

各種繊維の耐アルカリ性の評価法に関する基礎研究

魚本健人*・勝木 太**

本研究では、ガラス繊維、アラミド繊維、炭素繊維の耐アルカリ性を明らかにするためにアルカリ溶液による劣化促進試験を実施し、各々の繊維強度および弾性係数の変化について検討した。また、走査電子顕微鏡を用いて浸漬した繊維の微視的な観察も行った。本研究の結果、ガラス繊維はアルカリによって著しく劣化し、その劣化の進行を拡散律速理論によって評価することで、繊維強度の低下を定量化できること、アラミド繊維、炭素繊維について耐アルカリ性が非常に優れていることなどが明らかとなった。

Key Words : glass fiber, aramid fiber, carbon fiber, durability, alkali-resistance, diffusion

1. まえがき

コンクリート用補強材である鉄筋や高張力鋼の代替品として利用される各種繊維（ガラス繊維、アラミド繊維、炭素繊維）を用いたFRPロッドは、塩化物イオンによる劣化が生じないと考えられ、海洋構造物などの海洋環境下に建設される構造物や、融氷剤が多量に散布される橋梁などへの適用が注目されている。しかし、例え塩化物イオンによる劣化が生じないと考えられる材料であっても、このような新しい材料をコンクリート用補強材として使用するためには、鋼材の場合と同様に、力学的特性や耐化学薬品性などについて十分把握する必要がある。このことについては多くの貴重な研究がなされている^{1)~8)}。

一般に、アラミド繊維や炭素繊維の場合は耐化学薬品性に優れ、問題になることは非常に少ないが、ガラス繊維についてはアルカリ性によって耐久性が著しく低下することが知られている⁸⁾。しかし、既往の研究における耐化学薬品性評価はデータ数も少なく必ずしも十分に明らかにされておらず、劣化促進試験によって実際の構造物が受ける環境での長期的な耐久性を正しく評価することは非常に難しい。このような現状の中で、使用経験の少ない材料を使用することは、非常に危険なことである。したがって、各種繊維の耐化学薬品性試験を行い、繊維自身の化学的な腐食、劣化のメカニズムについて把握し、また、その劣化を定量的に評価するための解析手法を提案する必要がある。

そこで本研究では、コンクリート用補強材として使用される繊維が高アルカリ環境下におかれることから、劣化要因として特にアルカリ性を取り上げ、アルカリ溶液

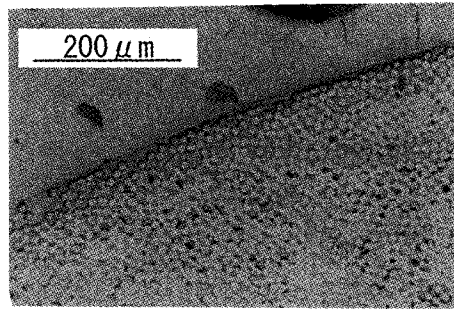


写真-1 GFRP ロッド断面 ($V_f=55\%$) <200倍>

に浸漬した繊維の静的引張試験を実施し、繊維の破断強度および弾性係数の変化について検討すると共に、浸漬した繊維を走査電子顕微鏡 (SEM) で微視的に観察し、アルカリによる劣化機構を明らかにすることを目的とした。即ち、筆者らは、アルカリによる繊維の劣化のメカニズムを定量的に評価するために、走査電子顕微鏡による観察結果を基に、その劣化速度がアルカリの拡散によって支配されるとした拡散律速理論を用いて、繊維の引張強度の低下を予測することを試みた。

2. 本研究の位置づけ

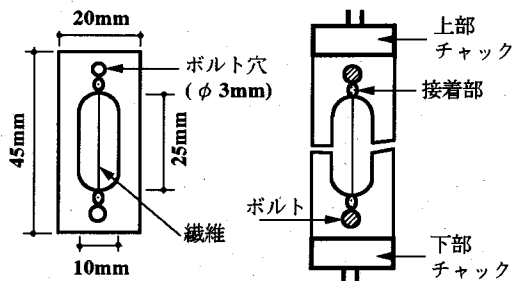
各種繊維を連続繊維補強材として利用する場合、一般に樹脂によって繊維を棒材に成形したもの (FRP ロッド) が使用される。樹脂によって棒材に成形された繊維は、樹脂が繊維の保護材としての役割を果たすことから、コンクリート中のアルカリと絶縁され、アルカリによって劣化する可能性が非常に低いと考えられる。しかし、一般に繊維を取り巻く樹脂は写真-1に示すように、その厚さが数 μm 以下と非常に薄く、運搬や保管時に樹脂が物理的な劣化および紫外線劣化を起こす可能性が非常に高いこと、また、アルカリによるエステルの加水分解反応によって樹脂が腐食を起こすことなど⁸⁾により、樹

* 正会員 工博 東京大学生産技術研究所 第5部 教授
(〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

** 正会員 工修 東急建設(株) 技術本部 土木技術部

表—1 各種繊維の材料特性

	ガラス	アラミド	炭素
繊維直径 (μm)	12.77	12.15	6.68
引張強度 (kgf/mm ²)	251	389	335
標準偏差 (kgf/mm ²)	87	36	52
変動係数 (%)	34.7	9.2	15.5
弾性係数 (kgf/mm ²)	8551	8355	22730
備考	T ガラス	テクノーラ	バン



図—1 静的引張試験概要図

脂によってアルカリの侵入を完全に防ぐことは不可能であると考えられる。

一方、FRP ロッドの強度は樹脂ではなく繊維の種類と繊維混入率によって定まっていることから、もし、アルカリによるFRP ロッドの強度低下が生じた場合には、その原因はロッドの強度を支配する繊維自身の劣化に他ならないと考えられる。

したがって、繊維そのものの耐アルカリ性を把握することで、FRP ロッドの最悪の状態を想定した耐アルカリ性を評価することが可能なこと、また、繊維の劣化機構を明らかにし定量化することがFRP ロッドの劣化を定量化することの近道であると考えられる。そこで、本研究では繊維そのものの耐アルカリ性試験の結果を基に、繊維の耐アルカリ性の定量化を試みた。

