

河川構造物の耐震性能照査指針・解説
—Ⅱ. 堤防編—

平成28年3月

国土交通省水管理・国土保全局治水課

まえがき

平成24年2月の改定（前回の改定）以降、堤防の耐震に係る様々な課題について検討を行ってきた結果、その一部について一定の結論が得られたことから、耐震性能照査の合理化に資するため、河川構造物の耐震性能照査指針・同解説（以下、指針・同解説）のうち、堤防に係る部分を改定することとしたものである。

前回の改定は、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東北地方から関東地方の広範囲にわたって河川堤防に甚大な被災が生じたことを受け、様々な課題がある中でその当時の知見を結集して行ったものであった。これらの課題のうち今回一定の結論が得られたのは堤防に係る範囲のみであることから、指針・同解説のI. 共通編とII. 堤防編から、堤防に係る部分を集約し、新たな堤防編として改定することとした。堤防以外の構造物については、平成24年2月改定の指針・同解説を適用することとなる。

主な改定項目は、堤体の液状化の照査方法、液状化判定における細粒分補正、レベル2-1地震動の見直しの3つである。

基礎地盤の液状化と堤体の液状化を異なる方法で照査することとしていたものを、基礎地盤と堤体の液状化を同じ方法で一体的に照査することとした。

液状化判定における細粒分補正は、東北地方太平洋沖地震の発生後に被災した河川堤防において数多くの不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験を実施した結果から得られた、細粒分含有率と繰返し三軸強度比、N値の関係を踏まえたものである。これにより、細粒分が比較的少ない範囲では改定前の式で求めた繰返し三軸強度比とほとんど変わらないが、粘性土に分類されるような細粒分を多く含む土では改定前に比べ大きな繰返し三軸強度比が得られることとなる。

レベル2-1地震動については、関東地震の東京周辺の地震動の加速度応答スペクトルをより高度に推定し、政府機関から公表されている東海地震等の地震動予測結果等、あるいは、東北地方太平洋沖地震や東海地震、東南海地震、南海地震、日向沖地震が連動する場合等も考慮し改定を行った。

今回の改定は、「東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について報告書」に示された様々な課題のうちの一部に対応するものであり、全ての課題が解消された訳ではないことから、引き続き、今後の研究・技術開発の進展に応じて適切に対応していくことが必要とされるのは言うまでもない。

本指針の趣旨が正しく理解され、河川構造物の質の高い整備が一層推進されることを期待するものである。

目 次

1. 総 則	1
1.1 適用の範囲	1
1.2 用語の定義	1
2. 基本方針	2
2.1 耐震性能の照査の基本	2
2.2 耐震性能	2
2.3 耐震性能の照査において考慮する外水位	3
2.4 地震動	3
3. 地震の影響	4
4. 耐震性能の照査に用いる地震動	5
4.1 一 般	5
4.2 レベル2地震動	5
4.3 地域別補正係数	9
4.4 耐震性能照査上の地盤種別	10
4.5 耐震性能照査上の地盤面	11
4.6 耐震性能照査上の基盤面	11
5. 耐震性能の照査	12
5.1 一 般	12
5.2 耐震性能の照査方法	12
5.3 堤防の限界状態	12
6. 静的照査法による耐震性能の照査方法	13
6.1 一 般	13
6.2 液状化の影響	13
6.3 液状化の判定	14
6.4 耐震性能の照査	16

1. 総 則

1.1 適用の範囲

本編は、盛土による堤防(以下、堤防)の耐震性能の照査に適用する。ただし、高規格堤防については適用対象外とするものとする。

(解説)

本編の適用の範囲を明らかにしたものである。堤防以外の自立式構造の特殊堤、水門・樋門及び堰、揚排水機場は、耐震性能の照査に用いる地震動を含め、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説(平成24年2月) I. 共通編、III. 自立式構造の特殊堤編、IV. 水門・樋門及び堰編、V. 揚排水機場編を適用する。また、本編は高規格堤防については適用対象外とした。これは、高規格堤防においては高規格堤防特別区域内の土地が通常の利用に供され、高規格堤防に必要とされる耐震性能は一般の堤防の場合とは異なるためである。なお、本編に規定していない計画、調査、設計、施工、維持管理に関する事項については、次の資料によるものとする。

国土交通省河川砂防技術基準 同解説・計画編(平成17年11月)

国土交通省河川砂防技術基準 同解説・調査編(平成24年6月)

建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編(平成9年10月)

国土交通省河川砂防技術基準 維持管理編(河川編)(平成27年3月)

1.2 用語の定義

本編に用いる用語の定義は、次のとおりとする。

(1) レベル1地震動

河川構造物の供用期間中に発生する確率が高い地震動

(2) レベル2地震動

対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動

(3) 耐震性能

地震の影響を受けた河川構造物の性能

(4) 限界状態

耐震性能を満足し得る河川構造物及び各部材の限界の状態

(5) 液状化

地震動による間げき水圧の急激な上昇により、飽和した土層がせん断強度を失うこと

(6) 耐震性能照査上の地盤種別

地震時における地盤の振動特性に応じて、工学的に分類する地盤の種別

(7) 耐震性能照査上の地盤面

耐震性能の照査において地表面と仮定する地盤面

(8) 耐震性能照査上の基盤面

対象地点に共通する広がりを持ち、耐震性能の照査上、振動するとみなす地盤の下に存在する十分堅固な土層の上面

(9) 静的照査法

静的な解析等を用いて耐震性能の照査を行う方法

2. 基本方針

2.1 耐震性能の照査の基本

堤防の耐震性能の照査においては、耐震性能及び耐震性能の照査に用いる地震動を適切に設定するとともに、適切な耐震性能の照査方法を用いるものとする。

(解説)

堤防の耐震性能の照査の基本を規定したものである。耐震性能の照査を構成する要素としては、耐震性能、耐震性能の照査に用いる地震動及び耐震性能の照査方法の三者があるが、堤防の耐震性能の照査においては、これら三者のいずれについても、適切に設定又は選定する必要がある。

