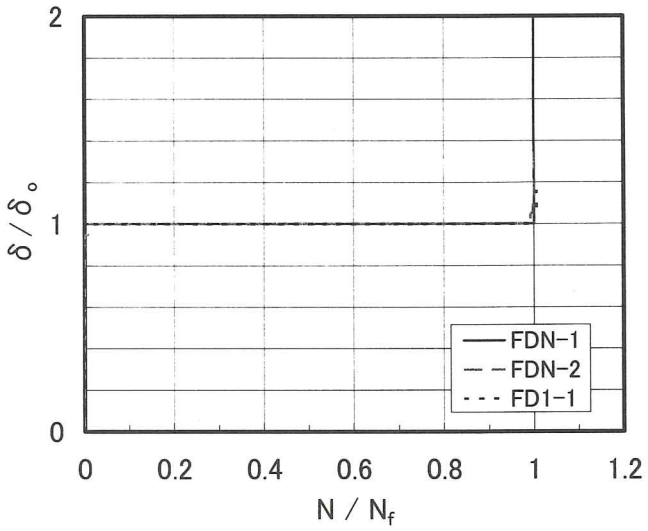
これらの変位の増加の原因は，7.2 で述べた静的載荷試験時の破壊過程や既往の研究で見られた 3 段階の破壊過程(2 章)と類似する部分があると考えられ，マトリックスの微細なひび割れやガラス繊維との付着切れに起因した弾性係数の低下とともに，SP250 のように表層をもつ GFRP 厚板の場合に特有の，応力集中の高い箇所での表層のひび割れなどの局部的な損傷の蓄積が起因していたと考えられる。

しかし，疲労試験の破壊状況は，表面疵からひび割れが発生するもののロービング層の終局破断がこの表面疵付近以外の箇所(チャック部)で生じるものが多く(図-7.4.2)，断面欠損部近傍で破断した表面疵 3*mm の静的試験の場合(図-7.4.3)と異なっていた。疲労試験の場合，表面疵から応力集中の影響により早期に表層のひび割れが発生した後，ひび割れた側(A 面)の表層とひび割れていない部分との剥離が徐々に伸展して，FDN(試しに行ったもの)の疲労試験と同様の状態(チャック部が最も厳しい状態)に近づいていったものと推察される。

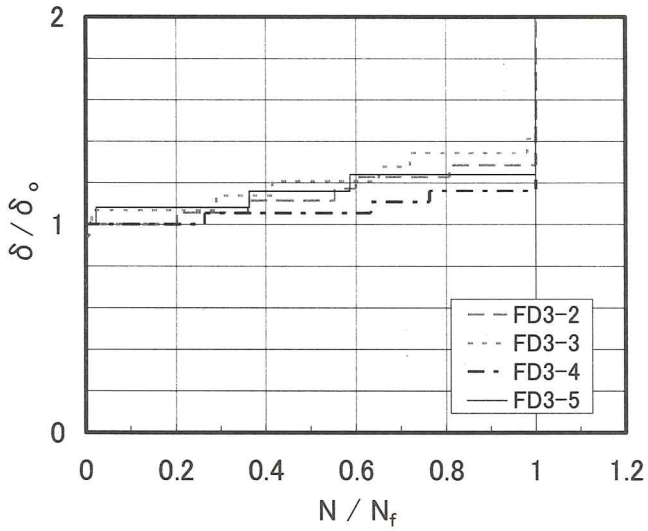
図-7.4.4 に，エンドミル試験片 FDE と表面疵 3*mm の試験片 FD3 の結果を，同じ載荷応力比同士を対比して示す。載荷応力比が 0.28，0.35 の場合は両者の差は見られなかったが，0.3，0.4 の場合は FDE の方が短期間で破断した。



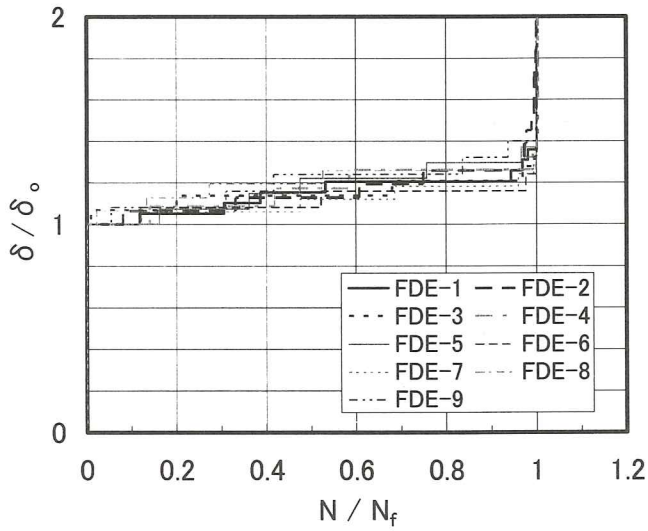
(a) 疵なし (FDP シリーズ)



(b) 参考 (FDN, FD1)



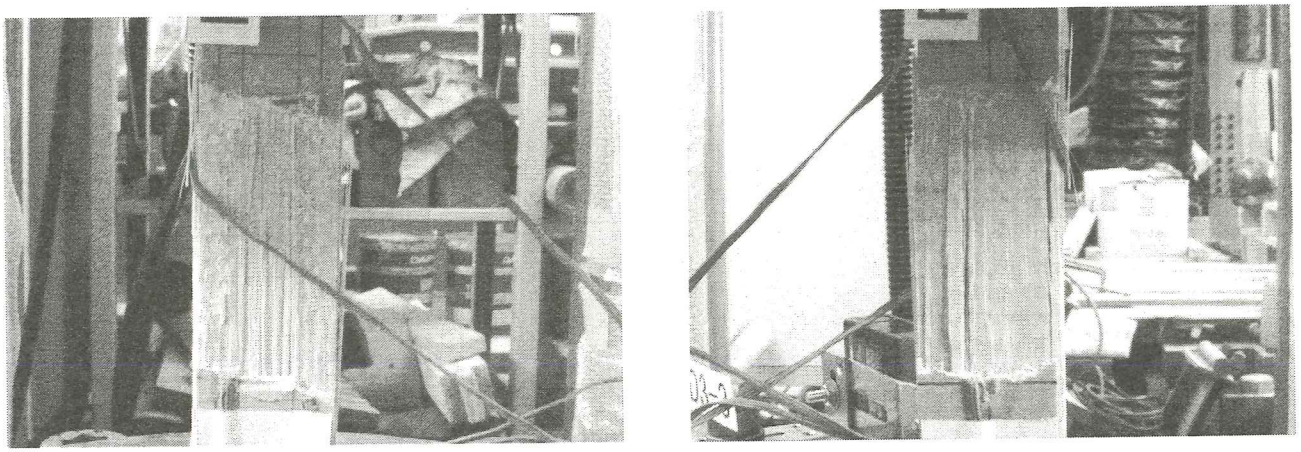
(c) 表面疵 3*mm (FD3 シリーズ)



(d) エンドミル (FDE シリーズ)

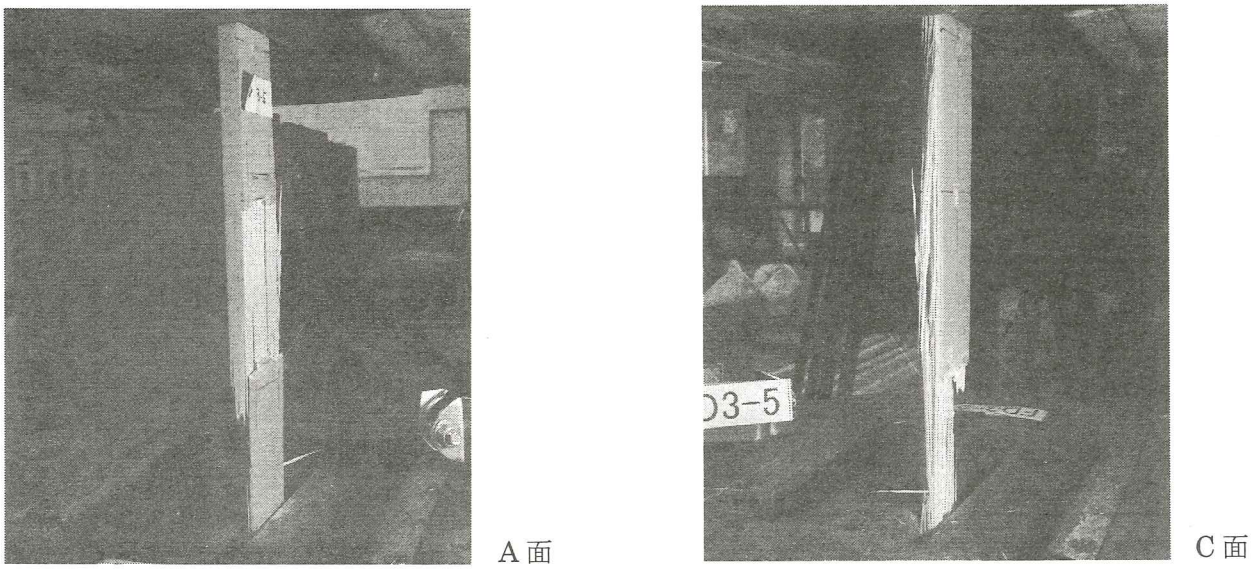
δ : クロスヘッド変位振幅
δo : 疲労試験開始時のクロスヘッド変位振幅
N : 繰返し数
N_f : 破断時の繰返し数

