



CERS 法群を用いたポートアイランド地盤の非線形挙動分析

佐藤勉¹⁾、中村豊²⁾、齋田淳³⁾

1) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、主任研究員 修士 (工学)

e-mail: tsato@sdr.co.jp

2) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、代表 工学博士

e-mail: yutaka@sdr.co.jp

3) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、主任研究員

e-mail: jun@sdr.co.jp

要 約

神戸の人工島ポートアイランドには強震観測の鉛直アレイが設置され、1995年の兵庫県南部地震とその余震の記録に成功している。数多くの研究者により、これらの記録を用いて、地盤の液状化などの非線形挙動について研究がなされてきた。ここでは、あらたに提案されたCERS法群を、2年半以上に亘る記録に適用して、非線形挙動の詳細を分析してみた。その結果、手法の有効性を確認するとともに、ポートアイランド地盤の詳細な非線形挙動を明らかにすることができた。

キーワード：CERS法群、伝播時間、減衰、地盤、兵庫県南部地震、ポートアイランド

1. はじめに

地盤や構造物の劣化状態をリアルタイムに把握するための手法としてCERS法群が提案された¹⁾。CERS法群は、二点間の波動伝播時間や減衰を逐次算出できることから、対象物の状態変化や健全性についてリアルタイムに把握できるものとして期待される。ここでは、CERS法群の中のC法やR法を、1995年兵庫県南部地震以降、ポートアイランドで記録された波形データに適用して、ポートアイランド地盤の非線形挙動を分析した。

2. CERS法群について

CERS法群は、二点間の波動伝播時間をリアルタイムに処理して計測できる新たな手法として提案された。手法群は、媒質表面と媒質内の二点の観測値から波動伝播時間を計測するC法、表面付近の観測値だけを用いて媒質内の波動伝播時間を推定するE法、リアルタイム相互関係法であるR法、二点間の観測値の差異が最少になる時間差をもって波動伝播時間とするS法から成る。なお、それぞれの詳細は、文献1)を参照されたい。

3. 解析対象

ポートアイランドは神戸市中央区の沖合に神戸市により建設された人工島で、1966年から1981年までの一期工事で436haが埋め立てられている。1987年よりその南側で二期工事が始まり新たに390haが埋め立てられて2010年までに終了している。図1にポートアイランドの衛星写真と地震観測地点を、表1にポートアイランドの地盤情報を示す。ここでは、地表、地下16m、地下32mおよび地下83mで地震動加速度が観測され、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震の本震を含め、数多くの余震の記録に成功している。これらの記録は独立行政法人 港湾空港技術研究所から公開されており、ここでは、そのうち、表2に示す記録群を用いた。なお、地下83mの地震計は本来の方向から少し回転して設置されていることが指摘²⁾されており、ここでは、これに従って、正しい方向に補正したものを分析に用いている。図2に表2の記録波形を繋げたものを示す。丸で囲んだ数字は表2の記録に対応する。左からNS成分、EW成分、UD成分の波形を示し、上から地表、地下16m、地下32mおよび地下83mの波形を示している。縦線はそれぞれの記録の境界を示す。