3. 実験概要

実験に用いた繊維は、ガラス繊維、アラミド繊維、炭素繊維の3種類とした。表—1に浸漬前の各種繊維の材料特性⁹⁾を示す。

各種繊維の浸漬条件は、以下の目的により決定した。

- ① 短期間でアルカリによる繊維の化学的な劣化メカニズムを把握すること。
- ② 既往の研究^{7), 8)}におけるアルカリ濃度は、pH=13 (0.1 mol/l) 程度のもが多く、それ以上の濃度条件で耐アルカリ性を評価したものが少ないこと。

したがって、ガラス繊維についてはpH=14 (1.0 mol/l) の、アラミド繊維、炭素繊維については既往の研究^{7), 8)}を考慮し、ガラス繊維の濃度条件の2倍の

表—2 各種繊維の繊維強度と弾性係数の低下

単位 (σ: kgf/mm², E: kgf/mm², 低下率: %)

繊維種類	項目	1日	4日	7日	14日	21日	28日	56日
ガラス	σ	205	136	132	109	58	37	—
	低下率	8.3	45.8	47.4	56.6	76.9	85.3	—
	E	8153	5935	5086	3206	1586	948	—
	低下率	4.7	30.6	40.5	62.5	81.5	88.9	—
アラミド	σ	364	344	358	338	331	341	334
	低下率	6.4	11.6	8.0	11.3	9.3	9.8	9.1
	E	8194	8095	8182	7898	7966	7821	7947
	低下率	1.9	3.1	2.1	5.5	4.7	6.4	4.9
炭素	σ	315	286	291	301	318	317	315
	低下率	6.0	14.6	13.1	10.1	5.1	5.4	6.0
	E	25240	25279	23384	25801	23192	24075	24180
	低下率	—	—	—	—	—	—	—

水酸化ナトリウム溶液に浸漬し、40℃の恒温室で保管した。浸漬期間は、1, 4, 7, 14, 21, 28, 56日とし、所要日数経過後、繊維をアルカリ溶液から取り出し、蒸留水で洗浄後、1日間デシケータの中で乾燥させた。

図—1に各種繊維の静的引張試験用供試体の詳細を示すが、乾燥後の試料は繊維1本ずつのモノフィラメントとし、JIS-R-7601にしたがった試験用紙にセットし、荷重制御型オートグラフ (5 kgf) を用いて室温 (温度 20±3℃) で試験を行った。また、測定項目は繊維破断時の荷重 (gf) と伸び量 (mm) である。なお、引張試験は1条件 50~60本とし、載荷速度は0.5 mm/minとした。

4. 実験結果および考察

(1) 各種繊維の引張破断強度とばらつき

表—2に静的引張試験より得られた各種繊維の破断強度 (σ) と弾性係数 (E) の平均値、およびその低下率 (%) をまとめて示す。ただし、ガラス繊維の浸漬日数 56日については、繊維破断荷重がオートグラフの最小測定荷重 (2.5 gf) 以下であったため、測定不能となりここでは省略している。

ここで、各浸漬日数における繊維強度は、静的引張試験より得られた破断荷重を浸漬前の繊維断面積 (表—1参照) で除した値である。また、弾性係数は次式によって算定した。

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} ; E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

ここで、L: 試験前の繊維長さ (25 mm)

ΔL: 繊維伸び量 (mm)

ε: ひずみ

σ: 繊維強度 (kgf/mm²)

E: 弾性係数 (kgf/mm²)

表—2より、ガラス繊維は浸漬日数28日において約

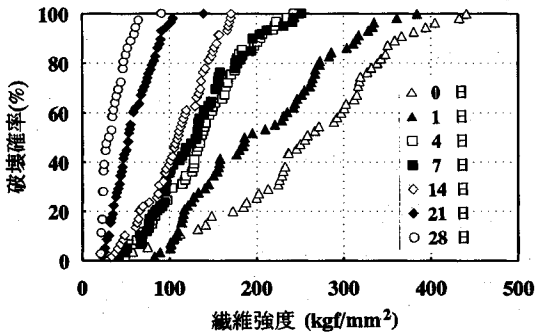


図-2 破壊確率と繊維強度の関係(ガラス繊維)

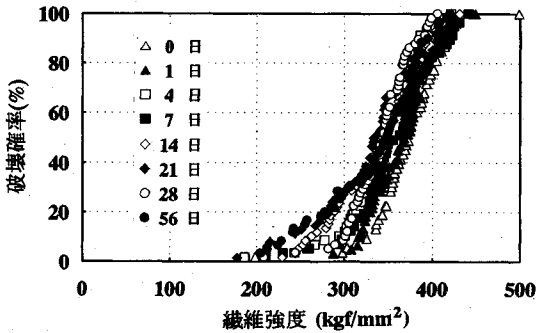


図-3 破壊確率と繊維強度の関係(アラミド繊維)

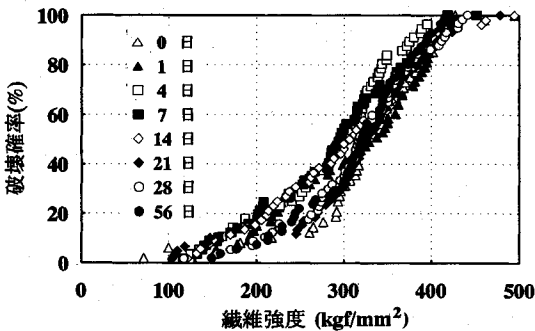


図-4 破壊確率と繊維強度の関係(炭素繊維)

85%の強度低下を起こしているのに対し、アラミド繊維、炭素繊維は浸漬溶液のアルカリ濃度がガラス繊維の2倍であるにもかかわらず、浸漬日数56日において、それぞれ約9%と約6%と、ガラス繊維に比べ非常に優れた耐アルカリ性を有していることが明らかとなった。また、弾性係数においてもガラス繊維は約89%低下しているにもかかわらず、アラミド繊維、炭素繊維は、それぞれ約5%と約0%とほとんど低下していないことが確認された。

