

砂質土の液状化に関する研究 (その2)

木 村 薫 平 間 邦 興
北 村 仁 森 田 伸

Study on Liquefaction of Sand (Part 2)

Kaoru Kimura Kunioki Hirama
Hitoshi Kitamura Shin Morita

Abstract

Of the kinds of dynamic failures of soil, liquefaction of sandy soil is one regarding which many factors have been made clear up to this time. Among these factors, the one that has recently been stressed in particular may be said to be the influence of history. By influence of history is meant here various forms of natural or artificially-imposed phenomena, such as stress-strain or disturbance, and it is known that liquefaction properties will differ greatly depending on these factors.

In the study reported here, liquefaction tests were carried out assuming three cases of history, and from the results of these tests, examinations were made of the differences in the liquefactions produced according to the forms of history.

概 要

土の動的破壊のうち、砂質土の液状化破壊については、これまでも数多くの影響因子が明らかにされてきている。これらの因子の内最近、特に強調されてきているのが履歴の影響といえる。ここで履歴の影響とは、対象となる地盤や土要素が過去に受けた応力・ひずみの履歴や攪乱の履歴など、種々の自然現象や人為的な内容を意味しており、これらの影響によって液状化性状の大きく異なることが知られている。

この報告では、3ケースの履歴現象を仮定して液状化要素試験を実施し、それらの結果から履歴の様式によって生じる液状化過程の差異について検討を試みた。

1. まえがき

微小なせん断履歴を繰り返し供試体に加えると、液状化強さは増大し、その増加する割合と履歴ひずみ振幅の間に相関性があることを前報¹⁾で示した。

この他にも液状化性状を左右する履歴現象は、きわめて多様である。たとえば、過去に大きな地震動を受けて液状化状態に至った地盤が圧縮沈下し、密度が増した後も再び液状化を生じるか否かといった問題は、かなり以前から検討の対象となっている。また、地盤が乱されずに自然状態にある場合と、掘削・埋戻しや振動締固めなどを受けた地盤のように、ある程度乱された状態では、当然、液状化性状は異なるはずである。

2. 試料および供試体条件

今回の実験に使用した試料は、豊浦標準砂・新潟砂(新潟県鳥屋野潟産)の乱した試料と、旧江戸川河口付近で採取した乱さない沖積砂である。これらの試料の物理性状と、粒径加積曲線を表-1および図-1に示す。

また、この報告では、種々の履歴に応じて変化する液状化性状を把握する目的から、4種類の異なった試料条件で供試体を作製し、それぞれの液状化過程を詳細に検討した。供試体作製条件は次の通りである。

- a) 標準供試体: 脱気水に浸漬している試料を、スプーンでφ70 mmのワイヤーメンブレン内に流し込み圧密した供試体。

- b) 再液状化供試体: 標準供試体を20回前後の繰り返し回数で、事前に液状化させた後、再び圧密した供試体。
- c) 不覚乱供試体: サンドサンプラーによって、現位置から採取した試料をそのまま圧密した供試体。
- d) 排水履歴供試体: 圧密中の標準供試体を排水状態のまま、20回程度の载荷で液状化するに等しい応力によってせん断履歴を加えた供試体。

自然状態における履歴現象と試料条件との関連づけはむづかしいが、a) 供試体とb) 供試体との比較は、先に述べたように過去に液状化を生じた地盤と以前の地盤状態の液状化性状の差異の検討に対応するものであり、a) 供試体とc) 供試体との比較からは地盤試料のディスターバンスの影響を把握するものである。d) 供試体から得られる試験結果からは、履歴現象を応用した振動締固め工法²⁾を実施した地盤性状についての示唆を得ようとするものである。

ここで、前述の試料の内、再液状化の検討については豊浦標準砂と新潟砂、攪乱・不覚乱の検討については江戸川沖積砂を、また、排水履歴の検討については、すべての試料を検討対象とした。

これらの試料の違いによる基本的な液状化性状を理解するため、各試料のa) 標準供試体の液状化強さについて液状化応力比 (τ_t/σ_1) と相対密度 (D_r) の間係を示したのが図-2である。物理性状ならびに粒径加積曲線が

良く一致する豊浦標準砂と新潟砂は類似した液状化強さを示していることがわかる。これに対して、細粒分を比較的多く含む江戸川沖積砂は、相対密度が平均80%程度の高い値にもかかわらず、応力比は同等か若干下回る傾向となっており、試料による液状化性状の違いが認識される。

