

③-4 地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策技術に関する研究①

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博，星隈順一，西田秀明，
谷本俊輔

【要旨】

本研究は、傾斜地等に立地する道路橋を対象として、地震による大きな地盤変状で下部構造自体が大きく移動する事象に対して、地震時に道路橋に影響を及ぼすような変状を起こしやすい地盤条件の判定手法や大きな地盤変状が構造物の安全性に及ぼす影響を明らかにし、構造物の耐震安全性を高めるための方策を提示することを目的としたものである。

平成 24 年度は、地震時に斜面変状の影響を受ける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、道路橋基礎の安全余裕に影響し得る斜面変状の要因について基礎的検討を行った。

キーワード：道路橋，地震，斜面の変状，柱状体深礎基礎

1. まえがき

大規模な地震に対する道路橋の耐震性は、既往の地震被害の経験や研究開発の成果を踏まえて技術基準の改定や既設橋に対する耐震補強の対策がなされた結果、着実に向上してきている。しかし、地震時に大きな地盤変状の影響を受ける場合については、地盤変状の範囲・規模やこれが橋に与える影響について十分な知見がないことから、現行の設計体系にはほとんど反映されていない。このため、地震時に大きな地盤変状の影響を受ける道路橋は、安全性はもとより、復旧、復興の長期化などにより地域経済に大きな損失を及ぼしかねない甚大な被害を生じる可能性がある。

例えば、平成 16 年新潟県中越地震や平成 20 年岩手・宮城内陸地震をはじめ、近年の地震被害の特徴に、特に山地や丘陵の急峻な地形に立地した道路橋が、過去に滑動した経験がない基礎岩盤の初生すべりや地盤の大きな変状により落橋、段差、移動等の被災事例が多く見られている。このため、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が、条件によっては地盤変状を生じう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、このような場合に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手法は確立されていない。

以上のような背景から、本研究では、地盤変状の影響

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方策を提示し、耐震設計基準や震前対策等に反映していくことを目的とする。

平成 24 年度は、地震時に斜面変状を生じう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、斜面の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検討を行った。

2. 検討方法

2.1 地震による斜面地盤変状パターンと構造物への影響

地震による斜面崩壊は、これまでも数多く確認されている。その中でも、岩手・宮城内陸地震、新潟中越地震、東北地方太平洋沖地震等において、地震による斜面地盤変状が発生している。このような斜面変状の特徴については、過年度に実施した本研究課題において地震による斜面地盤変状の 42 事例を収集・分析しており、変状パターンを 5 種類に分類している。分類された変状パターン模式図を図-1 に示す。

このうち、①、②は崩壊土や風化層などの堆積土のすべり又は崩壊に起因する変状パターンである。また、③、④、⑤は岩盤の脆弱層に起因する変状パターンであり、脆弱層の状況によって多種多様な変状パターンが発生すると考えられる。

