

臨海埋立地盤における 道路橋基礎杭の地震時損傷要因に関する考察

松井 保¹・南荘淳²・安田扶律³・中平明憲⁴・黒田兆次⁴

¹フェロー, 工博 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²正会員 工修 阪神高速道路公団神戸第一建設部(〒650-0041 神戸市中央区新港町16-1)

³正会員 工修 阪神高速道路公団京都建設事務所(612-8418 京都市伏見区竹田向代町4)

⁴正会員 工修 (株)建設技術研究所大阪支社道路本部技術第4部(〒560-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

臨海埋立地盤上に建設された阪神高速道路5号湾岸線では、兵庫県南部地震により護岸際を中心に大きな地盤変状および基礎杭の水平移動が見られ、これに伴い数多くの基礎杭に損傷が確認された。本研究においては、地盤内部の杭体の損傷の実態を明らかにするとともに、地震時の地盤変位と杭の損傷との関係を分析した。その結果、杭体のクラック分布は、杭頭および地層の境界面付近に集中している傾向が明らかになった。クラックの発生は、主要動時に生じる地盤応答変位の影響が支配的であり、とくに護岸近傍では、液状化後の側方流動による地盤変位の影響も受けていることを実証的に示した。

Key Words : seismic damage , crack , pile foundation , reclaimed ground , lateral displacement

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震は、大都市域に存在する活断層の活動によって生じた直下型地震であり、都市施設の被害は想像をはるかに越えるものであった。阪神高速道路も例外でなく、内陸部の自然地盤上に建設された3号神戸線では、基礎の被害は軽微であったものの橋脚や上部工に大きな被害が発生した。一方、臨海埋立地盤上に建設された5号湾岸線では、一部の長大橋梁を除いて、上部工の被害はわずかであったが、護岸際を中心に大きな地盤変状および基礎の水平移動が見られ、これに伴い数多くの基礎杭に損傷が確認された。このような状況から、この地震以後、道路橋基礎についても従来の耐震設計の見直しをせまられるところとなった。

本研究は、5号湾岸線を対象として、基礎杭の損傷データの地域別特徴を整理するとともに、護岸からの距離と地盤内部の杭体の損傷との関係等を分析し、その損傷の実態を明らかにしたものである^{1), 2)}。あわせて、橋脚ごとに地盤の動的変位の差異を1次元地震応答解析により算定し、地盤内に生じた応答変位と杭の損傷との関係を分析し、損傷要因の考察を行ったものである。

2. 従来の基礎杭の震害調査

道路橋に耐震設計が導入される契機となった関東地震(1923)における基礎の震害の多くは、基礎躯体自身の破断・破壊、周辺地盤の支持力不足に伴う基礎の傾斜、周辺地盤の破壊・移動・支持力喪失に伴う基礎工の沈下・傾斜・移動に起因するものであった。その後、耐震設計法が逐次整備され、基礎工本体および周辺地盤の支持力に対する照査が定着するようになった^{3), 4), 5)}。

さらに、砂地盤の液状化が原因と考えられる震害が広範囲にみられた新潟地震(1964)以後、地盤の液状化に関する研究が精力的に行われ、1971年に制定された道路橋耐震設計指針⁶⁾には液状化に関する規定が盛り込まれるなど、耐震設計に液状化の影響が考慮されるようになった。また、新潟地震で落橋した昭和大橋の基礎鋼管杭(600mm, $\ell=25\text{m}$, 上杭 $t=16\text{mm}$, 下杭 $t=9\text{mm}$)において代表的な震害調査として引き抜き調査が実施されている⁷⁾。この調査では、杭先端から約6mのところまで曲げによる永久変形がみられ、杭の肉厚が16mmから9mmに変化する位置で局部座屈が発生していたと報告されている。

そして兵庫県南部地震では、臨海埋立地を中心

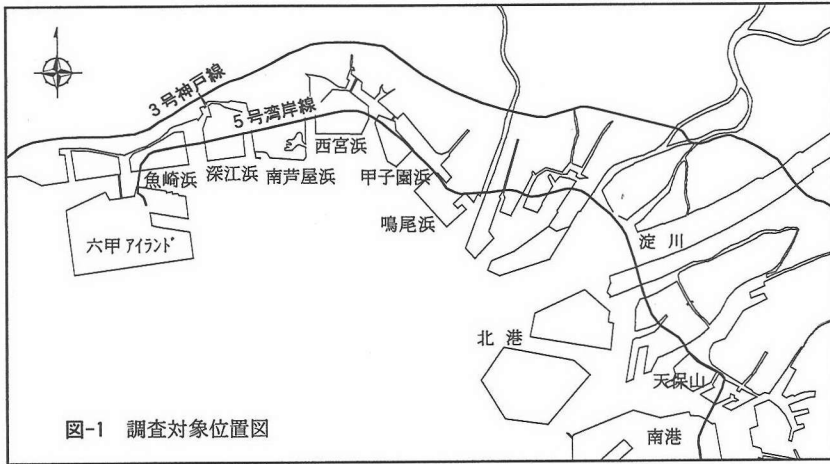


図-1 調査対象位置図

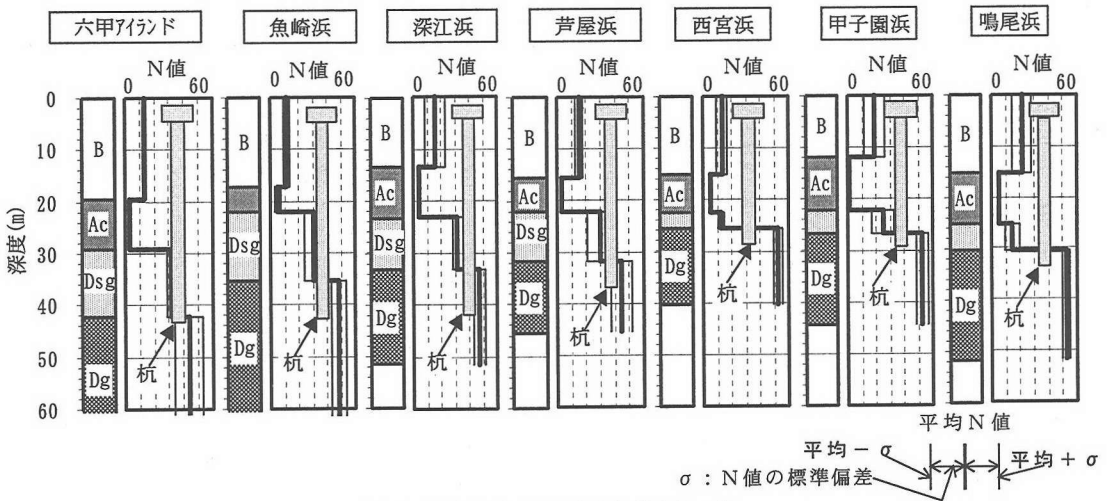


図-2 埋立地ごとの平均地盤構成とN値

地盤の液状化およびそれに伴う側方流動が発生し、数多くの道路橋基礎杭に損傷がみられた⁸⁾。これを受けて道路橋示方書耐震設計編が大きく改訂され、液状化の規定の改訂に加えて、液状化に伴う側方流動に対する基礎の耐震設計法として、側方流動の発生要件や流動力の算定方法が新たに規定された。しかし、この側方流動現象が基礎に及ぼす影響のメカニズムがすべて解明されたわけではなく⁹⁾、今後の研究の進展に応じた速やかな耐震設計上の対応が望まれている。

なお、兵庫県南部地震では建築構造物基礎杭についても、掘り出し調査等が多数実施され、震害の定量的分析も行われている¹⁰⁾。ただし、建築構造物は道路橋とは異なり単体の構造物で、建築構造物自身の水平・鉛直の相対変位が問題となるため、地盤の側方流動によって発生した建築構造物の変位そのものに関するデータは少ないようである。

