

1995年阪神大震災によって生じた橋脚基礎から放射状に伸びる地盤亀裂の発生原因について

田蔵 隆 佐藤 正義 真野 英之
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

The Cause of Ground Fissures Radiated from the Footing of a Bridge Pier Generated by the 1995 Great Hanshin Earthquake

by Takashi Tazoh, Masayoshi Sato and Hideyuki Mano

Abstract

Ground fissures radiated from the footing of a bridge pier were found after the 1995 Great Hanshin Earthquake. The cause of the ground fissures are reported by Matsui et al. to have been generated by the movement of the pier toward the river (or sea) due to lateral spreading of the ground induced by soil liquefaction. It has been indicated that this lateral spreading of the ground intensified the damage to structures, so that the investigation of the mechanism that causes this severe damage is urgently needed. Consequently, this kind of ground fissures is being observed with keen interest. This paper clarified from simple experimental and numerical studies that the ground fissures appeared not by the force due to the spreading ground acting to the back of the footing of the bridge pier, but by movement toward the river (or sea) of the ground behind the riverbank (or sea-bank) caused by the collapse of the riverbank (or sea-bank).

概 要

1995年の阪神大震災による橋梁基礎の被害調査報告書において、被災した橋梁基礎の端部から地盤亀裂が放射状に伸びるように発生していたことが示されている。この放射状に伸びた地盤亀裂の発生原因に関して、簡単な土槽実験と数値解析から、それらは護岸の崩壊に伴う護岸背後地盤の前方移動によって生じたものであり、橋脚の背面から流動化した地盤が大きな力を伴って作用したために発生したものではないことを明らかにした。

§ 1. まえがき

1995年の阪神大震災による橋梁基礎の被害調査報告書¹⁾において、被災した橋梁基礎の端部から地盤亀裂が放射状に伸びるように発生していたことが示されている。その地盤亀裂の発生原因に関して、松井らは、液状化によって地盤が側方に流動し、それに伴う側方流動圧を受けて橋脚が水路側に移動したことによって生じたものだと考察している¹⁾。

阪神大震災では側方流動が構造物の被害を激化させた主たる要因として問題視されており、側方流動のどのような現象が被害を著しく大きくしたのか、その力学的メカニズムの解明が緊急の課題となっている。このような地盤亀裂が注目されるのは、その理由からである。

本報は、放射状に伸びた地盤亀裂の発生原因について、簡単な土槽実験と数値解析から、それらは護岸の崩壊に伴う護岸背後地盤の前方移動によって生じたものであり、橋脚の背面から流動化した地盤が

大きな力を伴って作用したために発生したものではないことを明らかにした。

§ 2. 基礎から放射状に伸びる地盤亀裂

図-1は、「西宮港大橋」の甲子園浜側の橋脚基礎の周辺地盤に見られた亀裂のスケッチと写真¹⁾である。護岸の背面には護岸に平行する亀裂が発生しており、さらに橋脚基礎の背面地盤には放射状に伸びた亀裂が確認できる。写真-1は、「西宮港大橋」の1995年の阪神大震災による落橋状況を撮ったものであり、放射状に伸びた地盤亀裂が写っている。

放射状に伸びた地盤亀裂は、1995年の阪神大震災によって被災した他の橋梁の周辺地盤でも確認されている。図-2および写真-2は、佐藤らが行った被災調査事例について示したものである²⁾。側方流動が発生し、川幅が19mであったものが14~15mに狭まっている。橋台の基礎杭(杭径 $\phi=500$ mm、肉

