

フリーアクセスフロアの辺集中荷重における変形挙動

勝世 敬一, 内田 典昭, 古賀 卓哉*

Deformation Behavior of Free-Access Floor Panels by Concentrated Loading on the Edge

Keiichi KATSUSE, Noriaki UCHIDA, Takuya KOGA*

抄 録

多くのフリーアクセスフロアは、辺集中荷重の強度が中央集中荷重に比べて弱い。そこで、辺集中荷重による破壊のメカニズムを明らかにする目的で、市販のフリーアクセスフロアを中心に4種類のパネルについてひずみゲージによって変形挙動を調べた。その結果、辺集中荷重では剪断変形が支配的で、コア層の強度や下表面の補強材との界面強度の改善が重要であることを示唆する結果が得られた。

1. はじめに

1980年代後半以降建設されるオフィスビルは、その多くが“インテリジェントビル”を称しOA化への対応をセールスポイントとしている。“インテリジェントビル”はその基本的な機能として、

- ①空調、照明、輸送、セキュリティ、省エネなどを自動制御する「ビルディングオートメーション機能」
- ②屋内デジタル交換機、衛星通信、テレビ会議などが利用できる「テレコミュニケーション機能」
- ③OA機器・ワープロ・コンピュータや各種外部情報などが利用できる「オフィスオートメーション機能」

の3つとされている¹⁾。

ここで③のオフィスオートメーション機能についてはコンピュータをはじめとする各種端末機器の統合的運用システムであるローカルエリアネットワーク(LAN)が中心となるため、それらの配線システムをあらかじめ建設設備の中に組み込んでおく必要がある。そしてこのことは新築ビルだけにとどまらず、既存のビルについても改修によるインテリジェント化を図ろうとする傾向が強まっている。そのような配線システムのひとつが、ケーブル類の収納空間を床下に確保するフリーアクセスフロアと呼ばれる2重床システムである。フリーアクセスフロアパネルの静的な強度を評価する方法には、中央集中荷重試験と辺集中荷重試験がある。フリーアクセスフロア製品の多くはパネルの1辺が50cm程度の正方形で、四隅に支持脚を配して隣のパネルと連結するシステムが

多い。そこで、パネルの四隅をジグによって支持してパネルの中央に荷重をかけるのが中央集中荷重試験、同じく四隅を支持して1辺の中央に荷重をかけるのが辺集中荷重試験である。

フリーアクセスフロアパネルの強度は、従来、中央集中荷重試験によって評価することが多かった。しかし、実際の施工現場ではパネルの中央部分ではなく、周辺部分にかかった荷重によって破損する事故が多い。しかも、その多くの場合、中央集中荷重で破壊する荷重よりも小さな荷重で破壊すると考えられている。

現在市販されているフリーアクセスフロアは、サンドイッチ型あるいは積層型の構造をとる複合材料が多い。このような材料は荷重の受け方によってコア層、あるいは層間から破壊する 경우가少なくない。L.J.Gibsonら²⁾はサンドイッチはりまたはサンドイッチパネルの曲げによる破壊機構を、①引張側表層の破壊または降伏、②圧縮側表層のしわ寄り、③コア層の破壊、④表層とコア層の界面剥離、⑤負荷点に生じる表層またはコア層のへこみ、の5種類に分類している。フリーアクセスフロアパネルのように四隅で4点支持される機構の材料は、辺集中荷重の場合に特にコア層破壊や層間破壊が起こりやすいことが経験的に知られている。

そこで本研究では、辺集中荷重による破壊メカニズムを明らかにすることにより、その破壊荷重の向上に役立てることを目的とした。供試体には市販のフリーアクセスフロアを中心に異なった積層構造を有する供試体について4点支持辺集中荷重試験を行い、ひずみゲージを用いて試験体各部のひずみ分布および荷重によるひずみ量の変化を調べた。

*新日鐵化学株式会社

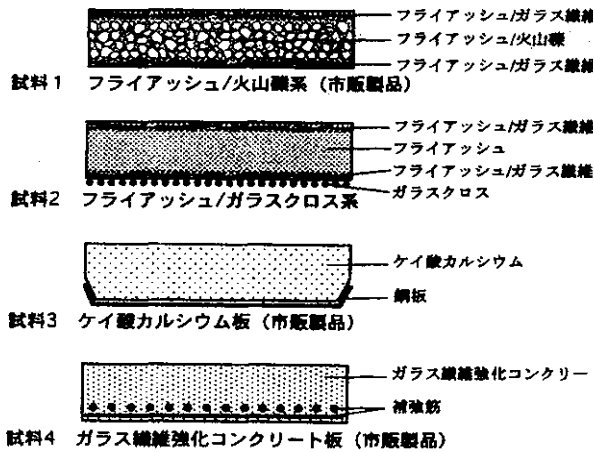


図1 供試体の構成

2. 実験方法

2.1 供試体

供試体は市販のフリーアクセスフロアを中心に実験に供した。それらの供試体の材料構成を図1に示す。

試料1は表層がフライアッシュ/ガラス繊維で、コア層がフライアッシュ中に火山礫を配合した系、試料2は、上側表層は試料1と同様にフライアッシュ/ガラス繊維であるが、コア層のフライアッシュ中に火山礫が配合されておらず、ま

た下側表面にガラスクロスを配したものである。試料3はケイ酸カルシウム板とその下側表面に接着された強化用鋼板の2層の構造を持ったもの、試料4はガラス繊維強化コンクリート (GRC) 板で下側表面付近に補強筋を配置した構造を持ったものである。この中で、試料1, 3, 4が市販製品である。

2.2 ひずみ測定

辺集中荷重試験は四隅で支持したパネルの一辺の中央に荷重を加えながら、パネル表面および裏面のひずみ分布を測定した。荷重装置として油圧サーボ型疲労試験機 (±10ton; 鷺宮製作所製) を使用し、マニュアル制御で荷重を加えた。供試体に対する荷重は約50kgfずつ増加してゆき、各荷重ごとにひずみ分布および加圧子の変位を測定した。

ひずみ測定には直角方向の2軸ひずみゲージ (共和電業製 KFG-10-120-D16-11L1M2S) を使用し、データロガー (共和電業製 UCAM-5BT + USB-50A: 計60点測定可能) に取り込んで記録したひずみの測定点は図2に示したように、荷重点を通る中央線・A-A', A-A'に平行な辺・B-B', 荷重点を通る辺・C-C', C-C'に平行な中央線・D-D' およびC-C'の反対側の辺・E-E'の5本の線上の分布を測定できるように設定した。ただし、C-C', D-D', E-E'については半分の3カ所のみ測定し、残り半分は対称なものとして処理した。ひずみゲージの貼付位置