3. 基礎杭の損傷調査の概要

(1) 調査対象位置と地盤構成

阪神高速道路5号湾岸線は、阪神間の臨海埋め立て地を東西に結び、大阪市天保山から六甲アイランドに至る高架道路である。構造物の設計は、昭和55年または平成2年の道路橋示方書に基づいている。図-1に、その位置図を示す。本研究で対象としたのは、鳴尾浜から六甲アイランドまでの7箇所の埋立地に建設された橋脚基礎杭である。なお、当該埋立地盤は、兵庫県南部地震の震央から25～35km程度の範囲に位置している。

各埋立地の地盤は、いずれも上層から埋土層、上部沖積砂層、沖積粘土層、下部沖積砂層、洪積砂質土・粘土の互層、洪積砂礫層、洪積粘土層から構成されており、橋脚基礎杭は、N値40～50以上の洪積砂礫層に支持されている。図-2に、埋立地ごとの平

均的地盤構成とN値の深度分布を示す。これは、橋脚建設地点ごとの地盤調査結果をもとに、地盤区分をB層(埋土層および一部上部沖積砂層を含む)、Ac層(沖積粘土層)、Dsg層(洪積砂質土・粘土の互層および一部下部沖積砂層を含む)、Dg層(洪積砂礫層)に分類して集計したものである。

鳴尾浜から六甲アイランドにかけて、以下の傾向が認められる。①埋立層(B)の層厚が12~15mから20m程度へと厚くなり、N値が30から10程度へと小さくなる。②支持層(Dg)の深さは30m前後から42mへと深くなり、N値は50から40程度へとやや小さくなる。③支持層上部のDsg層では層厚が5m程度から10m以上へと厚くなり、N値が10程度から30程度へと大きくなる。なお、沖積層(Ac)の層厚は鳴尾浜・甲子園浜・深江浜・六甲アイランドでは10m程度あるが、他の3地区では5~7mとやや薄い。

(2) 調査方法

構造物の損傷状況を把握するために、地震発生直後から各種調査が精力的に実施された。このうち、以下では、基礎杭の損傷に係るものについて述べる。

杭頭の水平残留変位は、橋脚間の距離の変化を測定することにより相対的な移動量を把握し、GPS(汎地球測位システム)を用いた測量を行い、設計時の座標値と比較することにより絶対的な移動量を求めた。地盤の水平残留変位は、地震前後の空中写真で同定できる地盤のポイントにおいて、地震前後の座標値の差から求めた。地盤の沈下量は、水準測量も行ったが基準点の信頼性に欠けていたため、フーチングと周辺地盤の相対沈下量から求めた。

杭体のクラックの発生状況については、地上部から確認できないので、杭頭の水平残留変位が大きかった一部の橋脚について、フーチング下面まで掘削し杭頭部を露出させ、目視により杭頭部のクラックの状況を直接観察した。この方法で全線の基礎を調査することは復旧工事の工程上不可能であったため、弾性波を用いた非破壊調査手法やボアホールカメラによる間接目視調査を適用した。これにより、海上部や橋台を除くほぼ全橋脚について杭体のクラック発生状況を把握することができた¹⁾。

弾性波を用いた非破壊調査手法は、掘起しや引抜調査などをしなくても、基礎体の損傷程度が短時間で効率的に把握できる調査法の一つとして実用化された手法である。すなわち、フーチング上端面をプラスチックハンマーで打撃し、杭の先端または破損面から反射してくる弾性波の加速度をセンサーで測定して解析することで、杭体損傷の有無と位置が検出できる。その信頼性については、代表的な杭でボ

表-1 整理した主な調査項目

分類	データ名	単位	摘要
位置情報	橋脚番号	-	-
	埋立地名	-	-
	護岸からの距離	m	橋軸方向距離
損傷調査結果	地盤		
	水平変位	m	橋軸方向残留変位
	沈下量	m	フーチングとの相対沈下量
	基礎		
	水平変位	m	橋軸方向残留変位
基礎構造情報	クラック本数	本	ボアホール試験、非破壊試験による
	クラック幅	mm	密着クラック幅は0.25mmと設定
	クラック発生位置	m	杭頭からの距離
	各層天端高	OP. m	B, Ac, Dsg, Dgの各層
地盤情報	N値	-	各層平均値
	PL値	-	道路橋示方書による
	基礎形式	-	杭、ケーソン、連壁
基礎構造情報	杭径・杭長	m	-
	杭本数	本	-
	鉄筋段落とし位置	m	杭頭からの距離
	土被り厚	m	杭頭位置
	フーチング規模	m ²	幅×奥行×厚さ

※構造情報は、上部工支保条件(固定、移動、弾性)、橋脚形式(単柱、門型等)、橋脚材料(RC、鋼製)等についても整理

アホールカメラを併用して確認している¹²⁾。

(3) 調査データの整理

整理した損傷データは、基礎体のクラック本数およびクラック幅とその発生位置、杭頭の水平残留変位、周辺地盤の水平残留変位等である。損傷データの整理と併せて、位置条件、地盤構成、基礎構造条件等についても整理した。表-1に、整理した主な調査項目を示す。

ボアホールカメラによる間接目視調査によれば、クラックの発生位置や幅を、コアボーリングした孔壁の360度展開画像からの確に確認できる。しかしながら、コアボーリングの際、孔曲がり等により鉄筋を切断する恐れがあるので、杭先端付近の深部まで削孔することは困難な場合もある。これに対して、弾性波を用いた非破壊調査手法では、杭先端までの損傷の有無が確認できるが、クラック本数や幅についての正確な情報は得られない。ただし、多くの同一孔で実施した両調査のクラック本数を対比した結果¹²⁾を整理すると、図-3に示すような関係が得られている。すなわち、

$$C_{NBOR} = (1.0 \sim 2.0) \times C_{NSIT} \quad (1)$$

ここに、 C_{NSIT} : 非破壊調査によるクラック本数、 C_{NBOR} : ボアホールカメラ調査によるクラック本数である。そこで、ボアホールカメラ調査深度以深のクラック本数については、式(1)の平均的な関係である式(2)を用いて、非破壊調査結果 C_{NSIT} からボアホールカメラ調査結果 C_{NBOR} を換算して求めた。

$$C_{NBOR} = 1.5 \cdot C_{NSIT} \quad (2)$$

表-2 埋立地別損傷調査結果概要

埋立地名	鳴尾浜	甲子園浜	西宮浜	芦屋浜	深江浜	魚崎浜	六甲アイランド	合計	
対象橋脚数(基)	16	19	10	31	27	11	5	119	
平均杭長(m/基)	29.2	24.9	24.9	33.0	36.9	38.8	38.7	32.1	
平均杭本数(本/基)	23.4	18.8	19.9	31.0	17.9	22.2	18.0	22.8	
護岸からの橋軸方向距離(m)	平均値	393	362	587	405	320	332	52	371
	最大値	642	599	720	738	500	631	58	738
	最小値	33	34	408	20	91	31	45	20
クラック本数密度 C_{ndp} (本/m)	平均値	0.35	0.27	0.31	0.28	0.37	0.39	0.45	0.33
	最大値	0.80	0.60	0.60	0.56	0.64	0.92	0.66	0.92
	最小値	0.07	0.04	0.00	0.06	0.11	0.05	0.21	0.00
クラック幅密度 C_{wdp} (mm/m)	平均値	0.13	0.14	0.19	0.21	0.21	0.20	0.40	0.19
	最大値	0.34	0.39	0.50	0.52	0.34	0.40	0.74	0.74
	最小値	0.04	0.04	0.00	0.03	0.03	0.05	0.24	0.00
杭頭の水平残留変位(m)	平均値	0.01	-0.04	-0.01	0.06	0.02	-0.01	0.54	0.04
	最大値	0.09	0.07	0.07	0.93	0.06	0.62	0.88	0.93
	最小値	-0.22	-0.11	-0.06	-0.03	-0.05	-0.20	0.37	-0.22
周辺地盤の水平残留変位(m)	平均値	-0.02	0.06	0.29	0.10	0.02	0.02	1.29	0.13
	最大値	0.42	0.28	0.38	0.91	0.39	1.09	2.22	2.22
	最小値	-0.39	-0.09	0.18	-0.42	-0.36	-0.27	0.99	-0.42

