

護岸背後の既設橋脚基礎の流動化照査

落合 英俊¹・安田 進²・前田 良刀³・田中 清幸⁴・田上 裕⁵・白井 康夫⁵

¹九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: ochiai@civil.kyushu-u.ac.jp

²東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

³九州共立大学教授 工学部都市システム工学科 (〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

E-mail: maeda@kyukyo-u.ac.jp

⁴福岡北九州高速道路公社 保全施設部部長 (〒812-0055 福岡市東区東浜2-7-53)

E-mail: tanaka-k@fk-tosikou.or.jp

⁵基礎地盤コンサルタンツ株式会社 九州支社 (〒814-0022 福岡市早良区原2-16-7)

E-mail: tanoue.yutaka@kiso.co.jp, E-mail: shirai.yasuo@kiso.co.jp

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震では、地震時の液状化に伴う地盤の流動化により、護岸近くの構造物基礎が多大な被害を受けた。それ以降、大地震時の流動化に対して構造物の安全性を保証することが要求されるようになり、臨海部に建設されている福岡・北九州都市高速道路においても、既設橋脚基礎に対してその照査が必要となった。その照査にあたり、護岸の流動量および橋脚位置の地盤の変形量を解析的に求め、その変形量を用いて応答変位法により基礎の照査を行う、という手法を採用した。ここにその手法、照査結果について報告すると共に、平成17年3月に発生した福岡県西方沖地震の際の被害状況と比較を行った。

Key Words : *Pile, liquefaction, Liquefied Soil, Earthquake-resistant Design*

1. はじめに

福岡・北九州両都市圏において、現在98.2kmの都市高速道路が福岡北九州高速道路公社によって供用されており、それぞれ重要な路線としての役割を果たしている。これらの橋脚基礎の設計は、地震時における基礎地盤の液状化を考慮して許容応力度法で実施されている。ところが、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）では、単に液状化だけでなく、埋立地の護岸近辺などで液状化に伴う地盤の流動化が生じ、護岸近くの構造物の基礎は多大な被害を受けた。

このようなことから、同地震以降、大地震時の流動化に対する構造物の安全性を保証することが要求されるようになり、同公社によって管理されている福岡高速および北九州高速道路全線を対象として、大地震を想定した流動化時の橋脚基礎の安全性に対して照査を実施した。

検討方法は、道路橋示方書耐震設計編¹⁾（以下、道示と略す）や、高圧ガス保安協会²⁾、首都高速道路公団の調査研究結果³⁾を参考として、最終的には5橋脚に対して

流動化時の変形量を解析的に予測し、その値をもとに保有水平耐力法で安全性を判定した。その際、福岡市の護岸地域の地盤特性を反映させるために、地盤凍結法による不攪乱試料採取、その試料に対する液状化後の残留変形試験などを行った。

本報告は、これら5橋脚における照査方法、地盤物性値の考え方、照査結果について延べ、合わせて、平成17年3月24日に発生した福岡県西方沖地震による被害状況と比較を行ったものである。

2. 照査方法

照査は、道示¹⁾による流動化の検討が必要な橋脚（水際から100m以内、水底高さが5m以上、液状化層厚が5m以上）を抽出後、表-1に示すように3段階で実施した。まず、道示（保有水平耐力法¹⁾）に従って照査を行い、それで照査基準を満足しない場合には、地盤の変形量を求め、その値を用いて照査を実施した。また、この地盤変