3. 実験方法

一連の実験はすべて動的単純せん断試験機を使用し

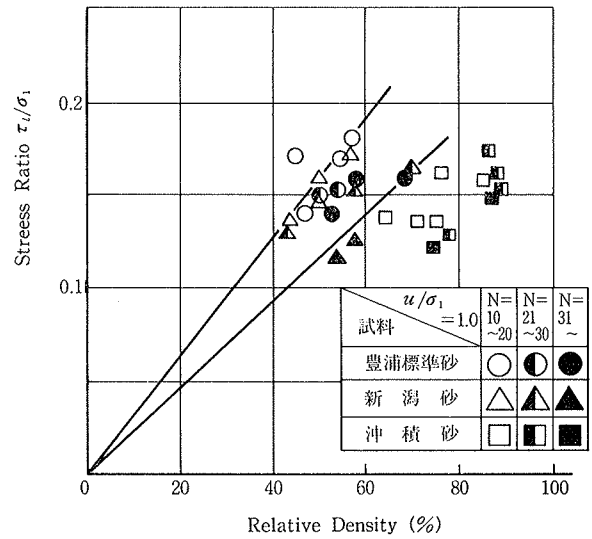


図-2 応力比～相対密度

試料名	Fc (%)	D ₅₀ (mm)	e _{max}	e _{min}	Uc
豊浦標準砂	0	0.17	0.990	0.610	1.44
新潟砂	0	0.28	1.064	0.751	1.42
沖積砂	42	0.09	1.550	0.802	—

表-1 試料の物理性状

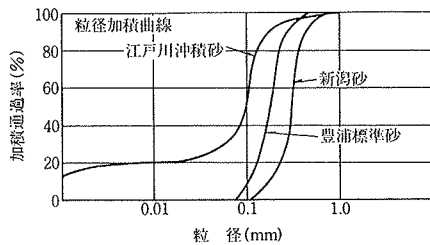


図-1 試料の粒径加積曲線

試料	供試体	相対密度の平均	液状化応力比の平均	液状化载荷回数
豊浦砂	標準	51.3	0.161	18
	再液状化	60.7	0.159	17
新潟砂	標準	52.5	0.149	21
	再液状化	63.2	0.145	19

表-2 液状化試験結果

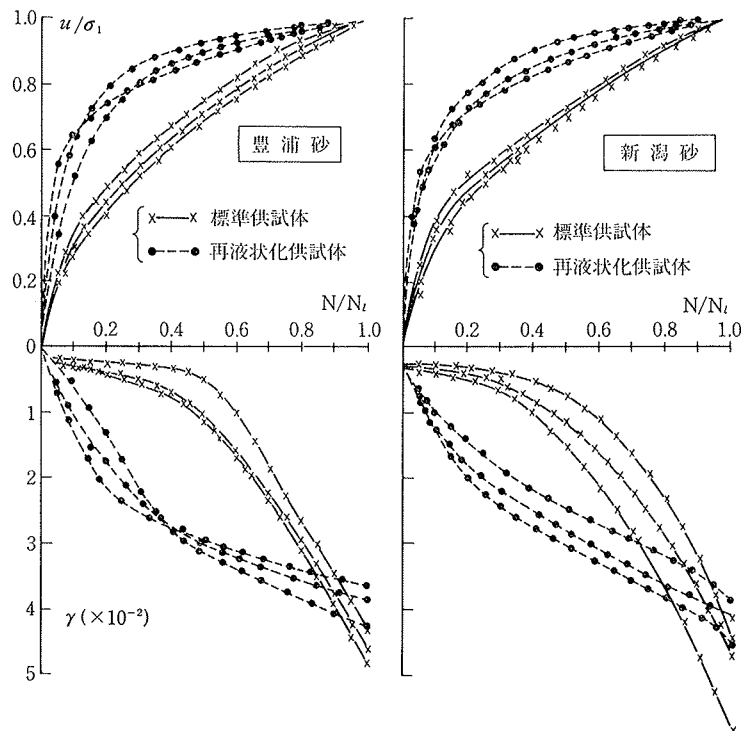


図-3 液状化過程の (u/σ_1) と (γ)

た。装置の概要については別報を参照されたい¹⁾²⁾

圧密応力は、 $\sigma_1 = \sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の等方条件としたが側方拘束が期待できるワイヤーマンブレンを使用したので a) 標準供試体, b) 再液状化供試体, c) 不攪乱供試体については、いずれも圧密終了時には $K_0 = 0.5$ 程度の異方応力状態になっているものと推定される。また、d) 排水履歴供試体の内部応力状態は、せん断履歴中に水平方向の圧力が増大する為、別報¹⁾を参照すれば $K_0 = 0.7 \sim 0.8$ 程度に上昇していると推定される。

