

地盤統計学的手法を用いたグラウンドアンカーの
推定残存緊張力を考慮した斜面安定評価に関する研究

平成 26 年 2 月 21 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

白井智也

要旨

我が国の構造物の多くは、戦後の復興期から高度経済成長期にかけて急速かつ大量に整備されてきた。現在、それらの構造物に長期の供用に伴う劣化が顕在化している。これらの構造物の維持管理および補修が必要とされているが、一方で使うことのできる予算は限られている。

本研究の対象構造物であるグラウンドアンカーも同様の問題を抱えている。グラウンドアンカーは斜面の安定化を図る目的で大量に整備されており、その健全性評価のために多くの調査が必要であるが、現在アンカーの健全性調査として主に行われているリフトオフ試験は大規模な試験装置を伴うとともに金銭的成本が大きく、より安価で簡便な調査方法が求められている。

一方、現在アンカー斜面全体の残存緊張力を推定する手法としては、リフトオフ試験結果に対して通常クリギング法を用いる手法が提案されている。しかし、十分な推定結果を得るためにはより多くのアンカー健全性調査が必要であり、全ての入力情報をリフトオフ試験結果を用いて得るとコストが非常に大きくなる。

そこで本研究ではより簡便で安価な手法として提案されている超音波法の残存緊張力推定に対する有効性を検討する。本手法は現在発展途上にあり、室内実験では有効性が示されているが原位置における試験結果にはデータのバラつきが生じている。そのため入力データを確率関数として扱う必要があり、通常クリギング法による推定は不適切である。そこで、本研究ではインディケータクリギング法を用いることでアンカー斜面全体の残存緊張力推定を行う。

本論文のアンカーの健全度評価の検討では性能低下領域から過緊張領域までの5段階評価を行なった上で、その分布について比較検討を行った。さらに、超音波法を考慮した場合であっても問題なく3次元滑り解析が行えることを確認した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	社会的背景	1
1.1.2	技術的背景	2
1.2	研究の目的	3
1.3	既往の研究との関連	3
1.4	本論文の構成	5
第 2 章	原理	6
2.1	リフトオフ試験の概説	6
2.1.1	リフトオフ試験のメカニズム	6
2.1.2	アンカーの健全度評価	7
2.2	超音波法の概説	7
2.3	クリギング手法の概説	8
2.3.1	クリギング法の起源	8
2.3.2	クリギング法の特徴	9
2.3.3	通常クリギング法の概説	11
2.3.4	インディケータクリギング法の概説	13
2.4	3次元すべり解析	15
第 3 章	インディケータクリギング法を用いた残存緊張力の推定	16
3.1	超音波法から算出した緊張力を用いた残存緊張力の推定	16
3.2	アルゴリズム	16
第 4 章	推定残存緊張力の検討	18
4.1	推定残存緊張力の比較	18

4.1.1	解析結果	18
4.1.2	最尤推定残存緊張力の考察	18
4.1.3	フェイズ 1 の考察	19
4.1.4	フェイズ 2 の考察	20
4.1.5	残存緊張力の検討	21
4.1.6	安全面からの検討	22
4.1.7	維持補修計画面からの検討	23
4.2	3次元滑り解析による安全率の算定	24
4.2.1	解析結果	24
4.2.2	考察	24
第 5 章	結論と今後の課題	25
5.1	結論	25
5.2	今後の課題	25
参考文献		27
謝辞		28

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 社会的背景

我が国のインフラ構造物は、高度経済成長期に急速に整備が行われてきた。現在、それらの構造物は長期の供用により劣化が顕在化してきており、補修の必要性が指摘されている場合が多い。また、今後さらに老朽化した構造物が増加して維持管理費用の増加が見込まれる一方で、長期の景気低迷や少子高齢化に伴う公共投資縮減といった厳しい予算制約が課されることが予想される。

道路構造物のうち斜面对策工の一つであるグラウンドアンカー工（以下、アンカーと称す）は、主に 1980 年代以降高速道路において切り取り斜面の補強を目的として大量に整備された。図 1-1¹⁾に示すように現在では打設されているアンカーは十数万本にのぼり、それらのうち半数のアンカーは打設されて 20 年以上が経過している。そのため、アンカーの導入力低下、不十分な補修、また集中豪雨などの自然災害等に起因する経時的劣化が懸念され、アンカーの性能評価が重要となっている。

一方で図 1-2²⁾に示すように我が国の建設投資額は 1990~1996 年をピークとして減少傾向にあり、近年多少の増加はあるが依然として更新期を向かえる構造物の維持管理に充てる事のできる費用は限られている。さらに図 1-3³⁾に示すように 1990 年代をピークに生産年齢人口が減少しており、今後も減少が続くと予想されることから我が国の財政はより厳しい状態が続くと推測される。

このように維持管理が必要な建造物の数が膨大であるにも関わらず、それらに充てる事のできる費用が限られている背景を踏まえると、性能評価に充てる事のできる費用も限られていることがわかる。

しかし、現在アンカーの残存緊張力を直接計測する手法として主流であるリフトオフ試験によるアンカーの健全性調査はコストが大きく、必要となる機材も大規模であるため施工数が限られている。入力データ数が限られていることはアンカー斜面全体の推定に悪影響を及ぼし、残存緊張力の推定結果は不正確になる。

これを解消するためにはより多くの健全性調査が必要であるが、それら全てをリフトオフ試験で行うとコストがさらに増大し、限られた予算をさらに圧迫することに繋がる。そこで、本研究では補完データとしてより簡便で安価な試験法として提案されている超音波法³⁾を導入し、その適用性について検討する。

1.1.2 技術的背景

現在提案されているリフトオフ試験のみによるアンカー斜面の残存緊張力推定手法をフェイズ 1 とすると、本研究で行う超音波法を用いる手法はより広範囲の推定を目指すフェイズ 2 とみなすことができる。概念図を **図 1-4** に示した。

フェイズ 1 ではリフトオフ試験のみを用いており、リフトオフ試験結果は確定値であると仮定していたため通常クリギング法による推定を行った。しかし、フェイズ 2 で補間データとして用いる超音波法には以下に概説する問題があるため通常クリギング法を適用することはできない。

トライボロジーの分野では **式 (1.1)** に従い真実接触面積は垂直荷重と線形関係にあることが知られている。ここで、 A_r は真実接触面積、 W は垂直荷重、 P_m は媒質固有の塑性流動圧力である。この式から超音波法の振幅と垂直荷重は相関関係を示すことが予想され、**図 1-5**⁴⁾ に示すように岩本らの行った室内実験においても超音波法の振幅と緊張力の相関はある程度確認されている。

$$A_r = W / P_m \quad (1.1)$$

しかし、**図 1-6**⁴⁾ に示すように実際に原位置でアンカーに対して超音波法を行う際には様々なエラーにより緊張力との相関性は崩れている。そのため、観測された振幅値は **図 1-7** に示すような確率分布を持つ値であると推測した上で入力データとして利用する必要がある。

このことから、得られた振幅値から推定した残存緊張力は不確実性が高く、フェイズ 1 でリフトオフ試験結果に対して使用されている通常クリギング法は適さない。そこで、本研究では不確実性を含む値に対しても使用可能なイン

ディケータクリギング法を用いて残存緊張力の推定を行う。

1.2 研究の目的

先述のように構造物の維持管理に充てる事のできる費用は限られているのにも関わらず、アンカーの残存緊張力を直接得ることのできる健全性調査として主に施工されているリフトオフ試験は金銭的および時間的コストが大きい（50万円前後/箇所・60分/本）。さらに大規模な試験装置をとまなうことから試験本数も限られており、斜面に多数施工されたアンカーの一部（10%かつ3本以上が目安）に実施されるのみにとどまっている。しかし、より正確な斜面安定性の評価を行うためにはより多くの残存緊張力を得ることのできる健全性調査が必要であり、簡便で安価な試験法が望まれている。これらの理由から本研究ではより簡便で安価かつアンカーの残存緊張力を間接的に得ることのできる試験法として提案されている超音波法を補完データとして使用することを提案し、その有用性について検討する。

本研究ではまず実施されたリフトオフ試験のうち約半分を不使用とすることで擬似的にリフトオフ試験数の少ない状態を作る。フェイズ1としてこの少ないリフトオフ試験のみによるアンカーの推定残存緊張力を算出する。次にフェイズ2として超音波法結果を考慮したアンカーの推定残存緊張力を算出する。さらに、真値に最も近い推定値としてリフトオフ試験結果をすべて利用した場合の推定残存緊張力を算出する。概要図を図 1-8 に示した。これらの3種類の推定残存緊張力を比較し、超音波試験の有効性を検証することを本研究の目的とする。さらに推定残存緊張力を用いて斜面全体の3次元滑り解析を行い、斜面安定性についての検討も行う。

1.3 既往の研究との関連

アンカーの残存緊張力の推定にはアンカーの健全性の把握が非常に重要であり、これまでに最も簡便で安価な方法によりアンカーの残存緊張力を推定

する試みは多くの研究者によって進められている。以下に既往の研究の概要および課題を挙げる。

大窪ら⁵⁾は高速道路の斜面に導入されているアンカーの維持管理に関して、リフトオフ試験法の確立と簡略化、あるいは全く別の簡便な緊張力推定手法を確立し、アンカーの残存緊張力を評価することが法面全体の安定性につながると指摘した。これを踏まえ、酒井ら⁶⁾は従来のリフトオフ試験に用いられるセンターホール型ジャッキの小型・軽量化を図った SAAM ジャッキの開発を行った。この軽量化された SAAM ジャッキを用いることで、リフトオフ試験の簡便化が図られたが、高速道路の斜面だけでも 12 万本以上のアンカーが設置されている中、斜面の安定性を検討するためにはより多くのアンカーの性能を推定・評価する必要がある、時間・コスト面においても優れた測定手法が必要であると指摘された。そこで芥川ら⁷⁾は、リフトオフ試験に代わる全く別の簡便な緊張力の推定手法として、緊張力の変動に伴う透磁率の変化を利用した

「磁歪法を利用した簡便なアンカーの緊張力測定手法」を提案し、透磁率の変化から間接的に残存緊張力を推定することを試みた。磁歪法は主に地下空洞に導入されている PS アンカーを対象に研究が進められてきたが、アンカーヘッドの材質、形状、寸法のわずかな違いにより、緊張力の変動に伴う透磁率の変化傾向に大きな差が生じるという問題が生じ、様々なタイプのアンカーに適用するまでには至らなかった。一方で岩本ら⁴⁾もまたリフトオフ試験に代わる全く別の簡便な緊張力推定手法として超音波の振幅を利用した「透過法を利用した簡便なアンカーの緊張力測定手法」と「反射法を利用した簡便なアンカーの緊張力測定手法」を提案した。しかし、前者はくさびタイプアンカーやストランドタイプのアンカーへの適用で問題が生じている。

本研究では岩本らの提案する「反射法を利用した簡便なアンカーの緊張力測定手法」について、支圧板の穴の位置を考慮した超音波法の試験結果を用いて残存緊張力の推定を行う。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全 5 章からなる。

第 1 章において、序論として研究の背景、研究の目的および既往の研究との関連を述べた。

第 2 章では、本研究で用いるリフトオフ試験、超音波法、インディケータクリギング法および 3 次元すべり解析について概説する。

第 3 章では、超音波法の結果にインディケータクリギング法を適用し、残存緊張力の推定を行う。また本研究で使用したアルゴリズムについて述べる。

第 4 章では、リフトオフ試験に通常クリギング法を適用した推定残存緊張力との比較を行い、本手法の精度を検討する。また斜面全体に対し 3 次元滑り解析を行い、斜面の安定性を評価する。

第 5 章では、本研究で得られた知見をまとめ、本手法の問題点および今後の展望を示す。

第 2 章 原理

2.1 リフトオフ試験の概説

2.1.1 リフトオフ試験のメカニズム

アンカーの健全性調査は目視点検や打音試験による予備調査ののちに行われる。リフトオフ試験は定着具やテンドン余長にジャッキあるいはリフトオフ専用油圧式ジャッキを設置して載荷をする。定着具が支圧板から離れはじめた（0.1~1.0mm）ときの荷重を測定することによって、現在アンカーに作用している荷重を求めるものである。

載荷は 1 段階あたりの荷重増加量を決めて段階載荷で行い、アンカーヘッドの変位量を観測する。この際、より鋼材や鋼棒の破断などによるテンドンの飛び出しの危険性があり、慎重に行う必要がある。載荷完了後、段階除荷を行う。これを 1 工程とし、数回行う。試験結果は **図 2-1** に示すようなグラフとなる。

図 2-1 中の①では、アンカーに残存している緊張力がリフトオフ試験の引張り荷重に対し抵抗するため大きな傾きをもっている。②では残存緊張力による抵抗がなくなり、アンカーの自由長部が以下の式に従って弾性的に伸長した結果の傾きとなっている。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

ここで、 σ は応力、 E は弾性係数、 ε は変位量であり、リフトオフ試験によって求められる残存緊張力は、②の直線の y 切片である。

本研究においてはリフトオフ試験による結果を真値に最も近い値であると仮定し、リフトオフ試験結果を最大数用いた推定結果を最尤推定結果としてその他の推定結果との比較に利用する。

2.1.2 アンカーの健全度評価

アンカーの不具合としては導入直後の緊張力が増大する過緊張と、緊張力が減少する性能低下の二種類がある。前者は地山の変形を起因としており、テンドンの破断や定着部の引き抜け等のアンカー機能の喪失に加え、破断や抜け出しによる第三者被害の発生につながる可能性がある。後者は腐食やアンカーヘッド部の損傷や定着部の異常により経年的に発生する。この場合、滑りに対する抑止効果の低減の原因となる。

本研究ではアンカーの健全度について、残存緊張力に注目して 5 個の領域に分類する。アンカーの導入緊張力を T_d として、**図 2-2** に危険性と原因と共に分類を示した。各々の閾値について以下に概説する。

過緊張領域を示す $1.2T_d$ の閾値は設計荷重に近い値であり、この閾値を超過するとアンカーの断裂の危険が高まる。

過緊張注意領域を示す $0.8 \sim 1.2T_d$ の緊張力はアンカーの経年劣化が想定されるにもかかわらず導入緊張力から大きな変動がないことから、自山からの何らかの外力を受けていることを示唆する。

逆に、性能低下領域を示す $0.2T_d$ 以下の緊張力では十分な滑りに対する抑止効果が期待できないことを示している。

性能低下注意領域を示す $0.2 \sim 0.4T_d$ の緊張力は残存緊張力の低下が比較的激しいことから、今後性能低下領域に変化する可能性を示している。

これら 4 つの領域に該当しない $0.4 \sim 0.8T_d$ の緊張力を健全領域としている。

2.2 超音波法の概説

超音波法には透過法と反射法の 2 通りの手法がある。そのうち本研究で使用する反射法について、以下に概説する⁴⁾。

図 2-3 に反射法の概要を示す。反射法とは、アンカーヘッドから支圧板へ向けてアンカー軸と平行した方向に超音波を送信し、アンカーヘッドと支圧板の接触面などの境界からの反射波の振幅を受信するものである。この際、アンカ

ーヘッドと支圧板の接触の度合が残存緊張力の増減にともなって変化することと超音波反射特性が変化することを利用し、残存緊張力を推定する。またアンカーキャップを外す必要があるため現在はリフトオフ試験箇所と同じ場所で行われ、データの蓄積が行われている。

支圧板には図 2-4 に示すような穴があり、本論文ではこの上で行った試験結果を除外する。これは図 2-5 に示すように支圧板の穴の上ではアンカーヘッドと支圧板の間に全反射してしまうために得られたデータは不適切であると判断できるからである。