注) クラック本数密度: $C_{ndp} = C_{np} / L_p$, クラック幅密度: $C_{wdp} = \sum_{i=1}^{C_{np}} C_{wpi} / L_p$

ここに, C_{np} : 杭 p のクラック本数(本), C_{wpi} : 杭 p の深さ i におけるクラック幅(mm), L_p : 杭長(m)

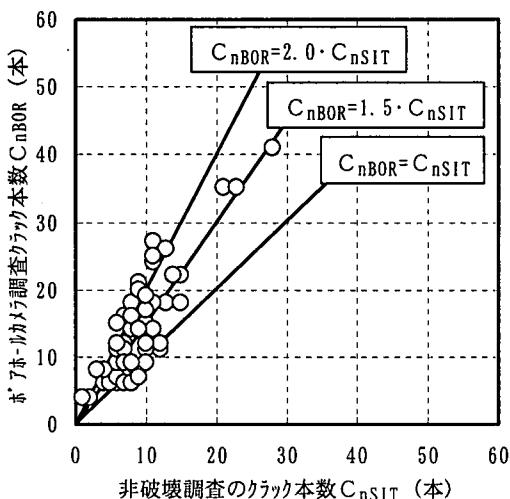


図-3 ポアホールカメラ調査と非破壊調査とのクラック本数の比較

また, クラック幅は, クラック1本ごとの幅の総和を集計したものであるが, 幅0.5mm未満の密着クラックについてはクラック幅0.25mmと設定して集計した。非破壊調査結果では, 前述の本数換算をした後, クラック幅の情報がないので, すべて密着クラック相当と仮定した。

杭頭および地盤の水平残留変位については, 橋軸方向変位として整理した。これらは, 地殻変動で移動した基準座標の補正等を行った上で, 最大ベクトル方向の変位を橋軸方向ベクトルに変換したものである。同様に, 護岸からの距離についても, 橋軸方

向の最短距離として整理した。

(4) 対象データと損傷の概要

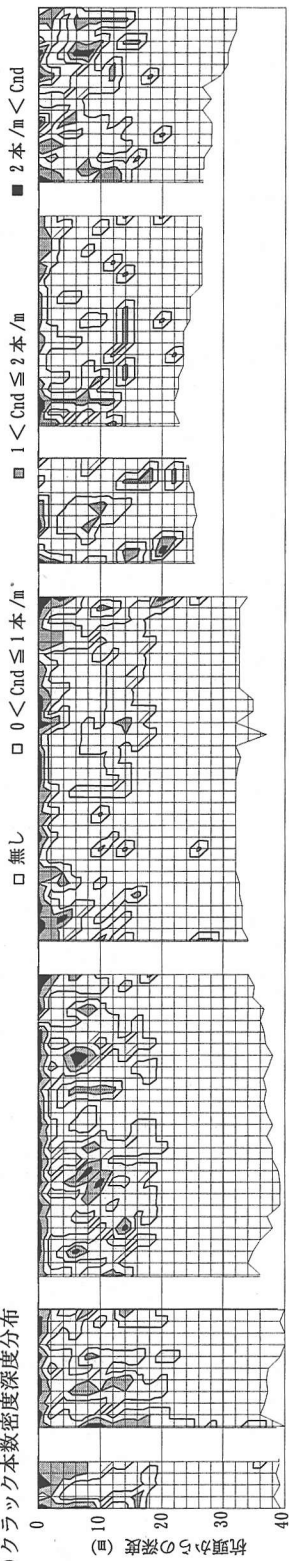
損傷調査結果のうち, 本研究で対象としたのは, ボアホールカメラ調査を実施した119基の橋脚基礎である。橋脚直下の杭を除くすべての杭において, 弾性波による非破壊試験も実施しており, 杭先端までの損傷状況が明らかにされたものである。なお, 杭はすべて大口径の場所打ち杭である。

図-4は, 対象橋脚についての損傷調査結果を集約して示したものである。ここに, クラック発生状況および地盤条件は, いずれも杭頭から深さ方向への距離で整理している。クラック本数については深さ2mごとの発生頻度を, クラック幅については深さ2mごとの発生量をそれぞれコンター図として表示している。また, 杭頭および地盤の水平残留変位は, 橋軸方向に対し護岸側への移動を(+), 内陸側へを(-)として示している。なお, 対象とした橋脚が埋立地のどの位置にあるかを見るために, 護岸からの距離を併記している。

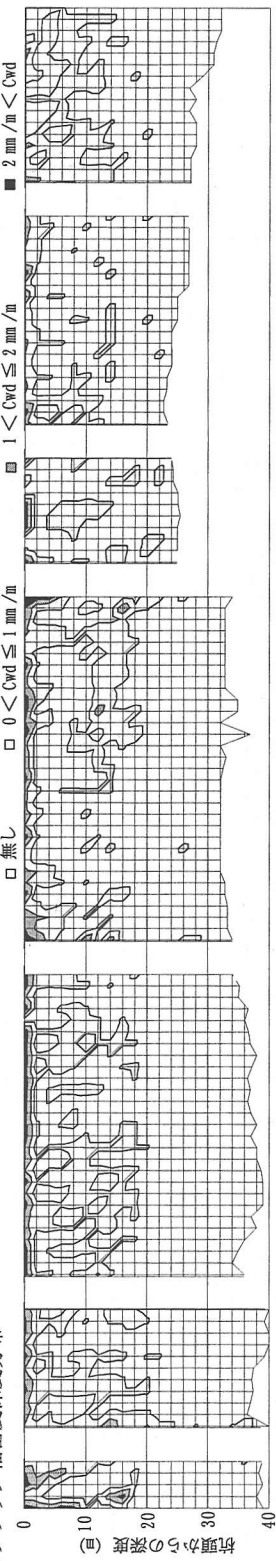
図-4から, クラックの発生状況についてみると, 大半は杭頭付近に集中しているが, 地盤内部にも多く発生していること, 護岸近傍では発生程度がやや大きい傾向にあることがうかがえる。また, 杭頭および地盤の水平残留変位についてみると, 護岸近傍で大きく, 内陸部では小さい傾向がうかがえる。