載荷に先立って、間隙圧係数 (B 値) は 0.95 以上を満足させるため、それぞれの供試体について、まず通水や炭酸ガスの通気を実施した後に 2 kgf/cm^2 のバックプレッシャーを加えている。載荷する動的せん断応力は一定振幅の応力制御とし、 0.5 Hz の正弦波形である。

各供試体の液状化過程は、実験目的に応じてヒステリシスループや応力径路の形で記録する手法をとった。

4. 実験結果と考察

4.1. 再液状化性状について

(標準供試体と再液状化供試体の比較)

試験結果の概要を一括して示したものが表-2 である。ここで、液状化載荷回数 (N_L) とは、供試体内間隙水圧が拘束圧に等しくなる載荷回数とした。再液状化供試体は標準供試体に比べ、相対密度にして 10% 程度の増加が認められるが、液状化応力比や繰り返し回数から判断する限り、液状化性状は標準供試体と同等か若干下まわる結果が得られた。数多い試験結果の中から代表的な例について、液状化過程の間隙水圧発生状況 (u/σ_1)、および、ひずみ振幅の変化を示したのが図-3 である。ここで、繰り返し回数の比 (N/N_L) (N は任意の載荷回数・ N_L は液状化載荷回数) に応じて示される (u/σ_1) と (γ) の増大する傾向には明らかに二つのパターンが認められ

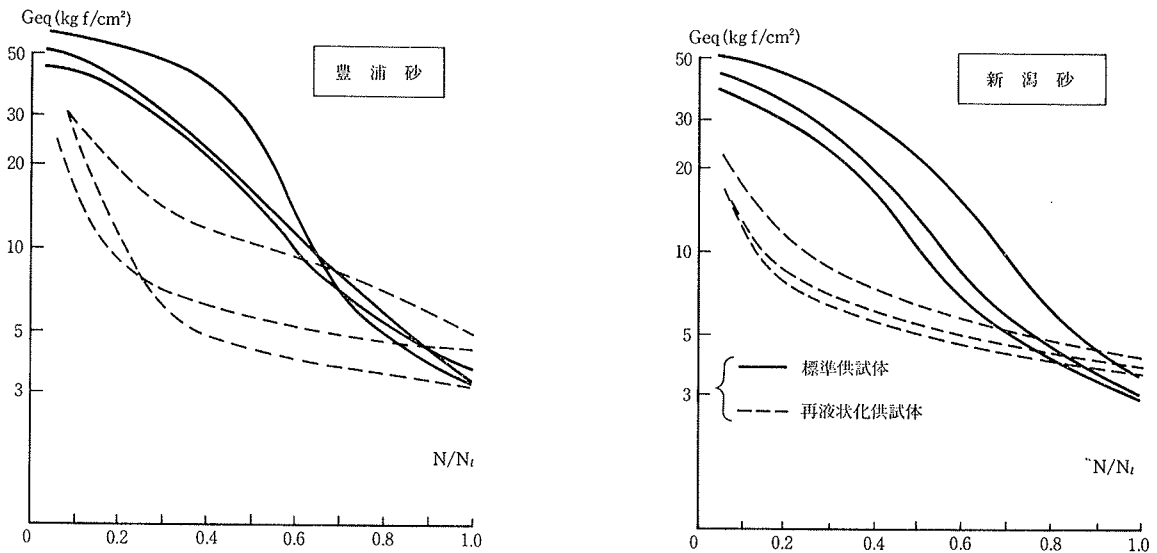
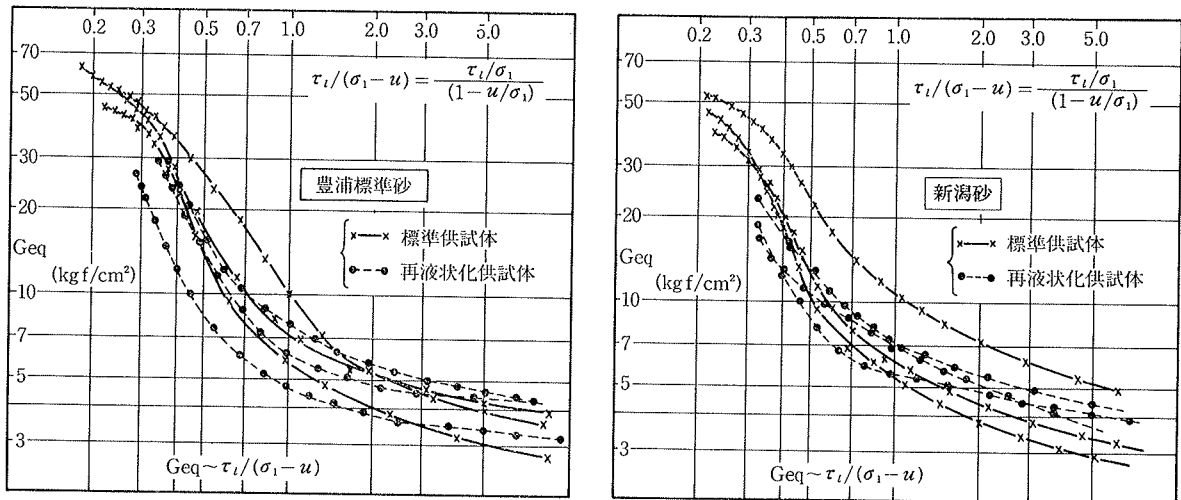


