

# 構造物基礎被害

調査メンバー：松井 保（大阪大学工学部教授：土質基礎工学）  
小田和広（大阪大学工学部助手：土質基礎工学）

## 1. 調査の目的

兵庫県南部地震は、高度に発達した近代都市直下において発生した最大規模の都市直下型の大地震である。この地震の特徴は、土木学会阪神大震災第1次および第2次調査団等の報告にもあるように、短時間に集中してこれまでの予想を上回る激しい横揺れと縦揺れが生じたことである。このため、土木構造物に限ってみても、高速道路、鉄道、港湾施設等をはじめとする社会基盤に大きなダメージを与える結果となった。

一般に、構造物は地盤に支えられているが、土木構造物はそのほとんどが重量構造物であるため、上部構造物を支える基礎構造物は重要な役割を担っている。したがって、健全な構造物とは上部構造物のみならず下部構造としての基礎を含むものでなければならない。また、今回のような最大規模の直下型地震では、上部構造と下部構造が一体となった構造物全体としての地震時挙動の解明が重要な視点になると思われる。

今回の地震による構造物被害において、直接視認できる損傷のほとんどは上部構造において発生している。しかし、直接視認できない基礎構造にも、場合によっては損傷があり、上部構造の損傷の原因になっていることは大いに考えられる。本調査は、上記の視点から地盤中の構造物基礎に焦点を当てて、構造物基礎の周辺地盤の被害、すなわち地盤の液状化現象や側方流動現象などとの関連も含めて、構造物基礎の被害実態を把握するとともに、地盤工学的見地から推定される構造物の損傷原因を明らかにすることによって、今後の詳細調査の一助とすることを目的としている。なお、今回の調査では、時間および地域的な制約から、地盤工学的に問題も多く、構造物基礎にとっても厳しい条件下におかれるであろう埋立地の水際線構造物（道路橋）にのみ調査対象を絞った。

## 2. 調査対象

今回調査を行った橋梁は以下の通りである。

阪神高速道路湾岸線：A. 西宮港大橋、B. 新夙川橋、C. 新芦屋川橋、D. 東神戸大橋、E. 六甲アイランド大橋

人工島の連絡道路：F. 六甲大橋、G. 神戸大橋

ハーバーハイウェイ：H. 摩耶大橋、第二摩耶大橋、I. 灘浜大橋

さらに、上記橋梁に接続している高架橋についても同時に調査を行った。図-1は、今

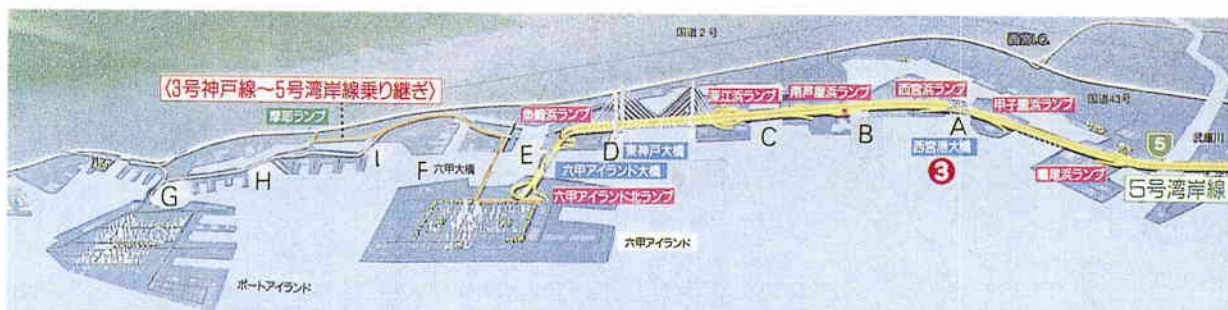


図-1 調査対象の橋梁の架設地点

回調査を行った橋梁の架設地点を示している。いずれの橋梁も埋立地の間に存在する水路を跨いでおり、水際線構造物である。

### 3. 水際線構造物に関する被害状況と損傷原因

表-1は、今回調査を行った各橋梁および被害状況の一覧を示している。同時に、周辺地盤の液状化の状況、護岸から橋脚までの距離および護岸の被害状況も示している。表-1より、橋桁に関する被害は、支承部分に集中していることがわかる。橋桁は、橋軸方向にのみ移動するのではなく、橋軸直角方向にも移動しているものもあった。また、その原因となる橋脚の水平移動、沈下および傾斜が目視でも確認できるものもあった。さらに、被害は水路を跨ぐ高架橋、すなわち水際線構造物に集中しており、それよりさらに陸側に位置する高架橋では入出路部分を除き、大きな被害がほとんど認められなかった。また、橋脚が海中に設置されている場合にもほとんど被害が認められなかった。