図-2にガラス繊維の破断強度と破壊確率(累積破断本数の割合)の関係を示す。浸漬前の繊維破断強度は90~450(kgf/mm²)程度であったが、浸漬日数が増加するとその強度の範囲は小さくなり、浸漬日数28

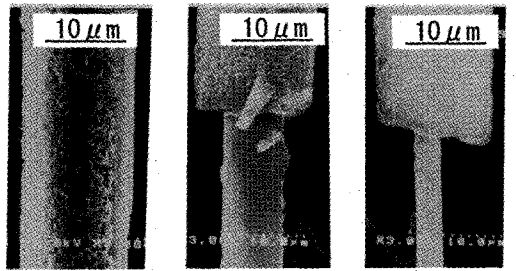


写真-2 Tガラス繊維の劣化性状(3,000倍)

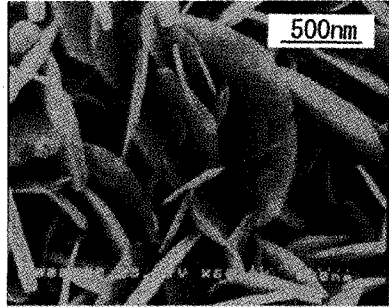


写真-3 アルカリ反応生成物(60,000倍)

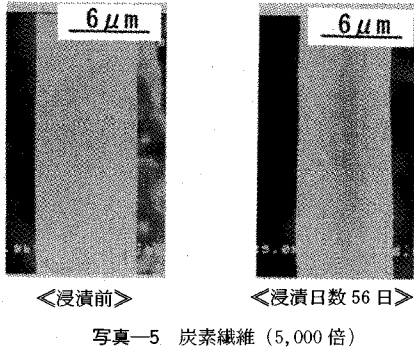
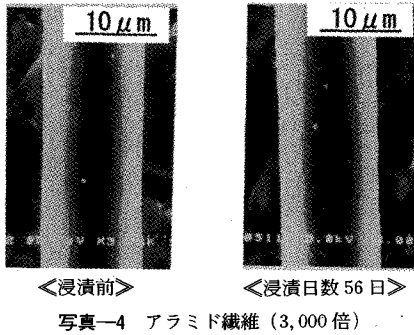
日においては20~90(kgf/mm²)程度となっており、繊維破断強度が低下していることがここでも確認できる。また、浸漬日数0~28日の変動係数は、34.6~42.7%の範囲であり、浸漬日数の違いによる変動係数にはさほど差が生じておらず、劣化したことによるデータのバラツキの変化は無いものと考えられる。

図-3, 4にアラミド繊維および炭素繊維における浸漬日数毎の破壊確率を示す。繊維の違いによる破断強度のバラツキの違いはあるものの、両者とも浸漬日数が増加してもガラス繊維のような明らかな変化は見られず、アルカリによる強度低下の傾向は確認されなかった。しかし、アラミド繊維の破壊確率40%以下の繊維破断強度は、浸漬日数が増加するにしたがい、多少ばらつく傾向にあることが確認される。このことから、さらに浸漬日数を増加させることによって強度低下を起こす可能性があると考えられる。

(2) 走査電子顕微鏡による観察結果

写真-2に浸漬前および浸漬日数1, 14, 28日のガラス繊維を走査電子顕微鏡(3,000倍)で観察したものを示す。

浸漬前のガラス繊維の表面は、非常に滑らかであるにもかかわらず既に浸漬日数1日において、ガラス繊維とアルカリが反応することによって生じたと考えられる反応生成物が付着しているのが確認できる。さらに、浸漬日数が増加するにしたがい、その反応生成物の層が均一に増加していき、アルカリと反応してない健全な部分が



減少していることが確認される。このことより、ガラス繊維の強度低下は、時間とともに強度を有しないアルカリ反応層が増加し、強度を有する健全な部分の断面が減少していくために起こるものと考えられる。

写真—3には、アルカリ反応生成物の拡大写真を示す。反応生成物の結晶は板状であり、その構造は透水性の良いものとなっていることが確認できる。したがって、反応生成物によってアルカリの進行が抑制されることは、ほとんどないと考えられる。

次に、写真—4にアラミド繊維、写真—5に炭素繊維の浸漬日数0日および56日における観察結果を示す。両者において、ガラス繊維のような明白な劣化を観察することはできず、現段階では、アルカリによる侵食はないと判断される。

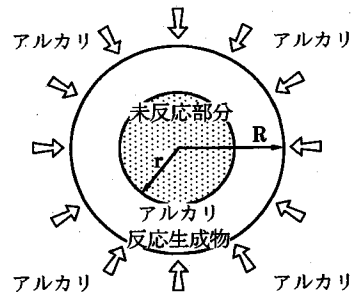
5. ガラス繊維の劣化を予測するモデル

(1) 解析モデル

アルカリがガラス繊維表面から内部方向へ、図—5に示すように均一に進行するものとし(写真—2参照)、その速度がアルカリの拡散によって支配されるものとする。その支配方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + F(x, y, t; C) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 t : 浸漬時間 (hr)
 x, y : 繊維表面からの反応量 (mm)
 C : 繊維表面のアルカリ濃度 (mol/l)



図—5 アルカリ反応モデル

D : アルカリの拡散係数 (mm²/hr)

$F(x, y, t; C)$: アルカリの消費を伴う反応

また、ガラス繊維の断面がほぼ円形であることより、式(1)を式(2)に示すように極座標系に変換することが可能となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) + F(r, t; C) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 r : 繊維中心からの未反応量 (mm)

式(2)における関数 F の反応速度は無限大であるので、アルカリの消費速度も無限大である。したがって、拡散により繊維に進入したアルカリは、繊維中のシリカ成分と反応することにより一瞬に消費されることとなる。しかし、アルカリは無限に消費されるのではなく、シリカ成分が単位体積当り消費し得るアルカリ量は、単位繊維中のシリカ量 (mol/l) にアルカリとシリカの反応比を乗じた値が上限となる⁹⁾。本論文ではこの値を有効消費アルカリ容量 (S_i ; mol/l) と定義する。即ち解析上、時間ステップ毎に繊維の各断面に蓄積されるアルカリ量が、有効消費アルカリ容量を超過すればアルカリ反応層を形成することになる。

