

ランマーによって生ずる地中応力

—— フィルダムの締固めに関する実験的研究 (VIII) ——

藤井 弘章・渡辺 忠

Stress Generated by a Tamper While Compacting

——Experimental Studies on the Compaction
of Fill-Type Dams (VIII)——

Hiroaki FUJII and Tadashi WATANABE

The author measured the stress generated in situ by a tamper (78 kg) while compacting cohesive soil (Cr.) and sand (Fr.) of a fill-type dam, and discussed these theoretical background.

Results are as follow.

1) The model of the behavior of tamper-ground systems are expressed by the linear models of 3rd, 2nd and single degree of freedom as eq. (1)–(4), eq. (12)–(13) and eq. (17), shown Fig. 1.

2) By supposing a soil prism region where the stress works effective for compaction, the stress are calculated from the theory of the strain energy. The height of soil prism is double of the depth generating the stress which is one half of the surface stress. A is a contact area in eq. (28).

3) Measured stresses in Fr. are larger than in Cr.. Quasi-dynamic forces are calculated at 3.6–5.6 kg/cm² from these values.

4) Substituting the values K, M, E and a, measured by field and laboratory tests, into the equations in 1), a theoretical force is obtained but extraordinary in comparison with measure values. However using equations in 2), theoretical stresses are calculated at 3.8–5.2 kg/cm² which almost coincide with experimental results.

5) Ground characteristics such as of soil, water content and density effect the stress generated by a tamper.

I. はじめに

フィルダムは単に農業土木だけでなく一般の土木分野でも最も大きく重要な構造物の一つであることはいうまでもない。筆者は、従来等閑視されていたフィルダムの現地施工の締固め機構を知ろうとして一連の試験を行なって來た¹⁾¹⁵⁾。そしてとくにこの数年は締固め機械によって発生する地中応力を測定し、その締固め特性と機構を探っている。既にタイヤローラ⁶⁾、振動ローラ⁷⁾、ブルドーザ¹⁴⁾あるいはそれらの走行速度と地中応力の関係を論じた¹³⁾。この報告では、ランマーで締固めた際発生する力および地中応力について考察し、理論的な意味づけを行なおうとする。

一般にランマーは、タンパーと同じ意味に用いられているが、厳密にはランマーはエンジンの爆発力を利用するものであり、タンパーはエンジンの回転力をクラシクによって往復運動に

変えて締固めに利用するものである¹¹⁾. 今回使用したものは機構上タンパーであるが、慣例に従い、広義のランマー（RAと略称）と呼ぶ。欧米では重量の大きいランマーがよく用いられているようであるが、我国では1、2名で持ち運べる大きさのものが一般的である。フィルダムの締固めにおいては、地山と取付部、計器埋設部によく用いられる。

ランマーの性能試験は、1938年からアメリカ、イギリスで行なわれている¹¹⁾。いずれも施工の要求からくる含水比、密度の測定のみで、機構の解明、応力の測定など行なわれていない。

II. ランマー～地盤系のモデル表示

ここでランマー～地盤系をモデル化して、発生する力を考察してみよう。次のような仮定をする。

- (1) 土の質量を無視する。
 - (2) 土を完全弾性体とする。
 - (3) 動的変形係数（または動的ばね常数）は静的変形係数（または静的ばね常数）に等しい。

1. 3自由度系モデル¹²⁾：ランマー各部の重量配分を考え、Fig. 1-1 のようにエンジン部分を中心とする W_1 、クランクを支える W_2 の部分およびシュー（またはフート）部分 W_3 にわける。そして図のように W_2 と W_3 はばねで連成され、さらに地盤ともばね系で連成されているとすれば、次のような式が成立する。

ここで Fig. 1-1 を参照して u_1 は M_1 の, u_2 は M_2 の, u_3 は M_3 のそれぞれ変位である。そして K_2 は地盤の, K_1 はランマーのばね常数である。これを解くと

であり、ただし

$$\Delta = \left| \begin{array}{cc} \frac{K_1 + K_2}{M_1} - \omega^2 & -\frac{K_1}{M_1} \\ \frac{K_1}{M_2 + M_3} & \omega^2 - \frac{K_1}{M_1 + M_3} \end{array} \right| \dots \dots \dots \quad (8)$$

$$\mathcal{A}_1 = \frac{aK_1}{M_1} \left| \begin{array}{cc} 1 & 1 \\ \frac{K_1 - M_2 \omega^2}{M_2 + M_3} & \omega^2 - \frac{K_1}{M_2 + M_3} \end{array} \right| \dots \dots \dots \quad (9)$$

