

(51) ダム基礎軟岩のパイピング抵抗性

建設省土木研究所 正会員 松本徳久

同 同 山口嘉一

同 同 ○田原則雄

Piping Potential of Soft Rocks for Dam Foundations

Norihiisa MATSUMOTO, Yoshikazu YAMAGUCHI and Norio TAHARA

Public Works Research Institute, Ministry of Construction

Abstract

Recently, in Japan, not a few dam sites are composed of soft rock foundations, such as sedimentary rock of the Neogene Tertiary, volcanic fall deposit of Quaternary, weathered granite and so on. Soft rocks are weak in strength compared to hard rocks. On the other hand, large seepage force will take place in dam foundation during filling of reservoir. If dam foundation consists of soft rock, there is the possibility that seepage failure, such as piping, internal erosion and hydraulic fracturing, will occur. Therefore it is very important to grasp the piping potential by laboratory or field test in surveying or designing stage.

In this paper we showed the results of laboratory piping tests for soft rocks collected from several dam sites as disturbed or undisturbed specimens. Furthermore we considered the relationship between critical hydraulic gradient(i_{cr}) and void ratio(e), coefficient of permeability(k) or unconfined compressive strength(q_u). Here, i_{cr} is the index of piping potential which can be gotten by laboratory piping test.

1. はじめに

ダムの本体建設工事は、堤体築造と基礎処理に大別することができる。主として基礎地盤がダム基礎として十分堅固であるサイトにダムを建設してきた時代には、基礎に対する設計・施工の重要性は堤体に対するそれに比べて相対的に低いものであった。しかし、近年、我が国においては、上記のような堅固な地盤を有するダムサイトの多くが既に開発されたこともあり、軟岩、風化岩、破碎岩といった強度の小さい岩盤や砂礫層上でのダムの建設（地下深部に弱層を挟んでいる場合も含む）に対する要求が増大してきている。これに伴い、ダムの設計・施工における技術課題の焦点は堤体築造から基礎処理に移ってきているといっても過言ではない。つまり、上記の地盤はその強度が小さいため、硬岩と比較すると、設計段階でその安全性を検討すべき項目が多い。その1つに、ダム湛水時に発生する基礎の浸透流によるパイピング発生の可能性を把握することが挙げられる。

地盤のパイピング抵抗特性を知る試験方法には、現場から採取した不攪乱試料に対して行う室内試験と現地におけるありのままの地盤に対して行う現場試験がある。筆者らは、ありのままの地盤に対して実施できるという利点を考慮し、現場パイピング試験に関する検討を進めている。^{1)~4)}一方、室内試験には、供試体の大きさの制約等の問題はあるものの、現場試験に比べると安価であるため試験数量を増やすことができるうえ、種々のダムサイトで統一した方法により試験を実施することが容易であるため試験結果の比較がしやすいという利点がある。実際、建設省系のいくつかのダムにおいては、その設計段階に不攪乱試料に対する

室内パイピング試験を実施し、パイピング抵抗性の指標である限界動水勾配 i_{cr} を求めている。今回は、この i_{cr} と間隙比、透水係数、一軸圧縮強度等の一般的な諸物性との関係を整理し、軟岩のパイピング抵抗性の一般的な諸物性による評価の可能性を検討したので報告する。

2. 試験対象試料

試験対象試料は7つのダムサイトで採取された11種類で、砂岩2、泥岩1、凝灰岩3の軟岩の他に、シラス3、砂2の土も含んでいる。地質年代的には、新第三紀4、第四紀7と、すべて新第三紀以降の岩あるいは土である。各試料の物理試験の結果をパイピング試験結果とともに表-1に示す。物理試験結果は原則として平均値で記している。なお、漁川ダムと長柄ダムの結果は、それぞれ参考文献5),6)によっている。