図-4 液状化過程の動剛性率 (Geq)



動剛性率 (Geq) ~ 液状化過程の応力比 $\tau_t/(\sigma_1 - u)$

図-5 動剛性率 (Geq) ~ 液状化過程の応力比 ($\tau_t/\sigma_1 - u$)

る。再液状化供試体については、一般に $(N/N_L)=0.3\sim 0.4$ の初期の繰り返し段階で (u/σ_1) が0.8以上を示し、 (γ) は液状化ひずみの1/2以上に増大している。一方、標準供試体では、これと同じ程度の状態に至るには (N/N_L) が0.7~0.8以上の載荷回数を必要とする。

このような液状化過程の相異について、動剛性率(G_{eq})の減少傾向を片対数紙上で示したのが図-6である。標準供試体では緩やかな勾配をもって減少するのに対して、再液状化供試体では $(N/N_L)=0.3\sim 0.4$ 程度で急激に剛性を失い、その後はあまり変化せず $(N/N_L)=1.0$ に近づくと、ほぼ標準供試体と同等となる。

次に有効応力 (σ_1-u) の減少に伴って増大する繰り返し回数に対応する応力比 (τ_1/σ_1-u) と (G_{eq}) の関係を示したのが図-5である。応力比に対応する (G_{eq}) を比較すると、載荷初期の応力比の小さい範囲では再液状化供試体の (G_{eq}) がやや小さいものの、応力比が増大するにつれて、その差は明確でなくなり、有意の差はしだいに認められなくなるようである。

4.2. 攪乱不攪乱の影響について

(標準供試体と不攪乱供試体の検討)

江戸川沖積砂について、乱した状態(標準供試体)と乱さない状態(不攪乱供試体)における液状化過程の差異を明らかにするため、同程度の相対密度 $(D_r=80\sim 88$

%)を持つ6供試体について実施した液状化試験結果を示したのが表-3である。 $(u/\sigma_1)=1.0$ に至る平均的な応力比 (τ_1/σ_1) と繰り返し回数 (N_L) は、標準供試体で $(\tau_1/\sigma_1)=0.154$, $(N_L)=19$ 回、不攪乱供試体で $(\tau_1/\sigma_1)=0.215$ $(N_L)=22$ 回である。相対密度がほぼ同じであり、 (N_L) にもそれほど差がないにもかかわらず液状化応力比は不攪乱供試体のほうが1.4倍程度大きい値を示している。

両供試体の液状化過程を繰り返し回数 (N_L) に対応させて、載荷中におけるひずみ振幅 (γ) と間隙水圧 (u/σ_1) の変化を片対数紙上に示したのが図-6である。 $(N_L)\sim (u/\sigma_1)$ の傾向には有意の差は認められず、一様な傾きを保って増大している。しかし、 $(N_L)\sim (\gamma)$ の関係については、乱した試料条件である標準供試体では、液状化時点に近い繰り返し回数の付近でひずみが急増し、5%以上の値を示すのに対して、不攪乱供試体では、ひずみの増大傾向はほぼ一様であり、その最大ひずみも3%程度と小さい値にとどまっている。このように、不攪乱供試体では液状化応力比が大きいにもかかわらず、ひずみの増大が少ないことや、明確なひずみ急増点が見られないことなどの相違が認められる。その原因はさだかではないが、不攪乱供試体における構造的な強さの影響と推定することもできる。

