

超微粒子セメント注入材（固結砂）の 長期強度特性に関する研究

柴田 英明*

Study on Long-Term Strength Properties of Suspension Grouts with Ultra-Fine-Grain Materials

By Hideaki Shibata*

Synopsis: With the increasing need for underground construction work at great depths in urban areas, there has been a demand for greater certainty and durability in the technologies for water cutoff using chemical grouts. A promising material in this regard is the chemical grout containing ultra-fine-grain cement. While these ultra-fine-grain cement grouting materials are said to have a greater capacity for penetration than other cement suspension grouts, little research has been conducted to date on their durability. In the study reported here, investigations were made on the effects of the cement and water glass contents on the gel formation time of the ultra-grain cement grouts and the strength properties of the homogenised gels. The principal conclusions drawn were as follows. 1) The gel formation time is little influenced by the water glass concentration but is greatly influenced by the cement content with all types of cement. 2) With ultra-fine-grain cement grouts, high homogenised gel strength is attained at early stages, but the strength is reduced after one year or so. 3) In the measurement of the pH values of the curing water, ultra-fine-grain cement grouts were found to reach neutrality after 80 to 120 days.

要旨：都市部における大深度地下工事の必要性が叫ばれる今日では、薬液注入材による止水技術はさらに確実性や耐久性が要求されてきている。現在、これらの要求する注入材として超微粒子セメントを混合した注入材が注目されてきている。この超微粒子セメント注入材は他のセメント系懸濁型薬液よりも浸透性に優れていると言われているが、耐久性についての評価は未だなされていない。本研究では、超微粒子セメント注入材の薬液ゲル化時間や固結砂の強度特性に及ぼすセメント量や水ガラス量の影響を調査研究したものであり、主な結果は次のとおりである。

1. 超微粒子セメント注入材の薬液ゲル化時間は、どのセメントにおいても、水ガラス濃度の影響は少なく、セメント量の影響が大きい。
2. 超微粒子セメント注入材の固結砂の強度特性は、ホモゲルの強度特性とよく類似している。即ち、早期強度は期待できるが、一年以上経過すると、その強度は弱くなる傾向を持つ。
3. 養生水の pH 測定においては、超微粒子セメント注入材の養生水の pH は120日までに中性値に近づく。

1. ま え が き

薬液注入工法は止水・強度増加を目的とする地盤改良のひとつである。この工法は簡便迅速で応急処理にも優れるという他の工法で代替できない利点を有しているため、都市の建設現場において広く利用されている。しかしながら、上記の利用の反面、薬液による固結地盤の

耐久性が十分でないなどの基本的な問題点も抱えている。現時点において、注入工法はあくまで仮設を目的として用いられるが、最近では注入工法の確実性や耐久性といった品質の向上が要求されている。都市部における大規模な地下空間の開発においては、これまでにもまして確実な止水技術が必要となっている。開発の対象となっている東京区部の深部地下の地盤が、十分に固結した水密性の高い土丹や岩盤であると、止水に関する問題は少ないが、深度50 m 前後の深部地下の多くは被圧した未固結な滞水砂礫層であり、薬液注入の効果が十分期待

*工学部土木工学科 助教授
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Associate Professor.

できる透水係数 10^{-3} (cm/sec)程度の部分も少なくない。したがって、従来の溶液型薬液では固結後の強度や耐久性に問題があり、高い被圧水にも耐えられる高性能薬液の開発が必要となっている。耐久性に優れる一方で、かつ十分な浸透性を有している薬液を考える上では、溶液型薬液があくまでも基本である。しかし、注入薬液による地下水汚染を防止するため“薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針(建設省事務次官通達, 昭和49年)”が設けられており、現在使用できる薬液は耐久性に問題のある水ガラス系に限られている。このため、最近では超微粒子セメントが各方面で開発され、ある程度実用に供されているが、これら注入材のゲル化時間や固結砂の強度特性については不明な点が多い。

本研究では、超微粒子セメントを用いた薬液のゲル化時間と長期強度特性に及ぼすセメント量や水ガラス量の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 従来の研究

懸濁液注入材に関する研究では、浸透限界に関する事柄が多く^{1)~9)}、注入材の浸透の可否は個々あるいは団粒化した懸濁粒子の粒径に対する地盤の間隙径の大きさで決まることが指摘されている。また、注入材のセメントの細粒化やセメント懸濁液の遅延及び分散効果等に関する研究¹⁰⁾¹¹⁾が行われている。一方、超微粒子注入材に関する研究では浸透性は溶液型薬液よりやや劣るものの、強度・耐久性は溶液型よりも優れていることが指摘されている¹²⁾¹³⁾。また、本研究室ではホモゲルの長期強度特性についての実験を行っている^{14)~16)}。

3. 実験

3.1 各セメントの粒度分布および化学成分

実験に使用したセメントは超微粒子セメントとして3種類(マイクロA, N, Sと呼ぶ)、またこれらのセメントと比較するためポルトランドセメントと高炉セメントの

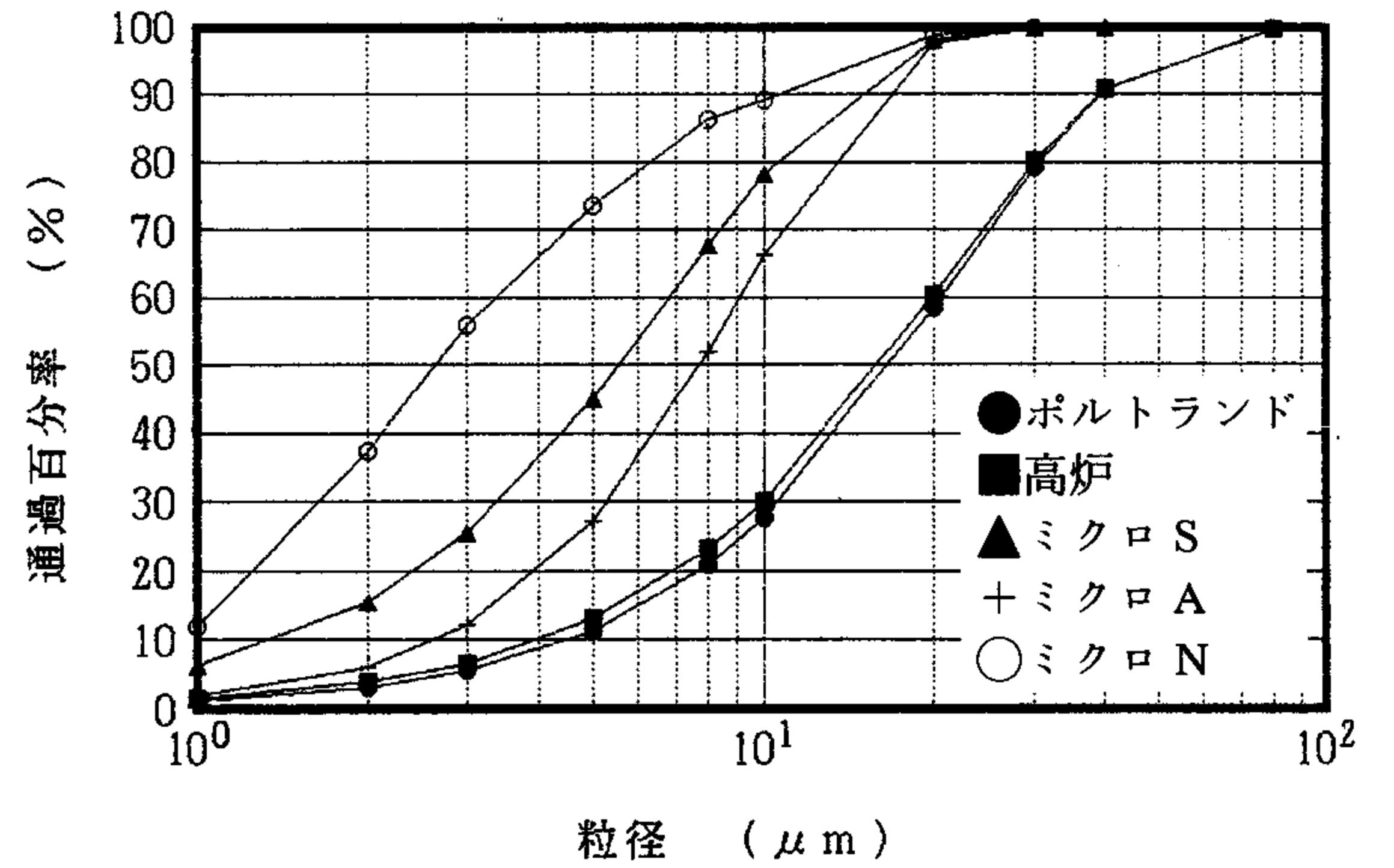


図1 各セメントの粒度分布

計5種類を使用した。これらの粒度分布を図1に、また化学成分を表1にそれぞれ示している。

3.2 薬液の作成方法

A液は水と水ガラスをそれぞれ1:1, 2:1, 1:2の重量比配合で混合して作成する。一方、B液は各々のセメントと水を種々の配合に従って混合したものを作成する。ゲル化時間の測定用薬液として(1)式を利用して、B液全体として250ccになるようにする。

$$W + G_g / G_c = 250 \tag{1}$$

ここで W: 水 (cc) G_g: セメント (g)

G_c: セメントの比重 (3.15)

ホモゲルの作成については、(2)式を利用し、表2のように混合して250ccになるようにする。なお、水ガラスも水とみなして計算する。

$$G_g / G_c + W_B = 250 \tag{2}$$

水セメント比 = (W_A + W_B) / G_g * 100

ここで、W_A: A液全体 W_B: B液中の水 (cc)

薬液はこれらA液とB液とを混合することにより作成することになる。

3.3 固結砂の作成方法

ゲル化時間をもとに、A液とB液を混合したセメン

表1 各セメントの諸性質

銘柄 (セメント)	ブレン 比表面積 (cm ² /g)	平均 粒子径 (μm)	化 学 成 分 (%)								total (%)
			ig. loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	
ポルトランド	3,240	17.0	1.2	—	21.2	5.4	2.8	64.2	1.3	2.2	98.3
高 炉	3,760	16.2	1.5	—	25.5	8.4	1.9	54.9	3.6	2.2	98.0
ミ ク ロ S	10,180	5.5	1.7	—	26.9	10.4	1.4	51.1	4.6	2.0	98.1
ミ ク ロ A	10,080	7.9	1.0	—	28.8	11.3	1.0	48.9	5.4	1.4	97.8
ミ ク ロ N	9,900	2.7	0.4	0.1	30.9	12.9	0.5	44.3	6.3	1.6	97.0

