

地震時の斜面変状が橋梁基礎の安全余裕度に及ぼす影響に関する解析的検討

遠藤繁人・西田秀明・石田雅博

1. はじめに

平成16年新潟県中越地震や平成20年岩手・宮城内陸地震では、山地や丘陵の急峻な地形に立地した道路橋に、過去に滑動した経験のない基礎岩盤の初生すべりや大きな変状により落橋、段差、移動等が生じる事例が多く見られ、安全性はもとより、復旧、復興の長期化など甚大な影響を及ぼした。

このような被害を避けるためには、あらかじめ十分な調査を行い、大きな斜面変状が生じるような箇所を避けて架橋することが基本である。しかし、条件によってはやむを得ず地盤変状を生じる箇所に架橋せざるを得ない場合も考えられる。しかしながらこの場合には、地震時に大きな地盤変状を受ける道路橋の耐震安全性を確保するために必要となる一般的な手法は確立されていない。

以上のような背景から、地震時に斜面変状を生じる箇所に設置された道路橋基礎が有する耐震安全性の判断手法の提案を行うために、斜面変状が生じる状況に対してどのような要因が道路橋基礎の安全余裕に影響し得るかについての基礎的な検討を行った。

2. 地震により斜面変状を生じる箇所に設置した基礎の安定性に関する検討方法

斜面の変状が生じる箇所に基礎を設置する場合、斜面変状規模が限定的であり、かつ基礎本体の耐力や支持力が十分大きければ構造的な対処で対応可能な可能性がある。しかし、大規模な斜面変状が生じることが想定される場合、基礎のみでは対処が不可能となり、実質的に当該地点への架橋は困難となると考えられる。そこで、地すべりを生じる可能性を有する斜面上に設置された道路橋基礎を対象に、地層構成、斜面の傾斜角及びすべり層の地盤定数が変化することによる外力（すべり力）の違いが、基礎の有する耐力や支持力に

関する安全余裕へ及ぼす影響について解析的に検討した。

2.1 検討対象とした地盤変状パターン

地震による斜面崩壊は、これまでも数多く確認されており、このような変状が生じるパターンの特徴について、土木研究所では地震による斜面地盤変状の42事例を収集・分析しており¹⁾、本研究では、斜面崩壊に伴い基礎にすべり力（外力）が作用する状況を対象とする検討を行った。

2.2 検討対象とした基礎の諸元

検討対象とした道路橋基礎は、平成24年道路橋示方書に基づいて設計した斜面上に設置された柱状体深礎基礎である^{2),3)}。柱状体基礎の構造図を図-1に示す。

2.3 基礎に作用するすべり力の導出と作用方法

地震時に基礎に作用する外力には、地震動に起因するものと斜面の変状に起因するものがある。斜面の変状が地震動の最も強い時に生じるのか、これを越えて生じるかについての明確な知見はないが、ここでは、地盤の変状のみに着目して地震動との荷重の重ね合わせは考慮しない状態に対する基礎の安定性を検討した。地盤変状が生じる場合の基礎の安定性については、道路土工・切土・斜面安定工指針⁴⁾において示されている、シャフ

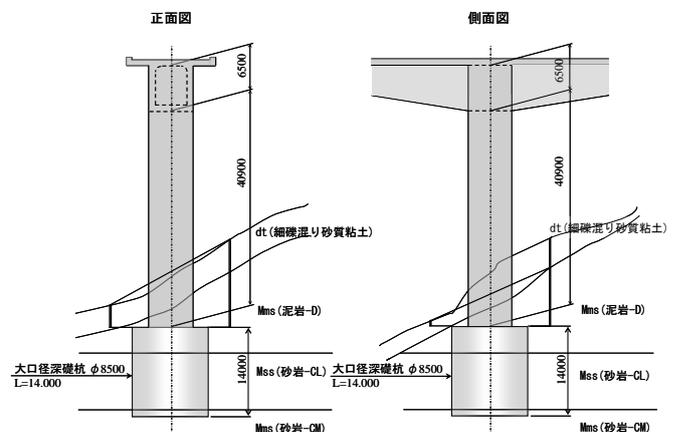


図-1 検討対象とした柱状体基礎構造図

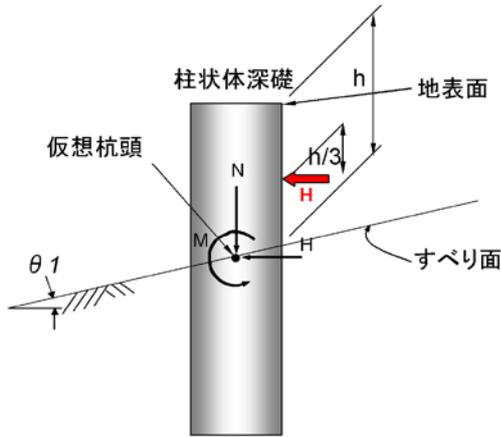


図-2 すべり力の作用位置

表-1 本試算における解析パラメータ

パラメータ	概要
(1)地層構成 (すべり層部)	C1) 崖錐 dt 層5.0m C2) 崖錐 dt 層5.0m+ 未固結D級層 3.0m
(2)傾斜角	A1) 10° A2) 30°
(3)すべり層の地盤定数 c (崖錐層における粘着力)	G1) 5 (kN/m ²) G2) 15 (kN/m ²)
(4)すべり面 (設計水平震度 k_h)	S1) 0.16 S2) 0.40 S3) 0.80