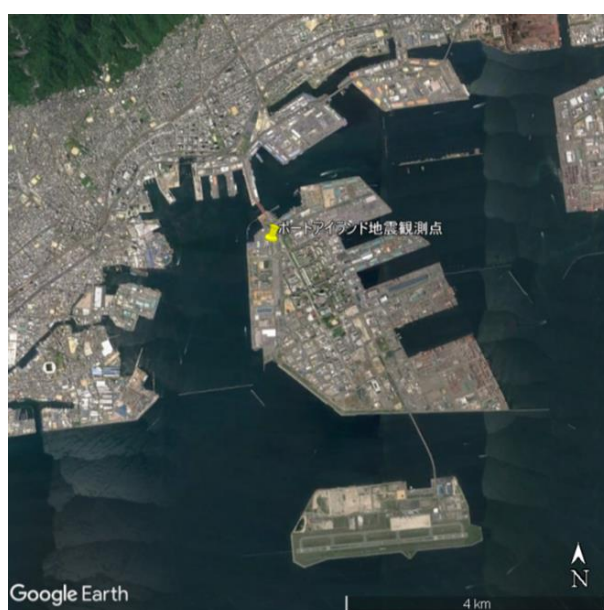


図1 ポートアイランドと強震観測地点

表1 ポートアイランドの地盤情報

Depth (m)			Thicknes	Vp	Vs	seismometer
			m	m/s	m/s	
0-2	sandy gravel	reclaimed	2	260	170	○
2-5	sandy gravel		3	330	170	
5-12.6	sandy gravel		7.6	780	210	
12.6-19	sand with gravel		6.4	1480	210	○
19-27	alluvial clay	sand and clay	8	1180	180	
27-33	diluvial sand	inter-layered	6	1330	250	○
33-50	sand with gravel	stratum	17	1530	310	
50-61	diluvial sand		11	1610	350	
61-79	diluvial clay		18	1610	300	
79-85	sand with gravel		6	2000	320	○

表2 解析に使用したポートアイランドの波形記録一覧

始点	年月日	時分秒(JST)	備考
0秒	1995.1.17	05:46:00	本震ほか ①
357秒	1995.1.17	05:53:00	7分後 ②
513秒	1995.1.17	08:58:00	約3時間後 ③
587秒	1995.1.18	05:25:00	約1日後 ④
711秒	1995.2.18	21:37:00	約1か月後 ⑤
770秒	1995.6.16	07:55:00	約4か月後 ⑥
816秒	1995.10.14	02:04:00	約9か月後 ⑦
885秒	1997.9.7	02:19:00	約32か月後 ⑧

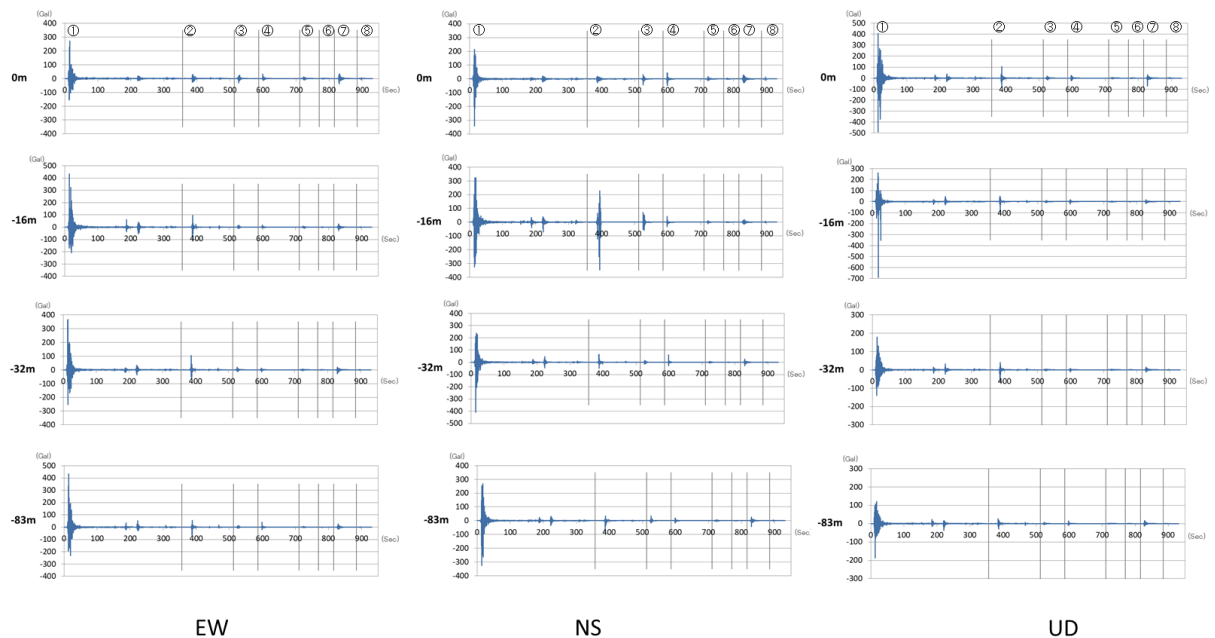


図2 ここでの解析に用いたポートアイランドの記録波形一覧

4. 解析結果と考察

ポートアイランドの記録は兵庫県南部地震の本震で強烈に液状化して、なかなか回復していない様子を示している。その状況をCERS法群により各地震計間の波動伝播時間の時間的推移として定量的に分析した。ここではCERS法群の内、C法とR法を用いて分析したポートアイランド地盤の非線形挙動について述べる。平均化法として指数平滑を用い、その際の半減期は5秒としている。