表-1 軟岩の物理試験およびパイピング試験結果

No	岩 種	ダムサイト名	地質年代	湿潤密度 (g/cm^3)	自然 含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm^3)	土粒子の 比重	間隙比	一軸圧縮 強度 (kgf/cm^2)	飽和度 (%)	透水係数 (cm/s)	コンシステンシー			限界動水 勾配 (i_{cr})	G_r-1 i_{cr} (i_{cr})	$\alpha = \frac{i_{cr}}{i_{cr}}$
												液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 (%)			
不 乱 試 料	1 砂 岩	S ダム	新第三紀中 新世～鮮新世	2.04	18.8	1.71	2.78	0.58	15.6	80.6	6.8×10^{-5}	38.5	21.1	17.4	5 (現場)	1.13	4.4
	2 泥 岩	S ダム	新第三紀中 新世～鮮新世	1.81	35.1	1.33	2.71	1.05	13.2	93.7	2.1×10^{-6}	67.1	32.3	34.8	80 (現場)	0.83	96.4
	3 凝石凝灰岩	漁川ダム ⁵⁾	第四紀更新世	1.58	42.5	1.09	2.29	1.11	11.1	88.9	2.5×10^{-4}	—	—	—	注2) 128~242 (5)	0.61	206.6 396.7
	4 白色火山灰 (粗 粒)	R ダム	第四紀更新世	0.98	21.6	0.81	2.48	2.08	注1) 1.0	28.0	2.3×10^{-5} (1)	NP	NP	NP	5 (1)	0.48	10.4
	5 シラ ス	I ダム	第四紀更新世	1.61	31.0	1.23	2.67	1.17	0.78	70.7	2.5×10^{-5} ~ 8.2×10^{-4} (10)	—	—	—	18.7~45 (2)	0.77	21.7 58.4
	6 非熔結凝灰岩	I ダム	第四紀更新世	1.70	29.6	1.31	2.53	0.93	0.80	80.5	1.3×10^{-4} ~ 2.0×10^{-4} (11)	—	—	—	14.2 ~17.2 (2)	0.79	18.0
	7 降下凝石	I ダム	第四紀更新世	0.94	112.2	0.44	2.47	4.58	—	80.5	1.3×10^{-4} ~ 8.1×10^{-4} (8)	—	—	—	5.7 ~25.3 (2)	0.28	21.9
	8 砂 (金剛地層)	長柄ダム ⁶⁾	第四紀更新世	1.70	11.9	1.52	2.80	0.84	—	39.7	3.2×10^{-3} ~ 7.2×10^{-3} (7)	—	—	—	5.7 ~14.7 (7)	0.98	5.8 15.0
	9 砂 (成田層)	長柄ダム	第四紀更新世	1.48	19.4	1.23	2.70	1.19	—	44.0	7.9×10^{-4} ~ 1.2×10^{-3} (3)	—	—	—	5.1~7.1 (3)	0.78	6.5 9.1
擾 乱 試 料	10 粗粒砂岩	P ダム	新第三紀中 新世～鮮新世	1.55	28.0	1.21	2.67	1.0	—	74.8	1.6×10^{-3} ~ 3.2×10^{-3}	—	—	—	11.4 (1)	0.84	13.8
	11 凝灰岩	K ダム ⁷⁾	新第三紀 鮮新世	1.90	19.3	1.59	2.49	0.56	注1) 2.8	65.8	1.3×10^{-4} ~ 1.8×10^{-3} (8)	35.1	NP	NP	11~33 (8)	0.96	11.5 34.4

注1) 三軸圧縮試験結果より推定。

注2) 供試体高さ毎に求めた動水勾配の平均値の範囲を示す。

注3) () 内数字はデータ数を示す。

3. 室内パイピング試験方法の概要

パイピング試験といっても現在のところまだ統一された試験基準があるわけではない。しかし、室内試験法の原理は図-1に示すように、通常の透水試験機に段階的に安定した圧力水を供給できる装置を取り付け、

