

特別
寄稿地質リスク活動
「地質リスクマネジメント
による事業費の低減」はら たかし
原 隆史*

適切な地質調査によるコスト縮減」は、全国地質調査業協会連合会（以下、全地連）がかねてより言い続けてきたことである。ただ、「具体的にどうすれば、どうコストを縮減できるのか」を明確に示すことが困難で、適切な地質調査の実現にあたって克服すべき課題であった。この課題に取り組み、「適切な地質調査によるコスト縮減」を定量的に明示すること、ひいては「適切な地質調査とは何か」を提案することを目的として、地質リスク活動を行なっている。

一般にリスクとは、特定の事象に対し「それがどの程度発現しそうか」ということと「それが起きた場合にどの程度大変なことになるのか」で表現される^{※1)}、意思決定のための一つの指標である。これに対し、地質リスクとは地質に関連して発生する危険な事象の起こりやすさとこれに伴う被害損失から定義され、地質調査と地質リスクの関係を明らかにしていくことが地質リスク活動である。折しもわが国では、1998年に閣議決定された「規制緩和推進3ヵ年計画」にはじまる国家施策の一つとして、性能設計の運用と同時に信頼性に基づく設計基準への改訂が道路橋示方書をはじめとしてまさに今行われており^{※2)}、地質リスクから適切な地質調査を提案する絶好の機会と捉え、当該活動を鋭意進めている。

本報告では、信頼性に基づく新たな設計基準の安全性と地質リスク・地質調査との関係、および地質リスクにおける地盤抵抗の不確実性の影響について概説し、適切な地質調査によりどうコストを縮減できるのかといった具体的なイメージを紹介する。

※1：ISO等の定義では、対象事象の発生に伴うよい結果とわるい結果の両方が含まれるが、ここではわるい結果を取り扱う

※2：港湾では、信頼性に基づいた「港湾での施設の技術上の基準」がすでに2007年に発刊されている

(1) 設計の安全性と地質リスク・地質調査

これまでの設計における安全性は、「抵抗は荷重よりも大きい」という大前提の元、抵抗の代表値を荷重のそれよりどの程度大きく設計するかについて、経験的に決められた安全率を用いて評価してきた。これに対し信頼性に基づいた設計では、図-1に示すように、荷重と抵抗のばらつきに係わる科学的データに基づき、「抵抗は荷重よりも大きい」という前提を満足しない確率（以下、破壊確率）により安全性を評価する。すなわち、ある特定の荷重を対象とした場合、目標とする破壊確率を下回るように、対象とする構造物の抵抗のばらつきに応じて構造（断面、杭の本数など）が決定される。

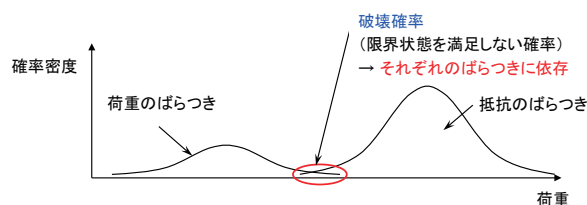


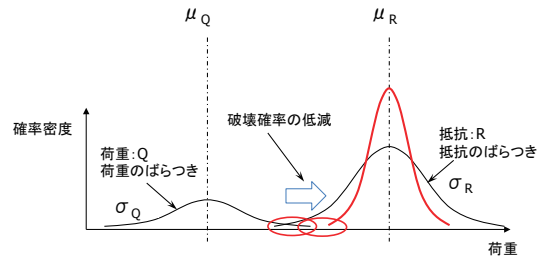
図-1 信頼性に基づいた設計

ここで、「抵抗のばらつきに応じて」というのが重要であり、この抵抗のばらつきの高さに応じて構造物の構造は変化することはいわば当たり前のことであるが、これまでの安全率を用いた設計ではこの点が十分に評価されていなかった。これ

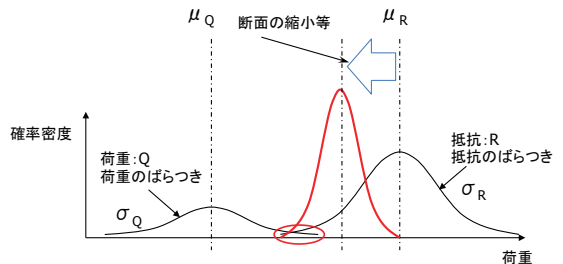
*岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授／地質リスク学会 理事

は、先人が経験的に決めてきた安全率が今日の社会基盤の安全性を支えてきたことは間違いないものの、どのように決定したのかが不明確な点が多く、明らかに異なるばらつきに対して同じ安全率を用いている例もあり、設計の安全性も不明確なものとなっていた。この結果、新たな技術や最新の研究成果が設計に活用されにくい大きな要因ともなっており、実は適切な地質調査が評価されない大きな原因の一つにもなっていた。信頼性に基づいた設計では、この点を定量的に扱うことにより、新たな技術や研究成果と同様に、適切な地質調査を評価することができるようになる。

例えば図-1で示した破壊確率は、地質リスクを対象とする事象（構造物の沈下や斜面崩壊など）の発生確率である。これに対し、地質調査により地盤の強度といった抵抗のばらつき（不確実性）を小さく出来れば、図-2(a)に示すように発生確率を低減させ、ひいては地質リスクを小さくすることができる。あるいは現在と同等の安全性（破壊確率）を満足するのでよい場合には、図-2(b)に示すように抵抗の平均値を小さくする、すなわち断面や杭本数などの構造を小さく抑えコストを縮減することも可能となる。このように、今後信頼性に基づいた設計基準が確立される中で、適切な地質調査の位置付けは、安全性の確保やコスト縮減の観点で重要なものになると考えられている。



