

# 近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 15 年度		番号 氏名	00168071
指導教官	藤井 大地 助教授		中川 恭一
題名	FRP の建築構造への適用に関する基礎的研究		

## 1. はじめに

近年建築構造部材において、省エネルギー・省資源の観点から、耐久性に優れた高品質の構造材で、可動移設建築や構造材のリサイクル高度利用など 21 世紀に於ける省資源型・環境に優しいという機能性を有している建設部材が注目されている。

こうした事情を背景にして、欧米において、高比強度・軽量・加工性等の面で FRP (Fiber Reinforced Plastics : 繊維強化プラスチック) が建設構造材として利用されるようになった。これは 1940 年代初め、アメリカでガラス繊維を不飽和ポリエステル樹脂で固める技術が開発され、後にこれが複合材料の始まりである。以来、様々な新繊維の開発が進み、複合材料の応用範囲も拡大してきた。1993 年英国スコットランドで全長 113m の全て FRP の斜張橋が竣工したのを始めとして、欧米各地で橋などへの利用が報告され、標準を整備する動きも見られるようになった。

また FRP は新素材としてわが国でも、鉄よりも強く、アルミニウムよりも軽い材料として、特に、耐食性の優れた工業材料として、また一体成形の材料として注目されるようになった。三島市立屋内プール建屋の立体トラス部材に FRP パイプが使用されたのを契機として、大空間屋根構造や FRP 構造材を利用する応用研究や設計が行われはじめた。さらに、FRP の成形法の一つである連続引抜成形法の改良に伴い、連続鑄造形鋼と同様の、長尺で、精度がよく、かつ、大量生産が高く、安価な FRP 形材を作ることが可能となり、特に、軽量性と高強度・低剛性が耐震設計上極めて有利な効果をもたらすため、建築・土木構造材としての利用が期待されている。

そこで近年、FRP 素材の開発研究は、既に航空・船舶・機械の各工学分野で先駆的に行われ実用化されており、建築構造分野ではコア材を FRP 板で補強したサンドイッチ板や、FRP ハニカムコア・サンドイッチ板の研究が行われている。しかしながら、それらの数値解析は未だ、よくなされていないのが現状である。

そこで本研究は、一般技術者が設計しやすいよう積層板解析プログラムを作り、FRP の構造部材への適用方法を求める。またプログラムの実用化をめざし、解析例との比較・検討を行い、プログラムの有効性の確立を目的とする。

## 2 既往研究

### 2.1 FRP の特徴

繊維強化プラスチックの略で、繊維強化材とマトリックス樹脂を複合して、個々の持つ特性よりも優れた性質を引き出し、機械的強度を著しく向上させた強化プラスチックの総称である。また、使用目的に合った設計が可能であり、単一素材では得られないメリットを持つ材料である。

しかしながら、未だコスト面で大きな問題を抱えているのが現状である。以下に FRP の主な特徴を示す。また、繊維別利用割合、そして、その用途割合を示す。

- 1、 高比強度・・・引張強度がスチールの降伏点より高く、異方性の高いもの場合は、スチールの 7 倍にもなる。また、エネルギー吸収量が大きい。また、衝撃に対しても強い。
- 2、 軽量である・・・密度はスチールの約 20% で、アルミニウムの 60% であり、加工性もよく、輸送費の軽減にも有効である。
- 3、 高耐食性である・・・酸、アルカリ、薬品、海水等に対して優れていて、金属で腐食が問題になる場所でも有効である。
- 4、 断熱性が良い・・・熱伝導率がスチールの約 1/60、アルミニウムの 1/250 で、水分等の吸湿性もよい。
- 5、 非磁性・・・電気絶縁性がよく、非磁性が求められる場所でも適用可。

