斜面対策工の性能低下を考慮した LCC評価に関する研究

平成 20 年 2 月 20 日 京都大学工学部地球工学科土木工学コース

新村 知也

日本では高度経済成長期に建設されたインフラ構造物が多く、現在 それらの構造物は、補修の必要性が指摘されている. ただし、公共投 資削減という予算制約の下で、膨大な社会ストックを対象とするため 効率的に維持補修が行われることが求められることから、アセットマ ネジメントの概念が注目されている. 本研究では、インフラ構造物の うち斜面対策工が施工されている道路斜面、その中でも吹付けコンク リートが施工されている斜面、およびグラウンドアンカーが施工され ている斜面に着目する. それぞれの対策工の性能低下を考えたモデル を構築するとともに、ライフサイクルコストを評価指標として、維持 補修に対する費用対効果を考慮した補修の優先順位付けの定量的指標 を提案する.

吹付けコンクリート斜面は、吹付け表面に生じた亀裂から降雨などによる水分が浸透し、背面地山の風化が進行する.本研究では、性能低下の支配的要因を風化の進行による吹付けコンクリート背面地山の粘着力の低下と仮定する.そして、この粘着力の低下にともない吹付けコンクリートと風化した地盤が一体となって滑落する崩壊形態、すなわちスライド現象を対象とする.この吹付けコンクリート斜面の安定性評価においては、実際の崩壊形態とスライド現象との類似性から、表層崩壊モデルを適用する.

次に、グラウンドアンカー斜面に関しては、一部のアンカーで PC ケーブルの腐食にともなうケーブルの断面減少により、導入力の減少が見られる. そこでこの性能低下を考えたモデルを構築する. 崩壊形態として、より一般的な崩壊形態である円弧すべりモデルを適用する.

上記の対策工の性能低下を考える際には、その性能低下の不確実性を考慮する必要がある.このため本研究では、粘着力、およびアンカー導入力を確率変数として扱う.確率変数の分布型として正規分布、および対数正規分布の二つを考え、両者の結果について比較検討を行い、LCCに影響を与える要因について考察を加える.

目次

第	1	1 :	章	序論	•																							 1
	1.	1	研	究の育	皆 孱	ţ																					. 	 1
	1.	2	研	究のト	目的	J																					. 	 2
	1.:	3	既	往の研	开穷	<u></u>																					. 	 2
	1.4	4	本	論文の	り棒																						. 	 4
第	2	2 :	章	斜面	対	策	エ	の	性i	能化	氐门	F 0	りす	ララ	<u>"</u>	レイ	匕扌	6	ょ	び	LC	C 4	算	定	手	法		 5
	2.	1	斜	面安定	定 性	上評	価	手	法の	の概	更																. 	 5
		2	.1.	.1 吹作	寸に	ナコ	ン	ク	IJ -	- 1	斜	面	に	おり	ナ	るま	评估	五 月	手衫	去 .							. .	 5
		2	. 1 .	.2 グラ	ラウ	ァン	ド	ア	ンフ	カー	- 斜	面	に	おり	ナ	るま	评化	五月	手衫	去 .							. 	 6
	2.:	2	粘	着力值	氏下	・の	モ	デ	ルイ	匕.																	. 	 7
		2	.2.	.1 粘差	音 ナ	」の	算	定	方剂	去 .																	. .	 7
		2	.2.	.2 回り	帚曲	自線	を	用	レトラ	とモ	デデ	ル	化														. .	 8
	2.:	3	グ	ラウン	/ }	・ア	ン	力	<u> </u>	り導	入	力	低	下	り・	モラ	デカ	レ化	匕.								. .	 8
		2	.3.	.1 回り	帚曲	自線	: を	用	レトカ	たモ	デデ	ル	化														. 	 9
	2	4	年	破壊	雀 琌	立の	算	定	方剂	去 .																	. .	 9
		2	.4.	.1 確 3	犎 歿	ど数	を	正	規分	分布	i と	L	た	場合	合.												. 	 9
		2	.4.	.2 確 3	犎 歿	ど数	を	対	数〕	E規	見分	布	と	しが	<u>ا</u>	場~	合 .										. 	 11
	2.:	5	LC	CC の言	平価	方	法																				. .	 13
		2	.5.	.1 LC	C 0	定	式	化																			. 	 13
		2	.5.	.2 損 /	夫 額	頁お	ょよ	び	補何	多 費	もの	算	定	方剂	去.												. .	 15
第	3	3 :	章	実 際	の	吹	付	け	⊐ :	ンク	クリ	J -	- 1	、余	}	面~	<u> </u>	Οì	適	用						. 		 . 16
	3.	1	風	化带原	享 さ	(D	設	定																			. 	 16
	3.:	2	粘	着力值	氏下	こに	お	け	る[可帰	計曲	線	0	設気	숱.												. .	 17
	3.:	3	年	破壊	雀 莩	きの	算	定																			. 	 17
	3.4	4	LC	CC の算	章 定	<u>.</u>																					. 	 17
	3.:	5	考	察																					• • • •		. 	 18
		3	.5.	.1 年和	波 垺	复確	率	の	変イ	とに	. 対	す	る	考多	察.												. .	 19
		3	.5.	.2 正規	見欠	介布	お	ょ	びゞ	寸 数	正	規	分	布し	こ :	対 -	する	5 新	吉!	果の	比	較と	؛ يا	考务	至.		. 	 20
		3	.5.	.3 変動	動係	系数	· の	感	度り	分析	i に	対	す	るぇ	考	察												 21

	•	3.5.	4 ‡	也 点	, <u> </u>	と	の着	結り	果の) 分	·析	お	ょ	びき	考多	桑 .				 	 		 	 	22
第	4	章	実	際(の	グラ	ラ!	ウ:		ドフ	7)	ノス	ታ –	一余	計正	₫ ^	· 0)	適	用	 	 		 	 . :	26
	4.1	導	入え	力低	下	に	おし	ける	5 E	可帰	曲	線	の	設力	定.					 	 		 	 	26
	4.2	年	破場	裏 確	率	Ø :	算	定.						•••						 	 		 	 	26
	4.3	LC	C 0)算	定															 	 		 	 	27
	4.4	考	察.																	 	 		 	 	27
第	5	章	ま	٤ :	める	と糸	洁言	淪				. 				. 				 	 	• • •	 	 . :	29
	5.1	ま	ک ک	カと	結	論														 	 		 	 	29
	5.2	今	後の	の課	. 題															 	 		 	 	29
参	考	文	献.		• •						• •		· • •	· • •						 	 		 	 . :	3 1
謝	辞																			 	 		 	 	32

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本における道路、港湾等に代表されるインフラ構造物は高度経済成長期に急速に建設が進み、広範囲で整備が行われてきた、現在、高度経済成長期に建設されたインフラ構造物は、長期の供用により構造物の健全性が損なわれていることが確認され、補修の必要性が指摘されている場合が多い。ただし、90年代から続く長期の経済低迷にともない、公共投資縮減という厳しい予算制約の下での効率的なインフラ構造物の維持補修計画の立案が求められている。近年、インフラ構造物を資産(アセット)としてとらえ、予算制約の下で構造物の安全性・利便性等を確保し、利用者の便益を最大化するための戦略的なマネジメント手法としてアセットマネジメントの概念が注目されており、この観点からインフラ構造物の維持補修計画を立案することが必要不可欠となっている。アセットマネジメントを用いた維持補修計画は、道路構造物のうち道路舗装、橋梁分野で、実務で適用される段階まで研究が進められている。一方、道路斜面分野では、従来防災という視点からの検討が重要視され、維持補修の方策が進められてきたため、道路舗装、橋梁に比べてアセットマネジメントに関する研究は緒に就いたばかりであり、早急に計画手法を構築することが望まれている。

道路斜面においては、地盤材料の主たる劣化特性である風化現象は、通常の想定供用期間では顕著には見られない。しかし、斜面を構造物と捉える場合、構造物の性能が低下する要因として、斜面対策工の性能低下現象が考えられるため、本研究では、道路斜面のうち、性能低下現象が想定される斜面対策工が施工された道路斜面を対象とする。道路斜面に施工されている斜面対策工としては、地下水排除工、グラウンドアンカー工、吹付けコンクリート工、のり枠工などが挙げられる。このうち、吹付けコンクリート工が施工された斜面(本研究では吹付けコンクリート斜面と称す)では建設後30年以上経過した斜面が多く、現在補修の必要性が指摘されている。また、グラウンドアンカー工が施工された斜面(本研究ではグラウンドアンカー斜面と称す)では、永久構造物として必要な防食に関する性能保証の基準が制定される以前のアンカー(本研究では旧タイプアンカーと称す)において腐食が顕在化しており、吹付けコンクリート斜面同様に補修の

必要性が指摘されている.

しかし、補修の必要性がある斜面は膨大に存在し予算制約上、維持補修計画の立案においては、維持補修の必要がある斜面の選定、優先順位付け、および維持補修のタイミングを戦略的に決定するアセットマネジメントによる検討が注目を集めている.予防保全の観点から短期、および長期の維持補修計画を立案するために必要な検討事項 1)は、構造物の現在状態の規定、構造物の性能低下に対する将来予測、構造物の性能低下過程のモニタリング、および費用対効果の評価を含めた最適な維持補修計画の立案である.現在状態の規定より、構造物の健全性が定量的に評価され後述の劣化予測に大きく寄与することから、高い精度が要求される.将来予測、およびモニタリングは、斜面対策工の性能低下を考慮した劣化曲線を求めることで、一般に回帰曲線が用いられている.モニタリングは、将来予測に関する不確実性を担保するための手法と位置づけられる.維持補修計画の立案には、一般にライフサイクルコスト(以下 LCC とする)が判断指標として用いられる.

1.2 研究の目的

本研究では、道路斜面分野での維持補修計画立案に対して、アセットマネジメントを用いたモデルの一つを提案することを目的とし、以下のように展開する.

斜面対策工のうち、吹付けコンクリート斜面、およびグラウンドアンカー斜面を対象としアセットマネジメントの概念を用いて、最適な維持補修計画の立案を目指す.維持補修計画の検討に際し、第一に重要となることは、性能低下の主たる要因の決定、およびその劣化予測である.本研究では、吹付けコンクリート斜面では地山の粘着力、グラウンドアンカー斜面ではグラウンドアンカー導入力を性能低下の主たる要因として、劣化予測を行う.そして、劣化予測に基づいて算定される年破壊確率を用いて、LCCを判断指標として斜面の維持補修の優先順位、および最適な補修時期を決定する.

1.3 既往の研究

本節では、斜面対策工の性能低下に関する既往の研究を概観し、それらの中で

の本研究の位置づけを述べる.

大津ら²⁾は、地下水排除工について、目詰まりにより性能低下が生じるものとしてモデル化を行い、最適な補修(地下水排除工の洗浄)時期が、地下水排除工の閉塞速度をパラメータとする LCC 変動により表現できることを示した.

大津ら³⁾は,グラウンドアンカーの性能低下について,その導入力の低下に着目してモデル化を行い,LCCを指標として最適補修年を判断した.上記の両研究とも,崩壊の誘因となる自然ハザードとして降雨を想定し,ガンベル分布を用いてモデル化している.

松山⁴⁾らは、吹付けコンクリートの安定性に関する研究を行い、吹付けコンクリートの劣化の主たる要因は、施工条件と地質条件にあると報告した。そして、地質の風化進行は、多くの斜面で100~200箇月で収束するという知見を示した。また、地盤内の岩質に応じて、新第三紀堆積岩では施工後3年程度で、中古生層堆積岩では施工後約15~20年程度でスライド現象が発生し、供用後25年以上経過した斜面での新規変状は、風化部分、およびコンクリート付着面の強度低下に起因するとの考えを示した。

大津ら⁵⁾は、吹付けコンクリートの性能低下について、地盤の粘着力の低下に着目してモデル化を行った.この際、粘着力の劣化予測に金融工学分野、とりわけ時間とともに変動する株価等の金融商品の価格挙動の予測に用いられる幾何ブラウン運動過程を用いてモデル化を行い、LCCによる最適補修年算定の一つの方法を示した.

以上より本研究では、既往の研究と同様に吹付けコンクリート斜面では地盤の粘着力,グラウンドアンカー斜面ではグラウンドアンカー導入力の低下に着目し、これらを確率・統計手法を用いて扱うことにより性能低下の不確実性を考慮したモデル化を行う、既往の研究^{3),5)}との相違点をまとめると以下のようになる.

● 確率・統計手法の相違

本研究では、確率・統計手法としてグラウンドアンカーに関する既往の研究³⁾ と同様に、性能低下を表す指標を確率変数として取り扱う方法(第2章で詳説する)を用いる。既往の研究では、確率変数の分布型として正規分布を用いる場合の算定のみにとどまっているが、本研究ではさらに対数正規分布を用いる場合の算定も行う。これは本研究で扱う粘着力、およびグラウンドアンカー導入力は正の値のみをとるので、変数の範囲が正の範囲に限定されている対数正規分布を用

いることでより的確なモデル化が行えると推察されるからである.

● 算定過程の簡便化

吹付けコンクリートに関する既往の研究 ⁵⁾では、確率・統計手法として幾何ブラウン運動過程を用いており、モンテカルロシミュレーションにより破壊確率を算定するため、計算量が比較的多い.一方で、本研究で用いる確率変数を用いる手法では計算量が少ないという利点がある.すなわち本研究は算定過程が比較的簡便で扱いやすいものとなっている.

● 自然ハザードの考慮の有無

グラウンドアンカーの既往の研究³⁾では、崩壊の誘因となる自然ハザードとして降雨を想定しているが、本研究では自然ハザードを考慮せずモデル化を行う. 自然ハザードを考えない場合、扱いの煩雑さが解消され、また純粋に性能低下のみに着目したモデル化を行うことができる.

以上より、既往の研究、および本研究により、吹付けコンクリート斜面、およびグラウンドアンカー斜面の性能低下を様々な確率・統計手法で扱い、モデル化を行うことになる. そこで、それぞれのモデル同士の比較検討を行い、最適補修年の評価過程における共通点、および相違点の考察を行う.

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全5章からなる.

第1章では、研究の背景、目的、および既往の研究について述べた.

第2章では、斜面対策工の性能低下のモデル化、および LCC による最適補修年の評価に関する一連の流れを述べる. 具体的には、斜面崩壊形態のモデル化、粘着力、およびグラウンドアンカーの導入力低下のモデル化、年破壊確率の算定方法、および LCC による評価手法に関して説明する.

第3章では、実際の吹付けコンクリート斜面を事例として取り上げ、第2章で提案した評価手法を適用し、結果に対する考察を行う。

第4章では、第3章と同様に実際のグラウンドアンカー斜面を事例として取り上げ、第2章で提案した評価手法を適用し、結果に対する考察を行う.

第5章では、第3章、および第4章での結果から本研究のまとめ、および結論 を述べ、今後の課題についても述べる.

第2章 斜面対策工の性能低下のモデル化および LCC 算定手法

本章では、斜面対策工として吹付けコンクリート工、およびグラウンドアンカー工を取り上げ、そのモデル化に関しての概要を述べる.

2.1 斜面安定性評価手法の概要

本節では、吹付けコンクリート斜面、およびグラウンドアンカー斜面における 安定性評価の方法について述べる.

2.1.1 吹付けコンクリート斜面における評価手法

吹付けコンクリート斜面では、吹付け表面に生じた亀裂から降雨などによる水分が浸透し、背面地山が風化することが想定される。そこで、本研究では吹付けコンクリート斜面の性能低下の支配的要因を、吹付けコンクリート背面地山の風化による粘着力の低下と仮定する。この粘着力の低下により吹付けコンクリート会配化した地盤が一体となって滑落する現象、すなわちスライド現象を対象とする。実際の崩壊形態とスライド現象との類似性から、吹付けコンクリート斜面の安定性評価においては、図 2.1 に示す表層崩壊モデルを適用する。吹付けコンクリート斜面の劣化を背面地山の風化と捉える場合、図 2.1 に示す風化帯厚さ d の設定が重要となる。そこで、本研究では供用後数回にわたり速度検層が実施されている吹付けコンクリート斜面を対象とし、風化にともなう弾性波速度の低下を用いて、弾性波速度が約 1 km/s 以下の低速度帯範囲を風化帯と仮定し、その厚さを風化帯厚さとする。なお、測定が行われていない年次の風化帯厚さは測定されている年次の値を線形補間して求める。

上述したように、本研究では吹付けコンクリート斜面の安定性評価に表層崩壊 モデルを適用するが、その際に用いる安全率 *Fs* は、すべり面上のせん断応力とせ ん断抵抗の比により次式で定義する.

$$Fs = (1 - \frac{\gamma_W H_W}{\gamma H}) \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha}$$

γw: 水の単位体積重量(kN/m³)

γ: 土の単位体積重量(kN/m³)

c: 地山の粘着力(kN/m²)

φ: 地山の内部摩擦角(rad) (2.1)

α: 斜面の傾斜角(rad)

H: 表層土の層厚(m)

Hw: 表層土中の地下水深さ(m)

本研究では性能低下の不確実性を考慮して粘着力cを確定値ではなく確率変数とすることから、斜面の安定性を示す指標として以下の性能関数Oを定義する.

$$Q = a_0 + a_1 c + a_2 \tan \phi$$

$$a_0 = -1, a_1 = \frac{1}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha}, a_2 = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H}\right) \cdot \frac{1}{\tan \alpha}$$
(2.2)

土の力学的特性を表す指標として内部摩擦角があるが、本研究では次の理由により定数で扱うことに留意されたい.式(2.1)の Fs の算定はモール・クーロンの破壊規準が前提にあるが、垂直応力と tan Øの積項における垂直応力は崩壊部の深さに依存することから、浅いすべりである表層崩壊を考える場合には粘着力項に比べて積項の寄与が小さいと考えられるためである.