したがって、実際の計算は、式(2)を繊維中心からの距離(r)と時間(t)に離散化して差分法を用いて行うが、その計算過程は、時間(t_n)において、反応距離($R - r_m$)に蓄積されたアルカリ量が有効消費アルカリ容量を超過しなければ、(t_{n+1})における($R - r_m$)のアルカリ濃度を0とし、超過すれば(t_n)における($R - r_m$)でのアルカリ濃度の値をそのまま保存して、(t_{n+1})における計算を行うものとした。

(2) Tガラス中における温度40℃での拡散係数の計算

温度40℃におけるアルカリの拡散係数は、フィックの拡散方程式を簡略化した一次元モデル式を利用し、実験値から最小2乗法によって求めた。即ち、一次元モデル式の式(3)に、時間 $t=0$ で繊維表面からの一次元反応量 $x=0$ の初期条件を与えて、 x について両辺を積分すれば式(4)が得られる。さらに、アルカリと反応していない繊維部分の強度が、浸漬前の繊維強度と同等

表—3 T ガラスの組成一覧表 (単位: %)

lg.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
0.8	65.1	23.9	.108	.296	9.74	.084

である ((式5)) とすることで、浸漬前の引張破断荷重から各浸漬日数の引張破断荷重を求め、各浸漬日数の繊維強度を算定する。式(6)に最終的に得られる算定式を示すが、反応期間中のガラス繊維表面のアルカリ濃度 C は大きく低下しないものとして、初期アルカリ濃度を一定と仮定することで、式(6)中において拡散係数 k が未知数となる。したがって、表—2の実験値を用いて最小2乗法によって未知数である拡散係数 k を決定した。このようにして求められた拡散係数は、 $9.988 \times 10^{-9} (\text{mm}^2/\text{hr})$ となる。

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot \frac{C}{x} \dots\dots\dots (3)$$

$$x = \sqrt{2 \cdot k \cdot C \cdot t} \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_t}{S_t} \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{P_t}{S_0} \\ &= \sigma_0 \cdot \frac{S_t}{S_0} \\ &= \left(1 - \frac{\sqrt{2 \cdot k \cdot C \cdot t}}{R_0}\right)^2 \cdot \sigma_0 \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

- ここで、 σ_0 : 浸漬前の繊維強度 (251 kgf/mm²)
- σ_t : 浸漬日数 t 日の繊維強度 (kgf/mm²)
- P_0 : 浸漬前の引張破断荷重 (kgf)
- P_t : 浸漬日数 t 日の引張破断荷重 (kgf)
- S_0 : 浸漬前の繊維断面積 ($\pi \cdot R_0^2 \text{mm}^2$)
- S_t : 浸漬日数 t 日の繊維断面積 ($\pi \cdot (R_0 - x)^2 \text{mm}^2$)
- R_0 : 浸漬前の繊維半径 ($6.385 \times 10^{-3} \text{mm}$)
- C : アルカリ濃度 (1.0 mol/l)
- k : 拡散係数 (mm^2/hr)

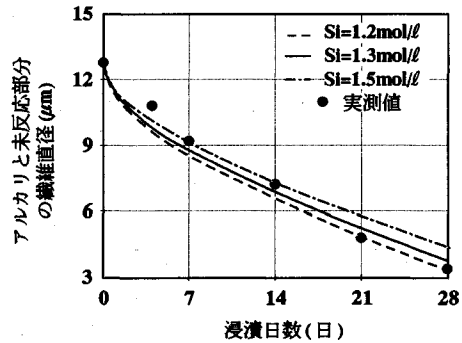
(3) T ガラスにおける有効消費アルカリ容量の計算

表—3に使用したTガラスの組成一覧表を示す。Tガラスの組成のうち65.1%が反応性シリカ成分であるので、単位体積当たりのシリカ成分量は23.9 mol/l (2200/60 × .651, 2200 g/l; SiO₂の比重 60; SiO₂の分子量) である。

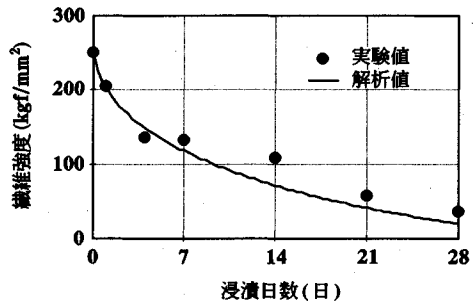
一方、石英ガラスにおけるシリカ 1.0 mol/l 当たり消費し得るアルカリ (NaOH) 量は 0.04 mol/l である。ここで、Tガラスのアルカリ/シリカ反応比 (R) が石英ガラスのアルカリ/シリカ反応比 (0.04) の定数倍であると仮定し ($R = 0.04 \times h; h$ は定数)、Tガラスのアルカリ/シリカ反応比を様々に変化させて有効消費アルカリ容量を決定した (表—4 参照)。この値を用いて式

表—4 有効消費アルカリ容量の計算

シリカ成分量 R: mol/l	定数 h	アルカリ/シリカ反応比 (R=0.04·h)	有効消費アルカリ容量 Si: mol/l
23.9	1.05	0.042	1.00
23.9	1.15	0.046	1.10
23.9	1.25	0.050	1.20
23.9	1.35	0.054	1.30
23.9	1.45	0.058	1.40
23.9	1.55	0.062	1.50



図—6 未反応部分の繊維直径と浸漬日数との関係



図—7 繊維強度と浸漬日数との関係

(2) によって解析した未反応部分の直径を図—6に示す。ただし、図中には代表値として $Si = 1.2, 1.3$ および 1.5 mol/l の値を用いて解析した結果について示す。

