

2. 兵庫県南部地震による淀川堤防の被災とその考察

Study on damage to the levee of Yodo river at
Hyogo-ken Nambu earthquake.

川井正彦, 阿部知之, 小野寺功, 利藤房男

Masahiko Kawai, Tomoyuki Abe,

Isao Onodera, Fusao Ritou

Abstract

The 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake caused liquefaction and damaged to many structures in Kansai area . The levee of Yodo-river was also damaged mainly at downstream area. In the left levee, at Torishima area, the maximum settlement of the embankment reached about 3m and the total damaged area covered about 2km length.

The authors joined the project concerning with the repair work after earthquake and performed the soil investigation, study on countermeasure and trench investigation.

In this paper, the outline of damage to levee of Yodo-river is summarized , and the mechanism of failures in the left levee at Torishima area that was occurred the biggest failures in downstream area is studied. As a result, the authors judged that the failures of levee were not caused by sliding failure, but reduction of bearing capacity and lateral flow followed by liquefaction of baseground.

Furthermore , the authours analyzed the factors of the damage, and designed the methods to estimate and predict the damage of levee on liquefied ground , using P_L -value (index of liquefaction potential) and estimating various influence factors. These methods are not general, because the estimated settlement was adjusted the measured settlement, but in future using these methods for precedent of other rivers then it is possible that the methods will be effective one by applying for failures of other levees.

1 まえがき

兵庫県南部地震は、京阪神地方の河川構造物に対しても甚大な被害を与えており、大阪府、兵庫県を中心に350ヶ所以上の被害が報告されている。

著者らは地震発生の当日より、主に大阪市内を流下する一級河川「淀川」の堤防被災状況の調査、地質調査をはじめ、対策工法の検討、被災原因究明のための堤体開削調査といった一連の業務に携わってきた。

本報文では、淀川下流部における堤防の被災状況の概要について紹介するとともに、被災機構の推定のために実施した堤防開削調査の結果について報告する。また、推定される堤防の変形メカニズムについて述べるとともに、被災原因の分析結果をもとに提案した液状化による堤防被災の評価手法について述べる。

2 淀川堤防の歴史

周知のように京阪神地方は古代より文化・文明の中心として栄えた地域であり、その治水の歴史も古く最古は西暦323年の茨田堤の築堤にまでさかのぼる。当時の淀川は、大阪湾と奈良、京都を結ぶ水運の中心としてその重要な役割を果たしてきた。西暦1000年頃の古地図「浪花古図」によると大阪平野の大半は海中にあり、上町台地の部分が南北に連続した陸地として存在していたほかは、島状の州が数多く認められる程度であった。

近世になり、淀川は治水・利水のみならず軍事上の必要性もあり、太閤堤に代表されるような大規模な築堤工事が施工され、その姿を変えつつあったが、依然、河道は大きく蛇行し、幾度と無く大きな氾濫を繰り返した記録を残している。

明治に入ると、海外の進んだ技術を導入できるようになり、水運の確保を主とした低水工事が行われるようになる。

明治18年7月、淀川堤防各所で決壊をまねく大洪水が発生し、上町台地を除く大阪市全域で浸水被害を生じるとともに、旧淀川筋の天満橋、淀屋橋等の橋梁が流失する大災害となり、高水防御を目的とした大規模な「淀川改良工事」に対する要望が高まってきた。

明治29年、全国各地で洪水被害が発生し、同年、「河川法」が制定されるに至った。この河川法の制定を受け、翌明治30年に起工された「淀川改良工事」は、大川、中津川、神崎川の三川に分流していた淀川下流部をまとめた大放水路を開削し計画流量の疎通を確保しようとしたもので、現在の「新淀川」の直線的な流路が開削された。

3 淀川堤防の被災の概要

図-1 に兵庫県南部地震による淀川堤防の主な被害箇所を示した。図より明らかなように、淀川堤防の被害は下流部に集中しており、このうち河口から4 kmの範囲の次の3地区における被害が最も著しかった。

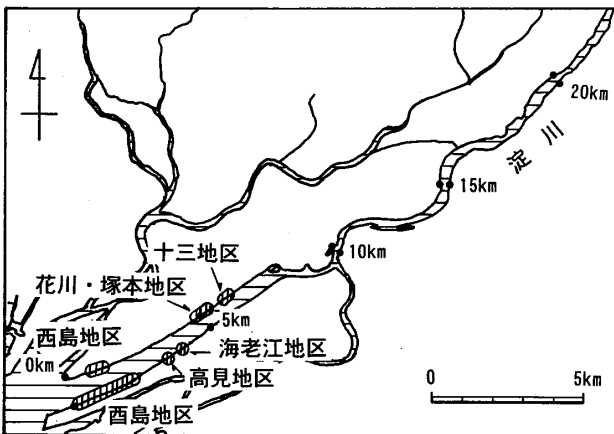


図-1 淀川における主な被災箇所
Fig.1 Location map of damaged site at Yodo river.

- | | | |
|------|-------------|------|
| 左岸下流 | 0.0km~2.0km | 西島地区 |
| 左岸下流 | 3.5km~4.0km | 高見地区 |
| 右岸下流 | 1.1km~1.8km | 西島地区 |

この3地区のうち、特に西島地区での被害が著しく、堤体の最大沈下量は約3 mにもおよんだ。

これら3地区における被災の断面形状を図-2 に示す。同図には、被災直後の地質調査結果から推定した液状化範囲 ($F_L < 1.0$) を斜線で示した。

すなわち、堤防直下の砂層がほぼ全体にわたって液状

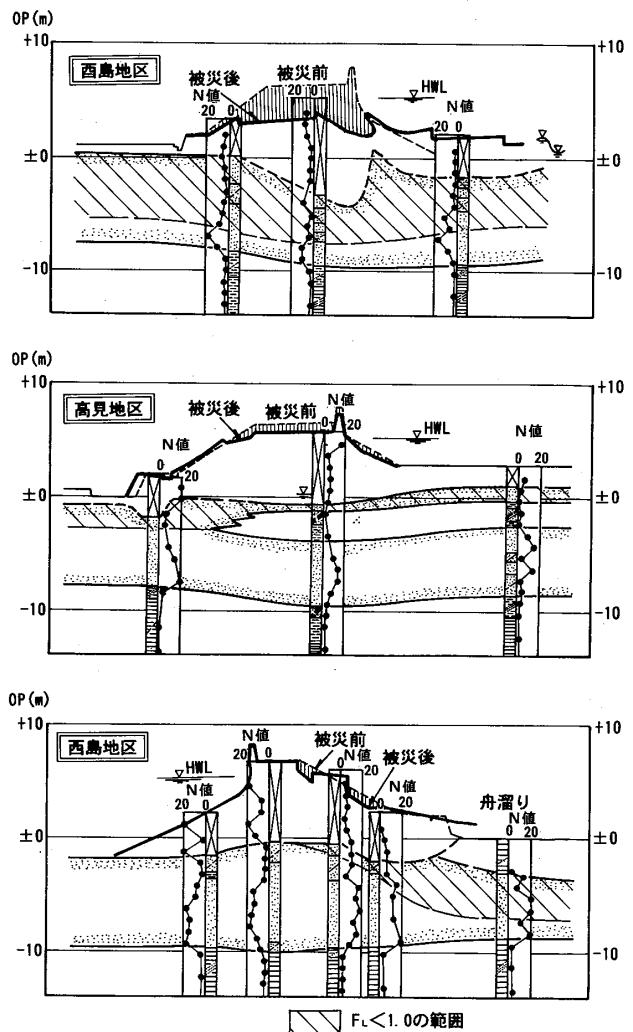


図-2 被災箇所の代表的断面
Fig.2 Typical section of failures at downstream area.

化したものと考えられる西島地区での被害が最も著しくなっており、高見地区・西島地区においては川裏側の砂層上部の液状化のみに留まったため、主に川裏側の堤体に被害が集中したものと考えられる。なお、右岸西島地区においては堤防中央より川表側に軟弱地盤対策としてサンドコンパクションパイルが打設されており、この改良も川表側での被害を軽減した要因のひとつと考えられる。

また、上記3地区のいずれにおいても地表部に噴出したいわゆる噴砂の痕跡が残されている(写真-1参照)。最も被害が著しい西島地区における被災後の平面図(距離標1.4~1.6km付近)を図-3に示した。図より明らかなように、西島地区においては多くの噴砂の痕跡が認められるとともに、コンクリート護岸が著しく変状している。また、距離標1.5km~1.6km付近では、川表側で河床が三日月状に隆起している現象も確認できた。



写真-1 地表からの噴砂の状況

写真-1 Profiles of sand boils at surface.

