

木曽三川上流部における河川堤防の地震時の変状特性

木曽川上流河川事務所 調査課 ○松本 洋和
木曽川上流河川事務所 調査課 齊藤 正徳
株式会社建設技術研究所 楊 雪松

1. はじめに

平成23年3月に発生した東日本大震災では、東北地方の北上川、鳴瀬川、阿武隈川の各水系、関東地方の利根川、那珂川、久慈川の各水系を中心に、河川堤防においても液状化現象により、大規模な沈下、すべり破壊、亀裂等の被害が広範囲に渡って発生した。

これを踏まえ、平成24年2月に「河川構造物の耐震性能照査指針」、「河川堤防の耐震点検マニュアル」が改訂され、全国的に耐震点検及び対策が進められている。

木曽三川上流部においても、耐震点検を進めてきた結果、管轄区間の大部分の堤防高が照査外水位と比較して高く、詳細な解析によっても点検が必要となる区間が生じていないことから所要の耐震性能を満足している。

一方で、木曽三川が流れる濃尾平野は、砂層および堤防の沈下に繋がる軟弱な粘土層が広域に堆積し、南海トラフの巨大地震による被害想定（第二次報告書）においても、液状化の可能性が高いことが推定されている。

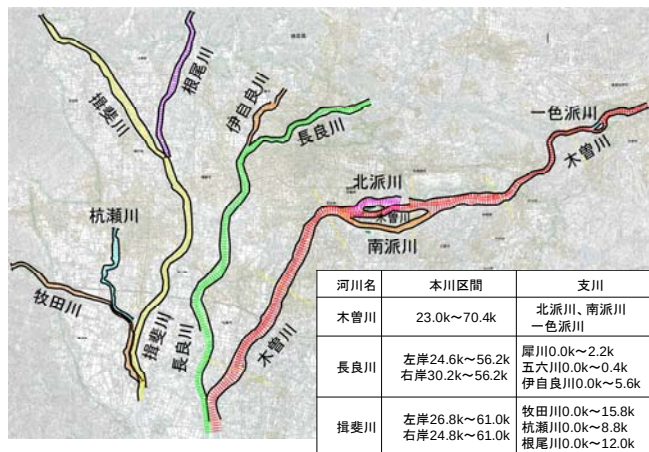
地震時の危機管理を考える上で、具体的に河川堤防の挙動を把握することが重要であることから、管内の河川の代表断面において動的解析を実施した。

木曽三川（木曽川、長良川、揖斐川）の各河川堤防は、異なる地質・地盤特性を有しており、木曽三川上流部河川堤防の変状傾向の分類について検討することとした。

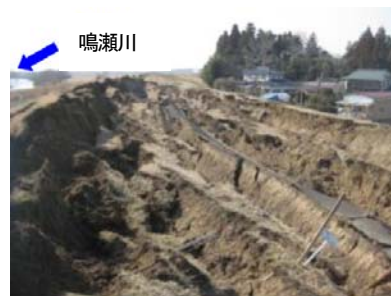
2. 濃尾平野の地形・地質構造

(1) 濃尾平野の成り立ち

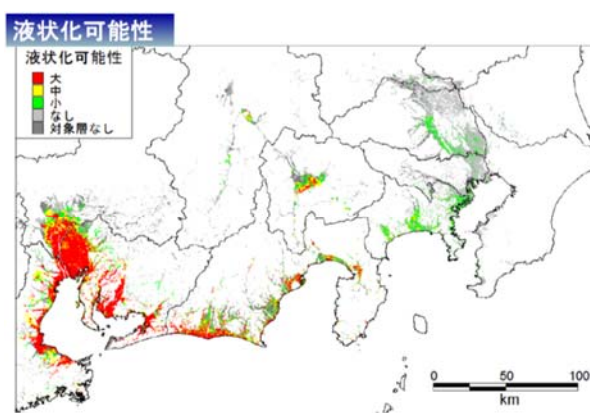
濃尾平野は、北東から南西に向かって、扇状地地帯、自然堤防地帯、三角州地帯が連なっている。木曽川扇状地は、犬山を扇頂とする半径12km、面積100km²の広大な扇状地で、傾動運動と土砂の堆積の結果、南西に向かって傾斜している。