また、本研究においては支圧板と受圧板の第三反射波の平均最大振幅を解析に利用している。平均最大振幅を利用する理由は、解析対象のアンカーがくさびタイプであり、くさびタイプやストランドタイプは図 2-6 に示すような残存緊張力の偏りが予想されるからである。この残存緊張力の偏りにより最大振幅に偏りが発生して適正な最大振幅を得ることができないと予想されるため、最大振幅の平均値を利用する。

2.3 クリギング手法の概説

2.3.1 クリギング法の起源

クリギング法は地球統計学の中心的手法のひとつであり、クリギング法と地球統計学はしばしば同義とされている。また、本論文の題目の地盤統計学的手法もクリギング法を指しており、本研究においても重要な位置を占めている。以下にクリギング法の歴史を概説する^{8) 9)10)11)}。

クリギング法の起源は鉱山学である。鉱山学では比較的少数のボーリング調査結果データから鉱山全体にわたる鉱物の含有量を推定する必要がある。1950年代初頭、南アフリカの鉱山技師 D.G.Krige と統計学者 H.S.Sichel は鉱物資源埋蔵量の推定方法を改良する目的でデータが持つ空間的な従属性を考慮することの重要性を指摘し、推定位置までの距離の逆数で重みをつけたデータの線形結合で推定を行う手法を提案した。

その後、パリ国立高等工業学校の数学者であった G.Matheron によって 1960

年代に現在知られる形でのクリギング法が定式化された。G.Matheron は確率場の枠組みの下で空間的従属性を、バリオグラム関数を用いて表現することにより、観測データの最良線形不偏予測量としてのクリギング法を確立した。

また、クリギング法は基礎理論を確立したのが数学者であったため、当初より高度な数学的背景を備えていた。そのため技術者に速やかに受け入れられたとは言い難く、有用性について激しい議論が交わされた時期があった。他方で鉱山学においては固有の手法として利用され、研究も統計学の本流とは離れたグループによって行われてきた。これらの歴史の名残として、地球統計学では統計学標準とは異なる確率関数や推定といった用語が確率場や予測といった統計学の標準用語に代わって用いられることが多い。

2.3.2 クリギング法の特徴

先述した通りクリギング法は地球統計学の中心的手法のひとつであり、未観測位置における確率場の値を比較的少ない数の観測値データを用いて推定することを目的としている。十分な数の観測データが存在する場合、確率場全体の推定を行うことができるため空間的予測・補間法と呼ばれることもある。

本研究ではアンカーの残存緊張力が空間的相関を持っていると仮定し、残存緊張力を二次定常性と固有定常性をもつ確率場の値として解析を行う。

(1) 二次定常性

任意の位置 x で平均値 $m(x) = E[Z(x)]$ が存在するとき、関数 $m(x)$ を確率場のドリフトと呼ぶ。さらに $m(x) = E[|Z(x)|^2]$ に有限のとき $Z(x)$ を二次の確率場と呼ぶ。このとき共分散 $C(x,y) = C\{Z(x),Z(y)\}$ を定義することができる。

定義 2.1. 二次の確率場 $\{Z(x)\}$ が次の二つの性質を持つとき、 $Z(x)$ は二次定常であるという：

1. ドリフト関数は定数値 $m(x) = m$,
2. 共分散 $C(x,y)$ は $x - y$ のみに依存する

また、位置の差分 $h = x - y$ のみに依存する関数

$$C(h) = C\{Z(x+h), Z(x)\} = E[Z(x+h) - m][Z(x) - m] \quad (2.1)$$

を二次定常確立場の共分散関数と呼ぶ。共分散関数は非負定値性をもち、次の不等式が成立する。ここで、 w_i 及び w_j はそれぞれ i 番目と j 番目の観測点の重み係数とする

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j C(x_i - x_j) \geq 0 \quad (2.2)$$

この特徴により、共分散関数のとりうる形は大きな制限を受ける。

(2) 固有定常性

定義 2.2 任意の 2 点 x, y に対する確率場の差分 $Z(x) - Z(y)$ が以下の二つの特徴を持つとき、確率場 Z は固有定常であるという：

1. $E[Z(x) - Z(y)] = 0$,
2. $V[Z(x) - Z(y)] = E[Z(x) - Z(y)]^2$ が $x - y$ のみに依存する。

また、位置の差分 $h = x - y$ のみに依存する関数

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (2.3)$$

を固有定常確率場のセミバリオグラム関数と呼ぶ。定義からセミバリオグラム関数は以下の性質を持つ。

$$\begin{aligned} \gamma(0) &= 0 \\ \gamma(h) &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\gamma(-h) = \gamma(h)$$

(3) セミバリオグラム関数

セミバリオグラム関数は固有定常確率場の空間的依存性を特徴づける基本特性量である。定義式は**式(2.3)**に示した。クリギング法では確率場 $\{Z(x)\}$ の二次定常性と固有定常性を仮定しているため、以下の関係式が成立する。

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (2.5)$$

さらに、先述の通り共分散関数 $C(h)$ は非負定値性という条件を持つため、取りうる形が大きく制限されている。共分散関数のモデルとしては多くの種類が存在しているが、本研究では指数モデル、ガウスモデル、球形モデルの3種類を利用している。それぞれのモデルの一般式を順に**式(2.6)**、**式(2.7)**、**式(2.8)**に示す。

$$C(h) = C(0)(\exp[-r]) \quad (2.6)$$

$$C(h) = C(0)(\exp[-r^2]) \quad (2.7)$$

$$C(h) = \begin{cases} C(0)\{1 - 1.5 \cdot r + 0.5 \cdot r^3\} & (h \leq a) \\ 0 & (h > a) \end{cases} \quad (2.8)$$

このとき、 r は2点間の距離 h の関数である。

2.3.3 通常クリギング法の概説

通常クリギング法は最も単純なクリギング法であり、斜面の一部のアンカーのリフトオフ試験結果から斜面全体のアンカーの性能評価を行う際に利用される。この際、推定対象領域を二次固有定常確率場と仮定し、推定点における値をその近傍に存在する観測値と重み係数を用いた線形結合によって推定する。

$$Z(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} Z(x_{\alpha}) \quad (2.9)$$

$$\sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} = 1 \quad (2.10)$$

ここで、 $Z(x)$ は物性値、 x_0 は推定点 x_0 の座標、 x_{α} は観測点 α の座標、 w_{α} は観測点 α の推定点 x_0 に対する重みである。また、先述した通り二次固有定常確率場においては、領域内の2点間の物性値の増分の期待値は0となり、分散の増分は2点間の距離 h のみの関数となる。

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (2.11)$$

$$V\{Z(x+h) - Z(x)\} = 2\gamma(h) \quad (2.12)$$

ここで、 h は2点間の距離、 $\gamma(h)$ はセミバリオグラムである。**式(2.5)**と、**式(2.6)**または**式(2.7)**または**式(2.8)**から以下の式が求まる。

$$\gamma(h) = C(0) \left(1 - \exp \left[-\frac{|h|}{a} \right] \right) \quad (2.13)$$

$$\gamma(h) = C(0) \left(1 - \exp \left[-\frac{h^2}{a^2} \right] \right) \quad (2.14)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C(0) \left\{ 1.5 \cdot \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right\} & (h \leq a) \\ C(0) & (h > a) \end{cases} \quad (2.15)$$

ここで a をレンジといい、距離 a より離れた地点同士の相関はない。つまりこの値が大きいほど離れた地点の物性値の影響が発生しやすいことを示し、推定可能な領域の広さに繋がっている。よって本論文ではクリギング法による推定に対する評価指標として参考になっている。

クリギング法では推定誤差分散を最小化することで推定値を決定する。推定誤差分散を最小化する際にラグランジュの未定乗数法を用いることで、**式**

(2.16)と式(2.17)を得る。

$$-2\sum_{\beta=1}^n \omega_{\beta} \gamma(x_{\alpha} - x_{\beta}) + 2\gamma(x_{\alpha} - x_0) - 2\mu = 0 \quad (2.16)$$

$$\sum_{\beta=1}^n \omega_{\beta} = 1 \quad (2.17)$$

この連立方程式を各推定点において解き、式(2.9)に重みを代入することで推定値を算出する。

アンカー斜面全体の残存緊張力を推定する際、フェイズ 1 としてリフトオフ試験に対し単純クリギング法を行っている。

2.3.4 インディケータクリギング法の概説

インディケータクリギング法は物性値の不確実性が高い場合に用いられる。物性値を確率変数とみなし、物性値に対する複数の閾値を設定する。これらの閾値に対する非超過確率をインディケータ変換値と呼ぶ。 $Z(x_i)$ を観測点 x_i での物性値としたとき、 $Z(x_i)$ が定数の場合は式(2.18)、 $Z(x_i)$ が確率関数の場合は式(2.19)でインディケータ変換値は求められる。

$$I(x_i; z_k) = \begin{cases} 1 & Z(x_i) \leq z_k \\ 0 & Z(x_i) > z_k \end{cases} \quad (2.18)$$

$$I(x_i; z_k) = F(x_i; z_k) \quad (2.19)$$

ここで、 z_k は k 番目の閾値、 $F(x_i; z_k)$ は観測点 x_i の残存緊張力の k 番目の閾値に対する非超過確率関数である。

上記のいずれかの式で求められた値を通常クリギング法での物性値として扱い、図 2-7 に示すように各推定点における閾値に対する非超過確率を推定する。その後、各閾値に対して推定された非超過確率を用いて、図 2-8 に示すように最尤値を決定する。最尤値決定の計算式を以下に示す。

$$T(x_0) = Z_j + a_{j+1} \{0.5 - I(x_0; z_j)\}$$

$$a_{j+1} = \frac{Z_{j+1} - Z_j}{I(x_0; z_{j+1}) - I(x_0; z_j)} \quad (2.20)$$

$$Z_j < 0.5 \leq Z_{j+1}, \quad j = 0, 1, \dots, n, \quad Z_0 = 0$$

このとき $T(x_0)$ は推定点 x_0 における推定残存緊張力、 a_j は緊張力－非超過確率の直線の j 番目の傾きである。さらに、設定した閾値に対する非超過確率が 0.5 をこえなかった場合は $a_{n+1} = a_n$ と仮定し、計算を行う。

通常クリギング法と比べた際のメリットとして、観測誤差や人為的誤差が生じる場合でも観測値を入力情報として利用できることが挙げられる。そのため入力データ数が増やしやすくなり、インディケータクリギング法は発展途上の技術を用いた解析などに使いやすいという利点がある。また、各観測点が観測値に対し個別の確率関数を持つことも挙げられる。これにより、精度の違う複数の手法による解析を行うことが可能である。

デメリットとしては各推定点において設定された閾値の数だけセミバリオグラムおよび推定値を算出する必要があることが挙げられる。そのため通常クリギング法に比べて解析時間が増大しやすくなるが、本研究では大きな問題にはならなかった。別のデメリットとして、セミバリオグラムモデルのレンジが通常クリギング法に比較して小さいことが挙げられる。これは入力データ数を増やすことで解消されるが、本研究では超音波法を実施した場所はリフトオフ試験を行った場所と一致している場所のみであり、このデメリットは解消されていない。さらに、観測点の推定結果は設定された閾値に大きく依存しているため入力データが正確であっても結果と一致しないというデメリットが存在するが、これは閾値を増やすことである程度解消される。しかし、閾値を増やすことはインディケータクリギング法のメリットを相殺することに繋がるため、このデメリットはある程度許容する必要もある。

本研究ではまず超音波法の試験結果とリフトオフ試験結果が両方存在する観測点から超音波法のみが存在する地点の残存緊張力を確率変数として算出する¹¹⁾。これらすべての観測点の残存緊張力の閾値に対する非超過確率を用いてインディケータクリギング法を行い、残存緊張力を推定する。概略図を  図 2.1

2-9 に示した。

2.4 3次元すべり解析

本研究においては、アンカー斜面の崩壊モデルとして図 2-10 に示す三次元直線すべり解析を行う¹³⁾。ここで地盤の区別のため図中に①と②を示した。

また、斜面の安定性は式(2.21)に示す安全率 Fs を用いて定義する。

$$Fs = \frac{\sum_{i=1}^n [c' A_i + (w_i \cos \gamma_{zi} - u_i A_i) \tan \phi'] + \sum_{j=1}^l T_j (\sin \theta_j + \cos \theta_j \tan \phi')}{\sum_i^n (w_i \sin \gamma_{zi})} \quad (2.21)$$

$$\cos \gamma_{zi} = \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \alpha_{xi} + \tan^2 \alpha_{yi} + 1}}, \quad A_i = dx_i dy_i \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{xi} \sin^2 \alpha_{yi}}}{\cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi}}$$

ここで c' は地山の粘着力 (kN/m^2)、 ϕ' は地山の内部摩擦角 (rad)、 w_i はブロック i の自重 (kN)、 dx_i および dy_i はブロック i の幅 (m)、および α_{xi} はブロック i の x 軸および y 軸からの傾斜 (rad)、 u_i はブロック i の間隙水圧 (kN/m^2) を表す。また、 T_j はアンカー j の残存緊張力 (kN)、 θ_j はアンカー j の打設角度 (rad)、 n はブロック総数、 l はアンカーの総本数を表す。

第 3 章 インディケータクリギング法を用いた残存緊張力の推定

3.1 超音波法から算出した緊張力を用いた残存緊張力の推定

本研究では舞鶴自動車道、福知・20 の斜面に対して解析を行った。リフトオフ試験を施工した 11 箇所のうち 6 箇所を選択し、超音波法はリフトオフ試験を施工した 11 箇所で行ったすべての結果を使用する。それぞれの試験位置は **図 3-1** に示すとおりである。また、試験結果を **表 3-1** に示す。

この残存緊張力の推定法では、超音波法とリフトオフ試験の両方が行われているアンカーに注目し、残存緊張力ー平均最大振幅の近似直線を作成する (**図 3-2**)。この際に誤差も算定し、ある残存緊張力に対する平均最大振幅は平均が近似直線上になる正規分布を持つ確率変数であるとする (**図 1-7**)。この確率変数から任意の平均最大振幅に対して残存緊張力が確率変数として求まる。また、これらの概略図は先に **図 2-9** で示したとおりである。求まった確率変数と正規分布表を利用してインディケータクリギング法を行い、残存緊張力を推定する。これらの流れをフローチャートを用いて **図 3-3** に示す。

また、インディケータクリギングを行う際のモデルの選択はレンジが球形モデル、ガウスモデル、指数モデルの 3 種類のうち、今回最も推定範囲の広いモデルであった球形モデルを選択した。以下では推定された残存緊張力を UT11 と称する。

3.2 アルゴリズム

本研究で使用しているクリギング法計算のプログラム¹⁴⁾¹⁵⁾は、基本的なクリギング法の計算に沿った構成となっている。**図 3-4** にフローチャートを示す。以下に本プログラムの特徴を挙げる。

- 残存緊張力ー平均最大振幅の近似直線は傾きと y 切片の値を別個に変動させつつ評価漏れの無いように最小二乗法を用いて決定している。
- インディケータ変換値を算出する際、リフトオフ試験結果の存在する 6 点に関しては正規分布表を参照せず、0 か 1 としている。超音波試験のみを

用いた 5 点に関しては正規分布表を参照してインディケータ変換値を算出している。

- 正規分布表を参照する際、 x を超えない最大値と x を超える最小値の間を線形増加として参照している。
- セミバリオグラムモデルのタイプとして球形モデル、指数モデル、ガウスモデルの三種類を導入しているが、最尤タイプの自動選択は行われない。
- 最適なセミバリオグラムモデルの選択はレンジの値を変動させて、最小二乗法を用いて行っている。
- **式(2.16)、式(2.17)**の連立方程式は次式の行列計算で表されるが、逆行列を用いずにガウスの消去法を用いて重みの算出を行なっている。

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_i) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_i) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