表2 B液の配合表

B液 (250 cc)				
水セメント比 (%)	200	400	600	800
水 (cc)	182	214	224	230
セメント (g)	216	116	79	60

トミルクをゲル化直前に一軸圧縮用モールド (φ5 cm, h10 cm) に流し込み、さらに空気乾燥した豊浦標準砂を入れ、約20 kgfの重りにて静的に締め固めて供試体を作成する。ホモゲル作成の時と同様に1日後成形し水中養生を始める。養生日数は1, 3, 7, 14, 28, 60, 120, 360, 720日とした。

3.4 養生水の pH 測定方法

薬液の養生中のアルカリ溶脱の状況を調べるため、養生水の pH の変化を調べた。ホモゲル用供試体を1リットルの水中に養生させ、毎日その養生水の pH を測定する。このときの養生水は毎日取り換えるものとする。なお、実験ではセメントや水ガラスの濃度や種類等の違い

による影響を調べた。

4. 固結砂の強度特性

4.1 水ガラス3号を用いた場合

A剤として水ガラス3号をもちいた場合の固結砂の強度特性について説明する。各セメントにおける養生日数と一軸圧縮強度との関係を図2～図6に示す。図2よりセメントとしてマイクロSセメントを使用した場合、セ

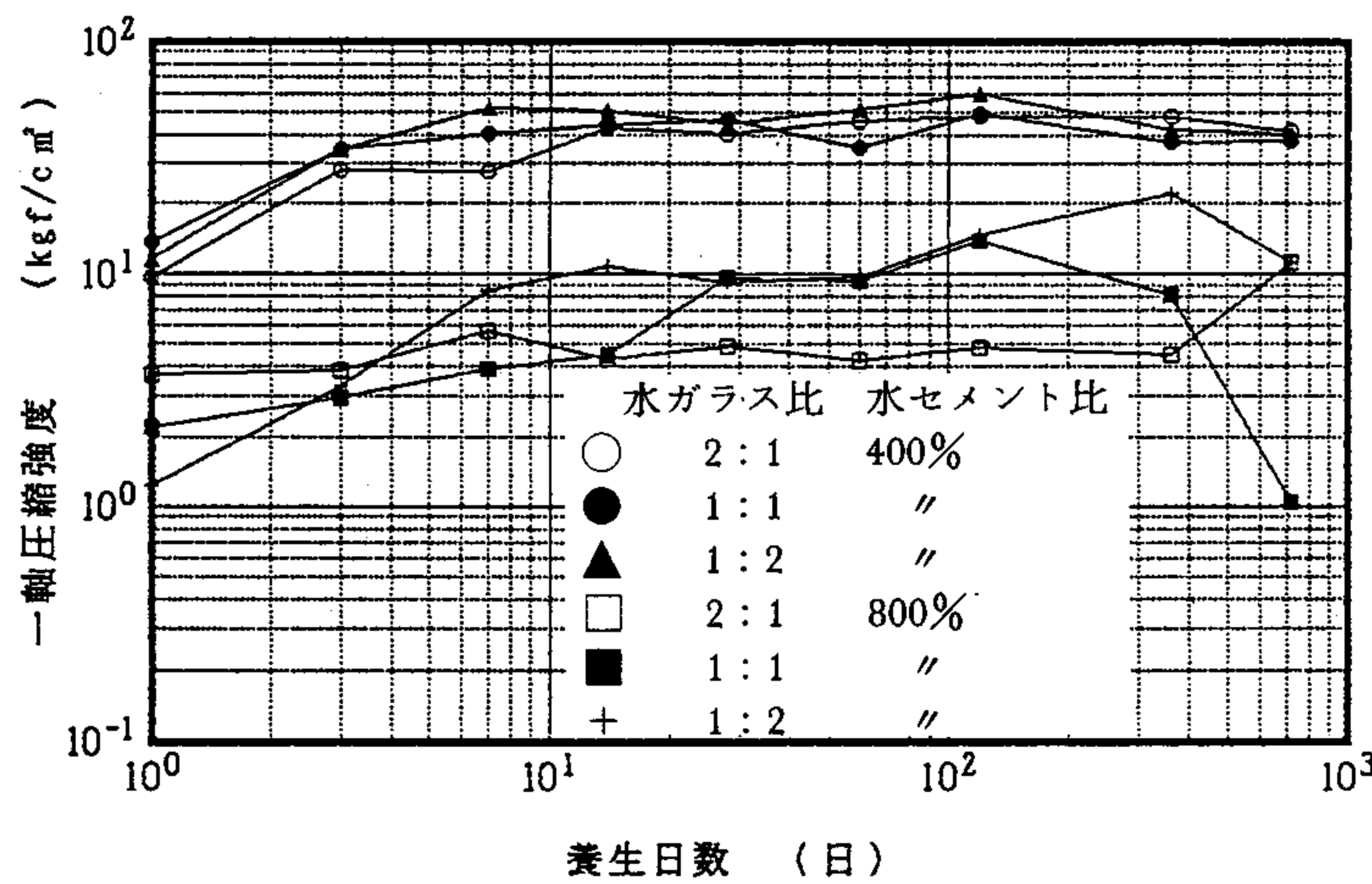


図2 養生日数と一軸圧縮強度との関係 (マイクロ S)

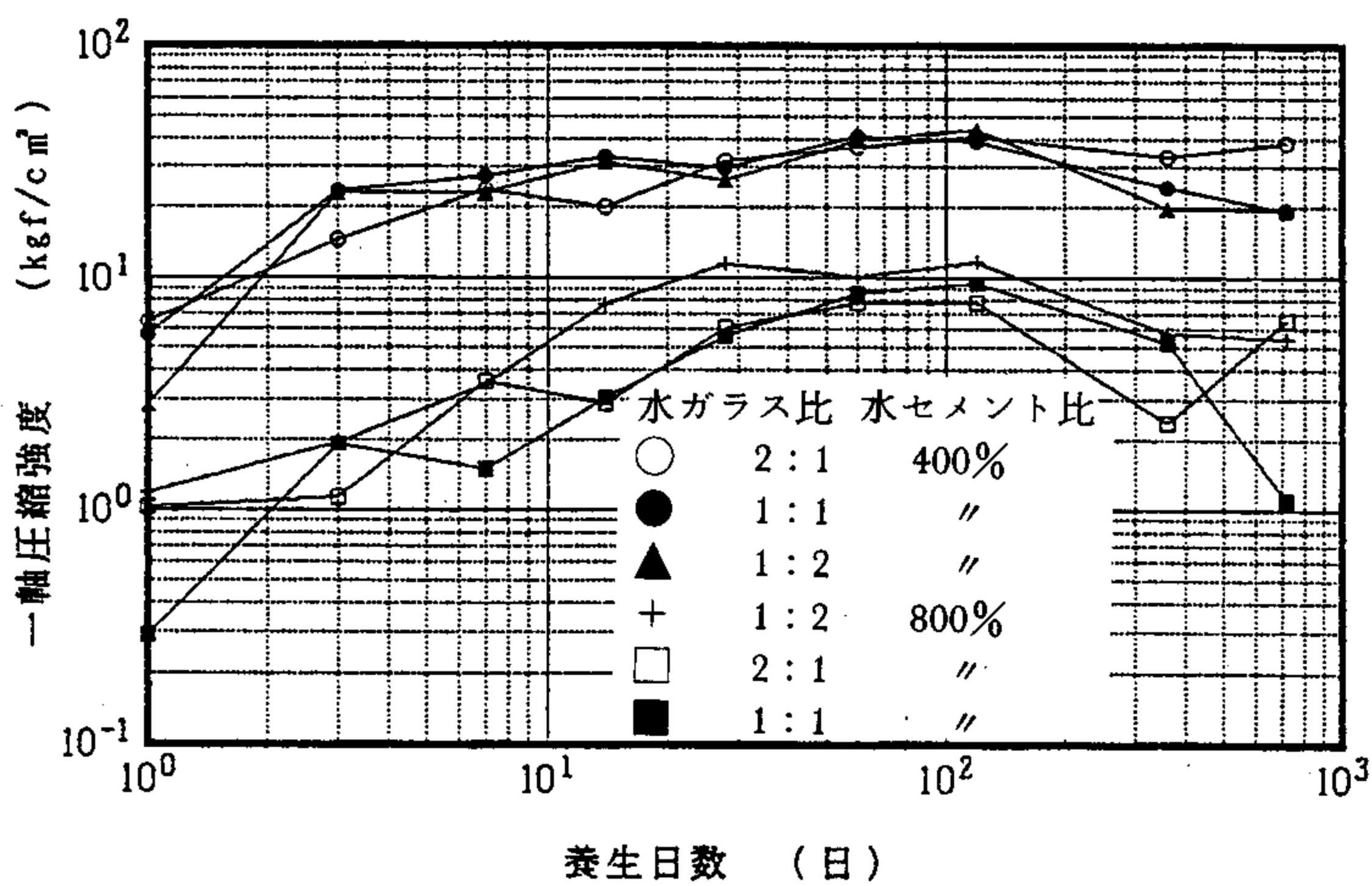


図3 養生日数と一軸圧縮強度との関係 (マイクロ A)

