

修正震度法によるロックフィルダムの安定解析におけるすべり面の最小深さに関する検討

(独) 土木研究所 正会員 山口 嘉一
 (独) 土木研究所 正会員 佐藤 弘行
 (独) 水資源機構 非会員 林 直良
 (独) 土木研究所 正会員 ○坂本 博紀

1. はじめに

現在、我が国のロックフィルダムは震度法により設計されている¹⁾。震度法においては、地震時慣性力は堤高方向に一様とし、主材料であるロック材料の強度は大型三軸圧縮試験等の結果からモール・クーロンの破壊基準により c 、 ϕ を算出した後、 c をゼロとするとともに ϕ に余裕を持たせて設計強度を決定している。一方、将来のより実際に近い地震荷重、強度を採用した設計法を視野に入れ、耐震性の照査法として、1991年6月に「フィルダムの耐震設計指針(案)」²⁾ (以下、「指針(案)」) というが策定され、堤高100m以下のロックフィルダムの耐震性能照査においては、地震時の堤体の応答を考慮することで鉛直方向に地震力の分布を与える震力係数が導入された修正震度法と、ロック材料のせん断強度について拘束圧依存性を考慮された評価方法 (Ab法、 ϕ_0 法：2章参照) を組み合わせた方法が提案されている。

指針(案)におけるせん断強度評価式 (Ab法、 ϕ_0 法) における式中の定数は室内試験結果から算出されるが、現在、ロック材料のせん断強度試験法として最も一般的な試験方法である大型三軸圧縮試験では約50kPa以下の低拘束圧条件下における試験を適切な精度で実施することが困難である。また、浅い表層すべりについては発生したとしてもダムの安全上、重大な問題を引き起こす可能性は小さいと考えられる。このため指針(案)では実験により ϕ_0 法の σ_0 および ϕ_{max} が精度よく求められる場合を除いてはすべり安定計算はすべり土塊の土中高さ(鉛直高さ)の最大値が5m以下のすべり面には適用しないこととしている²⁾。本稿ではこのすべり土塊の土柱高さの最大値を「すべり面の深さ」と定義する。

一方、山口らは従来の大型一面せん断試験機を改良することで、大型三軸圧縮試験では測定することが出来ない低拘束圧条件下におけるせん断強度を評価している³⁾。そこで、本研究では参考文献3)の研究成果である50kPa以下の低拘束圧条件におけるせん断強度を用いて修正震度法による5m以下の表層すべりに対する安全率について検証し、指針(案)で対象としているすべり面の深さの最小設定値(5m)やその設定理由の妥当性について検討を行った。

せん断強度を用いて修正震度法による5m以下の表層すべりに対する安全率について検証し、指針(案)で対象としているすべり面の深さの最小設定値(5m)やその設定理由の妥当性について検討を行った。

