砂利充填坑井における流体運動*

平 川 誠 一**

(昭和26年6月29日受理)

Flow of Fluid in Gravel-packed Wells.

by Seiichi. Hirakawa.

The main purpose of the gravel packing methods is said to prevent the sand troubles for increasing oil production. However, there occurs the sand invade into the gravel to reduces greatly permeability of the screen. Therefore the effects of the gravel packing is not to increase oil production, but only to prevent the sand troubles in wells.

I. 緒 言

軟弱なる油層及びガス層に掘られた坑井から、流体を回収する際、流体は砂を押し出して、そのために、流体の産出を不可能にするか又は産出を止める程でなくても、各種の障害を起す結果になる。かかる砂による各種の困難を除去するための技術の1つとして、考えられている砂利充填法に關して、坑井仕上の作業面においても、砂利を設置する方法、循環液体の性質及びその循環方法等の解決されつつある技術問題が多分にある様であるが、筆者は主として、流体回収の面から砂利充填法の考察を加えようと思う。さて流体の回収能率を良くするためには、砂利充填法において、出砂を防止することに主眼を置き、それに附隨して出来るだけ澤山の産出量を計ることが考えられる。

II. 實驗裝置及方法

實驗裝置は fig. 1 に示される様に、油層に掘られた坑井に類似させて製作する。水槽 A より「ギャー・ポンプ」B に依り揚水し、その流体は調節バルブ附水槽 D を通過して後、送られる。その際送入水量を調節するために、D には調節バルブ E が附けてあり、餘分の流体は A に流れ戻る。送入量はオリ

* 松浦教授に與えられた昭和25年度文部省科學研究費の1部による研究

** 東京大學石油工學科大學院特別研究生

フィス G で瞬間流量として測定する。F は水銀マンローターであり、C はゴムホースである。流體は G を通つて装置の上部より入り、外側に廻つて實驗資料を入れてある K 部を通過する。K の外側は媒體たる砂の崩れを防ぐため、孔の澤山あけてある圓錐形の鐵板に 100 mesh の金網 J を巻いてある。K を通つた流體は装置の中心部にある孔明管 L ($1\frac{1}{2}$ " pipe, 8 列の丸孔, pitch 1.4 cm, 孔の直径 0.7 cm) に流れ込み、流體と砂とを受ける容器 O に入り、砂は沈澱し流

體は上方部の排水口 P より A に戻る。L の出口に制限孔の働きをさせるためバルブ N を付け流出量を加減する。装置は圓形の蓋 H を備え、パッキング I 及内部蓋抑えの木片 Q 4 個で、流體の洩れを防いでいる。外部の蓋の周囲の R はフランジである。又装置には油層壓及坑底壓に相等する壓力測定のために、M なるマンローターをつける。

パイプ・オリフィスで瞬間流量を求めるには、流量係数が豫め分つていれば、オリフィスの直径 d と壓力水頭差 h を測定すればよい。管内オリフィスの流量係数の値¹⁾は、Witte の實驗結果により、面積比 m ($m = d^2/D^2$, D : 管の直径) に應じて一定値となるが、これに従うには數個の條件¹⁾にあてはまつている必要がある。しかるにこの實驗に用いたオリフィスは、條件にあてはまつていない故、流量係数は實驗から求めて、壓力水頭差と流出量とのグラフを作成して、この實驗の換算に便とした。

使用した流體は水である。そして E 及び N を適當に調節し、種々の壓力及び壓力差と流出量に對して實驗を行い、壓力は M で流入量は F・G で読み、流出量は積算流量として求め、出砂量は乾燥後秤量する。この操作を各種の砂及び各種の砂利を組合せ、且砂利充填部の厚さを變化させて行く。それから使用せし砂は、篩震盪機により篩別試驗を行い、且使用せし砂利と砂兩方の滲透率測定試驗を行う。

III. 出砂防止の論議

充填された砂利層を通しての砂の移動は、大變複雑な現象で、これは澤山

1) 沖藏：水力學 岩波書店發行

の變數から成る函數である。Sage and Lacey²⁾は實驗式に確率論を使つて、砂の移動の現象を説明しているが、筆者は現在の所理論式を展開して、それからこの現象の理論的結果を求めることが不可能である故、實驗室での實驗結果と油井における實際の記録とから、この問題を解明しようと思う。先づ出砂防止に關する1部の實驗結果を fig. 2.~4. に示し、出砂防止に影響する要素を検討する。

Fig. 2. (a).