図-2は、水際線に位置する構造物基礎の一般的な被害状況を模式図として示している。図-2 a) に示すように、構造物基礎の位置する埋立地では、ほとんどの護岸が海側に移動するとともに沈下している。護岸の崩壊のため、護岸背面の地盤に著しい変状が生じ、時には陥没が生じている。地盤変状は、一般に、護岸から30m~40m程度の範囲で、時には70~80m程度の陸域にまでおよんでおり、ほとんどの場合、護岸に平行に伸びるひび割れの存在が確認された。また、液状化現象によるものと考えられる噴砂の痕跡は、内陸域において大規模な痕跡が確認される場合が多かったが、護岸近傍の地表ではほとんど確認されなかった。しかし、このことは護岸の崩壊が液状化現象によらないことを必ずしも意味しない。この点については、今後、地盤中あるいは海底における確認が必要であろう。

一方、構造物が護岸から20~30mしか離れていない場合、図-2 b) に示すように、構造物付近の護岸は、他の部分の護岸に比べ、水路側への移動量が小さくなっていった。これは、構造物基礎によって地盤が水路側へ移動することが妨げられたためであると考えられる。このことは、基礎構造から見れば、構造物基礎は地盤から側方流動圧を受けたことになり、地震時の構造物基礎の変形にとってより厳しい条件下におかれたことを意味している。このような条件下におかれた杭基礎は、地震時に側方流動を受ける杭、すなわち「地震時受働杭」と呼ばれることがある（土質工学会編：地盤の側方流動、第4章、参照）。

以上の被害状況に基づいて、今回調査を行った構造物基礎に水平移動、沈下、傾斜などの変状

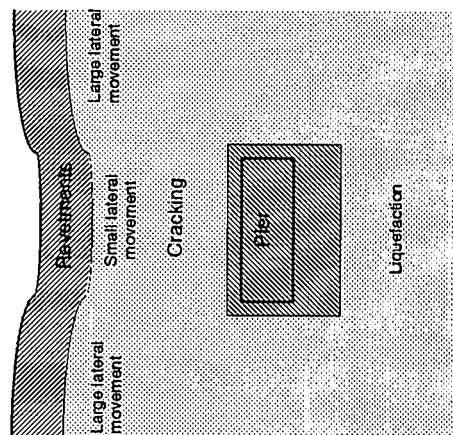
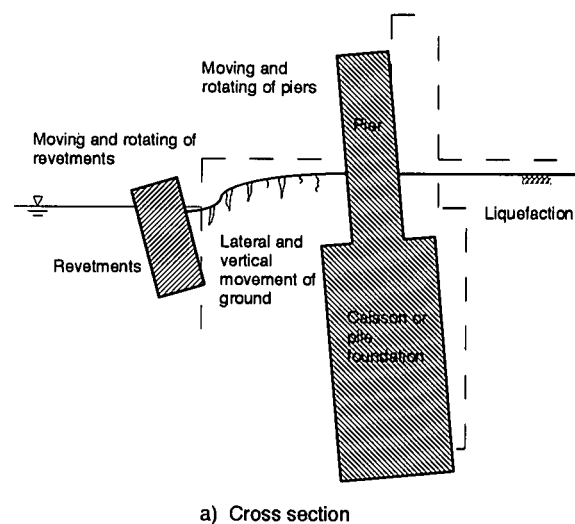