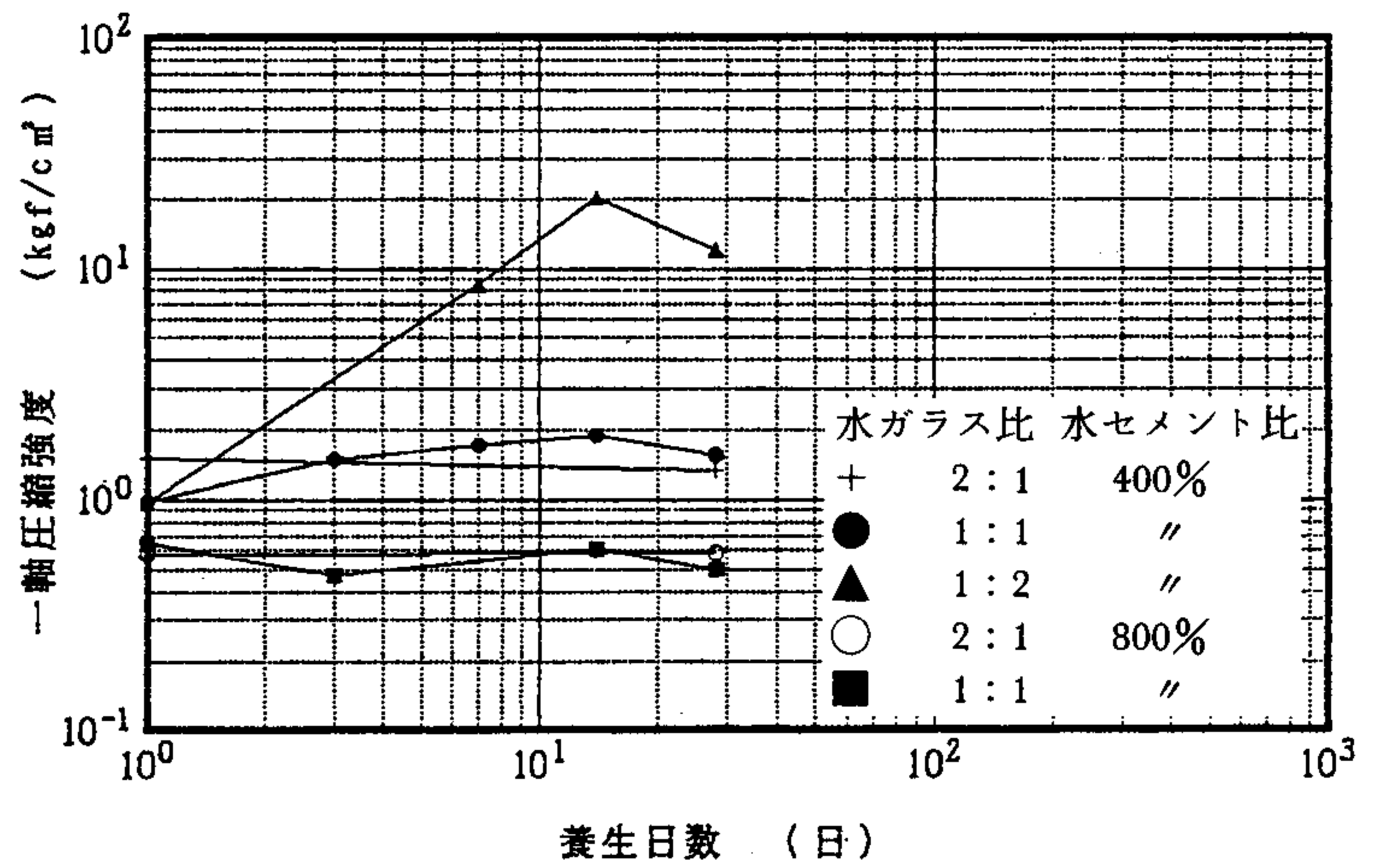


図4 養生日数と一軸圧縮強度との関係 (マイクロ N)

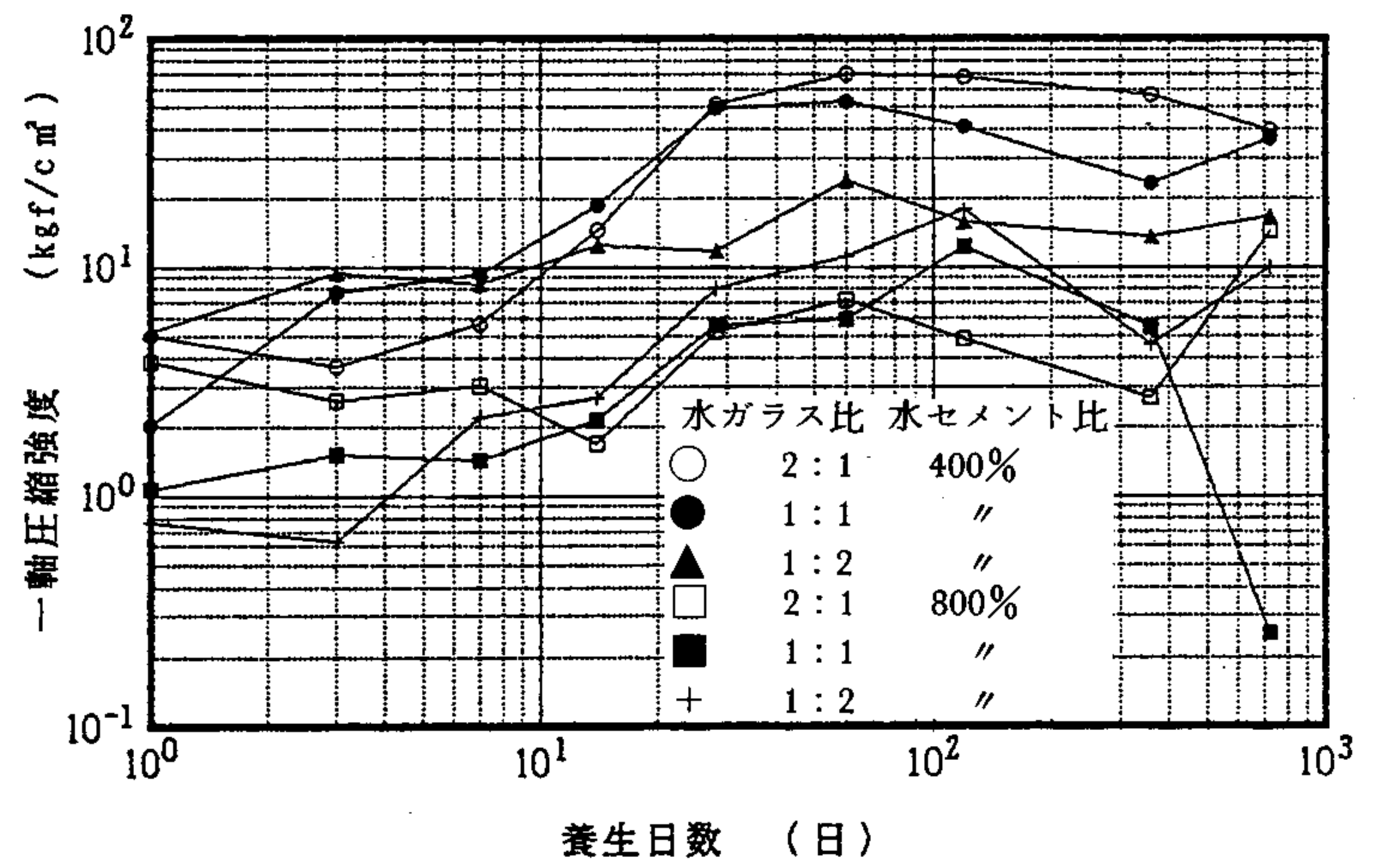


図5 養生日数と一軸圧縮強度との関係 (ポルトランド)

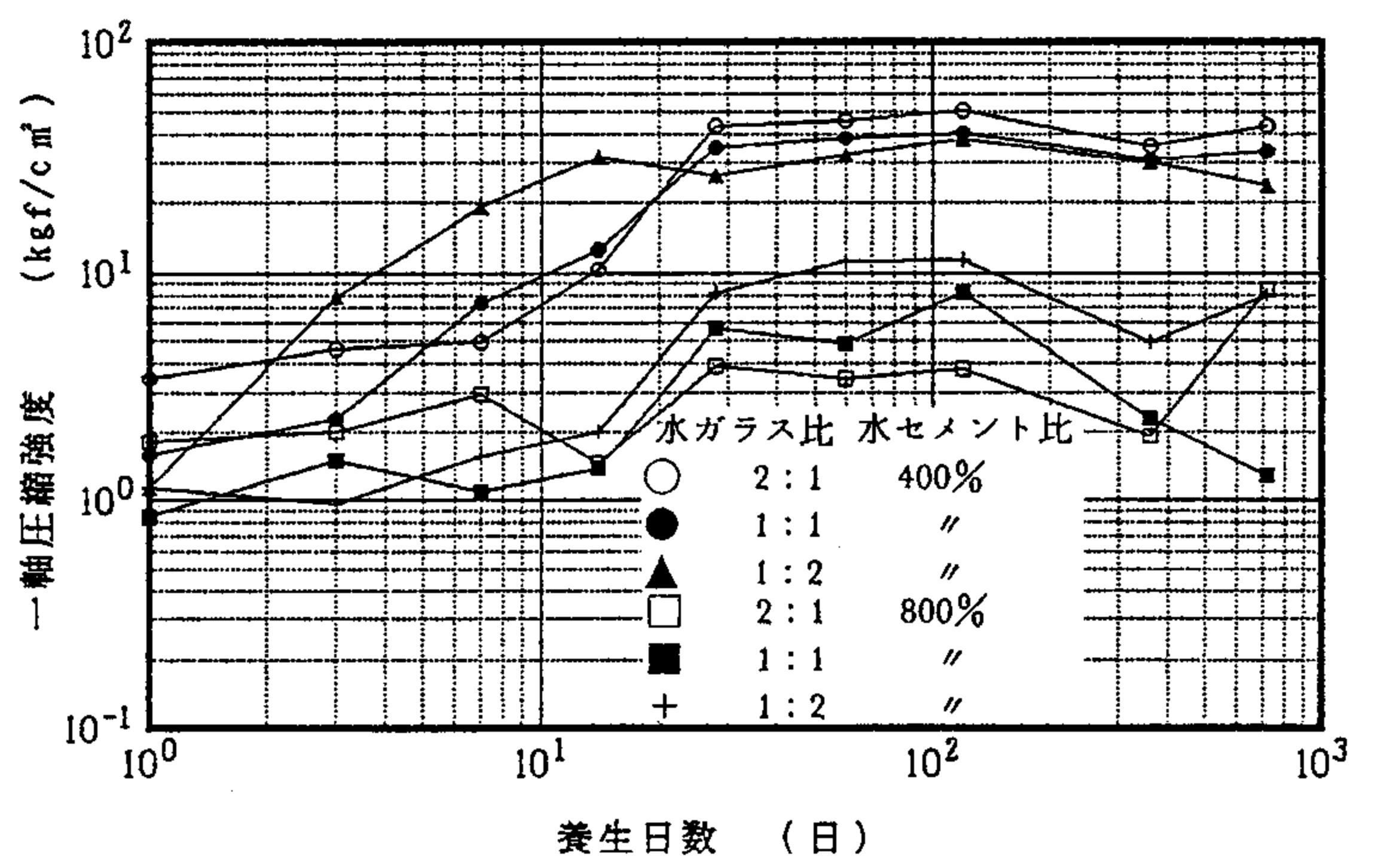


図6 養生日数と一軸圧縮強度との関係 (高炉)