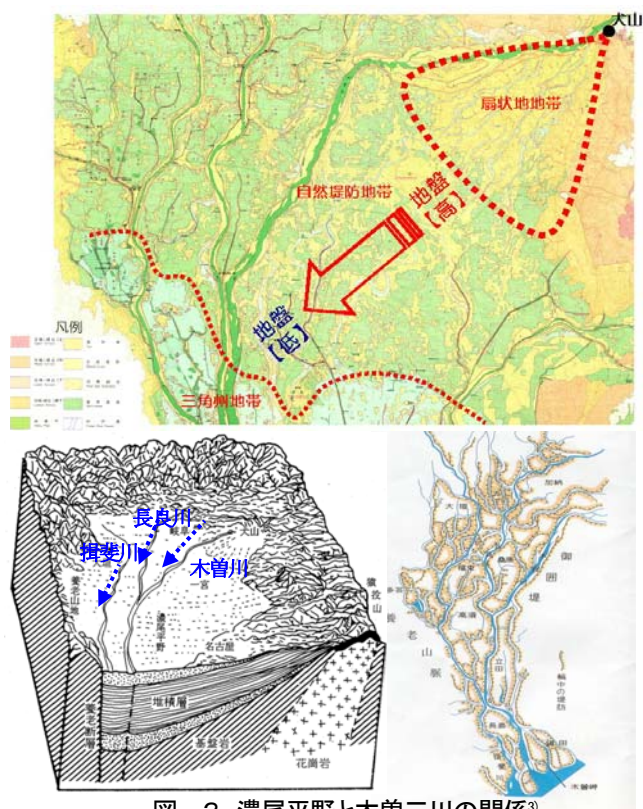
図－1 木曽三川上流部における点検対象区間



写真－1 東日本大震災における河川堤防の被災状況¹⁾



図－2 南海トラフ巨大地震における液状化可能性²⁾



図－3 濃尾平野と木曽三川の関係³⁾

Seismic behaviors of upper stream banks of the Kiso Three Rivers, hirokazu MATSUMOTO, masanori SAITO (Kiso-Jyoryu river office), xuesong YANG (CTI Engineering Co., Ltd)

① 木曾川

② 長良川

③ 揖斐川

The diagram is a geological cross-section showing the Permian-Triassic boundary in the Zhenyuan area. The stratigraphic units are labeled as B (Permian), As (Permian), Ac (Permian), and Dg (Triassic). The boundary is marked by a wavy line. Five wells are shown, labeled 144, 145, 146, 147, and 148. The wells are represented by vertical lines with patterns indicating different rock types. The cross-section shows the relationship between these units and the boundary, with the Permian units (B, As, Ac) above the boundary and the Triassic unit (Dg) below it. The wells are located at various depths, with well 144 being the deepest and well 148 being the shallowest. The diagram also shows the thickness of the units and the positions of the wells relative to the boundary.