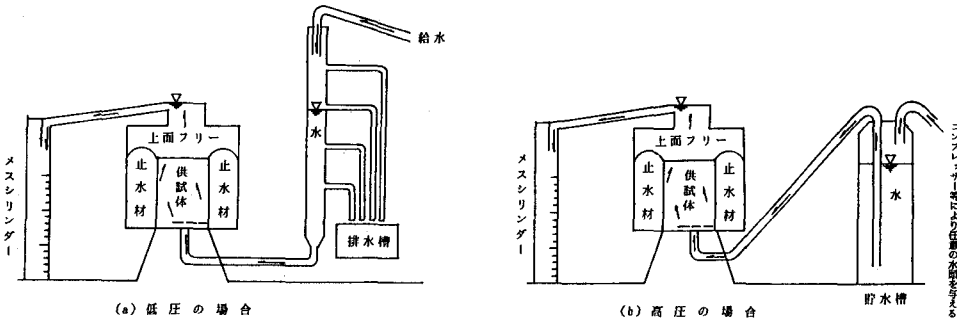


図-1 室内パイピング試験概念図

表-2 調査対象ダムの室内試験方法一覧

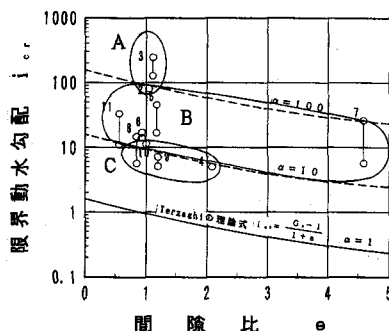
	漁川ダム ³⁾	R ダム	I ダム			長柄ダム ⁴⁾	P ダム	K ダム ⁷⁾
			シラス	非輝結凝灰岩	降下礫石			
止水材	パタフィン	ウレタン樹脂	水ガラスセメント	水ガラスセメント	水ガラスセメント	パタフィン	——	エポキシ樹脂
供試体寸法	径 150mm 高さ 30~250mm	径 70~80mm 高さ 100mm	径 185~196mm 高さ 200~300mm	径 194~196mm 高さ 200~300mm	径 115~123mm 高さ 116~176mm	径 180mm 高さ 100mm	——	径 100mm 高さ 127mm
昇圧段階	0~8kgf/cm ² まで 0.2kgf/cm ² づつ	①動水勾配2以下 0.25づつ ②動水勾配2以上 0.50づつ	①0~3.0kgf/cm ² 0.5kgf/cm ² づつ ②3.0~10.0kgf/cm ² 1.0kgf/cm ² づつ	①0~3.0kgf/cm ² 0.5kgf/cm ² づつ ②3.0~10.0kgf/cm ² 1.0kgf/cm ² づつ	①0~1.0kgf/cm ² 0.25kgf/cm ² づつ ②1.0~3.0kgf/cm ² 0.5kgf/cm ² づつ ③3.0~10.0kgf/cm ² 1.0kgf/cm ² づつ	——	——	・段階的に動水勾配を載荷 ・第1段階の動水勾配は1で、その後2ずつ増加
流量測定方法	各圧力段階で10分間測定	・動水勾配=0.25で1昼夜通水 ・10分毎に透過水量を測定し、透過水量が一定になった時点で次段階に移る。	①0~3.0kgf/cm ² 昇圧…… 0.1kgf/cm ² 昇圧で15分間測定 一定水圧…… 0.5kgf/cm ² づつで30分間測定 ②3.0~10.0kgf/cm ² 昇圧…… 0.2kgf/cm ² 昇圧で15分間測定 一定水圧…… 1.0kgf/cm ² づつで30分間測定	①0~1.0kgf/cm ² 昇圧…… 0.05kgf/cm ² 昇圧で15分間測定 一定水圧…… 0.5, 1.0kgf/cm ² は30分間測定 1.5kgf/cm ² 以上は30分間測定 ②1.0~3.0kgf/cm ² シラスの①に同じ ③3.0~10.0kgf/cm ² シラスの②に同じ	①0~1.0kgf/cm ² 昇圧…… 0.025kgf/cm ² 昇圧で15分間測定 一定水圧…… 0.05kgf/cm ² 昇圧で30分間測定 0.25kgf/cm ² づつで30分間測定 ②1.0~3.0kgf/cm ² シラスの①に同じ ③3.0~10.0kgf/cm ² シラスの②に同じ	——	——	1 動水勾配段階は、1日24時間継続し、その最終の1時間で透過水量を測定する。
破壊の判定基準	圧力(動水勾配)と流量の直線関係から流量が増加する点での圧力から限界動水勾配を求める。	圧力(動水勾配)と流量の直線関係から流量が増加する点での圧力から限界動水勾配を求める。	最初の噴出孔の発生した時点での動水勾配を限界動水勾配とする。	最初の噴出孔の発生した時点での動水勾配を限界動水勾配とする。	最初の噴出孔の発生した時点での動水勾配を限界動水勾配とする。	動水勾配と透過水量の直線関係から透過水量が増加する点を限界動水勾配とする。	水圧を徐々にあげ配水が流出した時点まで破壊時(パイピング発生)とする。	供試体表面が盛り上がり、ひび割れが発生した時点の動水勾配を限界動水勾配とする。
観察項目	流出量の変化と粒子の移動を観測して撮影	透過量、漏洩、目視による内視観察、写真、ビデオ撮影	目視観察、流量増加点、流量-動水勾配変化点より確認	目視観察、流量増加点、流量-動水勾配変化点より確認	目視観察、流量増加点、流量-動水勾配変化点より確認	透過量及び目視による内視観察	——	流量、測定水の漏れ、供試体の変状等を目視により観察

