

◆特集：最近の地震災害と耐震技術◆

大規模地震に対する河川堤防の耐震設計技術

石原雅規* 杉田秀樹** 田村敬一***

1. はじめに

土構造物である堤防は、被害が発生しても短期間に容易に復旧できることから、耐震対策が行われることはほとんどなかったが、1995年の兵庫県南部地震により淀川堤防が著しく沈下したことを契機として、河川堤防の耐震対策が全国的に実施されるようになった。

この耐震対策においては、レベル1地震動相当の地震力（中規模地震）を考慮し、震度法に基づいて対策の必要性の判定や対策工の仕様が決められてきた。

しかし、近年、東海地震、東南海・南海地震や活断層による大規模地震の規模や確率などが公表され、地方自治体においては防災計画の一環として大規模な地震動を想定する場合もあることなどから、河川堤防においても、大規模地震（レベル2地震動）に関する評価を行う必要性が高まってきた。このような背景から、大規模地震動を考慮した耐震設計法に関する検討を行っているところである。

本報では、現在の河川堤防の耐震対策、大規模地震動に対する河川堤防の耐震性能の照査の概要を述べる。

2. 現在の河川堤防の耐震対策

1995年兵庫県南部地震により淀川堤防の一部が著しく沈下し浸水の二次被害の危険性があったことを踏まえ、河川堤防の耐震点検¹⁾が行われた。

耐震点検は、ゼロメートル地帯等の河川水位よりも堤内地盤高さが低く、堤防が沈下した場合に浸水等の二次被害が発生する可能性のある区間を中心に実施された。河川水位としては、朔望満平均潮位等を考慮し、洪水は考慮していない。朔望満潮位を考慮するのは、堤防の修復性が高いとは

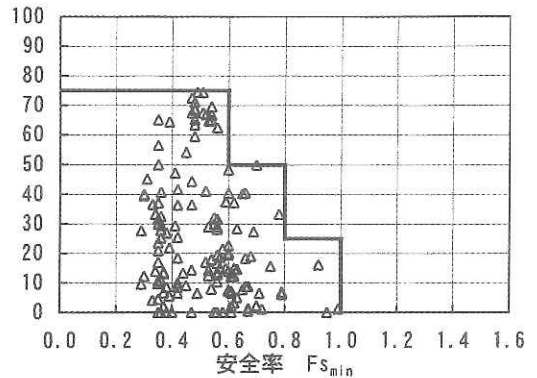


図-1 沈下率と安全率の関係

言え、2週間に1回生じる朔望満潮位までに、応急復旧が間に合わない可能性があるためである。また、洪水は大規模地震と同じ時期に発生することは非常にまれであり、同じ時期に発生しなければ発生するまでに応急復旧が可能であると考えられるため、洪水は考慮されていない。

点検対象区間では、地震による堤防の沈下量を実測沈下率と円弧すべり安全率の階段状の関係（図-1）から求め、沈下後の堤防高さが河川水位よりも低い区間が要対策区間と判定された。

要対策と判定された区間に対しては、順次対策工が実施されているところである。耐震対策としては、のり尻直下地盤の締固め工法や固結工法、矢板締切り工法などの液状化対策²⁾が多く実施されてきている。

現在の耐震設計上の問題は以下のとおりである。

まず、耐震点検や対策工の設計において考慮されている外力は、レベル1地震動相当であるが、大規模地震に対する検討の必要性が高まってきていることである。

次に、変形量を直接的に評価できない震度法に基づく照査方法によって、要対策区間の判定や対策工の設計を行っていることである。河川堤防のような土構造物は、たとえ変状を生じても短期間で容易に復旧できるという特徴を持っている。こ

