

河川堤防の耐震点検マニュアル

平成28年3月

国土交通省水管理・国土保全局治水課

目 次

1. 総則	1
1.1. 適用の範囲及び本マニュアルの位置づけ	1
1.2. 用語の定義	2
2. 耐震点検の手順	3
2.1. 一般	3
3. 一次点検	5
3.1. 一般	5
3.2. 既往の地震による堤防天端の最大沈下量の算定及び許容沈下量の設定	6
3.3. 二次点検の対象区間の設定	8
4. 二次点検	9
4.1. 一般	9
4.2. 二次点検の対象区間の細分	11
4.3. 地形条件による判定	15
4.4. 代表断面の選定	15
4.5. 基礎地盤の液状化に対する二次点検	16
4.5.1. 基礎地盤の土層構成による判定	16
4.5.2. 簡易式による基礎地盤の液状化に関する判定	18
4.6. 堤体の土質等による判定（堤体の液状化に対する二次点検）	19
5. 三次点検	24
6. 点検結果のとりまとめ	27

1. 総則

1.1. 適用の範囲及び本マニュアルの位置づけ

- (1) 本マニュアルは、盛土による堤防の耐震点検に適用する。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。
- (2) 本マニュアルは、延長の長い線状構造物である堤防について、既存データを有効に活用しつつ、的確かつ効率的に耐震点検を進めるための標準的な手順を示すものである。
- (3) 本マニュアルにおける堤防の耐震性能、限界状態、耐震性能の照査に関する考え方は、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月改定、以下、指針という）に準拠するものとする。

(1)～(2) 本マニュアルの適用の範囲及び位置づけを示したものである。本マニュアルは延長の長い線状構造物である堤防について、既存データを有効に活用しつつ、指針で規定される耐震性能の照査を的確かつ効率的に行うために、現時点における技術や経験に基づく標準的な手順を示したものであり、今後の研究開発の進展に応じて、適切に見直しを行う必要がある。

延長の長い河川堤防の耐震点検を効果的、効率的に進めるためには、地形・地質、河川の変遷や河道の特性等の条件、社会的条件等に加えて、これまでの点検、対策の実施状況、調査の状況、地域（流域）の特性等を考慮すべきものであるが、本マニュアルは既存データを有効に利用して、耐震性能を満足しないと想定される区間を効率的に抽出するための標準的な手法を示したものである。このため、本マニュアルは長大で複雑な土質構成を有する河川堤防に対して画一的に適用されるべき点検手法を示すものではなく、地震に対する堤防の安全性を的確に点検するために、調査の頻度、地域（流域）の特性等を踏まえて適宜修正して用いるのがよい。また、本マニュアルによる点検手法は、既存データを利用した点検を想定しているが、追加調査が必要となる場合もある。また、本点検の結果に基づき具体的な耐震対策の検討を行うにあたっては、さらに詳細な調査を行うことが前提となる。

(3) 指針において、堤防の耐震性能とは、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として定義され、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されている。また、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定めることとされており、堤防の耐震性能の照査は、レベル2地震動に対して堤防に生じる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こととされている。本マニュアルにおいては、これらの考え方を指針に準拠することとした。

ここでいう耐震性能の照査において考慮する外水位は、指針2.3に定義されるものである。すなわち、原則として平常時の最高水位として設定され、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し、また、地震の発生に伴い津波の溯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した上で設定されるものである。

1.2. 用語の定義

本マニュアルに用いる用語の定義は、次のとおりとする。

(1) 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

(2) 耐震性能

地震の影響を受けた堤防の性能

(3) 限界状態

耐震性能を満足し得る堤防の限界の状態

(4) 液状化

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

(5) 堤防天端高

堤防天端の標高

(6) 堤防高さ

堤防天端とのり尻の比高

(5)、(6) 本マニュアルでは、「堤防天端高」を堤防天端の標高、「堤防高さ」を堤防天端とのり尻の比高とし、両者を明確に区別することとした。堤防高さは、図- 1.1に示すように、堤内側のり尻から求めた堤防高さ H_1 と堤外側のり尻から求めた堤防高さ H_2 の平均として求めるものとする。

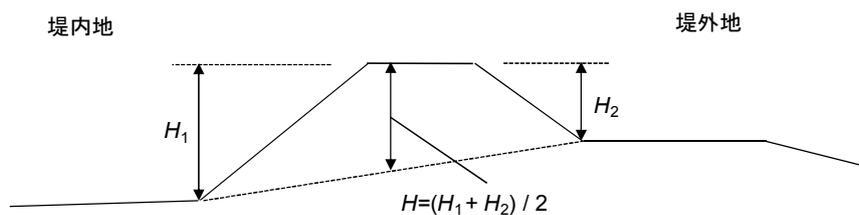


図- 1.1 本マニュアルにおける堤防高さの定義

2. 耐震点検の手順

2.1. 一般

- (1) 堤防の耐震点検を行うにあたっては、調査、点検作業の進捗に合わせ、一次点検、二次点検、三次点検に分けて実施することを標準とする。
- (2) 一次点検、二次点検、三次点検の手順はそれぞれ3章、4章、5章によるものとする。
- (3) 堤防の耐震点検の結果は、6章に基づいてとりまとめるものとする。

(1)～(3) 本マニュアルによる堤防の耐震点検に関する標準的な手順を示したものである。一連の堤防の安全性は、一部分の堤防の局所的な安全性によって決定される。このため、延長の長い線状構造物である堤防の耐震点検にあたっては、ある断面について地震による堤防の沈下量を詳細に評価することもさることながら、一連の堤防の中から地震に対する危険箇所を的確に抽出し、さらにその中から代表となる断面を適切に選定することが重要である。また、区間の細分や代表断面の選定は、概略の情報に基づいて徐々に危険箇所を絞り込み、作業段階が進むにつれてより詳細なデータを用いていくことで、効率的に行うことができる。さらに、既往の地震被害事例に照らし、堤防に生じる沈下量が十分に小さいものと判断された時点で耐震性能を満足するものとみなすといった判断を適切に加えていくことで、より効率的に点検作業を進めることができる。本マニュアルでは、このような観点から堤防の耐震点検の手順を組み立てている。

