

地震応答解析に用いる降伏強度比の定義とその互換性について

平尾 潔*・沢田 勉**・成行義文***

既往の研究では、強震下における構造物の損傷を解析的に評価する場合、降伏強度比として、個別に、2つの異なる定義が用いられており、両研究成果の互換性が不明である。そこで、本ノートでは、既往の研究成果の相互利用を可能とするため、両降伏強度比の変換係数を導き、応答解析結果を基に、その回帰式を求めた。そしてこの回帰式より、両者が比較的精度良く互換できることを明らかにした。

Key Words : yield strength ratio, energy response analysis, seismic damage

1. はじめに

近年、合理的な耐震設計法を導くことを目的として、強震下における構造物の最大変位応答並びに履歴吸収エネルギー応答等に関する研究が盛んに行われ、地震による構造物の損傷評価に有用な、多くの知見が蓄積されてきている^{1)~8)}。しかし、既往の研究では、構造物の損傷を支配する重要なパラメータである降伏強度比として、異なる2つの定義が個別に用いられているため、たとえ両者の値が同一であっても解析結果は異なったものとなり、貴重な研究成果が相互に利用できない状態にある。

そこで、本ノートでは、このような不都合を解消するため、両降伏強度比の定義式より、両者の変換係数を求めその回帰式を導いた。そして、強震下における構造物の終局安全性照査に有用と思われる、保有降伏強度比を例にとり、両降伏強度比がこの回帰式により比較的精度良く互換できることを示した。

2. 降伏強度比 R_1 , R_2 及び変換係数 C_R

前述のように、既往の研究では、その相互関係を検討することなく、式(1)、(2)で定義されるような、降伏強度比 $R_1^{2),4),5)}$ 及び $R_2^{1),3),7)}$ が個別に用いられていた。

$$R_1 = Q_y / Q_{emax} = X_y / X_{emax} \dots\dots\dots (1)$$

$$R_2 = Q_y / (M \cdot \ddot{X}_{0max}) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Q_y , M , X_y は、それぞれ、構造物の降伏強度、質量、降伏変位を表し、 \ddot{X}_{0max} は入力地震動の最大加速度を表す。また、 Q_{emax} , X_{emax} は構造物を弾性系とみなした場合の最大復元力及び最大応答変位を表す。

両者を比較すると、式(2)の R_2 は、構造物を剛体とみなした場合の最大地震力を基準としたもので、簡単且つ馴染み易いものであるが、その定義に構造物の動特性が考慮されていないため、 R_2 の値と、固有周期等によって異なる、構造物の損傷(非弾性応答)の程度との対応関係が不明確となる⁴⁾。これに対し、式(1)の R_1 は、基準とする弾性応答値 $Q_{emax}(X_{emax})$ に構造物の動特性(固有周期、減衰定数)が反映されているため、この値と構造物の非弾性応答の程度がほぼ対応することになるが、その値の決定に弾性応答解析を必要とするなど、それぞれ一長一短があり、優劣はつけ難い。

それゆえ、本ノートでは、これら両降伏強度比の対応関係を明らかにするため、式(1)、(2)より、両者の関係、式(3)を導いた。

$$R_2 = C_R \cdot R_1, \quad C_R = (2\pi/T)^2 \cdot X_{emax} / \ddot{X}_{0max} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 X_{emax} , \ddot{X}_{0max} は式(1)、(2)と同様であり、 T , π は固有周期及び円周率を表す。

3. 保有降伏強度比 R_r

最近、地震による構造物の損傷評価指標がいくつか提案されてきている。本ノートでは、これらの内で汎用性があり、数式表現の簡単な、式(4)の Park らの損傷指標 $D^9)$ を選び、その崩壊条件、 $D=1$ 、を満たす降伏強度比 R_1 及び R_2 の値、すなわち保有降伏強度比 R_r 、及び R_{2r} をエネルギー応答解析の繰返しにより求め、両者の間に、式(3)の変換関係が成り立つかどうかを検討した。

$$D = (\mu_d + \beta \cdot \mu_h) / \mu_u \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_d &= X_{max} / X_y, \quad \mu_h = E_h / (Q_y \cdot X_y) \\ \mu_u &= X_u / X_y, \quad E_h = \int dE_h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 X_{max} , E_h は地震による構造物の最大応答変位、履歴吸収エネルギーを、 Q_y , X_y 及び X_u は、それぞれ、

* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科
(〒770 徳島市南常三島町 2-1)

** 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科

*** 正会員 工博 徳島大学講師 工学部建設工学科

Table 1 Artificial Earthquakes

EQ-NAME (GROUP)	GC	M	D (km)	A/V (1/cm)	t_p (sec)	P_t (cm/sec)	T_s (sec)
No. 1	I	5.3	120	30.1	0.24	66324	12.76
No. 2	I	5.3	400	30.0	0.25	74236	13.76
No. 3	I	5.3	20	28.6	0.25	52168	9.38
No. 4	I	5.3	60	28.6	0.24	54301	12.50
No. 5	I	6.0	120	27.0	0.25	88651	15.62
No. 6	I	6.7	20	25.2	0.29	98676	16.60
No. 7	I	5.3	200	24.6	0.25	70234	13.20
No. 8	I	6.0	20	24.5	0.29	62868	12.96
No. 9	I	6.0	200	24.2	0.27	101567	17.58
No. 10	I	6.0	60	22.6	0.27	79833	12.34
No. 11	II	5.3	120	19.0	0.36	100042	13.98
No. 12	II	5.3	60	18.6	0.36	84801	13.14
No. 13	II	6.0	120	18.3	0.42	87545	14.72
No. 14	II	6.0	20	15.5	0.45	111825	15.34
No. 15	III	5.3	120	14.9	0.47	106728	15.28
No. 16	III	6.7	120	14.2	0.55	137849	25.84
No. 17	III	6.0	400	13.4	0.63	113594	22.04
No. 18	III	6.0	20	12.7	0.62	114528	15.48
No. 19	III	6.0	60	12.5	0.64	107962	14.44
No. 20	II	6.7	60	12.2	0.59	149637	22.06
No. 21	II	7.4	200	10.9	0.72	208259	32.78
No. 22	III	6.7	200	10.4	0.84	160464	31.38
No. 23	III	6.7	120	9.9	0.84	153970	29.46
No. 24	III	6.7	60	9.6	0.88	144737	28.72
No. 25	II	7.4	400	8.9	0.68	210819	36.02
No. 26	III	7.4	200	8.7	1.11	152664	32.70
No. 27	II	7.9	20	8.5	0.94	203863	33.80
No. 28	II	7.9	200	8.5	0.89	265569	43.44
No. 29	II	7.4	120	7.3	1.11	164486	25.00
No. 30	III	7.4	400	6.0	1.08	227829	37.10

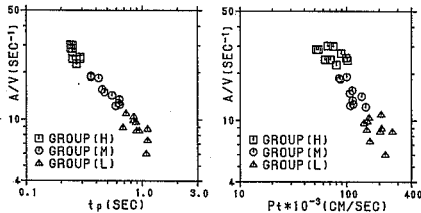


Fig.1 Relationship between A/V and t_p and P_t

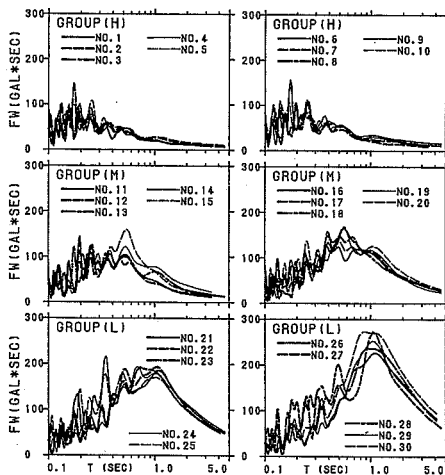


Fig.2 Fourier spectra for each earthquake

単調載荷による構造物の降伏強度、降伏変位及び終局変位を表す。また β^9 は断面特性に依存した正の係数であり、 μ_u 、 μ_d 、 μ_h は、それぞれ、終局変位靱性率、変位靱性率及びエネルギー靱性率を表す。

