

論文 界面の力学的特性評価による補修用樹脂材の材料設計支援に関する研究

中村秀明*1・中西 誉*2・宮本文穂*3

要旨：本研究は、コンクリート構造物の補修に用いられる積層化樹脂材について、界面での力学的特性を評価することにより、力学的な観点から材料設計が支援できる手法の構築を行ったものである。樹脂材の材料選定に際しては、数値解析を必要としない簡易的な手法として、Dunders Parameter による方法を提案し、補修用積層化樹脂材の材料選定図を作成した。この選定図上に材料の組み合わせから決まる Dunders Parameter をプロットすることにより、材料設計を支援することができるものと考えられる。

キーワード：コンクリート構造物，補修，樹脂材，界面，材料設計

1. まえがき

コンクリート構造物の樹脂を用いた補修・補強における材料（樹脂材）選定の現状は、材料の耐候性、遮塩性、防水性といった材料学的観点から検討される場合が多く、力学的観点からの検討はあまり行われていない。材料を単体として用いる場合、材料力学的観点からのみ材料を選定しても問題はないであろうが、複数の材料を用いて一つの構造物としたとき、そこには必ず異種材の接合による界面が存在し、界面の剥離防止などといった力学的観点からの検討が必要と考えられる。

著者らは、従来より、積層化樹脂材界面の力学的挙動の評価と力学的な機能性を表す指標の確立についての検討を行ってきており^{1),2)}、その結果、界面上のき裂を考慮した破壊力学の適用による応力拡大係数などに基づく指標と、界面の層間応力に着目した力学的挙動に基づく指標を結合することにより、合理的な材料設計が行えることを示した。しかしながら、これらの方法は、FEM解析などの数値解析が必要不可欠であり、あまり実用的ではない。

そこで、本研究では、より実用的な材料設計

が行える手法として、数値解析を必要としない Dunders Parameter による方法を提案し、これを用いた材料選定図の作成を行った。この選定図上に材料の組み合わせから決まる Dunders Parameter をプロットすることにより、選定材料の是非が力学的観点から検討できるものと考えられる。

2. Dunders Parameter³⁾による樹脂材接着界面の力学特性の評価法

異なる材料を接合すると、各材料の変形能力の相違により、外荷重あるいは温度変化を受けると、その界面端などに応力集中が生じる。材料の変形は弾性係数 E （せん断弾性係数 μ ）とポアソン比 ν で規定される。したがって、2つの材料が接合された界面を特徴づける材料定数として E_1, E_2 と ν_1, ν_2 の4つがあり、材料の組み合わせは無限にあるが、界面端の応力集中に関しては2つのパラメータで界面の力学特性あるいは適合性を特性づけることができる。これを Dunders のコンポジットパラメータという^{4),5)}。本研究では、供試体モデルを2次元等方弾性体の異種材と考える。この場合の Dunders

*1 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科，博士(工学) (正会員)

*2 大成建設株式会社 (正会員)

*3 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科，工博 (正会員)

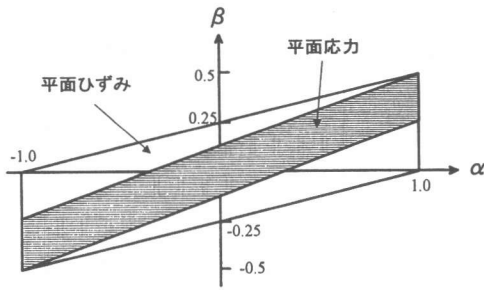


図-1 Dunders Parameter 上での材料の存在領域

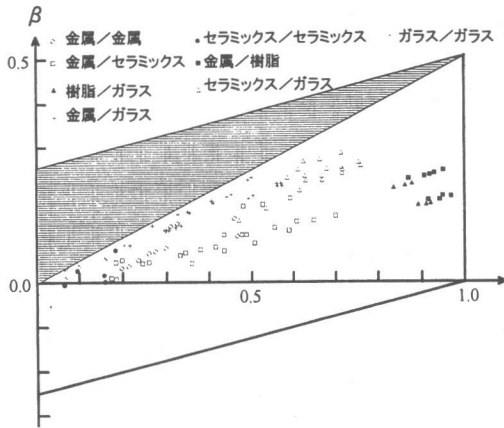


図-2 各種異種材の Dunders Parameter³⁾

Parameter は以下の式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\mu_1(\chi_2 + 1) - \mu_2(\chi_1 + 1)}{\mu_1(\chi_2 + 1) + \mu_2(\chi_1 + 1)} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\mu_1(\chi_2 - 1) - \mu_2(\chi_1 - 1)}{\mu_1(\chi_2 + 1) + \mu_2(\chi_1 + 1)} \quad (2)$$

