川崎地区水位・水質観測井にみられる圧密現象について*

福田 理**

(昭和51年11月5日受理)

Pre-Compressions Found in the Kawasaki Observation Well of Geological Survey of Japan

By

Osamu FUKUTA

Abstract The Kawasaki observation well of Geological Survey of Japan was drilled in the Fujimi Park, about 1 km east of the Kawasaki Station, Kawasaki City, Kanagawa Prefecture. Lithostratigraphical subdivisions of the well are as follows, in descending order.

A formation (Alluvium)

A₁ member (3-25 m): medium to coarse sands

A₂ member (25-30 m): sand and gravel

———— Unconformity ————

C formation (Kazusa Group, upper Pliocene to middle Pleistocene)

C₁ member (30-85 m): clayey silt

C₂ member (85-157 m): sandy silt

———— Unconformity ————

C₃ member (157-202 m): clayey silt

C₄ member (202-271 m): sandy silt

C₅ member (271-306 m): clayey silt

C₆ member (306-428 m): Sandy silt, sand, and gravel

C₇ member (428-633 m): silt, and sandy silt

C₈ member (633-701 m): gravelly coarse sand, and sandy silt

———— Unconformity ————

D formation (Ikego Formation, lower Pliocene)

D₁ member (701-719 m): siltstone

D₂ member (719-885 m): sandy siltstone

D₃ member (885-994 m): fine, medium, and coarse sands

D₄ member (994-1,016 m): siltstone

Basing on the pre-compressions, the above mentioned members of the Kazusa Group and the Ikego Formation are classified into three groups. The average values of pre-compression-effective stress of the upper group (C₁ and C₂ members), the middle group (C₃, C₄, C₅, C₆, C₇, and C₈ members), and the lower group (D₁, D₂, D₃, and D₄ members) are 63.2 kg/cm², 80.5 kg/cm² and 100.6 kg/cm², respectively. From these data, the lost sediments represented by the unconformities between C₂ and C₃ members, and C₈ and D₁ members are estimated as 1,072 m and 1,576 m in thickness, respectively.

1. 緒 言

地質調査所の川崎地区水位・水質観測井(以下川崎GS

観測井とする)の工事および付帯測定・試験は、川崎市東部の最近の異常隆起地域の地質学的、地球物理学的、地球化学的、水理学的ならびに天然ガス鉱床学的諸条件を明らかにし、仕上げ後に行なわれる地盤変動の実態および機構追求のための諸調査・研究を可能にし、かつそ

* 昭和51年5月27日、第41回石油技術協会総会地質・探鉱シンポジウム講演

** 工業技術院地質調査所

第1図 川崎ガス田付近略図（河井原図に加筆）

- A: 丘陵地
 B: 上総層群を切る正断層（数字は落差）
 C: 坑井、試錐
 D: ガス露頭または浅層ガス（後上総第四系中のガス）の顕著な所

の結果の解析に資することを目的として、計画・実施されたものである。本稿においては、本観測井の付帯測定・試験の結果のうち、圧密に関するものだけを取り出してお紹介するとともに、考察によって導かれた若干の結論めいた事項を述べて広くご批判を仰ぎたい。竣工後の観測を除く本観測井の主要諸元や、付帯測定・試験の概要ならびに一般的な結果については、地質ニュース所載の拙稿（福田ほか4名，1976；福田ほか2名，1976a，b）を参照されたい。なお、本観測井および周辺の主要坑井の位置を参考までに図1に示しておいた。

2. 地質概説

本坑井の岩相層序は、上位より次のように区分される。

A累層（沖積層）

- A₁ 部層（3—25m）：中～粗粒砂
 A₂ 部層（25—30m）：砂礫

不整合

C累層（上総層群）

- C₁ 部層（30—85m）：粘土質シルト
 C₂ 部層（85—157m）：砂質シルト
 不整合
 C₃ 部層（157—202m）：粘土質シルト
 C₄ 部層（202—271m）：砂質シルト
 C₅ 部層（271—306m）：粘土質シルト
 C₆ 部層（306—428m）：砂質シルト，砂礫
 C₇ 部層（428—633m）：シルト，砂質シルト
 C₈ 部層（633—701m）：礫質粗粒砂，砂質シルト