図—6には同時に走査電子顕微鏡によって測定したアルカリと未反応部分の直径の実測値も示したが、この実測値に最も近い挙動を示す解析値を曲線近似によって求め、そのときの有効消費アルカリ容量をTガラスの有効消費アルカリ容量とする。このようにして求められた有効消費アルカリ容量は 1.3 mol/l となる。

6. 解析結果および考察

図—7には静的引張試験より得られた繊維破断強度と浸漬日数との関係を示す。

ただし、各浸漬日数毎の繊維破断強度は、50~60本試験を行った結果の平均値である。また図中には解析値を示すが、これはアルカリと未反応部分の繊維強度が浸

漬前の繊維強度と同等であるとする式(5)の仮定を基に、式(2)から求まるアルカリと未反応部分の繊維直径を用いて算定した。

ただし、解析条件として、拡散係数 9.988×10^{-9} (mm^2/hr)、有効消費アルカリ容量 $1.3 \text{ mol}/\ell$ 、アルカリ濃度 $1.0 \text{ mol}/\ell$ とした。

本モデルの劣化進行は、アルカリの進行速度を支配する拡散係数とアルカリ反応層を形成するために消費されるアルカリ量、即ち有効消費アルカリ容量によって評価される。本解析に使用したこれらの値は、実験値から逆解析して決定したものであり、実験値とほぼ同じような強度低下の傾向を示していることが確認できる。

このように、本モデルは、拡散係数および有効消費アルカリ容量を用いて実際の繊維劣化のメカニズムを模擬し、繊維の強度低下を予測できると判断される。

以上の結果より、Tガラス中の反応性シリカ量を考慮して導入した“有効消費アルカリ容量”を用いて、アルカリ反応モデルを厳密に表現することができた。さらに、その拡散現象を拡散律速理論を用いることで、アルカリの進行を予測し、浸漬前の強度と未反応部分の強度が同等であるとする事で、ガラス繊維の強度低下を定量的に推定することが可能となった。

7. 実環境におけるガラス繊維の劣化予測

実環境におけるガラス繊維の劣化を解析によって予測するためには、アルカリ濃度および環境温度を変化させた場合においても、「5. ガラス繊維の劣化を予測するモデル」で提案したガラス繊維へのアルカリの進行を、アルカリの拡散律速理論によって評価できることを検証する必要がある。

したがって、ここでは、環境温度を 40°C と一定にし、アルカリ濃度を $0.05, 0.5, 1.0, 2.0 \text{ mol}/\ell$ と変化させた場合の、また、アルカリ濃度を $1.0 \text{ mol}/\ell$ と一定にし、環境温度を $20, 40, 60^\circ\text{C}$ と変化させた場合の実験値と解析値の比較検討を行った。尚、実験方法は、「3. 実験概要」と同様な方法で行い、試験本数も一条件 $50 \sim 60$ 本とした。

(1) アルカリ濃度を変化させた場合の解析モデルの検証

図-8にアルカリ濃度を変化させた場合の繊維強度低下について示す。ここでは、拡散係数がアルカリ濃度の影響を受けないものとし、環境温度 40°C で求められた拡散係数 $9.988 \times 10^{-9} (\text{mm}^2/\text{hr})$ を使用した。

以上の結果から、実験値と解析値とは多少バラツキはあるものの、十分解析によって強度低下を予測できるものと判断される。これは、アルカリ濃度を変化させた場合においてもTガラスへのアルカリの進行を拡散律速理論によって評価できることを示唆するものである。

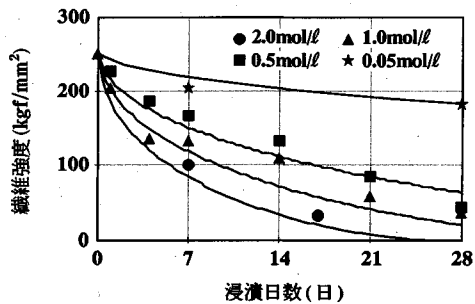


図-8 アルカリ濃度を変化させた場合の繊維強度低下

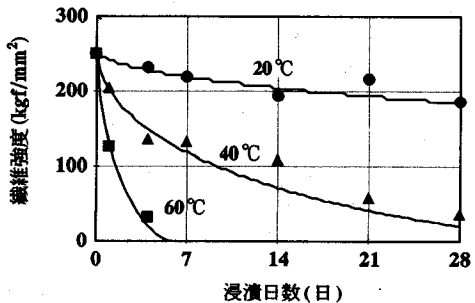


図-9 温度を変化させた場合の繊維強度低下

表-5 各環境温度での拡散係数 (mm^2/hr)

20°C	40°C	60°C
1.020×10^{-9}	9.988×10^{-9}	18.14×10^{-9}

(2) 環境温度を変化させた場合の解析モデルの検証

多くの化学反応の速度が温度の上昇によって促進されることはよく知られており、このことは、反応の速度定数が温度変化にもとづいているため、この変化を表わす実験式として以下に示すアレニウズ式がよく用いられる¹⁰⁾。

$$\log_{10}k = \left(-\frac{E}{R \cdot T}\right) + \log_{10}F \dots \dots \dots (7)$$

- ここで、 k : 反応速度定数
- F : 頻度因子
- E : 活性化エネルギー
- R : 気体定数
- T : 絶対温度

もし、実験値から逆解析して求められる拡散係数が、アレニウズの関係を損なうものでなければ、温度の影響によって生じるアルカリの進行速度の変化を式(7)の関係をj用いて解析できることとなる。