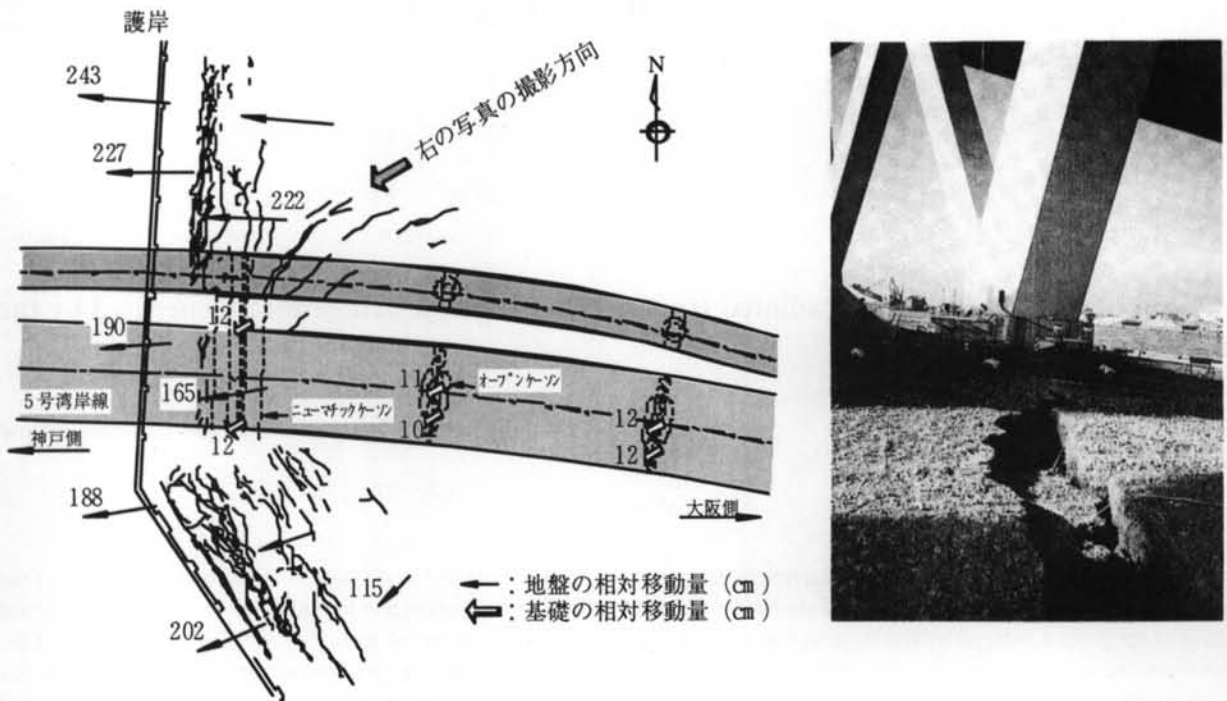


図-1 1995年阪神大震災における西宮港大橋の甲子園浜側橋脚の基礎周辺で見られた地盤亀裂
 (左の地盤亀裂図は基礎地盤コンサルタンツ(株)の久保田氏より提供されたものに加筆。右の写真は文献(1)からの引用)

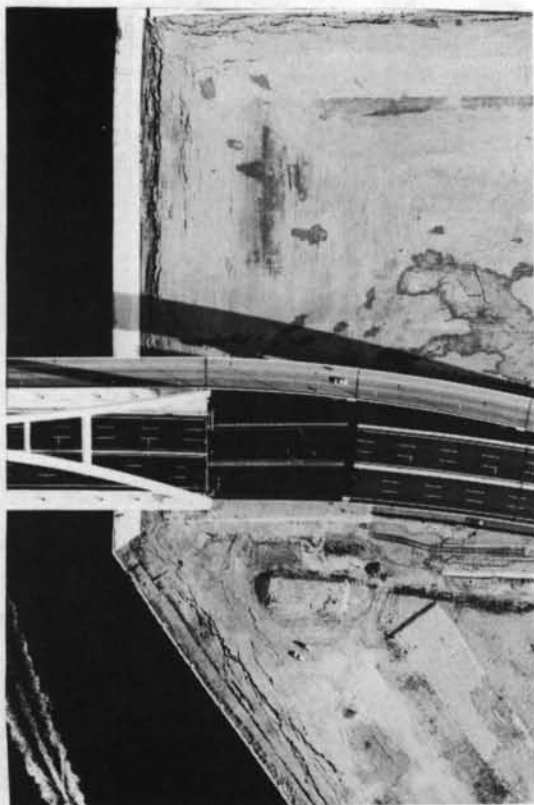


写真-1 1995年の阪神大震災における西宮港大橋の落橋被害と地盤亀裂
 (1995年1月21日アジア航測(株)撮影)

厚 $t=80\text{mm}$ 、杭長 $l=31\text{m}$ 、上杭：鋼管コンクリート杭、中杭および下杭：PC杭)は被災し、大きな残留曲げ変形が確認されている。

放射状に伸びた地盤亀裂は、佐藤らが行った遠心模型による側方流動実験でも明確に確認されている³⁾。図-3～4はその一例について示したものである。図-4の地表に見られた地盤亀裂図では「西宮港大橋」と同様、護岸背面には護岸に平行する亀裂が現れ、フーチングの端部からは放射状に伸びる地盤亀裂が発生している。

§ 3. 放射状に伸びた地盤亀裂発生原因究明のための土槽実験

基礎の端部から放射状に伸びた地盤亀裂の発生原因究明のために、きわめて簡単な土槽実験を行った。図-5は、土槽実験モデルについて示したものである。土槽の内部寸法は、 90cm (長さ)× 30cm (幅)× 30cm (高さ)であり、中央から少しずれた位置に8本杭の杭基礎模型を、下端を完全に固定して設置した。矢板式護岸を模擬したプラスチック板を、土槽の片方の端部から 24cm の位置に設けた。地盤は湿潤状態の8号珪砂で作成した。実験は、護岸の前面移動に伴う地盤崩壊を模擬することを目的に、以下のようにして行った。

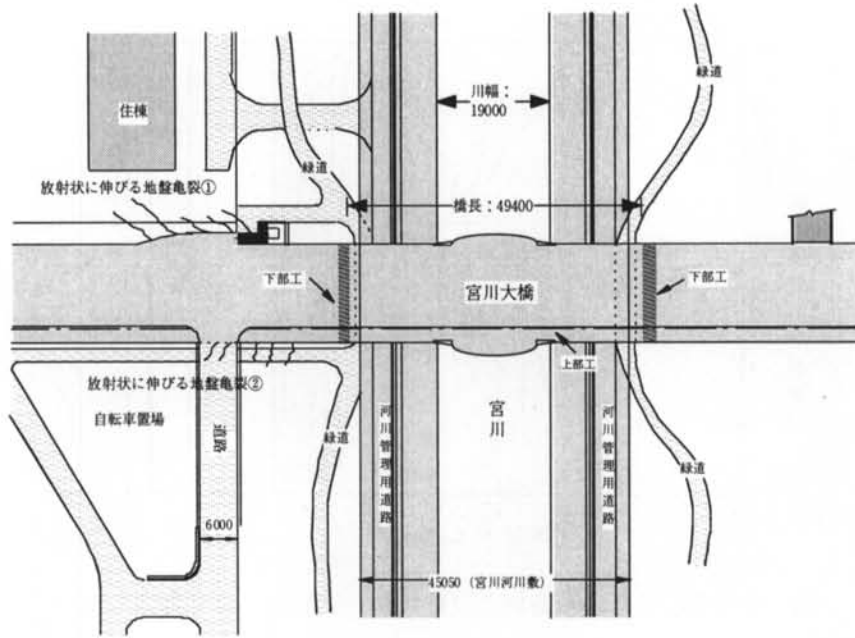


図-2 1995年の阪神大震災で被災した橋脚周辺の放射状に伸びる地盤亀裂²⁾



(図2における①の位置)



