

บทที่ 4  
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การวิจัยนี้เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยม  
ผืนผ้าขนาด 0.60 x 20.40 x 0.75 เมตร (โดยประมาณ) โดยใช้ทรายจาก  
แม่น้ำแม่กลอง บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรีเป็นวัสดุท้องน้ำ ดำเนินการ  
ทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลอง ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3  
ตลอดจนรวบรวมการศึกษาที่ผ่านมาเพื่อมาใช้เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์วิจัยผล  
การศึกษา

4.1 ผลการทดลอง

จำนวนครั้งของการทดลองที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีดังนี้

1. จำนวน 15 ครั้งของการทดลอง ทำโดยผู้ศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการ  
การชลศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลที่ได้จากการ  
ทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของ  
เม็ดทราย เท่ากับ 0.70 มิลลิเมตร การเรียงเม็ด (Gradation) เท่ากับ  
2.134 ดังแสดงในรูปที่ 4.1

2. จำนวน 15 ครั้งของการทดลอง ทำโดย Mr.Niwat  
Daranandana (1962) ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4  
ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทรายเท่ากับ 0.33 มิลลิเมตร ค่าการ  
เรียงเม็ด (Gradation) เท่ากับ 2.07 (รูปที่ 4.2)

3. จำนวน 11 ครั้งของการทดลอง ทำโดย Mr.Ong-Ach  
Kuhapinant (1966) ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.1 ผลการกระจายขนาดเม็ดทรายที่ขนานของทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.70 มม. (σ = 2.13)

Run No.	Bed Form	Percent Finer than Indicated Size, in mm.					4.760
		0.075	0.149	0.250	0.420	0.841	
2	Ripple	1.03	3.18	8.42	21.98	54.58	90.21
3	Ripple	0.67	2.22	7.44	21.25	53.71	90.20
5	Ripple	0.46	1.83	8.30	27.18	60.96	93.83
1	Dune	0.47	1.70	6.97	22.11	56.09	90.56
4	Dune	1.15	3.85	8.44	23.09	58.08	91.77
6	Dune	0.34	1.36	5.99	21.10	55.61	93.09
7	Dune	1.78	4.98	11.71	28.15	63.48	95.47
8	Dune	0.48	1.81	6.88	20.20	56.61	91.45
9	Dune	1.63	6.07	12.52	29.76	65.46	96.01
12	Dune	1.18	6.14	12.92	29.74	64.73	96.30
13	Washed Out Dunes	1.26	4.14	8.85	24.26	58.89	90.99
14	Washed Out Dunes	1.18	4.19	8.74	23.24	58.39	92.31
10	Standing Wave	0.79	5.39	12.16	29.11	64.93	93.77
11	Standing Wave	0.43	2.03	8.52	27.44	61.25	93.70
15	Antidunes	0.86	3.08	8.13	21.81	55.47	89.61
Average % Finer		0.91	3.46	9.07	24.63	59.15	92.62

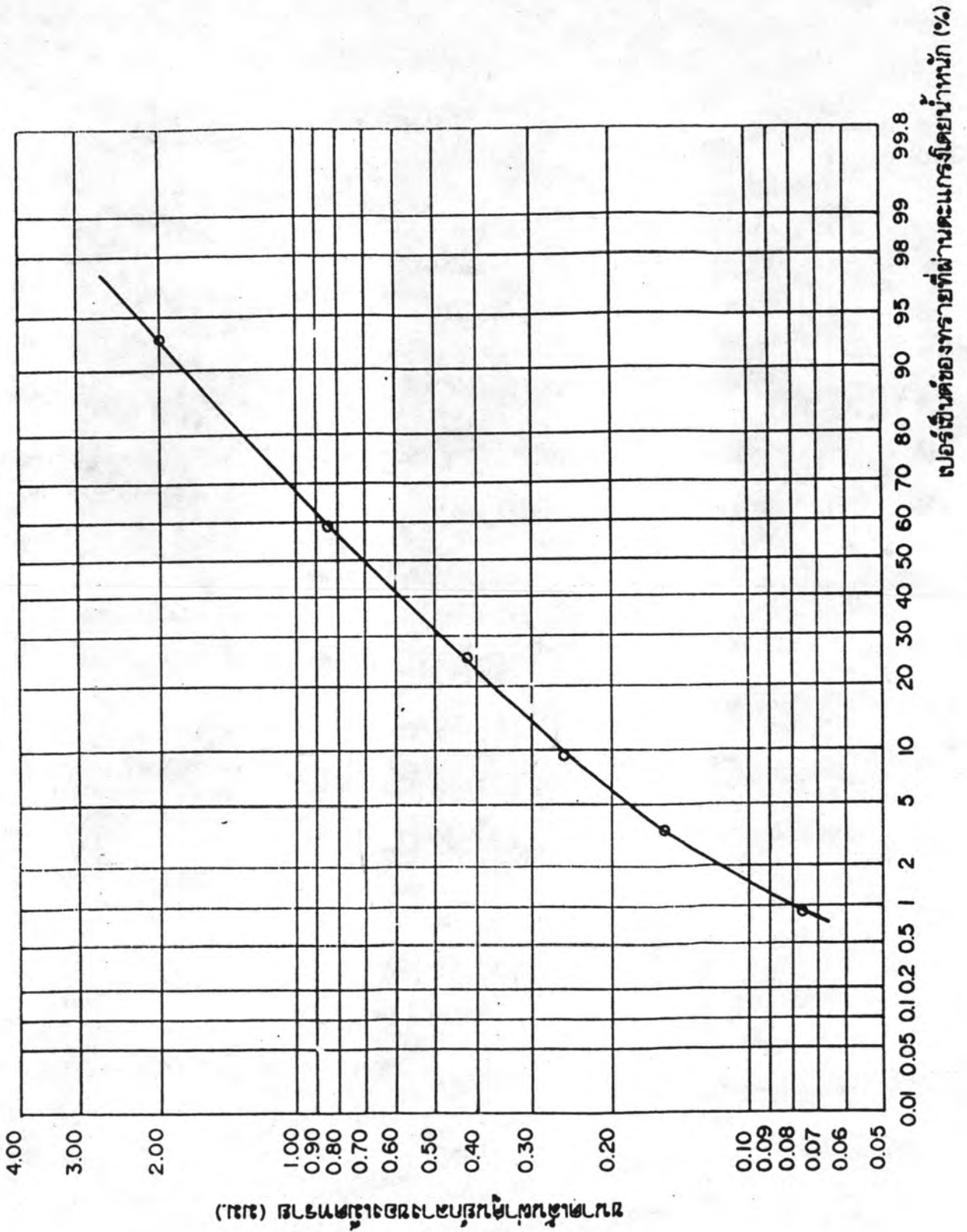
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลอง ของทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.70 มม. (σ = 2.13)

Run No.	Slope (ft./ft.)	Discharge (cfs.)	Depth (ft.)	Velocity (fps.)	Viscosity (sq.ft./sec.)	Temperature (c)	Total Bed Material Discharge Ct. (pps.)	Suspended Bed Material Discharge Cs. (pps.)	Bed Material		Regime	Bed Form
									Ave. Diameter (ft.)	Gradation (-)		
2	2.50E-04	1.186	0.489	1.232	8.11E-06	33.2	68	22	2.461E-03	2.200	Lower	Ripple
3	4.60E-04	1.470	0.497	1.503	8.26E-06	32.2	99	31	2.52E-03	2.160	Lower	Ripple
5	7.50E-04	1.097	0.494	1.129	8.45E-06	31.2	80	26	2.13E-03	2.176	Lower	Ripple
1	2.2E-03	1.858	0.496	1.903	8.08E-06	33.4	548	94	2.32E-03	2.156	Lower	Dune
4	2.9E-03	2.106	0.496	2.157	8.22E-06	32.5	738	136	2.36E-03	2.120	Lower	Dune
6	4.2E-03	2.508	0.496	2.569	8.45E-06	31.2	969	237	2.44E-03	2.013	Lower	Dune
7	5.1E-03	2.829	0.505	2.646	8.30E-06	32.0	2,134	963	2.13E-03	2.146	Lower	Dune
8	6.1E-03	2.816	0.509	2.811	8.40E-06	31.5	2,567	1,775	2.42E-03	2.061	Lower	Dune
9	6.7E-03	3.035	0.509	3.030	8.54E-06	30.7	3,404	1,358	2.00E-03	2.086	Lower	Dune
12	7.1E-03	2.919	0.496	2.991	8.45E-06	31.0	3,948	2,591	2.06E-03	2.173	Lower	Dune
13	7.50E-03	3.106	0.472	3.344	8.45E-06	31.2	4,678	2,936	2.32E-03	2.188	Transition	Washed Out Dunes
14	7.5E-03	3.196	0.492	3.301	8.34E-06	31.8	4,026	2,701	2.32E-03	2.116	Transition	Washed Out Dunes
10	8.6E-03	3.899	0.460	4.307	8.09E-06	33.3	5,328	2,739	2.03E-03	2.190	Upper	Standing Wave
11	8.9E-03	4.041	0.467	4.337	8.40E-06	31.5	5,562	2,776	2.16E-03	2.152	Upper	Standing Wave
15	1.00E-02	4.191	0.484	4.400	8.34E-06	31.8	6,507	3,390	2.46E-03	2.198	Upper	Antidunes

Average width (B) = 1.968 ft.

Average d50 = 2.297E-03 ft.

Gradation (σ) = 2.134



รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายของทรายที่องน้ำขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.70 มม. (D=2.134)

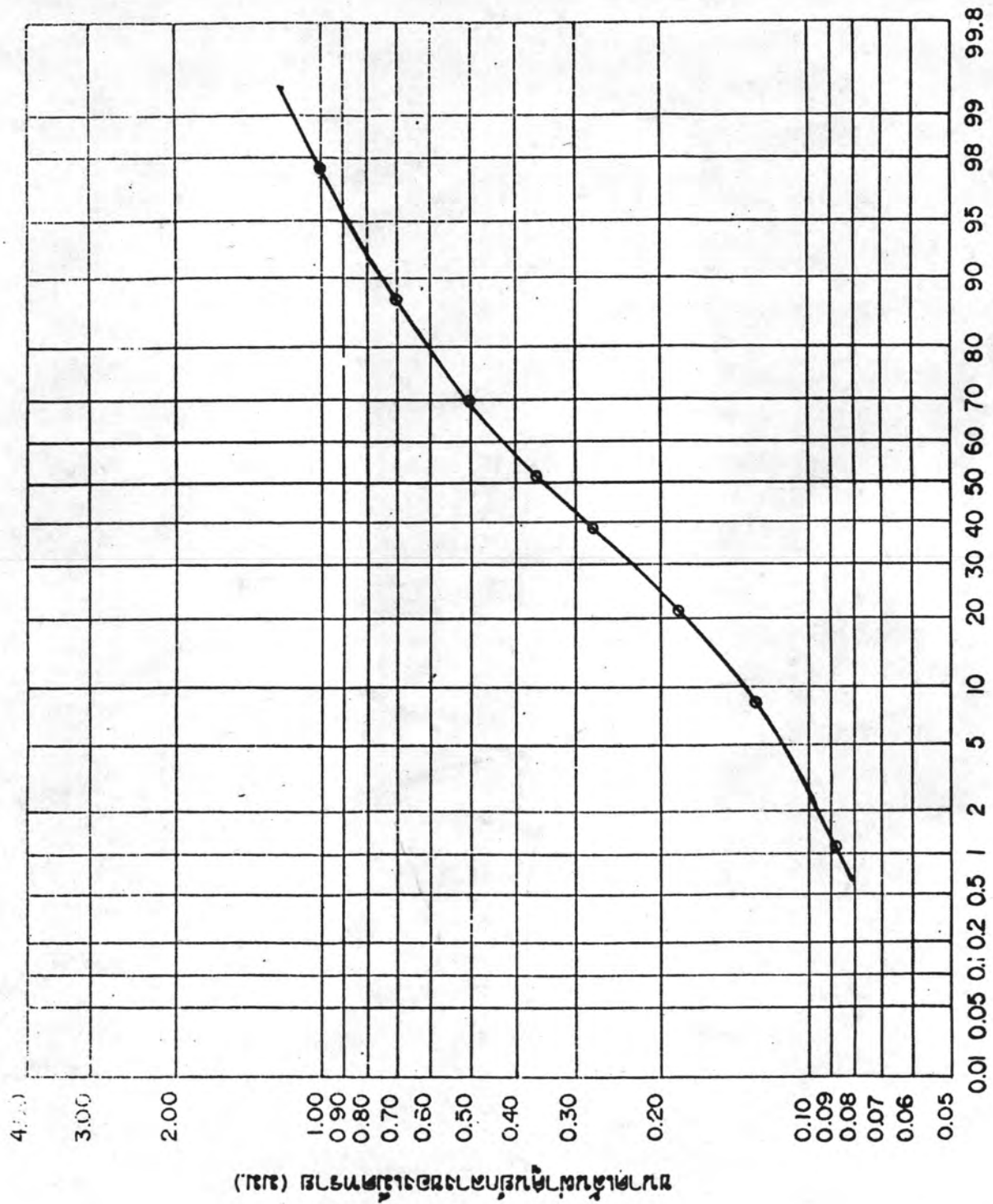


ตารางที่ 4.3 ผลการกระจายขนาดเม็ดทรายที่อ่างน้ำ ของทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.33 มม. (σ = 2.07)

Run No.	Bed Form	Percent Finer than Indicated Size, in mm.					0.700	1.000
		0.088	0.125	0.175	0.250	0.350		
16G	Ripple	1.50	9.50	22.30	39.30	56.00	92.20	98.40
6G	Ripple	1.50	11.20	30.00	45.20	56.00	88.70	97.20
5G	Ripple and Plane	2.50	12.20	27.50	40.80	51.70	85.80	97.80
1G	Plane and Ripple	1.50	11.00	25.00	40.00	52.50	84.50	97.00
10G	Dune	0.30	5.50	20.60	37.80	48.80	85.10	97.60
8G	Dune	0.50	4.50	13.50	25.50	38.00	83.20	96.70
9G	Dune	1.30	6.30	17.00	32.80	45.50	81.80	96.50
7G	Dune	0.50	5.20	16.50	29.20	42.50	81.20	97.50
2G	Washed Out Dunes	0.00	7.50	20.50	36.50	51.00	85.00	94.00
3G	Washed Out Dunes	1.50	10.50	24.50	41.50	54.50	91.50	98.50
4G	Plane	1.50	12.50	27.50	44.50	58.50	89.00	97.50
12G	Standing Wave & Plane	1.20	9.60	24.30	41.30	57.90	93.50	99.40
13G	Antidunes	1.40	10.30	26.80	45.00	61.10	92.20	98.10
15G	Violent Antidunes	0.00	4.40	15.50	33.00	53.80	95.00	99.50
14G	Antidunes	1.30	6.80	17.80	32.30	49.80	90.30	98.50
Average	% Finer	1.10	8.47	21.95	37.65	51.84	87.93	97.61