メント濃度の濃い方が、強度は大きくなっており、一方、水ガラス濃度の違いの影響は少ないことがわかる。即ち、A剤の水ガラスと水との比が1:1で、B液の水セメント比が400%と800%のときを比較すると、一日強度がそれぞれ10 kgf/cm², 2.3 kgf/cm²と約4倍ほど、セメント濃度の濃い方が大きくなっている。その後の養生日数における濃度は120日でそれぞれ48 kgf/cm², 15 kgf/cm²とやはりセメント濃度の濃い方が3倍ほど大きい値を示している。図3よりマイクロAセメントを使用した場合は殆どマイクロSセメントのときと同じ傾向を示している。一方、図4より、マイクロNセメントでは、どの条件においても強度は10 kgf/cm²以下と大変小さく、28日以降の供試体は水中で崩れてしまっており、実験を行うことができなかった。図5よりポルトランドセメントを使用した場合、やはりセメント濃度の違いが強度にはっきりと表れており、マイクロSセメントのときと同様に濃い方が強度は大きくなるのがわかる。しかし、養生日数に対する強度増加の傾向をみると、養生日数が60日程度まで徐々に強度は増加し、この日数で、強度は最大値70 kgf/cm²になり、その後は減少傾向を示し始めてい

る。また図6より高炉セメントを使用した場合はポルトランドセメントのときと殆ど同じ傾向を示している。以上の結果をもとに、セメントの違いによる養生日数と一軸圧縮強度との関係を図7~図8に示している。図7ではA液の水ガラス比を1:1, B液の水セメント比を400%とした場合、図8ではA液は同じでB液の水セメント比を800%とした場合の結果を示している。図7より、マイクロNセメントを使用した場合のみ強度が1~2

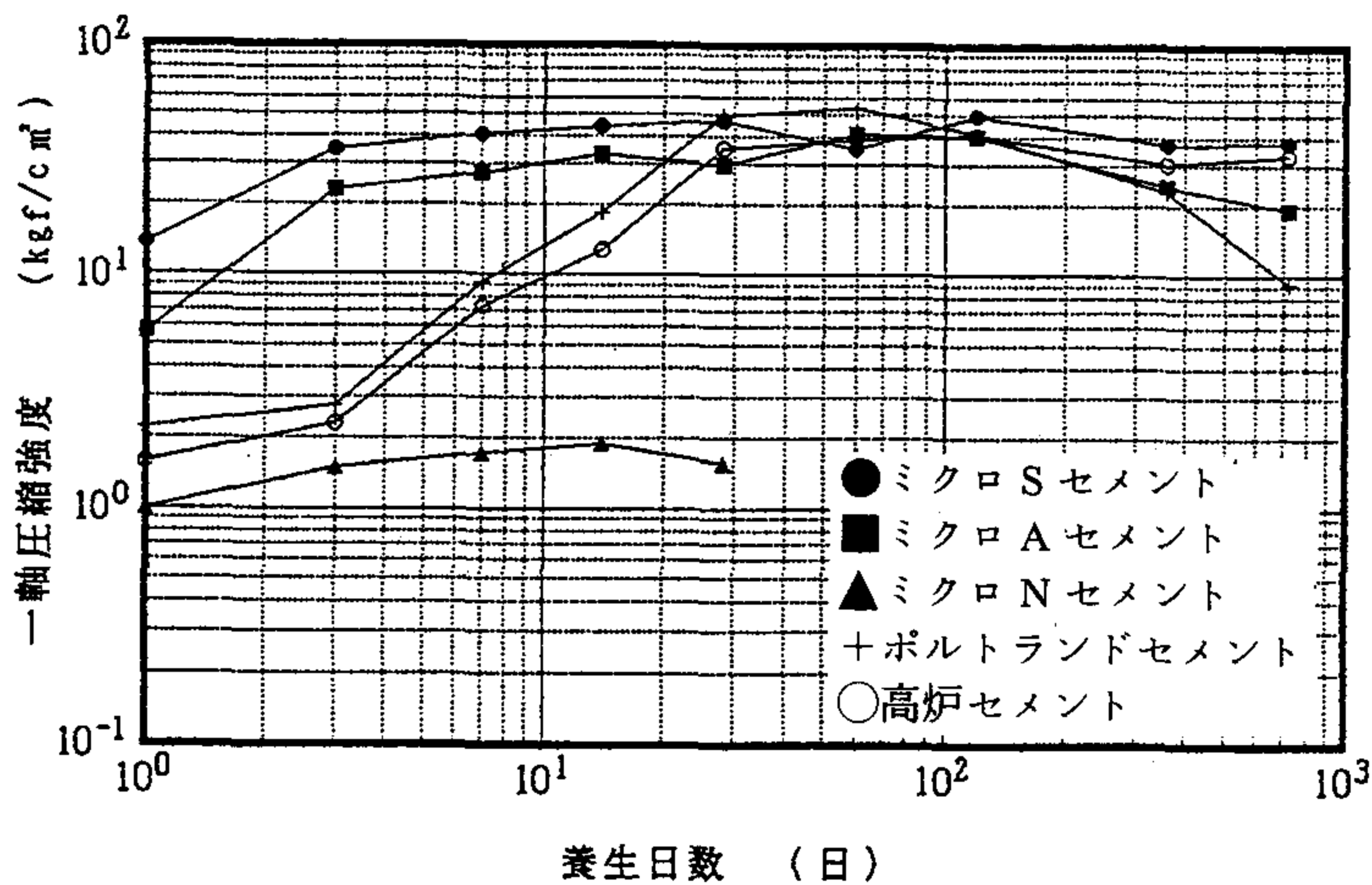


図7 養生日数と一軸圧縮強度との関係 (各セメントの比較, A:1:1, B:400%)

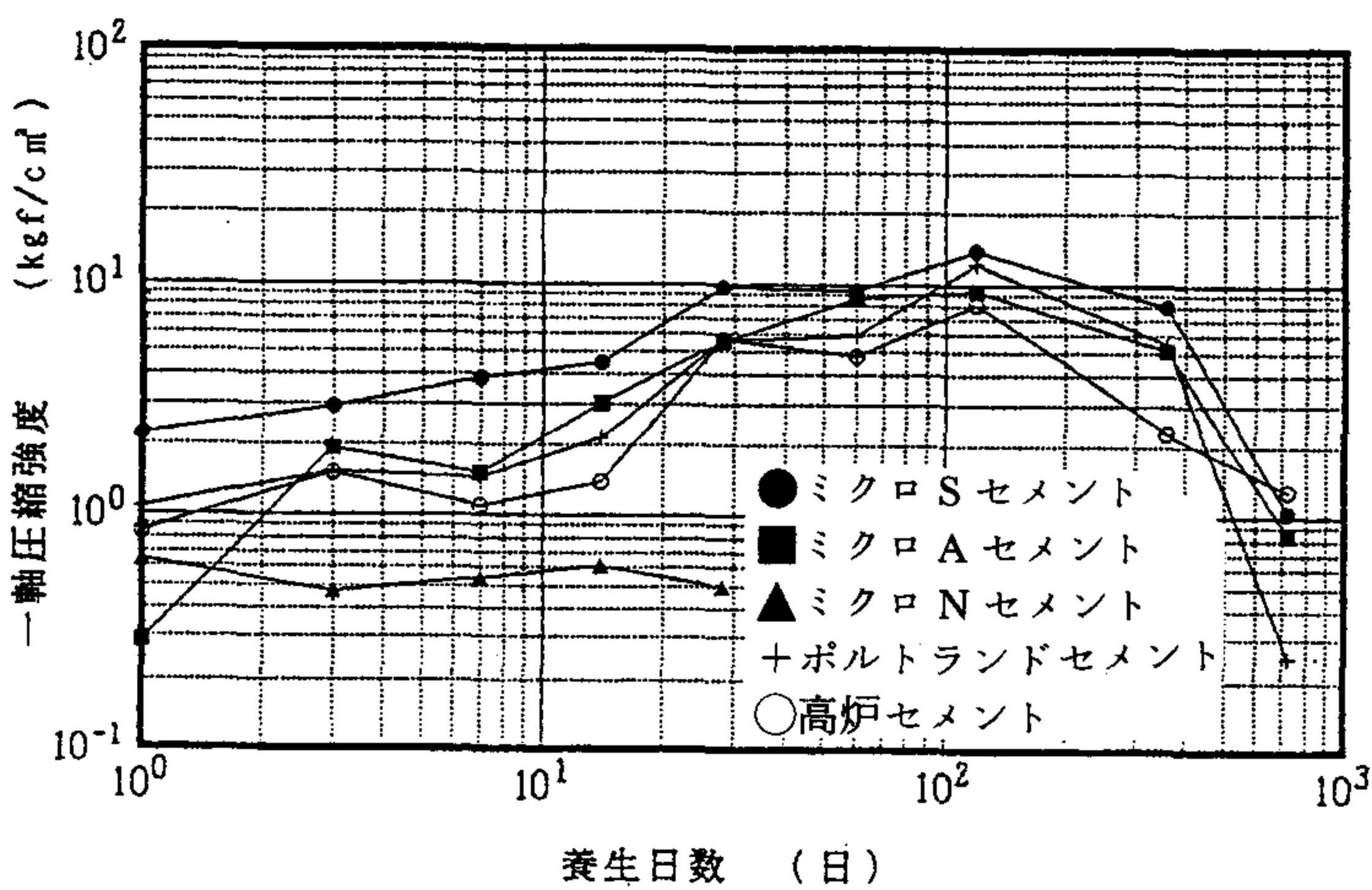


図8 養生日数と一軸圧縮強度との関係 (各セメントの比較, A1:1, B800%)