本マニュアルにおける堤防の耐震点検に関する標準的な手順は、図- 2.1に示すとおりである。

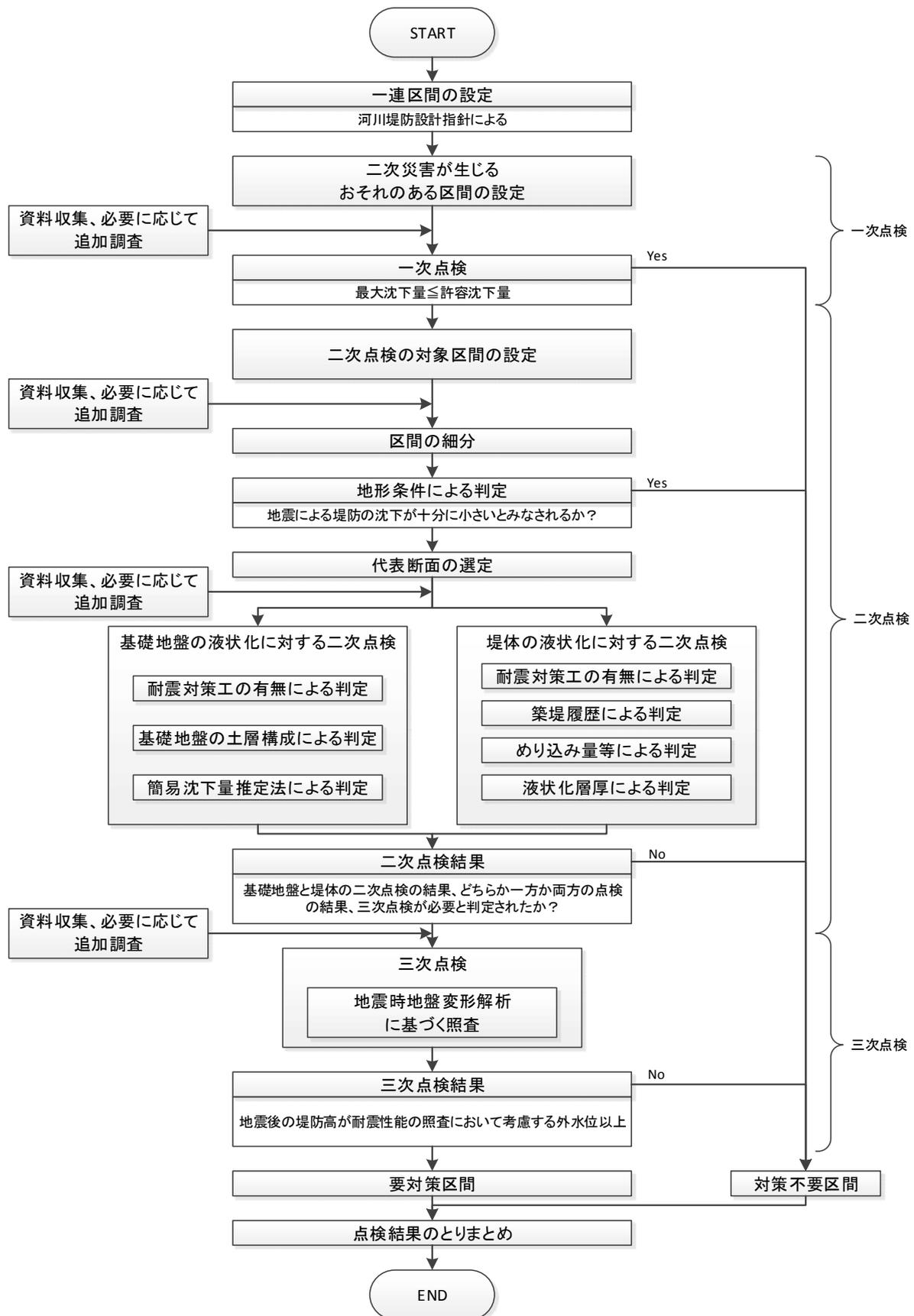


図-2.1 堤防の耐震点検に関する標準的な手順

3. 一次点検

3.1. 一般

- (1) 地震後に二次災害が生じるおそれのある区間に対して、一次点検を行うものとする。ここで、地震後に二次災害が生じるおそれのある区間とは、堤内地盤高が指針2.3に規定される耐震性能の照査において考慮する外水位（以下、照査外水位という）より低い区間とする。ただし、地殻変動に伴う広域な地盤沈降の影響が想定される場合には、津波や高潮の高さに地盤沈降量を加えた高さを照査外水位として用いる。
- (2) 一次点検における耐震性能の照査は、既往の地震による堤防天端の最大沈下量が許容沈下量を上回らないことを照査することにより、耐震性能を満足するとみなすものとする。ここで、既往の地震による堤防天端の最大沈下量の算定及び許容沈下量の設定は、3.2に示す方法によるものとする。
- (3) 一次点検における耐震性能の照査を行う位置は、堤内地盤高、堤防天端高、照査外水位の延長方向の変化を考慮して適切に設定するものとする。一般には、当該区間において定期横断測量が行われている位置としてよい。ただし、堤内地盤高、堤防天端高あるいは照査外水位が局所的に著しく変化する地点がある場合は、これを考慮して最大沈下量の算定及び許容沈下量の設定を行う位置を適切に設定するのがよい。
- (4) 一次点検の結果、耐震性能を満足しない可能性がある区間の堤防を二次点検の対象とする。二次点検の対象区間の設定は、3.3.に示す方法によるものとする。
- (5) 一次点検を行うにあたっては、十分な情報収集を行うものとし、不足する場合は追加調査を行うものとする。

(1) 一次点検の対象区間を示すものである。堤内地盤高が照査外水位よりも高い区間については、指針に規定される堤防の耐震性能は自動的に満足されることから、一次点検の対象外とした。

ここで、堤内地盤高および照査外水位については、堤防縦断方向の変化を踏まえて適切に設定するものとする。特に、堤内地盤高は堤防縦断方向に著しく変化する可能性があることから、注意が必要である。

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、牡鹿半島で最大沈降量約1.2mを記録するなど、特に東北地方の太平洋沿岸では顕著な沈降量となったことから、地殻変動に伴う広域な地盤沈降が想定される場合に考慮することとしたものである。ここでは、地盤沈降の影響を、堤防周辺地盤地表面を基準として、図-3.1に示すように相対的に外水位が上昇するとして考慮することとした。自己流で照査外水位が決定する区間については、河床と堤防が同じく沈降し、水位と堤防の相対的な関係が変わらないため、このような区間では照査外水位に地盤沈降量を加えない。しかし、津波や高潮で照査外水位が決定する区間と隣接する部分では照査外水位が滑らかに接続するよう留意されたい。地盤沈降量は、当該河川の施設計画上の津波を再現する断層モデルにより算定される値を用いて設定するとよいが、中央防災会議の検討結果や地方自治体の防災計画、海岸堤防の施設計画等と整合を図ることも重要である。隆起が想定される地域も存在するが、安全のため、隆起は考慮しないのがよい。

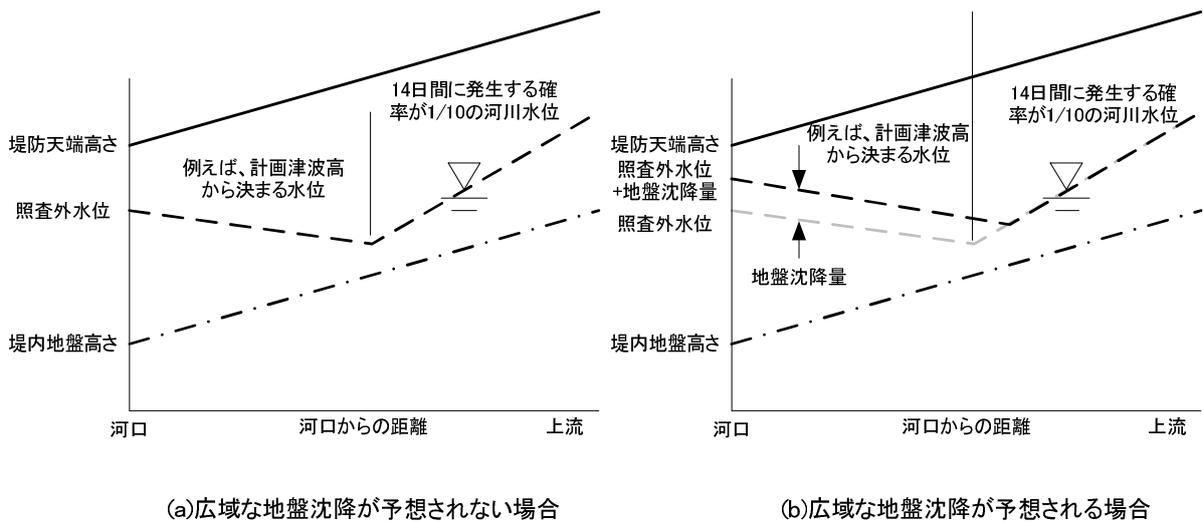


図- 3.1 広域な地盤沈降が予想される場合の地盤沈降量の考慮方法

(3) 一次点検における最大沈下量の算定及び許容沈下量の設定を行う位置は、堤内地盤高、堤防天端高、照査外水位を考慮して適切に設定するものとするが、一般に、当該区間において定期横断測量が行われている地点としてよいこととした。ただし、定期横断測量が行われている地点の間において、堤内地盤高、堤防天端高あるいは照査外水位が局所的に著しく変化している場合もあることから、最大沈下量の算定及び許容沈下量の設定を行う位置の設定にあたっては、これを適切に考慮するのがよい。この場合、現地踏査の結果や定期縦断測量成果、河川管理基平面図（1/2500程度の地形図）等に基づき、定期横断測量のデータを補間するのがよい。

(4) 一次点検では、照査外水位、堤防天端高、堤内地盤高を得るために十分な情報収集を行うものとした。堤防断面が変化する箇所、堤内地盤高が急変している箇所等については、照査外水位、堤防高さ、想定される沈下量が局所的に変化する可能性があるため、情報が不足する場合は、現地踏査や測量等の追加調査によって補完するのがよい。

3.2. 既往の地震による堤防天端の最大沈下量の算定及び許容沈下量の設定

(1) 一次点検における概略の堤防天端の最大沈下量 S_{max} は式(3.1)によるものとする。

$$S_{max} = 0.75H \dots\dots\dots (3.1)$$

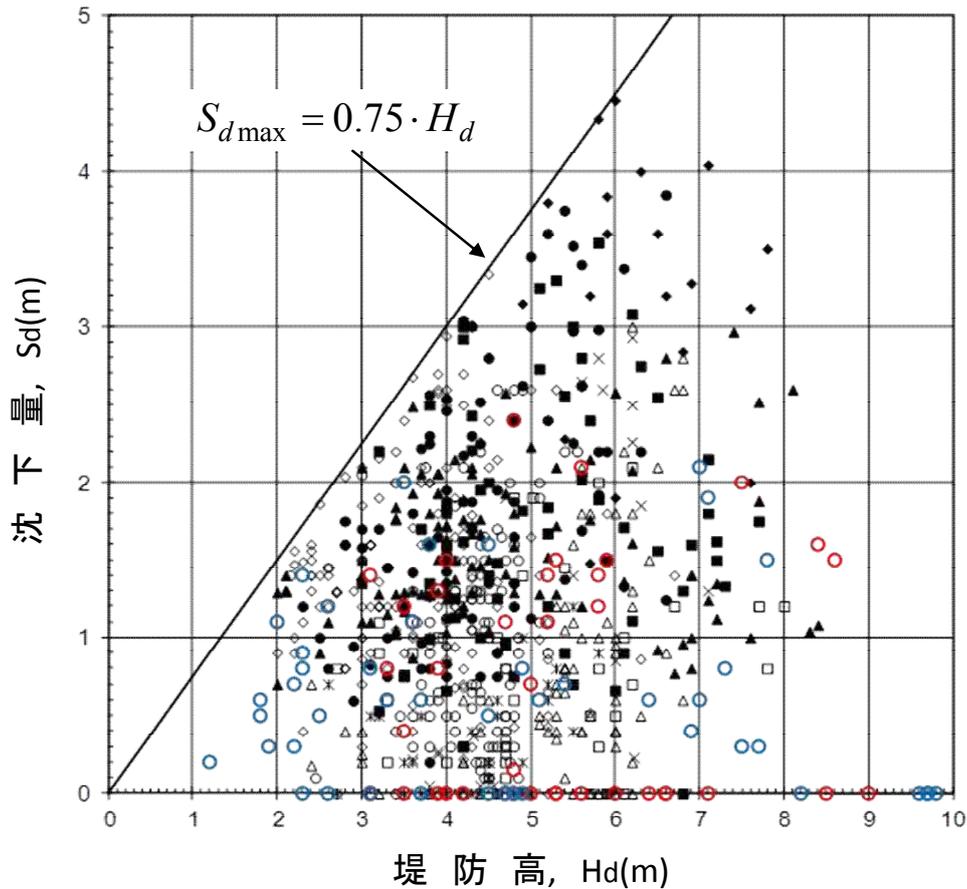
ここに、

S_{max} : 既往の地震による堤防天端の最大沈下量(m)

H : 堤防高さ(m)

(2) 許容沈下量は、堤防天端高と照査外水位の差として設定するものとする。

(1) 図- 3.2に示すように、既往の地震においては、堤防天端に堤防高さの75%以上の沈下が生じた事例はなく、地震前の堤防高さの25%は最低でも残存していたことが経験的に知られている。このことを踏まえ、堤防の一次点検においては、既往の地震による堤防天端の沈下量を基に最大沈下量 S_{max} を式(3.1)により簡便に算定することとした。



- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| ◆ 濃尾地震(長良川、揖斐川等) | ■ 関東大地震(江戸川、富士川等) |
| ● 福井地震(九頭竜川、大聖寺川等) | ▲ 十勝沖地震(新釧路川、十勝川等) |
| ◇ 新潟地震(阿賀野川、信濃川等) | □ 宮城県沖地震(北上川、名取川等) |
| ✱ 日本海中部地震(岩木川、米代川等) | △ 釧路沖地震(釧路川) |
| ○ 北海道南西沖地震(後志利別川) | × 兵庫県南部地震(淀川) |
| ○ 東北地方太平洋沖地震
(阿武隈川、鳴瀬川、江合川等東北地整管内) | ○ 東北地方太平洋沖地震
(利根川、霞ヶ浦、那珂川等関東地整管内) |

図-3.2 既往の地震における堤防高さと沈下量の関係

(2) 本マニュアルでは、便宜上、堤防天端高と照査外水位の差として求まる比高を許容沈下量と呼ぶこととした。地震により生じる堤防天端の沈下量が許容沈下量を越えなければ、地震後に河川の流水が河川外に越流することはない。このため、許容沈下量は、指針に規定される堤防の耐震性能が満足される最大の沈下量であると考えることができる。

照査外水位は、区間によっては、プレート境界型の地震(レベル2-1地震動)に対して津波の遡上や地殻変動に伴う地盤沈降量により照査外水位が決まり、一方で内陸直下型の地震(レベル2-2地震動)に対して平常時の最高水位により照査外水位が決まるなど、地震の種類によって異なる照査外水位が設定される場合がある。一次点検の段階では、両者のうちいずれか厳しい方として設定してよい。

3.3. 二次点検の対象区間の設定

一次点検により耐震性能を満足しない可能性がある区間の起点及び終点を適切に設定し、二次点検の対象区間として設定する。

一次点検の結果を踏まえ、耐震性能を満足しない可能性がある区間の起点及び終点を適切に設定し、二次点検の対象区間として設定する必要がある。このとき、二次点検の対象区間は、河川堤防設計指針に規定される一連区間を跨ぐことのないように設定する必要がある。

一般には、図- 3.3に示すように、耐震性能を満足するとみなせる箇所が連続する区間を除き、残された区間を二次点検の対象としてよい。

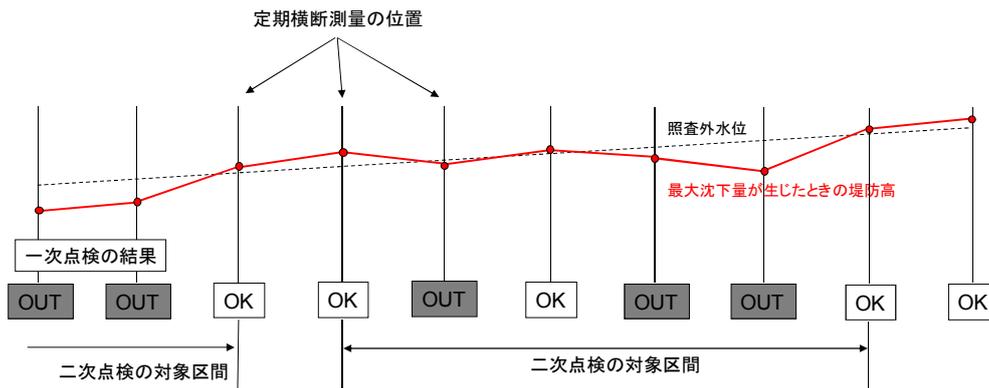


図- 3.3 二次点検の対象区間の設定例

4. 二次点検

4.1. 一般

- (1) 二次点検にあたっては、地震に対する安全性が同程度になるような一連の区間として二次点検の対象区間を細分する。区間の細分は、4.2に示す方法による。
- (2) 各細分区間において、4.3に示す地形条件による判定を実施し、既往の地震被害事例に照らしても地震による堤防の沈下が十分に小さいと判断される区間については、耐震性能を満足するとみなしてよい。
- (3) (2)の結果、耐震性能を満足するとみなすことのできない細分区間において、地震時に最も不利となる位置の断面を代表断面として選定するものとする。代表断面の選定は、4.4に示す方法によるものとする。
- (4) 代表断面について、(5)に示す基礎地盤の液状化に対する点検と(6)に示す堤体の液状化に対する点検の両方を実施し、少なくともどちらか一方の点検の結果、三次点検が必要と判定された場合には、当該断面を含む細分区間の堤防を三次点検の対象とする。
- (5) すでに基礎地盤の液状化に対する耐震対策が実施されている区間の堤防は、無対策に比べ高い耐震性を有していると考えられることから、当面、基礎地盤の液状化に対する対策を実施しない。代表断面について、4.5.1に示す方法に基づき、既往の地震被害事例に照らしても地震による堤防の沈下が十分に小さいと判断されるか、4.5.2に示す簡易沈下量推定法により算定される堤防の沈下量が、許容沈下量を上回らないことを照査することにより、三次点検の必要性を判定する。
- (6) すでに堤体の液状化に対する耐震対策が実施されている区間の堤防は、無対策に比べ高い耐震性を有していると考えられることから、当面、堤体の液状化に対する対策を実施しない。代表断面において、粘性土や透水性の高い礫質土などの液状化しない材料が堤体内に部分的に存在し、それ以外の部分が仮に無くなったとしても外水位に対して必要となる堤防の高さと幅を確保できるかどうか築堤履歴を確認するか、4.6に示す方法に基づき、三次点検の必要性を判定する。
- (7) 二次点検を行うにあたっては、十分な情報収集を行うものとし、不足する場合は追加調査を行うものとする。

図-4.1に、具体的な二次点検のフローを示す。

(1)～(3)二次点検においては、地震に対する安全性が同程度となるような一連の区間として二次点検の対象区間を細分するとともに、地形条件及び基礎地盤条件による簡単な方法により地震による堤防の沈下量が十分に小さいとみなせる区間を除いた上で、細分区間の中で地震時に最も不利となる断面を代表断面として選定することとした。

(4) 東北方地方太平洋沖地震では、基礎地盤の液状化による被害と堤体の液状化による被害、基礎地盤と堤体の液状化が複合した被害が生じた。このため、基礎地盤の液状化と堤体の液状化についてそれぞれ点検を実施することとしたものである。

(5) 堤防において現時点で実施されている耐震対策は、その多くが中規模地震を設計外力として設計されたものであるが、東北地方太平洋沖地震では、このような対策がなされた堤防での被災がほとんどなかった。これは、対策工の設計にあたり参照された河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案)(建設省土木研究所, H9.10.)は中規模地震動を設計外力としたものであるが、改良範囲内に液状化を生じさせないことや、対策工が外的・内的に安定することを照査していたことから、中規模地震動に対して十分な安全余裕を確保するように設計されていたため、結果として、大規模地震動に対しても対策効果を発揮したものと考えられる。また、これまでの堤体の液状化対策の設計法は、レベル2地震動を与えた模型実験の結果に基づいたものであることから、この設計法に従って

対策を実施した区間では、十分な耐震性を有していると考えられる。

このため、今回のマニュアルでは、基礎地盤と堤体の液状化に対する耐震対策済みの区間については、当面、対策を実施しないこととした。このような区間については、今後の調査研究の進展に応じ、適切に対応していく必要がある。