図3は、方向成分ごとにR法による各観測点間の相互相関係数の変動を示したものである。地表と地下16m（青点）、地下16mと32m（赤点）、地下32mと83m（緑点）および地表と地下32m（紫点）の組合せで相関を見ている。相関が小さいのは、ふたつの波形を記録した地点の間に地盤に異常が生じたか、いずれかの観測機器に異常が生じているか、が考えられる。水平方向（NSおよびEW）をみると、本震ほか①では本震のS波到来時から、地表に絡む相関が下がっており、80秒時点辺りから相関が上がり始めて、140秒時点辺りで最大になっている。つまり、本震直後、表層地盤の液状化により地表と地中観測

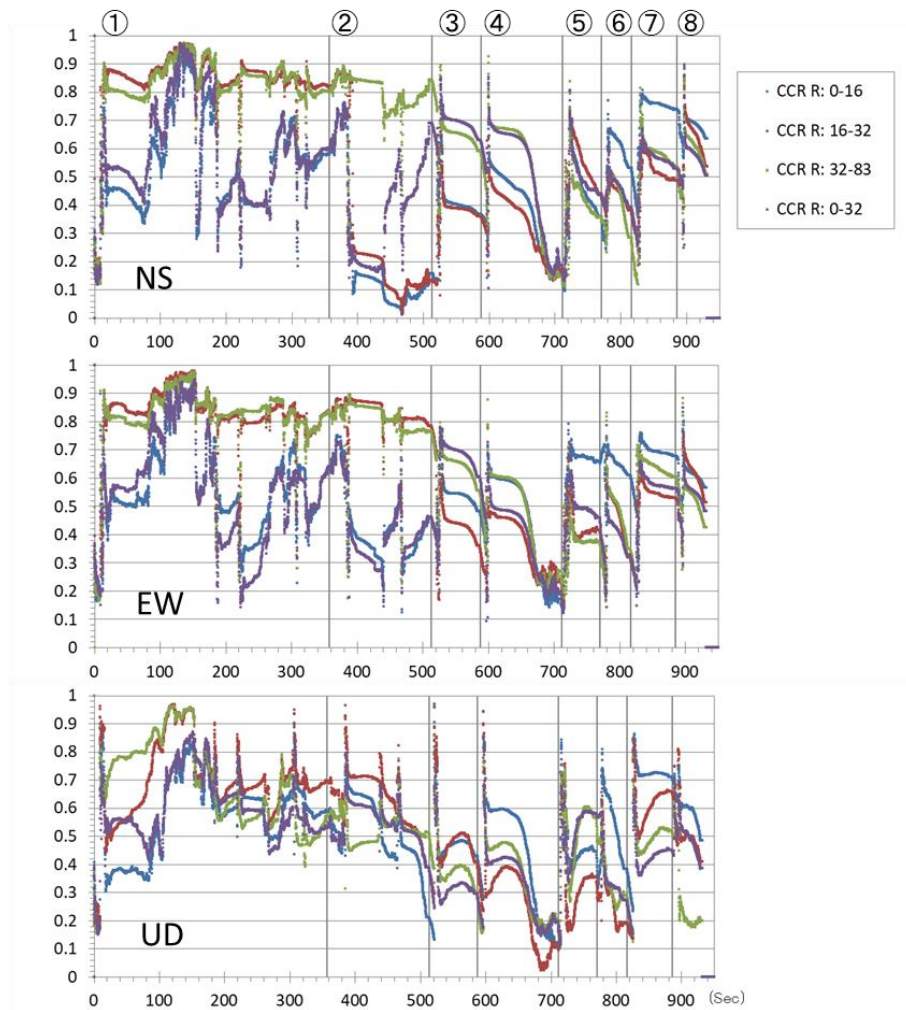


図3 観測点間の相関係数の変動

点の間で相関が低下したが、80秒時点から地盤が液状化から復元し始めていることを示唆している。その後の増減は、余震の発生とともに再び液状化して相関が低下した回復するという経過を示していると推察される。本震波形①の終りから7分後の余震②のS波到来まで地表と地下の波形の相関は0.7を超えるところまで回復している。しかし余震②のS波到来とともに地表との相関は急激に低下している。

