

◆ 土砂災害特集 ◆

地すべり対策における二次元、三次元斜面安定解析の比較

杉本宏之* 綱木亮介**

1. はじめに

地すべり対策を行う際には、必要な対策工の工種及びその数量を決定するために安定解析が行われる。まず、地すべりブロックの現状の安全率を仮定し、目標とする安全率(計画安全率)を設定する。河川砂防技術基準(案)同解説¹⁾では現状安全率を0.95~1.00、計画安全率を1.10~1.20(場合によっては1.05~1.10)とするのが一般的であるとしている。工種を決定すれば、現状安全率から計画安全率まで安全率を向上させるのに必要な対策工の数量は安定解析で計算でき、それに基づいて地すべり対策の設計が行われる。この場合、一般に二次元安定解析手法の簡便法が用いられ、地すべりブロックを代表する断面(主断面)をブロックの中心部で運動方向に平行にとり、その主断面に対して解析を行っている。しかし、地すべりは三次元的な現象であり、三次元安定解析手法を用いて地すべりブロック全体を取り扱う方が、精度の高い解析が可能である。その結果、より合理的な対策工の設計が行える。

二次元安定解析を用いて地すべりブロック全体の対策を設計する場合は、主断面についての解析で単位幅当たりの対策工の工種及び数量を算出し、それを地すべり幅全体に適用している。一般に、地すべりブロックの層厚は中心で厚く、端部で薄いため、主断面で計算した対策工の数量を地すべりブロック全体に適用した場合、安全側に余裕もった設計になることが多い。それに対して三次元安定解析では、ブロック全体の形状を考慮するため、同じ工種で比較すれば、必要な対策工の数量が二次元よりも減少することが多く、結果として対策にかかるコストの縮減が可能である²⁾。

その一方で、三次元安定解析を行うには、三次元的なすべり面形状や地下水位分布のデータが必要なため、二次元安定解析を行う場合に較べて、

より多くの調査を必要とする。また、三次元データや三次元安定解析プログラムの扱いは、手計算でもできる二次元安定解析に比べると手間がかかる。そのため、三次元安定解析を行うためにかかる調査のコストは二次元安定解析を行うための調査コストより多くなる。このことは、三次元安定解析が普及しないことの一因となっている。しかし、コストの増減については、調査コストの増加分と対策コストの減少分を比較し、それらを合計したコスト(以下、トータルコストという)を考える必要があるが、この点については報告がほとんどない。

また、三次元安定解析で対策工を設計した場合、対策工の数量を削減できることが多いが、この状態で主断面に対する二次元安定解析を行うと、三次元安定解析で得られた安全率よりも低い安全率が計算される。安全率がどの程度低下するかについては、仮想的なモデル斜面での解析事例³⁾はあったが、実際の事例についての研究はほとんどなかった。現在用いられている計画安全率の基準は、簡便法による事例の蓄積の中から経験的に決められたものであり、三次元安定解析法などの簡便法以外の安定解析式には、そのまま適用できるとは限らない。また、現在のところ三次元安定解析を行った事例は多くなく、参考となる事例も限られる。このことも、三次元安定解析が普及しないことの一因となっている。

本研究では、三次元安定解析の普及に資する基礎資料を得ることを目的とし、実際に三次元安定解析を行った事例について、三次元安定解析を行った場合と二次元安定解析を行った場合のトータルコストの比較、主断面の二次元安定解析で計算される安全率の低下について検討を行った。

2. コスト、安全率の計算方法

三次元安定解析で対策工を設計した地すべりの現場事例について、地すべりの形状、調査数量、対策工数量、安定解析に関わるパラメータが分か

Comparisons of Two-Dimensional Stability Analysis and Three-Dimensional Stability Analysis in the Countermeasure of Landslide.