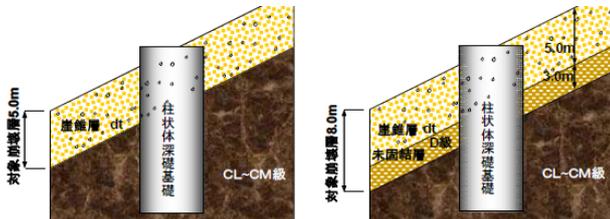


図-3 地層構成(左:表-1の地層構成C1, 右:同C2)

ト工による地すべり対策を行う場合における地すべりに伴う外力の作用位置の仮定を参考に、すべり力がすべり面の上方 $h/3$ (h は地表面からすべり面までの深度) に集中荷重として作用するものとし(図-2)、この時に生じる力や地盤反力度を求めた。ここで、斜面の変状に伴い生じるすべり力は、2.4に示す地層構成や傾斜角などからなる斜面モデルに対して、フェレニウス法にて斜面安定解析を実施して得られるすべり面で地すべりが生じるものとして設定した。ここで、フェレニウス法とは、斜面の安定解析法の1つであり、すべり土塊を適当な細片(スライス)ごとに分割し、スライスごとに滑動力と抵抗力を求め、最後に全体を集計して安全率を求める方法であり、実務で使用されている解析法のほとんどがフェレニウス法である。これらの計算結果と、基礎の耐力や支持力とを比較して安全率を求め、斜面の変状の規

模等の違いによる影響を検討した。

2.4 解析ケース

2.4.1 斜面の変状に関するパラメータ

斜面の変状に関する解析パラメータを表-1に示す。地層構成は、すべりが生じる層(崖錐層と未固結層部分)が薄い場合(表-1のC1)と厚い場合(表-1のC2)の2種類とした(図-3)。傾斜角は、斜面上に設置される基礎の設計実績⁵⁾として、地盤傾斜が20°~40°が全体の50%程度を占めることを踏まえて、10°と30°とした。すべり層の地盤定数(崖錐層における粘着力)は、すべり層である崖錐 dt 層の地盤定数の影響を把握するために、粘着力 c を5kN/m²と15kN/m²とした。また、フェレニウス法による安定解析から求められるすべり面を設定するための設計水平震度としては、道路土工指針⁴⁾におけるレベル2地震時の設計水平震度(0.16)、道路橋示方書V耐震設計編⁶⁾におけるレベル2地震時(タイプII)の設計水平震度に相当する震度(0.80)及びその半分(0.40)の3ケースを考慮した。

2.4.2 載荷幅に関する影響を検討するためのパラメータ

基礎に作用する地すべりの平面的な影響範囲(載荷幅)がどの程度の広がりとなるか現時点では明確な知見はないが、この設定が耐震安全性の評価に及ぼす影響は少なからずあると考えられる。そこで、本研究では、載荷幅として基礎径相当を考慮した基本ケースに加えて、載荷幅を基礎径の3倍としたケースについても検討した。

2.4.3 すべり面の受働土圧抵抗の影響を検討するためのパラメータ

地すべりが生じる箇所に設置し、道路橋基礎に類する形状の構造物として地すべり抑止杭がある。地すべり抑止杭の設計では、すべり面の受働側地盤抵抗は、すべり面の中間付近に位置する場合には、基礎背面土砂がすべり落ちてしまうため受働土圧抵抗を考慮しないものとして設計を行うのが一般的である⁷⁾が、すべり面の末端部付近に位置する場合には崩壊土砂が堆積し、受働土圧抵抗が期待できる状況になるとしている。このような状況は、道路橋基礎でも同様と考えられるため、受働土圧抵抗を考慮しないケースを基本としつつ、地層構成C2、傾斜角30°の一部について受働土圧抵抗を考慮したケースについても検討した。