図-7.4.1 クロスヘッド変位の経時変化



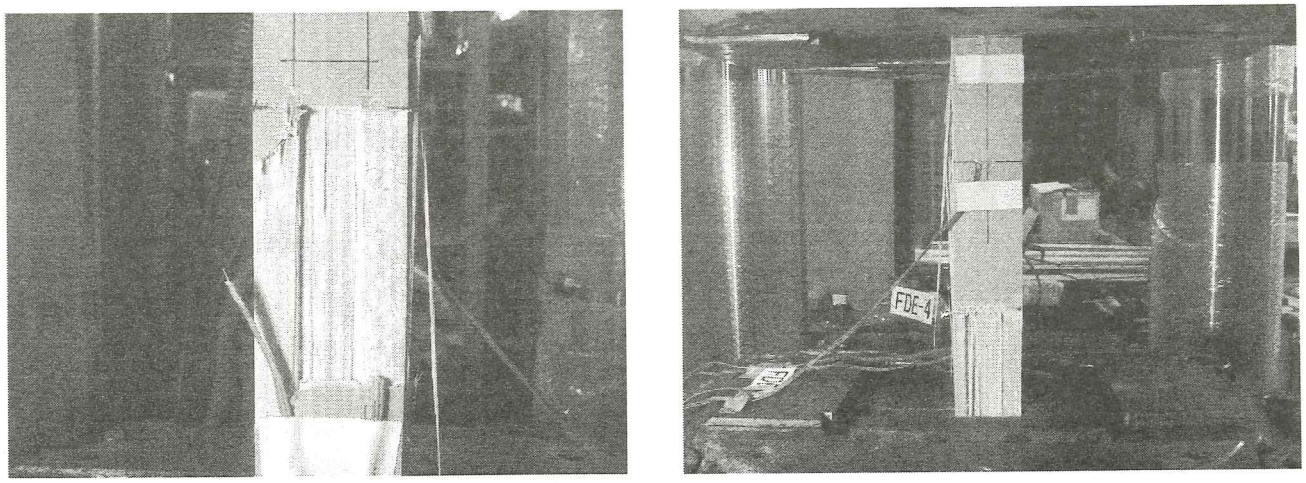
A 面　　C 面

(a)　FD3-3（両面とも中央で破断）



A 面　　C 面

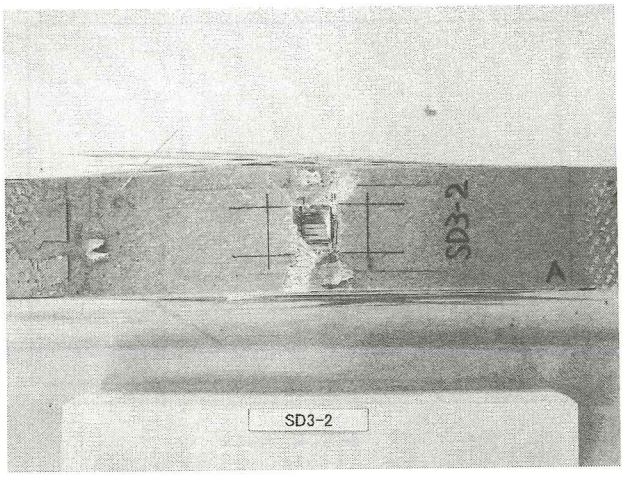
(b)　FD3-5（裏面はチャック部で破断）



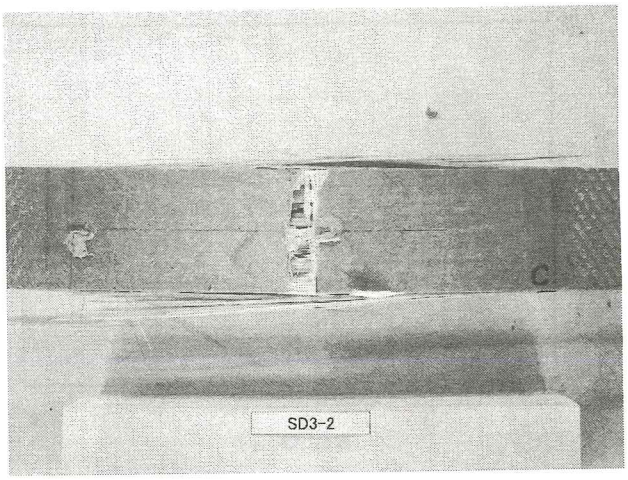
A 面　　C 面

(c)　FDE-4（裏面はチャック部で破断）

図-7.4.2　疲労試験における破壊状況

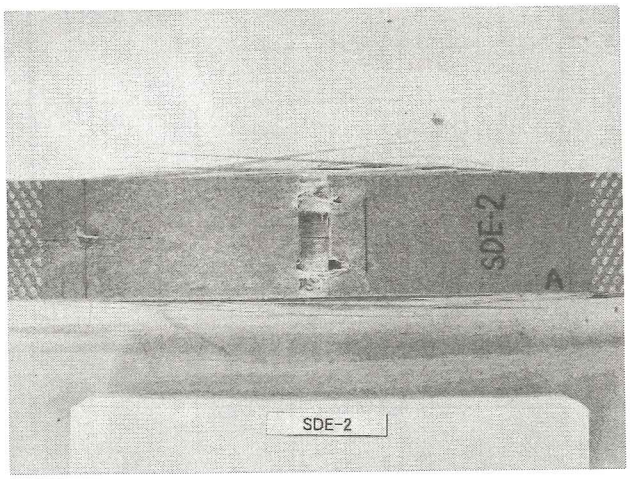


A 面

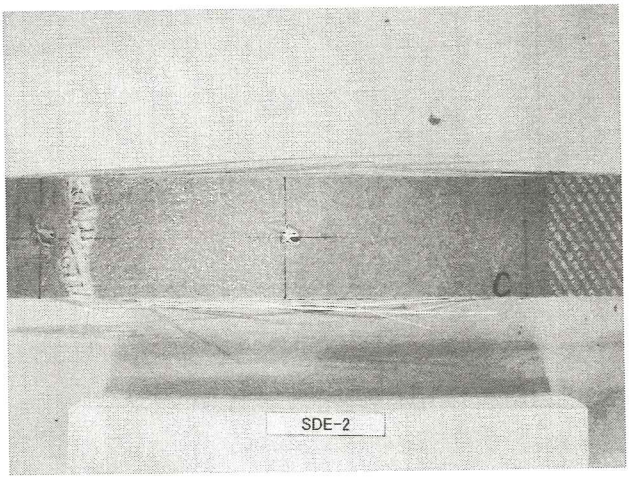


C 面

(a)　SD3-2（両面とも中央で破断）



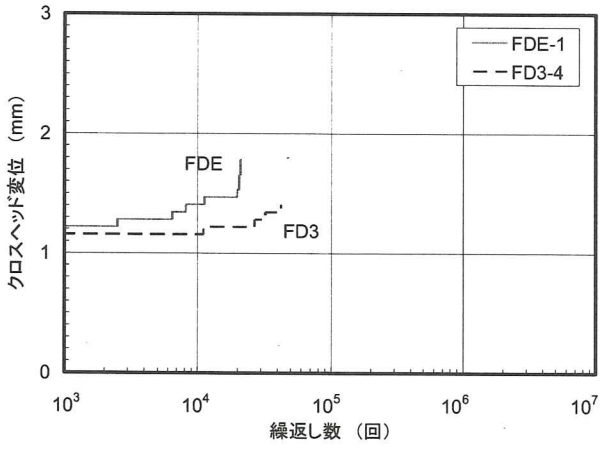
A 面



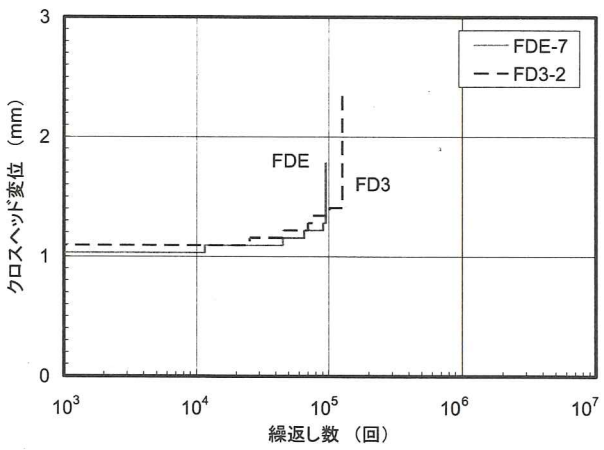
C 面

(b)　SDE-2（裏面は断面欠損部ではないがチャック部ではない）

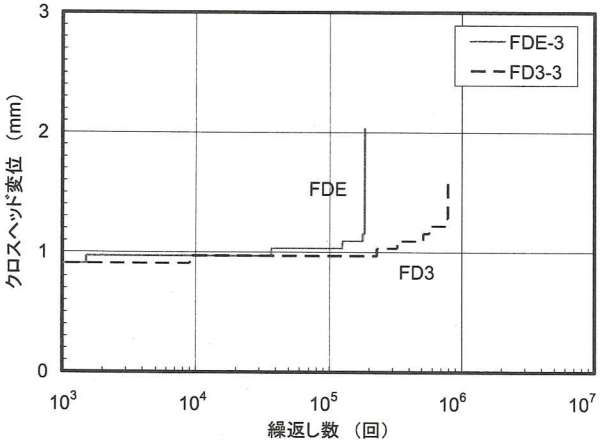
図-7.4.3　静的載荷試験における破壊状況



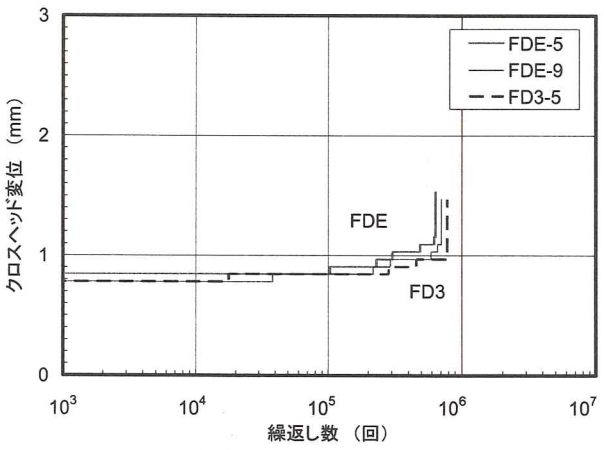
(a) 載荷応力比 0.40



(b) 載荷応力比 0.35



(c) 載荷応力比 0.30



(d) 載荷応力比 0.28

図-7.4.4　FDE と FD3 のクロスヘッド変位の比較

7.5　表面疵が疲労強度に及ぼす影響

図-7.5.1a に疲労試験結果を応力比 SR_n (= $P_1/A_n/\sigma_B$, 表-5.3.1 より σ_B = 495 MPa)で整理した S-N 線を示す。図中，FDP, FD3, FDE それぞれのシリーズごとの回帰式を示す。FD3 の結果がやや小さいものの，各シリーズの間に顕著な差は見られない。図-7.5.1b は，図-7.5.1a のデータと同じであるが，FD3-1 及び FD3-1R を除く全データで回帰式を示す(SR_n－logN)。また，図-7.5.2 は図-7.5.1 と同じデータを両対数軸上にプロットしたものである(logSR_n－logN)。応力比 SR_n で整理した場合，各シリーズの結果を同一の S-N 線で表せることがわかった。また，片対数(図-7.5.1b)，両対数(図-7.5.2a)のいずれの整理でも応力比と繰返し数の間に明確な直線関係が認められた(相関係数はいずれも 0.94)。両対数軸で整理した場合の回帰式を以下に示す。

$$SR_n = 1.15\ N^{-0.093} \qquad (3)$$

この結果は，疲労強度に関して，断面欠損による平均的な応力の増加は影響を及ぼしていたが，応力集中による局部応力はあまり影響していなかったことを示唆している。疲労試験において表面疵付近で比較的早期に表層のひび割れが発生したが，終局破断に対してはロービング層があるために表層のひび割れがほとんど影響しなかったものと考えられる。

表面疵 3*mm の場合の静的破断荷重はこの 45° のひび割れのためにエンドミル加工による疵深さ 5 mm の場合と同等か，それよりさらに低下していた(前掲図-7.3.1)。疲労試験においても 3*mm の表面疵のある試験片は，静的載荷試験と同様に，目視で確認できるみかけの疵だけでなく，ロービング層に 45° のひび割れが確認された(図-7.5.4)。しかし，SR_g で整理した疲労試験結果(前掲図-6.4.1)では FD3 は SDE よりも明らかに疲労強度が高い傾向が見られ，図-7.5.2a に示した SR_n で整理した疲労試験結果では，わずかに FD3 の疲労強度が低いものの，この 45° のひび割れの影響を考慮しなくとも，概ね 1 本の回帰式で表すことができた。3*mm の表面疵の場合，ロービング層の一部に破断が見られたので，その深さを断面観察の結果などから 1 mm と仮定して考慮した場合の S-N 図を図-7.5.2b に示す。ロービング層の中での断面欠損は 20 mm^2 であり，同図からも疲労強度に及ぼす影響はわずかであったことがわかる。また，45° のひび割れは鋭利であったが，ロービング層内の繊維間のすべりが生じるため，ひび割れ先端の応力集中の影響も軽微なものであったと考えられる。

FD3，FDE ともに疲労破断がチャック部以外で見られたものもあるが，S-N 図上で破壊形態による顕著な差は見られなかった。

図-7.5.3 に FD3-1，FD3-1R と FD3-3 のクロスヘッド変位の推移を示す。表-7.5.1 に両試験片の板厚測定値と表面疵深さを抜粋して再掲する。6.3 で述べたとおり，低い応力範囲で疲労試験した後に再試験した FD3-1R は，FD3-3 よりもわずかにクロスヘッド変位が小さかったにもかかわらず，FD3-3 よりも少ない繰返し数で破断した。しかし，前掲図-7.5.2 の S-N 線図上で見ると，ばらつきの範囲であったことがわかる。マイナーの累積疲労被害則[7.8]に基づくと，式(4)より FD3-1 の $SR_n = 0.11$ での約 420 万回の繰返し載荷履歴は，$SR_n = 0.32$ での等価換算繰返し数にしてわずか 31 回に相当し(表-7.5.2a)，FD3-1R にまったく影響しなかったことがわかる。FD3-1R と FD3-3 の違いは，素材や表面疵深さなどのばらつきによるものであったと考えられる。

$$N_2 = (S_2 / S_1)^{1/m} \cdot N_1 \qquad (4)$$

ここに，N_2：等価換算繰返し数

S_2：等価換算する載荷応力レベル

S_1：実際の載荷応力レベル

N_1：S_1 で行った実際の繰り返し数

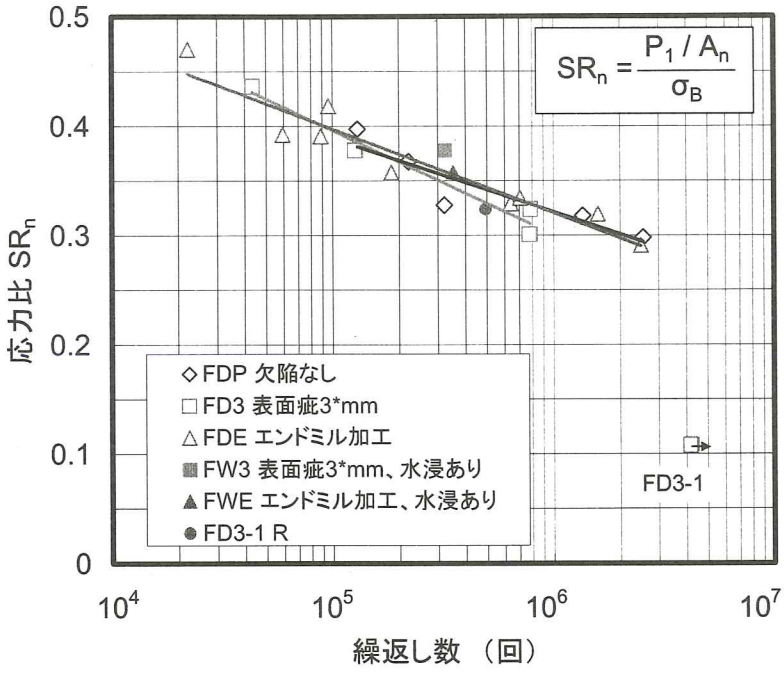
m：S-N 線の傾き（ここでは，$m = -0.093$）

表-7.5.1　FD3-1, 3 の諸元(実測値)

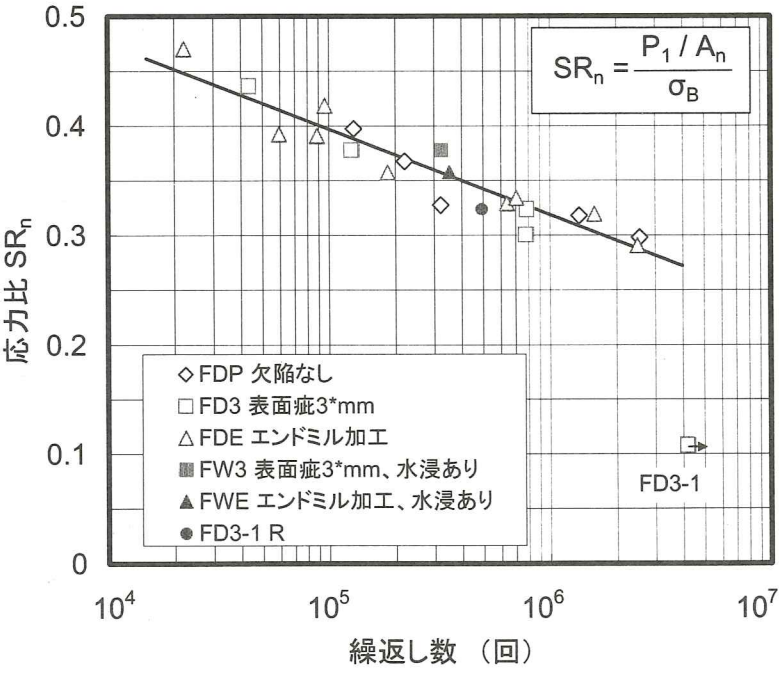
試験片	板厚 (mm)	表面疵深さ (mm)
FD3-1 (FD3-1R)	12.11	2.50
FD3-3	11.98	2.56

表-7.5.2　FD3-1 の等価換算繰返し数

試験ケース	純断面積 A_n (mm^2)	荷重 P (kN)	平均応力 $\sigma_n = P/A_n$ (MPa)	応力比 $SR_n = \sigma_n / \sigma_B$	実際の繰返し数 N_1 (回)	SR_n=0.32 としたときの等価換算繰返し数 N_2 m = −0.093
FD3-1	564	30.1	53.4	0.11	4188320	31
FD3-1R	564	90.4	160.3	0.32	493500	493500
				Σ=	4681820	493531

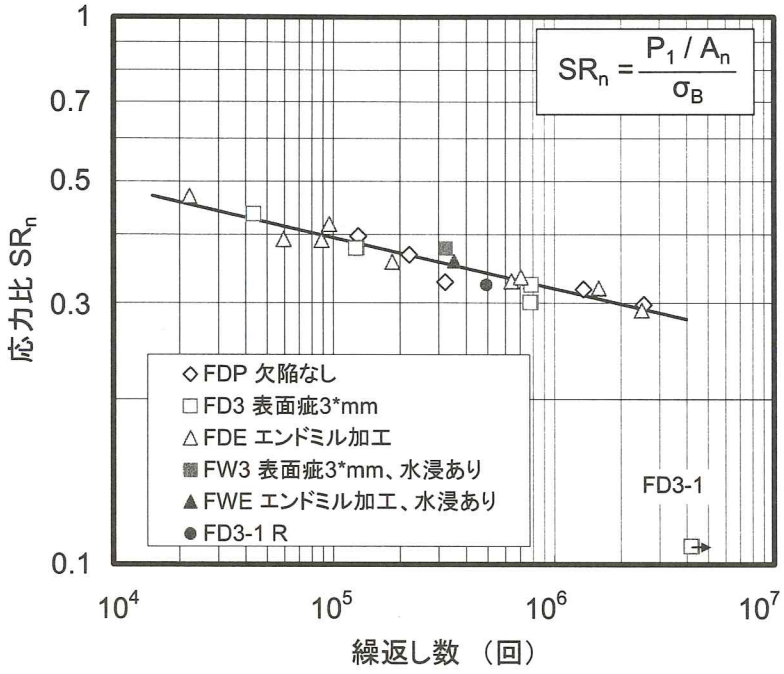


(a) 各シリーズの回帰式



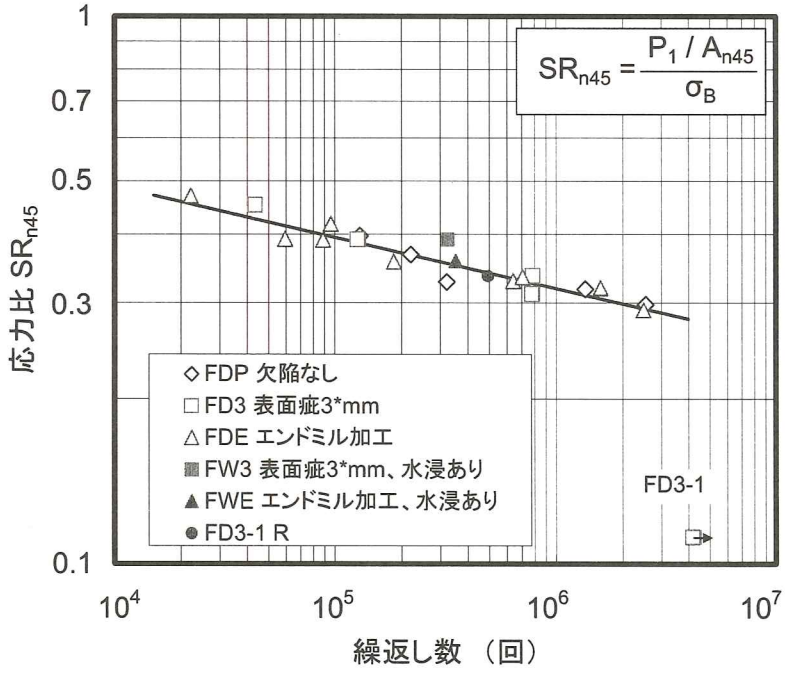
(b) 全データの回帰式

図-7.5.1　応力比 SR_n と破断までの繰返し数の関係



(a) 45° のひび割れ考慮しない場合

(図-7.5.1b を両対数軸で表示した)



(b) 45° のひび割れ考慮した場合

(A_{n45} は 45° のひび割れによる断面欠損を減じた純断面積,

図中の回帰式は図-7.5.2a と同じ式(3))