不整合

D累層（池子層，鎌倉層群）

- D₁ 部層（701—719m）：シルト岩
 D₂ 部層（719—885m）：砂質シルト岩
 D₃ 部層（885—994m）：細，中，粗粒砂
 D₄ 部層（994—1,016m）：シルト岩

表 1 川崎 GS 観測井のコアの圧密試験の結果一覧

コ ア 番 号	コ ア 深 度 (m)	岩 相	真比重 (G_s)	試 験 前		試 験 後		圧 密		係 数			
				湿潤密度 (g/cm^3)	間 グ キ 比 e_0	含水比 (W) (%)	乾燥密度 (g/cm^3)	湿潤密度 (g/cm^3)	体積圧縮係数 m_v	圧 密 係 数 (cm^2/min)	透 水 係 数 (cm/min)	圧縮指数 c_c	圧密降伏 応力 p_r (kg/cm^2)
1—5	94.00—94.24	シルト	2.608	1.785	0.993	(36.38) 24.41	1.670	2.078	$5.74 \sim 60.4 \times 10^{-4}$	$1.80 \sim 11.4 \times 10^{-2}$	$4.59 \sim 18.0 \times 10^{-9}$	0.837	71
2—3	131.05—131.30	シルト	2.602	1.716	1.192	(44.54) 26.83	1.453	1.843	$1.65 \sim 19.1 \times 10^{-4}$	$2.98 \sim 16.4 \times 10^{-2}$	$3.13 \sim 12.6 \times 10^{-9}$	1.197	74
3—8	189.00—189.25	シルト	2.603	1.743	1.053	(37.42) 26.16	1.600	2.019	$1.31 \sim 17.7 \times 10^{-4}$	$4.20 \sim 12.3 \times 10^{-2}$	$1.58 \sim 22.3 \times 10^{-9}$	1.149	96
4—5	252.16—252.42	シルト	2.641	1.846	0.886	(31.84) 21.41	1.715	2.082	$1.18 \sim 15.2 \times 10^{-4}$	$5.03 \sim 11.8 \times 10^{-3}$	$1.28 \sim 17.9 \times 10^{-9}$	1.000	105
5—2	315.30—315.60	シルト	2.618	1.844	0.866	(31.45) 23.04	1.724	2.121	$1.05 \sim 9.53 \times 10^{-4}$	$6.86 \sim 2.03 \times 10^{-3}$	$1.81 \sim 15.7 \times 10^{-9}$	0.640	108
6—5	380.86—381.10	シルト	2.583	1.846	0.834	(31.08) 22.09	1.659	2.025	$1.00 \sim 13.0 \times 10^{-4}$	$2.85 \sim 11.7 \times 10^{-2}$	$5.70 \sim 13.4 \times 10^{-9}$	1.150	115
7—1	463.10—463.40	シルト	2.658	1.859	0.895	(32.55) 23.07	1.650	2.031	$0.80 \sim 8.94 \times 10^{-4}$	$8.13 \sim 10.2 \times 10^{-3}$	$9.35 \sim 11.5 \times 10^{-9}$	0.867	136
8—6	557.06—557.31	シルト	2.631	1.852	0.870	(31.58) 22.80	1.658	2.036	$0.80 \sim 8.40 \times 10^{-4}$	$8.66 \sim 12.6 \times 10^{-3}$	$1.64 \sim 26.4 \times 10^{-9}$	0.74 ⁴	130
9—7	631.47—631.69	細砂	2.620	1.827	0.857	(29.51) 23.11	1.704	2.098	$1.23 \sim 7.89 \times 10^{-4}$	$4.96 \sim 10.0 \times 10^{-3}$	$0.61 \sim 11.1 \times 10^{-9}$	0.618	113
10—5	693.00—697.00	細砂	2.648	1.827	0.885	(30.02) 23.23	1.737	2.141	$1.15 \sim 9.75 \times 10^{-4}$	$0.86 \sim 35.5 \times 10^{-2}$	$2.24 \sim 16.1 \times 10^{-9}$	0.965	98
11—3	796.80—797.06	シルト	2.704	1.894	0.850	(29.56) 23.41	1.747	2.156	$8.95 \sim 14.4 \times 10^{-5}$	$1.41 \sim 11.7 \times 10^{-2}$	$0.85 \sim 17.7 \times 10^{-9}$	1.039	181
12—3	851.57—851.77	シルト	2.696	1.750	1.132	(38.60) 31.99	1.462	1.930	$0.78 \sim 10.6 \times 10^{-4}$	$1.02 \sim 8.04 \times 10^{-2}$	$1.27 \sim 12.9 \times 10^{-9}$	1.509	186