(a) 破壊確率を低減（安全性の向上）



(b) 構造（断面、杭本数等）の縮小（コスト縮減）

図-2 地質調査で抵抗のばらつき（不確実性）を低減する効果

デル誤差である。地質調査の結果のばらつきの影響が大きいと思われる方も多いと思われるが、これが設計に及ぼす影響は以外に小さい。これは例えば円弧すべりの計算では、すべり円弧上の合計せん断力が問題となり、地盤がばらついていてもすべり円弧上のせん断力が合計される過程で平均化され、設計に用いられていることになるためである。直接基礎や杭基礎の支持力も同様なことが言える。したがって、設計に影響の大きい統計的誤差や変換誤差に対し、調査の量を増やしたり、土質試験の実施による調査の質を向上したりすることで、地盤抵抗の不確実性を確実に低減することが可能となる。なお、モデル誤差については、現地で載荷試験をするなどして不確実性を低減することが可能なため、これも調査の質の一つとして取扱えると考えられる。

(2) 地質リスクにおける地盤抵抗の不確実性

(1)では、今後適切な地質調査で地盤抵抗の不確実性を小さくすることにより、安全性やコストの面で合理的な設計が可能となることを述べた。ここで、適切な地質調査がどの観点で地盤抵抗の不確実性を低減できるのかについて触れておく。

地質調査に関連した設計上の地盤抵抗の不確実性に影響する要因を表-1に示す。これらのうち設計に影響が大きいのは、調査数量に起因する統計的誤差、調査の質に起因する変換誤差、およびモ

表-1 地盤抵抗の不確実性に影響する要因

地盤抵抗の不確実性に影響する要因		内容
1	地質調査結果のばらつき（空間分布）	同一層の場合でも、地質調査結果は一般に鉛直・水平方向にばらつく
2	調査数量による不確実性（統計的誤差）	ボーリング本数や間隔、土質試験の量等により調査の信頼性は変化する
3	地盤物性値の変換誤差（変換誤差）	例えばN値から推定したcやφなど、変換地盤定数の真値との再現性はばらつく
4	設計モデルの再現性（モデル誤差）	支持力式などの設計式やFEM解析など、計算方法に応じて実態挙動の再現性は異なるとともにばらつく

(3) 適切な地質調査によるコスト縮減

(2) では、調査の量や質の向上で地盤抵抗の不確実性を小さくできることを述べ、この結果により安全性の確保やコストの縮減を可能とできることは(1)で述べた。地質リスク活動では、これらに関する具体的な事例を収集し分析することで、「適切な地質調査によるコスト縮減」の実現を目指している。

以下に、今後地質リスク活動で収集していこうとしている対象事例のイメージを示す。

1) 調査の量を増加して事業費を低減する

事例のイメージ-1

本城や大竹らの研究^{1)~4)}によれば、道路盛土や河川堤防など線状構造物の安定や変状の問題で、基礎地盤の調査箇所を増やすことにより地盤抵抗の不確実性が低減され、設計の信頼性の向上により、対策工を低減できる可能性が大きいことが指摘されている。ここでは、これが具体的にどのようにコスト縮減へつながるのかといったイメージを示す。

現場は、地震時に液状化の発生が懸念される地盤上の既設河川堤防であり、別途代表断面におけるFEM解析を用いた地盤条件のパラメトリックスタディにより、PL値15が対策実施の閾値になっているものと仮定する。ここでの例では、河川堤防の5kmの区間を対象とし、500m間隔で既設ボーリング(N値計測)があり、これを用いて対策区間を設定する場合と、さらに5本の追加ボーリング(N値計測)をした場合との対策範囲を比較する。検討結果の不確実性としては、N値からFL値を求める推定誤差、地盤のばらつき、FEM解析の再現性、信頼性解析の不確実性を考慮するものとする。すなわち、各ボーリング箇所では計算されるPL値は、これらの不確実性によりばらついている。さらにこのばらつきは、調査箇所間の距離と調査結果の水平方向の自己相関距離の関係で大きくなる。このことは、調査していない箇所のPL値は調査箇所のそれより信頼性が劣ること、隣り合う調査箇所のPL値に差が大きければその間の調査していない箇所の信頼性がより劣ることはイメージしやすいと考える。

既設ボーリングから設定した対策範囲を図-3に示す。ここで、各既設ボーリング箇所では計算されたPL値に対し、受容損傷確率を10%とした場合の10%超過確率を破線で示している。10%超過確率は、計算PL値に対し先に述べた各不確実性により大きめのところにあり、さらに調査箇所間で隣

り合う調査箇所までの距離とPL値の差に応じて大きくなっている。この10%超過確率の線が対策の閾値である15を超える範囲が対策範囲であり、この例ではほぼ全線に渡って要対策範囲と評価されている。

これに対し、追加ボーリングを5本追加した場合の対策範囲を図-4に示す。ここでは、追加ボーリング箇所では比較的小さいPL値が計算されたこと、追加ボーリング箇所では調査箇所間の距離と既設ボーリングのPL値との差が小さいことから、調査箇所間の10%超過確率が小さくなっていることが分かる。この結果、要対策範囲が既設ボーリングの場合と比較して約2/3にできると評価されている。

実際の設計では追加ボーリングの位置を色々と検討し、最適な位置を決めることが適切な地質調査となるが、このように信頼性に基づく設計により、調査の量と事業費との関係を定量的に示すことができる。