4. 入力地震動

周知のように、地震による構造物の損傷は、その構造

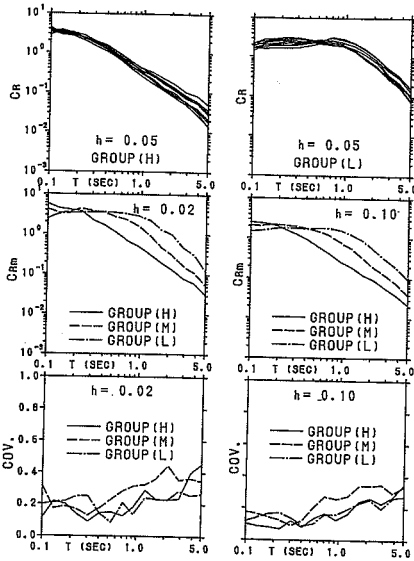
特性とともに入力地震動特性によっても異なる^{2)~8)}。それゆえ、本ノートでは、解析結果に一般性をもたせるため、道路橋示方書 V 耐震設計編の平均水平成分加速度応答スペクトルを目標とした、模擬地震動 No.1~No.30 を作成し、入力地震動として用いた。なお、この模擬地震動の作成方法については著者らの別の報告^{11),12)} にゆずるが、強震部の継続時間としては文献¹²⁾ の T_{p0} を用いた。また、波形の包絡線形状 (時間関数) には位相差分布を選び、これを正規分布として与えた。各地震動の目標とした加速度応答スペクトルの地盤種別 GC、マグニチュード M 、震央距離 D 、並びに、作成した模擬地震動の最大加速度 A と最大速度 V の比 A/V 、卓越周期 t_p 、トータルパワー P_t 及び強震部の継続時間 T_s を Table 1 に示す。また、各地震動の A/V と t_p 及び P_t との関係、並びに加速度フーリエスペクトルを、それぞれ、Fig.1, 2 に示す。これらの図、表より、 A/V の大きい地震動ほど、構造物の応答と密接な関係にある t_p 及び P_t が小さくなり、短周期成分も多く含まれることが分かる。したがって、本ノートでも、最近の研究にあるように^{8),10)}、この A/V が構造物の応答に関係する入力地震動特性を代表する簡単且つ有効な指標とみなし、Table 1 のように、作成した 30 個の模擬地震動を適当に、各 10 個ずつ、3 つのグループ、すなわち、 A/V 値が比較的大きいグループ (H)、中間的なグループ (M) 及び比較的小さいグループ (L) に分類した。そして、各グループごとの変換係数 C_R 、並びに保有降伏強度比 R_{1r} 、 R_{2r} を求め、入力地震動の A/V 値がこれらに及ぼす影響も合わせて検討することとした。

なお、解析には、周知の運動方程式並びにエネルギー応答式⁴⁾ を用い、前者は線形加速度法により解き、後者の各積分は、線形加速度法における時間関数を用いて、各増分時間内で直接積分した。

5. 解析結果の比較検討

(1) 変換係数 C_R とその回帰式

減衰定数 $h=2\%$ 、 5% 及び 10% をもつ一自由度系構造物を対象として、その固有周期 T を、 $0.1\sim5$ 秒の間を対数軸上で 14 等分した、15 通りに変化させて弾性応答解析を行い、模擬地震動 No.1~30 に対する式 (3) の変換係数 C_R を求めた。Fig.3 に、 $h=5\%$ の場合のグループ (H) 及び (L) 地震各 10 個に対する C_R の値を、また、 $h=2\%$ 及び 10% に対する各グループ 10 個の平均値 C_{Rm} 並びに変動係数 COV を、それぞれ、上から順に示す。これらの図より、つぎのことが分かる。(a) 変換係数 C_R の値は、その定義 (式 (3)) に弾性応答値 X_{emax} を含んでいるため、入力地震動の A/V 、並びに構造物の固有周期 T と減衰定数 h によって異なる。(b) すなわち、 A/V 値が大きく短周期成分が卓越するグルー