埋立地ごとの平均的な傾向を把握するために, 表-2に, 対象とした119基の橋脚における基礎杭の

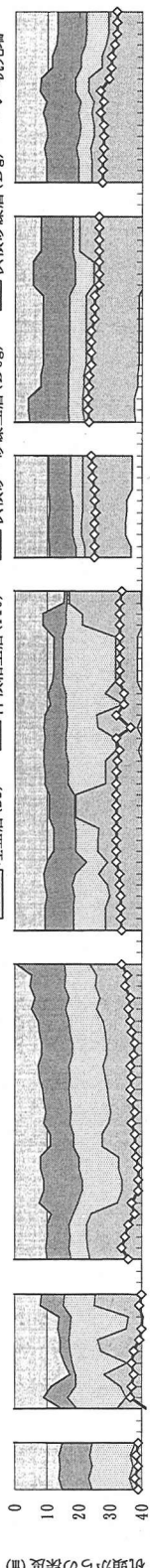
a) クラック本数密度深度分布



b) クラック幅密度深度分布



c) 地盤構成と杭の根入れ深度



d) 地盤・基礎の水平変位

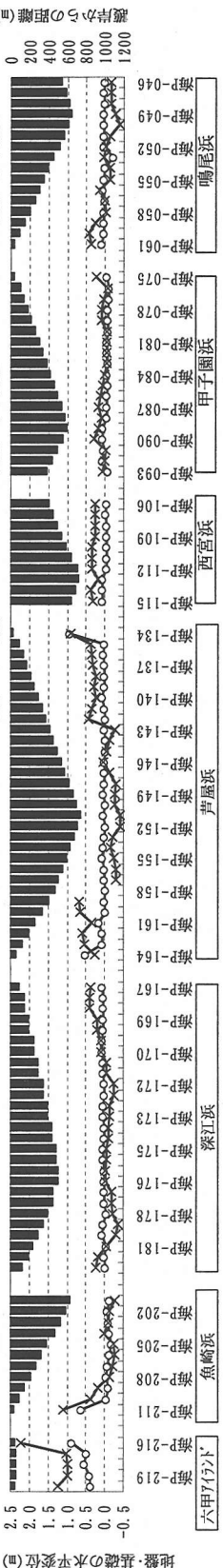


図-4 損傷調査結果概要図

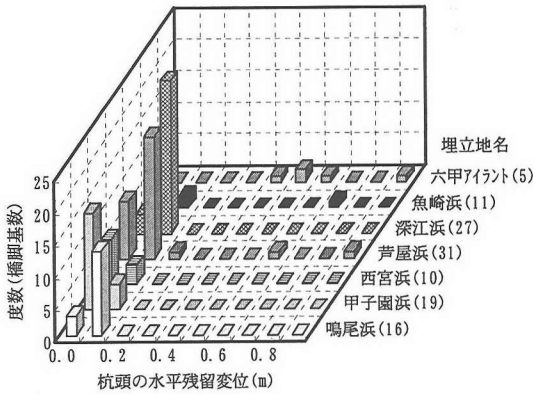


図-5 埋立地ごとの杭頭の水平残留変位

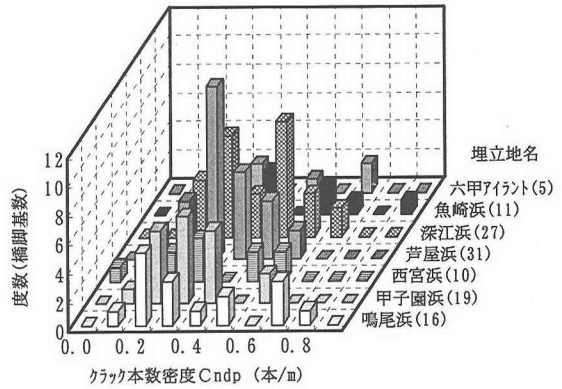


図-6 埋立地別基礎杭のクラック発生状況

諸元および損傷調査結果を埋立地別に要約して示す。表中のクラック本数密度およびクラック幅密度は、杭長1m当たりの発生本数および幅として求めたもので、これらの定義は表中に示している。また、図-5に、埋立地ごとの杭頭および地盤の水平残留変位を、図-6に、杭のクラック本数密度を示す。

表-2から、杭頭および地盤の水平残留変位、クラック密度の平均値はともに、7地域のうちでは六甲アイランドにおいて最も大きく、鳴尾浜から六甲アイランドにかけてその程度が比較的大きくなる傾向がうかがえる。このような傾向は、図-2に示した支持層の深さや埋立層の厚さなどの傾向と対応している。また、損傷が大きい六甲アイランドの橋脚は、護岸からの距離が短いことが特徴的である。

図-5から、杭頭の水平残留変位が40cmを上回る大きいものは六甲アイランドに多く、他では芦屋浜、魚崎浜の一部にみられる程度であることがわかる。これに対して、図-6に示したクラック本数密度は、埋立地間で大差のないことが特徴的である。

次節以下では、これらの平均的な特徴を踏まえ、護岸からの距離、地盤条件と基礎杭の損傷との関係について、さらに分析をすすめる。

4. 基礎杭の損傷の特徴

(1) 護岸からの距離と基礎杭の損傷

図-7および図-8に、それぞれ護岸からの距離と橋脚ごとの杭頭および地盤の水平残留変位との関係、および杭体の地層区別別クラック本数密度との関係を示す。

図-7から、杭頭の水平残留変位は、護岸から100m未満では50cmから100cmの海側への大きな変位を生

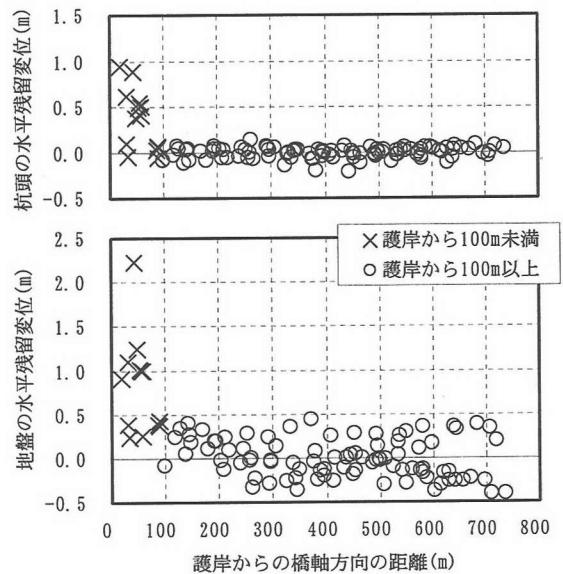


図-7 護岸からの距離と杭頭および地盤の水平残留変位との関係

じたものがあるが、護岸から100m以上離れると10cmから20cm程度に小さくなっていることがわかる。すでに、このような護岸からの距離と基礎杭の水平残留変位との関係をもとに、護岸近傍での基礎の設計法が見直されている¹³⁾。

同様に、地盤の水平残留変位も護岸から100m未満の位置では、100cmから200cm以上の海側への大きな動きを生じたものがあるが、護岸から100m以上離れると、その動きは高々50cmまでである。

また、図-8から、地層区別別クラック本数密度も、各層ともに、護岸から100m未満の範囲で比較的大きいものが見られる。ただし、護岸から100m以上離れても大きくは低下せず、ほぼ一定範囲内ではばらつ

表-3 地層区分別クラック発生状況

橋脚位置	地層区分	杭部層厚 (m)	クラック本数 (本/基)	クラック幅 (mm/基)	クラック本数密度 (本/m)	クラック幅密度 (mm/m)	平均クラック幅 (mm/本)
護岸近傍 (14基)	B層	11.8	11.4 (63.2%)	8.8 (73.2%)	1.25	1.14	0.91
	Ac層	8.4	4.4 (24.3%)	2.5 (20.8%)	0.55	0.37	0.67
	Dsg層	9.0	1.3 (7.4%)	0.5 (4.0%)	0.11	0.04	0.36
	Dg層	5.7	0.9 (4.8%)	0.3 (2.3%)	0.09	0.03	0.33
	計	34.9	18.1 (100.0%)	12.1 (100.4%)	0.54	0.34	0.64
内陸部 (105基)	B層	9.7	6.6 (67.0%)	4.5 (80.3%)	0.70	0.49	0.70
	Ac層	8.4	2.7 (27.2%)	0.9 (15.4%)	0.32	0.12	0.38
	Dsg層	8.2	0.5 (4.8%)	0.2 (4.0%)	0.07	0.03	0.39
	Dg層	5.5	0.1 (0.9%)	0.0 (0.4%)	0.03	0.01	0.33
	計	31.8	9.8 (100.0%)	5.6 (100.0%)	0.31	0.18	0.57
計 (119基)	B層	10.0	7.2 (66.3%)	5.0 (78.7%)	0.76	0.57	0.75
	Ac層	8.4	2.9 (26.6%)	1.1 (16.6%)	0.35	0.15	0.43
	Dsg層	8.3	0.6 (5.3%)	0.3 (4.0%)	0.07	0.03	0.39
	Dg層	5.5	0.2 (1.7%)	0.1 (0.8%)	0.04	0.01	0.33
	計	32.1	10.8 (100.0%)	6.4 (100.1%)	0.33	0.19	0.58

注)クラック本数: $C_n = \sum_{p=1}^N C_{np} / N$, クラック幅: $C_w = \sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^{C_{np}} C_{wpi} / N$