C累層も一般に凝灰質ないし浮石質であるが、D累層は一般に著しく浮石質である。また、コアに見られる傾斜には数度をこえるものはなかった。底棲有孔虫化石によって、本坑井の上総層群を模式地のそれと対比すると、次のようになる。

C ₁ ~C ₂ 部層	大田代層
C ₃ ~C ₆₋₃ 副部層	黄和田層
C ₆₋₄ ~C ₈ 部層	大原層~野々塚層

なお、C₆部層は5つの副部層に細分され、C₆₋₃副部層の基底の深度は401mである。横式地の上総層群については、*Globorotalia truncatulinoides* が出現するのは黄和田層の基底より少し下位（尾田，1975），また *Gephyrocapsa oceanica* が出現するのは大田代層の上限より少し上位（高山，1973）であるとされているから、C₂, C₃ 両部層間の不整合の年代はおよそ80万年前を含んでおり、またおよそ190万年前とされている鮮新・更新両統の境界は、C₇ 部層と C₈ 部層の境界あたりにあることになる。

一方、D累層の浮遊性有孔虫には *Globorotalia tumida tumida* があって、*Pulleniatina obliquiloculata obliquiloculata* を欠くところから、本累層はBLOW(1969)のN.18帯からN.21帯のどこかに入るか、後者の全体にまたがることになる。しかし、上位の上総層群が上部鮮新統を含み、かつD累層がBLOW(1969)のN.16帯あたりから始まると考えられる鎌倉層群の上部しか代表していないことから、D累層は下部鮮新統あたりに属すると考えるのが自然であろう。

3. 圧密試験*とその結果の解釈

圧密試験は東工大型高圧圧密試験機により、コアから直径60mm、高さ20mmの低円柱型に整形された供試体について行なわれた。圧密荷重は10, 20, 40, 80, 160および320kg/cm²の6段階とした。また、圧密量の測定は圧密箱にとりつけた2個のダイヤルゲージによって行なわれ、測定時間は6, 9, 15および30秒, 1, 2, 4, 8, 15および30分, 1, 2, 4, 6および24時間の15段階とした。今回使用した圧密試験機の特徴は水浸箱をもっていることで、整形された供試体の側面にシリコングリースをぬったものを圧密リングにセットした後、水浸箱に水を満たし、5kg/cm²の圧力をかけ、1昼夜放置して供試体を水で飽和させて、測定準備が完了する。

圧密試験の結果をとりとめて示したのが表1である。本表中の真比重、含水比および乾燥密度の測定は日本工業規格に準じて行なわれているため、一般的には正しいとはいえないが、コア試験の際参考までに行なった105°C, 24時間乾燥による含水率の測定値と、本島・永田(1973)によって考案された方法（湿度40%, 60°Cに保った恒温恒湿槽内で48時間放置）によるものとの差が0.13~1.56(重量%)しかないので、実際問題としては、これらの測定値をそのまま容認して差し支えないと考えられる。上に述べた2つの方法によってこれらの測定値に差が出るのに、従来の方ではモンモリロナイト等の含水鉱物中の水まで追い出されてしまうからであるが、川崎GS観測井のコアについて行なわれた鉱物組成調査の結