Fig. 1-1 Tamper-Ground System
(3rd degree of freedom)

$$A_3 = a \begin{vmatrix} \frac{K_1 + K_2}{M_1} - \omega^2 & \frac{K_1}{M_1} \\ \frac{K_1}{M_2 + M_3} & \frac{K_1 - M_2 \omega^2}{M_2 + M_3} \end{vmatrix} \dots \dots \dots \quad (10)$$

地盤に与える力は次のように得られる.

ただし、(1)式から $A_2 = \frac{A - A_3}{A}$ である。

2. 2自由度モデル：総重量を頭部(W_1)とフート部分にわけ、これがばね(K_1)でつながり、かつ W_2 はばね常数 K_2 の地盤と連成されているとすれば次の式が成立する。

この解は

$$u_2 = \left(1 - \frac{M_1}{K_1} \omega_1^2\right) A_1 \cos(\omega_1 t + \delta_1) + \left(1 - \frac{M_1}{K_1} \omega_2^2\right) A_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2) \quad \dots (15)$$

で得られ、地盤反力は

として得られる。

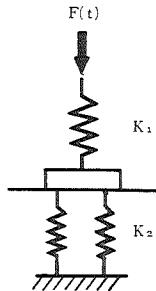


Fig 1-2 Tamper-Ground System
(2nd degree of freedom)

3. 1 自由度系モデル：ランマーの全重量 W はフートにかかり地盤と連成されていると考えると

が得られ、この解は

$$\omega = \sqrt{K/M}$$

が得られる。反力 R は

である。

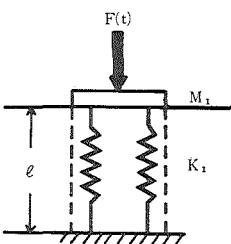


Fig 1-3 Tamper-Ground System
(Single degree of freedom)

4. 今まででは、地盤あるいはランマーの地盤特性をばね常数 $K(\text{kgf/cm})$ で表わし、連成されていると考えた。先の仮定の他、さらに次の仮定を設ける。

- (1) 跳躍するまでの機構は無視し、落下は重力のみによる。
 - (2) 衝撃が締固めに影響を与える有効な地盤の深さは、地表面応力の 2 分の 1 の応力を生ずる深さの 2 倍の長さをとり、面積は RA の接地面積とする。
 - (3) 衝撃による側方流動は無視できる。

(2) の仮定から一種の土柱を考えられ、これは周囲を拘束されているから、既述²⁾ したように進行方向を y 軸、これに直角に x 軸、下方に z 軸をとれば

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

である。一般化された Hook の法則に代入してみると

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_y = \frac{\mu}{1+\mu} \sigma_z \\ \sigma_z &= \frac{(1-\mu) E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \varepsilon_z \end{aligned} \right\} \dots \quad (21)$$

となる。よってひずみエネルギーは

となり、変形に要した仕事量 U' は、落下高を h として

$$U' = \frac{1}{2} p \delta = \frac{1}{2} \varepsilon_z \sigma_z A \ell = \frac{(1 - 2\mu)(1 + \mu)p^2 \ell}{2(1 - \mu)EA} \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

ここで P : 荷重, δ : 変形量, A : 接地面積, ℓ : 有効深さである. 弾性変形量を λ' とすれば, ポテンシャルエネルギーは

$$W(h - \lambda') = W \left[h - \frac{(1-2\mu)(1+\mu)\sigma_z \ell}{(1-\mu) E} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

である。ここで拘束された変形係数として

$$E_c = \frac{(1-\mu) E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \quad \dots \dots \dots \quad (26)$$

とすれば

$$W(h - \lambda') = W\left(h - \frac{\sigma_z \ell}{E_c}\right) \dots \dots \dots \quad (27)$$