ここで、 $\mu_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}$, $\chi_i = \frac{3-\nu_i}{1+\nu_i}$ ($i=1, 2$)

である。 $E_1, E_2 > 0$, $0 \leq \nu_1, \nu_2 \leq 0.5$ であるから、次式で規定される線の内側に実際の材料の組み合わせの範囲がある。(図-1 参照)

$$\alpha = \pm 1, \quad \beta = \frac{(3\alpha \pm 1)}{8} \quad (3)$$

同一材料とすると $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ となり、また、

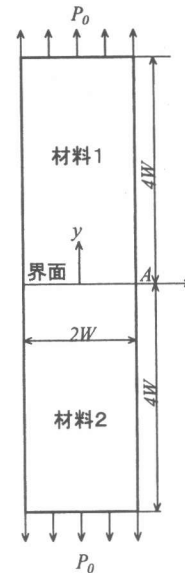


図-3 異種材継手

表-1 材料の組み合わせ材料定数

材料組合せ	ヤング率 E_i (GPa)	ポアソン比 ν_i	ヤング率 E_i (GPa)	ポアソン比 ν_i
■ Good pair	64.73	0.1	238.31	0.35
▼ Bad pair	1.702	0.47	19.61	0.0
● Equal pair	64.73	0.1	229.48	0.3

E_1/E_2 を 0 ないし ∞ (すなわち、どちらか一方を剛体) とすると $\alpha = \pm 1$ となる。また、材料を入れ換えると符号が逆転する。図-2 に実際の材料定数を与えて α, β をプロットしたものを示す。

また、界面端近傍の応力 σ_{ij} は界面端を原点とした極座標表示を用いて、次式のような応力場になると、一般的には考えられている。

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{r^{1-p}} \quad (4)$$

ここで、 p は実数とし、 $0 < p < 1$ となるのが特異応力場 (応力集中が起こっている) である。また、 $p \geq 1$ となり、特異性が消失 (応力集中が存在しない) することもある。さらに p が複素数となることもあり、その場合は、界面端に向かって振動しながら発散する振動特異性の応力場となる³⁾。

Bogy⁶⁾に従い、図-3 に示すような 2 相異種材継

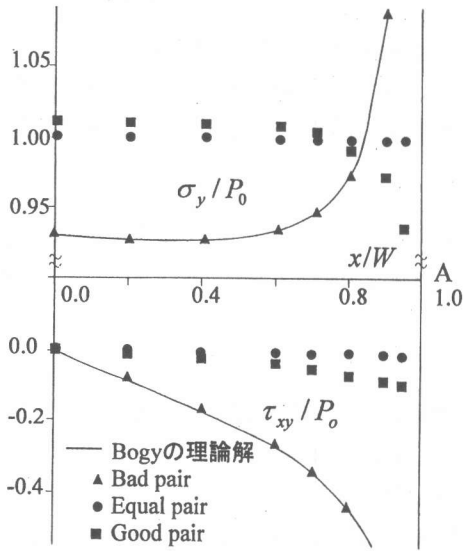


図-4 界面の応力分布

手モデルについて、材料の組み合わせを表-1 のように扱った場の界面での応力分布を図-4 に示す。ここで、 P_0 は引張荷重、 W は材料幅の2倍、 x は材料中心からの x 方向の距離、 y は界面からの y 方向距離である。これより、組み合わせが Good pair のものは、その界面端で応力が小さくなっており、組み合わせが Bad pair のものは、界面端に応力集中が起こっている。つまり、Good pair のものほど組み合わせが良く、界面強度も向上するものと期待される。これらそれぞれの場合の Dunders Parameter を p とともにプロットすると、図-5 のようになる。これは平面ひずみの場合である。このように、 p の等高線が引かれた α - β 線図上に材料の組み合わせによって決まる α, β をプロットすることにより、材料の適合性の善し悪しが判断できる。この場合は、 p が1より大きくなると応力特異性が消失するので、 p が1に近い値を取る点にプロットされた α, β の組み合わせの材料が良い組み合わせということになる。この理論の根底には、界面端などでの応力集中が少ない方が、界面で破壊しにくく（はがれにくい）、良い材料の組み合わせであるという考え方が存在している。