耐震性能の照査方法は、構造物の地震時挙動を動力学的に解析する動的照査法と地震の影響を静力学的に解析する静的照査法に大別される。動的照査法では地震動の時刻歴波形から堤防の地震時挙動を算定するのに対し、静的照査法では地震の影響を液状化層の物性の変化として表し、堤防の変形を算定することが行われる。

動的照査法は、一般に、地震時の現象を精緻にモデル化し、詳細な入力データ及び高度な技術的判断を必要とする。一方、静的照査法は、現象を簡略化して、比較的簡易に実施することが可能である。

耐震性能の照査にあたっては、構造物の地震時挙動、必要とされる精度等を考慮して、適切な照査方法を選定する必要があるが、本編では主として静的照査法について規定している。

また、本編では可能な限り最新の知見を取り入れているが、一方、現時点では指針として規定するためには、十分に解明されていない事項があることも事実である。したがって、過去に地震を経験した堤防の被災状況や被災の程度などを照査や対策に活かすことも重要である。

2.2 耐震性能

堤防の耐震性能は、地震後においても、耐震性能の照査において考慮する外水位に対して耐震性能照査上の堤防としての機能を保持する性能を原則とする。

ここで、耐震性能照査上の堤防としての機能とは、河川の流水の河川外への越流を防止する機能とするものとする。

(解説)

堤防は、一般に、河川の流水が河川外に流出することを防止するために設けられるものであり、治水上重要な機能を有している。特に、堤内地盤高が外水位よりも低い地域では、地震により被災した堤防を河川の流水が越流した場合、二次的に浸水被害を引き起こす可能性もある。また、盛土による堤防（土堤）については、その構造上、地震に対して損傷をまったく許容しないことは不合理であるとともに、一般に、地震による損傷を受けても短期間で修復が可能である。このような堤防の特性を踏まえて、堤防の種々の機能のうち、地震によりある程度の損傷が生じた場合においても、耐震性能の照査において考慮する外水位に対して河川の流水の河川外への越流を防止するという耐震性能照査上の堤防の機能を保持することを堤防の耐震性能としたものである。この堤防の耐震性能は、他の河

川構造物では、地震後においても河川構造物としての機能を保持するという耐震性能 2 に相当するものである。

また、以上より、耐震性能の照査の観点からは、堤内地盤高が耐震性能の照査において考慮する外水位よりも高い地域では、堤防の耐震性能は自動的に満足されることになる。

2.3 耐震性能の照査において考慮する外水位

耐震性能の照査において考慮する外水位は、原則として、平常時の最高水位とするものとする。ここで、河口部付近では、平常時の最高水位として朔望平均満潮位及び波浪の影響を考慮するものとし、また、地震の発生に伴い津波の遡上が予想される場合には、施設計画上の津波高についても考慮するものとする。

(解説)

一般に、河川構造物の耐震性能の照査を行う場合に必要となる水位には 2 種類の水位がある。1 種類は条文に規定する耐震性能の照査において考慮する外水位である。地震と洪水が同時に発生する可能性は低く、また、従来の耐震点検・耐震対策等で考慮されてきた外水位を踏襲して、耐震性能の照査において考慮する外水位は、原則として、平常時の最高水位としたものである。河口部付近では朔望平均満潮位及び波浪の影響を考慮する必要がある。また、地震の発生に伴い津波の遡上が予想される場合には、「河川津波対策について」（平成23年9月2日 国水河計第20号、国水治第35号）等を踏まえ、施設計画上の津波高を考慮する必要がある。

もう 1 種類の水位は、3. に規定する地震の影響を考慮するときに用いる水位である。この水位としては、通常想定される水位を用いればよい。

2.4 地震動

堤防の耐震性能の照査においては、対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動（以下、レベル 2 地震動）を考慮するものとする。

ここで、レベル 2 地震動としては、プレート境界型の大規模な地震を想定したレベル 2-1 地震動及び内陸直下型地震を想定したレベル 2-2 地震動の 2 種類を考慮するものとする。

(解説)

堤防については 2.2 に規定したように、1 種類の耐震性能のみを考慮している。

レベル 1 地震動とレベル 2 地震動を受けた場合の堤防の変形、沈下等の損傷状況は異なるものの、修復性には顕著な差異が認められないことによるものである。このため堤防の耐震性能の照査においては、レベル 1 地震動とレベル 2 地震動のうち厳しい結果を与えるレベル 2 地震動のみを考慮すればよい。

レベル 2-1 地震動は大きな振幅が長時間繰返して作用する地震動であるのに対し、レベル 2-2 地震動は継続時間は短いが構造物の地震応答に対して支配的な影響を及ぼす周期帯域において極めて大きな振幅を有する地震動である。堤防の地震動による変形・沈下は、地震動の振幅特性のみならず、周期特性、継続時間、繰返し特性等の影響を受けるため、耐震性能の照査においては、地震動特性が異なる 2 種類の地震動を考慮することとした。

3. 地震の影響

堤防の耐震性能の照査においては、原則として、地震の影響として基礎地盤及び堤体の液状化の影響と広域な地盤沈降の影響を考慮するものとする。

(解説)

堤防の耐震性能の照査において考慮すべき地震の影響の種類を規定したものである。堤防(土堤)の地震時挙動は、地形、地盤条件、堤体材料等の種々の要因の影響を受ける。特に、堤防の既往の地震被害のうち、大規模な変状が生じた被害の多くは堤防の基礎地盤の液状化に起因するものであったが、平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震により堤体の液状化に起因する堤防の大規模な被害が多数発生したことから、本編では原則として、地震の影響として基礎地盤と堤体の液状化を考慮するものとした。なお、今次の地震の堤体の液状化による被災の典型的な状況を図-解3.1.1に示すが、今次の地震以外にも、例えば、泥炭上の堤防等では地下水位以深の堤体の下部が液状化した事例もある。

また、東北地方太平洋沖地震により、東北から関東にかけての広範囲に地殻変動に伴う地盤沈降が生じたことから、地震による広域な地盤沈降が予想される場合には、その影響を適切に考慮しなければならない。