NS方向では地表のみならず、地下16mに関係する相関も低下している。EW方向に見られるように、地表と地下16mの相関は、②に含まれる最初の余震のみならず後続の余震でも低下と回復を繰り返しているが、NS方向では、地下16mに関係する相関が下がったままとなっている。地表と地下32mのNS方向の相関は、EW方向で見られるものと同様の低下と回復を繰り返しており、波形②の最初の余震のS波到来とともに、NS方向成分の地下16mの観測機器に異常が生じたものと推測される。この異常は、ここで検討した記録の最後まで、程度の相違はあるものの継続している恐れがあるとともに、波形③のS波到着以後はEW方向にも波及している可能性がある。波形③以後はいずれの相関も低下し、特に波形④の後半では、一時的ではあるが、UDも含めていずれの相関も0.3をかなり下回っている。このように本震後の余震記録でNS成分などに異常が見られるほか、いずれの相関も波形③以後、低下する様子が明らかとなった。

そこで、まず本震後しばらくは波形異常が少ないとみられるEW成分から検討を始める。

4.1 EW方向の波動伝播時間

図4は、EW方向について、C法とR法による観測点間の波動伝播時間の変動を示したもので、図中の青線はボーリング調査結果によるS波伝播時間を表す。これによれば、地表と地下16mの間では、C法とR法による結果がほぼ一致しており、本震記録の間に伝播時間（ボーリング調査データによれば、8.18/100秒）が5倍以上に増加し、伝播速度でみれば1/5以下に、また剛性でみれば1/25以下に低下している。伝播時間は一時的には120/100秒を超えている。