表-1 照査方法

検討手法		地盤変形量の求め方	基礎の照査方法	地盤データ
第1段階	道示式	地盤変形量は考慮しない	二次元骨組み非線形解析 (保有水平耐力法) 照査基準: $\delta_F < 2\delta_y^*$	既往データ (建設時の調査データ)
第2段階	簡易法	簡易式 (高压ガス方式) ・ 護岸の形式や規模 ・ 液状化層の分布状況 ・ 液状化層のN値 ・ 護岸からの距離 を考慮した式	地盤変形量のみで照査 照査基準: $\delta_G < 4\delta_y^*$ N.G.の場合 ↓	既往データ (建設時の調査データ)
		残留変形解析 ・ 簡易法による液状化判定 ・ N値を用いた地盤定数	二次元骨組み非線形解析 (応答変位法; 首都高方式) 照査基準: $\delta_F < 2\delta_y^*$	
第3段階	詳細法	地震応答解析+残留変形解析 ・ 液状化強度試験結果 ・ 残留変形試験結果 などを使用	二次元骨組み非線形解析 (応答変位法; 首都高方式) 照査基準: $\delta_F < 2\delta_y^*$	詳細調査 ・ 凍結サンプリング ・ 液状化強度試験 ・ 残留変形試験

* δ_F : 杭頭変位, δ_y : 基礎の降伏変位, δ_G : 橋脚中心位置での地盤流動量

形量の求め方にしても、まずは、高压ガス保安協会の方法²⁾ (以下、高压ガス方式と略す) で簡易的に橋脚位置の地盤変形量を求め、その地盤変形量が照査基準を満たすかどうか判定し、それで基準値を満たさない場合には、残留変形解析で地盤変形量を求め、その値を用いて応答変位法による照査を実施した。なお、この場合の地盤定数はN値による推定値であり、液状化判定も簡易式によるものである。

第2段階までの照査により100基近くあった検討対象橋脚が5基にまで絞られ、その5基を対象に図-1に示すように、より詳細に地震時の地盤変形量を求めるために、地盤調査・試験、及び残留変形解析を行い、その地盤変形量をもとに照査を実施した。具体的には、二次元FEM地震応答解析及び液状化強度試験により液状化抵抗率 F_L を求め、次章に示す残留変形試験を行うことで F_L による変形係数の低下度合いを求め、その結果を用いて二次元静的FEM解析で地盤変形量を求めた (残留変形解析)。そして、その地盤変形量を用いて二次元骨組み非線形解析により応答変位法 (首都高速方式³⁾) で基礎の照査を行った。

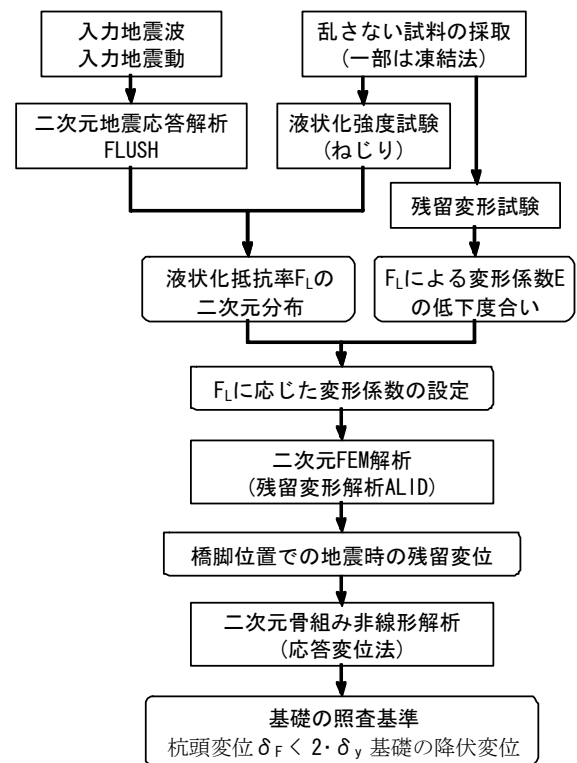


図-1 詳細な照査方法

3. 地盤物性

第3段階の照査を行った5橋脚のうちの1橋脚 (I-280 荒津大橋) の断面を代表としてここに紹介する。

地層状況は、図-2に示すように、3m程度の埋土層Bの下位に沖積砂層As(N=5)が5m、1m程度の薄い沖積粘土層を挟んで洪積砂層Ds(N=15)が8m分布し基盤岩に至るという構成にある。B層、As層、Ds層ともに砂質土層であり、N値も5~15と比較的小さく、地下水位も表

