瀬戸内におけるある花崗岩体の載荷実験結果の解析

大 西 千 秋※

Analysis on the Results of Loading Test of some Kind of Setouchi Granite mass

by Chiaki Ōnishi,

要 旨

本論文は、瀬戸内花崗岩体に属する中国四国連絡送電線高鉄塔基礎地盤について、次の緒言に示された著者の行った各種調査のうちで、特にその地盤を構成する風化花崗岩いわゆる真砂体の外力に対する変形特性を見出すために、4か所において表面下深度2 mから最大深度13 mまでの間の数階のレベルにおける自由表面で載荷実験と最終深度における繰返し載荷実験とを行なって得られた結果と、その解析およびそれらに対する考察を述べたものである。

載荷実験をかくの如く数階のレベルで行なったのは、鉄塔基礎の許容支持力地盤が現われるレベルを見出すためである。また繰返し載荷実験は風圧の変化により鉄塔が傾動し、これが基礎地盤におよぼす繰返し荷重に対処するための基礎資料を提供する目的を持つものである。

1. 緒 言

中国四国連絡送電線（中四幹線）は愛媛県西条市に新設された電源開発伊予変電所を起点とし、今治市波止浜から馬島、中渡島、大島、大三島、大久野島を足がかりに瀬戸内海を横断して、広島県竹原市忠海で中国本土にわたり、さらに西進して広島県安芸町の中国電力広島変電所にいたる亘長125 kmの220kV超高压送電線である（図版1, 2, 4参照）。そのうち、島づたいの海峡部には径間2,357 mを最長とし、1,000 mをこえる長径間が数か所あり、その鉄塔も、高さ226 m、重量約770tonを最大とし、高さ100 mをこえるものが7基設けられている。イタリアのメッシナ海峡横断の

架空送電線路¹の鉄塔は、前記の鉄塔と同程度の規模で海峡部の径間は3,645mである。この径間は前記の2,357mより著しく長い、中国四国連絡送電線路の特徴は、前述の如く多数の海峡を横断していることである。

海峡横断の鉄塔規模は従来のものに比して著しく巨大なものであるのに対して本路線通過地点の地質は殆んど全部風化花崗岩であり、相当深いところまで風化がおよんで真砂化していると推定されたので、高鉄塔の基礎地盤にあたる部分の地質条件を明らかにすることが非常に重要であった。

そのために次の如き各種の方法による調査、実験を行なった。

- (1) 地表地質調査
- (2) 測量：三角測量のほか海上径間においてはTellurometer 使用
- (3) 電気探査：比抵抗法，探査深度60m，測点数118点，測線総延長17,348m
- (4) ボーリングおよび貫入試験：平均深度20m，全孔数52孔，総延長1,127.9m，標準貫入試験，電気式コーン貫入試験。
- (5) 土質および岩石試験：JIS規格による土質試験，黒雲母のX線回折実験，岩石試料の弾性波速度測定
- (6) 初載荷実験および繰返し載荷実験：初載荷実験9地点(深度別を含む)，繰返し載荷実験4地点
- (7) 弾性波速度：各鉄塔基礎掘削面
- (8) 真砂土現場締固め試験
- (9) 埋戻し真砂土のコーン貫入試験
- (10) 基礎上引耐力試験：掘削工法の差異（1：1，1：0，タコソボ，1：0.3）
- (11) 鉄塔振動実験：大久野島ルートNo.5号，No.6号塔体および基礎の振動

以上の調査、実験資料は電源開発資料として電源開発株式会社に保管されてある。

本論文で取り扱ったのは、大久野島ルートNo.2号（大三島），同No.3号（大久野島），同No.6号（忠海）および来島ルートNo.3号（馬島）の4か所の鉄塔の基礎地盤に対して行なった初載荷実験および繰返し載荷実験に関するもので、調査資料中でも最も重要な部分を占めるものである。

なお、本論文は同名の「京都大学審査学位論文」の概要を公表したものである。ただし測定結果の図示は紙面の関係で大久野島ルートNo.2号（大三島）のみにとどめ、その他の箇所はこれを割愛した。

2. 実験地盤の地質摘要

大久野島ルートNo.2号，No.3号，No.6号鉄塔の基礎地質を構成するものは、通称広島型に属する黒雲母花崗岩で、その組織は概して粗粒，かつ一般に風化，変質が著しい。風化状態は表層より深部に向って漸移しており，構成鉱物が完全に分離していわゆる真砂と化し，あるいは原岩の様相をとどめ

てはいるが、わずかな外力によっても崩壊し易い状態になっている。ことに大久野島ルートNo.2号鉄塔の基礎地質は極めて風化が進んでいるために地質調査や地耐力実験には最も念を入れたところである（図版2, 5, 6, 7, 参照）。

来島ルートNo.3号鉄塔の基盤は領家Ⅱ型といわれている細粒の黒雲母花崗岩ないし石英閃緑岩質黒雲母花崗岩で岩相不均質である。その風化度は前者に比してかなり低い。

3. 初載荷実験

(1)実験期間

自昭和36年5月7日—至昭和36年6月3日

(2)実験位置

大久野島ルートNo.2号鉄塔, c脚, EL (海拔高) =7.47, 4.47, 1.97m

大久野島ルートNo.3号鉄塔, a脚, EL=8.31, 5.01m

大久野島ルートNo.6号鉄塔, c脚, EL=12.22, 7.52m

来島ルートNo.3号鉄塔, b脚, EL=74.64, 74.14m

(3)実験方法

鉄塔基礎地盤に2.2 m×2.2 mの試掘を実施し、指定深度に実験基盤面を出し、表面はできるかぎり平滑に仕上げる、その上にプラストンまたはセメントペーストを打設して加圧板（載荷板）を置き、さらにその上にオイルジャッキ、円筒ブロックおよび球座等を設置して支柱により支圧板に支承させる。掘削土砂はカマスに入れてこれを載荷台に載せ、それを支圧面とする。

本実験は「JIS A1215」および「JES 建築3001」に準じて行なった。加圧板は半径15cm（面積約707cm²）、厚さ約2.5cmの鉄製円板を使用し、オイルジャッキに加えた圧力はオイルポンプに取り付けた荷重計（1目盛1ton）によって測定する。基盤の変位は加圧板の上に置かれた1/100mm目盛りのダイヤルゲージ2個で読み取り、その平均値をもって沈下量とした。

載荷速度および抜荷速度は場合に応じて0.5ton/min、1ton/minおよび2ton/minの三つを採用し、最終荷重を16ton（226ton/m²）とした。毎回の載荷後5分間は1分ごとに、以後10分ごとに沈下が停止するまで沈下量の測定を続け、その後次の載荷に移った。これを継続し、荷重—沈下曲線が降伏点に達すると推定されたとき、測定を中止し、次に載荷と全く逆の手順によって抜荷して各段の反発量を測定し、零荷重となってから、なお30分間測定を続けた後実験を中止する。

4. 繰返し載荷実験

(1)実験期間

自昭和36年5月21日—至昭和36年6月7日

(2)実験位置

大久野島ルートNo.2号鉄塔, c脚, EL (海拔高) =0.97m

大久野島ルートNo.3号鉄塔, a脚, EL=4.01m

大久野島ルートNo.6号鉄塔, c脚, EL=6.52m

来島ルートNo.3号鉄塔, b脚, EL=73.14 m

(3)実験方法

初載荷実験終了後, その最終レベルの表面をさらに1.0 m掘さくして得る基礎床付予定地盤について前記の初載荷実験と全く同様の方法を採用した。全荷重の繰返し範囲は0⇔5 tonおよび0⇔10tonで, 繰返し回数の最大値は場所により10および23を採用した。ただし, 大久野島ルートNo.2号鉄塔c脚は沈下量著しきため0⇔10tonは6回をもって実験を中止した。

5. 実験結果 (図版3参照)

(1) 初載荷実験結果

実験によって得られた各鉄塔基礎地盤のEL (海拔高) 別の荷重-沈下量関係を示す数値は表-1～表-4に示すとおりである。次に測定結果を表わす荷重-時間, 沈下-時間, ならびに荷重-沈下曲線は図版3に総括して示してある。この荷重-沈下曲線の非直線性を示すため両対数方眼紙上にプロットしたのが図-1である。

まず荷重-沈下曲線をみるに, 注目すべきは大久野島ルートNo.2号鉄塔, c脚では曲線の勾配がきわめて急であるが, この鉄塔脚以外の場合は曲線勾配はゆるやかになり最終荷重16tonに至っても明確な降伏点はみられないという特徴が見出されている。