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลอง ของทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.33 มม. (σ = 2.07)

Run No.	Slope (ft./ft.)	Discharge (cfs.)	Depth (ft.)	Velocity (fps.)	Viscosity (sq.ft./sec.)	Temperature (°c)	Total Bed Material Discharge		Suspended Bed Material Discharge		Bed Material (ft.)	Bed Form
							Material Discharge (cfs.)	Material Discharge (ppm.)	Material Discharge (cfs.)	Ave. Diameter Gradation (-)		
16G	2.908-04	1.05	0.500	1.07	1.032E-05	20.5	4	0	0	1.015E-03	1.970	Ripple
6G	4.708-04	1.06	0.510	1.06	1.032E-05	22.5	12	0	0	9.500E-04	2.130	Ripple
5G	6.308-04	1.46	0.520	1.43	1.032E-05	22.6	85	8	8	1.100E-03	2.250	Ripples and Plane
1G	9.708-04	1.95	0.500	1.99	1.032E-05	22.1	507	217	217	1.050E-03	2.240	Plane and Ripples
10G	1.17E-03	1.69	0.480	1.80	1.032E-05	23.4	452	56	56	1.170E-03	2.080	Dune
8G	1.20E-03	2.11	0.510	2.11	1.032E-05	24.1	1,030	372	372	1.45E-03	1.960	Dune
9G	1.43E-03	2.46	0.520	2.42	1.028E-05	23.0	1,520	888	888	1.335E-03	2.110	Dune
7G	1.63E-03	2.32	0.530	2.23	1.004E-05	23.2	1,220	370	370	1.408E-03	2.100	Dune
2G	1.88E-03	2.62	0.520	2.57	1.002E-05	22.1	2,190	1,240	1,240	1.110E-03	2.100	Washed Out Dunes
3G	3.12E-03	3.34	0.520	3.27	9.840E-05	21.9	4,320	3,370	3,370	1.016E-03	2.040	Washed Out Dunes
4G	4.32E-03	4.00	0.510	4.00	9.990E-06	21.8	5,100	2,560	2,560	9.500E-04	2.140	Plane
12G	4.47E-03	4.50	0.490	4.79	1.028E-05	21.6	7,900	3,610	3,610	9.800E-04	1.990	Standing Wave & Plane
13G	6.95E-03	5.38	0.490	5.61	1.017E-05	19.6	151,000	8,130	8,130	9.190E-04	1.960	Antidunes
15G	9.10E-03	6.46	0.520	6.34	1.019E-05	19.6	225,000	8,820	8,820	1.082E-03	1.740	Violent Antidunes
14G	9.80E-03	6.04	0.510	6.05	1.067E-05	19.6	146,000	3,770	3,770	1.470E-03	1.910	Antidunes



เปอร์เซ็นต์ของทรายที่ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)

รูปที่ 4.2 กราฟการกระจายของทรายที่ผ่านขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.33 มม. (σ = 2.07)

ตารางที่ 4.5 ผลการกระจายขนาดเม็ดทรายท้องน้ำ ของทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.95 มม. (σ=1.82)

Run No.	Bed Form	Percent Finer than Indicated Size, in mm.						
		0.147	0.300	0.500	1.000	1.500	2.380	4.760
6	Ripple	0.59	5.50	19.40	56.00	77.00	93.84	100.00
9	Ripple	0.62	5.00	18.00	53.80	75.00	94.96	100.00
8	Dune (small)	0.42	4.10	9.00	58.00	80.50	97.15	100.00
3	Dune	0.41	3.50	14.80	53.00	77.00	94.38	100.00
7	Dune	0.11	2.40	12.00	53.00	76.00	94.41	100.00
10	Dune	0.11	2.00	18.00	41.80	70.00	92.26	100.00
11	Dune (big)	0.40	3.70	14.00	55.50	80.00	91.24	100.00
12	Transition	0.05	2.50	15.00	58.00	83.00	94.19	100.00
13	Standing Wave	0.24	3.20	16.00	57.00	80.00	91.91	100.00
14	Standing Wave	0.14	2.30	13.50	54.00	78.20	91.99	100.00
15	Standing Wave	0.14	2.30	13.50	54.00	79.10	93.19	100.00
Average % Finer		0.29	3.32	14.84	54.01	77.80	93.59	100.00

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลอง ของทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.95 มม. (σ=1.82)

Run No.	Slope (ft./ft.)	Discharge (cfs.)	Depth (ft.)	Velocity (fps.)	Viscosity (sq.ft./sec.)	Temperature (c)	Total Bed		Suspended Bed		Bed Material Ave. Diameter Gradation (ft.) (-)	Regime	Bed Form
							Material Discharge Ct., (ppm.)	Material Discharge Ave. Diameter Gradation (ft.) (-)	Cr., (ppm.)	Bed Material Ave. Diameter Gradation (ft.) (-)			
6	5.238-04	1.21	0.490	1.280	8.650E-06	30.3	38	10	2.950E-03	1.978	Lower	Ripple	
9	5.708-04	1.45	0.510	1.490	8.350E-06	31.8	65	24	3.080E-03	2.101	Lower	Ripple	
8	1.378-03	1.60	0.510	1.625	8.480E-06	31.2	127	28	2.885E-03	1.857	Lower	Dune (Small)	
3	1.838-03	1.80	0.520	1.780	8.510E-06	31.0	128	97	3.145E-03	1.834	Lower	Dune	
7	3.168-03	2.10	0.480	2.265	8.510E-06	30.8	778	49	3.145E-03	1.810	Lower	Dune	
10	3.488-03	2.29	0.505	2.350	8.500E-06	31.1	528	272	3.670E-03	1.736	Lower	Dune	
11	6.798-03	2.62	0.480	2.830	8.510E-06	31.0	1,383	907	3.150E-03	1.768	Lower	Dune (Big)	
12	6.908-03	2.87	0.520	2.860	8.490E-06	31.2	2,707	1,954	2.950E-03	1.727	Transition	Washed Out Dunes	
13	7.508-03	3.16	0.520	3.150	8.450E-06	31.3	4,587	2,857	2.950E-03	1.810	Upper	Standing Wave	
14	8.338-03	3.50	0.500	3.620	8.340E-06	31.8	4,779	2,101	3.090E-03	1.823	Upper	Standing Wave	
15	8.508-03	3.75	0.490	3.960	8.600E-06	30.5	5,394	2,171	3.080E-03	1.775	Upper	Standing Wave	

มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทราย เท่ากับ 0.95 มิลลิเมตร ค่าการเรียงเม็ดของทราย (Gradation) เท่ากับ 1.824 (รูปที่ 4.3)

4. จำนวน 130 ครั้งของการทดลอง โดย Simons และ Richardson (1961) ข้อมูลผลการทดลองเหล่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 ถึง 4.11 ได้แก่ขนาดของเม็ดทรายเฉลี่ย เท่ากับ 0.19, 0.27, 0.28, 0.32 และ 0.47 มิลลิเมตร ตามลำดับ

#### 4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอย (Suspended load) กับตะกอนทั้งหมด (Total load) และศึกษาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Einstein และสมการของ Meyer - Peter และ Muller

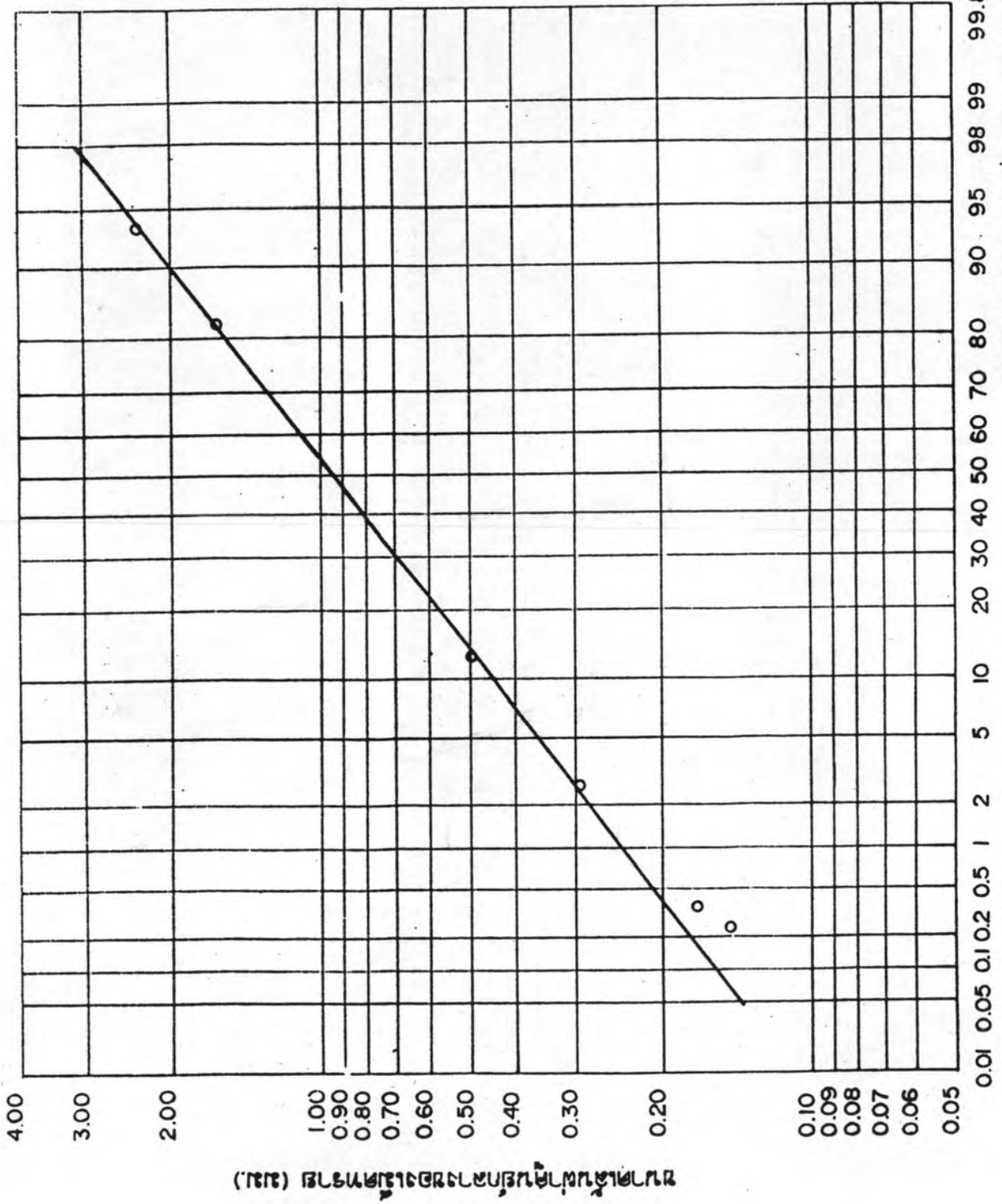
4.2.1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย กับความเข้มข้นของตะกอนทั้งหมด

1. ความเข้มข้นระหว่างตะกอนแขวนลอย ,  $C_s$  กับความเข้มข้นของตะกอนทั้งหมด  $C_t$  ในหน่วย ppm. สำหรับรูปแบบความขรุขระของ ท้องน้ำลักษณะใดลักษณะหนึ่ง จากข้อมูลการทดลองของทรายขนาดเม็ดเฉลี่ยหลายขนาด ซึ่งผลที่ได้สามารถแสดงในรูปของกราฟและกำหนดเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

สำหรับลักษณะท้องน้ำเป็นริบเปิ้ล (Ripple) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด ในหน่วย ppm. แสดงในรูปที่ 4.4 และสามารถกำหนดค่าความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้เป็น

$$C_s = 0.2849 (C_t) - 1.7672 \quad (4-1)$$

หรือ  $C_s = 30 \% (C_t)$  โดยประมาณ



รูปที่ 4.3 กราฟการกระจายของไอน้ำขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.95 มม. (σ = 1.824)

เปอร์เซ็นต์ของไอน้ำที่ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (%)



ตารางที่ 4.7 ข้อมูลจากผลการทดลองของ Simons และ Richardson สำหรับทรายขนาด

เม็ดเฉลี่ย 0.19 มม.

Run No.	Total Bed Material Discharge Ct, (ppm.)	Suspended Bed Material Discharge Cs, (ppm.)	Bed Material		Bed Form
			Ave. Diameter (ft.)	Gradation (-)	
2	0	0	6.560E-04	1.340	Ripples
1	1	0	6.430E-04	1.320	Ripples
5	120	105	6.400E-04	1.360	Ripples
23	2	0	5.970E-04	1.330	Ripples
29	58	31	6.430E-04	1.310	Ripples
8	519	506	6.300E-04	1.330	Dunes
11	1,300	795	5.830E-04	1.320	Dunes
34	503	393	6.530E-04	1.300	Dunes
12	1,270	929	5.930E-04	1.360	Dunes
6	861	550	6.200E-04	1.330	Dunes
7	1,240	918	6.140E-04	1.330	Dunes
35	999	729	6.560E-04	1.270	Dunes
9	1,210	697	6.230E-04	1.340	Dunes
13	1,240	772	5.900E-04	1.310	Transition
14	1,490	950	5.640E-04	1.290	Transition
15	2,000	1,130	5.840E-04	1.320	Transition
16	2,750	1,350	5.970E-04	1.310	Transition
10	2,480	861	5.870E-04	1.330	Transition
17	4,650	4,030	5.610E-04	1.390	Antidunes
18	9,240	7,270	5.970E-04	1.300	Antidunes
20	23,900	23,300	5.900E-04	1.300	Antidunes
21	25,200	21,900	-	-	Antidunes

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลจากผลการทดลองของ Simons และ Richardson สำหรับทรายขนาด

เม็ดเฉลี่ย 0.27 มม.

Run No.	Total Bed Material Discharge Ct, (ppm.)	Suspended Bed Material Discharge Cs, (ppm.)	Bed Material		Bed Form
			Ave. Diameter (ft.)	Gradation (-)	
50D	0.5	0	8.560E-04	1.480	Ripples
51	12	9	8.890E-04	1.600	Ripples
52	98	57	8.200E-04	1.520	Ripples
57	93	0	9.510E-04	1.520	Ripples
54	200	157	9.350E-04	1.570	Dunes
56	550	407	8.230E-04	1.540	Dunes
43	931	556	9.120E-04	1.500	Dunes
44	833	623	8.560E-04	1.420	Dunes
42	704	416	8.370E-04	1.540	Dunes
58	753	751	9.020E-04	1.520	Dunes
45	1270	679	9.510E-04	1.760	Transition
46	1670	857	8.270E-04	1.560	Transition
47	4760	3770	8.630E-04	1.510	Antidunes

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลจากผลการทดลองของ Simons และ Richardson สำหรับทรายขนาด

เม็ดเฉลี่ย 0.28 มม.