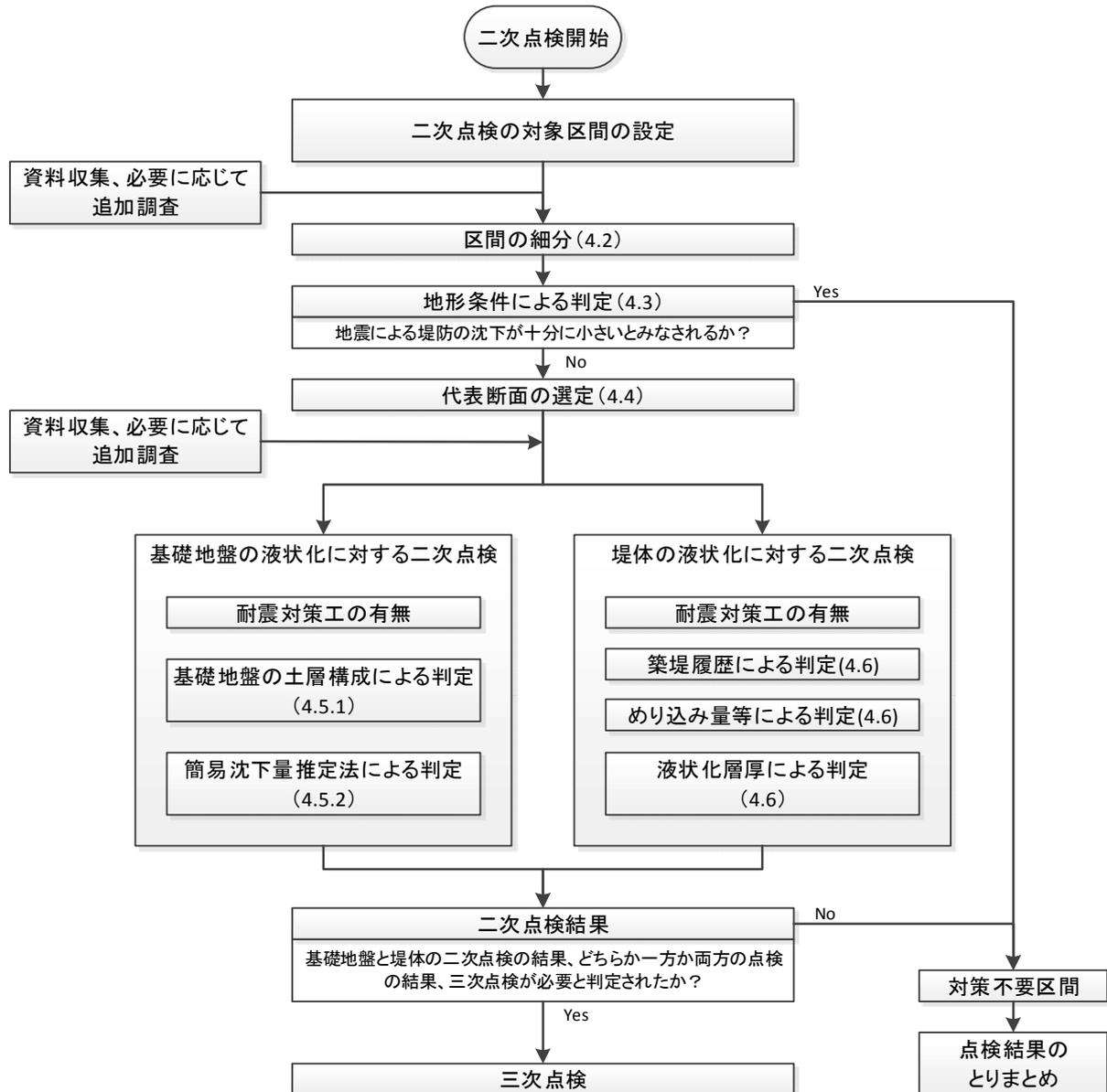


図-4.1 二次点検のフロー（カッコ内の数字は、関連する章節番号）

なお、浸透対策として設置されている遮水矢板等については、根入れ深さや強度等の仕様が耐震性の向上にあたって十分なものとなるように設計されたものではないことから、耐震対策工として評価することは適当でない。ただし、東北地方太平洋沖地震において根入れ深さが不足する場合には大規模な被害が見られたものの、耐震対策効果が認められる事例もあり、現場の状況に応じて適切に評価することも考えられる。

(6) 既往の質的整備などの調査結果から築堤履歴が明らかな場合には、これを活用する。図-4.2のように液状化判定において対象外とされる材料が堤体内に部分的に存在し、液

状化判定の対象となる材料による部分が仮に全て無くなった場合でも、天端幅を確保できる堤防高さを照査外水位と比較することにより、三次点検の必要性を判定する。

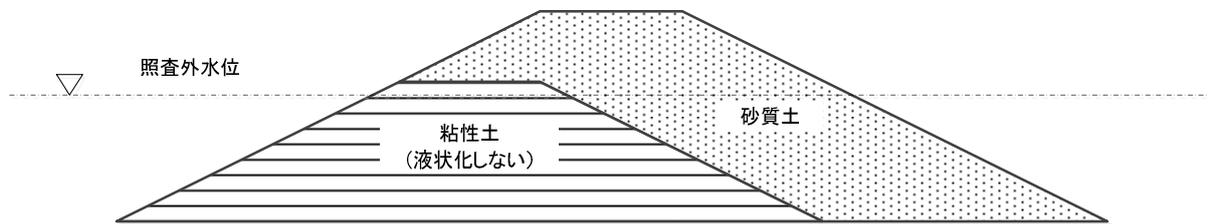


図- 4.2 築堤履歴による判定の例

(7) 二次点検を行うにあたっては、十分な情報収集を行うものとし、不足する場合は追加調査を行うものとした。二次点検において必要となる資料には、地形分類図（治水地形分類図など）、地質縦断図及び土質柱状図、堤防工事履歴、樋門等横断工作物の補修履歴、対策工の種類や規模等がある。

指針に規定される耐震性能の照査に用いる地震動は、指針4.2に規定される耐震性能照査上の地盤種別に応じて規定されており、地盤種別は指針4.4に規定される耐震性能照査上の基盤面以浅の土層構成に基づいて判別される。

また、指針6.3では、現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土層について、液状化の判定を行う必要があることが解説されている。これらのことから、堤防の耐震点検においても、基礎地盤の土層構成等を調べるにあたり、比較的深度の大きな位置の情報が必要となる。このため、既往の地盤調査や浸透に対する詳細点検等において得られたデータのみならず、既往の耐震点検の際に得られたデータを有効に活用するのがよい。地質縦断図についても、既往の耐震点検で得られたデータが反映されたものを用いるのがよい。

また、細分区間の設定や代表断面の選定には、ボーリングやサウンディングと物理探査などの調査方法を組み合わせることが有効な場合もある。

4.2. 二次点検の対象区間の細分

二次点検の対象区間の細分にあつては、地震に対する安全性が同程度になるように、次に示すa)～f)を考慮するものとする。

- a) 被災履歴
- b) 微地形分類
- c) 基礎地盤の土層構成及び堤体の土質
- d) 許容沈下量
- e) 耐震対策工及び護岸の有無、川裏のり尻ドレーン工の規模
- f) その他

二次点検の対象区間を細分する指標として、被災履歴、微地形分類、基礎地盤の土層構成及び築堤履歴を含む堤体の土質、許容沈下量、耐震対策工及び護岸の有無、川裏のり尻ドレーンの規模等を用いることとした。

二次点検の対象区間の細分は、地震に対する堤防の危険箇所を的確かつ効率的に抽出することを目的として行うものであり、地震に対する安全性が同程度になるような一連の区間として細分することとした。なお、区間を過度に細かく細分することは、点検作業の効率性を欠くため、そのような場合は細分区間を適切に統合し、ある一定の延長を有する

区間として細分するのがよい。

a) 被災履歴

堤防に関する既往の地震被害は、主として基礎地盤の液状化に起因するものであったこと、地震によって液状化が一度生じた地点において、再度の地震によって再度の液状化が生じた事例も多数確認されていることから、地震被害を受けた履歴があり、地盤改良等の対策が施されずに復旧された区間の堤防は、今後についても地震被害を受ける可能性が高い。

また、洪水時に基礎地盤からの漏水が確認された地点は、基礎地盤が緩い砂質土層によって構成されている可能性があり、このような地点で地震が生じた場合には基礎地盤の液状化による堤防の沈下が生じる可能性があると考えられる。さらに、局所的に堤防が沈下している箇所や、漏水に関わらず洪水時に被災を受けた箇所についても、局所的に基礎地盤の条件が変化している可能性もある。

以上の観点から、区間の細分にあたり、堤防の被災履歴を指標の一つとすることとした。特に、地震被害及び基礎地盤からの漏水被害が生じる箇所においては、地震時に被災を受ける可能性が高い場合があるので区間の細分にあたっては留意する必要がある。

b) 微地形分類

過去の地震による事例から、液状化の発生地点と微地形分類は強い相関関係を有することが明らかとなっている。これは、液状化の生じやすさが土質や堆積状況、堆積年代、応力履歴等に依存し、微地形分類がこれらを概ね反映したものであるためである。さらに、既往の堤防の地震被害が主として基礎地盤の液状化に起因するものであったため、堤防の概略の地震被害程度と微地形分類についても一定の相関関係を有することが明らかとなっている。このことから、区間の細分にあたり、微地形分類を指標の一つとすることとした。一般には、微地形分類が異なる区間を異なる細分区間とするのがよい。

微地形分類の判別にあたっては治水地形分類図を用いてよい。治水地形分類図は河川堤防の立地する地盤条件を包括的に把握し、さらに詳細な地点の調査を行うための基礎資料を得ることや氾濫域の土地の性状やその変化の過程、及び地盤高等を明らかにすることを目的とし、昭和51年度～53年度に作成されたものである。このため、治水地形分類図を利用するにあたっては、当分類図が洪水や高潮等における治水対策を進める上での基礎資料として作成されているため、地震の影響を考慮した細かい地形区分までは分類されていないことや、作成当時と現在で地形状況が異なる可能性があることなどに留意する必要がある。また、治水地形分類図の他に地形を区分するための資料として、土地分類図や土地条件図等もある。

治水地形分類における地形区分と地震による堤防の沈下の可能性の関係を表- 4.1に示す。これは、液状化地域ゾーニングマニュアル（平成10年度版）（国土庁防災局震災対策課、1999）に示される微地形区分と地盤表層の液状化可能性の関係を参考としつつ、堤防に関する既往の地震被害事例を踏まえて整理したものである。同表では、地形区分による危険度をA～Dの4ランクに区分しており、これらが地震による堤防の沈下の可能性の大きさを表している。細分区間の延長が過度に短くなる場合は、このランクが同じとなる区間を統合してよい。また、やむを得ず異なるランクの区間を統合する場合は、いずれか厳しい方のランクとして区分するのがよい。

旧河道については、既往の地震においても特に堤防の被害が集中していることから、入念に点検を行うのがよい。

治水地形分類における干拓地については、埋立地が含まれる場合があること、1995年

兵庫県南部地震において甚大な被害を受けた淀川堤防西島地区が干拓地に区分されることを踏まえ、地震による堤防の沈下の可能性が極めて大きいものとして区分することとした。

砂丘については、均質かつ緩い砂質土により構成されることが多いものの、周辺に比べて比高が高いため、一般に地下水位が低く、液状化が生じる可能性は低いと考えられている。ただし、砂丘であっても末端部や砂丘間低地、切土部など、地下水位が高い箇所では、過去にも液状化が生じた事例が多数確認されている。一般に、砂丘上に堤防が築堤されている地点はこれらのいずれかに該当する場合はほとんどであると考えられることから、砂丘については、比高が高い箇所（一般に 3～4m以上）を除き、地震による堤防の沈下の可能性が極めて大きいものとして区分するのがよい。

浅い谷については、液状化が生じる可能性は否定しえないものの、一般に液状化層厚が小さく、また、河川水位が低く許容沈下量が大きいことも勘案し、地震による堤防の沈下の可能性が小さいものとして区分した。なお、治水地形分類図では、旧川微高地と同じ凡例にて取り扱われているため、地形図等より旧川微高地と判別する必要がある。