次にこれらの両対数表現で表わした荷重-沈下曲線をみると, 荷重-沈下量の関係は一般に直線的でないことがわかる。大久野島ルートNo.2号鉄塔, c脚, EL=7.47m, EL=4.47mは3 ton, EL=1.97mは5 tonにおいて, それぞれ折点が現われている。大久野島ルートNo.3号鉄塔, a脚, EL=8.31mは9 tonに折点をみるが, EL=5.01mでは最大荷重16tonに至るも折点をみず直線である。大久野島ルートNo.6号鉄塔, c脚, EL=12.22 mは3 tonが折点であるが, EL=7.52mにおいては16tonに達しても直線である。来島ルートNo.3号鉄塔, b脚, EL=74.64 mは9 tonのところで折点が出ているが, EL=74.14 mでは16tonに至るまでほぼ直線である。

沈下量は来島ルートNo.2号鉄塔, c脚が最も大きく, EL=1.97mにおいて最終荷重16 tonで沈下量は1.923 cmである。次に大久野島ルートNo.3号鉄塔, a脚, 大久野島ルートNo.6号鉄塔, c脚の順に減少し, 来島ルートNo.3号鉄塔b脚はEL=74.14 mにおいて最終荷重16tonで沈下量は0.256 cmとなり最も小さい。一般に荷重の増加とともに沈下量は増加するが, 深度が増すにしたがって, すなわちELが減少するにしたがって減少する傾向がある。ただし比較的浅いところでは風化状態の不均一によって部分的に深度が増しても沈下量が増加するところもある。

以上の実験結果から得られた荷重-沈下量特性には鉄塔基礎地盤の場所および深度の変化の実態がよく把握されているが, 風化花崗岩体 (真砂体) 特有の漸移的風化構造をよく反映していると思われる。一般に広島型花崗岩は風化が著しく, 特に大久野島ルート No.2号鉄塔, c脚, 基礎地盤は注意す

べきところである。これに比べて領家Ⅱ型花崗岩の風化度はかなり低いことがよく現われている。

(2) 繰返し载荷実験結果

繰返し载荷実験最終サイクルにおける荷重と加荷重過程の沈下量 v_N を示す数値は表-11～表-14に示してある。ここに沈下量 v_N は、最終サイクルを第 N 回目とすれば N 回目の加荷重過程の全沈下量(初载荷前の地表のレベルから測ったもの) w_N から第 $N-1$ 回目のサイクルで見出された残留歪 $\tilde{w}_{N-1}$ を差引いたものである。

すなわち

$$v_N = w_N - \tilde{w}_{N-1}$$

表-11の結果を両対数表現で表わしたのが図-6である。また図-7には繰返し、载荷実験の初めの数サイクルと最終の2サイクルの模様が示されてある。

実験結果によれば、繰返し回数が増すにしたがって沈下の増加率は減少する傾向がある。

また、最終サイクルの加荷重過程における荷重—沈下量(v_N)関係は初载荷実験におけると同様に非直線的である。大久野島ルートNo.3号鉄塔、a脚、EL=4.01mでは $P=0 \sim 5$ ton、 $P=0 \sim 10$ tonともに3

tonにおいて折点が現われ、大久野島ルートNo.6号鉄塔、c脚、EL=6.52mでは $P=0 \sim 10$ tonにおいて4 tonが折点である。これらの折点より先きは曲線の w 軸に対する勾配は急となる。これは沈下の増加率が減少し硬化現象を呈することを意味する。そのほかの鉄塔脚地盤においては折点をみず1本の直線に沿う変形を示している。

沈下量は大久野島ルートNo.2号鉄塔、c脚が最も大きく、EL=0.97mにおいて $P=0 \sim 5$ ton、23回で沈下量0.575 cm、 $P=0 \sim 10$ ton、6回で沈下量0.937 cmとなり、沈下量が著しく大きくなるために実験を中止し、基礎底面を広げたところである。次に大久野島ルートNo.3号鉄塔、a脚、大久野島ルートNo.6号鉄塔、c脚では、この順に沈下量が減少している。来島ルートNo.3号鉄塔、b脚では、EL=73.14 m、 $P=0 \sim 5$ ton、10回で沈下量0.062 cm、 $P=0 \sim 10$ ton、10回では沈下量0.093 cmとなり最も小さい。前述の初载荷実験結果と同様の傾向が現われている。

図 6

6. 結果の解析と考察

以上の諸実験に明らかにみられるように、各鉄塔脚基礎地盤の表面加圧による変形は下記に述べる新しい方法によって解析を行ない、それに対して考察を試みた。

(1) 荷重—沈下量曲線の非直線性

まず、初荷重—沈下量特性から4カ所の地盤全体としての変形特性の解析と考察を記述しよう。4

か所の実験場所、すなわち大久野島ルートNo.2号鉄塔、c脚、同No.3号鉄塔、a脚、同No.6号鉄塔、c脚、および来島ルートNo.3号鉄塔、b脚の種々のEL（海拔高）、加圧面に対して行なわれた全荷重P、荷重強度qに対する加圧面の沈下量wの実測値はそれぞれ表-1、表-2、表-3および表-4に示した通りである。この結果からP-w関係を両対数によって表示したものは図-1、である。この図からうかがわれる重要な事実は全荷重P（または荷重強度q）が沈下量wのべき関数で表わされるということである。そこで筆者は全荷重または荷重強度を沈下量のべき関数で表わし得る式を導くことを試みた。

いま、 σ を応力、 ϵ を歪、Aを応力の次元をもつ定数、 μ を無次元の定数とすれば、多くの物質について、

$$\sigma = A \epsilon^{\mu} \quad (1)$$

という関係が見出されている²⁾

また、Boussinesq³⁾の式は、半無限完全弾性体の表面に完全剛体の半径 $r = a$ の円盤をおき、この円盤に全荷重Pを加えた場合の、加圧板下底面の沈下量wとpとの関係を示すものであって、

$$w = \frac{P (1 - \nu^2)}{2 a E_s} \quad (2)$$

である。ここに E_s 、 ν はそれぞれ半無限完全弾性体の静ヤング率およびポアソン比である。いま、 $\nu = 0.25$ と仮定し、荷重強度をqとすれば $q = P / \pi a^2$ であるから(2)式は、

$$q = E_s \left(\frac{w}{1.5 a} \right) \quad (3)$$

に変形できる。いま(1)式の応力 σ と歪 ϵ をそれぞれ(3)式のqと $w / 1.5 a$ に対応せしめ、そして定数AをBに定数 μ を μ' に書き改めると(1)式と同じ形の次の式が得られる。

$$q = B \left(\frac{w}{1.5 a} \right)^{\mu'} \quad (4)$$

これが求むる式である。ここにBはAと同様に応力の次元をもつ定数であり、 μ' は μ と同様な無次元の定数である。実験値の解析はこの(4)式によって行なった。ここで $\mu' \neq 1$ である場合は荷重-沈下量曲線は非直線である。 $\mu' = 1$ となる特別の場合は(4)式は被圧体が完全弾性体である場合の(3)式に一致し、Bは E_s に等しくなる。

さきの(1)式における定数 μ は歪硬化指数 (strain hardening exponent) と称せられているものであるが、新しく求められた(4)式における μ' は、 $w / 1.5 a$ を後述するように見掛歪と呼ぶことから、見掛歪硬化指数という名称をつけよう。(4)式における μ' は、次に示すように、q-w曲線の曲り方を支配するものである。すなわち、qのwに対する第1階微分係数を(4)式によって求めると

$$\frac{d q}{d w} = \frac{B}{(1.5 a)^{\mu'}} \cdot \mu' w^{\mu'-1} \quad (5.1)$$

となる。

$w=0$ では

$$\left. \begin{aligned} \mu' > 1 & \dots\dots\dots \frac{dq}{dw} = 0 \\ \mu' = 1 & \dots\dots\dots \frac{dq}{dw} = \frac{(B)_{\mu'=1}}{1.5 a} \\ \mu' < 1 & \dots\dots\dots \frac{dq}{dw} = \infty \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

後述の(9)式が示すとおり k , h を定数とすれば $\mu' = k (B + h)$ であるから $(B)_{\mu'=1} = \frac{1}{k} - h$ である。

第2階微分係数は

$$\frac{d^2 q}{dw^2} = \frac{B}{(1.5 a)^\mu} \cdot \mu' (\mu' - 1) w^{\mu'-2} \quad (6.1)$$

である。 $w > 0$ では

$$\left. \begin{aligned} \mu' > 1 & \dots\dots\dots \frac{d^2 q}{dw^2} > 0 \\ \mu' = 1 & \dots\dots\dots \frac{d^2 q}{dw^2} = 0 \\ \mu' < 1 & \dots\dots\dots \frac{d^2 q}{dw^2} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