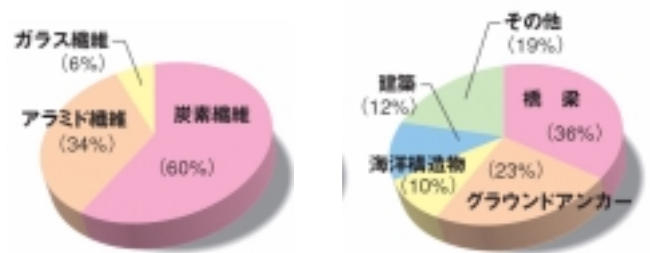


図 2.(a) 繊維別割合

図 2.(b) 用途別割合

### 3 応力仮定法

本研究では、有限要素として 3 次元要素 (8 節点 6 面体要素) を用いるが、通常の板曲げ理論では FRP 部分の要素は床スラブと比較して非常に薄くなるため、精度が落ちてしまう。そこで、関口、菊池らが提案した応力仮定法要素を用いる (図 a)。この要素は、同じ 8 節点要素でありながら、通常のアソパラメトリック要素と比較して、垂直応力が 1 次高次であるため、非常に精度が良く、スラブ等の解析に適している。したがって、本研究では、この応力仮定法を

用いて、応力解析を行う。以下にその概要を示す。

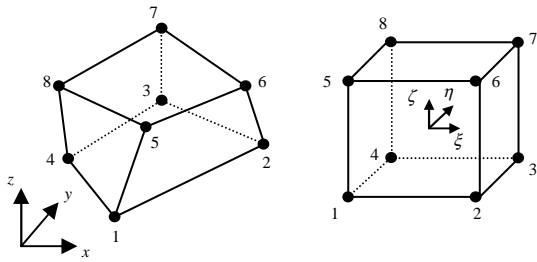


図 - a 8 節点 6 面体要素

### 3.2 応力仮定法要素による定式化

応力仮定法による定式化では、変位を(2.1.2)式のように仮定するだけでなく、要素内の応力を次式で仮定する。

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c_{11} + c_{12}y + c_{13}z + c_{14}yz \\ c_{21} + c_{22}z + c_{23}x + c_{24}zx \\ c_{31} + c_{32}x + c_{33}y + c_{34}xy \\ c_{41} + c_{42}z \\ c_{51} + c_{52}x \\ c_{61} + c_{62}y \end{Bmatrix} = \mathbf{N}_s \mathbf{c} \quad (2.2.1)$$

一方、(2.1.2)式の変位の仮定から導かれるひずみは(2.1.4)式となる。(2.1.4)式のひずみと(2.2.2)式のひずみは一致する必要があるが、ここでは、次式のようなエネルギー的一致条件を課す。

$$\iiint_{\Omega^e} \delta \boldsymbol{\sigma}^T [\mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s \mathbf{c} - \mathbf{B} \mathbf{d}^e] d\Omega = 0 \quad (2.2.4)$$

(2.2.4)式に、(2.2.1)式を代入すると、

$$\delta \mathbf{c}^T \iiint_{\Omega^e} \mathbf{N}_s^T [\mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s \mathbf{c} - \mathbf{B} \mathbf{d}^e] d\Omega = \delta \mathbf{c}^T [\mathbf{M}_S \mathbf{c} - \mathbf{M}_B \mathbf{d}^e] = 0 \quad (2.2.5)$$

要素剛性マトリックスは、次のようになる。

$$\mathbf{k}^e = \iiint_{\Omega^e} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} d\Omega = \mathbf{M}_B^T \mathbf{M}_S^{-1} \mathbf{M}_B \quad (2.2.6)$$

ただし、

$$\mathbf{M}_S = \iiint_{\Omega^e} \mathbf{N}_s^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{N}_s d\Omega \quad (2.2.7)$$

$$\mathbf{M}_B = \iiint_{\Omega^e} \mathbf{N}_s^T \mathbf{B} d\Omega \quad (2.2.8)$$