Influence of velocity on produced sand.

No.	Medium.	Gravel-size. (Mesh)	Gravel-thickness. (cm)
1	(2)	4-6	0.9
2	(2)	4-6	1.2
3	(2)	4-6	1.5
4	(2)	4-6	1.8
5	(2)	4-6	2.6
6	(3)	4-6	1.5
7	(3)	4-6	3.0
8	(3)	4-6	3.5
9	(3)	4-6	4.0

Gravel-sand size ratio.

No. 1-5.....11.7- 8.3

No. 6-9.....25.4-18.0

Fig. 2. (b).

Influence of velocity on produced sand.

No.	Medium.	Gravel-size. (Mesh)	Gravel-thickness. (cm)
1	(2)	6-8	0.8
2	(2)	6-8	1.0
3	(2)	6-8	1.2
4	(2)	6-8	2.1
5	(3)	6-8	1.2
6	(3)	6-8	2.0
7	(3)	6-8	2.5
8	(3)	6-8	3.3

Gravel-sand size ratio.

No. 1-4..... 8.3- 5.9

No. 5-8.....18.0-12.8

2) Sage and Lacey : Effectiveness of Gravel Screens. Trans. A. I. M. E. (1942)

Fig. 2 (c).
Influence of velocity on
produced sand.

No.	Medium.	Gravel-size. (Mesh)	Gravel-thickness. (cm)
1	(2)	8—10	0.5
2	(2)	8—10	0.7
3	(2)	8—10	0.9
4	(2)	8—10	1.0
5	(3)	8—10	1.1
6	(3)	8—10	1.3
7	(3)	8—10	1.6
8	(3)	8—10	2.0

Gravel-sand size ratio.

No. 1—4..... 5.9—4.1

No. 5—8..... 12.8—8.9

Fig. 2. (d).
Influence of velocity on
produced sand.

No.	Medium.	Gravel-size. (Mesh)	Gravel-thickness. (cm)
1	(2)	10—12	0.4
2	(2)	10—12	0.6
3	(2)	10—12	0.7
4	(2)	10—12	0.9
5	(3)	10—12	0.7
6	(3)	10—12	0.9
7	(3)	10—12	1.1

Gravel-sand size ratio.

No. 1—4..... 4.1—3.5

No. 5—7..... 8.9—7.5

1) 砂と砂利の性質。先づその形状が考えられる。實驗に使用した砂利は、便宜上大學構内より採集して、 $-4 \sim +6$ Mesh $\cdot -6 \sim +8$ Mesh $\cdot -8 \sim +10$ Mesh $\cdot -10 \sim +12$ Mesh に篩別けたもので、その形状は不規則な形をしている。一方 B ガス田で砂利充填に用いているのは、大體扁平形ながら丸味を持った砂利で、筆者が篩別けた結果は、容量百分率で $-6 \sim +8$ Mesh 約 50%, $-8 \sim +10$ Mesh 及び $-10 \sim +12$ Mesh 共に約 25% である。又米

國加州の Kobe 會社も丸味のある砂利を規定している³⁾。更に砂利の材質は、粉碎機 (ball mill) を通して碎けない程度の強度をもつもので、且つ酸に對しての抵抗が強く、容易に溶解しないものが希ましいといわれている。その外、砂利の詰り方が問題になるのは當然であるが、この點では地上で砂利充填を施して降管する所の pre-packed liners は、完全に充填し易い。次に砂の形狀・粒徑・分布狀態が出砂に影響するが、實驗に使用せし砂 3 種のそれ等の性質は、Table 1. に表示されている。その内媒體 (1) と (2) は實驗室で學生實驗に使用している川砂で、媒體 (3) は A ガス田の砂で、この實驗に當り約 1 ケ月水に浸しておき、粘土分を膨潤させて實驗した。媒體 (4) は B ガス田の坑井元に

Fig.5. Distribution of grain size, mixed sand.

