

「河川堤防の液状化被害と解析」

岡 二三生（京都大学 名誉教授）

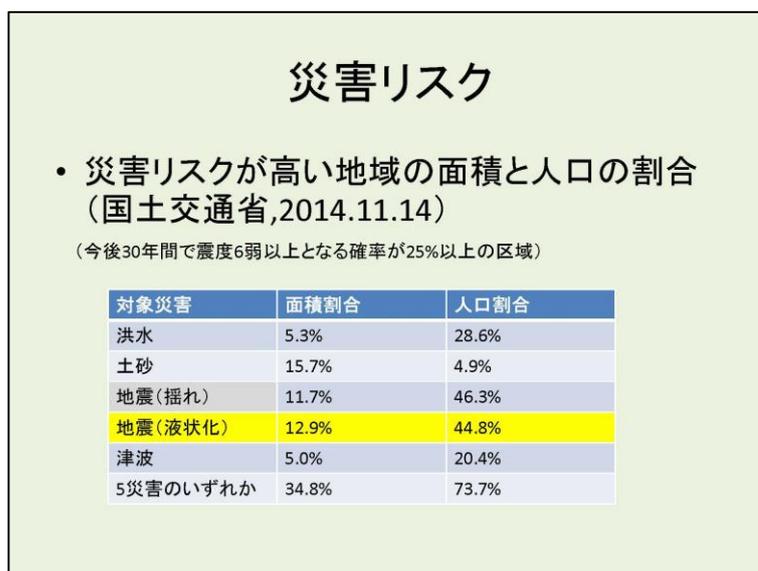
今回でもう4年目になりますが、私は河田先生の『国難』となる最悪の被災シナリオと減災対策の「液状化が最悪となる被災シナリオの導出と減災対策の提案」を担当しています。1年目は東日本大震災における液状化関係の被害の見直し、2年目は浦安などの住宅の問題に付随したこと、3年目はコンビナート関係についてまとめました。それぞれ教訓があって、例えばコンビナートだと、耐震強化岸壁の立派なものがあればいいのですが、できれば水際から50m以内には配管も含めて重要なものを造らない。ただ、そうもいかない状況にあるというのが教訓でした。今年は河川堤防の問題について、現状を含めて話をしたいと思います。なお、来年が最終年（5年目）なのですが、そこでは全体をまとめようかと考えています。

本日の内容ですが、震災の被害の振り返り、液状化解析（シミュレーション）、整備方法（マニュアルの内容）と課題、それから対策と全体の課題についてお話しします。2014年に国交省が出したデータによれば、日本は低地で地下水位の高い沖積低地に都市が発達している関係上、地震の揺れによる災害リスクが高い地域の面積割合は約12%、人口割合は50%弱です（図表1）。液状化はこれとほぼ同じぐらいの割合で、非常に大きな部分を占めています。

1. 河川堤防の被害

今までの被害をもう一度振り返ってみたいと思います。河川堤防の被害は、宮城県を中心に東北と関東で多く見られました。全体では2115の地点で被害があったといわれています。

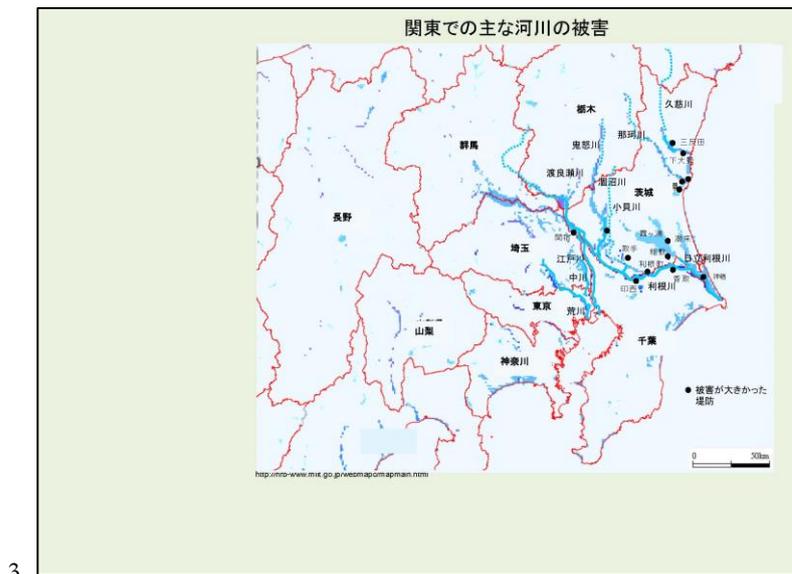
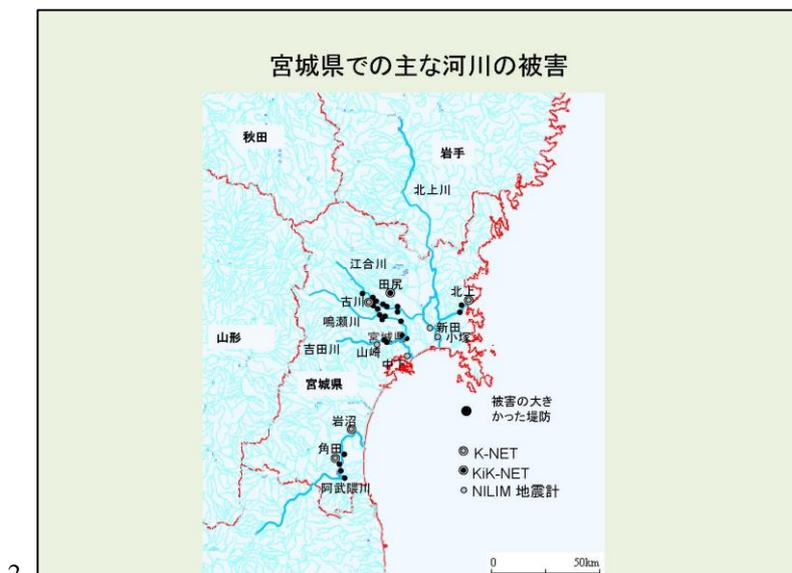
東北地方における被害堤防や関連施設の数、東北地方整備局によれば1195カ所となっています。私も何回か東北に行って調査をしたのですが、被害は非常に大きかったという