Fig.3 C_R for (M), C_{Rm} and COV for (H), (M) and (L)

プ (H) とその逆のグループ (L) の地震動では、 $T < 0.2 \sim 0.3$ 秒の範囲を除き、後者に対する値が大きくなる。そして、前者のグループ (H) では、固有周期 T の増加につれて、 C_R の値がほぼ直線的に減少するのに対し、グループ (L) では、 $T=1$ 秒前後を頂点とした曲線状を呈する。また、 C_R の値は減衰定数 h が大きくなるほど小さくなる。(c) C_R のバラツキ、すなわち変動係数 COV は、各グループとも良く似た傾向を示し、ほぼ $0.2 \sim 0.4$ の範囲にあり、固有周期 T が短く、減衰定数 h が大きくなるにつれて小さくなる。

つぎに、本ノートでは、降伏強度比 R_1 , R_2 の互換を可能とするため、この変換係数 C_R に対する回帰式を、固有周期 T をパラメータとして、減衰定数 h 並びに入力地震動のグループ (A/V) ごとに導いた。その際、 C_R の目標値とした各グループの平均値 C_{Rm} (Fig.3 参照) を、両対数紙上で、式 (6) のように、固有周期 T の 3 次曲線で近似し、その回帰係数を試行錯誤により求めた。

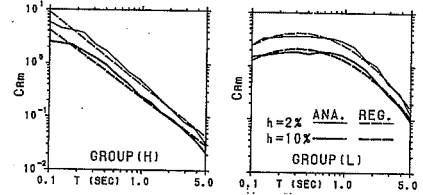
$$\log_{10} C_R = A_0 + A_1 (\log_{10} T + c) + A_2 (\log_{10} T + c)^2 + A_3 (\log_{10} T + c)^3 \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $A_0 \sim A_3$ 及び c は回帰係数を表し、入力地震動の A/V 及び減衰定数 h に応じて、それぞれ、Table 2 のようである。ただし、グループ (H) の A_2 , A_3 , c 及びグループ (L) の A_3 は、その値が他に比べ、非常に小さかったため、これらを 0.0 としている。

Fig.4 は、回帰式 (6) の精度をみるため、 $h=2\%$, 10% の場合のグループ (H) 及び (L) 地震に対する変換係数の平均値 C_{Rm} と回帰結果を比較したものであり、

Table 2 Coefficients of regression EQ.(6)

EQ-GROUP	h	A_0	A_1	A_2	A_3	c
GROUP (H)	2	-0.419	-1.368	0.0	0.0	0.0
	5	-0.529	-1.308	0.0	0.0	0.0
$A/V \geq 10$	10	-0.646	-1.289	0.0	0.0	0.0
GROUP (M)	2	0.607	-0.038	-1.395	0.003	0.0
	5	0.461	-0.037	-1.335	0.003	0.5
$A/V=11 \sim 20$	10	0.326	-0.037	-1.289	0.003	0.5
GROUP (L)	2	0.615	-0.003	-0.986	0.0	0.5
	5	0.452	-0.006	-0.909	0.0	0.5
$A/V \leq 11$	10	0.323	-0.003	-0.891	0.0	0.5

Fig.4 Analytical value of C_{Rm} and regression one

いずれの場合も両者は良く一致していることが分かる。

(2) 保有降伏強度比 R_{1r} と R_{2r} の関係

3. で述べたように、保有降伏強度比 R_{1r} 及び R_{2r} の値は、構造物の崩壊 (非弾性応答) に関係したものであり、固有周期 T , 減衰定数 h のほかに、構造物の復元力特性、塑性剛性比 γ 及び終局変位靱性率 μ_u によっても異なる。しかし、 $R_1(R_{1r})$, $R_2(R_{2r})$ 両者の関係は、式 (3) のように、弾性応答値のみに関係し、非弾性応答値には関係しない。それゆえここでは、終局変位靱性率 $\mu_u=5$, 塑性剛性比 $\gamma=0.1$ とした Q-hyst 型一自由度系構造物に対する結果のみを紹介することとする。