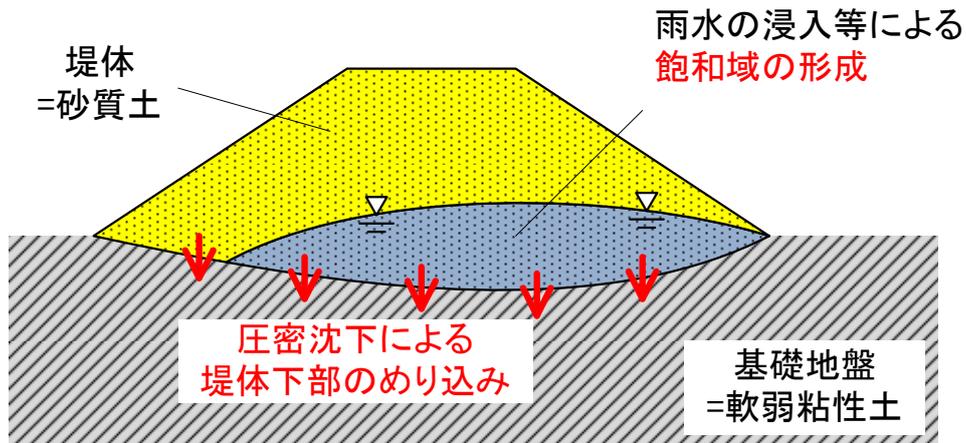


図-解3.1.1 堤体の液状化による被災の典型的な状況

4. 耐震性能の照査に用いる地震動

4.1 一般

レベル2地震動は、4.2の規定により設定するものとする。ただし、レベル2地震動については、対象地点周辺における過去の地震情報、活断層情報、プレート境界で発生する地震の情報、地下構造に関する情報、対象地点の地盤条件に関する情報、既往の強震記録等を考慮して対象地点における地震動を適切に推定できる場合には、その結果に基づいて設定してもよい。

(解説)

レベル2地震動は、4.2に規定する加速度応答スペクトルに基づいて設定することとした。

本指針では、レベル2地震動を対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動と定義しているが、将来、発生が予想される地震動を適切に推定することは一般的に容易ではない。そこで、耐震性能の照査に用いる標準的な地震動を規定した。

一方、これを上回る地震動が生じる可能性もあるため、中央防災会議、地震調査研究推進本部、地方自治体等による活断層の調査、断層を特定した上での地震動の評価等を参考に、対象地点における地震動を適切に推定できる場合には、その結果に基づいてレベル2地震動を設定してもよいこととした。

4.2 レベル2地震動

(1) レベル2地震動は、(2)に規定する加速度応答スペクトルに基づいて設定するものとする。

(2) レベル2地震動の加速度応答スペクトルは、原則として、耐震性能照査上の地盤面において与えるものとし、地震動の種別に応じて、それぞれ、式(4.2.1)及び(4.2.2)により算出するものとする。

$$S_1 = c_{1Z} S_{10} \cdots \cdots \cdots (4.2.1)$$

$$S_2 = c_{2Z} S_{20} \cdots \cdots \cdots (4.2.2)$$

ここに、

S_1 : レベル2-1地震動の加速度応答スペクトル (1gal単位に丸める)

S_2 : レベル2-2地震動の加速度応答スペクトル (1gal単位に丸める)

c_{1Z} : 4.3に規定する地域別補正係数

c_{2Z} : 4.3に規定する地域別補正係数

S_{10} : レベル2-1地震動の標準加速度応答スペクトル (gal) であり、4.4に規定する地盤種別及び固有周期 T に応じて表-4.2.1の値とする。

S_{20} : レベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル (gal) であり、4.4に規定する地盤種別及び固有周期 T に応じて表-4.2.2の値とする。

表-4.2.1 レベル2-1地震動の標準加速度応答スペクトル S_{10}

地盤種別	固有周期 T (s) に対する S_{10} (gal)		
I種	$T < 0.16$ $S_{10}=2,579T^{1/3}$	$0.16 \leq T \leq 0.6$ $S_{10}=1,400$	$0.6 < T$ $S_{10}=840/T$
II種	$T < 0.22$ $S_{10}=2,153T^{1/3}$	$0.22 \leq T \leq 0.9$ $S_{10}=1,300$	$0.9 < T$ $S_{10}=1,170/T$
III種	$T < 0.34$ $S_{10}=1,719T^{1/3}$	$0.34 \leq T \leq 1.4$ $S_{10}=1,200$	$1.4 < T$ $S_{10}=1,680/T$

表-4.2.2 レベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル S_{20}

地盤種別	固有周期 T (s) に対する S_{20} (gal)		
I種	$T < 0.3$ $S_{20}=4,463T^{2/3}$	$0.3 \leq T \leq 0.7$ $S_{20}=2,000$	$0.7 < T$ $S_{20}=1,104/T^{5/3}$
II種	$T < 0.4$ $S_{20}=3,224T^{2/3}$	$0.4 \leq T \leq 1.2$ $S_{20}=1,750$	$1.2 < T$ $S_{20}=2,371/T^{5/3}$
III種	$T < 0.5$ $S_{20}=2,381T^{2/3}$	$0.5 \leq T \leq 1.5$ $S_{20}=1,500$	$1.5 < T$ $S_{20}=2,948/T^{5/3}$

(解説)

(1)耐震性能の照査に用いる地震動の表し方としては、時刻歴波形や加速度応答スペクトル等がある。加速度応答スペクトルは、特定の地震動に対して任意の固有周期及び減衰定数を持つ1自由度系の最大応答加速度として定義され、耐震設計基準類における地震動の表し方として広く用いられている。また、耐震性能の照査において加速度時刻歴波形を用いる場合でも、加速度応答スペクトルを設定した上で、当該加速度応答スペクトルに近い特性を有するように加速度波形を調整する、あるいは、地震動の振幅及び周期特性は加速度応答スペクトルに基づき設定し、経時特性は別途モデル化することにより加速度波形を合成することが行われている。このように、加速度応答スペクトルは地震動の表し方として汎用性を有するものであり、本指針では、耐震性能の照査に用いる地震動を加速度応答スペクトルに基づいて設定することとした。