クラック本数密度: (杭 p) $C_{ndp} = C_{np} / L_p$, (地層区分 j) $C_{ndj} = C_{npj} / L_{pj}$

クラック幅密度: (杭 p) $C_{wdp} = \sum_{i=1}^{C_{np}} C_{wpi} / L_p$, (地層区分 j) $C_{wdj} = \sum_{i=1}^{C_{npj}} C_{wpi} / L_{pj}$

平均クラック幅: (杭 p) $C_{wmp} = C_{wdp} / C_{ndp}$, (地層区分 j) $C_{wmj} = C_{wdj} / C_{ndj}$

ここに, N: 橋脚数(基), C_{np} , C_{npj} : 杭 p および地層区分 j のクラック本数(本), C_{wpi} : 杭 p の深さ i におけるクラック幅(mm), L_p , L_{pj} : 杭 p の杭長および地層区分 j の杭部層厚(m) ($\sum L_{pj} = L_p$)

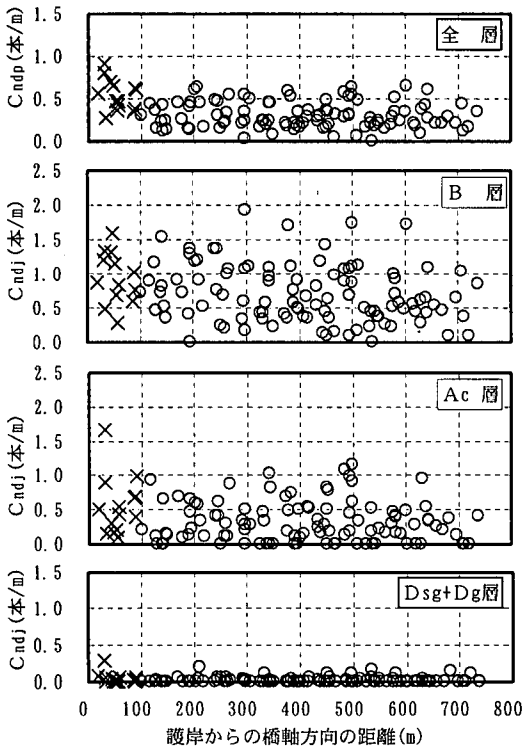


図-8 護岸からの距離とクラック本数密度との関係

ている。図示していないが、クラック幅密度も同様な傾向にあることを確認している。

クラック発生状況の護岸からの距離による低減傾向は、基礎杭や地盤の水平残留変位のように顕著ではないが、護岸からの距離100mを境に損傷の程度に差異が認められることから、以下の分析は、データを100m未満(護岸近傍と定義)のものとして100m以上(内陸部と定義)のものとして区分して行う。

(2) 地盤内部の基礎杭の損傷

対象橋脚を護岸近傍14基、内陸部105基の橋脚に分けて、地層区分別クラック発生状況を集計した。表-3は、その平均値を示したものである。表からクラック本数をみると、護岸近傍では約18本/基と内陸部の2倍程度に多くなっている。その地層区分別割合は、B層(埋立層・上部沖積砂層)が6割から7割をしめ、ついでAc層(沖積粘土層)が2割から3割程度となっている。以深のDsg層(下部沖積砂・洪積砂質土層)およびDg層(洪積砂礫層)では、合わせて1割程度である。護岸近傍では、内陸部に比べてB層の割合がやや少なく、Ac層以深の深部の割合がやや多い傾向があり、深部の損傷が比較的大きいことを示している。クラック幅、本数密度および幅密度についても同様な傾向がうかがえる。また、クラック1本当たりの平均幅をみると、B層では0.7~0.9

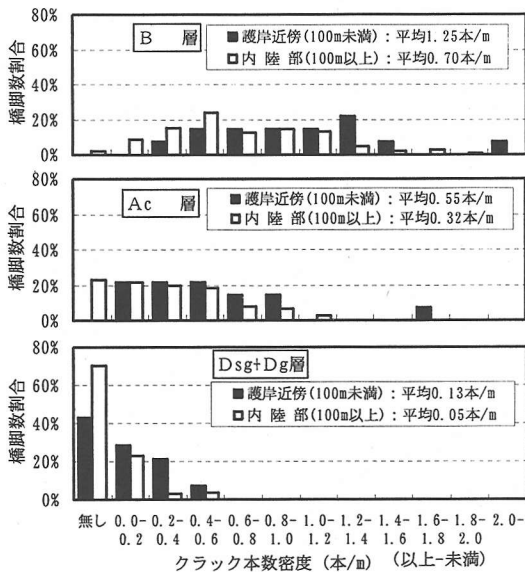


図-9 クラック本数密度の地層区分別ばらつき

mm/本, Ac層以深では0.3~0.7mm/本程度と深部ではやや小さくなっており, 護岸近傍では内陸部に比べて大きい傾向がある。

図-9は, 橋脚ごとの地層区分別クラック本数密度の分布を示している。本数密度をみると, B層でのばらつきがもっとも大きく, 大部分0.2~1.6本/mの広範囲に分布している。Ac層では1.0本/mまでに大部分が分布しており, 以深のDsgおよびDg層では損傷の無いものも多い。護岸近傍では内陸部に比べてばらつき範囲がやや広く, 特異的に大きな損傷の橋脚がみられる。図示していないが, クラック幅密度をみても同様な傾向がうかがえる。

したがって, クラック本数と幅およびそれぞれの密度のデータから判断して, 護岸近傍では, 内陸部と比較して杭損傷の程度は大きく, より深部に及んでいる傾向が確認できる。

(3) 地層境界面と基礎杭の損傷

地盤内部の杭体のクラック発生状況を杭頭部および地層境界面に着目して集計した。図-10は, 集計に際して定義した杭頭部および各地層境界面と集計範囲を示したものである。ここでは, 杭頭からの集計は, 杭頭からB層中間深度までのクラックを対象とし, B層とAc層の境界面以深については, 各層の境界面から上下層の中間深度までのクラックを対象としている。表-4に集計結果を示す。ただし, この集計では, 表-3と同様, 護岸からの距離100mで分別し, 護岸近傍と内陸部とに区分して橋脚1基当た

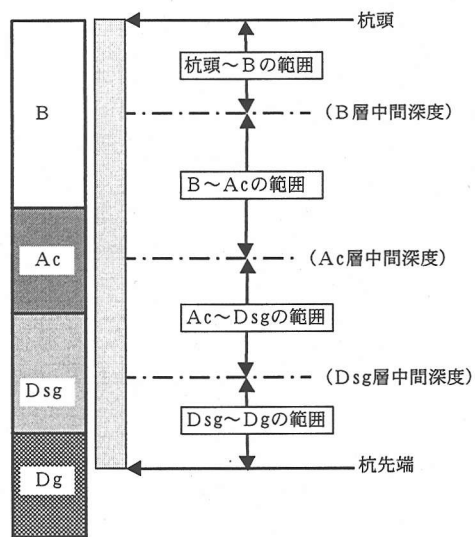


図-10 杭頭部および各地層境界面と集計範囲

表-4 地層境界区分別クラック発生状況

地層区分	クラック本数(本/基)			クラック幅(mm/基)		
	護岸近傍(14基)	内陸部(105基)	計(119基)	護岸近傍(14基)	内陸部(105基)	計(119基)
杭頭-B	8.2 (45.0%)	4.8 (48.7%)	5.1 (47.8%)	7.3 (60.7%)	4.0 (70.6%)	4.3 (67.8%)
B-Ac	6.1 (34.7%)	3.4 (34.8%)	3.8 (34.8%)	3.1 (25.5%)	1.0 (18.5%)	1.3 (20.4%)
Ac-Dsg	2.4 (12.5%)	1.4 (14.9%)	1.6 (14.3%)	1.2 (10.0%)	0.6 (10.2%)	0.6 (10.2%)
Dsg-Dg	1.4 (7.7%)	0.2 (1.6%)	0.3 (3.2%)	0.4 (3.8%)	0.0 (0.7%)	0.1 (1.6%)
計	18.1 (100.0%)	9.8 (100.0%)	10.8 (100.0%)	12.0 (100.0%)	5.6 (100.0%)	6.3 (100.0%)