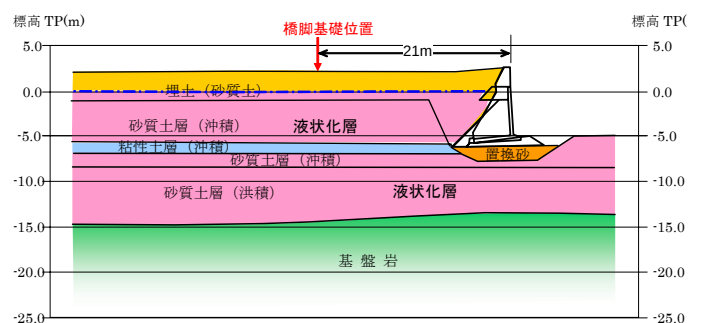
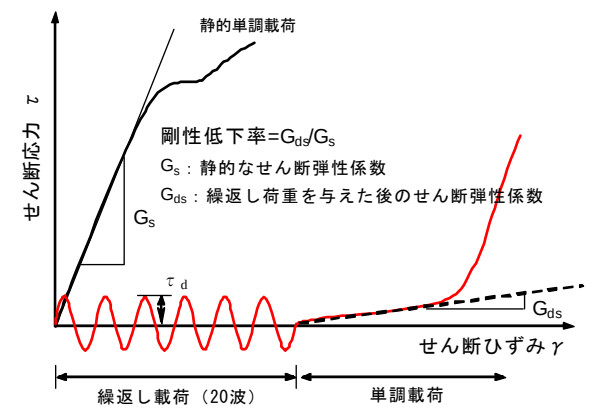
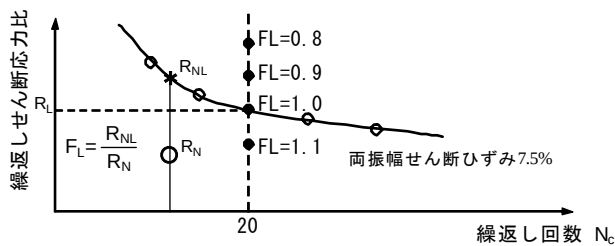


図-2 護岸構造を含めた地層断面



(a) せん断弾性係数の液状化後の低下割合



(b) 試験時拘束圧の変化とFLの関係

図-3 残留変形試験の概念図

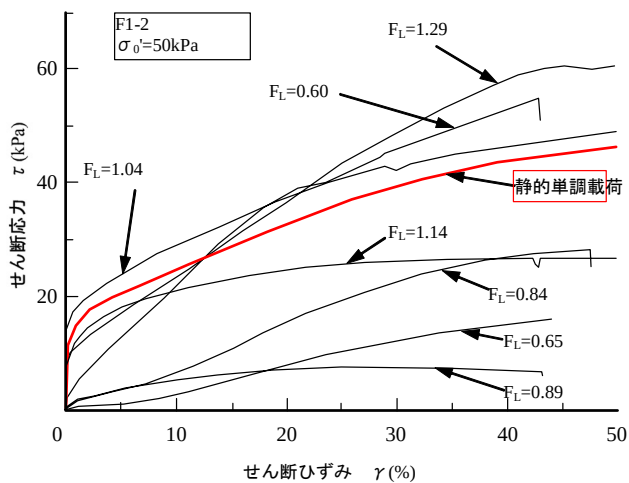


図-4 繰返し載荷前後のτ~γ曲線

層より 2m 付近と高い位置にあるために道示の簡易式¹⁾では、ほぼ地表から GL-17m まで液状化するという結果が得られる。その液状化範囲において、首都高速方式³⁾や既往研究成果⁴⁾をもとに、変形係数を 1/100 に低減して残留変形解析を行うと、地盤変形量（流動量）が大きくなり照査基準値を満足しないという結果が得られる。