ことで、特に宮城県ではマスコミでも取り上げられたように江合川、鳴瀬川、北上川、吉田川、名取川、阿武隈川が被害を受けました。江合川と鳴瀬川はつながっていて、吉田川があって、鳴瀬川はずっと海までつながっています（図表2）。それから北上川ですが、新北上川の河口は津波の影響もあって液状化が起きました。さらにずっと下がって阿武隈川、仙台からすぐの名取川でも、運河も含め、もちろん津波の影響も非常に大きかったのですが、液状化の被害がありました。

関東地方での被害堤防や関連施設の数 は 939 カ所といわれており、茨城県的那珂川、久慈川、涸沼川、霞ヶ浦沿岸、新利根川、千葉県のリ根川、江戸川、埼玉県のエ戸川、中川、東京の荒川護岸や河川敷で河川堤防が被害を受けました。基本的には利根川に沿って、それから鬼怒川は洪水で有名になりましたが、鬼怒川からその付近、さらに江戸川から荒川にかけて被害がありました(図表3)。もちろん沿岸の住宅地や埋立地では液状化が起り、茨城県の新利根川、霞ヶ浦なども影響を受けました。

被害の形態ですが、基本的には天端が沈下し、それに伴って左右ではらみだしが起り



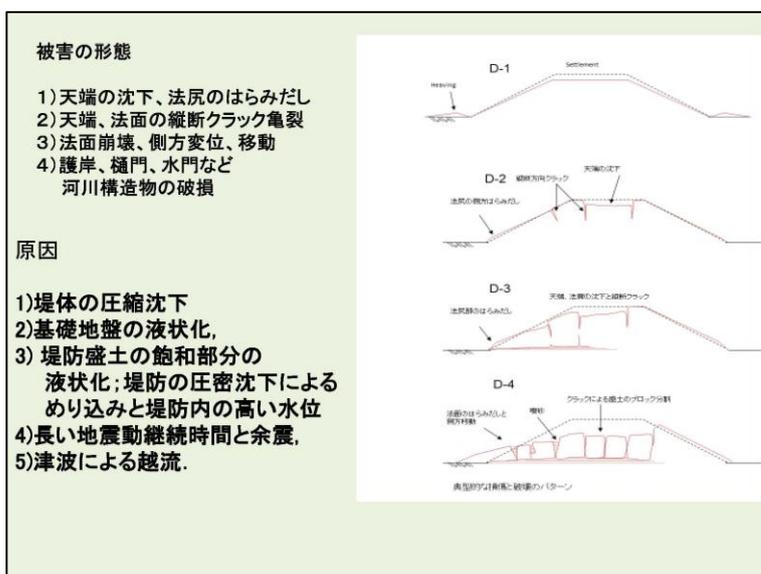
ます（図表4）。堤防では沈下が少なければ取りあえず洪水を防げて、その間に直すのが基本になるので、沈下が一番怖いのです。また、クラックは濃尾地震以来ずっとありますが、今回は非常に大きな縦断クラックが入りました。それから、10m 近くの非常に大きな法面の崩壊と側方変位が起きました。それに伴い、護岸、樋門などの河川構造物が壊れるわけです。

原因としては、まずは緩く造られた堤体の圧縮沈下が挙げられます。ただ、1m 以内の沈下なら、あまり問題にはなりません。次に基礎地盤の液状化ということで、今まではここをやればよいということになっていました。ですから、私も含め、基礎地盤の液状化についてはきちんと調査をしていましたが、堤防の堤体についてはあまり調査してきませんでした。それは知見が少なかったということもありますし、研究も進んでいなかったからなのですが、ここは基本的に不飽和状態で水はないから大丈夫だというイメージで、調査のレベルも相対的に低かったわけです。しかし、今回、非常に強調されているのは、堤防盛土、堤体自体が液状化でどうなるかということです。堤体飽和部といわれますが、意外にも堤体の中には水位が高いところがあり、そこが液状化すると大きな堤防の崩壊につながります。