図-7.5.2　応力比 SR_n と破断までの繰返し数の関係

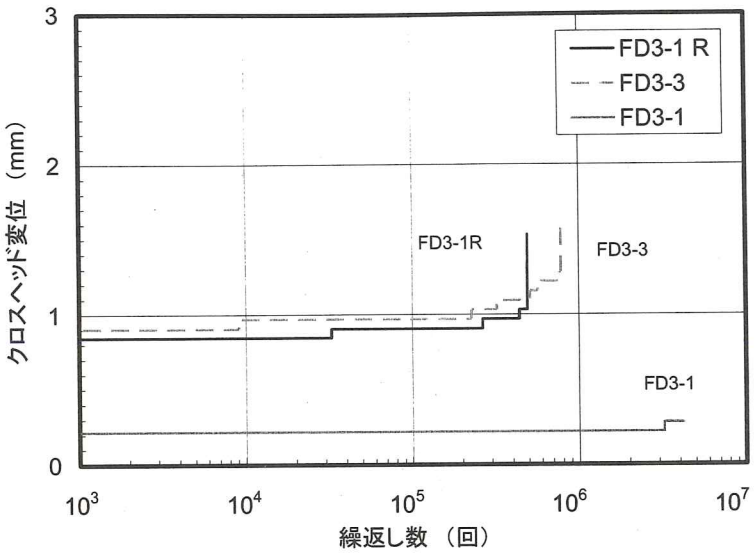
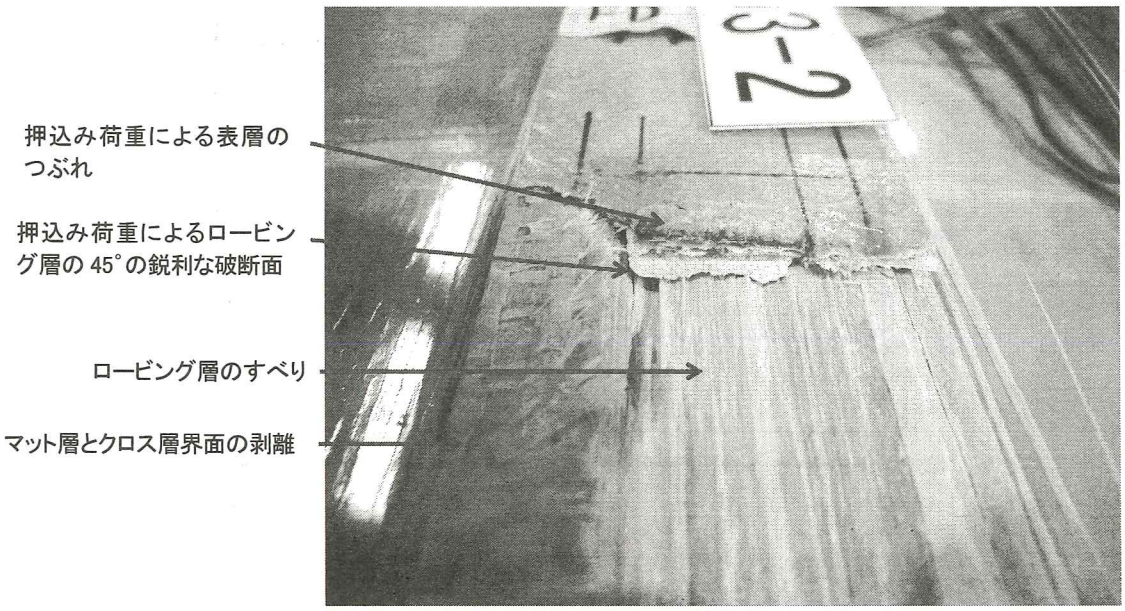
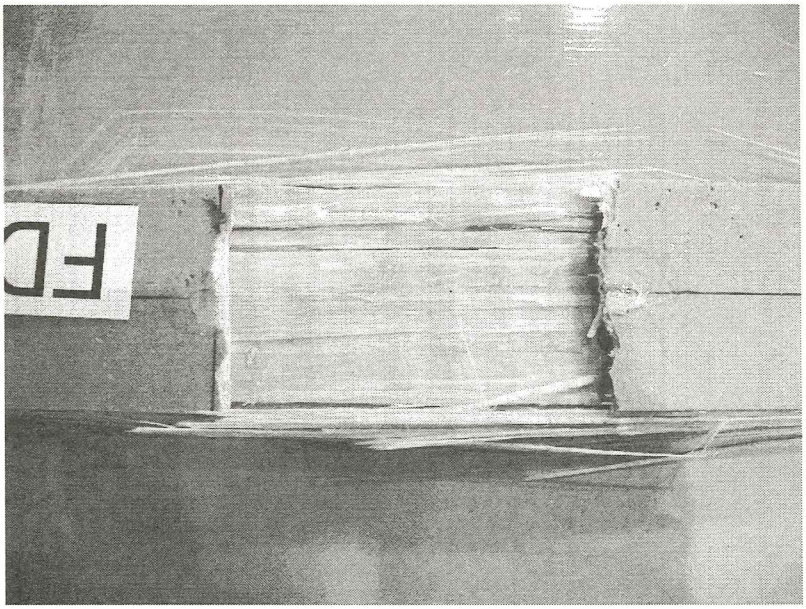


図-7.5.3　累積疲労被害の程度

(低い応力範囲で疲労試験した後に再試験した FD3-1R と
同等の応力範囲で疲労試験した FD3-3 との比較)



(a)　A 面



(b)　C 面

(FD3-2，FD3-3 は C 面も表面疵のある断面付近で破断した)

図-7.5.4　疵深さ 3*mm の破断後の状況（FD3-2 の例）

7.6 水中浸漬の影響

載荷試験前に行った1週間の常温水中浸漬による吸水率は，押込み荷重による表面疵を有する試験片の吸水率が0.1～0.2 %，疵なしの試験片で0.05～0.1 %程度であった。水分の主要な経路として，側面からクロス層の直角方向繊維に沿った侵入，同じく側面から層間に沿った侵入及び表面疵からの侵入が考えられる。表面疵のない試験片は側面からの吸水が比較的容易であったと考えられる。また，表面疵のある試験片では疵からの吸水が概ね吸水量全体の半分程度であった。その後の3週間の乾燥によって吸水率は0.01 %以下に低下していた。以下に静的載荷試験及び疲労試験における水中浸漬の影響について整理しておく。

(1) 静的挙動への影響

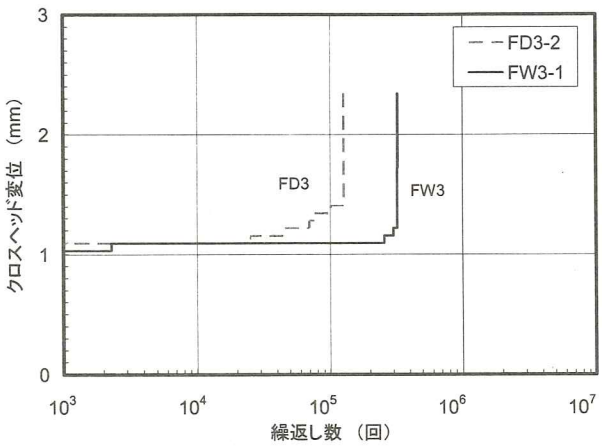
今回の水浸の範囲では，水浸による破断荷重(最大荷重)への影響は見られなかった(前掲表-5.3.1)。

水浸なしかつ深い表面疵がない試験片の場合，表層の破断後に再び荷重上昇の傾向が見られた(前掲図-5.1.1)。この現象は，表層とロービング層の伸び性能の差によると推察した。しかし，水浸した試験片(以下，水浸試験片)ではこの荷重再上昇はまったく見られなかった。このことから，わずか1週間の常温水浸であっても水浸を一度経験することによって，表層とロービング層の付着に何らかの変化が生じていたものと推察される。

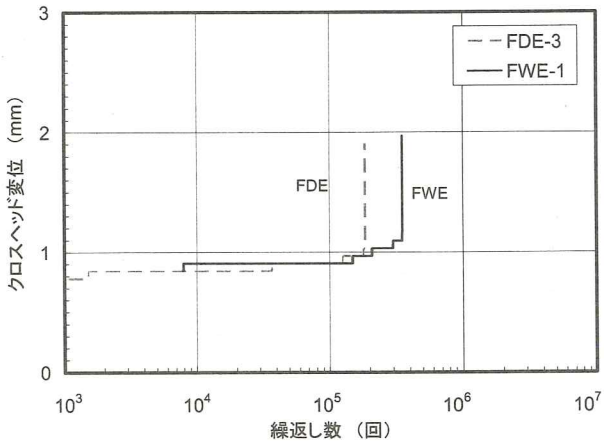
水浸試験片の弾性係数は水浸なしの試験片よりもやや小さい傾向が見られた(前掲図-5.4.2)。水浸試験片の試験時の湿度が水浸なしの場合に比べて高かったことも(前掲図-5.3.1)，多少影響したかもしれない。

(2) 疲労挙動への影響

疲労試験において水浸試験片は2本のみであったが，水浸試験片は同じ応力レベルで試験した水浸のない試験片に比べて疲労寿命が長い傾向が見られた(前掲図-7.5.2)。図-7.6.1に，表面疵3*mmとエンドミル加工について疲労試験中のクロスヘッド変位の変動における水浸の影響を示す。疲労試験前の水浸の有無以外は同一の試験条件でそれぞれ対比している。上述のとおり，水浸を経験した試験片の方が破断までの寿命が長いことがこれらの図でも見ることができる。途中までの変位の変動は水浸の有無に関係なくほとんど同じであったが，破断直前の変位の急な増加までの寿命は水浸した試験片の方が長いことがわかる。FW3-1はFD3-2に比べて表面疵が浅かったのでその影響は無視できないが，今回の試験の範囲では少なくとも水浸による疲労強度の顕著な低下は見られなかった。

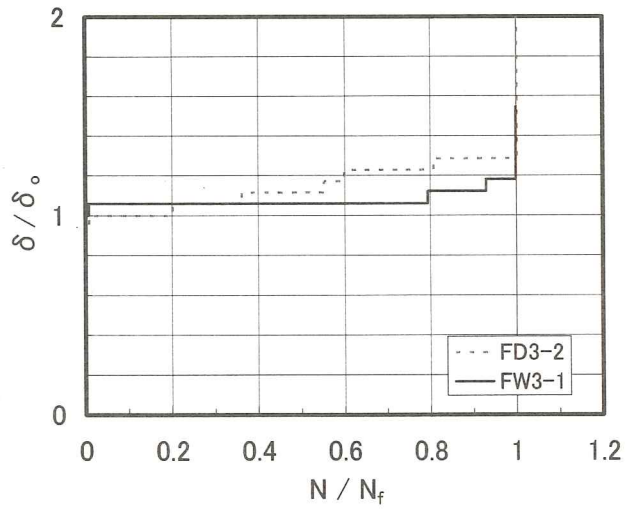


(a) 表面疵 3*mm

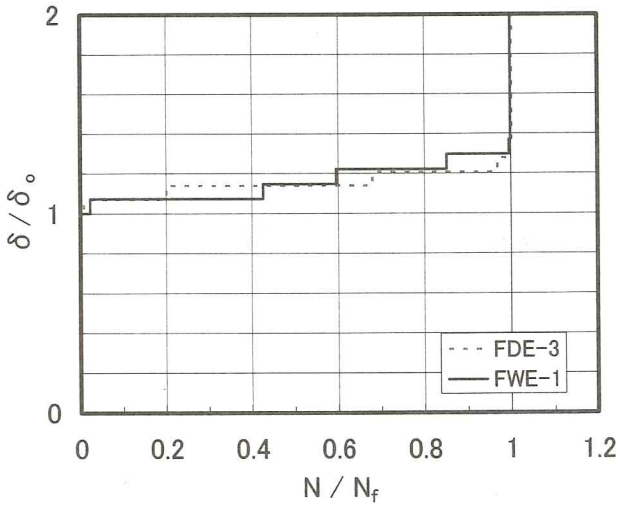


(b) エンドミル

図-7.6.1　試験前の水浸が疲労挙動に及ぼす影響



(a) 表面疵 3*mm



(b) エンドミル

(参考)　表面疵深さ FD3-2　2.50 mm,　FW3-1　2.06 mm
FDE-3　4.94 mm,　FEW-1　4.94 mm

図-7.6.2　試験前の水浸が疲労挙動に及ぼす影響

7.7　測定した表面ひずみの有効性

GFRP 厚板の挙動を把握する上でひずみ測定は不可欠であるが，表層に貼り付けたひずみゲージで測定したひずみ値の有効性は，試験当初，明確でなかった。補足のために実施した貫通孔を有する試験片の応力集中が鋼材の場合と同様に既往の応力集中でよく表されていたことから，表層のひび割れ，剥離などの変状が生じるまでは，板厚方向に平均的なひずみ挙動を把握できることが確認できた(7.1 節)。

疲労試験中，ひずみゲージの監視を行ったが，比較的早期にひずみ値が大きく変化した。試験開始直後の段階で，荷重，変位，ひずみそれぞれの応答波形はいずれも明確なサインカーブであることが確認された(図-7.7.1)。

図-7.7.2 に，疲労試験中にヒストグラムレコーダで監視したひずみゲージ貼付位置各部のひずみ範囲とそのひずみ値の監視により判別した表層の変状発生までの繰返し数の関係を示す。これらのデータは表面疵のない一般部でのひずみ測定結果及び表面疵周辺の比較的ひずみ値の高い箇所での測定結果を含んでいる。図中，回帰式（式(5)，FD3-1(1 回目)を除く）を合わせて示す。両者は両対数軸上で直線関係であることがわかった(相関係数 R = 0.90)。

$$\Delta \varepsilon = 14800\, N_s^{-0.13} \qquad (5)$$

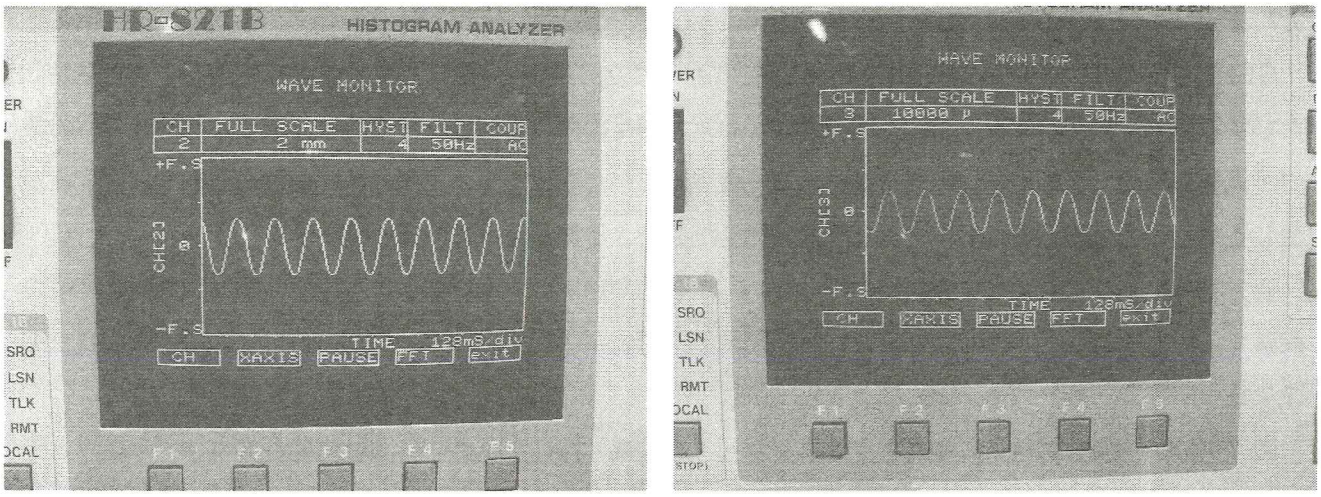
ここに，$\Delta \varepsilon$ ：ひずみ範囲（μ）

N_s：ひずみの監視により判別した表層の変状発生までの繰返し数

3*mm の表面疵の背面のひび割れ発生までの繰返し数(図中 FD3 の ε 8，△印)は他の測定結果に比べてやや早い傾向が見られた。図-7.7.3 に 3*mm の表面疵の背面のひび割れ発生状況を示す。試験開始前に，試験片表面に明確な損傷は目視では認められなかったが，押込み荷重負荷時に最も大きい反力を受ける箇所であったので，背面表層の内部に微細な損傷が生じていたのかもしれない。

図-7.7.4 に，図-7.7.2 に示した表層ひび割れ発生までの繰返し数と対比して，表層のひび割れを目視で確認した時点の繰返し数を示す。目視観察が 1 日に数回程度であったことから，実際に表層にひび割れが生じてからかなり遅れて発見していたことがわかる。このことから，試験開始後早期に見られたひずみの変化は，GFRP の表層にひび割れか目視では判別し難い損傷の兆候が生じていたことによるものであったと考えられる。

図-7.7.5 に，図-7.7.2 の結果と対比して，破断までの繰返し数をひずみ範囲との関係で示す（図中，楕円で囲んだデータ)。一つの試験片で複数のゲージを貼り付けていたので，一つの破断までの繰返し数に対してゲージ枚数分のデータがプロットされている。当然ながら，全体としてはばらついたグラフとなっているが，概してみると，表層のひび割れ発生までの繰返し数と試験片が破断するまでの繰返し数の間に 1～2 桁の差があったことがわかる。クロスヘッド変位の変化で，初期の段階に見られた 1～2 度目の変化の時点(図-7.4.1 で N/N_f が 0.1 以下の範囲)で既に表層の損傷が生じていたことがわかる。このことは，SP250 のような表層をもつ GFRP 厚板の疲労挙動に関する一つの特徴であると考えられる。また，SP250 のような GFRP 厚板のひずみ監視において，表層破壊に注意する必要がある。その際，それぞれの材料構成における式(5)のような S-N 線を把握しておく必要があり，SP250 に関しては式(5)が参考となる。