Seismic Design Technique of river embankment for Level II Earthquake Motions

の特徴を最大限活かした合理的な設計を行うためには、変形量を直接評価できる照査方法を利用する必要がある。

特に、大規模地震に対する耐震性能照査においては、変形量を直接評価できる照査方法が不可欠である。

3. 大規模地震動に対する河川堤防の耐震性能の照査³⁾

現在、大規模地震動を対象とした河川堤防の耐震性能の照査方法について検討が進められている。ここでは、その考え方の基本について報告する。

大規模地震動（レベル2地震動）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とし、プレート境界型の大規模な地震と内陸直下型地震の2種類の地震動を考慮する。プレート境界型の大規模な地震では、大きな振幅が長時間繰り返して作用する地震動であるのに対し、内陸直下型地震では、継続時間は短い極めて大きな強度を有する地震動となる。土構造物の地震時挙動に対しては、地震動の振幅特性に加えて、継続時間特性も大きな影響を及ぼすため、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ものとしている。

堤防の耐震性能は、地震後においても、外水位に対して堤防としての機能を保持する性能としており、地震により損傷が生じた場合においても、河川の流水が河川外に流出することを防止することができることを堤防の耐震性能としたものである。ここで考慮する外水位とは、原則として、平常時の最高水位である。これは、地震と洪水が同時に発生する可能性は低く、かつ、土堤の場合、地震による損傷を受けても短期間での復旧が可能であることを考慮したものである。河口部付近では朔望平均満潮位を考慮する必要がある。

地震の影響としては、地盤の液状化の影響を考慮するものとする。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は堤防の基礎地盤の液状化に起因するものがほとんどである。このようなことを踏まえて、堤防の耐震性能の照査においては、地震の影響として地盤の液状化の影響を考慮するものとした。

堤防の限界状態は、堤防高が耐震性能の照査において考慮する外水位を下回らない限界の状態と

する。堤防の限界状態は、地震後においても、河川の流水が河川外に流出することを防止するという堤防の機能を確保することができるようにしたものである。

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。堤防の耐震性能の照査方法にあたっては、動的照査法または静的照査法のいずれの方法を用いることもできるが、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なことも多い。

堤防の耐震性能の照査を静的照査法により行う場合は、まず、設計水平震度を算定し、その結果を用いて、砂質土層の液状化の判定を行う。次に、液状化の程度等に応じて、堤防の変形を静的に算定し、地震後の堤防高が耐震設計上考慮する外水位を下回らないことを照査する。

4. 地震時変形量の推定

大規模地震動に対する耐震性能の照査では、地震時地盤変形解析などの変形量を推定するための道具が不可欠である。要対策区間の判定だけではなく、対策工の設計においても、耐震性能の照査を地震時変形量に基づいて行うことが望ましい。

地震の影響として液状化を考慮するものとしていることから、変形量推定法としては、地盤の液状化を適切に表現できる必要がある。液状化を表現できる方法は様々であるが、そのうち代表的な方法を紹介する。

4.1 静的地震時地盤変形解析

地盤の液状化を考慮した静的な地震時変形解析

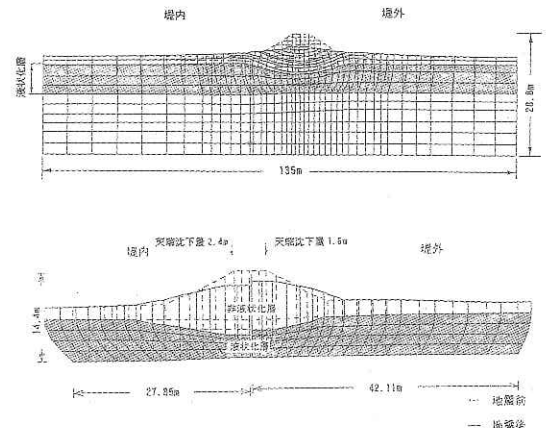


図-2 静的地震時変形解析による解析例⁴⁾

としては、液状化に伴う地盤の変形を、液状化層の剛性低下に起因するものと仮定し静的な有限要素法により解く方法⁵⁾と液状化した土層を粘性流体と仮定し土層のひずみエネルギーと位置エネルギーを数学的に求め、エネルギーが最小となる変形を求める方法⁶⁾が代表的である。液状化層の剛性を低下させる有限要素法は、有限要素法の特性から複雑な盛土形状や地盤条件をモデル化することが可能である。一方、粘性流体と仮定しエネルギーが最小となる変形を求める方法では、複雑な条件はモデル化できないものの、別途地震動の継続時間の影響を考慮することができる。