2. 指針(案)に示されるせん断強度評価式

指針(案)におけるせん断強度評価式 (Ab法、 ϕ_0 法) の定義式とイメージ図を図-1に示す。

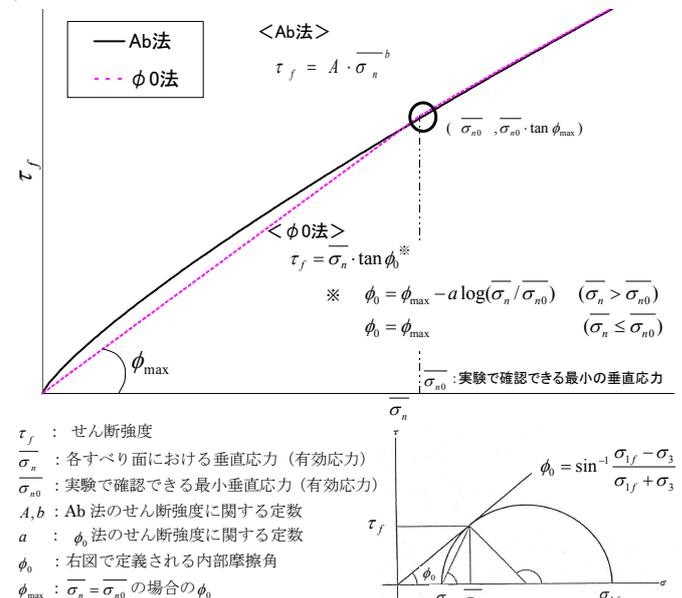


図-1 ϕ_0 法とAb法の関係

3. 拘束圧依存性を考慮したロック材料強度の評価

3.1 試料

室内試験に使用した試料は、石英安山岩のロック材料 (以下、「A材」という)、笠間産砕石骨材と砕砂の混合材料 (以下、「B材」という)、花崗岩のロック

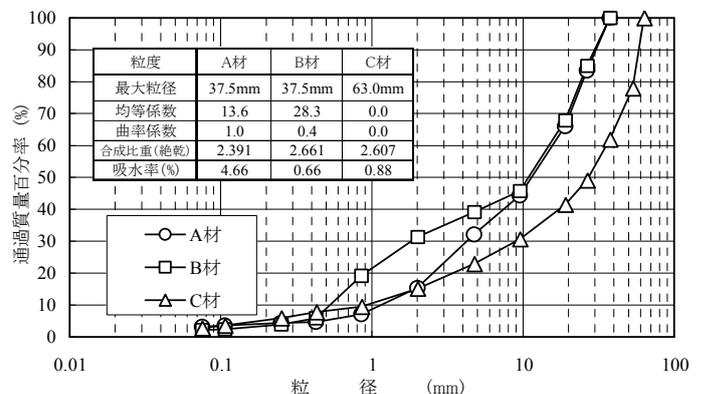


図-2 試料の粒度分布および物性値

キーワード ロックフィルダム、修正震度法、拘束圧

連絡先 〒300-8516 茨城県つくば市南原1-6 (独) 土木研究所 TEL029-879-6781 E-mail : h-saka@pwri.go.jp

材料（以下、「C材」という）の3種類である。各試料の粒度分布および物性値を図-2に示す。

3.2 室内試験方法

3.2.1 大型三軸圧縮試験

大型三軸圧縮試験は地盤工学会基準「粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法」(JGS 0520-2009)および「土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験方法」(JGS 0524-2009)に準じ、飽和および不飽和条件下で49、98、196、294kPaの4拘束圧条件で実施した。

供試体密度はA材およびB材では相対密度 $D_r=90\%$ 、C材では $D_r=85\%$ とし、この相対密度が得られる電動ハンマーによる1層あたりの締固め時間を締固め試験結果に基づきA材は12秒、B材は20秒、C材は18秒とした。供試体作製法の詳細およびその他の試験条件は参考文献3)による。

3.2.2 大型一面せん断試験

大型一面せん断試験は、飽和条件および不飽和条件下で、15、25、49、98、196、294kPaの6垂直応力条件で実施した。なお、試験装置は反力板とせん断箱との間にローラーを設置し、摩擦低減を目的として改良を施したものを使用した³⁾。供試体密度は各材料とも大型三軸圧縮試験の供試体と同じとし、電動ハンマーによる振動締固め法にて供試体を作製した。供試体作製方法の詳細およびその他の試験条件は参考文献3)による。

4. 室内試験結果

A~C材の大型三軸圧縮試験および大型一面せん断試験の結果について、本稿では5章以降の安定解析に使用する飽和条件での試験結果を示す。Ab法を適用した場合の垂直応力とせん断強度の関係と指数近似曲線を図-3~5に、 ϕ_0 法を適用した場合の垂直応力と内部摩擦角の関係と近似直線を図-6~8に示す。

図-3~5の点線は大型三軸圧縮試験結果のみ用いて算出した近似曲線で、実線は大型三軸圧縮試験と大型一面せん断試験の両方の試験結果を用いて算出した近似曲線である。図より近似曲線には算出方法の違いによる大きな差はない。

図6~8の細線は大型三軸圧縮試験結果から算出した近似線で、太線は大型三軸圧縮試験と大型一面せん断試験の両方の試験結果を用いて算出した近似線である。図より、大型一面せん断試験により測定される低拘束圧条件下で高い内部摩擦角となるため、 ϕ_0 法で使用する ϕ_{max} は大型一面せん断試験結果を含めて計算した場合の方が大きくなるが、両試験データが存在する範囲の近似直線には大きな差はない。