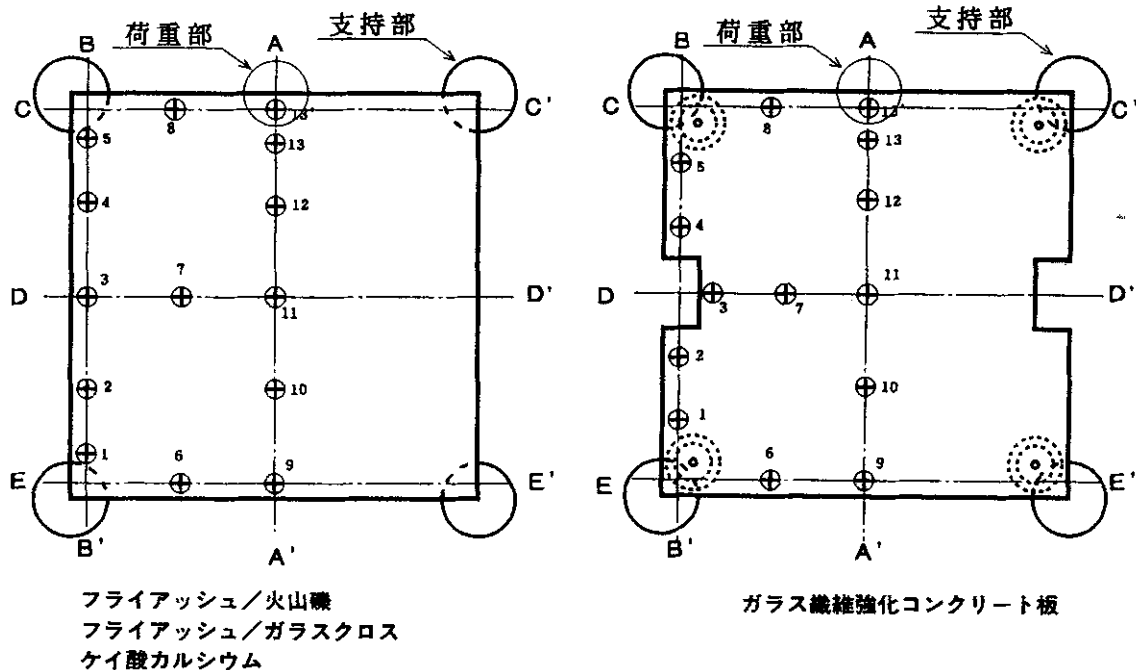


図2 辺集中荷重のひずみ測定位置と測定方法

は図2に示した表面および裏面各13カ所、ひずみゲージの数は測定点1カ所につきタテ方向とヨコ方向の2枚で、1供試体につき合計52個使用した。

なお、GRCの張付け位置が他の供試体と若干変わっているところもあるが、これは脚部の凸面や切り欠きを避けたためである。また、原則として表面と裏面の同じ位置にゲージを配置したが、表面の荷重部の点は加圧子が当たるため、図2の13の位置にずらして貼った。試験装置は図3に示す。

3. 結果と考察

3.1 荷重-たわみ曲線

各供試体の荷重-たわみ曲線を、辺集中荷重と中央集中荷重を比較しながら図4に示した。

図から明らかなように、立ち上がりの傾きは辺集中荷重と中央集中荷重でいずれの試料も大きな差はない。それに対して破壊荷重は、中央集中荷重に対して辺集中荷重が50～60%と、はるかに弱いことを示している。したがって、たわみや歩行感などに関しては、パネルの中央部と周辺部で大きな差はないと考えられるが、破壊に至る事故は周辺部の方が起こりやすいということを裏付けている。

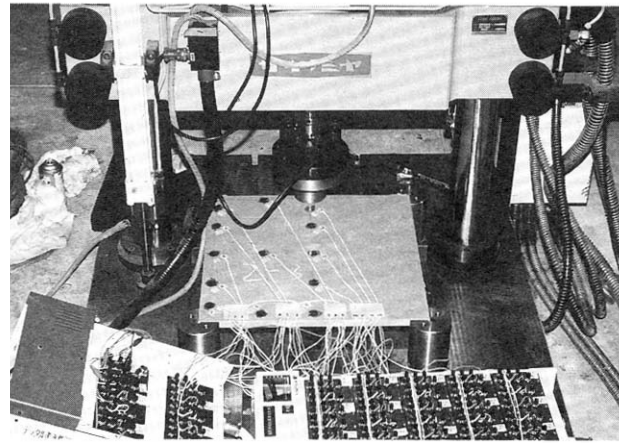


図3 辺集中荷重の試験装置

3.2 破壊の形態

各供試体に辺集中荷重を加えて破壊した様子を図5に比較した。

供試体(a)(b)(d)の荷重点を含む辺を見ると、両端の支持点の内側から荷重点に向けて斜めに亀裂がはいっており、それが荷重点を中心とする半円状に広がっている。これに類似した破壊形態について、鉄筋コンクリート工学の分野ですでに議論されている。すなわち、1次元の問題では引張主鉄

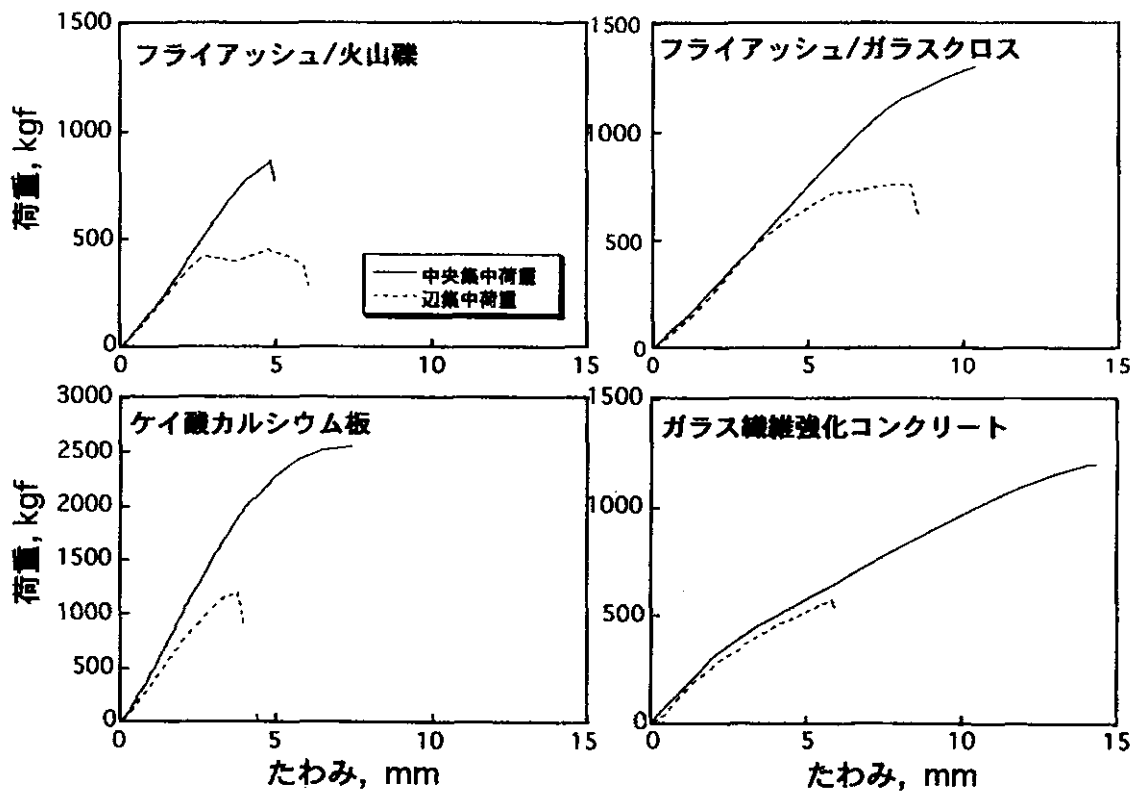
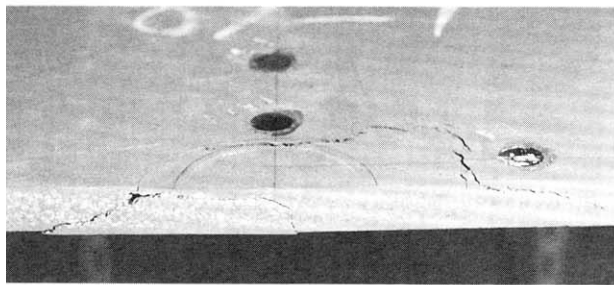
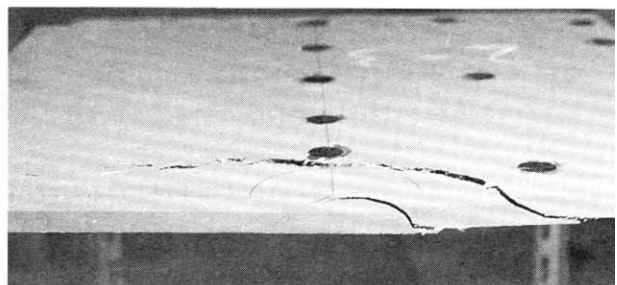