となり、一般の衝撃応力と同様の式¹⁶⁾ が得られる。よって衝撃応力は

となり、 W , A が一定ならば、 ℓ が小さいほど、また h が大きいほど増大する。

III. 実験方法

実験は既述したように²⁾、中四国農政局西原ダムの施工現場で行なった。ランマーで締固められた供試土は、コア用土の粘性土(SM; Crと略記)と、フィルター用土の山砂(SW; Frと略記)である。ランマーは三笠産業製MTR-60およびMTR-80型を用いた。MTR-80の総重量は78kg、接地面積34.5×30.0cm=1035cm²、静的接地圧0.075kg/cm²である。土圧計等の計測機器、記録機器についても既述した⁴⁾。

IV. 実験結果および考察

走時曲線の例をFig. 2に示す。横軸に時間(t)、縦軸に土圧計によって測定されたひずみが示されている。この波形がランマーの特性で他の締固め機械とは著しく異なる。特徴的な細い線は、載荷が非常に短かいために生じる。その中間ではランマーが跳ね上り、空中にある。この図からは単位衝撃関数のように見えるが、オツシログラフの紙送り速度をさらに大きくすれば半波の連続として得られるはずである。図から周期は0.1secで、これから計算される一種の振動数は、f=10~11Hzである。

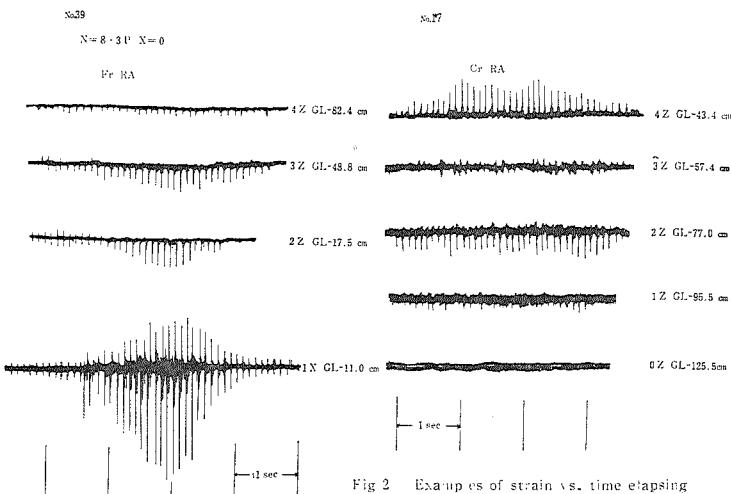


Fig. 2 Examples of strain vs. time elapsing

C_r , F_r 中の応力の実測結果をFig. 3, Fig. 4に示す。Fig. 3はx z面の、Fig. 4はz方向の応力の測定値である。測定値の妥当性はFig. 3の分布状態から確かめられ、少なくとも定性的には弾性論に従うことがわかる。Fig. 4はFig. 3の最大値を中心に描いている。土圧計直上にランマーがあるとき最大値を示し、これが意味を持つのはFig. 3をみて明らかであろう。

Fig. 4からわかるように実測応力は F_r (Fig. 4-2, 4-3)の方が、 C_r (Fig. 4-1)よりもやや大きな値を示している。地中応力から弾性論解に従うとし、影響値 K_r ¹⁰⁾を用いて疑似動荷重 q ⁵⁾を推定する。ただし、長方形荷重とし、長辺と短辺の比は、1:1.3である。したがって、疑似動荷重は、地表下15cmの実測応力 $\sigma_{z=15}$ から F_r で3.6kg f/cm²、 $\sigma_{z=45}$ から F_r で3.7~4.6kg f/cm²、 C_r では4.2kg f/cm²と得られる。これは、静的接地圧(0.078kg f/cm²)の50~60倍にも達し、あきらかに衝撃により大きな荷重が生じていることがわかる。

ここで、前記のモデルの一般解に実測数値を代入して地盤に与える力を算定してみよう。

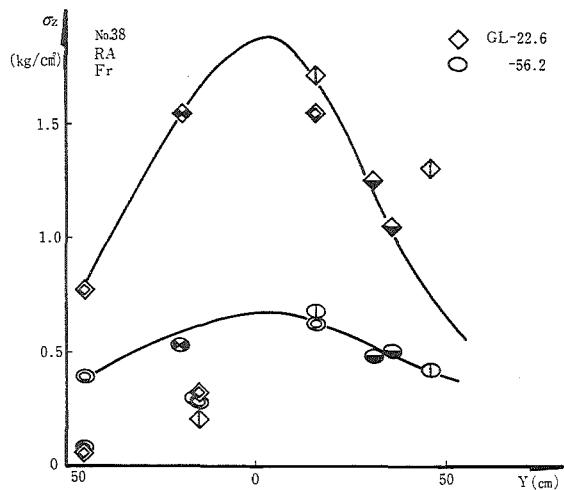


Fig. 3-1 Stress distribution of Y direction
in situ by a tamper. ($h=10\text{cm}$)