なお、式(2.2)より次式が吹付けコンクリート斜面の安定性を表す条件である.

$$Q \ge 0 \tag{2.3}$$

2.1.2 グラウンドアンカー斜面における評価手法

グラウンドアンカー斜面の安定性評価においては、より一般的な斜面崩壊を対象とするために、図 2.2 に示す円弧すべりモデルを適用する. このとき、吹付けコンクリートと同様に次式に示す性能関数 Q を定義する.

$$Q = a_0 + a_1 c' + a_2 \tan \phi' + \sum_{j=1}^{l} (a_{j+2,1} T_j) + \sum_{j=1}^{l} (a_{j+2,2} T_j) \tan \phi'$$

$$a_0 = -1$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (b_i \sec \theta_i)}{\sum_{i=1}^{n} (w_i \sin \theta_i)}, \qquad a_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (w_i \cos \theta_i - u_i b_i \sec \theta_i)}{\sum_{i=1}^{n} (w_i \sin \theta_i)}$$

$$a_{j+2,1} = \frac{\sin \theta_j}{\sum_{i=1}^{n} (w_i \sin \theta_i)}, \qquad a_{j+2,2} = \frac{\cos \theta_j}{\sum_{i=1}^{n} (w_i \sin \theta_i)}$$
(2.4)

c': 地山の粘着力(kN/m^2), ϕ' : 地山の内部摩擦角(rad)

 w_i : スライス i の自重(kN), b_i : スライス i の幅(m)

 θ_i : スライス i の水平軸からの傾角 (rad)

 u_i : スライス i の間隙水圧 (kN/m^2)

 T_i : グラウンドアンカーの導入力(kN)

 θ_i : グラウンドアンカーiの打設角度(rad)

n: スライス総数, l: グラウンドアンカーの総本数

グラウンドアンカー斜面に関しても、安定性を表す条件は(2.3)を用いる.また、 地山の粘着力、および内部摩擦角は、グラウンドアンカーの導入力に比べて劣化 に対する寄与が小さいものと考えて定数として扱う.

2.2 粘着力低下のモデル化

本節では、粘着力の算定、およびその劣化過程のモデル化について述べる.

2.2.1 粘着力の算定方法

本研究では、地山の粘着力を、その地山において計測された一軸圧縮強度、地山の縦波弾性波速度、および地山の超音波伝播速度を用いて算定する.粘着力の算定方法⁶⁾の手順を以下の 1)~4)に示す.また、算定手順をフローチャートで示したものが図 2.3 である.

1) 地山で採取した供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、測定された一軸圧縮強度 q_u を用いて、次の相関式 $^{7)}$ から風化前の初期粘着力 c_0 を算定する.

$$c_0 = 10^{(0.9144 \times \log q_u - 0.6106)} \tag{2.5}$$

2) 地山で実施された速度検層結果から得られた風化の進行に伴う低速度帯の弾性波速度 V_p と、地山で採取した供試体に対して超音波速度試験を実施し、算出された超音波伝播速度 V_{p0} から、次式に示す亀裂係数 C_r を算定する $^{8)}$.

$$C_r = 1 - (\frac{V_p}{V_{p0}})^2 \tag{2.6}$$

なお、超音波伝播速度 V_{p0} は、風化していないと考えられる深さ約 $10 \, \mathrm{m}$ から採取した供試体を用いて測定している.

3) 式(2.6)で求めた亀裂係数 C_r を用いて、以下に示す相関式により低減係数 K_c を算定する $^{7)}$.

$$K_c = e^{-3.5643Cr} ag{2.7}$$

4) 式(2.5), (2.7)を用いて、地山の粘着力 c を以下の式で求める $^{7)}$.

$$c = K_c \times c_0 \tag{2.8}$$

2.2.2 回帰曲線を用いたモデル化

2.2.1 における算定手順より、粘着力を求めることができる.しかし、予算制約上、調査の実施期間、および実施回数などが個々の斜面により異なるという問題がある.つまり、得られる粘着力は、速度検層を実施した年次に限定される.しかし、斜面の性能低下を性能関数 Q で評価する場合、全ての年次の粘着力の値が必要となる.そこで、実際のデータが得られていない年次の粘着力を推定するため、図 2.4 の概念図に示すように年次と 2.2.1 で算定された粘着力に対して指数回帰を行い粘着力の低下をモデル化する.回帰曲線は数少ないデータから得られているので、回帰曲線上のデータを確定値として用いず、不確実性、すなわちばらつきを持つ値として扱う.本研究ではこの回帰曲線を平均値 μ_c として、それに対する標準偏差 σ_c を設定し、回帰曲線にばらつきを与えることで不確実性を考慮する.標準偏差 σ_c を設定する際は変動係数 COVを用いることとし、その関係を以下に示す.

$$\sigma_c(t_i) = COV \cdot \mu_c(0) \tag{2.9}$$

 $\mu_c(0)$: 供用開始時における粘着力 c の平均値

 $\sigma_c(t_i)$: 年次 t_i における粘着力 cの標準偏差

以上より、各年次の粘着力を確率変数として扱う. なお、本研究では確率変数の分布型として、正規分布、および対数正規分布の2つの確率分布を用いる.

2.3 グラウンドアンカーの導入力低下のモデル化

本研究では、 グラウンドアンカーの耐久性に関する基準が制定された平成 2 年以前に打設された旧タイプアンカーを対象に、グラウンドアンカーの性能低下として PC ケーブルの腐食にともなうケーブルの断面減少に起因する導入力の減少に着目する.

2.3.1 回帰曲線を用いたモデル化

グラウンドアンカーの導入力に関しても得られているデータ数が少ないため、 2.2.2 における粘着力の性能低下に関するモデル化と同様に、性能低下を図 2.5 に示すようにモデル化する. グラウンドアンカー導入力のモデル化では、性能低下率 κを以下のように定義する.

$$\kappa = \frac{T(t_i)}{T_0} \tag{2.10}$$

 T_0 : グラウンドアンカーの設計アンカー力(kN)

 $T(t_i)$: グラウンドアンカーの年次 t_i における引抜荷重(kN)

年次と式(2.10)により求まった性能低下率 κ に対して指数回帰曲線を用いて性能低下率 κ の低下をモデル化する.この回帰曲線から得られた各年次の性能低下率 κ に対して,設計アンカーカを掛け合わせることで,各年次の導入力が算定される.そして,この回帰曲線を平均値 μ_{κ} として,それに対する標準偏差 σ_{κ} を設定する.標準偏差 σ_{κ} の設定する際は変動係数COVを用い,その関係を以下に示す.

$$\sigma_{\kappa}(t_i) = COV \cdot \mu_{\kappa}(0) \tag{2.11}$$

 $\mu_{\kappa}(0)$: 供用開始時における導入力の性能低下率 κ の平均値

 $\sigma_{\nu}(t_i)$: 年次 t_i における導入力の性能低下率 κ の標準偏差

以上より、各年次の導入力の性能低下率 κを確率変数として扱う.本研究では確率変数の分布型として、正規分布、および対数正規分布の2つの確率分布を用いる.

2.4 年破壊確率の算定方法

本節では、2.2、および 2.3 でモデル化した粘着力 c、および導入力 T を用いて、斜面の年破壊確率を算定する方法 $^{9)}$ について述べる. なお、第 4 章で行う実際のグラウンドアンカー斜面に対する適用事例においては、斜面内にグラウンドアンカーが 9 本設置されているため、確率変数として $T_{I}\sim T_{9}$ の 9 変数が存在するが、これらは互いに独立であると仮定している.

2.4.1 確率変数を正規分布とした場合

本研究では、吹付けコンクリート斜面における粘着力、およびグラウンドアン

カー斜面における導入力を確率変数として扱っているため、それぞれの場合で定義される性能関数 Q も確率変数となる. 性能関数 Q が線形関数であることから、確率変数 c、および Tが正規分布に従う場合、性能関数 Q も正規分布に従う. 算定手順を以下に示すとともに、図 2.6 にその概念図を示す.

性能関数 Q の平均値、および標準偏差を μ_Q 、 σ_Q とすると、その確率密度関数 $f_O(x)$ は次式で表される.

$$f_{Q}(x) = \frac{1}{\sigma_{Q}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_{Q}}{\sigma_{Q}}\right)^{2}\right\}$$
 (2.12)

したがって、性能関数 Q が 0 未満となる確率 p(0)は、次式により算定される(図 2.6(1)).

$$p(0) = \int_{-\infty}^{0} \frac{1}{\sigma_{Q} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{X - \mu_{Q}}{\sigma_{Q}} \right)^{2} \right\} dX$$
 (2.13)

次に、式(2.14)に示す変数変換を行うことで、p(0)は式(2.15)に変換される.

$$s = \frac{X - \mu_Q}{\sigma_Q} \tag{2.14}$$

$$p(0) = \int_{-\infty}^{-\left(\frac{\mu_o}{\sigma_o}\right)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}s^2\right] ds = \Phi\left(-\frac{\mu_o}{\sigma_o}\right) = \Phi\left(-\beta\right)$$
 (2.15)

ただし, $\Phi(x)$ は,標準正規確率変数 x に対する累積確率を表し, $\beta = \frac{\mu_Q}{\sigma_Q}$ は,信頼性指標である.正規確率変数 Φ は,確率密度関数が正規分布に従うため,次式の関係が成り立つ.

$$\Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \tag{2.16}$$

式(2.16)により算定された確率は図 2.6(2)における時刻 i における破壊確率 $P_f(t_i)$ に相当し、時間空間において離散量として算定された累積確率である.

また信頼性指標 β は、以下のような捉え方もできる.吹付けコンクリート斜面における性能関数を例に説明する.式(2.2)より次式が求められる.

$$\mu_0 = a_0 + a_1 \mu_c + a_2 \tag{2.17}$$

$$\sigma_O = \sqrt{a_1^2 \sigma_c^2} \tag{2.18}$$

$$\beta = \frac{a_0 + a_1 \mu_c + a_2}{\sqrt{a_1^2 \sigma_c^2}}$$
 (2.19)

すなわち、信頼性指標 β は、c=0 から Q=0 における c の値までの距離となる. 性能関数 Q が 2 変数であれば β は2変数による直交座標(変数が無相関である場合のみに直交する)の原点から、Q=0 を示す限界曲線(線形関数であれば直線)までの距離、3 変数であれば原点から限界曲面までの距離となる.

(2.16)により算定された破壊確率 $P_f(t_i)$ における時刻 t_1 , t_2 , t_3 が等時間間隔 Δt であるとすると,図 2.6(3)に示す時間間隔 Δt に対する破壊確率密度 $\Delta P_f(t_i)$ は次式により算定される.

$$\Delta P_f(t_i) = \frac{P_f(t_i) - P_f(t_{i-1})}{\Delta t} , \quad \Delta t = t_i - t_{i-1}$$
 (2.20)

式(2.17)において Δt =1, つまり t_i を 1 年間隔として扱うことにより, 年破壊確率を算定することができる.

2.4.2 確率変数を対数正規分布とした場合

2.4.1 にある式(**2.16**)が年破壊確率を算定する際の基本となる式であるが、その導出過程より、性能関数 Q が正規分布であるという仮定の下に導出された式である。確率変数 c、および T を非正規分布に従う場合の年破壊確率の算定方法を以下で述べ、続けて対数正規分布に従う場合の算定方法を述べる.

確率変数が非正規分布に従う場合,等価正規分布を用いることにより式(2.16)を適用することができる.すなわち確率変数に対して,限界曲面上の適当な点 x_i^* において,等価正規分布,および元の非正規分布の累積確率,ならびに確率密度の値がともにそれぞれ等しくなるように,非正規変数に対する等価正規分布を求める.

破壊点 x_i^* における累積確率を等置すると次式が得られる.

$$\Phi\left(\frac{x_{i}^{*} - \mu_{X_{i}}^{N}}{\sigma_{X_{i}}^{N}}\right) = F_{X_{i}}(x_{i}^{*})$$
 (2.21)

 $\mu_{X_i}^N, \sigma_{X_i}^N$: 等価正規分布の平均値,標準偏差

 $F_{X_i}(x_i^*)$: X_i の元の累積分布関数の x_i^* における値

Φ(-):標準正規分布の累積分布関数

式(2.21)より、次式が得られる.

$$\mu_{X_i}^N = x_i^* - \sigma_{X_i}^N \Phi^{-1} [F_{X_i}(x_i^*)]$$
 (2.22)

一方、対応する確率密度の x_i^* における値を等置して、次式が得られる.

$$\frac{1}{\sigma_{X_i}^N} \phi \left(\frac{x_i^* - \mu_{X_i}^N}{\sigma_{X_i}^N} \right) = f_{X_i}(x_i^*)$$
 (2.23)

 $f_{X_i}(x_i^*)$: X_i の元の確率密度関数の x_i^* における値

φ(-):標準正規分布の確率密度関数

式(2.23)を解くことにより,次式が得られる.

$$\sigma_{X_i}^N = \frac{\phi \{\Phi^{-1} [F_{X_i}(x_i^*)]\}}{f_{X_i}(x_i^*)}$$
 (2.24)

以上の算定手順を踏まえた上で,以下確率変数が対数正規分布にしたがう場合 について述べる.式(2.21),(2.23)より,

$$F_{X_i}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{\ln x_i^* - \lambda_i}{\zeta_i}\right)$$
 (2.25)

$$f_{X_i}(x_i^*) = \frac{1}{x_i^* \zeta_i} \phi \left(\frac{\ln x_i^* - \lambda_i}{\zeta_i} \right)$$
 (2.26)

 λ_i . ζ_i : 対数正規パラメータ

これらを解くことにより次式が得られる.

$$\mu_{X_i}^N = x_i^* \left(1 - \ln x_i^* + \lambda_i \right) \tag{2.27}$$

$$\sigma_{X_i}^N = x_i^* \zeta_i \tag{2.28}$$

この算定手順により、信頼性指標 β を算定する際に必要な $\mu_{X_i}^N,\sigma_{X_i}^N$ を算定することができるが、一般に破壊点 x_i^* は未知であるため繰り返し計算が必要である.

まず、破壊点 x_i^* の初期値を与える必要があるが、本研究では各年次で算定されている粘着力、あるいは導入力の平均値を用いることとした.このようにして、 $\mu_{X_i}^N,\sigma_{X_i}^N$ が求まり、次式により信頼性指標 β を算定することができる.

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_i a_i \mu_{X_i}^N}{\sqrt{\sum_i (a_i \sigma_{X_i}^N)^2}}$$
 (2.29)

次に、方向余弦 α_i を次式で定義する.

$$\alpha_{i} = \frac{\begin{pmatrix} \partial Q / \\ \partial X_{i}^{*'} \end{pmatrix}}{\sqrt{\sum_{i} \begin{pmatrix} \partial Q / \\ \partial X_{i}^{*'} \end{pmatrix}^{2}}}$$
 (2.30)

なお, $X_{:}^{'^*}$ は, 式(2.14)と同様の方法で求められたものである.

以上により,新しい破壊点 x_i^* が次式で得られ,この繰り返し計算により最適な破壊点 x_i^* を求めることができる.

$$x_{i}^{*} = \sigma_{X_{i}}^{N} x_{i}^{*} + \mu_{X_{i}}^{N} = -\alpha_{i} \beta \sigma_{X_{i}}^{N} + \mu_{X_{i}}^{N}$$
 (2.31)

2.5 LCC の評価方法

現在、インフラ構造物の維持補修計画においては、補修の優先順位付けの判断指標が求められ、安定性、および補修による費用対効果を総合的に判断する必要性が求められている。本節では、その判断指標として提案されている LCC による評価方法を述べる。

2.5.1 LCC の定式化

LCC は以下の式(2.32)で定義される⁵⁾.

$$LCC = C_C + C_{MT} + C_O ag{2.32}$$

Cc: 建設コスト

C_{MT}: 維持補修費用

Co: オペレーション費用

この内、オペレーション費用の代表例としては、プロジェクトへの融資に対する返済額があげられ、維持補修費用には調査点検費が含まれる.

式(2.32)に示す LCC を評価する上では、地震などの自然災害、あるいは予算制約等の問題から調査点検回数が限定されることなどを考えると、LCC 算定期間が比較的長いインフラ構造物において将来の不確実性要素が多く含まれると考えられる. したがって、この不確実性を考慮する必要があり、LCC の評価式は以下のように書き換えられる⁵⁾.

$$LCC = C_C + C_{MT} + C_O + \Delta R$$

$$\Delta R = \Delta R_C + \Delta R_{MT} + \Delta R_O$$
 (2.33)

 ΔR_C : 建設コストに関するリスクコスト

 ΔR_{MT} : 維持補修費用に関するリスクコスト

 ΔR_0 : オペレーション費用に関するリスクコスト

現状でのインフラ構造物のアセットマネジメントに関する研究分野では、既存構造物を対象としている場合が多く、主に維持補修費用に関するリスクコスト Δ R_{MT} のみが検討対象とされているため、本研究でも維持補修費用に関するリスクコストについてのみ考えることとし、評価式は以下のように定義する.

$$LCC = C_M + \Delta R_{MT} \tag{2.34}$$

したがって、LCC を考える際の重要な点は、リスクコストを定量的に評価する 手法の構築となる. リスクの定義は、一般の工学分野で用いられている以下を採 用する.

$$R = p \times C \tag{2.35}$$

式(2.35)において、pと C はそれぞれ年破壊確率と損失額を示しており、R は期待損失を意味する.以上のことから、本研究における LCC の算定式は以下とする.

$$LCC = \sum_{i=1}^{N} p_i C_h \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} + \sum_{i=1}^{N} I(i) \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1}$$

i: 供用後経過年数, p_i: 年破壊確率

 C_h : 崩壊時の損失額(復旧費用+迂回・走行損失) (2.36)

I(i): i 年次に発生する補修費用, N: LCC 算定期間

ρ: 社会的割引率

式(2.36)における右辺第1項は、式(2.35)にある期待損失を意味し、各年次の期待損失Rを LCC 算定期間内で累積したものである.本研究では年破壊確率は年次ごとに p_1 , p_2 , p_3 , …と推移し、実際に崩壊が生じた翌年には破壊確率は p_1 に戻る. さらに崩壊復旧後の劣化は考えない、すなわち崩壊復旧後は p_1 , p_1 , p_1 , …という確率推移となる.一方、第2項は補修費を表しており、仮にm年次に補修するとした場合以下のような数列として表される.

$$0,0,\cdots,0,I_{m},0,0,\cdots$$
 (2.37)

すなわち、1 度しか補修を行わないため m 年次以外の補修費は 0 となる. そして、補修後は復旧の場合と同様に破壊確率は p_i に戻り以降劣化は生じない.