5. 修正震度法において照査対象とするすべり面の深さに関する検討

4章では適切な精度を確保した大型三軸圧縮試験の実施が困難な50kPa以下の拘束圧領域について、大型一面せん断試験結果を考慮した強度定数を評価

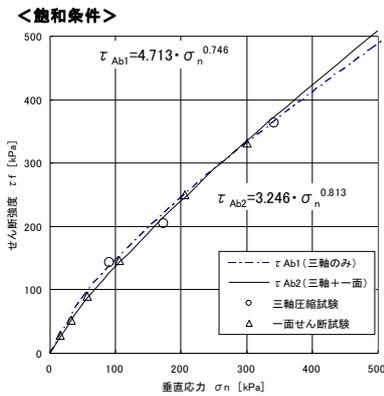


図-3 強度試験結果 (Ab法:A材)

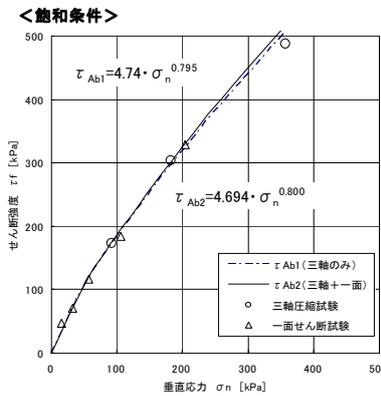


図-4 強度試験結果 (Ab法:B材)

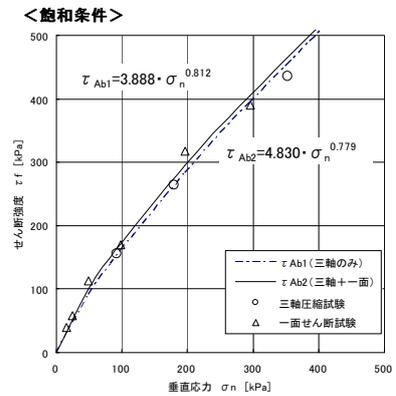


図-5 強度試験結果 (Ab法:C材)

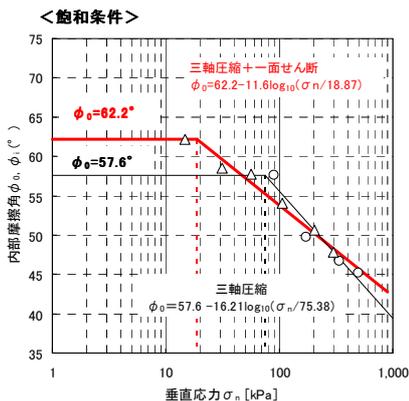


図-6 強度試験結果 (ϕ_0 法:A材)

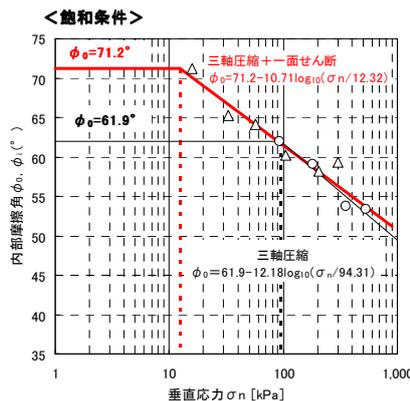


図-7 強度試験結果 (ϕ_0 法:B材)

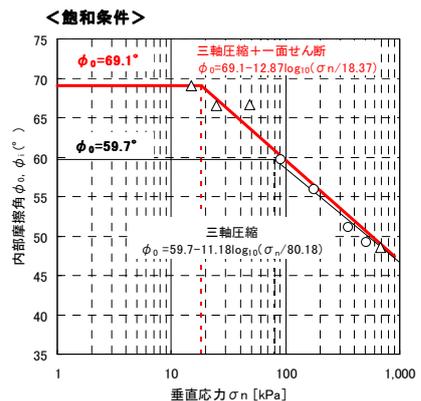


図-8 強度試験結果 (ϕ_0 法:C材)