表-1 調査対象地すべりブロックの諸元

ブロック番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	平均	
規模	長さ(m)	130	450	140	180	250	145	130	500	350	115	75	60	670	120	180	400	200	830	350	650	296
	幅(m)	130	325	120	220	180	80	85	335	300	100	40	125	380	130	70	260	150	420	700	380	227
	層厚(m)	25	50	48	25	45	20	25	45	70	45	5	25	40	25	25	30	40	80	70	70	40
形状	長さ/幅	1.0	1.4	1.2	0.8	1.4	1.8	1.5	1.5	1.2	1.2	1.9	0.5	1.8	0.9	2.6	1.5	1.3	2.0	0.5	1.7	1.4
	幅/層厚	5.2	6.5	2.5	8.8	4.0	4.0	3.4	7.4	4.3	2.2	8.0	5.0	9.5	5.2	2.8	8.7	3.8	5.3	10.0	5.4	5.6
	長さ/層厚	5.2	9.0	2.9	7.2	5.6	7.3	5.2	11.1	5.0	2.6	15.0	2.4	16.8	4.8	7.2	13.5	5.0	10.4	5.0	9.3	7.5
地表面勾配(度)	20	10	40	20	20	45	25	20	20	45	30	20	5	40	20	5	30	10	20	10	22.8	
一次元解析	調査コスト(百万円)	3.7	31.3	36.0	14.1	5.2	12.2	10.0	62.7	34.5	43.1	9.5	14.5	112.8	16.1	19.2	14.0	12.7	26.1	28.5	27.3	26.7
	対策コスト(百万円)	439	2,600	3,867	1,698	865	1,389	464	4,810	5,962	1,315	165	356	2,861	1,627	619	3,390	420	15,275	5,218	4,309	2,882
	トータルコスト(百万円)	442	2,631	3,903	1,712	870	1,401	474	4,873	5,997	1,358	174	370	2,973	1,643	638	3,404	433	15,301	5,247	4,336	2,909
二次元解析	調査コスト(百万円)	11.4	308.1	60.1	38.3	18.6	22.2	15.3	141.1	67.1	49.3	16.2	19.1	234.3	57.7	79.3	29.4	44.5	103.3	90.4	379.9	89.3
	対策コスト(百万円)	151	725	2,248	1,073	562	950	315	3,517	4,458	1,008	125	299	2,338	1,382	516	3,361	411	16,295	5,834	7,541	2,655
	トータルコスト(百万円)	163	1,033	2,308	1,111	581	972	330	3,658	4,525	1,058	141	318	2,572	1,439	596	3,390	455	16,398	5,924	7,921	2,745
コスト変化率	調査コスト(%)	1.7	10.5	0.6	1.4	1.5	0.7	1.1	1.6	0.5	0.5	3.8	1.2	4.1	2.5	9.4	0.5	7.3	0.5	1.2	8.1	2.9
	対策コスト(%)	-64.9	-71.2	-41.5	-36.5	-34.8	-31.4	-31.5	-26.5	-25.1	-22.6	-23.0	-15.3	-17.6	-14.9	-16.1	-0.9	-2.2	6.7	11.7	74.5	-19.2
	トータルコスト(%)	-63.2	-60.7	-40.9	-35.1	-33.3	-30.6	-30.4	-24.9	-24.5	-22.1	-19.2	-14.1	-13.5	-12.4	-6.6	-0.4	5.1	7.2	12.9	82.7	-16.2
安全率	三次元(計画安全率)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.15	1.10	1.20	1.20	1.21	1.15	1.20	1.20	1.00	1.20	1.11	1.20	1.18
	二次元(主断面)	1.04	1.16	1.07	1.12	1.16	1.08	1.17	1.17	1.10	1.03	1.11	1.16	1.20	1.06	1.13	1.20	0.99	1.21	1.15	1.23	1.13
	二次元-三次元	-0.16	-0.04	-0.13	-0.08	-0.04	-0.12	-0.03	-0.03	-0.05	-0.07	-0.09	-0.04	-0.01	-0.09	-0.07	0.00	-0.01	0.01	0.04	0.03	-0.05
対策工	横ボーリング				○				○	○	○		○		○	○				○	○	
	集水井		○		○				○	○			○			○				○	○	○
	排水トンネル												○							○	○	
	切土			○							○		○	○						○	○	
	盛土																			○	○	
	鋼管杭				○				○					○		○	○	○	○			
	深礎杭		○						○													○
アンカー	○		○		○	○	○			○	○	○		○	○							

る資料を収集した。収集した現場事例は、17の地すべり地区(20の地すべりブロック)である。これらのデータを用いて、地すべりブロックごとに三次元安定解析と二次元安定解析のそれぞれに必要な調査コストと対策コストを見積もった。