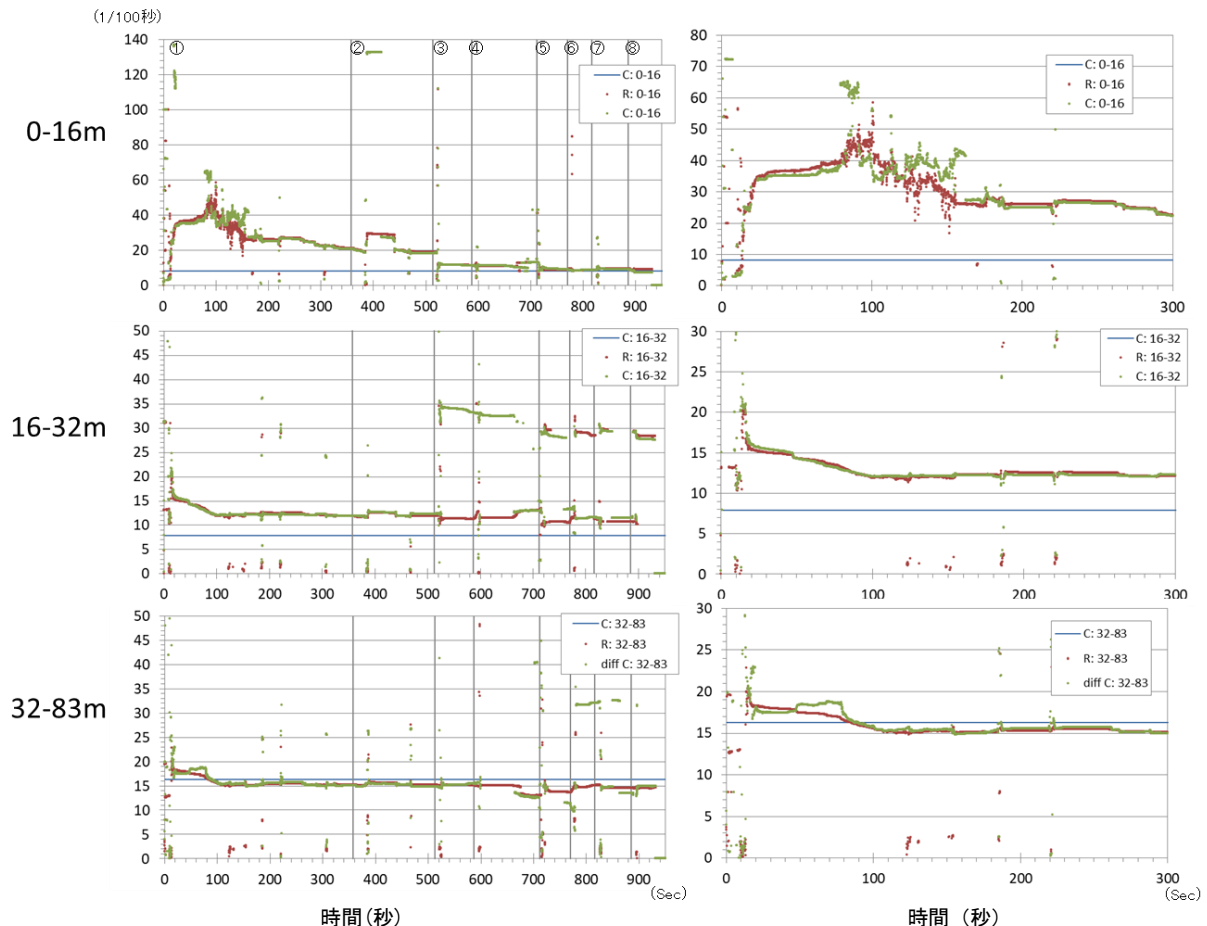


図4 C法とR法による観測点間の波動伝播時間の変動（EW方向）
図中の青線はボーリング調査結果によるS波伝播時間

C法の結果を詳しくみれば、S波到来の13秒時点以後15秒時点までに伝播時間は急激に24/100秒程度まで増大し19秒時点までその値で安定している。20秒時点から23秒時点では120/100秒程度に瞬間的に急増し、24秒時点には34/100程度に戻っている。その後31秒時点で約35/100秒まで増大した後、76秒時点まで約37.5/100秒と安定していたが、その後急激に60/100秒程度まで増大し、90秒時点過ぎには40/100秒弱程度まで戻っている。その後、多少の乱高下の後、160秒時点あたりで当初伝播時間（ボーリング調査結果の8.18/100秒）の3倍程度の25/100秒程度まで回復している。この値が260秒時点あたりまで継続した後、次第に低下し、本震記録の終了（370秒付近）時点では、20/100秒程度まで回復している。その後、次の余震で再び30/100秒程度まで増大した後、440秒時点で20/100秒に、520秒時点（3時間後に対応）で12/100秒（初期値の1.5倍程度）に、段階的に伝播時間は低下し、回復している。その後もゆっくりと回復し、大きな余震で一時的に伝播時間は増大するものの、5か月後の6月にはほぼ地震前の状態に回復している。

地表と地下16mの間のC法による伝播時間が急変し、R法による伝播時間とも大きく乖離するところ（80秒時点から160秒時点など）では、C法で仮定した波動場が成立しておらず、地下16mを通過した波

動が地表に達していないか、地表の波動が地下16mに達していないことを示唆している。すなわちこれらの時点でせん断波が遮断された、すなわち、完全液状化が発生したと推測される。

一方、この間で地表と地下16mの波形の相関は、前述のように回復しており、140秒時点では0.9を超えるまでになっている。これらの現象は一見矛盾しており、解釈上、疑問が残るが今後の課題としたい。

図4に示すように、地下16mと32m、地下32mと83mの間の伝播時間は本震時一時的に増大するものの、概ね100秒時点で旧に復している。ただし、これらの地点間の伝播時間は、ボーリング調査結果とは多少異なり、地下16mから32m間は、調査結果が7.87/100秒のところ、10.5/100秒程度で安定し、また地下32mから83m間は、調査結果が16.28/100秒のところ、14.8/100秒程度で安定している。つまり、地下16mから32mはボーリング調査結果より軟らかく、また地下32mから83m間は硬くなっている。しかしながら、これらの層の伝播速度の和は調査結果とほぼ同じになっており、地下16mと地下83m間の伝播時間としては、ボーリング調査の結果とほぼ等しいものとなっている。