りの値を求めたものである。

表-4より, 護岸近傍のクラック本数の分布をみると, 杭頭からB層中間深度までに45%が集中しているが, B層中間深度からAc層中間深度までに35%, Ac層とDsg層の境界の上下に13%, Dsg層中間深度から杭先端までにも8%程度存在しており, クラックの発生が杭頭だけでなくB層下半部以深に及んで発生していることが明らかとなった。内陸部では, 杭頭付近へ集中する傾向がみられる。このような傾向はクラック幅で見ても同様である。

図-11は, 杭頭付近および地層面の境界付近のクラック発生状況を深度分布で整理したものである。これらは, 杭頭および各境界面から1mごとにクラック発生本数を集計し, 橋脚1基当たりに換算し, 護岸近傍と内陸部それぞれの平均地層区分に対応つけたものである。図のa)は護岸近傍を, b)は内陸部

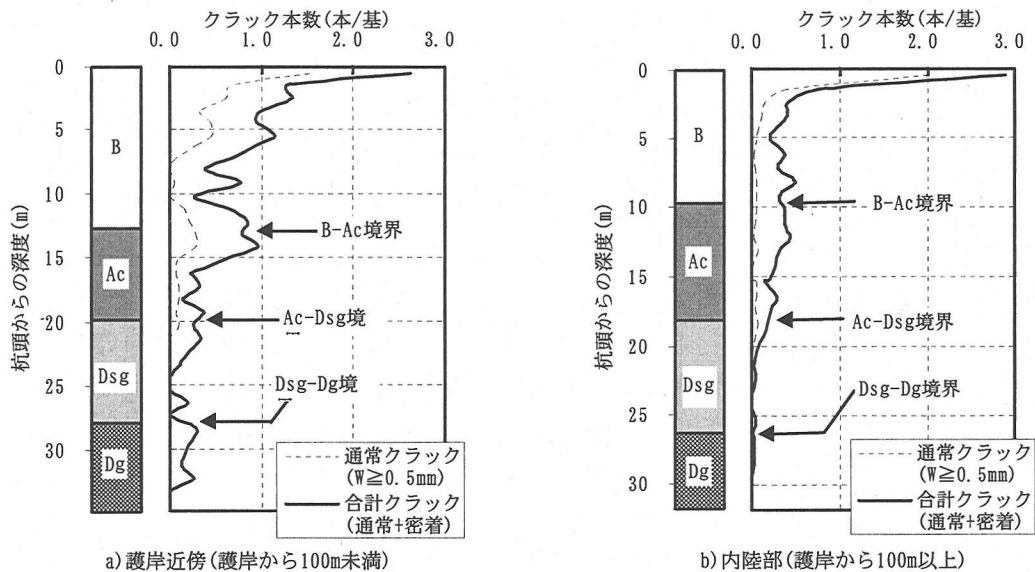


図-11 クラック発生深度分布

のものである。また、クラック本数は、通常クラックとこれに密着クラックを加えた総本数(合計クラック)とを示しており、密着クラック本数は各図中の曲線間の幅で示される。

図-11から、護岸近傍のクラック分布については、以下の傾向が認められる。①杭頭付近では、杭頭から1m程度の範囲に集中するとともに、B層上半部にまで及んでいる、②B層とAc層の境界付近では、境界面を含む4m程度の範囲に集中しており、相対的に下部のAc層側が多い、③Ac層とDsg層の境界付近では、境界面を含む4~5mの範囲にクラックの集中がみられる、④Dsg層とDg層の境界面付近では、クラック本数は少ないものの、境界面付近を中心に分布している。

内陸部のクラック分布もほぼ同様な傾向を示しているが、護岸近傍に比べて杭頭付近への集中傾向がより顕著に現れている。

このような地盤内部のクラックの発生状況を説明するために、次章では、地震時の地盤変位と基礎杭の損傷との関係について、さらに分析をすすめる。

5. 地震時地盤変位と基礎杭の損傷

(1) 地震時地盤変位

液状化地盤では、主要動の繰り返しによって継続時間の後半に液状化が起ると考えられる。液状化が起る前の地盤変位は小さく地盤剛性もそれほど低下しないが、液状化が起った後の地盤変位は大きく地盤

剛性も大きく低下することが想定される¹⁴⁾。

いま、基礎杭の損傷に影響を与えるのは、①初期の主要動時に作用する応答変位か、②液状化後の地盤変位かは明らかでない。

ここでは、地盤変位の小さい内陸部の杭の損傷が地盤変位の大きい護岸近傍と大きく違わないことから、初期の主要動時に作用した応答変位を説明指標として杭の損傷を説明することを試みる。

そこで、主要動時の応答変位は等価線形解析で求めた値、液状化後の地盤変位は地盤の水平残留変位計測値として、両者と基礎杭の損傷との関係を分析してみる。

ここに、等価線形解析では、地盤材料の非線形性を等価線形でモデル化し、次元重複反射理論に基づく解析手法(SHAKE)を用いている。この方法では、地盤の非線形性が考慮された地中内のせん断応力やせん断ひずみの応答値および主要動時の地盤の地震応答変位が算出される。また、地盤の水平残留変位は表-2、図-4および図-7に示したものである。

(2) 地盤応答変位と基礎杭の損傷との関係

橋脚地点ごとの局所的な地盤特性を反映した表層地盤の地震応答変位を把握するために、入力地震動として兵庫県南部地震で観測されたポートアイランドのG. L. -83m波形(N-S成分, $\alpha_{max}=536gal$)を用いて、1次元地震応答解析(SHAKE)を実施した。多くの橋脚が対象となることから、各橋脚ごとの地盤モデルは、B層をフーチング下端で上下2層(B1, B2)に、以深をAc, Dsg, Dg層およびDc層(洪積粘土

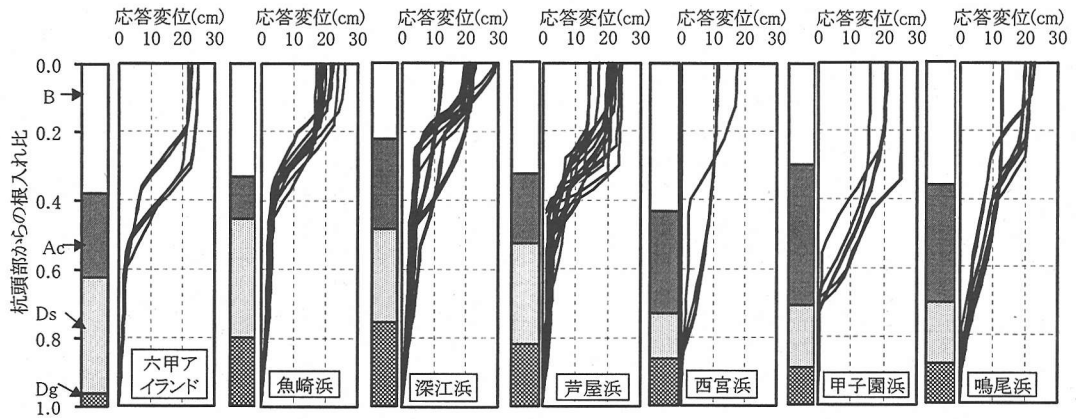


図-12 地盤応答変位の解析結果

層)に大きく分け、粘土と砂の互層状態やN値の細部の変化は平均化して取り扱った。地震動の入力基礎は、Dc層の下端で、これはポートアイランドの観測地点とほぼ同等と見なせる層序に相当している。各地層区分ごとのせん断波速度はN値から道路橋示方書の方法¹⁵⁾で求め、せん断剛性低下曲線等のパラメータは、別途調査した埋立地盤の標準曲線¹¹⁾を採用した。