ただし、堤防のような地盤構造物では、地震動継続時間も重要であることから、動的解析の入力地震動等を設定する場合には、加速度応答スペクトルだけでなく、既往の強震記録や地震動の継続時間に関する距離減衰式等を踏まえ、地震動継続時間にも配慮することが望ましい。地震動継続時間に類似する液状化に伴う流動的な変形の継続時間と地震のマグニチュードの関係の例として式(解4.2.1)を示す。

$$T_{ul} = -1144 + 602.0M - 104.5M^2 + 6.035M^3 \dots \dots \dots \text{(解4.2.1)}$$

ここに、

T_{ul} : 液状化に伴う流動的な変形の継続時間(s) (最大加速度発生時刻以降、地震動の加速度が50gal以上を維持する時間)

M : 地震のマグニチュード ($M > 6$)

(2) レベル2-1地震動及びレベル2-2地震動の加速度応答スペクトル S_1 及び S_2 は、それぞれ、表-4.2.1及び表-4.2.2に規定する標準加速度応答スペクトル S_{10} 及び S_{20} を、地域別補正係数 c_{1Z} 、 c_{2Z} により補正して算出することとした。ここで、 S_1 及び S_2 は、いずれも水平方向の加速度応答スペクトルであり、減衰定数0.05の加速度応答スペクトルの検討結果に基づくものである。

レベル2-1地震動は、発生頻度が低いプレート境界で発生する大規模な地震を想定した地震動を与えるものである。従来、標準加速度応答スペクトルの最大値は、地盤種別に応じて700gal、850gal、1000galだったものを、今回の改定では1400gal、1300gal、1200galとしている。関東地震の東京周辺の地震動の加速度応答スペクトルをより高度に推定し、政府機関から公表されている東海地震等の地震動予測結果等も踏まえ、規定された¹⁾ものである。

一方、レベル2-2地震動は、発生頻度が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震を想定した地震動を与えるものである。レベル2-2地震動についても、これまでに最大規模の被害を引き起こした地震として平成7年兵庫県南部地震を考慮し、同地震により地盤上で実測された加速度強震記録に基づき、レベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル S_{20} を定めることとした。兵庫県南部地震では、神戸海洋気象台（Ⅰ種地盤）、JR西日本鷹取駅（Ⅱ種地盤）、東神戸大橋周辺地盤上（Ⅲ種地盤）等において加速度が大きく構造物に破壊的な影響を与えた地震動が観測されており、これらの加速度応答スペクトルを計算し、特別に大きなピークは平滑化して求めた加速度応答スペクトルがレベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル S_{20} である。

表-4.2.1及び表-4.2.2を図示すると、それぞれ、図-解4.2.1及び図-解4.2.2のようになる。

条文に規定するレベル2地震動の加速度応答スペクトルの入力位置は、4.5に規定する耐震性能照査上の地盤面とした。したがって、耐震性能の照査に用いる地震動の入力位置を耐震性能照査上の基盤面とする場合等には、地盤の影響を適切に考慮する必要がある。

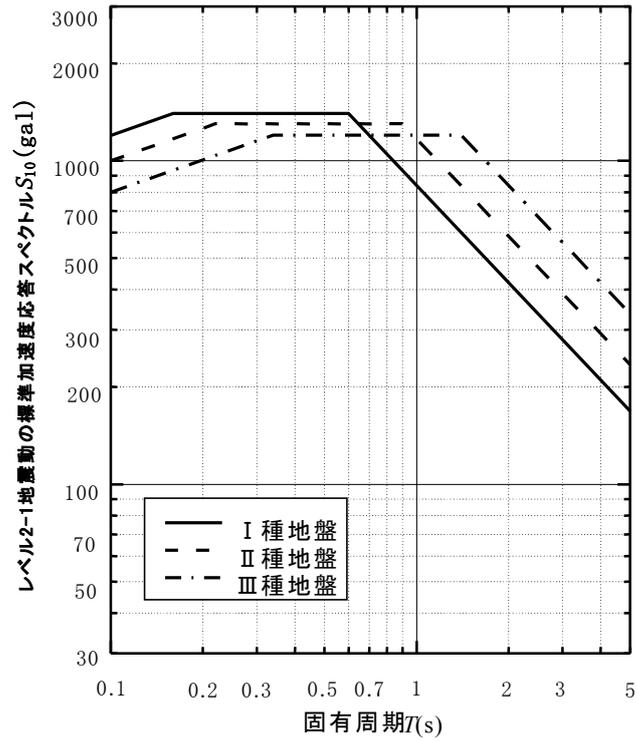


図-解4.2.1 レベル2-1地震動の標準加速度応答スペクトル S_{10}

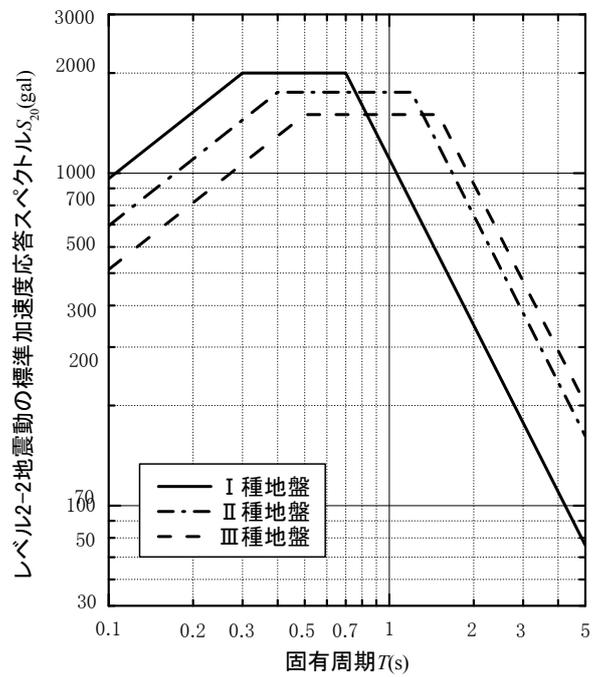


図-解4.2.2 レベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル S_{20}

4.3 地域別補正係数

地域別補正係数 c_{1Z} 、 c_{2Z} は、地域区分に応じて表-4.3.1の値とする。ただし、対象地点が地域区分の境界線上にある場合は、係数の大きい方をとらなければならない。