これら2種の供試体の液状化過程を、ひずみ振幅 (γ) の増大と動剛性率 (G_{eq}) の減少経過の関係で示したのが図-7である。標準供試体の (G_{eq}) の減少傾向は各供試体の応力比 (τ_1/σ_1) や液状化繰り返し回数 (N_L) によらず、ほぼ一様な傾向を示し興味深い。これに比較して、不攪乱供試体の傾向には大きなバラツキが認められる。ここで、同一ひずみレベルにおける動剛性率に着目すると、不攪乱供試体の (G_{eq}) は標準供試体のそれよりも常に大きく、また液状化 $(u/\sigma_1=1.0)$ に至ったと想定される時点においても、 10 kgf/cm^2 程度の値を保っていることがわかる。

試料	江戸川沖積砂							
	標準供試体				不攪乱供試体			
供試体	A	B	C	平均	a	b	c	平均
Dr (%)	87.3	88.2	80.5	85.3	85.3	88.5	86.1	86.6
N _L (回)	18	22	17	19	24	20	23	22
τ_1/σ_1	0.158	0.143	0.160	0.154	0.210	0.224	0.212	0.215

表-3 液状化試験結果

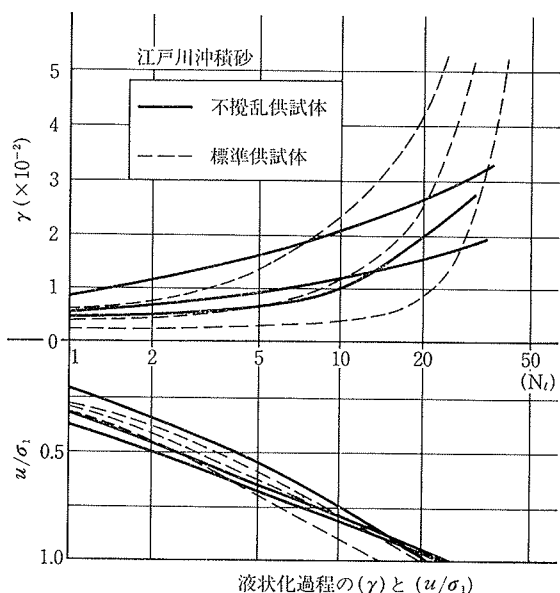


図-6 液状化過程の (γ) と (u/σ_1)

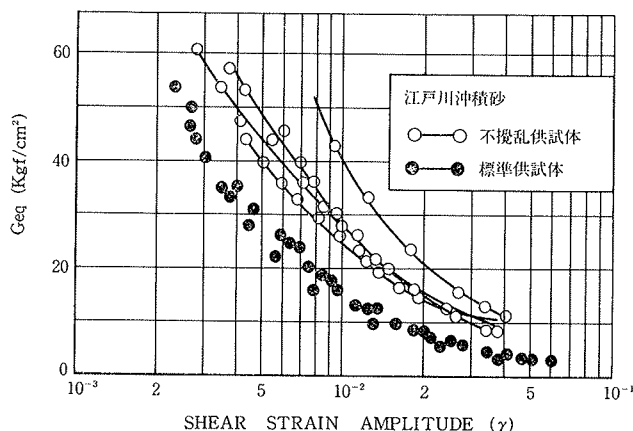


図-7 液状化過程の $(G_{eq})\sim(\gamma)$

4.3. 排水履歴の影響について

20回の載荷回数で液状化を生じる応力を標準供試体に排水条件で同じ回数だけ作用させた後の相対密度は、豊浦標準砂・67%，新潟砂・68%，江戸川沖積砂92%であった。したがって前掲のデータと比較すれば標準供試体との密度増加の割合は、豊浦標準砂と新潟砂で1.3倍，江戸川沖積砂では1.1倍程度である。

排水履歴供試体を含めた，すべての供試体について液状化強さを一括して示したのが図-8である。各供試体の液状化強さは，せん断ひずみ振幅(γ)が1%，2%，3%に達した際の応力比(τ_l/σ_1)と繰り返し回数(N_l)で示してある。いずれの試料においても排水履歴供試体の液状化応力比は他の供試体を大きく上まわり，2倍程度の増大が認められる。また，排水履歴供試体についてのひずみ振幅の増大は少なく，繰り返し載荷によって3%のひずみに至る供試体は半数程度であった。