なお、(2.2.7),(2.2.8)式で定義される

## 4 解析プログラムの概要

### 4.1 はじめに

本研究の解析プログラムは応力仮定法に基づき、一般技術者が設計しやすいように Excel VBA によって作成したプログラムである。以下にその概要を示す。

### 4.2 データ入力

下図 a,b は自動解析を行う User Form である。入力したら、これらの値はセル上に吐き出される。データ入力後のセル上を図 c に示す。また、ヤング係数、ポアソン比、板厚、異方性のデータは後にセル上に入力する。

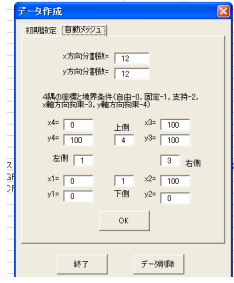
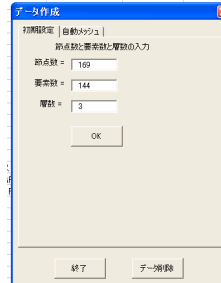


図 a 初期設定の User Form

図 b 自動メッシュの User Form

8 節点番号	x座標	y座標	z座標	x座標	y座標	z座標	x座標	y座標	z座標
9	1	0	0	1	1	1	0	0	0
10	2	6.875	0	1	1	1	0	0	0
11	3	13.75	0	1	1	1	0	0	0
12	4	20.625	0	1	1	1	0	0	0
13	5	27.5	0	1	1	1	0	0	0
14	6	34.375	0	1	1	1	0	0	0
15	7	41.25	0	1	1	1	0	0	0
16	8	48.125	0	1	1	1	0	0	0
17	9	55	0	1	1	1	0	0	0
18	10	0	12.5	0	0	0	0	0	0
19	11	6.875	12.5	0	0	0	0	0	0
20	12	13.75	12.5	0	0	0	0	0	0
21	13	20.625	12.5	0	0	0	0	0	0
22	14	27.5	12.5	0	0	0	0	0	0
23	15	34.375	12.5	0	0	0	0	0	0

図 c データ入力後のセル

要素番号	Ex	Ey	Ez	νxy	νxz	νyz	板厚	異方性	
82	1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
83	2	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
84	3	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
85	4	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
86	5	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
87	6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
88	7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
89	8	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
90	9	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
91	10	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
92	11	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
93	12	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
94	13	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
95	14	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
96	15	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
97	16	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
98	17	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
99	18	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
100	19	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2
101	20	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	1.4	2

図 d 材料定数の入力

### 4.3 応力表示

以上のデータ入力より先に述べた応力仮定法を用いた有限要素法プログラムを実行して算出した様子を以下に示す。

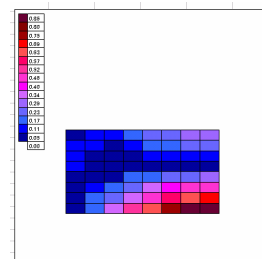


図 e 応力表示

## 5 解析例との比較

### 5.1 はじめに

まず、実際 FRP を使用した解析例と比較し、プログラムの有効性を検討する。

#### 5.1.1 解析モデルと解析条件

基本的なモデルとして、コア材に材質 ss400 の鋼板を用い、補強材として、コア材の上下面に CFRP 板を用いた積層板とする。境界条件については、下側を拘束し、上側の一様な引張荷重を加えたものとする。また CFRP 板については、図 5.1.1 に示すものとする。