もう一つは、大阪などもそうなのですが、大都市圏だと堤防の下は砂層があって、さらに下に軟らかい粘土層があります。この粘土層は長い年月をかけて沈下します。これは仕方がないのですが、そうすると、砂層が下にめり込んでいき、そこが液状化するのです。粘土の上に堤防があるのになぜ液状化するのかというと、それは水位より下に砂質の堤防が沈下しているからです。ここが今回は非常に強調されました。

その他、50gal 以上の液状化に影響があるような地震動の継続時間が 100 秒を超えました。もちろん余震もありました。また、津波による越流も被害の原因となりました。女川のようにもともと液状化していて、そこに津波がやってきて崩壊を大きくしてしまったということが考えられます。

従って、今回の教訓は、3) 堤防盛土の飽和部分の液状化、4) 長い地震動継続時間と余



震、5) 津波による越流です。液状化に限らず、耐震工学は実際の被害が起こってからそれに対処していくので、仕方がない面があるのですが、今まで分かっていたかもしれないけれども、あまり気にしていなかったような点が大きくクローズアップされました。そのような原因による被害の拡大がこれまで続いてきていたということです。

1995年の阪神・淡路大震災で非常に有名になった大阪淀川左岸の酉島はスーパー堤防整備事業地区として整備されていますが、震災当時、もともと6m強あった堤防が3m沈下しました(図表5)。ここで洪水が起こったら非常に危なかったのですが、運良く近くにあった土を持ってきて応急対策ができました。そのときはあまり気付いていなかったのですが、これは今回起こった大きな堤防被害とよく似ています。噴砂が中にも見られ、移動量もあるのですが、調べてみると圧密沈下で粘土層まで堤体が沈んでおり、その砂の部分が液状化していたことが分かりました。全国でもそのような例はたくさんあると思いますが、まだ全てが分かっているわけではありません。研究者も今まではそれほど強調してこなかったのですが、今ではそのように考えています。

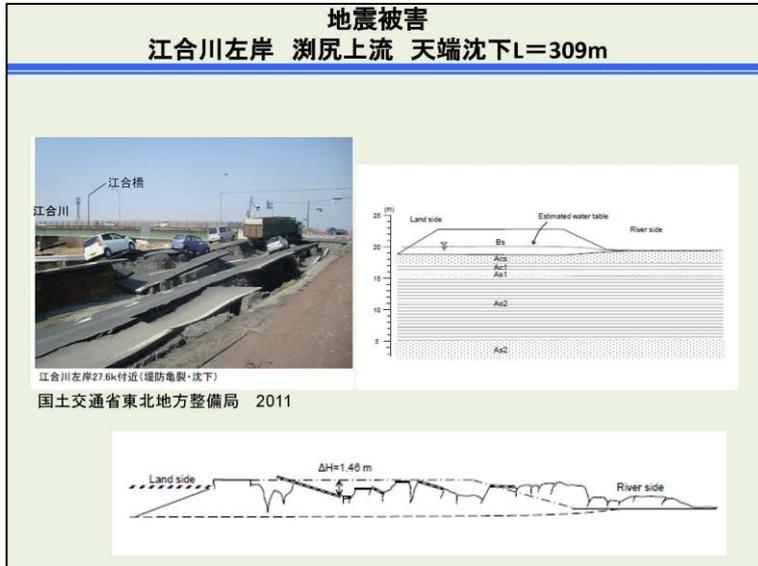
江合川左岸は最初にテレビにもよく出たところですが、砂層があり、水位が結構高いということで液状化して、大きな縦断クラックができて左右に側方変位が8m程度起こりま

大阪 淀川左岸堤防 酉島
1995年阪神大震災時の被害
最大沈下量=3.0m



5

した（図表6）。ここは大きく崩壊はしたのですが、裏側がかなり埋め立てられ、大きく支障を来すことにはならず、全体としては陸側の機能が保てました。図表7は4月の江合川左岸の様子ですが、復旧され、上にコンクリートブロックが置かれています。ここはかなり早い段階で修復をされました。



6

2011. 4. 29 江合川左岸堤防
湧尻上流 復旧後



7

北上川でも液状化があったと思われます（図表8）。堤防が決壊しましたが、これは液状化だけではなく津波の影響も大きく、どちらがどれだけというのは分かりません。北上川右岸だけでなく、左岸の河口付近の月浜でも数キロメートルにわたって堤防が決壊しました。図表9は北上川堤防左岸と富士川です。大川小学校があるのですが、北上川と並走して富士川が流れており、ここに津波が来て、新北上大橋のところで越流して堤防を壊しまし