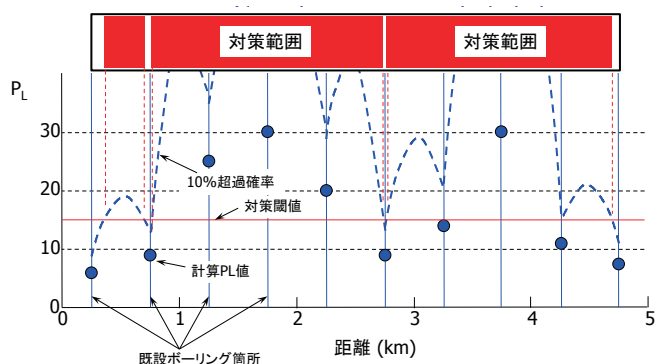


図-3 既設ボーリングによる対策範囲

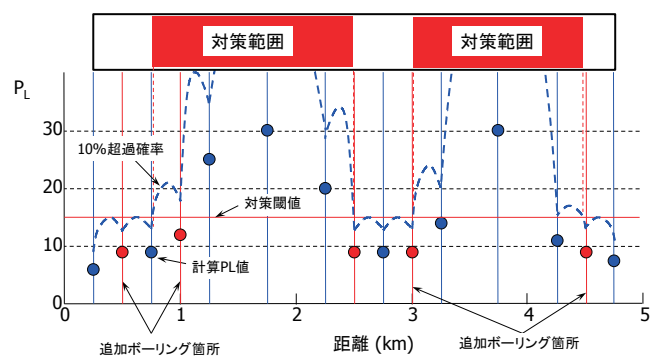


図-4 追加ボーリング後の対策範囲

2) 調査の量を増加して事業費を低減する

事例のイメージ-2

ここでは、軟弱地盤上に延長の長い盛土を構築する場合の調査数量が盛土の設計に及ぼす影響について、そのイメージを示す。

盛土の形状を図-5に示すが、盛土の単位体積重量は 18kN/m^3 である。また、基礎地盤は盛土高さと比較して十分に厚い腐植土層であり、単位体積重量は 2kN/m^3 である。本事例では、安全率が1.0を満足する目標信頼性をISO2394⁵⁾の例より $\beta = 2.32$ 以上(破壊確率1.0%以下)とし、調査数量(4箇所と10箇所)の違いが設計結果に及ぼす影響について例示する。この際、実際の盛土では、沈下量に相当する量を余計に盛ることとなるが、ここでは考慮しない。

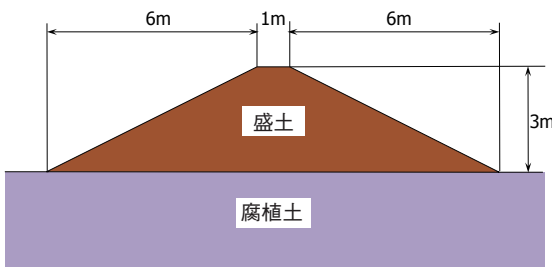


図-5 盛土形状

ここで、腐植土の粘着力は、延長方向に4箇所の調査を行った場合と10箇所の調査を行った場合で、偶然に両方正規分布で平均値:10kPa、標準偏差:4kPaと同じ結果が得られたとする。この場合の設計上の粘着力を表-2に示す。これは、例えば地盤調査の結果同じ値が得られたとしても、4箇所と10箇所では調査の信頼性が異なることを既往の文献⁶⁾から仮定したものである。なお、調査数量が4箇所でも10箇所でも水平方向の自己相関距離は調査間隔と比較して非常に小さいことを仮定している。

表-2 設計上の粘着力のばらつき (kPa)

調査数量	平均値	標準偏差
4箇所の場合	10 (1.0)	1.6 (0.16)
10箇所の場合	10 (1.0)	0.8 (0.08)

() は、平均値を1.0とした値

解析は円弧すべり計算とするが、別途式(1)に示す安全率を推定する応答曲面^{*}が得られており、

その再現性は正規分布で平均値:1.0、標準偏差0.05であったとする。

※ 応答曲面¹⁾: 別途地盤解析を行い、これを再現する近似式

$$F_s = -8.13 + 1.16 \cdot c \quad (1)$$

ここで、 c : 粘着力

この場合の信頼性の算出式は以下のとおりとなる。

なお、円弧すべり計算の実態挙動の再現性、すなわちモデル誤差については、調査数量が異なっても同じ条件のためここでは考慮しない。

性能関数:

$$g = F_s - 1 > 0 \quad (2)$$

安全率の推定:

$$F_s = \delta_{RS} \cdot (-8.13 + 1.16 \cdot \delta_c \cdot c) \quad (3)$$

ここで、 δ_{RS} 、 δ_c : 応答曲面と粘着力の平均値を1.0とした不確かさ

解析結果を表-3に示す。

この結果から分かるとおり、4箇所の調査結果ではNGとなるが、10箇所の調査結果では信頼性の観点でOKになっている。すなわち、例えば調査で同じ結果が得られた場合でも、多くの調査を実施した方が経済的な設計を行うことができる。

表-3 解析結果

調査数量	信頼性		判定
	β	Pf (%)	
4箇所の場合	1.95	2.5	NG
10箇所の場合	3.86	$5.6 \cdot 10^{-3}$	OK

3) 調査の質を向上して事業費を低減する

事例のイメージ-1

ここでは、2)の事例に対し、10箇所の調査が標準貫入試験だった場合を仮定して計算を行う。N値から粘着力を推定する場合には、調査結果のばらつきに加え、N値から粘着力を推定する誤差を考慮しなければならない。考慮する不確かさを表-4に示す。

表-4 N値から設計する際に考慮する不確かさ

項目	平均値	標準偏差	備考
調査結果のばらつき	1.0	0.08	正規分布
粘着力の推定誤差 ^{※1}	1.0 ^{※2}	0.45	正規分布

※1 粘着力の推定誤差は仮定値(ただし、参考として文献7))。

※2 通常N値から c を推定する場合には、平均値の0.1~0.3といった下限値付近の値となる。しかしながら、これを適用して事例2)を土質試験結果からの推定として比較する場合には、事例2)の土質試験結果の粘着力にN値からの推定のバイアスの逆数を乗じる必要がある。そこで、ここでは事例2)と単純比較できるように1.0とした。