なお社会的割引率 ρ は、将来に想定される収入、支出を現在価値に割り戻して評価するための係数であり、対象国のマクロ経済の成長率もしくは公定歩合に連動して設定される、日本では 4% を用いることが多く、本研究でも 4% を採用する.

2.5.2 損失額および補修費の算定方法

本項では、LCC 算定において必要となる損失額、および補修費の算定方法について述べる. 損失額は、復旧費と迂回・走行損失費に分けられる. 復旧費は崩壊が生じた際に想定される土塊量から、土木工事積算マニュアルに基づき算定する. 迂回・走行損失費 L_U , L_S は過去の通行量調査結果から以下の式で求める $^{3)}$.

$$L_{U} = n \times \sum (A_{m} \times N_{m} \times \Delta t)$$
 (2.38)

$$L_S = n \times \sum N_m \left(B_m^L \times l^L - B_m^H \times l^H \right) \tag{2.39}$$

n: 通行止め日数, A_m: 車種ごとの時間価値原単位 (円/分・台)

 N_m : 日交通量, Δt : 迂回により余分にかかる時間

 B_m^L, B_m^H : 車種ごとの燃料費,オイル,タイヤ・チューブ,車両整備,車両償却の合計である走行費用原単位(B_m^L が迂回時, B_m^H が現道走行時)

 l^L , l^H : 迂回時走行距離, 現道走行距離

次に、補修費は吹付けコンクリート斜面の場合、打換えにかかる費用、グラウンドアンカー斜面の場合、アンカーの更新費用を土木工事積算マニュアルに基づき算定する.

第3章 実際の吹付けコンクリート斜面への適用

本章では、2章で述べたモデル化を実際の吹付けコンクリート斜面に適用し、 考察を行う. 対象地点は9地点あり、表3.1に対象地点のスライド現象発生の有 無,発生した地点はその年次,未発生の地点は最新調査年次を示す.また,基本 データとして,崩壊面の傾斜角 α ,地山の単位体積重量 γ ,地山の内部摩擦角 ϕ , 地盤の地質も併記する.なお、内部摩擦角φは全地点で測定値が得られているわ けではないため、得られているデータの平均値20°とした. 地下水位 H_W は、全地 点において風化層より深い位置にあったため、本研究における算定では考慮しな い. また, 表 3.2 に示す判断指標 10)による 2004 年度に実施された未崩壊地点に 対する健全度判定の結果も併記する.また,3.1,および 3.2 において風化帯厚さ, および粘着力を算定し,式(2.1)を用いて,粘着力の平均値を用いた安全率(以下, 中央安全率と称す)を計算する. 本研究では、中央安全率が 1.0 を下回る年次を 予測スライド発生年と定義し、これをLCCの考察の際に利用する.ここで、予測 スライド発生年を表 3.1 に併記する. 表 3.3 に示すのは, 既に崩壊した地点 A~ 地点 Dの実際のスライド発生年とその時の中央安全率である.4地点いずれも実 際のスライド発生時には安全率が 1.0 を下回っている. 現実の斜面条件を完全に 算定に反映させることができているのであれば、安全率 1.0 の時点で崩壊するは ずであり、すなわち本モデルの算定は多少危険側に見積もっているといえる、中 央安全率は 3.2 で設定する回帰曲線により求めており、その結果を用いた中央安 全率の算定結果が上述のように現実と乖離が見られることを考えると、回帰曲線 に対してばらつき、すなわち不確実性を考慮するモデル化手法は妥当であり、か つ安全率のみで補修に対する意思決定を行うことの危険性を示しているといえる.

3.1 風化帯厚さの設定

本節では、風化帯厚さの設定方法について示す.図 3.1 に風化帯厚さの設定概念図を示し、図 3.2a~図 3.2i に各地点の速度検層の結果、および推定された風化帯厚さの設定結果を示す.風化帯厚さが 0 m である場合は、吹付けコンクリート厚さを風化帯厚さとして代用している.なお、既崩壊地点のスライド発生年次以降、および未崩壊地点の最新調査年次以降の風化帯厚さは、既往の研究 4)より、

推定風化帯厚さが以降一定値として扱う. また, 既崩壊地点では崩壊後にも調査が行われている場合があるが, 崩壊後は地盤の状況が大きく変化していると考えられるため, そのデータはモデル化の際は利用しない.

3.2 粘着力低下における回帰曲線の設定

本節では、粘着力低下の回帰曲線を 2.2 で述べた方法により求める. 表 3.4 に、粘着力の推定の際に用いる一軸圧縮強度、および超音波伝播速度の測定結果、ならびに初期粘着力の算定結果を示す. これらの数値を用い、各地点の各調査年次における粘着力を算定し、表 3.5 に示す. これらの粘着力推定値から指数回帰により求めた粘着力の低下曲線を図 3.3a~図 3.3i に示す.

3.3 年破壊確率の算定

本節では、年破壊確率の算定を 2.4 で述べた方法により行う. なお、標準偏差を設定する際に用いる変動係数 *COV* は、0.2、0.3、0.4、0.5 の 4 種類を設定しその感度分析を行う.

以上より、供用開始年から年破壊確率を算定したグラフのうち、確率変数として正規分布を仮定した場合を図 3.4a~図 3.4i に、対数正規分布を仮定した場合を図 3.5a~図 3.5i に示す. 同時に風化帯厚さの変化も示す. 図中丸印、三角印は各ケースの最適補修年を表しており、丸印、および三角印の違いは 3.4 で述べる.

3.4 LCC の 算 定

本節では、2.5 で述べた方法により LCC の算定を行う. 吹付けコンクリート斜面では、全地点で LCC 算定期間を 50 年とする. 各地点の、崩壊時に発生する損失額、および補修費を表 3.6 に示す. これらの値と 3.3 で算定した年破壊確率を用いて LCC 算定を行う. 補修年をパラメータとした LCC 算定結果を以下、正規分布を仮定した場合を図 3.6a~図 3.6i に、対数正規分布を仮定した場合を図 3.7a~図 3.7i に示す. LCC 算定では算定期間のうち LCC の金額が最小である年次を最適補修年とするのが基本である. しかし例えば図 3.8 のような場合は、p 年次を

最適補修年とする. 算定上の LCC の最小値は q 年次であるが、中央安全率が 1.0 未満であるため、算定上では既に崩壊していると考える. そのため、このような場合は余裕も含め中央安全率が 1.1 となる年次を最適補修年とする. 図 3.6、3.7では、前者の最小値が得られた場合の最適補修年を丸印、中央安全率 1.1 となる年次を最適補修年とした場合を三角印で表す. また、既往の研究 5)との比較を行うため幾何ブラウン運動過程を用いて年破壊確率を算定した場合の LCC 算定結果を図 3.9 に示す.

以下幾何ブラウン運動過程の算定条件について,簡単に述べる.幾何ブラウン 運動過程は粘着力の低下の不確実性を考慮する方法で,次式で粘着力を算定する.

$$\ln c_t = \ln c_{t-1} + \mu \Delta t + \sigma \varepsilon_t \sqrt{\Delta t}$$
 (3.1)

 c_t : 時刻 t の 粘着力 (kN/m^2)

 Δt : 時刻 t と時刻 t-1 との時間間隔

 ε_t : 平均 0,標準偏差 1 の標準正規確率過程

μ: トレンド

σ: ボラティリティ

トレンドは、粘着力の平均的な変動を示し、ボラティリティは平均的変動周りの変動である.式(3.1)は、モンテカルロシミュレーションにより確率パスとして算定され、これにより年破壊確率を算定している.

幾何ブラウン運動過程では最新調査年以降の確率パスを考えているため、最新調査年以降の年破壊確率のみが算定されるため、未崩壊地点のみの LCC 算定が行われており、LCC 算定の期首が最新調査年となっていることに留意されたい.また、既往の研究における最適補修年の意味合いは補修間隔、すなわち i 年次が LCC 最小となれば、i 年間隔で補修を行うということを示すが、本研究では 2.5.1 で示したように補修は 1 度だけである. これらの算定結果を表 3.7 にまとめる.

3.5 考察

本節では、3.3、3.4 における算定結果より、年破壊確率の変化に対する考察、年破壊確率算定において確率変数として正規分布を仮定した場合と対数正規分布を仮定した場合の相違点の比較と考察、および変動係数の感度分析に対する結果の比較と考察を行う、次に、地点別の考察を既崩壊地点と未崩壊地点に分けて行

い、未崩壊地点に対しては幾何ブラウン運動過程の結果との比較と考察を行う.

3.5.1 年破壊確率の変化に対する考察

年破壊確率は式(2.16)で算定された累積の破壊確率を式(2.20)により、年次ごと の差分をとることで算定される. 経年的に変化する物理量は、粘着力、および風 化帯厚さである. 図 3.3 の回帰曲線における算定式の指数部分より, 地点 A, E, および G は粘着力の低下速度が比較的速い地点といえる. その他の地点 B, C, D, F, H, および I は比較的低下速度が遅い地点である. この分類において, 特に後 者の粘着力の低下速度が遅い地点における年破壊確率の算定結果は、図 3.4、お よび図 3.5 より風化帯厚さの変化の挙動と酷似している. 特に地点 D に顕著にそ の傾向が現れており、風化帯厚さの増加範囲では年破壊確率が増加し、風化帯厚 さが一定の範囲では年破壊確率が非常に小さくなっており、両者の挙動に合致が 認 め ら れ る . 前 者 の 地 点 A , お よ び E (風 化 帯 厚 さ の 変 化 が な い 地 点 G は 除 く) という粘着力の低下速度が比較的速い地点についても、風化帯厚さが急変する区 間 (例えば地点 E における 10 年次から 14 年次の区間)で, 年破壊確率の増加が 著しい. すなわち, 年破壊確率に影響を与えている粘着力, および風化帯厚さの うち, 風化帯厚さの方が年破壊確率に影響を与えていると結論づけられる. 風化 帯厚さの変動は粘着力の変動と比べて急であり、風化帯厚さの増大がせん断応力 の増大に影響を及ぼしていることを考えると、この結果が得られたことはある種 当然のことといえる.

また、弾性波探査の測定条件の影響についての考察を行う.本研究では、粘着力の算定に弾性波速度を用いているが、例えば図 3.2b の浅層部分の弾性波速度の推移は 1.30 km/s、1.80 km/s、1.40 km/s となっている.本研究では風化が進行すれば弾性波速度も低下すると考えるが、この例のように年次が進んだ際に増加している場合も散見され、増加する場合には粘着力も増加した値として算定される.これは、測定ミスではなく、測定条件が測定年次により一定していないことに起因すると考えられる。例えば、降雨により含水率が高い状態で測定する場合と、乾燥して含水率が低い状態で測定する場合では、あるいはその前後により測定の値は大きく異なる。つまり、実際は風化が進んでいる場合でも測定時の土質条件により弾性波速度が増加、減少することが十分考えられる。粘着力を確率変数とするのは、将来予測に対する不確実性に加えてこのような不確実性も考慮するた

めである.しかし,各速度帯の弾性波速度の値自身が測定条件により変化しても,速度境界に関しては,測定条件による誤差は少ないものと考えられる.すなわち,風化帯厚さの算定値は粘着力の算定値と比べてより不確実性の少ない値を与えているといえる. モデル化において,粘着力は測定されている年次の値に対して指数近似を用いて,回帰曲線を求めているため,例えば上述した地点Bにおける2回目の計測のように粘着力が増加するという結果が得られても,指数近似よりその影響が緩和される.一方,風化帯厚さは測定されている年次の値に対して線形補間を行うことで,測定されていない年次の値を推定するため,差分をとることで年破壊確率を算定することを考えると算定結果が反映されやすくなっている.

よって、風化帯厚さの変化を反映しやすい本モデル化は、現場の測定状況を反映したモデル化と考えることができる.

3.5.2 正規分布および対数正規分布に対する結果の比較と考察

本項では、年破壊確率を算定する際に、確率変数として正規分布、および対数 正規分布を仮定した場合の両者の結果の比較、および考察を行う、変動係数の影響を除くため、*COV*=0.2 とした場合の LCC 算定結果から比較、検討を行う.

結果より、正規分布を用いた場合に最適補修年が早くなる地点が 1 地点 (地点 G)、対数正規分布を用いた場合に最適補修年が早くなる地点が 3 地点 (地点 C, D, および E)、またどちらを用いても変わらない地点が 5 地点 (地点 A, B, F, H, および I) であった.ここで、正規分布は変数の範囲は - ∞から + ∞であり、対数正規分布は 0 から + ∞である.正規分布の負の範囲はすなわち粘着力が小さい範囲であるから、地盤を危険側に判断することになる.その負の部分がない対数正規分布は安全側に見積もることになり、結果として最適補修年が遅くなると考えられるが、算定結果より対数正規分布を用いた場合の方が、最適補修年が早くなる結果が数多く得られている.

例として、図 3.10.1、および図 3.10.2 に最適補修年に差が見られる地点 C、D、E、および G における粘着力の確率密度関数、累積分布関数を示し、考察する. 図 3.10.1 より正規分布の負の部分による確率的な寄与は非常に小さい. 一方、正規分布と対数正規分布を比較すると対数正規分布を用いる場合、最頻値は粘着力が小さい方向へ移動している. 最頻値が小さくなることは、すなわち粘着力を小さく評価することになるため、対数正規分布を用いた場合の方が、最適補修年が

早くなっていると考えられる. 正規分布を用いた場合に最適補修年が早くなって いる場合(地点 G)に対する考察を以下に加える. 図 3.3g より, 地点 G は他地点 と比較して粘着力の値が大きい.本モデルでは,変動係数を平均値に掛け合わせ ることにより標準偏差を算定する方法を用いているため、粘着力の平均値が大き い地点 G は標準偏差も大きくなる. 図 3.10.1 より, 分布形状が広範囲であるため, 粘着力が大きい値に対する確率も比較的大きくなり、地点Gは正規分布を用いた 場合の方が、最適補修年が早くなったと考えられる.すなわち、ある程度確率変 数 の 標 準 偏 差 が 大 き い 場 合 , 正 規 分 布 の 方 が 最 適 補 修 年 が 早 く な る 場 合 が あ る と 考えられる.このことを定量的に表すために,以下の指標を考える.各地点にお い て, 正 規 分 布 に お け る 最 頻 値 と 対 数 正 規 分 布 に お け る 最 頻 値 の 差 の 絶 対 値 を d₁, 同様に中央値の差の絶対値を d_2 とし、 d_1/d_2 を考える. このとき分布の標準偏差 の大小、すなわちばらつきの大小により、最頻値と中央値の比率に特異な傾向を 見出せるかを検討する. 地点ごとに算定を行った結果を表 3.8 に示す. 正規分布 の方が、最適補修年が早くなった地点Gの値が最小となり、ばらつきが地点Gよ り小さい他地点はそれより大きい値となっている.今後サンプル数を加えること で, d₁/d₂ を指標として正規分布, および対数正規分布が最適補修年に与える影 響を検討することが可能なものと考えている.

3.5.3 変動係数の感度分析に対する考察

本項では、変動係数による感度分析の結果を考察する.

図 3.6、および図 3.7 より変動係数が大きい場合,LCC 算定金額も大きくなっており,以下で考察を加える.変動係数が大きいほど,平均値は等しいが標準偏差が大きくなり,すなわち変動係数が大きいほど同じ年次で比較した場合に,性能関数が 0 を下回る確率(2.4.1 で述べた破壊確率 $P_f(t_i)$ である)が大きくなる.よって,地点 G に最も顕著に見られるように年破壊確率の増加が比較的早い時期に生じる場合が見られ,比較的広範囲にわたる分布形状となる.このことが式(2.36)の右辺第 1 項に影響を及ぼす.右辺第 1 項は期待損失の項であり,社会的割引率で現在価値に割り戻すことを考慮すると,早い年次に破壊確率が大きくなる場合,すなわち変動係数が大きい場合の方が,右辺第 1 項の値を大きく見積もることになり,結果的に LCC 算定金額も大きくなると考えられる.

3.5.4 地点ごとの結果の分析および考察

分布,および変動係数による相違は上述した通りであり、これらの要因が複合的に影響し合って年破壊確率が算定されるため、地点ごとの考察を行い、モデルの適合性を検討する.