そこで、図-9に温度を変化させた場合の実験結果と解析結果を示す。また、表-5には逆解析によって求められた各環境温度での拡散係数を示す。

さらに、表-5の拡散係数を用いて式(7)により評価したものを図-10に示す。この図から明らかなよう

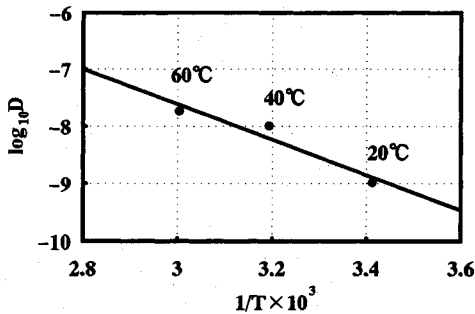


図-10 アレニウスプロット

表-6 実環境下での劣化予測

劣化促進試験における浸漬日数	実環境下での劣化予測年数	劣化予測強度 (kgf/mm ²)	低下率 (%)
1日	0.7年	203	19
4日	3.0年	149	41
7日	5.2年	120	52
14日	11.3年	71	72
21日	15.9年	42	83
28日	20.9年	21	92
設定温度 40℃	設定温度 20℃		
アルカリ濃度 1.0mol/l (pH=14.0)	アルカリ濃度 0.05mol/l (pH=12.7)		

に、逆解析によって求めた拡散係数と温度はアレニウスの関係において良好な直線関係を示しており、本解析モデルにおける温度の影響をアレニウス式によって評価できることが明らかとなった。

(3) 実環境におけるガラス繊維の劣化予測

表-6には、促進試験による劣化の程度に相当する実環境下での劣化年数を解析によって予測した結果を示す。ここに示す実環境とはコンクリートの中を想定したもので、環境温度が20℃、アルカリ濃度がpH値で12.7である。例えば、劣化促進試験による28日劣化は、実環境下では約21年に相当し、その強度低下率が92%と予測できるものである。

8. 耐アルカリガラス繊維の耐アルカリ性

現在、ガラス繊維の耐アルカリ性を向上させるために開発された、ZrO₂系耐アルカリガラス繊維を利用するのが一般的になってきている。しかし、この種のガラス繊維の耐アルカリ性は、ZrO₂を加えることにより飛躍的に改善されたにもかかわらず、その耐久性は完全なものではなく、アルカリ溶液に対する耐久性を確認する必要があり、さらに、定量的な耐久性評価が望まれている。

そこで筆者らは、現在市販されているZrO₂系耐アルカリガラス繊維の劣化促進試験を実施し、その劣化性状

表-7 耐アルカリガラス組成一覧表 (単位: %)

ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
1.7	59.0	0.30	0.09	0.43	0.02	14.0
K ₂ O	TiO ₂	ZrO ₂	Total			
2.36	2.89	19.2	100.0			

表-8 耐アルカリガラス繊維の強度低下

繊維直径 (μm)	浸漬前 (kgf/mm ²)	浸漬後 (kgf/mm ²)
13.26	156	93

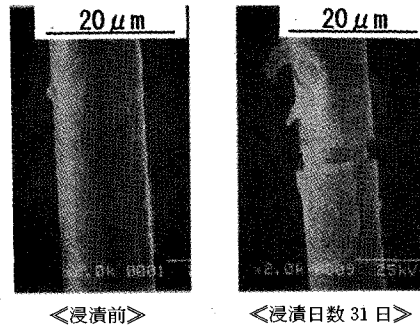


写真-6 ZrO₂系アルカリガラスの劣化性状 (2,000倍)

について明らかにした。表-7に実験に使用した耐アルカリガラス繊維の組成一覧表を示す。

劣化促進試験は、60℃の温度環境の中でアルカリ濃度1 mol/lのNaOH溶液に31日間繊維を浸漬させ、浸漬後の繊維強度はTガラスと同じ方法および条件で測定した。また、浸漬前の耐アルカリガラス繊維の繊維直径は、SEMによって100本実測した値の平均値である。

表-8に耐アルカリガラス繊維の直径、浸漬前の繊維強度および31日間浸漬後の繊維強度を示すが、ZrO₂系耐アルカリガラス繊維においても劣化することが明らかであり、その劣化性状について明らかにする必要がある。

写真-6に浸漬前および浸漬後の繊維のSEM像を示す。写真からも明らかのように、浸漬後の繊維はアルカリに侵食されていることがわかる。また、繊維の劣化は、繊維表面から均一に進行し、強度を持たないアルカリ反応層と未反応層に分かれているのが確認できる。これは、Tガラス繊維のアルカリ反応生成物の結晶構造(写真-3参照)とは異なるものの、写真-2で明らかにしたTガラス繊維と同様な劣化進行が生じたものと考えられる。したがってTガラスと同様な解析モデルによって耐アルカリガラスの劣化を定量化できると判断される。今後、様々な劣化条件を加え、Tガラスと同様に解析モデルの検証を行う必要がある。

9. 結 論

本研究は、短繊維または連続繊維補強材として使用されるガラス、アラミド、および炭素繊維の耐アルカリ性を明らかにし、特にアルカリによって著しく劣化を生じるガラス繊維については、その劣化を定量的に評価するための解析手法を提案した。以下にその結論をまとめる。

1) ガラス繊維はアルカリによって著しく強度低下を起こす。その原因は、アルカリとガラス繊維が反応し、強度を有しないアルカリ反応生成物を形成するため、その反応はガラス繊維表面から内部方向へ時間とともに均一に進行し、強度を有する未反応部分の断面が減少するためである。また、この反応を定量的に評価するために、拡散律速理論に基づいてアルカリの進行を予測するモデルを提案し、ガラス繊維の強度低下を十分にこの理論によって評価できることを明らかにした。このことは、GFRP や GRC の耐アルカリ性を定量的に評価するための基本になるものと考えられる。

2) ガラス繊維とアルカリの反応の温度依存性は、アレニウスの関係に従う。また、アルカリ濃度を变化させた場合においても、拡散律速理論を用いた解析モデルによってアルカリの進行を評価できる。

3) アラミド繊維、炭素繊維の耐アルカリ性は、ガラス繊維に比べ十分高いものであり、今後、さらに他の溶液中における劣化の可能性について検討することが必要となろう。

4) ZrO_2 系耐アルカリガラス繊維の耐アルカリ性は、T ガラスと比べ非常に高いと判断されるが、それは完全なものではなく、環境温度 $60^\circ C$ 、アルカリ濃度 1.0 mol/l の劣化条件で 31 日間浸漬した場合、浸漬前の強度より約 60% 低下することが明らかとなった。今後、様々な劣化条件による劣化促進試験を実施し、拡散律速理論を用いた解析モデルの検証を行う必要がある。