以上が使用したプログラムの概要であり、いまだ様々な改良の余地がある。以下に改良可能な箇所を列挙するが、プログラムの改良については今後の課題とする。

- 超音波法から得られる平均最大振幅値は常に正の値であるため、正規分布では表すことが出来ない。今回は簡略化のため正規分布表を参照しているが、対数正規分布などの確率関数を用いる必要がある。
- セミバリオグラムモデルには数多くの種類があり、今回はごく少数のモデルを考慮するのみにとどまっている。より多くのモデルでの検証のため、選択可能モデルを追加する必要がある。
- 最尤セミバリオグラムモデル選択は現在自動化しておらず、インディケータクリギング法での計算の際には全てのしきい値に対して同じモデルの選択をしている。常に最適なモデル選択を行うため、モデル選択の自動化が必要である。また、今回は球形モデルが突出して優秀なモデルであったため、悪影響は発生していない。

第 4 章 推定残存緊張力の検討

4.1 推定残存緊張力の比較

4.1.1 解析結果

フェイズ 1 として、3.1 節で利用したリフトオフ試験 6 箇所のみに対して通常クリギング法を行い、アンカー斜面全体の残存緊張力を推定する（以降 LT6 と称する）。さらに最尤推定残存緊張力として、全測定点 11 箇所のリフトオフ試験結果に対して通常クリギング法を行い、残存緊張力を推定する（以降 LT11 と称する）。これらの 2 種類の推定結果と前章の推定結果を図 4-1 に試験位置と共に 3 次元表示した。このとき、青が性能低下領域、水色が性能低下注意領域、緑・黄・橙が健全領域、濃い赤が過緊張注意領域である。また、図中の青枠および赤枠に囲まれた領域については後述する。

4.1.2 最尤推定残存緊張力の考察

前述のとおり LT11 はリフトオフ試験を 11 箇所行っており、今回の解析においては最も真値に近い最尤推定値としている。本研究ではこの LT11 の分布傾向をおおまかに捉え、UT11 および LT6 と比較する。LT11 の分布傾向の特徴を以下に列挙する。

- (1) 座標(0,4)近傍は平均的な残存緊張力である。
- (2) 座標(2,0)が残存緊張力 0kN となっており、近傍はやや低めの残存緊張力である。
- (3) 座標(2,2)は高い緊張力である。
- (4) 座標(4,2)近傍は健全な残存緊張力となっている。
- (5) 座標(4,4)近傍がやや低い残存緊張力となっている。
- (6) アンカー斜面中央の残存緊張力は高めである。
- (7) 座標(14,0)近傍は低めの残存緊張力である。

- (8) 座標(14,4)近傍は健全な残存緊張力である。
- (9) 座標(19,0)近傍は高めの残存緊張力である。

以上が LT11 の分布傾向であり、アンカー性能低下領域および性能低下注意領域は座標(2,0)近傍、座標(4,4)、座標(14,0)近傍となっている。

4.1.3 フェイズ 1 の考察

フェイズ 1 である LT6 は通常クリギング法で推定された値であるため、滑らかな曲面を描きやすくなっている。その結果試験箇所が 6 箇所のみであっても完全に推定できていない箇所が存在しておらず、試験数に比して良い推定ができていえる。LT6 の分布傾向の特徴を以下に挙げる。また、レンジの値は距離 10 程度であった。

- (1) 座標(0,4)近傍は健全な残存緊張力である。
- (2) 座標(2,0)近傍の低緊張力領域は推定できていない
- (3) 座標(2,2)は高い残存緊張力である。
- (4) 座標(4,2)近傍は健全な残存緊張力となっている。
- (5) 座標(4,4)近傍がやや低い残存緊張力となっている。
- (6) 座標(8,4)近傍は高い残存緊張力を示すが、座標(8,0)近傍は健全な残存緊張力を示している。
- (7) 座標(14,0)近傍の性能低下領域が広く推定されている。
- (8) 座標(14,4)近傍は健全な残存緊張力である。
- (9) 座標(19,0)近傍は高めの残存緊張力である

このように大まかな斜面全体の推定はできている。一方で  4-1 に青枠で示した領域では十分な推定ができておらず、特に(2)の 0kN のアンカーを全く予想できていないことは残存緊張力推定の観点から問題となる。これを解消するためにはより多くのリフトオフ試験が必要になると推察される。また、フェイズ 1 から推定されるアンカーの性能低下領域および性能低下注意領域は座標

(4,4)および(14,0)近傍である。

4.1.4 フェイズ 2 の考察

3 章で先述したとおり、本項で扱うフェイズ 2 ではリフトオフ試験と超音波法の両方を考慮した 6 箇所の観測点と超音波法のみを考慮した 5 箇所の観測点が存在する。これらのデータの重みはインディケータ変換値を算出する際に考慮されており、前者の観測点の試験結果は確定値として扱われている。また、前者の 6 点に関しては後者の 5 点での試験結果を残存緊張力に変換するための緊張力ー平均最大振幅直線の作成にも利用されている。

フェイズ 2 である UT11 はフェイズ 1 である LT6 に比較して入力データ数は多いが、インディケータクリギングの特徴としてセミバリオグラムモデルのレンジが小さくなるので、効果的な推定ができない領域は増加している。UT11 の分布傾向の特徴を以下に挙げる。

- (1) 座標(0,4)は健全な残存緊張力であるが、近傍は高い残存緊張力である。
- (2) 座標(2,0)は低い残存緊張力である
- (3) 座標(2,2)近傍は高い残存緊張力である。
- (4) 座標(4,4)近傍がやや低い残存緊張力となっている。
- (5) 座標(5,0)は低い残存緊張力である。
- (6) アンカー斜面中央は高い残存緊張力であり、特に座標(8,2)が高い残存緊張力を示している
- (7) 座標(12,4)は高めの残存緊張力である。
- (8) 座標(14,0)近傍のやや低い残存緊張力の領域を広く推定している。
- (9) 座標(17,3)近傍は健全な残存緊張力である。

このように LT11 の特徴に近づいていることがわかる。また、座標(2,0)を除き高く推定する場合は LT11 では平均的な残存緊張力以上の推定点である。さらに、座標(2,0)に関しても非常に低い推定値が算出されており、異常が発生していることがわかる。健全領域以下の推定値を低く算出することに関しては安

全面の問題はないため、UT11の推定結果は十分に有用な推定であると判断できる。

しかし、先述の通りレンジが距離3前後となっており効果的な推定ができていない領域が多い。この領域は主に図4-1中の赤枠で囲われた部分である。この問題は超音波法を実施するアンカーを増やすことで消滅することが予想できるが、今回はデータが存在しないためこの問題を解消することは出来ない。

4.1.5 残存緊張力の検討

本項ではフェイズ1とフェイズ2を最尤推定値と比較し、超音波試験を考慮することによる影響を検証する。フェイズ1、フェイズ2及び最尤推定値の残存緊張力を表4-1に示す。ここでアンカーの識別のため座標(0,0)を番号1、(1,0)を番号2、(0,1)を番号21として(20,4)まで100までのアンカーの番号を付けた。さらに、最尤推定値をフェイズ1またはフェイズ2の推定値から引いたものを、横軸の数字をアンカーの番号として図4-2に示す。たとえば、番号2のアンカーではフェイズ1では最尤推定値よりも約70kN大きく推定しているのに対し、フェイズ2では約30kNの推定誤差となっていることがわかる。また、過緊張を考慮しなかった場合、正の方向に誤差が発生していることはアンカーの性能を過大評価していることと同義であり、危険である。

表4-1で示した橙色の列および図4-2で青丸によって囲った番号はフェイズ2ではリフトオフ試験と超音波法の両方の試験結果を利用しており、計算上フェイズ2の推定結果と最尤推定値は非常に近い値になる。なお、フェイズ1の推定結果および最尤推定値はリフトオフ試験結果と一致している。一方、表4-1の黄色の列および図4-2で青丸によって囲った番号はフェイズ2において超音波法結果のみを利用しており、この列の推定結果がフェイズ1の推定結果よりも最尤推定値（リフトオフ試験結果）に近くなれば超音波法による残存緊張力計測が有効であると言える。

実際に表4-1の黄色の枠を比較すると、番号3および12ではフェイズ2はフェイズ1よりも最尤推定値に近くなっている。しかし、番号6、49、93はフェイズ1がフェイズ2よりも最尤推定値に近くなっている。この3点のうち特

に番号 49、93 では残存緊張力をより多く推定する危険なエラーを出しており、超音波法が有効であると言うことはできない。

次に、**図 4-3** にフェイズ 1 およびフェイズ 2 の最尤推定値との乖離をヒストグラムで表した。ここで、横軸は推定残存緊張力の乖離の絶対値であり、幅は 10kN となっている。このヒストグラムから、フェイズ 2 では 40kN 前後の乖離を持つアンカーがほぼ一定であり、最尤推定値からある程度の幅で外れていることがわかる。

これらの原因として、超音波法の実施数の不足と超音波法の精度の不足が挙げられる。前者を解消することで、インディケータクリギングを行う際のレンジが大きくなることが推察される。後者を解消することでインディケータ変換値を作成する際の閾値の数を減らすことが可能になり、インディケータクリギングのメリットをより効果的に得ることができると推察される。

4.1.6 安全面からの検討

本項ではアンカー残存緊張力の推定結果を健全度評価を行うことで分類し、その結果を比較することで推定の安全性を検討する。各手法に対し、アンカーの健全性評価を視覚化したものを **図 4-4** に示す。さらに、LT11 との健全性評価の乖離を視覚化したものを **図 4-5** に示す。この際、LT11 での評価結果よりも健全側に推定した場合は **False Positive**、逆に LT11 での評価結果よりも危険側に推定した場合は **False Negative**、LT11 と健全性評価が同じ場合に **True** としている。これらの分類について **図 4-6** に示す。

UT11 と LT6 を比較すると **False** の数が最も少ないものは LT6 となる。しかし **False Positive** は安全上問題が発生しやすいのに対し **False Negative** は安全上問題が発生しにくいことを考慮すると、**False Positive** の数だけでこれらの推定値を比較すべきである。

False Positive の数のみを比較すると、UT11 が 0 個、LT6 が 8 個となり、安全上の観点からは UT11 が LT6 より優れていることがわかる。

以上よりリフトオフ試験の施工数を減らした場合において、超音波法結果を用いた結果がリフトオフ試験のみを用いた結果よりも優れていることが分か

った。

4.1.7 維持補修計画画面からの検討

さらに正確な斜面全体の健全性調査を行おうとする場合、フェイズ1のクリギング計算時のレンジから判断できる効果的な推定が行われていない領域での追加調査が必要なことは自明である。これに加えて、補完データとして超音波法の結果を使用したフェイズ2をフェイズ1と比較することでさらに効果的な試験箇所の選定を行うことができる。フェイズ1とフェイズ2の比較結果を図4-7に示す。

この結果とクリギング法への入力位置選択の観点から、座標(2,0)、(5,0)、(5,2)、(16,2)で追加リフトオフ試験を施工することが正確なアンカー健全性調査に効果的であると推察される。図4-7に示した番号の順に、以下にそれぞれの選択理由を概説する。

①の2点(2,0)および(5,0)では健全度の評価結果が2段階の乖離を示しており、アンカーの残存緊張力が異常値を示す可能性が非常に高い。さらに①近傍では全てのアンカーが1段階の乖離を示しているため、2点のどちらかまたは2点の間でのみの追加ではなく、両方での追加リフトオフ試験を提案している。

②(8,2)では周辺が健全状態であるにも関わらず1点のみか緊張注意領域を示しているため、何らかの異常が発生している可能性がある。また、座標(5,2)近傍は1段階の乖離を示しており、この領域の推定にも寄与できることから追加リフトオフ試験位置として提案している。

③(16,2)では健全度評価の乖離は発生していない。しかし(14,2)、(15,2)、(16,0)および(16,1)では健全度の乖離が1段階発生していること、近傍の試験位置が(12,4)、(14,0)および(19,0)と健全度の乖離が発生している4点を中心としてほぼ線対称に位置していること、リフトオフ試験の施工数を抑えることの3点の理由から追加リフトオフ試験位置として提案している。

4.2 3次元滑り解析による安全率の算定

4.2.1 解析結果

各手法による推定残存緊張力を用いて、斜面全体の3次元滑り解析を行なった。これは最終的な安全率がLT11のものと大きく乖離しないことを確認することが目的である。また斜面の各種物性値はアンカー導入前の斜面全体の安全率が1になるように設定している。解析結果を表4-3に、解析に使用した物性値を表4-4に示す。

4.2.2 考察

真値に最も近いと推察されるLT11の安全率は1.152であるのに対し、LT6が1.159、UT11が1.158となっている。このことから、安全率の値は超音波法結果を考慮した場合であっても健全に算出できることがわかった。

また、UT11が僅かにではあるがLT6の結果よりもLT11の結果に近くなっており、さらに超音波法による健全性調査を行うことでより正確な安定性解析を行うことができると推測される。

第 5 章 結論と今後の課題

5.1 結論

本研究はより効率的な維持管理に貢献できる簡便かつ安価なアンカー健全性評価手法として提案されている超音波法について検討した。リフトオフ試験を最大数用いた推定緊張力を真値として、リフトオフ試験の試験数を減らして超音波法を考慮した推定緊張力の検討を行った。以下に本研究で得た成果を列挙する。

- (1) アンカーの健全度評価によって分類すると、超音波法を考慮することによって False の数が増加する。しかし False Positive がなくなり、False Negative の数が増加した結果であるため安全上の問題は減少している。
- (2) 超音波法を考慮することで、追加リフトオフ試験の位置の提案を行うことができる。
- (3) 超音波法を考慮していても十分な精度で 3 次元すべり解析を行うことができる。

以上のような知見を得たが、本研究によって浮き彫りになった課題もある。それらについて次節で述べ、今後の研究につなげるものとする。

5.2 今後の課題

本研究によって明らかになった課題と、本研究で考慮することのできなかった課題について以下に列挙する。

- (1) 本研究においてはリフトオフ試験を真値であると仮定しているが、本来はリフトオフ試験結果自体にも誤差が存在している。解析フロー冒頭の平均最大振幅を残存緊張力に変換する際にこの点を考慮する必要がある。
- (2) 現時点の超音波法の精度と実施数では、超音波法の試験結果を考慮する

ことで残存緊張力の推定値が正確になるとは言えない。これは超音波法の精度の不足と、実施数の不足が原因であると推察される。

- (3) 超音波法の結果を緊張力に変換する際、緊張力－平均最大振幅の近似直線を算出し、ある残存緊張力に対する平均最大振幅の存在確率を正規分布で仮定している。しかし、平均最大振幅は常に正の値であるため正規分布は正確な確率関数としては不適切である。より正確な推定を行う場合、指数分布のような負の値を取らない確率分布を採用する必要がある。

参考文献

- 1) NEXCO 総研：高速道路におけるアンカーの維持管理の状況，2013.
- 2) 国土交通省総合政務局建設統計室：平成 25 年度建設投資見通し，図 1 建設投資額(名目値)の推移，2013.
- 3) 国立社会保障人口問題研究所：日本の将来推計人口，図 1-3 年齢 3 区分別人口の推移，2012.
- 4) 岩本勲哉：グラウンドアンカー緊張力の超音波による非破壊評価，京都大学修士論文，2013.
- 5) 大窪克己ほか：高速道路斜面の維持管理について－特にグラウンドアンカーについて－，地盤と調査 2008 年第 1 号，pp13-18，2008.
- 6) 酒井俊典ほか：SAAM ジャッキを用いたアンカーの残存引張り力の調査方法，地盤工学会誌，Vol.56，No.12，pp611，2008.
- 7) 芥川真一ほか：歪磁法による P S アンカーの軸力推定法の提案と大規模地下空洞における適用例，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集(社)土木学会，pp.91-96，2008.
- 8) 間瀬茂：地球統計学とクリギング法，オーム社，2010.
- 9) 高坂宏行：クリギングとその地理適応用，日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要 NO.34，pp.27-35，1998
- 10) 酒井悠：地盤リスク解析による山岳トンネル地質調査に関する研究，京都大学修士論文，2008
- 11) 大津宏康ほか：PFI 建設プロジェクトでの地下リスク評価及び分担に関する研究，建設マネジメント勉強会 Summer School 2002 in Tokyo 講演概要集，pp.189-204，2002
- 12) 北村隆一ほか：工学のための確率・統計，朝倉書店，2006.
- 13) HULINKS：SVSLOPE2009，TUTORIAL & THEORY MANUAL，2009.
- 14) 萩田武史：MATLAB の基本的な使い方，
http://www.math.twcu.ac.jp/~ogita/lec/sim1/matlab_basic.pdf，2013
- 15) MathWorks 公式サイト：<http://www.mathworks.co.jp/>