調査コストの見積もりには、資料に記載された数量と、(社)地すべり対策技術協会の歩掛かり⁴⁾を用いた。三次元安定解析を行うための調査コストは、資料に記載された全ての調査数量を計上し、二次元安定解析を行うための調査コストは、主測線上の調査のみを計上した。地すべりブロックの幅が100m以上にわたるような広域の場合、主測線の両側に50m以内の間隔で副測線群を設ける場合が多い¹⁾ため、実際は二次元安定解析を行う際にも、これより多くの調査が行われる。そのため、二次元安定解析については実際よりも調査コストが小さく見積もられている。複数の測線が

設けられている場合は、必要抑止力が最大の測線を主測線とした。

三次元安定解析による対策コストの見積もりは、資料に記載された数量と単価に基づいて行った。単価の記載がない場合は、他の事例を参考にして決定した。

二次元安定解析による対策コストの見積もりは、地すべりブロックの主測線について簡便法で二次元安定解析を行い、仮想的に対策工を設計して行った。規模が大きい地すべりブロックでは、主測線のみ解析によって対策工を決定することはないが、ここでは統一基準によって比較を行うためにこのようにした。比較を容易にするため、対策工の工種は二次元安定解析と三次元安定解析で同種になるようにした。資料中で二次元安定解析による対策工の設計がなされている場合は、その結果を利用した。土質強度定数は二次元、三次

元安定解析とも同じ粘着力を用いたため、逆算の結果、内部摩擦角は二次元、三次元で異なる値になっている。資料中で二次元安定解析も行われている場合は、二次元、三次元の粘着力が異なっても資料の結果を用いた。地下水の低下量は二次元、三次元で同じにしているが、対策コストには計上していない。

また、安全率の比較のため、三次元安定解析によって対策工を設計した後、主断面について簡便法による二次元安定解析を行い、安全率を算出した。調査した全ての地すべりブロックで、三次元安定解析にはホフランド法⁵⁾ またはその改良型が用いられていた。

表-1 に各地すべりブロックの諸元を示す。地すべりブロックには、トータルコストの変化率の小さい順に 1 から 20 までの通し番号を付けた。

3. 調査対象地すべりブロックの特徴

本調査で収集した事例は、三次元安定解析を行っているという点で特別な事例である。そこで、一般的な地すべりと比べて規模や形状に特徴があるかを明らかにしておく必要があると考え、地すべりの統計資料⁶⁾ との比較を行った(表-2)。この資料は、昭和 48 年度に対策を行った地すべりブロックから 1/3 程度 (141ヶ所) を選んで行ったアンケート結果を取りまとめたものである。そのため、日本の全ての地すべりを代表するものではないが、対策を行っている地すべりブロックの平均的な特徴は把握できると考えられる。

表-2 統計資料との比較

	本調査	統計資料(昭和 48 年)
長さ (m)	296	458
幅 (m)	227	324
層厚 (m)	40.4	13.7
長さ/幅	1.38	1.93
幅/層厚	5.6	24.1
長さ/層厚	7.5	35.9
地表面勾配(度)	22.8	18.6

地すべりブロックの長さ・幅について比較すると、本調査の平均値はそれぞれ 296m、227m であり、統計資料の 458m、324m の約 7 割で、平面的な大きさについては平均的に小さいといえる。それに対して、層厚については、本調査の平均値

は 40m と統計資料の 13.7m の約 3 倍であり、統計資料に比べると地すべり面が深いものが多い。

形状については、長さ/幅をとると、本調査の平均値は 1.38 であり、統計資料の平均値の 1.93 より小さく、平面形状は統計資料の方が細長い。幅/層厚、長さ/層厚については、本調査の平均値は、統計資料の平均値の 2 割程度とかなり小さい。これは、層厚が大きいためであり、本調査で対象とした地すべりブロックは長さや幅に対して厚みがあるといえる。

地表面勾配については、本調査での平均値は 22.8 度であり、統計資料の 18.6 度の 1.2 倍であり、全体的に急である。

4. 調査結果

4.1 コストの比較

図-1 は調査した 20 の地すべりブロックについて、二次元安定解析を行った場合のトータルコストに対して、三次元安定解析を行った場合の調査コスト、対策コスト、トータルコストがどれだけ変化するかを示したものである。表-1 にもブロック毎のコスト変化率を示した。