ただし、洪積層がたとえ液状化したとしても既往の研究⁴⁾による変形係数Eの低下度合い(1/100)とは異なると予想された。

そこで、乱さない試料の採取を行い、残留変形試験でEの低下度合いを求めることとした。ただし、このDs層

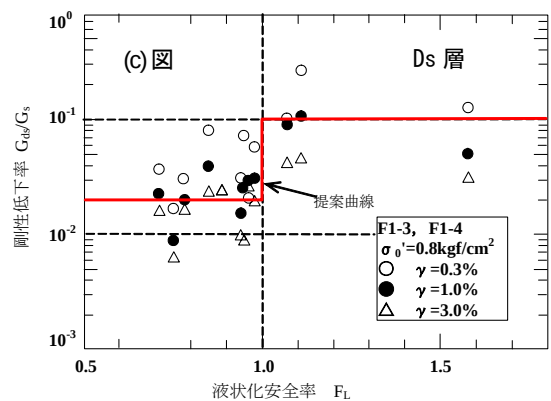
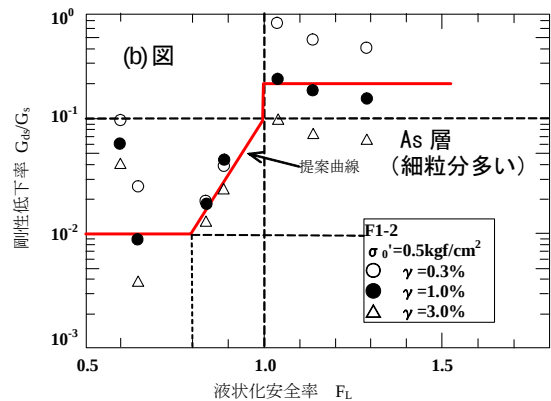
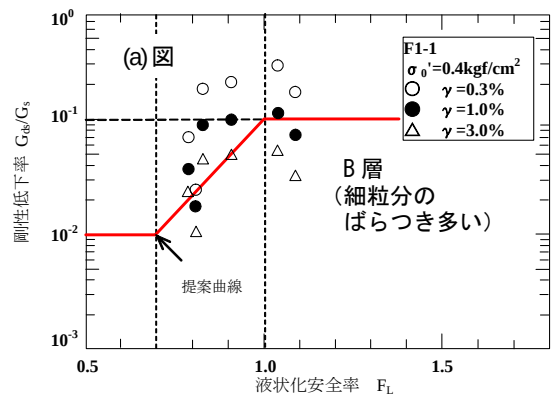


図-5 液状化後のせん断弾性係数の低減率

は小礫（最大50mm、2~15mm主体）を30%程度含むため通常のサンプリングでは採取困難となるので凍結法で採取した。

残留変形試験の方法は図-3に示すとおりであり、同図(a)のように静的なせん断弾性係数Gsと、繰返し荷重を与えた後のせん断弾性係数Gdsより剛性低下率Gds/Gsを求め、同図(b)のように繰返しせん断応力比を変化させて(a)の試験を実施することにより、図-4、図-5のようなFLとGdsあるいはGds/Gsの関係を得るというものである。

繰返し前後のせん断応力とせん断ひずみの曲線は図-4に示すように、FLが小さいほどひずみが小さい領域での曲線勾配(Gds)は小さくなる。そして、剛性低下率Gds/GsとFLの関係を地層毎にまとめたものが図-5の(a),(b),(c)であり、図-5の(c)のDs層ではFLが1以下になると、急激

表-2 液状化判定に用いた動的せん断強度比 R

地層名	R_L	C_w	R	FC
B層	0.254	1.51	0.384	15
As層	0.280	1.59	0.445	30
Ds層上部	0.241	1.47	0.354	3
Ds層下部	0.253	1.50	0.380	3