Run No.	Total Bed Material Discharge Ct, (ppm.)	Suspended Bed Material Discharge Cs, (ppm.)	Bed Material		Bed Form
			Ave. Diameter (ft.)	Gradation (-)	
8B	3	0	9.850E-04	1.780	Ripples
10	1	0	8.660E-04	1.520	Ripples
5	12	0	9.850E-04	1.620	Ripples
4	51	0	9.020E-04	1.510	Ripples
11	20	0	9.510E-04	1.570	Ripples
12	150	74	8.860E-04	1.640	Ripples
14	298	134	8.530E-04	1.610	Dunes
20	506	347	9.280E-04	1.650	Dunes
2	664	583	9.180E-04	1.800	Dunes
21	732	528	8.660E-04	1.530	Dunes
19	563	423	8.700E-04	1.650	Dunes
16	549	436	8.200E-04	1.650	Dunes
17	505	262	8.920E-04	1.690	Dunes
3	733	445	8.430E-04	1.680	Dunes
15	789	389	8.370E-04	1.690	Dunes
23	1,230	608	9.970E-04	1.710	Transition
18	1,040	439	8.140E-04	1.670	Transition
30	1,370	548	9.750E-04	1.710	Transition
24	2,350	763	8.990E-04	1.730	Transition
22	1,540	442	9.510E-04	1.720	Plane
25	2,710	972	1.031E-03	1.700	Plane
28	2,760	804	8.730E-04	1.580	Plane
29	3,120	1,240	9.290E-04	1.690	Plane
26	5,060	1,740	8.860E-04	1.600	Antidunes
32	10,500	9,490	8.460E-04	1.650	Antidunes
27	11,500	8,240	9.160E-04	1.620	Antidunes
37	19,900	7,820	9.350E-04	1.700	Antidunes
38	36,100	33,800	9.120E-04	1.630	Antidunes

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลจากผลการทดลองของ Simons และ Richardson สำหรับทรายขนาด

เม็ดเฉลี่ย 0.32 มม.

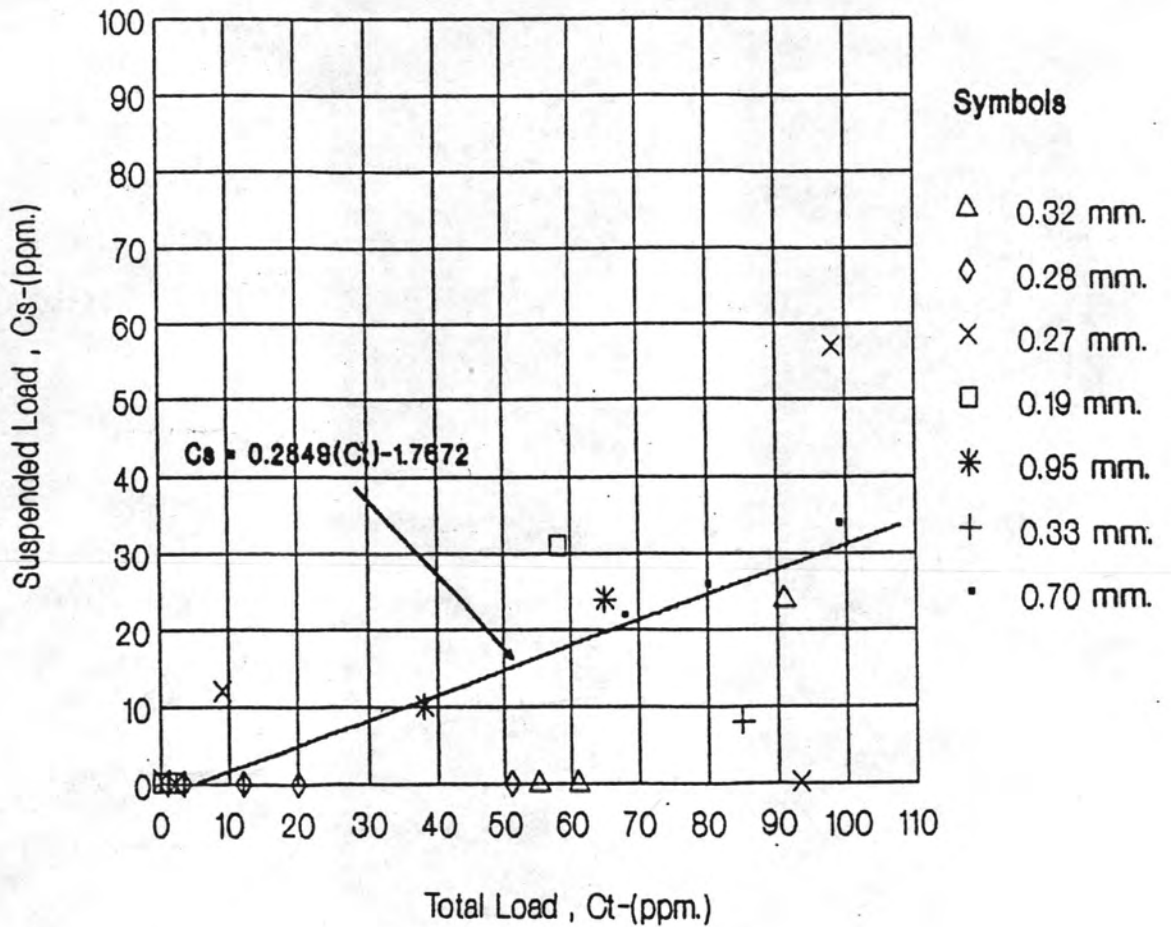
Run No.	Total Bed Material Discharge Ct, (ppm.)	Suspended Bed Material Discharge Cs, (ppm.)	Bed Material		Bed Form
			Ave. Diameter (ft.)	Gradation (-)	
3	55	0	-	-	Ripples
4	61	0	8.540E-03	1.560	Ripples
30	91	24	1.021E-03	1.440	Ripples
29	117	9	1.019E-03	1.460	Dunes
5	226	56	8.370E-04	1.500	Dunes
6	168	33	8.540E-04	1.580	Dunes
27	455	168	1.038E-03	1.520	Dunes
28	787	251	1.035E-03	1.570	Dunes
26	854	80	1.071E-03	1.620	Dunes
25	719	274	1.019E-03	1.520	Dunes
21	907	196	1.035E-03	1.650	Transition
22	1150	498	1.051E-03	1.500	Transition
24	683	307	9.690E-04	1.490	Transition
23	1150	227	9.160E-04	1.400	Transition
8	1720	248	1.003E-03	1.590	Transition
7	1410	196	9.500E-04	1.040	Transition
19	4340	735	9.790E-04	1.420	Plane
10	5180	2020	1.001E-03	1.640	Plane
12	3520	1480	1.051E-03	1.560	Plane
20	5600	1520	1.001E-03	1.450	Antidunes
9	5530	1480	9.350E-04	1.500	Antidunes
11	5250	1810	1.051E-03	1.480	Antidunes
14	12300	5340	1.215E-03	1.560	Antidunes
13	8780	2100	1.049E-03	1.490	Antidunes
15	26100	19000	1.160E-03	1.590	Antidunes
16	21000	14700	1.527E-03	1.890	Antidunes
18	20800	17400	1.231E-03	1.600	Antidunes

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลจากผลการทดลองของ Simons และ Richardson สำหรับทรายขนาด

เม็ดเฉลี่ย 0.47 มม.

Run No.	Total Bed Material Discharge Ct, (ppm.)	Suspended Bed Material Discharge Cs, (ppm.)	Bed Material		Bed Form
			Ave. Diameter (ft.)	Gradation (-)	
86	4,800	4,070	1.437E-03	1.560	Ripples
87	8,400	7,100	1.521E-03	1.560	Ripples
88	11,400	10,000	1.640E-03	1.540	Ripples
90	6,990	6,690	1.355E-03	1.540	Ripples
89	9,030	7,490	1.509E-03	1.480	Ripples
93	100	53	1.742E-03	1.500	Dunes
92	6,180	5,350	1.619E-03	1.550	Dunes
91	8,660	8,050	1.610E-03	1.580	Dunes
82	562	235	1.679E-03	1.550	Dunes
52	2,200	1,830	1.417E-03	1.470	Dunes
76	9,790	9,520	1.456E-03	1.510	Dunes
53	11,200	2,750	1.564E-03	1.590	Dunes
83	588	503	1.633E-03	1.540	Dunes
54	2,600	2,590	1.469E-03	1.510	Dunes
55	4,820	3,140	1.692E-03	1.53	Dunes
57	5,080	5,010	1.518E-03	1.390	Dunes
58	6,080	4,220	1.535E-03	1.480	Dunes
78	13,500	13,306	1.453E-03	1.490	Dunes
59	7,490	5,820	1.535E-03	1.500	Dunes
60	6,890	4,390	1.699E-03	1.480	Plane
61	9,560	7,910	1.722E-03	1.550	Plane
71	8,850	3,040	1.673E-03	1.610	Plane
72	12,800	7,490	1.588E-03	1.560	Plane
70	10,200	3,840	1.515E-03	1.630	Plane
100	8,550	4,240	1.561E-03	1.510	Plane
81	4,490	3,380	1.584E-03	1.660	Standing Wave
62	9,280	7,320	1.647E-03	1.480	Standing Wave
67	15,600	11,400	1.620E-03	1.550	Standing Wave
79	18,200	15,200	1.355E-03	1.480	Standing Wave
68	14,400	12,400	1.738E-03	1.580	Standing Wave
63	8,380	4,540	1.535E-03	1.540	Antidunes
64	12,000	8,400	1.601E-03	1.560	Antidunes
65	14,200	11,600	1.506E-03	1.490	Antidunes
66	17,400	16,600	1.526E-03	1.560	Antidunes
80	19,100	14,000	1.594E-03	1.460	Antidunes
84	7,110	3,700	1.640E-03	1.530	Antidunes
69	15,300	9,890	1.430E-03	1.580	Antidunes
98	59,700	57,700	1.440E-03	1.570	Antidunes
99	43,000	42,300	1.492E-03	1.600	Antidunes
07	14,800	6,300	1.597E-03	1.660	Antidunes

### Relation of Total Load & Suspended Load in pmm. for Ripple Bed Form



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับลักษณะท้องน้ำแบบริบเบิล

สำหรับลักษณะท้องน้ำที่เป็นเนิน (Dunes) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_s$  กับ  $C_u$  แสดงในรูปที่ 4.5 และสมการที่ได้ คือ

$$C_s = 0.7873 (C_u) - 155.148 \quad (4-2)$$

หรือ  $C_s = 80 \% (C_u)$  โดยประมาณ

สำหรับลักษณะท้องน้ำเป็นทรานซิชัน (Transition) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_s$  กับ  $C_u$  แสดงในรูปที่ 4.6 และสมการความสัมพันธ์ คือ

$$C_s = 0.7526 (C_u) - 481.439 \quad (4-3)$$

สำหรับท้องน้ำที่เป็นเพลนเบด (Plan bed) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_s$  กับ  $C_u$  แสดงในรูปที่ 4.7 และสมการความสัมพันธ์ คือ

$$C_s = 0.6267 (C_u) - 869.906 \quad (4-4)$$

สำหรับลักษณะท้องน้ำเป็นแอสแตนดิงเวฟ (Standing wave) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_s$  กับ  $C_u$  แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 และสมการความสัมพันธ์ คือ

$$C_s = 0.9343 (C_u) - 2117.38 \quad (4-5)$$

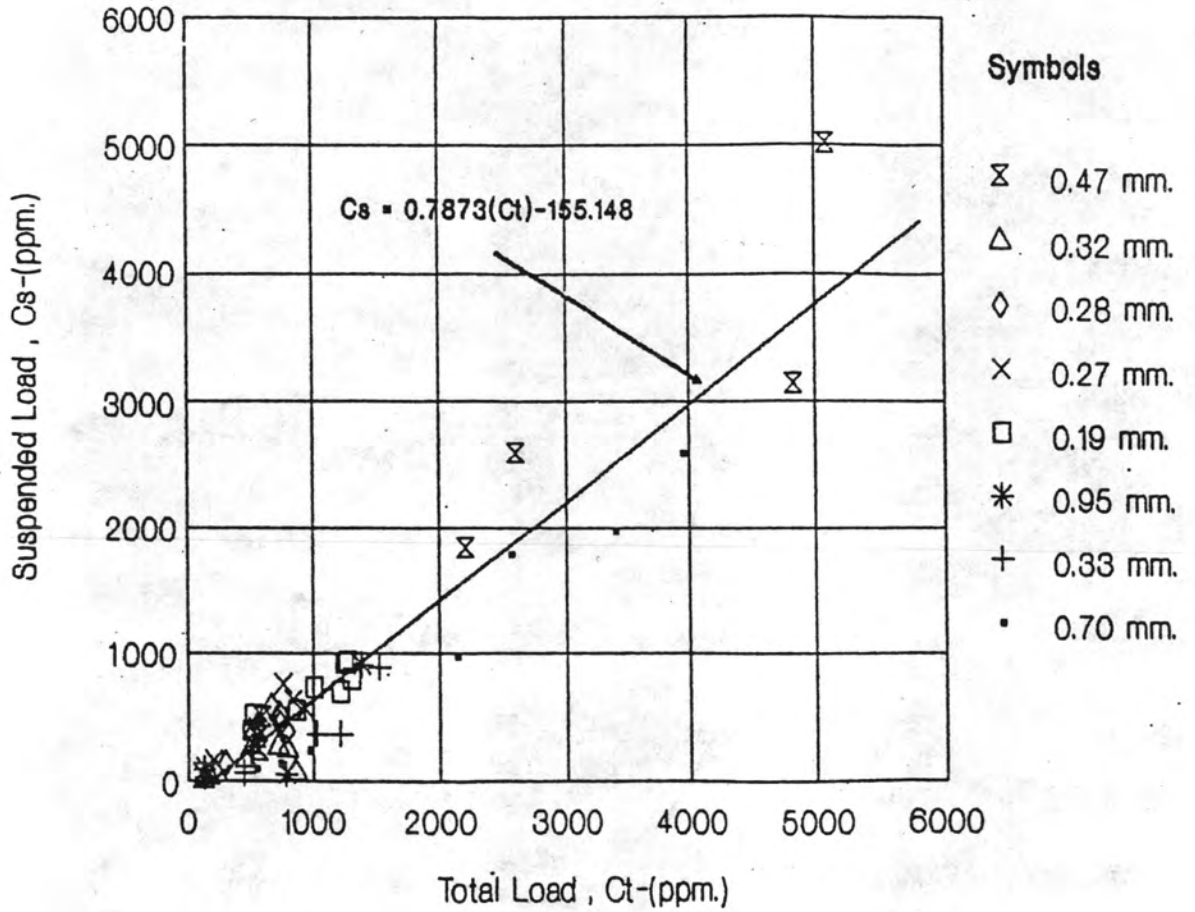
สำหรับแอนติดูน (Antidunes) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย,  $C_s$  กับตะกอนทั้งหมด,  $C_u$  แสดงในรูปที่ 4.9 และสมการความสัมพันธ์ที่ได้ คือ

$$C_s = 1.017 (C_u) - 4897.09 \quad (4-6)$$

2. กรณีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยกับความเข้มข้นของตะกอนทั้งหมด ในทุกลักษณะความขรุขระของท้องน้ำ (หน่วย ppm.) สำหรับขนาดเม็ดทรายเฉลี่ยหลายขนาด แสดงในรูปที่ 4.10 และความสัมพันธ์ในรูปของสมการ คือ