(a) 変位の応答波形　　(b) ひずみの応答波形

図-7.7.1　疲労試験開始時における応答波形の確認

(注) 測定状況を確認するため，試験開始時に各センサの応答状況を確認した。

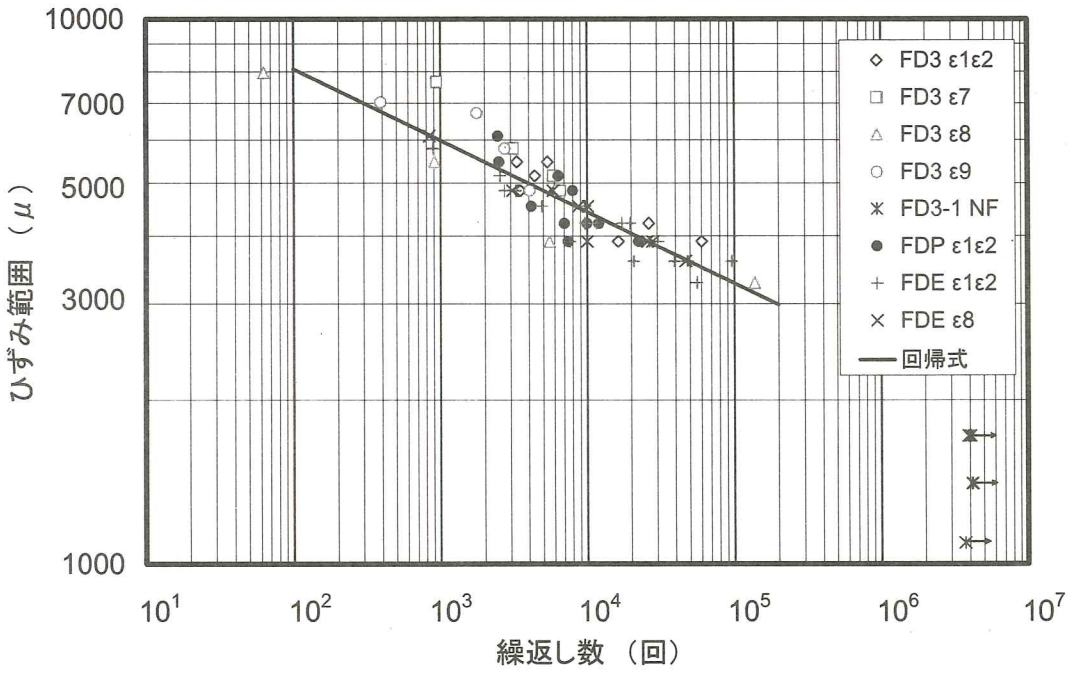
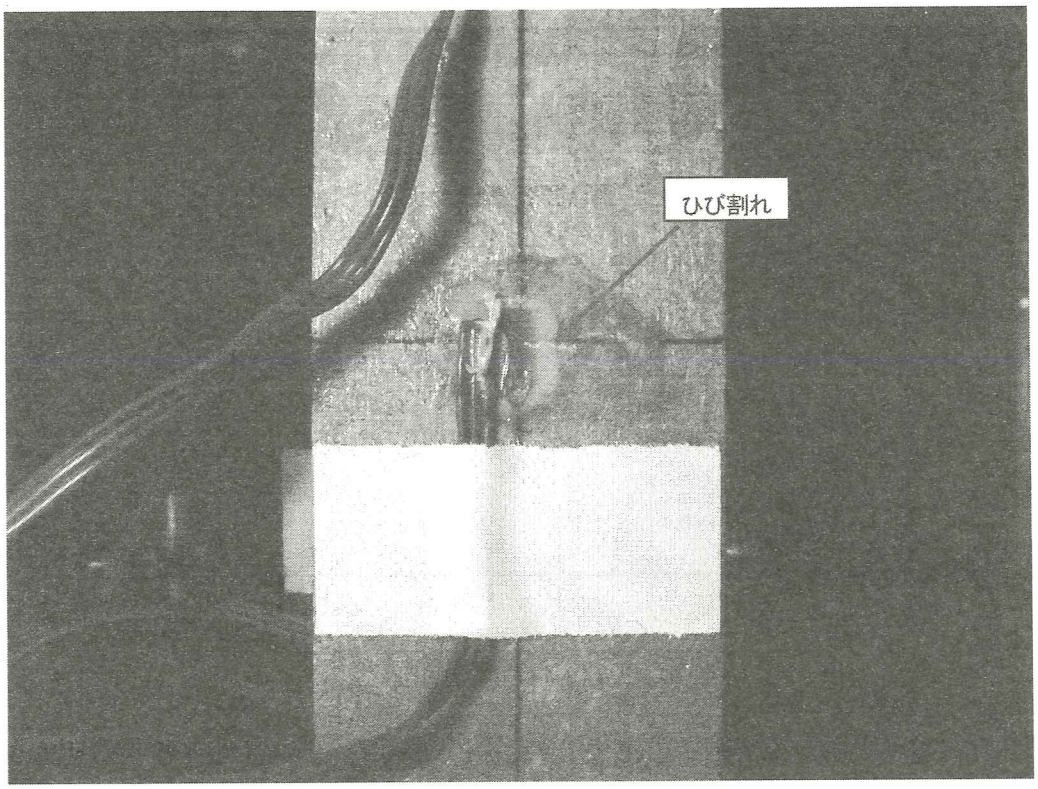
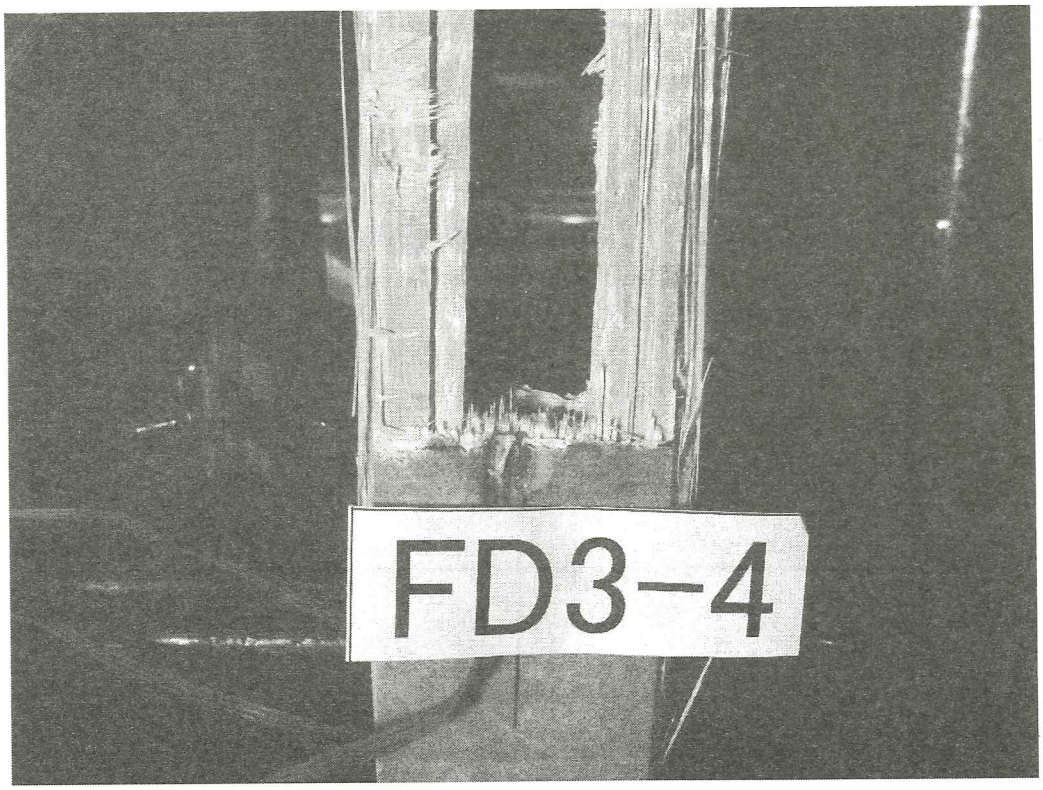


図-7.7.2　疲労試験中に監視した各部のひずみ範囲と
そのひずみ値の監視により判別した表層破断までの繰返し回数の関係



(a)　表面疵背面のひび割れ状況（約 30000 回時）



(b)　破断後の状況（43320 回）

図-7.7.3　表面疵背面のひび割れ（FD3-4 の例，破壊形態としては特異な事例）

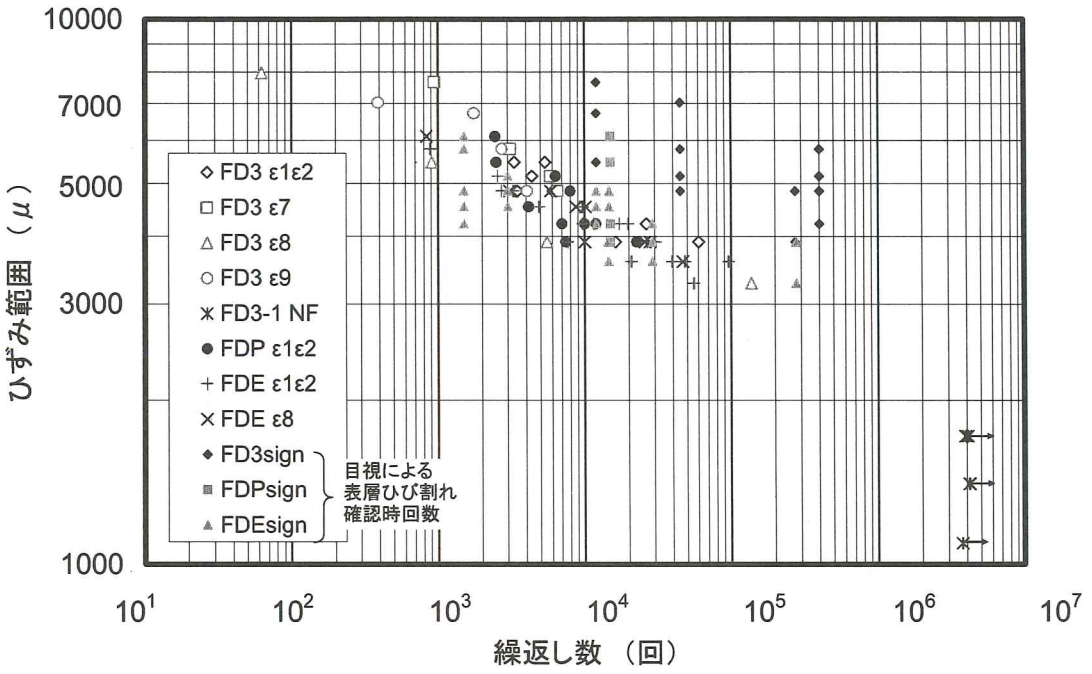


図-7.7.4　表層破断までの繰返し回数と表層の変状を目視で確認した時点での繰返し回数

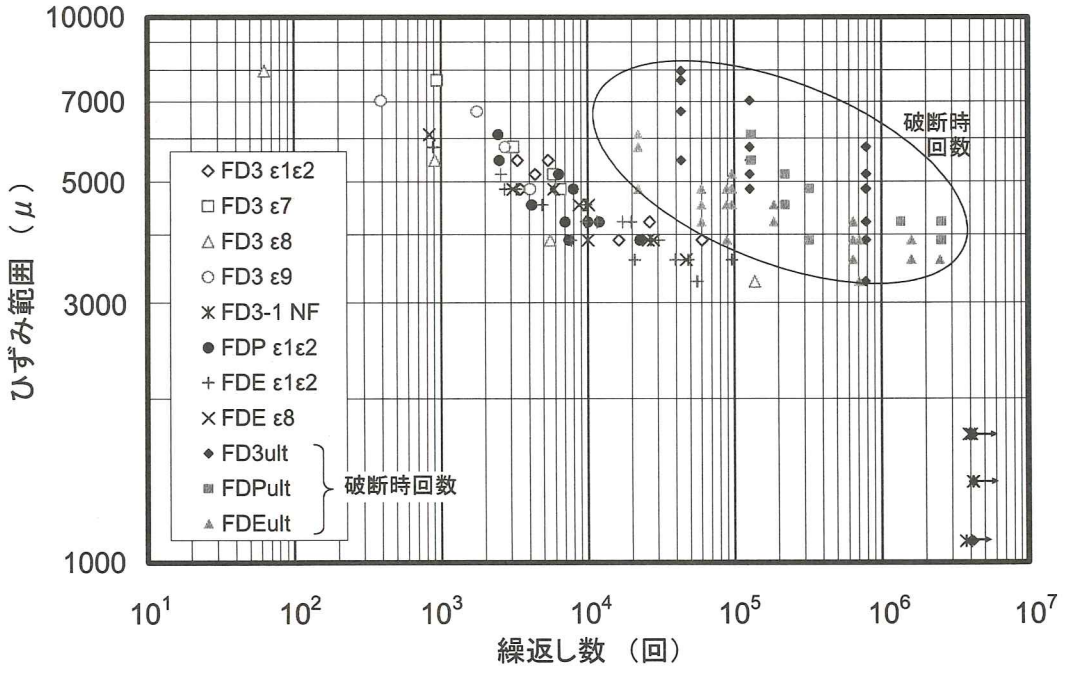


図-7.7.5　表層破断までの繰返し回数と試験片破断までの繰返し回数

7.8　表面疵の影響に関する鋼材との比較

参考として，表-7.8.1 に GFRP 厚板の表面疵が機械的性質に及ぼす影響を鋼材の性質と対比して示す。

表-7.8.1　GFRP 厚板の表面疵が機械的性質に及ぼす影響（鋼材との比較）

比較項目	GFRP 厚板(SP250 の場合)	普通軟鋼
静的挙動への影響（破断強度を除く）	応力集中の影響により，低い荷重で表層にひび割れが生じる。	応力集中の影響により，部分的な降伏が生じる。
静的破断強度の低下	応力集中率の影響により強度低下が大きい。	ほとんど影響しない。
疲労挙動への影響（疲労強度を除く）	応力集中の影響により，比較的早期に表層にひび割れが生じる。	応力集中の影響により，疲労亀裂が生じる。
疲労強度の低下	断面欠損に伴う平均応力の増加が影響するが，応力集中の影響は小さい。	局部応力の程度に応じて疲労強度が低下する。

8．まとめ

押込み荷重またはエンドミル加工により表面疵を入れた，厚さ 12 mm の引抜成形 GFRP 帯板の静的引張載荷試験及び引張疲労試験を実施した。試験片の一部はそれぞれの試験前に 1 週間の水中浸漬，3 週間の気中乾燥を行った。また，予備検討として，同一ロットの帯板に円孔または長孔の貫通孔を設けた 3 本の試験片の静的引張載荷試験を行った。これらの試験より次の結果を得た。

1) 先端角 90° の加工用鋼材を用いて押込み荷重を試験片表面(マット層表面)に負荷すると，負荷荷重の増加とともにより深い表面疵が生じる。今回の GFRP 材(SP250)の場合，外見で確認できる残存疵深さは押込み荷重約 50 kN までであれば表層(マット層，クロス層，片面あたり 1.7 mm)の範囲にとどまった。しかし，外見上クロス層まで刃先が到達していた試験片を顕微鏡で断面観察したところ，ロービング層繊維の変状(局部曲げ，繊維の切断)が見られた。さらに 80～90 kN までの負荷により，刃先はロービング層に達して，ロービング層に繊維の局部曲げや破断を伴う約 45° (載荷方向に対する角度)のせん断ひび割れが確認された。
2) 引張破断荷重は表面疵深さ（断面欠損）に応じて低下する傾向があることを確認した。特に，疵深さが 3*mm の場合に破断荷重の顕著な低下が見られた。エンドミルで加工した試験片の疵深さは 5 mm であったが，疵深さ 3*mm の破断荷重はばらつきが大きく，エンドミルの結果と同程度か多少低いものもあった。疵深さ 3*mm の破断荷重は，外見で確認できたみかけの表面疵(実測値は平均 2.6 mm)だけでなく，ロービング層の繊維が損傷を受けていたために，みかけの疵深さで推定される破断荷重よりも低下していた。一方，表面疵深さが 1*mm 以下では，損傷がマット層とクロス層のごく一部に入る程度であることと，破断位置が表面疵の存在にほとんど依存していなかったことから，この程度の表面疵は破断強度にほとんど影響しないことがわかった。
3) 疲労試験結果を総断面積 A_g で整理した応力比 SR_g (= $P_1/A_g/\sigma_B$，σ_B：健全な試験片の平均引張強さ，495 MPa)で比較した場合，表面疵 3*mm の FD3 シリーズの疲労強度は疵のない FDP シリーズの試験片よりも明らかに低く，応力比 SR_g で 0.05 程度低下した。前項 2)のとおり，表面疵 3*mm の表面疵を持つ SD3 シリーズの静的破断強度はエンドミルによる表面疵をもつ SDE シリーズの結果と同程度かむしろ低くなるものが見られたが，エンドミル加工した試験片(FDE シリーズ)の疲労強度(SR_g)は表面疵 3*mm の結果(FD3 シリーズ)よりも明らかに低かった。
4) 純断面積 A_n での応力比 SR_n (= $P/A_n/\sigma_B$)で整理した S-N 線では，FD3 の結果がやや小さいものの，FDP, FD3, FDE 各シリーズの間に顕著な差は見られなかった。このことは，疲労強度に関して，断面欠損による応力の増加は影響を及ぼしていたが，応力集中による局部応力はほとんど影響しないことがわかった。
5) 疲労試験中にヒストグラムレコーダで測定した各部のひずみ範囲と表層損傷までの繰返し数の関係は，測定箇所が表面疵のない一般部，表面疵周辺の応力集中部に関係なく，両対数軸上で概ね直線的であることがわかった。ひずみの監視により確認されたこれらの表層の損傷までの繰返し数は，破断までの繰返し