まず、既崩壊地点に対する考察を行う.既崩壊地点は実際にスライドが発生した年次が得られているため、得られた最適補修年との比較が可能である.まず、図 3.4a~d、および図 3.5a~d の結果から、実際のスライド発生年は年破壊確率のピークよりも後になっていることがわかる.また正規分布、変動係数 0.2 の場合の累積の破壊確率を表 3.9 に示す.表よりスライド発生時の累積確率も 0.64~1.00とそれぞれ違いがあり、すなわち累積確率がある値を上回った時点で補修するという方法も非効率的であると考えられ、やはり、破壊確率と同時に社会経済への影響も含めた LCC による評価が肝要といえる.

そこで、LCC 算定結果に注目する.地点A,および地点Dは実際のスライド発 生年と予測スライド発生年の乖離が小さく,算定値の信頼度が高いと考えられる. そこで,この2地点はばらつきが小さい変動係数が0.2の場合の算定結果に着目 する. 図 3.11 に地点 A, および地点 D における LCC の経時変化を示す. 地点 A は図 3.4a, および図 3.5a に示したように 3 年次以降から年破壊確率の増加が見ら れる. このため図 3.11 より 1 年次に補修する場合は,式(2.36)の第 1 項,累積期 待損失が小さいため,50年次での LCC 算定結果の大部分を補修費が占めている. また、最適補修年である3年次に補修する場合は、正規分布、および対数正規分 布のどちらも累積期待損失が1年次より大きくなっている.しかし、本来一定で ある補修費を社会的割引率の影響を考慮して割り戻すので、補修費、すなわち式 (2.36)の第 2 項は 1 年次より小さくなる. 補修費が小さくなる寄与が、累積期待 損失が大きくなる寄与より大きいため1年次より3年次の方が,LCC 算定結果が 小さくなっていると考えられる. その後, 年破壊確率の増加にともない累積期待 損失が大きくなるが,補修費は割り戻しにより年次が進むごとに小さくなるため, 徐々に期待損失の影響が大きくなり, 5, 7 年次は LCC 算定結果が再び増加して いる.地点Dは,正規分布と対数正規分布により最適補修年が異なる.これは, 累積期待損失の増加傾向によるものである. 図 3.11 より,累積期待損失は2段階 で 増 加 し て お り , 1 段 階 目 の 増 加 は 対 数 正 規 分 布 を 用 い た 場 合 の 方 が 著 し く な っ ている. これは 3.5.2 で述べた対数正規分布が, より危険側に算定することが多

いという事例の 1 つといえる. 対数正規分布を用いた場合, 5 年次からの累積期待損失の増加傾向が補修費の割り戻しの影響より大きいため,増加する直前の 5 年次が最適補修年となったと考えられる. 一方,正規分布を用いた場合は 1 段階目の累積期待損失の増加傾向が緩やかであるため,補修費の割り戻しの寄与の方が大きくなり,最適補修年は次の累積期待損失の増加の直前である 13 年次になったものと考えられる. 両者の算定結果からいえることは,最適補修年は実際のスライド発生年より比較的早い場合が多いという点であり,スライド発生年の直前での補修は LCC の観点からは実は非効率的な場合があると判断できる. さらに,両地点の 3 年次の中央安全率を比較すると,図 3.6a,および図 3.6d より地点 A は 5.51,地点 D は 1.86 である. この結果だけで比較すると,地点 D の方が危険であり補修が必要であると考えられるが,LCC の観点では地点 A を先に補修するべきであり,算定結果が逆転する.また,補修年次のみでなく,LCC の金額自体も地点 A の方が大きくなっており,金額面からも地点 A の重要度がわかる.つまり,社会経済的に効率的な補修時期は,必ずしも安全率の大小と一致しないことが以上の結果からわかる.

次に、予測スライド発生年と実際のスライド発生年の乖離が大きい地点 B, および地点 D に対してその原因を考察する.

地点 B で乖離が大きい原因は、粘着力の値そのものが小さいこと、および初期の風化帯厚さの増加が著しいことが理由と考えられる.粘着力の値が小さい理由としては式(2.6)における超音波伝播速度の値が大きく、実際の地盤物性を反映できなかったことによるものと考えられる.図 3.2b より、風化の影響を受けていないと考えられる深層の弾性波速度は 3.50 km/s、2.40 km/s、1.60 km/s と不安定であり、かつやはり風化の影響を受けていない深層から採取した供試体から求められた超音波伝播速度の値とも乖離している.つまり、弾性波の値に不確実性が生じやすい地盤と考えられ、そのような地盤において測定場所の差異により、大きな超音波伝播速度が算定されたと考えられる.超音波伝播速度は飽和度により速度が異なる 11)ため、測定条件によっても微妙な違いがでることも考えられる.以上より、最適補修年が早くなったと考える.地点 C も地点 B における理由と同様であると考えられる.地点 B と異なり、3 年次まで、吹付けコンクリートの密閉効果により風化帯厚さが抑えられており、また地点 B と比べて超音波伝播速度が小さく、一軸圧縮強度が大きいため粘着力が大きな値となり、地点 B よりは予測

スライド発生年は遅くなっている. このように, この 2 地点は測定上の課題があるとはいえるものの, 図 3.6b, c, および図 3.7b, c の LCC 算定結果は年破壊確率が増加, すなわち累積破壊確率が増加する直前が最適補修年となっており, 地点 A, および地点 D との傾向の合致が見られる.

次に、未崩壊地点に対する考察を行う.

まず、地点 Fと地点 H は予測スライド発生年が 75年次、101年次となっており、この観点からは比較的安全な斜面と捉えることができる. しかし、図 3.6f、h、および図 3.7f、h より対数正規分布を用いた場合変動係数が 0.2 以外の時に最適補修年が非常に早くなっている場合がある. これは 3.5.2、および 3.5.3 で述べた理由によるものであると考えられる.この結果が妥当か否かの判断は困難であるが、この結果から変動係数の設定値により算定結果が大きく異なる、すなわち変動係数をいかに正確に設定するかが最適補修年算定に大きく寄与しているといえる. 但し、両地点とも 50 年間補修しない場合の LCC 算定結果と比較した場合、対数正規分布、変動係数 0.5 の場合を除いて補修しない方が LCC の金額が安くなっている. これを勘案すれば、現状ではこれらの地点は補修しないという意思決定が下せるものと考える. 上述した補修しない場合の LCC を正規分布、変動係数 0.2 の場合で比べると、地点 F は 0.77 億円、地点 H は 1.02 億円であり、どちらも比較的安全な斜面とはいえるが、仮に両者の順位付けを行うとすれば、補修しない場合の LCC が大きい地点 H が優先されるべきといえる.

残りの3地点、地点 E、地点 G、および地点 I に対する考察を行う. この3地点は予測スライド発生年が46年次,50年次,45年次であり、上述した2地点との比較では注意が必要な斜面と考えられる.3地点に共通していることは極値が得られている場合、最新調査年以前に極値が現れるということである.この理由は以下のように考えられる.最新調査年以降の風化帯厚さは3.1で述べたように一定値として扱っている.風化帯厚さの変動が年破壊確率に大きく影響を与えていること、および補修費の割り戻しの寄与は年次が進むにつれて大きくなることを考えると、風化帯厚さが一定値となる最新調査年以降に極値が現れることは少ないと考えられ、風化帯厚さの影響を受けやすい本モデルの特徴といえる.また、LCCの金額に注目すると地点 E では正規分布で4.0~6.5億円、対数正規分布では3.5~7.0億円と他の2地点より数値も大きい範囲であり、かつ幅も広い.これより、3地点の中では補修の優先順位が高い地点であると判断できる.一方、地点 E と

予測スライド発生年がほぼ同時期である地点 I は、正規分布で 2.5~3.5 億円、対数正規分布で 3.5~4.5 億円と地点 E より多少 LCC の数値も小さく金額幅も狭い.これより、地点 E より補修の優先順位は低いものと考えられる.このように予測スライド発生年が同時期でも LCC を算定することで順位付けが可能となる.地点G は便宜的に吹付けコンクリート厚さを風化帯厚さとした地点で実際に風化が生じていないと現状で判断されている地点であるため同列で比較できないが、図3.2g より、4、5 回目の速度検層で 0.90 km/s というやや小さい値が得られていることから、追加調査を行い風化が生じているか否か判断が必要といえる.

次に、3.4 で述べた幾何ブラウン運動を用いた未崩壊地点における算定結果との比較を行う.幾何ブラウン運動過程を用いた LCC 算定の期首が本研究の場合とは異なり、最新調査年であるため、単純な比較はできないが、本研究で比較的安全と判断された地点 F、および H の最適補修年が遅く、LCC の金額も小さい.地点 E、および地点 I の比較でも最適補修年次は共に 10 年次(最新調査年次から 10 年次である)であるが、地点 E の LCC 金額の方が、大きいため優先順位は地点 E の方が高いといえ、本研究と傾向に合致が見られる.

さらに、現場の調査により評価されている健全度判定との比較を行う. 地点 F, および地点 H については、健全度判定で c, d という健全側な評価がなされており、本研究の算定結果と一致する. 地点 E は健全度判定で b と危険側に判定されおり、本研究の算定結果でも、地点 F, および地点 H を除いた 3 地点の中で 1 番優先順位が高いと判断されており、算定結果と一致する. 地点 G は、上述したよう、風化帯厚さの設定が他地点と多少異なっているため、的確な判断はできないが、予測スライド発生年まで 21 年残されていることを考えると健全度判定 c という結果はある程度一致している. 地点 I は、健全度判定では c と健全側の評価となっており、CC の金額も地点 E より小さいことからある程度の合致が見られると考えられる.

第4章 実際のグラウンドアンカー斜面への適用

本章では、2章で述べたモデル化を実際のグラウンドアンカー斜面に適用し、考察を行う.グラウンドアンカー斜面のデータは非常に少なく、地山のデータが既往の研究で用いられた場合のみしか得られていない。今回モデルを適用する地山の形状を図 4.1 に示し、粘着力、内部摩擦角、土の単位体積重量、水の単位体積重量、水の単位体積重量、グラウンドアンカーの初期導入力、位置、傾角、崩壊時に発生する損失額、および補修費を表 4.1 に示す。今回は、グラウンドアンカーが 9 本設置されている場合を考える。なお、図 4.1 における地下水面はグラウンドアンカー斜面の供用開始時に中央安全率が 1.2 となるように定めた仮想的な地下水面である.

4.1 導入力低下における回帰曲線の設定

本節では、グラウンドアンカー導入力低下の回帰曲線を 2.2 で述べた方法により求める.本研究では、2 通りの導入力の低下を考える.ケース 1 は、以下に述べる方法で設定する.アンカーの性能低下率は地山で得られている引抜荷重から算定されるが、表 4.2 に示すように地点 a では 10 年次の算定結果、地点 b では20 年次の算定結果のみが得られている.よって、本研究では、10 年次は地点 a の結果を、20 年次は地点 b の結果を用い、仮想的な劣化曲線を設定する.ケース2 は既往の研究で用いられた劣化曲線を採用する.両者の回帰曲線の設定結果を図 4.2 に示す.

4.2 年破壊確率の算定

本節では、年破壊確率の算定を 2.4 で述べた方法により行う. なお、標準偏差を設定する際に用いる変動係数 COV は、0.1、0.2、0.3、0.4 の 4 種類としその感度分析を行う.

以上より、供用開始年から年破壊確率を算定したグラフのうち、確率変数として正規分布を仮定した場合を図 4.3.1、および図 4.3.2 に、対数正規分布を仮定した場合を図 4.4.1、および図 4.4.2 に示す.

4.3 LCC の算定

本節では、LCCの算定を 2.5 で述べた方法により行う. グラウンドアンカー斜面における LCC 算定期間は、ケース 1 は 24 年、ケース 2 は 64 年とする.これは、図 4.2 の回帰曲線の値が 0 となる年次である. 表 4.1 の損失額、および補修費と4.2 で算定した年破壊確率を用いて LCC 算定を行う. 補修年をパラメータとした正規分布の場合の LCC を図 4.5.1、および図 4.5.2、補修年をパラメータとした対数正規分布の場合の LCC を図 4.6.1、および図 4.6.2 に示す. また、中央安全率の算定結果も併記する. また、図 4.7 に正規分布 (変動係数 0.2)、および対数正規分布 (変動係数 0.2)の場合の LCC の経時変化を示す.

4.4 考察

ケース 1 は劣化率が 0 となる年次が 24 年次であり、最適補修年は、正規分布で 17 年次から 20 年次、対数正規分布で 6 年次から 19 年次であった。ケース 2 は劣化率が 0 となる年次が 64 年次であり、最適補修年は、正規分布で 49 年次から 55 年次、対数正規分布で 29 年次から 52 年次であった。正規分布と対数正規分布の比較では、両ケースとも対数正規分布の方が最適補修年が早い。この理由は、吹付けコンクリート斜面において考察した場合と同様に、正規分布における負の部分が無くなった影響より、最頻値がグラウンドアンカー導入力の劣化率が小さい方に移動する寄与が大きいためと考えられる。また、変動係数が大きくなるほど最適補修年が早くなっている。これも、吹付けコンクリート斜面の場合と同様に、平均値が等しく変動係数が大きい、つまり標準偏差のみが大きくなるために性能関数が 0 を下回る時期が早くなり、最適補修年も早くなっていると考えられる。

図 4.7 の LCC の経時変化より,ケース 1 では 20 年次付近から,ケース 2 では 50 年次付近から累積期待損失が増加し始めている.このため,これらの年次以前に補修する場合は,LCC において補修費が支配的となる. それらの年次後は,急速に累積期待損失が増加するため,累積期待損失の増加が補修費の割り戻しの寄与より大きくなる.以上により,累積期待損失が増加し始める直前が最適補修年次になったと考えられる.

累積期待損失の増加が始まる時期は、年破壊確率が上がり始めた頃であり、この年破壊確率の増加傾向はグラウンドアンカーの性能低下曲線の挙動と酷似しており、急速な増加が見られる。これは、性能低下曲線を指数近似したことによるものと考えられる。吹付けコンクリート斜面の場合も粘着力を指数近似していたが、風化帯厚さの変化の影響より、様々な年破壊確率の挙動が見られた。一方、グラウンドアンカー斜面はグラウンドアンカー導入力のみが時間的に変化するため、その劣化曲線の指数近似の影響が年破壊確率に大きく作用し、増加し始めると短期間に急激に増加する結果となっていると考えられる。

次に、ケース 1、およびケース 2の LCC 金額に着目する. 図 4.5、および図 4.6 よりケース 1の LCC 金額の方が大きく、両者でかなりの隔たりがある. 両者の年破壊確率の挙動が類似しているにもかかわらず、このような結果が得られているのは社会的割引率の影響であると考えられる. 両者の年破壊確率の挙動自体は類似しているが、増加が始まる時期はケース 2の方が遅い. 遅くに破壊確率が増加し始めても、社会的割引率で割り戻される割合も大きくなるため、LCC 算定上は影響が小さくなる. さらに、補修費も遅くに補修するほど、割り戻しにより小さく算定される. ケース 2 は以上の理由で、補修費、および累積期待損失の両者が小さくなるため LCC の金額も小さくなったものと考えられる.

第5章 まとめと結論

5.1 まとめと結論

本研究で提案したモデル化により、これまで報告が数少ない吹付けコンクリート斜面、およびグラウンドアンカー斜面の性能低下過程の評価、および将来予測を行う一つの方法を示すことが可能となった.性能低下過程のモデル化の際に、性能低下の要因となっている粘着力、およびグラウンドアンカー導入力の性能低下の不確実性を考慮し、これらを確率変数として扱ったことが重要な点である.以上より、将来予測において、ある範囲を有する予測を行うことが可能となった.性能低下過程のモデル化を確立したことで経済性という観点から LCC を用い、斜面の維持補修計画を求めることが可能となった.

本モデル化は、既往の研究と比較して原理が簡単であるために、算定結果である最適補修年を完全に信頼するほどの精度ではないが、本モデルにより、安全率のみで維持補修計画を検討することの非効率性を示すことが可能となった。また、同時期の最適補修年次が得られている斜面同士の優先順位付けとして、LCCの金額に着目することで順位付けが可能であることを示した。グラウンドアンカー斜面は、調査数の関係から事例検証が少ないが、本モデル化により LCC を用いた評価が可能であることが示されたので、今後の調査により体系的な維持補修計画を立てることが可能になると思われる。

以上より、本研究では、公共においての顧客である国民に対しての説明責任を果たす方法の1つとしても位置づけられるであろう斜面に対する維持補修計画立案がLCCにより可能であることを示すことができた. 5.2 で述べるように、解決すべき課題は存在するが、本モデルの提案をしたことにより、斜面アセットマネジメントのさらなる研究を喚起するものと考えている.

5.2 今後の課題

本節では、吹付けコンクリート斜面、およびグラウンドアンカー斜面のモデル 化における今後の課題を述べる.

吹付けコンクリート斜面のモデル化では、表層崩壊モデルを適用しているが、 風化帯厚さが非常に大きい地点に対して、表層崩壊を仮定してよいかという課題 がある. また, 実際のすべりは直線すべりに近いものの, のり尻部で崩壊面が表面に現れる, すなわち半径の非常に大きな円弧すべりのような崩壊形態となっている. つまり, 表層崩壊モデルを適用することは多少危険側に算定することになり, 崩壊形態の取り扱いの検討も重要である.

また、LCCによる評価を行う際の損失額、および補修費は社会的割引率の寄与を除けば、年次によらず一定値として扱っている.しかし、風化帯厚さによって崩壊時の損失額、および補修費が変動すると考えられる.本研究ではこれらの影響を考慮できていないため、今後は年次によってこれらの値を変化させることで、さらに的確なモデル化が行えると考える.