Fig.5 は、上から順に、 $h=5\%$ の場合のグループ (M) 地震 10 個に対する保有降伏強度比 R_{1r} 及び R_{2r} , グループ (H), (M) 及び (L) 地震各 10 個ごとの平均値 R_{1rm} 及び R_{2rm} 並びにこれらの各平均値に対する変動係数 COV を示したものである。図より、つぎのことが分かる。(a) 保有降伏強度比 R_{1r} は、その定義 (式 (1)) に構造物の動特性が含まれているため、 R_{2r} に比べて、構造物の固有周期 T に対する依存性がかなり小さくなる。また、解析結果は省略したが、減衰定数 h に対する依存性も少ない。(b) 同様な理由により、 R_{1r} の方が入力地震動の A/V 値に対する依存性が少なく、入力地震動間のバラツキも小さい。(c) R_{1r} のスペクトル形状が、固有周期 T にあまり依存せず、緩やかな直線状となるため、 R_{2r} の形状は、Fig.3 に示した変換係数 C_R のそれと類似する。

つぎに Fig.6 は、 $h=2\%$, 10% をもつ構造物にグループ (H) 及び (L) 地震を入力した場合の、平均保有降伏強度比 R_{2rm} の解析値と、式 (6) より得られる C_R の回帰値及び R_{1rm} の解析値を式 (3) に代入して求めた、 R_{2rm} の推定値を比較したものである。図より、両者は良く一致しており、既往の両降伏強度比 $R_1(R_{1r})$, $R_2(R_{2r})$ は、本ノートで導いた式 (3) 及び式 (6) により、比較的精度良く互換できることが分かる。