図-12に、解析結果から求めた最大応答変位の深度分布を埋立地ごとに示す。深度については、橋脚地点ごとに杭長や地盤構成が局所的に異なっているため、深さ方向を杭長で正規化して重ね書きしている。図示の応答変位は、解析結果から得られた杭先端に対する杭頭までの相対変位である。以下、これを応答変位と呼ぶ。図中、縦軸の0点は杭頭を、1.0点は杭先端を示し、地盤構成は各埋立地の平均構成を示している。

図-12をみると、同じ埋立地でも応答変位にばらつきが現れており、局所的な地盤条件の差異が反映されている。また、図中の地盤構成は平均的なものであるため、その対応関係が必ずしも明確ではないが、剛性が変化する地層の境界面で変位勾配が変化している様子が表現されている。このことは、図-11に示した境界面付近を中心としたクラックの発生状況との対応性を示唆するものである。

この応答変位の解析結果から、地層区分別の平均応答変位を式(3)のように定義して、以下の分析をすすめる。

$$\delta e = \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\delta z}{z_{i+1} - z_i} dz \quad (3)$$

ここに、 δe : 地層区分別平均応答変位、 δz : 深度 z における応答変位、 z_i, z_{i+1} : i 層の上端および

下端深度である。

図-13および図-14に、それぞれ各層別の平均応答変位と各層のクラック本数密度およびクラック幅密度との関係を示す。ここに、各図中のa)は護岸から100m未満の護岸近傍の橋脚について、b)は100m以上離れた内陸部のものを示している。原点付近に集中しているデータポイントがDsgおよびDg層のデータである。

両図から、データのばらつきはあるものの、クラック本数密度および幅密度ともに平均応答変位と有意な相関関係にあることがうかがえる。図中の直線は両者の傾向をつかむために、最小自乗法により原点を通る直線に回帰させたものである。また、図中のR値は上記直線をフィッティングさせたときの相関係数で、いずれも統計的には有意な関係にあることを示している。

護岸からの距離区分で見ると、護岸近傍では内陸部の橋脚と比べ、回帰直線の傾きが大きく、同じ平均応答変位でも杭の損傷に与える度合いがやや大きくなる傾向にあることを示している。

このことから、基礎杭の損傷は一次元重複反射解析による主要動時の応答変位である程度説明でき、とくに、護岸近傍では、これに含まれない液状化後の地盤変位の影響が損傷をさらに助長したと考えられる。

(3) 地盤の水平残留変位と基礎杭の損傷

図-15および図-16に、それぞれ地盤の水平残留変位とクラック本数密度およびクラック幅密度との関係を示す。両図から、護岸近傍の橋脚では、地盤の水平残留変位が大きいところでクラックの発生密度が大きくなる傾向がうかがえる。この傾向を線形関係で表わせば、相関係数(図中のR値)は小さいが、

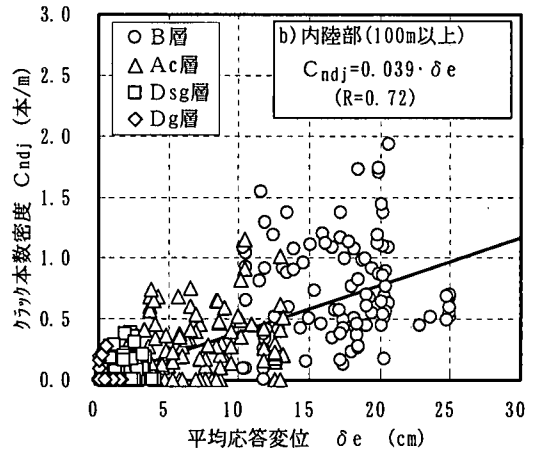
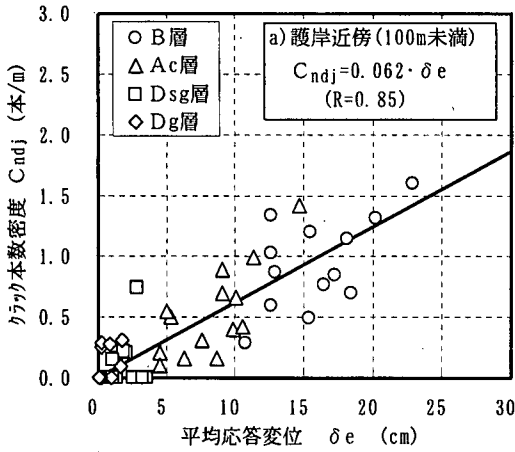


図-13 平均応答変位とクラック本数密度との関係

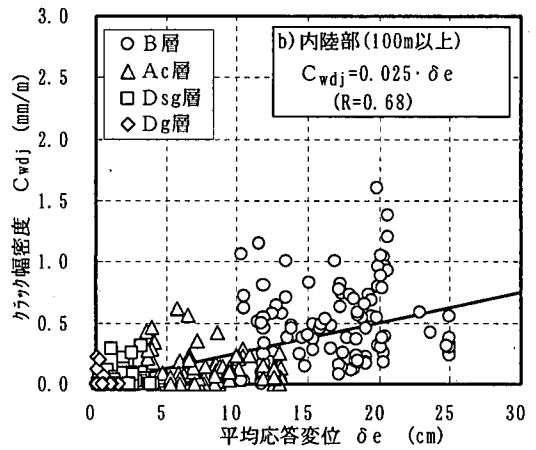
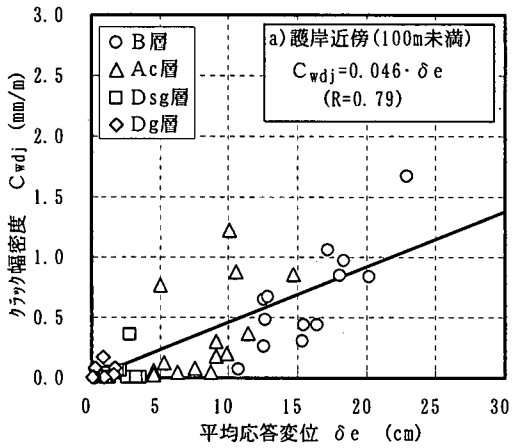


図-14 平均応答変位とクラック幅密度との関係

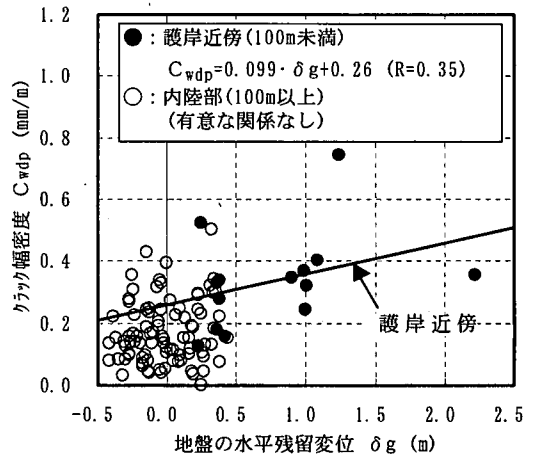
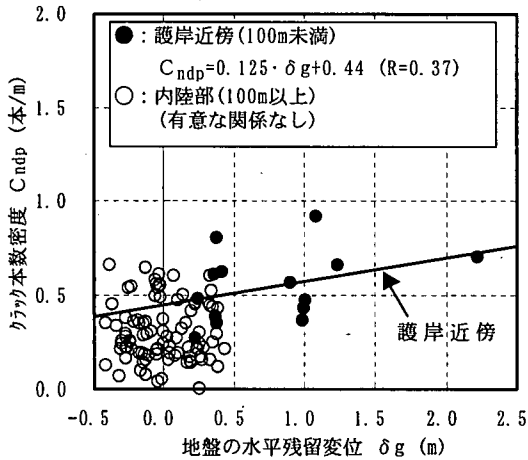


