

薄肉開き断面部材の断面変形に関する実験的検討

志澤一之*・高橋邦弘**

本報告は、著者の一人らが以前提出した薄肉開き断面部材の断面変形理論を実験的に検証しようとするものである。4枚の折板からなる1軸対称断面部材を例にとり、このような部材に生ずるたわみならびにひずみを測定し、断面変形理論の妥当性を検討する。また、断面変形のせん断中心の位置を実験的に求め、その存在を確認するとともに、実際の設計においては断面変形を考慮する必要があることを指摘する。

Keywords: thin-walled members, distortion, shear center, warping, bimoment, torsion

1. 緒言

近年、薄肉構造部材が鋼構造要素として随所に使用されている。薄肉構造部材の変形に関する理論は、その断面形状が変化しないという前提のもとに、はりの曲げねじり理論として体系化されている^{1),2)}。ところが、薄肉開き断面はりの変形は断面変形を伴い、その断面変形に関するせん断中心が複数存在することが以前著者の一人ら³⁾によって提唱された。その後、断面変形を伴う薄肉部材の挙動を理論的に把握しようとする研究^{4),5)}がなされてきたが、それらに関する詳細な実験は行われていない。

そこで本報告では、断面変形を伴う薄肉開き断面部材のうち最も基本的なモデルとして4枚の折板からなる1軸対称断面部材を例にとり、荷重点に生ずるたわみならびに部材中のひずみ分布を測定し断面変形理論の妥当性を検討する。さらに断面変形のせん断中心の位置を実験的に求め、その存在を確認するとともに実際の設計において断面変形を考慮する必要があることを指摘する。

2. 断面変形理論

(1) 断面変形とその自由度

板厚一様で直線辺で構成された折板からなる薄肉開き断面部材における断面変形には、板の面内変位によって折板の各折れ点が相対位置を変えるような第1種断面変形(図-1(a))と、板の面外変位によってのみ生じ各折れ点が相対移動しないような第2種断面変形(図-1(b))とがある。しかし、断面変形理論³⁾では第2種断面変形を無視して考えている。第1種断面変形では、一つの折れ点(図-1の点2)のみをヒンジとし、その

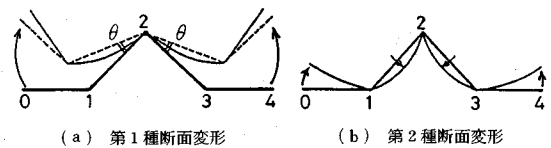


図-1 断面変形

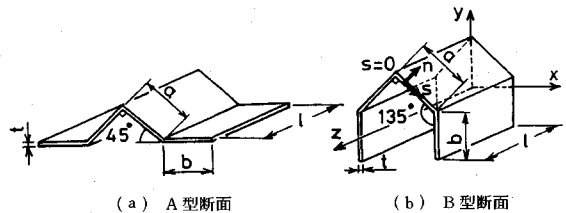


図-2 1自由度1軸対称断面

まわりに左右の断面部分が角度 θ だけ剛体回転することによって断面変形が起る場合を一つの自由度と考える。剛体並進変位を分離することで一つの自由度に対し2個のせん断中心が存在する。このとき、ヒンジ点とせん断中心は一直線上に存在する。いま、第2種断面変形およびねじりの自由度を除き、理論を線形範囲に限定すれば、断面変形の自由度 N は構成板の数を M として $N = M - 3$ のように与えられる³⁾。したがって、断面変形は $M \geq 4$ のときのみが生ずる。ここでは図-2に示すように4枚の構成板からなる2種類の1自由度1軸対称断面部材を考え、図-2(a), (b)の断面をそれぞれA型断面、B型断面とよぶことにする。

(2) 断面変形理論より得られる結果

ここでは本実験で検証すべき断面変形理論³⁾より得られるいくつかの結果を挙げておく。いま対象とする部材に対し図-2(b)に示すような座標系を設定する。このとき原点を図心にとり、 y 軸を断面の対称軸に一致させる。なお、断面の対称性から本節の議論では $0 \leq s$ の部分についてのみ扱う。