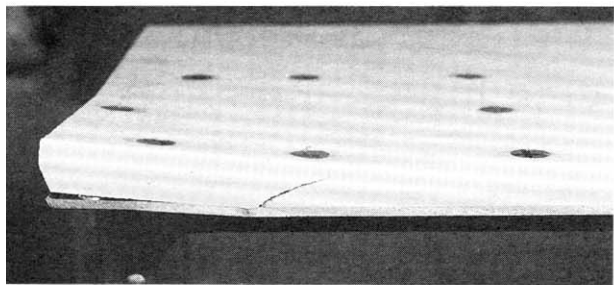
図4 各供試体の荷重-たわみ曲線



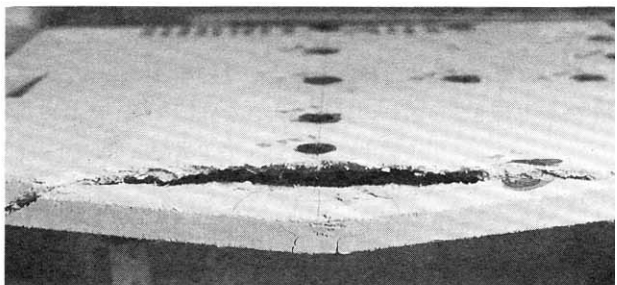
(a) フライアッシュ／火山礫系



(b) フライアッシュ／ガラスクロス系



(c) ケイ酸カルシウム板



(d) ガラス繊維強化コンクリート板

図5 辺集中荷重による破断の状態

筋を下側に配したはりに曲げが加えられたときに生ずる斜め引張応力³⁾、およびその2次元的な類似問題である鉄筋コンクリートスラブの押抜き剪断⁴⁾で、いずれも剪断破壊が支配的なメカニズムとされている。

また、(C)のばあいには、最初に補強鋼板の剥離が起こり、次にケイ酸カルシウム板本体の曲げによると思われる破壊が起こっている。したがって、この場合も鋼板の剥離を引き起こした剪断破壊が支配的なメカニズムと考えられる。

3.3 ひずみ分布

(1) フライアッシュ / 火山礫系

図6に示したのは、フライアッシュ / 火山礫系の供試体に400kgfの辺集中荷重を加えた時の、上表面と下表面のC-C'におけるひずみ分布である。横軸は荷重点を0mmとするC-C'上の位置を、縦軸は 10^{-6} を単位とするひずみで+側が引っ張り、-側が圧縮をそれぞれ示している。

上表面の図は、荷重点（位置=0mm）で最も大きな圧縮ひずみ示し、両端の支持点でひずみがゼロになる三角形のひずみ分布を示している。また、下表面の図では、いくらか形は崩れているが引張側に同様な三角形の分布を示している。この様な分布状態は3点曲げ試験片のひずみ分布と同じである。材料力学の成書⁵⁾に詳述されているように、3点曲げ試験において曲げモーメントは次の式で表されて三角形の分布を示し、表面のひずみは曲げモーメントに比例する。したが

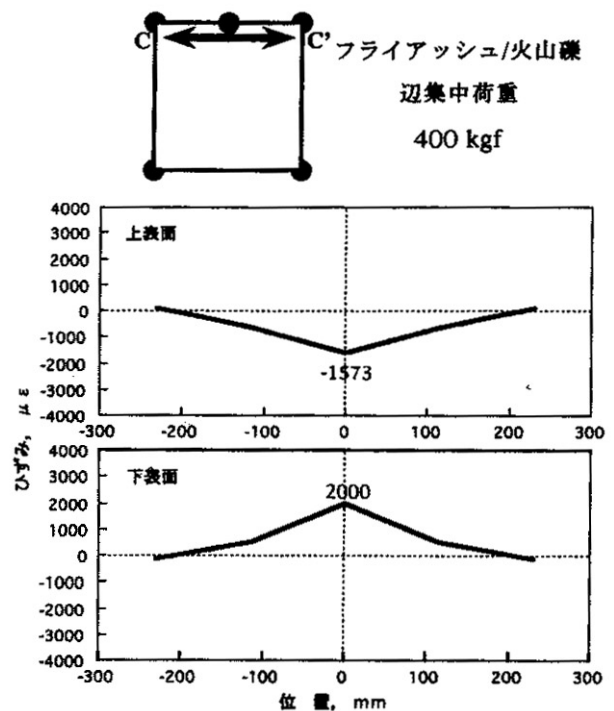


図6 フライアッシュ／火山礫のひずみ分布 (C-C')

って、3点曲げのひずみ分布は、荷重点、支持点を結ぶ三角形になる。

ただし、 M は曲げモーメント、 P は荷重、 X は左支点から

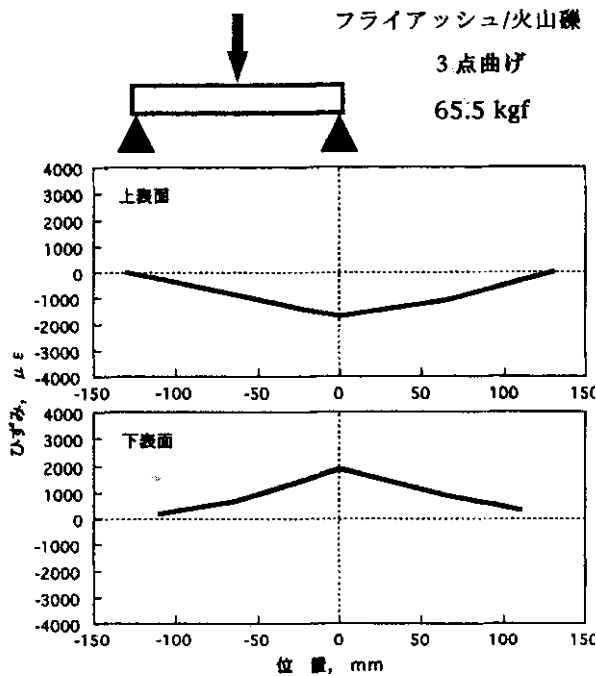


図7 フライアッシュ/火山礫系の3点曲げひずみ分布

$$M = \begin{cases} \frac{P}{2}x & (\text{荷重点より左側}) \\ \frac{P}{2}(1-x) & (\text{荷重点より右側}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{Mt}{2EI} \quad (2)$$

の距離, t は試料厚さ, ϵ は下表面の曲げひずみ, E は弾性率, I は断面2次モーメントである。

図7にフライアッシュ/火山礫系供試体の3点曲げひずみ分布を示したが、実際に図6とほとんど同じ分布形状を呈しているのがわかる。すなわち、辺集中荷重のC-C'においては、ほとんど3点曲げと同様の变形挙動を示している。

次に、C-C'方向の上表面のひずみ分布が荷重点から離れたとともにどう変化するかを示したのが図8である。

D-D', E-E'ともに中央でひずみ量最大、両端でひずみ量ゼロと、C-C'と同様の分布形状を示している。中央部におけるひずみ量を比較すると、C-C'が $-1573\mu\epsilon$ 、D-D'が $-498\mu\epsilon$ 、E-E'が $-257\mu\epsilon$ と、C-C'に対してD-D'が約1/3、E-E'が約1/6と急激に減少しており、特に荷重点と反対側の辺であるE-E'では曲げの影響が非常に小さくなっている。

図9は、C-C'に垂直で荷重点を通る方向A-A'の上表面および下表面のひずみ分布である。縦軸にA-A'の位置、横軸に上表面および下表面のひずみ量を表している。この図で特徴的なことは、C-C'に比べてA-A'には両面ともに