水頭を徐々に増加させて破壊時(パイピング発生)の動水勾配を求めるとというのが一般的である。一定水圧のかけ方は、低圧(0.2kgf/cm²程度まで)域では位置水頭差を利用し、高圧の場合にはコンプレッサー等を使用して任意の水頭を与えるというものである。また、通水の方向は図-1に示すように供試体下面から上向きとしている。表-2に今回対象としたダムの室内試験方法一覧を示す。表-2に見られるように、試験方法は各ダムでまちまちとなっている。また、今回は室内試験を中心とした記述となるため、現場試験については参考文献1),2)を参照されたい。

4. 限界動水勾配と一般的な諸物性との関係

4.1 間隙比と限界動水勾配との関係

図-2は、横軸に間隙比 e 、縦軸に限界動水勾配 i_{cr} をとり、図示したものである。なお、Sダム砂岩に対する現場試験は精度上の問題があると判断し、以下の考察の対象からは除外している。図-2で間隙比に着目すると間隙比1の近傍で限界動水勾配は1オーダ以上の差がでていいる。これは岩種の違いや強度、つまり粒子の固結度の影響を大きく受けているものと考えられる。図-2に示すTerzaghi⁸⁾の理論限界動水勾配($i_{ct} = (G_s - 1) / (1 + e)$:ここに、 G_s は土粒子の比重)は、粒子相互間の摩擦力、粘着力、粒径、粒度分布などを無視しており、これと実測限界動水勾配(i_{cr})との比 $\alpha = i_{cr} / i_{ct}$ は骨格構造の発達によるパイピング抵抗性の大小を表わすものである。図中に示す曲線はTerzaghiの理論限界動水勾配で $G_s = 2.6$ とした場合の理論曲線である。また、実測・理論動水勾配比 α 、一軸圧縮強度 q_u に着目すると



- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1: 砂岩 (Sダム) | 7: 降下礫石 (Iダム) |
| 2: 凝灰岩 (Sダム) | 8: 砂(金剛地層) (長柄ダム) |
| 3: 輝石凝灰岩 (漁川ダム) | 9: 砂(成田層) (長柄ダム) |
| 4: 白色火山灰(粗粒) (Rダム) | 10: 粗粒砂岩 (Pダム) |
| 5: シラス (Iダム) | 11: 凝灰岩 (Kダム) |
| 6: 非輝結凝灰岩 (Iダム) | |

図-2 間隙比と限界動水勾配との関係

表-3のように概ね3グループに分類できそうである。

4. 2 透水係数と限界動水勾配との関係

図-3は、横軸に透水係数 k 、縦軸に限界動水勾配 i_{cr} をとり、図示したものである。図中の3本の直線はSichartの式⁹⁾、中部電力の式¹⁰⁾、大雪ダムのコア材の結果¹¹⁾を示したものである。全体の傾向としては一般的に考えられるように、透水係数が大きいほど限界動水勾配は小さいと言えるが、バラツキも大きい。透水係数が同程度で限界動水勾配に大きな差がでているのは、4. 1でも述べたように、骨格構造に差異があるためと考えられ、密実で一軸圧縮強度の大きなものは限界動水勾配も大きな値となっている。また、横軸方向についても着目してみると、限界動水勾配が同程度でも透水係数が大きく差が出ているものがある。これは、間隙の影響が大きいと考えるが、室内試験精度の問題もある。即ち、限界動水勾配については攪乱試料のデータ、現場試験のデータが混じっていることと、各ダムでの試験方法が統一されていないことである。