3. 河川堤防における動的解析の実施

(1) 木曽三川上流部における堤防の耐震性能照査

① 一次点検

② 二次点検

なお、木曽三川上流域において三次点検が必要となる区間は発生しなかった。

③ 三次点検

静的FEM解析等を用いてより詳細な耐震解析を行い、液状化等による堤防の沈下を算出する。地震後の堤防高さは耐震照査外水位と比較し、堤防の耐震性を評価する。

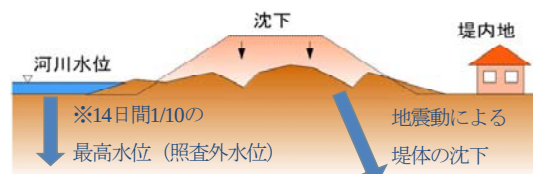


図-7 耐震性能照査のイメージ

(2) 河川堤防における動的解析の実施

レベル2相当の大規模地震時に、木曾三川上流部の河川堤防の挙動を把握するために、動的解析法（LIQCA）を用いて時刻歴解析を行った。

① 代表（解析）断面の選定

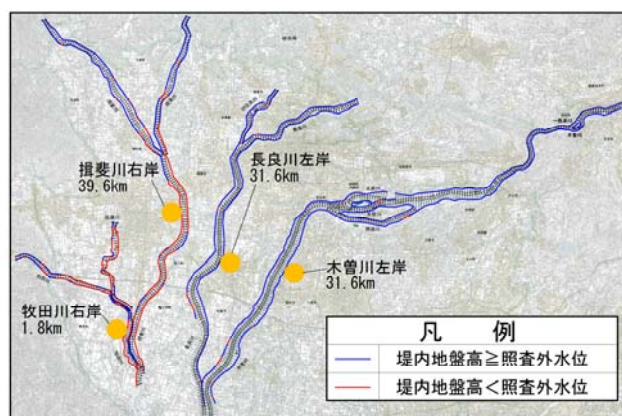
木曽三川上流部における解析断面は図-8に示すように、本川に加えて牧田川にて選定した。各河川の代表断面は、以下の考え方から選定した。

- ・木曽川、長良川、牧田川：液状化層の層厚を考慮した。
- ・揖斐川：堤防の整備時期によって築堤盛土の土質・施工法が異なり、締固めの不十分な築堤部は液状化の可能性があるので、築堤履歴を考慮した。

② 解析の流れ

動的解析の手順は、以下となる。

- STEP-1 : 堤防の土質構造のモデル化
STEP-2 : 地震波形の設定
STEP-3 : 解析の実施



图一8 動的解析断面位置図

表－１ 動的解析結果の一覧

河川	地震動	堤防天端 沈下量 (cm)	法尻水平 変位量 (cm)	許容 地下量 (m)	耐震 性能	変形特性	評 価
木曽川 L31.6k	道示 L2-2	37	48	10.42	○	すべり型	●堤防直下に薄い砂層が分布し、地震時に法尻部は受働抵抗を失い、滑り型の変状になる。 ●最もすべりやすい堤防断面である。
	南海トラフ巨大地震(陸側ケース)	70	75				
長良川 L31.6k	道示 L2-2	169	191	9.28	○	すべり型	●緩い砂層が厚く堆積し、直下型地震では滑り型、海溝型地震では滑り出しながら沈下する縦断亀裂の発達したすべり型変状が予想される。
	南海トラフ巨大地震(陸側ケース)	214	262				
揖斐川 R39.6k	道示 L2-2	24	7	6.95	○	天端陥没型 (局所横断亀裂)	●法尻部直下の薄い砂層(As1)は液状化強度比 $RL20=0.445$ と高いため、滑り変状に至らなかった。 ●深層の液状化による被害は少ない。
	南海トラフ巨大地震(陸側ケース)	29	13				
牧田川 R1.8k	道示 L2-2	42	26	7.51	○	天端陥没型 (局所横断亀裂)	●堤防直下は粘性土、その下位に厚い砂層が分布している ●継続時間の長い地震によって、堤防は落ちて沈みゆく沈下型になる。
	南海トラフ巨大地震(陸側ケース)	97	65				

③ 想定外力

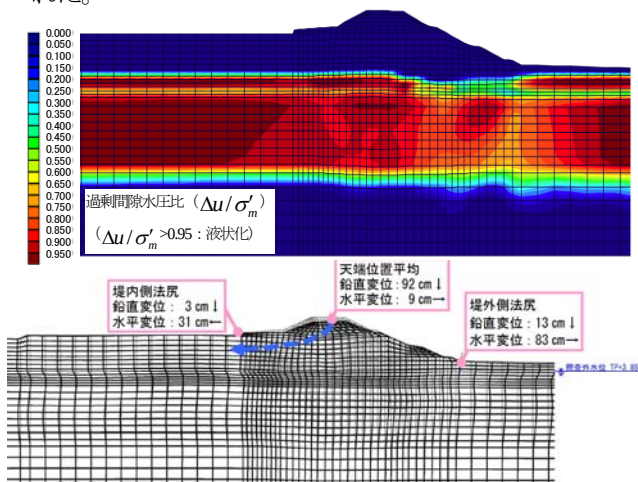
- ・道路橋示方書に定めるレベル2地震動
(直下型、海溝型)
 - ・東海、東南海連動地震
 - ・南海トラフ巨大地震
(基本ケース、陸側ケース:最大想定外力)
- ※地震動は中央防災会議の公表資料より。