謝 辞

最後になりましたが、本論文の作成にあたって、お世話になった方々に感謝の意を表します。

まず、ご多忙の中熱心にご指導していただいた京都大学大学院工学研究科・大津宏康教授には心から感謝しています。予定の合間を縫って多くのゼミを設けていただき、発表の経験を積ませていただきました。また、研究のアドバイスはもちろん就職するにあたっての心の持ちようや教授の経験など、様々なご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科・塩谷智基准教授には研究の行き詰まった時に新たな視点からのご指摘と的確な研究の方向性を示していただきました。大変感謝いたします。

京都大学大学院工学研究科・飛田哲男准教授には副査として適切な指摘をしていただき、より良い論文を作成することができました。大変感謝致します。

大八木智子秘書には、快適な研究室生活を送る上で様々な面からサポートをしていただきました。大変感謝しています。

大津研究室の諸先輩方ならびに同回生の方々のおかげで、充実した大学生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

最後に、大学で有意義に学ぶ環境と機会を与えて下さり、無条件に応援していただいた家族に心から感謝を申し上げます。

表 3-1 福知 20 原位置計測結果

X 座 標	Y 座 標	平均最大振幅	殘存緊張力
2	0	0.023886	0
14	0	0.032230	68
4	4	0.029575	112
0	0	0.028843	132
5	0	0.020956	143
12	4	0.070980	146
8	2	0.088824	193
8	4	0.044853	239
19	0	0.075613	243
2	2	0.099387	252
11	0	0.064583	277

表 4-2 残存緊張力推定結果

no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
LT6	132	169	181	183	180	178	177	177	177	175	169	160	147	126	68	131	156	177	198	243
UT11	132	130	42	130	130	29	130	140	185	186	200	222	187	131	68	130	135	193	244	244
LT11	132	100	0	98	126	143	160	174	188	202	221	277	196	149	68	131	155	176	198	243
no	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
LT6	169	184	198	192	182	178	178	180	181	180	173	164	151	136	127	140	158	176	192	203
UT11	133	133	136	136	133	130	133	204	234	215	197	200	181	133	130	133	136	181	243	244
LT11	144	137	132	134	141	152	165	178	191	203	213	213	187	154	132	139	156	174	192	204
no	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
LT6	181	198	252	195	179	175	178	184	188	187	180	170	160	150	147	152	163	175	185	190
UT11	166	240	252	236	136	134	170	233	330	238	191	184	185	157	135	136	162	165	181	193
LT11	161	175	252	170	155	158	170	184	193	201	201	193	177	159	149	151	160	172	183	191
no	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
LT6	183	191	195	178	162	166	177	190	200	196	186	176	168	161	159	161	167	174	180	183
UT11	182	234	241	170	131	133	177	233	236	234	197	199	214	199	174	163	163	163	163	163
LT11	169	179	185	167	151	157	173	191	204	203	194	182	167	159	155	157	162	170	177	182
no	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
LT6	180	181	176	160	112	156	175	195	239	203	190	181	173	168	166	167	170	174	177	178
UT11	165	182	165	131	108	130	163	233	236	234	202	214	251	214	181	163	163	163	163	163
LT11	169	172	169	155	112	154	175	196	239	204	190	174	146	157	158	160	164	169	174	177