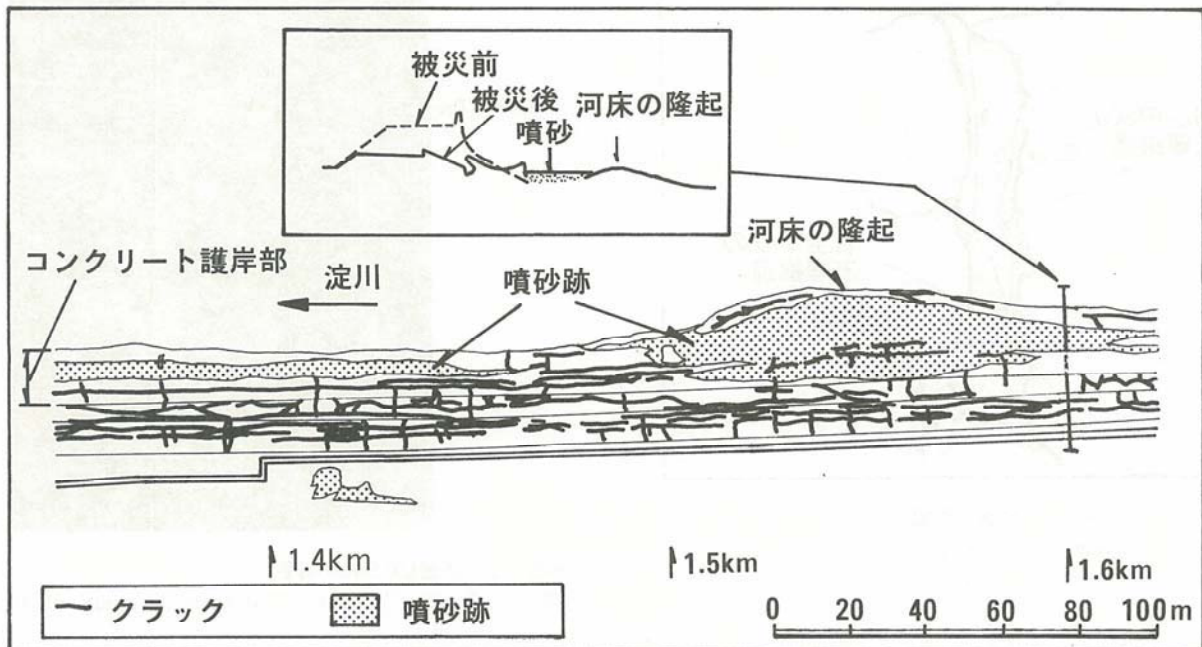


図-3 西島地区における被災平面図

Fig.3 Map of Torishima area after earthquake.

4 堤防開削調査

上述のように、被害が最も著しかった左岸下流部の西島地区では、本復旧工事の施工時に被災メカニズムの推定のために堤防の開削調査を実施した。

以下に、開削調査より明らかとなった各断面の特徴について記述する。

① 距離標0.25km断面

観察結果を図-5に示した(写真-3参照)。

堤体を構成する土は全体に川表側に傾斜しており、川裏側にはせん断面も確認できる。また、波返し構造(パラベット)の直下には脈状の砂の貫入が認められ、この脈中には図-4に示すように、砂の貫入履歴を示すような流理構造が認められる(写真-2参照)。すなわち、始めに砂脈右側の右上がりの流理構造を持つ砂脈が形成され、その後、堤防延長方向(紙面直角方向)から左上の部分に砂が貫入し、上に凸の同心円状の流理構造が形成されたものと考えられる。

また、この砂脈の最上部には、逆に下に凸の流理構造もあり、開口クラックを充填した砂が、上端で行き止まり、下に向かって沈降していく過程で形成されたものと考えられる。

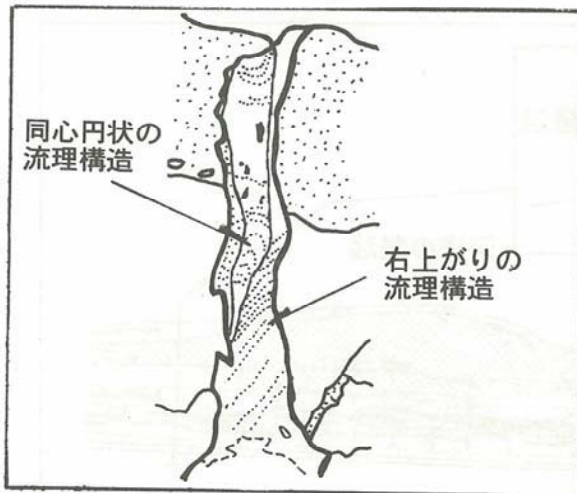


図-4 砂脈の詳細
Fig.4 Details of sand dike.



写真-2 距離標0.25kmの砂脈
Photo-2 Sand dike at 0.25km from the mouth of river.

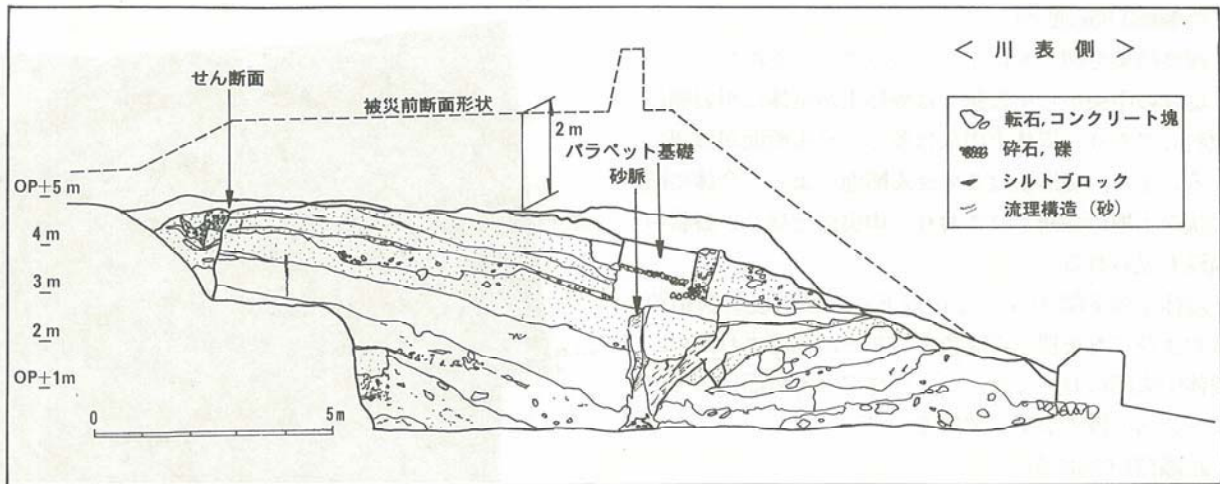


図-5 距離標0.85kmの開削断面

Fig.5 Sketch of open cut section at 0.85km from the mouth of river.

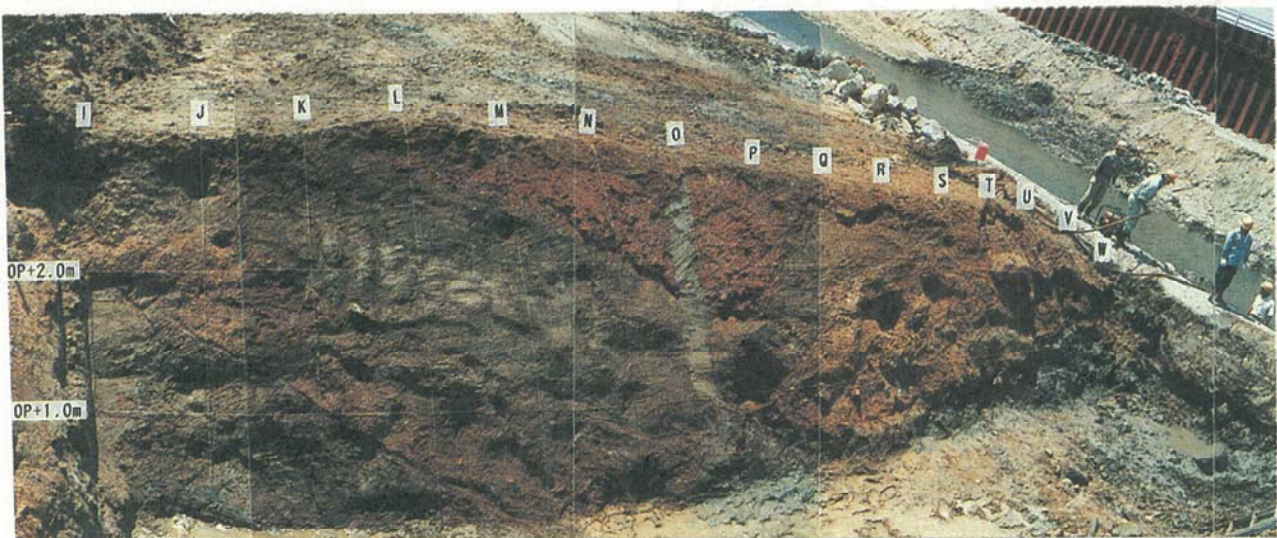
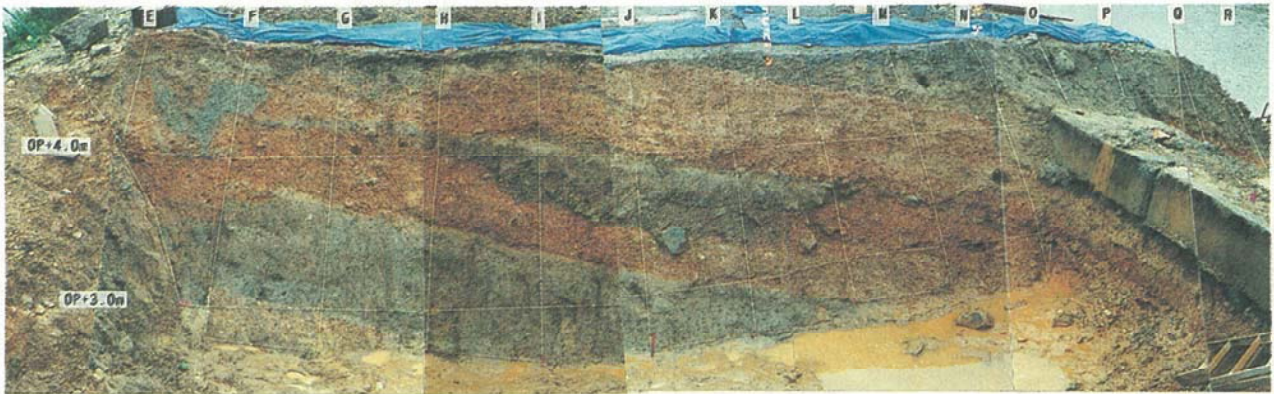


写真-3 距離標0.25kmの開削断面

Photo-3 Profiles of open cut Section at 0.25km from the mouth of river.