(図2における②の位置)

写真-2 被災した橋脚周辺の放射状に伸びる地盤亀裂²⁾

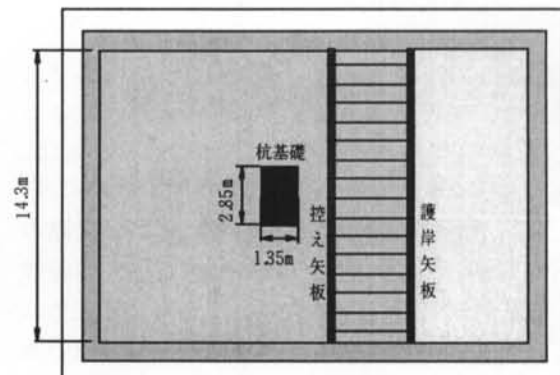
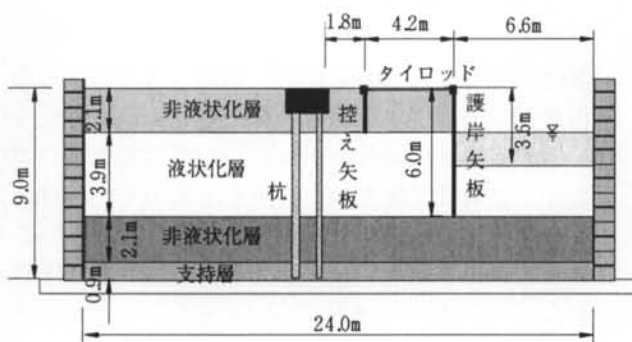


図-3 せん断土槽を用いた遠心模型による側方流動実験モデル³⁾

(図中の寸法は、遠心加速度 300m/s^2 により換算した値)

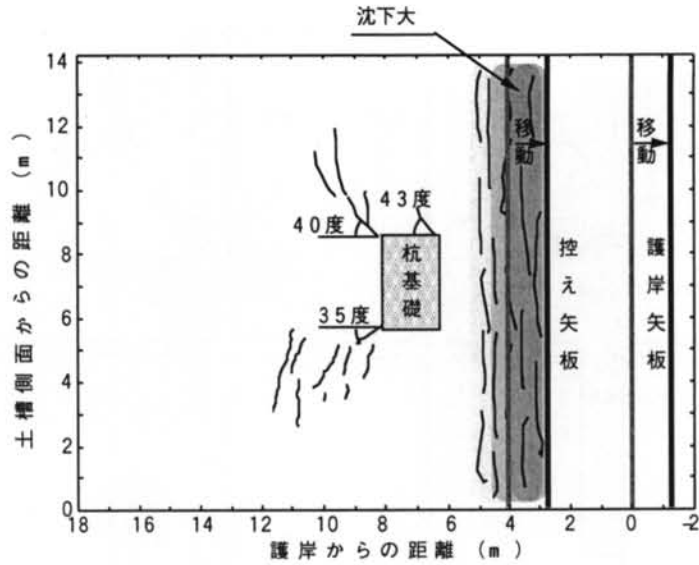


図-4 遠心模型による側方流動実験（実験後の地盤亀裂）³⁾

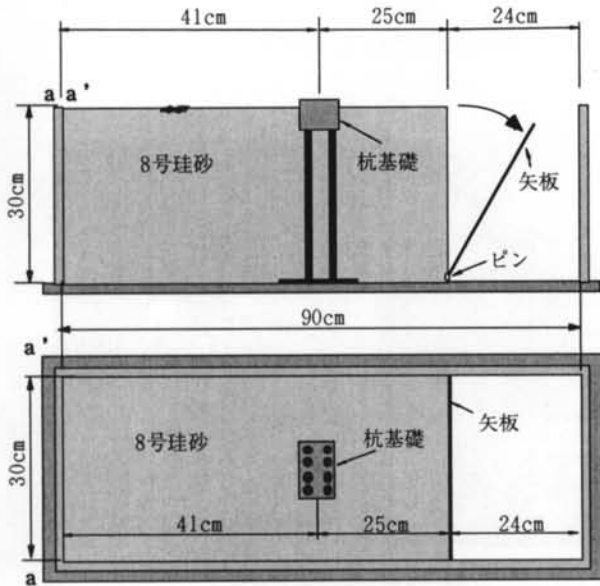


図-5 放射状に伸びる地盤亀裂の原因究明のための土槽実験モデル

土槽の端部（図中の a と a'）をクレーンで吊り上げた状態で、矢板を前面にお辞儀をするようにゆっくりと傾斜させた。これに伴い、矢板背面の地盤は、引っ張り亀裂を発生させ、部分崩壊しながら前方に移動した。その移動量が顕著になるに従い、基礎の背面の端部から放射方向に伸びる地盤亀裂が明瞭に現れ、最終的に写真-3 に示すような亀裂の発生状態となった。ここで留意すべき点は、矢板背面の地盤が崩壊し前方に移動しただけで、杭基礎の背面地盤はまったく動いていないことである。