LT&UT試験位置

UT試験位置

表 4-3 3次元安定解析結果

	安全率
アンカー導入直後	1.365
最尤推定値 (LT11)	1.152
フェイズ1 (LT6)	1.159
フェイズ2 (UT11)	1.158

表 4-4 3次元安定解析物性値

	①	②
密度(kN/m ³)	20	20
内部摩擦角(deg)	40	18
粘着力(kPa)	50	21

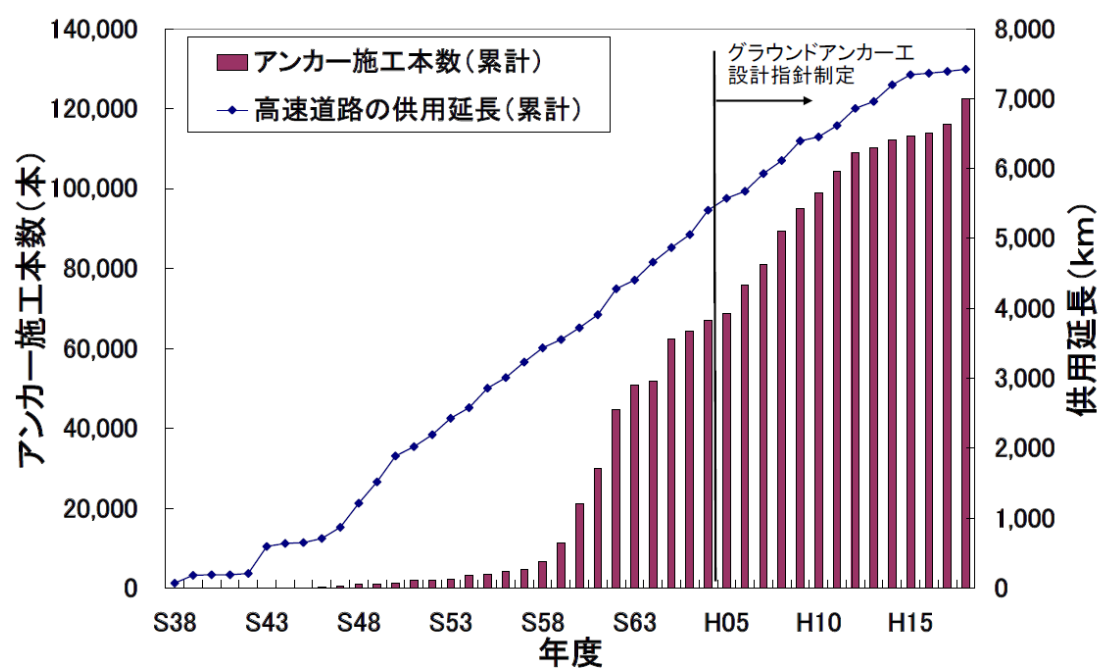


図 1-1 アンカーの累計施工本数¹⁾

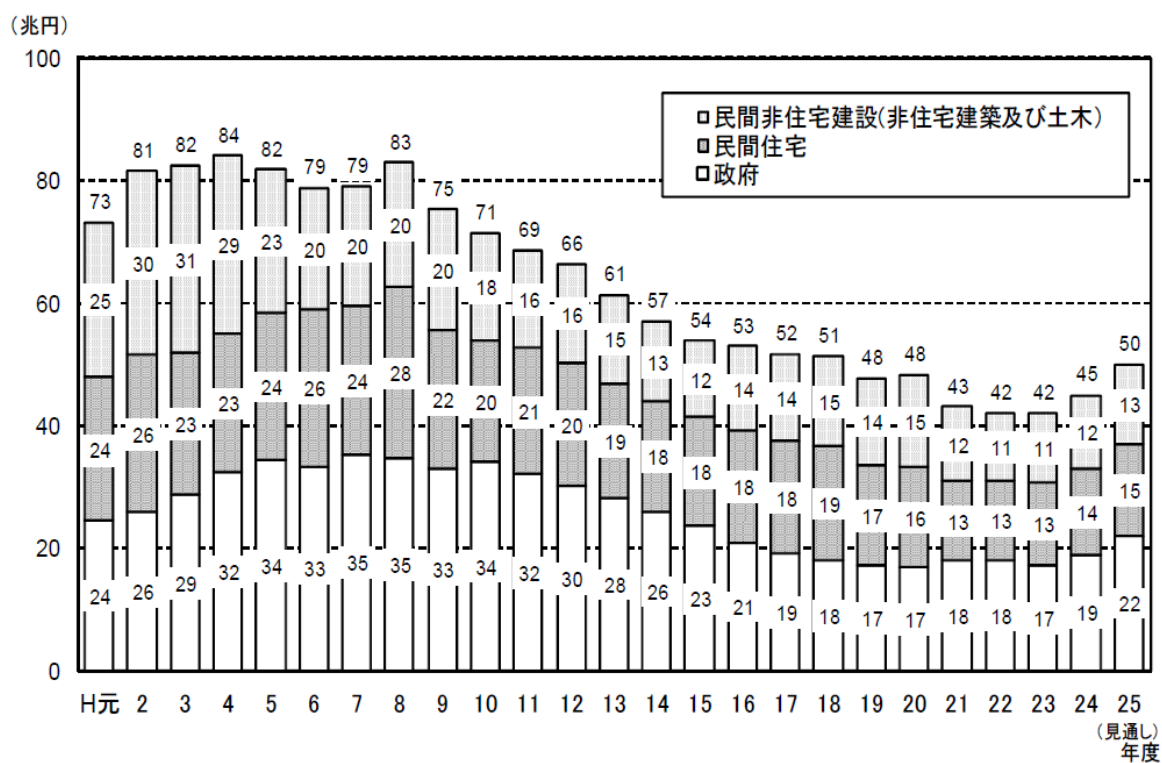


図 1-2 建設投資額推移²⁾

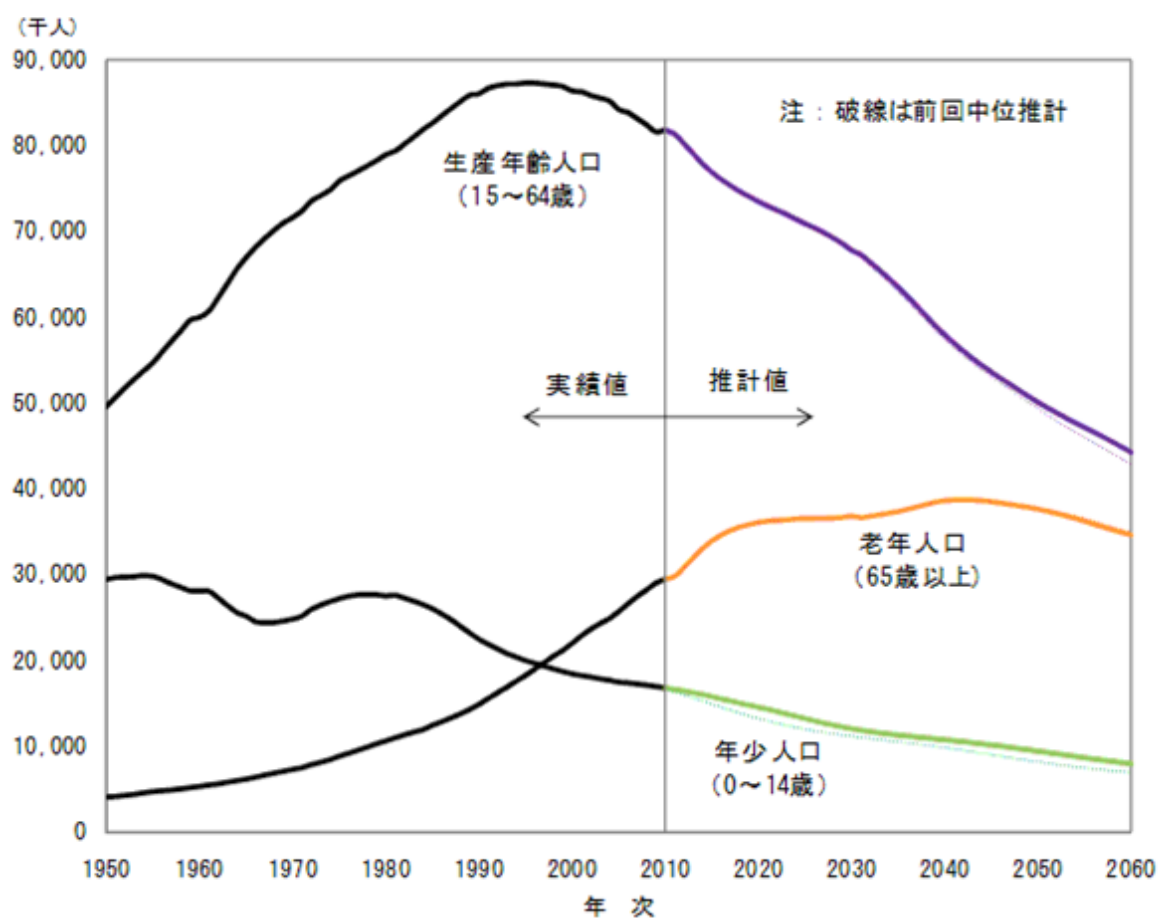


図 1-3 日本の将来推計人口³⁾

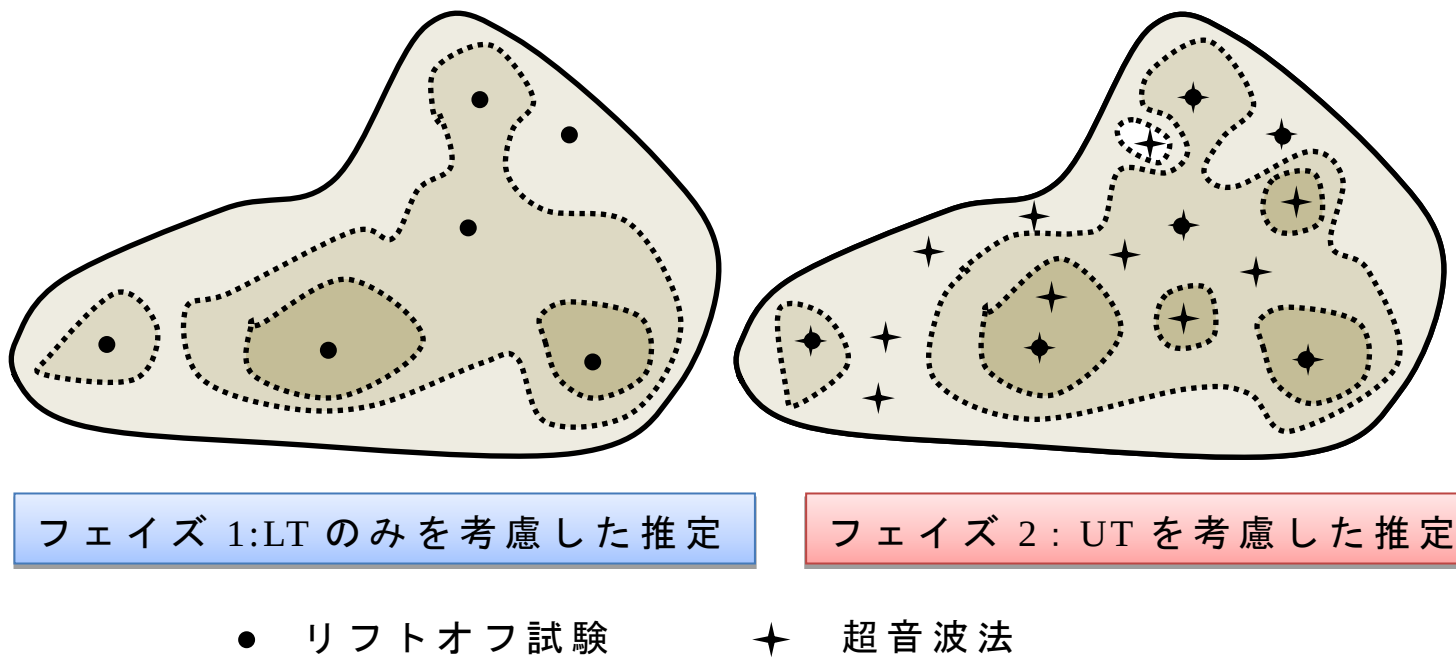


図 1-4 残存緊張力推定の概念図

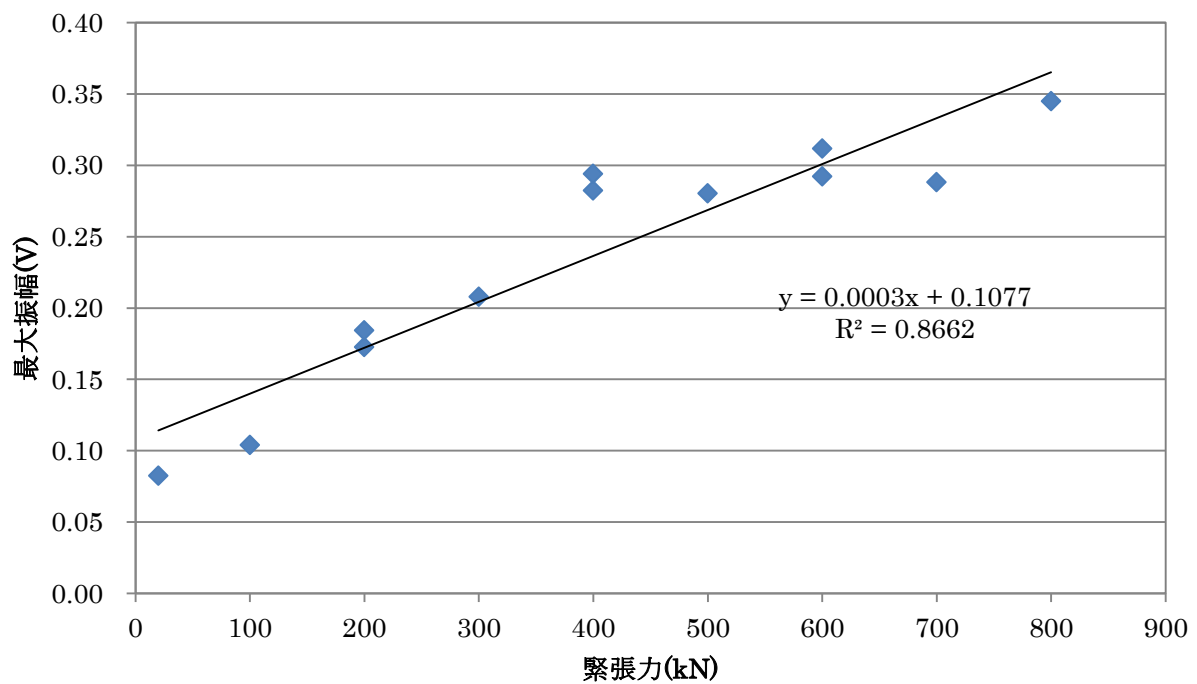


図 1-5 緊張力と最大振幅の相関関係 ⁴⁾

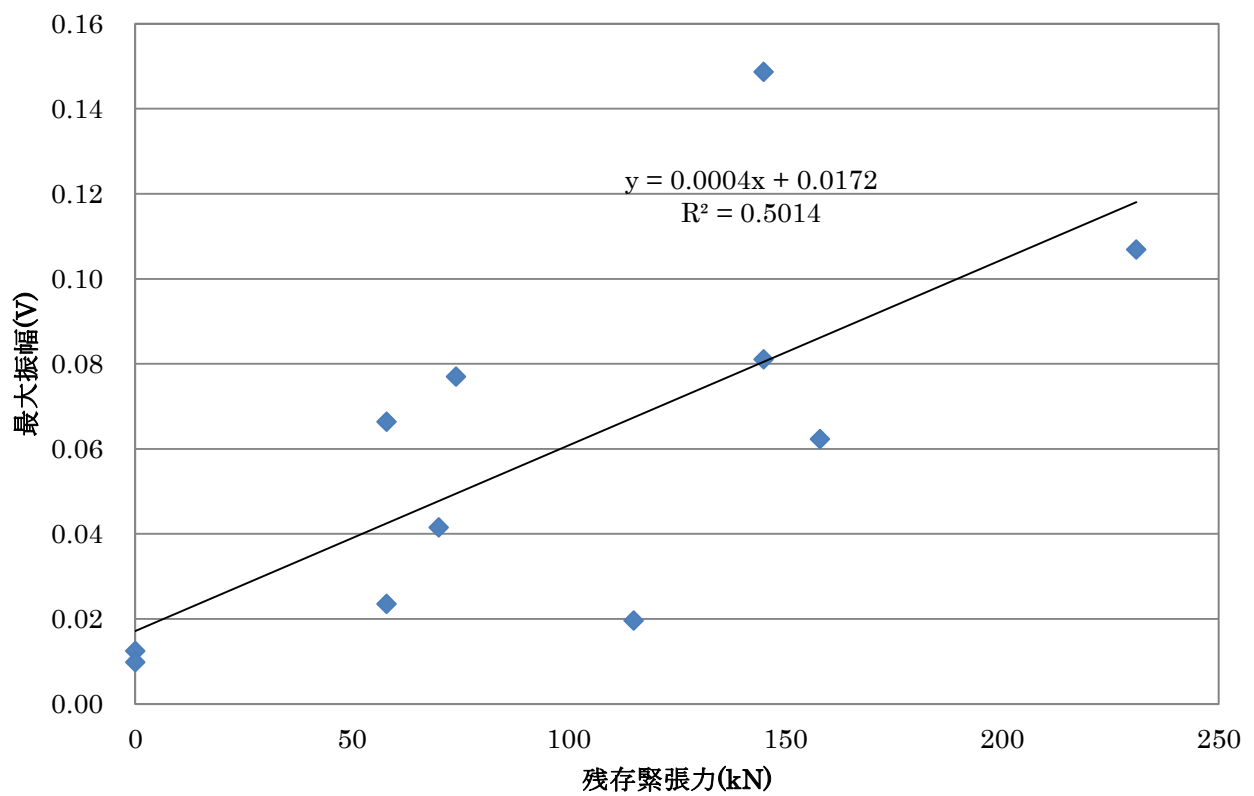


図 1-6 原位置計測結果⁴⁾

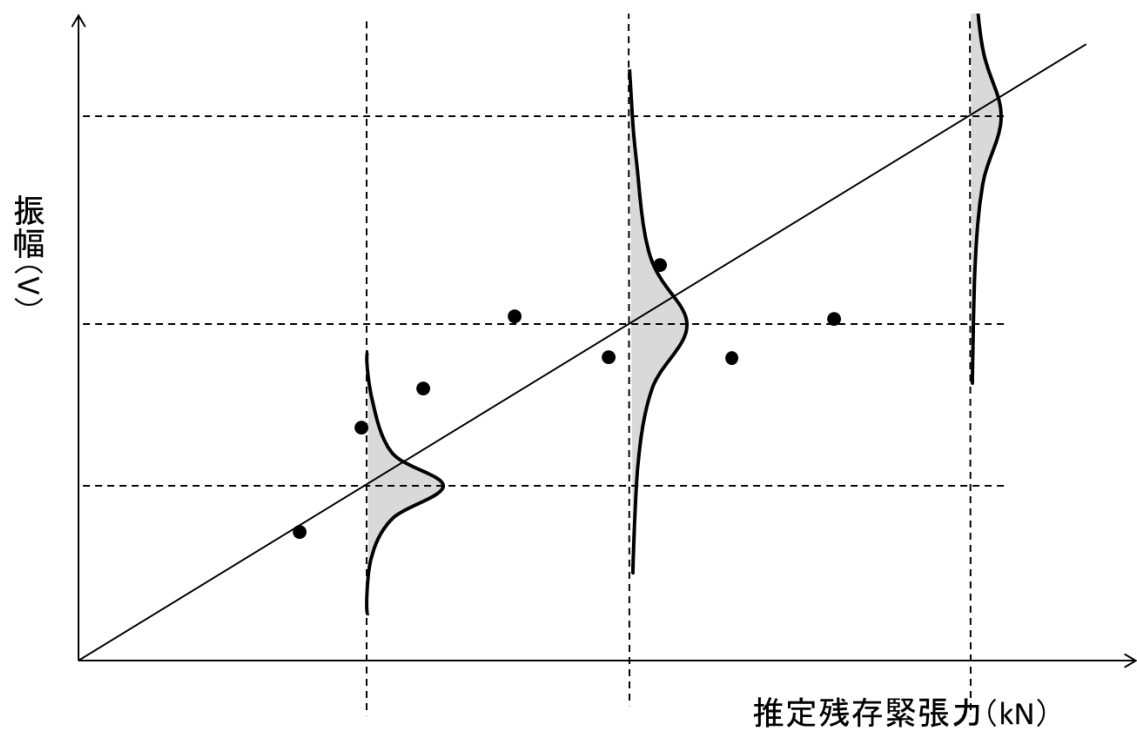


図 1-7 振幅の不確実性

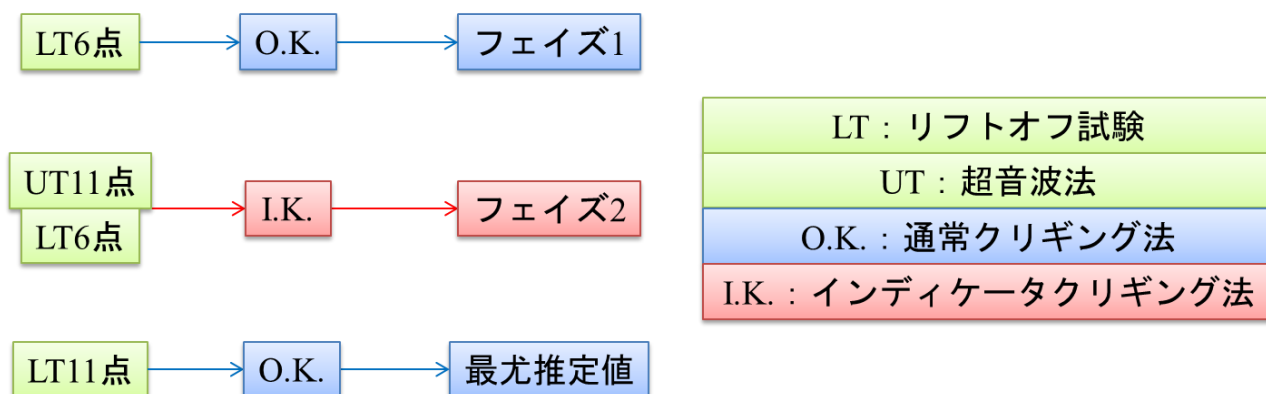