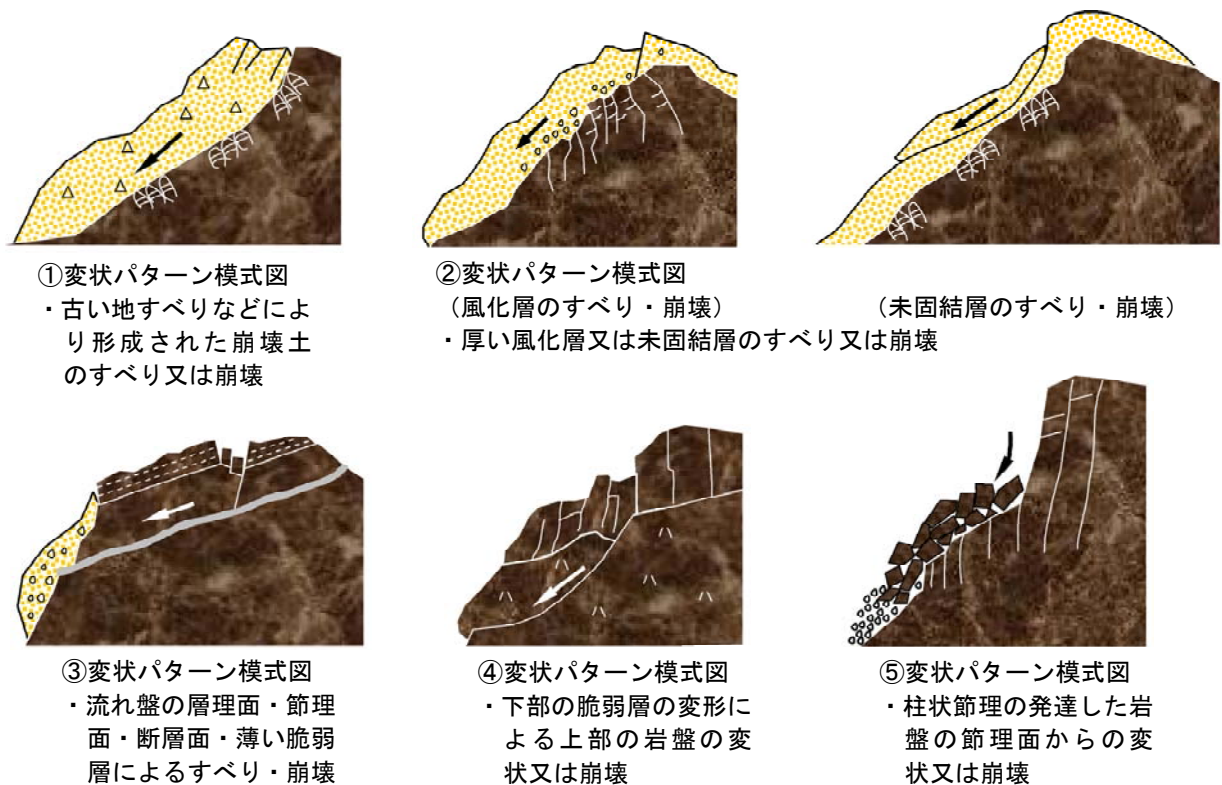


図-1 変状パターン模式図

ここで、構造物への影響という観点から考えると、堆積土のすべりによる場合と岩盤のすべりによる場合で異なると考えられる。堆積土のすべりの場合は、基礎前面から一定の範囲におけるすべり力が構造物に作用すると考えられる。一方、岩盤のすべりによる場合は、基礎前面にある岩塊の大きさに依存し、一体として動く岩塊が大きければ基礎に作用する力も大きくなると考えられる。以上のことから、これらは別々に扱う必要があるが、本年度はこのうち①、②に相当する斜面崩壊に伴い基礎に外力（すべり力）が作用する状況を対象とした検討を行った。

2.2 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

斜面の変状が生じる箇所に基礎を設置することを考えた場合、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、基礎が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。