図-15 地盤の残留水平変位とクラック本数密度の関係

図-16 地盤の水平残留変位とクラック幅密度の関係

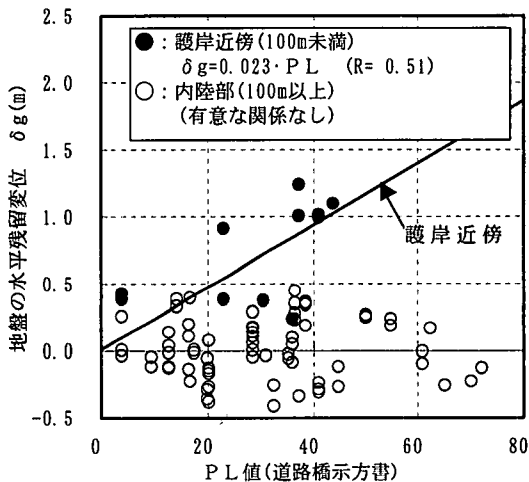


図-17 PL値と地盤の水平残留変位との関係

図示の直線関係になる。ただし、内陸部ではこのような関係は認められない。

図-17に、PL値と地盤の水平残留変位との関係を示す。護岸近傍では、地盤の水平残留変位の大きさは内陸部に比べて大きく、PL値とほぼ正の相関関係にあるが、内陸部では無関係であることがわかる。したがって、護岸近傍では、液状化による側方流動が生じ、水平残留変位も大きくなり、一方、内陸部では液状化しても側方流動を起こさず、結果として水平残留変位も小さくなる。図-15および図-16と併せてみると、内陸部における水平残留変位が基礎杭の損傷に与えた影響も小さかったと推察できる。

このように、護岸近傍では、液状化後の側方流動による地盤変位が基礎杭の損傷に与える影響は一定程度認められるが、内陸部ではほとんど見られないことが認められる。

結局、図-13、図-14、図-15および図-16に示した結果から、内陸部では、主要動時の応答変位の影響が支配的であるが、護岸近傍では、主要動時の地盤応答変位と液状化後の側方流動による地盤変位との両方の影響を受けたと考えられる。

6. まとめ

本論文では、臨海埋立地盤上に建設された阪神高速道路5号湾岸線が兵庫県南部地震により受けた損傷のうち、119基の橋脚について基礎杭の損傷調査結果を分析した。すなわち、まず、杭頭および地盤の水平残留変位と杭体部に発生したクラックの発生

状況とについて、調査結果の全貌を概観的に示すとともに、埋立地ごとの損傷状況を示した。また、橋脚位置の護岸からの距離と損傷状況について分析した。この結果を踏まえ、護岸近傍と内陸部における地盤内部の杭体のクラック発生状況を地盤構成や地層境界面との関連で明らかにした。さらに、地盤内部の杭体のクラック発生状況を、地震時の地盤応答変位解析結果から説明するとともに、護岸近傍と内陸部において、クラック発生状況に対する地盤の応答変位や水平残留変位との関係に差異があることを確認した。

以上の結果より、主な結論を要約すれば、以下のとおりである。

- (1) 杭頭および地盤の水平残留変位は護岸から離れるにしたがって低減し、100m以上離れた内陸部では、100m以内の護岸近傍に比してほとんど無視しうる程度となる。一方、杭体のクラックは、距離による低減傾向がうかがえるが、内陸部でも護岸近傍に比して無視し得ない損傷程度である。
- (2) 地層区分ごとの杭体のクラック本数と幅およびそれぞれの密度のデータから判断して、護岸近傍では、内陸部と比較して杭損傷の程度は大きく、より深部に及んでいる傾向が確認できる。
- (3) クラック発生の深度分布をみると、杭頭から埋立層上半部の範囲に45%程度が集中しており、内陸部では、護岸近傍に比べて杭頭付近への集中傾向がより顕著に現れている。また、護岸近傍と内陸部ともに、埋立層下半部以深でのクラックは、地層境界面付近を中心に分布している傾向にある。
- (4) 基礎杭の損傷は一次元重複反射解析による主要動時の応答変位である程度説明でき、とくに護岸近傍では、これに含まれない液状化後の地盤変位の影響が損傷をさらに助長したと考えられる。
- (5) 護岸近傍では、地盤の水平残留変位が大きいとクラックの発生密度が大きくなる傾向にあるが、内陸部ではこのような関係は認められない。
- (6) 内陸部では、主要動時の応答変位の影響が支配的であるが、護岸近傍では、主要動時の地盤応答変位と液状化後の側方流動による地盤変位との両方の影響を受けたと考えられる。

今回の分析は、損傷調査結果を現象面から考察したもので、地震動の慣性力については考慮できていない。このことが、平均応答変位とクラック発生密度の関係のばらつきを示すものとも考えられる。より精度良く損傷状況を説明するためには、慣性力と地盤変位とを適切に反映した解析手法を用いることが必要となろう。

参考文献

- 1) 南莊淳, 安田扶律, 中平明憲, 黒田兆次: 埋立地盤における基礎の損傷要因に関する考察(その1), 第33回地盤工学研究発表会, pp. 1005-1006, 1998.
- 2) 南莊淳, 安田扶律, 中平明憲, 黒田兆次: 埋立地盤における基礎の損傷要因に関する考察(その2), 第33回地盤工学研究発表会, pp. 1007-1008, 1998.
- 3) 小寺重郎: 関東大地震と橋りょう, 基礎工, pp. 51-59, 1978.
- 4) 建設省土木研究所: 北陸震災調査報告, 土木研究所報告, 第78号, 1949.
- 5) 川島一彦: 橋梁基礎の耐震設計のための地震工学研究の現状, 土木研究所資料, 第2385号, 1986.
- 6) 日本道路協会: 道路橋耐震設計指針, 1972.
- 7) Fukuoka, A.: Damage to Civil Engineering Structures, Soil and Foundation, Vol. 6, No. 2, March, pp. 45-52, 1966.
- 8) Matsui, T. and Oda, K.: Foundations Damage of Structures, A Special Issue of Soils and Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp. 189-200, 1996.
- 16) 日本道路協会: 道路橋示方書耐震設計編, pp. 85-90, 1996.
- 10) 地盤工学会: 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, pp. 26-27, 1998.
- 11) 阪神高速道路公団, 同管理技術センター: 埋め立て地盤の橋梁基礎構造物に関する震災調査研究, 1996.
- 12) 松井保, 南莊淳, 安田扶律, 仲田慶正, 今田和夫: 非破壊試験による基礎杭損傷調査における解析手法の開発と適用性に関する研究, 土木学会論文集, 第596号/Ⅲ-43, pp. 261-270, 1998.
- 13) 例えば日本道路協会: 道路橋示方書耐震設計編, 1996.
- 14) 日本建築学会構造委員会, 基礎構造運営委員会: 液状化地盤における基礎の設計の考え方, 日本建築学会, pp. 99-119, 1998.
- 15) 日本道路協会: 道路橋示方書耐震設計編, p. 43, 1996.

(1999. 1. 29受付)

SEISMIC DAMAGE ANALYSIS ON PILE FOUNDATIONS OF ELEVATED HIGHWAY IN THE RECLAIMED GROUND

Tamotsu MATSUI, Atsushi NANJO, Furitsu YASUDA,
Akinori NAKAHIRA and Choji KURODA

The Hyogoken-Nambu Earthquake gave serious damage to foundations located on the Hanshin Expressway No.5 Bay Route that connects many recently reclaimed islands, together with causing greater residual ground deformation and residual lateral displacement of piers near waterfront. In this paper, were described the details of damage condition of piles and its relationship with the seismic response displacement of the ground that was calculated using one dimensional earthquake response analysis. As the results, it was concluded that cracks were concentrated at pile top and around pile surface at the boundary of soil layers, and that cracks were caused mainly due to the seismic response displacement of ground, especially at around revetments, the lateral flow displacement of ground was an additional cause.