図 1-8 推定方法と本論文における呼称

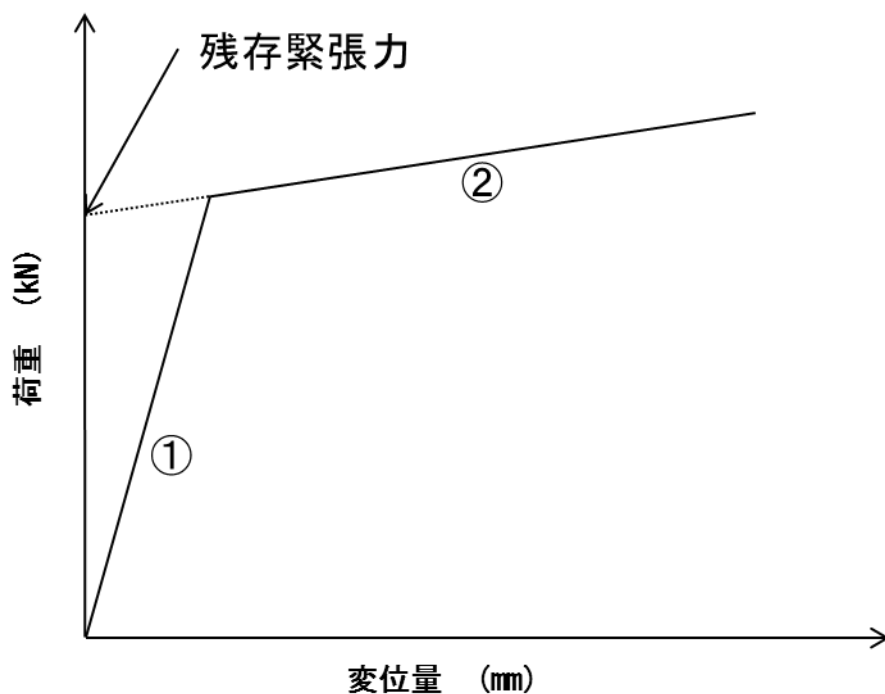


図 2-1 リフトオフ試験

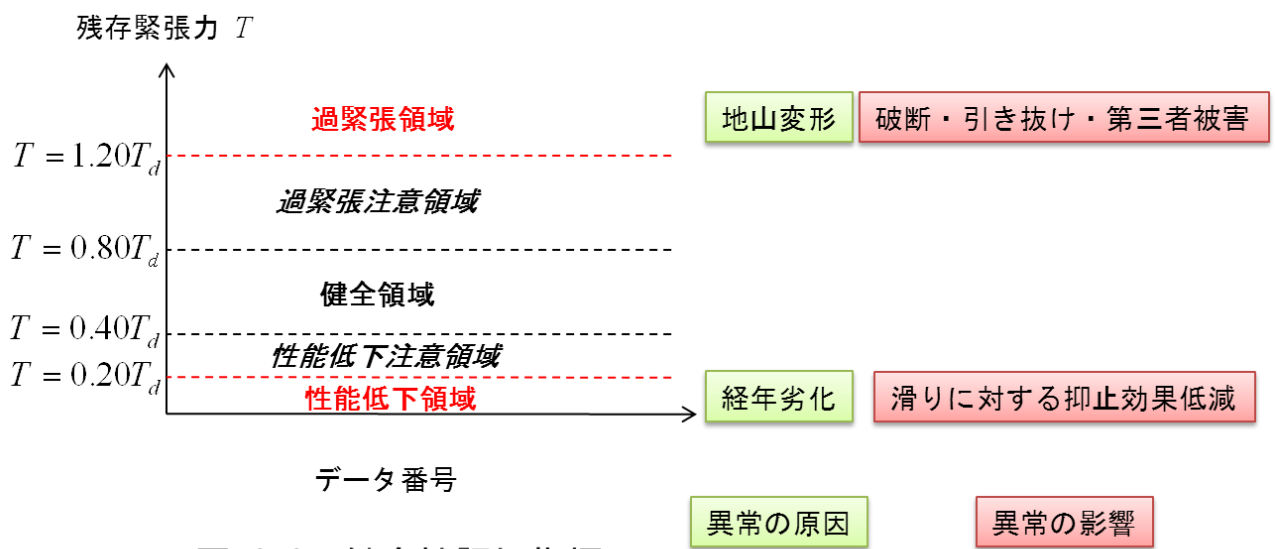


図 2-2 健全性評価指標

図 2-2 健全性評価指標

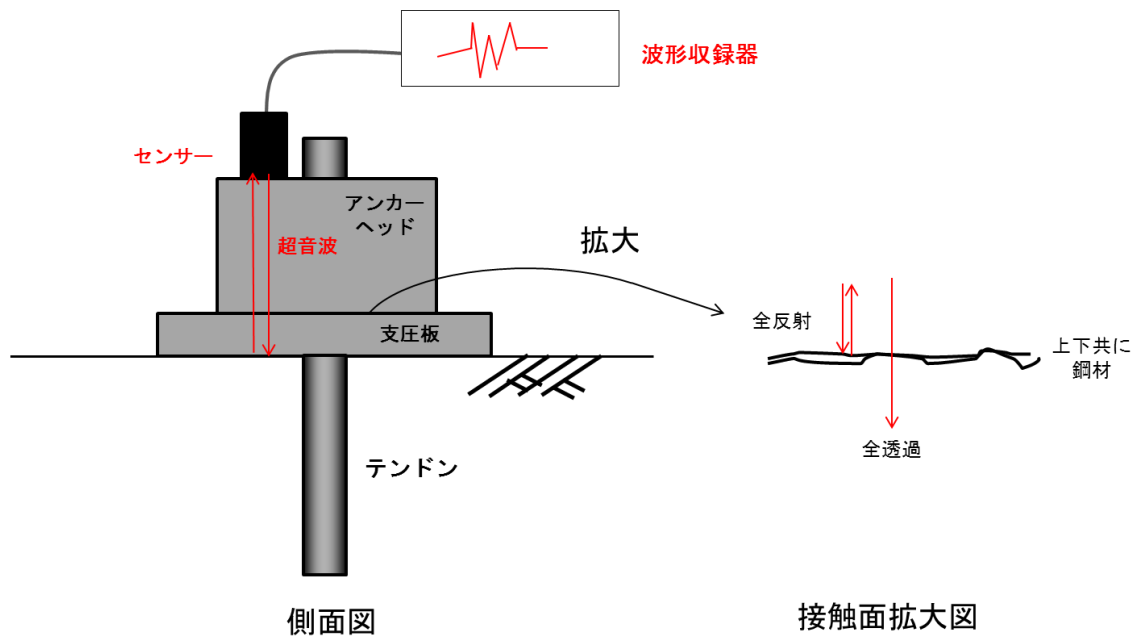


図 2-3 反射法の概要

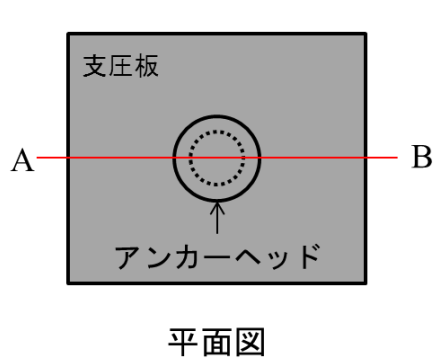


図 2-4 支圧板の穴

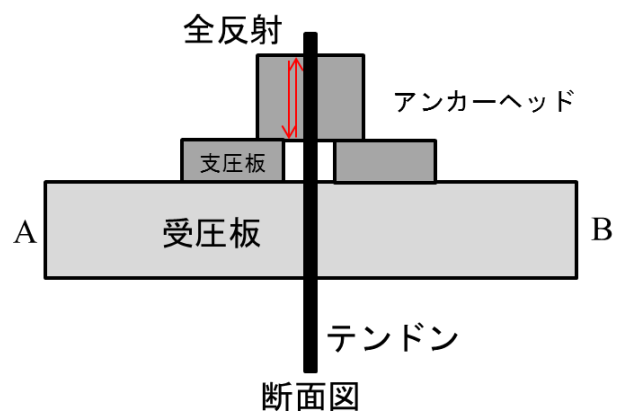


図 2-5 支圧板の穴での反射

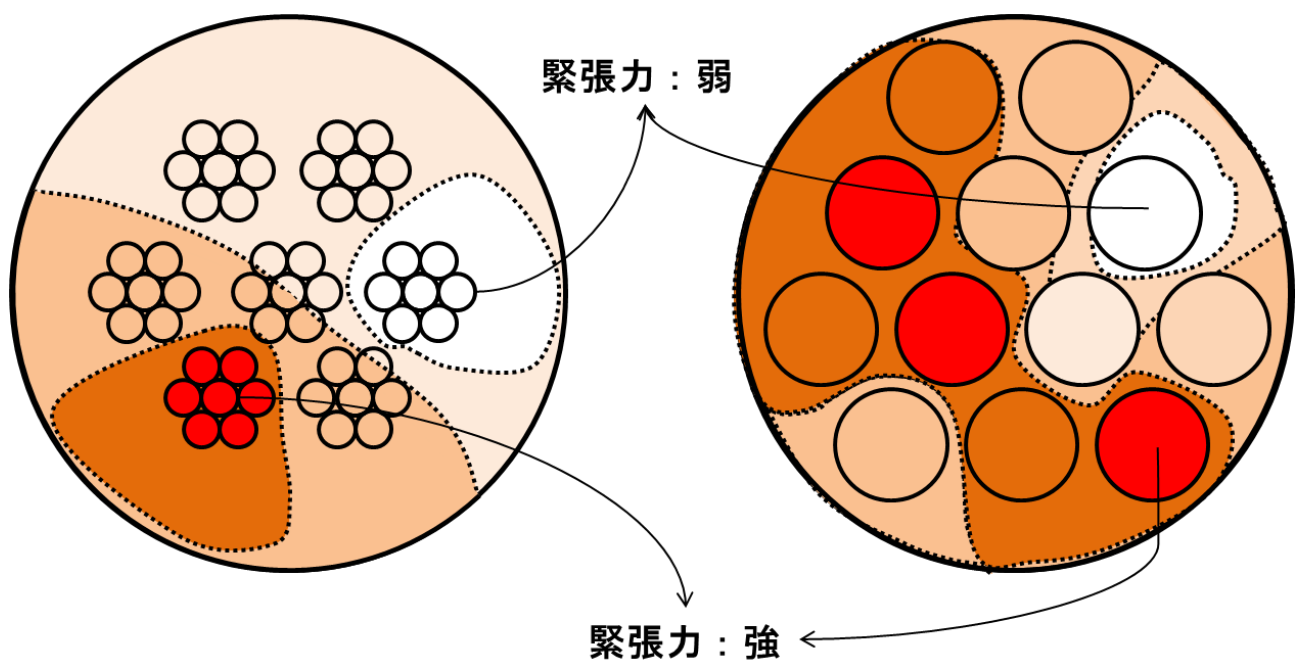


図 2-6 緊張力の偏り

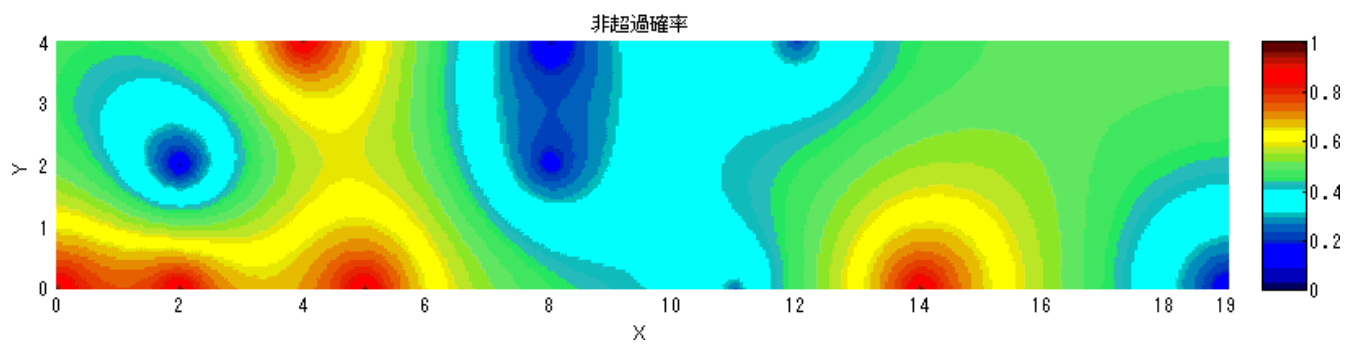


図 2-7 推定非超過確率の一例

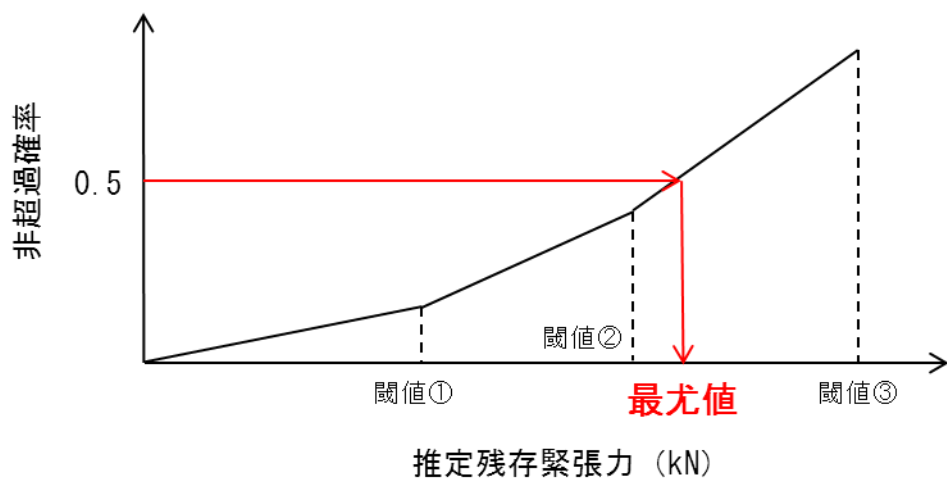


図 2-8 推定残存緊張力の最尤値決定方法

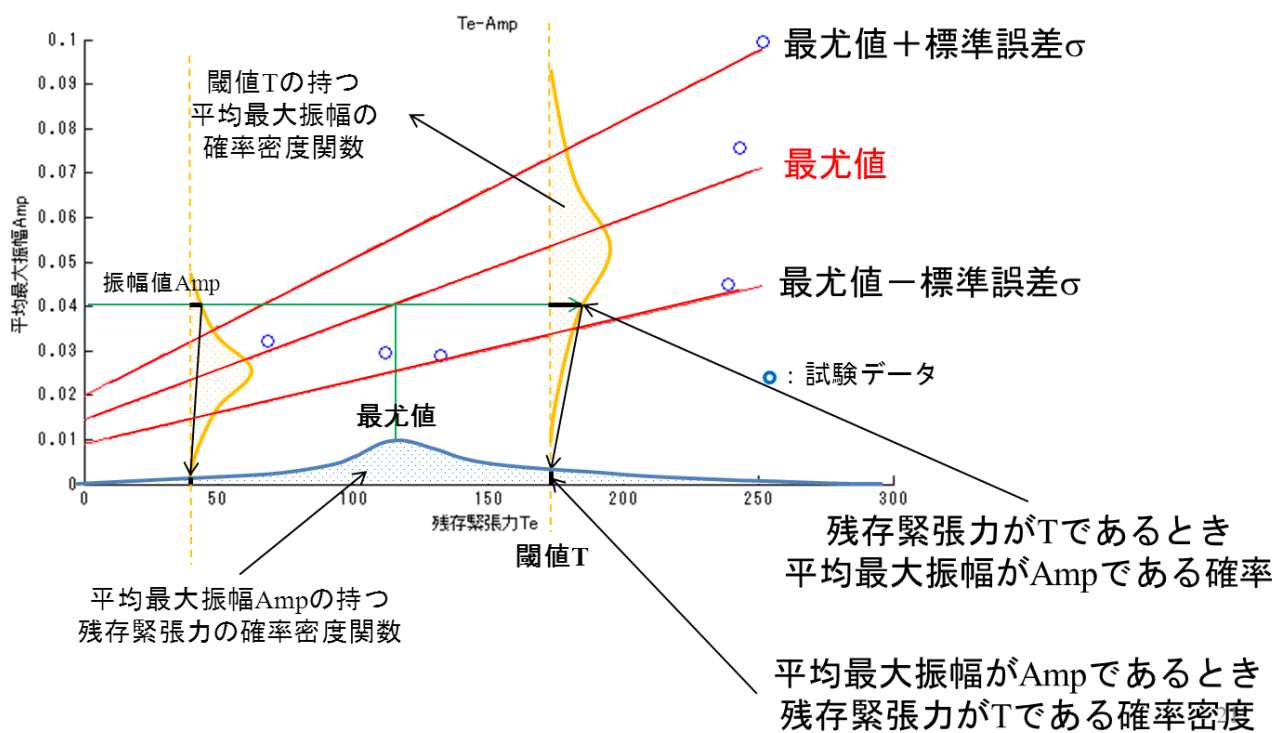


図 2-9 確率関数取得の概略図

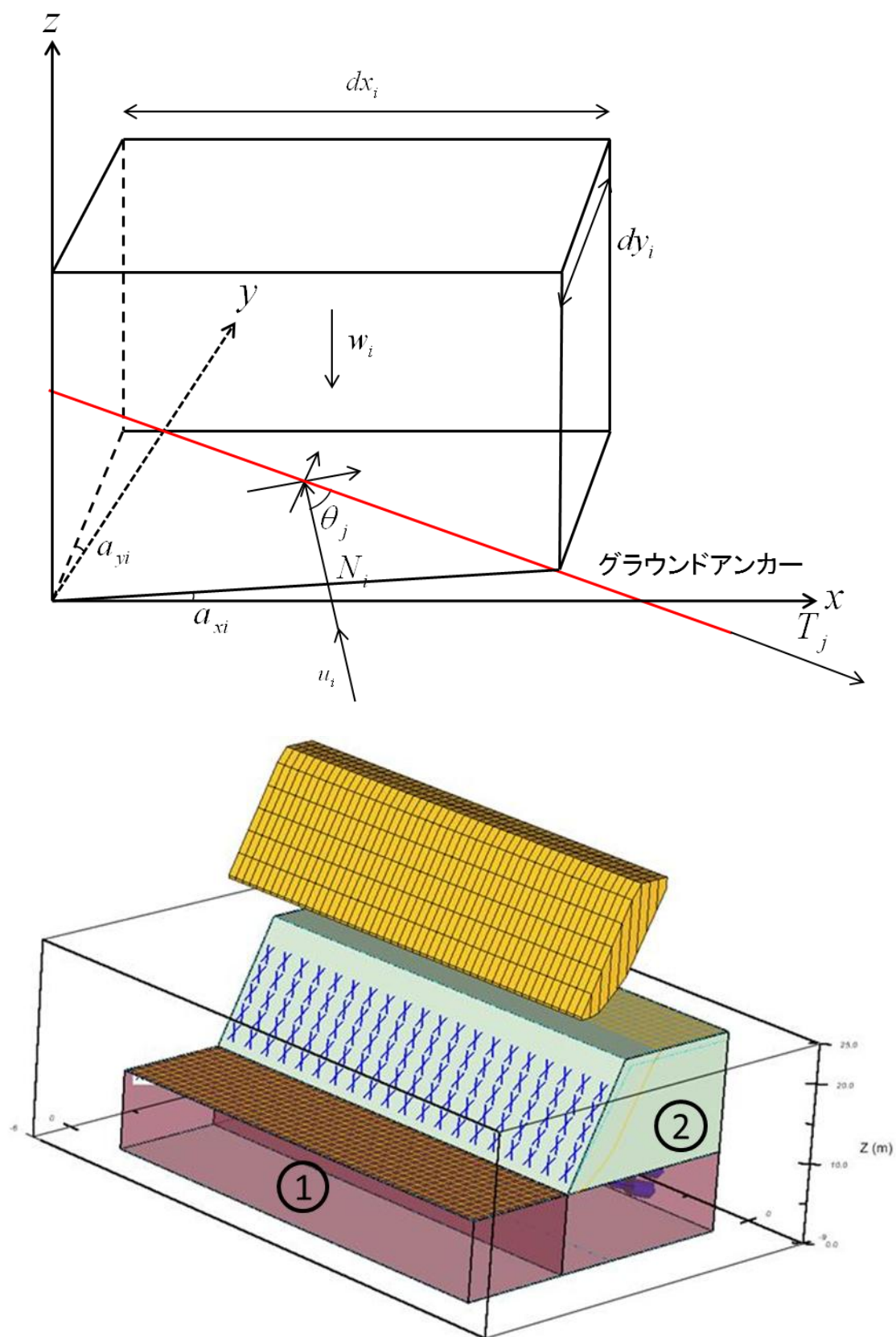
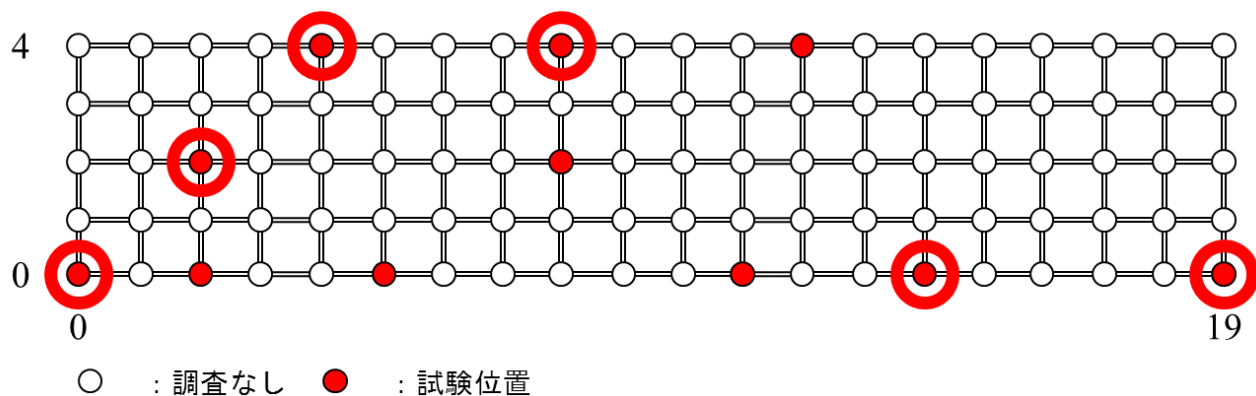