(3) 動的解析結果と変状特性

代表断面における解析結果の概要を表-1に示す。沈下後の堤防高は、照査外水位を上回っていることから、耐震性能は満足していることが確認された。

① 木曽川左岸:31.6km地点

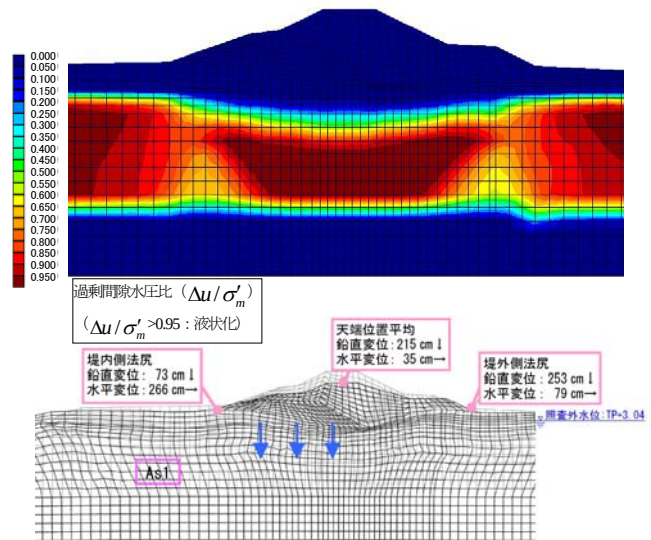
- ・堤外側の法尻部の側方変位量は、天端沈下量より大きい、堤内側は小さい。
- ・堤防の変形状は、堤外側への”すべり型”と予測された。



図－９ 木曽川堤防の動的解析結果

② 長良川左岸:31.6km 地点

- ・天端沈下量と法尻部の水平変位は、ほぼ同時に進行し、その大きさもほぼ同じである。
- ・基礎地盤は、堤防直下地盤と法尻部でほぼ同時に液状化した。30 秒経過以降に地盤沈下と側方変位が徐々に増大し、堤防全体は“沈下型”の変状になることが予測された。



図－10 長良川堤防の動的解析結果

③ 揖斐川右岸:39.6km地点

- ・法尻部の揺れは終始小さいままで変位も小さい。
- ・基礎地盤深部の液状化による堤防天端の沈下量は、繰返し地震荷重によって徐々に増加し、堤防全体が沈みいわゆる“天端陥没型”の変状になることが予測された。

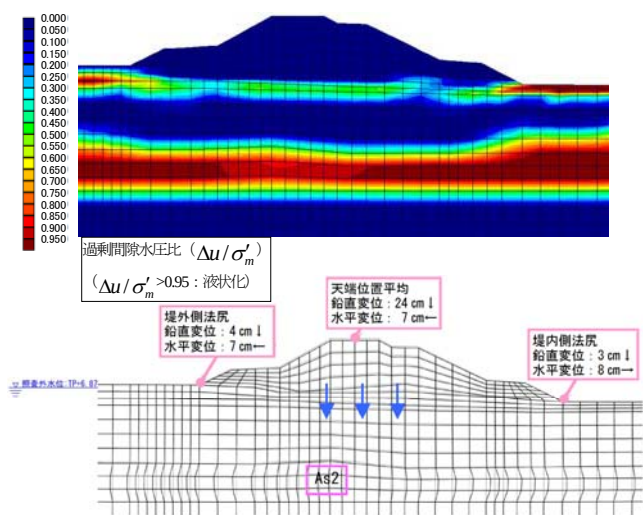


図-11 揖斐川における動的解析

④ 牧田川右岸:1.6km地点

- ・法尻部は地震中に大きく揺れていたが、表層の剛性低下は顕著でないため、水平変位量は64cmで、堤防天端の沈下量より小さい。
- ・基礎地盤深部の液状化に伴って堤防全体が沈む、いわゆる“沈下型”の変状になることが予測された。