数より 1～2 桁少なく，疲労試験の早い段階($N/N_f < 0.1$)で発生していたことがわかった。

6) 載荷試験前に行った 1 週間の常温水中浸漬による吸水率は押込み荷重による表面疵ありの試験片で 0.1～0.2 %，表面疵なしの試験片で 0.05～0.1 %であった。その後の 3 週間の自然乾燥によって 0.01 %以下に低下したが，水浸試験片は水浸のない試験片に比べて静的破断強度，弾性係数は同等かそれよりやや低い傾向が見られた。疲労試験では，水浸試験片はわずか 2 本であったが，水浸による疲労強度の顕著な低下は見られなかった。

参考文献

[1 章]

1.1) Virmani, Y.P. and Clemena, G.G.: Corrosion Protection – Concrete Bridges, No. FHWA-RD-98-088, September 1998

1.2) McDonald, D.B., Pfeifer, D.W. and Sherman, M.R.: Corrosion evaluation of epoxy-coated, metallic-clad and solid metallic reinforcing bars in concrete, No. FHWA-RD-98-153, December 1998

1.3) Clemena, G.G. and Virmani, Y.P.: Comparing the chloride resistances of reinforcing bars, Concrete International, pp.39-49, November 2004

1.4) Reising, R.M.W., Shahrooz, B.M., Hunt, V.J., Neumann, A.R., Helmicki, A.J. and Hastak, M.: Close look at construction issues and performance of four fiber-reinforced polymer composite bridge decks, Journal of Composites for Construction, ASCE, 8-1, pp.33-42, 2004

1.5) 国広哲男：道路橋床版の問題点，橋梁と基礎，pp.1-5，1968.7

1.6) 西川和廣，村越潤，山本悟司，杉山純：活荷重による橋梁上部構造の損傷と対策，土木技術資料，34-8，pp.58-65，1992.8

1.7) FRP 橋梁—技術とその展望—，構造工学シリーズ 14，土木学会，2004.1

1.8) コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究—コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査—，土木研究所資料第 3811 号，2001.3

1.9) 例えば，吉野利男，安田健：表面に押込み損傷を受けた GFRP 積層板の曲げ疲れ強さに関する研究，日本機械学会論文集 A，No. 476，pp. 972-980，1986.4

1.10) 新井恵一，村越潤，大石哲也：FRP を主材料とした床版が橋梁全体の工費に与える影響について，土木学会第 58 回年講概要集，2003.9

1.11) 新材料の土木構造物への適用に関する研究－アルミニウム合金と繊維強化プラスチックの道路橋への適用に関する調査・分析－，土木研究所資料第 3888 号，2004.2

1.12) 村越潤，新井恵一，長屋優子：FRP 部材の接合部の強度特性に関する基礎検討，土木学会第 59 回年講概要集，2004.9

[2 章]

2.1) 森本尚夫：プラスチック系先端複合材料，新高分子文庫，1998.10

2.2) 新版 FRP 入門，(社)強化プラスチック協会，2000.4

2.3) 前掲 1.7)と同じ

2.4) 繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(II)，第 252 号，建設省土木研究所，(社)強化プラスチック協会ほか，2000.12

2.5) Benmokrane, B., Wang, P., Ton-That, T.M., Rahman, H. and Robert, J.: Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment, Journal of

Composites for Construction, ASCE, 6-3, pp.143-153, 2002

2.6) Shao, Y. and Kouadio, S.: Durability of fiberglass composite sheet piles in water, Journal of Composites for Construction, ASCE, 6-4, pp.280-287, 2002

2.7) Nishizaki, I. and Meiarashi, S.: Long-term deterioration of GFRP in water and moist environment, Journal of Composites for Construction, ASCE, 6-1, pp.21-27, 2002

2.8) Barbero, E.J. and Damiani, T.M.: Interaction between static fatigue and zero-stress aging in e-glass fiber composites, Journal of Composites for Construction, ASCE, 7-1, pp.3-9, 2003

2.9) Hayes, M.D., Garcia, K., Verghese, N. and Lesko, J.J.: The effects of moisture on the fatigue behavior of a grass/vinyl ester composite, Second International Conference on Composites in Infrastructure, pp.1-13, 1998

2.10) Khennane, A. and Mechers, R.E.: Durability of glass polymer composites subject to stress corrosion, Journal of Composites for Construction, ASCE, 7-2, pp.109-117, 2003

2.11) Abd Allah, M.H., Abdin, E.M., Selmy, A.I. and Khashaba, U.A.: Effect of mean stress on fatigue behaviour of GFRP pultruded rod composites, Composites Part A, 28-1, pp. 87-91, 1997

2.12) Bhat, M.R. and Murthy, C.R.L.: Fatigue damage stages in unidirectional glass-fibre -epoxy composites: identification through acoustic emission technique, International Journal of Fatigue, 15-5, pp. 401-405, September 1993

2.13) 倉鋪憲，倪慶清，前坂敏彦，岩本正治：赤外線熱画像法による GFRP 材の疲労損傷評価法に関する研究(第1報，疲労温度上昇曲線)，日本機械学会論文集 A, No. 645, pp. 960-965, 2000.5

2.14) 吉野利男，加藤亨：表面に直線みぞを有する平織 GFRP 積層板の疲労強度に関する研究，日本機械学会論文集 A，No. 460, pp. 1916-1925，1984.12

2.15) 倉鋪憲，倪慶清，前坂敏彦，岩本正治：赤外線熱画像法による GFRP 材の疲労損傷評価法に関する研究(第 2 報，2 段階疲労試験による評価)，日本機械学会論文集 A，No. 645，pp. 966-971，2000.5

2.16) 中西洋一郎：CFRP, GFRP の水中引張疲労に及ぼす塩濃度と温度の影響，大阪工業技術試験所季報，41-1，pp. 1-6，1990.3

2.17) Liao, K., Altkorn, R.L., Milkovich, S.M., Gomez, J., Schultheisz, C.R., Brinson, L.C., Fildes, J.M. and Hunston, D.L.: Long-term durability of grass-fiber reinforced composites in infrastructure applications, Journal of Advanced Materials, April 1997

2.18) Komai, K., Minoshima, K. and Shiroshita, S.: Hygrothermal degradation and fracture process of advanced fibre-reinforced plastics, Materials Science and Engineering, A143, pp.155-166, 1991

2.19) Whitney, J.M. and Nuismer, R.J.: Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations, Journal of Composite Materials, Vol.8, pp. 253-265, July 1974

2.20) 佐藤次彦，清水明彦，豊田忠司：GFRP におけるボイド径の疲れ寿命に及ぼす影響，日本機械学会関西支部定時総会講演会講演論文集，Vol. 64，No. Pt.1，pp.42-43，1989.2

2.21) 古市博, 服部憲治:ガラス繊維の疲労破壊, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, Vol. 1996-A, pp. 187-188, 1996.9
2.22) 前掲 1.9 と同じ
2.23) 野口義男:一方向強化 FRP の引張疲れ試験法に関する評価, 航空宇宙技術研究所報告 NAL TR-1241, 14P, 1994.7
2.24) 松原剛, 武浩司, 宮部秀樹, 田中啓介, 田中拓:GFRP 積層板のモード II 層間疲労き裂進展における応力比の影響, 疲労シンポジウム講演論文集, Vol. 22, pp. 117-120, 1994.11
2.25) 松原剛, 西川弘泰:GFRP 積層板における層間埋没欠陥の疲労進展特性, 複合材料シンポジウム講演要旨集, Vol. 24, pp. 171-172, 1999.11
2.26) Holt, J. and Worthington, P.J.: A comparison of fatigue damage detection in carbon and glass fibre/epoxy composite materials by acoustic emission, International Journal of Fatigue, 3-1, pp. 31-35, January 1981

[4 章]
4.1) 前掲 1.9 と同じ

[5 章]
5.1) Nuismer, R.J. and Labor, J.D.: Applications of the average stress failure criterion: Part I - Tension, Journal of Composite Materials, Vol.12, pp. 238-249, July 1974
5.2) 増田雄市郎, 王暁純, 古江治美:応力集中部を有する複合材料の破壊条件, 第 25 回 FRP シンポジウム講演論文集, pp.227-230, 1996

[6 章]
6.1) 前掲 2.2, p.109

[7 章]
7.1) 西田正孝:応力集中, 森北出版, 1967.9
7.2) 山田聖志, 中澤博之:連続引抜成形繊維補強ポリマー接合部の母材破壊性状, 構造工学論文集, 48A, pp.11-18, 2002.3
7.3) 塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究(III)ー塩害により損傷を受けたＰＣ鋼材の機械的性質ー, 土木研究所資料 3810 号, 2001.3
7.4) 前掲 5.2)と同じ
7.5) 前掲 2.20 と同じ
7.6) 吉野利男, 大塚年久:FRP 平織りガラス積層板モデルの内部応力解析, 日本機械学会論文集 A, No. 420, pp. 771-779, 1981.8
7.7) 矢ヶ崎隆義, 木村雄二:炭素繊維強化エポキシ樹脂複合材料(CFRP)の疲労特性に及ぼす水分吸収の影響, 日本機械学会論文集 A, No. 571, pp. 599-605, 1994.3
7.8) Fisher, J.W. (阿部英彦, 三木千壽訳監修版):鋼橋の疲労と破壊ーケーススタディーー, 建設図書, 1987

付　　録

疲労試験における頻度測定データ

注記

OPER：振幅の捉え方，本検討ではすべてレインフロー法(RAIN)による

CHNO：ヒストグラムレコーダのチャンネル

FULL：フルスケールの設定値

UNIT：単位

FILT：ローパスフィルター遮断周波数

COUP：カップリングモード，本検討ではすべてACモード(0.17 Hz～FILT)による

TIME：総計測時間（sec）

1～64：振幅（スライス番号）　1スライス幅 = FULL／32，本文では代表値として中央値を取った

TOTAL：頻度の合計

FD3-1

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	58.8	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	834905	834905	834905	834905	834905	834905	834905
64	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0
24	0	1	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0
19	0	1	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0
16	1800	0	0	0	0	0	0
15	4882189	0	0	0	0	0	0
14	3347184	0	0	0	0	0	0
13	142401	1	0	0	0	0	0
12	1	3	0	0	0	0	0
11	1	1	0	0	0	0	0
10	0	2	0	0	0	0	0
9	2	9	0	0	0	0	0
8	0	3	0	0	0	0	0
7	0	4	0	0	0	0	0
6	0	1967087	7	0	7831556	0	8137246
5	0	6406465	8368706	8284003	542017	0	236328
4	0	12	4860	89569	1	7442127	2
3	2	4	2	3	2	931446	1
2	0	0	0	0	0	2	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	8373580	8373593	8373575	8373575	8373576	8373575	8373577

FD3-1(30%)

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	101604	101604	101604	101604	101604	101604	101604
64	0	0	1	99	1383	318	69
63	0	0	0	64	200	18	116
62	0	0	0	160	184	9	106
61	0	0	0	194	134	8	84
60	0	0	0	660	94	4	68
59	0	0	0	326	66	17	52
58	0	0	0	44	78	8	42
57	0	0	6	32	146	6	34
56	0	0	18	36	100	12	52
55	0	0	40	42	82	8	332
54	0	0	62	14	157	6	412
53	0	0	46	12	56	8	246
52	0	0	70	20	71	10	220
51	0	0	58	7	101	7	52
50	0	0	64	14	83	6	195
49	0	0	222	6	41	9	36
48	0	0	106	15	34	14	18
47	0	0	47	8	59	15	25
46	0	0	46	6	143	8	31
45	0	0	20	6	126	7	17
44	0	1	33	4	95	7	38
43	0	0	63	10	98	3	26
42	0	0	54	4	99	10	22
41	0	0	45	16	160	2	2
40	0	0	50	20	115	8	8
39	0	0	76	10	177	3	6
38	0	0	122	20	142	6	5
37	0	0	76	14	154	3	6
36	0	0	44	26	162	14	7
35	0	0	30	40	171	22	20
34	0	0	33	27	196	18	24
33	0	0	32	50	249	9	28
32	0	0	34	46	204	8	28
31	0	0	14	67	168	25	17
30	0	0	16	43	167	23	50
29	0	0	30	48	193	40	41
28	0	0	41	64	191	35	26
27	0	0	50	28	122	23	35
26	0	0	61	39	113	33	38
25	1	2	49	48	144	45	45
24	37351	19	53	31	245	32	22
23	770629	919	33	28	258	23	25
22	176674	10	53	57	340	36	67
21	112	22	156	52	320	20	245
20	18	87	193	62	238	29	537
19	4	420	121	126	467	63	1172
18	328	101520	197	183	1026	96	2946
17	612	352378	212	160	11270	274	1662
16	0	464938	327	295	1588	548	5
15	0	65426	1892	1239	159	775	7
14	2	0	18583	6823	184	2558	14
13	4	0	42	22	130	57366	12
12	2	0	102	24	184	33170	8
11	2	0	93	16	345	16218	16
10	2	0	79	34	251	5385	21
9	1	1	122	36	240	25	16
8	0	0	110	29	223	32	21
7	0	0	220	29	292	54	18
6	2	0	220	44	357	80	28
5	0	0	80	70	422	94	32
4	1	0	154	30	394	56	18
3	0	1	171	61	407	88	37
2	0	0	215	75	373	134	118
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	985745	985744	25187	11915	26171	117991	9726

FD3-2

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	28047	28047	28047	28047	28047	28047	28047
64	0	0	89	1005	89	193	13
63	0	0	114	98	100	254	6
62	0	0	192	108	174	168	10
61	0	0	100	52	128	88	10
60	0	0	70	36	162	56	108
59	0	0	66	102	208	40	132
58	0	0	36	106	280	26	86
57	0	0	24	54	122	18	28
56	0	0	20	24	72	11	28
55	0	0	22	10	40	5	24
54	0	0	22	6	17	3	27
53	0	0	35	7	16	2	22
52	0	0	18	9	13	4	20
51	0	0	29	7	28	3	20
50	0	0	21	7	18	5	19
49	0	0	20	15	21	2	13
48	0	0	15	8	12	9	7
47	0	1	11	17	15	8	23
46	0	0	19	13	10	3	14
45	0	0	17	11	2	2	13
44	0	0	16	4	4	4	15
43	0	0	27	6	6	3	14
42	0	0	9	6	21	0	7
41	0	0	1	7	48	2	26
40	0	0	5	23	71	1	14
39	0	0	6	20	42	1	6
38	0	0	4	18	72	3	6
37	0	0	10	22	98	4	18
36	0	1	14	26	39	6	17
35	0	0	24	21	57	13	13
34	0	0	105	18	58	6	15
33	0	0	79	23	53	3	11
32	0	15	43	28	54	5	14
31	0	4	74	20	55	9	17
30	0	2	104	31	69	13	20
29	0	6	87	41	61	19	26
28	0	34	74	28	64	32	15
27	1	14	102	48	65	35	8
26	245269	8	57	59	27	45	16
25	6166	3	100	35	9	46	27
24	0	48413	80	44	90	81	80
23	0	52080	161	60	173	163	781
22	2	12008	371	55	323	373	97
21	0	48258	318	78	460	636	2
20	0	40162	738	108	876	696	10
19	0	48471	643	526	6231	1314	6
18	0	1961	1043	996	1	1812	4
17	0	2	3368	8755	2	1753	11
16	0	0	6964	42	2	1001	14
15	2	0	55	49	3	0	8
14	0	0	55	55	8	3	6
13	0	0	40	30	2	0	20
12	0	0	44	50	0	3	2
11	0	0	81	44	1	2	10
10	0	2	37	40	2	2	9
9	0	0	44	66	4	0	8
8	2	0	51	66	4	1	11
7	0	4	23	54	1	1	9
6	0	2	29	58	6	0	13
5	0	4	151	80	0	2	12
4	1	3	109	112	5	1	9
3	0	2	175	195	8	2	15
2	0	2	83	214	6	3	12
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	251443	251462	16544	13956	10708	8999	2077