写真-4 および写真-5 は、地盤の作成方法を変えて、同様の実験をさらに 2 回行った結果である。い

ずれの場合も基礎の背面の端部から地盤亀裂が放射状に発生していることが確認できる。

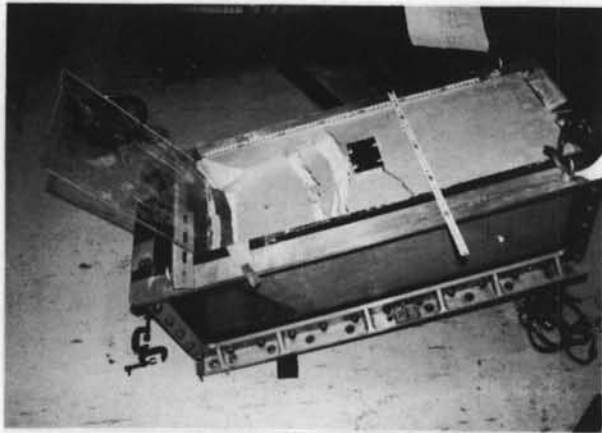
この実験は、矢板護岸の崩壊に伴う背面地盤の移動を模擬したものである。地震動により液状化が発生し、矢板護岸が崩壊した場合も、背面地盤の前方への移動は概ね同様の状態で生じるものと考えられる。つまり、基礎の端部から放射状に伸びた地盤亀裂は、矢板護岸背面の地盤が、川あるいは海の方に移動することによって発生したものである。地盤と杭基礎の相対変位という観点からこの結果を考察すると、杭基礎の変位に比べて護岸の背面地盤の移動量が非常に大きい場合、同様の現象が発生すると言える。

§ 4. 放射状に伸びた地盤亀裂の発生要因究明のための数値解析

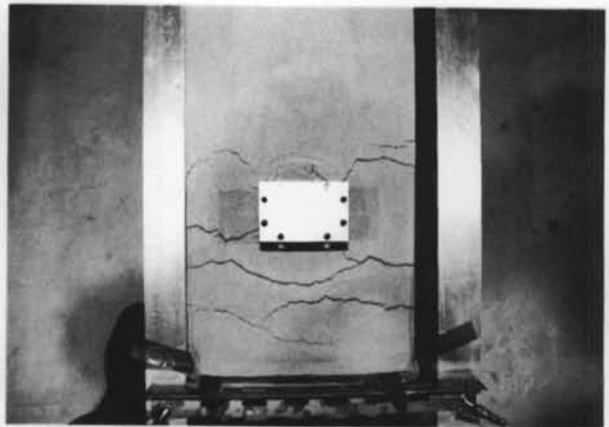
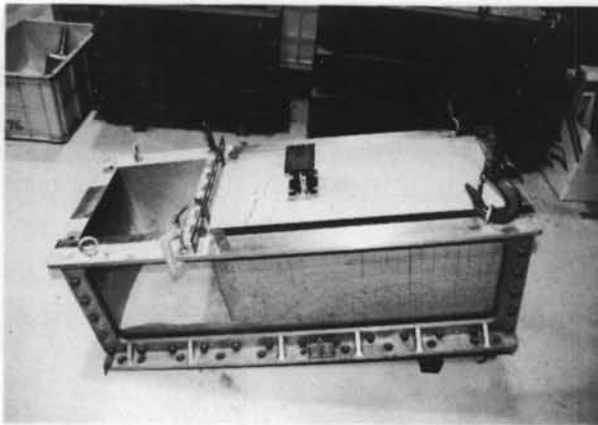
基礎の端部から地盤亀裂が放射状に入る力学的な理由を明らかにするために、2次元 FEM 解析を行った。図-6 は解析モデルについて示したものであるが、これは基礎と地盤の系を上から見た状態を想定している。

モデルの中央にある塗りつぶされた四角形は基礎に対応している。一端を完全固定とし、他端は自由端として、自由端を静的に引っ張った場合と押し込んだ場合の解析から、基礎周辺の主応力状態の変化について考察することが本解析の目的である。

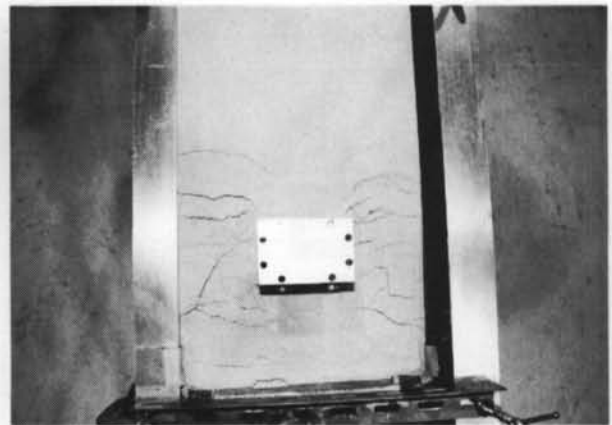
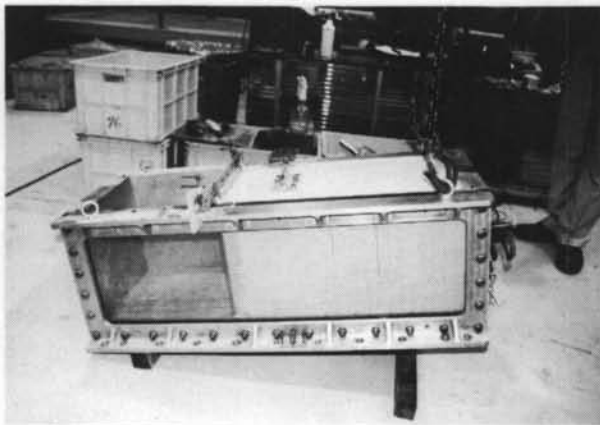
自由端を引っ張った場合は、護岸が崩壊し、護岸



写真一 放射状に伸びる地盤亀裂の原因究明のための土槽実験結果 (1回目)



写真二 放射状に伸びる地盤亀裂の原因究明のための土槽実験結果 (2回目)



写真三 放射状に伸びる地盤亀裂の原因究明のための土槽実験結果 (3回目)