この場合の信頼性の算出式は以下のとおりとなる。

性能関数：

$$g = F_s - 1 > 0 \quad (2)$$

安全率の推定：

$$F_s = \delta_{RS} \cdot \delta_{RS} \cdot (-8.13 + 1.16 \cdot \delta_N \cdot \delta_{Ec} \cdot c) \quad (3)$$

ここで、 δ_{RS} 、 $\delta_N \cdot \delta_{Ec}$ ：応答曲面の不確実性、 N 値のばらつき（事例2）の c のばらつきと等価とした）、および粘着力の推定誤差

解析結果を事例2) を土質試験結果とした場合と比較して表-5に示す。

この結果から分かるとおり、 N 値から設計を行う場合には、 N 値から粘着力を推定する不確実性が大きく、不経済な設計となることが確認された。特に事例2) における4箇所の土質試験をした場合よりも大きい信頼性を低下させており、少数の土質試験であってもこれを実施することによる信頼性への影響、ひいては経済性に及ぼす影響は大きいことが確認される。

表-5 解析結果

調査方法	信頼性		判定
	β	Pf (%)	
土質試験	3.86	$5.6 \cdot 10^{-3}$	OK
標準貫入試験	0.62	26.8	NG

4) 調査の質を向上して事業費を低減する

事例のイメージ-2

ここでは、図-6に示す自立式山留めに対し、孔内水平載荷試験と N 値から変形係数を推定する場合との設計結果の違いについて示す。両者の違

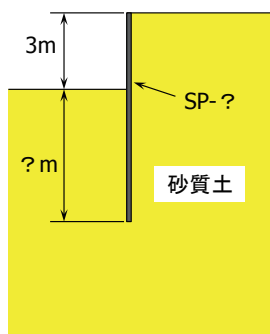


図-6 土留の形状

いを明らかにするため、得られる変形係数とそのばらつきは等価なものとする。それぞれの水平地盤反力係数とその不確実性を表-6に示す。

なお、本事例では、土留材は鋼矢板とし、両者に共通する土圧および設計式のモデル誤差は確定値として取り扱う。また、土留の設計の目標信頼性は、ISO2394の例より $\beta = 1.5$ 以上 ($P_f = 6.5\%$ 以下) とする。

表-6 水平地盤反力係数の不確実性

項目	水平方向地盤反力係数 (kN/m ³)	項目	平均値	標準偏差	備考
孔内水平載荷試験	7,000	調査結果のばらつき	1.0	0.10	正規分布
		推定誤差	1.0	0.25	正規分布
標準貫入試験	7,000	調査結果のばらつき	1.0	0.10	正規分布
		推定誤差	1.0	0.60	正規分布

ここでの性能関数と設計式は以下のとおりとなる。

性能関数：

$$g = \beta \cdot 1 - 2.5 > 0 \text{ (根入れ)}$$

$$g = \sigma_a - \sigma > 0 \text{ (断面)}$$

$$g = \delta_a - \delta > 0 \text{ (変位)}$$

設計式⁸⁾：

$$\beta^* \cdot l = \sqrt[4]{\frac{\delta_E \cdot \delta_k \cdot k_H \cdot B}{4 \cdot E \cdot I}} \cdot l \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{P}{2 \cdot \beta^* \cdot z} \cdot \sqrt{(1 + 2 \cdot \beta^* \cdot h_0)^2 + 1} \cdot \exp\left(-\tan^{-1} \frac{1}{1 + 2 \cdot \beta^* \cdot h_0}\right) \quad (5)$$

$$\delta = \frac{(1 + \beta^* \cdot h_0)}{2 \cdot E \cdot I \cdot \beta^{*3}} \cdot P + \frac{(1 + 2 \cdot \beta^* \cdot h_0)}{2 \cdot E \cdot I \cdot \beta^{*2}} \cdot P \cdot H + \frac{P \cdot h_0 \cdot H^2}{5 \cdot E \cdot I} \quad (6)$$

ここで、 β^* ：杭の特性値 (m^{-1}) で、式 (7) により、水平地盤反力係数の不確実性を考慮して求める。

$$\beta^* = \sqrt[4]{\frac{\delta_E \cdot \delta_k \cdot k_H \cdot B}{4 \cdot E \cdot I}} \quad (7)$$

l ：根入れ長 (m)、 σ 、 δ ：最大発生応力度 (kN/m^2) と変位量 (m)、 σ_a 、 δ_a ：発生応力度 (kN/m^2) と変位量 (m) の制限値で $265 kN/mm^2$ (軽量で 205) と $0.09m$ 、 δ_E 、 δ_k ：水平方向地盤反力係数の調査結果と推定誤差の不確実性、 k_H ：水平方向地盤反力係数 (kN/m^3)、 B ：載荷幅で $1.0m$ 、 EI ：鋼矢板の曲げ剛性 (kNm^2) で継手効率から 45% に低減して用いる、 P ：土圧合力 (kN) で $32kN$ 、 z ：鋼矢板の断面係数 (m^3) で継手効率から 60% に低減して用いる、 h_0 ：掘削底面から土圧合力の作用位置までの距離 (m)、 H ：掘削深さ (m)

なお、設計上地下水位は掘削底面より下にあるものとする。

設計結果を表-7に示す。

表-7 設計結果

		孔内載荷試験を用いた設計			標準貫入試験を用いた設計		
		LSP-5	SP-II	SP-III	LSP-5	SP-II	SP-III
全 長 (m)		6.5	7.5	8.0	7.5	8.5	9.0
根入れ	β	1.60	2.24	1.77	1.67	1.73	1.54
	P_f (%)	5.5	1.3	3.8	4.8	4.2	6.2
応力度	β	4.24	-	-	3.02	3.9	4.17
	P_f (%)	1.1×10^{-3}	-	-	0.12	5×10^{-3}	1.5×10^{-3}
変 位	β	1.51	3.13	3.63	0.77	1.65	2.0
	P_f (%)	6.6	9×10^{-4}	1.4×10^{-4}	22.1	4.9	2.1
判 定		OK	OK	OK	NG	OK	OK