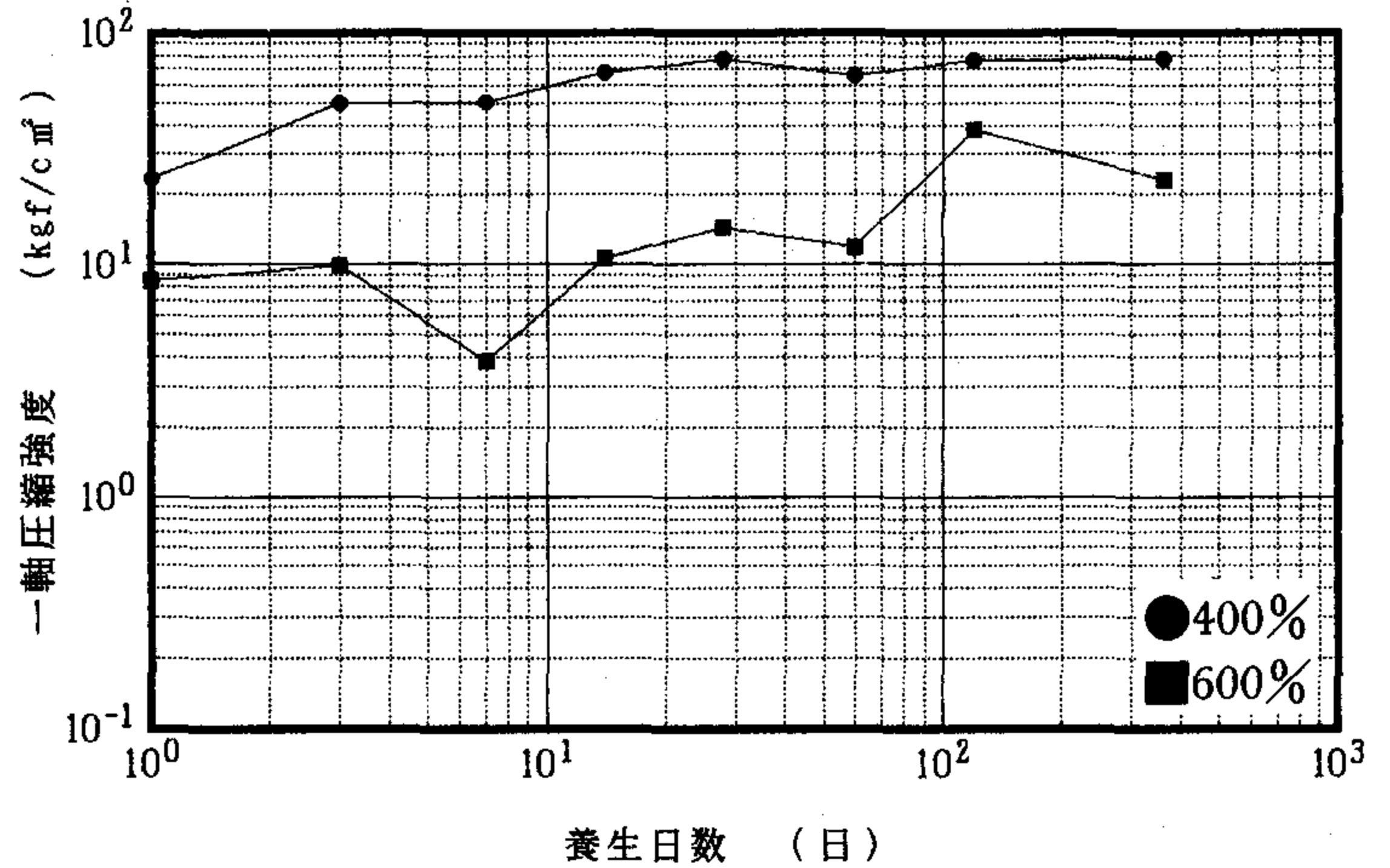


図9 固結砂の養生日数と一軸圧縮強度との関係 (マイクロS)

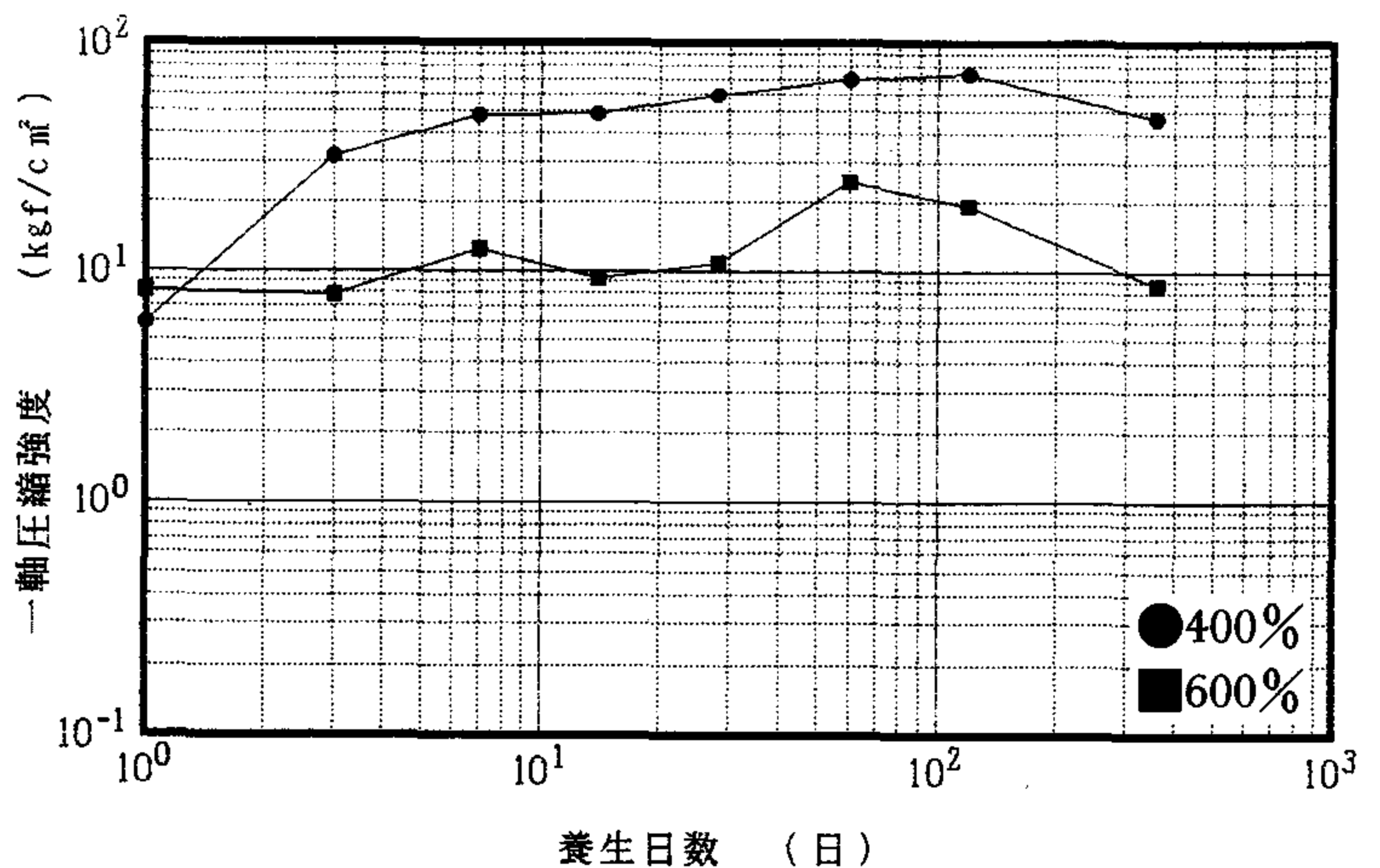


図10 固結砂の養生日数と一軸圧縮強度との関係 (マイクロA)