自然堤防については、既往の地震において液状化が生じた事例が多く、液状化する可能性が大きい。特に自然堤防縁辺部、比高の小さい（一般に1m未満）自然堤防等地下水位が高い箇所（一般にG.L-2m～G.L-3m以浅）では地震による堤防の沈下の可能性が極めて大きいものとして区分するのがよい。

その他、治水地形分類図では地形区分されていないが、一般に堤間低地と呼ばれる、現況または旧河道の堤防、自然堤防、氾濫平野内に存在する砂州等の微高地には含まれた低地においては、既往の地震において液状化が生じた事例が多いことから、区間を細分する上で堤防の沈下の可能性が極めて大きいものとして区分するのがよい。

表- 4.1 治水地形分類による地形区分と堤防の地震被害の可能性

地形区分による危険度ランク (括弧内は地震による堤防の沈下の可能性を表す)	治水地形分類による地形区分
A (極大)	旧河道、落掘、旧落堀、 高い盛土地、干拓地、砂丘
B (大)	自然堤防、旧川微高地、 氾濫平野、湿地、旧湿地
C (小)	扇状地、浅い谷
D (なし)	山地・丘陵地、台地、崖

c) 基礎地盤の土層構成及び堤体の土質

既往の堤防の地震被害が主として基礎地盤の液状化に起因するものであった。このため、基礎地盤の土層構成（土質、層厚、深度やN値等）を指標の一つとして区間を細分することとした。ただし、河川近傍の基礎地盤の土層構成は複雑で、これを指標として区間を細分することが困難な場合、便宜上、基礎地盤上面から20m以浅においてN値30未満の砂質土層または砂礫質土層の有無を指標の一つとし、このような土層を有する区間と有しない区間を異なる細分区間としてよい。

また、東北地方太平洋沖地震をはじめとし、過去の地震被害では、図- 4.3に示すような軟弱地盤上に築堤されている箇所において、軟弱層の圧密沈下により基礎地盤にめり込んだ堤体土が液状化し、大規模な変状が生じた事例がある。このような箇所では堤防の被害が生じやすい原因としては、地表面付近の軟弱粘性土層は透水性が低いいため、降雨等によっ

て堤体内に浸潤した間隙水がめり込んだ堤体部分にたまりやすく、常に飽和した状態にあることや、めり込みに伴い堤体に緩み（密度低下、応力減少）が生じるためであると考えられる。また、大規模な変状が生じた箇所の堤体の土質は液状化しやすい砂質土であることが多い。このため、区間の細分にあたっては、堤体土のめり込みや堤体の土質についても着目するのがよい。堤体のめり込みの有無や堤体の土質は、浸透に対する詳細点検結果等を有効に活用して調査するのがよい。堤体のめり込み量が既往の調査から確認できない場合には、軟弱層の平均的なN値や厚さに着目するとよい。なお、軟弱地盤の圧密による沈下が著しいために、嵩上げを実施した堤防や、補修の履歴がある樋管などの横断構造物の周辺の堤防はめり込み量が大きいと推測されるため、堤防の維持管理や横断構造物の補修の履歴などを参考にするとよい。

また、築堤履歴と堤体土質の関係に着目し細分するとよい。築堤履歴が縦断的に複雑な場合には十分な調査結果に基づいて設定することが必要である。

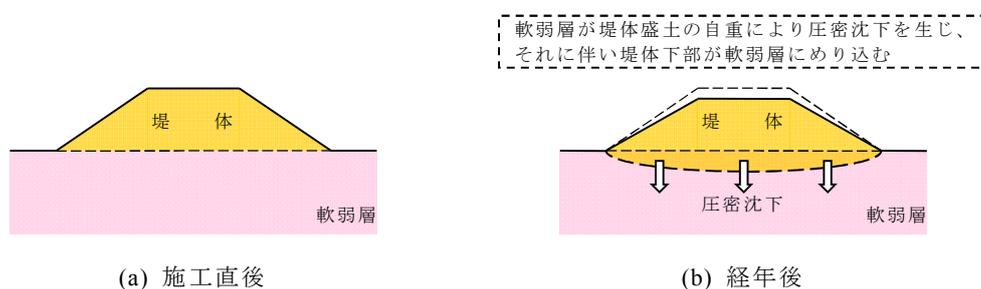


図-4.3 堤体土のめり込み

d) 許容沈下量

地震により生じる沈下量が同程度であっても、許容沈下量の大小によって地震に対する安全性が異なることから、沈下量のみによって地震に対する安全性を判断することはできない。このため、区間の細分にあたっては、許容沈下量を指標の一つとすることとした。一般に、許容沈下量が1m程度ごと（例えば1.0～2.0mの区間、2.0～3.0mの区間等）に変化するように区間を細分してよい。

e) 耐震対策工及び護岸の有無

堤防において現時点で実施されている耐震対策は、その多くがいわゆるレベル1地震動を対象として設計されたものであるが、東北地方太平洋沖地震では、このような対策がなされた堤防での被災がほとんどなかった。このため、対策が実施された区間とされていない区間は異なる細分区間としなければならない。

また、護岸が設置されている場合や川裏のり尻にドレーン工が設置されている場合には、堤体の液状化による崩壊を抑制する効果が期待できることから、これらが施工された区間とされていない区間は異なる細分区間としなければならない。ドレーン工の規模が大きく変わる場合にも、異なる細分区間とするのがよい。

f) その他

細分区間の延長が長くなりすぎる場合や、その他合理性が認められる場合は、上記a)～e)のほか、堤内地の土地利用状況や地域ごとに作成された液状化マップ等を参考に区間を細分してよい。

4.3. 地形条件による判定

既往の地震被害事例に照らし、地震による堤防天端の沈下量が十分に小さいと判断される地形条件に該当する細分区間の堤防は、基礎地盤及び堤体の液状化に対して耐震性能を満足するものとみなしてよい。

既往の地震被害事例に照らし、当該細分区間において生じる堤防の沈下量が十分に小さいと判断される場合、二次点検の対象区間を細分した段階で、耐震性能を満足するものとみなしてよいこととした。ここで、一般には、表- 4.1に示す地形区分による危険度ランクがCまたはDに該当する細分区間の堤防については、地震による堤防天端の沈下量が十分に小さいとみなしてよい。

4.4. 代表断面の選定

代表断面は、選定対象とする細分区間のうち、地震による堤防天端の沈下量が最も大きくなると考えられる断面として選定するものとする。

細分区間の中から、地震に対する堤防天端の沈下量が最も大きくなると考えられる断面を代表断面として選定することとした。代表断面は細分区間の堤防を代表するものであり、この位置での堤防の耐震性能の照査を行うことで、当該細分区間全体の地震に対する安全性が確認される。

地震に対する安全性を評価する指標としては、様々なものが考えられるが、概略想定される堤防天端の沈下の程度や、沈下に対する余裕の程度が概ね同程度となるように区間が細分されることから、一般には基礎地盤の土層構成（土質、層厚、深度、N値等）、既往の被災履歴を考慮し、地震により最も沈下量が大きくなると考えられる位置を適切に設定するのがよい。基礎地盤の液状化に対しては、基礎地盤の土質性状（ここでは、N値の大きさ）が同程度の場合は、基礎地盤の液状化による沈下量が最も大きくなると考えられる位置として、基礎地盤上面から20m以浅に存在するN値30未満の砂質土層または砂礫質土層の層厚の合計が最も大きい位置を代表断面として選定してもよい。

4.2 c)に示すような堤体土のめり込みが生じている区間については、代表断面を選定するにあたり、堤防の築堤履歴やその際に用いられた盛土材の特性を踏まえて、堤防の沈下量が最も大きくなると考えられる位置を適切に設定するのがよい。めり込んだ堤体土の土質の特性が同程度の場合には、一般にめり込み量が最も大きい位置を代表断面として選定してもよい。

代表断面としては、細分区間の中から1断面を選定するものとする。ただし、細分区間内において、地震に対する安全性が最も低い断面として1断面のみを選定することが困難な場合は、細分区間の中から複数の代表断面を選定してよい。この場合、以降の点検においては、当該細分区間の堤防の評価を複数の代表断面のうち最も厳しい箇所で行うことや、追加調査によって細分区間を再度細分化するなどの方法が考えられる。

4.5. 基礎地盤の液状化に対する二次点検

4.5.1. 基礎地盤の土層構成による判定

代表断面位置において、既往の基礎地盤の液状化による地震被害事例に照らし、地震により生じる堤防天端の沈下量が十分に小さいと判断される土層構成に該当する場合、当該細分区間は基礎地盤の液状化に対する耐震性能を満足するものとみなしてよい。

代表断面が選定された段階においても、その断面位置において生じる地震時の堤防の沈下量が十分に小さいと判断される場合は、当該細分区間は耐震性能を満足するものとみなしてよいこととした。また、この判断は、土層構成を指標として行ってよいこととした。

堤防に関する既往の地震被害事例のうち、地震による堤防天端の沈下量、微地形区分及び基礎地盤の構成が明らかなものについて分析を行った結果、表- 4.2及び表- 4.3が得られている。これは、1993年北海道南西沖地震、1995年兵庫県南部地震、2003年宮城県北部の地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震における堤防の顕著な被災事例を整理したものである。これは、治水地形分類による地形区分、基礎地盤上面から20m以浅に存在するN値30未満の砂質土層または砂礫質土層（以下、土層分類Aという）の層厚の合計、土層分類Aの上方に位置し、土層分類Aに該当しない土層（以下、土層分類Bという）の層厚をいくつかに分類し、これらの分類ごとに生じた堤防天端の有意な沈下についてまとめたものである。ここで、土層分類AおよびBの層厚は、図- 4.4のように定義して集計されたものである。表- 4.1及び表- 4.3より、地形区分による危険度ランクが高いほど沈下量が大きいこと、土層分類Aの層厚の合計が大きいほど沈下量が大きいこと、土層分類Bの層厚が大きいほど沈下量が小さいことが分かり、地形区分及び基礎地盤の土層構成と地震による堤防天端の沈下量の間には一定の相関関係が認められる。