となる。したがって $q-w$ 曲線を μ' をパラメーターとして図示すれば、ここに添付した第1図のようになる。この図からわかるとおり、沈下量の同一微小増加 dw を生ずるに必要な荷重強度の増加 dq は、 $\mu' < 1$ なる場合には w の増大とともに次第に大きくなる。これは w の増大とともに物質は次第に硬くなることを意味する。 $\mu' < 1$ なる場合にはこれと反対に次第に軟くなるような現象を示す。また $\mu' = 1$ の場合には w が増加しても硬さは変らない。

以上は μ' のもつ重要な意味である。

μ' , B の値は、両対数表現の荷重—沈下量関係を示す直線上の任意の2点における値を用いて、次に示す(7), (8)両式によって計算した。

$$\mu' = \frac{\log q_1 - \log q_2}{\log w_1 - \log w_2} \quad (7)$$

$$B = \frac{1}{2} \{ \log q_1 + \log q_2 - \mu' (\log w_1 + \log w_2 - 2 \log 1.5 a) \} \quad (8)$$

第 1 図

かくの如く計算された各鉄塔基礎地盤における E L (海拔高) 別の μ' , B の数値は表一 5 に示してある。両対数表現の荷重—沈下関係が一つの折点をもつ場合は, 2 直線を折点で分離して, それぞれの直線について μ' を求めた。第 5 表において μ' の値の変化を分類した結果をみると, μ' は最小値 0.55, 最大値 1.56 の範囲に変化しており, $\mu' < 0.9$ である場所は 4 か所, $\mu' \div 1$ ($0.96 \leq \mu' \leq 1.03$) となる場所は 4 か所, $\mu' > 1.1$ である場所は 7 か所であった。

なお, 表一 5 を注意してみると, 各鉄塔脚の基礎地盤の同一の E L に対し, 二つの異なる全荷重範囲についてそれぞれ異なる値の μ' と B が得られている。それをみると全荷重が増加すると μ' も B も増加している。すなわち μ' , B とは互いに独立ではないということがうかがわれる。そこで, この地域の瀬戸内花崗岩の風化体 (真砂体) 全体に対する μ' と B との関係を見出すために, 上記の数値を図示してみると, それは k, h を定数とすれば

$$\mu' = k (B + h) \quad (9)$$

という比例関係を示す直線に沿って配列することがわかった。

この図にさらに表一 5 の最後の 3 か所の基礎地盤の E L = 5.01, 7.52, 74.14m に対し $P = 1 \sim 16$ ton の範囲で得られた μ' , B の値を記入してみると, 上記の直線に乗るので, (9) 式の直線関係は, この地域に対してかなり一般性をもつものと思われる。k および h の値を概算してみると $k \div 0.136 \text{ cm}^2 / \text{kg}$, $h = -10.0 \text{ kg} / \text{cm}^2$ である。したがって,

$$\mu' = 0.136 (B - 10.0) \quad (10)$$

を得る。上式の係数決定に用いられた μ' および B の数値の範囲は, それぞれ 0.55 ~ 1.56, 14.75 ~ 21.34 kg / cm^2 である。(9) 式は今後 μ' の物理的意味を研究する上に重要な手がかりになるとと思われる。

(7), (8) 両式によって計算された 4 か所における種々の地表面からの深さに対する μ' および B の数値は表一 5 に示すとおりである。なお, 同表には P の範囲および両対数表示における 2 直線の折点が示されている。表中 (表一 5) の μ' —E L 関係および μ' —P 関係を図示したものは, 図一 2 である。

まず, μ' —E L 関係 (図一 2) をみて注目される一般的傾向は μ' は E L が減少するにしたがい, すなわち深度が増すにしたがって, 一般に増大していることである。換言すれば, この地域の花崗岩の風化体は深部ほど, もし, そのレベルを自由表面にして加圧するとすれば, その表面に一定の沈下量を与えるための荷重は大であるということ, つまり深部ほど物質が硬いということである。

次に, 一定の E L 値に対する μ' —P の関係をみると次の事実が認められる。

第 2 図 総ての E L に対する初載荷実験における μ' と B との関係

大久野島ルートNo.3号鉄塔, c脚(図-3)においては, $E L=7.47\text{m}$ および 4.47m では, $P=3\text{ ton}$ を境とし, $E L=1.97\text{m}$ では $P=5\text{ ton}$ を境として, 全荷重の増加により μ' は急速に減少することを示している。

大久野島ルートNo.3号鉄塔, a脚においては, $E L=8.31\text{m}$ では, $P=8.8\text{ton}$ を境として, 全荷重の増加により, 同様に, μ' は急速に減少する。ところが, $E L=5.01\text{m}$ では, 全荷重 $1\sim 16\text{ ton}$ の範囲で μ' は一定値を保っている。すなわち $E L$ が 8.31m から 5.01m に減少すると, P の増加によって μ' が急速に減少する現象が現われていることは注目すべきである。

大久野島ルートNo.6号鉄塔, c脚においては, 前記No.3号鉄塔, a脚と同様な現象が見出されている。すなわち, $E L=12.22\text{m}$ では $P=3\text{ ton}$ を境として全荷重が増加すると μ' は急速に減少しているが, $E L=7.52\text{m}$ では全荷重 $1\sim 16\text{ ton}$ の範囲で μ' は一定値を保っている。

来島ルートNo.3号鉄塔, b脚においても, 再び同様の事実が見出されている。すなわち, $E L=74.64\text{m}$ では $P=8.5\text{ton}$ を境として, 全荷重の増加により μ' は急速に減少し, このレベルよりわずかに 0.5m 下方の $E L=74.14\text{m}$ では全荷重 $1\sim 16\text{ton}$ の範囲において μ' は一定値を保持している。

上記4か所のうち最後の3か所における共通な現象は,

- (I) その場所特定の海拔高すなわち特定の深度では, P が3ないし9 tonの比較的低い値を境として μ' が P の増加により不連続的に減少を示すが,
- (II) この特定の深度よりも数10cmないし数m深い深度になると $P=1\sim 16\text{ton}$ の広範囲において, μ' は一定値を保っているということである。この(II)の事実はこの場所の風化花崗岩体の先天的特性であるか, または低深度において行なわれた載荷実験のある効果が深部におよび現われた後天的の性質であるか速断を許さないもので, これは将来研究を要する現象であると思う。

大久野島ルートNo.2号鉄塔, c脚(図-7)で得られた結果は, 上記3か所と異なり, P の増加に対して μ' が定値を示す $E L$ が見出されていないが, これは上記3か所と比較して地質的な特例であるように思われる。

以上に述べた μ' - P 関係を示す事実のうちで特に興味あるものは, 荷重が増加中ある値を通過すると μ' は急に小さくなることである。これはこの特定荷重を受けることによって真砂の粒子間の結合が変化して μ' の小さな物質に転移することを示すものと解釈し得る。

以上4か所の実験場所において各深度の露頭を観察した結果によれば, 定性的ではあるが表面からの深さが大いほど, すなわち $E L$ の小さいほど風化の程度が低いことがうかがわれる。この観察と, 前記の μ' - $E L$ 関係(図-2)に現われた事実, すなわち $E L$ の減少(表面からの深度の増加)とともに μ' が増大するという事実とから考えると, $1/\mu'$ を風化の程度を計る尺度となし得るという可能性が認められる。これは将来の研究問題である。すなわち, ある方法で風化度を定量化し, これと $1/\mu'$ との関係を研究するというテーマが考えられる。

また, μ' - P 関係(図-3)に現われた事実からみると, 風化程度の尺度となり得るところの $1/\mu'$

は一定範囲の荷重に対して規定されなければならないものと考えられる。

(2) 接線見掛ヤング率と割線見掛ヤング率

載荷実験によって得られた基礎地盤の変形特性を理解するために、次の方法を採用する。いま、比 $w/1.5a$ は無次元の量であるので、これを見掛歪 ϵ' と称し

$$\epsilon' = \frac{w}{1.5a} \quad (11)$$

とおく、そして $q-\epsilon'$ 曲線を作りこの曲線上の 1 点における q/ϵ' を E' 割線で表わし、これを割線見掛ヤング率と呼ぶ。一方同じ点における接点の傾斜 $dq/d\epsilon'$ を E' 接線で表わし、これを接線見掛ヤング率と称するならば、(4)式から

$$E'_{\text{割線}} = \frac{q}{\epsilon'} = \frac{q}{\frac{w}{1.5a}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (12)$$

$$E'_{\text{接線}} = \frac{dq}{d\epsilon'} = \mu' \frac{q}{\frac{w}{1.5a}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (13)$$