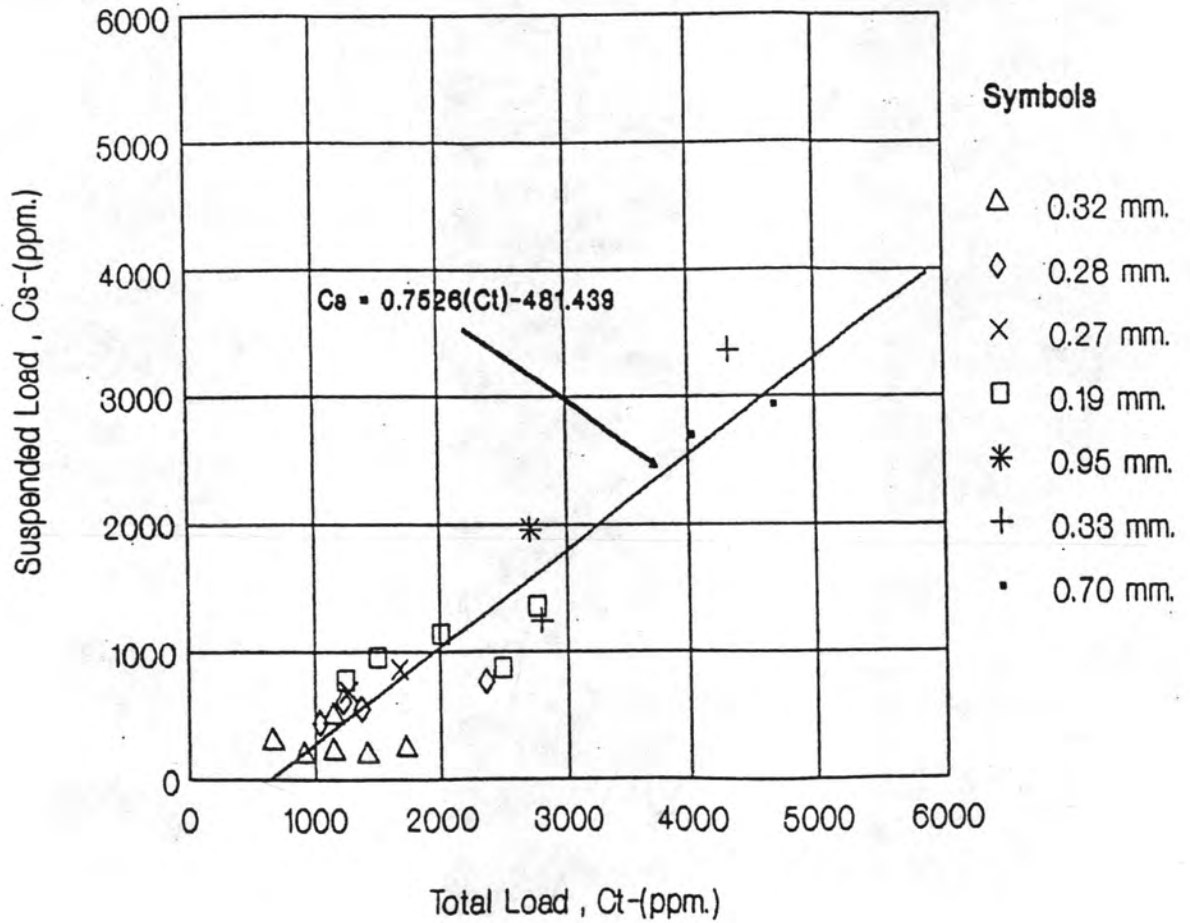
$$C_s = 0.215 (C_u)^{1.1045} \quad (4-7)$$

### Relation of Total Load & Suspended Load in pmm. for dune Bed Form



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับลักษณะท้องน้ำแบบดอน

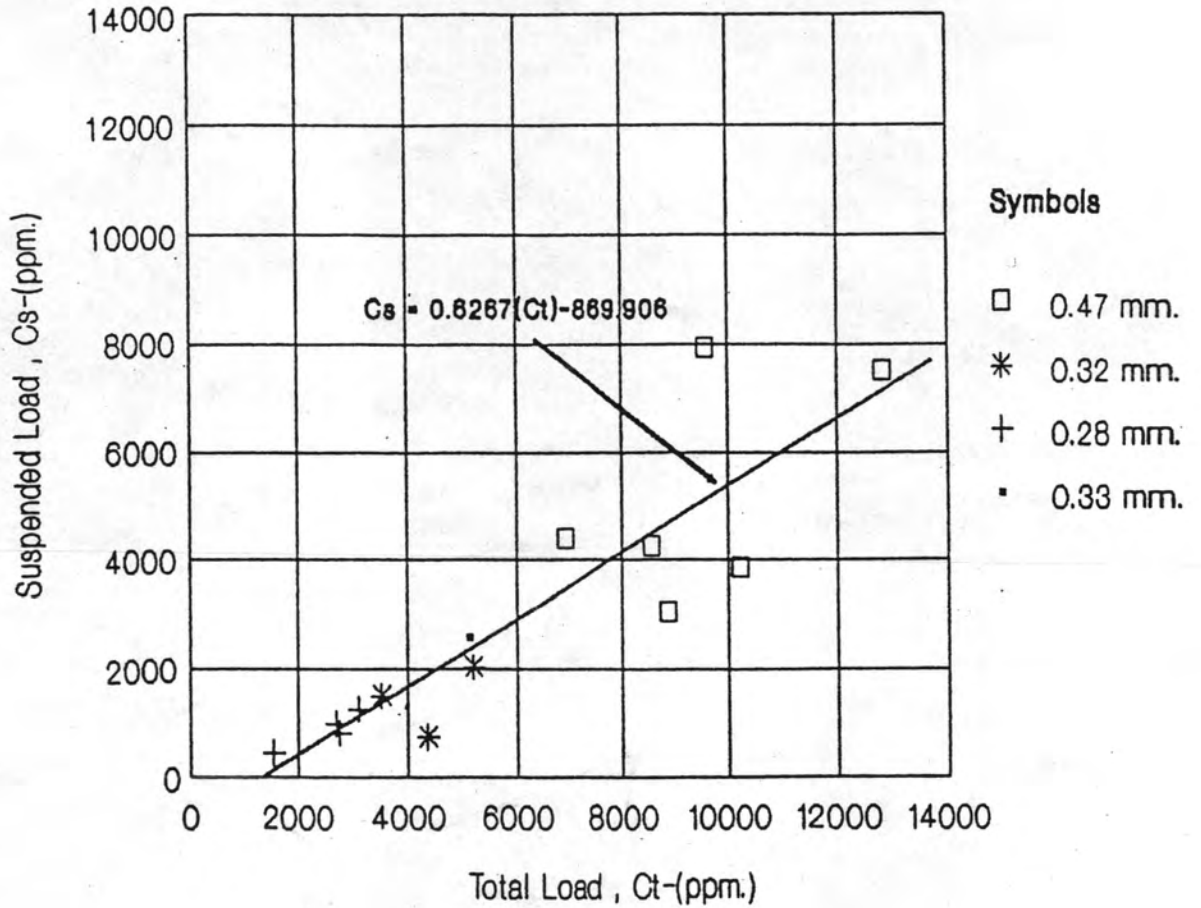
### Relation of Total Load & Suspended Load in ppm. for Transition Bed Form



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับลักษณะท้องน้ำแบบทรานซิชัน



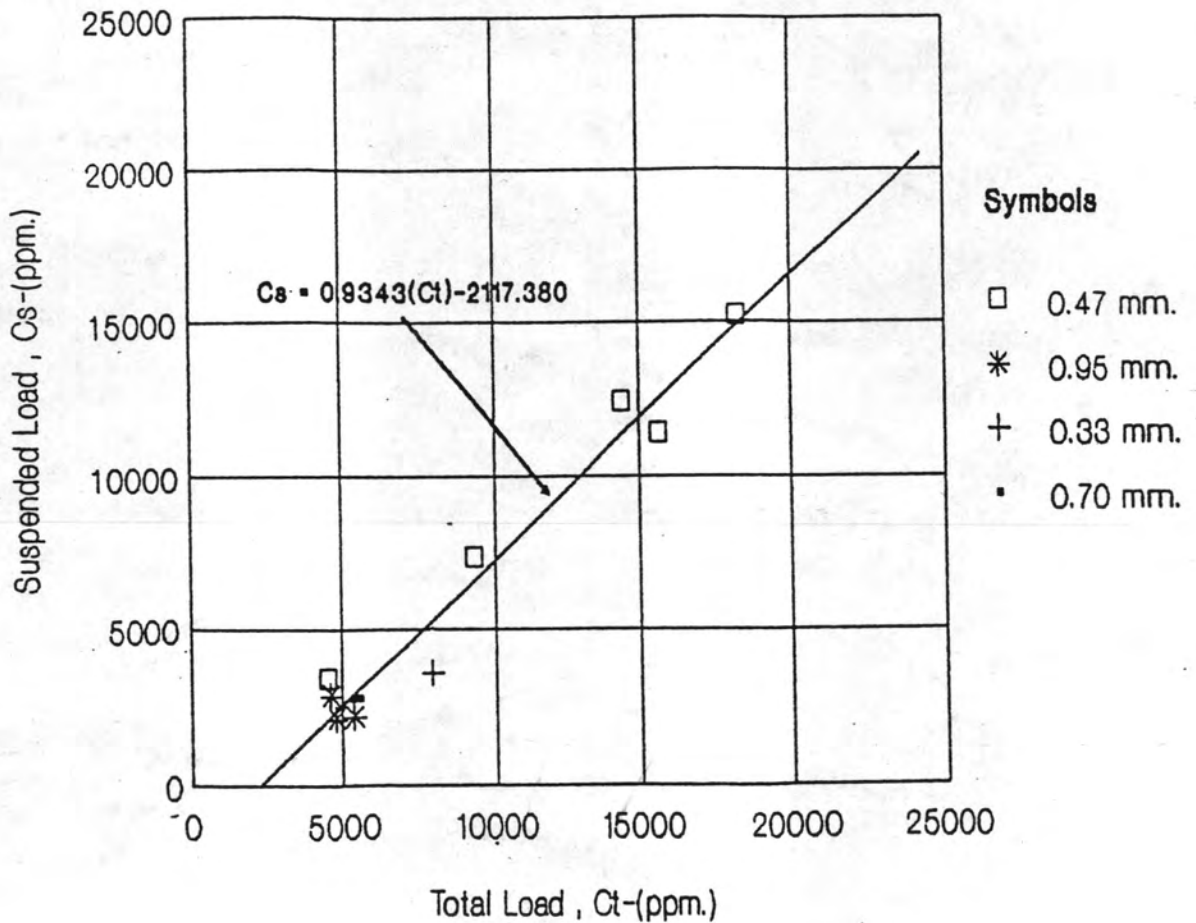
### Relation of Total Load & Suspended Load in ppm for Plane Bed in the upper regime