* 正会員 工博 慶應義塾大学専任講師 理工学部機械工学科 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)

** 正会員 工博 慶應義塾大学教授 理工学部機械工学科

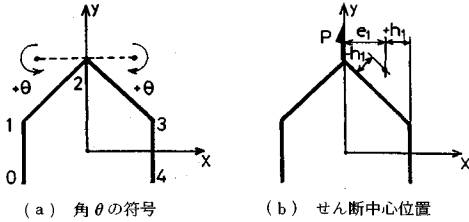


図-3 せん断中心

せん断中心の位置を図-3のように各折板の接線からの距離 $h_1(s)$ で表せば、A型およびB型断面部材に対して $h_1(s)$ はそれぞれ次の式(1)、(2)のようになる。

$$0 \leq s \leq a : h_1 = 3\lambda^2 a / \sqrt{2} (4\lambda + 1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$0 \leq s \leq a+b : h_1 = -a / \sqrt{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし λ は $\lambda = b/a$ 、 C は次のとおりである。

$$C = \frac{\lambda^2 (\sqrt{2} \lambda^2 + 4\sqrt{2} \lambda + 3)}{2\lambda^4 + 8\lambda^3 + 6\sqrt{2} \lambda^2 + 4\lambda + 1} a \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1)、(2)および式(3)によりA型断面では、断面左半分のせん断中心が右半分側にあり、B型断面では左半分側にあることがわかる。

いま、 $z=0$ を固定端として $z=l$ の自由端に図-3に示すような集中荷重 P が作用する場合を考えると、負荷点の y 軸方向のたわみ δ は次式にて与えられる。

$$\delta = \theta(l) e_1 + (Pl^3 / 3EI_x) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで E は部材の縦弾性係数、 I_x は部材の x 軸まわりの断面2次モーメントである。式(4)の右辺第1項および第2項はそれぞれ断面変形および曲げによるたわみを表している。

さらに z 方向ひずみ ϵ_z および s 方向ひずみ ϵ_s はそれぞれ以下のようになる。

$$\epsilon_z = \theta''(z) \omega_1(s) + \{P(l-z)y(s) / EI_x\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\epsilon_s = \theta(z) M_1(s) n / EI \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$0 \leq s \leq a : M_1(s) = 3EI(a-s) / a^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

また I は $I = t^3 / 12$ 、断面変形の扇形面積 $\omega_1(s)$ は

$$\omega_1(s) = - \int_s^a h_1(s) ds \quad \dots\dots\dots (8)$$

である。式(5)の右辺第1項および第2項はそれぞれ断面変形および曲げによるひずみを表している。式(4)、(5)および式(6)における断面変形の回転角 θ は次の支配方程式の解として得られる。

$$\theta''''(z) + 4(k/l)^4 \theta(z) = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} k &\equiv \sqrt[4]{M_{11} / 4EI \omega_1} \\ M_{11} &\equiv \int_s^a \frac{M_1^2}{EI} ds, I_{\omega_1} \equiv \int_s^a \omega_1^2 t ds \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

である。いま考えている問題に対する式(9)の解析解

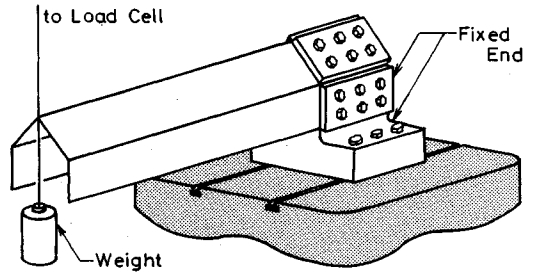


図-4 実験状況

は以下のようになる。

$$\theta(z) = C_1 \sinh k \frac{z}{l} \sin k \frac{z}{l} + C_2 \left(\cosh k \frac{z}{l} \sin k \frac{z}{l} - \sinh k \frac{z}{l} \cos k \frac{z}{l} \right) \quad \dots\dots (11)$$