R_L : 液状化強度比($N_e=20$ 回, $\gamma_{DA}=7.5\%$), FC : 細粒分含有率
 C_w : 道示によるタイプII地震の補正係数

に剛性低下率も小さくなる。そして、図-5(a),(b)のようにDs層に比べてB層、As層ではFLが1以下になっても急激に低下しない結果となっているが、その理由としては表-2に示すように、B層、As層は細粒分が多いことが考えられる。ただし、Ds層は洪積層であることを一因としてか、液状化後の剛性低下率 G_{dr}/G_s の下限値は1/50とB層やAs層に比べると低下幅は小さくなる。

また、液状化強度についても、表-2のようにDs層の液状化強度比 R_L がB層やAs層よりも小さいが、これも細粒分含有率が少ないことが理由として考えられる。

4. 地震応答解析

二次元 FEM 地震応答解析（プログラムは FLUSH）は、残留変形解析時の液状化抵抗率 F_L の二次元分布を求めることを目的として実施した。

地震波形は、警固断層を想定した内陸直下型地震動（道示のタイプII）を考慮して、国土交通省（旧建設省土木研究所振動研究室）より提供された図-6の波形を用いた。この波形は、兵庫県南部地震の際の神戸海洋気象台の地表記録波形を、工学的な基盤面まで地震応答解析で引き戻し、スペクトル調整が加えられたものである（後に道示¹⁾で示されるスペクトル解析用の地震波となったもの）。

また、入力地震動は、基盤からの入力波のみを規定する OUT CROPPING（岩盤露出）方式によるものとして、地震動の大きさは道示¹⁾のタイプII地震動（基盤=I種地盤）より福岡県の地域別補正係数を乗じた震度

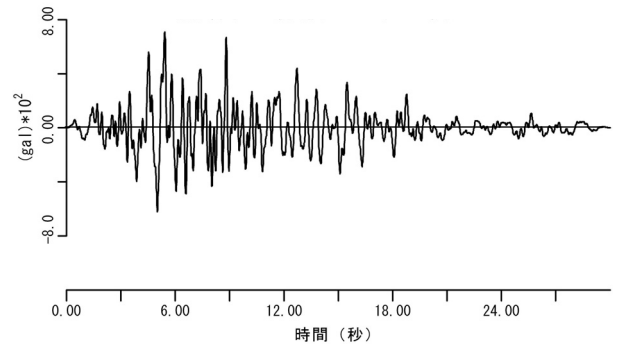


図-6 地震応答解析に用いた波形

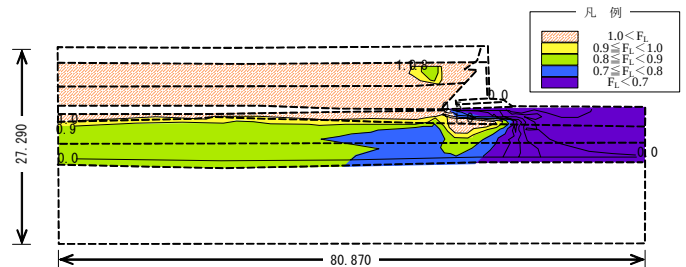


図-7 F_L の分布図

$k_{rc}=0.56$ より、 $2e=549\text{gal}$ とした。

液状化抵抗率 F_L ($F_L=L/R$) は、地震応答解析による最大せん断応力 $\tau_{\max}$ と二次元静的 FEM 解析による鉛直応力 σ_v' より地震時せん断応力比 L ($L=\tau_{\max}/\sigma_v'$) を求め、表-2の動的せん断強度比 R で除して求めた。その F_L の分布図を図-7に示した。

護岸前面では拘束圧が小さいため、 F_L も小さくなっており、護岸の傾斜が予想される一方、護岸背面は液状化しない結果になった。

5. 地震後の残留変形解析

地震後の橋脚位置での地盤変形量（残留変形量）を求めるため、自重法による残留変形解析を行った。自重法は、液状化前後の変形係数を用いて、それぞれ静的な自重解析を行い、液状化後の変形量から液状化前の変形量を差し引くことにより残留変形量を求める方法である。