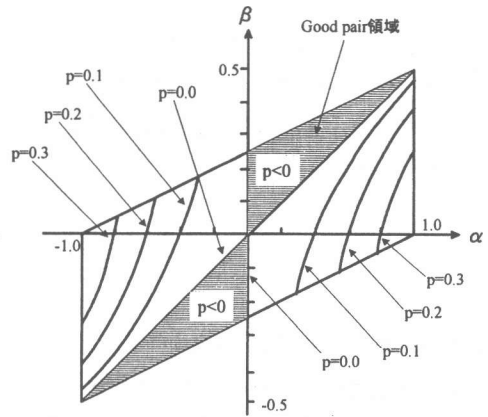


図-5 Dunders の選定図

表-2 各材料定数 (曲げ)

	弾性係数 E (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν	μ (kgf/cm ²)	α
モルタル	237,000	0.2	84,643	2.33
樹脂材 H	19,650	0.4	7,018	1.86
樹脂材 M	5,000	0.4	1,786	1.86
樹脂材 S	1,900	0.4	679	1.86

表-3 Dunders Parameter (曲げ)

1層塗布 供試体	a	b	A_r	α	β
樹脂材 H	3.0	2.00	0.633	0.83	0.24
樹脂材 M	2.5	0.40	0.147	0.95	0.28
樹脂材 S	2.5	0.25	0.092	0.98	0.29

3. 補修用積層化樹脂材の材料設計への適用

適用例として3種類の弾性係数の異なるエポキシ樹脂 (H, M, S) を1層塗布したものと、3層塗布したものを取り上げ、曲げおよび温度応力に対する材料設計を行った。各材料の材料定数を表-2 に示す。材料設計には、材料定数から決まる Dunders Parameter を用い、数値解析を行わずに樹脂材を選ぶための材料選定図の作成を行った。

3.1 曲げを受ける場合の Dunders Parameter の適用

1層塗布供試体についての Dunders Parameter は、表-2 に示される材料定数を式(1)および(2)に代入することにより、表-3 のように求めることができる。なお、表-3 には参考のため、層間せん断応力の分布面積である指標面積 A_r を示す。この A_r は層間せん断応力分布の回帰式を積分す

ることにより、式(5)のように求めることができる。\$A_r\$ は界面の応力集中を定量的に表すものであり、この値が小さいほど界面破壊が起これにくく、大きいほど界面破壊しやすい。

$$A_r = \frac{b}{a} \left(1 - \frac{1}{e^a} \right) \quad (5)$$

ここで、\$a, b\$ は材料により決まる定数

次に、3層塗布供試体に対する適用を行う。モルタルと1層目樹脂材の界面における層間せん断応力分布は、2層目、3層目の樹脂材の影響を無視することはできない。つまり、モルタルと1層目樹脂材の材料定数だけから Dunders Parameter を決定することはできない。そこで、まず初めに、表-3 に示される Dunders Parameter と指標面積 \$A_r\$ の関係を見ると、ほぼ線形関係が得られるので、Dunders Parameter を指標面積 \$A_r\$ で回帰すると、次式のような関係が得られる。

$$\alpha = -0.265A_r + 0.997 \quad \text{相関係数 } r=0.995 \quad (6)$$

$$\beta = -0.088A_r + 0.296 \quad \text{相関係数 } r=0.995 \quad (7)$$

表-4 に各組み合わせに対する指標面積 \$A_r\$ の値と、それを式(6)および(7)に代入して求めた Dunders Parameter の値を示す。また、表-5 には、各層間における Dunders Parameter を示す

表-4 指標面積 \$A_r\$ と Dunders Parameter (曲げ)

組合せ	\$A_r\$	\$\alpha\$	\$\beta\$
HMH	0.871	0.766	0.219
HMS	0.824	0.779	0.223
MHM	0.374	0.898	0.263
MSM	0.333	0.909	0.267
SHM	0.079	0.976	0.289

表-5 各層間の Dunders Parameter (曲げ)

	\$\alpha_i\$	\$\beta_i\$
モルタル-H	0.84	0.24
モルタル-M	0.97	0.29
モルタル-S	0.99	0.30
H-M	0.67	0.20
M-S	0.51	0.15
H-S	0.88	0.26