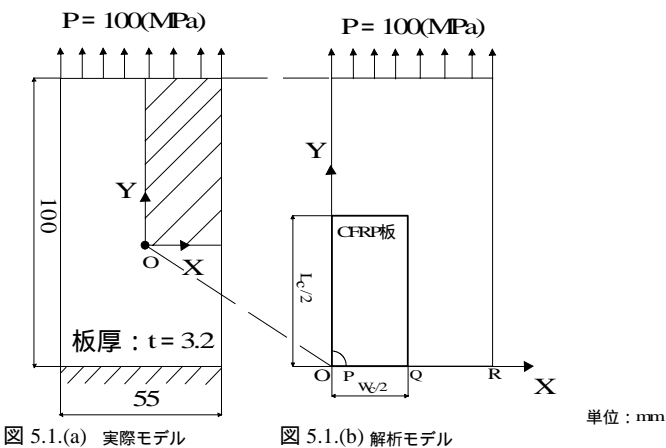


図 5.1.(a) 実際モデル 図 5.1.(b) 解析モデル

図 5.1.1 解析モデル

表 5.1.1 材料定数

	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	板厚 (mm)
スラブ	210000	0.3	3.2
CFRP	$E_x=8000$	$\nu_{xy}=0.005$	1.4~4.2
	$E_y=155000$	$\nu_{yz}=0.34$	1.4~4.2
	$E_z=8000$	$\nu_{zx}=0.005$	1.4~4.2

#### 5.1.3 解析結果

同じ条件の下で解析を行った結果、ほぼ解析例と同様の結果が得られた。解析例との比較を図 5.1.3 に示す。

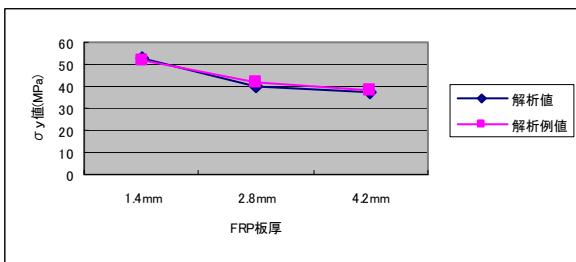


図 5.1.3 解析結果

## 5.2 構造部材への適用

次に実際の構造部材に FRP 補強した際の実験的シミュレーションを行い、FRP の有効性を検討する。

### 5.2.1 解析モデルと解析条件

解析モデルは、内法スパン長が 8.2m の実大の集合住宅の段差付き床スラブを想定したものを考える。スラブ厚さは 250mm(段差部 230mm)、スラブ幅は 5.6m(段差部含む)。スラブ部分の配筋には PC 鋼線量を定め(15.2(SWPR-7B)@800)、設計荷重の 40% をキャンセルする。また、段差部分には配線出来ないことから、床段差両側のリブに PC 鋼線を 2 本ずつ集約して配線し設計荷重の 33% キャンセル出来るものとする。このスラブの上面、下面、両面の 3 パターンにおいて GFRP を貼り付けるものとする。この時スラブと FRP はエポキシ接着剤により接着している。以上のモデルに一樣な等分布荷重(2.1kN/m<sup>2</sup>)を加えているものとする。また解析は解析モデルの 1/4 領域で 12x12 分割で CFRP と GFRP の 2 種類で行った。以下の表 5.2 に材料定数を、図 5.2 に解析モデルの形状を示す。

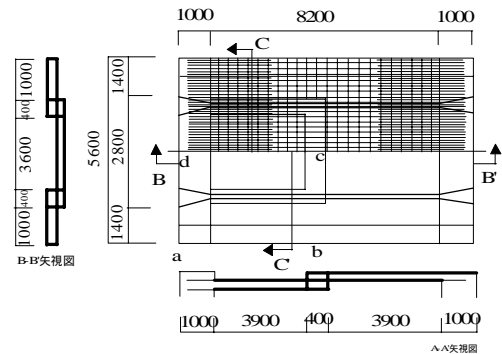


図 5.2(a) 実際モデル

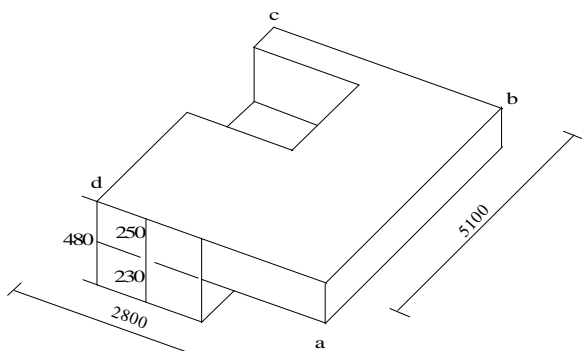


図 5.2(b) 解析モデル

表 5.2 材料定数(単位: N/mm<sup>2</sup>)