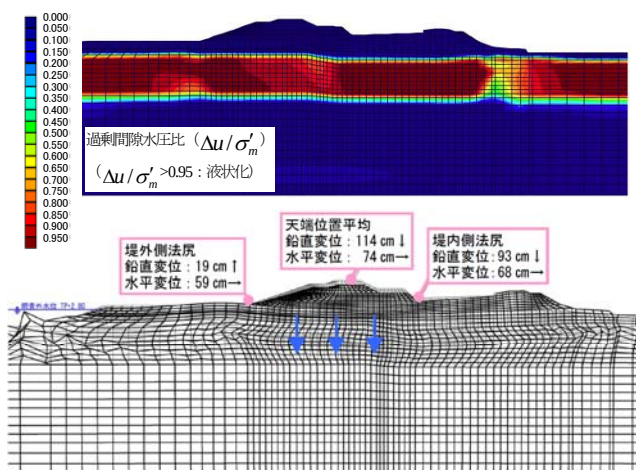


図-12 牧田川における動的解析

(5) 解析結果から確認された変状の傾向

解析の結果から、以下の変状傾向が確認された。

- 表層付近に広く砂層が堆積する断面では、液状化層が弱点となるすべり型の変状傾向
- 軟弱な粘性土層が堆積する断面では、水平方向の変状が抑制され沈下型の変状傾向

4. 地震時の堤防被災モードと関連施設

(1) 堤防の被災モードについて

地質構成から木曽三川上流部の河川堤防の変状傾向を分類する際の考え方を整理した。

① すべり型・沈下型の分類

現行の堤防耐震照査指針類では、地震後の堤体残留沈

下に着目しており、変状モードの予測については記載されていない。

このため、本検討では、表-2に示すように、地震被害調査をもとに作成された「基礎地盤と液状化被害の評価区分」を参考として変状の傾向分析を実施した。

表-2 すべり型・沈下型の分類の考え方

分類	特徴
すべり型	・液状化層(As)が浅層部にある場合に発生し、堤防法尻で隆起や外側方向への水平変位が生じる。 ・堤防直下に液状化層(As)が堆積 ・非液状化層(Ac)の層厚3m以下
沈下型	・堤防全体が外形を留めながら全体的に陥没する変状 ・非液状化層(Ac)の層厚3m以上

—— 変状前盛土形状 —— 変状後盛土形状

図-13は液状化による地盤変状が生じ、地上構造物に影響が及んだかを多数の事例を集めて作成したグラフであり、非液状化層厚が3mを境に無被害であったことが判る。

この考え方を土堤に準用すると、液状化層の上方に非液状化層の厚さが3m以上あれば、基礎地盤全体が沈下する沈下型の変状モードとなることが考えられる。また、非液状化層の厚さが3m以下の薄い場合には、すべり型の変状モードになる可能性が高い。

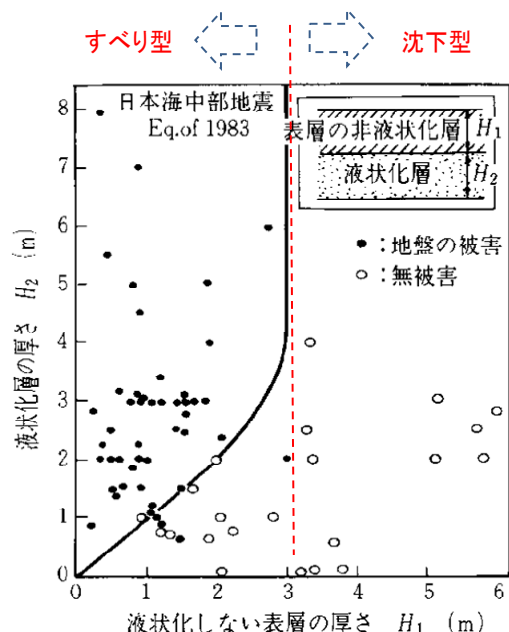


図-13 液状化の影響と上位非液状化層の厚さ⁴⁾

② 木曽三川の地質縦断面図による被災モードの判定

図-4～図-6に示す木曽三川の地質縦断面図、並びに法尻部や堤内地での地質調査結果を踏まえて各河川堤防の地震後の被災モードを判定した結果を、図-14に示す。木曽三川の大部分の区間で、すべり型の変状発生が想定される。