グラウンドアンカー斜面のモデル化では、性能低下曲線を求めグラウンドアンカーの導入力を求めた.斜面に設置されているグラウンドアンカーの本数は普通複数本であるが、その全てのグラウンドアンカーが必ずしも同じ性能低下曲線に基づき劣化するとは限らない.しかし現状では、アンカーごとに性能低下曲線を求めることは調査数の関係からも難しいと考えられる.そこで、グラウンドアンカーごとに変動係数を個別に設定することで、それぞれの違いを表現できるものと考えられる.

両方のモデル化にいえることであるが、変動係数をどの値に設定するかにより 算定結果に大きな差異が見られることがあるが、本研究ではその明確な指標は提 案できていないため、今後斜面により変動係数を設定する体系的な方法が必要で あると考える.

さらに、吹付けコンクリート斜面では速度検層、グラウンドアンカー斜面では 引抜荷重の測定が主な測定項目であるが、これらの調査数、および調査精度は、 さらに高い精度でモデル化するために今後も検討を加える必要がある.

以上のように、いくつか課題はあるものの、本研究で行った LCC 評価により維持補修計画に対する 1 つの判断指標が提案できたものと考える.

参考文献

- 1) 大津宏康: アセットマネジメント概論 (2), サマースクール 2007「建設マネジメントを考える」, pp.37-42, 2007.
- 2) 大津宏康, N. SUPAWIWAT, 松山裕幸, 高橋健二: 地下水排除工の性能低下を 考慮した斜面アセットマネジメントに関する研究, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.155-169, 2005.
- 3) 大津宏康,松山裕幸, N. SUPAWIWAT,高橋健二:斜面対策工の性能低下過程の不確実性を考慮したLCC評価,土木学会論文集 F, Vol. 62, No.2, pp. 405-418, 2006.
- 4) 松山裕幸,山本高司,田上雅彦,川久保昌平:吹付けコンクリートの安定性 と劣化状況,土木学会論文集 F, Vol.62, No.3, pp.445-458, 2006.
- 5) 大津宏康, 赤木舞, 松山裕幸, 大谷芳輝: 吹付けコンクリート斜面の維持補修費評価に関する研究, 建設マネジメント研究論文集, 土木学会, Vol.13, pp.301-314, 2006.
- 6) 日本道路公団試験研究所:切土のり面構造物の維持補修計画の精度向上に関する検討,2005.
- 7) 応用地質学会, 岩盤分類, 応用地質特別号, pp.105.
- 8) 日本道路公団, 設計要領第二集, 第 6 編橋梁下部構造·仮設構造物, pp.6-117,1998.
- 9) Ang,A.H. and Tang,W.H., 著,伊藤學,亀田弘行,黒田勝彦,藤野陽三,共訳: 土木・建築のための確率・統計の応用,丸善,pp.357-467,1988.
- 10) 日本道路公団試験研究所土工研究室:切土のり面保護工の安定度評価手法に 関する検討,pp.17,2004.
- 11) 土質工学会編: 岩の調査と試験, 第 47章 超音波速度試験, pp.388-395, 1988.

コロ 発 糖 糖

本研究に取り組むにあたって数多くの方にご指導,また生活面でもお世話をして頂いたことで,大学生活で最も充実した1年を過ごすことができました.

京都大学大学院工学研究科教授大津宏康先生には、自分で考え自分で組み立てていく研究に慣れておらずとまどいがちな筆者に対して、厳しくも温かいご指導をして頂きまして、筆者なりに成長することができました.心から感謝しております.

京都大学大学院地球環境学堂准教授勝見武先生には、本研究の副査として、お忙しい中筆者の拙い論文を読んで頂き、細部にわたり的確な助言をして下さいましたことに、深く感謝致します.

京都大学大学院工学研究科准教授塩谷智基先生には、書き慣れていない筆者の 論文を根気強く見て頂きましたことで、文章を書く力がつき、初めての論文を無 事書き上げることができました.心からお礼申し上げます.

京都大学大学院工学研究科助教稲積真哉先生には、研究面でも様々な助言をして頂き、生活面におきましても不自由なく研究が行える環境を作っていただきましたことに感謝致します.

また、水文技術コンサルタント株式会社高橋健二氏、日本道路公団試験研究所の皆様には、お忙しい中貴重な資料を数多く提供して頂きましたことに、心からお礼申し上げます.

北村瑞絵秘書,大津研究室の諸先輩,ならびに同回生の方々のおかげで,充実した研究生活を送ることができました。大変感謝致します。

最後になりましたが、研究のみならず不自由なく勉強ができるという素晴らしい環境を与えて下さり、自分をここまで育ててくれた家族に深く感謝致します.

表3.1 各地点の基本データ

地点名	スライド の有無	年次	崩壊面傾 斜角 α(度)	土の単位 体積重量 ½(kN/m³)	内部摩 擦角	地質	健全度 判定	予測スラ イド発生 年
A	あり	14	48.0	16.00	20	新第三紀	1	12
В	あり	17	39.8	28.95	20	中生代	ı	3
С	あり	27	51.3	24.68	20	中生代	ı	9
D	あり	18	33.7	25.33	20	中生代	ı	16
Е	なし	32	39.8	17.10	20	新第三紀	b	46
F	なし	31	45.0	21.75	20	新第三紀	С	75
G	なし	29	45.0	25.71	20	中生代	С	50
Н	なし	27	51.0	26.95	20	中生代	d	101
I	なし	32	42.3	21.36	20	新第三紀	c	45

表3.2 吹付けコンクリート各種変状の進行と要求性能低下に対する考え方

┫	産全度ランク	₽	S	q	ផ	特a
	スライド現象			のり夏水平クラックの発生 Puのひび割れ・寳形	のリ肩水平クラックの進度(関ロ・植生) PUの部分領域	のリア部地山野出 のリ尻部攻付ナ座医破壊 PUの連続破壊
	青			のり肩部における洗着・洗出。 吹付けコンクリート背面の中性化 開始	背面空洞の発生 吹付にコンクリート背面の中性化造行	空洞の面積・厚き拡大 吹付けの部分崩壊による地山の霧出
東状の	各種りラック		ヘアークラック 関ロ値D5 mm程度 選集石灰で網想したクラック	関ロ値>-3 mm シール板の劣化 雑草の生長	関ロ幅4~5 mm以上 複数クラック・目地の交差によるブロック 化 樹木の生具	
循版	本		波撃石灰をともなうひび割か、 厚さ数 rim程度のスケーリング	まだら状の表面は〈亀の発生	貝殻状スケーリングの全面発達	ラス・鉄筋に達するはく等
- 被位	主撃工事・第目		目地沿いのひび割れの発生	うき・はく馬の連続 建草の生育	樹木生長による吹付けコンクリートの破 横系の侵入による地山真化の促進	
	小段都		第異・はく落片の堆積 雑草の生育	樹木の生長 湿潤状況の発生(排水機能の低 下)		
	水抜き孔		水抜き孔からの常時温水	中華の後十	樹木の生長による排水機能喪失	
	上茶			凸部周辺のひび割れの発生	ひび割木の側口価進展	凸部を囲むひび割れの連結 吹付け表面の部分的はく等
	要求性能		満たす _{日常点検} メンテナンス		不足モニタリング詳細調査・設計	◆──猫たさない ── 緊急性対策

表3.3 既崩壊地点の崩壊時中央安全率

地点名	スライド発生年	中央安全率
A	14	0.68
В	17	0.64
С	27	0.74
D	18	0.89

表3.4 各地点の粘着力推定に必要な諸値の 算定結果

地点名	一軸圧縮強度	超音波伝播速度	初期粘着力
	(kgf/cm ²)	V _{p0} (km/s)	$c_0(kgf/cm^2)$
A	7.50	1.26	1.55
В	18.00	4.11	3.45
С	27.00	3.10	4.99
D	39.40	3.05	7.05
Е	30.60	2.08	5.60
F	58.10	2.25	10.06
G	46.60	2.70	8.22
Н	103.00	5.07	16.98
Ι	15.50	2.26	3.00

表3.5 粘着力の算定結果

地点A

調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
1	1.462
3	0.414
9	0.155
14	0.113

地点B

調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
4	0.139
6	0.193
17	0.148

地点C

調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
0	0.470
1	0.413
3	0.292
9	0.168
27	0.199

地点D

調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
5	0.263
8	0.282
13	0.229
18	0.255

地点E

- 5/11/2	
調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
6	2.287
10	3.102
14	0.213
32	0.429

地点F

調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
5	2.788
7	0.576
13	0.402
31	0.723

地点G

調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
3	4.945
5	18.970
11	0.346
16	0.346
29	2.482

地点H

調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
1	0.587
2	0.718
4	0.718
9	0.531
14	0.490
27	0.579

地点I

調査年次	粘着力
(年)	(kgf/cm ²)
6	0.816
8	0.508
14	0.171
19	0.232
32	0.298

表3.6 各地点の崩壊時の損失額および補修費

地上夕	損失額	補修費
地点名	(億円)	(億円)
A	4.0	11.0
В	12.1	35.2
С	10.2	30.3
D	2.0	5.9
Е	6.2	18.7
F	4.8	13.7
G	3.2	11.9
Н	9.4	28.1
I	4.4	11.6

表3.7 各地点のLCC算定まとめ

地点名	崩壊年/最 新調査年 次		最適補修4	最適補修年(正規分布)		幾何ブラウン運 動過程	中央安全率=1.1	予測スライド発生年
	(年次)	Cov=0.2	Cov=0.3	Cov=0.4	Cov=0.5	(年次)	(年次)	(年次)
٧	14	3	2	2	11		11	12
В	17	1	1	1	1		2	3
0	27	9	4	3	ε		8	6
Q	18	13	5	5	5		14	16
3	32	43	43	43	43	42	43	46
Ь	31	20	20	50	20	65	68	75
В	29	15	47	47	47	43	47	50
н	27	50	50	50	50	77	83	101
I	32	39	39	39	39	42	39	45

地点名	崩壊年/最新調査年		最適補修年(次	適補修年(対数正規分布)		中央安全率=1.1	予測スライド発生年
		Cov=0.2	Cov=0.3	Cov=0.4	Cov=0.5	(年次)	(年次)
٧	14	3	11	11	11	11	12
В	17	1	1	2	2	2	8
С	27	4	3	3	3	8	6
D	18	5	5	5	5	14	16
Е	32	21	10	10	43	43	46
Ь	31	50	50	5	5	89	75
G	29	23	47	47	47	47	20
Н	27	20	4	4	4	83	101
I	32	39	4	3	3	39	45

表 $3.8~d_2/d_1$ のまとめ

地点名	${f d_1/f d_2}$
地点C	2.57
地点D	2.04
地点E	1.87
地点G	1.81

表3.9 既崩壊地点スライド発生時累積確率 (正規分布, COV=0.2)

地点名	累積確率
А	0.64
В	1.00
С	0.91
D	0.88

表4.1 地山、およびグラウンドアンカーの基本データ

土の粘着 力	内部摩擦 角	土の単位体積 重量	水の単位体積 重量	スライスの分割数	損失額	補修費
(kN/m^2)	(度)	(kN/m ³)	(kN/m^3)		(億円)	(億円)
35	25	20	10	30	1.76	9.85

マ ン.十 平口	斜面にお	ける位置	アンカーの傾角	アンカーの初期道入力
アンカー番号	x座標	y座標	(度)	(kN)
1	12.8	5.0	-20	114
2	16.7	8.3	-20	114
3	18.6	10.8	-20	91
4	20.4	13.0	-20	91
5	24.6	15.6	-20	91
6	26.7	17.8	-20	91
7	28.7	20.0	-20	91
8	33.6	23.0	-20	91
9	36.4	25.7	-20	91

表4.2 地点a, bにおける引抜荷重の測定結果 および性能率の算定結果

地点a

経過年	10		
アンカー番号	設計アンカーカ	有効緊張力	性能率κ
	(kN)	(kN)	(%)
1	367.7	475.0	129.18%
2	367.7	275.0	74.79%
3	367.7	350.0	95.19%
4	367.7	250.0	67.99%
5	286.2	270.0	94.34%
平均值		324.0	92.30%

地点b

ᄵᅑᄓᇛᄼᅮ	20		
経過年	20		
アンカー番号	設計アンカーカ	引抜荷重	性能率κ
	(kN)	(kN)	(%)
1	185.0	166.5	90.00%
2	185.0	185.0	100.00%
3	185.0	18.5	10.00%
4	185.0	37.0	20.00%
5	185.0	0.0	0.00%
6	185.0	55.5	30.00%
7	185.0	0.0	0.00%
8	185.0	166.5	90.00%
平均值		78.6	42.50%

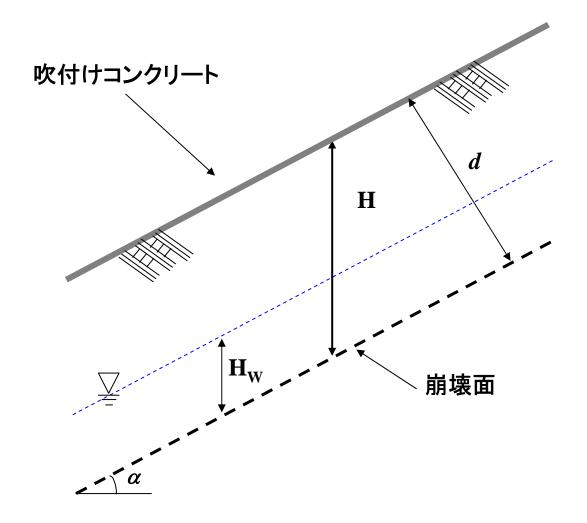


図2.1 表層崩壊モデル概念図

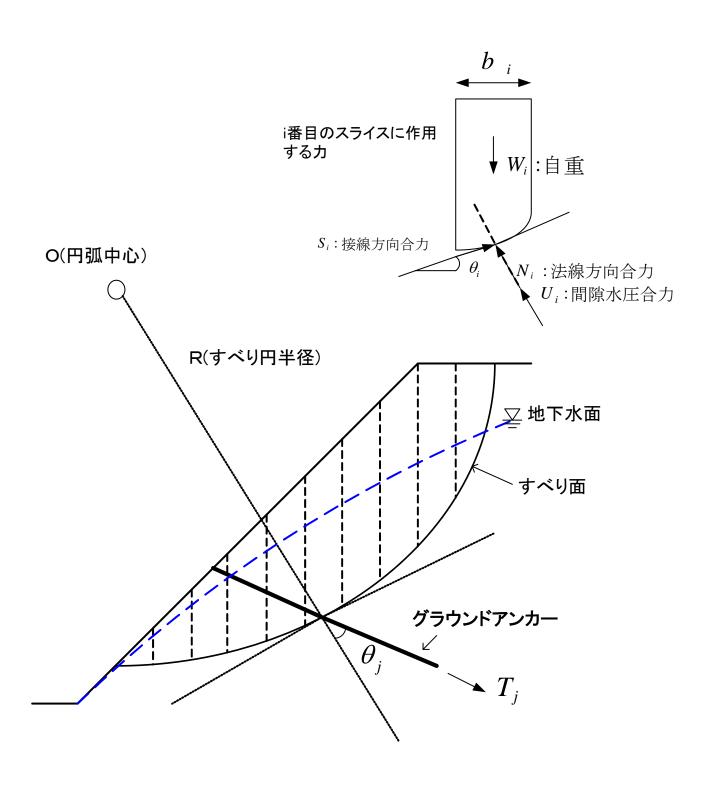


図2.2 円弧すべりモデル概念図

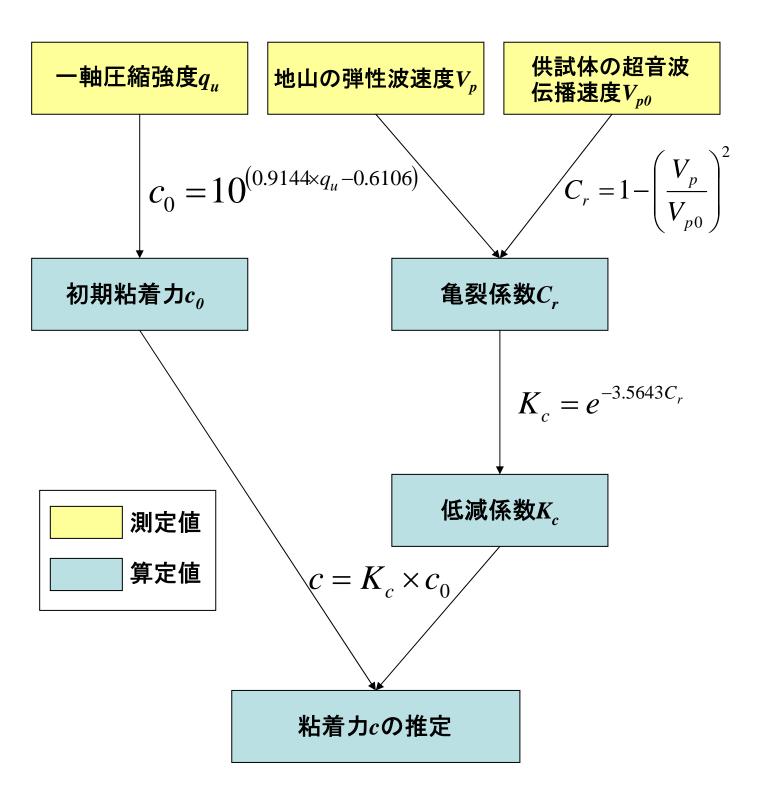


図2.3 粘着力算定のフローチャート

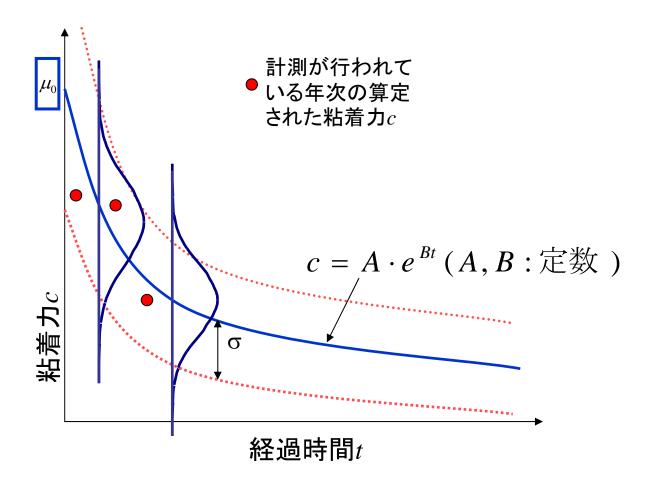


図2.4 粘着力低下の回帰曲線の設定概念図 (正規分布の場合)