### 5.2.2 解析結果

	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	板厚(mm)
スラブ	32100	0.25	250(段差部 230)
GFRP	25500	0.26	1.4~4.2

以上のように解析を行った結果、今回の段差付き床スラブにおいては、明らかに FRP で補強した場合の剛性の増加により、応力の低減が見られた。

以下にそれぞれの板厚の寸法を変化させた 2 例を x、y、値それぞれについての解析結果を図 g-1,2 に示す。

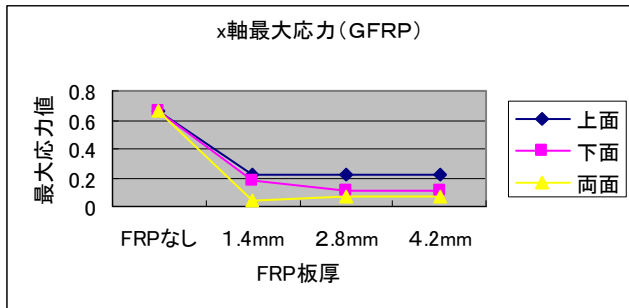


図 g - 1GFRP で補強した場合の x

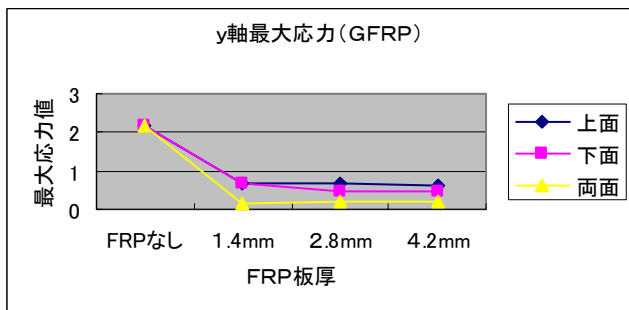


図 g - 2GFRP で補強した場合の y

## 6 結論

本研究では、FRPの知識を深め、積層板解析プログラムを作成し実験的シミュレーションを行い、FRPの構造部材への適用を検討した。今回は GFRP を床スラブの補強に用いた応力解析を行った結果、プログラムの解析値と解析例値が一致し、プログラムの信頼性が得られた。また FRP で補強した際の最大応力の低減も見受けられ、補強していない時の約 30%まで低減され、構造部材に適用した場合の FRP の有効性が確認できた。しかしながら、本来 FRP 板の厚さを厚くすれば剛性が高まり応力の低減が見受けられるだろうと予測されるはずだったが、予測と若干ずれが見受けられた。

## 7 今後の課題

今後の研究では、本研究で作成した積層板解析プログラムを使い、様々な形状の床スラブの FRP 補強した際の解析を行い、構造部材への適用をさらに深く検討する。また、座屈応力に対応出来る解析プログラムについても検討していく予定である。しかしながら、今回の実験で多少の予測の違いが生じたのでさらに解析をし、以後プログラムの問題点を改正していきたい。

## 8 謝辞

本研究を行い、この卒業論文を完成させるにあたり、近畿大学工学部建築学科の藤井大地助教授をはじめとする構造解析研究室の皆様へ助言、ご指導のほどを受け賜りましたことを誠にありがたく、ここに感謝の意を表します。

## 9 参考文献

- 1) 藤井大地, パソコンで解く構造デザイン
- 2) 日本建築学会, 学術講演
- 3) 東京化学同人, 新しい複合材料と先端技術
- 4) 藤井大地, 小泉智彦, CFRP を用いた中空スラブの最適補強に関する研究
- 5) 鴨川直昌, 段差付き PRC スラブの長期たわみに関する実験的研究
- 6) 宮入裕夫, 複合材料入門 -基礎と応用-