ここで C_1 および C_2 は次式にて与えられる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &\equiv - \frac{Pe_1 l^3}{2EI_{\omega_1} k^3} \frac{\sinh k \cos k + \cosh k \sin k}{\cosh^2 k + \cos^2 k} \\ C_2 &\equiv \frac{Pe_1 l^3}{2EI_{\omega_1} k^3} \frac{\cosh k \cos k}{\cosh^2 k + \cos^2 k} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (12)$$

3. 実験方法

実験に用いた試験片は、板厚 $t=1$ mm、全長 $l=960$ mm のアルミニウム JIS H 4000 A 5052 P の板を $a=b=80$ mm に加工したものである(図-2参照)。

(1) たわみの測定

試験片を断面の対称軸が鉛直方向と一致するように一方の端を固定端として設置し、頂点(折れ点2)に質量5kgの重錘を取りつける。また同頂点とロードセルとを直径0.4mmの鋼線で結び、鉛直上向きの荷重を加え負荷を連続的に増加させる(図-4参照)。荷重点の変位を写真撮影し、読取顕微鏡で解析する。

(2) ひずみの測定

前節と同様に試験片を設置して、鉛直上向きにのみ49Nの荷重を加えた場合に対し、A型、B型各々の試験片に生ずるひずみの分布(ϵ_z の z 方向分布、 ϵ_z の s 方向分布、 ϵ_s の z 方向分布、 ϵ_s の s 方向分布)をゲージ長2mm(z 方向)と1mm(s 方向)のワイヤストレインゲージで測定する。なお、ゲージは部材の表、裏の両面に接着し、 ϵ_z に関しては折板の中央面($n=0$)における値を、また ϵ_s に関しては両者の絶対値の平均値を算出する。

(3) 断面変形のせん断中心の測定

断面変形のせん断中心は、その点に横荷重が作用する場合、部材に断面変形が生じない点として定義される。したがって、そのような荷重の作用線を2本求めれば、2つの作用線の交点として断面変形のせん断中心の位置が得られる。まず図-5(a)、(c)に示すように試験片の折れ点に質量5kgの重錘を取付け、荷重の作用線

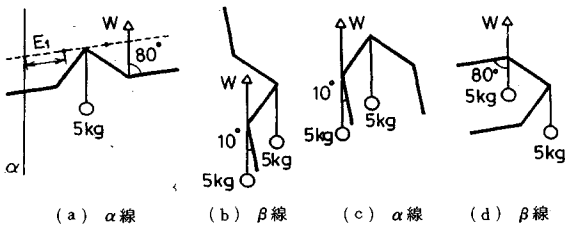


図-5 重錘取り付け位置

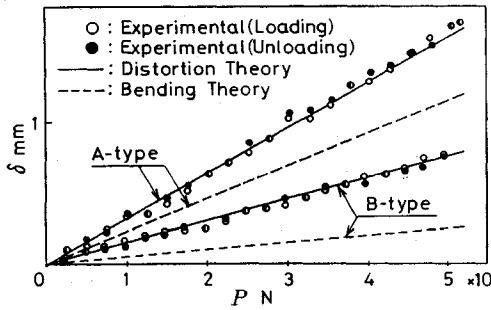


図-6 荷重 P とたわみ δ の関係

が鉛直方向を向くようにその一方の折れ点とロードセルとを直径 0.4 mm の鋼線によって結ぶ。次に油圧サーボアクチュエータを抑制することによってロードセルに加える荷重 W を変化させる。こうすることによって、重錘の質量を変化させることなく重錘とロードセルの合力の作用線を水平方向に連続的に移動させることができる。部材断面を写真撮影することにより折れ点 1-3 間の距離を読取顕微鏡で測定する。そして、断面変形の生じない合力の作用線を求め、それを第 1 の作用線 α とする。次に図-5 (b), (d) に示すように試験片を 90 度回転させて同様の実験を行い、断面変形の起こらない第 2 の作用線 β を求める。二つの作用線 α と β の交点を見出せば、せん断中心の位置が求められる。さらに折れ点 0-4 間距離を基準とした場合の線 α, β をも求める。