② 距離標0.85km断面

観察結果を図-8に示した(写真-5参照)。

堤体の中央から川表側では堤体土が全体に川表側に傾斜しており、堤体土中には多くのせん断面が確認できる。また、堤体土はこのせん断面によって全体に階段状の土塊に分断されており、中央部ではくさび状の陥没も見られる。

堤体土の下部(OP+1m以下)には、成層構造の砂およびこれを覆う青灰色のシルトが確認されたが、堤体中央部においては、シャープなせん断面によって20~30cmの段差が生じている。

③ 距離標1.0km断面

観察結果を図-9に示した(写真-6参照)。

距離標0.25kmの断面と同様、堤体を構成する土は全体に川表側に傾斜している。また、堤体の中央部付近に多くのせん断面が存在しており、堤体の中央部全体がくさび状に陥没している(図-6, 写真-4参照)。

一方、川表側では図-7に示すように、液状化時に噴き上げた幅5m以上におよぶ砂脈があり、この中には堤体土と同じ土塊が存在している。砂脈内には下方

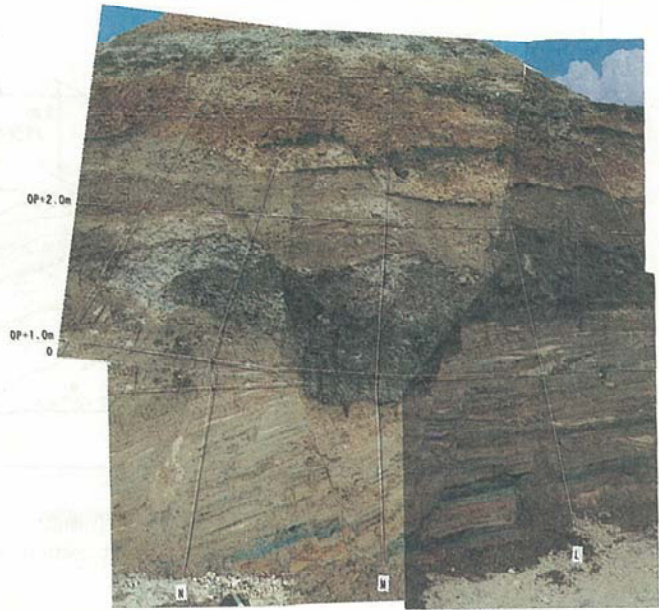


写真-4 堤体中央のせん断面の詳細
Photo-4 Details of Slip planes at center of embankment.

から上方への流理構造がみられるが、川表側の土塊周囲には同心円状の流理構造が発達している(写真-7参照)。

これは、液状化時の砂の流れによって、堤体から分離した土塊が丸く削られたことによるものと考えられることができる。

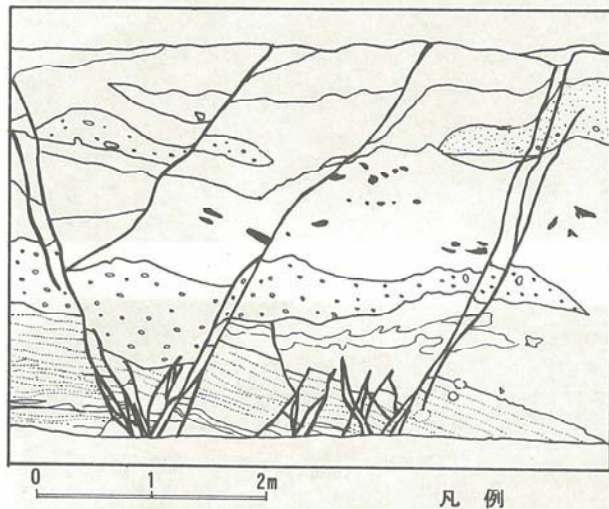


図-6 堤体中央のせん断面の詳細
Fig.6 Details of slip planes at center of embankment.

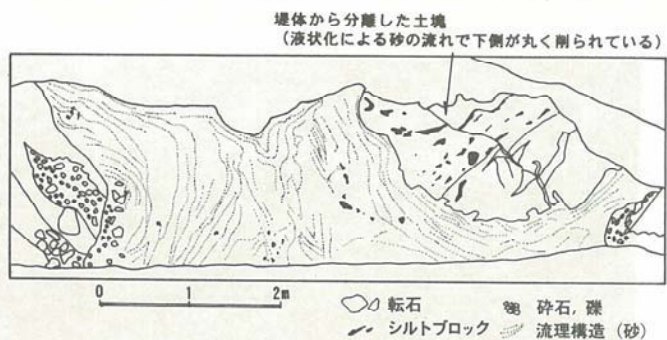


図-7 川表側の砂脈の詳細
Fig.7 Details of sand dike at front of river.

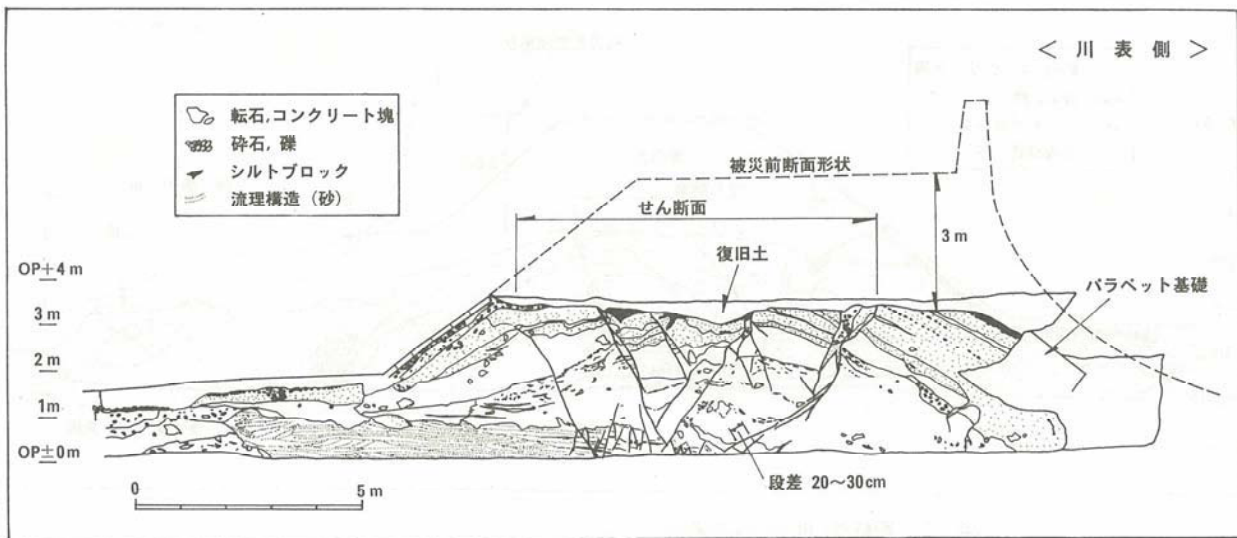


図-8 距離標0.85kmの開削断面

Fig.8 Sketch of open cut section at 0.85km from the mouth of river.

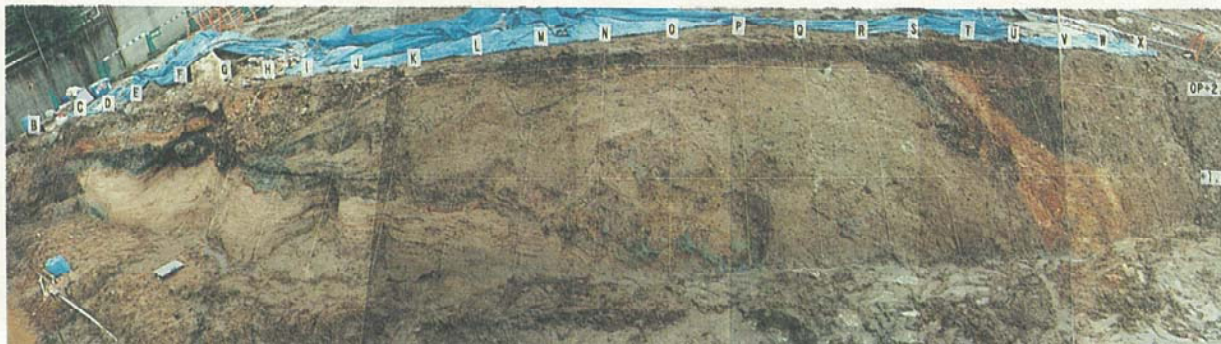


写真-5 距離標0.85kmの開削断面

Photo-5 Profiles of open cut section at 0.85km from the mouth of river.