また、変状モードの判定並びに堤防沈下変位解析の精度を向上させるために、堤防横断方向における砂層の深さ位置とその傾斜分布の確認、ならびに軟弱な非液状化層（Ac）の動的変形特性に関して今後の解析を想定した追加地質調査を検討している。

(2) 河川堤防の地震被災による周辺施設への影響

① 周辺施設・堤防横断構造物への影響

河川を横断する橋梁は、その橋台部が堤防定規断面に切り込み、設置されることがある。周辺の土堤の地震時挙動と大きく異なるため、隙間の発生や噴砂現象、堤防のすべりなどの変状が予想される。また、樋門・水門等の堤防横断構造物においても、その周辺堤防にクラック・緩み領域や空洞の発生等により堤防機能の確保に大きな悪影響を及ぼすことがある。

② 緊急輸送道路とのアクセススポットの機能確保

緊急輸送道路は、堤防と立体交差していない場合、地震後の堤防変状によって道路が寸断され、緊急輸送道路の機能を喪失してしまうことが考えられる。図-14は、輸送路と堤防の交差状況、堤防の沈下量などを、次のように整理した。

○：堤防の変状が輸送路に影響を及ぼさない立体交差

×（青）：沈下量50cm未満のため、簡易な復旧によって車両通行が可能な箇所

×（赤）：復旧困難につき、輸送路への影響は大きい

5. 今後の課題

(1) 動的解析手法の課題

① 地震時の時刻歴解析（静的解析との比較）

本検討で実施した動的解析（LIQCA）と、静的解析（ALID）とを比較し、考察した。

- ・動的解析（LIQCA）では、繰返し荷重によって液状化した砂層のせん断ひずみの増加による剛性の回復特性を評価しているため、継続時間の長い海溝型地震による堤防天端の沈下量は静的解析（ALID）より小さい結果が得られた。

- ・動的解析（LIQCA）では、地震動の継続時間の影響を考慮できるのに対して、静的解析（ALID）では考慮できないため、すべり型の変形モードになる地盤上の堤防の場合には、ALIDを適用すると、危険側の結果を与えるおそれがある。

このため、動的解析を適用することが望ましい。

② 土質試験の影響を受け易い

動的解析は、土質定数を得るために、繰返し三軸圧縮試験などより多く土質試験を行う必要がある。また、試験費用を考慮して実施数量を少なく設定すると、試験結果のばらつきを評価し難い。