北上川右岸釜谷 堤防決壊 L=1100m 3.8-4.6k+16m
津波



河口付近の月浜でも左岸堤防の決壊 L=3770m -0.8+20m-2.8K+192r

8

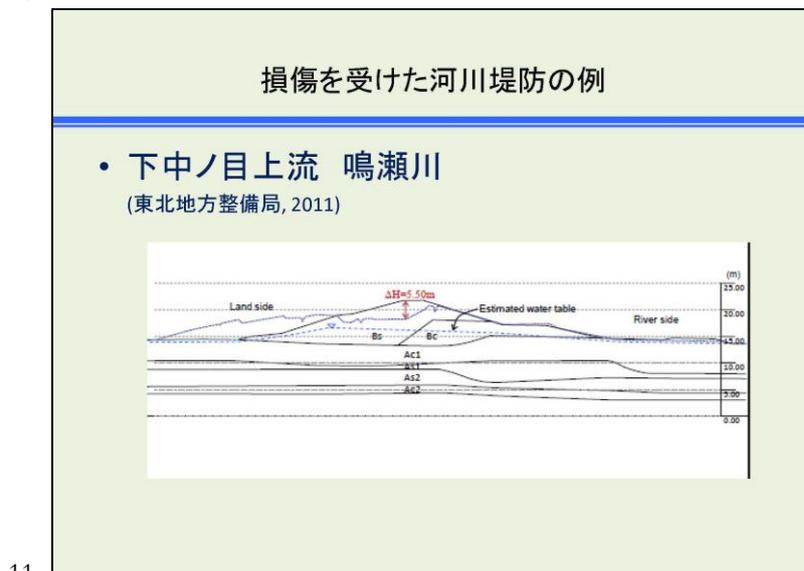
北上川堤防左岸と富士川 津波の遡上



9

た。新北上大橋のすぐ下流まで水が来て、それが陸に入ってしまったわけです（図表10）。小学校にとっては非常にまずい状態でした。

図表11は鳴瀬川です。大きく崩壊して、これは陸側に移動しているのですが、後で測ったところ水位が非常に高く、堤体内部（Bs）の盛土部分が液状化しました。この液状化した部分の水と土が、上の盛土のまだ飽和していないところ（青色の点線）まで上がってき



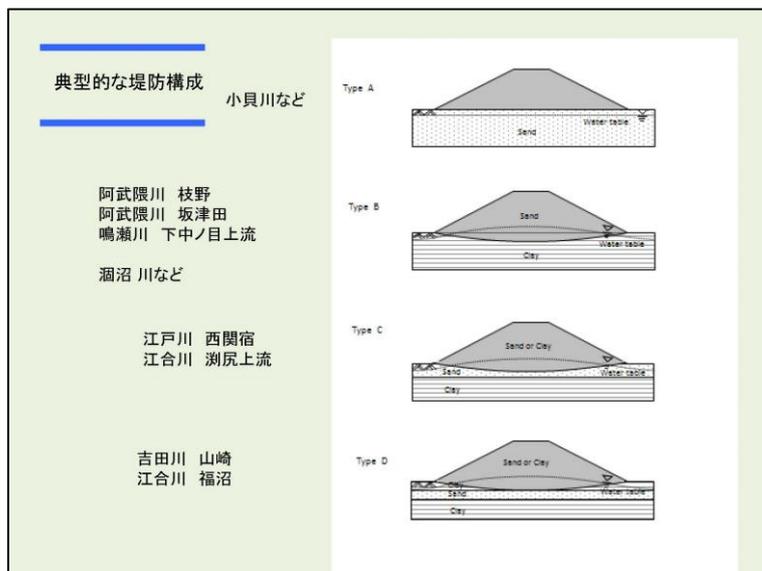
ました。見てみると、確かに下の砂の部分が上がってきています (図表12)。こういうことが堤防の被害の要因になりました。

通常は小貝川などのように、堤防が砂地盤の上であって液状化して壊れるのですが、今のように沈んでしまっていて、それよりも水位が高かったわけです (図表13)。江戸川の場合も、少し砂層はありますが、水位が結構高く、吉田川も同様でした。どうして高いのかというと、河川工学の先生に聞いてもあまりいい答えはなかったのですが、関西でも淀川、木津川、宇治川など、水位は結構高いのです。なぜかはよく分かりませんが、通常から結構高いところにあります。

木間塚地区の鳴瀬川右岸は縦断方向に大きくクラックが入り、川表と川裏の斜面が側方



12



13

へ移動して変形しました（図表14）。

まとめると、東日本大震災では特徴として大きなクラックが縦断方向にあり、中で噴砂していました。これは阪神・淡路大震災のときもそうでした。堤防だけが非常に大きく壊れていて、左右はさほどでもありません。そのようなことが、私も同行しましたが、国土技術研究センター等の調査で分かりました。それから、東北では特に粘性土地盤上の堤防が被害を受けていました。はっきりしないところはあるのですが、これも特徴の一つです。

2. 河川堤防の液状化解析

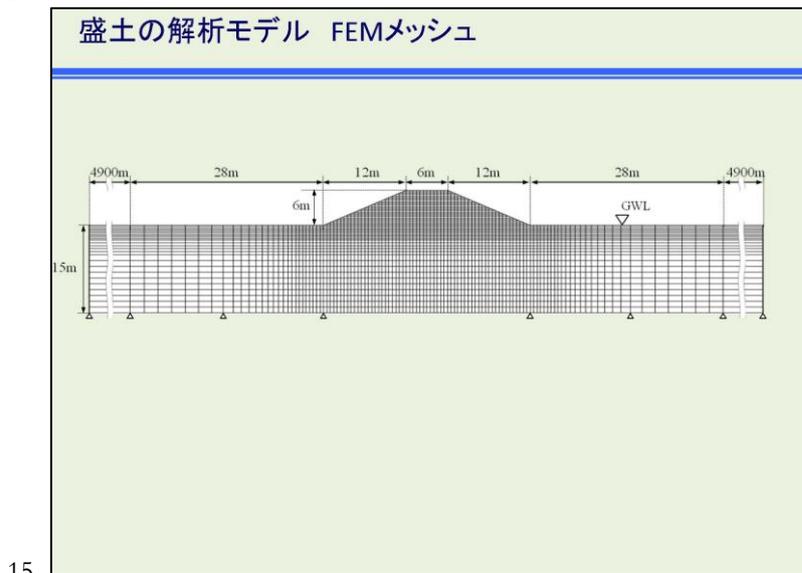
そのような特徴を踏まえて、堤体のモデルを作り、入力地震動等の条件を与えてシミュレーションを行いました。盛土の解析モデルは 6m ぐらいの標準的なものにターゲットを絞って、勾配は 1 対 2 の 2 割勾配です（図表15）。