表-4.3.1 地域別補正係数

地域区分	c_{1Z}	c_{2Z}
A1	1.2	1.0
A2	1.0	1.0
B1	1.2	0.85
B2	1.0	0.85
C	0.8	0.7

(解説)

地震動強度の地域特性については、建設省総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」(昭和47~51年度)において詳細な検討が行われ、その結果は新耐震設計法(案)における地域区分図としてまとめられている。その後の多くの耐震設計基準類では、地震動強度の地域特性として新耐震設計法(案)による地域区分を基礎としている。今回の改定でも、レベル2-2地震動で用いる地域別補正係数 c_{2Z} は、従来の強震帯地域(A1,A2)、中震帯地域(B1,B2)、弱震帯地域(C)と同じ地域で同じ係数を規定した。一方、レベル2-1地震動に関しては、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震、北海道の太平洋沖の地震動が連動する場合や、東海地震、東南海地震、南海地震及び日向灘地震が連動する場合などの大規模な地震の震源域が連動する影響も考慮し、レベル2-1地震動で用いる地域別補正係数 c_{1Z} を規定した¹⁾。

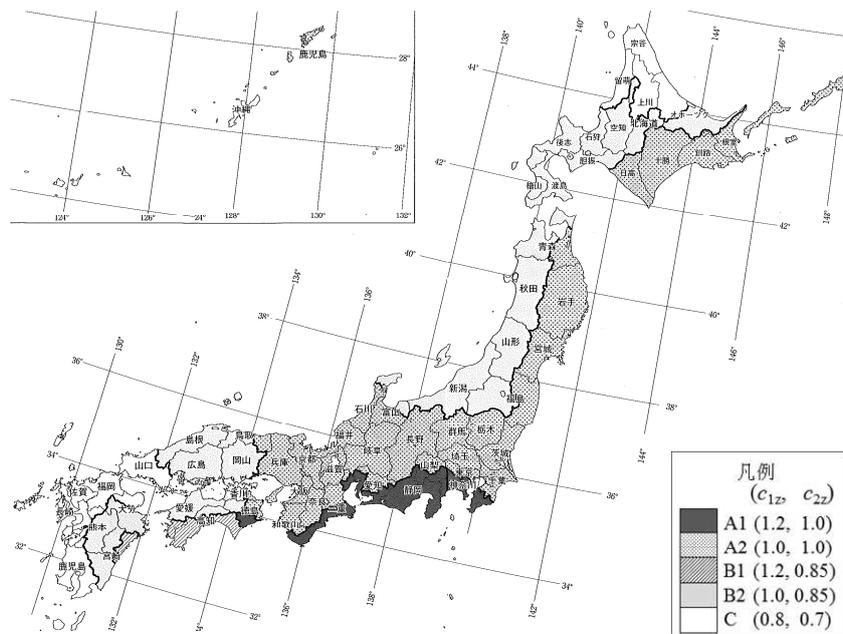


図-解4.3.1 表4.3.1に示す地域別補正係数

4.4 耐震性能照査上の地盤種別

耐震性能照査上の地盤種別は、原則として、式(4.4.1)により算出する地盤の特性値 T_G をもとに、表-4.4.1により区分するものとする。ただし、地表面が耐震性能照査上の基盤面と一致する場合はⅠ種地盤とするものとする。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \dots\dots\dots (4.4.1)$$

ここに、

T_G ：地盤の特性値(s)

H_i ： i 番目の土層の厚さ(m)

V_{si} ： i 番目の土層の平均せん断弾性波速度(m/s)

i ：当該地盤が地表面から耐震性能照査上の基盤面まで n 層に区分されるとき地表面から i 番目の土層の番号

表-4.4.1 耐震性能照査上の地盤種別

地盤種別	地盤の特性値 T_G (s)
Ⅰ種	$T_G < 0.2$
Ⅱ種	$0.2 \leq T_G < 0.6$
Ⅲ種	$0.6 \leq T_G$

(解説)

地表面における地震動特性は地盤条件の影響を受けることが知られており、耐震性能照査上の地盤種別はそれを考慮するために規定したものである。概略の目安としては、Ⅰ種地盤は良好な洪積地盤及び岩盤、Ⅲ種地盤は沖積地盤のうち軟弱地盤、Ⅱ種地盤はⅠ種地盤及びⅢ種地盤のいずれにも属さない洪積地盤及び沖積地盤と考えてよい。洪積地盤及び沖積地盤は、それぞれ、主として洪積層及び沖積層から構成される地盤であるが、ここでいう沖積層には、がけ崩れ等による新しい堆積層、表土、埋立土及び軟弱層を含み、沖積層のうち締まった砂層、砂れき層、玉石層等については洪積層として取り扱ってよい。

地盤種別は、建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編(平成9年10月)と同様に、地盤の特性値 T_G により区分するものとした。地盤の特性値 T_G は、微小ひずみ振幅領域における地盤の基本固有周期に相当するものであるが、レベル2地震動といった強震動の特性も地盤の周期特性に強く影響を受け、また、工学的に簡便に算出することができるため、本指針ではレベル2地震動についても地盤条件を区分するために T_G を用いることとした。

平均せん断弾性波速度 V_{si} は、弾性波探査やP S検層によって測定するのが望ましいが、実測値がない場合は式(解4.4.1)によってN値から推定してもよい。この場合のN値は各層の平均的なN値で代表し、むやみに計算を繁雑にする必要はない。

$$\left. \begin{array}{l} \text{粘性土層の場合} \\ V_{si} = 100N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 25) \\ \text{砂質土層の場合} \\ V_{si} = 80N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 50) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (解4.4.1)$$

ここに、

N_i ：標準貫入試験による i 番目の土層の平均N値

式(解4.4.1)は、粘性土層については $N=1\sim 25$ の範囲、砂質土層については $N=1\sim 50$ の範囲での実験値から導いた推定式である。なお、 N 値が0の場合は $V_{si}=50\text{m/s}$ としてよい。