図-2 水際線に位置する構造物基礎の一般的な被害状況

表-1 調査対象橋梁および被害状況の一覧

調査地点	被害状況	周辺地盤の液状化	護岸から橋脚までの距離	周辺護岸の崩壊
A. 西宮港大橋 (甲子園浜)	端部に連結する桁の落下	△	△	△
A. 西宮港大橋 (西宮浜)	支承の破損	○	△	△
B. 新夙川橋 (西宮浜)	支承の破損, 橋脚の傾斜	△	○	△
B. 新夙川橋 (芦屋浜)	支承の破損	△	○	△
C. 新芦屋川橋 (芦屋浜)	支承の破損, 橋脚の傾斜	○	×	△
C. 新芦屋川橋 (深江浜)		△	海中	○
D. 東神戸大橋 (深江浜)		△	○	○
D. 東神戸大橋 (魚崎浜)	支承の破損	○	海中	○
E. 六甲アイランド大橋背後の高架橋 (魚崎浜)	支承の破損	△	○	△
E. 六甲アイランド大橋背後の高架橋 (六甲アイランド)	支承の破損	△	○	○
F. 六甲大橋背後の六甲ライナー高架橋 (六甲アイランド)	桁の落下, 橋脚の傾斜	○	○	○
G. 神戸大橋 (神戸港)	支承の移動, 破損	×	○	○
G. 神戸大橋背後の高架橋 (神戸港)	支承の破損	○	×	-
G. 神戸大橋 (ポートアイランド)	橋脚の破損, 沈下, 傾斜	○	○	○
H. 摩耶大橋 (小野浜)	支承の破損, 桁の傾斜・移動	△	○	○
H. 第二摩耶大橋 (小野浜)	橋脚の破損	△	○	○
H. 摩耶大橋 (摩耶埠頭)	支承の破損, 桁の傾斜・移動	○	○	○
H. 第二摩耶大橋 (摩耶埠頭)	橋脚の破損および移動	○	○	○
H. 第二摩耶大橋背後の高架橋 (摩耶埠頭)	橋脚の橋軸直角方向への移動	○	○	○
I. 灘浜大橋 (摩耶埠頭)	端部における桁の移動, 連結の破損	○	海中	○
I. 灘浜大橋 (灘浜側)	端部における桁の移動	○	海中	○

- ※1. 周辺地盤の液状化: ○→地盤の沈下, ひび割れ, 噴砂の痕跡が顕著, △→噴砂の痕跡がある, ×→認められない  
 2. 護岸から橋脚までの距離: ○→護岸近傍, △→護岸から30~40mの範囲, ×→護岸から40m以上, 海中→海中に位置している  
 3. 周辺護岸の崩壊: ○→護岸の移動および背面の陥没が顕著, △→護岸の移動のみ



を起こさせ、ひいては水際線構造物に損傷を与える原因を地盤工学的見地から総合的に推定すれば、以下のように分類できる。

- ① 液状化現象と側方流動現象（護岸の崩壊による）との相乗作用
- ② 側方流動現象のみ
- ③ その他

液状化現象によっては、構造物基礎の水平抵抗力が低下するとともに、周辺地盤の沈下によって鉛直支持力の低下が生じることが考えられる。一方、側方流動現象によっては、大規模な場合には側方流動圧が、比較的小規模な場合には偏土圧が構造物基礎に作用し、いずれも構造物基礎の水平方向変形を増大させることになる。また、その他の原因としては、基礎の形状および下部構造と上部構造との構造物全体としての3次元挙動などが考えられよう。



写真－1 西宮港大橋の甲子園浜側における桁の落下現場



写真－2 橋脚の前面の護岸の状況

#### 4. 被害の具体例

ここでは、特に変状が顕著であった水際線構造物の被害状況を2, 3の被害例として具体的に示すことにする。

##### 4. 1 西宮港大橋

写真－1は西宮港大橋の甲子園浜側における桁の落下現場を示している。西宮港大橋に連続する本線の桁が、西宮大橋との接続部分において落下している。写真－2および3は橋脚の前面の護岸の状況および周辺護岸の変状をそれぞれ示している。橋脚前面の護岸の位置と比較して周辺の護岸が水路側により大きく移動している。すなわち、護岸は橋軸の直下を中心として全体的に凹型に変状し（写真－3、図－2参照）、そのへこみ量は70~80cm程度である。