**木間塚地区の鳴瀬川右岸
(大崎市の鹿島台)**

- この地域は釜巻と二子屋の間にある。土層構成は次のようである。上部から軟弱な粘土(1-2m, N値5以下)その下に薄い砂層, 1-2mの軟弱粘土層, 3-4mの砂層である。写真1-3に示すように、堤頂に幅80cm, 深さ50cmの大きなクラックがみられ; 沈下量は約30cmである。川表と川裏の斜面は側方へ移動している。
- 川裏側の法尻には多くのクラックが発生している。
破壊パターンは D-3パターン

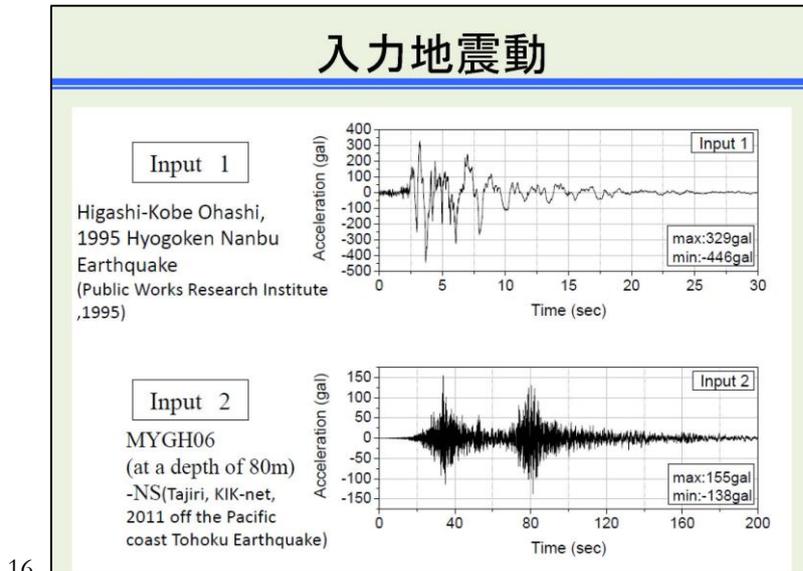


14

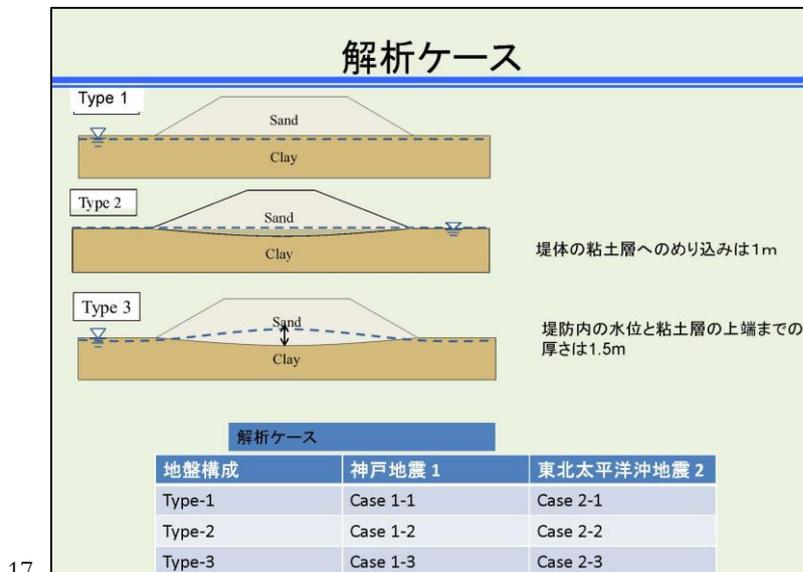


図表16は入力地震動です。Input 1 は兵庫県南部地震のときの東神戸大橋での地震動です。短い時間ですが、400gal を超えるかなり大きな加速度がかかっています。Input 2 は東北地方太平洋沖地震のときの宮城県田尻での地震動で、150gal ぐらいなのですが、長く続いたものです。

解析ケースは三つあります（図表17）。まず、Type 1 の堤体が沈まずに粘土層の上にある場合ですが、兵庫県南部地震型の地震動では、そういう何もないタイプの方が大きな沈下