E'接線と E'割線の比は(12), (13)式より

$$E'_{\text{接線}} / E'_{\text{割線}} = \mu' \quad (14)$$

である。したがって、これら 2 種類の見掛ヤング率は $\mu' = 1$ である岩盤に対しては、Boussinesq の式 (2) から導かれたところの (3) 式で求められる真の静ヤング率 E_0 と一致し、 $E'_{\text{割線}} = E'_{\text{接線}} = E_0$ となる。

非直線性を示す荷重-沈下曲線が見つけれられると、曲線の各部分において割線見掛ヤング率と接線見掛ヤング率をそれぞれ(12)式と(13)式によって求めることができる。このようにして 2 種類の見掛上のヤング率を求め、それらの値が場所ごとの深度による変化および荷重強度の大きさによる変化を考察すれば次のとおりである。

各鉄塔地盤において、EL (海拔高) 別に $P=5, 6, 10\text{ton}$ に対する E'接線・E'割線の値は表-6 に示すとおりである。これを図示したのが図-4 である。

まず、E'接線・E'割線と EL との関係を見ると、荷重 5 ton および 10 ton に対しては、EL が減少するほど、すなわち深度が増加するほど E'接線も E'割線もともに大きくなるという一般的傾向を示している。ただし、大久野島ルート No.3 号鉄塔 a 脚の場合は特別である。すなわち前記の 3 か所に比較すると、きわめて不規則な結果を示すが、 $P=10\text{ton}$ に対する E'接線だけは前 3 者の場合と同様に EL の減少に対し増加を示している。

上記の 4 地盤の各 EL (海拔高) に対して $P=1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16\text{ton}$ と荷重を変化した場合に対応する E'接線・E'割線の計算値は表-7～表-10 に総括して示してある。これを図示したものは図-5-1, 図-5-2 である。このうち、大久野島ルート No.2 号鉄塔, c 脚は特に沈下量大なるため、 $EL=7.47\text{m}$ においては $P=5\text{ton}$, $EL=4.47\text{m}$ においては $P=10\text{ton}$ を最終全荷重とした。図によって各 EL 別に全荷重と E'接線・E'割線との関係を調べてみると、E'接線・E'割線の変化の様様は大

別して一応3種類に分類できる。すなわち、(I)荷重が大きくなるほど小さくなる場合、(II)低荷重の間は変化がないが、荷重が大きくなるにしたがって小さくなり凸凹状態を続ける場合、(III)荷重が大きくなると逆に大きくなり凸凹状態を続ける場合のようである。

さきに(14)式で明かにしたようにE'接線/E'割線 $=\mu'$ であるから、これを示すために表-5に記載されてある μ' の値を図-5-1, 図-5-2, に記入しておいた。定数 μ' は前述したとおり、荷重強度(q)-沈下量(w)の測定値の両対数表示上の分布が一つの直線で近似されているとみて(7)式によって見出されたものである。したがって、このようにして求められた μ' の値はある定まった場所の風化花崗岩体を巨視的に均質とみた場合の特性定数とみることができる。

μ' の正確な求め方はq, wのすべての測定値を最小自乗法で処理する方法であるが、この方法で求められたものと、かくの如く(7)式で求められたものとの間には著しき相違のないことは確かである。ところがE'接線・E'割線の計算値はq-w曲線の曲り方に支配されている、したがって、上述の如く(I), (II)および(III)の3種類に分類されるような荷重に対する不規則性が見出されたのは当然である。

もともと、q, wの測定値には測定誤差が含まれていることは否定できないが、上記の不規則性が全部測定誤差によるとは考えられない。したがって定性的には次のことが結論されると思う。すなわち、上述の如き荷重に対するE'接線・E'割線の変化の様子は、瀬戸内花崗岩の風化体、すなわち真砂体の構成鉱物の風化状態および各鉱物粒子の結合状態、両者の不規則分布に起因するものと想像される。また、前述の如く真砂体を巨視的に取扱って、その特性定数 μ' を見出すことができたのであるが、真砂体を微視的にみれば著しい不規則性のあることがうかがわれる。

(3) 繰返し載荷実験結果に現われた特性

繰返し載荷実験のPの範囲は0≦5tonおよび0≦10tonで、繰返し回数nの最大値Nは場所により6, 10および23の3種類である。実験で見出されたNと最終最大荷重に対する最終全沈下量 W_N との間の一般的関係を示す曲線は第3^{*}図に示すとおり、Nが増すにしたがって W_N の増加率は次第に減少する傾向を示す。ここに最終全沈下量 W_N は、初荷重を加える前の真砂体の表面のレベルから測った沈下量である。

この場合最終全沈下量 W_N とNとの間には

$$W_N = \frac{N}{a+bN} \quad (15)$$

なる実験式⁴⁾がよく成立つものとして広く採用されておるので、ここでもこの式を採用した。

ここにa, bは定数である、第2^{*}表中の定数a, bの値はここに添付してある第1^{*}表に示したN=1, 10 (および23) に対する実測値 W_1 , W_{10} (および W_{23}) を用いて(15)式から見出されたものである。

次に、初載荷実験の場合と同様な方法を用いて、繰返し載荷実験の最終サイクルの加荷重過程における荷重強度qと v_N から μ' , Bを計算した(v_N の意味: V-(2)繰返し載荷実験結果, 第a図参照)。これらを μ'_N , B_N と名づけよう。資料qと v_N の値は表-11~表-14に示すとおりである。

第 1 表 W_N の測定値

ル ー ト	番 号	位 置		P=0±5 ton				P=0±10 ton			
		脚	EL	N	W_N	N	W_N	N	W_N	N	W_N
大久野島	㍿2	c	0.97 ^m	1	0.62 cm	—	—	—	—	—	—
				23	1.16	—	—	—	—	—	—
"	㍿3	a	4.01	1	0.43	1	0.67 cm	—	—	—	—
				10	0.53	10	0.78	—	—	—	—
"	㍿6	c	6.52	1	0.25	1	0.44	—	—	—	—
				10	0.29	10	0.54	—	—	—	—
来 島	㍿3	b	73.14	1	0.13	1	0.20	—	—	—	—
				10	0.165	10	0.22	—	—	—	—

第 3 図 W_N — N 関係 (モデル)

第 2 表 繰返载荷実験の最終サイクル

$$W_N = \frac{N}{a + bN}$$

N : 繰返し回数の最大値

a, b : 定数

W_N : N 回繰返し载荷の最終最大荷重に
対する沈全下量

$$\frac{1}{b} = W_{\infty}$$

場 所	EL	繰 返 載 荷 実 験 P=0±5 ton								繰 返 載 荷 実 験 P=0±10 ton							
	(m)	a(1/cm)	b(1/cm)	1/b=W _∞ (cm)	W _N	N	μ _N	B(kg/cm ²)	a(1/cm)	b(1/cm)	1/b=W _∞ (cm)	W _N	N	μ _N	B(kg/cm ²)		
大久野島ルート㍿2号鉄塔c脚	0.97	0.79	0.825	1.210	1.16	23	2.616	29.408	—	—	—	—	6	2.413	27.443		
〃 ㍿3号鉄塔a脚	4.01	0.488	1.84	0.544	0.530	10	1.898	23.807	0.235	1.26	0.794	0.78	10	2.017	24.672		
〃 ㍿6号鉄塔c脚	6.52	0.58	3.42	0.292	0.290	10	1.467	20.835	0.468	1.80	0.556	0.54	10	1.601	21.709		
来 島ルート㍿3号鉄塔b脚	73.14	1.81	5.88	0.170	0.165	10	1.624	22.915	0.50	4.50	0.223	0.22	10	1.709	22.915		

第 3 表 初载荷実験

場 所	EL	初 載 荷 実 験						
	(m)	μ'	B (kg/cm ²)	P の範囲	μ'	B (kg/cm ²)	P の範囲	
大久野島ルート㍿2号鉄塔c脚	1.97	1.50	20.64	1→5 ton	0.99	17.55	5→16 ton	
" ㍿3号鉄塔a脚	5.01	—	—	—	1.20	18.84	1→16 ton	
" ㍿6号鉄塔c脚	7.52	—	—	—	1.56	21.34	1→16 ton	
来島ルート㍿3号鉄塔 b脚	74.14	—	—	—	1.49	21.08	1→16 ton	

上記の $a, b, 1/b (=W_{\infty}), \mu'N, BN$ 等の値は一括してここに添付してある第 2 表^{*}に示すとおりである。なお第 3 表^{*}には参考のために、繰返し载荷実験の EL よりもわずかに 1 m 上方のレベルですで行なわれた初载荷実験の μ' と B の値を示しておいた。