4.2 NS方向の波動伝播時間

図5はNS方向について、C法とR法による観測点間の波動伝播時間の変動を示したもので、図中の青線はボーリング調査結果によるS波伝播時間を表す。これによれば、NS成分についても基本的には、EW成分と同様の変化をしているが、本震による地表と地下16m間の伝播時間の増加は一層著しく、安定的に100/100秒を超えている。

詳しくみれば、13秒時点で概ねボーリング調査結果の8.18/100秒程度であったものが、瞬間的に増大し、20秒時点で100/100秒を超えている。本震後の160秒時点には28/100秒程度まで回復し、その後の経過はEW成分とほぼ同じである。ただし、図6に示すように、7分後と3時間後の余震でNS成分は

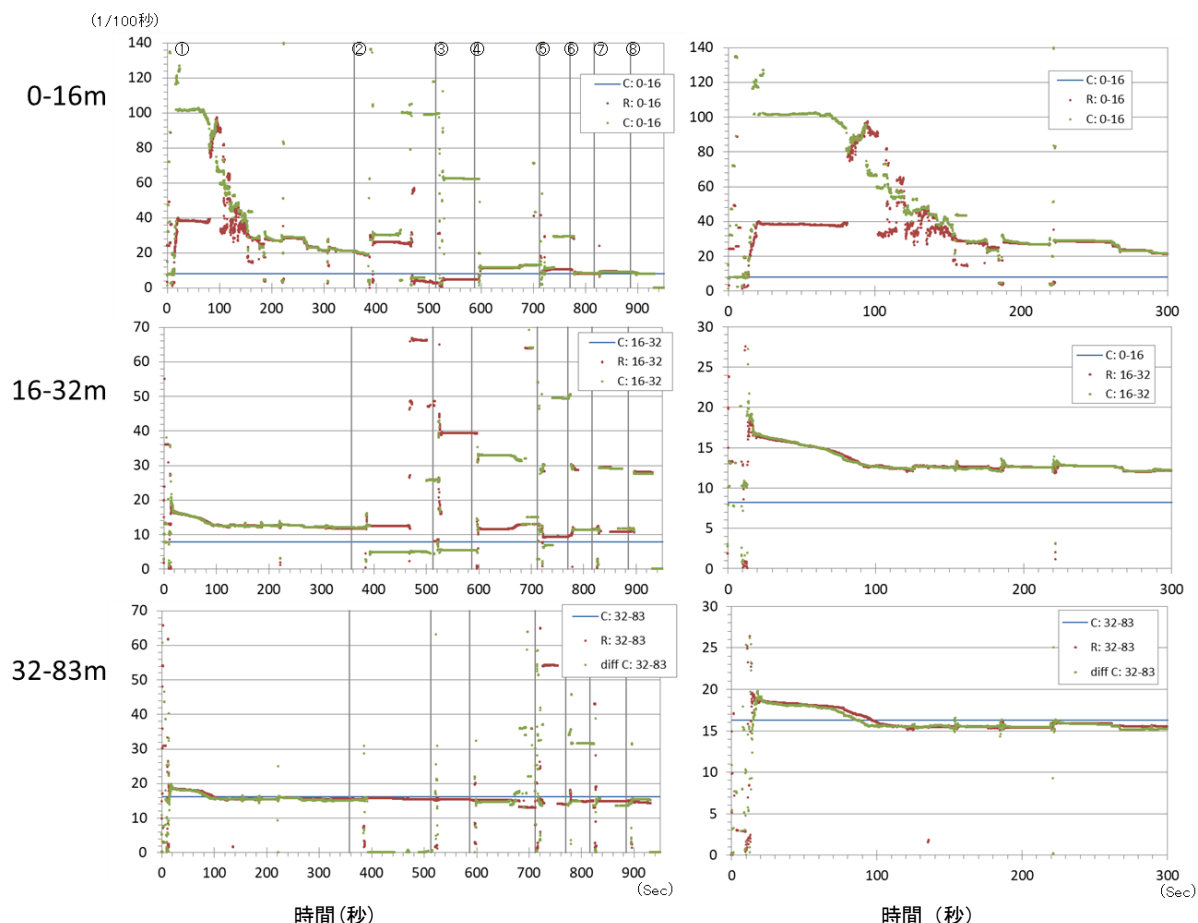


図5 C法とR法による観測点間の波動伝播時間の変動 (NS方向)