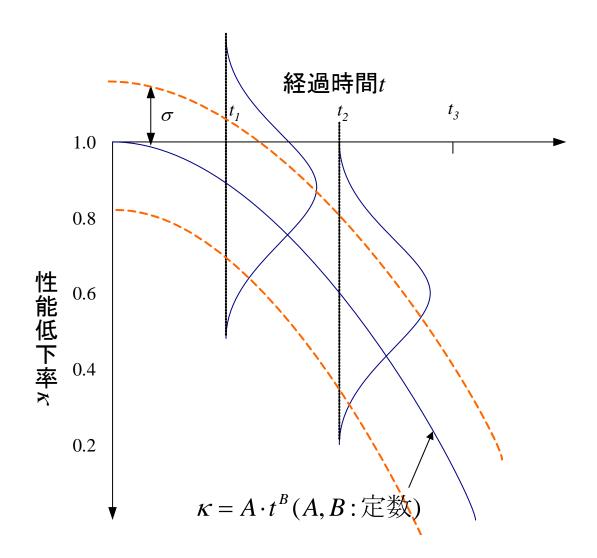


図2.5 グラウンドアンカー導入力の性能率の回帰曲線の設定概念図 (正規分布の場合)

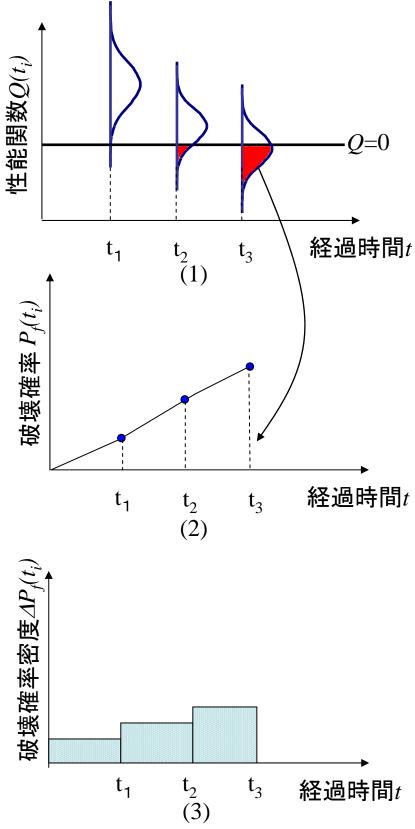


図2.6 確率変数が正規分布である場合の年破壊確率 算定方法

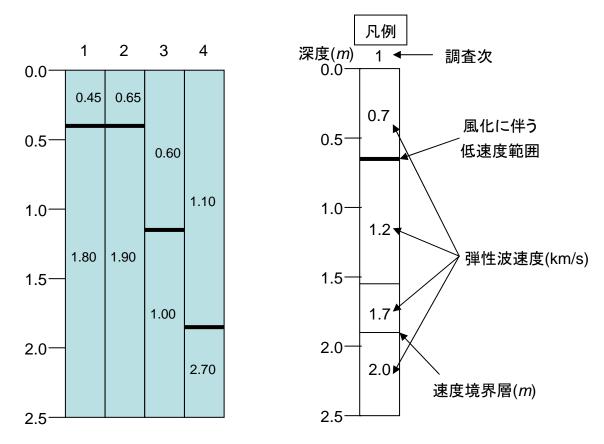


図3.1 風化帯厚さの設定概念図

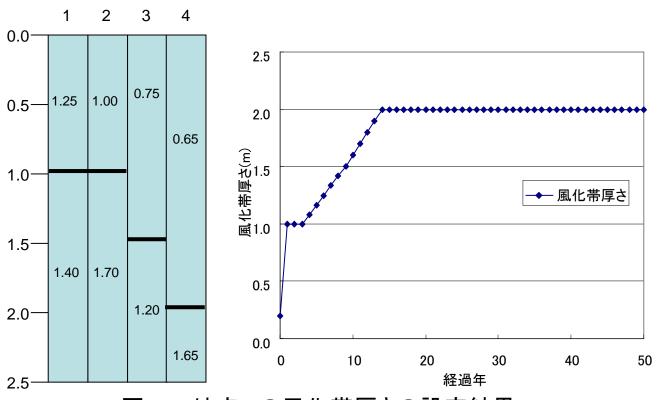
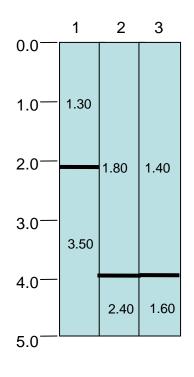