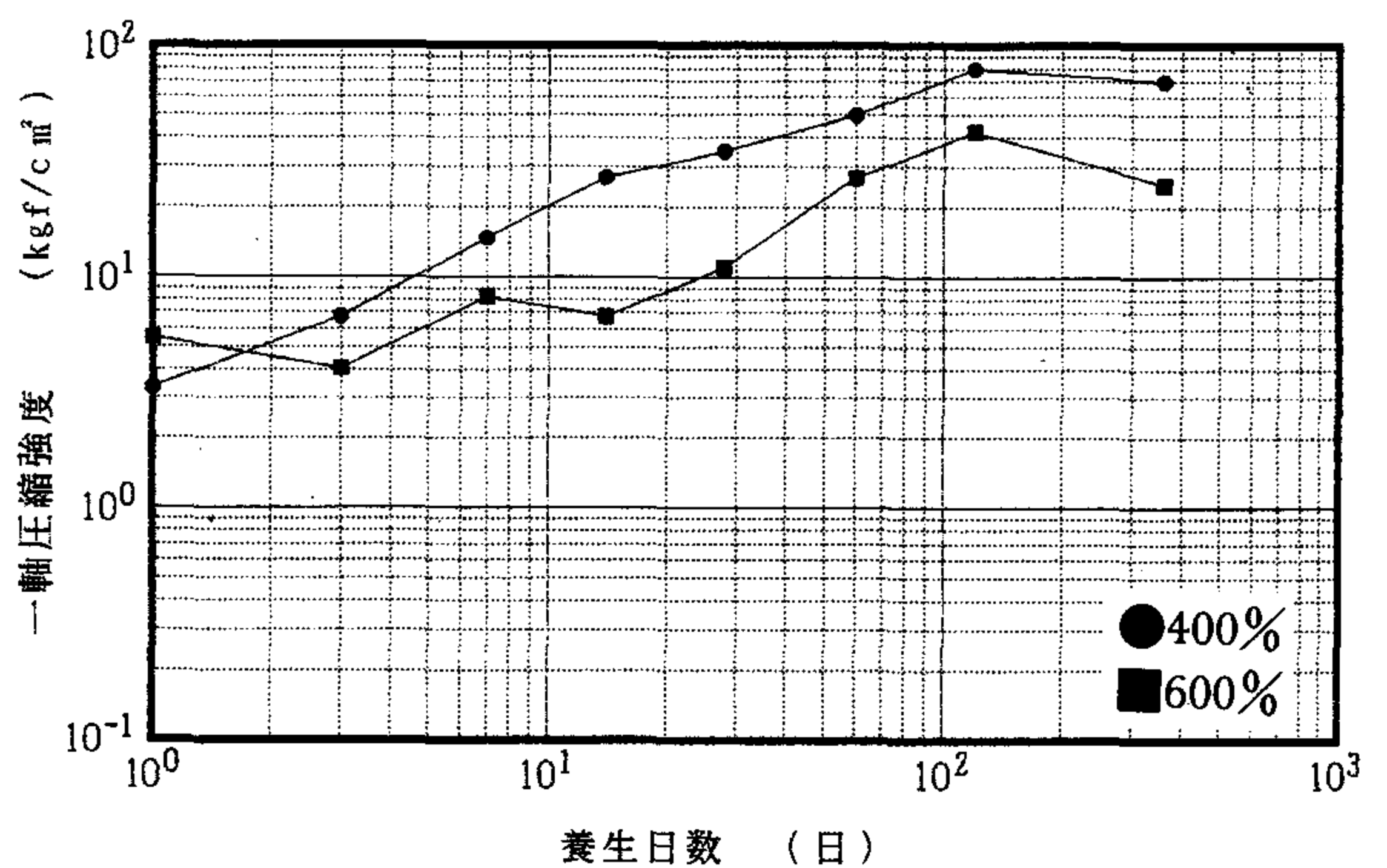


図11 固結砂の養生日数と一軸圧縮強度との関係 (ポルトランド)

kgf/cm²位と非常に小さい値であるが、他の超微粒子セメントを使用した場合、初期強度は大きく、養生日数に対する強度増加は28日程度でほぼ最大値に近づき、その強度を120日頃までは維持するが、その後は徐々に強度が減少していく傾向を示していることが判る。一方ポルトランドセメント等の通常のセメントを使用した場合、最大強度に達するまで約一ヶ月程かかり、その強度を120日頃までは保っているが、その後は超微粒子セメントと同様に、強度は減少傾向を示していることが判る。また図8よりセメント濃度が薄くなってもこの傾向は変わらないことが判るが、セメントの違いによる強度差はそれほど顕著には表れてはいない。

以上の実験結果より、水ガラス3号を用いた場合の固結砂の強度は養生日数が一ヶ月から4ヶ月の間は、マイクロNセメントを除いて、どのセメントを使用しても30 kgf/cm²以上の強度を維持しているが、4ヶ月以上になると強度低下をし始めることが判った。またマイクロNセメントを除いた超微粒子セメントを使用した場合は通常のセメントのときよりも、28日までの早期強度が大きくなること判った。

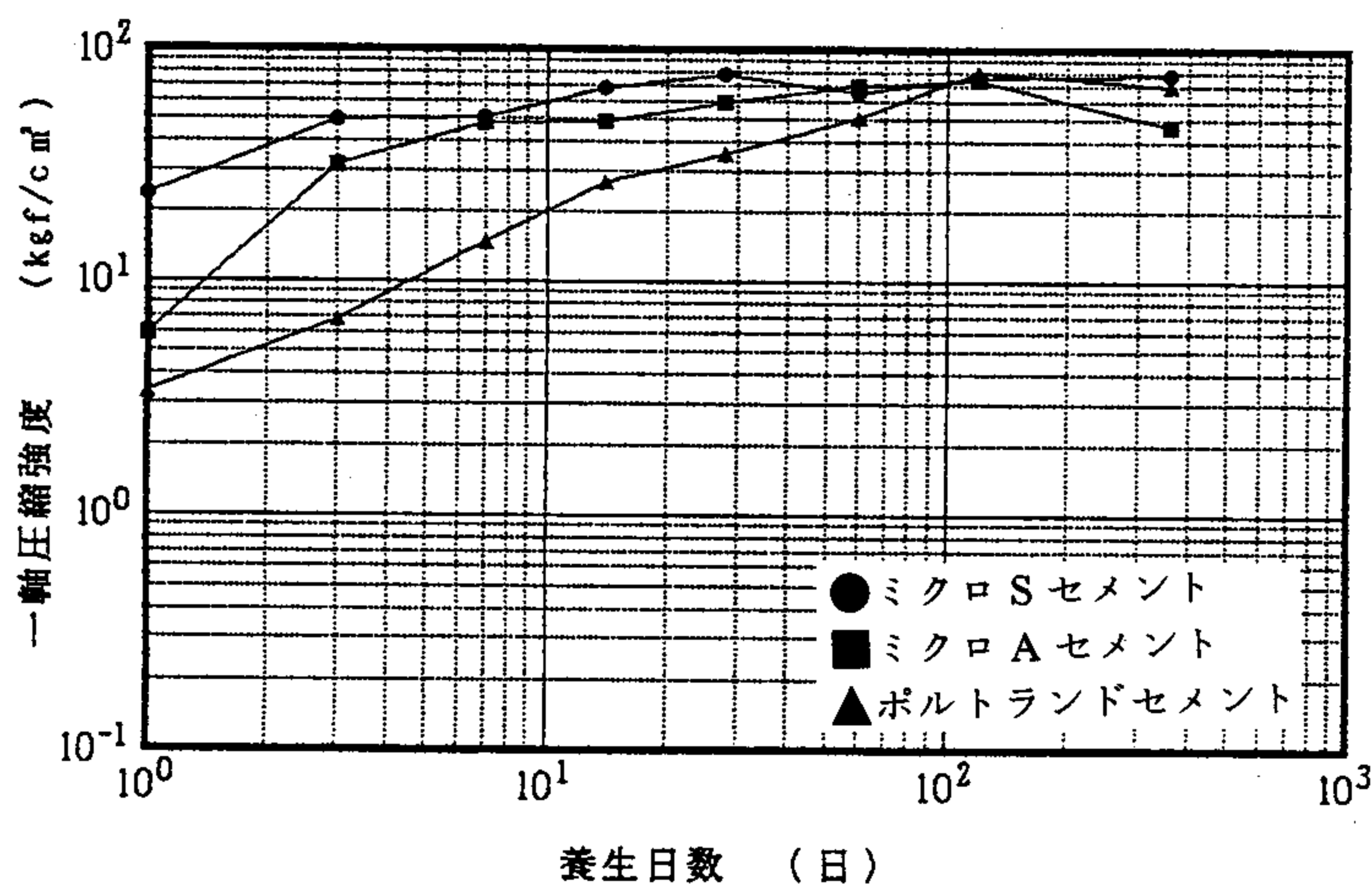


図12 固結砂の養生日数と一軸圧縮強度との関係 (各セメントの比較, A1:1, B400%)

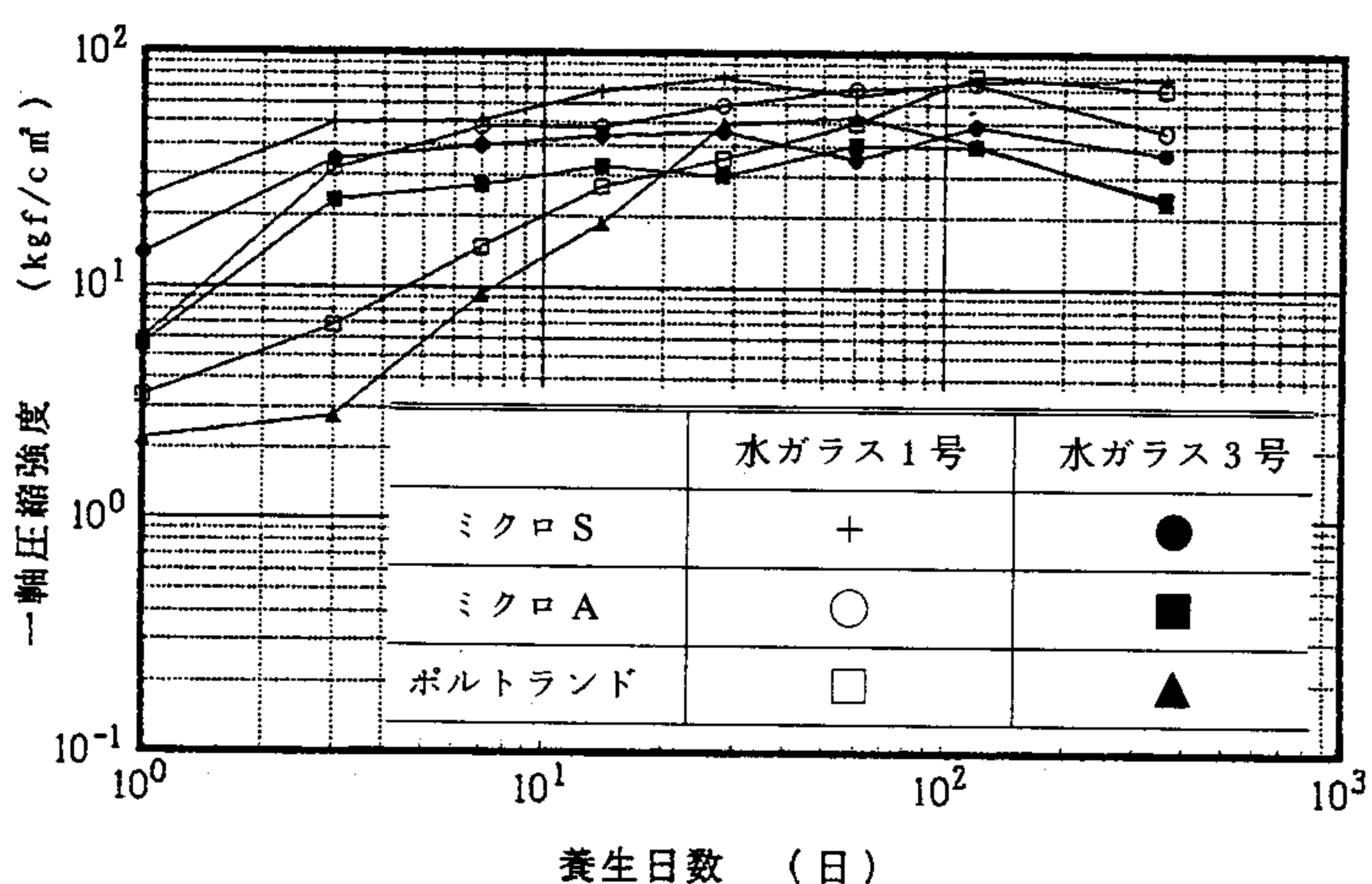


図13 水ガラスの違いによる養生日数と一軸圧縮強度との関係 (各セメントの比較)