Table 1. 砂の篩別試験及滲透率測定試験結果

粒 徑 Mesh	種 類 mm	媒 體 (1)			媒 體 (2)			媒 體 (3)			媒 體 (4)		
		重量 g	百分率 %	累 計 %	重量 g	百分率 %	累 計 %	重量 g	百分率 %	累 計 %	重量 g	百分率 %	累 計 %
-20~	0.590				6	1.52	1.52				1	0	0
+30													
+40	0.420	4	0.8	0.8	5	1.26	2.78						
+48	0.295	83	17.7	18.5	210	53.00	55.78	7	2.1	2.1	66	14.0	14.0
+60	0.246	32	7.0	25.5	31	7.84	63.62	4	1.2	3.3	25	5.3	19.3
+65	0.208				62	15.70	79.32						
+80	0.175	87	18.6	44.1	25	6.32	85.64	33	10.0	13.3	79	16.7	36.0
+100	0.147	156	33.3	77.4	30	7.58	93.22	82	24.8	38.1	85	18.0	54.0
+115	0.124	66	14.1	91.5									
+150	0.104	7	1.5	93.0	19	4.80	98.02	117	35.4	73.5	134	28.4	82.4
+200													
(* -150)	0.074*	33	7.0	100.0				38	11.5	85.0	45	9.5	91.9
+250	0.061				2	0.56	98.58				6	1.3	93.2
+325													
(** -250)	0.043				** 6	1.52	100.10	10	3.0	88.0	19	4.0	97.2
-325								40	12.1	100.1	13	2.8	100.0
10% point の 徑 (mm)		0.32			0.40			0.185			0.34		
水の 滲 透 率 (darcy)		12.8			27.2			7.0			—		
滲透率測定時の 温 度		水温 27°C ; 室温 29°C			水温 27°C ; 室温 27.5°C			水温 27°C ; 室温 27.5°C			—		

Table 2. 砂 利 の 滲 透 率

略 號	砂 利 の 徑		水に對する 滲 透 率 (darcy)
	Mesh.	mm.	
g ₁	- 4~+ 6	-4.699~+3 327	217.4 (22)
g ₂	- 6~+ 8	-3.327~+2.362	132.1 (130)
g ₃	- 8~+10	-2.362~+1.651	73.4 (73)
g ₄	-10~+12	-1.651~+1.397	42.6 (43)

吹き上げられて上つて來た砂であり、この出砂防止實驗には使用しなかつたが、筆者が篩別けた結果を Table 1 に併せて示している。それから各媒體の加積曲線は fig 5 に、その水に對する滲透率は Table 1

に、そして砂利の水に對する滲透率は Table 2 にそれぞれ示されている。

2) 砂利の粒徑と砂の粒徑との比。如何なる粒徑の砂利が適當かという問題がある。これは軟弱なる油層内の砂の粒徑に對應して定まるものであるが、その砂の粒徑も種々色々あるので、それをどう決めるかは疑問の餘地があるが、慣用に従つて粒徑の對數の算術平均たる加積曲線の 10% ポイントの砂の粒徑に對して、何倍の砂利の粒徑が適當であるかを實驗結果から判斷する。この比を或る數に定めても、出砂量は後述する流速・砂利充填部の厚さの變化に應じて變わるが、媒體 (1), (2) の出砂試験の結果 (fig. 2 参照) か

ら、約7~8倍が適當の様に思う。多少媒體が粘土分を含んでいる時は、媒體(3)の試験結果(fig. 2 参照)の示す通り出砂が多い様である故、約6~7倍が適當であらう。これに關しては、テキサス州の Jackson 地方の様に比較的粘土分の多い油砂では、粘土分によりスクリーンが閉塞される傾向のため、粒径が累加曲線の10%ポイントの6倍という小徑の砂利で成功している⁴⁾。その外、この比に就いて、Coberly and Wagner⁵⁾は比較的粗い砂で實驗した結果13倍以下であるが、安全率をかけて10倍にするのが好ましいといつており、Gumpertz⁶⁾は35~65 Meshの砂を用いて11倍を超えないと述べ、Hill⁷⁾は8倍が適當であるとしている。加州油田での記録⁸⁾からこの比を計算して見ると、8.35, 8.35~15.0, 6.25, 7.35倍である。又 Kobe 會社により指定された砂利の粒径を、Table 3.³⁾ から計算して見ると約7~12倍である。