ただし、沈下量が大きいものの地形区分、基礎地盤の構成が不明確であるため整理することができていない事例が多く存在する。また、これらの事例における地震動の強度についても不明確な点があり、レベル2地震動に相当する強度の地震動を受けた場合にはさらに大きな沈下が生じる可能性もある。これらを勘案して工学的に判断を加えた結果、以下のいずれかに該当する断面については、基礎地盤の液状化による堤防天端の沈下量が十分に小さいとみなしてよいこととする。

ただし、これらは基礎地盤の液状化に着目したものであることから、別途4.6に従い、堤体の液状化に対する照査を行う必要がある。

土層分類ごとの層厚を算出する際には、地下水位の設定が必要となる。液状化判定や地盤変形解析においても、結果を大きく左右する重要な設定項目の1つであるため、点検箇所地下水位の状況を総合的に判断し、設定する必要がある。洪水時を想定した浸透流解析で良く用いられる設定を耐震点検でそのまま用いると過度に安全側の評価となる場合もある。既往のボーリング調査で得られた水位を縦断的に整理し、季節や雨、河川水位等による地下水位の変動を大まかにとらえ地下水位を設定する方法が考えられる。ここで設定した水位よりも高い位置に孔内水位がある場合には、その水位が洪水や降雨の後で高かったのか、あるいは常に高いのかを判別し、局所的に水位設定を変えるなどの工夫を行うとよい。

<地形区分による危険度ランクA>

- ・土層分類Aの層厚の合計が5m未満であり、かつ、土層分類Bの層厚が5m以上の場合

<地形区分による危険度ランクB>

- ・土層分類Aの層厚の合計が5m未満であり、かつ、土層分類Bの層厚が5m以上の場合
- ・土層分類Aの層厚の合計が2m以上5m未満であり、かつ、土層分類Bの層厚が2m以上の場合

表- 4.2 基礎地盤の条件と地震による堤防の沈下量の関係
(地形区分による危険度ランクがAの場合)

		土層分類Bの層厚		
		0～2m	2～5m	5m～
土層分類Aの層厚の合計	0～2m	○	○	×
	2～5m	○	○	×
	5m～	○	○	○

※1 表中の「○」は堤防天端に有意な沈下が生じたもの及び不明なもの、「×」は有意な沈下が生じなかったものを表す。

※2 基礎地盤条件が「×」に該当する場合、地震による堤防の沈下量が十分に小さいとみなしてよい。

表- 4.3 基礎地盤の条件と地震による堤防の沈下量の関係
(地形区分による危険度ランクがBの場合)

		土層分類Bの層厚		
		0～2m	2～5m	5m～
土層分類Aの層厚の合計	0～2m	○	×	×
	2～5m	○	○	×
	5m～	○	○	○

※1 表中の「○」は堤防天端に有意な沈下が生じたもの及び不明なもの、「×」は有意な沈下が生じなかったものを表す。

※2 基礎地盤条件が「×」に該当する場合、地震による堤防の沈下量が十分に小さいとみなしてよい。

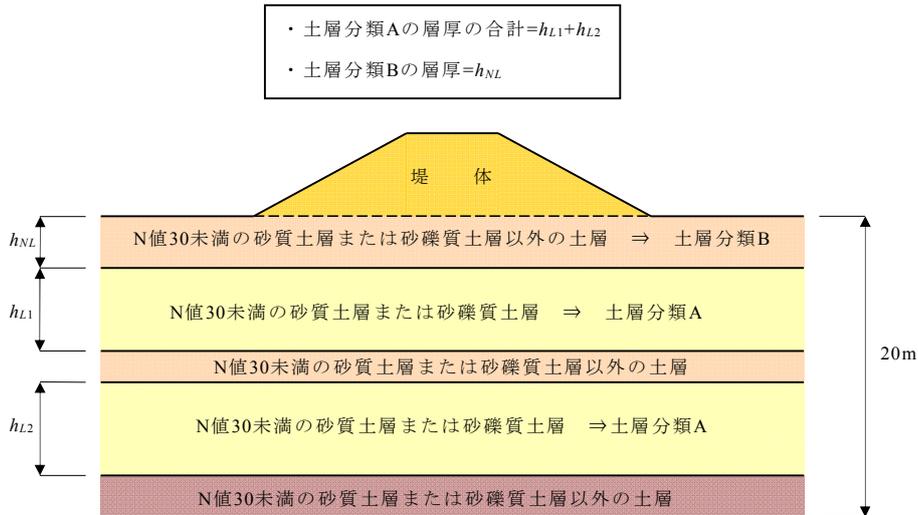


図- 4.4 土層分類Aの層厚の合計、土層分類Bの層厚の定義

4.5.2. 簡易式による基礎地盤の液状化に関する判定

代表断面位置において、指針6.3に規定される液状化の判定を行い、堤防天端の沈下量を次に示す簡易式により算定し、これが許容沈下量を上回らないことを照査するものとする。

$$S = 1.41 \cdot H \cdot H_L^{1.56} \cdot 10^{-7.54 \cdot R_L} + 0.0655 \cdot H_L^{0.930} \leq S_{\max} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに、

- S : 堤防天端の沈下量 (m)
- H : 堤防高さ (m)
- H_L : 表層の液状化層厚 (代表断面において、複数のボーリングデータがある場合には堤内地、天端直下、堤外地の表層の液状化層厚の平均値) (m)
(「表層の液状化層」とは、液状化層が複数あり、第1液状化層と第2液状化層の間に5m程度の非液状化層がある場合に第1液状化層を「表層の液状化層」と定義する)
- R_L : 表層の液状化層の繰返し三軸強度比 (算定された R_L の平均値)
- S_{\max} : 既往の地震による堤防天端の最大沈下量 (m)で、式(3.1)により算定する

三次点検においては、地盤変形解析に基づく耐震性能の照査が行われるが、これに先立ち、堤防天端の沈下量を式(4.1)により簡便に算定し、これが許容沈下量を上回らないことを照査することとした。この簡易式は、地盤変形解析により得られた堤防天端の沈下量について、いくつかのパラメータとの相関分析を行った結果に基づき、安全側の値が算出されるように導かれたものである。このため、明らかに過大な沈下量が算定される場合もあるが、その場合は既往の地震被害の経験を重視し、式(3.1)により算定される既往の地震による堤防天端の最大沈下量 S_{\max} を沈下量の上限としてよいこととした。

ここで、地震の種類によって異なる照査外水位が設定されている区間においては、地震の種類ごとに許容沈下量を算定し、レベル2-1地震動、レベル2-2地震動のそれぞれに対する沈下量と比較を行うことで照査を行うものとする。

液状化の判定は、指針6.3に規定によるものとする。液状化の判定にあたっては、指針4.4に規定される耐震性能照査上の地盤種別を判別し、地盤面の水平震度を設定する必要がある。地盤種別は代表断面の周辺のボーリングデータから判別するものとし、既存のデータが存在しない場合は追加調査を行うのが望ましいが、困難な場合はⅡ種及びⅢ種地

盤のうち、いずれか大きな方の水平震度を用いてよい。

簡易式では、堤体及び基礎地盤の状況を堤防高さ、液状化層厚、繰返し三軸強度比のみで代表させるため、当該断面における堤防及び基礎地盤の状況を適切に考慮する。液状化層が2層にわたって存在する場合を図- 4.5に示す。液状化層①、②の両者を考慮した場合及びいずれか一方を考慮した場合の計3ケースについて堤防天端の沈下量 S を算定し、最も大きな沈下量を用いて照査を行うことが考えられる。

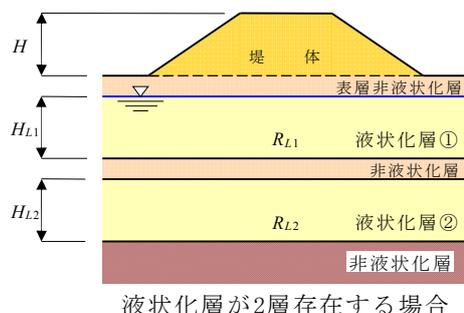


図- 4.5 土層構成の違いによる計算ケースの設定の例

4.6. 堤体の土質等による判定（堤体の液状化に対する二次点検）

代表断面位置において、（１）と（２）、（３）の全ての条件を満たす場合には、堤体の液状化による被害が生じる可能性があることから、三次点検を行わなければならない。

- （１）堤体下部が砂質土で以下の両方の条件に該当する場合
- 1) 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
 - 2) 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）以下のいずれかの条件に該当する場合
- 1) 堤防の下に粘性土層が存在し、めり込み量が1.0m以上の場合
 - 2) 常に河川水が堤体内に浸透するなどにより堤体内水位が高いことが想定される場合

（３）以下の液状化層厚や透水係数に応じ繰返し三軸強度比に補正を加え液状化判定を実施し、液状化すると判定された土層の厚さが1.0m以上、かつ堤防高さの2割以上ある場合

$$\varepsilon_{v\max} = \frac{k\sigma_v'}{\gamma_w H^2} t_d \quad (4.2)$$

$$R_L^* = \log_{10}(65000 \cdot \varepsilon_{v\max} + 10) \cdot R_L \quad (4.3)$$

ここに、

$\varepsilon_{v\max}$: 最大体積ひずみ

k : 液状化が懸念される堤体土層の透水係数(m/秒)

σ_v' : 液状化が懸念される堤体土層中央の有効鉛直応力(kN/m²)

γ_w : 水の単位体積重量(kN/m³)