表-1 入力物性値一覧

材料	使用データ ※1	Ab法		φ ₀ 法			モール・クローンの破壊基準		飽和重量 γ _{sat} (kN/m ³)	湿潤重量 γ _s (kN/m ³)
		A※2	b※2	φ _{max} (°)	a※2	σ _{n0} ※3 (kPa)	c (kPa)	φ ₀ (°)		
ロック	①	4.713	0.746	57.6	16.21	75.38	-	-	20.2	19.1
A材	①+②	3.246	0.813	62.2	11.6	18.87	-	-		
ロック	①	4.740	0.795	61.9	12.18	94.31	-	-	23.4	21.9
B材	①+②	4.694	0.800	71.2	10.71	12.32	-	-		
ロック	①	3.888	0.812	59.7	11.18	80.18	-	-	22.7	21.0
C材	①+②	4.830	0.779	69.1	12.87	18.37	-	-		
コア材	-	-	-	-	-	-	0	35	21.9	21.8

※1 ①:大型三軸圧縮試験データ ②:大型一面せん断試験データ
 ※2 実験定数はkPa単位に対する定数である
 ※3 σ_{n0}:実験により確認される垂直応力の最小値

表-2 計算ケース一覧

CASE	ロック材料	せん断強度式	使用データ※	最小深さ D _{min} (m)	
CASE A-1~3	A	Ab法	①	5.0,1.0,0.5	
CASE A-4~6			①+②		
CASE A-7~9			①		
CASE A-10~12		φ ₀ 法	①+②		
CASE B-1~3			B		①
CASE B-4~6					①+②
CASE B-7~9	①				
CASE B-10~12	φ ₀ 法	①+②			
CASE C-1~3		C			①
CASE C-4~6					①+②
CASE C-7~9	①				
CASE C-10~12	φ ₀ 法		①+②		

※ ①:大型三軸圧縮試験結果 ②:大型一面せん断試験結果

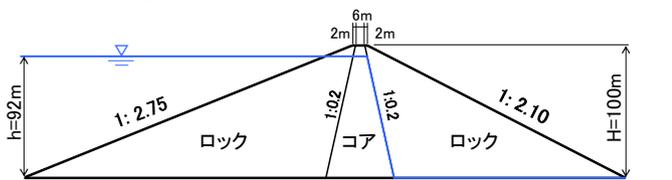


図-9 モデルダム断面

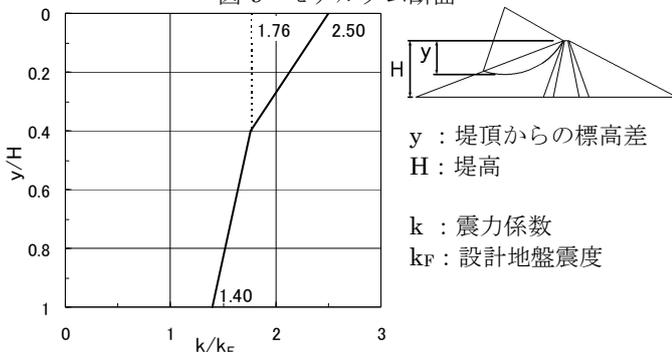


図-10 堤体震力係数

した。本章ではこれらの強度定数を用いて修正震度法によるロックフィルダムのすべり安定解析を行い、最小安全率となるすべり面の深さが、従来より対象外としている5m以下かどうかを確認することで、修正震度法において対象とするすべり面深さの最小値の妥当性を検討する。

5.1 検討条件

5.1.1 モデルダムと入力物性値

モデルダムの形状は、我が国のロックフィルダムの上下流面勾配に関する調査結果⁴⁾を参考に、強震帯における平均値(上流面1.0:2.75、下流面1.0:2.10)を用いるとともに、解析の簡略化を図るためフィルタゾーンはモデル化せず、図-9のとおりとした。修正震度法における設計地盤震度 k_Fは強震帯地域の0.18とし、堤体震力係数については指針(案)に従い、図-10のとおりとした²⁾。また、安定計算に使用する入力物性値を表-1に示す。

5.1.2 計算ケース

A~C材について、(1)せん断強度式(Ab法、φ₀法)、(2)使用試験データ、(3)検証対象とするすべり面の深さの最小値 D_{min}を変化させた36ケースについて計算を行った。計算ケースの一覧を表-2に示す。なお、具体のせん断強度式は図-3~8に示している。