FD3-3

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	164425	164425	164425	164425	164425	164425	164425
64	0	0	1	23	1	2535	1
63	0	0	160	66	0	240	0
62	0	0	122	614	0	128	24
61	0	0	59	166	42	146	130
60	0	0	87	98	270	92	222
59	0	0	52	22	182	202	396
58	0	0	113	16	180	408	112
57	0	0	59	20	120	296	30
56	0	0	95	34	168	300	68
55	0	0	141	192	188	326	100
54	0	0	161	60	200	266	82
53	0	0	56	74	182	158	44
52	0	0	37	12	143	134	38
51	0	0	30	14	84	122	25
50	0	0	13	8	72	162	16
49	0	0	17	13	46	108	6
48	0	0	45	26	48	110	12
47	0	0	51	16	76	137	44
46	0	0	33	12	143	116	23
45	0	0	72	34	93	84	2
44	0	1	83	15	82	61	1
43	0	0	51	46	46	51	4
42	0	0	44	52	54	56	10
41	0	0	39	72	60	51	20
40	0	0	47	82	46	43	18
39	0	0	65	93	74	42	28
38	0	0	47	121	51	27	25
37	0	0	44	100	42	50	20
36	0	0	26	84	66	25	8
35	0	0	36	61	60	37	30
34	0	0	60	49	101	35	15
33	0	0	64	56	73	50	15
32	0	0	68	50	80	30	17
31	0	0	90	72	89	42	19
30	0	0	96	61	389	36	26
29	0	0	132	85	328	46	41
28	0	0	102	60	105	29	40
27	0	0	120	77	351	31	46
26	1	9	208	74	296	63	5
25	42	1	236	64	245	55	17
24	11870	37	203	61	402	84	21
23	1439291	171	313	113	290	98	14
22	115198	29940	698	125	506	112	32
21	2	408780	841	150	1347	158	111
20	4	107514	1768	156	1308	261	1188
19	2	371935	2816	399	1196	746	5459
18	2	194570	4555	848	1496	739	2735
17	2	435461	4936	1254	11657	997	22
16	2	17998	7530	12182	114	1453	27
15	0	0	12995	95	98	1899	50
14	1	0	52697	77	54	4316	43
13	0	0	26	138	98	11059	44
12	2	1	24	124	150	460	76
11	0	2	20	132	203	44	71
10	0	2	25	129	150	49	48
9	0	0	21	138	122	37	70
8	0	2	30	165	132	33	53
7	0	4	35	224	124	30	50
6	0	6	24	261	278	18	37
5	2	6	26	265	472	32	36
4	0	2	46	313	454	27	42
3	0	0	126	488	248	31	55
2	0	12	102	463	256	19	53
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1566421	1566454	92919	21194	26031	29632	12117

FD3-4

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	147.1	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	8470	8470	8470	8470	8470	8470	8470
64	0	0	437	5	1	1	0
63	0	0	39	4	0	0	1
62	0	0	48	2	0	2	0
61	0	0	34	6	0	4	0
60	0	0	56	14	0	6	2
59	0	0	46	26	0	12	240
58	0	0	41	38	12	6	290
57	0	0	38	62	14	6	44
56	0	0	51	256	22	8	34
55	0	0	15	592	30	6	30
54	0	0	10	300	62	6	20
53	0	0	8	472	156	6	21
52	0	0	6	734	223	8	17
51	0	0	8	810	152	8	9
50	0	0	6	154	392	6	10
49	0	0	7	170	127	18	14
48	0	0	3	558	122	9	12
47	0	0	3	1099	187	2	11
46	0	0	1	904	64	2	11
45	0	0	3	384	54	2	11
44	0	0	4	266	48	2	13
43	0	1	3	100	30	2	10
42	0	0	0	134	48	2	34
41	0	0	2	131	32	1	4
40	0	0	3	62	65	0	15
39	0	0	3	66	140	0	7
38	0	0	5	28	104	1	17
37	0	0	6	16	29	0	14
36	0	0	1	4	27	1	12
35	0	0	5	17	30	1	18
34	0	0	3	37	61	1	21
33	0	0	1	33	70	0	11
32	0	0	6	19	75	2	20
31	0	0	2	8	113	2	35
30	0	0	2	16	100	5	62
29	0	0	10	14	112	18	32
28	0	0	15	8	125	27	77
27	0	0	21	49	115	45	78
26	0	0	22	69	302	125	166
25	2	0	17	93	1878	0	191
24	53633	0	92	77	1447	1	848
23	29873	20089	102	98	102	0	2444
22	301	10989	132	162	65	0	3525
21	30	31285	212	459	35	0	4
20	28	22291	1125	299	27	0	9
19	10	1	1092	743	24	0	1
18	28	0	10716	6623	6	0	7
17	62	0	9421	75	4	0	11
16	10	0	17	22	2	0	8
15	52	0	23	8	4	0	4
14	232	0	18	12	0	0	13
13	176	2	8	14	1	0	18
12	76	0	25	22	7	0	8
11	20	0	32	10	8	0	8
10	74	0	32	16	4	0	19
9	44	0	11	15	4	0	21
8	6	0	11	19	7	0	14
7	0	0	12	8	3	0	24
6	0	0	28	13	4	0	40
5	2	0	14	17	2	0	80
4	0	0	18	8	0	0	70
3	0	0	30	38	1	0	88
2	0	0	60	67	4	2	137
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	84659	84658	24222	16585	6883	356	9015

FD3-5

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	169218	169218	169218	169218	169218	169218	169218
64	0	0	0	0	485	0	519
63	0	0	22	0	28	0	266
62	0	0	187	0	82	0	218
61	0	0	184	0	58	0	196
60	0	0	286	0	26	0	282
59	0	0	390	0	68	0	220
58	0	0	164	0	48	0	206
57	0	0	48	0	58	0	168
56	0	0	40	0	33	0	329
55	0	0	40	0	25	0	264
54	0	0	24	0	47	0	150
53	0	0	60	0	18	0	57
52	0	0	33	0	42	0	40
51	0	0	35	0	46	0	90
50	0	0	44	0	34	0	64
49	0	0	38	0	17	0	50
48	0	0	43	0	14	0	17
47	0	0	73	0	18	0	16
46	0	0	68	0	22	0	23
45	0	0	39	0	13	0	12
44	0	0	46	0	25	0	7
43	0	1	49	0	21	0	9
42	0	0	36	0	15	0	15
41	0	0	79	0	21	0	19
40	0	0	112	0	23	0	38
39	0	0	78	0	26	0	43
38	0	0	26	0	19	0	22
37	0	0	50	0	21	0	31
36	0	0	124	0	20	0	49
35	0	0	74	0	16	0	33
34	0	0	77	0	24	0	37
33	0	0	94	0	31	0	43
32	0	0	157	0	42	0	50
31	0	0	144	0	43	0	34
30	0	0	239	0	95	0	21
29	0	0	133	0	71	0	12
28	0	0	307	0	74	0	33
27	0	0	247	0	47	0	68
26	0	0	160	0	68	0	92
25	0	0	184	0	122	0	76
24	0	4	74	0	264	0	78
23	0	12	47	0	275	0	296
22	787644	152	74	0	306	1	513
21	771306	80	149	2	392	9	465
20	167	100	451	8	529	34	462
19	88	68	814	9	1370	7	203
18	130	215	1265	25	1561	8	405
17	6	645107	2903	20	3606	4	1065
16	2	347145	3019	48	13014	11	8073
15	2	530990	6805	63	2676	30	5316
14	14	35494	8903	535	24	456	63
13	2	0	120222	32541	18	1056	69
12	0	0	1390	4680	26	7868	66
11	2	0	175	1	18	274752	75
10	0	2	192	1	16	105688	83
9	2	0	158	1	32	25474	44
8	0	0	148	2	19	3	84
7	4	0	123	1	34	2	76
6	1	2	91	1	18	4	110
5	0	1	188	3	30	0	100
4	2	0	524	2	31	5	150
3	0	2	934	10	48	0	198
2	0	0	392	10	43	4	222
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1559372	1559375	153275	37963	26356	415416	22135

FDE-1

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	No oP	RAIN	No oP
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	147.1	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	4242	4242	4242	4242	4242	4242	4242
64	0	0	0	1	0	7	0
63	0	0	0	4	0	4	0
62	0	0	0	8	0	8	0
61	0	0	0	4	0	26	0
60	0	0	0	6	0	48	0
59	0	0	0	10	0	48	0
58	0	0	0	18	0	66	0
57	0	0	0	36	0	128	0
56	0	0	0	90	0	54	0
55	0	0	0	314	0	46	0
54	0	0	0	104	0	42	0
53	0	0	0	19	0	22	0
52	0	0	0	14	0	28	0
51	0	0	0	22	0	18	0
50	0	0	0	52	0	13	0
49	0	0	0	6	0	5	0
48	0	0	0	8	0	5	0
47	0	0	0	8	0	5	0
46	0	1	0	4	0	3	0
45	0	0	0	5	0	3	0
44	0	0	0	18	0	2	0
43	0	0	0	13	0	3	0
42	0	0	0	13	0	2	0
41	0	0	0	12	0	9	0
40	0	0	0	8	0	5	0
39	0	0	0	4	0	4	0
38	0	0	0	7	0	7	0
37	0	0	0	12	0	4	0
36	0	0	0	25	0	0	0
35	0	0	0	43	0	2	0
34	0	0	0	28	0	3	0
33	0	0	0	31	0	2	0
32	0	0	0	31	0	6	0
31	0	0	0	19	0	6	0
30	0	0	0	20	0	7	0
29	0	3	0	17	0	7	0
28	0	791	0	23	0	24	0
27	0	536	0	28	0	34	0
26	0	1083	0	50	0	31	0
25	0	17364	0	70	0	33	0
24	26190	6125	0	173	0	70	0
23	14483	3466	0	176	0	104	0
22	2	7884	0	257	0	278	0
21	138	5021	0	462	0	513	0
20	348	0	0	1137	0	1674	0
19	22	2	0	1774	0	1	0
18	68	0	0	16	0	2	0
17	44	0	0	14	0	3	0
16	52	0	5453	19	0	5	0
15	578	0	3995	23	0	0	0
14	310	0	3224	12	0	2	0
13	28	0	1348	16	0	2	0
12	5	1	661	12	0	0	0
11	6	0	1043	11	0	0	0
10	0	0	1826	3	0	1	0
9	2	0	790	3	0	1	0
8	0	0	1305	12	0	1	0
7	0	0	1882	14	0	1	0
6	0	0	4836	4	0	2	0
5	2	0	10714	11	0	5	0
4	0	0	3715	8	0	2	0
3	0	0	447	14	0	0	0
2	0	0	863	12	0	2	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	42278	42277	42102	5388	0	3439	0

FDE-2

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	No oP	RAIN	No oP
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	63062	63062	63062	63062	63062	63062	63062
64	0	0	0	361	0	0	0
63	0	0	0	66	0	0	0
62	0	0	0	84	0	0	0
61	0	0	0	120	0	0	0
60	0	0	0	16	0	0	0
59	0	0	0	82	0	0	0
58	0	0	30	174	0	0	0
57	0	0	139	302	0	0	0
56	0	0	82	148	0	0	0
55	0	0	60	28	0	0	0
54	0	0	100	8	0	0	0
53	0	0	64	6	0	0	0
52	0	0	64	5	0	0	0
51	0	0	30	14	0	0	0
50	0	0	42	58	0	0	0
49	0	1	34	28	0	0	0
48	0	0	21	13	0	0	0
47	0	0	35	23	0	1	0
46	0	0	33	12	0	0	0
45	0	0	30	11	0	6	0
44	0	0	48	12	0	3	0
43	0	0	39	14	0	2	0
42	0	0	53	6	0	2	0
41	0	0	68	11	0	5	0
40	0	0	66	30	0	5	0
39	0	0	43	16	0	2	0
38	0	1	30	21	0	2	0
37	0	4	22	40	0	1	0
36	0	10	20	20	0	3	0
35	0	5	21	40	0	2	0
34	0	8	20	46	0	3	0
33	0	4	8	61	0	2	0
32	0	0	16	58	0	4	0
31	0	0	41	47	0	1	0
30	0	108	92	38	0	3	0
29	0	334	86	30	0	2	0
28	0	86	57	49	0	1	0
27	0	106	64	34	0	4	0
26	1409	56	58	41	0	2	0
25	115639	585	56	37	0	2	0
24	173	1426	41	32	0	3	0
23	2	460	49	34	0	5	0
22	0	390	75	29	0	2	0
21	10	25851	77	51	0	2	0
20	6	16600	78	86	0	6	0
19	10	32456	95	204	0	65	0
18	0	29236	154	288	0	974	0
17	2	9529	195	1102	0	4530	0
16	2	0	292	4116	0	6183	0
15	2	0	891	9796	0	1344	0
14	2	0	39368	18	0	0	0
13	0	0	24	23	0	0	0
12	0	0	30	39	0	1	0
11	0	0	58	22	0	0	0
10	0	0	53	21	0	1	0
9	0	2	76	16	0	8	0
8	0	0	52	35	0	0	0
7	1	0	60	16	0	0	0
6	0	1	74	22	0	4	0
5	0	0	74	36	0	4	0
4	0	0	112	21	0	3	0
3	0	0	178	38	0	5	0
2	4	0	260	72	0	9	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	117262	117259	44038	18327	0	13207	0

FDE-3

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	No oP	RAIN	No oP
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	78896	78896	78896	78896	78896	78896	78896
64	0	10	87	123	0	165	0
63	0	0	42	26	0	38	0
62	0	0	30	32	0	42	0
61	0	0	28	8	0	16	0
60	0	2	18	12	0	10	0
59	0	0	12	4	0	8	0
58	0	2	14	5	0	10	0
57	0	0	14	2	0	6	0
56	0	0	24	2	0	3	0
55	0	0	22	2	0	2	0
54	0	0	22	6	0	7	0
53	0	0	14	1	0	0	0
52	0	0	16	2	0	4	0
51	0	0	6	3	0	2	0
50	0	0	10	1	0	19	0
49	0	0	2	4	0	13	0
48	0	0	0	4	0	11	0
47	0	1	6	13	0	13	0
46	0	0	0	3	0	17	0
45	0	0	8	10	0	16	0
44	0	0	4	4	0	7	0
43	0	0	8	10	0	14	0
42	0	0	4	6	0	16	0
41	0	0	4	5	0	12	0
40	0	0	4	5	0	19	0
39	0	0	5	5	0	18	0
38	0	0	4	6	0	18	0
37	0	0	3	4	0	7	0
36	0	0	4	3	0	10	0
35	0	0	2	5	0	10	0
34	0	0	0	3	0	7	0
33	0	2	1	3	0	14	0
32	0	2	1	5	0	22	0
31	0	2	2	5	0	23	0
30	0	85	6	4	0	18	0
29	0	104	2	2	0	14	0
28	0	13	1	5	0	20	0
27	0	67	5	5	0	15	0
26	0	11	4	4	0	15	0
25	0	7	2	3	0	33	0
24	0	9	6	7	0	39	0
23	174403	37	2	8	0	34	0
22	194519	500	2	6	0	40	0
21	110	1683	8	12	0	32	0
20	85	9790	4	29	0	31	0
19	10	106383	10	29	0	69	0
18	0	176671	13	35	0	161	0
17	4	70746	16	55	0	471	0
16	0	3020	26	68	0	4402	0
15	0	1	6679	510	0	17398	0
14	2	0	19383	34553	0	5070	0
13	0	0	3	1	0	33	0
12	0	0	19	4	0	26	0
11	2	0	12	1	0	24	0
10	0	0	16	0	0	12	0
9	0	0	26	2	0	26	0
8	0	0	14	5	0	24	0
7	0	2	18	6	0	25	0
6	0	0	12	18	0	29	0
5	0	0	14	32	0	26	0
4	0	0	22	24	0	24	0
3	0	0	26	18	0	40	0
2	2	0	30	28	0	84	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	369137	369150	26802	35806	0	28834	0

FDE-4

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	NO OP	RAIN	NO OP
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	511454	511454	511454	511454	511454	511454	511454
64	0	0	1	201	0	0	0
63	0	0	0	68	0	0	0
62	0	0	0	62	0	0	0
61	0	0	0	46	0	0	0
60	0	0	0	90	0	0	0
59	0	0	0	98	0	0	0
58	0	0	0	154	0	0	0
57	0	0	0	110	0	0	0
56	0	0	0	136	0	0	0
55	0	0	0	24	0	0	0
54	0	0	0	66	0	1	0
53	0	0	0	54	0	0	0
52	0	0	3	34	0	0	0
51	0	0	9	24	0	2	0
50	0	0	15	14	0	2	0
49	0	0	61	9	0	2	0
48	0	0	134	6	0	2	0
47	0	0	76	18	0	2	0
46	0	0	64	8	0	4	0
45	0	0	25	8	0	0	0
44	0	0	22	6	0	2	0
43	0	0	34	7	0	2	0
42	0	1	19	14	0	0	0
41	0	0	40	12	0	1	0
40	0	0	14	10	0	2	0
39	0	0	16	6	0	2	0
38	0	0	22	5	0	2	0
37	0	0	14	12	0	0	0
36	0	0	20	3	0	0	0
35	0	0	29	12	0	0	0
34	0	0	35	0	0	2	0
33	0	0	93	3	0	1	0
32	0	0	124	1	0	1	0
31	0	0	219	3	0	0	0
30	0	0	414	7	0	6	0
29	0	1	355	114	0	0	0
28	0	0	237	40	0	0	0
27	0	1	212	42	0	2	0
26	0	0	321	27	0	2	0
25	0	0	264	34	0	4	0
24	0	2	82	38	0	3	0
23	0	0	89	25	0	0	0
22	0	1	429	40	0	5	0
21	0	7	478	36	0	3	0
20	652233	1182	310	44	0	8	0
19	4287980	8472	362	30	0	12	0
18	44467	752	1082	32	0	12	0
17	510	43514	1048	36	0	28	0
16	13	2025981	169	46	0	124	0
15	0	832102	421	259	0	80	0
14	0	1378194	1194	796	0	140	0
13	4	703986	6085	2262	0	222	0
12	9498	670	78904	96929	0	93854	0
11	0	0	59	10463	0	23016	0
10	92	0	72	32	0	9	0
9	68	0	62	23	0	8	0
8	0	6	56	13	0	6	0
7	0	4	88	18	0	4	0
6	2	2	104	18	0	10	0
5	0	10	186	39	0	8	0
4	0	12	373	37	0	8	0
3	4	10	596	41	0	14	0
2	2	4	616	52	0	14	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	4994873	4994914	95757	112897	0	117632	0