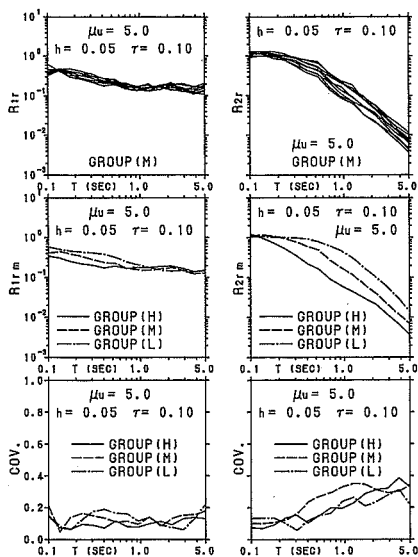


Fig.5 Relationship among R_{1r} , R_{2r} , R_{1rm} , R_{2rm} and COV

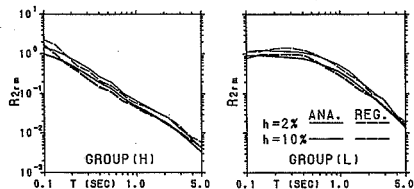


Fig.6 Analytical value of R_{2rm} and regression one

6. ま と め

本ノートでは、既往の研究で個別に用いられてきた式 (1), (2) の代表的な降伏強度比 R_1 , R_2 の関係を明らかにするため、式 (3) の関係を導き、解析結果を基に、両者の変換係数 C_R に対する回帰式、式 (6) を導いた。そして、保有降伏強度比 R_{1r} 及び R_{2r} を例にとり、式 (3) 及び (6) から、両降伏強度比が比較的精度良く互換できることを示した。したがって、本ノートで示した変換係数 C_R を用いれば、 R_1 , R_2 いずれの降伏強度比を用いた研究成果であっても相互に活用することができるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 加藤 勉・秋山 宏：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷，日本建築学会論文報告集，No. 235，pp. 9～18，1975年9月。
- 2) 山田善一・家村浩和・西村一郎：履歴吸収エネルギーによるRC橋脚模型の耐震性評価，第17回地震工学研究発表会講演概要，pp. 231～234，1983年7月。
- 3) 大野友則・西岡 隆・藤野陽三：構造物が地震時に受ける塑性ひずみエネルギー量の定量的評価，土木学会論文報告集，第333号，pp. 91～99，1983年5月。
- 4) 平尾 潔・沢田 勉・成行義文・笹田修司：強震下における一自由度系の履歴吸収エネルギーと弾性応答値との関係，土木学会論文集，第368号/I-5，pp. 401～410，1986年4月。
- 5) Hirao, K., Sawada, T., Nariyuki, Y. and Sasada, S.: The effect of frequency characteristics and duration of input earthquake motion on the energy response of structures, Proc. of JSCE, No.386/I-8, pp.381s～390s Oct.,1987.
- 6) 伯野元彦・森川 修：地震加速度と構造物破壊の関係についての一つのシミュレーション，土木学会論文報告集，第344号/I-1，pp. 299～302，1984年4月。
- 7) 松島 学・松井邦人：構造物の弾塑性モデルに及ぼす地震動の影響，構造工学論文集，Vol. 32A，pp. 815～824，1986年3月。
- 8) Zhu, T.J., Tso, W.K. and Heidebrecht, A.C.: Effect of peak ground A/V ratio on structural damage, J. of Struc. Engrg., ASCE, Vol.114, No.5, pp.1019～1037, May., 1988.
- 9) Park, Y.J. and Ang, A.H-S.: Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, J. of Struc. Engrg., ASCE, Vol.111, No.4, pp.722～739, Apr.,1985.
- 10) 沢田 勉・平尾 潔・山本英史・川手 訓：地震動の最大振幅比 (a/v , $ad/v2$) とスペクトル特性及び継続時間の関係，第21回地震工学研究発表会講演概要，pp. 41～44，1991年7月。
- 11) 沢田 勉・平尾 潔：目標応答スペクトルに合致する模擬地震動の一作成法，第17回地震工学研究発表会講演概要，pp. 49～52，1983年7月。
- 12) 沢田 勉・永江正宏・平尾 潔：位相差分による地震動継続時間の定義とその統計解析，土木学会論文集，第368号/I-5，pp. 373～382，1986年4月。

(1992.5.18 受付)

RELATIONSHIP BETWEEN TYPICAL YIELD STRENGTH RATIOS USED IN EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS

Kiyoshi HIRAO, Tsutomu SAWADA and Yoshifumi NARIYUKI

This study was done in order to find a method whereby the useful results obtained from the analysis by the use of yield strength ratio R_1 or R_2 , which are often used in inelastic earthquake response analysis, could be used interchangeably. The transformation coefficient C_R of the R_1 to R_2 was derived from their definition, and the regression equation of the C_R was deduced, on the basis of numerical results of elastic response analysis for SDOF structures, excited by thirty artificial earthquakes prepared in this study. The result of verification of this equation, by using the numerical examples of the required yield strength ratios R_{1r} and R_{2r} , showed that the ratios R_1 and R_2 are interchangeable with each other within an acceptable range of accuracy.

より現実的な解析を！

未来設計企業

CRC

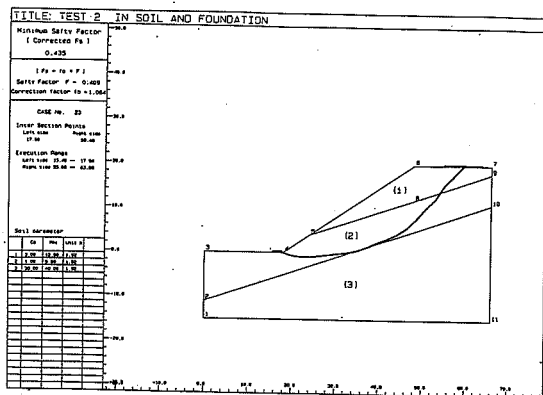
任意形状臨界すべり面自動決定プログラム

Mr. 一番すべり

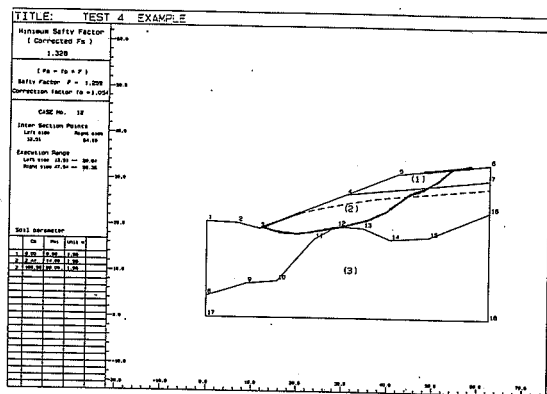
・概要

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

あなた自身の手で是非ご確認下さい。

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

個別要素法プログラム 未来設計企業 CRC

CRC-ITASCAが提供するカンドールモデル個別要素法(DEM)!!