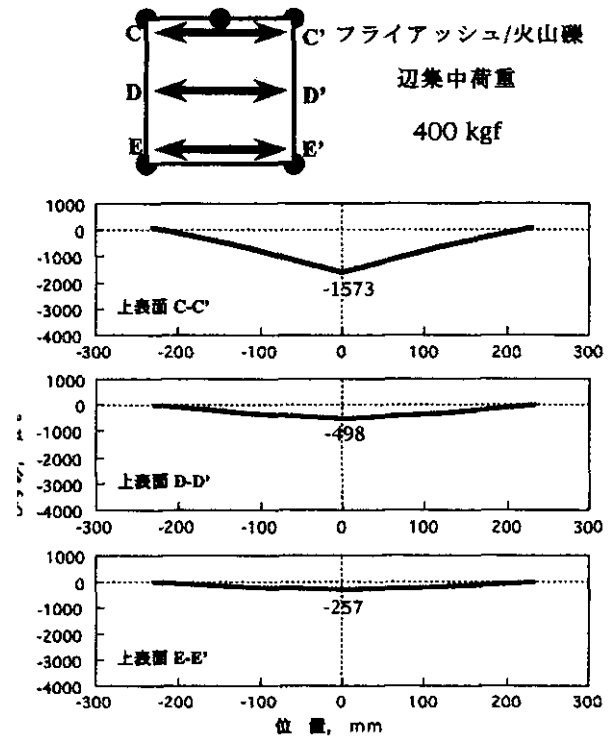


図8 フライアッシュ/火山礫系のひずみ分布

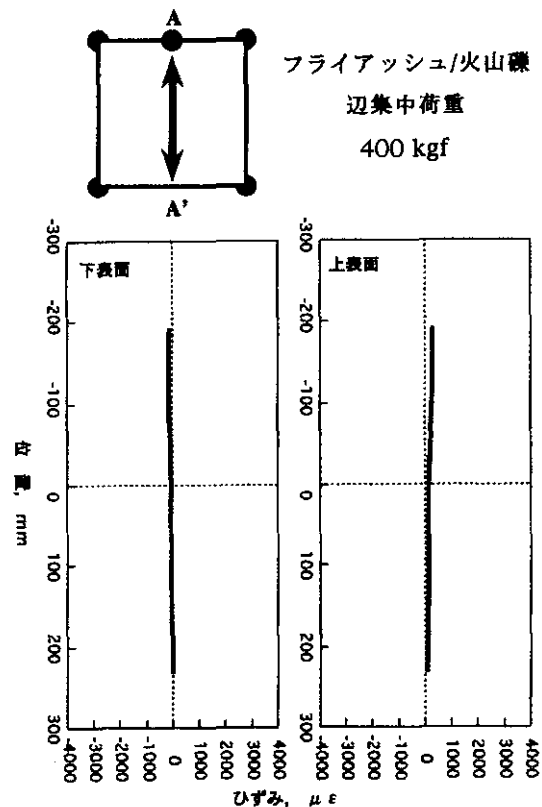


図9 フライアッシュ/火山礫系のひずみ分布 (A-A')

ほとんどひずみを生じていないことである。図8から、荷重点と反対側の辺E-E'にはほとんど曲げによる変位が生じていないので、A-A'とC-C'は最大と最小との間と同じ

程度の変位の差を持っている。この場合、最も考えやすいのはA-A' に片持りの曲げのような変形が生じていることであるが、図9には片持りの曲げ変形であれば現れるはずの上表面に引張、下表面に圧縮のひずみがほとんど認められない。したがって、A-A' の変形が曲げによるものでないとすれば、剪断によるものと考えざるを得ない。つまりA-A' 方向には、C-C' の曲げ変形に相当する大きさの剪断変形が生じていると考えることができる。

図10はA-A' と平行な辺B-B' の上表面のひずみ分布である。この図からB-B' に曲げによる変形はほとんど認められず、また、B-B' に剪断による変形が生ずることも考えられない。したがって、B-B' はほとんど変形していない。E-E' にほとんど変形が認められないことと併せて、パネル全体としてはC-C' 以外の3辺が辺で支持された場合と同様の変形が生じていると考えられる。

図11に示したのは中央集中荷重におけるひずみ分布である。上表面のひずみと下表面のひずみはほぼ対称であることから、中立面は板厚のほぼ中央にあると考えられる。それに対して辺集中荷重の場合には図6に示したように、上表面のひずみ量が $-1573\mu\epsilon$ 、下表面が $2000\mu\epsilon$ であるから、中立面は板厚中央から5%程度上側にあると考えられる。

(2) フライアッシュ / ガラスクロス系

同様に図12~15はフライアッシュ/ガラスクロス系の供試体に402kgfの辺集中荷重をかけた場合のひずみ分布である。分布の形状はフライアッシュ/火山礫系とあまり変わらない。したがってフライアッシュ/火山礫系と同様に、A-A' 方向には主として剪断変形が、C-C' 方向には主として曲げ変形が、それぞれ生じているものと考えられる。

ここで図6と図12を比較すると、ひずみ量はフライアッシュ/ガラスクロス系が16~18%大きくなっていることがわかる。前に述べたように、この供試体はフライアッシュ/火山礫系と比べて、低弾性の火山礫をコア層からはずし、下側表面をガラスクロスで強化しているため、剛性は高くなって当然と思われる。しかし、図6の表層のひずみ量が図12より大きくなっているばかりでなく、図5の荷重-たわみ曲線で比較してもフライアッシュ/ガラスクロス系の方が剛性が小さくなっている。

また、図16は400kgfの中央集中荷重を加えたときのひずみ分布である。位置=0mmにおける上表面と下表面のひずみ量 $-1145\mu\epsilon$ 、 $627\mu\epsilon$ から、中立面は板厚中央より15%程度下側にあると推定される。これに対して図12の辺集中荷重では板厚中央より約6%上側になり、フライアッシュ/火山礫系と同程度になる。この違いは、中央集中荷重では曲げ変形が主になるため、下表面の引張ひずみがガラスクロスによって拘束されて中立面が下がるが、辺集中荷重では剪断による変形の割合が大きくなるため、ガラスクロスの補強効果が減

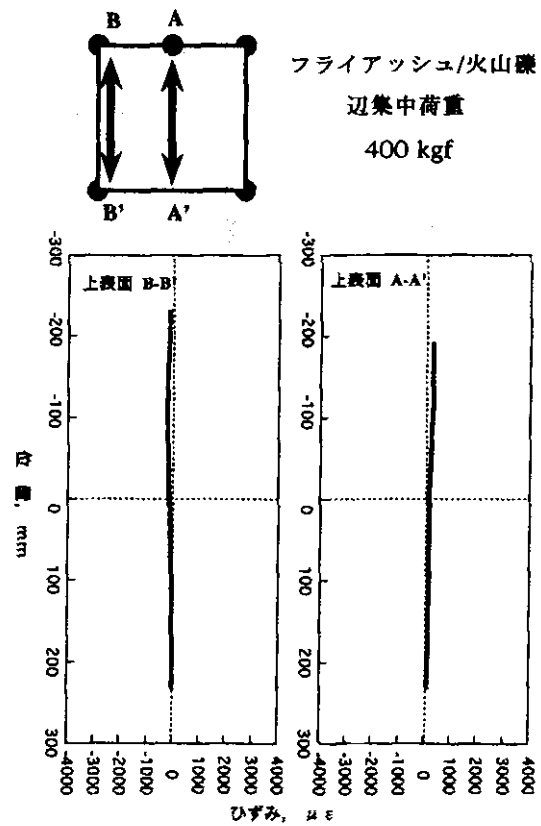


図10 フライアッシュ/火山礫系のひずみ分布(A-A'~B-B')