まず、2 表の $1/b = W_{\infty}$ と EL との関係を図示したここに添付の第 4 図をみると、 $P = 0 \rightleftharpoons 5$ ton の場合と $P = 0 \rightleftharpoons 10$ ton の場合とは、よく似ていることが注目される。

すなわち、 W_{∞} と EL との関係は、 C_1, C_2 を定数とすれば

$$(W_{\infty} - C_1) \cdot EL = C_2 \quad (16)$$

なる直角双曲線で近似できるようにみえる。ここに定数 C_1, C_2 は繰返し载荷の最終最大荷重の大きさに関係すると想像される。ここに述べられた事柄は数少ない資料から得られたものであるが、きわめて重要なことであると思われるので、将来さらに研究を積むことが希望される。

次に、第 2 表の第 6 欄の最終サイクルの測定値 W_N と第 5 欄の計算値 W_{∞} から、 $(W_{\infty} - W_N) / W_{\infty}$ の比を求めると $EL = 0.97, 4.01, 6.52, 73.14$ m の順にそれぞれ 4.1%, 2.6%, 6.8%, 2.9% である。すなわち、それぞれ $N = 23, 10, 10, 10$ で W_N はわずか 3% ないし 7% の差で W_{∞} に接近していることがわかる。

次に、第 2 表中の μ'_N と B_N の値を図示したものは第 5 図である。この図に表現されている直線関係は略算によると、すなわち

$$\mu'_N = -1.40 + 0.138 B_N \quad (17.1)$$

$$\mu'_N = 0.138 (B_N - 10.1) \quad (17.2)$$

である。(17.2) 式をさきに見出されている初载荷実験で得られた(10)式 $\mu' = 0.136 (B - 10.0)$ と比較すると、両式の係数の値は驚くべき一致を示している。ただし、ここに注意を要することは、(17.2) 式を与えた繰返し载荷実験の EL は、第 2 表と第 3 表とをみるとわかるとおり(10)式を与えた初载荷実験の EL より 1 m 小さいことである。詳しくいえば、最終レベルでの初载荷実験を終えた後、表面を 1 m 掘下げて得た新しい表面に対して繰返し载荷実験を行なったのである。しかし上記の両式の係数の値の一致は、 EL の 1 m の相違を無視せしめるほどの驚くべき一致である。

さて、上記の両式を得た資料の変化する範囲をみると、 (μ'_N, B_N) の範囲は、 $(1.467, 20.835) \sim (2.616, 29.408)$ [表-15]、 (μ', B) の範囲は $(0.55, 14.75) \sim (1.56, 21.34)$ [表-5]

第 4 図 繰返し载荷実験 $b = EL$ 関係

第 5 図 繰返し载荷実験最終サイクルの加荷重過程における、 μ'_N と B_N との関係

である、上記の範囲と両式を図示したものは第6*図である。この図をみると2本の直線の違いはきわめてわずかである。したがって、初載荷実験の場合の μ' 、Bの資料と繰返し載荷実験最終サイクルの場合の μ'_N 、 B_N の資料を一括して最小自乗法により新しく μ' とBとの間の直線関係を決定することができる。第6*図の太線cdおよびefは、それぞれ μ' 、B資料および μ'_N 、 B_N 資料の分布範囲を示す直線である。

したがって、瀬戸内花崗岩の真砂体のある任意のELにおいて、初載荷実験と繰返し載荷実験を行った場合は、後者の最終サイクルにおいて見出される μ'_N 、 B_N の値は、前者の μ' —Bの関係を示す直線を μ' の増加する方向に延長した線上に現われるということが、第6*図によって明かにされている。この事実は4か所にわたる真砂体全体の特性の一つであるといえよう。

次に、第2*表と第3*表に示された μ'_N と μ' の値の比較を試みてみよう。 μ'_N の値は $P=0 \rightarrow 5 \text{ ton}$ と $P=0 \rightarrow 10 \text{ ton}$ の2とおりに対してそれぞれ見出されており、これに対し μ' の値は $P=1 \rightarrow 5 \text{ ton}$ と $P=1$ （または5） $\rightarrow 16 \text{ ton}$ の2とおりに対して見出されているが、4か所の全基礎地盤のすべてに対して μ' が見出されているのは $P=1$ （または5） $\rightarrow 16 \text{ ton}$ の場合だけである。そこでこの4か所の μ' の値と $P=0 \rightarrow 10 \text{ ton}$ の場合の4か所の μ'_N 値を比較してみると第7*図のようになる。この図の4か所の点の配列は直線で近似できるので、最小自乗法によって計算した結果は

$$\mu'_N = 3.725 - 1.367\mu'$$

± 0.139 (M. E.) ± 0.104 (M. E.) (18)
である。こゝにM. E. は平均自乗誤差 (mean error) を示す。(18)式から次に述べるような興味あることが見出される。いま、こゝに

$$\frac{\mu'_N}{\mu'} = \gamma \quad (19)$$

なる γ を導入すると(18)式から

$$\gamma = \frac{3.725}{\mu'} - 1.367 \quad (20)$$

を得る。(20)式から

$$\mu' \leq 1.574 \text{ に対して } \gamma = \frac{\mu'_N}{\mu'} \geq 1$$

すなわち、 $\mu'_N \geq \mu'$ (21) が得られる。

第6図 初載荷過程における μ' —B関係と繰返し載荷最終サイクルの加荷重過程における、 μ'_N — B_N との比較

第7図

μ'_N との関係
 μ'_N ; $P(0 \rightarrow 10 \text{ ton})$ に対して見出された
 μ' ; $P(1 \rightarrow 16 \text{ ton})$

(2)式の示すように初載荷における見掛歪硬化指数の特定値 $\mu' = 1.574$ に対して $\gamma = 1$ となり $\mu'_N = \mu' = 1.574$ となる。このような μ' の特定値を μ'_c で示し、これを臨界見掛歪硬化指数 (critical apparent strain hardening exponent) と名命しよう。 μ'_c を $\mu'_N = \alpha + \beta\mu'$ なる直線式における α 、 β で表現するならば $\mu'_c = \alpha / (1 - \beta)$ である。 $\mu'_c = 1.574$ なる臨界見掛歪硬化指数の値は、瀬戸内花崗岩の真砂体の特性定数の一つとみることができると思う。

(2)式の相対応する二つの不等式から次のことがいえる。すなわち、瀬戸内花崗岩の真砂体のあるレベルの自由表面で行なわれた初載荷実験で見出された μ' の値が臨界値 $\mu'_c = 1.574$ よりも小さい場合には繰返し載荷実験の最終サイクルで見出される μ'_N の値はこの μ' よりも大である。これはすでに実測より確認されており、第2*表の $P = 0 \rightarrow 10$ ton に対する μ'_N と、第3*表の $P = 1$ および $5 \rightarrow 16$ ton に対する μ' の比較が示すとおりである。4か所の鉄塔基礎地盤について見出された μ' の最大値は第3*表の下段に示されたとおり大久野ルートNo.6号鉄塔、c脚の基礎地盤にして見出された1.56であって、これは $\mu'_c = 1.574$ よりわずかに1%小さい値である。

もし、 μ' の値が μ'_c より大である場合は μ'_N の値は μ' よりも小さくなり、またもし、 $\mu' = \mu'_c$ なる場合は $\mu'_N = \mu'_c$ なることが予想される。しかしこれは実際には見出されてはいない。

μ'_N と μ' の関係について得られた上記の結論は重要と思われるので、瀬戸内地域の他の場所および瀬戸内以外の地域の花崗岩の風化体に対して、同様の検討が行なわれることが希望される。

7. 結 語

中四幹線海峡部横断高鉄塔、大久野島ルートNo.2号鉄塔、c脚(大三島)、同No.3号鉄塔、a脚(大久野島)、同No.6号鉄塔、c脚(忠海)および来島ルートNo.3号鉄塔、b脚(馬島)の基礎地盤を構成する瀬戸内花崗岩の風化体である真砂体の外力に対する変形特性を調らべるために、場所および深度別に現地載荷実験ならびに鉄塔基礎床付予定地盤において繰返し載荷実験を実施した。

