

**投稿論文** (和文ノート)  
**TECHNICAL  
NOTE**

# 非破壊試験による10年間大気暴露された 耐候性鋼溶接継手の疲労き裂の検出

近藤明雅\*・山田健太郎\*\*・菊池洋一\*\*\*

本研究は、10年間大気暴露した耐候性鋼溶接継手試験片に微小な疲労き裂を発生させた後、各種の非破壊試験を行って、疲労き裂の検出精度の比較を行ったものである。非破壊検査による疲労き裂検出におよぼす表面錆層の影響を検討するため、錆層除去の前後2回非破壊検査を行った。錆層の有無にかかわらず、磁粉探傷試験で1.2 mm、渦流探傷試験で0.9 mmのき裂深さの疲労き裂が検出できた。超音波探傷試験では、錆層が厚い場合には疲労き裂を検出できなかった。

**Key Words** : weathering steel, welded joint, fatigue strength, corrosion, nondestructive test

## 1. ま え が き

近年、鋼橋の維持管理費用に占める防食のための塗装費の増加から、耐候性鋼の無塗装使用がクローズアップされてきた。鋼橋部材の疲労損傷事例が報告されてきており<sup>1)~3)</sup>、耐候性鋼を構造物に無塗装使用することを想定して、鋼材の腐食が構造部材の疲労強度におよぼす影響が検討されてきた<sup>4), 5)</sup>。疲労き裂が発生すると、すぐさま橋梁が破壊するというわけではないが、放置しておくと重大な事態にいたることも考えられる。したがって、疲労き裂の早期発見と適切な補修が重要である。このような観点から溶接欠陥および疲労き裂の検出に対する各種非破壊試験の適用性<sup>6)~8)</sup>や塗装膜上から非破壊検査を行った場合の塗膜の影響<sup>9)</sup>に関して検討が行われている。しかし、耐候性鋼の無塗装使用に対して錆層の影響を検討したものは見られない。本研究は、10年間大気暴露した試験片に微小な疲労き裂を発生させた後、各種の非破壊試験を行って、疲労き裂の検出精度の比較検討を行ったものである。

## 2. 非破壊試験

### (1) 試験方法

試験片の形状と寸法を Fig.1 に示す。使用鋼材は、耐候性鋼 SMA 50 で、JIS G 3114 の規格に相当するものである。試験片は、昭和 52 年 9 月から昭和 63 年 3 月までの 127 箇月間（約 10 年間）大気暴露したものと室内で同期間保存したものを使用した。試験片の暴露は、海岸から約 1 km 離れた鉄構工場敷地内に架台を設置し、特製の碍子にはさんで南向き 30° の角度で雨ざらしにして

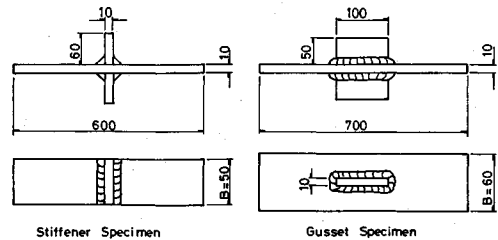


Fig.1 Fatigue test specimens.

Table 1 Number of cycles at dye-check and for failure.

Specimen	Exposure Time (Year)	Stress Range (MPa)	$N_{dye} \times 10^3$	$N_f \times 10^3$	$N_{dye}/N_f$
(a) Stiffener Specimens					
F101	10	245	180	292	0.62
F102	10	245	200	609	0.33
F001	0	245	150	197	0.76
(b) Gusset Specimens					
H101	10	245	80	187	0.43
H102	10	245	80	180	0.44
H001	0	245	70	170	0.41
H002	0	245	70	140	0.50

実施した。

これらの試験片は、疲労試験片として製作されたものであり、微小な疲労き裂を発生させるに十分な繰返し数を与えた後、疲労試験を中断し各種の非破壊試験を行って、疲労き裂の検出精度の比較を行った。試験片に与えた作用応力範囲  $\sigma_r$ 、非破壊試験を行ったときの繰返し回数  $N_{dye}$ 、試験片が疲労破断したときの繰返し回数  $N_f$  を Table 1 に示す。  $N_{dye}/N_f$  の値は、0.33~0.76 とばらついている。したがって、  $N_{dye}/N_f$  が小さい場合には、小さな半楕円き裂が発生しているが、

\* 正会員 工博 名城大学助教授 理工学部土木工学科 (〒468 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

\*\* 正会員 Ph.D. 名古屋大学教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 中部大学教授 工学部土木工学科

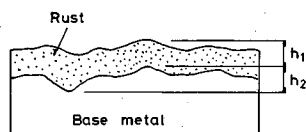


Fig.2 Rust thickness  $h_1$  and surface roughness  $h_2$ .