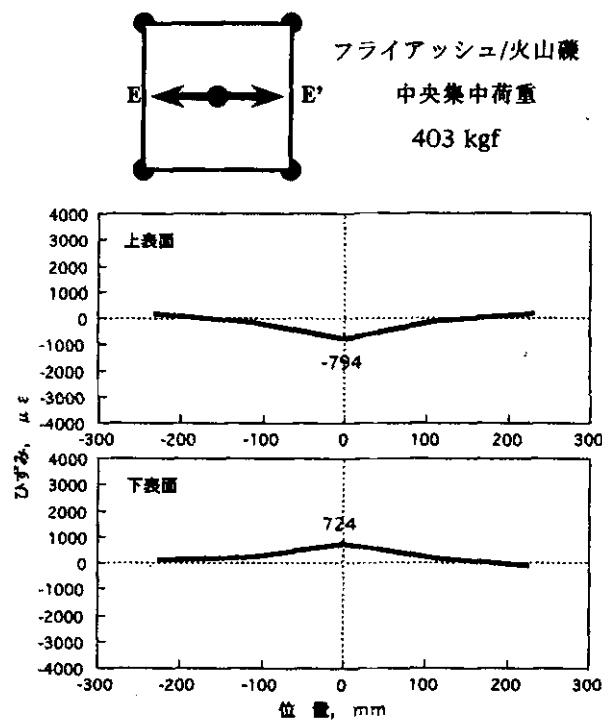


図11 フライアッシュ/火山礫系の中央集中荷重ひずみ分布

少している可能性がある。

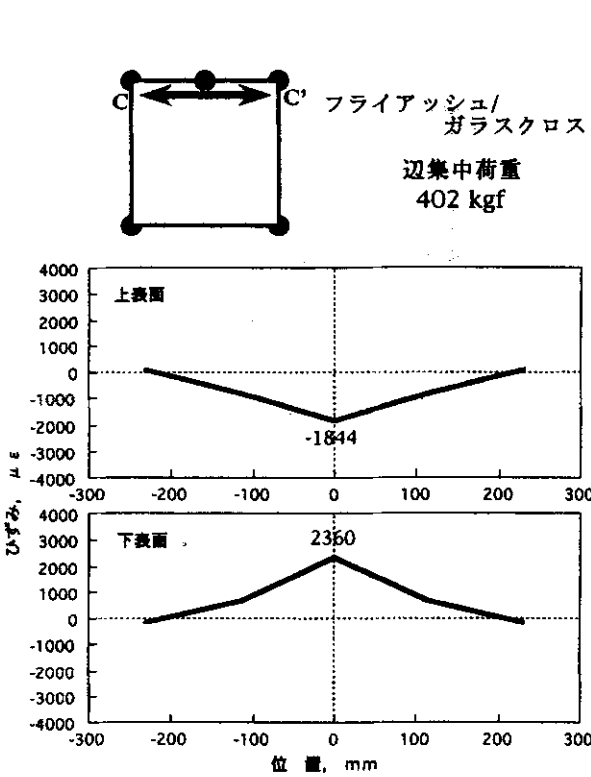


図12 フライアッシュ/ガラスクロス系のひずみ分布(C-C')

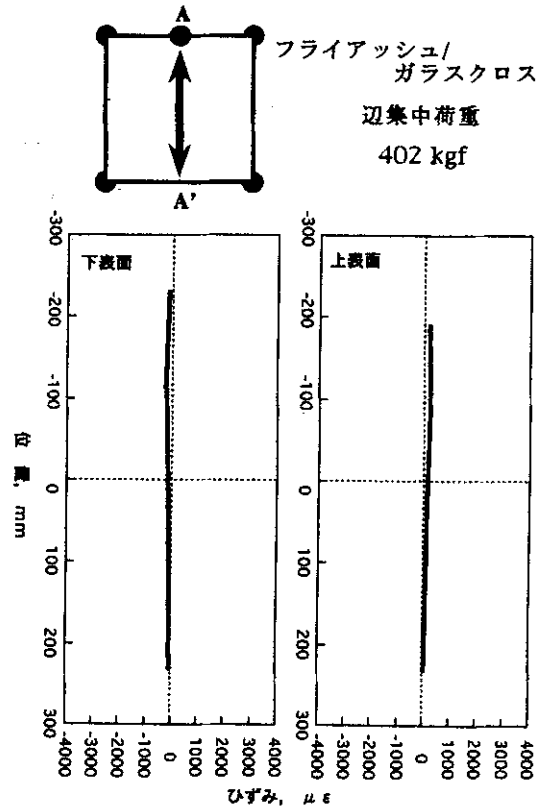


図14 フライアッシュ/ガラスクロス系のひずみ分布(A-A')

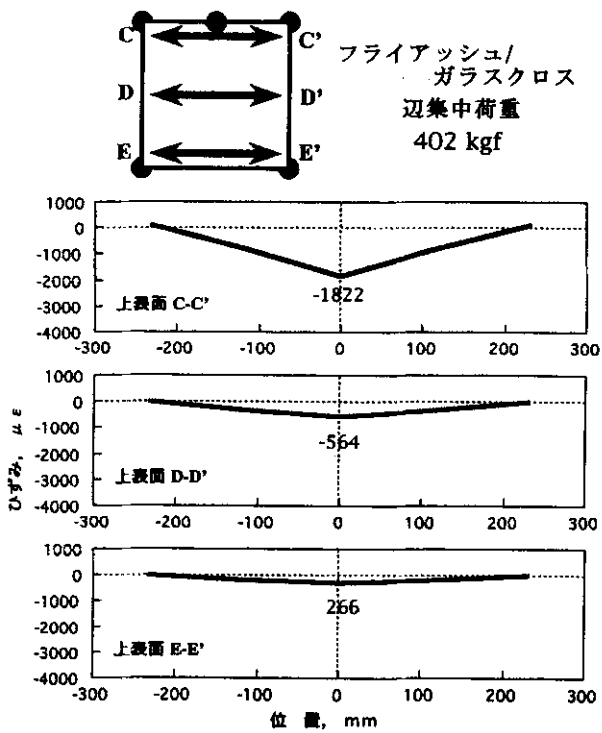


図13 フライアッシュ/ガラスクロス系のひずみ分布(C-C'~E-E')

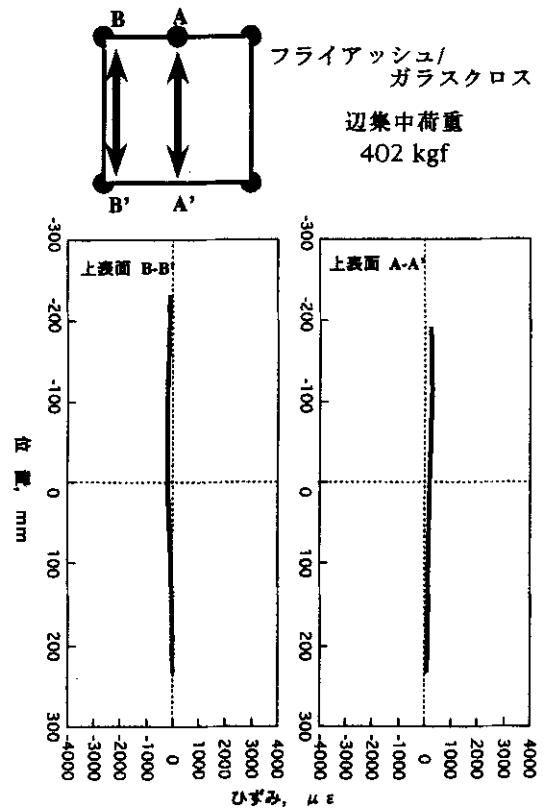


図15 フライアッシュ/ガラスクロス系のひずみ分布(A-A'~B-B')