その結果に対して解析を行なって得られた結論を要約すると次のとおりである。

- 1) 荷重強度 q —沈下量 w 関係の比例法則と応力—歪関係の指数法則とを組み合わせで次式を導いた。

$$q = B \left(\frac{w}{1.5a} \right)^{\mu'} \mu'$$

この式は上記の4か所の鉄塔基礎地盤の真砂体の表面で見出された q — w 関係の非直線性をよく説明する経験式である。上式で B は応力と同次元の定数、 μ' は無次元の定数 a は加圧板の半径である。定数 μ' を見掛歪硬化指数と名づけた。指数 μ' は次の如き意味をもつものである。すなわち、 $\mu' > 1$ である場合は、荷重が増加するにしたがって物質は次第に硬くなり、 $\mu' < 1$ の場合には反対に軟くなるような現象を示す。 $\mu' = 1$ の場合には硬さの変化は現われない。

- 2) μ' と B との間には $\mu' = k (B + h)$ なる関係があり、 $k = 0.136 \text{ kg/cm}^2$ 、 $h = -10.0 \text{ kg/cm}^2$ である。これは今後 μ' の物理的意味を研究するのに重要な手がかりになるとと思われる。

- 3) 4か所の鉄塔基礎地盤に対して見出された μ' -E L (真砂面海拔高) 関係および μ' -P (全荷重) 関係を見ると, $1/\mu'$ を風化の程度を計る尺度とみることができる, (ただし, μ' は一定範囲の荷重に対して規定されなければならないものである)。これは将来何かある方法によって風化度を定量化し, これと μ' との関係を研究するという新しいテーマを提供する。これはまた μ' の物理的意味を明かにする道を開くものと思われる。
- 4) 荷重-沈下量曲線の各部において計算された接線見掛ヤング率と割線見掛ヤング率がE LおよびPに対して 変化する模様をみるときわめて不規則であると考えられる。このことは真砂体を巨視的にみて定数 μ' が決定されたことと対照的である。
- 5) 全荷重 $P=0 \sim 5$ tonおよび $P=0 \sim 10$ tonの範囲で行なわれた繰返し載荷実験の最終サイクルの回数 N (10~23) と, それに対する最終全沈下量 W_N との関係を示す $W_N = N / (a + N b)$ なる実験式の定数 a, b ($=1/W_\infty$) の値を4か所の鉄塔基礎地盤面で見出した。そして $1/b = W_\infty$ とE Lとの関係は直角双曲線で近似できることもわかった。このことは数少ない資料から得られたものであるが, きわめて重要な事柄と思われるので, 将来さらに研究を積むことが希望される。
- 6) 初載荷実験における μ' -B関係と繰返し載荷実験の最終サイクルにおける $\mu'_N - B_N$ との関係を比較すると, 後者は前者の μ' の増加する方向への延長線の上に現われる。このことは当地方の真砂体のもう一つの特性であるといえよう。
- 7) μ' と μ'_N との関係を含まれると, $\mu'_c = 1.574$ なる臨界見掛歪硬化指数が見出された。 μ'_c の意味は $\mu' \leq \mu'_c$ に対して $\mu'_N \geq \mu'$ が成立することである。このように見掛歪硬化指数に1.547なる臨界値が存在するということは, 当地域の瀬戸内花崗岩の真砂体の興味ある特徴である。したがって, 瀬戸内地域の他の場所の真砂体および瀬戸内以外の地域の真砂体に対して同様の検討が行なわれることが希望される。
- 8) 以上の結論は広島県竹原市-愛媛県今治市間の1本のルートに沿う真砂体について得られたものである。したがって, 瀬戸内地域の他の場所および瀬戸内以外の地域の真砂体に対して同様の検討のなされることが希望される。

謝 辞

本論文の作成にあたり, 京都大学熊谷直一名誉教授, 同初田甚一郎教授の御懇篤な御指導, 同村山朔郎教授の現地御指導をいただいた, さらに本調査の機会を与えられ, 本論文完成に至るまで終始御懇切な御教示をいただいた電源開発株式会社広田孝一技術顧問の方々に対して心から厚く感謝の辞を捧げる。なおまた, 調査・研究にさいしては広島大学梅垣嘉治教授, 東京大学南雲照三郎助教授には有益な御助言を与えられた, ここに深く感謝の意を表する。

電源開発株式会社中四幹線建設所林潔所長, 同島田潔課長代理ほか関係各位から現場実験開始以来数年にわたりなみなみなならぬ御協力を得た, 併せて厚く感謝の辞を呈する。

参 考 文 献

- 1) Società Generale Elettrica della Sicilia
L'ATTRAVERSAMENTO Elettrico Dello Stretto di Messina
Libreria DEDALO editrice , Roma , via Barberini 75
- 2) ソコロフスキー, ブェー, ブェー, 塑性理論 第2版 (大橋義夫訳, 朝倉書店1950)
Sokolovsky , V , V . , Some discontinuous solution in soil mechanics
Neuvième congrès internationale de mécanique appliquée
(Brussel , T . 8, 1957)
Holloman , J . H . , Metals Technology , 12, No.4 (1945)
南雲昭三郎, 岩石の変形に関する力学理論について
第3回岩盤力学に関するシンポジウム, P . 67~68 (土木学会岩盤力学委員会1965)
- 3) Boossinesq , J. , “ Application des potentiels …………… ”, (Paris , 1885)
Timoshenko and Goodier, Theory of Elasticity , 2nd Ed , P . 372 (1951)
Sneddon , Ian , N. , Indentation by a flat — ended cylinder , P . 458
International series in pure and applied mathematics
— Fourier Transform — (McGraw Hill Co . , 1951)
- 4) 佐々木次郎, 締固め工法の研究, 農業技術研究所報告 F , No. 1
- 5) 大西千秋, 中四連絡送電線鉄塔基礎上引耐力試験の概要, 応用地質 , Vol. 2 , No. 1 P . 1~10,
1961年5月

表一 1 初載荷実験における荷重に
対する沈下量wの測定値

鉄塔番号 大久野島ルート 6
2号(大三島)
脚 c脚
加圧板半径 a = 15cm
(載荷板)

荷 重		EL = 7.47(m)	EL = 4.47(m)	EL = 1.97(m)
全荷重P	荷重強度q	沈下量 w	沈下量 w	沈下量 w
t	kg/cm ²	cm	cm	cm
1	1.414	0.351	0.203	0.237
2	2.829	0.620	0.330	0.335
3	4.243	0.944	0.464	0.427
4	5.658	1.347	0.640	0.529
5	7.072	1.801	0.829	0.616
6	8.487		1.029	0.735
7	9.901		1.224	0.834
8	11.315		1.452	0.963
9	12.730		1.678	1.093
10	14.144		1.875	1.193
11	15.559			1.283
12	16.973			1.428
13	18.388			1.557
14	19.802			1.683
15	21.216			1.803
16	22.631			1.923

表一 2 初載荷実験における荷重に
対する沈下量wの測定値

鉄塔番号 大久野島ルート 6 3号(大
久野島)
脚 a脚
加圧板半径 a = 15cm

荷 重		EL = 8.31(m)	EL = 5.01(m)
全荷重P	荷重強度q	沈下量 w	沈下量 w
t	kg/cm ²	cm	cm
1	1.414		0.100
2	2.829	0.187	0.188
3	4.243		0.259
4	5.658	0.303	0.331
5	7.072		0.394
6	8.487	0.411	0.453
7	9.901		0.511
8	11.315	0.524	0.563
9	12.730		0.626
10	14.144	0.657	0.679
11	15.559		0.751
12	16.973	0.821	0.809
13	18.388		0.869
14	19.802	1.015	0.924
15	21.216		0.991
16	22.631	1.220	1.041

表一 3 初載荷実験における荷重
に対する沈下量w測定値

鉄塔番号 大久野島ルート 6 6号
(忠海)
脚 c脚
加圧板半径 a = 15cm

荷 重		EL = 12.22(m)	EL = 7.52(m)
全荷重P	荷重強度q	沈下量 w	沈下量 w
t	kg/cm ²	cm	cm
0.5	0.707	0.104	
1	1.414	0.157	0.078
2	2.829	0.269	0.127
3	4.243	0.374	0.175
4	5.658	0.486	0.216
5	7.072	0.599	0.255
6	8.487	0.732	0.292
7	9.901	0.864	0.327
8	11.315	0.986	0.365
9	12.730	1.127	0.401
10	14.144	1.257	0.439
11	15.559	1.372	0.486
12	16.973	1.505	0.522
13	18.388		0.560
14	19.802	1.741	0.604
15	21.216		0.636
16	22.631	1.901	0.675