H : 液状化が懸念される堤体土層の厚さ(m)

t_d : 地震動継続時間(秒)。一般に、地震動タイプによらず10秒。

R_L^* : 補正後の繰返し三軸強度比

R_L : 補正前の繰返し三軸強度比

東北地方太平洋沖地震による河川堤防の大規模被災箇所のうち、堤体自体の液状化が一因と考えられる東北地方及び関東地方の直轄河川堤防について、諸要因を整理した。

被災箇所とその近傍の無被災箇所の堤体の土質について、細粒分含有率と塑性指数を整理した結果、被害があった箇所については液状化判定の対象となる土がほとんどであった。その後の詳細な調査、分析の結果、液状化判定の対象土以外で比較的大きな被災を受けた箇所（ $FC > 35\%$ かつ $15 < IP \leq 20$ ）は、液状化した土が流出しボーリング調査で液状化した土が採取できなかった可能性が高いことから、従来の点検では塑性指数を20以下としていたものを15以下に変更した。築堤履歴が複雑な場合は、堤体下部に様々な土質が存在することが考えられる。（1）の条件を満たす範囲が小さく、堤防天端の沈下量が十分に小さいと推測される場合には、（1）の条件は満たさないと扱ってよい。

堤体の土質の他に、堤体の液状化の条件と考えられるのが、堤体内の水位であり、（2）の条件は、東北地方太平洋沖地震の被災事例の分析から堤体内の水位が高くなる可能性のある条件を示したものである。

1)のめり込み量が大きいほど、飽和した領域が増えるだけでなく、堤体が緩み、変状が生じやすくなると考えられる。めり込み量は、両のり尻を結んだ線と基礎地盤にめり込んだ堤体下端の鉛直距離であり、図-4.6を参考に築堤履歴も考慮して求めるものとする。図-4.7は、東北地方太平洋沖地震において堤体の液状化が原因と考えられる被災断面及び近傍の無被災断面について、めり込み量と堤防天端の沈下率の関係を整理したものである。めり込み量が1.0m以上で、液状化による堤防天端の沈下率が大きくなる傾向が見られる。

2)は、東北地方太平洋沖地震において、干拓地堤防等のように平常時より外水位が高く、常に堤体内に浸透している箇所において被害が見られたことから、設定したものである。干拓堤防以外にも、集水地形上の堤防などで堤体内の地下水位が高いことが考えられる。

できるだけ既往の地盤調査結果を活用することが望ましいが、堤体の土質やめり込み量に関する十分な調査結果が存在しなければ、追加地盤調査を実施しなければならない。追加地盤調査を実施する際には、三次点検の実施も想定し、効率的な地盤調査の実施を心がける必要がある。

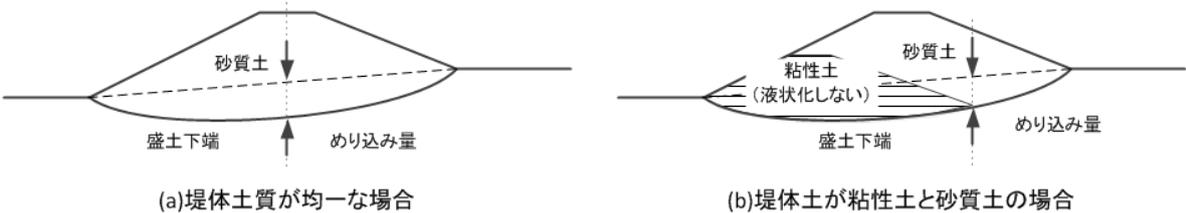


図-4.6 めり込み量の求め方（(a)築堤履歴がない場合には天端中央直下において両のり尻を結んだ線と盛土下端の鉛直距離とする。（b）築堤履歴がある場合には（1）の条件を満たす範囲で両のり尻を結んだ線と堤体下端の鉛直距離が最大となる位置で求める。）

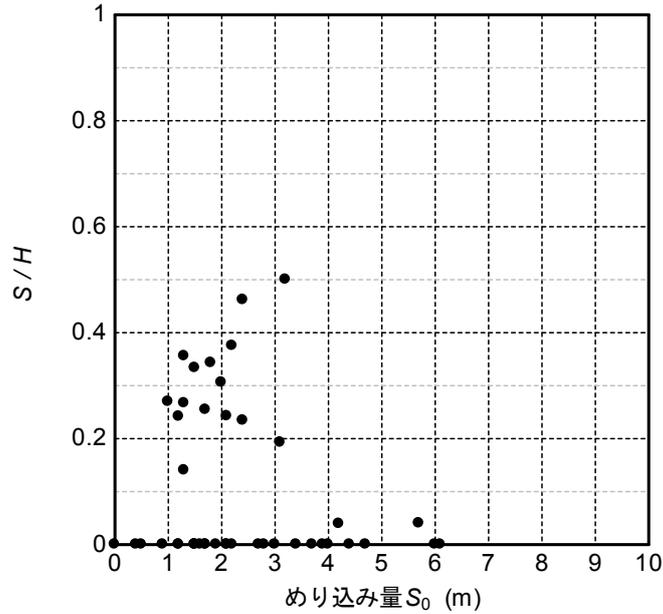


図-4.7 堤体の液状化による堤防天端の沈下率 (S/H) とめり込み量 (S_0) の関係

(3) の条件は、堤体の液状化層厚が一定以上の場合に堤体液状化による顕著な被害が確認されたことから設けたものである。

東北地方太平洋沖地震による河川堤防の大規模被災箇所のうち、堤体の液状化が原因と考えられる東北地方及び関東地方の直轄河川堤防とその近傍の無被災箇所について、沈下量と基礎地盤へめり込んだ堤体下端から堤体内水位までの盛土厚さ（飽和層厚）の関係を図-4.8示す。

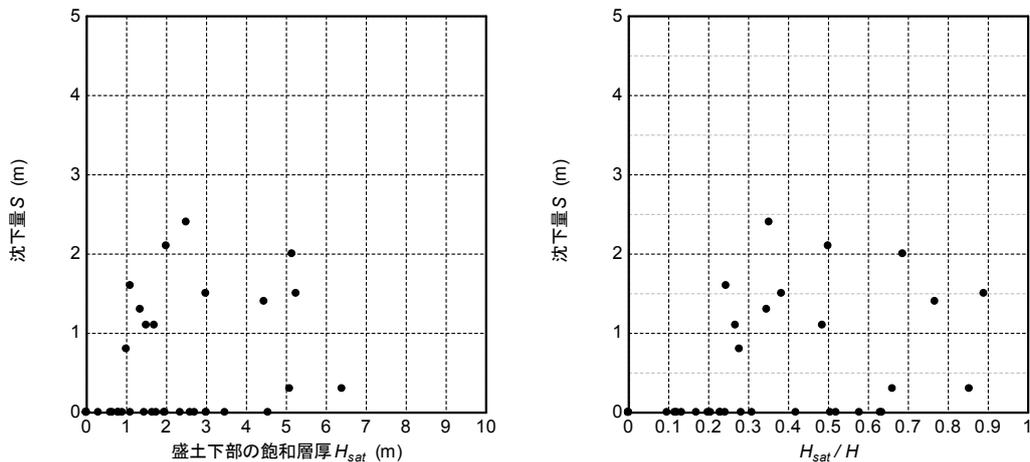


図-4.8液状化による沈下量と飽和層厚の関係

飽和層厚が1.0m以上かつ堤防高さの2割以上で、沈下量が1m程度以上の顕著な被害が発生していることが分かる。一方で、同じ条件の飽和層厚でも沈下が確認されなかった箇所も多かった。

堤体の液状化のように薄い土層の液状化は、地震中の間隙水圧消散（≒排水、体積圧縮）の影響を強く受け、層厚が薄い場合や透水係数が高い場合には液状化しにくいことは明らかである。このような層厚や透水係数に応じた繰返し三軸強度比の補正式¹⁾が式(4.2)

と(4.3)である。

式(4.2)と(4.3)は、地震中に生じうる最大体積ひずみを、堤体のうち液状化が懸念される土層の透水係数や厚さ等から算出し、これを元に繰返し三軸強度比を補正するものである。模型実験から得られた繰返し三軸強度比の補正係数と体積圧縮ひずみの関係が図-4.9である。なお、右端の最大体積ひずみ0.1は、10%に相当する。

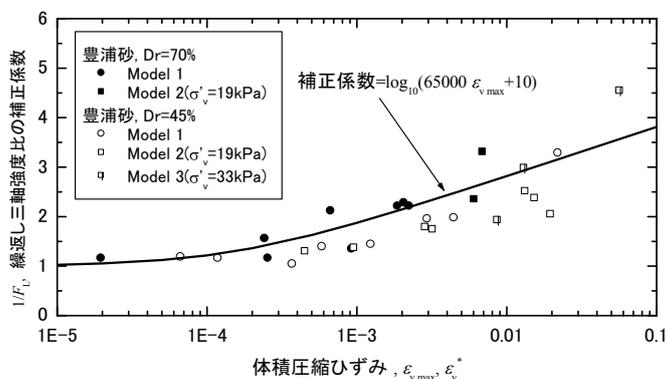


図-4.9 繰返し三軸強度比の補正係数と体積圧縮ひずみの関係¹⁾

液状化判定の実施は図-4.10のように堤防天端直下で行うことが原則とするが、築堤履歴が複雑な場合は飽和層厚が最も厚くなる位置を選定するものとする。実際の点検において、液状化層厚等による繰返し三軸強度比の補正を行う時には、他にも幾つか留意しなければならないことがある。基礎地盤も液状化する場合にはその液状化層厚も H に加算しなければならない。また、細粒分の多い土と少ない土が互層となっている場合には、細粒分含有率に基づく繰返し三軸強度比の補正は、細粒分の少ない土で実施し、液状化層厚等による繰返し三軸強度比の補正は細粒分の多い土で実施するなどの配慮が必要となる。

このような点検を実施するためには、地盤調査結果が不可欠であることから、図-4.1に必要に応じて追加地盤調査を実施することを明記した。液状化層厚を適切に求めるためには、柱状図と地下水位、物理試験結果、N値が必要となる。特に地下水位は、補正式にも利用され、特に重要であり、新たなボーリングやサウンディング孔を利用して堤体内水位を確認する場合には、以下の項目に留意して実施しなければならない。これらの留意事項は、新たに地盤調査する際だけでなく、既存の調査結果の利用を検討する場合にも留意しなければならない。