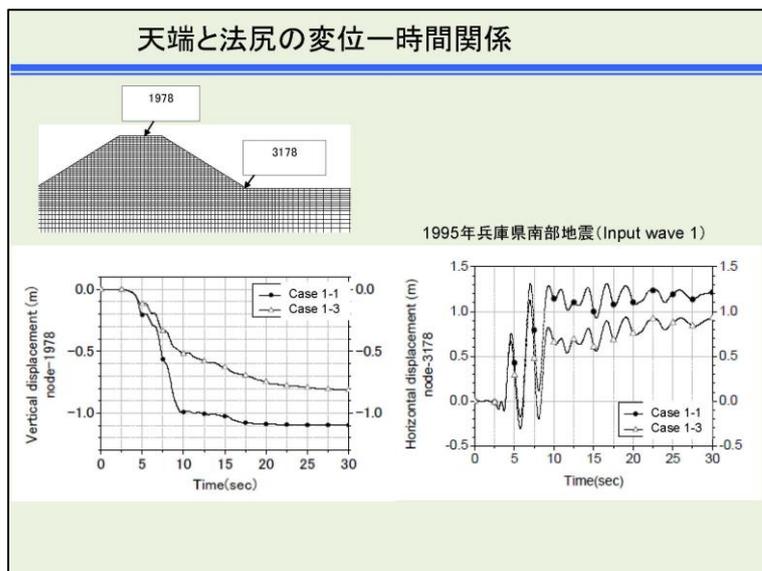


16

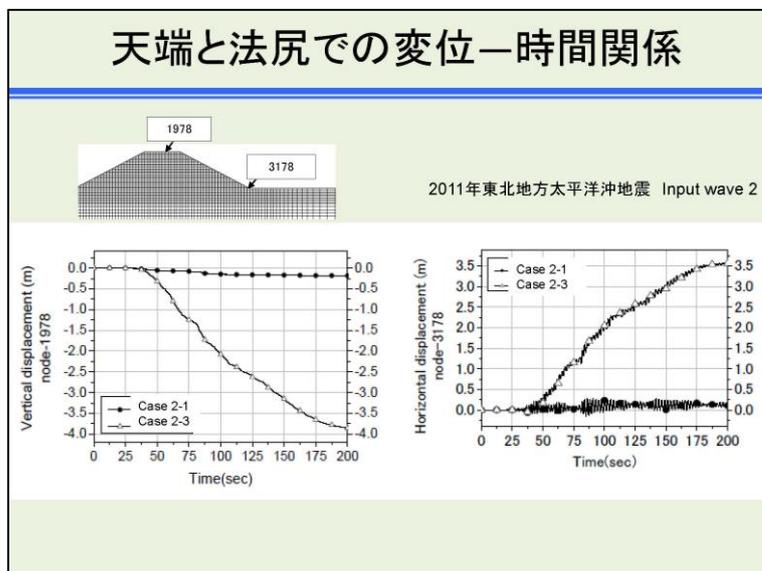


17

が起きました（図表18）。Type 1の方が危なそうなのですが、実は Type 3 の堤体が沈んでいて水位が高い場合は、液状化してエネルギーがそこで消散してしまうのです。一方、東北地方太平洋沖地震型の長時間の地震動では、今度は Type 3 の地下水位が高くて堤体が少し沈んでいる方が大きく沈下しました（図表19）。これは観測と大体一致するのですが、沈下量が 3.5m ぐらいです。150gal 程度であっても、非常に長い地震動は危ないということです。