$N_{dye}/N_f$ が大きくなると疲労き裂が成長してき裂長さが大きくなったりあるいは複数個の半楕円き裂が合体して1つの大きなき裂となる。

非破壊試験法は、鋼橋の検査に用いられる検査のうち、磁粉探傷試験 (MT)、渦流探傷試験 (ECT)、超音波探傷試験 (UT) および浸透探傷試験 (PT) である。また、非破壊試験による疲労き裂検出におよぼす表面錆層の影響を検討するため錆層除去の前後2回非破壊試験を行った。なお、浸透探傷試験は錆の存在下ではき裂検出が不可能なので錆の除去後のみに行った。非破壊試験の後、試験片のき裂を液体浸透液でマークした後破断させて破面観察を行って、非破壊試験時の実き裂の大きさを計測した。

非破壊試験は、A社において上記の4種類を行い、B社では、MTとUTを実施した。A社における試験条件の概要は次のようである。MTには、交流極間型の磁化装置とエアゾール式湿式蛍光磁粉液 (粒径  $3\mu$  以下) が使用された。ECTは、ED-800の探傷器と自己比較式の試験コイルを用いて試験周波数 100 KHz で実施された。UTでは、パルス反射式の探傷器と周波数 5 MHz、屈折角  $45^\circ$  の探触子および接触媒質としてグリセリンが用いられた。A社とB社の検査条件の相違点は、B社のMTにおいて粒径の大きい湿式蛍光磁粉液 ( $10\mu$  以下) が用いられたことである。その他の相違点として、A社の検査技師がこれまでに非破壊試験により疲労き裂を検出した経験を有するのに対し、B社の技師は疲労き裂に関する認識が十分でなかったことがあげられる。これらの結果、B社の非破壊試験では試験片7本中6本で疲労き裂が検出されなかった。このため、A社の試験結果のみを対象として考察する。

錆層の厚さは、文献4)と同様な方法により測定した。すなわち、研削盤を用いて鋼材の表面から約 0.05 mm ずつ削り、そのつど研削面の変化を観察することにより求めた。Fig.2に示すように、錆層がなくなり鋼の地金が見えるまでを錆層の厚さ  $h_1$  とし、その後腐食ピットが見えなくなるまでを腐食ピットの深さ  $h_2$  とした。10年大気暴露した試験片では、 $h_1$  が 0.1~0.15 mm、 $h_2$  が 0.2~0.3 mm 程度であった。また、室内で保存した試験片については錆層厚の測定を行っていないが、ワイヤブラシで強くこすると鋼の地金が見える程度の薄い錆層であった。

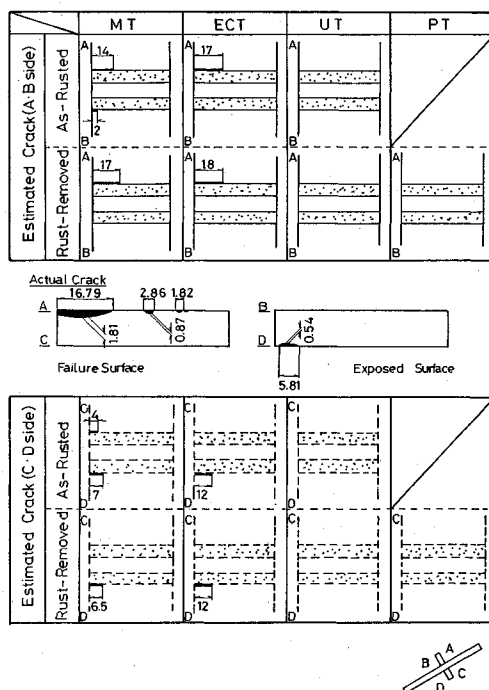


Fig.3 Typical non-destructive test results of fatigue tested stiffener specimens before and after the rust is removed.