この結果によると、モデル誤差や土圧の不確実性を考慮していないので実際より1ランク小さめの設計となっている感があるが、同条件での設計を比較すると、明らかに物性値の設定の不確実性により孔内載荷試験を実施した方がN値から設計するよりも経済的な設計が可能であることが確認できる。

5) 調査の質を向上して事業費を低減する

事例のイメージ-3

ここでは、4)の事例に対し、N値が5以下の粘性土の場合に孔内水平載荷試験と標準貫入試験とで設計を実施した場合の例を示す。

また、本事例では、孔内水平載荷試験の結果は標準貫入試験と比較して大きくとも、調査結果のばらつきも標準貫入試験と比較して大きい場合の事例をしめす。これは、以前に下記に示すような間違っただけの取扱いをして、精度のよい試験を実施しているにも関わらず、結果としてN値から物性値を設定している事例に遭遇したことがあるためである。

一 過去に遭遇した間違っただけの試験結果の取扱い事例一

現場では、標準貫入試験とともに多くの土質試験等精度の高い試験が実施されていたが、平均値は標準貫入試験と比較して大きいもののばらつきも大きく、設計者と地質調査者の判断で、平均値から 2σ 差し引いた値がN値から推定するそれより小さかったため、結果としてN値から地盤パラメータを推定して設計を実施した。

そこで本事例では、上記の間違った事例と同様な表-8に示す不確実性を仮定し試設計を行う。なお、粘性土の土圧の合力は30kNとし、その他の条件は事例4)と同じとする。

表-8 水平地盤反力係数の不確実性

項 目	水平方向地盤反力係数 (kN/m ³)	項 目	平均値	標準偏差	備 考
孔内水平載荷 試験	3,500	調査結果のばらつき	1.0	0.25	正規分布
		推定誤差	1.0	0.25	正規分布
標準貫入試験	2,000	調査結果のばらつき	1.0	0.10	正規分布
		推定誤差	1.0	1.0	正規分布

この結果を表-9に示す。

この結果によると、孔内水平載荷試験結果のばらつきを大きくした場合でも、当然ながら精度の高い試験を実施した方が経済的な設計が可能なが分かる。この結果より、過去に遭遇したまちがった調査結果の取扱いがいかに不合理なものであったかを理解いただけたのではないかと考える。地盤パラメータの特性値は平均値を用いることが基本であり、設計者や地盤調査者の不要なコンサバティブな取扱いが不合理な設計を招くことを留意されたい。また、ここでさらに留意しなければならないことは、N値から地盤パラメータを推定する精度は悪く、特に精度の悪い粘性土の変形係数や強度定数をN値から設定する場合には不合理な設計となる可能性が高いことである。

表-9 設計結果

		孔内載荷試験を用いた設計			標準貫入試験を用いた設計		
		SP-II	SP-III	SP-IV	SP-II	SP-III	SP-IV
全長 (m)		8.5	9.5	10.5	10.5	12.5	13.5
根入れ	β	1.98	2.0	1.55	1.62	1.78	1.55
	$P_f(\%)$	2.4	2.2	6.0	5.2	3.8	6.1
応力度	β	-	-	-	3.23	3.61	3.99
	$P_f(\%)$	-	-	-	0.06	0.02	3.3×10^{-3}
変位	β	2.0	2.91	3.43	0.8	1.33	1.72
	$P_f(\%)$	2.2	0.18	0.03	21.2	9.2	4.3
判定		OK	OK	OK	NG	NG	OK

6) 調査の質を向上して事業費を低減する
事例のイメージ-4

ここでは、直接基礎の設計について、土質試験から支持地盤の強度定数を設定した場合と N 値からの推定との比較を示す。例題は図-7 に示すように、5000kN の鉛直荷重（確定値、フーチング重量を含むものとする）のみ載荷される正方形の直接基礎の一辺の長さを設計するものである。この際、目標信頼性は、ISO2394 の例より $\beta = 3.8$ 以上 ($P_f = 7.5 \times 10^{-3}\%$ 以下) とする。

ここで仮定する地盤の強度定数の不確実性を表-10 に示す。N 値からの推定誤差の影響を確認するため、試験で得られるせん断抵抗角は両者を同じものとした。

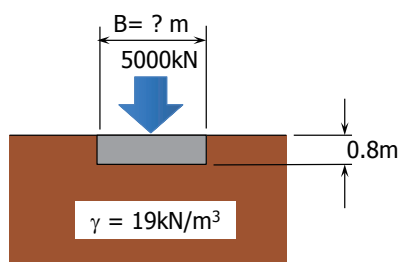


図-7 直接基礎の設計例題

なお、支持力は式 (8) から推定¹⁰⁾するものとし、モデル誤差は既往の研究¹¹⁾から対数正規分布で平均値：0.85、標準偏差：0.3 とした。

$$R_u = A_e \left\{ \kappa \cdot q \cdot N_q \cdot S_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot \beta_1 \cdot B_e \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \right\} \quad (8)$$

$$\kappa = 1 + 0.3 \cdot \frac{D_f'}{B_e} = 1 + 0.3 \cdot \frac{0.8}{B_e} = 1 + \frac{0.24}{B_e}, \quad q = \gamma_2 \cdot D_f$$

$$= 19 \cdot 0.8 = 15.2 \text{ (kN/m}^2\text{)},$$

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \exp(\pi \cdot \tan \phi), \quad \gamma_1 = 19 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$S_q = \left(\frac{q}{q_0} \right)^v = \left(\frac{16}{10} \right)^{-1/3} = 0.86, \quad \beta_1 = 0.6$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \cdot \tan(1.4 \cdot \phi),$$

$$S_\gamma = \left(\frac{B_e}{B_0} \right)^\mu = \left(\frac{B_e}{1.0} \right)^{-1/3} = B_e^{-1/3}$$