Table 3.³⁾ Kobe's Gravel Specification (※筆者の計算)

Grain size at 10% cumulative analysis	Gravel size Tyler screen Mesh	Gravel-sand size ratio ※	Slot width in outer shell Inches	Slot width in Liner Inches
0.011	- 6+ 8	11.9~8.5	0.060	0.050
0.009	- 8+10	10.3~7.2	0 060	0.050
0.006	-10+14	10.8~7.7	0.040	0.040
0.004	-14+16	11.5~9.8	0.030	0.030

3) 砂利充填部の厚さ。fig. 3 は媒體(2)についての一 定流速に於ける出砂量と砂利充填部の厚さとの關係である。(これは fig. 2 から計算される。)この實驗結果から、砂利の粒径對砂の粒径(加積曲線の10%ポイント)の比が大きくても、又は流速が大であつても、砂利充填部の厚さを厚くすれば出砂は止められるが、一般に砂が砂利の間に架橋する爲には、砂利充填部の厚さは、砂利の直徑の約5~6倍であるということが實驗結果から判る。この値について、Gumpertz⁶⁾は數倍であるといひ、Hill⁷⁾は理想的に一樣に砂利が充填された時には、3倍でよいが、安全率を掛けて少くとも5倍の厚さは必要であると述べている。然し以上の實驗結果から求めた此等の値は、砂を

- 4) Thomas S. West A. I. M. E. Tech. Pub. Sept. 1946.
松浦政男譯 “油井仕上げの新方法に就いて” 石油技術協會誌 第13卷第5號
- 5) Coberly and Wagner : Some considerations in the selection and installation of gravel pack in oil wells. A. I. M. E. Tech. Pub. (1938)
- 6) Gumpertz : Screening effect of gravel on unconsolidated sands. A. I. M. E. Tech. Pub. (1940)
- 7) Hill : Factors affecting the use of gravel in oil wells. May 26, 1944. The Oil Weekly.
- 8) Clark : A Résumé of the application of gravel packing to oil wells in California. A. I. M. E. Trans. (1940)

止める最小の値であり、實際問題としては餘りこの厚さが小であると、循環液體で砂利が送り込まれる時、ライナー管と坑壁との間の環狀空間に架橋状態をつくり、砂利充填が完全に行われないう危険もあり、又は砂利が完全に充填される前に、坑壁から落ちた砂がライナー内に侵入することもある。参考までに實際の砂利充填仕上の坑井の資料を紹介すると、Layne 會社⁹⁾では普通 7" O. D. Casing の時、直徑 16" に擴掘しているし、又加州では 5-in ライナーに對して、5-in の厚さの充填部を持つてゐる⁸⁾。次に prepacked liners に於いては、この厚さを大にすると、砂利中に詰まつた砂を掃除する時、抵抗が大になるし、更に與えられた外徑に對して、強度の弱い小徑のライナーを使わざるを得なくなる。又これに於いては、砂利を詰める時注意を拂えば、確實に詰める事が出來、環狀空隙での砂利の架橋の心配もないから、充填部の厚さは普通の砂利充填仕上法のそれと比較して薄い。Kobe 會社の prepacked liners に於ける充填部の厚さ³⁾を Table 4 に紹介する。

Table 4. Kobe's Liner Specification³⁾

Liner Outside Diameter Inches	Prepack Outside Diameter Inches	Weight added per Foot of Prepack lbs.	Shipping Weight lbs.
4 3/4	5 3/4	10	5
5	6	11	5
5 1/2	6 1/2	12	7
5 3/4	6 3/4	12	7
6 5/8	7 5/8	13	10
7	8	14	10
8 5/8	9 5/8	17	15
9	10	18	15

4) 流速。fig. 2 の示す如く砂が一時架橋された時でも、流速を増加させて行くと出砂を見る。そして流速が大になるに従つて、出砂量は大となる。流速は油層壓と坑底壓との差壓に比例することは、理論的にも實驗的 (fig. 4. 参照) にも確かであるから、(但し出砂の少ない實驗資料についてのみ直線的關係のグラフと