図 2-10 3次元滑り解析¹³⁾



最尤値 : 全てのLT結果を使用

フェイズ1 : ○ のLT結果を使用

LT : リフトオフ試験
UT : 超音波法

フェイズ2 : 全てのUT結果と ○ のLT結果を使用

図 3-1 超音波法及びリフトオフ試験の試験位置

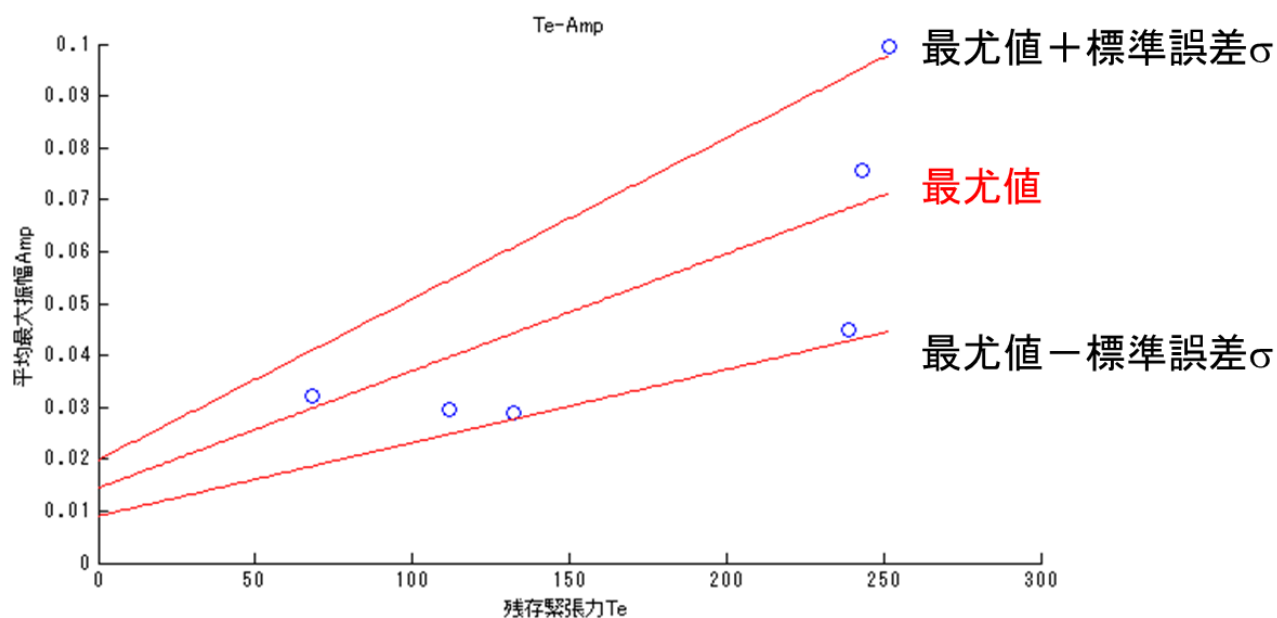


図 3-2 残存緊張力と平均最大振幅の関係

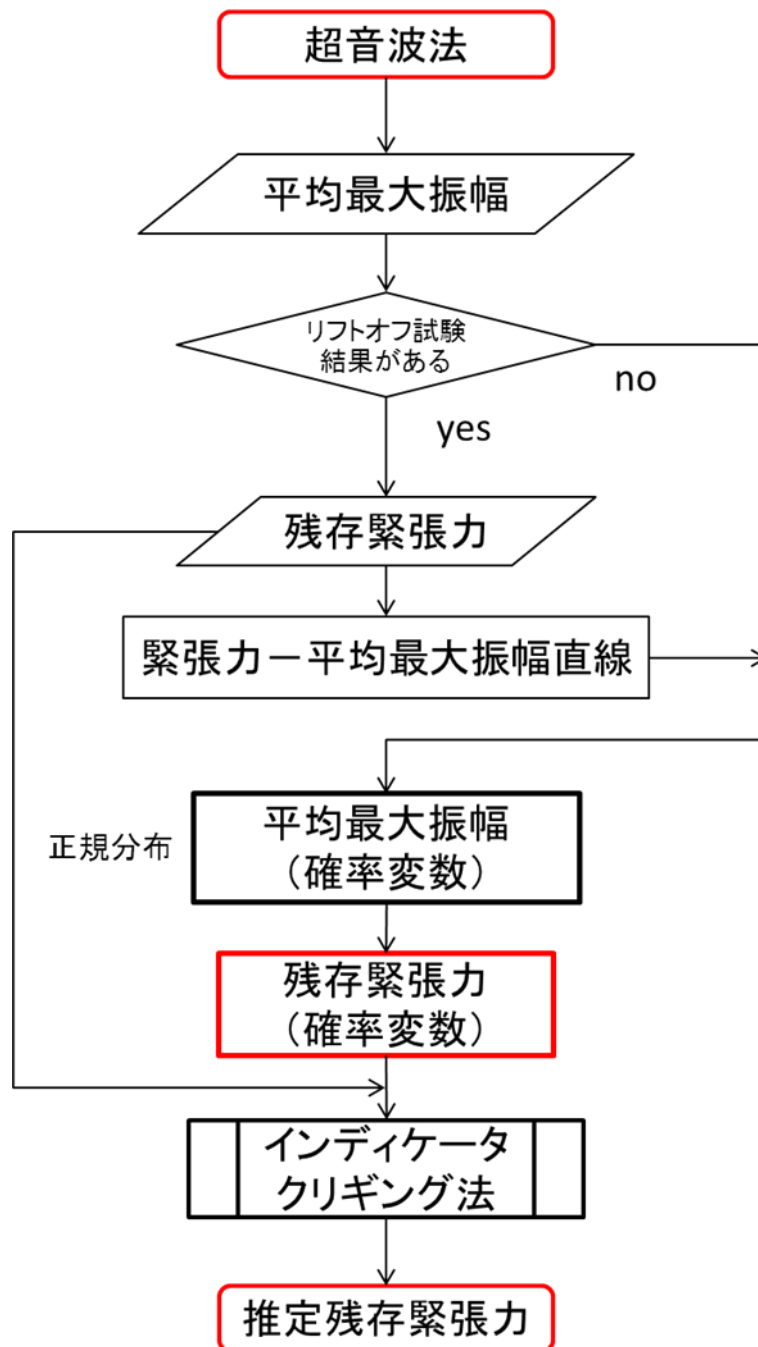


図 3-3 残存緊張力推定フロー

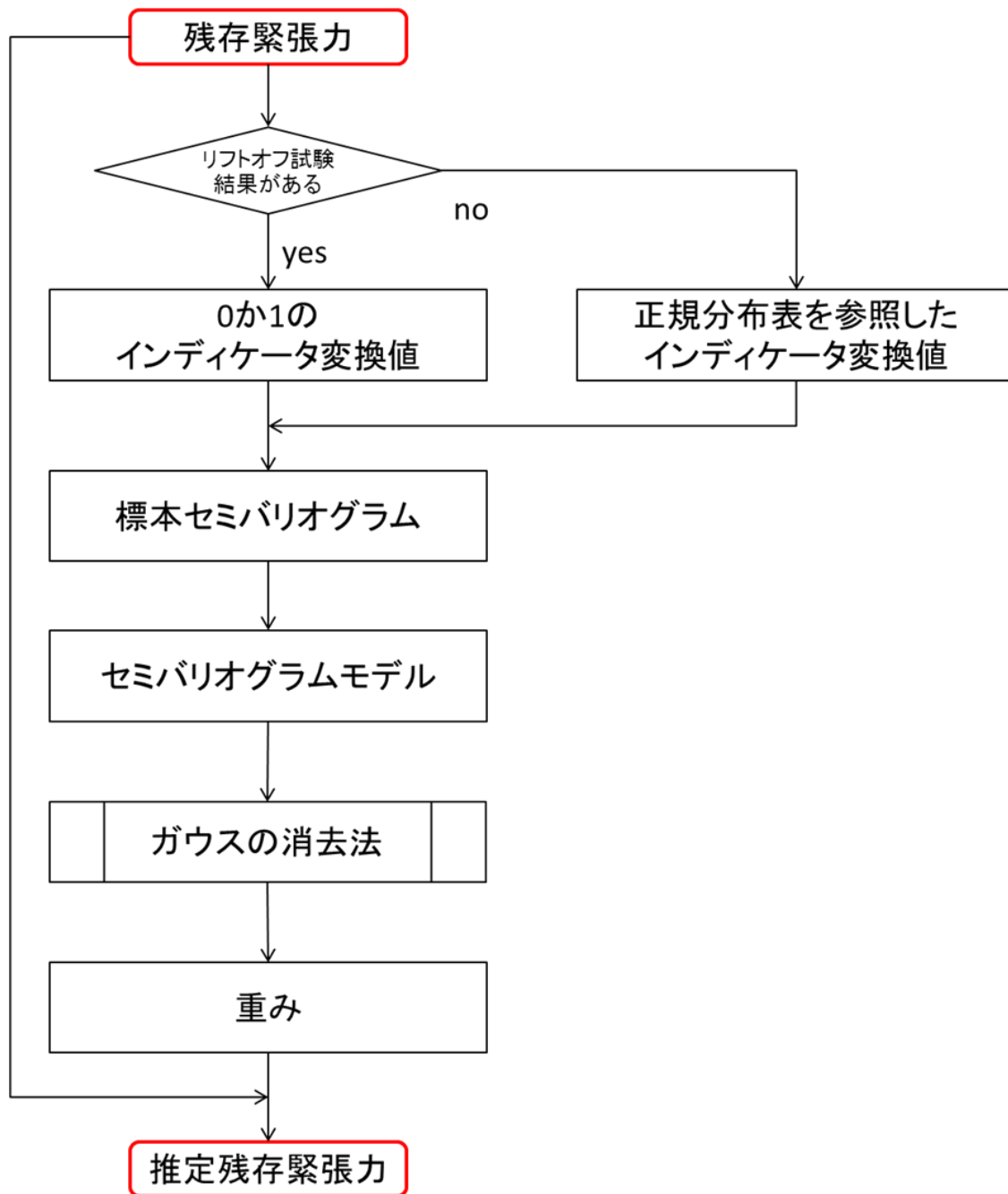
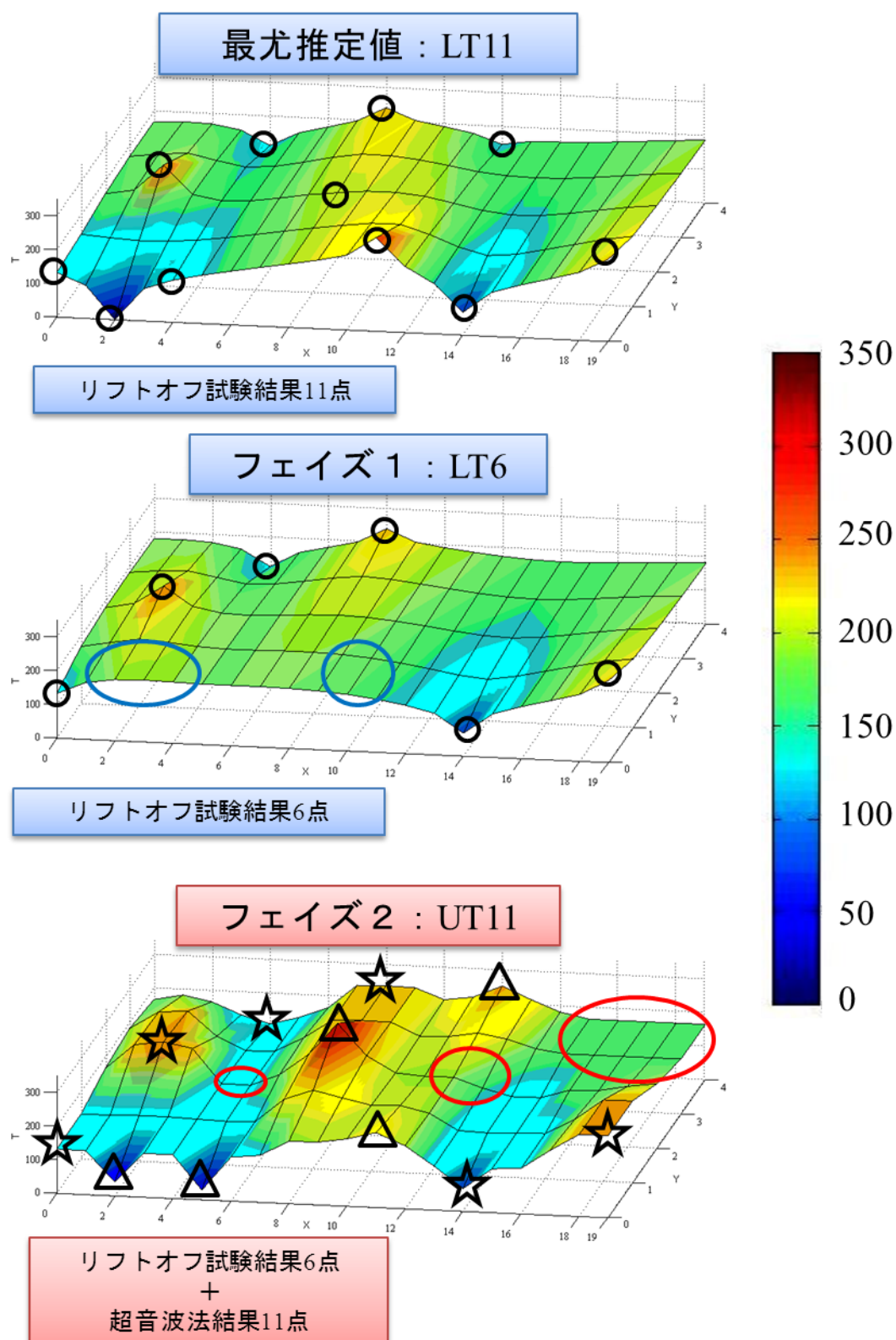