図中の青線はボーリング調査結果によるS波伝播時間

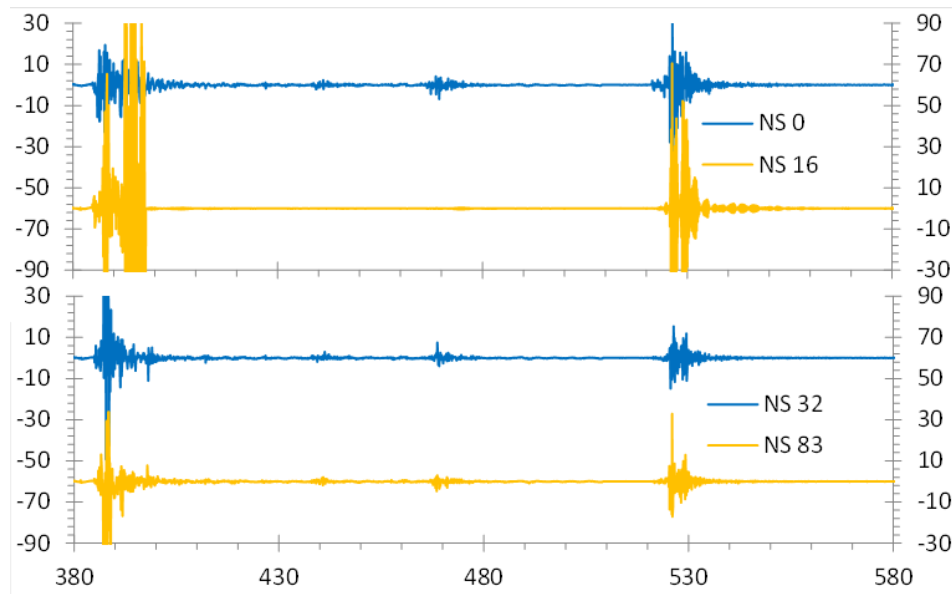


図6 記録波形②と③のNS方向成分波形

減衰機構が破壊されたような異常な記録波形となっているほか、地下16mの波形は400秒～510秒の間、信号が無いように見えるくらい小さい。

本震時のNS成分の伝播時間をC法とR法で比較すると、S波到来の13秒時点以後170秒時点まで両者の伝播時間は大きく乖離している。170秒時点以後については両者とも一致して徐々に低下し、本震記録終了時点では21/100秒程度まで回復している。NS成分については完全液状化の時間が長く、液状化はより激しいものであったと推測される。

4.3 UD方向の波動伝播時間

図7に示すように、上下(Z)成分についても、水平と類似した変化をしている。詳しく見ると、C法による伝播時間は、P波到来時点である9.3秒時点で概ねボーリング調査結果と同じ約2.9/100秒であったものが、P波到来後20秒時点付近まで5/100秒程度に急増し、その後66.3秒時点で5.9/100秒となっている。その後瞬間的に増大して、25/100秒を超えている。その後、160秒時点で8/100秒程度まで低下して260秒時点くらいまで継続している。その後300秒時点までに約6.3/100秒となり、本震記録終了までの約370秒時点では約5.8/100秒まで回復している。その後は大きな余震で一時的に大きくなるものの、順調に低下して、3時間後には3.5/100秒程度まで回復している。そして、水平成分と同様に5か月後の6月にはほぼ地震前の状態に回復しているとみられる。

C法による伝播時間が急変している70秒時点から、R法の伝播時間とも一致するようになる160秒時点までは、水平2成分の状況とも考え合わせると、この間に表層地盤はほぼ完全に液状化したものと考えられる。

4.4 別の視点からの液状化後の回復状況

図4に示すように、今回の場合、C法もR法もほぼ同様な結果となる。ただし、C法では、表層地盤が液状化した後は、情報が地表面に伝わりにくくなるので、液状化層から下の層を解析する場合、液状化層直下の地層をあらたな地表面として解析する必要がある。この場合、液状化層が回復して情報伝達可能になると、誤差が大きくなるので元の地表を基準面とした解析に戻す必要がある。