4.5 耐震性能照査上の地盤面

耐震性能照査上の地盤面は、長期にわたり安定して存在する地盤の上面とするものとする。

(解説)

耐震性能照査上の地盤面とは、4.2に規定するレベル2地震動の加速度応答スペクトルの設定位置である。一般に、液状化判定において安全側の結果となることから、堤防においては、図-解4.5.1に示すように低い方のり尻の高さを耐震性能照査上の地盤面とすればよい。

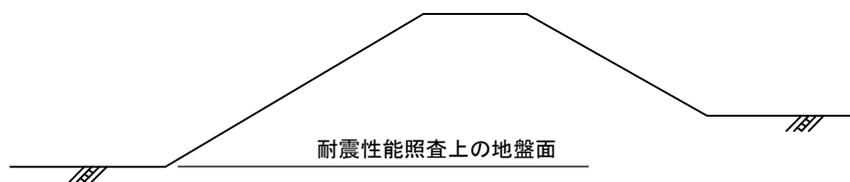


図-解4.5.1 のり尻の高さが異なる場合の地盤面の例

4.6 耐震性能照査上の基盤面

耐震性能照査上の基盤面は、対象地点周辺に広がりを持ち、工学的に十分堅固な土層の上面とするものとする。

(解説)

耐震性能照査上の基盤面としては、対象地点周辺に広がりを持ち、耐震性能の照査上、振動するとみなす地盤の下に存在する十分堅固な土層の上面を想定することとした。ここで、十分堅固な土層とは、せん断弾性波速度 300m/s 程度(式(解4.4.1)より、粘性土層では N 値25、砂質土層では N 値50)以上の値を有している剛性の高い土層と考えてよい。なお、大深度地下構造物の耐震設計、また、断層モデルを用いた地震動の推定等においては、基盤面として前記よりも堅硬な地層の上面を想定する場合もあるが、一般に、河川構造物の地震時挙動には比較的浅部の表層地盤が大きな影響を及ぼすため、前記のように規定した。

5. 耐震性能の照査

5.1 一般

堤防の耐震性能の照査は、耐震性能の照査に用いる地震動によって生じる堤防の状態が堤防の限界状態を超えないことを照査することにより行うものとする。

(解説)

堤防の耐震性能の照査の原則を規定したものである。堤防の耐震性能の照査は、耐震性能の照査に用いる地震動によって堤防に変形、沈下等が生じた後の状態が堤防の限界状態を超えないことを照査することにより行うものとした。

5.2 耐震性能の照査方法

堤防の耐震性能の照査は、耐震性能の照査に用いる地震動及び堤防の限界状態に応じて、適切な方法に基づいて行うものとする。ただし、6. に規定する静的照査法により耐震性能の照査を行えば、本規定を満足するとみなしてよい。

(解説)

耐震性能の照査方法は、構造物の地震時挙動を動学的に解析する動的照査法と地震の影響を静学的に解析する静的照査法に大別される。土構造物の地震時挙動や地震による変形に関しても、近年、種々の動的解析法及び静的解析法が提案され、実務に適用されている方法もある。耐震性能の照査にあたっては、外力や各種パラメータの設定も含め、事例や模型実験等により妥当性が検証された手法を用いなければならない。ここで、ただし書きを設けているのは、静的照査法については、地盤調査の方法からパラメータ設定方法も含め、標準的な手法として位置付けることのできる十分な検証がなされているためである。動的解析法を用いる場合には、静的解析法以上に様々な調査試験が必要となり、解析結果の信頼性は調査試験の量や質に大きく左右されることに留意しなければならない。

5.3 堤防の限界状態

堤防の限界状態は、地震により堤防に変形、沈下等が生じた場合においても、その変形が、2.3に規定する耐震性能の照査において考慮する外水位に対して耐震性能照査上の堤防としての機能を保持できる範囲内になるよう適切に定めるものとする。

(解説)

堤防の限界状態は、地震により堤防に変形、沈下等が生じた場合においても、その変形が河川の流水の河川外への越流を防止するという耐震性能照査上の堤防の機能を保持できる範囲内に抑えられるように定めたものである。

6. 静的照査法による耐震性能の照査方法

6.1 一般

静的照査法による堤防の耐震性能の照査は、6.2の規定により基礎地盤と堤体の液状化の影響を考慮した上で、6.4の規定に基づいて行うものとする。

(解説)

3.の規定により、堤防の耐震性能の照査においては、地震の影響として液状化の影響を考慮することとしているため、静的照査法により堤防の耐震性能の照査を行う場合には、まず、6.2の規定により基礎地盤及び堤体の液状化層の液状化の影響を考慮することとした。次に、その結果に基づき、6.4の規定により堤防の耐震性能の照査を行うこととした。

平成24年2月の改定では、基礎地盤と堤体の液状化の影響をそれぞれ別の方法によって考慮し、照査を行っていた。この改定以降の研究の結果、静的照査法によって基礎地盤と堤体の液状化の影響を一体的に考慮することも可能となってきた。このような状況から、今回の改定では、基礎地盤と堤体を区分しないこととした。

基礎地盤と堤体の液状化の影響を一体的に考慮し、より精度良く沈下量を算定するための留意点は6.4に示す。

6.2 液状化の影響

土層の液状化の判定は6.3の規定により行うものとし、液状化が生じると判定された土層（以下「液状化層」という。）については、液状化による土層の物性の変化を適切に考慮するものとする。

(解説)

既往の震災事例によれば、基礎地盤及び堤体の土層に生じる液状化は河川堤防に大きな影響を及ぼす。このため、河川堤防の耐震性能の照査にあたって基礎地盤及び堤体に液状化が生じる可能性がある場合には液状化の判定を行う必要がある。

基礎地盤及び堤体の液状化の判定は、6.3の規定に従うものとし、液状化層の土層の物性の変化を考慮することとした。土層が液状化した場合、剛性や強度、支持力が低下する。したがって、液状化が生じると判定された土層の土質定数は適切に低減させる必要がある。