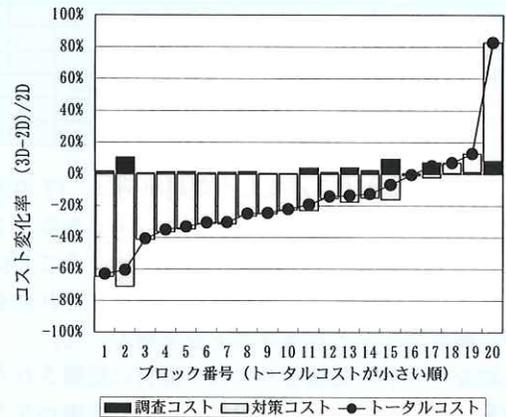


図-1 コストの変化

調査対象の 20 ブロックのうち、16 のブロックでトータルコストの変化率が負になっており、三次元安定解析で対策工を設計することにより、ほとんどの事例でトータルコストが減少している。平均は 16.2% の減少である。中央値は -20.7% であり、多くの事例がこの前後の減少率を示すが、一部には極端に変化した事例もある。ブロック番号 1 の事例は道路の切土が地すべり土塊を斜めに横切る地すべり、ブロック番号 2 は主測線付近

のみが河川に向かって解放している地すべり、ブロック番号 20 は、主測線付近のみが河川の対岸に達している地すべりで、これらは三次元安定解析と主測線のみで二次元安定解析でかなり条件が異なる地すべりブロックであった。本調査では、二次元安定解析を行う断面を機械的に決定したため、一部の事例でこのような極端な値になったものと考えられる。以下の議論でこれらの事例を除くことはしないが、この点に注意されたい。

調査コストは全てのブロックで増加しているが、トータルコストはほとんどのブロックで減少している。トータルコストに占める調査コストの割合が小さいことがその理由である。本調査では、二次元安定解析の調査コストとして主測線分のみを計上したため、二次元の調査コストは少なめの見積もりになっている。したがって、実際の調査コストの増加は、本調査の見積もりよりも、さらに少ないはずである。

4.2 対策工施工後の安全率の比較

図-2 は、三次元安定解析によって対策工を設計した後、その対策工を付加した主断面について簡便法による二次元安定解析で安全率を算出し、それらの差 (以下「安全率の差」という) の頻度分布を示したものである。表-1 にブロック毎の安全率の差を示した。ほとんどのブロックでは計画安全率が 1.20 であるが、1.20 以外 (1.15~1.00) のブロックが 5 つあった。しかし、図-2 では直感的に理解しやすいように差で表している。

調査対象の 20 ブロックのうち 16 ブロックで安全率が低下 (二次元の方が低い)、3 ブロックで

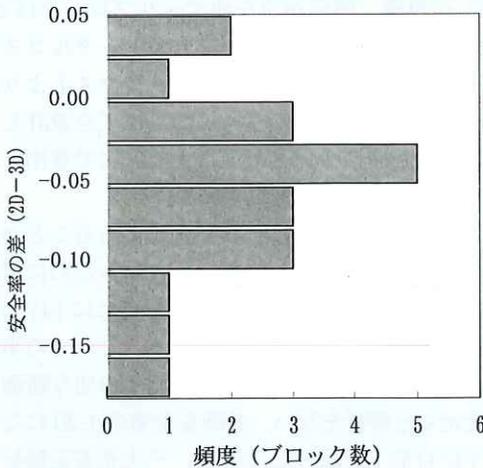


図-2 安全率の変化

安全率が上昇 (二次元の方が高い)、1 ブロックで変化なしであった。安全率が低下したブロックは対策コストが減少したブロックであり、安全率が上昇したブロックでは対策コストが増加している。安全率が低下したブロックのうちの 7 割は、0.00~0.10 の低下に収まっている。