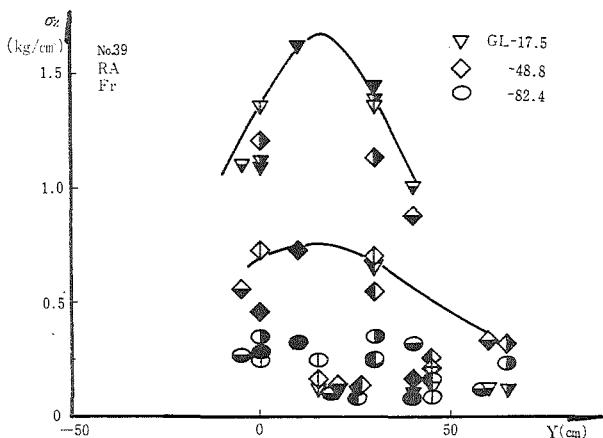


Fig. 3-2 Stress distribution of Y direction
in situ by a tamper. ($h=15\text{cm}$)

3自由度系とすれば $W_1 = 38 \text{ kg f}$, $W_2 = 10 \text{ kg f}$, $W_3 = 30 \text{ kg f}$, ストローク $2a = 2 \text{ cm}$ (中国土木KK, 福島工場調べ) であった。また実測の結果ランマーのばね常数 38.83 kg f/cm^2 , 跳躍高は約 5 cm , $f = 11 \text{ Hz}$ である。地盤係数 k_s (kg f/cm^2), 接地面積 A とすれば?

で C_r の k_s は 3.11kgf/cm^3 であるから⁸⁾ $K_2 = 32.9 \text{kgf/cm}$ が得られる。これらの値を(5)(6)式に入れて解くと、 $u_1 = 2.32 \times 10^{-6} \text{cm}$ 、 $u_2 = 0.71 \text{cm}$ が得られ、さらに(11)式に代入すると $R = 27.5 \text{kgf}$ となり、自重の 50% にも満たない値しか得られない。逆に実測の跳躍高 5 cm を u_1 と仮定すれば、 $K_1 = 92900 \text{kgf}$ 、 $R = 9.95 \times 10^7 \text{kgf}$ と非常に大きな値になる。そして、 $M_2 + M_3 = 1 \text{kg}$ としてはじめて $K_2 = 5000 \text{kgf/cm}$ となる。このように 3 自由度系モデルでは質量、ばね常数として実測値を用いると正しい反力は得られない。