【謝辞】 本研究の実施にあたっては、東京大学生産技

術研究所の西村次男氏に多大な御協力を頂きました。ここに記して深く感謝致します。

また、本研究費の一部は、平成 4 年度科学研究費（一般(B)代表；魚本健人）によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Proctor, B. A. : The Development and Performance of Alkali Resistant Glass Fibers for Cement Reinforcement, Proceedings of the International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, December 16-19, 1987.
- 2) P. Soroushian and A. Tlili : Durability Characteristics of Polymer-Modified Glass Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, V.90, No.1, January-February.
- 3) V. L. Brown and C. L. Bartholomew : FRP Reinforcing Bars in Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, V.90, No.1, January-February.
- 4) 五十嵐・川村：ガラス繊維補強コンクリートの微視的構造と耐久性，土木学会論文集，No. 451/V-17，pp. 215～224，1992. 8.
- 5) 魚本・西村・宮崎：プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性（6），生産研究，第 45 巻 5 号，1993. 5.
- 6) Hodhod, Uomoto : Evaluation of Tensile Strength of FRP with Aligned Continuous Fiber, ADVANCED COMPOSITE IN BRIDGES AND STRUCTURES, 1992.
- 7) 連続繊維研究小委員会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関する技術の現状，連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー 72，土木学会，1992. 4.
- 8) 連続繊維研究小委員会：連続繊維補強材の耐久性に関する考え方，連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー 72，土木学会，1992. 4.
- 9) 小山・矢島・古澤・魚本：アルカリ・シリカ反応のモデル化における拡散係数の取扱い，第 20 回関東支部技術研究発表会講演概要集，土木学会関東支部，1993. 3.
- 10) 魚本・古澤：アルカリ・シリカ反応の進行を定量的に予測する新しい測定システム，コンクリート工学論文集，第 3 巻，第 2 号，pp. 15～25，1992. 7.

(1993. 9. 29 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON EVALUATION METHOD FOR ALKALI-RESISTANCE OF FIBERS

Taketo UOMOTO and Futoshi KATSUKI

In order to utilize Glass, Aramid and Carbon fibers as a reinforced material of concrete, alkali-resistance of each fiber was tested and computational model predicting the degradation of fiber was verified based on the experiments for alkali-resistance of fibers. Alkali-resistance of each fiber was compared from the view point of fracture strength and Young's modulus through the accelerated aging test in the alkaline solution. In addition, the degree of degradation of each fiber after aging test was investigated by Scanning Electron Microscope.

As a result, it was concluded : (1) Glass fiber was easily degraded in the alkaline solution and the progress of degradation was simulated quantitatively by the proposed method based on a diffusion theory, (2) both Aramid and Carbon fiber had a significant alkali-resistance without degrading.

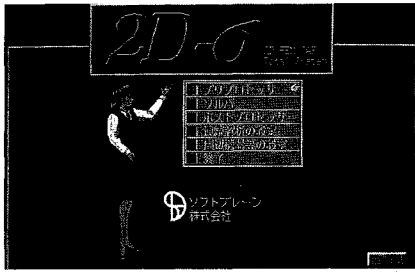
パソコン用土木構造解析CAEシステム

ツーディーシグマ

2D-σ TOTAL SYSTEM

「噂は聞いているが、ここまでできると思わなかった!」
「これなら私にも使える!」「もう他のソフトは使えない。」

—よく聞くユーザーの声



■システムマネージャー（動画、音声）

全く新しいコンセプトで開発されたこのシステムは今までに考えられなかった高度な自動化を実現し、静かなブームを呼んでいます。

高性能CADを内蔵、全ての情報はCAD図面に直接指定。（境界・荷重条件、掘削、盛土、支保等）

システムはCAD図面から自動的に有限要素アータを生成するのでユーザーは直感的な操作をするだけ。

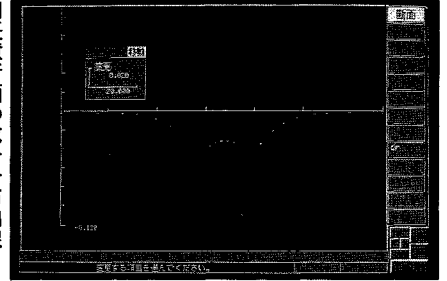
土木解析に必要な機能のほとんどに対応。（非線形、弾塑性、ジョイント、掘削、盛土、支保、熱応力など）

高度なステップ解析機能により、施工中の力学的変化をリアルに再現。（前ステップのデータは自動的に継承されユーザーは図面上で「施工」する感じ）

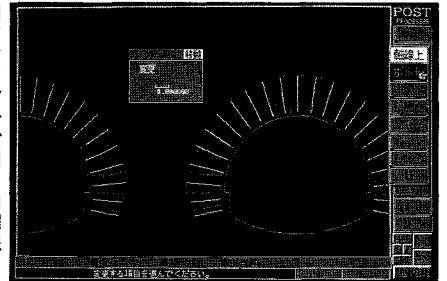
EWS並みの大規模解析能力と高速演算。（3000節点、拡張可、1400節点の演算はCPU486DXで約2分間）