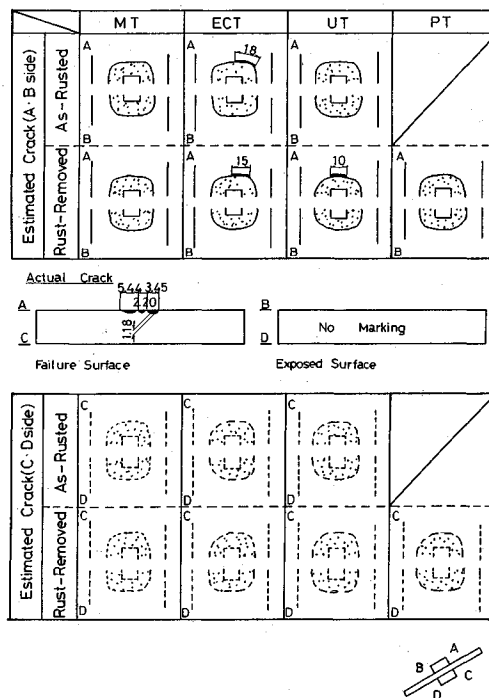


Fig.4 Typical non-destructive test results of fatigue tested gusset specimens before and after the rust is removed.

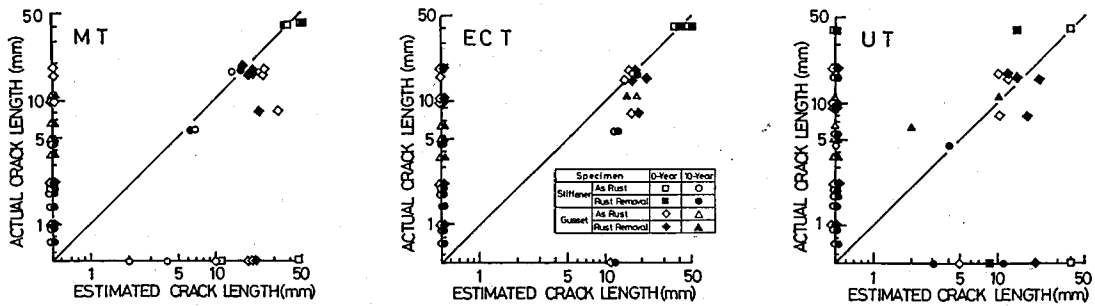


Fig.5 Comparison between the actual crack length and the estimated crack length.

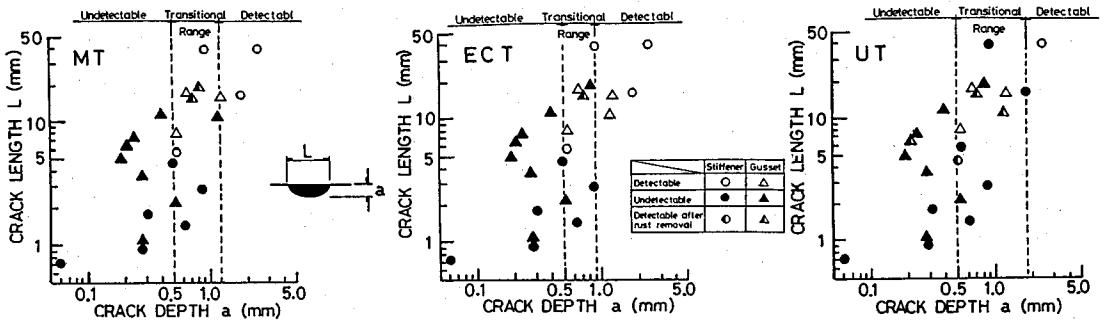


Fig.6 Detectable limit of fatigue crack by non destructive test.