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับลักษณะที่อน้ำแบบเพเลนเบด

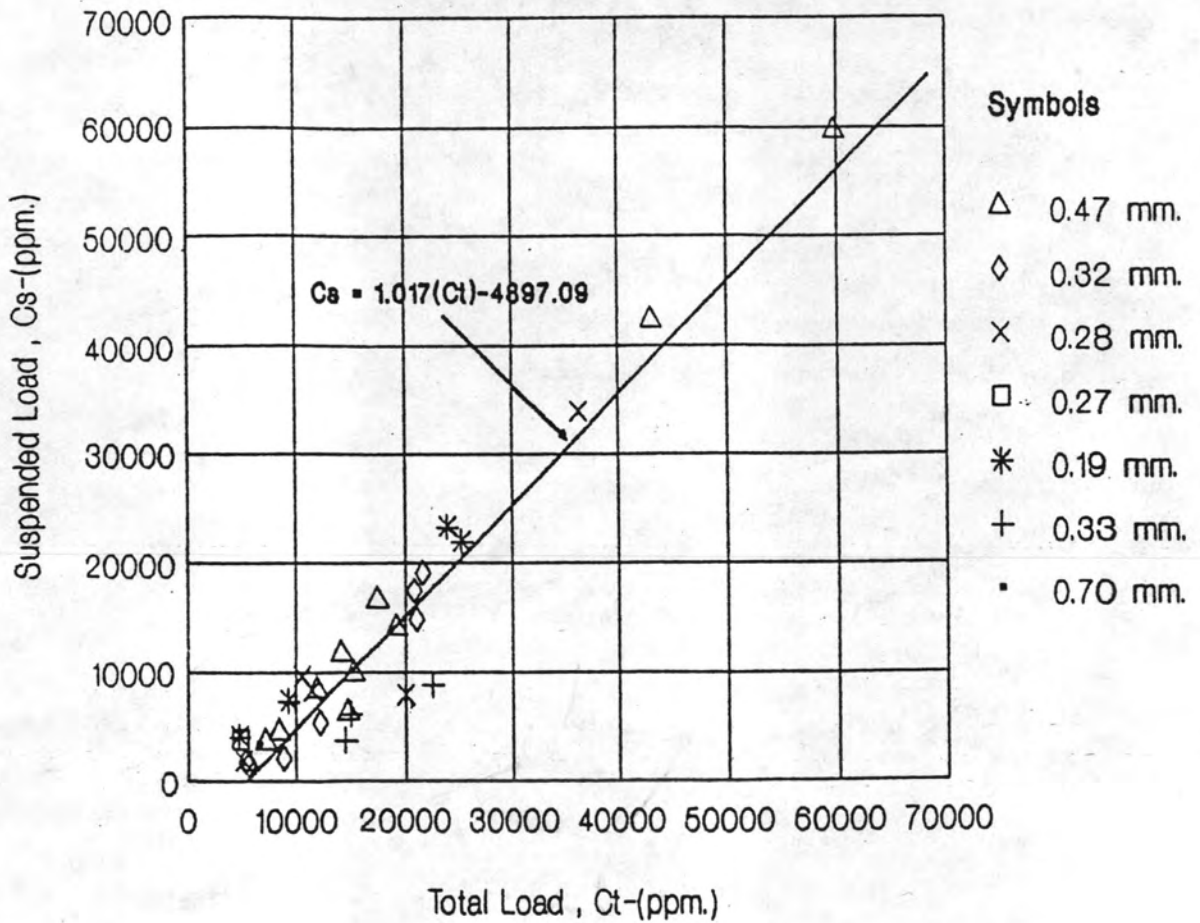


### Relation of Total Load & Suspended Load in ppm. for Standing Wave Bed Form

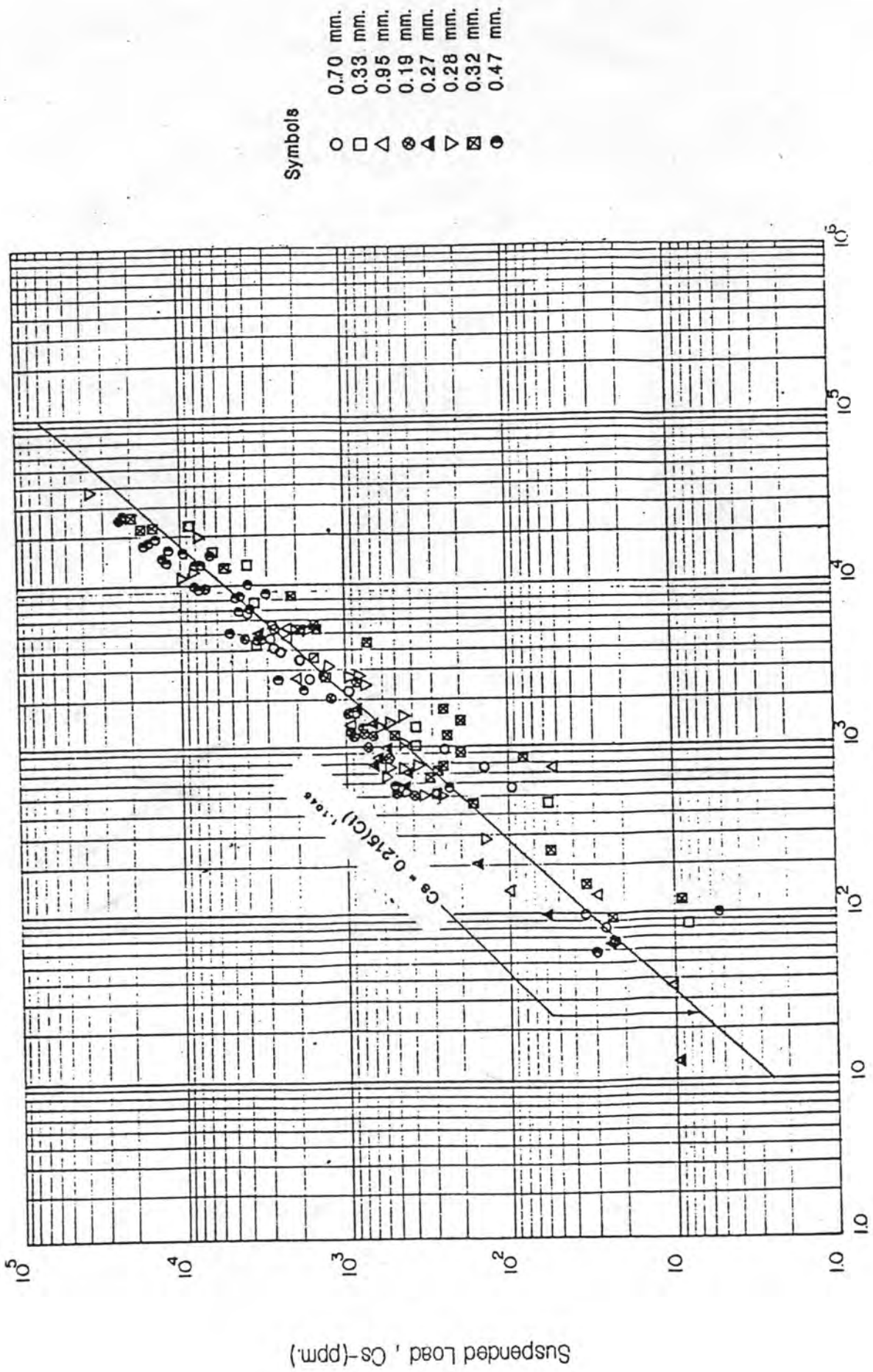


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับลักษณะท้องน้ำแบบ แลตนด์เวฟ

### Relation of Total Load & Suspended Load in pmm. for Antidunes Bed Form



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับลักษณะท้องน้ำแบบแอนติดูน



Suspended Load, Cs (ppm.)

Total Load, Ct (ppm.)

Symbols

- 0.70 mm.
- 0.33 mm.
- △ 0.95 mm.
- ◇ 0.19 mm.
- ▽ 0.27 mm.
- ◻ 0.28 mm.
- 0.32 mm.
- 0.47 mm.

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับทุกลักษณะของน้ำของทรายเม็ดเฉลี่ยหลายขนาด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย กับความเข้มข้นของตะกอนทั้งหมดในทุกลักษณะความขรุขระของท้องน้ำ สำหรับทรายขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.70 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.13$ ), 0.33 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.07$ ) และ 0.95 มิลลิเมตร ( $\sigma = 1.82$ ) แสดงไว้ในรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ และสมการความสัมพันธ์ได้มีดังนี้

$$\text{ทราย 0.70 มิลลิเมตร } (\sigma = 2.13), \\ C_s = 0.1165 (C_u)^{1.177} \quad (4-8)$$

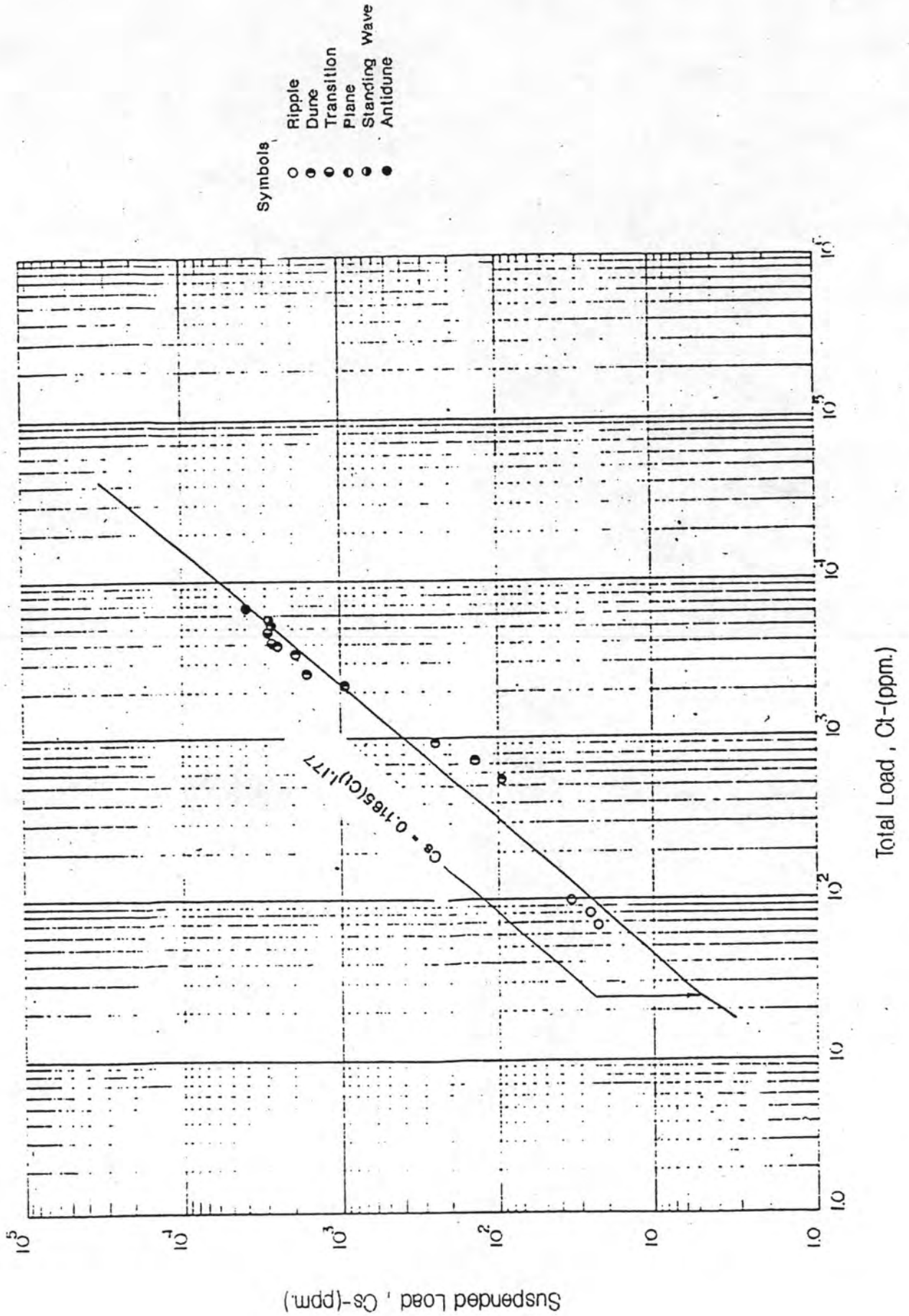
$$\text{ทราย 0.33 มิลลิเมตร } (\sigma = 2.07), \\ C_s = 0.0675 (C_u)^{1.210} \quad (4-9)$$

$$\text{ทราย 0.95 มิลลิเมตร } (\sigma = 1.82), \\ C_s = 0.2080 (C_u)^{1.095} \quad (4-10)$$

เมื่อนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้คือ สมการ 4-8, 4-9 และ 4-10 มาวิเคราะห์พบว่าเส้นกราฟของทรายขนาด 0.70 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.13$ ) และ ทรายขนาด 0.33 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.07$ ) เกือบจะขนานกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.14) แสดงว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดทราย จะมีผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ของตะกอนทรายท้องน้ำ ในทำนองเดียวกันค่าการเรียงเม็ดของทราย ก็จะมีผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ของตะกอนเช่นกัน

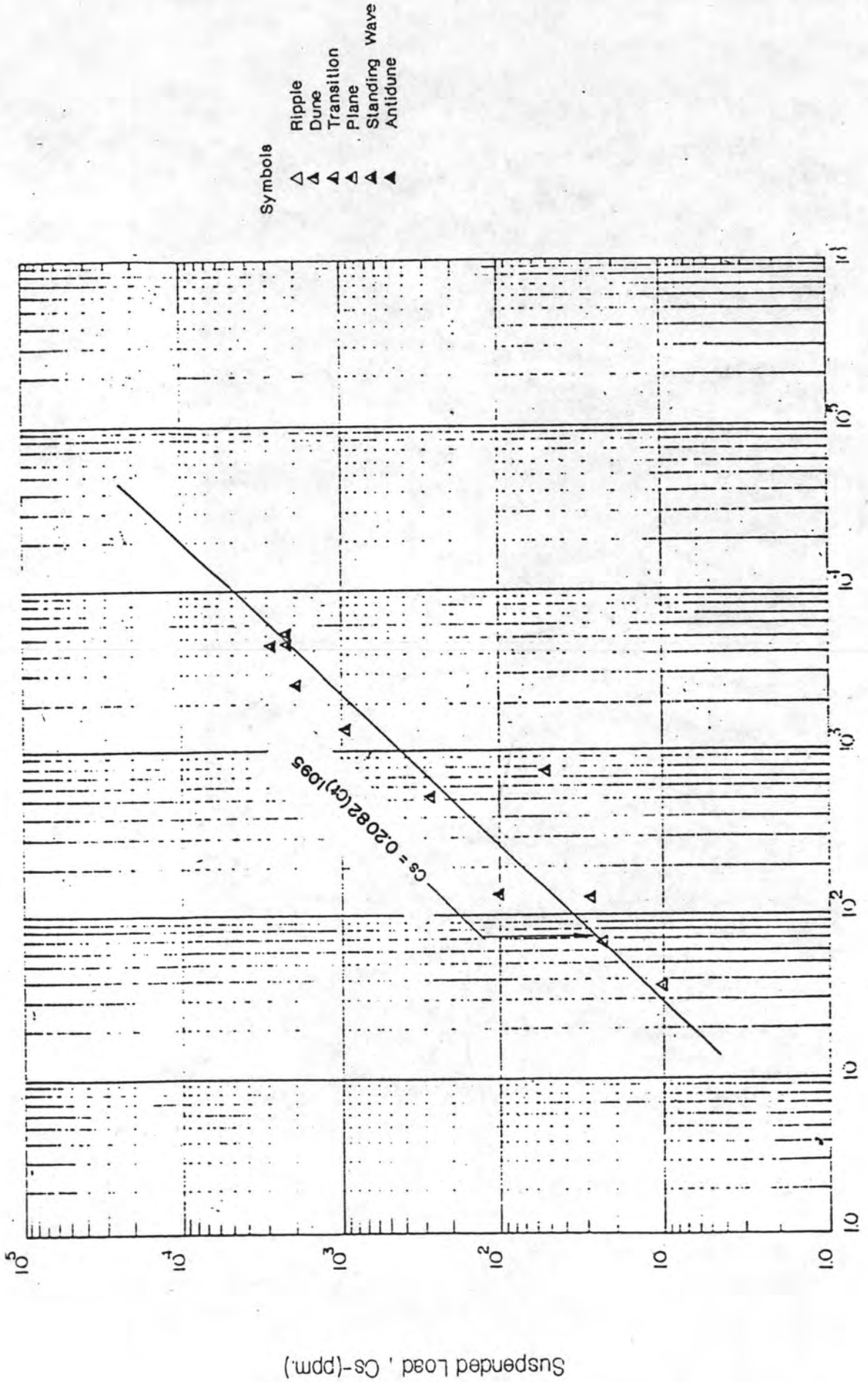
#### 4.2.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการของ Einstein และ Meyer-Peter และ Muller

1. การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (Bed load discharge) ซึ่งได้จากค่าตะกอนทั้งหมดหักออกด้วยค่า ตะกอนแขวนลอย (หน่วยเป็นตัน/วัน/ฟุต),  $q_b$  กับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ที่คำนวณจากสมการของ Einstein,  $q_E$  กับสมการของ Meyer-Peter และ Muller,  $q_s$  (รายละเอียดและตัวอย่างการคำนวณ แสดงไว้ใน ภาคผนวก ข.)