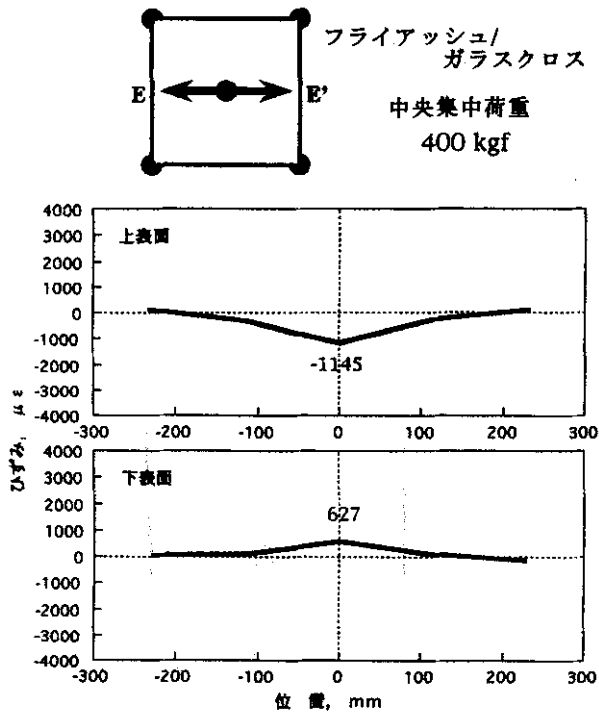


図16 フライアッシュ/ガラスクロス系の中央集中荷重ひずみ分布(E-E')

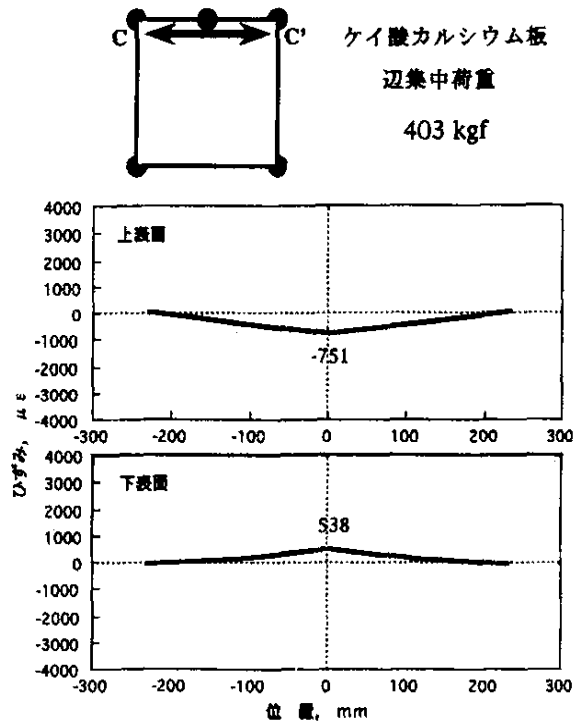


図17 ケイ酸カルシウム板のひずみ分布(C-C')

(3) ケイ酸カルシウム板

ケイ酸カルシウム板に 403kgf の辺集中荷重を加えた時のひずみ分布を図17~20に示した。この供試体は前の2供試体に比べて剛性が大きく、ひずみ量も 1/2 ~ 1/4 の小さな値を示しているが、これらの図のひずみ分布の形状に顕著な違いはない。すなわち前の試料と同様に、荷重点以外の3辺にはほとんどたわみがなく、C-C'には曲げ変形が、A-A'には剪断変形が生じているものと考えられる。

ここで、図17に示されたC-C'の上表面と下表面のひずみの値から計算すると中立面は板厚の下から約42%のところにあると推定される。また、図21は中央集中荷重の分布図であるが、この時の中立面は下から約45%のところにあると思われる。この試料は下表面に強化材(鋼板)を貼って補強しており、下表面の曲げ応力に対して大きな抵抗力をもっているため、辺集中荷重、中央集中荷重ともに中立面が5~8%下がっている。

(4) ガラス繊維強化コンクリート

図22~図25はガラス繊維強化コンクリート板に400kgfの辺集中荷重を加えた時のひずみ分布図である。

これらの図のひずみ分布の形状に前の試料と顕著な違いはない。つまり、荷重点以外の3辺にはほとんどたわみがなく、C-C'には曲げ変形がA-A'には剪断変形が主として生

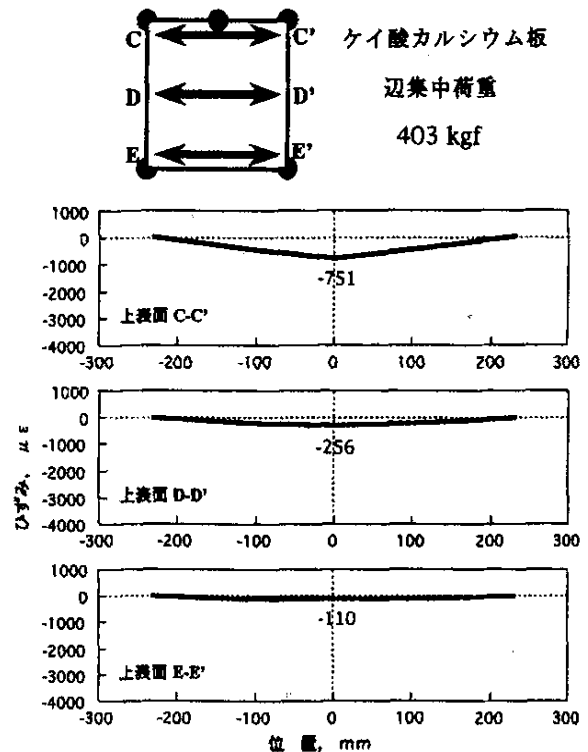


図18 ケイ酸カルシウム板のひずみ分布(C-C'~E-E')

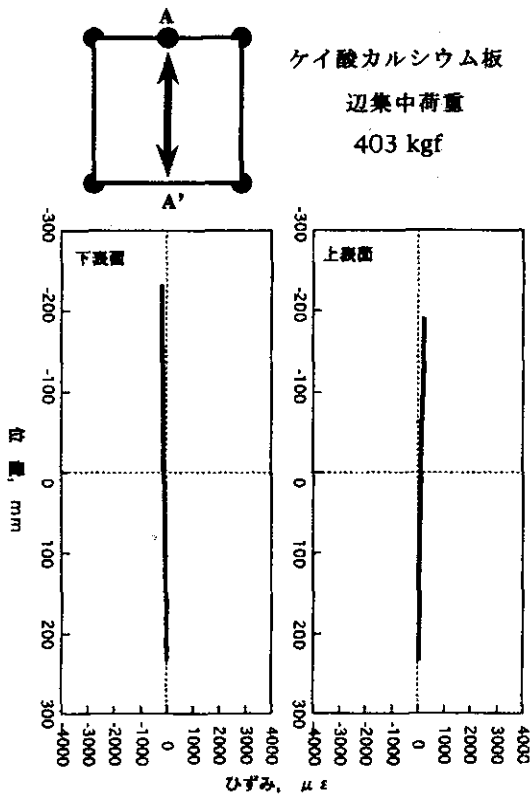


図19 ケイ酸カルシウム板のひずみ分布 (A-A')