4. 3 一軸圧縮強度と限界動水勾配との関係

図-4は横軸に一軸圧縮強度 q_u 、縦軸に限界動水勾配 i_{cr} をとり、図示したものである。今回調査したダムでは一軸圧縮試験を実施しているダムが少ないため、Rダム、Kダムについては三軸圧縮試験の結果から拘束圧を0とした場合の主応力の値として算出している。図-4より一軸圧縮強度が大きいほど限界動水勾配が大きくなっていることがわかる。また、長柄ダム、Pダムにおいて一軸圧縮試験を実施していないのは、未固結の砂層、砂岩で一軸圧縮試験用供試体として自立しないほど強度が小さいためと考える。

表-4に一軸圧縮強度、限界動水勾配、安全度の関係から考えられる試験の選択方法(案)を示している。試験は基本的には室内試験を行うものとし、不攪乱試料が採取できない場合や室内試験の結果の検証を要する場合には現場試験を行う。一般的には $q_u \leq 1 \text{ kgf/cm}^2$ では室内試験は困難な場合が多い。また、安全度については、通常のダム基礎を考えた場合、限界動水勾配が100以上あれば十分安全と考え、100以下の場合にはバイピング試験による検証が必要と考えた。ただ今回はデータ数に限りがあり、信頼性にやや欠けるため1つの大まかな目安とし、今後データの追加とともに確証を得たいと考えている。

5. 問題点と今後の対応策

今回の調査ではデータ数が少なかったため、間隙比、透水係数、一軸圧縮強度から限界動水勾配を予測する式を提案するには至らなかったが、一軸圧縮強度をパラメータとした1

表-3 各区分毎の実測・理論

限界動水勾配比の比較

区分	実測・理論動水勾配比 α	一軸圧縮強度 $q_u(\text{kgf/cm}^2)$
A	$100 \leq \alpha$	$10 \leq q_u$
B	$10 \sim 100$	$1 \sim 10$
C	$\alpha \leq 10$	$q_u \leq 1$

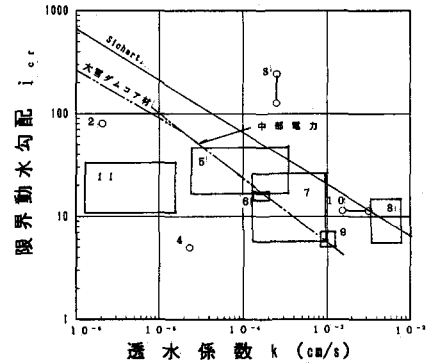


図-3 透水係数と限界動水勾配との関係

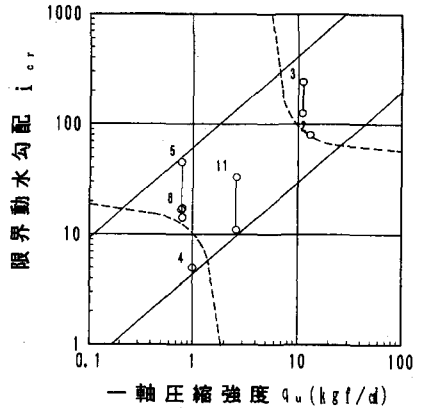


図-4 一軸圧縮強度と限界動水勾配との関係

表-4 試験、一軸圧縮強度、限界動水勾配、安全度の関係

試験	現場試験	室内試験 及び現場試験	なし
一軸圧縮強度 $q_u(\text{kgf/cm}^2)$	$q_u \leq 1$	$1 \sim 10$	$10 \leq q_u$
限界動水勾配 i_{cr}	$i_{cr} \leq 10$	$10 \sim 100$	$100 \leq i_{cr}$
安全度	かなり危険	やや危険	安全