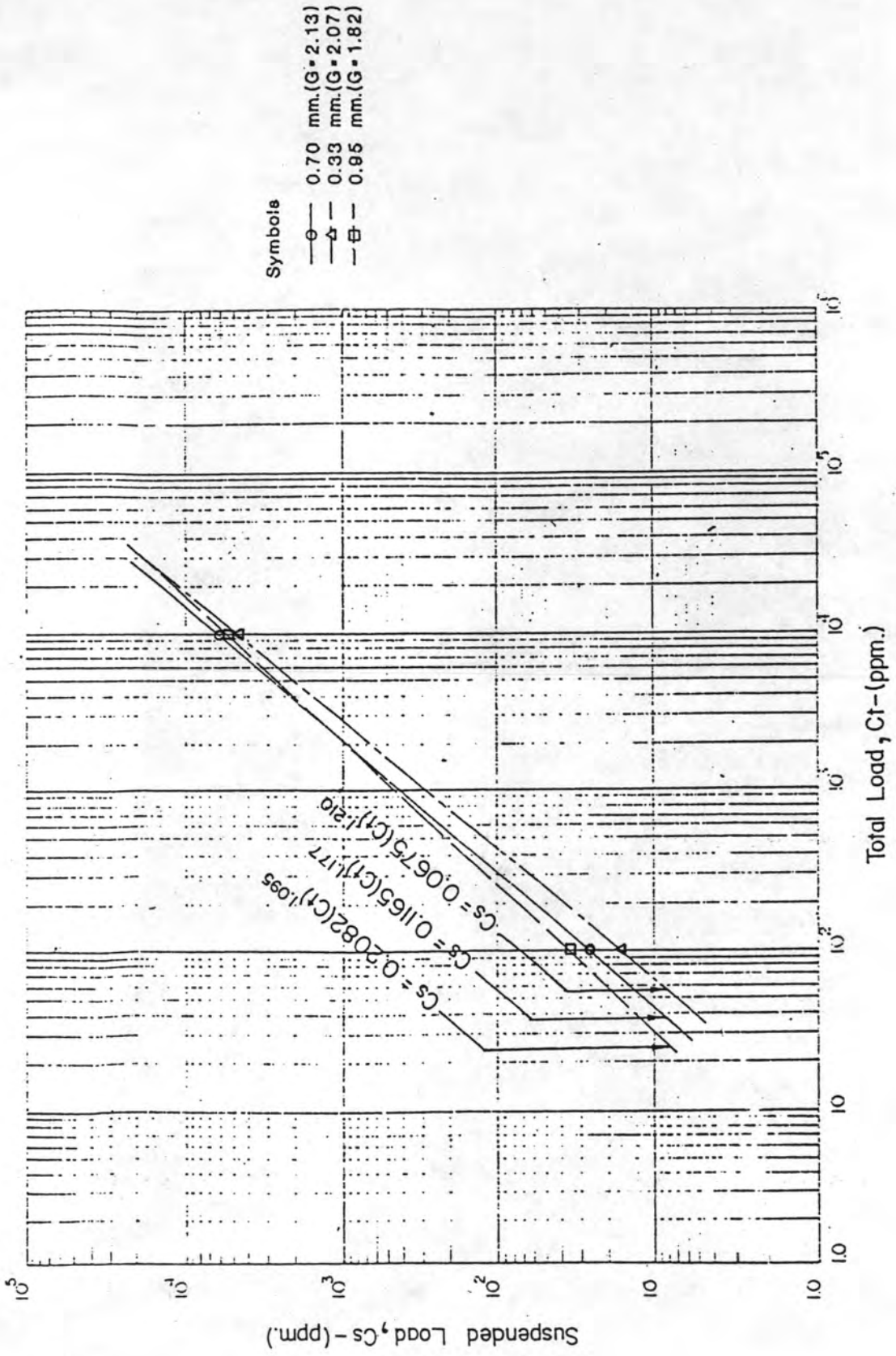


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับทุกลักษณะท้องน้ำของทรายเม็ดเฉลี่ย 0.70 มม. ( $\sigma = 2.13$ )





รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด สำหรับทุกลักษณะของน้ำของทรายเม็ดเฉลี่ย 0.95 มม. ( $\sigma = 1.82$ )



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยกับตะกอนทั้งหมด ของทราย 0.70, 0.33 และ 0.95 มม.



สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.70 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.13$ )  
แสดงผลการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.15 กับรูปที่ 4.16  
สมการที่ได้มีดังนี้

เปรียบเทียบกับสมการของ Einstein

$$q_m = 0.79 (q_g) + 0.1647 \quad (4-11)$$

เปรียบเทียบกับสมการของ Meyer-Peter และ Muller

$$q_m = 0.665 (g_s) - 0.3583 \quad (4-12)$$

สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.33 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.07$ )  
แสดงผลการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.17 กับรูปที่ 4.18  
สมการที่ได้มีดังนี้

เปรียบเทียบกับสมการของ Einstein

$$q_m = 3.51 (q_g) + 5.3938 \quad (4-13)$$

เปรียบเทียบกับสมการของ Meyer-Peter และ Muller

$$q_m = 2.929 (g_s) - 3.4287 \quad (4-14)$$

สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.95 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.07$ ) ผล  
การเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.19 กับรูปที่ 4.20 และ  
สมการที่ได้มีดังนี้

เปรียบเทียบกับสมการของ Einstein

$$q_m = 0.6821 (q_g) - 0.2992 \quad (4-15)$$

เปรียบเทียบกับสมการของ Meyer-Peter และ Muller

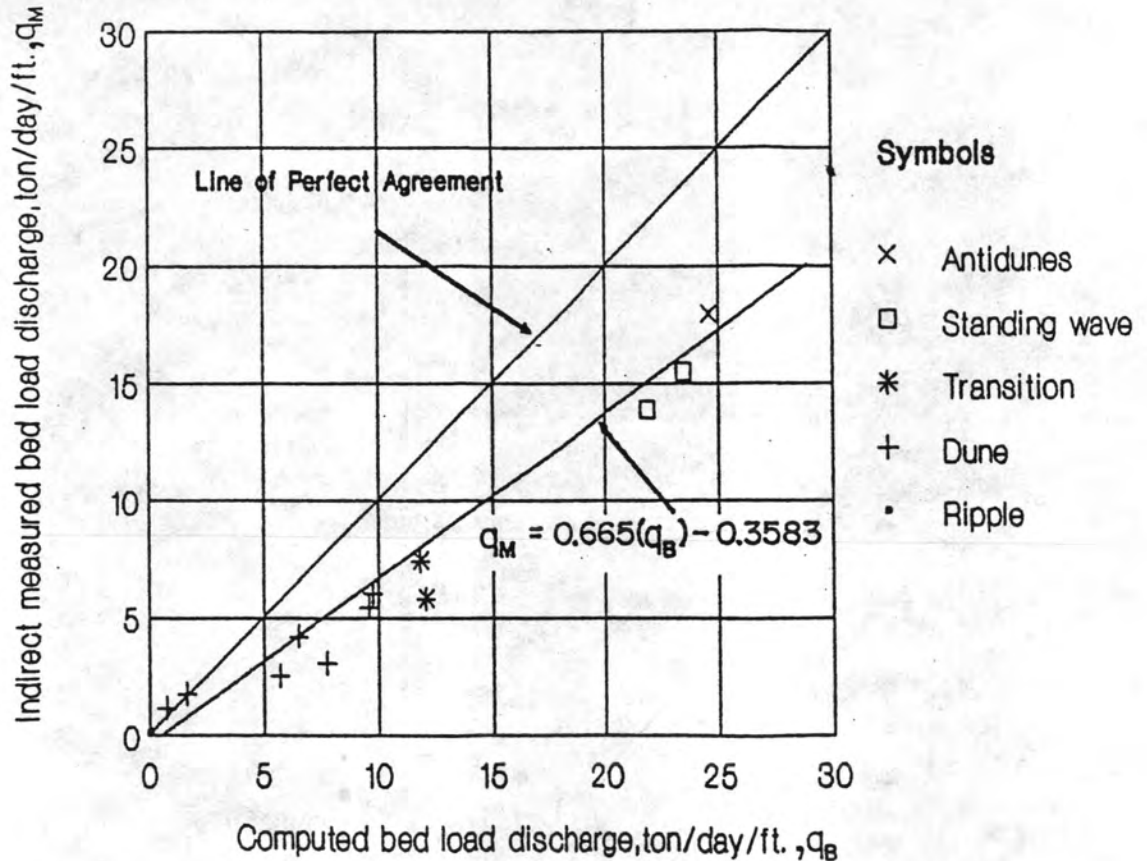
$$q_m = 1.0813 (g_s) - 0.79 \quad (4-16)$$

ซึ่งจากการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ  
จากผลการทดลองกับสมการของ Einstein และกับสมการของ Meyer-Peter  
และ Muller พบว่าสมการของ Meyer-Peter และ Muller ให้ผลใกล้เคียง  
เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการของ Einstein โดยเฉพาะทรายที่มีขนาด

ตารางที่ 4.12 อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายจากผลการทดลอง และผลการคำนวณโดยวิธีของ Einstein และ  
วิธีของ Meyer-Peter และ Muller สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.70 มม. ( $\sigma = 2.13$ )

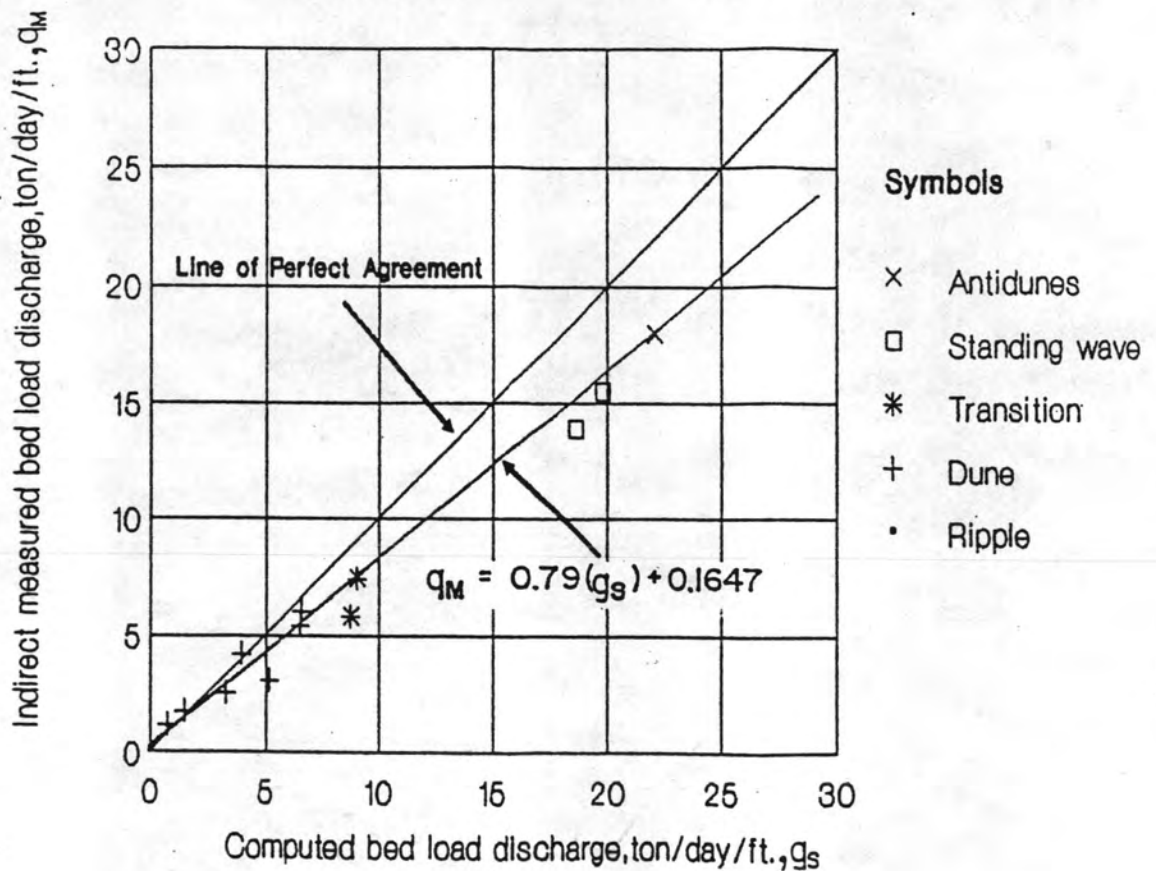
Run no.	Bed Form	Meyer-Peter&Muller Bed Load Discharge (ton/day/ft.)	Einstein's Bed Load Discharge (ton/day/ft.)	Total Discharge (ton/day/ft.)	Einstein's Total Load Discharge (ton/day/ft.)	Total Discharge (ton/day/ft.)	Measured Total Load Discharge (ton/day/ft.)	Indirect measured Bed Load Discharge (ton/day/ft.)
2	Ripple	0.0000	0.0031	0.0031	0.0031	0.0116	0.0116	0.0748
3	Ripple	0.0000	0.0561	0.0561	0.0566	0.1997	0.1997	0.1311
5	Ripple	0.0000	0.0099	0.0099	0.0099	0.1204	0.1204	0.0813
1	Dune	0.7702	0.7847	1.5549	0.7904	1.3969	1.3969	1.1573
4	Dune <sup>a</sup>	1.4884	1.6392	3.1276	1.8525	2.1323	2.1323	1.7394
6	Dune	3.2673	5.7005	8.9678	6.9918	3.3342	3.3342	2.5187
7	Dune	3.9354	6.5558	10.4912	8.3005	7.6970	7.6970	4.2236
8	Dune	5.1327	7.7917	12.9244	9.7071	9.9174	9.9174	3.0598
9	Dune	6.6074	9.7553	16.3627	13.5712	14.1738	14.1738	6.0210
12	Dune	6.5419	9.6073	16.1492	13.1267	15.8107	15.8107	5.4344
13	Transition	9.0476	11.8589	20.9065	15.7483	19.9343	19.9343	7.4232
14	Transition	8.7611	12.1120	20.8731	16.7021	17.6530	17.6530	5.8098
10	Standing Wave	18.5056	21.8397	40.3453	31.3323	28.5007	28.5007	13.8492
11	Standing Wave	19.7481	23.4287	43.1768	33.9962	30.8360	30.8360	15.4457
15	Antidunes	20.7052	24.5320	45.2372	40.9652	37.4143	37.4143	17.9223

Comparison between Indirect measured and Computed Bed Load (by Einstein's method) for 0.70 mm. Sand ( $\sigma=2.13$ )



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำระหว่างผลจากการทดลองกับผลการของ Einstein สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.70 มม. ( $\sigma=2.134$ )

Comparison between Indirect measured  
and Computed Bed Load (by Meyer-Peter &  
Muller) for 0.70 mm. Sand ( $\sigma=2.13$ )