動的な地震時変形解析に比べれば、一般的に、設定しなければならない変数は少ないものの、その分1つの変数が解析結果へ大きな影響を及ぼすこともあるため、値を設定する際には十分に吟味する必要がある。

4.2 動的な地震時地盤変形解析

動的解析は、入力加速度を時刻歴として与え、十分に細かい時間ステップごとに順に解く方法であり、液状化の発生、地盤変形、過剰間隙水圧の消散を考慮することができる。

地盤の液状化を考慮した動的な地震時変形解析としては、次の2つの方法が代表的である。Biotの混合体理論と砂の構成式を用いた有効応力に基づいた有限要素法であり、液状化層の構成則としては、岡・八島による砂の繰返し弾塑性モデルを用いた方法⁷⁾がある。また、同じく有効応力に基づいた有限要素法であり、構成則として主応力軸

の回転を考慮することができる東畑・石原によるマルチスプリングモデルを用いた方法⁸⁾がある。

これらの方法は、設定すべき変数が多く、調査・試験により設定できないものが含まれており、他の方法よりも解析者に依存する度合いが高い。
4.3 土木研究所の方法^{9),10)}

堤防の液状化対策では、法尻部直下地盤に固結工法や締固め工法、鋼矢板締切り工法などが行われる事が多い。

このような対策を施した場合の堤防の沈下量を推定する方法を土木研究所で開発している⁹⁾。対策工ごとの変形メカニズムに着目し、沈下量を求める方法で、対策工の変位・変形を算出するステップと沈下量を求めるステップの2段階がある。

対策工の変位・変形量の算出は、変位・変形メカニズムが対策工の種類ごとに異なるため、対策工の種類ごとに異なる方法を提案している。

例えば、固結工法では、内部破壊が生じないと仮定すれば、固結した領域(固化体)が地震時に剛体として挙動する。そこで、sliding block法を拡張した簡易動的解析を行うことにより固化体の変位量を算出する。固化体には、図-3に示す力が作用する。外力が地盤反力の上限値を越えると、固化体が加速度運動する。水平、回転の加速度時刻歴を2階積分することによって、固化体の残留変位を求めることができる。

また、締固め工法では、動的遠心模型実験より締固め領域の主な変形はせん断変形であることが明らかとなっているため、締固め領域をせん断型多質点系モデルとして、簡易動的解析を行う。質点にはバネから作用する力と慣性力、周辺地盤か