- ・築堤履歴を把握するとともに、バラツキのある地下水位計測結果を補完するため、できるだけ天端と両のり面中央付近の3箇所を実施することが望ましい。三次点検の静的照査法ではのり尻付近の地下水位の影響を強く受けるため、のり面の地下水位の計測が重要である。
- ・ボーリングを実施する場合には、地下水位までは無水掘りにより掘削を行い、初期水位を適切に確認する。
- ・盛土直下の粘性土層をボーリング等で打ち抜くと、一時的に堤体内水位が低下することもあるため、打ち抜く前に地下水位を確認する。
- ・堤体内の水位は、河川水位や潮位、降雨の影響を受けることに留意しなければならない。まとまった降雨の後には、しばらく水位の高い状態が続くため、降雨の直後は避けるのが望ましい。

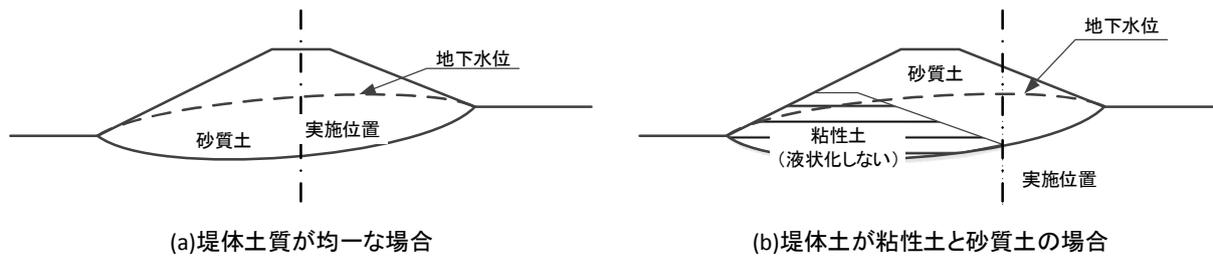


図- 4.10 液状化判定の実施位置

5. 三次点検

- (1) 三次点検における耐震性能の照査は、二次点検の結果、三次点検が必要と判定された細分区間の代表断面において耐震性能照査を行う。
- (2) 三次点検は、静的照査法に基づいて行うものとする。
- (3) 三次点検の結果、耐震性能を満足しないものとみなされた場合、当該断面を含む細分区間の堤防は耐震性能を満足しないものとみなし、要対策区間として扱う。
- (4) 三次点検を行うにあたっては、十分な情報収集を行う必要があり、不足する場合は追加調査を行う。

(1)～(2) 三次点検は、二次点検の結果、三次点検が必要と判定された細分区間の代表断面において耐震性能照査を行うものとした。

従来の三次点検では、堤体の液状化に対する点検と基礎地盤の液状化に対する点検を別の方法で実施することとしていたが、その後の検討により、堤体の液状化も含め、より精度良く沈下量を推定することが静的照査法によって可能となったことから、基礎地盤も堤体の液状化も合わせて、指針に準じ、静的な地盤変形解析に基づき耐震性能の照査を行うこととした。ただし、動的解析による耐震性能照査を妨げるものではない。

液状化に関する耐震性能の照査方法は、地震時挙動を動力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。堤防の耐震性能の照査においても、詳細な地盤調査・土質試験を行い、かつ、適切にパラメータを設定した上で動的照査法を適用すれば、液状化に伴う堤防の沈下量を算出することができる。ただし、堤防は比較的単純な構造物であり、静的照査法により耐震性能の照査を行うことが可能であること、動的照査法を用いる際には詳細な地盤調査・土質試験が必要となることから、基礎地盤の液状化に対する三次点検においては、静的照査法に基づき耐震性能の照査を行うものとした。

また、計算方法や地盤定数、堤防等の条件によっては算定された堤防天端の沈下量が明らかに過大なものとなることもある。その場合は既往の地震被害の経験を重視し、式(3.1)により算定される既往の地震による堤防天端の最大沈下量 S_{max} を沈下量の上限としてよい。

地震の種類によって異なる照査外水位が設定されている区間においては、地震の種類ごとに許容沈下量を算定し、レベル2-1地震動、レベル2-2地震動のそれぞれに対する沈下量と比較を行うことで照査を行うものとする。

なお、レベル2-2地震動の沈下量と比較する照査外水位を設定する際には、津波や広域地盤沈降との組み合わせは一般には考慮しない。

従来(2016年指針改定前まで)、基礎地盤の液状化と堤体の液状化は別々の方法で照査することとされてきた。これは、東日本大震災で多く確認された堤体液状化による被災箇所沈下量を当時の静的照査方法の適用方法では過小評価する傾向が顕著であったためであった。

ボーリングで確認された地下水位をそのまま使うと、液状化層(地下水位)の上の非液状化層の沈下量低減効果が強く現れ、特に、有限要素法を用いた自重変形解析法では、のり尻部の地表に液状化層が出ているか非液状化層が表面を覆っているかで変形に大きな差が生じることが分かった。実際の地盤を考えると、地下水位を境界にきれいに液状化する層とそれに抵抗する非液状化層に分かれているわけではない。地下水位より上部の非液状化層でも地下水位に近い部分は元々飽和度も高く、下の液状化層からの排水も考慮すれば、

液状化層とほぼ同じ挙動をとると考えられる。地下水位から離れるにしたがって、液状化層的な挙動から非液状化層的な挙動に遷移することも考えられる。このような実際の地盤の地震時の挙動を踏まえれば、ボーリングで確認された地下水位をそのまま使うよりも、地下水位よりも高い水位を用いた方がより実際に近い挙動を表現することができる²⁾と考えられる。

地下水位付近の非液状化層の挙動は、堤体の液状化だけでなく、基礎地盤の液状化でも当てはまることであるため、この地下水位の設定は、堤体の液状化だけでなく、基礎地盤の液状化に対しても適用することとなる。

一方、有限要素法を用いた自重変形解析法では、基礎地盤の液状化については、沈下量を過大評価する傾向が顕著であった。この問題は、拘束圧に応じた液状化層のせん断剛性の補正³⁾を導入することにより、大幅に改善することができる。

(3) 三次点検にて耐震性能を満足しない区間の堤防については、要対策区間として扱うこととした。このような区間の堤防については、今後、適切な耐震対策の検討を行う必要がある。

なお、耐震対策工の詳細設計の段階に至ると、耐震性能を満足しない一連の区間に対して、追加調査により堤防縦断方向の土質構成をさらに詳細に把握する必要がある。このときの追加調査の状況によっては、耐震対策の詳細設計の段階で、対策仕様の検討とあわせて精査した結果、対策が必要とされた区間の中でも、一部の区間については改めて対策が不要と判断し直されることも考えられる。

(4) 三次点検では、ボーリング調査及び室内土質試験によって堤体及び基礎地盤の情報を詳細に把握した上で、地盤変形解析に基づく耐震性能の照査を行う必要がある。このとき、既往の地盤調査や浸透に対する詳細点検等において得られたデータも有効に活用するのがよい。

地盤変形解析における堤防及び基礎地盤のモデル化にあたっては、堤防天端と堤防両のり尻位置の計3箇所以上におけるボーリングデータを用いるとともに、それらが十分な深度（最も深い液状化層の下面まで、あるいは基礎地盤上面より20mのうち、いずれか浅い方）までのデータを含んだものであることが望ましく、不足する場合は追加調査を行うのが望ましい。ただし、周辺における既存データ等によって当該地点の基礎地盤の土層構成や土質、N値等を適切に推定できる場合は、これらを有効活用するのがよい。

地盤変形解析においては、液状化層に関する繰返し三軸強度比 R_L の評価が特に重要である。このため、標準貫入試験に加え、粒度特性や液性・塑性限界など、 R_L の評価に必要な物理特性に関する調査を丹念に行うのがよい。特に、砂～シルト・粘性土に連続的に推移する層境界付近において、粒度特性の推移を十分に把握できていない場合、N値の減少とともに細粒分が増加していることを見落とすことにより、細粒分による繰返し三軸強度比 R_L の増加を見込むことができず、 R_L を過小評価してしまうケースが考えられる。このため、ボーリング試料の目視観察やボーリング時の記事等を参考にしつつ、必要に応じて粒度試験を追加実施するなど、粒度特性を慎重に評価するのがよい。

室内土質試験によって R_L を評価する場合、液状化試験の結果は試料の乱れの影響を受けやすいため、凍結サンプリングなど、試料の乱れの影響を受けにくい方法により試料を採取するのがよい。ただし、拘束圧が低い土層や細粒分を多く含む砂質土に対して凍結サンプリングを行う場合には、凍結膨張によって試料が乱される可能性があるため、サンプリング対象層の粒度特性等を事前に評価しておくことが望ましい。また、チューブサンプリングによる場合、緩い砂質土層から採取した試料は乱されて密実化し、逆に密な土層か

ら採取した試料は乱されて緩んでしまうことが多く、チューブサンプリングにより乱さない試料を採取することは困難な場合が多い。

6. 点検結果のとりまとめ

耐震点検の結果として、次の事項について、基本情報、検討の過程及び結果等を分かりやすくとりまとめるものとする。

- a) 地震後に二次災害が生じるおそれのある区間の設定
- b) 一次点検
- c) 二次点検の対象区間の設定
- d) 既設の耐震対策の諸元
- e) 細分区間の設定
- f) 代表断面の選定
- g) 二次点検
- g) 三次点検

耐震点検の結果として、基本情報、検討の過程及び結果等を分かりやすくとりまとめることを示したものである。

点検の過程で収集した情報についても、分かりやすく整理し蓄積するとよい。

参考文献)

- 1) 岡村未対：堤体内の比較的薄い飽和砂質土層の液状化判定法，地盤工学会誌，Vol. 63, No. 9, pp18--21, 2015年9月．
- 2) 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
- 3) 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