図3.2a 地点Aの風化帯厚さの設定結果



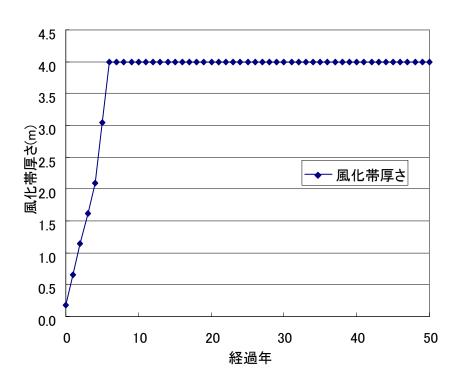


図3.2b 地点Bの風化帯厚さの設定結果

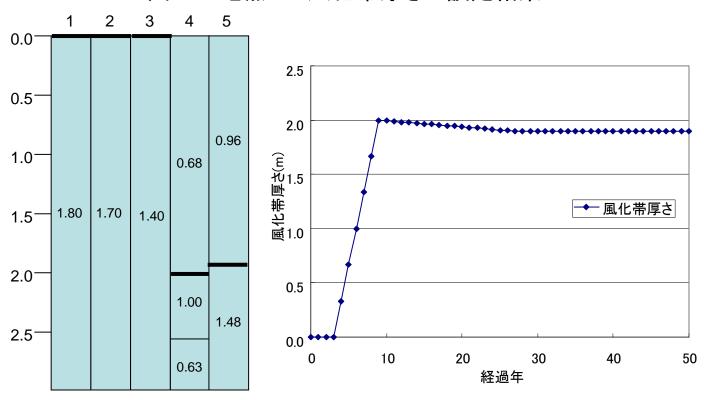


図3.2c 地点Cの風化帯厚さの設定結果

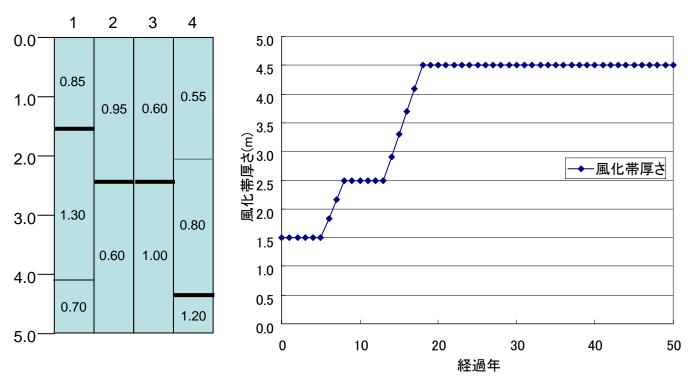


図3.2d 地点Dの風化帯厚さの設定結果

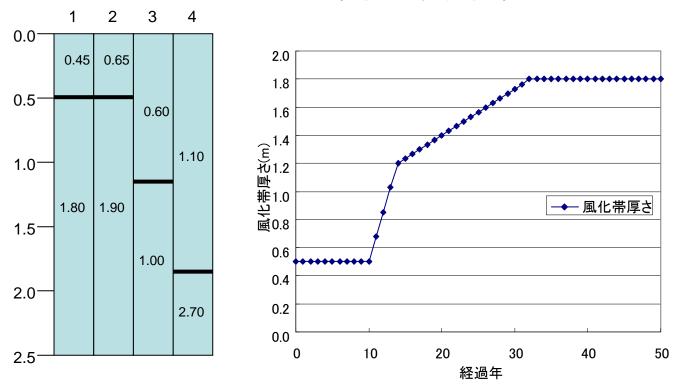


図3.2e 地点Eの風化帯厚さの設定結果

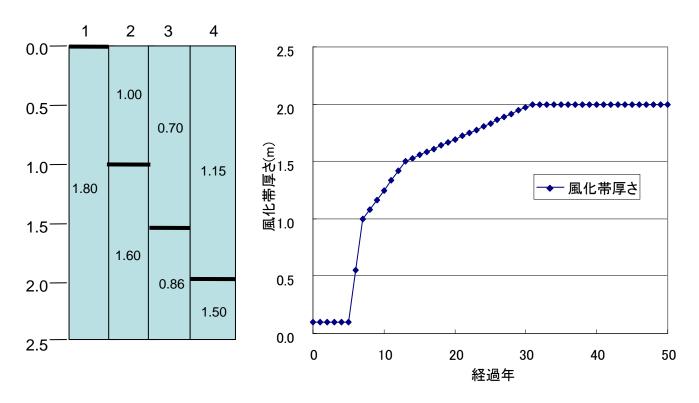


図3.2f 地点Fの風化帯厚さの設定結果

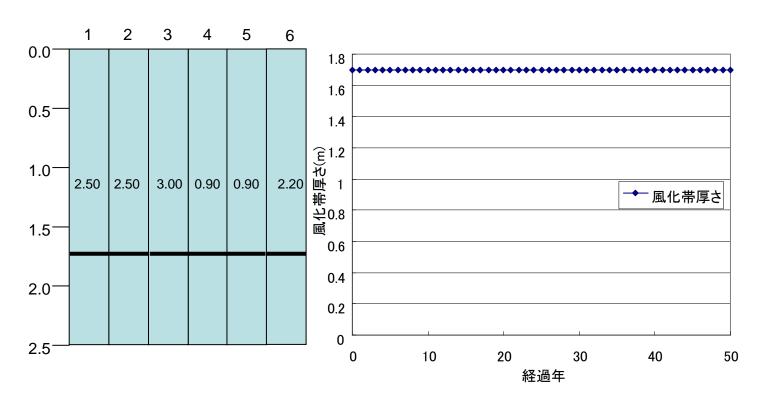


図3.2g 地点Gの風化帯厚さの設定結果

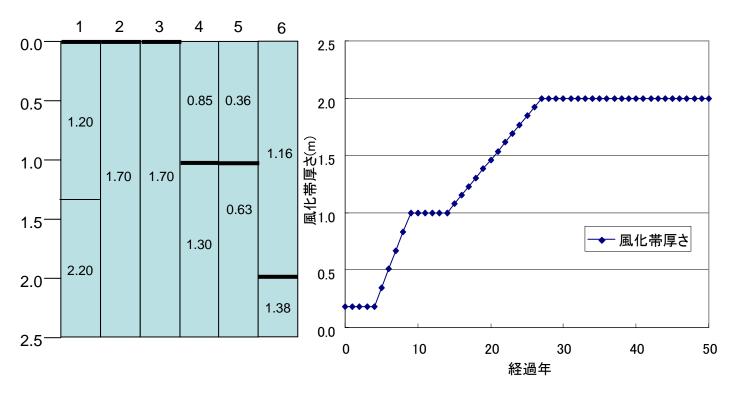


図3.2h 地点Hの風化帯厚さの設定結果

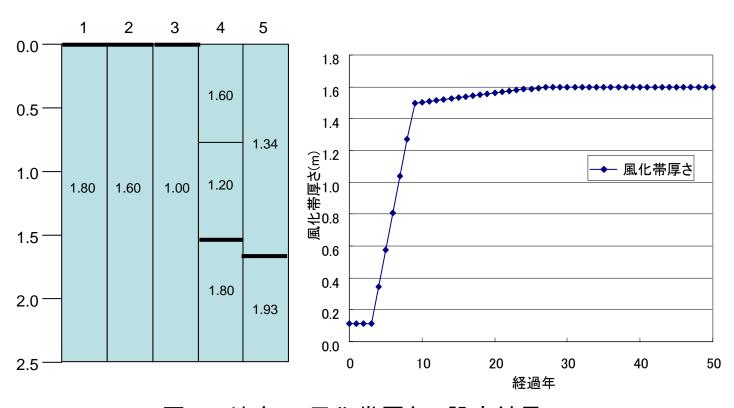


図3.2i 地点Iの風化帯厚さの設定結果

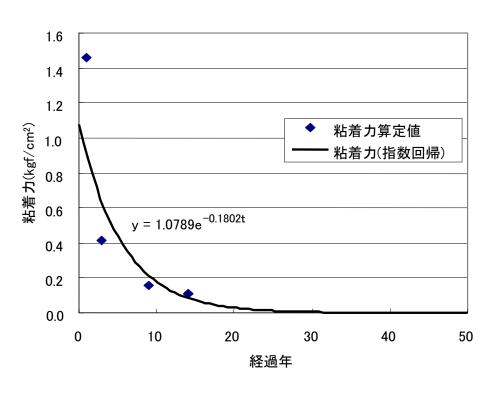


図3.3a 地点Aの粘着力の低下曲線

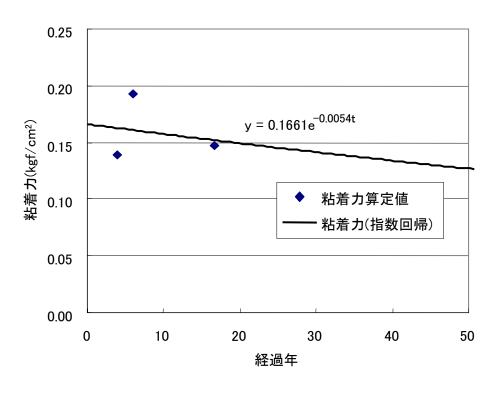


図3.3b 地点Bの粘着力の低下曲線

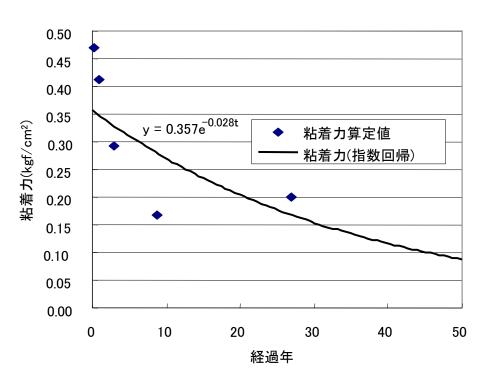


図3.3c 地点Cの粘着力の低下曲線

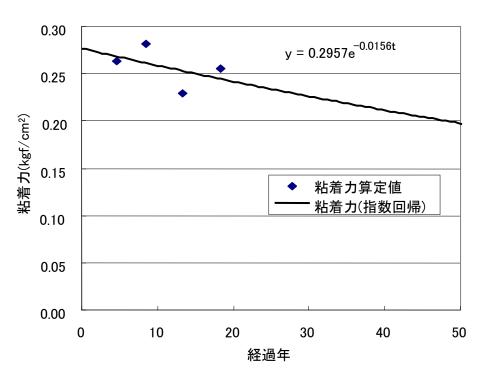


図3.3d 地点Dの粘着力の低下曲線

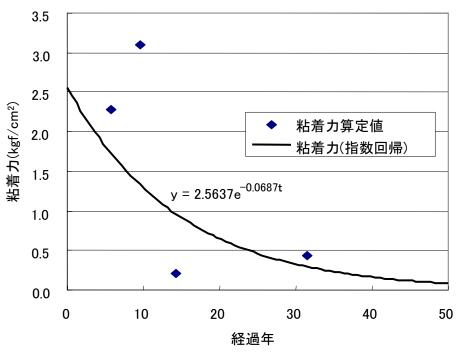


図3.3e 地点Eの粘着力の低下曲線

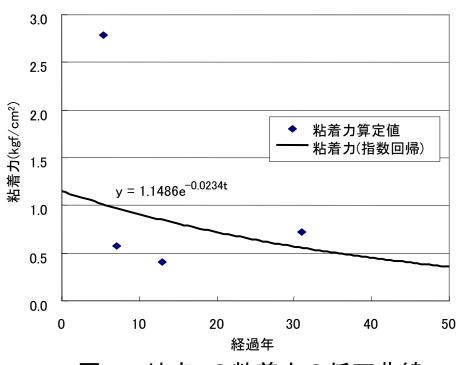


図3.3f 地点Fの粘着力の低下曲線

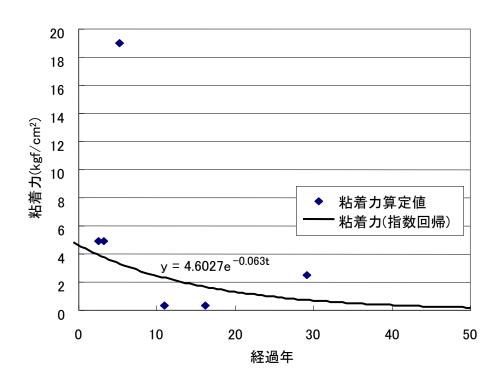


図3.3g 地点Gの粘着力の低下曲線

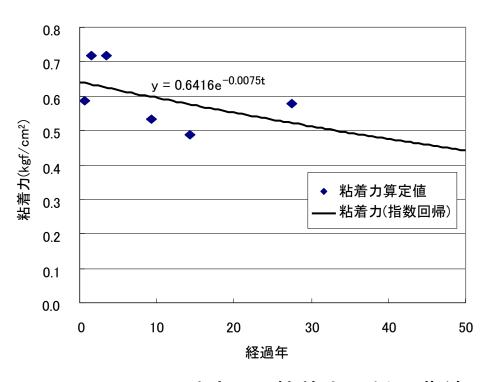


図3.3h 地点Hの粘着力の低下曲線

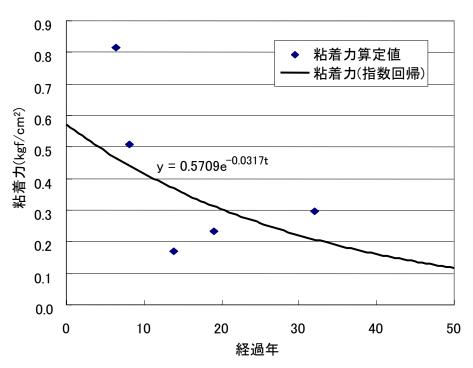


図3.3i 地点Iの粘着力の低下曲線

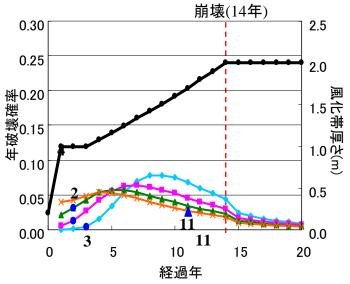


図3.4a 地点Aの年破壊確率

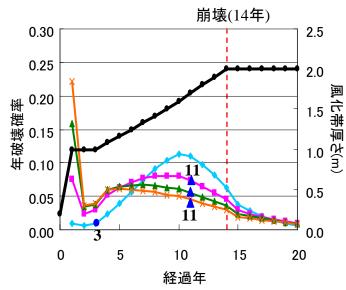


図3.5a 地点Aの年破壊確率 (対数正規分布)

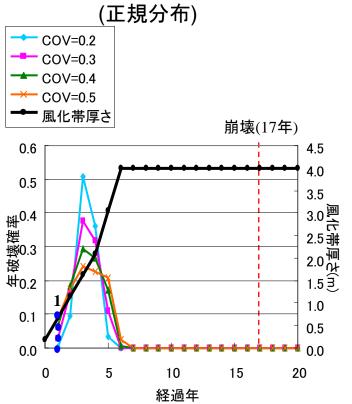


図3.4b 地点Bの年破壊確率 (正規分布)

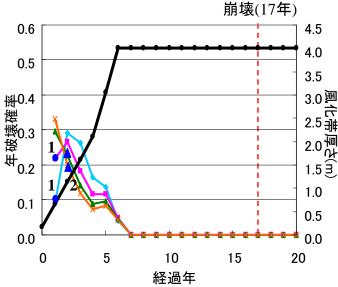


図3.5b 地点Bの年破壊確率 (対数正規分布)

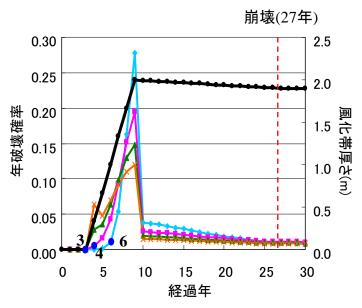


図3.4c 地点Cの年破壊確率

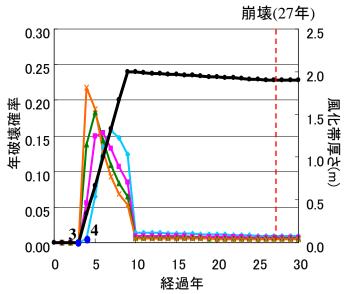
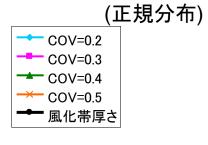


図3.5c 地点Cの年破壊確率 (対数正規分布)



崩壊(18年) 0.25 5.0 4.5 0.20 4.0 年破壊確率 0.15 0.10 3.5 3.5 3.0 供原以(a 2.5 2.0 (a 1.5 🕏 0.05 1.0 13 0.5 0.00 0.0 0 5 10 15 20 経過年

図3.4d 地点Dの年破壊確率 (正規分布)

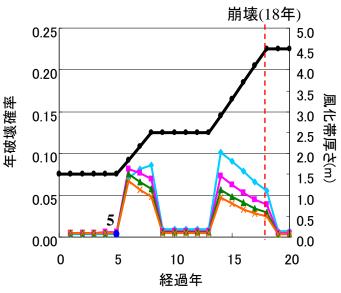


図3.5d 地点Dの年破壊確率 (対数正規分布)

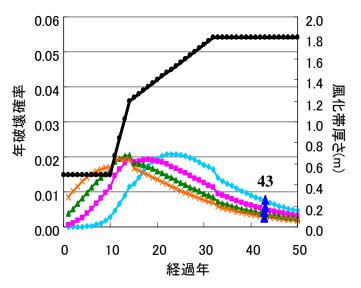
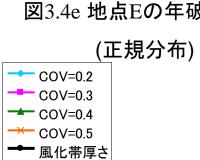


図3.4e 地点Eの年破壊確率



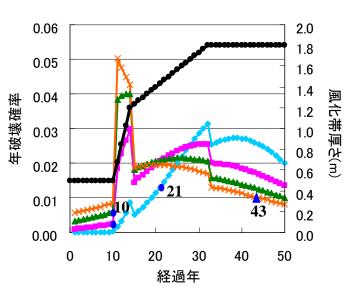


図3.5e 地点Eの年破壊確率 (対数正規分布)

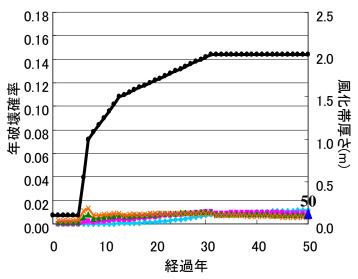


図3.4f 地点Fの年破壊確率 (正規分布)

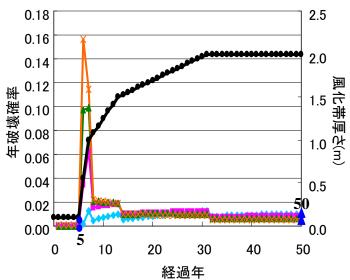


図3.5f 地点Fの年破壊確率 (対数正規分布)

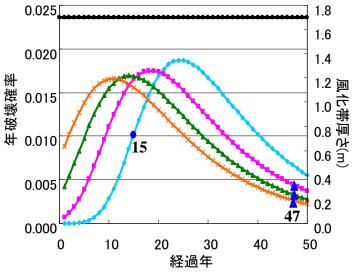


図3.4g 地点Gの年破壊確率

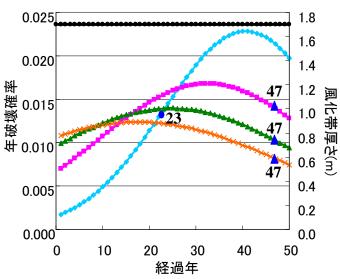
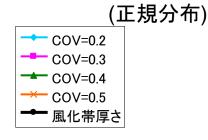


図3.5g 地点Gの年破壊確率 (対数正規分布)



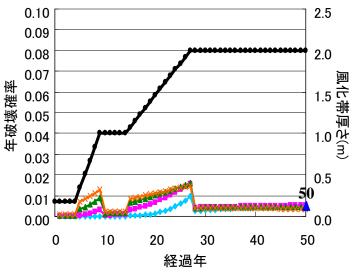


図3.4h 地点Hの年破壊確率 (正規分布)

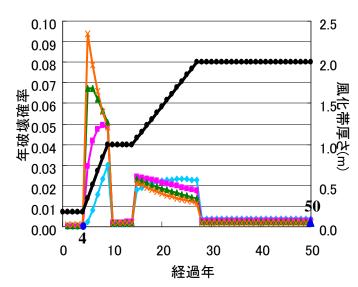


図3.5h 地点Hの年破壊確率 (対数正規分布)

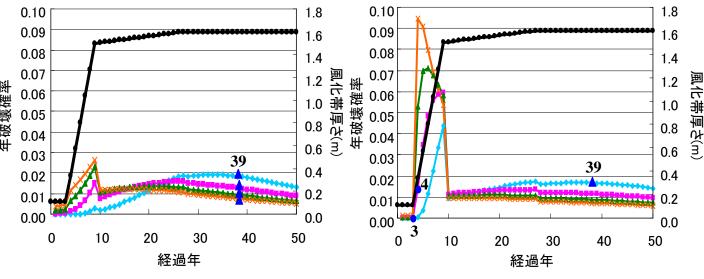
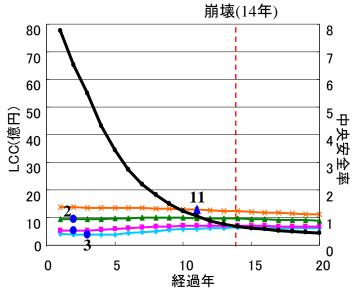


図3.4i 地点Iの年破壊確率

(正規分布)

COV=0.2
COV=0.3
COV=0.4
COV=0.5
風化帯厚さ

図3.5i 地点Iの年破壊確率 (対数正規分布)



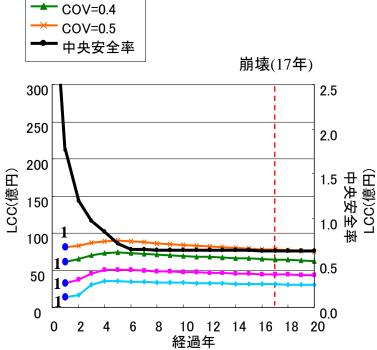
崩壊(14年) LCC(億円) 経過年

図3.6a 地点AのLCC算定結果

(正規分布)

COV=0.2 COV=0.3

図3.7a 地点AのLCC算定結果 (対数正規分布)



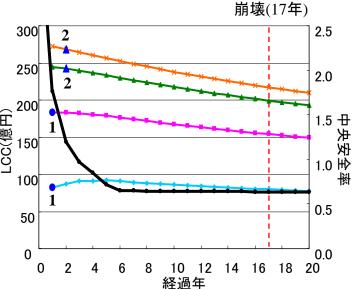
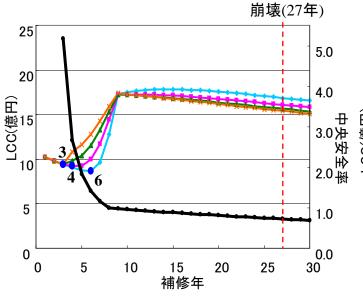


図3.6b 地点BのLCC算定結果 (正規分布)

図3.7b 地点BのLCC算定結果 (対数正規分布)



崩壊(27年) 25 5.0 20 4.0 LCC(億円) 3.0 块 好 全 2.0 率 15 10 5 1.0 0 0.0 5 30 10 15 20 25 補修年

図3.6c 地点CのLCC算定結果

(正規分布) COV=0.2 COV=0.3 COV=0.4 COV=0.5 中央安全率 崩壊(18年) 4.0 2.5 3.5 2.0 3.0 LCC(億円) 2.5 1.5 中 安 1.0 全 1.0 2.0 1.5 13 1.0 0.5 0.5

図3.7c 地点CのLCC算定結果 (対数正規分布)

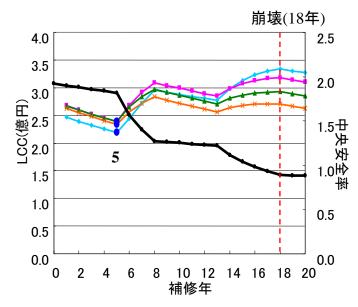


図3.6d 地点DのLCC算定結果 (正規分布)

補修年

6 8

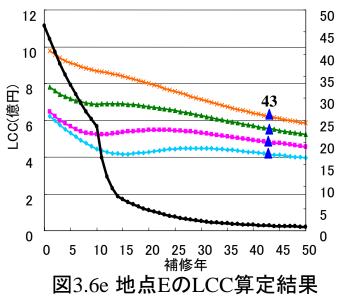
0.0

2

図3.7d 地点DのLCC算定結果 (対数正規分布)

0.0

10 12 14 16 18 20



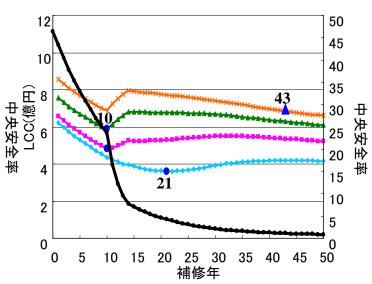
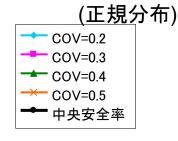


図3.7e 地点EのLCC算定結果 (対数正規分布)



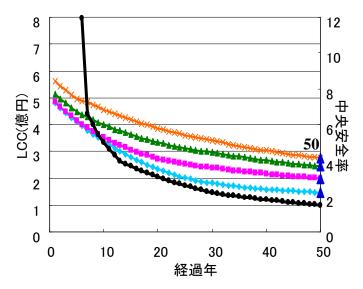


図3.6f 地点FのLCC算定結果 (正規分布)

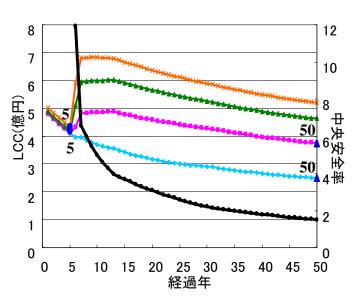


図3.7f 地点FのLCC算定結果 (対数正規分布)

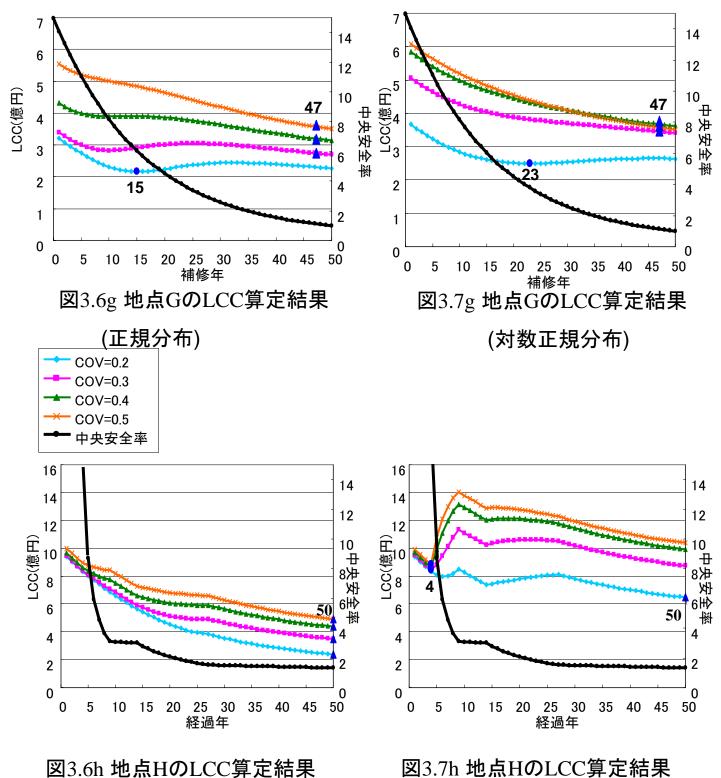
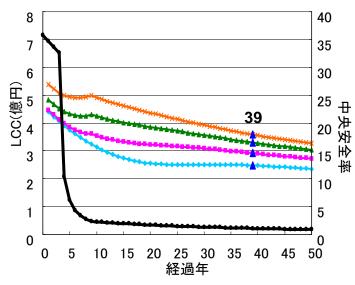


図3.7h 地点HのLCC算定結果 (対数正規分布)

(正規分布)



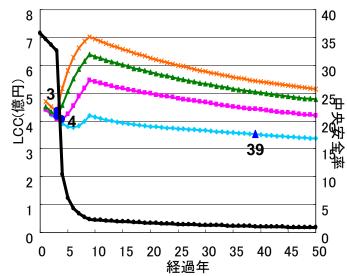


図3.6i 地点IのLCC算定結果

(正規分布)

COV=0.2
COV=0.3
COV=0.4
COV=0.5
中央安全率

図3.7i 地点IのLCC算定結果 (対数正規分布)