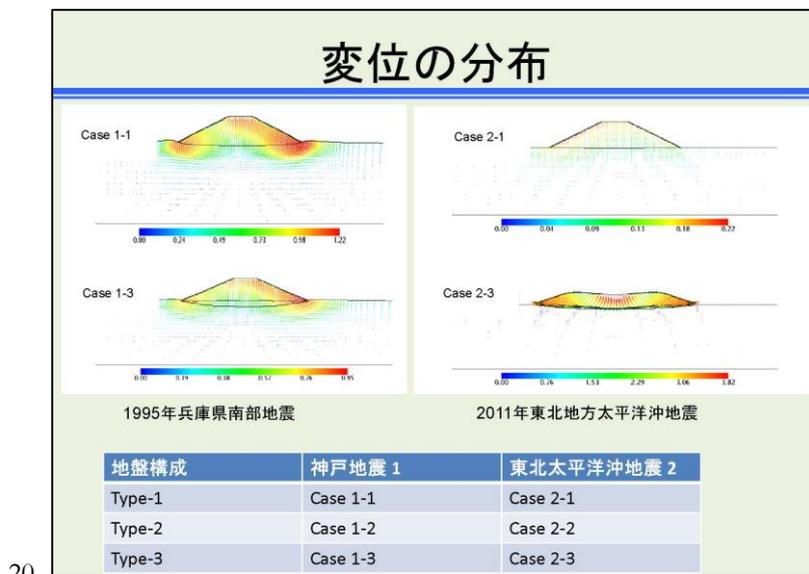


18

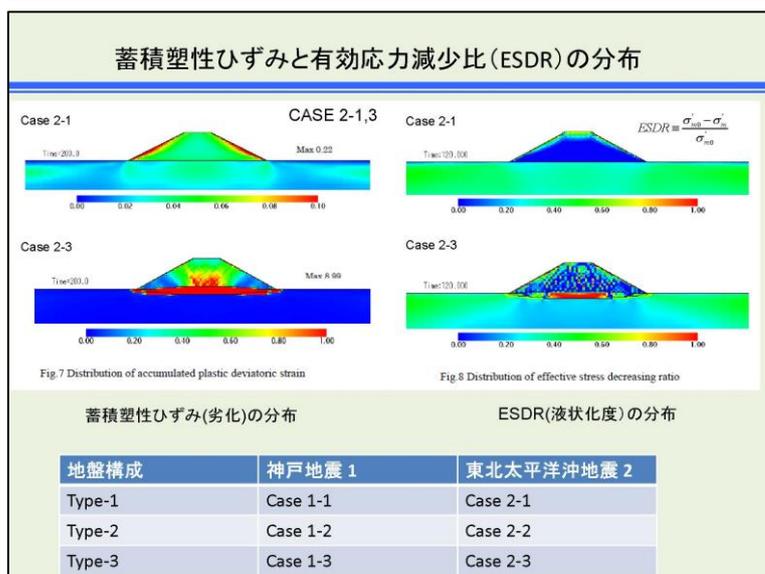


19

図表20は変位の分布、図表21は蓄積塑性ひずみと液状化の程度を示す有効応力減少比 (ESDR) の分布です。これから見ると納得できるような結果ではないかと思えます。



20

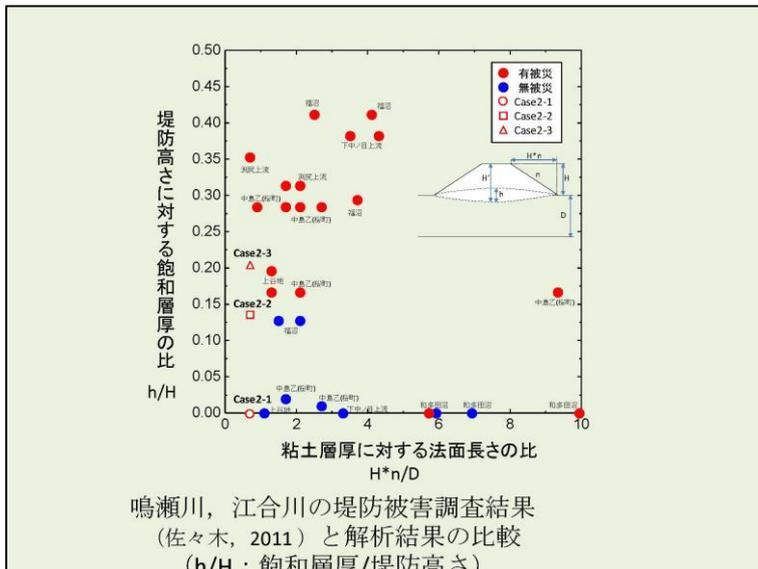


21

図22は飽和層厚と堤防の高さの比です。これは広島大学名誉教授の佐々木先生の解析方法です。横軸は粘土層厚に対する法面の長さの比 (H^*n/D)、縦軸が堤防高さに対する飽和層厚の比ですが、東北地方を中心とした被害は、圧倒的に飽和層厚が堤防の高さに対して大きいと起きていることが分かります。今の解析結果をこの図に乗せてみても、大体そのようになります。シミュレーションから見てもこういうことが説明できるということで、このシミュレーション手法を将来の問題に適用するといいいのではないかと考えています。堤防高さ (H) に対する飽和層厚 (h) の比 (h/H) が決め手になっています (図表23)。

3. 河川堤防の整備方法と課題

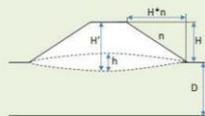
整備方法についてです。点検マニュアルなどが大幅に改訂されて、非常にいいものになってきています。私もかなり進んだなと思っています。河川堤防の耐震点検には1次点検、2次点検、3次点検があって、1次点検では地形条件に基づいて大まかに調べるようになっていきます。ただ、マニュアルでは扇状地は危険度小となっていますが、新潟県中越地震で



22

継続時間の長い地震では

- 堤防高さ(H)に対する飽和層厚(h)の比 h/H で被災度が決まる。



23

は長岡のような非常に緩い扇状地で多くの下水道が壊れており、そういうところでは液状化の危険度も本当に小さいのだろうかという疑問があります。

悪そうだということになれば2次点検に行くのですが、これは地層構成に基づいて見えます。砂層の厚さ、粘土層などで沈下が起こるような土層と起こらない土層に分類し、堤防の高さ、液状化層厚、三軸繰返し強度を用いて沈下量を予測します。0.75Hより小さいというのが今までの結果ですが、そういうものを使って先ほどのような特徴があるかをチェックして、さらに悪ければ3次点検に進みます。

3次点検では代表断面について点検を行います。ただ、残念なことに、地震ですから動的解析があるのですが、大変だということで静的照査法に置き換えます。堤体全体が液状化したとして、自重でどれだけ壊れるかを見ればよいということになっているのですが、私は物理的に言って動的解析をするのは当たり前ではないかと思います(図表24)。

沈下量の最大値は0.75Hよりも小さいといわれていますが、今回の場合、堤防高は大きいもので6mぐらいであり、その最大値が3m弱です(図表25)。沈下量の計測方法として、

レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル
平成24年2月 国土交通省水管理・国土保全局治水課

1次点検：地形条件： 扇状地は危険度小だが？
 2次点検：基礎地盤： 地層構成と既往簡易沈下式と簡易判定
 土層分類A (20mまでにN値30未満の砂、砂礫層) 5m以上は沈下発生
 土層分類B A層の上方のA層に該当しない土層；粘土層など
 A層が0-5mでもB層が5m以上では有意な沈下なし。

沈下量Sが許容沈下量を上回らないこと。また、 $S_{max} \leq 0.75H$
 S=S(堤防高さ、液状化層厚、3軸繰返し強度)

堤体： 築堤履歴、 堤体と基礎地盤の土層構成(細粒分、粒径、塑性指数、めり込み量)に対する液状化判定、耐震対策の有無

- 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次点検： 代表断面について点検を行う。
 (3) 基礎地盤の液状化に対する点検は、静的照査法に基づいて行うものとする。
 堤体に対しては、堤体のめり込みが1m以上かつ堤防高さの2割以上は耐震性能不足とする。

24

レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル
平成24年2月 国土交通省水管理・国土保全局治水課

東北地方太平洋地震(2011)
 赤丸: 東北地方 ×: 兵庫県南部地震(1995)
 青丸: 関東地方

25

3m 以上天端が残っていたら、それで高さを調べるので、その影響もあります。一方、昔の濃尾地震や福井地震は沈下量が圧倒的に大きく、4m 弱です。沈下量 3m、堤防高 6m ぐらいの×印は西島です。兵庫県南部地震も結構上に来ています。今回はこれを超えてはいないのですが、崩壊しているということ言えば、かなり被害があったということです。ただ、これが津波の影響とどう関連しているかはまだ分かっていません。東北地方太平洋地震（関東地方、東北地方）での沈下量は 2m 弱からそれ以下ということで、これを超えるようなものはあまりなかったので、国交省は若干安心しているところがあります。

耐震点検については、1 次点検で地形分類についての点検をもう少し細かくした方がいいのではないかと思います。また、3 次点検においても、危ないなど思ったら動的解析をするのも有効だということがあまり書かれていないのが残念だと思います。

4. 対策と課題

今後の対策としては、大きなところでは鋼矢板による強化があります。これはすぐにできます。基礎地盤の改良も対策として挙げられますが、時間が少しかかります。ただ、今回、東北地方で地盤改良していたところはほとんど壊れなかったので、地盤改良をしていくことは非常にいいと思います。また、マイクロパイルを入れる、グラベルドレーンによる排水促進などもあります。それから、もちろん基本的には締め固めて良いものを造っておけばいいのですが、できなければ良質土への置き換えも有効です。その他、抑え盛土で断面を拡大することも有効だと思います。

課題についてです。今のところ、地震と時期を同じくした豪雨はそれほど発生していませんが、新潟県中越地震のときは台風が来た数日後に地震が来て、信濃川の堤防は非常に高いところが液状化していました。地震と豪雨が同時に来ることは少ないといわれていますが、最近の豪雨はいつでも起こるので、複合被害の可能性もあると思います。耐震工学は起こってからでないに対処しないというところはあるので、言ってもあまりされていません。河田先生のおっしゃる国難の最悪シナリオにはこういうことも入ってくるので、今後、これにも触れていきたいと思っています。また、堤体は今まであまり重視されてこなかったのですが、解析法の進展などがあって、非常に詳細に堤体の変形について予測する方法を開発しました。そのような高度な解析法も作っています。

図表26は2012年3月に利根川下流の香取で行われた鋼矢板での改良です。鋼矢板で強化して、堤防を造り直しています。

堤防の形は地震動によってどんどん変形していきますが、通常の解析では、それは変わらないものとして解析を行います。それに対して、順次変形を追っていくような解析法が有限変形 FEM 解析です。図表27は有限変形 FEM 解析による変位ベクトル図ですが、6m の堤体が 1m 強沈下しており、赤い部分では 2m ぐらいの変位があることが分かります。このような詳細な解析ができるようになってきたので、こういうものも使っていけばいいのかなと思っています。

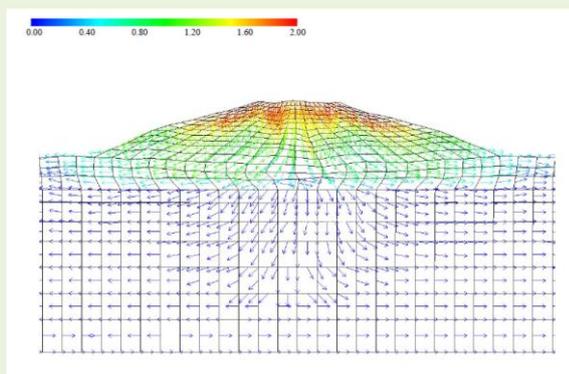
今後、教訓を基に強化していくということがもちろん基本ですが、将来ありそうなことについても考えていかなければいけないと私自身は考えています。

利根川下流香取市石納
鋼矢板での改良(2012. 3. 5)



26

有限変形FEM解析による変位ベクトル図



27