なる。) 坑底壓を大きく即ち差壓を小さくして、高背壓維持を行うため、坑口の制限孔を絞り流速を小にすれば、出砂量は段々少くなる。實際において、油層壓に相當する周圍の壓力が大きくても、出砂量が小さい場合があつたが、今述べた理由により説明される。扱つて實際の坑井において、油井半徑の點での流速は筆者の計算によると、C 油田では 0.0043 cm/sec, 0.0175 cm/sec, 0.0373 cm/sec が代表的な値で、次に出砂問題のある B ガス田では、0.192 cm/sec, 0.116 cm/sec, 0.140 cm/sec である。ガス田の特徴として水を單位時間當り澤山汲んで、多量のガスを採収するという事は大切であるが、出砂防止

9) The Layne products for well completion Catalog 48. Layne and Bowler Co. Texas. U. S. A.

の點から見ると、チョークで絞り流速を小にして採ガスすれば、出砂量は減少するのではなからうか。又砂利充填坑井のみならず、一般の坑井にもあてはまるのであるが、ガスの溶解度・油層の厚さ・滲透率についての坑底資料から、適當な背壓を維持せしめる様、最大徑の制限孔を決定して、差壓及ガス—油比を小さく保ち、産油率を調節する必要がある。

5) 孔明管。一般的問題として、その材質は化學的及び電氣的腐蝕に耐えられるもの、又はその豫防が考えられるべきである。

孔に關して、その切込みは fig. 6 に示される如く、鐵管の内部程その幅が擴がつている方が、孔に砂の詰まるのを防ぐといわれ、Kobe 會社で試験して見て、その

の角度が 2° では砂の粒子の移動が自由であるので、安全率をかけて 6° の角度をもつ孔の切込みを Kobe の標準⁹⁾ としている。次に選擇された砂利の粒徑に對して、スロットの幅を適當に定めなければならない。これは前者が後者より大きく、砂利が孔明管内に入り込まなければよい。過去に砂利の徑が 2mm~4mm であるのに對して、孔明管のスロットを長さ 3'', 幅 5mm にした爲、孔明管内に砂利が侵入して失敗した事がある様である。

最後に出砂に對する流體の粘性の影響は、流速程重要でないとされているが、然し粘性は流速と關係をもつて、出砂に影響する要素となつてゐる。

IV. 產 出 量 増 加 の 論 義

fig. 1 の實驗裝置では、排油半徑に相當する所が、實際の油層と比べて短かい故、比較的砂利部の厚さが大となり、產出量増加の實驗には不適當であるが、筆者は砂利充填部に砂が架橋され、その結果滲透率が砂利充填部の各部に於いて、砂利の滲透率と異なつて來ることに着目し、この裝置でそれを實驗し、その實驗結果を用いて、理論的に產出量増加の割合を計算する。

1) 孔明管の抵抗。裸孔坑井 (uncased well) からの產出量 Q_1 は、

$$Q_1 = \frac{2\pi hk \Delta p / \mu}{\log r_e / r_w} \dots\dots\dots (1)$$

孔明管 (the cased and perforated well) を通しての產出量 Q_2 は

$$Q_2 = \frac{2\pi hk \Delta p / \mu}{C + \log r_e / r_w} \dots\dots\dots (2)$$

であり、こゝに C は孔明管の抵抗を表わす。又兩產出量の比は

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\log r_e / r_w}{C + \log r_e / r_w} \dots\dots\dots (3)$$

である。扱て C についてであるが、(實驗に用いた孔明管の孔は 8 列の丸孔であるから、8 列の丸孔の場合について説明する。) Muskat¹⁰⁾ は次の計算

10) Muskat: The effect of casing perforations on well productivity. Trans. A. I. M. E. (1943)