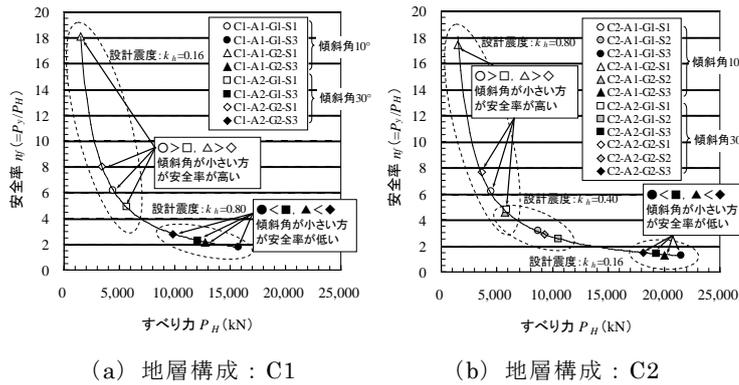


図-4 基礎の降伏水平耐力に着目した安全性の評価

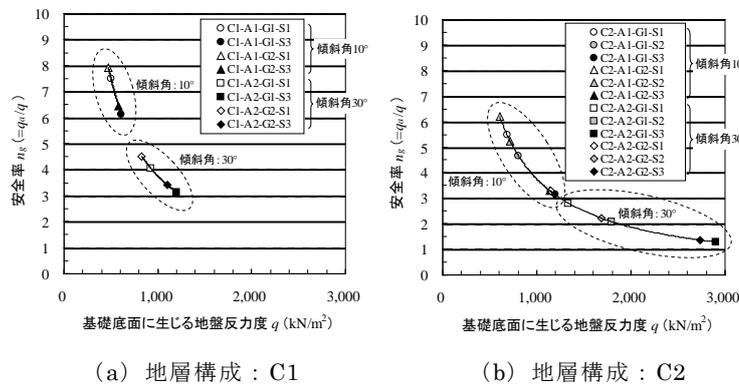


図-5 基礎底面の鉛直地盤反力に着目した安全性の評価

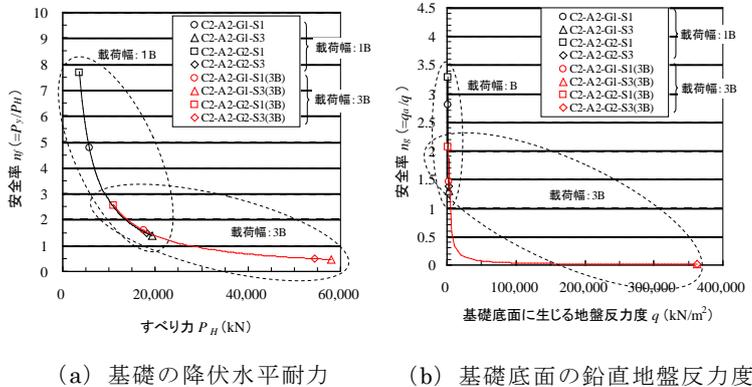


図-6 荷幅に着目した安全性の評価

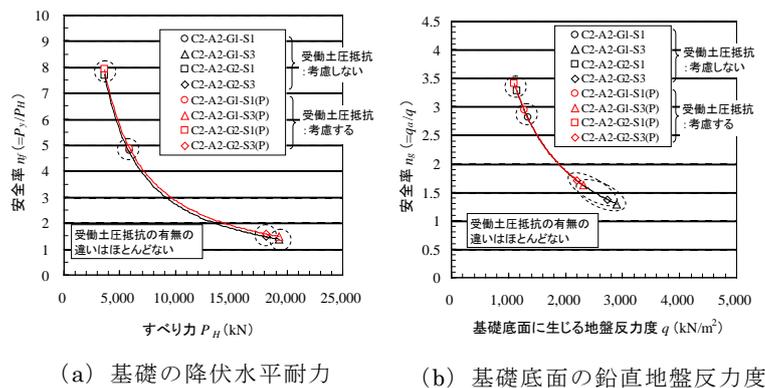


図-7 すべり面の受働土圧抵抗影響検討における安全性の評価

3. 地震による斜面変状に対する基礎の安定性に関する検討結果

3.1 斜面や震度の条件と基礎の安全率の関係

基礎本体の降伏水平耐力に着目した安全率 n_f とすべり力 P_H (kN) の関係を図-4に示す。ここで、安全率 n_f は、基礎の降伏水平耐力 P_v をすべり力 P_H で除して求めたものである。設計水平震度 k_h やすべり層厚が大きく、すべり層である崖錐層の粘着力が低いほど安全率は小さい。一方、傾斜角については、 $k_h=0.16$ のケースでは大きい方が、逆に、 $k_h=0.80$ のケースでは小さい方がそれぞれ小さな安全率になっている。設計水平震度が大きい場合に傾斜角の小さい方が小さい安全率になっているのは、すべり力に関係するすべり土塊の重量が傾斜角の小さい方が大きくなることが要因と考えられる。したがって、傾斜角が小さくても一度すべりが生じると基礎の安全性に与える影響が大きくなる可能性があることがわかる。