また、液状化した土層の上部に液状化しない土層が存在する場合には、液状化しない土層の物性の設定によって液状化の影響が大きく変わる。一般には、液状化しない土層に引張応力が生じないよう弾塑性モデルを用いるか剛性を低下させる等の方法を用いるのがよい。

6.3 液状化の判定

沖積層及び堤体の土層については、液状化が生じると判定される土層を特定するために、液状化の判定を行うものとする。

液状化の判定に用いる地盤面の水平震度は、地震動のタイプと地盤種別に応じて、表-6.3.1の標準値に地域別補正係数を乗じた値を用いるものとする。

表-6.3.1 液状化の判定に用いる地盤面の水平震度の標準値 k_{hgL0}

地盤種別	レベル2-1地震動	レベル2-2地震動
I種	0.50	0.80
II種	0.45	0.70
III種	0.40	0.60

(解説)

液状化の判定は、レベル2地震動を対象として、次の(1)～(3)により行うものとした。なお、本指針では、液状化の判定を行う必要がある土層の地下水位の条件等については、一般に、照査地点の地盤条件と比較して、安全側の規定としている。また、特に必要がある場合には、対象地点における詳細な地盤調査、室内土質試験等を実施し、液状化の判定を行うのがよい。

(1) 液状化の判定を行う必要がある土層

沖積層及び堤体の土層で次の3条件すべてに該当する場合には、(2)によって液状化の判定を行わなければならない。

- 1) 地下水位が現地盤面から10m以内にあり、かつ、現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- 2) 細粒分含有率 FC が35%以下の土層、又は、 FC が35%を超えても塑性指数 I_p が15以下の土層
- 3) 50%粒径 D_{50} が10mm以下で、かつ、10%粒径 D_{10} が1mm以下である土層

(2) 液状化の判定

(1)により液状化の判定を行う必要のある土層に対しては、液状化に対する抵抗率 F_L を式(解6.3.1)により算出し、この値が1.0以下の土層については液状化するとみなすものとする。

$$F_L = R/L \dots\dots\dots (解6.3.1)$$

$$R = c_W R_L \dots\dots\dots (解6.3.2)$$

$$L = r_d k_{hgL} \sigma_v / \sigma'_v \dots\dots\dots (解6.3.3)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x \dots\dots\dots (解6.3.4)$$

$$k_{hgL} = c_z k_{hgL0} \dots\dots\dots (解6.3.5)$$

$$\sigma_v = \gamma_{t1} h_w + \gamma_{t2} (x - h_w) \dots\dots\dots (解6.3.6)$$

$$\sigma'_v = \gamma_{t1} h_w + \gamma'_{t2} (x - h_w) \dots\dots\dots (解6.3.7)$$

(レベル2-1地震動の場合)

$$c_W = 1.0 \dots\dots\dots (解6.3.8)$$

(レベル2-2地震動の場合)

$$c_W = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \dots\dots\dots (解6.3.9) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

ここに、

F_L : 液状化に対する抵抗率

R : 動的せん断強度比

L : 地震時せん断応力比

c_W : 地震動特性による補正係数

R_L : 繰返し三軸強度比で、(3)の規定により求める。

r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

k_{hgL} : 液状化の判定に用いる地盤面の水平震度

c_z : 地域別補正係数で、4.3に規定する c_{1Z} 、または c_{2Z} とする。

k_{hgL0} : 液状化の判定に用いる地盤面の水平震度の標準値で、表-6.3.1に規定する値

σ_v : 全上載圧 (kN/m²)

σ'_v : 有効上載圧 (kN/m²)

x : 地表面からの深さ (m)

γ_{t1} : 地下水位以浅の土の単位体積重量 (kN/m³)

γ_{t2} : 地下水位以深の土の単位体積重量 (kN/m³)

γ'_{t2} : 地下水位以深の土の有効単位体積重量 (kN/m³)

h_w : 地下水位の深さ (m)

(3) 繰返し三軸強度比

繰返し三軸強度比 R_L は式(解6.3.10)により算出するものとする。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \dots\dots\dots (解6.3.10) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7 + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5}} & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

ここで、

< 礫質土以外の場合 >

$$N_a = c_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.47 \dots\dots\dots (解6.3.11)$$

$$N_1 = 170N / (\sigma'_v + 70) \dots\dots\dots (解6.3.12)$$

$$c_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \dots\dots\dots (解6.3.13) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases}$$

< 礫質土の場合 >

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1 \dots\dots\dots (解6.3.14)$$

ここに、

R_L : 繰返し三軸強度比

N : 標準貫入試験から得られるN値

N_1 : 有効上載圧100kN/m²相当に換算したN値

N_a : 粒度の影響を考慮した補正N値

c_{FC} : 細粒分含有率によるN値の補正係数

FC : 細粒分含有率 (%) (粒径75 μm 以下の土粒子の通過質量百分率)

D_{50} : 50%粒径 (mm)

式(解6.3.10)によって繰返し三軸強度比を推定するにあたっては、N値と細粒分含有率の組合せが特に重要である。したがって、粒度分布試験は1m間隔程度ごとに行う必要がある。これらの試験結果は、地盤特性の総合的な評価を行う際にも役立つものである。

また、繰返し三軸強度比の算出式(解6.3.10)、粒度の影響を考慮した補正N値 N_a の算出式(解6.3.11)、細粒分含有率によるN値の補正係数 c_{FC} の算出式(解6.3.13)を最新の検討成果²⁾を踏まえ改定した。東北地方太平洋沖地震後に、被災した河川堤防において数多くの不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験を実施した。これらの試料の中には、従来ほとんど試験が実施されてこなかった細粒分を多く含むものも含まれており、ここで得られた細粒分含有率と繰返し三軸強度比 R_L 、N値の関係から、式(解6.3.10)、式(解6.3.11)、式(解6.3.13)を見直したものである。式(解6.3.10)で求めた繰返し三軸強度比は、細粒分含有率が比較的少ない範囲では改定前の式で求めた繰返し三軸強度比とほとんど変わらないが、粘性土に分類されるような細粒分を多く含む土では改定前に比べ大きな繰返し三軸強度比が得られる。