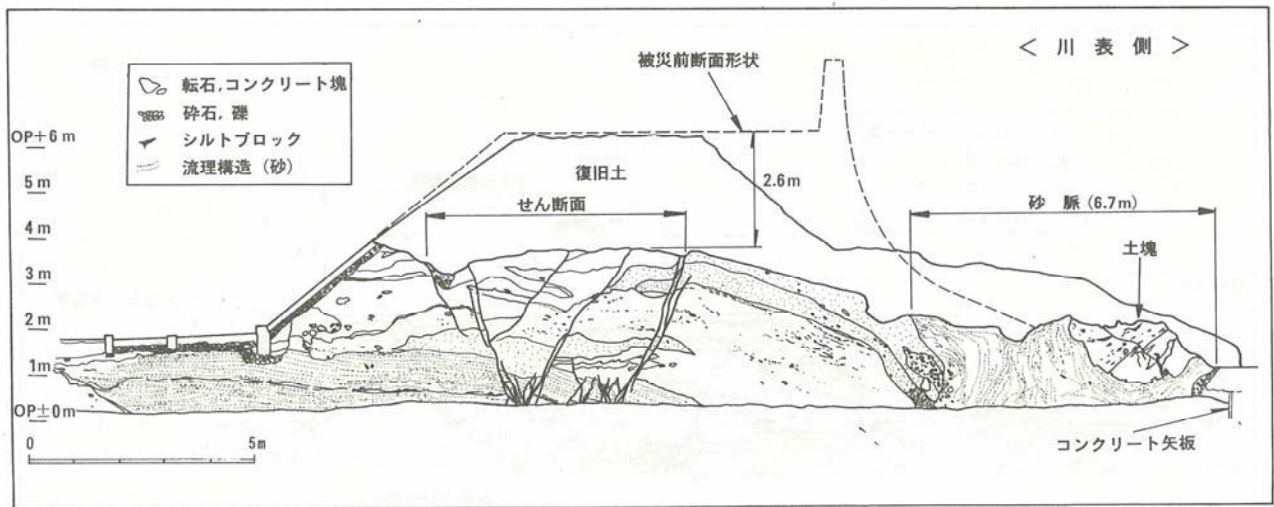


図-9 距離標1.0kmの開削断面

Fig.9 Sketch of open cut section at 1.0km from the mouth of river.

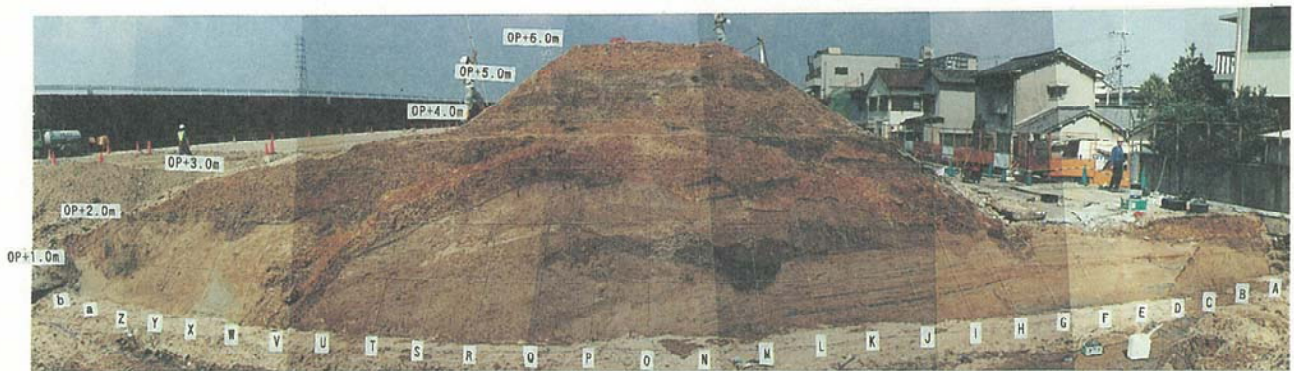


写真-6 距離標1.0kmの開削断面

Photo-6 Profiles of open cut section at 1.0km from the mouth of river.



写真-7 距離標1.0km断面における川表側の砂脈の詳細

Photo-7 Details of sand dike at front of river in 1.0km section.

④ 距離標1.4km断面

観察結果を図-11に示した(写真-9参照)。

堤体を構成する土が全体に川表側に傾斜しており、波返し構造(パラベット)の直下付近で最も大きな沈下を生じている(ただし、図中の被災前天端と復旧土下面との比高を3.5mと表示してあるが、被災直後の天端沈下量は3.0mであり、緊急復旧のため被災した天端表面を取り除いた後復旧土を盛土したことにより50cmの差が生じている)。全体的に見ると、堤体はせん断面によって多くの土塊に階段状に分断されており、これまでの断面で見られたくさび状の陥没は確認されなかった。

しかし、パラベットの直下およびその川表側において、地震時の液状化に伴う砂脈の貫入が確認できる。

⑤ 距離標1.7km断面

観察結果を図-12に示した(写真-10参照)。

この断面もこれまでの断面と同様、堤体が大きく川表側に傾斜して被災しているが、せん断面は認められなかった。

堤防天端の沈下量は、波返し構造(パラベット)付近で最も大きく、この部分では液状化に伴う砂脈の貫入が確認できた(写真-8参照)。

また、開削調査時に確認された砂脈から採取した試料と地震直後に地表面で採取した噴砂の試料の粒径加積曲線をまとめて図-10に示した。この試験結果によると、いずれの砂も粒径が均一であるが、地表に噴き上げた砂は、砂脈から採取した砂に比べやや細粒であることが分かる。

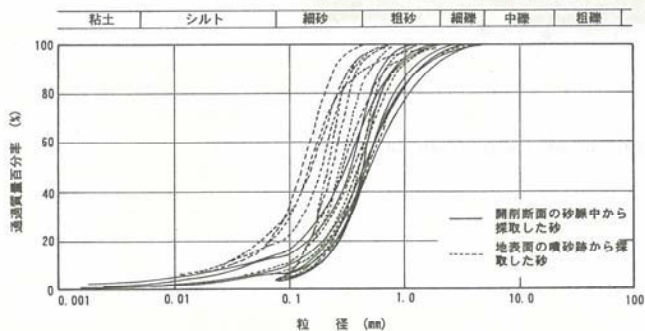


図-10 地表面に噴出した砂および開削断面の砂脈から採取した砂の粒度組成

Fig.10 Grading curves of sand dikes at open cut sections and sand boils at the surface.



写真-8 距離標1.7km断面における砂脈の詳細
Photo-8 Details of sand dike in 1.7km section.

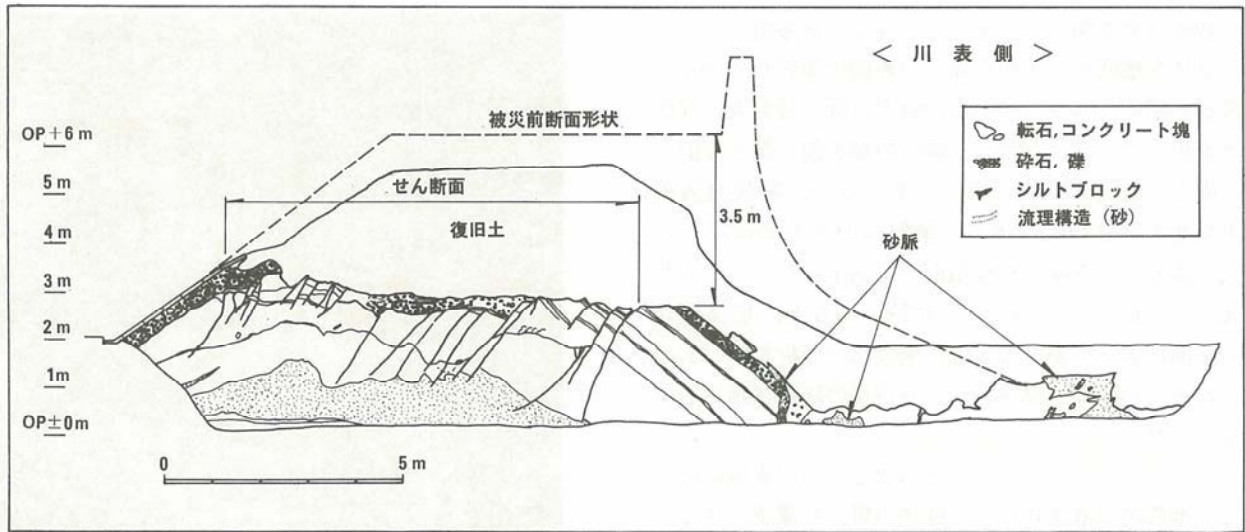


図-11 距離標1.4kmの開削断面

Fig.11 Sketch of open cut section at 1.4km from the mouth of river.