護岸からの距離	第2段階(簡易法)		詳細法(今回)	
	護岸移動量	地盤変位量	護岸移動量	地盤変位量
21m	93cm	70cm	25cm	16cm

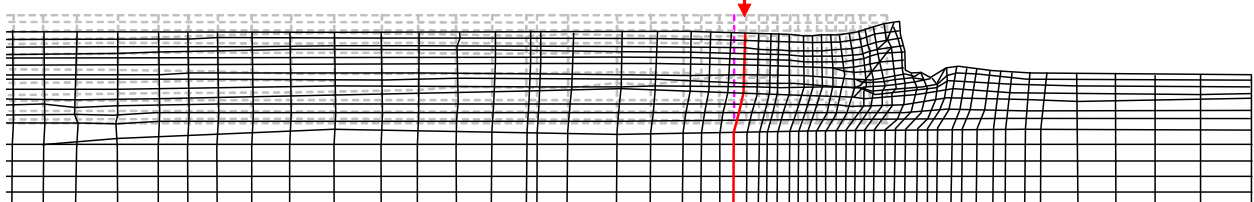


図-8 変形図（残留変形解析結果）

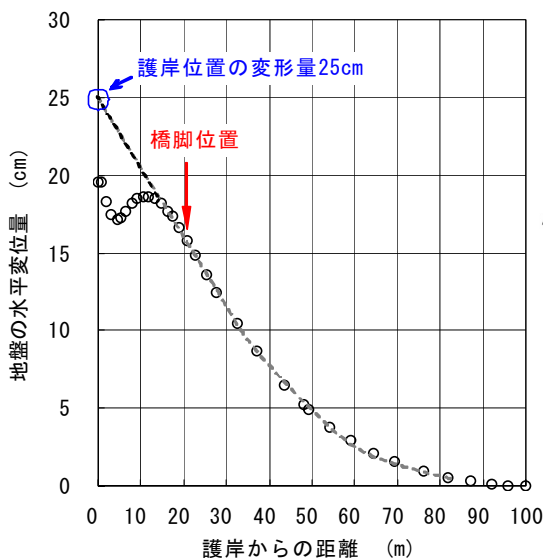


図-9 水平変位と護岸からの距離

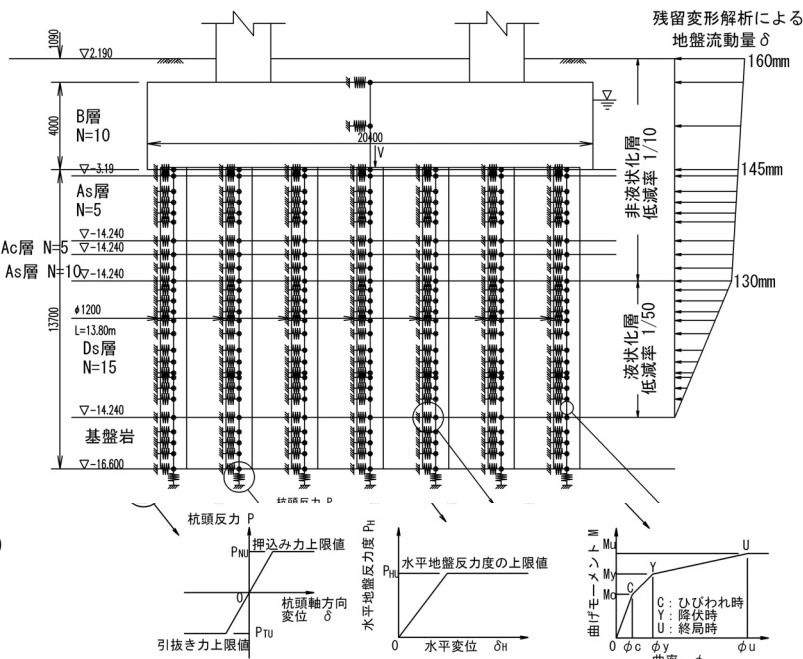


図-10 杭基礎の照査に用いた二次元骨組モデル

(首都高速方式³⁾)。

図-8に変形図を示すとともに、図-9に護岸からの距離と地表面の水平変位量の関係を示した。

図-9のように、護岸の変位量は25cm程度と推定され、橋脚中心位置での地盤変位量は16cmと、第2段階（地盤の物性をN値や既往研究成果⁴⁾より推定）までの解析値(70cm)と比較するとかなり小さくなった。

6. 応答変位法による照査

流動化時の地盤変形量による照査は、残留変形解析で求めた橋脚位置での地盤変位量を地盤バネ k_H を介して杭基礎（二次元骨組み非線形モデル）に流動圧として作用させる応答変位法で行った。

対象橋脚は、 $\phi 1200$ mmの場所打ち杭であり、杭長13.8m、フーチング幅 16.8×24.0 m、杭列 9×7 本(計36本)である。

杭基礎の照査に使用した骨組みモデルおよび地盤変形量を図-10に示した。なお、モデル化には以下の点を考慮した。

- ・ 杭基礎は地盤バネによって支持されたラーメン構造にモデル化
- ・ 場所打ち杭は非線形部材とし、杭体の曲げモーメント～曲率関係を考慮