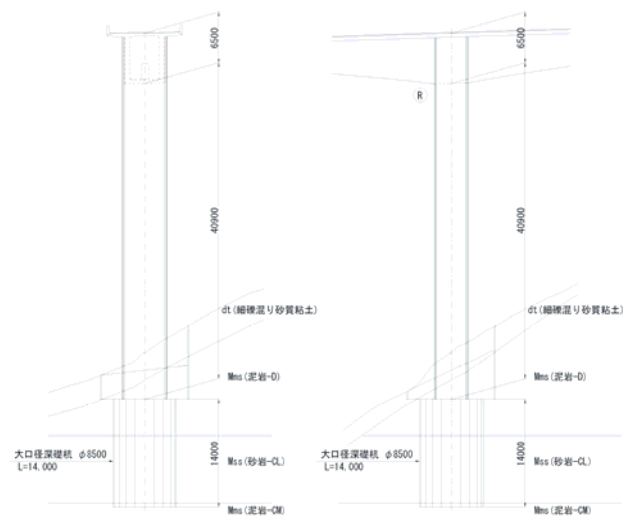


図-2 検討対象とした柱状体基礎構造図

検討対象とした柱状体基礎の構造図を図-2に、また試験設計モデルの設計条件を表-1に示す。

図-2に示す道路橋基礎は平成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¹⁾²⁾。

斜面の変状に伴い生じるすべり力は、2.3にて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。

表-1 試設計モデルの設計条件

(1)上部構造	形 式	4 径間連続 PC ラーメン橋						
	支間割	55.300m+97.500m+97.500m+63.200m						
	幅 員	全幅員 10.150m						
	活荷重	B 活荷重						
	支持条件	剛結						
(2)下部構造	橋 脚	柱式橋脚						
	基 礎	柱状体深礎基礎（土留め構造：ライナープレート補強リング＋吹付けコンクリート及びロックボルト） 公称径=8.500m，設計径=8.500m						
	使用材料	σ_{ck} =24N/mm ² ，SD345（基礎）						
(3)鉛直荷重及び水平荷重		鉛直荷重及び水平荷重は下表の通り。						
				レベル地震時				
		鉛直荷重（kN）		28,500				
		水平荷重（kN）		4,600				
		※試設計方向は，斜面の傾斜が橋軸方向であることから，協軸方向とする。						
(4)重要度の区分		B 種の橋						
(5)地域区分		A2 地域（地域別補正係数 $c_z=c_{1Z}=c_{2Z}=1.0$ ）						
(6)地盤条件		地盤条件は下表の通り。						
			地盤の種類	層厚（m）	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)	単位体積重量 (kN/m ³) γ	変形係数 E_s (kN/m ²)
		1 層	崖錐 dt	3.2	15	0	16	4,200
		2 層	軟岩 D	5.2	70	20	19	51,000
		3 層	軟岩 CL	8.9	90	40	20	65,900
		4 層	硬岩 CM	20.0	250	40	23	1,558,000
(7)橋脚の設計水平震度		設計水平震度は下表の通り。						
				橋軸方向				
		レベル 1 地震時		k_h (= $C_2 k_{hs}$)	0.20			
		レベル 2 地震時	タイプ I	k_{hc}	0.48			
			タイプ II	k_{hc}	0.63			
(8)橋脚の終局耐力時の設計水平震度		橋脚の終局耐力時の設計水平震度は下表の通り。						
				単位	橋軸方向			
					タイプ I	タイプ II		
		橋脚が終局状態に達した際の橋脚基部の曲げモーメント		kN・m	476,700	488,600		
		終局耐力時の設計水平震度		—	0.82	0.85		

基礎の安定性に関する試算は、道路土工切土・斜面安定工指針において示されている、シャフト工による地すべり対策を行う場合に考慮する地すべりに伴う外力の作用位置の仮定を参考に図-3 に示すように、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としたとき生じる力や地盤反力度を求めた。これらの試算結果と、基礎の耐力や支持力と比較した安全率を求めて、斜面の変状の規模等の違いによる影響を検討した。

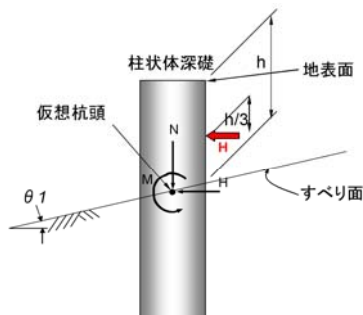


図-3 すべり力の作用位置

2.3 解析ケース

(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-2 に示す。地層構成は、すべりが生じ得る層（崖錐層と未固結層部分）が薄い場合（表-2 の C1）と厚い場合（表-2 の C2）とした（図-4）。傾斜角は、斜面上に設置される基礎の設計実績³⁾として、地盤傾斜が $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ が全体の 50% 程度を占めることを踏まえて、 10° （表-2 の A1）と 30° （表-2 の A2）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/m^2 と 15kN/m^2 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⁵⁾におけるレベル 2 地震時（タイプ II）の設計水平震度（0.80）及びその半分（0.40）の 3 ケースとした。

表-2 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

(2) 載荷幅に関する影響を検討するためのパラメータ

地すべりによる基礎への載荷幅として基礎径に対してどの程度の広がりかを考慮するべきかについては現時点では必ずしも明確ではないが、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、本検討では、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、基礎への作用荷重を基礎径の3倍としたケースについても検討することで影響度合いを評価した。

(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おいて設置し、道路橋基礎に類する形状の構造物としては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少なからず受働土圧抵抗が期待できる状況になるとしている(図-5)。このような状況は、道路橋基礎でも同様に考えることができることから、本検討では、受働土圧抵抗を考慮しないケースを基本としたが、地層構成 C2、傾斜角 30 度の一部について受働土圧抵抗を考慮したケースを検討することにより、その影響度合いを評価することとした。