表2 川崎GS観測井における圧密降伏応力、有効応力および全応力

コア番号	圧密降伏応力 p_r (kg/cm ²)	有効応力 p_e (kg/cm ²)	全応力 p_a (kg/cm ²)	$p_r - p_e$ (kg/cm ²)	$p_r - p_a$ (kg/cm ²)
1-5	71	7.7	17.1	63.3	53.9
2-3	74	10.9	24.0	63.1	50.0
3-8	96	16.0	34.9	80.0	61.1
4-5	105	21.7	46.9	83.3	58.1
5-2	108	27.8	59.3	80.2	48.7
6-5	115	33.9	72.0	81.1	43.0
7-1	136	42.4	88.7	93.6	47.3
8-6	130	52.3	108.0	77.7	22.0
9-7*	113	60.5	123.6	52.5	-10.6
10-5*	98	67.7	137.2	30.3	-39.2
11-3	181	79.6	159.3	101.4	21.7
12-3	186	86.3	171.4	99.7	14.6

* は細砂，その他はシルトである。

* 本試験は玉野技術研究所に依頼して実施された。

第2図 川崎 GS 観測井における圧密降伏応力，有効応力および全応力の垂直分布

果に照して見ても，モンモリロナイトの存在度はX線回折分析によって少ないながら確認できるか，痕跡程度である（福田ほか2名，1976a）。

圧密試験の結果のうち，圧密の進行状況を最もよく示すのは，いうまでもなく圧密降伏応力（ p_r ）の垂直分布である。この値と，有効応力（ p_e ），全応力（ p_a ）， p_r-p および p_r-p_a とをとりまとめて示したのが表2である。これらのうち，全応力を算出するには次のようにした。すなわち，密度検層の記録から，本観測井のある深度（ x m）における密度（ g/cm^3 ）を深度の1次関数として示す* と，およそ

$$1.80+0.0005x \quad (1)$$

となるので，全応力（ kg/cm^2 ）の深度分布は，およそ

$$\begin{aligned} & \frac{\int (0.0005x + 1.80) dx}{10} \\ &= (0.00025x^2 + 1.80x) / 10 \\ &= 0.000025x^2 + 0.18x \end{aligned} \quad (2)$$

となる。表2の全応力の値はこの式によって求めたものであり，また有効応力はこの値から深度対応の静水圧（ kg/cm^2 ）を引いて求めたものである。

図2は本観測井の圧密降伏応力，および上のようにして求めた全応力と有効応力の垂直分布を示したものである。表2および図2に見られるように，細砂からなるコア番号9—7および同10—5の試料については，圧密降伏応力が上位のものより小さいというあり得べからざる結果が出ており，このような試料に対する圧密試験が無意味であることをよく示している。また，コア番号7—1の試料の圧密降伏応力は，およそ94m下の同8—6の試料のそれより $6kg/cm^2$ 大きいという矛盾を示しており，この値も採用できないと思われる。しかし，このような値が出た原因はよくわからない。

以上の3試料を除くと， p_r-p_e についてはコア番号1—5と同2—3の2試料，コア番号3—8，同4—5，同5—2，同6—5および同8—6の5試料，およびコア番号11—3と同12—3の2試料の3群に分けられることは，表2および図2から明らかである。そして，上位群，中位群および下位群の p_r-p_e の平均値は，それぞれ $63.2 kg/cm^2$ ， $80.5kg/cm^2$ および $100.6kg/cm^2$ と，下位群はど大きい。これは， p_r を圧密先行有効応力と見做し，それぞれの群の間に不整合を想定することによって，容易に説明される。

これらのうち，中位群と下位群との間の不整合としては，C累層（上総層群）とD累層（鎌倉層群）との間の

* ATHY(1930), HUBERT and RUBEY(1959) および CHAPMAN (1972)等の研究から導かれる式を採用しなかったのは，本坑井には砂質土が卓越しているからである。

不整合, すなわち黒滝不整合を当てるはかなかりう。この不整合の深度は701mであるから, 先に述べた(1)式によって求めたこの深度における密度 2.15g/cm^3 が削剝された部分にも適用されたとすると, 削剝量は $1,576\text{m} [=701\text{m} + 10\text{m} \times 100.6 \div (2.15 - 1.00)]$ と算出される。

一方, 中位群と上位群との間の不整合に対応するのは, C_3 部層と C_2 部層の境界であると考えるのが最も自然であろう(福田ほか2名, 1976b)。この境界(不整合)の深度は157mであるから, 上と同様に, (1)式によって求めたこの深度における密度 1.88g/cm^3 が削剝された部分にも適用されたとすると, 削剝量は $1,072\text{m} [=157\text{m} + 10\text{m} \times 80.5 \div (1.88 - 1.00)]$ と算出される。