結果を得た。

$$C = \frac{1}{4} \sum K_0 (2n\pi\rho_p) + \frac{1}{2} \sum K_0 (1.5308n\pi\rho_w) \cos \frac{n\pi}{4} \\ + \frac{1}{2} \sum K_0 (2\sqrt{2}n\pi\rho_w) \cos \frac{n\pi}{2} + \frac{1}{2} \sum K_0 (3.6956n\pi\rho_w) \cos \frac{3n\pi}{4} \\ + \frac{1}{4} \sum K_0 (4n\pi\rho_w) \cos n\pi + \frac{1}{8} \log \frac{\rho_w}{\rho_p} - 0.2600 \dots \dots \dots (4)$$

筆者の計算結果は

$$C = \frac{ar_w}{8\pi r_p^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{2n\pi r_p}{a} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{p} \sin 8p \frac{r_p}{r_w} K_{sp} \left(\frac{2n\pi r_w}{a} \right) \dots \dots \dots (5)$$

猶この式は不完全の點もある故、後日機會を見て發表することとし、こゝでは fig. 1 に示した孔明管の抵抗を (4) 式に従ひ計算すると、

$r_p = 0.35\text{cm}$, $r_w = 1.8\text{cm}$, $a = 1.4\text{cm}$, $\rho_p = 0.25$, $\rho_w = 1.28$, $r_e = 18.0\text{cm}$ であるから、 $C = 0.0022$ となる。

2) 砂利充填部の滲透率。砂利充填部を通しての流體の流出量は、計算されて次の式で表わされる。^{2) 7)}

$$Q = \frac{2\pi h K_g (p_e - p_w) / \mu}{\log \frac{r_1}{r_w} + \frac{K_g}{K_f} \log \frac{r_e}{r_1}} \dots \dots \dots (6)$$

一方砂利充填部を持たない普通の坑井での流出量は、(1) 式で計算される故砂利充填による流出量の増加割合 Q/Q_1 は、

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{\frac{K_g}{K_f} \log \frac{r_e}{r_w}}{\log \frac{r_1}{r_w} + \frac{K_g}{K_f} \log \frac{r_e}{r_1}} \dots \dots \dots (7)$$

以上の式を誘導するのに、假定として、均質流體・整流・等方性多孔質媒體・裸孔坑井がある外に、砂利充填部に砂が架橋されても、その滲透率は砂利の滲透率に等しく、常に一定であるという假定に基いている。そこで砂利及砂(媒體)それから砂利充填部の厚さを變化させ、種々なる架橋状態で實驗し流出量を求めると、砂が架橋された砂利充填部の平均滲透率 $\bar{K}_g$ が計算される。この計算には前に求めた孔明管の抵抗係数を用い、流出量を裸孔坑井の流出量に換算し、次に (6) 式で K_g を $\bar{K}_g$ にかえて計算する。以上の實驗と計算の結果の 1 部である fig. 7. から判る様に、砂の架橋されている砂利充填部の滲透率は變化する。然し、fig. 8. に示される理論的に考えた滲透率變化のグラフと一致せず、一般に實驗結果の滲透率が低いのは、砂を押し出すためのエネルギー消費により、抵抗があるからであらう。それ故かゝる實驗結果から、砂の架橋状態の良好程度も判斷出来る。結論としてかゝる滲透率

と砂利充填部の厚さとの関係は、砂利の孔隙率、砂及砂利の粒径・形状等の澤山の要素に左右され、一義的には決まらないが、砂利充填部の滲透率は変化する。そしてその変化を大雑把に一次函数と考えて、砂利充填した時の流出量について次に論ずる。

3) 増加産出量の理論的解法。この解法に當つて、均質流体・整流・等方性多孔質媒体・裸孔坑井という假定を設け、砂のみの領域を F 領域、砂利のみの領域を G 領域、砂が砂利間に架橋している領域を M 領域とする。

さてダルシーの法則の一般形を定常流に於ける連続方程式に代入し、圓嚙座標に座標轉換した二次元での放射狀の流れは、次の微分方程式で表わされる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rK(r) \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} K(\theta) \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} = 0$$