問題となるモルタルと樹脂1層目の層間の Dunders Parameter が表-4 の値となるように表-5 の値を用いて重回帰をとり、係数を決定する。重回帰は、以下のように Dunders Parameter を与える

$$\alpha = A\alpha_1 + B\alpha_2 + C\alpha_3 + D \quad (8)$$

$$\beta = A\beta_1 + B\beta_2 + C\beta_3 + D \quad (9)$$

ここで、

\$\alpha, \beta\$: すべての層を考慮に入れた求めるべき

Dunders Parameter

\$\alpha_i, \beta_i\$ (\$i=1,2,3\$) : モルタルと1層目、1層目と2層目、2層目と3層目間の Dunders Parameter 係数を求めると、式(8)および(9)は以下のようになる。

$$\alpha = 0.971\alpha_1 - 0.022\alpha_2 - 0.018\alpha_3 - 0.031 \quad \text{相関係数}(r=0.968) \quad (10)$$

$$\beta = 0.869\beta_1 - 0.019\beta_2 - 0.018\beta_3 + 0.015 \quad \text{相関係数}(r=0.974) \quad (11)$$

3.2 温度変化を受ける場合の Dunders Parameter の適用

温度変化を受ける場合の Dunders Parameter は、曲げを受ける場合と同様に求めることができる。表-6 には温度応力を受ける場合の材料定数を示す。

表-6 各材料定数 (温度)

	弾性係数 E(kgf/cm ²)	ポアソン比 \$\nu\$	\$\mu\$ (kgf/cm ²)	\$\alpha\$
モルタル	237,000	0.2	84,643	2.33
樹脂材H	25,150	0.4	8,964	1.86
樹脂材M	9,700	0.4	3,464	1.86
樹脂材S	5,900	0.4	2,107	1.86

表-7 Dunders Parameter (温度)

1層塗布 供試体	\$a\$	\$b\$	\$A_r\$	\$\alpha\$	\$\beta\$
樹脂材H	45	0.50	0.0111	0.78	0.22
樹脂材M	53	0.25	0.0047	0.91	0.27
樹脂材S	35	0.075	0.0021	0.94	0.28

曲げの場合と同様に、表-7に示される Dunders Parameter を指標面積 A_r で回帰すると、次式のような関係が得られる。

$$\alpha = -18.257A_r + 0.986$$

相関係数 (r=0.994) (12)

$$\beta = -6.883A_r + 0.298$$

相関係数 (r=0.992) (13)

表-8 に各組み合わせに対する指標面積 A_r とそれを式(12)および(13)に代入して求めた Dunders Parameter の値を示す。また、各層間の Dunders Parameter を求めると、表-9 のようになる。

表-8 指標面積 A_r と Dunders Parameter (温度)

組合せ	A_r	α	β
HMH	0.0252	0.526	0.125
HMS	0.0141	0.729	0.201
MHM	0.0171	0.674	0.180
MSM	0.0078	0.844	0.244
SHM	0.0157	0.699	0.190

表-9 各層間の Dunders Parameter (温度)

	α_i	β_i
モルタル-H	0.81	0.25
モルタル-M	0.94	0.28
モルタル-S	0.98	0.30
H-M	0.53	0.16
M-S	0.54	0.16
H-S	0.83	0.25

ここで、表-9 の値を用いて、モルタルと樹脂 1 層目の層間の Dunders Parameter が表-8 の値となるように重回帰をとり、係数を決定すると以下のようなになる。

$$\alpha = 2.440\alpha_1 + 0.332\alpha_2 + 0.187\alpha_3 - 1.527$$

- 相関係数 (r=0.992) (14)

$$\beta = 3.733\beta_1 + 0.488\beta_2 + 0.263\beta_3 - 0.841$$

相関係数 (r=0.967) (15)

3.3 材料選定図の作成

曲げを受ける場合および温度変化を受ける場合のそれぞれにおいて、各材料の材料定数より

Dunders Parameter を決定し、それを Dunders の座標に書き込むと、図-6 および図-7 のようになる。ここで、従来の指標面積の観点 (指標面積 A_r が小さいほど界面破壊が起こりにくく、大きいほど界面破壊しやすい。) から考えると、表-4 より曲げを受ける場合は、SHMの方が指標 A_r の値は小さく、HMHの方が値は大きい。よって、組み合わせとしては、SHMの方が良い、また、温度変化を受ける場合は表-7 より、MSMの方が値が小さく、HMHの方が値が大きい。したがって図-6 および図-7 ともに座標原点から遠い点にプロットされた材料の組み合わせほど適した組み合わせと言える。式(10)、(11)および式(14)、(15)より Dunders Parameter を求めて、図-6 および図-7 にプロットすることにより、力学的観点から最適な材料の組み合わせを判断することができる。

4. まとめ

本研究は、コンクリート補修用の積層化樹脂材について、より実用的な材料設計が行える手法として、数値解析を必要としない Dunders Parameter による方法を提案し、これを用いた材料選定図の作成を行った。以下に本研究で得られた結果をとりまとめる。