3. 解析結果

3.1 斜面変状が生じる条件と基礎の耐震安全率の関係

基礎の降伏水平耐力に着目した安全率 n_f とすべり力 PH (kN) の関係を図-6 に示す。ここで、安全率 n_f は、基礎の降伏水平耐力 P_y をすべり力 PH で除して求めたものを指す。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低い。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

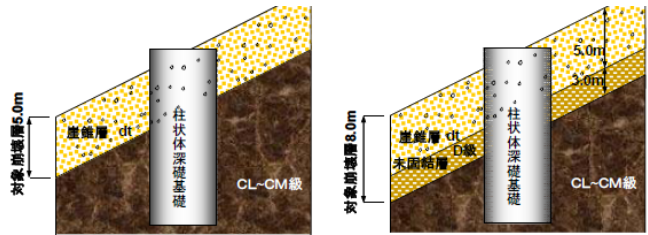
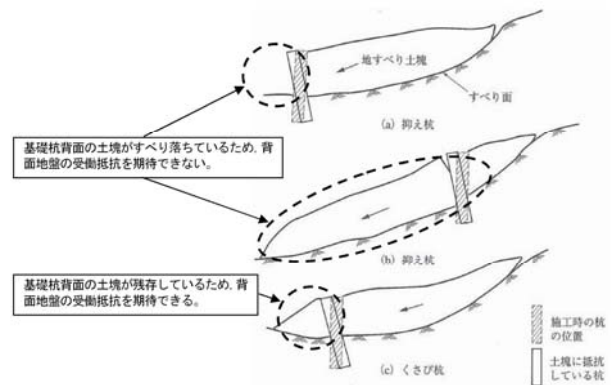


図-4 地層構成(左:表-2の地層構成 C1 右:同 C2)

図-5 剛体杭の抑止効果における受働抵抗^⑥

の小さい方が小さな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評価され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へ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) の関係を図-7 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。

以上より、斜面のすべりに対する基礎の安全性は、同一の設計水平震度の場合で見ると、基礎が設置されている斜面の傾斜角だけではなく、基礎本体耐力と鉛直地盤反力度のどちらが先に限界状態に至るかや、すべり層厚などによっても異なるといえる。

3.2 載荷幅に関する影響

載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。なお、基礎形状の違いによる影響を把握するために、本項目についてのみ図-2 で示したモデルに加えて、基礎径を 5000mm としたモデルについても試算を行った。図-7 (a) に載荷幅 B の1倍のケース (1B) と3倍のケース (3B) の場合にお