写真-9 距離標1.4kmの開削断面

Photo-9 Profiles of open cut section at 1.4km from the mouth of river.

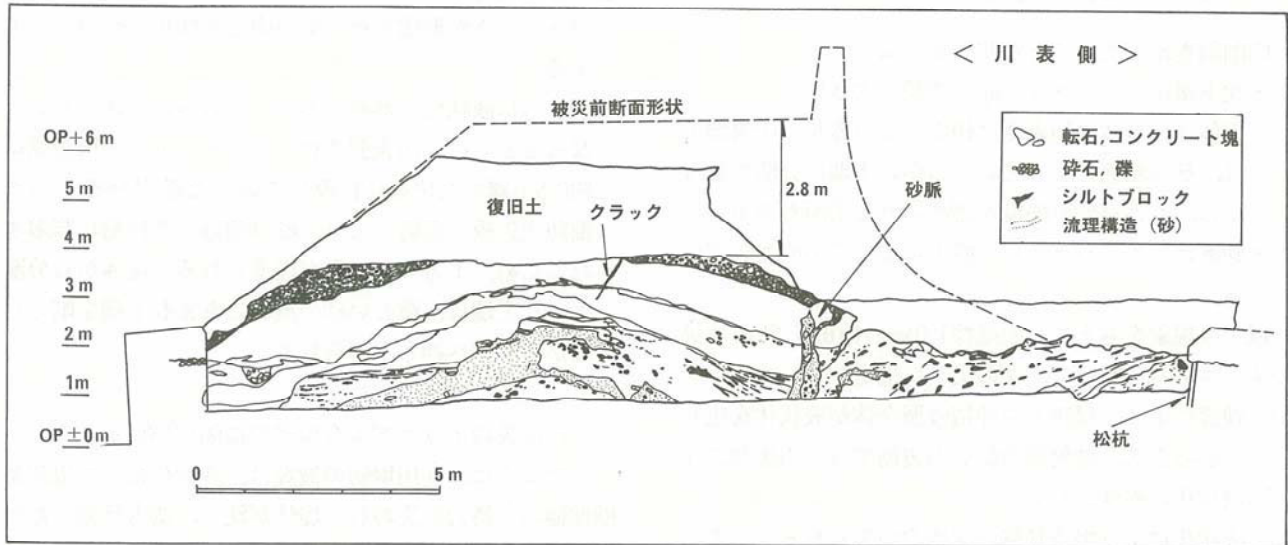


図-12 距離標1.7kmの開削断面

Fig.12 Sketch of open cut section at 1.7km from the mouth of river.

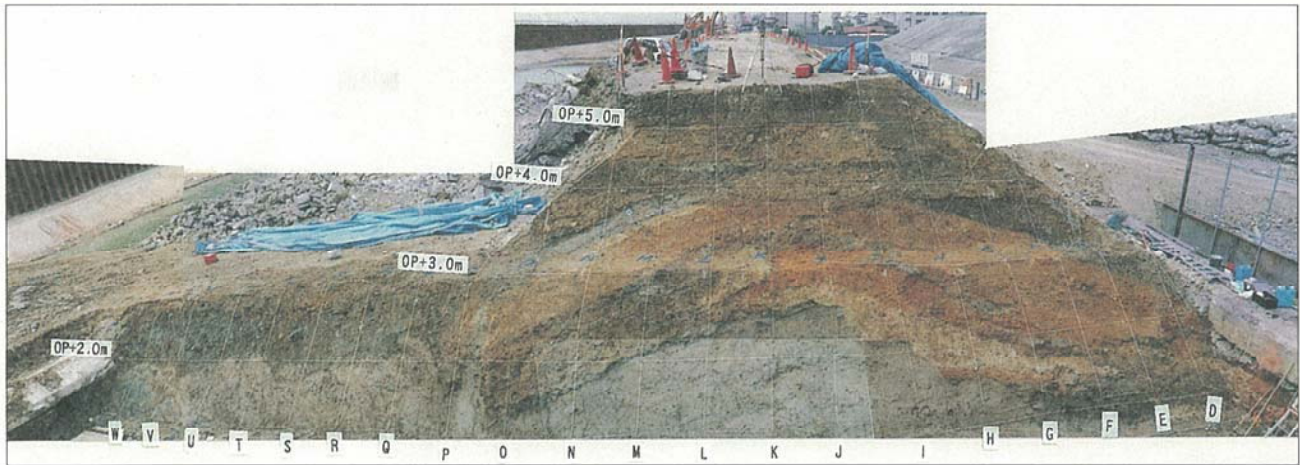


写真-10 距離標1.7kmの開削断面

Photo-10 Profiles of open cut section of 1.7km from the mouth of river.

5 被災メカニズムの推定

開削調査から次のことが明らかとなった。

- ・沈下量は、パラベット直下で最も大きい。
- ・堤体は、全体に川表側に傾斜しているが、中央部では、せん断面によっていくつかの土塊に分断されながら、くさび状の陥没が認められる箇所もある。
- ・砂脈は、主にパラベット直下において形成されている。

以上の現象をもとに、距離標1.0kmの断面を例に被災のメカニズムについて、次のように推定した。

- ① 地震によって堤防下の沖積砂層全体が液状化を生じる。このとき、地盤高の低い川表側では、川裏側に比べ液状化の程度が激しい。
- ② 液状化により堤防基盤の支持力が失われる。このとき、コンクリート護岸の自重が重く、かつ、液状化の程度が激しい川表側で大きく沈下を生じる。
- ③ 液状化の継続により、川表側の沈下が著しくなり、堤体が大きく川表側に傾斜するとともに、堤体内に引張り力が作用し、ブロック状の土塊に分断される。

- ④ ③と同時期、パラベット直下では、沈下に伴って開口クラックが形成され、その中を液状化した砂が充填する。
- ⑤ さらに液状化が継続すると、これらの変状が著しくなるとともに、川表側では、パラベットから川表側に約8.5m離れた位置に打設してあった護岸基礎下の洗掘防止矢板の影響により、砂は側方への移動が制限されるため、上方への移動が促進される。堤体から分離された土塊は、激しい砂の流れにもまれ下側を削られながら上方へ押し上げられる。

この被災のメカニズムを模式的に図-13に示した。

このように、淀川堤防の被災は、液状化により堤防基礎地盤の支持力が失われ、堤体が沈下、側方移動したために生じたものと考えられる。また、これらの変状に伴い堤体に引張り力が作用し、堤体がいくつかのブロックに分断、あるいはクサビ状の陥没を生じたため、外見上はすべり破壊に似たせん断面が形成されたものと考えられる。

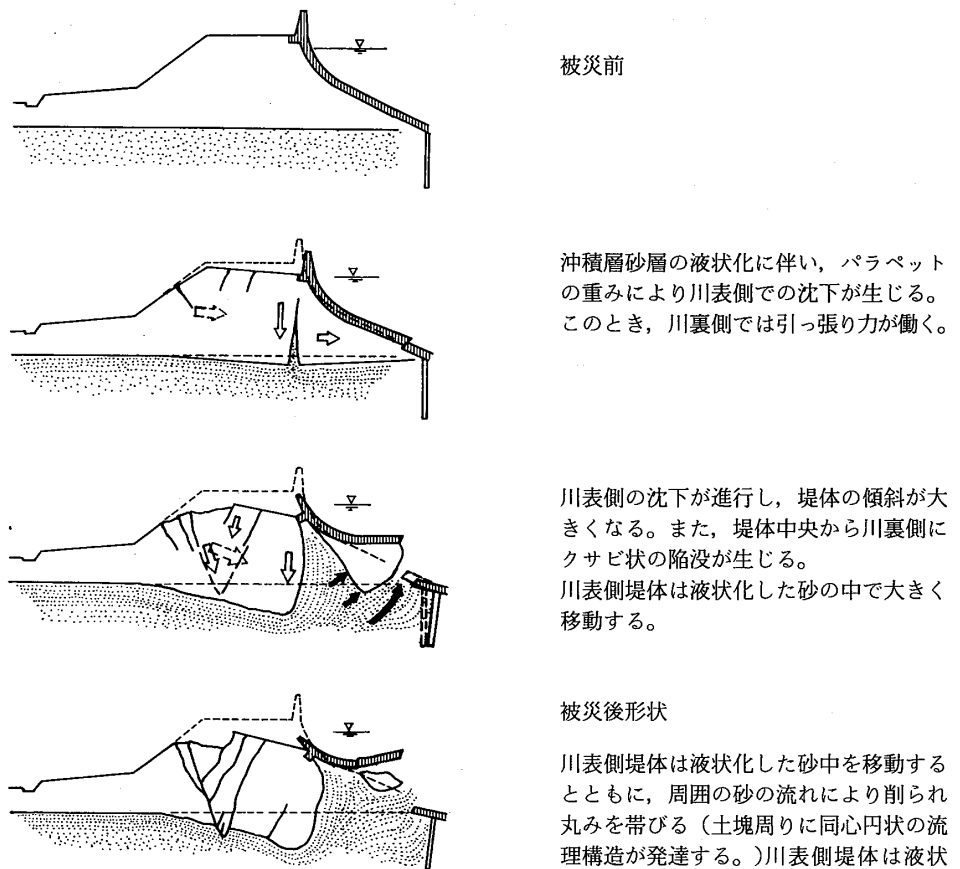


図-13 推定した被災メカニズム (距離標1.0km)

Fig.13 Estimated mechanism of the failures at 1.0km section.