一方，再液状化供試体については，大ひずみ振幅($\gamma=3\%$)を液状化判定基準とすれば，標準供試体との差異は明確でなくなる。

次に，標準供試体の動剛性率(G_{eq})_sと，それぞれに対応する各供試体の動剛性率(G_{eq})_Hとの比(G_r)を液状化過程のひずみ振幅に応じて示したのが図-9であ

る。ひずみ振幅の増大にかかわらず(G_r)の値はほぼ一定であることから，履歴の影響は液状化過程を通じて保たれているようである。

5. あとがき

履歴条件の差異を明確にする目的で作製した各供試体を対象に，その液状化挙動について検討した。しかし，現状では，その相異の要因を詳細に把握することは困難である。今後は液状化過程や強さを支配する要因として，粒子配列・インターロッキング・粒子間応力状態などについての微視的な問題も考え，これらを何らかの形でパラメータとすることが必要となろう。

参考文献

- 1) 木村，他：砂質土の液状化に関する研究，大林組技術研究所報，No. 19，(1979)，pp. 89~94
- 2) 斎藤，他：ネジリ振動による砂質地盤の締め固め試験，大林組技術研究所報，No. 17，(1978)，pp. 39~44
- 3) H. B. Seed, et al.: The effect of method of sample preparation the cyclic stress-strain behavior of sands, EERC 75-18, (Jul. 1975)

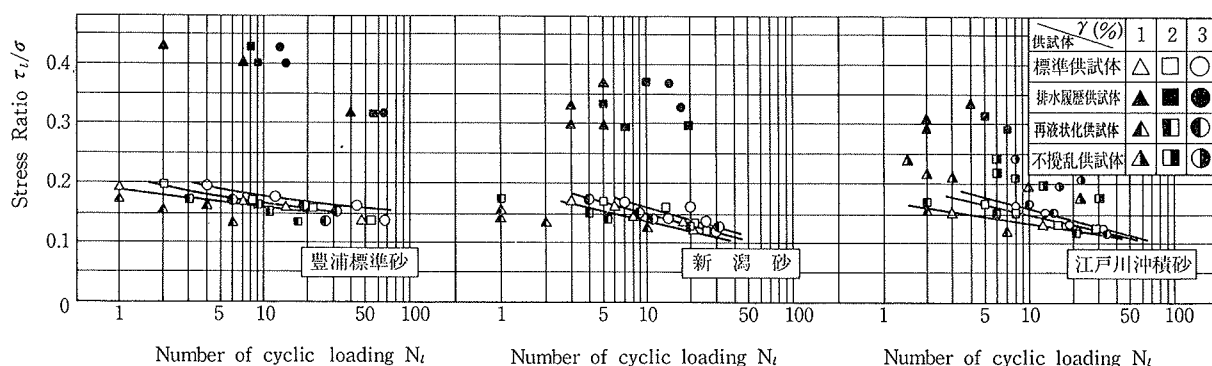


図-8 ひずみ振幅に応じた $(\tau_l/\sigma_1) \sim N_l$

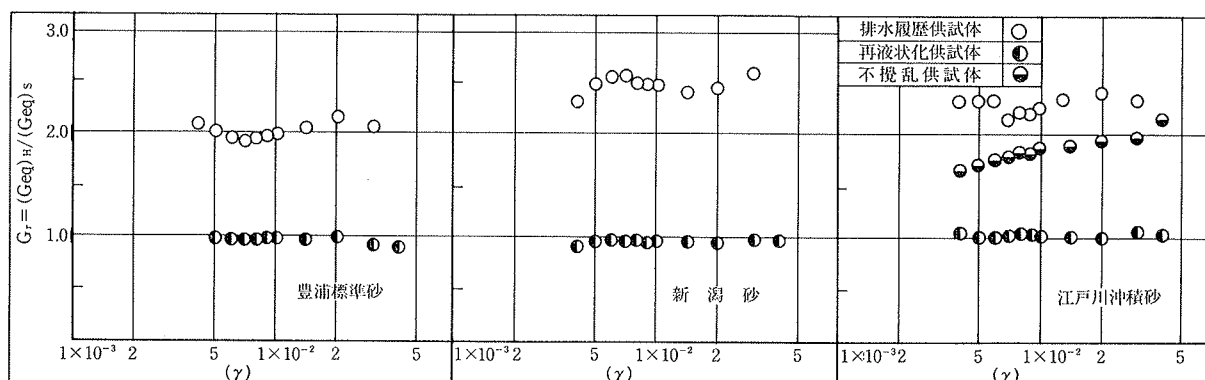


図-9 $(G_r) \sim (\gamma)$