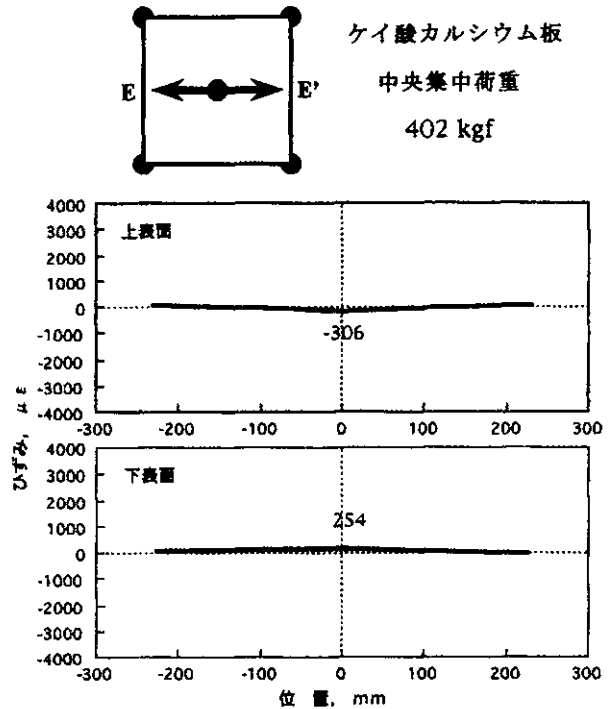


図21 ケイ酸カルシウム板の中央集中荷重ひずみ分布 (E-E')

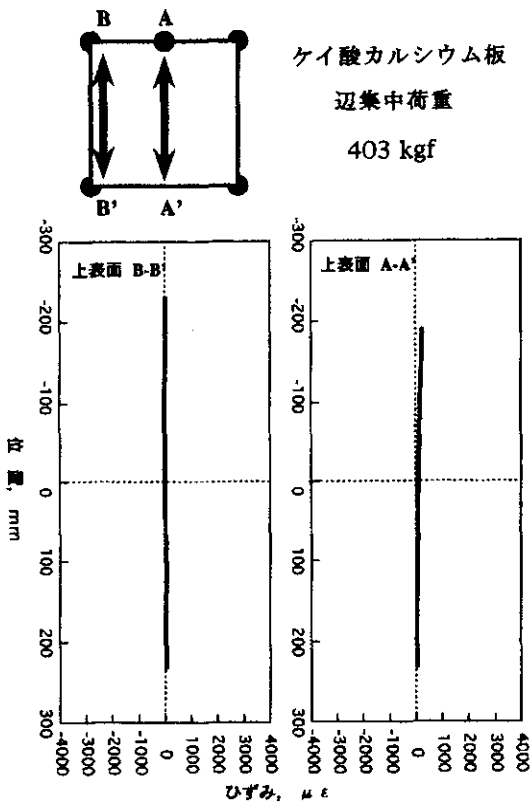


図20 ケイ酸カルシウム板のひずみ分布 (A-A' ~ B-B')

じているものと考えられる。

ただし、図22を詳細に見ると他の試料と異なる特徴が2点ある。第1には、これまで示した他の試料ではC-C'の上表面と下表面でひずみ分布が対称に近い、すなわち中立面が板厚の中央付近にあるのに対し、ガラス繊維強化コンクリートの下表面のひずみはほとんど計測できない程度に小さい。これは下側表層の補強筋がかなり強力なため中立面が下表面の補強筋の位置近くまで下がるので、曲げによって下表面に生ずる引張力による変形はほとんどないためである。したがって、ガラス繊維強化コンクリートの辺集中荷重による変形は主に上表面側のコンクリートの圧縮によるものと考えられる。

第2に、他の試料はC-C'の上表面のひずみ分布が支持点-荷重点-支持点を直線的に結ぶ三角形の形状を呈しているのに対し、ガラス繊維強化コンクリートは端部から中央部に向けてひずみが指数関数的に大きくなっていると思われる点である。(2)式に示したように、ひずみ ϵ は弾性率Eに反比例する。そこで図4の荷重-たわみ曲線を比較すると、ガラス繊維強化コンクリート以外の3試料は荷重とたわみの比例関係を示す直線部分が存在するのに対し、ガラス繊維強化コンクリートでは明確な直線部分が認められない。これは各材料の弾性率の特徴を反映した結果で、3試料が一定の弾性率をもっているのに対し、ガラス繊維強化コンクリートの弾性

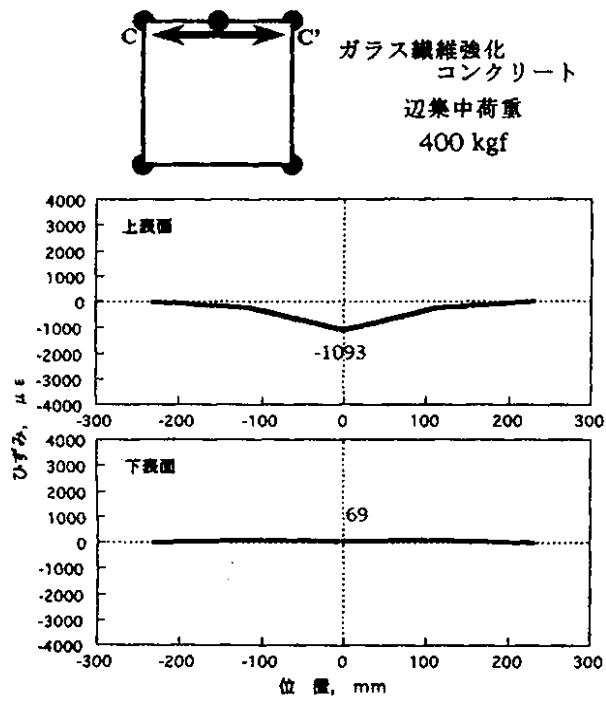


図22 ガラス繊維強化コンクリート板の
ひずみ分布 (C-C')

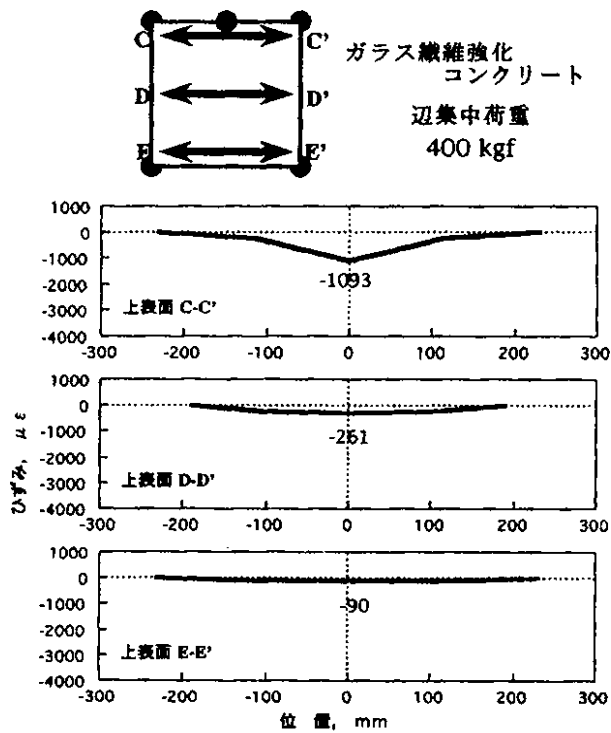


図23 ガラス繊維強化コンクリート板の
ひずみ分析 (C-C' ~ E-E')

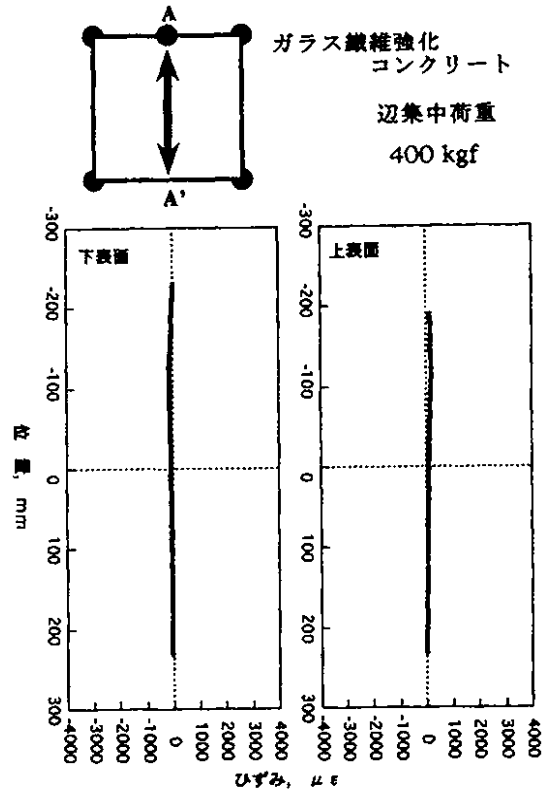


図24 ガラス繊維強化コンクリート板の
ひずみ分布 (A-A')