6 淀川堤防被災に対する考察

6・1 各要因の分析

被災直後の現地踏査、地質調査および堤防の開削調査結果より、淀川下流部の堤防は基礎地盤の液状化によって被災したものと考えられた。このような液状化による堤防被災の要因について、次の3点に着目して検討を行った。

- ・地形的要因（地形区分）
- ・堤防の構造的な要因（堤防高、矢板、高水敷など）
- ・土質的要因（N値、粒度分布など）

なお、地震動の差も被災の程度に影響しているものと考えられるが、これについては議論できるような詳細な記録が得られていないことや検討対象範囲が限られた比較的狭い範囲であることからここでは地震動の大きさは本検討区間では、ほぼ同程度と仮定した。

図-17、図-18に淀川下流部（上町台地の延長部、距離標10.0kmより下流）の地質断面、天端沈下量の分布、矢板長、高水敷幅、地形区分および根固め工の有無につ

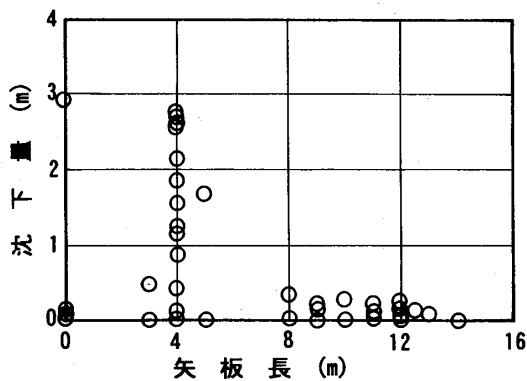


図-14 矢板長と沈下量の関係
Fig.14 The relationship between the length of sheet piles and settlement.

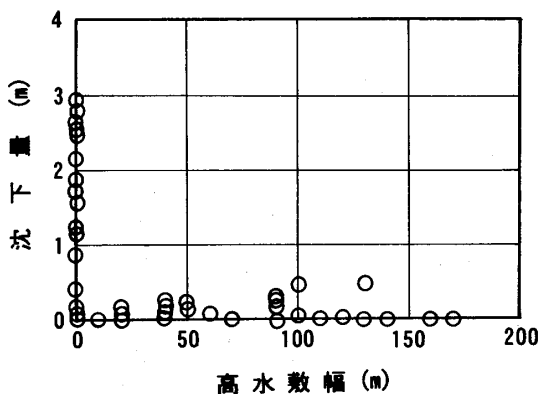


図-15 高水敷幅と沈下量の関係
Fig.15 The relationship between the width of blankets and settlement.

いてまとめて示した。

図によると、淀川下流部の地質構成には極端な変化は見られないが、被災地区（西島地区、高見地区、西島地区）は次のような特徴を有している。

- ・大きな沈下を生じた左岸の西島地区および右岸の西島地区は、地形区分としては大部分が干拓地に相当する。
- ・被災が比較的軽微であった高見地区は、デルタおよび旧河道部に相当している。
- ・西島地区、西島地区では、他の地区に比べ矢板の打設長が短く、また高水敷の幅も狭い。

矢板長および高水敷幅と沈下量との関係を見ると、図-14および図-15に示すように、矢板長が長くなる、あるいは高水敷幅が広がると、沈下量が小さくなる傾向にあるようである。特に、高水敷幅の無い所で大きな沈下が発生している。

また、矢板の長さの堤防直下の沖積層砂質土の層厚に占める割合と沈下量の関係についてみると、図-16に示すように、砂層厚に相当する長さの矢板を打設している区間では、ほとんど沈下は生じていない。

一方、下流部の堤防直下に分布する沖積層砂質土の土質特性について、N値、細粒分含有率、均等係数の頻度分布図を作成し、図-19～図-21に示した。

この図によると、多少のばらつきはあるものの、大局的には被災箇所では無被災箇所と比べ、全体にN値が小さめであり、細粒分含有率が小さく、また、均等係数も小さい傾向があることが分かった。

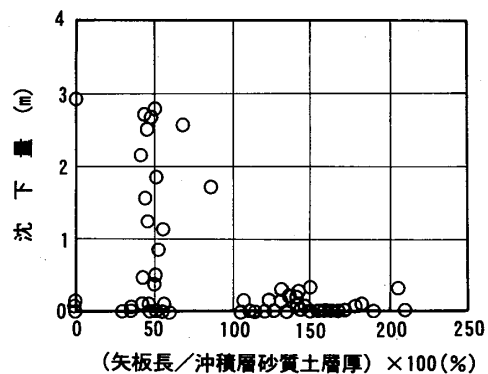


図-16 沖積層砂質土の層厚に対する矢板長の割合と沈下量の関係
Fig.16 The relationship between the ratio of the thickness at alluvium sand to the length of sheet piles and settlement.

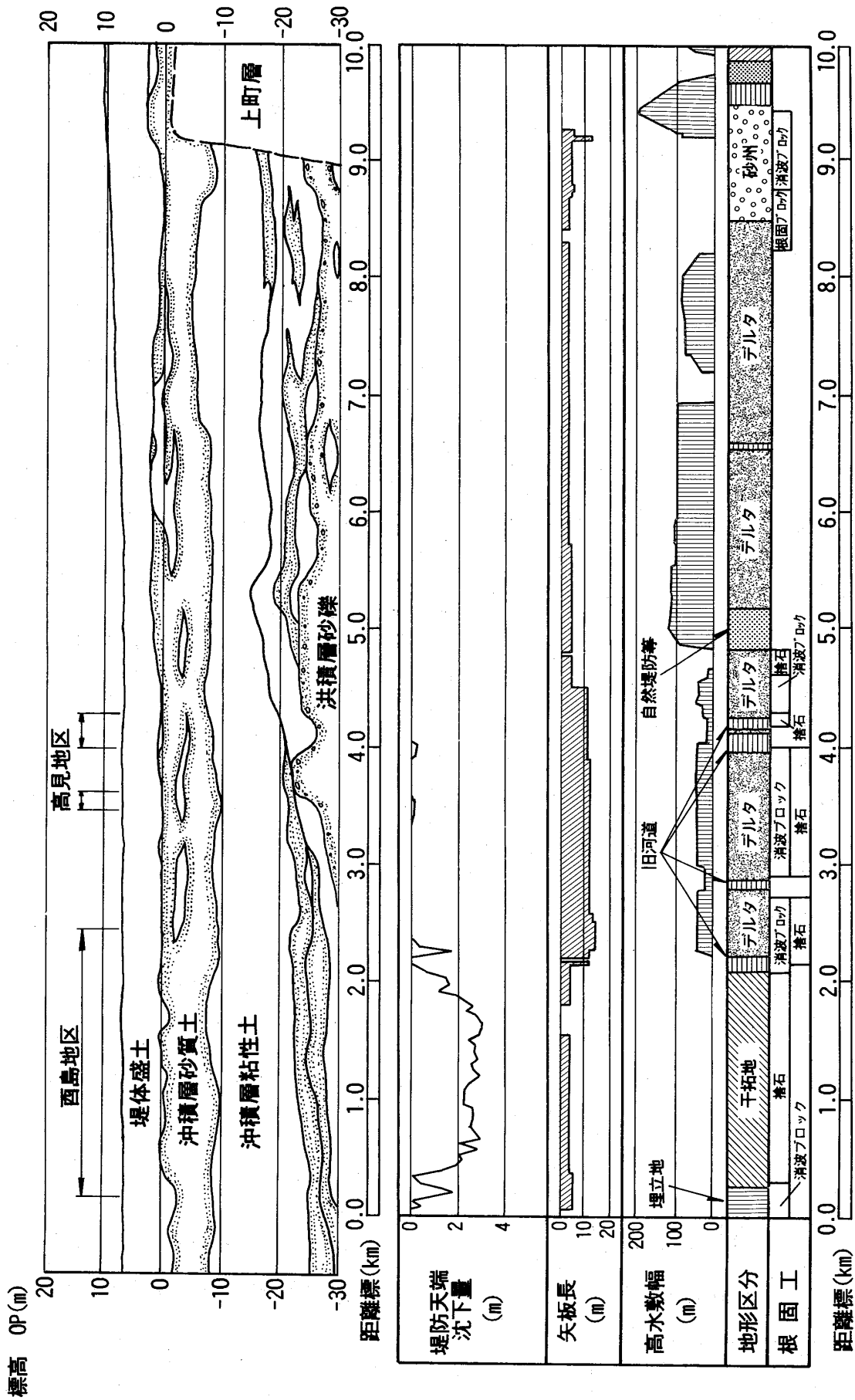


図-17 淀川左岸下流域の地質断面、実測沈下と河川改修のまとめ
 Fig.17 Geological profile, settlement, blanket width and sheet pile length on the left bank of Yodo-river in downstream area.