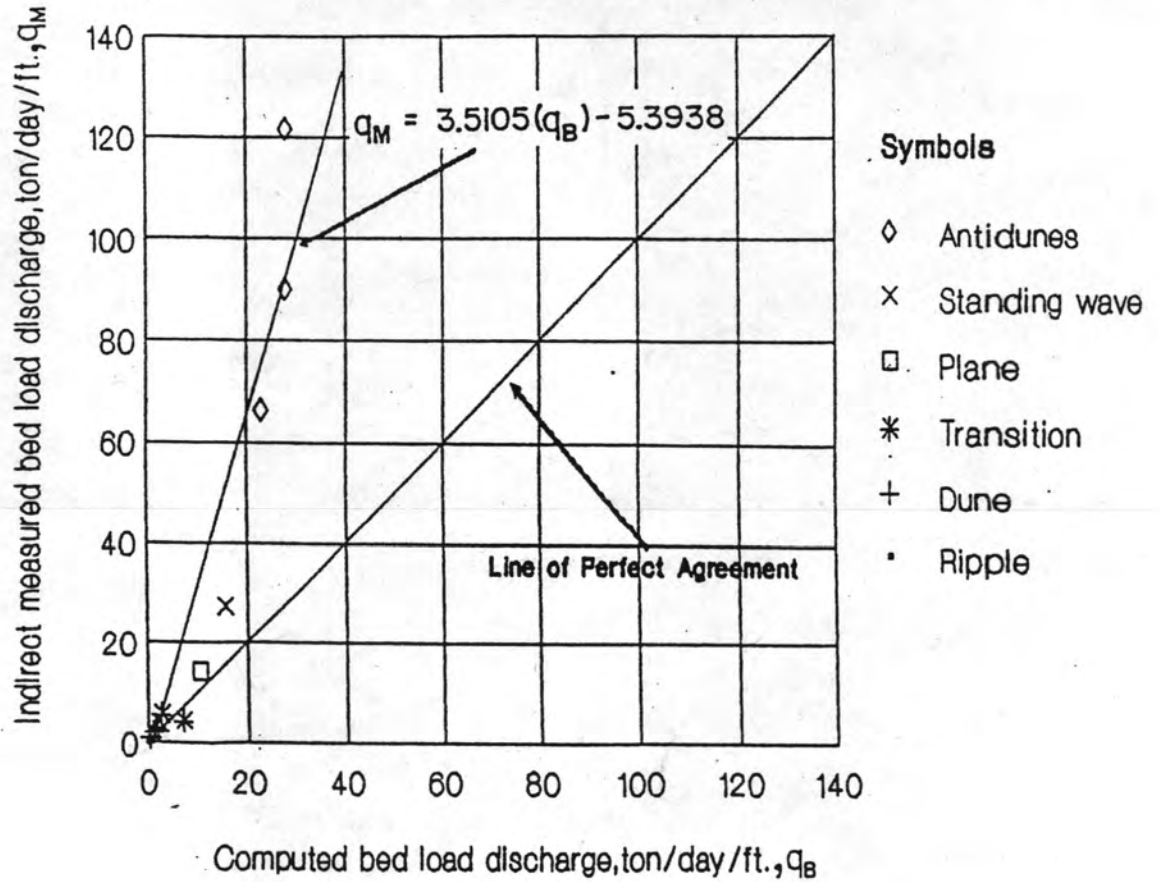


รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำระหว่างผลจากการทดลอง  
กับผลการของ Meyer-Peter และ Muller สำหรับทราย 0.70 มม. ( $\sigma = 2.134$ )

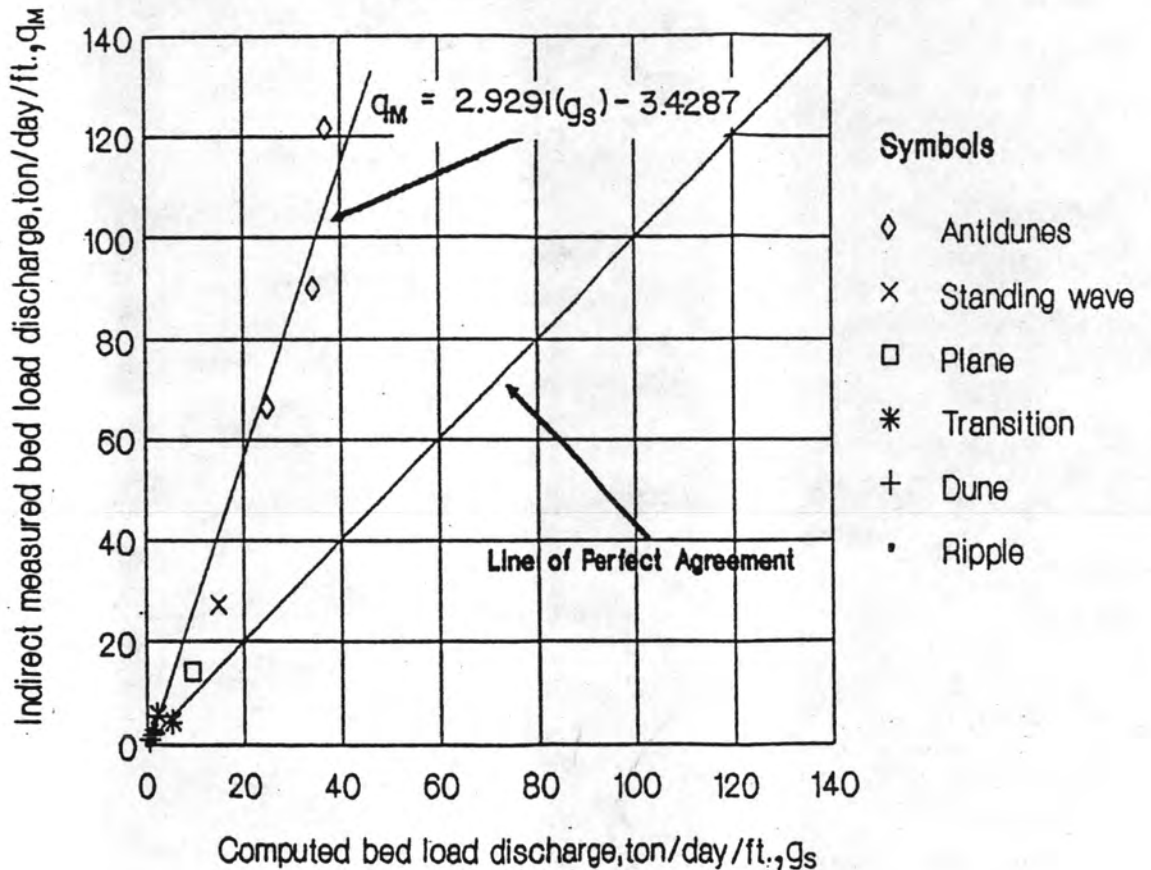
ตารางที่ 4.13 อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายจากผลการทดลอง และผลการคำนวณโดยวิธีของ Einstein และวิธีของ Meyer - Peter และ Muller สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.33 มม. ( $\sigma = 2.07$ )

Run no.	Bed Form	Meyer-Peter&Muller Bed Load Discharge (ton/day/ft.)	Einstein's Bed Load Discharge (ton/day/ft.)	Einstein's Total Load Discharge (ton/day/ft.)	Measured Total Load Discharge (ton/day/ft.)	Indirect measured Bed Load Discharge (ton/day/ft.)
16G	Ripple	0.0000	0.0043	0.0043	0.0051	0.0051
6G	Ripple	0.0057	0.0076	0.0076	0.0175	0.0175
5G	Ripples and Plane	0.1579	0.0675	0.0690	0.1708	0.1546
1G	Plane and Ripples	0.7312	0.5599	0.7713	1.3611	0.7790
10G	Dune	0.5735	0.3805	0.4781	1.0529	0.9219
8G	Dune	0.9745	1.0723	1.3958	2.9941	1.9125
9G	Dune	1.5829	1.9779	2.6857	5.1512	2.1417
7G	Dune	1.3280	1.5361	2.0491	3.8999	2.7165
2G	Washed Out Dunes	2.1071	2.6837	3.9281	10.0690	5.6940
3G	Washed Out Dunes	5.2227	7.0741	15.8390	19.8760	4.3707
4G	Plane	9.3405	10.4073	39.3570	28.1000	13.9960
12G	Standing Wave	14.6840	15.4108	73.9750	50.0570	27.1840
13G	Antidunes	24.8610	22.7686	134.2400	111.9000	66.4760
15G	Violent Antidunes	36.9860	27.8142	208.4500	200.2200	121.7300
14G	Antidunes	34.4330	27.5937	191.4700	121.4700	90.1050

Comparison between Indirect measured  
and Computed Bed Load (by Einstein's  
method) for 0.33 mm. Sand ( $\sigma=2.07$ )



Comparison between Indirect measured and Computed Bed Load (by Meyer-Peter & Muller method) for 0.33 mm. Sand ( $\sigma=2.07$ )



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำระหว่างผลจากการทดลองกับผลการของ Meyer-Peter และ Muller สำหรับทราย 0.33 มม. ( $\sigma = 2.07$ )

ตารางที่ 4.14 อัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายจากผลการทดลอง และผลการคำนวณโดยวิธีของ Einstein และ

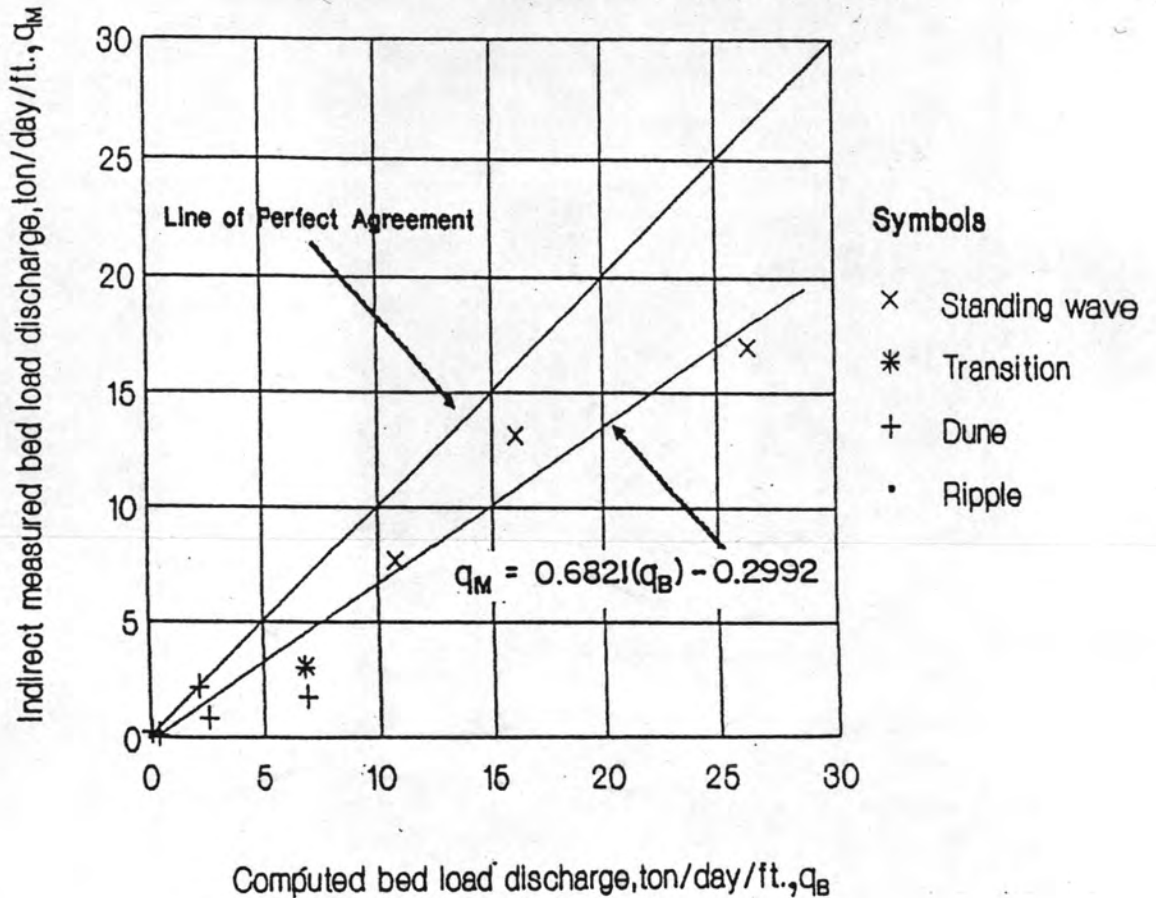
วิธีของ Meyer - Peter และ Muller สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.95 มม. ( $\sigma' = 1.82$ )

Run no.	Bed Form	Meyer-Peter&Muller Bed Load Discharge (ton/day/ft.)	Einstein's Bed Load Discharge (ton/day/ft.)	Total Load Discharge (ton/day/ft.)	Measured Total Load Discharge (ton/day/ft.)	Indirect measured Bed Load Discharge (ton/day/ft.)
6	Ripple	0.0000	0.0046	0.0046	0.0643	0.0474
9	Ripple	0.0000	0.0031	0.0031	0.1319	0.0832
8	Dune (Small)	0.0965	0.0721	0.0722	0.2843	0.2216
3	Dune	0.3390	0.4008	0.4014	0.3223	0.0781
7	Dune	1.7097	2.1544	2.4324	2.2856	2.1417
10	Dune	2.2172	2.5514	2.9046	1.5915	0.8201
11	Dune (Big)	5.4367	6.9371	8.7068	5.0691	1.7447
12	Washed Out Dunes	5.6530	6.8188	8.5907	10.8687	3.0233
13	Standing Wave	7.7647	10.7086	13.7022	20.2779	7.6479
14	Standing Wave	11.9177	16.0514	22.1241	23.3998	13.1125
15	Standing Wave	15.2369	26.3031	36.9327	28.2975	16.9082