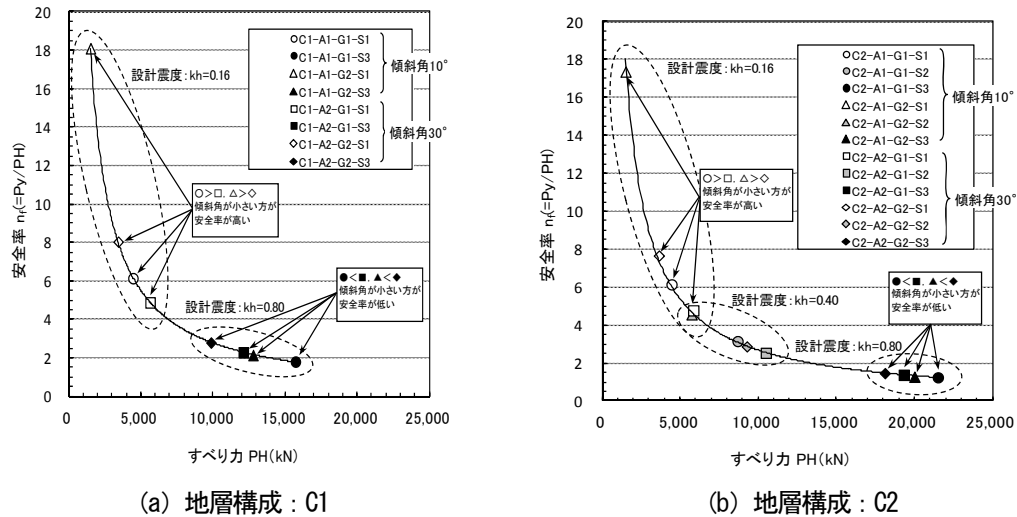


図-5 基礎の降伏水平耐力に着目した安全性の評価

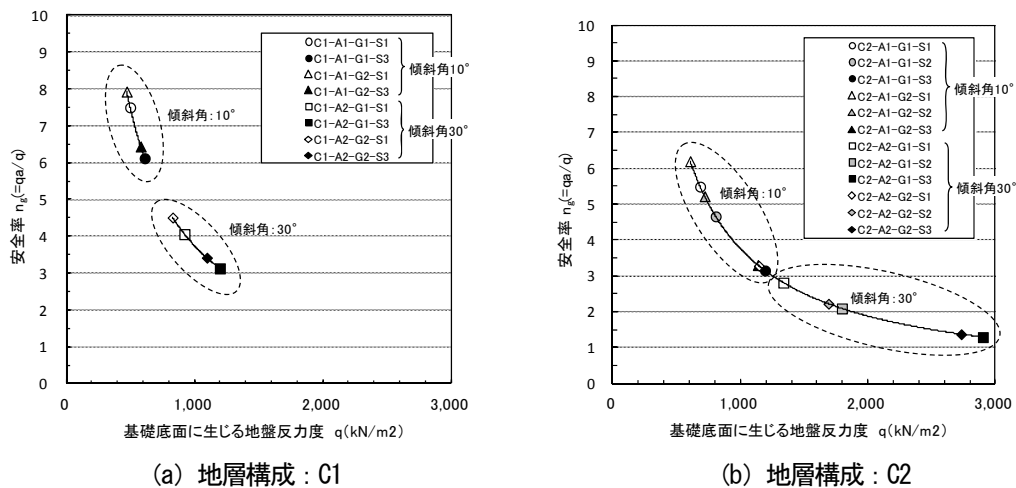


図-6 基礎底面の鉛直地盤反力に着目した安全性の評価

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 PH (kN) の関係を、また、図-7 (b) に載荷幅 1B と載荷幅 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。基礎径が同一のケースでみると、載荷幅が広い方が狭い方よりも安全率が小さい。また、斜面のすべりに関する条件が同じで基礎径のみが異なるものを比較すると、確保されている安全率としては全体的にさほど差は見られない。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、特に大規模地震時に斜面変状が生じた場合における載荷幅が基礎の安全性評価に与える影響が顕著であるといえることから、この評価を適切に行うための検討が必要である。

3.3 すべり面の受働土圧抵抗影響検討

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-8 (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耐力に着目した安全率 n とすべり力 PH (kN) の関係を、また、図-8 (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。基礎の水平耐力及び鉛直地盤反力ともに受働土圧抵抗の有無による違いはほとんどみ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（柱状体深礎基礎）