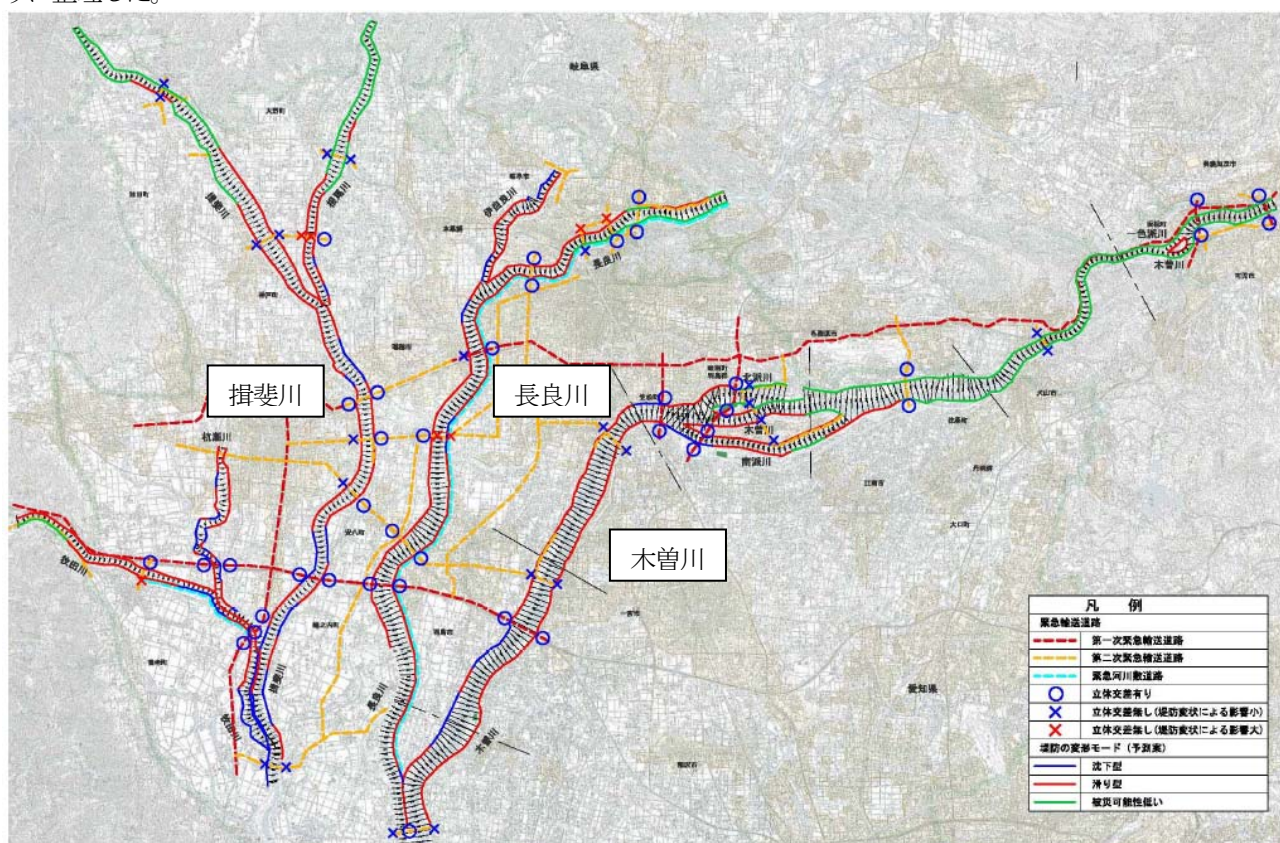


図-14 木曽川上流河川事務所管内の緊急用輸送道路との位置関係

(2) 地震水害のリスクに対する配慮

木曽三川の上流域においては、南海トラフの巨大地震等の地震の切迫性が高いとされており、今検討により河川堤防は耐震照査外水位より残留堤防高が高いが、すべりモードの変状によって堤防断面が確保できない延長が長いと分かった。

また、堤防の沈下・変位の大きい箇所では、樋門等の堤防横断構造物の周辺堤防に緩みや空洞が発生するおそれが高い。洪水時に堤防横断構造物の周辺堤防の緩みに起因して、木曽川・長良川等の堤防が破堤するリスクに対する配慮が重要である。

(3) 地震時の危機管理に関する課題

地震時の危機管理に関しては、堤防道路の地震時の活用が課題である。堤防道路は、地震時等において、物資等の緊急輸送用道路として活用されることが期待されているが、以下の課題がある。

① 堤防道路のネットワーク機能の維持

地震直後には、堤防道路が利用できなくなる可能性が高い。また、緊急用河川敷道路が被災した場合にも、ネットワーク機能が長期にわたって維持できなくなる可能性がある。

② 堤防に近接する家屋等への影響

すべり型の変状（水平変位大）となる長良川等の断面においては、堤防に近接する家屋に影響が及ぶ可能性がある。

6. まとめ

木曽三川上流部は、岐阜市をはじめとして人口の密集する地域が広く分布しており、河川堤防は必要な施設であり、河川堤防の変状の全体像を把握し、必要な対策工を実施していくことが求められている。

今後は、継続して堤防および基礎地盤の地質調査と解析断面を追加しながら精度を向上させていく必要がある。

- ・時刻歴を考慮した動的解析に必要となる土質試験の実施、精度の向上
- ・過去に実施した静的解析結果との整合性、相違点等の比較考量検討

参考文献

- 1) 河川堤防耐震対策緊急検討委員会：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，平成23年9月
- 2) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等（第二次報告）及び被害想定（第一次報告）について，平成24年8月29日。
- 3) 貝塚爽平，成瀬洋，太田洋子，小池一之(1995)：日本の自然 4日本の平野と海岸，岩波書店出版
- 4) 石原研而(1996)：根入れ基礎に及ぼす地震時における深部液状化の影響，土と基礎，Vol.44,No.4,pp.6-9
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：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
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針，平成24年2月
- 7) 土木学会 阪神・淡路大震災対応技術特別委員会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第二次提言」，平成8年5月