- 1 層塗布供試体について A_r と Dunders Parameter を求め、その相関式を 3 層塗布供試体に当てはめ、 A_r より 3 層塗布供試体についての Dunders Parameter を導き、最も重要となる母材と樹脂 1 層目間の Dunders Parameter を全層間の Dunders Parameter で重回帰をとった。その結果、以下の式を得た。

(曲げを受ける場合)

$$\alpha = 0.971\alpha_1 - 0.022\alpha_2 - 0.018\alpha_3 - 0.031$$

$$\beta = 0.869\beta_1 - 0.019\beta_2 - 0.018\beta_3 + 0.015$$

(温度変化を受ける場合)

$$\alpha = 2.440\alpha_1 + 0.332\alpha_2 + 0.187\alpha_3 - 1.527$$

$$\beta = 3.733\beta_1 + 0.488\beta_2 + 0.263\beta_3 - 0.841$$

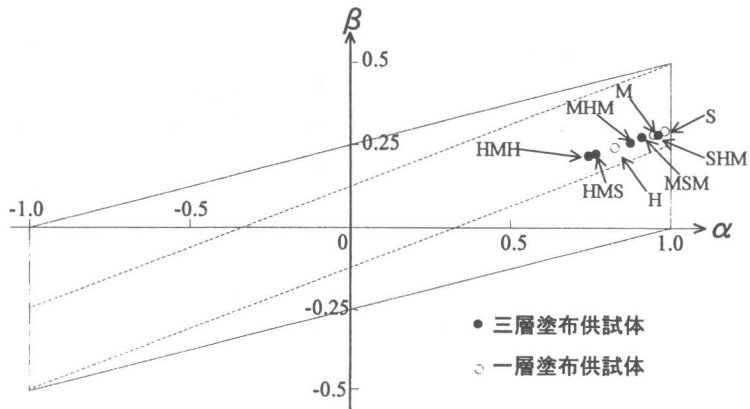


図-6 コンクリート補修用積層化樹脂材の材料選定図 (曲げ)

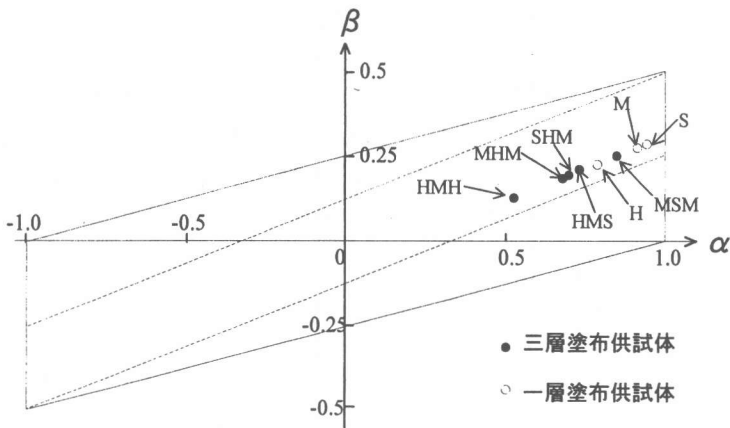


図-7 コンクリート補修用積層化樹脂材の材料選定図 (温度)

2) Dunders Parameter による材料選定図を作成し、上述の4式を用いて求めた Dunders Parameter を選定図の上に記入することにより、樹脂材を積層する場合の材料の組み合わせの優劣が判定できる。これにより、従来の数値解析を行うことなく、選定材料の是非が判別できる。

参考文献

1) 宮本文穂, 森川英典, 木村聡文, 若原直樹 : コンクリート補修用積層化樹脂材の力学的挙動と材料設計に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第5巻, 第2号, pp. 49-63, 1994. 7.
 2) 宮本文穂, 阿山泰久, 中西 誉, 若原直樹 : 破壊力学を適用した補修用積層化樹脂材の

界面応力解析と材料設計, コンクリート工学論文集, 第7巻, 第1号, pp. 41-56, 1996. 1.

3) 結城良治 : 界面の力学, 培風館, pp. 1-46, 1976. 6.
 4) Dunders, J. : Discussion, J. Appl. Mech, Vol.36, pp.650-652, 1969.
 5) Dunders, J. : Effect of Elastic Constants on Stress in A Composite under Plane Deformation, J. Composite Materials, Vol.1, pp.310-323, 1967.
 6) Bogy, B.D. : Two Edge-bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles under Surface Traction, J. Appl. Mech, Vol.38, pp.377-386, 1971.