背面の地盤が前方に移動した場合を模擬するものである。一方、自由端を押し込んだ場合は、護岸崩壊はせず、構造物の背面から流動化した地盤が流れてきて、基礎を押し、それによって基礎が被災する場合を模擬しようとしたものである。

基礎は固定部からばねで支持されている。これは基礎杭のばねによる弾性支持の効果を得るために挿入したものである。

解析定数を以下に列挙するが、これはあくまでも現象把握のために設定したもので、工学的な意味はない。

地盤： $E_g = 20\text{kN/m}^2$ 、 $\nu_g = 0.25$

基礎： $E_f = 200\text{kN/m}^2$ 、 $\nu_f = 0.25$

ばね： $k = 2000\text{kN/m}$

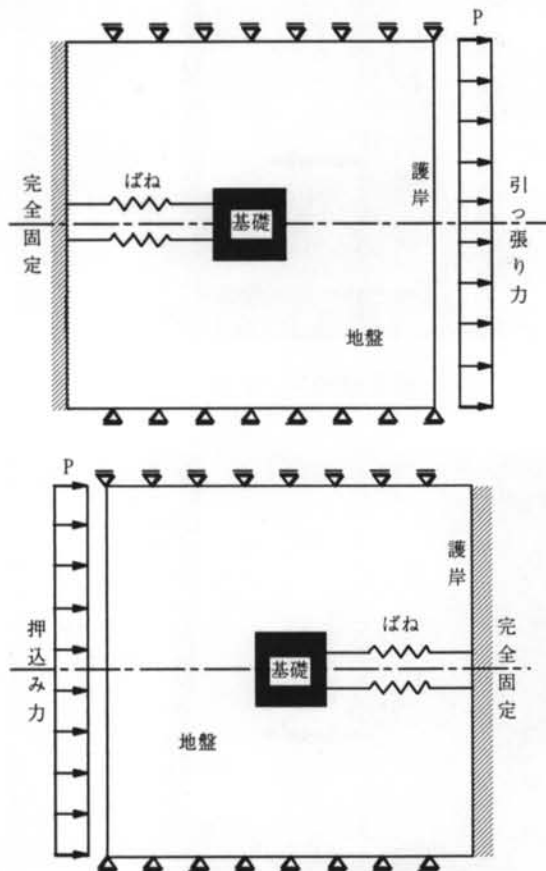
荷重： $p = 10\text{kN/m}$

地盤：長さ $L = 10\text{m}$ 、幅 $W = 10\text{m}$ 、

奥行き方向解析幅 $t = 1\text{m}$

平面ひずみ状態を仮定

図一7～8は解析結果（対称条件により、半分の解析領域のモデルで行った）について示したものである。荷重は分布荷重として自由端を一様に引っ



図一6 放射状に伸びる地盤亀裂の原因究明のためのFEM解析モデル図

張った場合と、一様に押した場合の2ケースである。図一7～8の上段および下段の図は、それぞれ引っ張った場合、および押し込んだ場合の変形図と主応力図である。

護岸の背面地盤の主応力状態は、引っ張った場合、護岸に垂直な状態で引っ張り力が発生しており、これによって護岸に平行な地盤亀裂が発生する。さらに、基礎の後方端部の主応力状態は、放射方向に亀裂が生じるような引っ張りの状態になっており、この応力状態が放射方向に伸びる地盤亀裂を発生させると考えられる。

一方、押し込んだ場合は、基礎の背面は圧縮状態となっている。つまり、側方流動が発生して、流動した地盤が基礎の背面に作用した場合、基礎がそれに抵抗することによって背面地盤は圧縮状態となり、そのオーダーが著しいと背面地盤は盛り上がった状態になると考えられる。

護岸付近の構造物で、阪神大震災の際に被災した構造物の被災事例を図一9～11に示す。図一9は芦屋市の11階建て共同住宅の被災事例⁴⁾、図一10は神戸商船大学の3階建て建物「海技実習センター」の被災事例⁵⁾、図一11は阪神高速道路5号湾岸線の新夙川橋「P134橋脚」の被災事例⁶⁾である。

図一9および図一10の被害事例では、被災建物の背面で土の盛り上がりは見られない。図一10の事例の場合は、空隙ができており（写真一6参照）、流動化した地盤が建物の背面から作用したとは考え難い。図一11の被災事例では橋脚の前後面で60cmと30cmの土の盛り上がりが見られるが、これは橋脚の背面にある盛土の沈下に伴って発生したものと考えられる。

側方流動によると考えられる土の盛り上がりは明確に確認できた事例として、1987年ニュージーランドで発生したエッジカム地震 ($M_L = 6.3$) によるランディングロード橋の橋脚の被災事例⁷⁾が報告されている。

被災した基礎周辺の背面地盤が顕著に盛り上がるといった事例は少ないようである。このことから流動した地盤が基礎の背面から外力として作用したと考えるのではなく、護岸が前面に大きく移動したり傾斜したことにより、基礎の前面の地盤反力が期待できなくなり、そのために基礎に被害が発生したと考えるのが妥当のように思われる。