5.2 計算結果

本稿では計算条件の違いによる変化が顕著に表れた上流側の計算結果のみを示す。

「材料」、「せん断強度式」、「使用試験データ」を固定し、「D_{min}」を0.5m、1.0m、5.0mと変化させた場合の安全率の変化を図-11~13に示す。全ての材料で大型三軸圧縮試験結果のみを用いてφ₀法を適用したケース(φ₀法_①)の安全率が最小となり、更にD_{min}の減少に従い安全率が減少している。その他のケースではD_{min}の減少による安全率の減少は見られない。

また、D_{min}と最小安全率となるすべり面の深さの関係を図-14~16に示す。図より大型三軸圧縮試験結果のみを用いてφ₀法を適用したケース(φ₀法_①)のみ、すべり面の深さがD_{min}(0.5m、1.0m、5.0m)と同程度の浅いすべりで最小安全率が発生している。

大型三軸圧縮試験結果のみを用いてφ₀法を適用した場合に、D_{min}の低下による安全率の低下が生じたり、D_{min}付近の浅いすべりで最小安全率が生じている理由について考察する。図-1を再度参照すると、φ₀法は実験により確認できる最小垂直応力σ_{n0}における内部摩擦角をφ_{max}とし、σ_{n0}以下の垂直応力におけるせん断強度については直線近似とする計算方法である。つまり、実験で計測可能な拘束圧条件よりも小さな低拘束圧条件下ではφ₀が一定として設計上安全側にせん断強度が評価され、また低拘束圧条件になるほど、この影響は大きくなるため、D_{min}の低下に従い最小安全率が小さくなったと考えられる。

また、大型三軸圧縮試験で適切な精度が確保でき

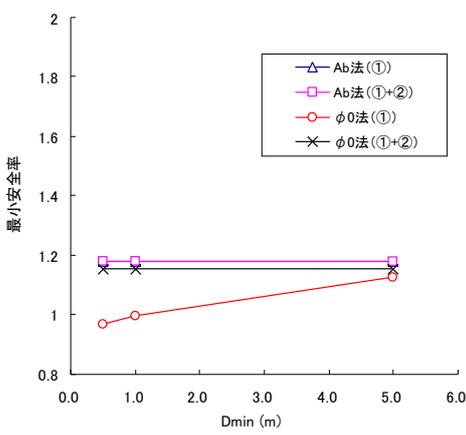


図-11 D_{min}と最小安全率 (A材)

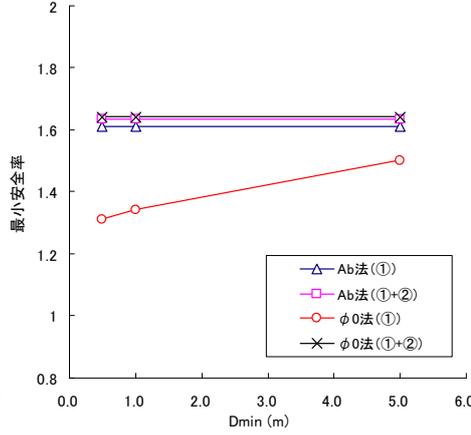


図-12 D_{min}と最小安全率 (B材)

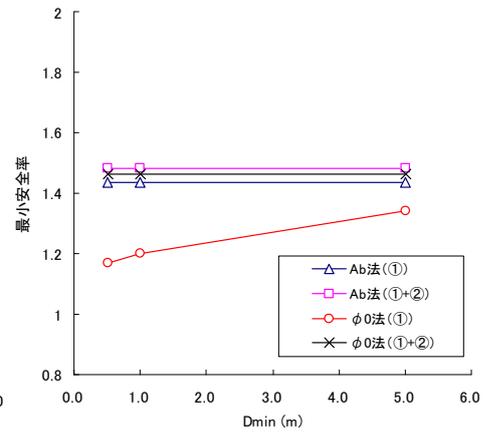


図-13 D_{min}と最小安全率 (C材)

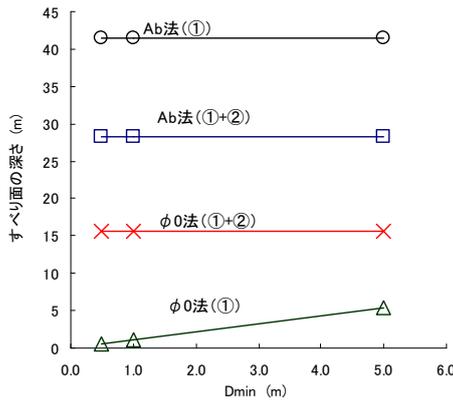


図-14 D_{min}と最小安全率となるすべり面の深さ (A材)