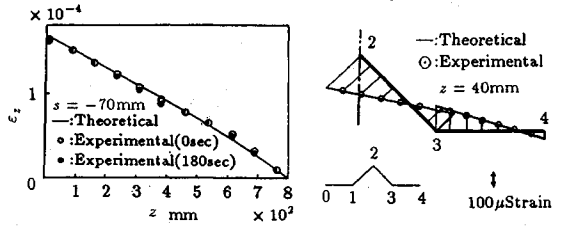
4. 実験結果および検討

(1) たわみについて

荷重 P と荷重点のたわみ δ の関係を図-6 に示す。これを見ると、断面形状が A 型, B 型のいずれの場合にも、実験値は断面変形理論の理論値によく一致していることがわかる。また、曲げによるたわみしか考慮していない従来の曲げ理論による結果は、実験値より常に小さい値となっている。このことは従来の曲げ理論が部材の剛性を実際よりも危険側に見積もっていることであり、式 (10) の k の値が小さい部材²⁾ に関しては断面変形を考慮する必要があるといえる。

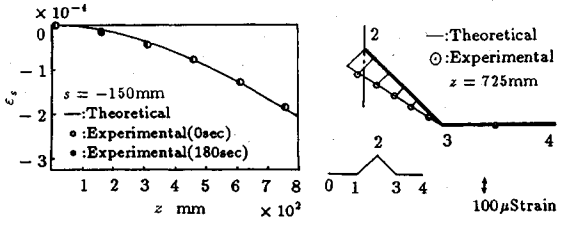
(2) ひずみについて

A 型, B 型両断面部材におけるひずみ, ϵ_z, ϵ_s の分布



(a) ϵ_z の z 方向分布

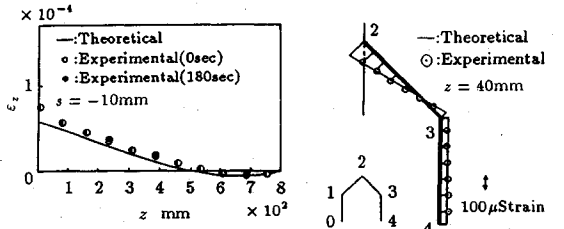
(b) ϵ_s の s 方向分布



(c) ϵ_z の z 方向分布

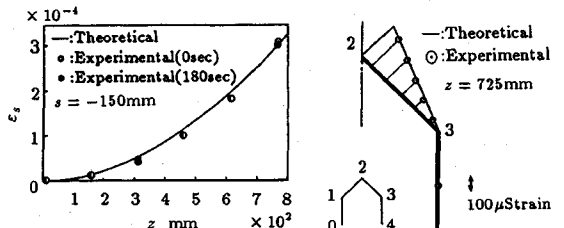
(d) ϵ_s の s 方向分布

図-7 A 型断面部材のひずみ分布



(a) ϵ_z の z 方向分布

(b) ϵ_s の s 方向分布



(c) ϵ_z の z 方向分布

(d) ϵ_s の s 方向分布

図-8 B 型断面部材のひずみ分布

を図-7, 図-8 に示す。いずれの場合も実験値は理論値に比較的良好に一致している。このことは、断面変形理論において用いられている諸仮定の妥当性を示している。また本荷重条件の場合、従来の曲げ理論では生じ得ない大きな s 方向ひずみが線形範囲で確認されることから、このような部材では断面変形を考慮すべきことがわかる。

(3) 断面変形のせん断中心について

式 (1), (2) で与えられるせん断中心の理論位置から荷重の合力の作用線の位置までの距離 E_1 (図-5 (a) 参照) と折れ点 1-3 間距離の無荷重状態からの変化量 D_{13} との関係を図-9 に示す。また E_1 と折れ点 0-4 間距