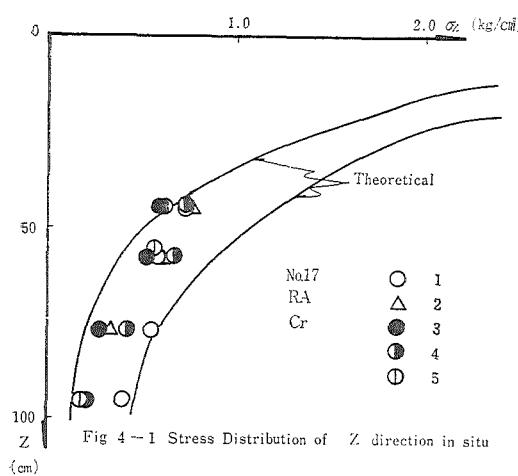


Fig. 4-1 Stress Distribution of Z direction in situ

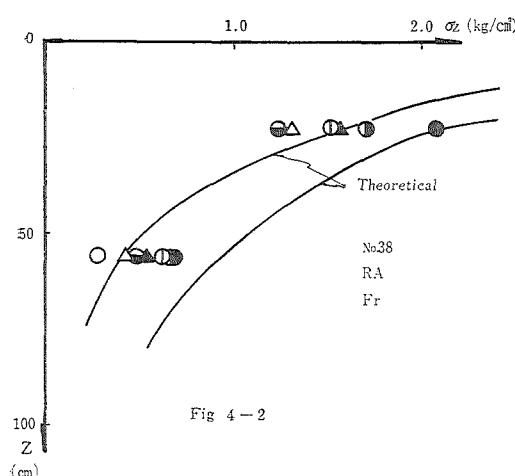


Fig. 4-2

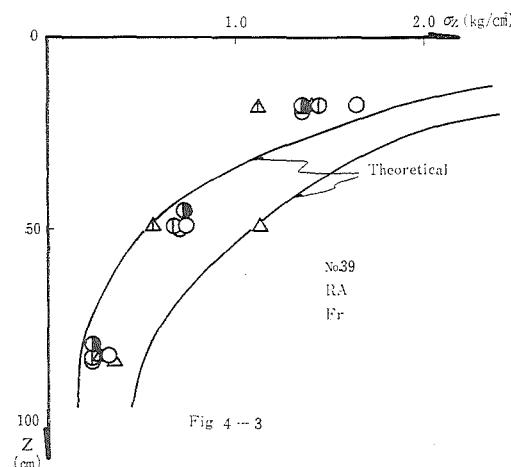


Fig. 4-3

2自由系モデルも同様の問題があった。

また1自由度系とすれば(2)式において

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \quad \dots \dots \dots (29)$$

として $K_2 = 2800 \text{ kg f/cm}$, $K_1 = 38.83 \text{ kg f/cm}$ とを代入して K を求めると, 38.29 kg f/cm となりまた $2u_1 = 5 \text{ cm}$ を代入すると, 反力は 95.74 kg f が得られるが自重よりやや重い程度にすぎない。

このように(1)～(3)の方法では実用的な疑似動荷重が得られない。そこで(4)の方法で求めてみる。 ℓ として、先の考察のように σ_z/q が 0.5 となる深さの 2 倍とすれば, $\ell = 40 \text{ cm}$ となり h は実測値から 5 cm である。

C_r の E_c は室内拘束圧縮試験から現地密度と同じ 1.20 g/cm^3 の時, 150 kg/cm^2 を得る。弾性変形量は塑性変形量の約 $1/10$ であるから¹⁷⁾ $E_{ce} = 1500 \text{ kg/cm}^2$ となり, これらの値を(28)式に代入すれば $\sigma = 3.84 \text{ kg f/cm}^2$ が得られる。

一方フィルターの含水比は約 5 %で現地乾燥密度 $\gamma_{d0} = 1.40 \text{ g/cm}^3$, 締固め後 $1.5 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ であった⁹⁾. これと同様の条件の砂の室内拘束実験結果から $E_c = 230 \sim 330 \text{ kg/cm}^2$ で, 平均 280 kg/cm^2 である. したがって $E_{ce} = 2800 \text{ kg f/cm}^2$ として(28)式に入れて計算すれば σ は 5.21 kg f/cm^2 が得られる。

これらの地表面衝撃応力が Boussinesq の解¹⁰⁾ に従うものとして式で地中応力を求めれば, Fig. 4 のようになり, 実測値は計算値の範囲内にありほぼ一致する. すなわち(4)の方法で求める発生応力は十分実用に供せられる. したがってこのような仮定は工学的に許されるとしてよい. さらに RA のような衝撃力の地中応力の分布も静的な弾性論解が準用できることがわかる. このように RA は自重は小さいが接地面では大きな荷重が発生し, 少なくともタイヤ

ローラの接地圧²⁾⁶⁾ ($q = 3.80 \text{ kg f/cm}^2$) ていどの力が生ずることがわかる。そして含水比が適度であり、締固めが進めば地盤の変形係数が大きくなり、さらに大きな力が発生することがわかる。このように力から考えればランマーの効果は大きいが、高速荷重¹⁸⁾¹⁹⁾であるので実際の締固め効果は力の大きさにかならずしも比例しないことに注意しなければならない³⁾⁹⁾。

V. おわりに

この報告では、ランマーによって生ずる地中応力を砂、粘性土について測定しその発生する機構を考察した。その結果次のようなことがわかった。

1) ランマー～地盤系のモデルとしては、3自由度系が2自由度系、1自由度系を考えられる。

2) ランマーによる力が地中内に有効に作用する角柱を仮想し、ひずみエネルギーから角柱内の応力を考察した。この角柱の長さは最大応力の2分の1の応力が生ずる深さの2倍とし面積はランマーの接地面をとった。

3) 実測応力は砂中においては、粘性土より大きい。疑似動荷重が静的弾性論解に従うとすれば、実測地中応力から q は $3.6 \sim 5.6 \text{ kg f/cm}^2$ となる。