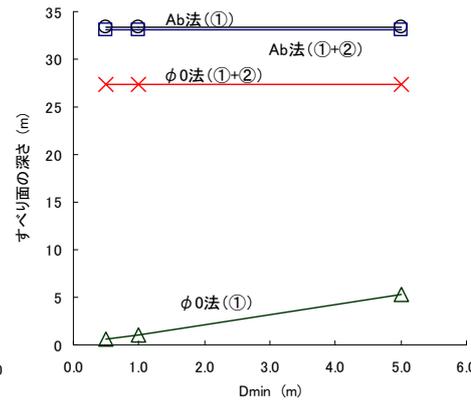


図-15 D_{min}と最小安全率となるすべり面の深さ (B材)

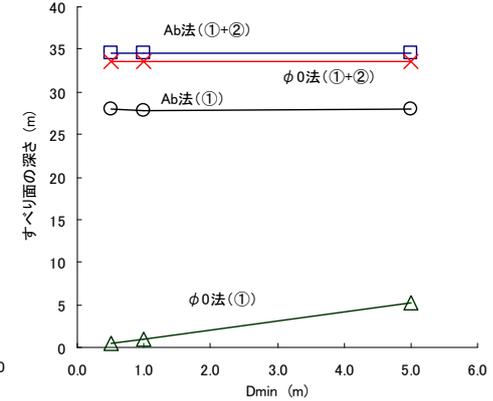


図-16 D_{min}と最小安全率となるすべり面の深さ (C材)

拘束圧の下限値である 50kPa に対応する垂直応力は約 90kPa であり、この垂直応力を各材料の水中重量 ($=\gamma_{sat}-\gamma_w$) で除して上流面の土被り厚に換算すると約 6.6~8.7m 程度となる。すなわち図-1 における σ_{n0} に相当する土被りが 6.6~8.7m となるため、今回の検討ケースではすべり面の深さが D_{min} (0.5m、1.0m、5.0m) 程度の規模のすべり面では、すべり面上の全ての点におけるせん断強度が $\phi_0 = \phi_{max}$ として直線近似されたせん断強度により安定計算されていたと考えられる。

一方、同じ ϕ_0 法の計算条件でも、大型一面せん断試験による低拘束条件下における試験結果も用いた場合 (ϕ_0 法_①+②) は、 D_{min} の減少による安全率の低下は生じておらず、最小安全率となるすべり面の深さは 15~35m の規模である。このことから、修正震度法において、検討対象から除外していた 5m 以下のすべり面は、低拘束条件下におけるせん断強度の計測結果を考慮して計算を行えば発生しないといえる。

6. おわりに

本研究により、大型三軸圧縮試験では確認出来ない 50kPa 以下の低拘束条件下のせん断強度の測定結果を考慮して計算を行った場合、指針 (案) において照査対象から除外しているすべり深さ 5m 以下の

すべり面は最小安全率を与えるすべり面にはならないことが確認された。

一方、実務的に利用される大型三軸圧縮試験結果のみを用いて ϕ_0 法による計算を行った場合、指針 (案) において最小値で設定されているすべり面深さ (=5m) において最小安全率が計算されることも確認された。

今後は今回の検討結果を踏まえ、フィルダムのすべり安定計算において照査対象とするすべり面の最小深さの最適値について検証をすすめる予定である。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：改訂新版 建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説 設計編 [I]，(社) 日本河川協会編集，山海堂，pp. 208-240, 1997. 10
- 2) 建設省河川局開発課監修：フィルダムの耐震設計指針 (案)，(財) 国土開発技術研究センター編集，pp. 5-10, pp. 43-48, 1991. 6
- 3) 山口嘉一，佐藤弘行，林 直良，吉永寿幸：拘束圧依存性を考慮したロック材料の強度評価，ダム工学 Vol. 18 -3, pp. 166-181, 2008. 9
- 4) 山口嘉一，佐藤弘行，澤田 尚：既設ロックフィルダムの設計地震係数と上下流面勾配の調査，第 37 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1281-1282, 2002. 2