図－3は西宮港大橋の橋脚の位置している周辺の



写真－3 周辺護岸の変状

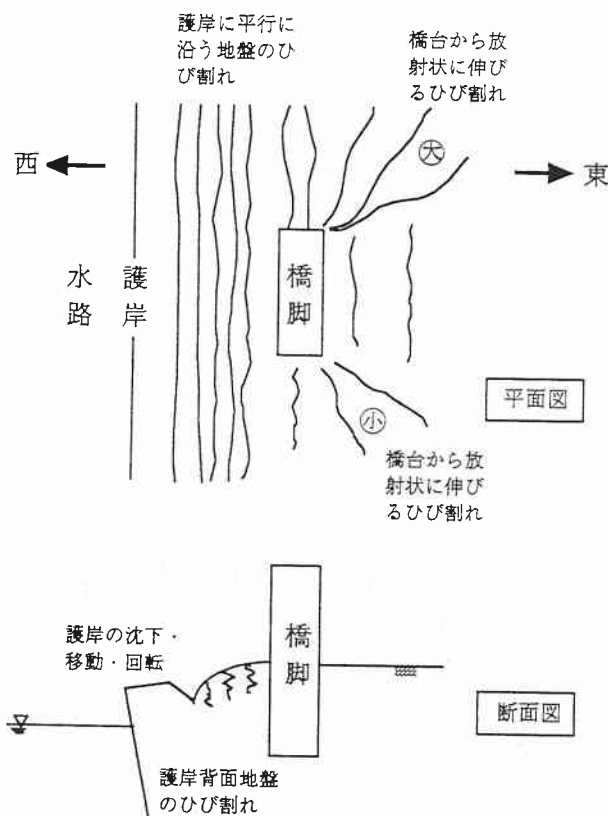
地盤状況を示している。橋脚は護岸から約 23m 離れた地点に位置している。橋脚と護岸との間には、護岸に平行に無数のひび割れが生じており、ひび割れ幅が 50cm 程度に達しているものもある。また、陸側の地盤では、橋脚から放射状に伸びる無数のひび割れが存在し、最も広い部分の幅が約 1m、長さが 50m 以上に達するものもあった（写真－4）。ただし、地表面での液状化の痕跡は大規模なものではなかった。図－3 に示すような橋脚から放射状に伸びるひび割れは、橋脚が内陸方向（東、大阪方向）に移動する場合、もしくは、地盤が水路側（西、神戸側）に移動する場合に生じる。桁が落下したことを考え合せると後者の可能性が高いと考えられる。

#### 4. 2 新夙川橋（西宮浜）

写真－5 は新夙川橋の西宮浜側の橋脚を示している。写真の左側に水路が位置している。橋脚は水路に向かって傾いているのが分かる。写真－6 は橋梁端とそれに連続する桁との連結部分を示している。連続する桁は橋脚の上にかろうじて載っており、落橋を免れている。また、支障は破損し、桁間に段差がついている。写真－7 は、護岸と橋脚の間の地盤の状況を示している。橋脚前面の地盤が水路方向に滑動し、陥没している。この周辺地盤には顕著な噴砂は認められなかった。したがって、橋脚の傾斜は、護岸の崩壊に伴う橋脚前面地盤の滑動により、基礎の水路方向への移動に対する抵抗力が減少したことと共に、地盤全体の水路側への移動による側方流動圧によると考えられる。

#### 4. 3 神戸大橋およびそのアプローチ高架橋（神戸港・第四突堤）

写真－8 は神戸大橋の神戸側の支承を示している。橋台が 60cm 程度水路側に移動している。本橋の橋台部分を除き、突堤突端の護岸は水路側に 1.5~2.0m 移動するとともに



写真－4 橋脚から放射状に伸びるひび割れ

図－3 西宮港大橋の橋脚周辺の地盤状況



1～1.5m程度沈下し（写真－9），橋台背面は広範囲にわた1～2m程度陥没している（写真－10）。したがって，突堤突端部の崩壊にともなう側方流動圧により，橋台が移動したものと考えられるが，シユの移動量にはポートアイランド側橋台の移動によるものも含まれていると思われる。ただし，橋台周辺において噴砂の痕跡は認められなかった。

写真－11は，神戸大橋へのアプローチ高架橋の橋脚を示している。桁を支持する梁を支えている橋脚のうち，右側の橋脚が沈下するとともに，傾斜している。また，橋脚の根元付近に液状化による噴砂の痕跡が認められた。このアプローチ高架橋はほとんどの橋脚が沈下しており，地盤の液状化により基礎の鉛直支持力が減少したためと思われるが，橋脚沈下のメカニズムは今後の課題であろう。