基礎底面の鉛直地盤反力に着目した安全率 n_g と基礎底面に生じる地盤反力度 q (kN/m²) の関係を図-5に示す。ここで、安全率 n_g は、レベル1地震時の地盤反力度の上限値 q_a をすべり力作用時に基礎底面に生じる地盤反力度 q で除して求めたものである。鉛直地盤反力度に対する安全率は、設計水平震度によらず傾斜角が小さい方が大きく、また、すべり層部が厚い方が同一の設計水平震度で見た場合に安全率が小さくなった。

3.2 荷幅による影響

荷幅に関する影響の検討は、相対的に安全余裕度が小さい地層構成C2に対して行った。図-6 (a) に基礎幅Bの1倍を荷幅としたケース (1B) と3倍のケース (3B) の場合における基礎の降伏水平耐力に着目した安全率 n とすべり力 P_H (kN) の関係を、また、図-6 (b) に1Bと3Bの場合における基礎底面の鉛直地盤反力度に着目した安全率 n_g と基礎底面に生じる地盤反力度 q (kN/m²) の関係をそれぞれ示す。ここで、黒色白抜きは (1B)、赤色白抜きは

(3B)を示す。図より、載荷幅が広い方が狭い方よりも安全率が小さいことがわかる。また、試算ケースでは基礎幅3Bで $k_b=0.80$ のケースにおいて、基礎の降伏水平耐力及び鉛直地盤反力ともに安全率が1を下回る結果となった。これより、載荷幅によっては基礎の安全性が確保できなくなることから、この評価を適切に行うための検討が別途必要である。なお、基礎形状の違いによる影響を把握するために、図-1で示したモデルに加えて、基礎径を5.0mとしたモデルについても試算を行ったが、安全率としては全体的に大きな差は見られなかった。

3.3 すべり面の受働土圧抵抗による影響

すべり面の受働土圧抵抗の有無による影響の検討は、載荷幅に関する検討と同様、相対的に安全余裕度が小さい地層構成C2に対して行った。図-7(a)にすべり面の受働土圧抵抗の有無における基礎の降伏水平耐力に着目した安全率 n とすべり力 P_H (kN)の関係を、また、図-7(b)にすべり面の受働土圧抵抗の有無における基礎底面の鉛直地盤反力度に着目した安全率 n_g と基礎底面に生じる地盤反力度 q (kN/m²)の関係をそれぞれ示す。ここで、黒色白抜き受働土圧抵抗を考慮する場合、赤色白抜きは考慮しない場合である。基礎の降伏水平耐力及び鉛直地盤反力度ともに受働土圧抵抗の有無による違いはほとんど見られないことがわかる。

4. まとめ

地震時に堆積土のすべり又は崩壊により斜面変状を生じうる箇所に設置された道路橋基礎を対象に傾斜角や地盤定数などの斜面の条件、設計地震力などの斜面の変状が生じる条件や、基礎のすべり力の載荷幅、受働土圧抵抗の考慮の有無が、基礎の安全余裕度に及ぼす影響について解析的検討

を行った結果、次のことが明らかとなった。

- すべり力に対する基礎の降伏水平耐力の比として定義した安全率は、設計水平震度が大きい場合では傾斜角が大きい場合よりも小さい場合の方が小さくなり、傾斜角が小さくても一度すべりが生じると基礎の安全性に与える影響は大きい。
- 外力の載荷幅が広いと基礎の耐震安全性が小さくなり、特に、大規模地震時における載荷幅の設定が安全性評価に及ぼす影響は大きい。
- 受働土圧抵抗については基礎の水平耐力及び鉛直地盤反力ともに基礎の耐震安全性評価に及ぼす影響は小さい。

なお、本検討では、すべり面の仮定やすべり力の作用方法などを簡易なモデルによっているが、設定したすべり力の作用幅及び大きさは仮定したものである。このため、この妥当性について、模型実験等で基礎に作用する土圧を計測することにより、実際に基礎に影響する地盤変状の範囲を確認するなどの検討が今後必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 浅井健一・日下勝仁・佐々木靖人：地震時に構造物基礎の安全性に影響を及ぼすような斜面地盤変状のパターン、地盤工学会関東支部発表会、2012
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書IV下部構造編・同解説、2012
- 3) 日本道路協会：斜面上の深礎基礎設計施工便覧、2012
- 4) 日本道路協会：道路土工・切土工・斜面安定工指針、2009
- 5) 独立行政法人土木研究所：橋梁基礎形式の選定手法調査、土木研究所資料第4037号、2006
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2012
- 7) 中村浩之：抑止杭による地すべり防止対策、2005

遠藤繁人



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員
Shigehito ENDO

西田秀明



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造研究部構造・基礎研究室 主任研究官
Hideaki NISHIDA

石田雅博



(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員
Masahiro ISHIDA