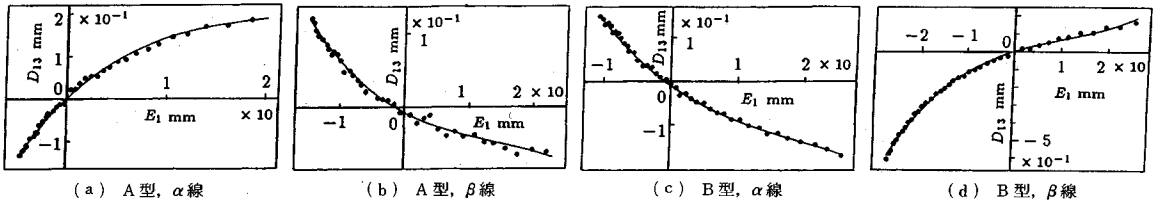


図-9 負荷位置 (せん断中心からの距離) E_1 と断面変形量 D_{13} の関係

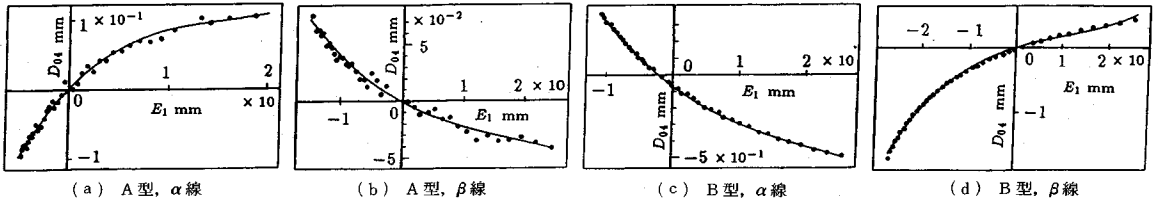


図-10 負荷位置 (せん断中心からの距離) E_1 と断面変形量 D_{04} の関係

離の変化量 D_{04} との関係を図-10 に示す。これらの図における曲線は、せん断中心の実験値である横軸との交点を表現するために、最小二乗法を用いて実験値を3次曲線で補間し描いたものである。図-9、図-10の曲線がいずれも横軸と交わることから、断面変形を生じない点、すなわち断面変形のせん断中心が存在することが確認できる。また、これらの曲線は理論的には原点を通ることが予想されるが、実験値もほぼ原点を通っており、せん断中心に関する理論の正当性を裏付けている。さらに同図に示すせん断中心は、A型、B型各々の断面においてそれぞれ折板2-3-4、折板0-1-2に対するものであるから、各々の断面で断面変形のせん断中心の位置が左右逆転することが確かめられる。

5. 結 言

薄肉開き断面部材に対し、その断面変形のせん断中心、たわみおよびひずみに関する実験を行い、実験値と断面変形理論の理論値とを比較・検討した結果、以下のような結論を得た。

(1) 薄肉開き断面部材には、引張り、曲げ、ねじり変形に加えて断面変形という特有な現象が実際に生ずる。

(2) 薄肉開き断面部材には、横荷重を加えても断面が変化しない点、すなわち断面変形のせん断中心が実際に存在し、その理論値は実験値と比較的よく一致する。

(3) 断面剛の仮定のもとで展開されている従来の曲げねじり理論は部材の剛性を実際よりも危険側に見積もっており、実際の設計においては断面変形を考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Vlasov, V. Z. (奥村・ほか5名共訳)：薄肉弾性ばりの理論，技報堂，全頁，1967.
- 2) 川井忠彦・藤谷義信：はり理論の精密化に関する二、三の試み (その1)，生産研究，25巻6号，pp.211~220，1973.6.
- 3) 高橋邦弘・水野正夫：薄肉開き断面部材の断面変形 (一自由度断面変形・一軸対称断面の場合)，日本機械学会論文集，44巻378号，pp.460~467，1978.2.
- 4) 高橋邦弘・水野正夫：薄肉開き断面部材の断面変形 (多自由度断面変形の場合)，日本機械学会論文集，45巻400号，pp.1545~1552，1979.12.
- 5) 高橋邦弘・米子明伸・水野正夫：断面変形を考慮した薄肉開き断面曲線部材の解析，土木学会論文報告集，第320号，pp.47~55，1982.4.