§5. 放射状の亀裂が発生しない場合

地盤亀裂が橋脚の振動によって生じる場合は、こ

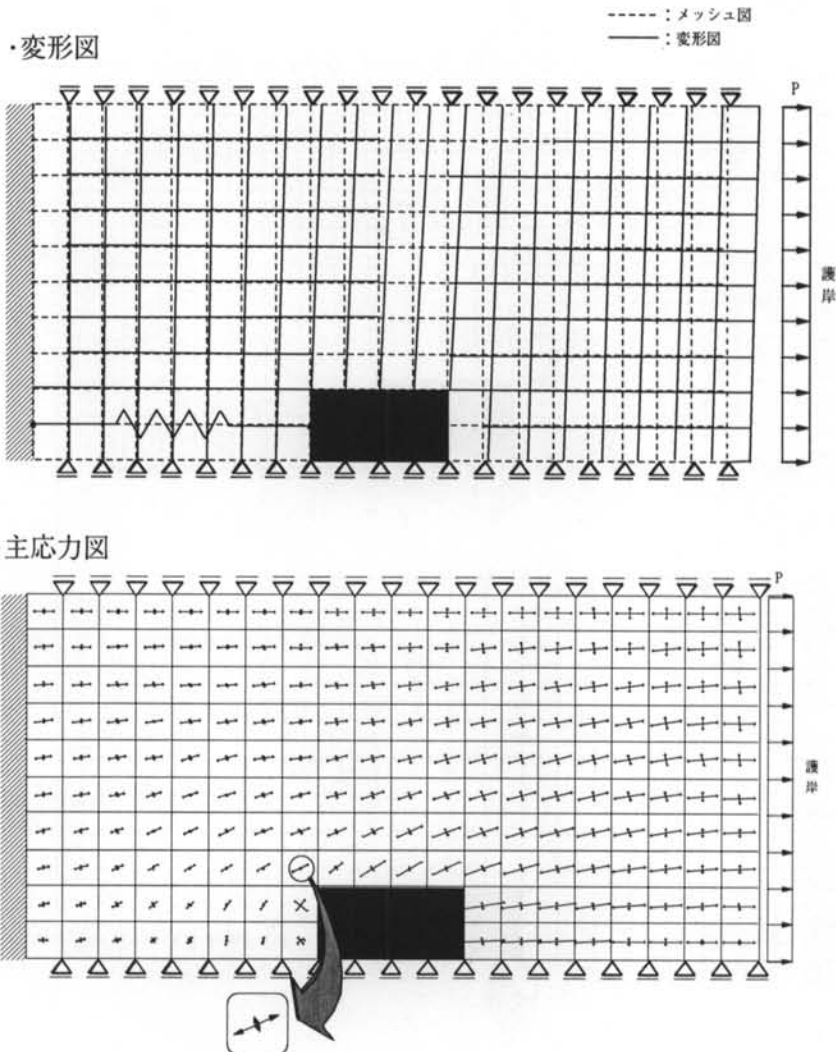


図-7 放射状に伸びる地盤亀裂の原因究明のためのFEM解析(引っ張り)

のような地盤亀裂ではなく、橋脚基礎の周囲を囲むような状態で亀裂が発生すると考えられる。

図-12はそのことが明瞭に現れた一例で、魚崎浜の「阪神高速道路5号湾岸線」の「P216橋脚」基礎において見られた地盤亀裂のスケッチ⁸⁾である。

護岸に平行な亀裂は、護岸背面地盤の前面移動に伴う亀裂である。基礎の周囲を囲む亀裂は、上述したように、橋脚の振動特性と地盤の振動特性の違いによって生じた亀裂と考えられる。

この事例で、基礎の端部から放射状に伸びる亀裂が発生していない理由としては、基礎の周囲を囲む亀裂が地震の主要動時に入り、地震の主要動が終わって側方流動が生じた時点で、基礎の端部から放射状に伸びる亀裂が入ろうとしたが、基礎の周囲を囲む亀裂がその緩衝材となって、放射状に入る亀裂が生じさせなかったのではないかと推察される。

このことを確認する目的で、§3.で示した土槽実験で、あらかじめ杭基礎を振動させて基礎の周りに地盤亀裂を生じさせておき、その後これまでと同様に土槽を少し傾け、矢板式護岸を前方に静かに傾斜させた結果が写真-7である。土槽を傾ける前と後で地盤亀裂の進展はなく、前の実験で見られたような放射状の亀裂はこの場合発生せず、予想どおりの結果となった。