FDE-5

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	336728	336728	336728	336728	336728	336728	336728
64	0	0	0	193	0	0	0
63	0	0	0	148	0	0	0
62	0	0	0	72	0	0	0
61	0	0	0	63	0	0	0
60	0	0	0	170	0	0	0
59	0	0	0	84	0	0	0
58	0	0	0	88	0	0	0
57	0	0	0	65	0	0	0
56	0	0	0	64	0	0	0
55	0	0	0	115	0	0	0
54	0	0	0	157	0	0	0
53	0	0	0	133	0	0	0
52	0	0	0	72	0	0	0
51	0	0	0	53	0	0	0
50	0	0	0	49	0	0	0
49	0	0	0	41	0	0	0
48	0	0	0	35	0	0	0
47	0	0	0	50	0	0	0
46	0	0	0	82	0	0	0
45	0	0	0	79	0	0	0
44	0	1	0	46	0	0	0
43	0	0	0	50	0	0	0
42	0	0	0	54	0	0	0
41	0	0	0	53	0	0	0
40	0	0	0	69	0	0	0
39	0	0	0	59	0	0	0
38	0	0	0	71	0	0	0
37	0	0	0	77	0	0	0
36	0	0	0	80	0	0	0
35	0	0	0	61	0	0	0
34	0	0	0	92	0	0	0
33	0	0	0	77	0	0	0
32	0	0	0	95	0	0	0
31	0	0	0	68	0	0	0
30	0	0	0	94	0	0	0
29	0	0	0	69	0	0	0
28	0	0	0	83	0	0	0
27	0	0	0	70	0	0	0
26	0	0	0	55	0	0	0
25	0	2	0	65	0	0	0
24	0	1	0	78	0	0	0
23	0	322	0	71	0	0	0
22	0	167	0	63	0	1	0
21	946910	14	0	79	0	12	0
20	331768	42876	0	81	0	18	0
19	23	267299	0	102	0	57	0
18	2	361594	0	104	0	52	0
17	2	145146	0	175	0	82	0
16	88	254484	0	276	0	73	0
15	402	206672	0	1792	0	161	0
14	8	638	0	23102	0	25538	0
13	0	0	2	67	0	55962	0
12	0	0	192386	92	0	6008	0
11	0	2	65180	51	0	521	0
10	2	0	43764	76	0	35	0
9	8	0	31320	76	0	21	0
8	2	0	21876	83	0	6	0
7	2	0	33490	78	0	24	0
6	0	0	145836	100	0	8	0
5	0	0	501878	102	0	22	0
4	2	0	206539	96	0	15	0
3	1	4	36487	272	0	15	0
2	3	1	447	284	0	9	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1279223	1279223	1279205	30501	0	88640	0

FDE-6

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	338108	338108	338108	338108	338108	338108	338108
64	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0
45	0	1	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	1	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	39	0	0	0
39	0	0	0	113	0	0	0
38	0	0	0	111	0	0	0
37	0	0	0	152	0	0	0
36	0	0	0	121	0	0	0
35	0	0	0	93	0	0	0
34	0	0	0	131	0	0	0
33	0	0	0	69	0	0	0
32	0	0	0	69	0	0	0
31	0	0	0	105	0	0	0
30	0	0	0	107	0	0	0
29	0	0	0	82	0	0	0
28	0	0	0	73	0	0	0
27	0	0	0	52	0	0	0
26	0	0	0	72	0	0	0
25	0	0	0	62	0	0	0
24	0	0	0	106	0	0	0
23	0	2	0	146	0	0	0
22	0	4	0	170	0	0	0
21	359151	2287	0	217	0	0	0
20	2790412	237	0	93	0	0	0
19	29804	22	0	69	0	0	0
18	392	369	0	71	0	0	0
17	18	73866	0	58	0	0	0
16	6	1444734	0	71	0	0	0
15	74	1280008	0	115	0	0	0
14	260	380698	0	279	0	1148	0
13	8	86	53697	1199	0	51576	0
12	44	0	42603	41576	0	13868	0
11	142	0	465	125	0	690	0
10	28	0	732	112	0	247	0
9	1854	0	705	113	0	249	0
8	121	2	565	70	0	138	0
7	0	0	532	51	0	107	0
6	3	0	541	80	0	171	0
5	0	1	510	67	0	285	0
4	2	1	428	100	0	219	0
3	0	0	453	424	0	211	0
2	0	0	192	542	0	160	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	3182319	3182318	101423	47306	0	69069	0

FDE-7

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	No oP	RAIN	No oP
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	19224	19224	19224	19224	19224	19224	19224
64	0	0	754	329	0	0	0
63	0	0	203	80	0	0	0
62	0	0	190	78	0	0	0
61	0	0	163	78	0	0	0
60	0	0	239	134	0	0	0
59	0	0	134	80	0	0	0
58	0	0	109	30	0	0	0
57	0	0	88	42	0	0	0
56	0	0	72	52	0	0	0
55	0	0	72	68	0	0	0
54	0	0	36	64	0	1	0
53	0	0	62	42	0	0	0
52	0	0	50	56	0	0	0
51	0	0	78	52	0	0	0
50	0	0	58	44	0	0	0
49	0	0	70	44	0	1	0
48	0	0	82	86	0	3	0
47	0	0	112	81	0	8	0
46	0	0	96	62	0	16	0
45	0	0	140	64	0	30	0
44	0	1	86	47	0	19	0
43	0	0	103	32	0	18	0
42	0	0	228	39	0	10	0
41	0	0	162	29	0	8	0
40	0	0	55	18	0	10	0
39	0	0	21	25	0	6	0
38	0	0	24	20	0	13	0
37	0	0	32	23	0	7	0
36	0	0	75	24	0	18	0
35	0	0	96	30	0	22	0
34	0	0	58	18	0	26	0
33	0	0	108	22	0	8	0
32	0	0	308	13	0	14	0
31	0	0	322	76	0	23	0
30	0	0	434	85	0	31	0
29	0	2	829	58	0	8	0
28	0	3	650	55	0	22	0
27	0	9	797	73	0	39	0
26	13371	2	809	57	0	24	0
25	176735	8	888	65	0	34	0
24	116	178	946	56	0	20	0
23	12	870	982	42	0	8	0
22	4	6675	1154	73	0	11	0
21	2	52067	1006	122	0	18	0
20	0	40118	1374	66	0	29	0
19	6	67045	1723	97	0	147	0
18	2	23283	1675	231	0	883	0
17	2	4	4733	5093	0	1562	0
16	6	0	14513	57	0	11709	0
15	2	0	19404	41	0	1367	0
14	2	0	88	42	0	26	0
13	2	0	111	49	0	34	0
12	0	0	101	54	0	15	0
11	0	0	88	49	0	14	0
10	0	0	75	48	0	19	0
9	2	0	49	38	0	20	0
8	0	0	42	48	0	36	0
7	2	0	111	48	0	28	0
6	0	0	423	50	0	44	0
5	0	0	482	46	0	52	0
4	0	0	101	33	0	110	0
3	0	0	50	52	0	260	0
2	0	0	162	110	0	206	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	190266	190265	58286	8920	0	17037	0

FDE-8

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	No oP	RAIN	No oP
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	21847	21847	21847	21847	21847	21847	21847
64	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0
43	0	1	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0
25	162020	0	0	0	0	0	0
24	13746	0	0	0	0	0	0
23	19	6	0	0	0	0	0
22	2	5102	0	0	0	0	0
21	0	78278	0	0	0	0	0
20	2	44308	0	0	0	0	0
19	0	24956	0	3	0	0	0
18	0	19328	0	1637	0	0	0
17	0	3814	0	4220	0	0	0
16	0	1	0	6511	0	1180	0
15	0	0	0	31	0	20251	0
14	2	0	74	16	0	1191	0
13	0	0	15354	11	0	309	0
12	2	0	6313	18	0	438	0
11	0	0	4058	16	0	297	0
10	0	0	2721	13	0	343	0
9	0	0	2594	10	0	332	0
8	2	0	4102	7	0	304	0
7	0	0	9646	9	0	286	0
6	0	0	10983	4	0	255	0
5	0	0	43924	6	0	287	0
4	0	0	76018	6	0	293	0
3	0	0	4	4	0	215	0
2	0	0	4	1	0	193	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	175795	175794	175795	12523	0	26174	0

FDE-9

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	142174	142174	142174	142174	142174	142174	142174
64	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0
42	0	1	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	1	0
36	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	2	0
34	0	0	0	0	0	4	0
33	0	0	0	0	0	1	0
32	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	2	0
30	0	0	0	0	0	3	0
29	0	0	0	0	0	9	0
28	0	0	0	0	0	4	0
27	0	0	0	0	0	1	0
26	0	0	0	0	0	2	0
25	0	0	0	0	0	1	0
24	0	2	0	0	0	2	0
23	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	4	0
21	864	22	0	0	0	7	0
20	1323893	56	0	0	0	4	0
19	86382	89213	0	0	0	4	0
18	116	140402	5	0	0	5	0
17	0	594878	6	101	0	3	0
16	0	148520	10	35	0	11	0
15	0	361566	15	30	0	11	0
14	10	76630	15	250	0	373	0
13	18	0	16	60689	0	20040	0
12	0	0	11008	22	0	348	0
11	0	0	111609	10	0	5	0
10	2	0	2	8	0	7	0
9	2	2	2	8	0	1	0
8	0	0	1	6	0	2	0
7	2	0	2	6	0	2	0
6	2	0	2	5	0	0	0
5	0	0	1	7	0	2	0
4	2	0	2	10	0	0	0
3	1	1	1	6	0	1	0
2	0	2	0	3	0	18	0
1	0	0	0	0	0	1	0
TOTAL	1411294	1411295	122697	61196	0	20881	0

FW3-1

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	338968	338968	338968	338968	338968	338968	338968
64	0	8	545	371	1	253	25
63	0	0	228	138	0	70	76
62	0	0	112	140	2	80	112
61	0	0	134	138	450	96	34
60	0	0	94	186	386	50	16
59	0	0	78	188	254	31	12
58	0	0	98	185	180	19	14
57	0	0	102	120	136	13	6
56	0	0	113	112	114	22	7
55	0	0	118	192	76	28	2
54	0	0	56	24	60	26	2
53	0	0	49	23	48	27	2
52	0	0	38	9	21	23	6
51	0	0	37	16	36	30	3
50	0	0	59	12	13	26	7
49	0	2	57	10	30	16	10
48	0	0	62	10	13	45	9
47	0	0	62	12	8	55	3
46	0	0	32	29	18	68	7
45	0	0	23	59	10	39	9
44	0	0	36	52	4	37	6
43	0	0	35	64	6	47	7
42	0	0	30	40	5	44	11
41	0	0	16	38	6	68	7
40	0	0	21	30	4	56	8
39	0	0	33	62	18	33	7
38	0	3	29	37	18	24	16
37	0	2	50	29	22	21	31
36	0	2	40	31	13	30	14
35	0	91	83	30	9	31	14
34	0	36	78	45	6	8	10
33	0	4	68	41	11	17	9
32	0	0	77	27	12	24	16
31	0	526	65	38	10	16	14
30	0	573	97	48	17	22	20
29	0	118	55	26	12	17	24
28	1	96	25	119	13	23	25
27	306890	15	36	312	18	12	9
26	340132	20	44	462	24	33	24
25	54	64	84	445	20	30	36
24	2	83	138	300	37	43	53
23	2	51	176	590	74	24	95
22	4	176	200	509	94	35	28
21	0	44461	272	1091	184	31	221
20	2	87114	908	1542	400	33	689
19	0	509130	1058	1923	960	31	694
18	1	4526	1311	2711	4781	47	2404
17	0	0	4934	5626	7657	262	9651
16	0	0	15680	22487	6	315	10
15	1	0	149	30	22	1475	2
14	0	0	138	32	10	17462	12
13	0	2	122	22	21	4475	14
12	0	3	75	34	29	20	19
11	0	2	99	28	36	62	22
10	2	2	106	28	69	54	31
9	0	2	105	34	26	70	24
8	0	1	205	42	54	92	34
7	0	7	224	36	77	99	52
6	2	4	128	70	96	126	74
5	1	6	55	82	118	165	94
4	1	10	111	89	146	296	105
3	0	12	167	59	221	371	92
2	0	6	144	72	250	375	101
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	647095	647158	29604	41387	17472	27573	15191

FWE-1

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	No oP	RAIN	No oP
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	117.7	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	81897	81897	81897	81897	81897	81897	81897
64	0	0	0	334	0	0	0
63	0	0	1	80	0	1	0
62	0	0	10	80	0	0	0
61	0	0	42	68	0	12	0
60	0	0	33	31	0	42	0
59	0	0	27	36	0	34	0
58	0	0	72	25	0	16	0
57	0	0	47	48	0	31	0
56	0	0	24	39	0	15	0
55	0	0	24	46	0	48	0
54	0	0	19	15	0	52	0
53	0	0	14	19	0	37	0
52	0	0	25	13	0	17	0
51	0	0	15	14	0	14	0
50	0	0	18	38	0	22	0
49	0	0	17	57	0	32	0
48	0	0	6	89	0	11	0
47	0	1	7	93	0	14	0
46	0	0	16	72	0	11	0
45	0	0	10	24	0	10	0
44	0	0	17	58	0	12	0
43	0	0	13	71	0	25	0
42	0	0	1	86	0	8	0
41	0	0	6	197	0	33	0
40	0	0	10	240	0	15	0
39	0	0	11	164	0	19	0
38	0	0	17	101	0	5	0
37	0	0	17	181	0	7	0
36	0	0	18	140	0	3	0
35	0	0	28	154	0	4	0
34	0	0	29	283	0	3	0
33	0	0	11	261	0	0	0
32	0	2	23	286	0	3	0
31	0	41	24	263	0	2	0
30	0	244	11	263	0	0	0
29	0	82	8	222	0	6	0
28	0	231	14	182	0	14	0
27	0	1	7	175	0	12	0
26	0	3	20	177	0	24	0
25	0	0	12	241	0	16	0
24	1	2	29	242	0	22	0
23	139646	2	43	315	0	28	0
22	559938	10	27	454	0	36	0
21	234	0	28	386	0	65	0
20	256	2995	31	579	0	85	0
19	74	100191	169	646	0	63	0
18	0	179254	375	956	0	65	0
17	2	118508	300	2264	0	252	0
16	0	282706	449	3910	0	3014	0
15	0	15885	1613	6652	0	3074	0
14	0	0	4394	27843	0	12951	0
13	2	0	52356	32541	0	45	0
12	2	0	0	98	0	60	0
11	2	0	23	104	0	52	0
10	0	0	32	122	0	22	0
9	0	0	32	126	0	44	0
8	0	0	69	183	0	20	0
7	0	0	104	193	0	32	0
6	2	0	46	246	0	20	0
5	0	0	60	234	0	60	0
4	0	0	56	368	0	58	0
3	0	0	114	492	0	78	0
2	0	0	212	568	0	190	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	700159	700158	61286	84488	0	20966	0