## (2) 試験結果

10年大気暴露されたリブ十字すみ肉溶接継手試験片(F101)に、マークされた疲労き裂の形状・寸法・位置と非破壊検査による推定き裂を対応させたものの一例をFig.3に示す。図中のA, B, C, Dは試験片の4個の溶接止端部を示す。この例では、溶接止端Aに4個の半楕円き裂がマークされているが、このうち表面での開口長さ16.79 mmの疲労き裂のみが錆層の有無にかかわらずMTおよびECTで検出されているのがわかる。また、液体窒素で冷却後脆性破壊させた溶接止端Dにマークされた長さ5.81 mmのき裂も、MTとECTにより検出されている。Fig.4に示したガセット溶接継手試験片(H102)の例では、止端部Aに3個の連続したき裂があり、ECTでは錆の有無にかかわらずき裂が検出されているが、UTでは錆を除去した後のみに検出されている。MTおよびPTでは検出できていない。

Fig.5は、実き裂の表面開口部の長さや非破壊試験による推定き裂長さの関係を示したものである。錆層除去以前の測定結果を白ぬきの記号で示し、除去後の結果を黒塗りで示した。縦軸上のプロットは、非破壊検査で検出できなかったき裂を表わし、横軸上のプロットは実き裂がないにもかかわらずき裂ありと判定(空振り)したことを示す。MTでは錆を除去する以前の測定でこの空振りが多く、UTでは錆層の有無にかかわらず空振りが認められる。どの非破壊検査法を用いても実き裂長さ

が5 mm程度以下の場合には検出できていない。き裂が検出できた場合には、一部を除いて実き裂長さや推定き裂長さはよく対応している。

錆層除去前の測定で検出できた疲労き裂の数は、MT, ECT, UTでそれぞれ7, 8, 4個であり、UTによる検出数が少ない。10年大気暴露された試験片と実験室内で保管した試験片の結果を比較すると、UTを用いた場合には、検出された実き裂はすべて実験室内で保管した試験片のものであり、錆層の厚い10年大気暴露試験片の疲労き裂は検出不可であった。これに対して、MTおよびECTを用いた場合には、錆層の厚さにかかわらず両者の試験片からき裂が検出された。

なお、錆層除去後の非破壊検査によって検出された疲労き裂の数は、MT, ECT, UTでそれぞれ9, 9, 8個であった。

Fig.6は、破面にマークされたき裂の表面長さや深さの関係を示し、そのき裂が、非破壊試験で検出されたかどうかを区別したものである。どの非破壊試験を用いても0.5 mm以下の実き裂深さは検出不可となった。また、磁粉探傷試験(MT)では、1.2 mm以上の実き裂深さは錆層があっても確実に検出されている。渦流探傷試験(ECT)においては、き裂深さ0.9 mm以上で検出されている。

超音波探傷試験(UT)の場合には、1.8 mm以上のき裂深さで検出可能となっているが、これはFig.4で示

したように実験室内で保管した試験片のような錆層が薄い場合の結果であり、10年暴露材のような錆層が厚い場合の結果は含まれていない。

なお、これらの非破壊試験はき裂が存在する可能性があることを知った上で、室内において下向きの作業姿勢で実施されたものであり、実験で得られたき裂の検出精度は用いた各検査方法の限界に近いものである。また、錆層の上からも微小なき裂が検出されたことは特筆に値する。しかしながら、本研究における非破壊検査の作業条件は現場での検査に比較して良好であることから、ここで示した疲労き裂の検出精度は、現場での検査にそのまま当てはまるものではないことに留意する必要がある。

### 3. ま と め

耐候性鋼無塗装橋梁の維持・管理の観点から、橋梁の現場で用いられる各種の非破壊検査を行い、10年大気暴露された溶接継手試験片の疲労き裂の検出精度の検討を行った。

得られた結果を要約すると次のようになる

(1) 各種の非破壊検査のうち、浸透探傷試験(PT)は、微少な疲労き裂の検出には信頼性が低い。

(2) 磁粉探傷試験(MT)と渦流探傷試験(ECT)の検出精度がよく、錆層の有無および錆層の厚さにかかわらず、疲労き裂の検出限界は、き裂の深さで示すとMTで1.2 mm, ECTで0.9 mm程度であった。