4) 現地試験および室内試験から求めた K_1 , M_1 , M_2 , M_3 , a , E などを用いて(1), (2)式の方法により発生する応力を求めた。(1)の方法では実測値とかけ離れた値しか得られないが、(2)の方法では $3.8 \sim 5.2 \text{ kg f/cm}^2$ が得られ、実測値とよく適合する。

5) ランマーによって発生する力は地盤の影響が大きく、土性、含水比密度によって異なる。さらに発生する力はタイヤローラ以上に大きいが高速載荷があるので、締固め効果はその割合に少ない。

最後に御指導頂きました京都大学沢田敏男教授ならびに御協力頂きました中四国農政局勝英開拓事業所および中国土木KKの関係各位に謝意を表します。また本研究の一部に文部省科学研究費を得たことを謝す。

引用文献

- 1) 藤井弘章, 井上慎一: 土質工学会(土質会)誌, 19-9, 28~30 (1971)
- 2) 藤井弘章, 渡辺 忠: 農業土木学会論文集(農土論), 41, 49~55 (1972)
- 3) 藤井弘章, 渡辺 忠: 農土論, 41, 56~61 (1972)
- 4) 藤井弘章, 渡辺 忠, 岡田純治: 農土論, 41, 62~69
- 5) 藤井弘章: 農土論, 41, 70~77 (1972)
- 6) 藤井弘章, 渡辺 忠: 農土論, 42, 35~41 (1972)
- 7) 藤井弘章, 渡辺 忠: 農土論, 42, 42~46 (1972)
- 8) 藤井弘章: 農土論, 42, 47~53 (1972)
- 9) 藤井弘章: 未発表
- 10) Harr, M. E.: Foundations of Theoretical Soil Mechanics, 77~79 (1966), McGraw-Hill B. C., New York
- 11) Johnson, A. W., Salberg, J. R.: HRB, Bul. 272, 104~107 (1960)
- 12) 西村源太郎: 振動工学, 271~275 (1969), 誠文堂, 東京
- 13) 沢田敏男, 渡辺 忠, 藤井弘章: 7 土質研究発表会講演集(演集), 345~348 (1972)
- 14) 沢田敏男, 渡辺 忠, 藤井弘章: 27 土木学会講演集, 327~330 (1972)
- 15) 高橋由喜雄, 藤井弘章, 深瀬良藏: S 38 農土北海道支演集, 171~180 (1963)
- 16) Timosenko, S.: Strength of Materials, 鵜戸口英善訳, 材料力学, 上, 296~301 (1959), 商工出版社, 東京
- 17) 渡辺 忠, 藤井弘章, 花田裕男, 佐々木芳文: 6 土質会演集, 289~292 (1971)
- 18) 渡辺 忠, 藤井弘章, 岡田純治: S 47 農土会演集, 27~28 (1972)
- 19) 渡辺 忠, 藤井弘章, 岡野成喜, 花田裕男: 27 農土会中四支演集, 70~71 (1972)

農学部学術報告41号正誤表

ページ (p)	行 (l)	誤 (Errata)	正 (Correct)
4	下より10行	in park	in part
10	上より 3 行	シクロヘキシミド 処理タバコ葉	シクロヘキシミド処理に よりタバコ葉
32	下から12行	12) 上林昭二・	12) 上村昭二・
61	14	investigation	investigations
66	1	Potata	Potato
67	10	Tabie	Table
98	14	W ₁	W ₃ (=M ₃ g)
98	15	W ₂	W ₂ (=M ₂ g)
98	16	W ₃	W ₁ (=M ₁ g)
98	eq. (2)	Mü ₂	M ₂ ü ₂
98	eq. (2)	-K ₂ u ₁ -	-K ₂ u ₁ +
98	eq. (9)	$\frac{aK_1}{M_1} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \dots & \dots \end{vmatrix}$	$\frac{K_1}{M_1} \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ \dots & \dots \end{vmatrix}$
99	eq. (11)		Omit the terms after the 2nd one.
99	eq. (16)		Omit the 2nd term.
99	2	$A_2 = \frac{A - A_3}{A}$	$A_2 = A + A_3$
104	Ref. 4)	62~69	62~69(1972)
104	Ref. 13)	研会発表会	研究発表会