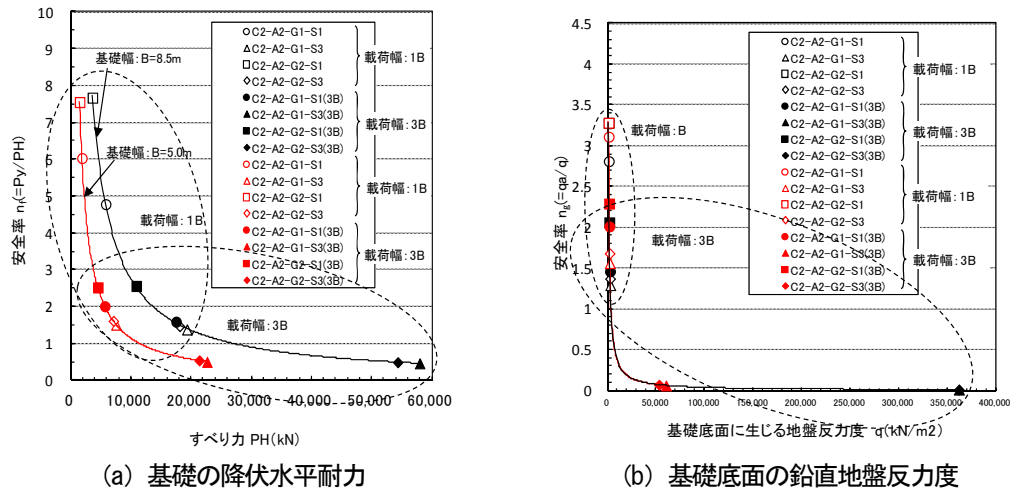


図-7 載荷幅影響検討における安全性の評価

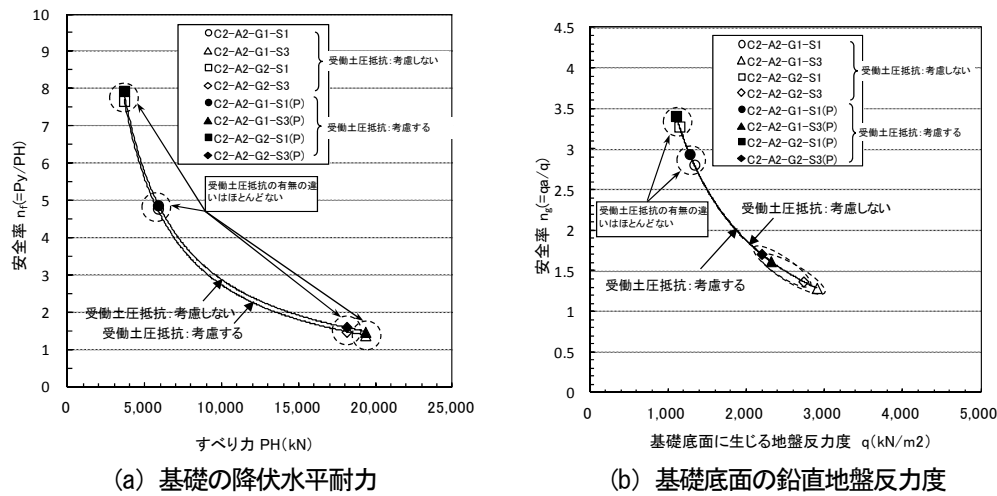


図-8 すべり面の受働土圧抵抗影響検討における安全性の評価

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、基礎へのすべり力の載荷幅、受働土圧抵抗の考慮の有無が、基礎の安全余裕に及ぼす影響について解析的検討を行った。

この結果、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緩い場合の方が小さくなり、傾斜角が緩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いことがわかった。また、斜面のすべりに対する基礎の安全性は、同一の設計水平震度の場合で見ると、基礎本体耐力と鉛直地盤反力度のどちらが先に限界状態に至るかによっても異なることがわかった。

基礎の載荷幅については載荷幅が広いと基礎の耐震安全率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が大きいこと、さらに、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評価に及ぼす影響は小さいことも

明らかとなった。

今回の検討では、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。今後は、載荷幅の設定や、三次元的な広がりや有ることを考慮したうえでの検討を行っていく予定である。

参考文献

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編，2012.3
- (社)日本道路協会：斜面上の深礎基礎設計施工便覧，2012.4
- 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
- (社)日本道路協会：道路土工・切土工・斜面安定工指針，2009.6
- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ 耐震設計編，2012.3
- 中村浩之：抑止杭による地すべり防止対策，2005.9

RESEARCH ON THE COUNTERMEASURES FOR PREVENTING THE DAMAGE OF A ROAD BRIDGE CAUSED BY MOVEMENT OF THE GROUND BY EARTHQUAKE (1)

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Bridge and Structural Technology
Research Group

Author : ISHIDA Masahiro

HOSHIKUMA Jun-ichi

NISHIDA Hideaki

TANIMOTO Syunsuke

Abstract : The purpose of this research is to propose the countermeasures for preventing the damage of road bridges caused by movement of the ground such as landslide, liquefaction induced ground flow by an earthquake.

In FY2012, analytical studies were carried out to evaluate seismic performance of the deep foundation which located on the slope and might be induced by landslide. It was found that seismic performance of the deep foundation depended on angle of slope, scale of seismic intensity, loading width of foundation.

Key words: road bridge, earthquake, land slide, drilled foundation