(3) 超音波探傷試験(UT)の検出限界は、錆層が薄い場合には1.8 mm程度であるが、錆層が厚い場合にはき裂の検出が不可であった。

### 謝 辞

本研究は、昭和52年(1977)からスタートした耐候

性鋼溶接継手の大気暴露後の疲労挙動に関する研究の一部である。11年目の昭和63年度の本研究は、名古屋高速道路公社からの受託研究として行われたものであり、研究の一部に名城大学学術研究助成費を使用した。本研究を進めるにあたり、青木尚夫(トビー工業)、田村勝巳(同)、加藤昌彦(橋梁検査センター)、大駐久雄(関西エックス線)の諸氏には多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，Vol.17, No.8, 1983年8月。
- 2) 阿部英彦・谷口紀久・阿部允：鋼鉄道橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，Vol.17, No.8, 1983年8月。
- 3) 三木千壽・西川和廣・Fisher, J. W.：鋼橋の疲労損傷とその検査，橋梁と基礎，Vol.20, No.5, 1986年5月。
- 4) 山田健太郎・村山眞・近藤明雅・菊池洋一：大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ，土木学会論文報告集，第337号，1983年9月。
- 5) Albrecht, P. and Sidani, M.：Fatigue of eight-year weathered A 588 steel stiffeners in salt water, J. Structural Eng., ASCE, Vol.115, No.7, July, 1989。
- 6) 三木千壽・深沢誠・加藤昌彦・大駐久雄：表面亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性，土木学会論文集，第386号，1987年10月。
- 7) 田島二郎・福井崇博・三木千壽・深沢誠：かど溶接ルート部に発生する疲労亀裂検出に対する非破壊試験の適用性，土木学会論文集，第386号，1987年10月。
- 8) 飯島武明・深沢誠・三木千壽・田島二郎：補剛トラス部材溶接継手の疲労亀裂検出に関する実験，土木学会論文集，第410号，1989年10月。
- 9) 深沢誠・大駐久雄・加藤昌彦・三木千壽：非破壊試験による表面疲労き裂検出に及ぼす塗膜の影響，土木学会論文集，第398号，1988年10月。

(1992.10.6 受付)

## DETECTION OF FATIGUE CRACK IN 10-YEAR WEATHERED SMA50 STEEL WELDED JOINTS

Akimasa KONDO, Kentaro YAMADA and Yoichi KIKUCHI

This paper deals with the detection of small fatigue cracks by the nondestructive tests in unpainted weathering steel welded joints after 10-year of atmospheric exposure. The nondestructive tests were carried out to find small cracks before and after the rust removal. The detectable limits of fatigue crack depth with or without the rust were 1.2 mm by the magnetic particle test and 0.9 mm by the eddy current test. The ultrasonic test was not applicable, when the test was carried out over the patina of about 0.1 mm.

# 図 書 案 内

## 構造工学論文集

Journal of Structural Engineering

Vol.39A 1993.3

B 5 版・計1,606頁

3分冊

定価 7,000円

〒1,000円

## 鋼構造架設設計指針

B 5 版 158頁

定価 3,100円

会員特価 2,700円

〒410円

## 鋼構造架設施工指針

B 5 版 122頁

定価 3,090円

会員特価 2,780円

〒410円

構造工学シリーズ 4

## 材料特性の数理モデル入門

～構成則主要用語解説集～

B 5 版 130頁

定価 4,500円

会員特価 3,800円

〒410円

お申込みは…社団法人 土木学会 刊行物販売係

〒160 東京都新宿区四谷1丁目無番地

☎ 03(3355)3441 内線144・145・146

郵便振替 東京6-16828

# 圧密解析ソフト パソコンに上陸!!

未来設計企業  
**CRC**

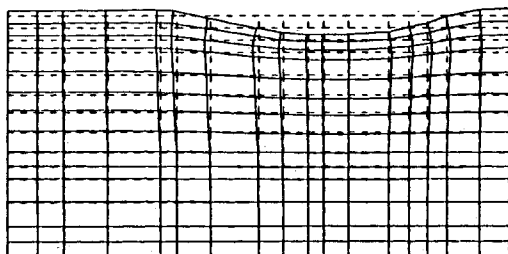
## 地盤の非定常圧密解析プログラム

# Mr. 圧密

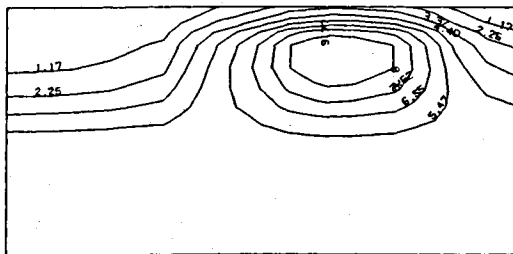
(特長)