表一 4 初載荷実験における荷重
に対する沈下wの測定値

鉄塔番号 来島ルート 6 3号(馬島)
脚 b脚
加圧板半径 a = 15cm

荷 重		EL = 74.64(m)	EL = 74.14(m)
全荷重p	荷重強度q	沈下量 w	沈下量 w
t	kg/cm ²	cm	cm
1	1.414	0.184	0.036
2	2.829	0.302	0.060
3	4.243	0.437	0.089
4	5.658	0.582	0.113
5	7.072	0.725	0.132
6	8.487	0.864	0.148
7	9.901	1.002	0.155
8	11.315	1.165	0.168
9	12.730	1.350	0.183
10	14.144	1.604	0.196
11	15.559	1.851	0.207
12	16.973	2.289	0.226
13	18.388		0.235
14	19.802		0.247
15	21.216		0.256
16	22.631		0.256

表-5 μ' および B の値

鉄塔番号	脚	EL(m)	Pの範囲(t)	折点(t)	μ'			B (kg/cm ²)
					$\mu' < 0.9$	$\mu' \approx 1$	$\mu' > 1.1$	
大久野島ルート Ⅱ 2号	c	7.47	$3 \geq P \geq 1$	3		0.96		15.68
	"	"	$5 \geq P \geq 3$		0.76			14.75
	"	4.47	$3 \geq P \geq 1$	3			1.19	18.66
	"	"	$10 \geq P \geq 3$		0.85			16.10
	"	1.97	$5 \geq P \geq 1$	5			1.50	20.64
大久野島ルート Ⅲ 3号	"	"	$16 \geq P \geq 5$			0.99		17.55
	a	8.31	$10 \geq P \geq 2$	8.8			1.27	19.28
	"	"	$16 \geq P \geq 10$		0.76			16.44
大久野島ルート Ⅳ 6号	"	5.01	$16 \geq P \geq 1$				1.20	18.84
	c	12.22	$3 \geq P \geq 1$	3			1.27	19.19
	"	"	$16 \geq P \geq 3$			1.01		17.65
来島ルート Ⅴ 3号	"	7.52	$16 \geq P \geq 1$				1.56	21.34
	b	74.64	$8 \geq P \geq 1$	8.5		1.03		17.29
	"	"	$12 \geq P \geq 9$		0.55			15.28
"	"	74.14	$16 \geq P \geq 1$				1.49	21.08

表-6 E' 割線・E' 接線—EL関係

鉄塔番号	脚	EL(m)	全荷重P(t)	E' 割線(kg/cm ²)	E' 接線(kg/cm ²)
大久野島ルート Ⅱ 2号	c	7.47	5	88.38	67.17
	"	4.47	"	176.75	150.25
	"	1.97	"	265.13	262.47
	"	4.47	10	163.13	138.68
	"	1.97	"	265.13	262.47
大久野島ルート Ⅲ 3号	a	8.31	6	424.50	539.12
	"	5.01	"	424.50	509.40
	"	"	5	353.51	424.20
	"	8.31	10	530.25	402.99
	"	5.01	"	424.20	509.04
大久野島ルート Ⅳ 6号	c	12.22	5	265.13	267.78
	"	7.52	"	530.25	827.19
	"	12.22	10	265.13	267.78
	"	7.52	"	707.00	1102.91
来島ルート Ⅴ 3号	b	74.64	5	212.10	218.46
	"	74.14	"	1178.33	1755.71
	"	74.64	10	192.83	160.05
	"	74.14	"	2121.00	3160.29

表-7 EL別にみたE' 割線・E' 接線—全荷重P関係

鉄塔番号	脚	EL(m)	全荷重P(t)	E' 割線(kg/cm ²)	E' 接線(kg/cm ²)
大久野島ルート Ⅱ 2号	c	7.47	1	105.75	101.52
	"	"	2	106.13	101.88
	"	"	3	106.01	101.76
	"	"	4	94.34	71.70
	"	"	5	83.38	67.17
	"	4.47	2	212.25	252.57
	"	"	4	212.25	180.42
	"	"	6	181.94	154.65
	"	"	8	169.80	144.33
	"	"	10	163.13	138.68
	"	1.97	2	212.25	318.38
	"	"	4	252.25	318.38
	"	"	6	254.78	252.00
	"	"	8	283.01	280.17
	"	"	10	265.13	262.47
	"	"	12	282.84	280.01
	"	"	14	270.00	267.30
	"	"	16	261.12	258.51

表一 8 E L別にみたE' 割線・E' 接線—全荷重P関係 (続き)

鉄塔番号	脚	EL(m)	全荷重P(t)	E'割線(kg/cm ²)	E'接線(kg/cm ²)
大久野島ルート3号	a	8.31	2	424.50	539.12
"	"	"	4	424.50	539.12
"	"	"	6	424.50	539.12
"	"	"	8	566.00	718.82
"	"	"	10	530.25	402.99
"	"	"	12	509.10	386.91
"	"	"	14	424.29	322.46
"	"	"	16	484.94	368.55
"	"	5.01	2	424.50	494.40
"	"	"	4	424.50	494.40
"	"	"	6	424.50	494.40
"	"	"	8	424.50	494.40
"	"	"	10	424.20	509.04
"	"	"	12	509.10	610.92
"	"	"	14	495.00	594.00
"	"	"	16	484.94	581.93

表一 9 E L別にみたE' 割線・E' 接線—全荷重P関係 (続き)

鉄塔番号	脚	EL(m)	全荷重P(t)	E'割線(kg/cm ²)	E'接線(kg/cm ²)
大久野島ルート6号	c	12.22	2	362.25	460.07
"	"	"	4	283.01	285.84
"	"	"	6	254.70	257.25
"	"	"	8	242.57	245.00
"	"	"	10	267.78	265.13
"	"	"	12	254.55	257.10
"	"	"	14	247.50	249.98
"	"	"	16	261.12	263.73
"	"	7.52	2	471.66	735.80
"	"	"	4	849.00	1324.44
"	"	"	6	636.75	993.33
"	"	"	8	849.00	1324.44
"	"	"	10	707.00	1102.91
"	"	"	12	848.49	1323.20
"	"	"	14	742.50	1158.20
"	"	"	16	678.90	1060.59

表一 10 E L別にみたE' 割線・E' 接線—全荷重P関係 (続き)

鉄塔番号	脚	EL(m)	全荷重P(t)	E'割線(kg/cm ²)	E'接線(kg/cm ²)
来島ルート3号	b	74.64	2	212.25	218.63
"	"	"	4	212.25	218.63
"	"	"	6	212.25	218.63
"	"	"	8	212.25	218.63
"	"	"	10	192.83	106.05
"	"	"	12	169.73	93.35
"	"	74.14	2	1061.25	1581.27
"	"	"	4	1212.86	1807.16
"	"	"	6	636.75	948.77
"	"	"	8	1698.00	2530.02
"	"	"	10	2121.00	3160.29
"	"	"	12	1272.75	1896.31
"	"	"	14	1485.00	2212.65
"	"	"	16	1697.25	2528.91

表一11 繰返し載荷実験最終サイクルの加

荷重過程における沈下量 $v_N = w_N - \tilde{w}$ $N-1$ の測定

鉄塔番号 大久野島ルート №2 号 (大三島)

脚 c 脚

実験レベル EL = 0.97 m

加圧板 (載荷板) 半径 a = 15 cm

荷 重		沈 下 量 v_N	
		$P=0 \pm 5 \text{ t}$	$P=0 \pm 10 \text{ t}$
全荷重 P	荷重強度 q	N = 23	N = 6
t	kg/cm ²	cm	cm
1	1.414	0.308	0.279
2	2.829	0.405	0.492
3	4.243	0.470	0.577
4	5.658	0.528	0.641
5	7.072	0.575	0.689
6	8.487		0.747
7	9.901		0.790
8	11.351		0.833
9	12.730		0.869
10	14.144		0.937

表一12 繰返し載荷実験最終サイクル加荷重過程における

沈下量 $v_N = w_N - \tilde{w}_{N-1}$ の測定

鉄塔番号 大久野島ルート №3 号 (大久野島)

脚 a 脚

実験レベル EL = 4.01 m

加圧板半径 a = 15 cm

荷 重		沈 下 量 v_N	
		$P=0 \pm 5 \text{ t}$	$P=0 \pm 10 \text{ t}$
全荷重 P	荷重強度 q	N = 10	N = 10
t	kg/cm ²	cm	cm
1	1.414	0.092	0.105
2	2.829	0.148	0.169
3	4.243	0.188	0.218
4	5.658	0.217	0.254
5	7.072	0.246	0.285
6	8.487		0.308
7	9.901		0.336
8	11.351		0.356
9	12.730		0.379
10	14.144		0.400

表一13 繰返し載荷実験最終サイクル加荷重

過程における沈下量 $v_N = \tilde{w}_{N-1}$ の測定

鉄塔番号 大久野島ルート №6 号 (忠海)