4.2 水ガラス1号を用いた場合

A剤として水ガラス1号を用いた場合の各セメントの養生日数と一軸圧縮強度との関係を図9～図11にそれぞれ示している。水ガラス3号の結果を参考にして、超微粒子セメントとしてマイクロA, Sセメントを、また通常のセメントとしてポルトランドセメントを使用し、比較検討を行った。尚、水ガラス濃度の比較として水セメント比を400%と600%の2種類とした。図9よりマイクロSセメントを用いた場合、セメント濃度の濃い方が初期強度から大きく、養生日数が1日で24 kgf/cm²、28日で75 kgf/cm²を示している。その後僅かの減少はあるが、強度はほぼ一定値を示している。図10よりマイクロAセメントを用いた場合、1日強度は7 kgf/cm²と小さいが、3日目で21 kgf/cm²、28日で60 kgf/cm²、120日で75 kgf/cm²とセメント濃度の濃い方が大きい強度を示している。図11よりポルトランドセメントを使用した場合、1日強度は3 kgf/cm²と小さい値を示しているが、3日以降やはりセメント濃度の濃い方が大きい強度を示している。以上の結果をもとに、同一水ガラス濃度、水セメント濃度のときのセメントの違いによる影響を図12に示している。この図より超微粒子セメントを使用した方が早期強度は大きくなるが、養生日数が120日になると、どのセメントにおいても70 kgf/cm²程度とほぼ同じ強度を示すことが判った。このことから水ガラス1号を用いた場合でも、超微粒子セメントは1ヶ月以内の早期強度を期待する場合は十分有益な注入材になりうると考えられる。

4.3 水ガラスの違いによるホモゲルの強度特性

図13に超微粒子セメントとして、マイクロA, Sセメントの2種類、通常のセメントとしてポルトランドセメントを使用した場合に水ガラスの種類が異なるときの固結砂の強度変化を比較検討したものを示している。この図より、どのセメントにおいても水ガラス1号を使用した

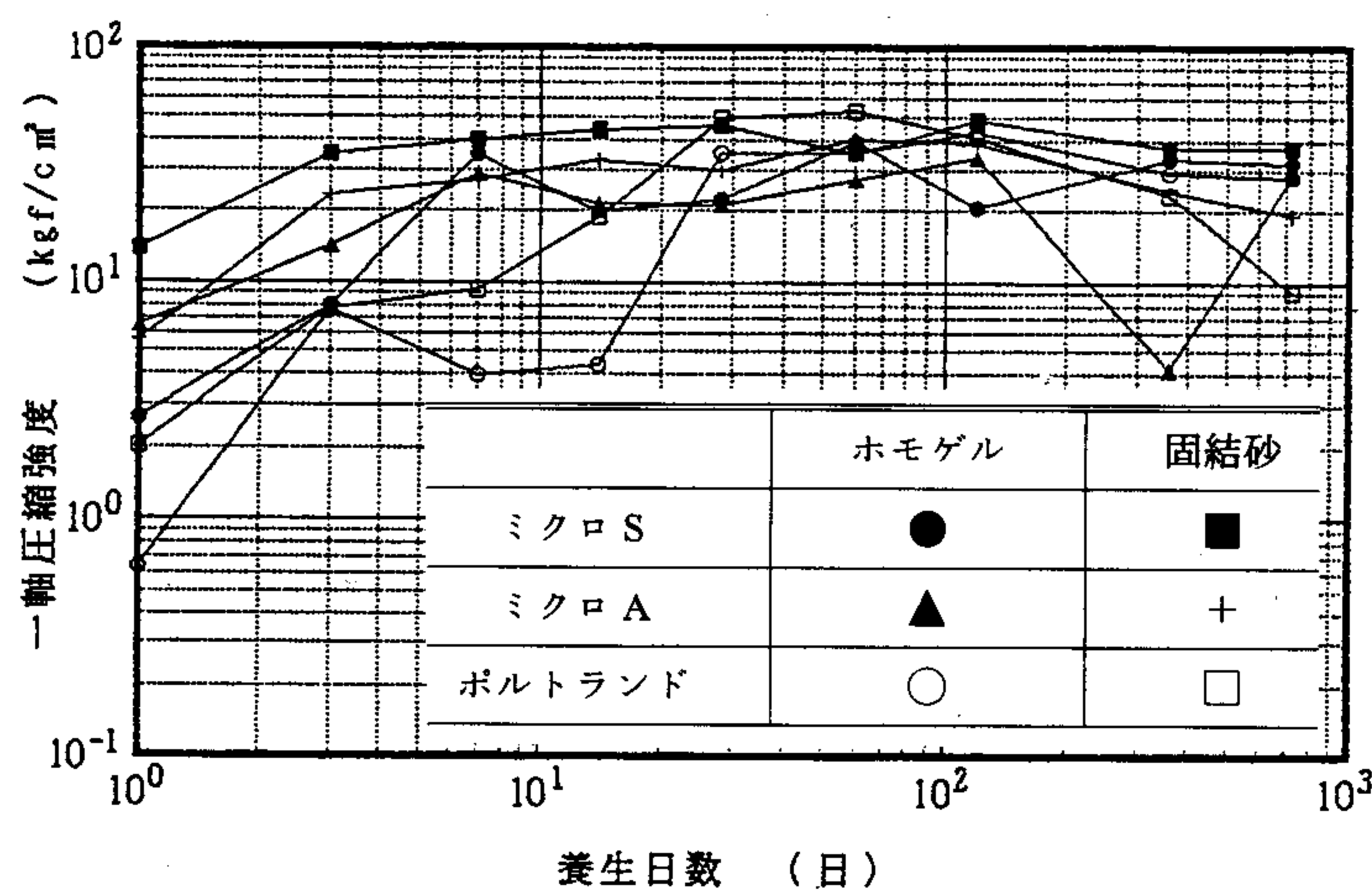


図14 各セメントのホモゲルと固結砂との比較

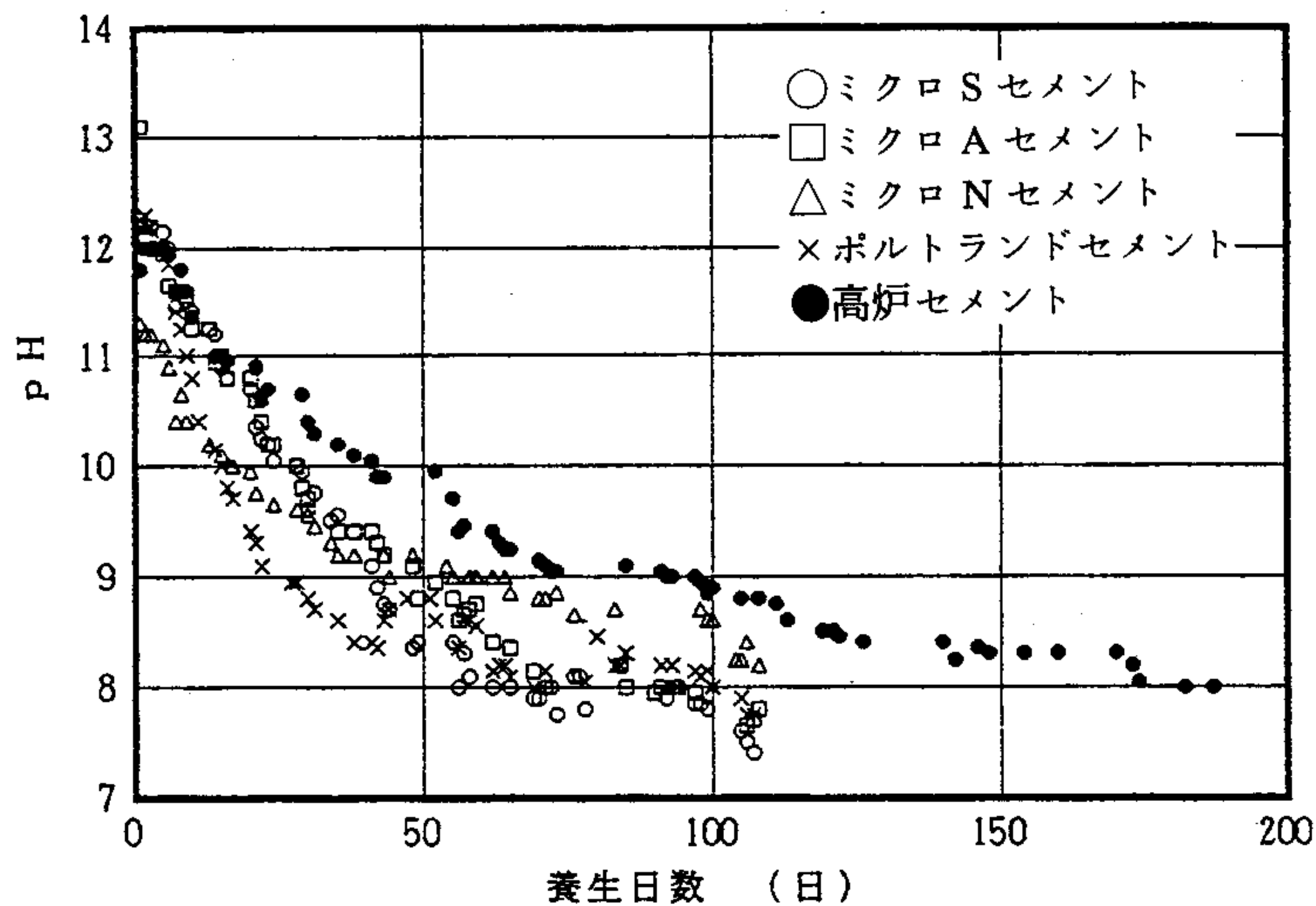


図15 養生水の pH 濃度経年変化
(水ガラス 3号, B液400%)