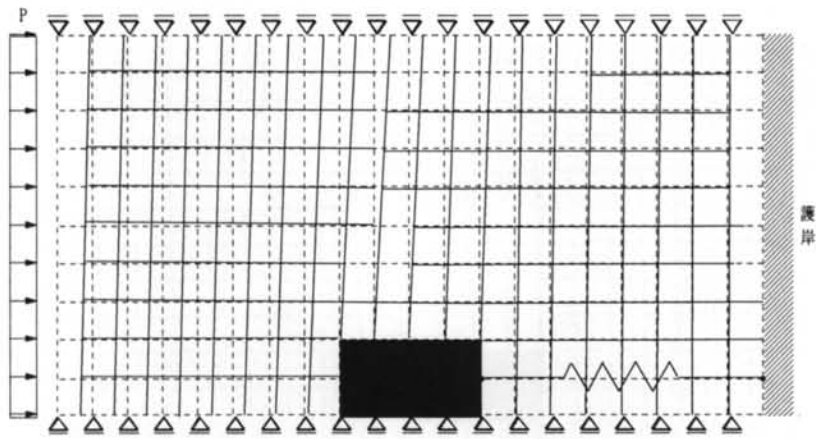
§6. まとめ

本研究の結論をまとめると、以下のように書ける。

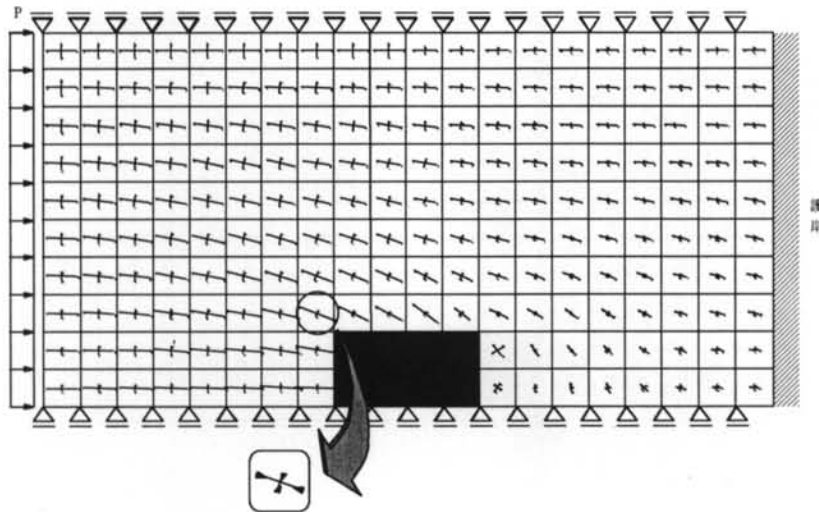
- (1) 基礎の端部から放射状に伸びる地盤亀裂は、護岸の背面地盤(建物の前面地盤)が前方に大きく移動したために生じたものであり、橋

・変形図

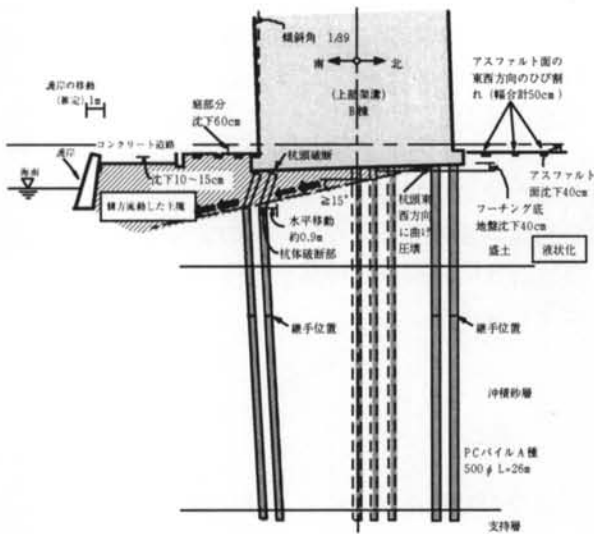
----- : メッシュ図
 —— : 変形図



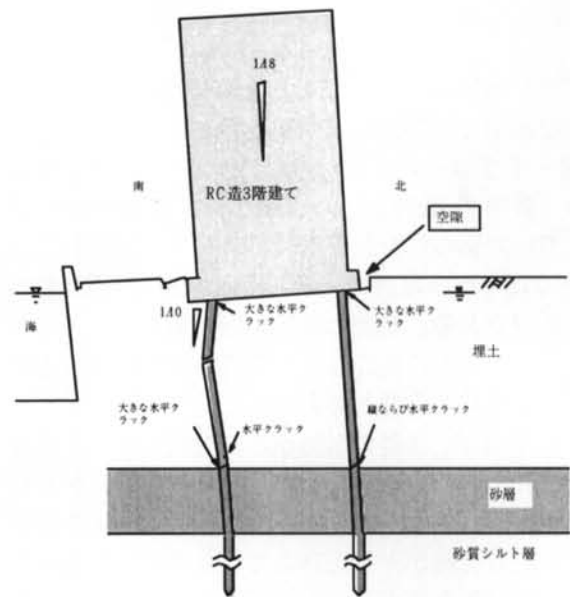
・主応力図



図一八 放射状に伸びる地盤亀裂の原因究明のためのFEM解析(押し込み)



図一九 芦屋市の11階建て共同住宅の被災事例⁴⁾



図一〇 神戸商船大学の3階建て「海技実習センター」被災事例(文献5に加筆)

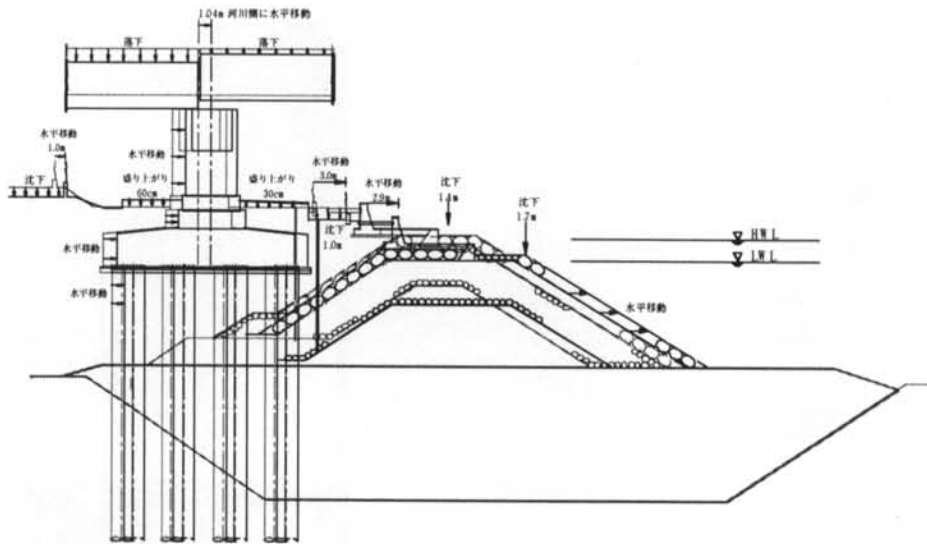


図-11 阪神高速道路5号湾岸線新夙橋「P134橋脚」基礎および地盤の被災事例⁶⁾



写真-6 神戸商船大学の3階建て「海技実習センター」被災状況
(東京大学 若松加寿江氏より提供)