- 非定常FEMによる線形弾性解析(christian系の解法)。
- 二次元平面歪解析。
- 要素として三角形・任意四角形が扱える。
- スケーリングをしているので安定して解が求まる。
- リスタート機能の完備。
- 入力はわかりやすいコマンド形式を採用(フリーフォーマット)。
- 図化处理(プロッタ、画像出力)等、豊富な機能を持つポストプログラムを完備。
- ジェネレート機能(長方形要素)により簡単にモデル作成が可能。
- 大モデルはそのままCRCネットワークでも(ホスト処理)可能。

販売価格：60万円 機種：NEC PC9800シリーズ 他



変形図



過剰間隙水圧コンター図

※EWS、汎用機用の圧密解析プログラム(逆解析も可能)として"UNICON"も用意しております。

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒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: 小林

# 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

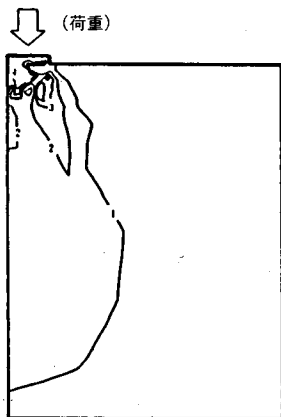
- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱い実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)

- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。

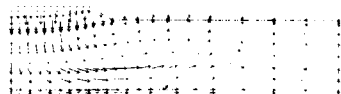
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)

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)

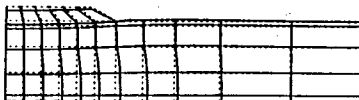
弾粘塑性(関口・太田モデル)



応力増分コンター( $\Delta\sigma V$ )  
(10日後)



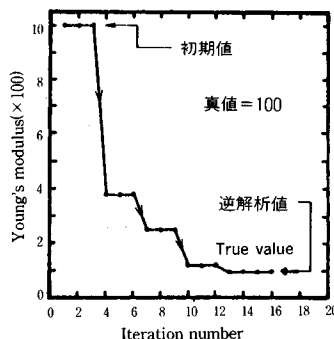
変位ベクトル図(40日後)



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



ヤング率と繰返し回数の関係

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

西日本支社

〒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



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

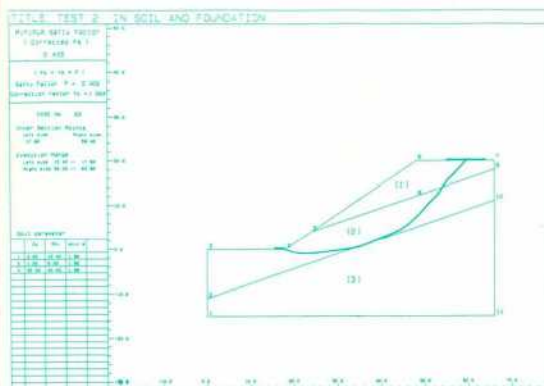
## ・概要

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。

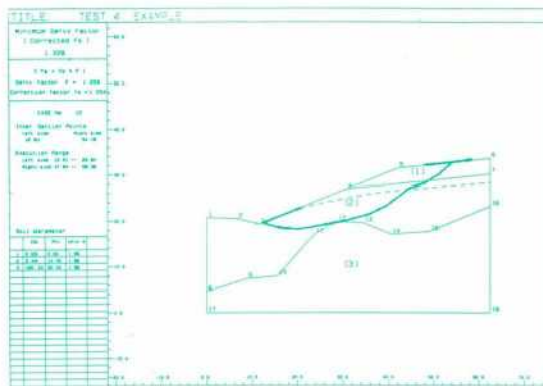
## ・適応機種 NEC PC9801シリーズ

## ・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

## ●お客様各位

土木施工（協山海堂 発行）5月号に弊社 Mr. 一番すべりが取り上げられその解析結果が掲載されていました。少し不審に思える点があり、早速弊社で同モデルを解析しましたところ、すべり面の位置・形状が多少異なり、また安全率も他のソフトより低い値になる事が判明致しました。関連記事を土木施工8月号に掲載予定。

（評価時の入力条件に問題があったものと思われます。）

株式会社 **CRC** 総合研究所 西日本支社

〒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：小 林

土木学会論文集

昭和三十七年五月二十八日 第三種郵便物認可  
平成五年七月十五日・印刷  
平成五年七月二十一日・発行  
土木学会論文集（毎月一回）二十日・二十一日発行

定価 一、五〇〇円（本体価格）一、四五六円