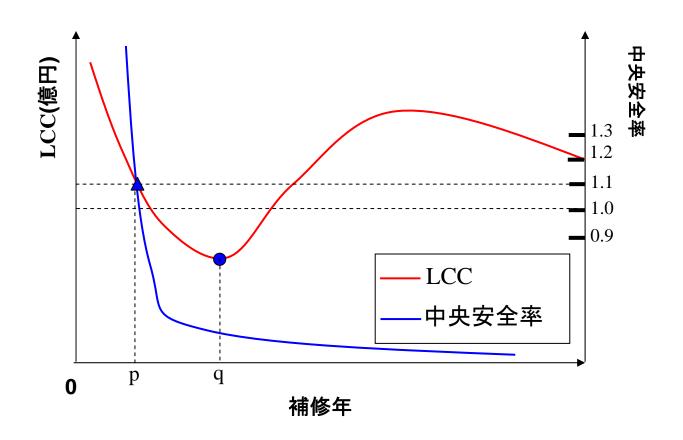


図3.8 LCC算定概念図

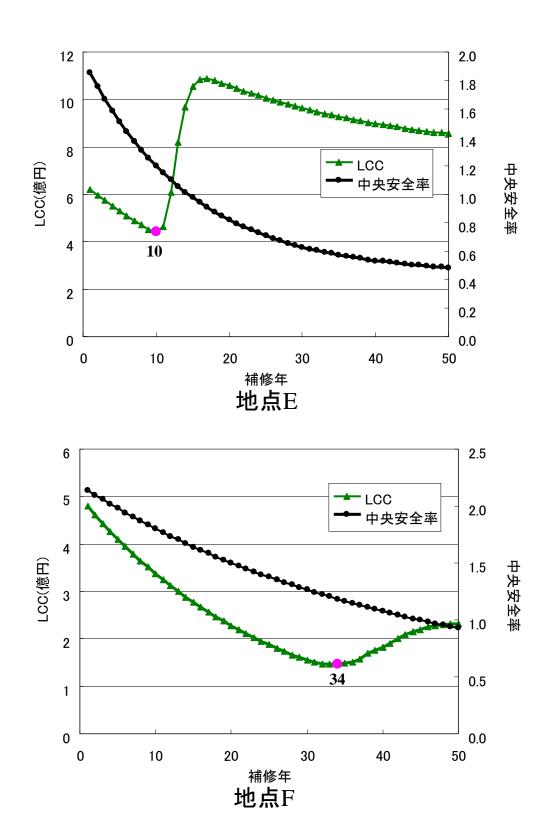


図3.9 幾何ブラウン運動過程を用いたLCC算定結果その1

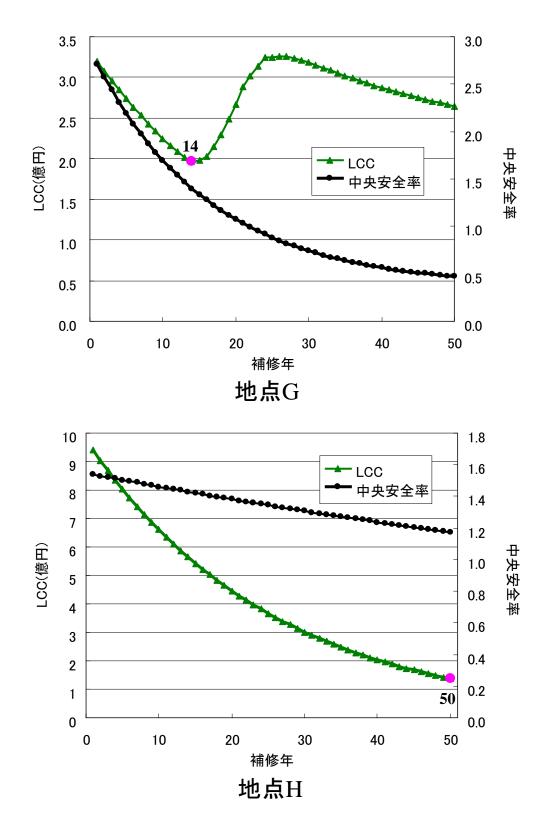


図3.9 幾何ブラウン運動過程を用いたLCC算定結果その2

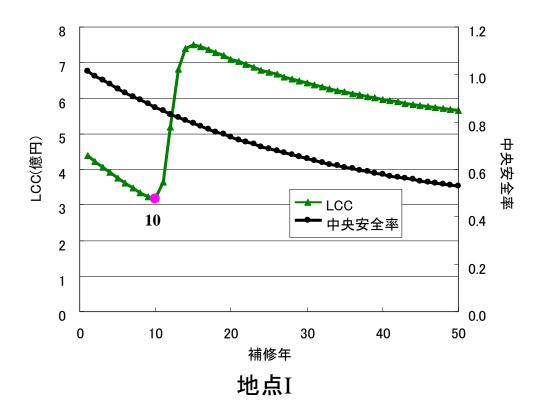
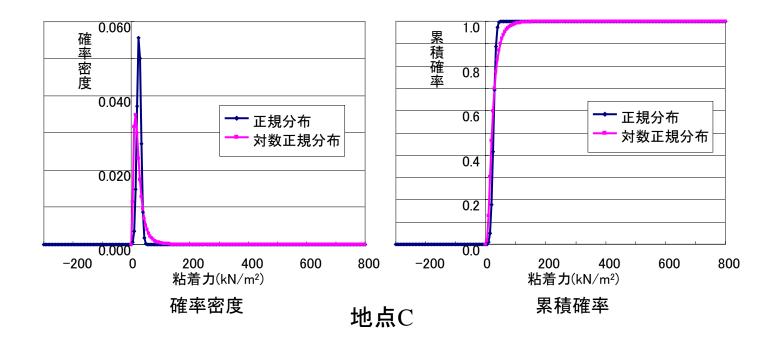
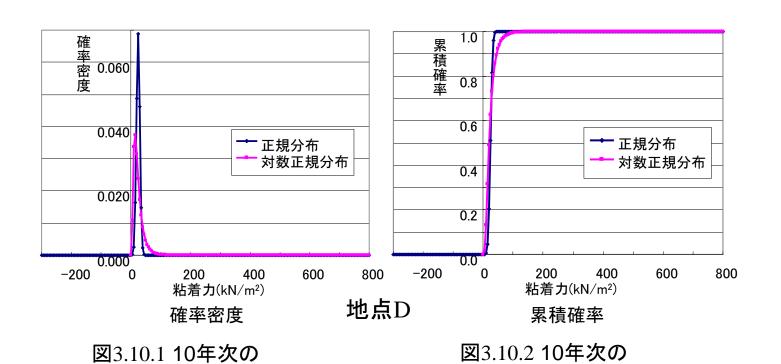


図3.9 幾何ブラウン運動過程を用いたLCC算定結果その3

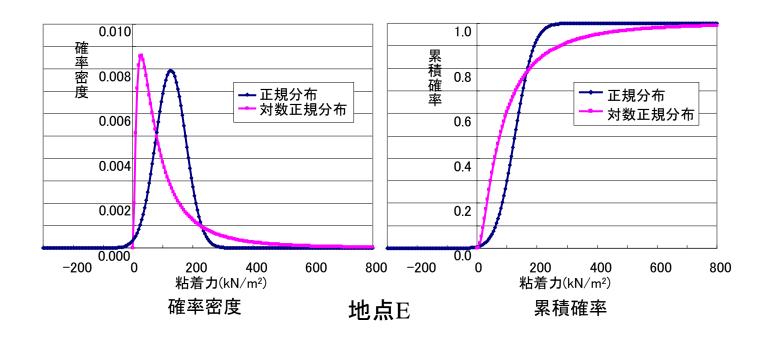


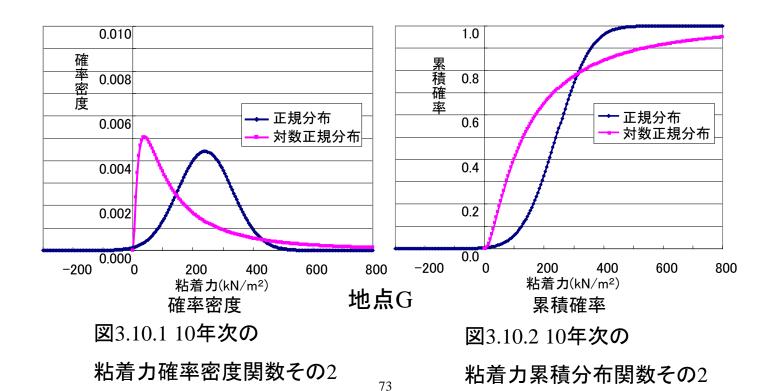


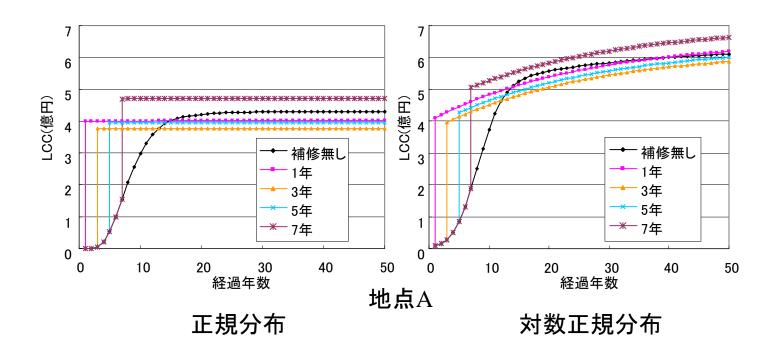
72

粘着力確率密度関数その1

粘着力累積分布関数その1







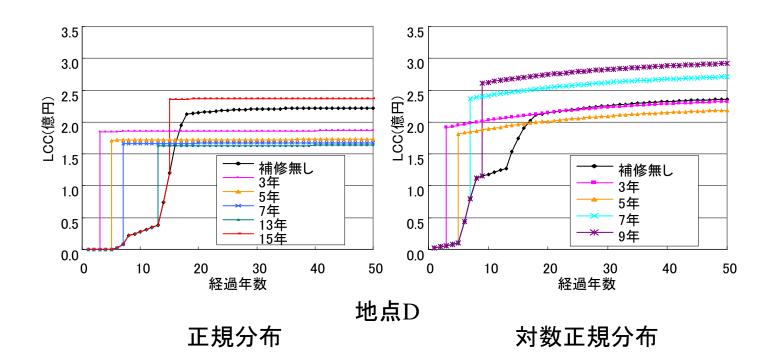


図3.11 LCCの経時変化

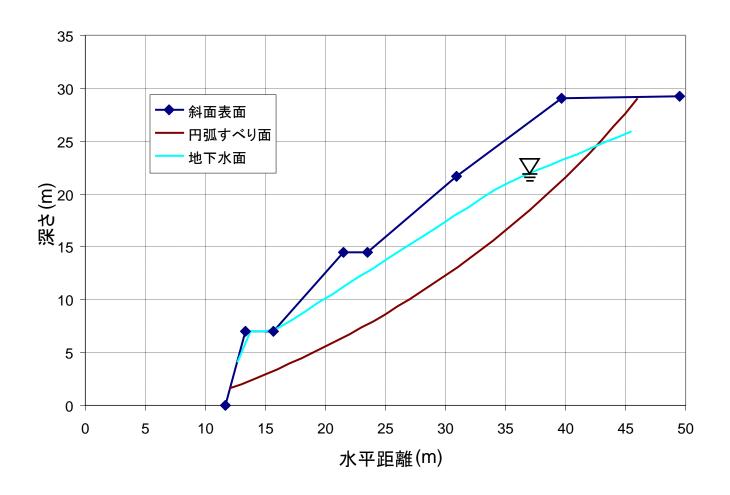


図4.1 グラウンドアンカー斜面の地山形状

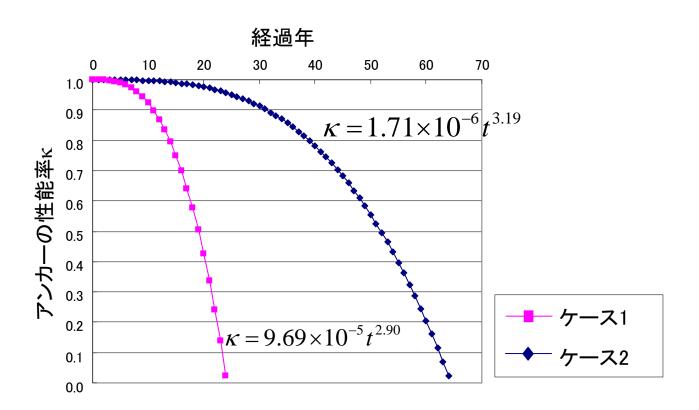


図4.2 グラウンドアンカーの性能低下曲線

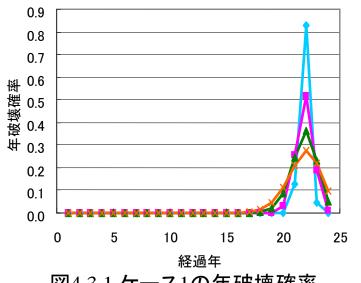


図4.3.1 ケース1の年破壊確率 (正規分布)

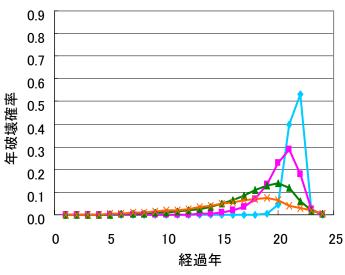
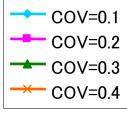


図4.4.1 ケース1の年破壊確率 (対数正規分布)



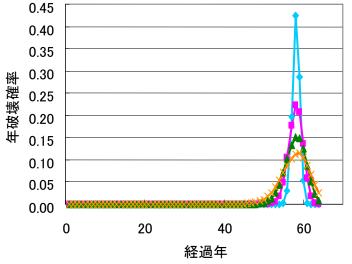


図4.3.2 ケース2の年破壊確率 (正規分布)

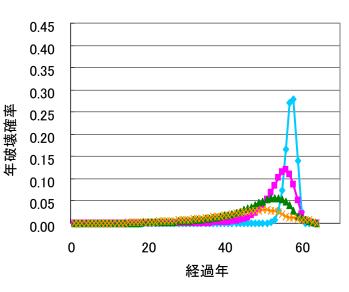


図4.4.2 ケース2の年破壊確率 (対数正規分布)

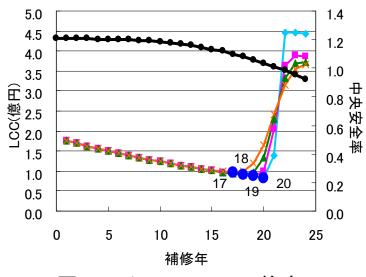


図4.5.1 ケース1のLCC算定 (正規分布)

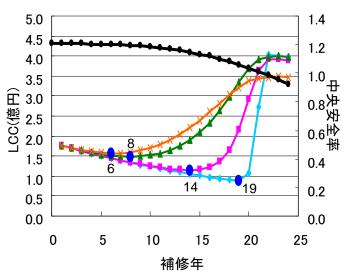


図4.6.1 ケース1のLCC算定 (対数正規分布)

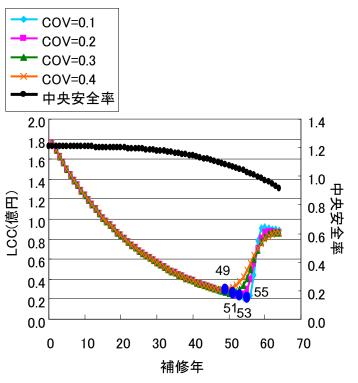


図4.5.2 ケース2のLCC算定 (正規分布)

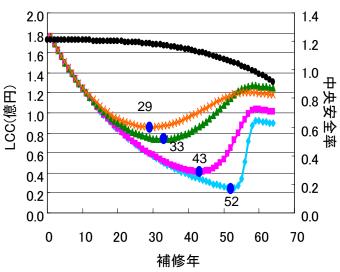
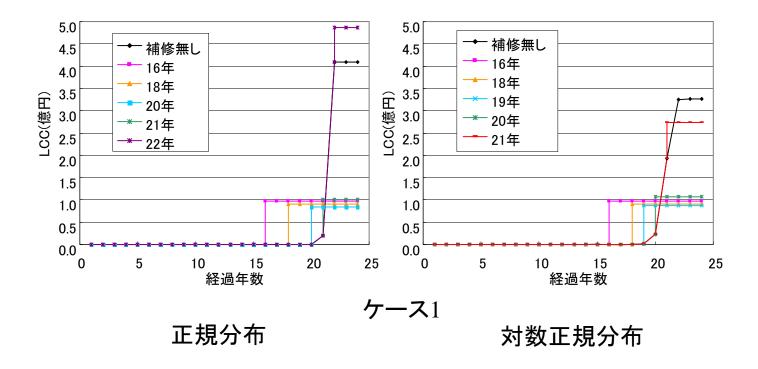


図4.6.2 ケース2のLCC算定 (対数正規分布)



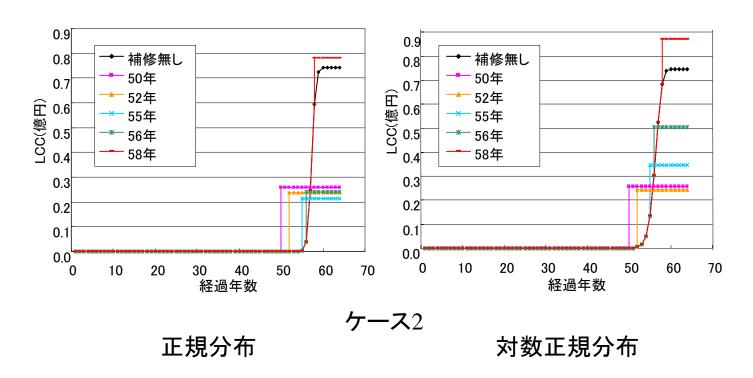


図4.7 LCCの経時変化