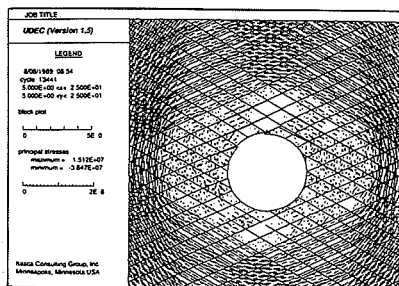
二次元個別要素法プログラム(ソースコード)

UDEC

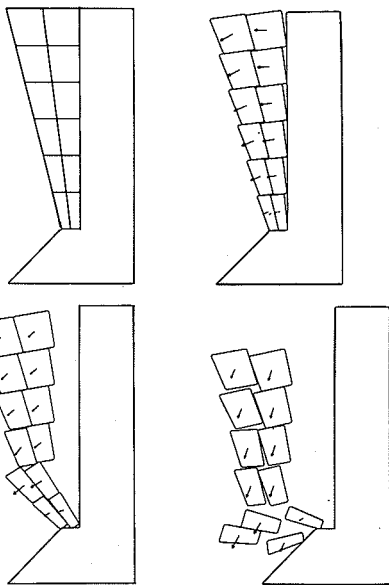
三次元個別要素法プログラム(ロードモジュール)

3DEC

個別要素法とは、1971年にDr. P. Cundallが発表した不連続体に対する動的崩壊過程をシュミレートするための解析手法です。すなわち、岩盤をジョイントとブロックから構成される岩石ブロックの集合体と考え、個々のブロックの挙動を時々刻々に追跡し、全体挙動を解析しようとするものです。集合体としての岩盤や地盤が最終的に、安定状態となるのか、あるいは大変形するのか、崩壊していくのかなど、時間の経過に伴うモデル全体のブロックの動きや破壊の進行の様子を視覚的に追跡できます。現在、岩盤・地盤の崩落や安定性の解析など、不連続体力学の有力な解析手法となっています。



大深度地下掘削時の安定解析



岩盤斜面崩落シミュレーション

- 岩盤の転倒・滑落解析
- 岩盤の掘削解析
- 不連続性岩盤の安定解析
- 地震応答解析
- 浸透—ブロック連成解析 (UDEC)
- 熱—ブロック連成解析 (UDEC)

■販売条件

UDEC・3DEC

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

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

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

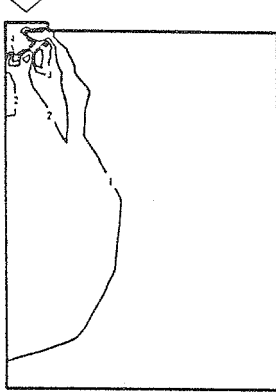
出力項目

- 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

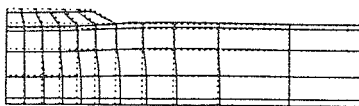
- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
弾粘塑性(関口・太田モデル)

(荷重)



応力増分コンター ($\Delta \sigma V$)
(10日後)

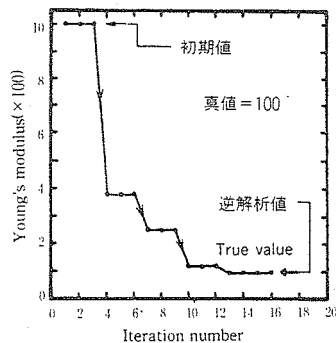
変位ベクトル図 (40日後)



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

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

〒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

平成五年四月二十五日発行
土木学会論文集(第115号・土木学会)

定価: 一、五〇〇円(本体価格: 一、四五六円)