表-10 強度定数 (ϕ) の不確実性

項目	せん断抵抗角(度)	項目	平均値	標準偏差	備考
土質試験	37	調査結果のばらつき	1.0	0.05	正規分布
		推定誤差	1.0	0	正規分布
標準貫入試験	37	調査結果のばらつき	1.0	0.05	正規分布
		推定誤差*	1.0	0.10	正規分布

* N 値からの推定誤差は仮定値（ただし、参考として文献 9）

表-11 設計結果

設 計	基礎幅 (m)	β	P_f (%)	判 定
土質試験から設計	4.0	3.55	0.02	NG
	4.5	4.26	1×10^{-3}	OK
標準貫入試験で設計	4.0	2.22	1.3	NG
	4.5	2.65	0.4	NG
	5.0	3.06	0.11	NG
	5.5	3.4	0.03	NG
	6.0	3.75 (≈ 3.8)	8.7×10^{-3}	OK
	6.5	4.12	1.9×10^{-3}	OK

性能関数と設計式は以下のとおりとした。

性能関数：

$$g = R_u - 2000 > 0$$

設計式：

$$R_u = R_u (B, \phi, \delta_E, \delta_F) \cdot \delta_{Ru} \quad (9)$$

ここで、 $R_u () : ()$ の変数による式 (8) から推定される支持力、 B ：基礎の一辺の長さ (m)、 ϕ ：土のせん断抵抗角 (度)、 δ_E 、 δ_F 、 δ_{Ru} ：それぞれ調査結果のばらつき、パラメータ推定誤差、モデル誤差である。

設計結果を表-11に示す。

この結果から分かるとおり、直接基礎においても調査の質が設計の合理性に及ぼす影響は大きい。

7) 調査の質を向上して事業費を低減する

事例のイメージ-5

橋梁の基礎のような点としての設計において、基礎地盤の調査の質を向上することで地盤抵抗の不確実性が低減され、設計の信頼性が向上することは容易に想定することができる。ここでは、これが具体的にどのようにコスト縮減へつながるのかといったイメージを示す。

ここでの現場は、明確な支持層が深い海上橋梁の橋脚基礎をイメージしており、当初設計と同等以上の安全性により不完全支持杭の適用からコスト縮減の検討を想定している。紙面の都合上具体的な設計条件は割愛するが、当初設計でN値のみから杭長50mの完全支持杭を計画したとした場合に、当初設計と同様にN値のみから40mの不完全支持杭を設計した場合、土質試験を詳細に実施して40mの不完全支持杭を設計した場合、さらに現

場で載荷試験を実施して25mの不完全支持杭を設計した場合について信頼性を計算^{*}している。

^{*}ここでのそれぞれの不確実性はすべて根拠無く仮定したものである。ここでは、調査の質を向上することで不確実性が変化した場合に、設計がどう変化するかといった観点のみでこの例を参照していただきたい。

この結果を図-8に示す。この結果によれば、N値のみから40mの不完全支持杭を設計した場合には、当初設計の完全支持杭と比較して不完全支持杭とすることによる不確実性の増加から、杭の破壊確率は増加し設計条件を満足しない。これに対し、土質試験を詳細に実施して40mの不完全支持杭を設計した場合には、土質試験により大きな地盤の強度が得られるとともに不確実性が低減し、結果として当初設計と同等の安全性（破壊確率）を確保でき設計条件を満足している。また、土質試験に加え現場で載荷試験を実施した場合には、さらに支持力式の不確実性（モデル誤差）も低減でき、25mの杭でも当初設計と同等以上の安全性（破壊確率）を確保でき設計条件を満足すると考えられた。

このように、信頼性に基づく設計により、調査の質を向上すればするほどそのための費用を考慮してもなお事業費の縮減が可能になるといった、調査の質と事業費との関係を定量的に示すことができる。

基本式

性能関数 : $g = R - S \geq 0$

支持力 (R) : $R = \delta_M \cdot (\delta_{BV} \cdot \delta_{BQ} \cdot q_d \cdot A + \delta_{MV} \cdot \delta_{Mf} \cdot U \cdot l \cdot f)$

荷重 (S) : $S = \delta_G \cdot G + \delta_Q \cdot Q$

仮定と計算結果 (表中の不確実性 (δ_{OO}) は、全て標準正規分布とし (mean, COV) で表記)