- ・ 地盤抵抗の非線形性を考慮するため、杭周辺の水平地盤バネの上限値及び杭軸方向の押込み支持力（引抜き支持力）の上限値を考慮
- ・ 地盤の変形量は、水平地盤バネを介して杭体に作用させる（変位漸増法による）

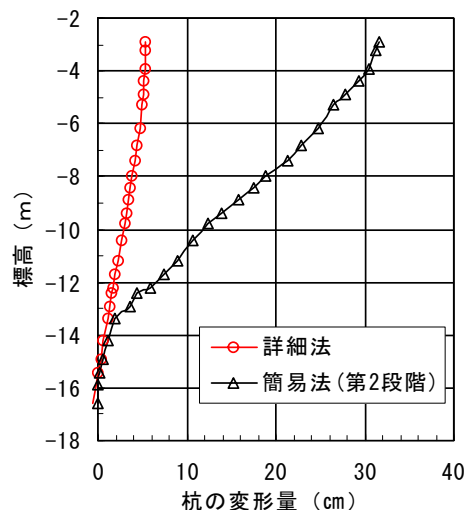


図-11 水平変位と護岸からの距離

なお、照査時には杭基礎モデルにフーチング下面に作用する上部構造の鉛直力（V）を考慮するとともに、地盤反力係数算出時の変形係数等について、液状化層に対しては剛性低下試験結果(Ds層で1/50)で、その上位の非液状化層に対しては1/10に低減した。

照査基準は、道示にしたがって下式のとおりとした。

$$\text{杭頭変位 } \delta_F < 2 \times \text{杭降伏変位 } \delta_y \quad (1)$$

その結果、図-11に示すように杭頭変位は $\delta_F=5.3$ cmと第2段階までの照査結果31.5cmよりもかなり小さくなり、また杭の降伏変位の2倍（ $2 \cdot \delta_y=23.3$ cm）以下となり、照査基準を満足した。なお、その他の橋脚についても同様の照査を行った結果、全橋脚ともに照査基準値を満たした。

7. 福岡西方沖地震での被害状況

平成17年3月20日、福岡県西方沖を震源とするM7.0の地震が発生し、本報告で紹介した福岡都市高速道路のある福岡市では、震度6弱の激しい地震動に襲われ、死者1名、負傷者1,087名の人的被害（H17.4.28現在）が出た他、斜面災害や液状化等の被害が発生した。