現行の一般的な圧密理論に立てば, 上に算出した削剝量は控え目な値である。しかし, これが大き目な値である可能性もある。それは, 60°C あたりまでにおいては, 水の粘度が温度の上昇とともに著しく減少する(村上政美, 1963)ことによるものである。このことを考慮した圧密理論を組立てることは今後の課題である。しかし, 上に算出した削剝量は過小であろう面と過大であろう面をもつことから, オーダーとしては認められてよいであろう。

上の水の粘度に関する部分をもう少し厳密に述べると, 削剝時の密度の深度分布が完全に知られたとして求めた削剝量は, 水の粘度が温度の上昇とともに著しく減少するため, 最大である可能性が生ずるのである。しかし, 上に述べた密度分布仮定による過少な値が得られる度合の方が大きいであろうし, その影響が深部ほど大きいことは明らかである。それ故, 上に算出した C_3 部層と C_2 部層の間の削剝量から算出される黒滝不整合の埋没深度 $1,616\text{m} [=1,072\text{m} + (701\text{m} - 157\text{m})]$ が $1,576\text{m}$ より40m大きいという矛盾は, 問題にならないとも考えられる。

4. 結 言

C 累層(上総層群)と D 累層(鎌倉層群)との間の不整合は圧密試験の結果が出る前から想定されていたものであるが, C_2 部層と C_3 部層との間のそれは圧密試験の結果の前節に述べたような解析を通して, 初めて想定されるに至ったものである。したがって, 私どもの報告のその1(福田ほか4名, 1976)では, この不整合には触れていない。

ここで考慮すべきことは, 前節における解析が圧密降伏応力を先行有効荷重と考えて行なわれたことである。圧密試験の結果についてこれ以上すっきりした解釈がない限り, 川崎GS観測井の広義の坑井地質をもたらし

た諸条件の範囲内では圧密降伏応力を一応先行有効荷重と考えて差し支えないというのが, 今回得られた最も重要な結論ではなかりうか。

擱筆に当り, 本稿の内容についてご討論下さった帝国石油(株)技術研究所の藤田嘉彦氏に衷心より感謝の意を表する。

引 用 文 献

- ATHY, L.F. (1930): Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks, *A.A.P.G. Bull.*, vol. 14, no. 1, pp. 1-24.
- BLOW, W.H. (1969): Late middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy, *Proceedings of the first international conference on planktonic microfossils*, Leiden E.J. Brill, vol. 1, pp. 199-421, pl. 1-54, text-figs. 1-43.
- CHAPMAN, R.E. (1972): Primary migration of petroleum from clay source rocks, *A.A.P.G., Bull.*, vol. 56, no. 11, pp. 2185-2191.
- 福田 理ほか4名(1976): 川崎地区水位・水質観測井について(その1 坑井編①), 地質ニュース, 259号, 1-14頁。
- 福田 理ほか2名(1976a): 川崎地区水位・水質観測井について(その2 坑井編②), 地質ニュース, 260号, 1-9頁。
- 福田 理ほか2名(1976b): 川崎地区水位・水質観測井について(その3 坑井編③), 地質ニュース, 261号, 21-35頁。
- HUBBERT, M.K. and RUBEY, W.W. (1959): Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting; pt. 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, vol. 70, no. 2, pp. 115-166.
- 本島公司・永田松三(1973): 海成泥質岩の含水率とその炭化水素鉱床の地球化学との関連, 石技誌, 38巻, 5号, 268-281頁。
- 村上政美(1963): 1. 2. 8. 水の物理的性質, 石油鉱業便覧, pp. 45-48.
- 尾田太良(1975): 浮遊性有孔虫化石からみた房総半島上部新生界の古地磁気記録の時代的解釈, 地質学雑誌, 81巻, 10号, 645-647頁。
- 高山俊明(1973): 本邦新生界最上部における石灰質ナノプランクトン化石の分布について, 地質学論叢, 8号, 45-63頁。