6.4 耐震性能の照査

堤防については、液状化に伴う土層の物性の変化を考慮し、堤防の変形を静的に算定できる方法を用いて、地震後の堤防高が2.3に規定する耐震性能の照査において考慮する外水位を下回らないことを照査するものとする。

(解説)

従来の堤防の耐震設計及び耐震点検では、円弧すべり法により地震時安全率を算出し、算出された地震時安全率と堤防の沈下量との経験的な関係から、堤防の沈下量を評価していたが、近年、地震による液状化に伴う土構造物の変形を直接算定する種々の方法が提案され、実務にも供せられるようになってきた。

液状化に伴う堤防の変形を簡便かつ精度よく静的に算定する方法としては、液状化の発生による土層の剛性低下を仮定するとともに、土構造物としての自重を作用させ、その変形を有限要素法により算定する方法(有限要素法を用いた自重変形解析法)、液状化した土層をせん断抵抗を有しない粘性流体と仮定し、地盤の流体的な変形を算定する方法(流体力学に基づく永久変形解析法)等を用いることができる。

有限要素を用いた自重変形解析法で、土層のせん断剛性を低減させる場合には、式(解6.3.1)による液状化に対する抵抗率 F_L 及び式(解6.3.10)による繰返し三軸強度比 R_L の値に応じてせん断剛性を低減させるのがよい。図-解6.4.1に、初期有効拘束圧に対するせん断剛性の比と F_L 及び R_L との関係の例を示す。同図の関係は、室内土質試験及び堤防の地震被害事例の分析結果を基に設定されたものである。また、液状化した土に関しては、せん断ひずみが大きくなるとせん断剛性が急激に回復することが実験的に確認されているため、せん断ひずみとせん断応力の関係は、下に凸なバイリニアモデルで表現するのがよい。

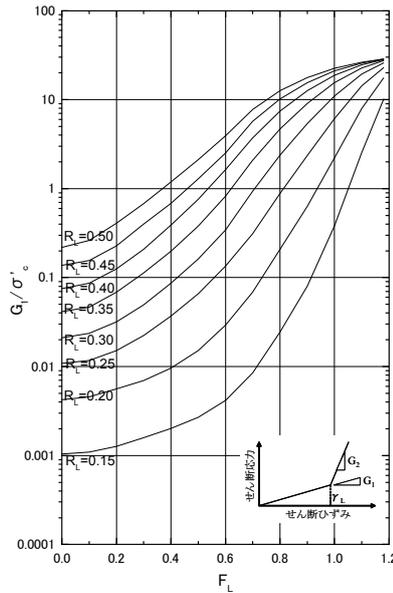
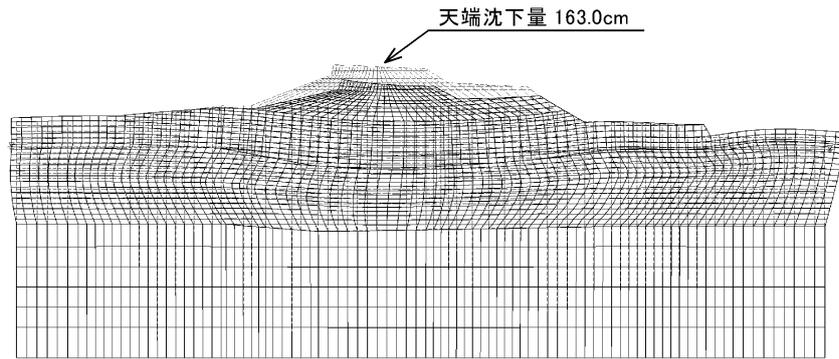


図-解6.4.1 液状化が生じる土層のせん断剛性の低減の例

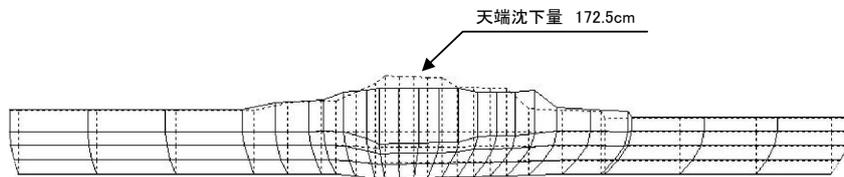
なお、いずれの変形解析方法も地震による堤防の損傷状況を完全に模擬するものではない点に注意が必要である。また、堤防高を算定する際には、解析から得られた堤防の特定の位置における変形や高さに注目するのではなく、例えば、天端の高さを平均するなど、地震後の堤防の変形状態を適切に評価する必要がある。

図-解6.4.2は、有限要素法を用いた自重変形解析法及び流体力学に基づく永久変形解析法による堤防の変形解析例を示したものである。また、有限要素法を用いた自重変形解析法及び流体力学に基づく永久変形解析法のいずれによっても、液状化層の体積圧縮に伴う沈下量については考慮されないため、それを別途算定し、合算する必要がある。

2011年東北地方太平洋沖地震で多く見られた堤体の液状化に対しては、静的照査法が沈下量を過小評価する一方、基礎地盤の液状化層の変形を過大評価する課題が明らかとなった。その後の検討により、ボーリングで確認された地下水位より上の飽和度の高い一定の範囲を液状化層として扱うことにより、堤体の液状化による沈下量を適切に評価することが可能となった³⁾。また、有限要素法を用いた自重変形解析法では、拘束圧に応じた液状化層のせん断剛性の補正⁴⁾を導入することにより、基礎地盤の液状化層による変形を適切に評価することができる。



(a)有限要素法を用いた自重変形解析法



(b)流体力学に基づく永久変形解析法

図-解6.4.2 堤防の変形解析例

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012年3月
- 2) (国研) 土木研究所：細粒分を含む砂の液状化強度の評価法に関する再検討，土木研究所資料，2016年3月
- 3) 脇中康太，石原雅規，佐々木哲也：東日本大震災における堤体の液状化による河川堤防の被害事例解析，第48回地盤工学研究発表会，pp1701-1702，2013年7月
- 4) 脇中康太，石原雅規，佐々木哲也：造成年代等を考慮した河川堤防の液状化被害事例再現解析，第49回地盤工学研究発表会，pp1643-1644，2014年7月