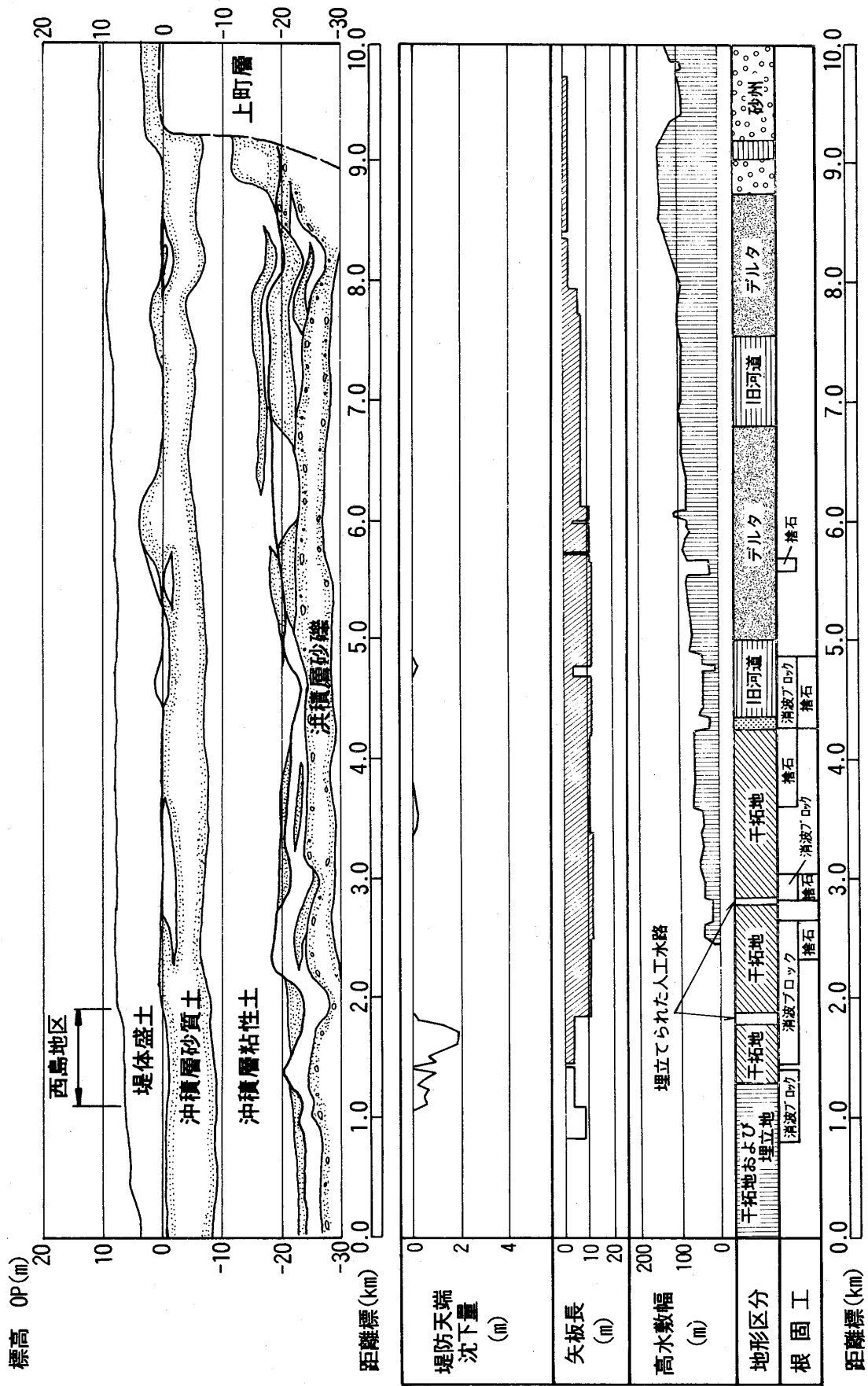


図-18 淀川右岸下流域の地質断面, 実測沈下と河川改修のまとめ
 Fig.18 Geological profile, settlement, blanket width and sheet pile length on the right bank of Yodo-river in downstream area.

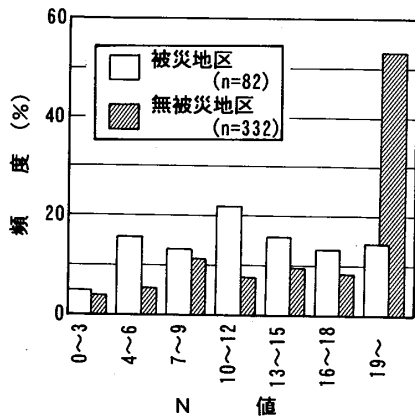


図-19 沖積層砂質土におけるN値の頻度分布
Fig.19 Distribution of N-value at alluvium sand.

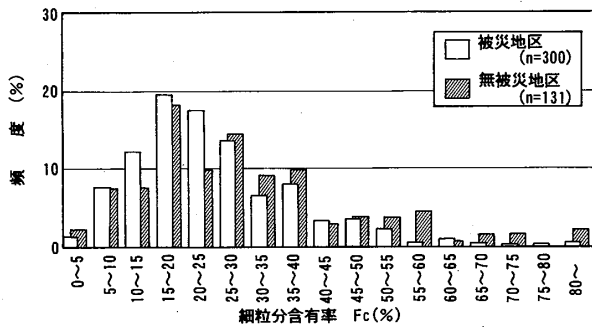


図-20 沖積層砂質土における細粒分含有率の頻度分布
Fig.20 Distribution of fine fraction content at alluvium sand.

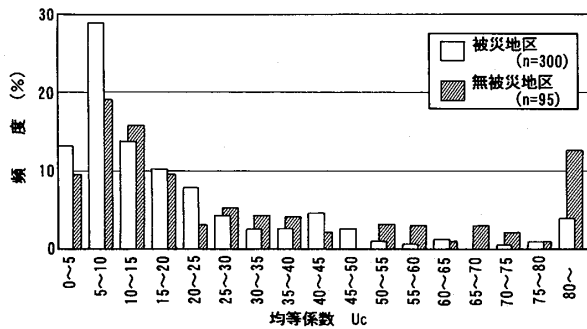


図-21 沖積層砂質土における均等係数の頻度分布
Fig.21 Distribution of coefficient of uniformity at alluvium sand.

6・2 沈下量予測手法の提案

(1) 地盤液状化指数を用いる方法

ある地点の液状化発生の可能性を判定する場合には、一般的に深度ごとに F_L 値を求める方法が用いられる。しかし、検討地点の液状化危険度を評価するためには、 F_L 値の深度分布を考慮する必要がある。

岩崎・龍岡らによると、次式で表される地盤液状化指数 P_L 値を定義している。

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz$$

ここに、 $F : F_L \leq 1.0$ のとき $F = (1.0 - F_L)$

$F_L > 1.0$ のとき $F = 0$

$w(z)$: 深度方向の重み関数

$$w(z) = 10 - 0.5z$$

z : 深度(m)

P_L 値は、 F_L 値を深度方向に積分しているため、その地点における液状化の程度を定量的に評価できる。そこで、この P_L 値を用いて、淀川堤防の沈下量の評価を試みた。

ただし、実際の堤防の被災には堤防の高さや法勾配等の堤体の構造も影響すると考えられるので、沈下の評価には、堤高による影響を取り除いた残留率 (= (堤高 - 沈下量) / 堤高 × 100%) を用いることにした。

図-22に地形区分毎の地盤液状化指数 (P_L 値) と残留率の関係を示した。図より、両者の間には負の相関が認められ、地形区分毎にその勾配が異なっているものと

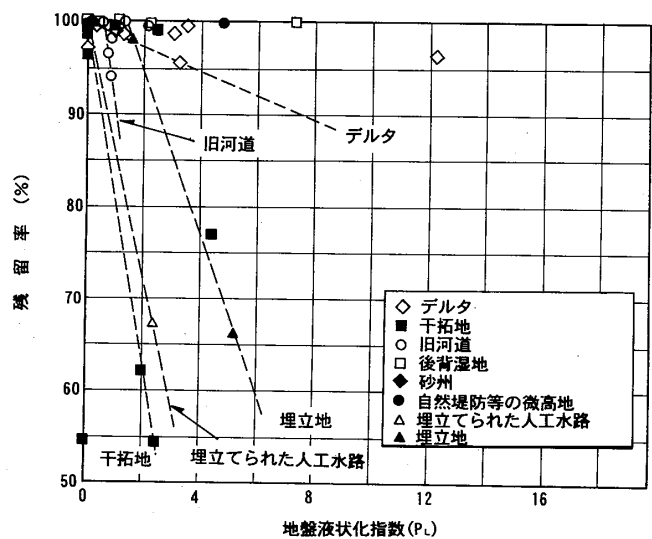


図-22 地盤液状化指数と残留率の関係
Fig.22 The relationship between P_L -value and remained ratio.