FDP-1

	Load	Disp	ε 1	ε 2
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4
FULL	117.7	2	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC
TIME	77095	77095	77095	77095
64	0	0	1	3
63	0	0	162	2
62	0	0	198	2
61	0	0	206	0
60	0	0	158	6
59	0	0	94	2
58	0	0	194	6
57	0	0	288	8
56	0	0	128	20
55	0	0	108	822
54	0	0	86	1324
53	0	0	106	1316
52	0	0	94	664
51	0	0	109	232
50	0	0	69	232
49	0	0	54	148
48	0	0	56	22
47	0	0	101	16
46	0	0	83	33
45	0	0	78	23
44	0	0	91	37
43	0	0	56	32
42	0	0	64	23
41	0	1	68	8
40	0	0	70	10
39	0	0	66	14
38	0	0	70	14
37	0	0	66	7
36	0	0	46	7
35	0	0	39	2
34	0	0	42	4
33	0	0	32	1
32	0	0	37	6
31	0	0	39	5
30	0	0	36	4
29	0	0	32	18
28	0	0	52	14
27	0	0	51	22
26	0	2	47	40
25	0	0	64	53
24	0	0	42	50
23	0	2	40	54
22	0	0	49	167
21	0	4	87	303
20	0	2	349	4922
19	0	0	1139	390
18	0	42	5001	0
17	0	21272	732	7
16	101236	223682	58	2
15	156237	12865	32	2
14	255	0	33	2
13	63	0	42	5
12	1	2	36	0
11	3	0	25	4
10	0	0	14	2
9	4	0	34	2
8	12	4	43	0
7	56	0	27	3
6	6	2	54	1
5	0	8	84	1
4	3	5	98	4
3	0	4	140	0
2	2	8	236	0
1	0	0	0	0
TOTAL	257878	257905	11836	11123

FDP-2

	Load	Disp	ε 1	ε 2
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4
FULL	58.8	2	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC
TIME	509064	509064	509064	509064
64	0	20	0	1421
63	0	2	0	140
62	0	0	0	226
61	0	0	1	264
60	0	2	0	238
59	0	0	0	142
58	0	0	28	118
57	0	0	46	80
56	0	0	115	160
55	0	0	61	116
54	0	0	36	138
53	0	0	28	37
52	0	0	12	22
51	0	0	11	104
50	0	0	11	177
49	0	0	17	77
48	0	0	46	58
47	0	0	47	37
46	0	0	59	44
45	0	0	40	47
44	0	0	41	48
43	0	0	28	50
42	0	0	38	62
41	0	1	39	72
40	0	0	66	89
39	0	2	76	46
38	0	0	68	38
37	0	0	106	24
36	0	0	110	27
35	0	0	98	23
34	0	0	91	27
33	0	0	71	27
32	0	0	74	23
31	0	0	55	26
30	0	0	48	14
29	0	0	52	31
28	0	0	78	20
27	1	0	112	20
26	0	0	150	17
25	28	0	288	168
24	8277	0	329	140
23	3062195	0	775	187
22	1816610	4	1118	122
21	179572	6	1086	52
20	35066	16	653	133
19	4627	15	211	304
18	402	132	958	256
17	364	222	915	203
16	390	256	2611	599
15	792	125	1823	720
14	42	5970	13207	14011
13	4	354196	45015	5179
12	2	3656971	16	63
11	0	1088974	8	55
10	0	1498	26	56
9	0	16	26	60
8	0	20	24	40
7	1	26	38	64
6	0	16	52	86
5	1	14	96	110
4	0	15	134	80
3	0	31	212	160
2	0	18	212	172
1	0	0	0	0
TOTAL	5108374	5108568	71792	27350

FDP-3

	Load	Disp	ε 1	ε 2
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4
FULL	58.8	2	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC
TIME	62576	62576	62576	62576
64	0	0	1	0
63	0	0	0	0
62	0	0	0	0
61	0	0	200	0
60	0	0	974	0
59	0	0	492	17
58	0	0	422	99
57	0	0	378	48
56	0	0	360	39
55	0	0	147	34
54	0	0	75	27
53	0	0	120	17
52	0	0	95	26
51	0	0	95	22
50	0	0	83	27
49	0	1	91	18
48	0	0	99	15
47	0	0	94	17
46	0	0	61	16
45	0	0	76	13
44	0	0	110	8
43	0	1	155	13
42	0	0	66	19
41	0	0	91	9
40	0	0	89	18
39	0	0	40	29
38	0	0	53	29
37	0	0	47	15
36	0	0	49	5
35	0	1	29	16
34	0	2	52	23
33	2	20	72	12
32	2	116	38	5
31	15	116	100	8
30	147	8	86	6
29	3325	22	71	6
28	237344	42	96	7
27	197600	16	27	3
26	82	10	32	15
25	4	18	171	21
24	6	32	246	35
23	0	30	722	71
22	0	34	1190	93
21	0	270	1455	231
20	0	428	2187	1344
19	1	226	3618	588
18	0	11130	8958	432
17	0	164720	12692	144
16	0	241539	92	3436
15	0	19752	84	8294
14	1	4	111	37
13	2	1	104	20
12	0	0	115	38
11	0	2	124	22
10	0	0	122	24
9	0	2	216	30
8	0	6	260	39
7	0	0	434	23
6	0	2	298	27
5	0	4	244	18
4	2	6	376	25
3	0	4	556	56
2	13	0	366	51
1	0	0	0	0
TOTAL	438546	438565	39907	15780

FDP-4

	Load	Disp	ε 1	ε 2
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4
FULL	117.7	2	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC
TIME	78398	78398	78398	78398
64	0	0	693	0
63	0	0	116	0
62	0	0	64	0
61	0	0	114	0
60	0	0	98	0
59	0	0	120	0
58	0	0	96	0
57	0	0	70	0
56	0	0	82	0
55	0	0	120	0
54	0	0	77	0
53	0	0	23	0
52	0	0	25	0
51	0	0	30	0
50	0	0	30	0
49	0	0	31	0
48	0	0	18	0
47	0	0	44	0
46	0	0	28	0
45	0	0	20	0
44	0	0	10	0
43	0	0	25	0
42	0	0	16	0
41	0	0	13	0
40	0	0	19	0
39	0	0	13	0
38	0	0	15	0
37	0	0	14	0
36	0	0	8	0
35	0	0	11	0
34	0	0	23	0
33	0	0	31	0
32	0	0	22	0
31	0	0	46	0
30	0	0	41	0
29	0	0	36	0
28	0	0	44	0
27	0	0	25	0
26	0	0	32	0
25	0	0	36	0
24	0	0	141	0
23	0	0	512	0
22	0	0	300	0
21	0	0	198	0
20	0	0	188	0
19	0	0	200	0
18	0	0	70	0
17	0	1	75	986
16	0	1	226	15928
15	0	59	237	191
14	1	119010	3361	206
13	553250	508552	14889	102
12	24182	14851	46	120
11	42842	0	58	205
10	6992	0	66	174
9	654	0	52	41
8	14554	1	62	27
7	1	0	59	40
6	0	0	67	27
5	0	0	99	21
4	0	0	70	15
3	0	2	58	14
2	0	2	158	5
1	0	0	0	0
TOTAL	642476	642479	23571	18102

FDP-5

	Load	Disp	ε 1	ε 2
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4
FULL	117.7	2	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC
TIME	313845	313845	313845	313845
64	0	0	0	0
63	0	0	0	1
62	0	0	0	20
61	0	0	0	28
60	0	0	0	21
59	0	0	0	8
58	0	0	0	10
57	0	0	0	20
56	0	0	0	10
55	0	0	0	13
54	0	0	0	10
53	0	0	0	8
52	0	0	0	8
51	0	0	0	4
50	0	0	0	11
49	0	0	0	14
48	0	0	0	10
47	0	0	0	14
46	0	0	0	4
45	0	0	0	16
44	0	0	0	19
43	0	0	0	6
42	0	0	0	11
41	0	0	0	8
40	0	0	0	14
39	0	1	0	20
38	0	0	0	14
37	0	0	0	18
36	0	0	0	18
35	0	0	0	24
34	0	0	0	7
33	0	0	0	4
32	0	0	1	8
31	0	0	0	8
30	0	0	11	13
29	0	0	26	13
28	0	0	24	13
27	0	0	11	12
26	0	0	10	20
25	0	0	10	13
24	0	0	13	25
23	0	0	18	28
22	0	0	7	42
21	0	0	9	81
20	0	0	15	84
19	0	0	9	177
18	0	0	17	141
17	0	0	55	717
16	0	0	84	1352
15	0	3	269	5532
14	0	129	19956	23937
13	2631459	1223578	375	8766
12	78499	1484598	1	10
11	1223	3187	3	16
10	118	0	3	20
9	13	0	4	41
8	5	2	3	26
7	17	2	3	30
6	150	2	2	24
5	16	2	3	32
4	4	0	2	60
3	0	2	4	76
2	0	0	4	96
1	0	0	0	0
TOTAL	2711504	2711506	20952	41806

FDN-1

	Load	Disp	ε 1	ε 2	—	—	—
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	—	—	—
CHNO	1	2	3	4	—	—	—
FULL	294.0	15	10000	10000	—	—	—
UNIT	kN	mm	μ	μ	—	—	—
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	—	—	—
COUP	AC	AC	AC	AC	—	—	—
TIME	24085	24085	24085	24085	—	—	—
64	0	0	3	157	0	0	0
63	0	0	1	88	0	0	0
62	0	0	3	136	0	0	0
61	0	0	2	80	0	0	0
60	0	0	5	70	0	0	0
59	0	0	9	46	0	0	0
58	0	0	49	30	0	0	0
57	0	0	229	28	0	0	0
56	0	0	218	18	0	0	0
55	0	0	127	21	0	0	0
54	0	0	192	5	0	0	0
53	0	0	105	8	0	0	0
52	0	0	48	8	0	0	0
51	0	0	145	6	0	0	0
50	0	0	24	6	0	0	0
49	0	0	84	11	0	0	0
48	0	0	77	6	0	0	0
47	0	0	70	6	0	0	0
46	0	0	119	3	0	0	0
45	0	0	129	2	0	0	0
44	0	0	57	5	0	0	0
43	0	0	33	4	0	0	0
42	0	0	53	6	0	0	0
41	0	0	67	4	0	0	0
40	0	0	66	8	0	0	0
39	0	0	59	2	0	0	0
38	0	0	35	14	0	0	0
37	0	0	35	31	0	0	0
36	0	0	21	28	0	0	0
35	0	0	23	23	0	0	0
34	0	1	18	14	0	0	0
33	0	0	61	11	0	0	0
32	0	0	48	4	0	0	0
31	0	0	42	2	0	0	0
30	0	0	59	14	0	0	0
29	0	0	27	6	0	0	0
28	0	0	35	7	0	0	0
27	0	0	48	18	0	0	0
26	0	0	57	26	0	0	0
25	0	0	69	12	0	0	0
24	0	0	134	44	0	0	0
23	0	0	114	48	0	0	0
22	0	0	97	98	0	0	0
21	0	0	130	145	0	0	0
20	0	0	60	123	0	0	0
19	0	0	529	171	0	0	0
18	0	0	5245	471	0	0	0
17	0	0	12	5058	0	0	0
16	0	0	8	275	0	0	0
15	0	0	2	44	0	0	0
14	0	0	0	18	0	0	0
13	0	0	2	26	0	0	0
12	180543	0	5	28	0	0	0
11	2507	0	4	34	0	0	0
10	160	0	6	16	0	0	0
9	32	0	9	34	0	0	0
8	42	0	1	28	0	0	0
7	54	0	8	28	0	0	0
6	46	0	37	33	0	0	0
5	24	0	20	71	0	0	0
4	16	10	72	92	0	0	0
3	0	183412	142	128	0	0	0
2	0	0	140	159	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	183424	183423	9329	8146	0	0	0

FDN-2

	Load	Disp	ε 1	ε 2	—	—	—
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	—	—	—
CHNO	1	2	3	4	—	—	—
FULL	294.0	2	10000	10000	—	—	—
UNIT	kN	mm	μ	μ	—	—	—
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	—	—	—
COUP	AC	AC	AC	AC	—	—	—
TIME	13252	13252	13252	13252	—	—	—
64	0	0	207	25	0	0	0
63	0	0	328	6	0	0	0
62	0	0	432	14	0	0	0
61	0	0	852	218	0	0	0
60	0	0	322	126	0	0	0
59	0	0	326	58	0	0	0
58	0	0	84	84	0	0	0
57	0	0	110	86	0	0	0
56	0	0	64	72	0	0	0
55	0	0	34	38	0	0	0
54	0	0	28	22	0	0	0
53	0	0	79	24	0	0	0
52	0	0	29	18	0	0	0
51	0	0	16	8	0	0	0
50	0	0	13	4	0	0	0
49	0	0	30	5	0	0	0
48	0	0	46	2	0	0	0
47	0	0	46	6	0	0	0
46	0	0	53	8	0	0	0
45	0	0	43	2	0	0	0
44	0	0	24	8	0	0	0
43	0	1	14	16	0	0	0
42	0	0	8	4	0	0	0
41	0	0	19	9	0	0	0
40	0	0	5	9	0	0	0
39	0	0	14	13	0	0	0
38	0	0	24	28	0	0	0
37	0	0	13	28	0	0	0
36	0	0	18	18	0	0	0
35	0	0	15	11	0	0	0
34	0	0	15	20	0	0	0
33	0	0	8	19	0	0	0
32	0	0	2	32	0	0	0
31	0	0	9	18	0	0	0
30	0	0	7	28	0	0	0
29	0	0	9	16	0	0	0
28	0	0	17	14	0	0	0
27	0	2	14	38	0	0	0
26	0	0	18	27	0	0	0
25	0	0	26	36	0	0	0
24	0	0	85	59	0	0	0
23	0	308	94	77	0	0	0
22	0	574	211	124	0	0	0
21	0	122099	577	155	0	0	0
20	0	1005	226	227	0	0	0
19	0	2	695	1157	0	0	0
18	0	0	1440	2705	0	0	0
17	0	0	2764	2619	0	0	0
16	0	2	16025	32	0	0	0
15	0	0	9225	24	0	0	0
14	0	0	48	30	0	0	0
13	16058	2	60	24	0	0	0
12	107173	0	58	38	0	0	0
11	383	0	105	36	0	0	0
10	42	0	99	40	0	0	0
9	8	0	217	54	0	0	0
8	16	0	111	74	0	0	0
7	4	0	88	74	0	0	0
6	76	0	138	92	0	0	0
5	232	0	60	106	0	0	0
4	2	0	122	138	0	0	0
3	2	0	110	164	0	0	0
2	0	0	112	187	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	123996	123995	36091	9454	0	0	0

FD1-1

	Load	Disp	ε 1	ε 2	ε 7	ε 8	ε 9
OPER	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN	RAIN
CHNO	1	2	3	4	5	6	7
FULL	147.1	2	10000	10000	10000	10000	10000
UNIT	kN	mm	μ	μ	μ	μ	μ
FILT	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz	50Hz
COUP	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
TIME	55948	55948	55948	55948	55948	55948	55948
64	0	0	445	7	181	99	0
63	0	0	32	4	82	18	0
62	0	0	222	8	162	22	0
61	0	0	322	14	94	130	0
60	0	0	204	726	160	210	0
59	0	0	88	468	230	206	0
58	0	0	78	140	78	18	0
57	0	0	72	226	82	20	0
56	0	0	136	52	88	10	0
55	0	0	100	36	100	12	1
54	0	0	126	68	78	22	0
53	0	0	62	32	60	8	0
52	0	0	34	10	32	4	0
51	0	0	20	24	24	10	0
50	0	0	29	14	18	9	0
49	0	0	17	18	19	6	13
48	0	0	26	34	6	8	33
47	0	0	18	40	3	6	70
46	0	0	21	83	8	8	41
45	0	0	20	42	4	5	35
44	0	0	20	39	5	8	33
43	0	0	29	22	5	1	18
42	0	1	28	18	4	6	24
41	0	0	30	14	4	4	30
40	0	0	49	13	4	8	35
39	0	0	27	36	3	16	53
38	0	0	35	46	3	18	51
37	0	0	40	29	4	3	43
36	0	0	32	39	4	8	33
35	0	0	17	32	0	0	26
34	0	0	38	18	31	8	25
33	0	0	42	33	84	0	38
32	0	0	68	52	18	8	72
31	0	0	59	29	25	8	147
30	0	0	89	55	22	2	182
29	0	0	66	32	14	14	193
28	0	0	67	48	8	10	152
27	0	0	85	38	11	14	75
26	0	0	64	38	72	33	33
25	0	0	110	54	134	23	134
24	18936	0	101	59	61	34	383
23	284458	0	204	56	39	68	419
22	404	2	331	81	66	142	464
21	12	1679	490	148	40	244	306
20	14	302221	753	378	94	199	489
19	10	12	3937	867	261	391	1656
18	36	2	50	3283	8796	739	10836
17	4	0	24	57	7	1616	32
16	10	0	30	23	7	6359	49
15	4	0	28	32	12	10	53
14	0	2	40	52	6	7	69
13	2	0	32	36	12	12	48
12	4	0	26	44	8	13	28
11	2	0	27	33	19	12	46
10	4	0	34	51	7	20	88
9	8	0	27	29	18	22	104
8	8	0	18	35	12	12	227
7	2	2	34	47	24	22	375
6	0	0	20	55	23	12	501
5	2	2	14	32	31	22	285
4	0	0	16	44	15	26	1034
3	0	0	22	38	56	20	784
2	0	0	10	43	162	30	450
1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	303920	303923	9335	8254	11740	11055	20316