脚 c 脚

実験レベル EL = 6.52 m

加圧板半径 a = 15 cm

荷 重		沈 下 量 v_N	
		$P=0 \pm 5 \text{ t}$	$P=0 \pm 10 \text{ t}$
全荷重 P	荷重強度 q	N = 10	N = 10
t	kg/cm ²	cm	cm
1	1.414	0.040	0.060
2	2.829	0.080	0.100
3	4.243	0.108	0.133
4	5.658	0.129	0.162
5	7.072	0.153	0.186
6	8.487		0.206
7	9.901		0.227
8	11.351		0.244
9	12.730		0.260
10	14.144		0.278

表一14 繰返し載荷実験最終サイクルの加重過程における

沈下量 $v_N = w_N - \tilde{w}_{N-1}$ の測定

鉄塔番号 来島ルート №3 号 (馬島)

脚 b 脚

実験レベル EL = 7 3.1 4 m

加圧板半径 a = 15 cm

荷 重		沈 下 量 v_N	
		$P=0 \pm 5 \text{ t}$	$P=0 \pm 10 \text{ t}$
全荷重 P	荷重強度 q	N = 10	N = 10
t	kg/cm ²	cm	cm
1	1.414	0.023	0.023
2	2.829	0.036	0.036
3	4.243	0.046	0.046
4	5.658	0.054	0.055
5	7.072	0.062	0.063
6	8.487		0.070
7	9.901		0.079
8	11.351		0.082
9	12.730		0.087
10	14.144		0.093

表一15 繰返し載荷実験最終サイクルの荷重過程における μ'_N と B'_N の計算値

鉄 塔 番 号	脚	EL(m)	最 終 最 大 全荷重 P(t)	n の最大値 N	折 点	μ'_N	$B_N(\text{kg/cm}^2)$	計算に用いた P の二つの値
大久野島ルート №2 号	c	0.97	5	6	なし	2.616	29.408	5t, 2t
"	"	"	10	23	なし	2.413	27.443	10t, 4t
大久野島ルート №3 号	a	4.01	5	10	3t	1.898	23.807	5t, 3t
"	"	"	10	10	3t	2.017	24.672	10t, 4t
大久野島ルート №6 号	c	6.52	5	10	なし	1.467	20.835	5t, 3t
"	"	"	10	10	4t	1.601	21.709	10t, 4t
来島ルート №3 号	b	73.14	5	10	なし	1.624	22.262	5t, 3t
"	"	"	10	10	なし	1.709	22.915	10t, 4t

鉄塔番号 大久野ルートNo.2号 (大三島)
脚 C 脚
実験レベル EL=7.47 m.....①
〃 =4.47 m.....②
〃 =1.97 m.....③

図一 1 初載荷実験の測定値・P-W関係の両対数表示

鉄塔番号 大久野ルートNo.2号 (大三島)
脚 c 脚

図一 2 μ' - EL 関係

鉄塔番号 大久野島ルートNo.2号 (大三島)
脚 C 脚

図一 3 μ' - P 関係

鉄塔 鉄塔番号 大久野島ルートNo.2号 (大三島)
脚 C 脚
⊙: E' 割線
×: E' 接線

図一 4 E' 割線, E' 接線 - EL 関係

鉄塔番号 大久野島ルートNo.2号 (大三島) - (1)
脚 C 脚

○: E' 割線

×: E' 接線

図-5-1 E' 割線, E' 接線 - P 関係

鉄塔番号 大久野島ルートNo.2 (大三島) (2)

脚 C 脚

○: E' 割線

×: E' 接線

図-5-2 E' 割線, E' 接線 - P 関係 (続)

鉄塔番号 大久野島ルートNo.2号 (大三島)
 脚 C 脚
 実験レベル E L=0.97m

図一6 繰返し載荷実験最終サイクル加荷重過程における
 $P-V_n$ 関係の両対数表示

鉄塔番号 大久野島ルートNo.2号 (大三島) —(1)
 脚 C 脚
 実験レベル E L=0.97m
 $P = 0 \rightarrow 5 \text{ ton}$
 $n = 1, 2, \dots, 23$

図一7-1 繰返し載荷実験の $P-W_n$ 関係

鉄塔番号 大久野島ルートNo.2号 (大二島) —(2)
 脚 C 脚
 実験レベル E L=0.97m
 $P = 0 \rightarrow 10 \text{ ton}$
 $n = 1, 2, \dots, 6$

図一7-2 繰返し載荷実験の $P-W_n$ 関係

図版一 中四連絡送電線經過地図 中四連絡送電線經過地図

図版—2

図版-3 載荷実験結果-1

図版—4 大久野島ルート 大久野島—忠海間鉄塔

図版—5 大久野島ルート鉄塔基礎床掘工事中(風化花崗岩—真砂体)

図版 6-1 大久野ルート鉄塔 No. 2 b 脚孔ボーリング柱状図

図版一8 大久野ルート鉄塔No.2号b 脚基礎地盤のコア写真

図版6-2 大久野ルート鉄塔No.3 d 脚孔ボーリング柱状図

図版 6-3 大久野ルート鉄塔No.6d 脚孔ボーリング柱状図

図版 6-4 来島ルート鉄塔No.3 b 脚孔ボーリング柱状図

試料		底	大久野ルート 忠海	大久野ルート 忠海	来島ルート 波止浜		
深 度		m	H = 1.00	H = 2.00	D = 2.00		
試料種別	乱さない		○	○	○		
	乱した						
粒度による土の分類			礫混り砂 質ローム	砂 礫	礫混り砂 質ローム		
粒 度 試 験	礫 分	%	31.0	46.0	30.0		
	砂 分	%	55.0	45.0	56.0		
	シルト 分	%	6.0	4.0	5.0		
	粘土 分	%	8.0	5.0	9.0		
	60 % 粒径	D ₆₀ mm	1.6000	2.4000	1.4000		
	10 % 粒径	D ₁₀ mm	0.0090	0.0900	0.0120		
	均等係数	U _C	178.0	26.7	116.6		
自然含水比		W %	10.37	7.87	11.24		
真 比 重		G _S	2.63	2.62	2.66		
単位体積重量		γ g/cm ³	2.22	2.22	2.23		
乾 燥 密 度		γ_d g/cm ³	2.01	2.06	2.00		
間 隙 比		e	0.32	0.27	0.33		
飽 和 度		S _r %	85.20	76.40	89.80		
稠 度 試 験	液性限界	W _L %					
	塑性限界	W _p %					
	塑性指数	I _p					
	流動指数	I _f					
直断 接剪 試験	粘 着 力	C kg/cm ²	0.00	0.55	0.35		
	内部摩擦力	ϕ°	34° 45'	31° 30'	27° 30'		
三縮 軸試 験	粘 着 力	C kg/cm ²					
	内部摩擦力	ϕ°					
一縮 軸試 験	圧 縮 強 度	q _u kg/cm ²					
	ねりかえした土の 圧 縮 強 度	q _{ur} kg/cm ²					
	鋭 敏 比	S _t					
圧 密 試 験	先行荷重	P ₀ kg/cm ²					
	圧密係数	C _v cm ² /sec					
	透水係数	k cm/sec					
	圧縮指数	C _c					

図版 7-1 真砂の土質試験結果一覧表

試料番号	大久野ルート海忠	試験結果	礫 分%	31.0	最大粒径 mm	9.0
深 度 m	H = 1.00		砂 分%	55.0	60% 粒径 D_{60} mm	1.6000
粒度による土の分類	砂 礫		シルト 分%	6.0	有 効 径 D_{10} mm	0.0900
分 散 剤	珪酸ソーダ		粘土 分%	8.5	均等係数 U_c	178.0

試料番号	大久野ルート海忠	試験結果	礫 分%	46.0	最大粒径 mm	16.0
深 度 m	H = 2.00		砂 分%	45.0	60% 粒径 D_{60} mm	2.4000
粒度による土の分類	礫混り砂質ローム		シルト 分%	4.0	有 効 径 D_{10} mm	0.0900
分 散 剤	珪酸ソーダ		粘土 分%	5.0	均等係数 U_c	26.7=6

図版 7-2 真砂の粒度実験

試料番号	来島ルート 波止浜	試験 結果	礫 分%	30.0	最大粒径 mm	11.0
深 度 m	D~2.00		砂 分%	56.0	60%粒径 D_{60} mm	1.4000
粒度による 土の分類	漂混り 砂質ローム		シルト分%	5.0	有効径 D_{10} mm	0.0120
分散剤	珪酸ソーダ		粘土分%	9.0	均等係数 U_c	116.6

図版7-3 真砂の粒度実験