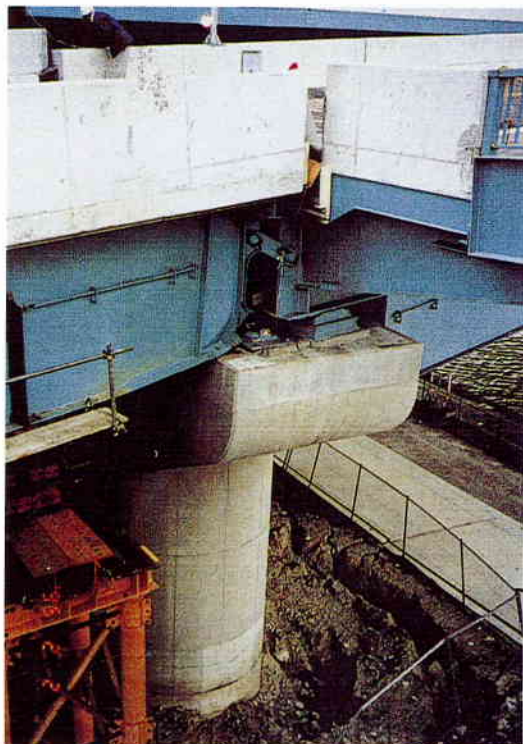
#### 4. 4 第二摩耶大橋およびそれに連結する高架橋

摩耶埠頭西側突堤には中央部分に摩耶大橋とそのアプローチが位置し，それよりも北側（陸側）には緑地帯が，南側（海側）には，第二摩耶大橋とそのアプローチ高架橋が位置している。写真－12は突堤の南側の根元から突端を望んでいる。突堤の護岸が海側に移動しており，崩壊しているものもある（写真－13）。そのため，第二摩耶大橋に連結するアプローチ高架橋の基礎（フーチング）がむき出しとなり，杭頭付近まで地盤がえぐれているものもあった（写真－14）。

突堤の先端に位置している第二摩耶大橋を支えるRC製の橋脚は大きな損傷を受けている（写真－13）。また，第二摩耶大橋に連続する突堤上のアプローチ高架橋は，橋脚の位置と比較して陸側（北）に移動して



写真－5 新夙川橋の西宮浜側の橋脚



写真－6 橋梁端とそれに連続する桁との連結部分



写真－7 護岸と橋脚の間の地盤状況



いた。これは、地震動によって桁自身が陸側に移動したか、もしくは突堤南側護岸の崩壊により基礎に側方流動圧が作用し、基礎が海側（南）に移動したことが考えられる。

## 5. まとめと課題

本調査では、埋立地に位置している水際線構造物基礎を対象とし、その被害について構造物基礎の周辺地盤との関連も含め調査・検討を行った。その結果、いくつかの橋脚では、目視による観察だけでも水平方向移動、沈下および傾斜が生じていることが明らかに認められた。これらの構造物基礎は、何らかの被害を受けていることが想定される。このような被害を生じさせた原因を地盤工学的見地から総合的に推定した結果、地盤の液状化現象と側方流動現象が大きな役割を果たしているとは結論できる。

最後に、今回の調査に基づいて考えられる2、3の技術的課題について要約する。



写真－8 神戸大橋の神戸側の支承



写真－10 神戸大橋（神戸側）橋台背面地盤の変状



写真－9 突堤突端の護岸の変状



写真－11 神戸大橋に連続する高架橋の橋脚





写真－１２ 突堤の南側護岸の崩壊



写真－１３ 突堤の護岸の崩壊



写真－１４ 第二摩耶大橋に連続する高架橋の基礎

- 1) 被害が想定される構造物基礎はもちろん、目視による観察では被害が認められなかった構造物においても、その基礎の健全性の検討の必要性が指摘される。被害調査の結果だけでなく、写真－１４ 第二摩耶大橋に連続する高架橋の基礎種々の地盤条件や基礎の形式なども含めて総合的に検討することにより、今後の補修対策法や耐震設計法を確立する必要がある。
- 2) 水際線構造物を計画・設計する際には、構造物と護岸との位置関係に配慮する必要がある。例えば、護岸から陸側に十分距離をとった位置あるいは海中に構造物を設置することである。一方、もし構造物が護岸に近接して陸側に設置しなければならない場合には、構造物基礎と護岸との系統的な設計が必要となる。
- 3) 構造物基礎と護岸との系統的な設計に関して、杭基礎では「地震時受働杭」として、定常的に側方流動圧を受ける受働杭の設計法が応用できよう。一方、ケーソン基礎では、これまでの設計法には側方流動圧が考慮されておらず、今後の課題である。
- 4) フェイルセーフおよび緊急時のライフラインの確保の観点から、桁落下は最低限避けなければならない。この点をより確実にするためには、上部構造と下部構造（基礎）との構造物全体の耐震性の整合性ある検討が重要なポイントになる。