図 3-4 インディケータクリギング法計算フロー



○ 試験位置(LT) △ 試験位置(UT) ☆ 試験位置(UT & LT)

図 4-1 推定残存緊張力



図 4-2 推定残存緊張力と最尤推定値の比較

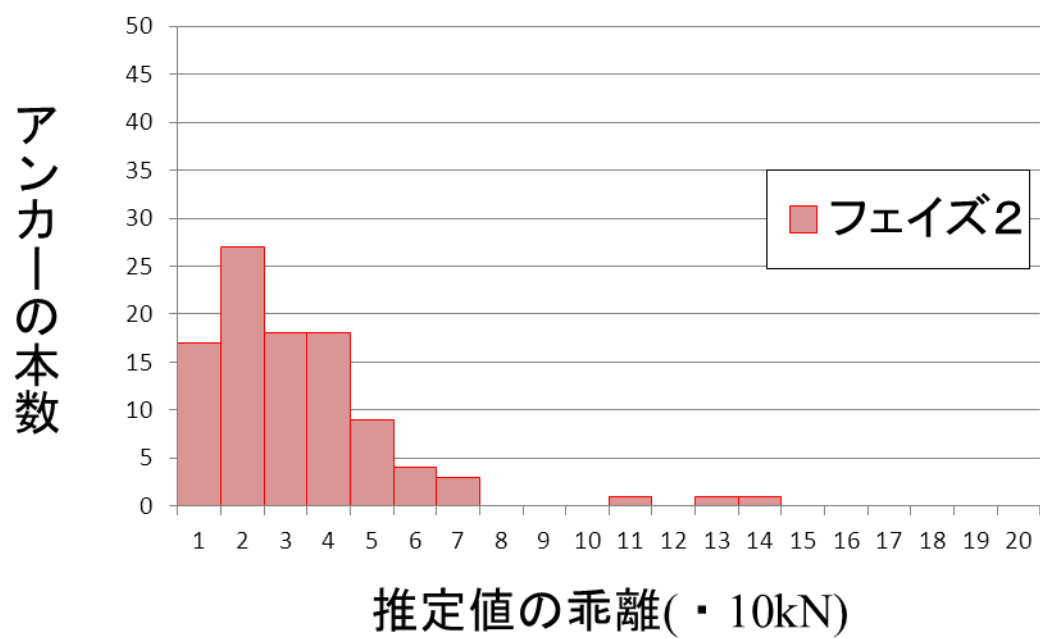
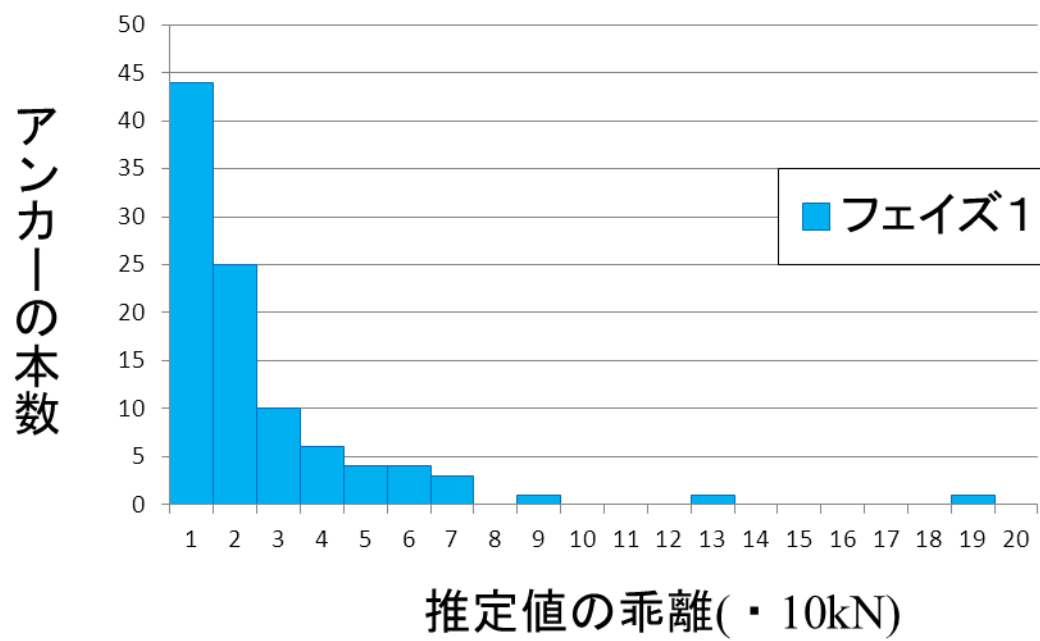
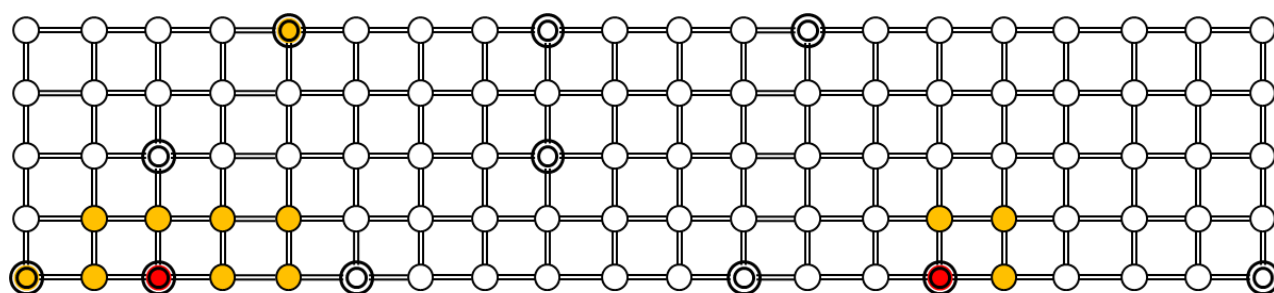
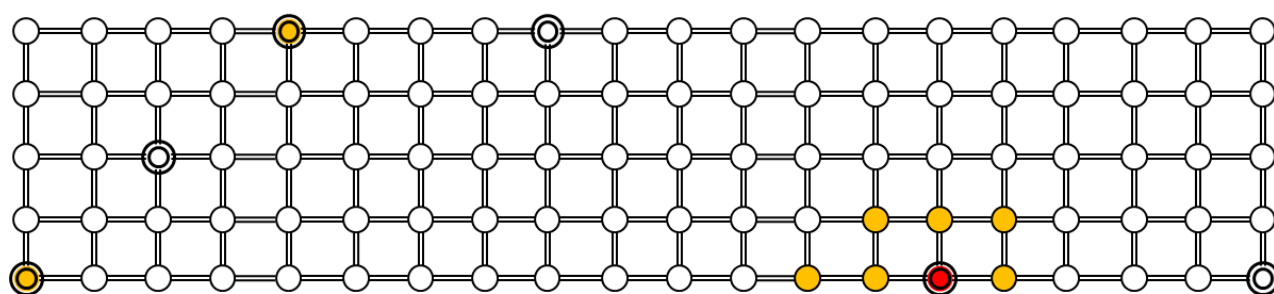


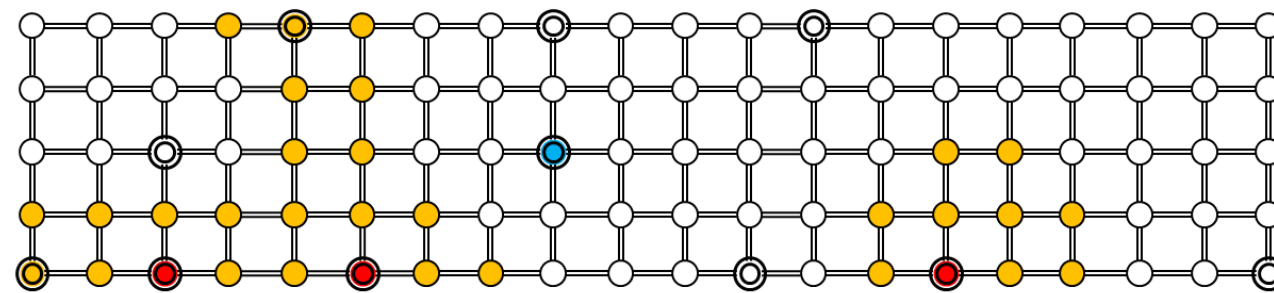
図 4-3 推定緊張力の乖離



LT11



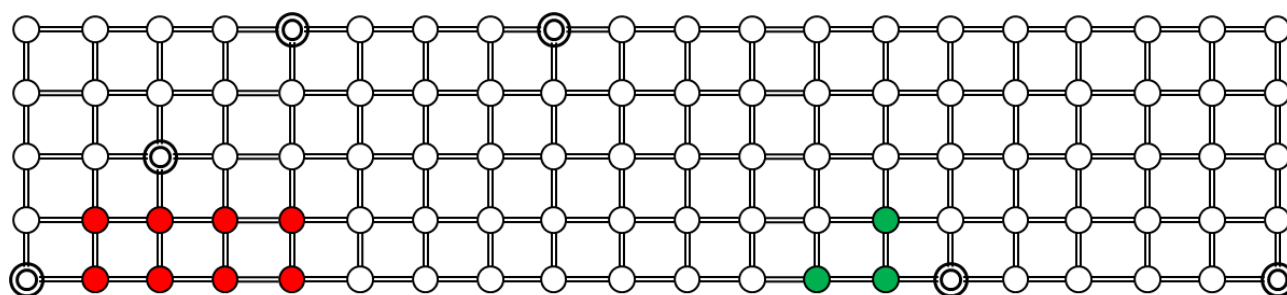
LT6



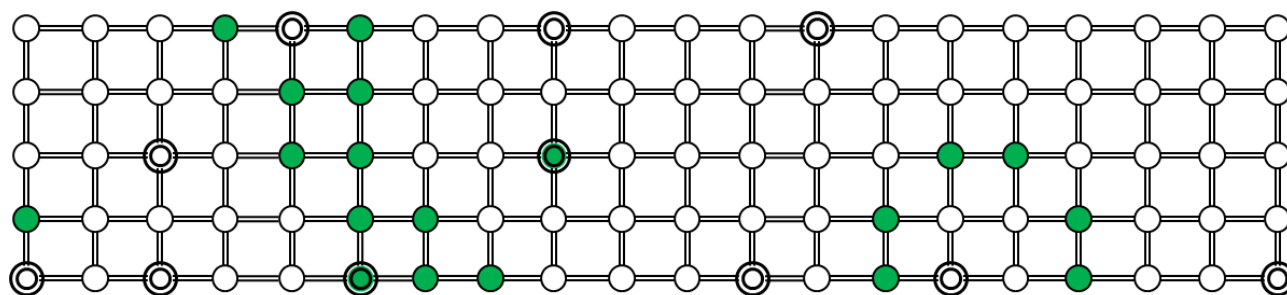
UT11

◎：試験箇所 ●：性能低下領域 ●：性能低下注意領域 ●：過緊張注意領域 ○：健全領域

図 4-4 アンカーの健全度評価



LT6



UT11

◎ : 試験箇所 ● : False Positive ● : False Negative ○ : True

図 4-5 健全度評価の LT11 との乖離

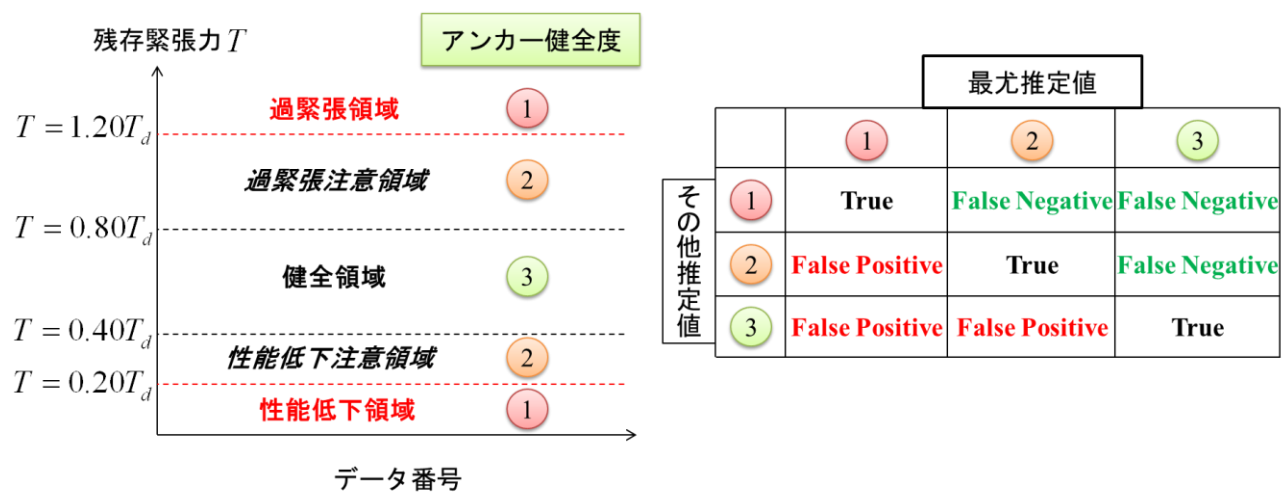


図 4-6 健全度評価の比較

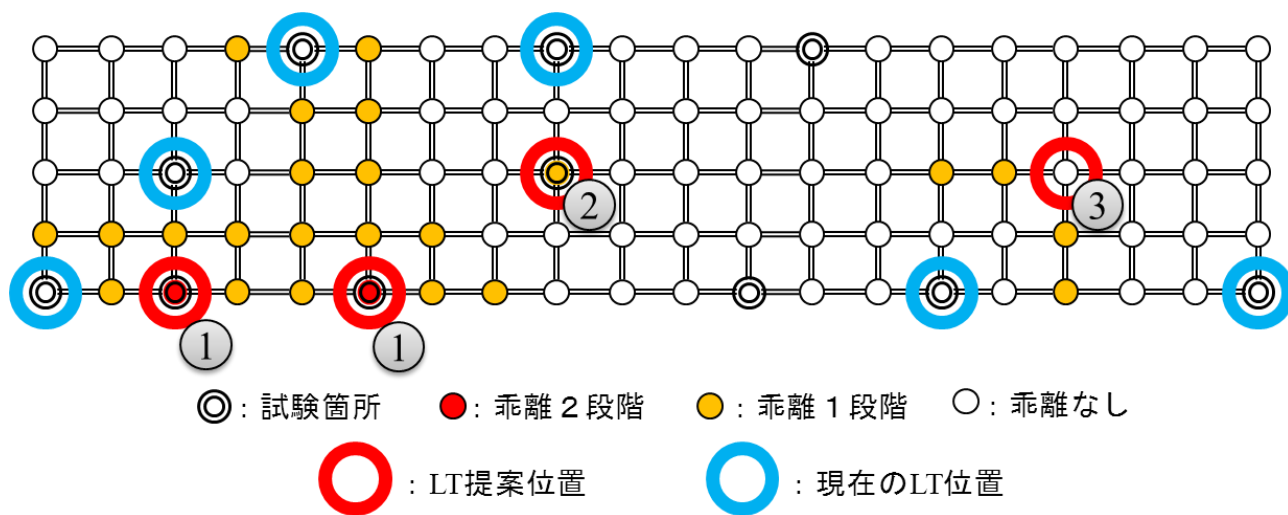


図 4-7 UT11 と LT6 の比較