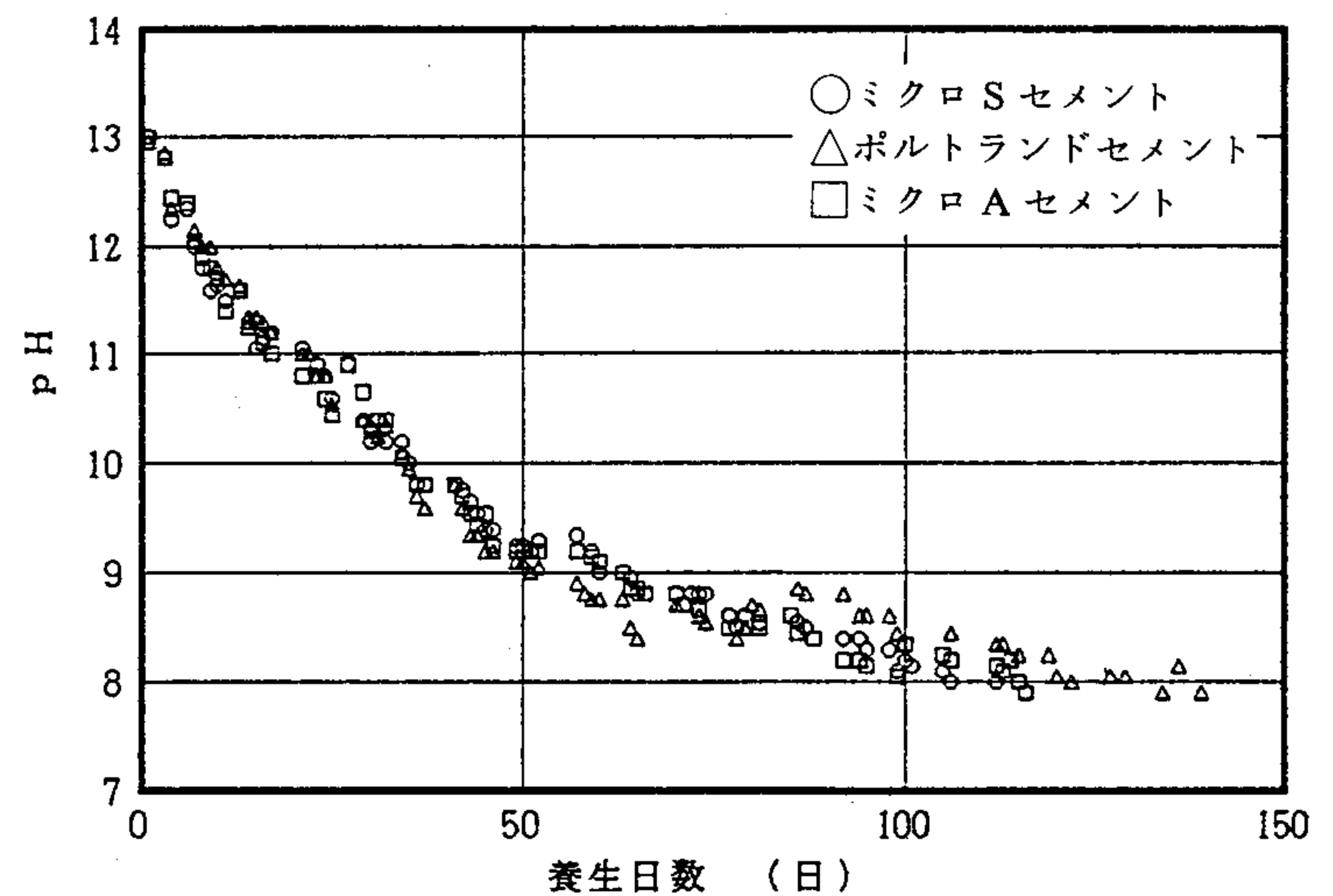


図16 養生水の pH 濃度経年変化
(水ガラス 1号, B液400%)

場合の方が、一軸圧縮強度は大きくなることが判る。また、どちらの水ガラスを用いても、養生日数が120日以上になると、強度低下が生じてきており、この傾向はホモゲルの場合の強度特性とほぼ同じ傾向であることが判った。

5. ホモゲルと固結砂との比較検討

A剤として水ガラス3号を用いたときの各セメントにおけるホモゲルと固結砂との強度を比較したものを図14に示している。この図より、どのセメントを使用しても、固結砂の強度の方がホモゲルのものより幾分大きい値を示すが、薬液の強度が安定している養生日数が一か月から三か月の間では、ホモゲルの強度も20 kgf/cm²以上を示しており、また、この養生期間では、ホモゲルの強度は固結砂の強度の70%程度はあることが判る。このことから、薬液注入された地盤の強度予測は、ある程度、そこに使用した薬液のホモゲルの強度特性からも十分予測可能であると考えられる。

6. 養生水の pH 測定結果

図15に水ガラス3号を用いたときの、図16に水ガラス1号を用いたときの各セメントにおける養生水の pH 測定結果を示す。これらの図を比較した結果、どのセメントにおいても、水ガラス1号を用いたときの養生水の pH が、水ガラス3号のときよりもやや高くなっていることが判る。また、個々の水ガラス別の傾向をみると、水ガラス3号を用いた場合は、高炉セメント以外はほぼ120日までに pH 8 になり、水ガラス1号では、110~130日までにどのセメントにおいても pH 8 になることが判る。一方個々のセメント別の特徴をみると、超微粒子セメントの方が通常のセメントよりも10~20日ほど早

く pH 8 になることが判った。ここで養生水の pH 値の変化と供試体の強度特性を比較してみると、個々のセメントで少しずつ異なるが、養生水の pH 値が約120日前後で中性に近づくことと、供試体の一軸圧縮強度が120日位まで最大値を示すことを考えると、注入材の強度は pH 値が変化している間は増加しており、pH 値が中性に近づく頃、強度は最も大きくなると考えることができる。以上のことから、養生水のアルカリ溶脱状況からも注入材の強度変化を知る手がかりになるのではないかと考えられる。

7. まとめ

本研究では、超微粒子セメント注入材の薬液ゲル化時間や固結砂の強度特性に及ぼすセメント量や水ガラス量の影響を調査研究したものであり、主な結果は次のとおりである。

7.1 超微粒子セメント場合、マイクロ N セメントのようにセメント粒子が細かすぎると薬液の反応時間は遅く、また強度低下が生じてしまう。このことから、セメント粒子の薬液における適性粒径が存在すると判断できる。

7.2 超微粒子セメント注入材（マイクロ N セメントを除く）の薬液ゲル化時間は、どのセメントにおいても、水ガラス濃度の影響は少なく、セメント量の影響が大きい。即ち、セメント量が少なくなるにつれて、ゲル時間は遅くなる。

7.3 超微粒子セメント注入材の固結砂の強度特性は、ホモゲルの強度特性とよく類似している。即ち、養生日数が120日頃まではある程度期待できるが、それ以上の長期強度は期待できない。

7.4 超微粒子セメントを使用した場合の水中へのアルカリ溶脱は、120日頃まで続くと判断できる。

謝辞：この研究は、平成2-4年度の3年間、建設省建築研究所田村昌仁博士のご指導のもと、卒業論文として本研究室にて行われたものである。また、セメント等の材料及び化学分析は宇部興産セメント事業部のご好意により提供していただいたものである。一方、この実験に際しては、卒論生諸君の尽力が大なるものです。ここに記して皆様に感謝の意を表します。

(原稿受付 平成5年9月22)

参 考 文 献

- 1) King, J. c. and Bush, E. G. W.: "Grouting of granular materials. "Symposium of grouting, Transaction of ASCE. Part-1, Vol. 128, pp. 1279-1317, 1963
- 2) Johnson, S. J.: "Cement and clay grouting of foundations." ASCE SM-1, Vol. 84, pp. 1-12, 1958
- 3) Scott, R. A.: "Grouts and drilling of muds in engineering practice." Butterworths, London, England, pp. 4-8, 1963
- 4) Mitchell, J. K.: "Soil improvement -state-of-the-art-reports-." Proc. of XICSMFE, Vol. 4, Stockholm, pp. 528-533, 1981
- 5) 土質工学会編：“薬液注入工法の調査・設計から施工まで”，土と基礎シリーズ9, pp. 128-129, 1985
- 6) 草野一人編：薬液注入ハンドブック，吉井書店，1983
- 7) 村上省一，穂積 豊：“船明ダム左岸フィル部のカーテングラウト”，大ダム，No. 102, 103号，pp. 60-73, 1983
- 8) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，pp. 148-152, 1973
- 9) Zebovitz, S., Krizek, R. J., and Atmatzidis, D. K.: "Injection of fine sand with very fine cement grout." ASCE GT-12, Vol. 115, pp. 1717-1734, 1989
- 10) 吉田 祐，松井利積，馬場恭平：“WMC（湿式細粒化セメント）グラウト工法とその適用性について”，電力土木，No. 201, 3月，pp. 59-77, 1986
- 11) 山本泰彦：“凝結遅延剤の分子構造並びにセメントの作用機構”セメント技術年報，pp. 148-152, 1973
- 12) 青函トンネル注入材料開発研究報告書：日本鉄道施設協会，1976
- 13) 森 麟，田村昌仁，佐藤洋一：超微粒子懸濁型注入薬液による固結強度の耐久性に関する実験的研究，第25回土質工学研究発表会，1990
- 14) 春名久美子，柴田英明，田村昌仁：超微粒子懸濁型注入剤による固結砂の強度特性に関する実験的研究，第26回土質工学研究発表会，1991, pp. 1925-1926
- 15) 菅野 健，柴田英明，田村昌仁：超微粒子懸濁型注入剤による固結砂の強度特性に関する実験的研究，第2報，第28回土質工学研究発表会，1993, pp. 2505-2506
- 16) 柴田英明：超微粒子セメント注入材（ホモゲル）の長期強度特性に関する研究，国土館大学理工学研究所報告第6号，1993, pp. 16-23