脚の振動や、地盤の側方流動に伴う流動圧が橋脚の背後から作用したために生じたものではない。

- (2) 基礎の端部から放射状に伸びる地盤亀裂はせん断亀裂ではなく、引っ張り亀裂である。
- (3) 基礎の端部から放射状に伸びる地盤亀裂が発生していて、しかも基礎が被災していた場合

は、基礎の前面地盤の破壊に伴う水平支持力の低下が、被災の主因と考えられる。

- (4) このような条件下での基礎の被害防止対策としては、護岸の崩壊の防止、護岸背面地盤の強化、護岸背面地盤の前方移動の防止、基礎の強化(地盤の水平支持力の低下を見込んだ設計)といったことが挙げられる。

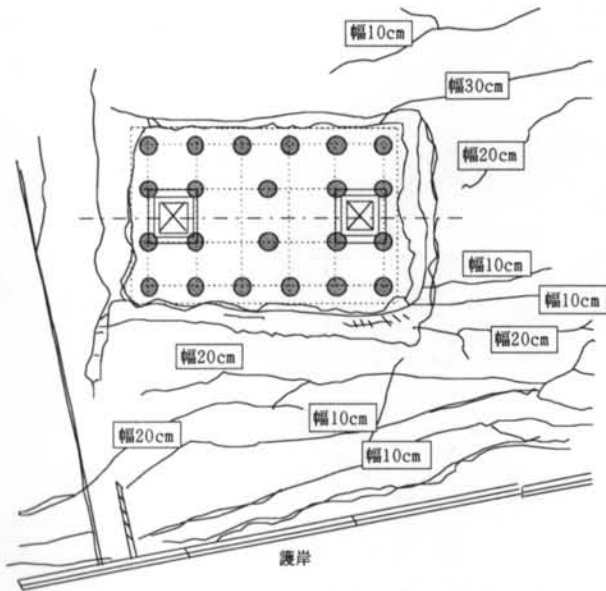


図-12 魚崎浜の阪神高速道路5号湾岸線の「P216橋脚」の基礎周辺の地盤亀裂（基礎地盤コンサルタンツ(株)の久保田氏より提供）

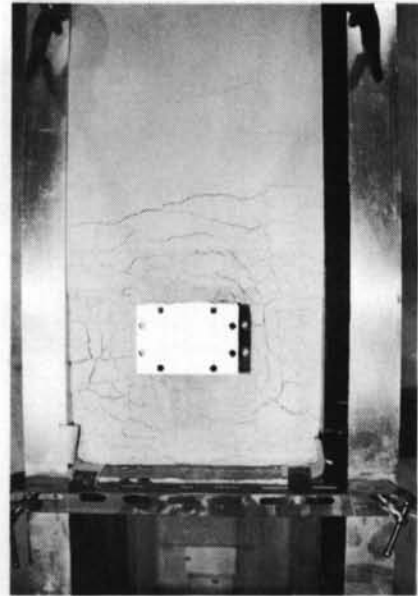


写真-7 あらかじめ基礎周辺に地盤に振動亀裂を発生させておき、その後土槽を傾斜させ、矢板式護岸を傾斜させて放射状亀裂が発生するかどうかを検討したもの（土槽を傾ける前と後で、地盤亀裂の進展は見られなかった）

液状化に伴う地盤の側方流動が懸念される地点での道路橋の耐震設計法として、建設地点が護岸近傍であっても、側方流動圧を構造物の背面から作用させる方法が採られているが、本研究はその設計法が実際の現象とは異なることを指摘したことになる。護岸近傍の構造物に対する有効な耐震設計法の策定と同時に、既設の構造物の耐震対策法について今後一層の研究が必要であろう。

謝辞

本研究は、阪神高速道路公団主催の「埋立地盤における橋梁基礎構造物の地震時挙動に関する研究会」において、阪神高速道路公団の南荘淳設計課長、幸

左賢二調査役、安田扶律専門役、ならびに藤井康男技術係長らとの議論がきっかけで行ったものである。四氏はじめ、研究会の関係各位に厚く御礼申し上げる次第である。

また、基礎地盤コンサルタンツ(株)の久保田耕司課長と東京大学生産技術研究所の若松加寿江研究員からは、本研究を行う上で重要な資料である地盤亀裂図ならびに被災写真の提供を受けた。ここに記して深謝の意を表す次第である。

さらに、当社土木本部設計第一部の木全宏之主査には、本報告を詳細に読んでいただき貴重なコメントを賜った。記して謝意を表す次第である。

<参考文献>

- 1) “土木学会阪神大震災 震災調査 第二次報告資料”，土木学会，1995.3.
- 2) 佐藤正義，淵本正樹：“兵庫県南部地震による宮川大橋被災調査報告書”，清水建設技術研究所報告，1995.3.
- 3) 佐藤正義，吉成勝美：“地盤流動が護岸背後地盤の杭基礎に及ぼす影響に関する遠心振動実験報告書”，清水建設技術研究所報告1998.5.
- 4) 中澤明夫，蘇鉄盛史，難波伸介，中澤瑤子：“兵庫県南部地震による建物杭基礎の被害調査報告（芦屋市の場合）”，日本建築学会技術調査報告集，第3号，1996.12.
- 5) 時松孝司，大岡弘，社本康広，浅香美治：“兵庫県南部地震の側方流動による杭の破壊・変形モード”，日本建築学会構造系論文集第495号，1997.5.
- 6) 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター：“埋立地盤の橋梁基礎構造物に関する震災調査研究”，1996.12.
- 7) “液状化対策実証調査報告”，通商産業省 資源エネルギー庁，電力土木技術協会，1998.3.