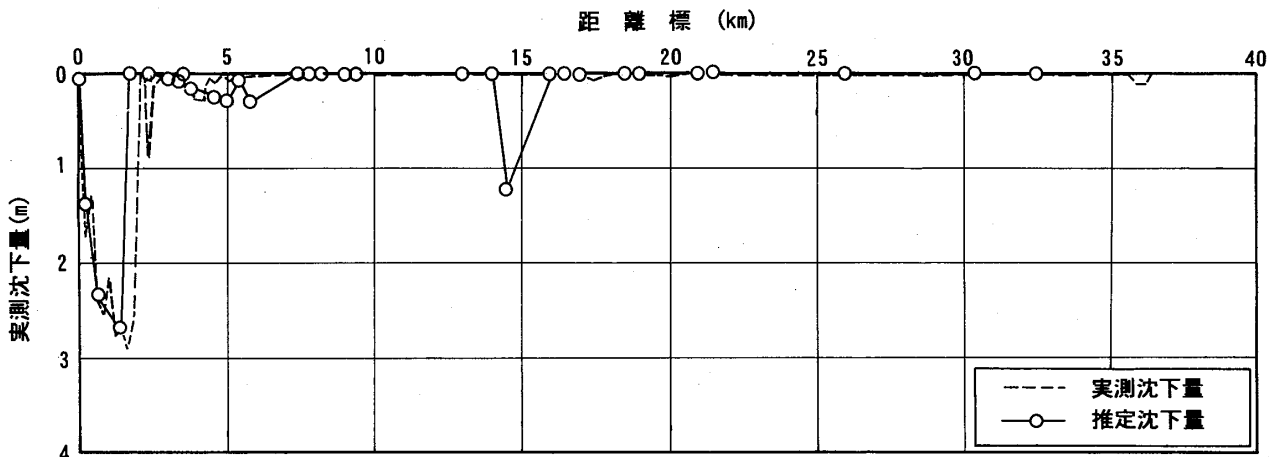


図-23 地盤液状化指数から推定した沈下量と実測沈下量

Fig.23 The estimated settlement obtained by P_L -value and measured settlement.

表-1 被災要因ごとの評価点

Table. Estimation points of each factor.

		地形	液状化指数	高水敷幅	矢板長 ^{*)}	堤高
評価点	0点	—————	$P_L=0$	$\geq 100\text{m}$	$\geq 150\%$	$\leq 2\text{m}$
	1点	下記以外の地形	$P_L=0\sim 1$	50~100m	100~150%	2~4m
	2点	旧河道、デルタ埋立地	$P_L=1\sim 3$	10~50m	50~100%	4~6m
	3点	干拓地埋立てられた人工水路	$P_L>3$	0~10m	0~50%	$\geq 6\text{m}$
重み付け		$\times 15\%$	$\times 40\%$	$\times 20\%$	$\times 20\%$	$\times 5\%$

*) 矢板長は、矢板長/沖積層砂質土層厚 $\times 100\%$ の値により評価した

考えた。ただし、地形区分が後背湿地、砂州、自然堤防に相当する箇所では P_L 値と残留率の間に相関が認められず、 P_L 値の大小に関わらず、堤体がほとんど沈下しなかったことを示している。

これらのことから、地形区分毎の P_L 値と残留率との関係をもとに、既往の地質調査結果より P_L 値、堤防形状から堤高を求め、既往地質調査箇所における沈下量を推定した。

推定した沈下量の分布を地震時に生じた実際の天端沈下量と併せて図-23に示した。図によると、距離標15km付近で実測沈下量に比べ推定沈下量が1m程度大きめに評価されている。

(2) 評価点を用いる方法

6章で述べてきたように液状化による被災の程度には液状化指数だけではなく、地質構造、地形区分等の他、河川改修による高水敷や矢板等も影響しているものと考えられる。

そこで、表-1に示すように、これらの各要因に0~

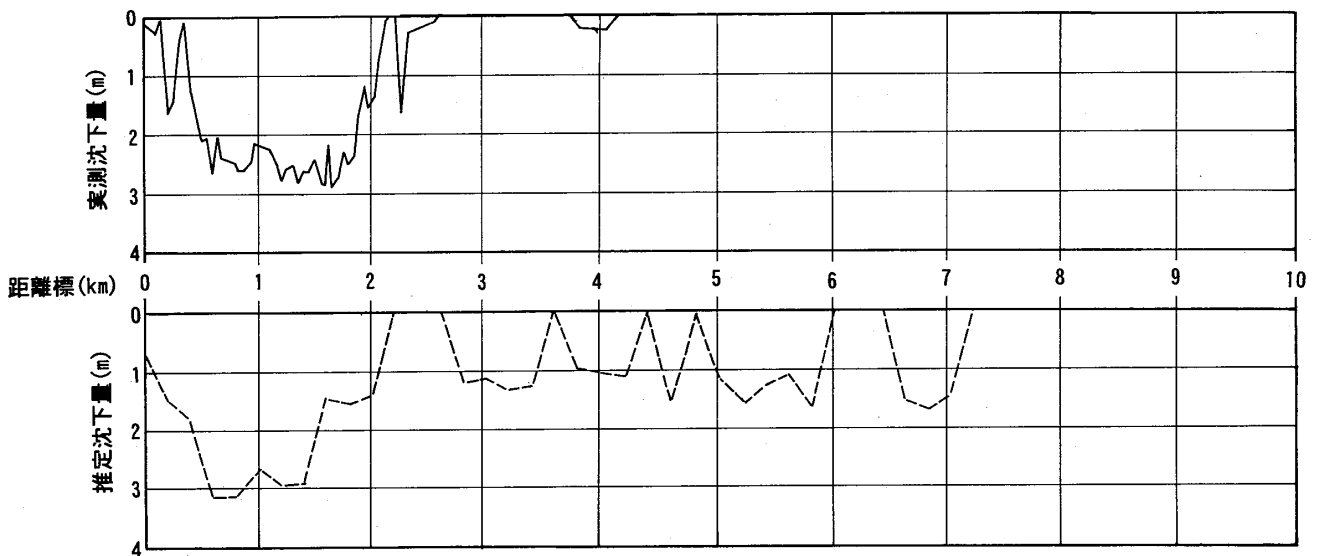


図-24 評価点による推定沈下量と実測沈下量

Fig.24 The estimated settlement obtained by proposed method and measured settlement.

3点の評価点を与え、さらにこの評価点に重み付けをすることによって、総合的な評価を試みた。

なお、重み付けした評価点の合計と堤防天端の沈下量を整合させ、沈下量の区分を以下のように考えた。

- 1) 合計点 3.5点以上：堤高の75%沈下
- 2) 合計点 2.5～3.5点未満：堤高の50%沈下
- 3) 合計点 1.5～2.5点未満：堤高の25%沈下
- 4) 合計点 1.5点未満：無被災

この評価による推定沈下量の分布を実測沈下量と併せて図-24に示した。図によると、距離標2.5km付近より上流で、実測沈下量に比べて推定沈下量が1m以上大きく評価されている部分が認められるが、最も被災の著しい距離標2kmより下流部においては、ほぼ実際の沈下量を再現できている。

これら手法は、 P_L 値あるいは評価点を実際の沈下量に整合するように検討したものであるため、堤防縦断方向の沈下量分布を良く再現することができている。

従って、これらの方法を一般的な予測手法とするためには、既往の地震による他の河川における被災事例も併せて総合的に評価検討していくことが必要である。

7 あとがき

兵庫県南部地震による淀川下流堤防の被災メカニズムおよび被災程度の評価手法について検討を行い、次の知見を得ることができた。

- 1) 淀川下流堤防の被災は、主に堤防基礎地盤の液状化を原因としているものである。
- 2) 開削調査結果によると、堤体の被災はすべり破壊により被災を生じているのではなく、液状化により堤防基礎地盤の支持力が失われ、堤体が沈下、側方移動したため生じたものである。
- 3) 淀川堤防の被災には、地形、土質、堤体構造などの要因が複雑に影響している。
- 4) 被災に関係している要因のうち、液状化指数(P_L 値)に着目すると、堤体の残留率との間に相関が認められ、実際の堤防縦断方向の沈下量の分布形態をほぼ再現することができる。
- 5) 各種要因に評価点を与え、それぞれ重み付けを行い総合的に評価した結果、多少の差異はあるものの、実際の堤防縦断方向の沈下量に近い分布形態を再現することができる。

今後、他の河川の被災事例に関して提案した予測手法の適用性を検討するとともに、簡便な地震時被災の予測手法として確立していきたい。

謝 辞

本報文は建設省近畿地方建設局淀川工事事務所のご理解により公表する事を許可されたものであり、ここに、改めて謝意を表します。また、調査・検討の実施に際しては、淀川河川堤防震災対策検討委員会の委員各位、ならびに(財)国土開発技術研究センター、(財)先端建設技術センターの関係各位にご指導・ご協力を頂きました。ここに深謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) (社)土質工学会関西支部他：大阪地盤図 1966年
- 2) 国土開発調査会：淀川 — その治水と利水 — 1984年
- 3) (財)先端建設技術センター：淀川堤防復旧施工調査検討業務報告書 1996年
- 4) (財)国土開発技術研究センター：淀川堤防強化工法検討業務報告書 1996年
- 5) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進：地震時地盤液状化程度の予測について, 土と基礎, Vol. 28, No.4 1980年