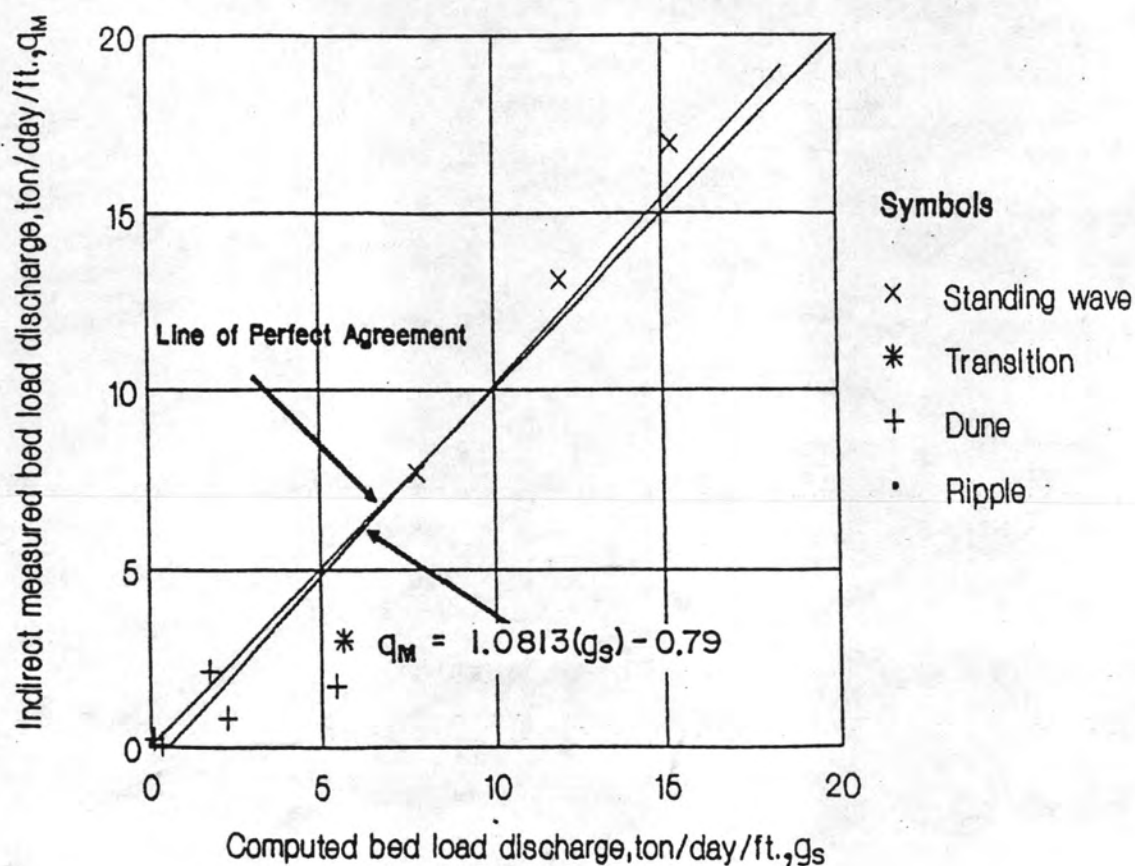


### Comparison between Indirect measured and Computed Bed Load (by Einstein's method) for 0.95 mm. Sand ( $\sigma=1.82$ )



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำระหว่างผลจากการทดลองกับผลการของ Einstein สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.95 มม. ( $\sigma = 1.82$ )

Comparison between Indirect measured  
and Computed Bed Load (by Meyer-Peter &  
Muller method) for 0.95 mm. Sand ( $\sigma=1.82$ )



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนที่ข่องน้ำระหว่างผลจากการทดลอง  
กับผลการของ Meyer-Peter และ Muller สำหรับทราย 0.95 มม. ( $\sigma=1.82$ )

### เม็ดเฉลี่ยใหญ่

2. การเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งหมด (Total load discharge) ซึ่งวัดได้จากการทดลอง,  $q_{mT}$  กับอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งหมด ที่คำนวณได้จากสมการของ Einstein,  $q_T$  หน่วยเป็นตัน/วัน/ฟุต สำหรับทรายขนาด 0.70 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.13$ ), 0.33 มิลลิเมตร ( $\sigma = 2.07$ ) และ 0.95 มิลลิเมตร ( $\sigma = 1.82$ ) แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 ถึง 4.23 และตารางที่ 4.12 ถึง 4.14 ตามลำดับ และสมการที่ได้มีดังนี้

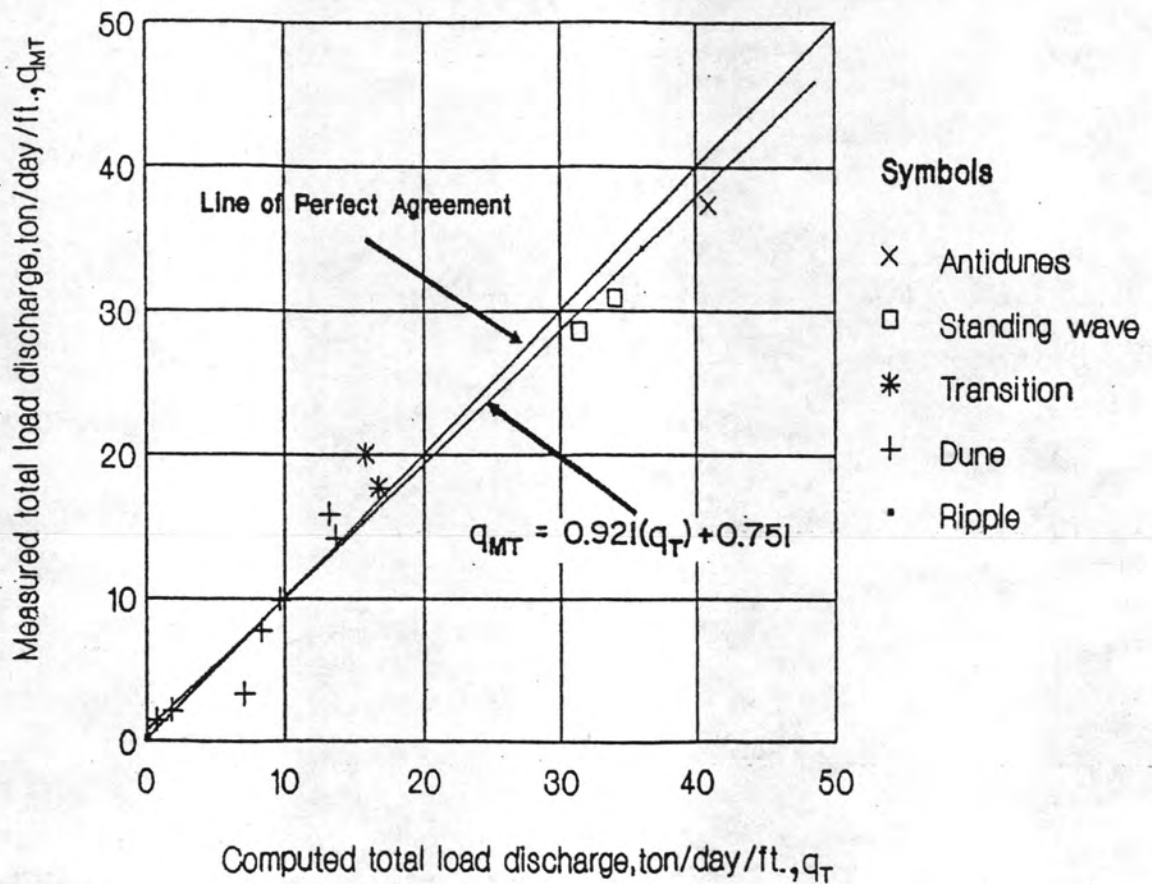
$$\begin{aligned} &\text{ทราย 0.70 มิลลิเมตร } (\sigma = 2.13), \\ &q_{mT} = 0.921(q_T) + 0.751 \quad (4-17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{ทราย 0.33 มิลลิเมตร } (\sigma = 2.07), \\ &q_{mT} = 0.802(q_T) + 1.037 \quad (4-18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{ทราย 0.95 มิลลิเมตร } (\sigma = 1.82), \\ &q_{mT} = 0.8621(q_T) + 0.9125 \quad (4-19) \end{aligned}$$

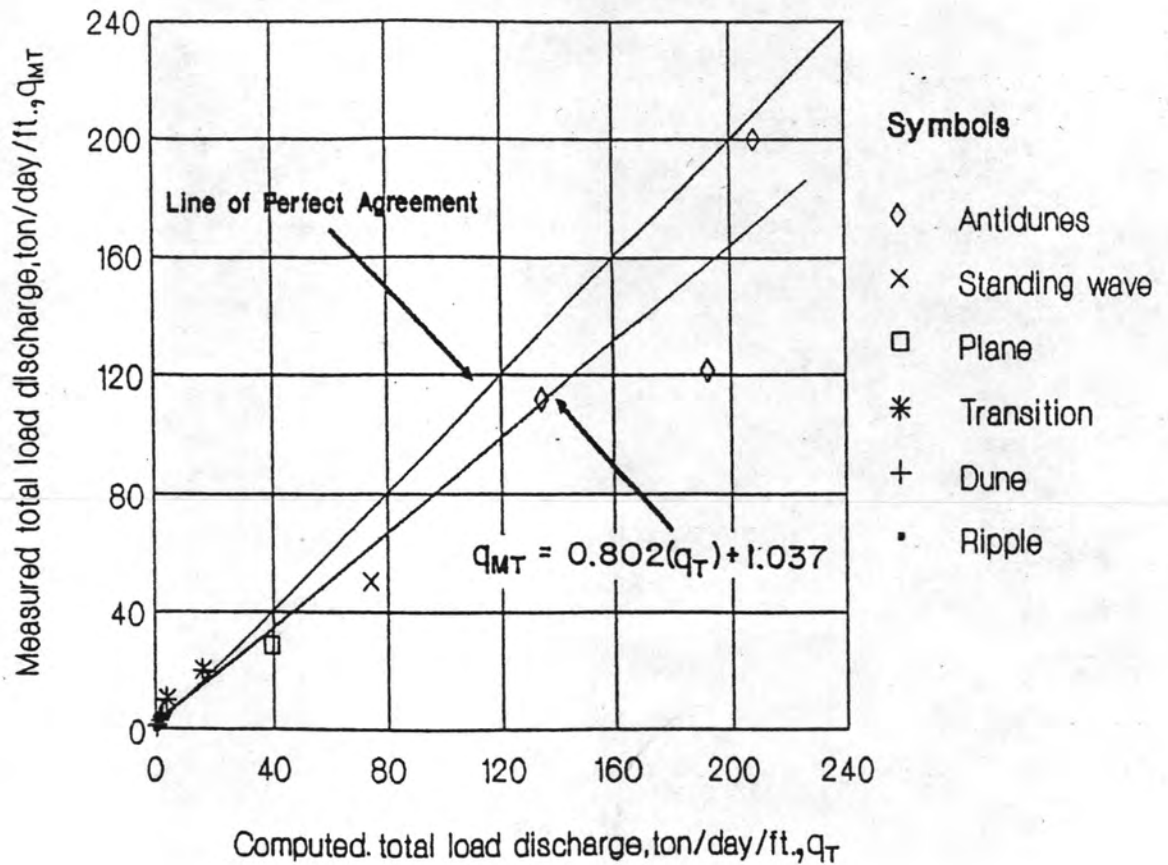
พบว่าสมการของ Einstein ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือได้ผลใกล้เคียงกับที่วัดได้จากการทดลอง แตกต่างกันเพียง 10 - 20 % เท่านั้น

Comparison between Measured & Computed  
Total Load (by Einstein's method)  
for 0.70 mm. Sand ( $\sigma=2.13$ )



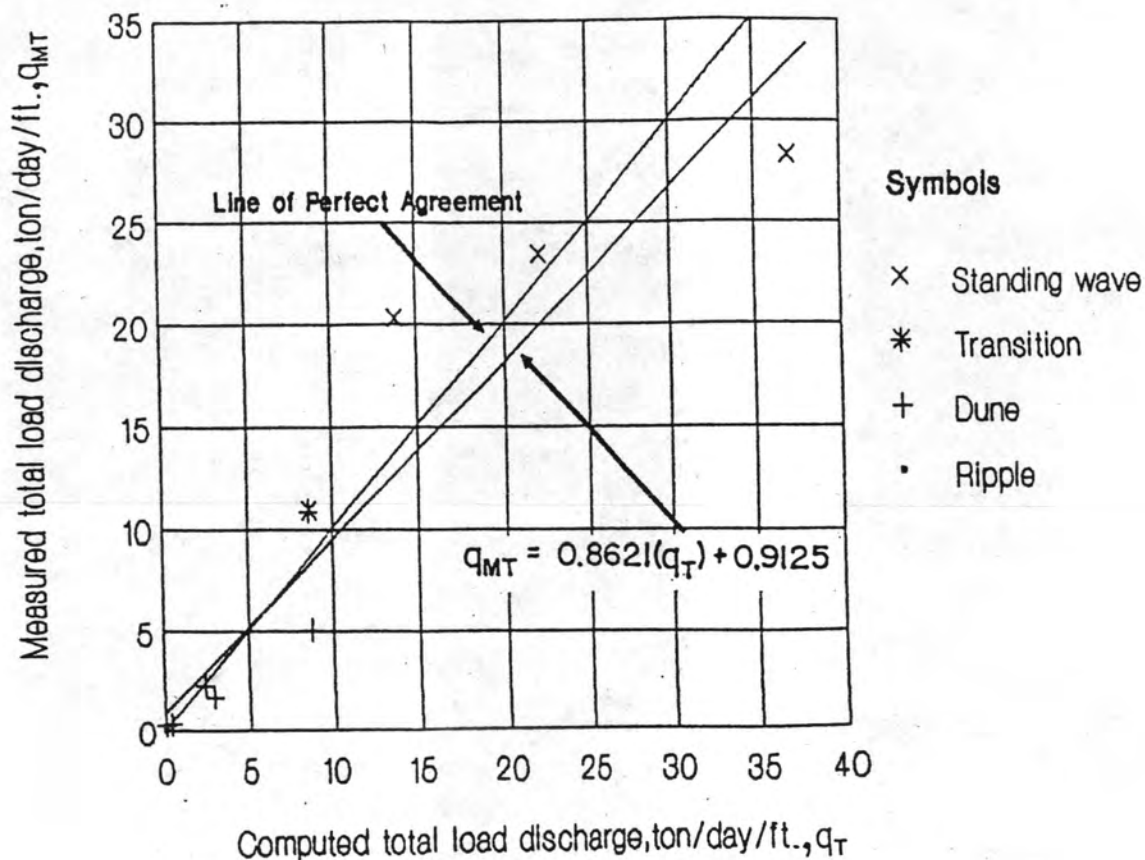
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งหมดระหว่างผลจากการทดลอง  
กับผลการของ Einstein สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.70 มม. ( $\sigma=2.134$ )

**Comparison between Measured & Computed  
Total Load (by Einstein's method)  
for 0.33 mm. Sand ( $\sigma=2.07$ )**



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งหมดระหว่างผลจากการทดลอง  
กับผลการของ Einstein สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.33 มม. ( $\sigma=2.07$ )

Comparison between Measured & Computed  
Total Load (by Einstein's method)  
for 0.95 mm. Sand ( $\sigma=1.82$ )



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งหมดระหว่างผลจากการทดลอง  
กับผลการของ Einstein สำหรับทรายขนาดเม็ดเฉลี่ย 0.95 มม. ( $\sigma=1.82$ )