独自のウィンドウシステム、音声サポート、オンラインヘルプ、豊富で高品質な出力など。

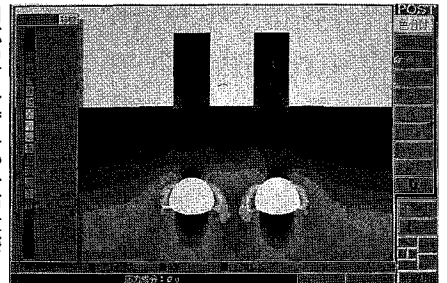
■任意断面の成分分布曲線



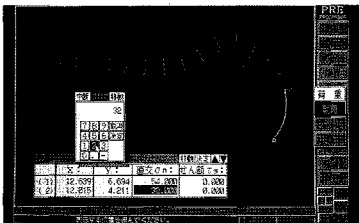
■ワンタッチでM・Q曲線



■応力/ひずみの分布状態



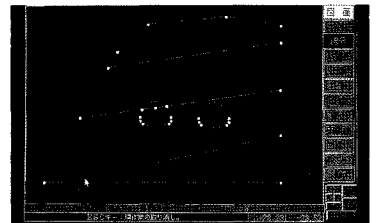
■全ての条件は図面上に直接指定



■断層・弱面の挙動はリアルに再現



■高性能CADで図面を素早く入力



土木業界で大好評

詳細資料提供

ソフトブレン株式会社

お問い合わせは 03-3592-7659

本社 〒001 札幌市北区北37条西4丁目王陽ビル

Tel 011-736-7009 Fax 011-736-7449

(イタスカ) 米国ITASCA社開発の岩盤・地盤解析プログラム

個別要素法(DEM)プログラム

UDEC 3DEC

個別要素法(離散要素法)は、1971年にDr.P.Cundallが発表した不連続体数値解析手法であり、岩盤や地盤をブロックや土粒子の要素の集合体と考え、個々の要素が隣接要素から受ける力により運動方程式にもとづき挙動する様子を時間差分式にて時刻繰返し計算する手法です。個別要素法は不連続力学の中心手法として位置づけ

られ、岩盤・地盤の崩落や安定性の解析、大深度地下空間、核廃棄物地下処理、鉱物資源開発等のプロジェクトおよび粒状体力学(粉体工学)の分野で有力な解析手段となっています。現在UDEC, 3DECは全世界の研究機関・企業で標準コードとして広く使用されています。

オプション

■ Barton-Bandisモデル

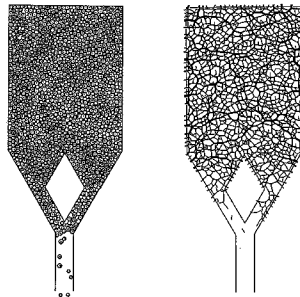
適用分野

- 粒状物質の挙動解析
- 鉱山採掘等 掘削解析
- 地震応答解析
- ジョイント内流れ解析 (浸透連成: UDEC)
- 核廃棄物の熱応力解析 (熱連成: UDEC)

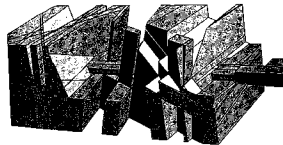
販売条件

UDEC・3DEC・FLAC

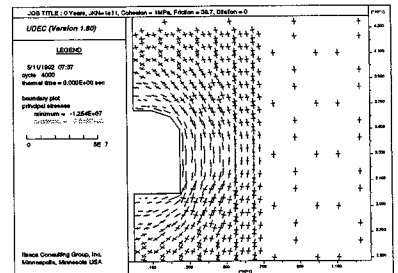
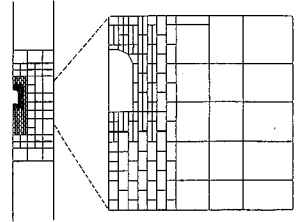
- ◆ EWS (SUN-SPARC)
- ◆ IBM-PC/AT及び互換機
- ◆ UDECはソースコードで提供します。
- ◆ 3DEC・FLACはロードモジュールで提供します。



ホッパー内粒状体挙動解析



亀裂性岩盤の3次元掘削解析



核廃棄物地中処理影響解析

FLAC

有限差分法(FDM)プログラム

FLACは個別要素法コードUDEC, 3DECを発表したDr.P.Cundallが同様の有限差分ロジックを用いて連続体の塑性大変形の解析するために開発したコードで、現在、全世界で数多く使用されています。有限差分法は、地盤、岩盤を有限領域内で離散化し、運動方程式と構成則を差

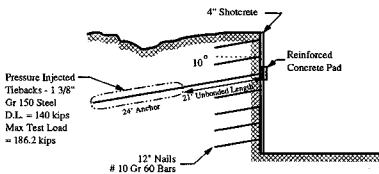
分方程式として解析するもので、有限要素法に比べ非線形大歪が扱えることで大きな優位性を持っています。FLACは小歪非線形、動的-静動挙動を始めとし、豊富な機能 オプションを備えたPC、ワークステーション用の地盤解析コードです。

オプション

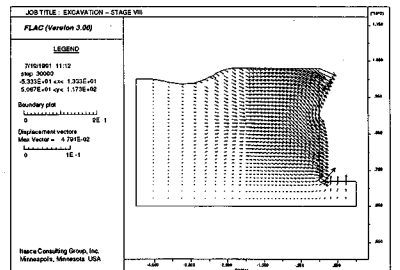
- ダイナミック解析モデル
- クリープ解析モデル
- 熱解析モデル

適用分野

- 斜面・盛土の設計、安定解析
- 浅/深基礎設計
- アースダム、コンクリートダムの設計
- トンネルの設計
- 核廃棄物貯蔵解析
- 液状化解析



地盤安定解析



土と水の連成逆解析プログラム

未来設計企業
CRC

UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

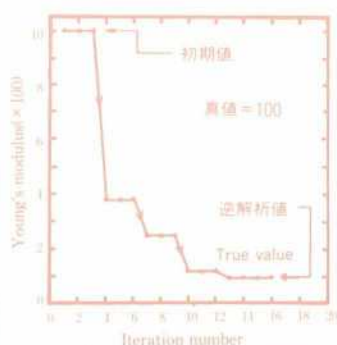
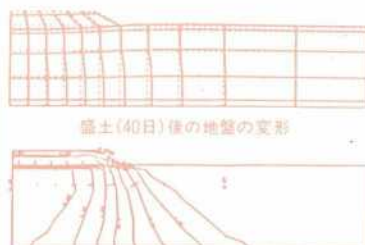
盛土・掘削

出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図面処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段階掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
弾塑性(ドラッカー・プラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
弾粘塑性(間口・太田モデル)



ヤング率と繰り返し回数との関係
逆解析によるパラメータの推定

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 **CRC** 総合研究所

西日本事業部

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号
TEL. (03) 3437-2301

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原