つの目安を得ることはできた。そこで、今後この研究を更に進めるため、表-5に現状の問題点と今後の対応策を整理した。

表-5 問題点と今後の対応策

項 目	問 題 点	今 後 の 対 応 策
試験データ	- パイピング試験のデータ数が少ない。特に、q_cが3~10kgf/cm²の試料のデータが少ない。 - 岩種別にパイピング特性の目安をつかむには、データ数に片寄りがあり信頼性に欠ける。 - 爆発試験、現場試験のデータも追加して補っているので、データの比較が難しい。	- パイピング試験に関する情報収集、データの補充を行う。 - 室内試験方法を確立し、パイピング試験を行って、データを追加する。 - 岩種別によるデータを整理し、補正因子を加えている。信頼性が高くなり、岩種毎の予測も可能となる。 - 不規則な試験を用いた室内試験データが十分そろった場合、爆発試験、現場試験のデータをそのせいで補正を行う。
試験方法	- 統一された試験基準がない。 - 各ダムで独自の方法でパイピング試験を実施している。 - 昇圧方法、昇圧ピッチが各ダムでまちまちである。 - 昇圧ピッチを小刻みに取っているため限界動水勾配が大きい場合にはデータが多くなり、工費的にも経済的にもマイナスとなる。	- 標準化を図り、基準を作る。 - 標準化、統一する。(高圧試験と低圧試験に分ける) - 安全上必要とされる動水勾配から昇圧段階を逆算し、全体の10段階程度とし、適度に配分する。
供 試 体	サンプリングが不可能なほどルーズな軟岩もあり、試料が採取できない。	- 現地のありのままの状態で現場試験を行なう。 - 現場試験についても精度の向上、経済性を考慮した試験方法を検討する。

6. おわりに

計画、設計段階の初期にパイピング試験を実施しなくても抵抗力の概略の目安となる指標があれば非常に便利であり、またパイピング試験には現在JISのような指針となるものがないので、どのような試験基準で行えばよいか苦慮することが多い。今回、これまでにいくつかのダムで独自の方法で実施されてきたパイピング試験結果の整理を試みてみた。同一の試料を用いて間隙比、透水係数を変化させた場合の限界動水勾配との関係を調べた実験はいくつか報告されているが、異なる岩種に対してこれらの関係を相互に比較したものは筆者らが知る限りではない。今回、7ダムのパイピング試験データを収集し、一般的な諸物性である間隙比、透水係数、一軸圧縮強度とパイピング抵抗性の指標である限界動水勾配の関係から何らかの傾向をつかみ、限界動水勾配の概略の値を予測することを試みたが、限られたデータ数での推定のため、十分な信頼性のあるものとはならなかった。ただし、一軸圧縮強度をパラメータとした1つの目安を得ることはできたと考える。今後、この研究を更に進め軟岩のパイピング抵抗性の一般的な諸物性による評価法を確立するとともに、最終的には試験方法を標準化し、統一していきたいと考える。

最後に本研究を実施するにあたって御協力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Takebayashi, S., N. Matsumoto and Y. Yamaguchi : A Mathematical Model for Field Piping Test, Int. Symp. Analytical Evaluation of Dam Related Safety Problems, ICOLD, pp.319~328, 1989.
- 2) 竹林征三・松本徳久・山口嘉一: 現場パイピング試験の数学モデル, 大ダム, No.130, pp.30~36, 1989年12月
- 3) 松本徳久・横井一秀・山口嘉一: 通水断面積が変化する場合のパイピング特性、第25回土質工学研究発表会講演集, pp.1673~1676, 1990年6月。
- 4) 山口嘉一・松本徳久・横井一秀: 粒度範囲の広い砂のパイピング特性, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp.1677~1678, 1990年6月。
- 5) 北條絃次: 漁川ダムの基礎処理について, 大ダム, No.98, pp.1~15, 1981年12月。
- 6) 宮下淳三・松原一則・清宮栄吉: 長柄ダム基礎地盤立坑調査について(2)-主に透水性とパイピング-, 第13回土質工学研究発表会講演集, pp.65~68, 1983年6月。
- 7) 松本徳久・山口嘉一: 低塑性築堤材料のパイピング抵抗性, 建設省土木研究所資料, 第2917号, 1990年12月。
- 8) Terzaghi, K.: Der Grundbruch an Stauwerken und seine Verhütung, Die Wasserkraft, p.445, 1922.
- 9) J. タロブル (進藤一夫訳): 岩盤力学, 森北出版, p.279, 1970年。
- 10) 朝倉喜美男・長谷川英明: 土質材料のパイピングに対する抵抗性とフィルターの有効性について, 中部電力総合技術研究所研究報告書, 1970年7月。
- 11) 北海道開発局: 大雪ダム工事記録, p.95, 1977年12月。