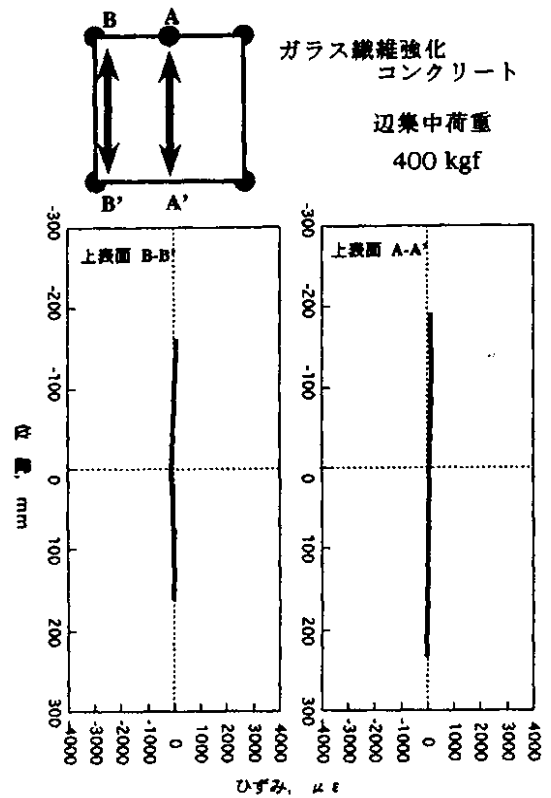


図25 ガラス繊維強化コンクリート板の
ひずみ分析 (A-A' ~ B-B')

4.まとめ

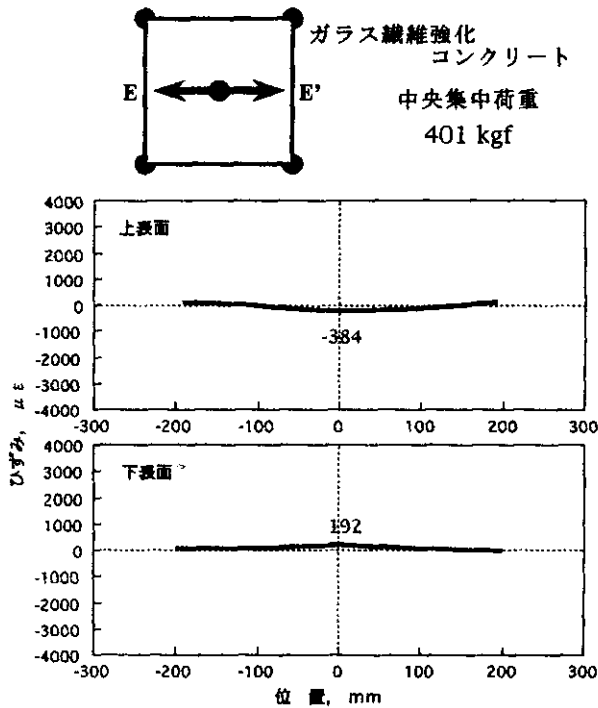


図26 ガラス繊維強化コンクリート板の中央集中荷重ひずみ分布 (E-E')

率は荷重あるいはたわみとともに減少すると考えられる。したがって(1)(2)式から前3試料のひずみ ϵ が距離 X に対して直線的に変わるのに対して、ガラス繊維強化コンクリートの場合には指数関数的に変わっているものと考えられる。図26は中央集中荷重のひずみ分布図である。辺集中荷重のC-C'において下表面のひずみがほとんど認められないのに対して、この図では上表面のひずみ量 $-384\mu\epsilon$ の1/2の $192\mu\epsilon$ を記録している。中立面の位置を計算してみると下表面からちょうど1/3で、かなり下ではあるが、辺集中荷重のほとんど下表面上というほど極端ではない。これは、辺集中荷重でコンクリートの受ける荷重が1軸圧縮に近いと考えられるのに対し、中央集中荷重では2軸圧縮であることに起因することが考えられる。コンクリートの1~3軸挙動に関してはW.F.Chen⁶⁾が過去の報告を集め整理しているが、その中で、コンクリートに3軸圧縮を加えた場合、周拘束圧が高くなるにしたがって、破壊形態が劈開からセメントペーストの圧潰に変わり、強度が増大することを指摘している。このことから類推して1軸より2軸圧縮の方が剛性や破壊強度が大きくなるため、中央集中荷重の中立面が辺荷重より中心に近くなるものと考えられる。

サンドイッチなど積層構造を有する複合材料の設計の参考とするために、フライアッシュ/火山礫系、フライアッシュ/ガラスクロス系、ケイ酸カルシウム板、GRC板の各試料について辺集中荷重試験を行い、パネルの各部分の変形挙動について調べた。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) 辺集中荷重試験によるひずみ分布は、荷重点の辺を除く3辺で支持しているようなひずみ分布を示す。荷重点を含む辺では短冊形試験片の3点曲げと同様に山形の分布を示すが、他の3辺ではひずみ分布の幅が非常に小さく、3辺支持のようなひずみ分布を示す。
- (2) 辺集中荷重試験において、荷重点を含む辺と平行する方向には三角形で次第に小さくなるひずみ分布を示すが、それと直角方向にはたわみの変化量が大いにもかかわらず曲げによる表層のひずみはほとんど観察されない。したがって、直角方向には縦剪断による変形が支配的ではないかと考えられる。辺集中荷重の破壊形態を観察すると、荷重点周辺に剪断によると思われるクラックが観察される。
- (3) 辺集中荷重による破壊状態の観察から、亀裂の開始点はフライアッシュ/火山礫系およびフライアッシュ/ガラスクロス系がコア層、ケイ酸カルシウム板が鋼板との接着面、ガラス繊維強化コンクリート板が補強筋との界面で、いずれも剪断による破壊と考えられる。
- (4) 以上の3点から、辺集中荷重の破壊は主に剪断変形によるものと考えられ、辺集中荷重強度の向上には、コア層の強度、または補強材との界面強度の向上が中心課題になると考えられる。

なお、ひずみ測定の実験を行うに当たって、(株)共和電業・札幌営業所の松山聡一氏には多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会編，“インテリジェントビル読本”，p.172，彰国社（1987）。
- 2) L.J.Gibson,M.F.Ashby,“Cellular Solids-Structure & Properties”，(1988), Pergamon Press;邦訳「セル構造体—多孔質材料の活用のために」,大塚正久訳, pp.342-354,内田老鶴圃（1993）。
- 3) 横道英雄,藤田嘉夫,「鉄筋コンクリート工学」(大学講座・土木工学), p.116, 共立出版（1971）。
- 4) W.F.Chen,“Plasticity in Reinforced Concrete”， McGraw-Hill（1982）; 邦訳「コンクリート構造物の塑性解析」, p.340,丸善（1985）。
- 5) 例えば河本実,「材料力学」(大学講座・機械工学5),

北海道立工業試験場報告 No.294 (1995)

p.45, 共立出版 (1967) ;S.Timoshenko, “Strength of Materials,Part1” 3rd Ed,p.79,p.92,D.Van Nostrand (1955) など.

6) W.F.Chen, “Plasticity in Reinforced Concrete ” , McGraw - Hill (1982) ;邦訳「コンクリート構造物の塑性解析」,p.40, 丸善 (1985) .