その際、本報告で紹介した護岸の側方流動も数多く見られ、写真-1に示すように護岸が5.5mも前面に押し出された箇所もあった。ただし、本報告で紹介した橋脚位置では十数cm程度護岸が動いたものの、橋脚は殆ど動いた形跡は見つかっていない。

福岡県西方沖地震は、警固断層を起源とする直下型地震動であり、CTIビル地下65m(ほぼ基盤)では203gal, CTIビル基礎で489gal, K-NET福岡FK0006地点で276galの地震動が⁹⁾、また、福岡北九州高速道路公社においても、百道で395gal(地表)の地震動が得られた。本報告で行った解析結果のうち、最大加速度分布を示したものが図-12であり、図より地表付近では500gal前後の加速度が得られていることが分かり、さほど遠い値ではないことが伺える。

以上のように、想定した地震動が異なることから、この照査方法が妥当であったとの断定はできないものの、解析結果としての地表加速度、液状化の有無、護岸の変形量などを考えたときに、ある程度の信憑性はあったものと考えられる。

8. さいごに

兵庫県南部地震以前の土木構造物の設計は、一部を除いて70～100年確率で発生する地震を考慮して許容応力度法で実施されており、福岡都市高速道路の橋脚についても同様である。それに対して同地震以降は、護岸付近の橋脚においては、護岸が移動または転倒し、護岸背後の地盤が流動した場合でも安全性を保证(例えば落橋しないなど)することが要求されるようになり、護岸付近の都市高速橋脚基礎を対象として、地震時の地盤の流動化に対する照査を実施した。

その方法として、まず道路橋示方書¹⁾に沿って照査が必要な橋脚を絞り込み、『橋脚の地震時の性能』という観点から護岸の移動量および橋脚位置地盤の変形量に着目し、それらを解析的に求め、その値をもとに応答変位法で照査するという方法を採用した。

また、地盤の変形量を求める際にも、簡易的な方法²⁾では安全側に変形量を大きめに算出するので、この方法で基準値を満足しなかった場合は、より詳細な解析手法



写真-1 福岡県西方沖地震時の護岸の流動化
(最大5.5m押し出されていた)

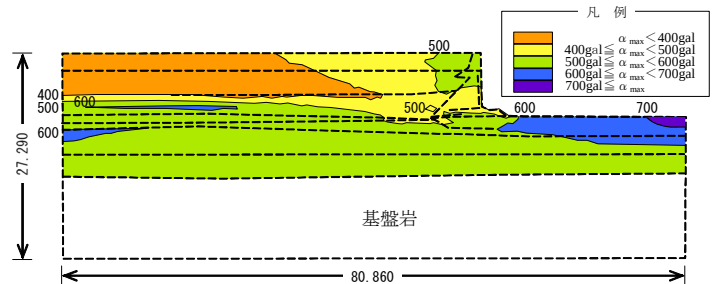


図-12 本報告で行った二次元地震応答解析結果
(最大加速度分布)

を取り入れて地盤の変形量を算出するという段階的な方法とした。

この照査を実施したのが平成11年から12年にかけてであり、このような方法での照査は、今後の構造物基礎設計法の主流となりつつある性能規定型設計法や限界状態設計法への具体的な取り組みの、当時としては第一歩であったと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1998.
- 2) 高圧ガス保安協会：設備等耐震設計指針レベル2耐震性能評価(基礎編)-2次原案-, 高圧ガス保安協会委員会資料, 1992.
- 3) 首都高速道路公団：既設橋梁基礎の流動化に対する耐震性向上設計要領(素案), 地盤流動に伴う高架橋への影響に関する調査研究(その2)報告書, pp167-189, 1997.3
- 4) 安田進・吉田望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp71-89, 1999.
- 5) 地盤工学会福岡県西方沖地震地盤工学会調査団：福岡県西方沖地震における被害調査報告

(2007.07.?? 受付)