然るに $V_\theta = -\frac{K}{\mu r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0$ なる故、この関係を上の方程式に入れて解くと、

$$rK(r) \frac{\partial p}{\partial r} = C_1$$

更にこの方程式を各領域に對して解くと

$$\text{F 領域: } p_f(r) = \frac{C_1}{K_f} \log r + C_2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{M 領域: } p_m(r) = C_1 \int \frac{dr}{h^2 + mr} + C_3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{但し } 1 = \frac{K_f - K_g}{r_2 - r_1} < 0, \quad m = \frac{r_2 K_g - r_1 K_f}{r_2 - r_1} > 0$$

$$G \text{ 領域: } p_g(r) = \frac{C_1}{K_g} \log r + C_4 \dots\dots\dots(10)$$

式(8), (9), (10) に境界値条件を入れる。

$$r=r_w, p_g=p_w \quad p_w = \frac{C_1}{K_g} \log r_w + C_4 \dots\dots\dots(11)$$

$$r=r_e, p_f=p_e \quad p_e = \frac{C_1}{K_f} \log r_e + C_2 \dots\dots\dots(12)$$

$$r=r_1, p_g=p_m \quad \frac{C_1}{K_g} \log r_1 + C_4 = C_1 \int_0^{r_1} \frac{dr}{lr^2 + mr} + C_3 \dots\dots\dots(13)$$

$$r=r_2, p_m=p_f \quad \frac{C_1}{K_f} \log r_2 + C_2 = C_1 \int_0^{r_2} \frac{dr}{lr^2 + mr} + C_3 \dots\dots\dots(14)$$

式(11), (12), (13), (14) の4式より C_1, C_2, C_3, C_4 が決定され、其等の値を式(8), (9), (10) に代入すれば、砂利充填坑井の周囲の壓力分布を知ることが出来るわけであるが、それを省略し、 C_1 の値を計算すると、

$$C_1 = \frac{p_e - p_w}{\frac{r_2 - r_1}{r_2 K_g - r_1 K_f} \log \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{K_g}{K_f} + \frac{1}{K_g} \log \frac{r_1}{r_w} + \frac{1}{K_f} \log \frac{r_e}{r_2}}$$

となる。次に流出量 Q を求めると、

$$\begin{aligned} Q &= - \int_0^{2\pi} h r V_r d\theta = 2\pi h \cdot \frac{K_g(r)}{\mu} \cdot r \frac{\partial p_g}{\partial r} \quad (\because V_r = - \frac{K_g(r)}{\mu} \cdot \frac{\partial p_g}{\partial r}) \\ &= 2\pi h \cdot \frac{C_1}{\mu} \quad (\because (10) \text{ 式より } \frac{\partial p_g}{\partial r} = \frac{C_1}{K_g} \cdot \frac{1}{r}) \end{aligned}$$

C の値を代入すると、

$$Q = \frac{2\pi h K_g (p_e - p_w) / \mu}{\frac{r_2 - r_1}{r_2 - r_1 \cdot \frac{1}{K_g/K_f}} \left(\log \frac{r_2}{r_1} + \log \frac{K_g}{K_f} \right) + \log \frac{r_1}{r_w} + \frac{K_g}{K_f} \log \frac{r_e}{r_2}} \dots\dots\dots(15)$$

従つて、砂利充填による流出量の増加割合 Q/Q_1 は、式(1)と式(15)とから

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{\frac{K_g}{K_f} \log \frac{r_e}{r_w}}{\frac{r_2 - r_1}{r_2 - r_1 \cdot \frac{1}{K_g/K_f}} \left(\log \frac{r_2}{r_1} + \log \frac{K_g}{K_f} \right) + \log \frac{r_1}{r_w} + \frac{K_g}{K_f} \log \frac{r_e}{r_2}} \dots\dots\dots(16)$$

實際問題を考慮に入れると、たとえ砂利充填してもその厚さに制限があり、多少の出砂がある故、 G 領域が無いと考え、 $r_1 = r_w$ とすると式(16)は次の如く變形される。即ち、

$$\frac{Q}{Q_i} = \frac{\frac{K_g}{K_f} \log \frac{r_e}{r_w}}{\frac{r_2 - r_w}{r_2 - r_w \cdot \frac{1}{K_g/K_f}} \left(\log \frac{r_2}{r_w} + \log \frac{K_g}{K_f} \right) + \frac{K_g}{K_f} \log \frac{r_e}{r_2}} \dots\dots\dots (17)$$

この式 (17) において $r_2=r_1$ とおくと、式 (7) と全く一致する。

4) 増加産出割合の計算。 $r_w=2$ in, $r_e=500$ ft の場合を例にとつて、増加産出割合を式 (17) から計算した結果を fig. 9. に示す。又 fig.