特徴	当初設計		変更対象	
	1. 完全支持杭	2. 不完全支持杭	3. 不完全支持杭	4. 不完全支持杭
特徴	N 値から設計	N 値から設計	土質試験から設計	土質試験と載荷試験
杭径と杭長	$\phi 1.2, l = 50m$	$\phi 1.2, l = 40m$	$\phi 1.2, l = 40m$	$\phi 1.2, l = 25m$
杭本数	200本 (10橋脚)	200本 (10橋脚)	200本 (10橋脚)	200本 (10橋脚)
基本工事費 (千円)	1,000,000 -	800,000 -	800,000 -	500,000 -
追加調査費 (千円)	0 -	0 -	100,000 -	130,000 -
合計 (千円)	1,000,000 -	800,000 -	900,000 -	630,000 -
先端面積 (A, m ²)	1.12	1.12	1.12	1.12
先端支持力 (q_d , kN/m ²)	3,000	2,000 (不完全支持)	3,000 (試験)	3,000 (試験)
支持地盤ばらつき (δ_{BV})	(1.0, 0.10)	(δ_{MV})	(δ_{MV})	(δ_{MV})
支持力変換誤差 (δ_{BQ})	(1.0, 0.20)	(1.0, 0.30) 不完全支持	(1.0, 0.15) (試験)	(1.0, 0.15) (試験)
周長 (U, m)	3.77	3.77	3.77	3.77
中間層杭長 (l, m)	50.0	40.0	40.0	25.0
周面摩擦力度 (f, kN/m ²)	100	100	250 (試験)	250 (試験)
中間地盤ばらつき (δ_{MV})	(1.0, 0.20)	(1.0, 0.20)	(1.0, 0.15) (試験)	(1.0, 0.15) (試験)
摩擦力変換誤差 (δ_{Mf})	(1.0, 0.30)	(1.0, 0.30)	(1.0, 0.20) (試験)	(1.0, 0.20) (試験)
モデル誤差 (δ_M)	(1.0, 0.30)	(1.0, 0.40) 不完全支持	(1.0, 0.40) 不完全支持	(1.0, 0.30) (試験)
固定荷重 (G)	4,000	4,000	4,000	4,000
-"- ばらつき (δ_G)	(1.0, 0.10)	(1.0, 0.10)	(1.0, 0.10)	(1.0, 0.10)
変動荷重 (Q)	2,000	2,000	2,000	2,000
-"- ばらつき (δ_Q)	(1.0, 0.20)	(1.0, 0.20)	(1.0, 0.20)	(1.0, 0.20)
信頼性指標 (β)	2.09	1.41	2.09	2.49
破壊確率 (Pf, %)	1.8	7.9	1.8	0.64
リスク (千円)	18,000 -	79,000 -	16,200 -	4,000 -
判定	-	NG	OK	OK

※ 計算は Monte Carlo Simulation (MCS)で 1,000,000 回の計算より

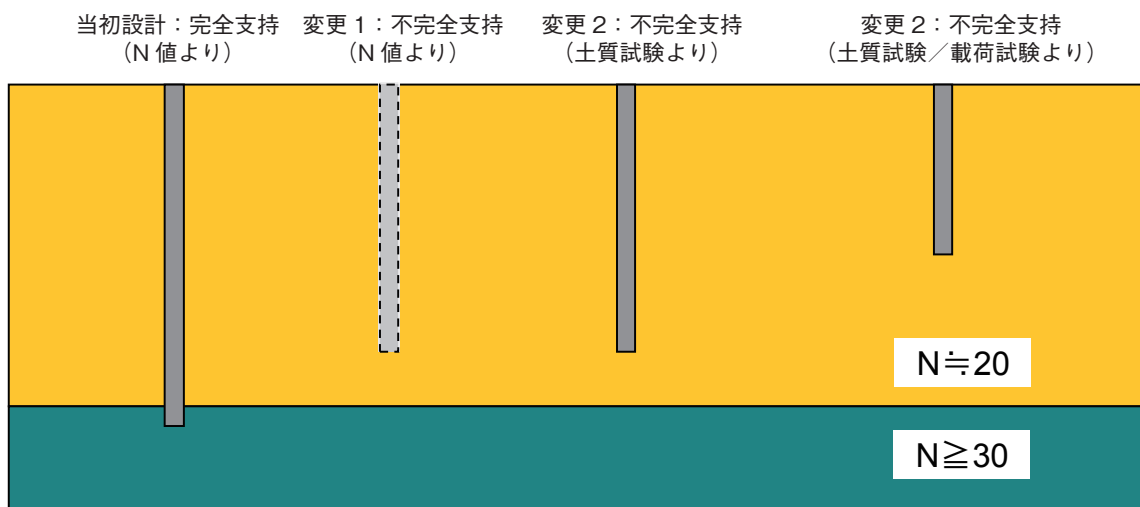


図-8 地質調査の質と杭基礎の設計例

8) 調査の量や調査箇所等の最適化する

事例のイメージ

これまで、調査の量の増加や質の向上により事業費を低減するイメージを示したが、適切な地盤調査を具体的に計画するためには、調査の量と調査箇所を調査費用とリスク（ひいては事業費）の低減額に応じて最適化する必要がある。現在、地質リスク活動では、東京都市大学の吉田教授が実施している研究を参考として、この課題に取り組んでいる。

ここでは、土壤汚染が懸念される区間のトンネル工事を例として、追加調査の費用と効果に応じた追加調査の量や調査箇所を最適化するイメージを示す。

工事を進める上で、既存調査の結果と実態とが異なった場合の追加費用を表-12に示す。すなわち、汚染土を普通土として処理してしまった場合には補償金が課せられるものとした場合、以下の追加費用が必要になるものとする。

- ① 設計段階で普通土と判断されたのに実態が汚染土の場合
普通土として処理した際の費用に加え、汚染土を普通土として処理した補償金
- ② 設計段階で汚染土と判断されたのに実態が普通土の場合
普通土として処理してよかったのに汚染土として処理したため、両者の処理費用の差額

ここでは、この追加費用に判断ミスの可能性（確率）を乗じたものをリスクとして取り扱う。

表-12 既存調査が不十分な場合の追加費用

既存調査に基づ く設計上の判断	普通土 汚染土	実 態（追加調査を実施した場合には明らかになる可能性が高い）	
		普通土	汚染土
	普通土	N/A	C1:補償金+普通土処理費
	汚染土	C2:汚染土処理費 - 普通土処理費	N/A

例えば、図-9に示すように、トンネルの施工区間に4本の既存調査があり、これに基づいて設計上の判断がなされたものとすれば、

- 各調査結果の違い
- 平面的な離隔：各調査箇所間の離隔と各調査箇所のトンネル施工区間からの離隔
- 調査深度：各調査の深度の違いと各調査の深度とトンネル深度との関係

などに応じて判断ミスの可能性は変化する。仮に隣り合う調査結果が大きく異なり調査箇所間の離隔が広ければ、その間の不確実性は大きくなり判断ミスの可能性も大きいと評価される。