(1991.9.5 受付)

EXPERIMENTAL DISCUSSIONS ON DISTORTION OF THIN-WALLED OPEN CROSS SECTION MEMBERS

Kazuyuki SHIZAWA and Kunihirō TAKAHASHI

In this report, distortion of thin-walled open cross section members is studied experimentally in order to verify the theory of distortion which was recently proposed by one of the authours. Bending deflections and distributions of longitudinal and transverse strains are measured for the case of beams with singly symmetrical cross section. Moreover the existence of distortional shear centers is confirmed for these beams. From the results obtained here, validity of theory of distortion is discussed, and then it is indicated that the distortion is necessary to be considered at the design stage of thin-walled structures.

より現実的な解析を！

未来設計企業
CRC

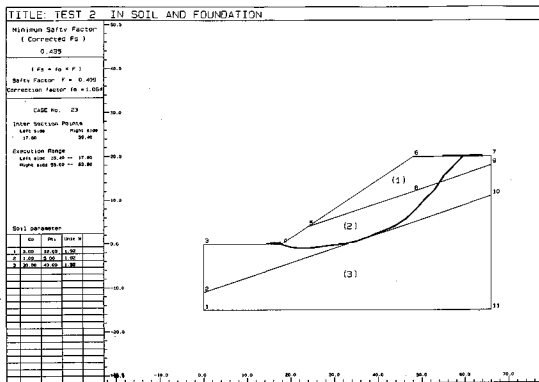
任意形状臨界すべり面自動決定プログラム

Mr. 一番すべり

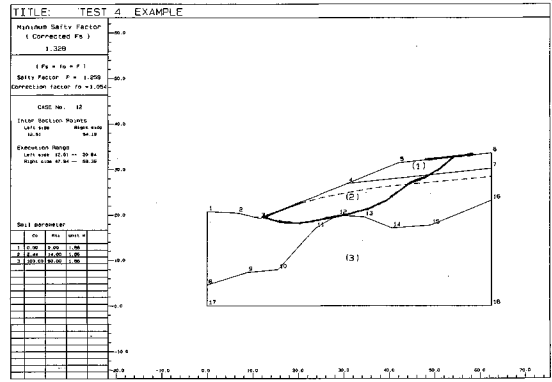
・概要

Mr. 一番すべりは、簡易 Janbu 法に基づき任意形状臨界すべり面位置を自動的に探索し、安全率を計算する斜面安定解析プログラムです。また、操作性が良く、グラフィックやプロッタ出力も充実しています。

- ・適応機種 NEC PC9801シリーズ
- ・価格 50万円（税別）
- ・適用例



傾斜地盤上の盛土



凸形基盤上の切土斜面

☆デモプログラム貸出し中

あなた自身の手では是非ご確認下さい。

株式会社CRC総合研究所 西日本支社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎

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
- 豊富な図化処理
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・ブラガー、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(関口・太田モデル)

↓ (荷重)



応力増分コンター (de V)
(10日後)



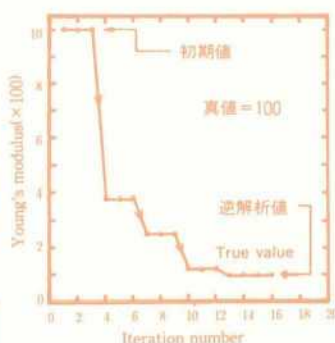
変位ベクトル図 (40日後)



盛土(40日)後の地盤の変形



盛土(40日)後の地下水の流れと水頭
コンターおよび自由水面



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

このシステムは、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。

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

問合せ先

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06-241-4121) 営業担当: 岩崎