4.3 コスト・安全率の変化と地すべりの規模・形状

図-3 にコスト変化率と地すべりの規模 (地すべり長さ、幅、面積、深さ) の関係を示した。長さ約 600m、幅 400m、深さ 70m 以上では、それ以下に比べてトータルコストの変化は 0 に近いか正の値であり、コストの減少が小さいか、逆にコストが増加している。図示はしていないが、安全率の差と地すべり規模との関係についても、小規模なほど安全率の低下が大きく、大規模なほど安全率の低下が小さいか、安全率が増加する傾向がみられた。

図-4 に安全率の差と地すべりの形状を表す指標 (長さ/幅、幅/層厚、長さ/層厚) の関係を示した。安全率の差と長さ/幅との関係には明瞭な傾向

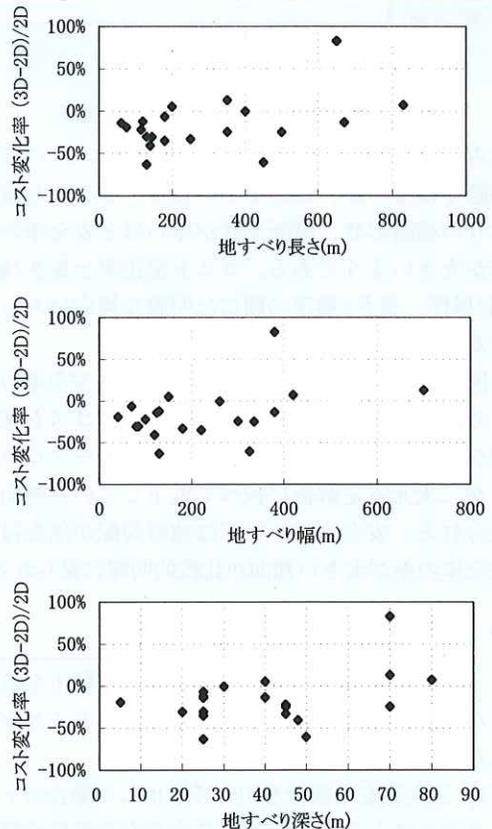


図-3 コスト変化率と地すべり規模の関係

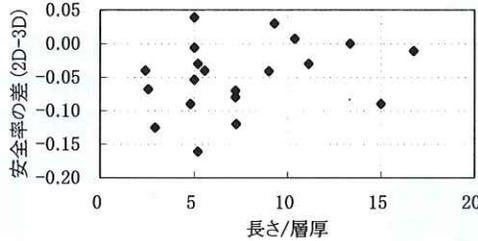
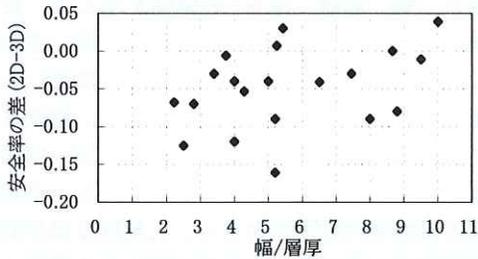
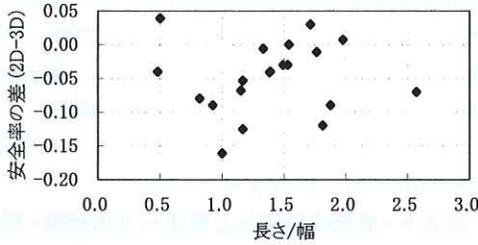


図-4 安全率の差と地すべり形状の関係

はみられない。幅/層厚、長さ/層厚については、明瞭ではないが、値が小さいほど、すなわち地すべりの横断形状、縦断型状が厚いほど安全率の低下が大きいようである。コスト変化率と長さ/幅、幅/層厚、長さ/層厚の間には明瞭な傾向はみられなかった。

図-5 に地表面傾斜とコスト変化率、安全率の差との関係を示す。地形勾配が急なほどコスト変化率が小さく、三次元安定解析によるトータルコストが二次元安定解析に較べて低下している傾向が見られる。安全率については地形勾配が急なほど安全率の差が大きい傾向が比較的に明瞭に見られる。

5. まとめ

三次元安定解析によって地すべり対策工を設計した事例について調査した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 三次元安定解析を用いて算出した場合のトータルコストと、主断面の二次元安定解析で算出したトータルコストを比較した結果、20 事例の