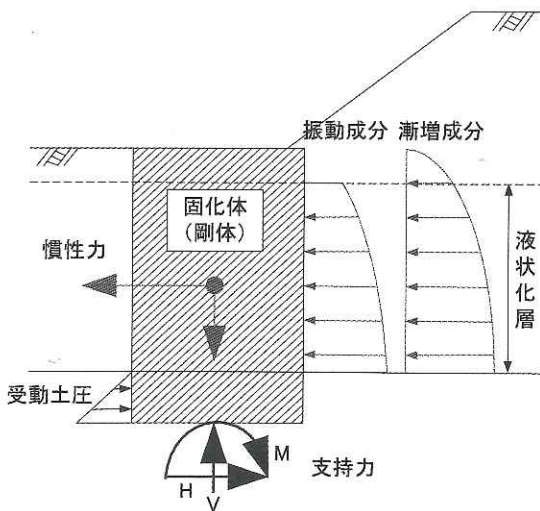


図-3 固化体に作用する力

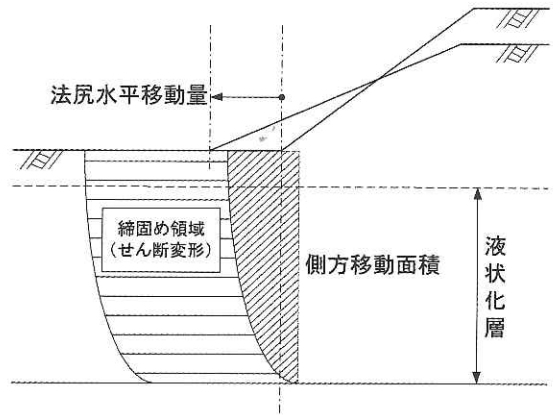


図-4 側方移動面積と法尻水平移動量

らの力が作用する。せん断バネには、液状化した締固めた砂の応力ひずみ関係を表現可能な構成則を用いており、このせん断バネの非線形性により締固め領域の残留せん断変形が発生する。

上述の方法により、固化体の残留変位、あるいは、締固め領域の残留変形を求めた後に、次式により天端の沈下量 S_c を算出する。

$$S_c = c_1 \left(\frac{2AL}{B} + \varepsilon_v HL \right) + c_2 \frac{2dLHE}{B}$$

ここに、 c_1 : 1.9 (定数)、 c_2 : 1.3 (定数)、 AL : 側方移動面積 (図-4 参照)、 dL : 法尻水平変位量、 B : 盛土幅、 HL : 液状化層厚、 HE : 盛土高さ、 ε_v : 体積ひずみ (別途算出)。

本手法は、対策工の設計で一般的に用いられている定数により計算ができ、計算時間も非常に短い。そのため、計算を繰り返すことにより、最適な対策工の規模や仕様を求めることができる。しかし、簡便な方法であるため、適用性は比較的低い。例えば、対策工に作用する土圧を液状化層厚や盛土高さ、盛土幅などの関数として与える方法を標準としているため、盛土形状や基礎地盤が複雑な場合には、盛土形状や基礎地盤を単純化するか、別途FEM解析により土圧を算出するなどの工夫が必要である。

4.4 注意事項

変形量を推定するための方法は簡便なものから複雑なものまで様々であるが、これらの方法を実務で利用する際には、実施する解析方法について豊富な知識・経験を持つ技術者が担当することが重要である。

5. 最後に

河川堤防の耐震対策の現状及びその問題点を述べた。また大規模地震動に対する耐震性能照査の基本的な考え方と、照査に必要な変形量推定方法のうち代表的なものを紹介した。

河川堤防の耐震性能の照査方法については、河川構造物の耐震検討会 (座長: 佐々木康前広島大学教授) において検討が進められているところである。ここに記して、関係各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省河川局治水課: 河川堤防耐震点検マニュアル・解説, 1995
- 2) 土木研究所: 河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル (案)、土木研究所資料第3513号, 1997
- 3) 田村ら: 河川堤防の耐震性能の照査、日本地震工学会年次大会, 2005
- 4) (財) 国土技術研究センター: 河川堤防の地震時変形量の解析手法、JICE資料、第102001号, 2002
- 5) 安田ら: The Mechanism and a Simplified Procedure for the Analysis for Permanent Ground Displacement due to Liquefaction, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, 1992
- 6) 東畑ら: Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle, Soils and Foundations, vol.32, No.3, 1992
- 7) 岡ら: A Cyclic Elasto-plastic Constitutive Mode for sand Considering a Plastic-strain Dependence of the Shear Modulus, Geotechnique, vol. 49, No. 5, 1999
- 8) 井合: FLIPによる解析、地盤と土構造物の挙動に関するシンポジウム、土質工学会, 1989
- 9) 土木研究所: 許容沈下量に基づいた河川堤防の液状化対策工法設計マニュアル、土木研究所資料、第3889号, 2003
- 10) 石原ら: 地震時変形を考慮した河川堤防の液状化対策工設計法、土木技術資料, Vol.46, No.10, 2004

石原雅規*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム研究員
Masanori ISHIHARA

杉田秀樹**



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム上席研究員、工博
Dr. Hideki SUGITA

田村敬一***



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震災害研究官、工博
Dr. Keiichi TAMURA