これに対し、図-10に示すように1本の追加調

査を実施した場合には、調査の結果と位置に応じてリスクが低減する。ここで、図中の着色部が低減するリスクである。すなわち、追加調査箇所の位置に応じたリスクの低減量を求めることにより、追加調査の本数（量）に応じたリスクを最も低減し得る各追加調査の最適な位置を検討することができる。また、この結果に基づき、調査の費用と低減するリスクとの関係から、調査費用に応じた追加調査本数（量）を最適化することができる。参考として、図-11に1本あたりの調査費用が異なる場合の最適本数検討結果のイメージを示す。この結果では、調査費用が「3」の場合には6本実施するのが最適で、調査費用が「5」と高価な場合には2本の追加調査が最適であるとの結果が得られている。ここで調査費用は無次元で、二つの費用の比較という観点でのみ参照していただきたい。

このように、ここでの事例から分かるとおり、調査の質、量、および位置といった最適な調査は、その効果（リスクあるいは事業費の低減）に応じて、理論的に最適化することは十分に可能であると考えている。

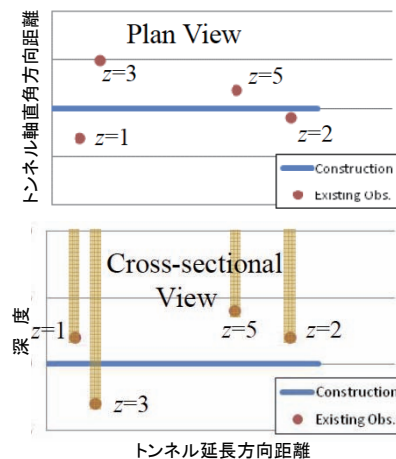


図-9 トンネル施工位置と既存調査

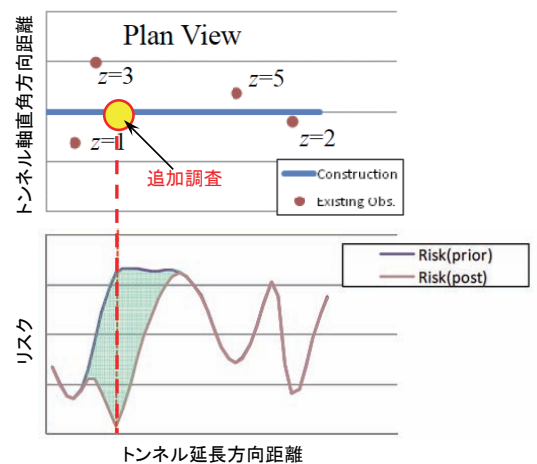
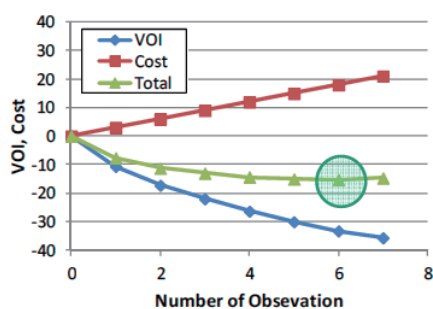


図-10 追加調査によるリスクの低減

Observation Cost=3 (one. obs.)
Optimal Number = 6



Observation Cost=5 (one obs.)
Optimal Number = 2

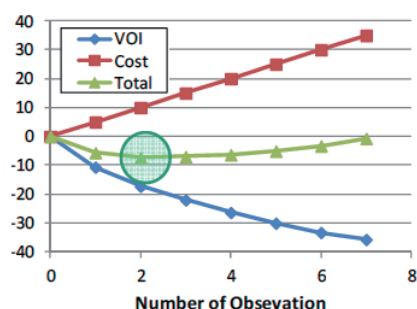


図-11 調査費用に応じた調査量の最適化イメージ

(4) 地質リスクに係わる今後の取り組み

本報告では、地質リスク活動を通じて、全地連がかねてより言い続けてきた「適切な地質調査によるコスト縮減」は事実であるとともに、今後の信頼性に基づく設計基準の改訂により、それを定量的に表現できることを述べた。今後とも本活動を継続し、「適切な地質調査によるコスト縮減」の事例を増やすとともに、実際の現場へのプロトタイプ的な適用についても取り組み、「適切な地質調査」の実現へ寄与していきたいと考えている。

〈参考文献〉

- 1) Honjo, Y. (2011) : Challenges in Geotechnical Reliability Based Design -2nd Wilson Tang Lecture-, Proc. of 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, N.Vogt et al. ed., pp.11-28
- 2) 本城勇介, 大竹雄, 加藤栄和 (2012) : 地盤パラメータ局所平均の空間的ばらつきと統計的推定誤差の簡易評価理論, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 68, No. 1, pp.41-55
- 3) 大竹雄, 本城勇介 (2012) : 地盤パラメータ局所平均を用いた空間的ばらつきの簡易信頼性評価法の検証, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.3, pp.475-490
- 4) 大竹雄, 本城勇介, 小池健介 (2012) : 調査地点を考慮した長大水路の液状化危険度解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.283-293
- 5) International Organization for Standardization (ISO) (1998) : ISO2394: General principles on reliability for structures
- 6) 地盤工学会 (2006) : 性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則, 付録 D : 少数標本からの特性値の設定
- 7) <http://www.strength.co.jp/n.html> : 標準貫入試験 N 値の話
- 8) 日本道路協会 (1999) : 道路土工仮設構造物工指針
- 9) J. Ching, J.R. Chen, J.Y. Yeh and K.K. Phoon (2012) : Updating uncertainties in friction angles of clean sands, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, pp.217-229
- 10) 日本道路協会 (2002) : 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編
- 11) Kohno, T., Nakaura, T., Shirato, M. & Nakatani, S. (2009) . An evaluation of the reliability of vertically loaded shallow foundations and grouped-pile foundations, Proc. of The Second International Symposium on Geotechnical Risk and Safety (IS Gifu) , Gifu, Japan, 177-184