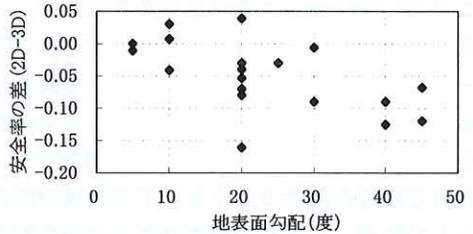
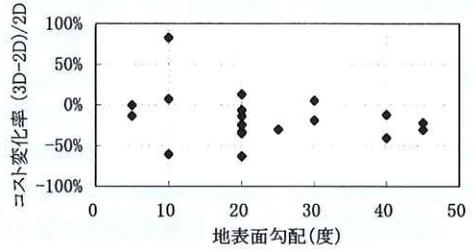


図-5 コスト変化率、安全率の差と地表面勾配の関係

うち 16 の事例で三次元安定解析を用いた方がトータルコストは低かった。

- (2) 三次元安定解析を用いた場合のトータルコストは、二次元安定解析のトータルコストよりも平均で 16% 低い。調査コストの増加は平均で 3%、対策コストの低下は平均で 19% であり、調査コストのトータルコストへの寄与は小さい。
- (3) 三次元安定解析によって対策工を設計した後、主断面について簡便法による二次元安定解析で安全率を算出した結果、安全率の差は、0.00~0.10 程度であった。
- (4) 大規模な地すべりにおいては、三次元安定解析によって設計した場合、対策コストが増加する事例があった。
- (5) 小規模、傾斜が急な地すべりブロックほど、三次元安定解析を用いた場合のトータルコストは、二次元安定解析でのトータルコストより低い。また、三次元安定解析で対策工を設計した後の主断面についての二次元簡便法で算出した安全率が低下する傾向がある。

大規模な地すべりは形状が複雑であることが多いが、本調査では統一基準で比較するために機械的に二次元断面を決定した。そのために (4) のような結果が得られた可能性がある。これらの事例は、形状が複雑な地すべりなどで不適切な断面で二次元安定解析を行い、計画安全率が 1.20 になるように対策工を設計した場合、三次元安定解析で評価すると安全率が 1.20 に達しないことがある

ということを示している。形状が複雑な地すべりは二次元安定解析で地すべり全体を的確に解析することは難しいため、調査対象事例のように三次元安定解析を行うことが望ましい。

6. 今後の課題

一般に地すべり対策で用いられる計画安全率は、斜面の現状の安全率に対して、どれだけ安全度を向上させるかを表す相対的なものであり、対策後の斜面の絶対的な安全率ではない。現在用いられている計画安全率の基準は、二次元簡便法による対策事例の蓄積の中から経験的に決められたものである。そのため、簡便法以外の安定解析式には、そのまま適用できるとは限らない。まだ実施事例が多くない三次元安定解析を用いる場合は、それぞれの地すべりブロックの特徴を把握した上で、計画安全率を慎重に設定する必要がある。そのような事例を積み重ねることによって、三次元安定解析を行う際の計画安全率を決めて行く必要がある。

謝辞

本調査を行うにあたり地すべりの事例についての資料を提供して頂いた関係各機関の皆様、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準(案)同解説 調査編, 山海堂, 1997.
- 2) 木村隆俊、小堀勝弘、川場浩二：大規模地すべり地における三次元解析の適用と建設コスト縮減について, 第 38 回地すべり学会研究発表講演集, pp.275-278, 1999.
- 3) 郎煜華、佐伯 孝：三次元地すべり安定解析およびその影響要素の評価, 第 38 回地すべり学会研究発表講演集, pp.279-282, 1999.
- 4) (社)地すべり対策技術協会：地すべり対策技術設計実施要領, 1996.
- 5) Hovland, H. J. : Three-Dimensional Slope Stability Analysis Method, ASCE, Vol.103, GT9, pp.971-986, 1977.
- 6) 渡正亮、中村浩之、板垣治：地すべり実態統計(その1), 土木研究所資料, 第 987 号, 1975.

杉本宏之*



独立行政法人土木研究土砂管理研究グループ(地すべり) 研究員
Hiroyuki SUGIMOTO

綱木亮介**



同 土砂管理研究グループ(地すべり) 上席研究員、学術博
Dr.Ryosuke TSUNAKI