9. には参考までに式 (7) で計算した結果が、点線で示されている。ここで K_g/K_f の値は、小さくなり 1 に近くなると、充填した砂利が孔明管の孔を通して入り込んで詰つて了い、逆に K_g/K_f の値が大きくなることは砂利の粒径が大きくなり、実際には砂が砂利の間に架橋しなくなる。架橋した場合はこの出

砂実験から、この値が 4~6 の範囲である。次に砂利充填部の厚さであるが、この厚さを小さくするに限度のある事は、出砂に対する砂利の厚さを論議した時、述べた通りである。逆にその厚さを大きくすると、産出量の増加率は減つて行くが、兎に角多少産出量が増加する傾向にあることが判る。然し實際問題として掘堀器の関係により、現在は直径 19 in が最高であるが、直径 21 in 迄掘り得ると云われているので、 $r_1 \leq 10$ inch の問題である。此等の事實を総合して fig. 9. を見直すと、増加産出割合は、今迄 (7) 式により計算されたよりも小さい事は勿論であるが、砂利充填による産出増加は餘り期待出来ない様に思われる。

V. 結 論

この論説は主として流體運動の觀點から、砂利充填法を實驗検討し、それを理論と實際問題とに結びつけて研究したもので、その結論を述べると

(1) 砂が架橋され砂利充填部の滲透率が變化するので、今迄考えられていた程の産出量増加の割合は得られず、その増加割合は小さい。

(2) 砂利充填法においては、産出量増加よりも本來の目的たる出砂防止を考えるべきである。

(3) 砂利充填法においては、砂利の形狀、粒径、詰り方・砂の形狀、粒

徑、分布状態・砂利の粒徑と砂のそれとの比・砂利充填部の厚さ・孔明管の孔の形状及配列状態・産出流體の速度・流體の粘性等が、その効果に影響する要素である。

(4) 砂利の適當な大きさは、媒體(砂)の加積曲線の10%ポイントの約7~8倍、媒體が粘土分を含んでいる時は約6~7倍である。

(5) 砂が砂利の間に架橋する爲には、砂利充填部の厚さは砂利の直徑の約5~6倍でよいが、實際問題から考えて或る程度の厚さが必要である。

(6) 流速が大になるに従い出砂量は大となる。そして坑口のチョークを絞リ、油層壓と油井坑底壓との差壓を小にすれば、出砂量は減少する。

(7) 孔明管の孔の大きさ・列・配列等は油層内の砂及使用する砂利の大きさから適當に定める必要がある。

〔記 號 說 明〕

K : 滲透率 darcy.

h : 油層の厚さ cm.

p_e : 油層壓 atm.

p_w : 坑底壓 atm. ($\Delta p = p_e - p_w$)

μ : 流體の粘性係數 C. P.

r_e : 排油半徑 cm.

r_w : 油井半徑 cm.

C : 孔明管の抵抗

Q_1 : 裸孔孔井からの産出量 c.c./sec.

Q_2 : 孔明管を通しての産出量 c.c./sec.

$K_m(X)$: m次の修正されたベッセル函數

r_p : 孔明管の孔の半徑 cm.

a : 孔明管の孔のピッチ cm.

$$\rho_e = \frac{r_e}{a} = \rho_w = \frac{r_w}{a}, \rho_p = \frac{r_p}{a}$$

K_g, K_t : 砂利部及砂部の滲透率 darcy.

Q : 砂利充填部を通しての産出量 c.c./sec.

r_1 : 中心から[砂の混合していない]砂利の外側までの距離 cm.

r_2 : 中心から砂利の外側[砂と砂利との混合した部分と砂の部との接觸點]までの距離 cm.

V : 流速 cm/sec.

最後に本研究をなすに當り、東大石油工學科の松浦・淵田兩先生の御指導を戴き、又帝國石油株式會社の皆様、特に佐渡道隆氏及山本信夫氏の多大なる御援助を賜りました事を附記し、且感謝の意を表する次第であります。

(26.6.25.)