こうした観点から、地下16mと32mの間の伝播時間について、地表面基準から求めたものと地下16m基準の解析結果を比較することによっても、液状化層より下の情報が地表面に伝わらなくなるくらいの液状化が発生した時点や回復した時点などを大まかに把握することが可能となる。

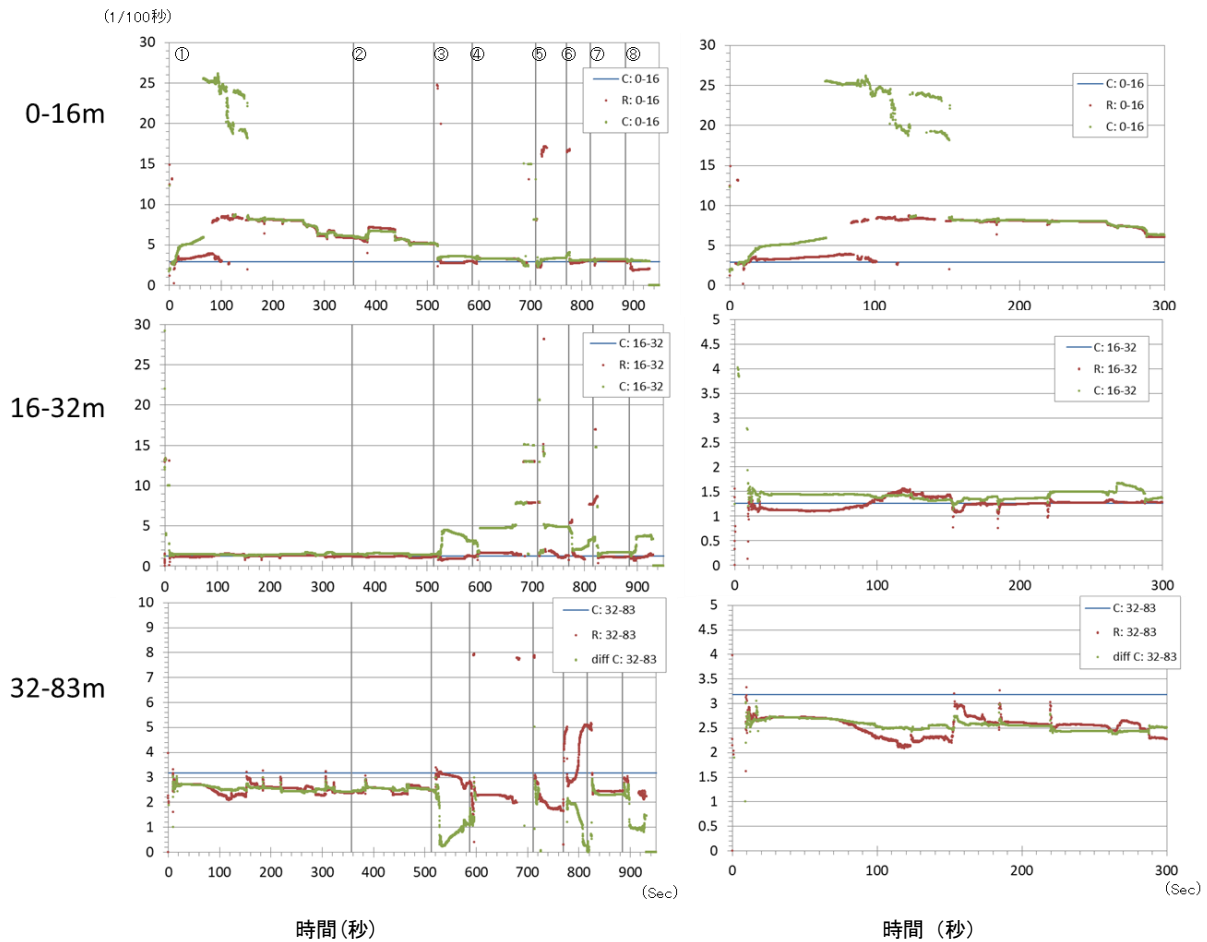


図7 C法とR法による観測点間の波動伝播時間の変動(UD方向)
図中の青線はボーリング調査結果によるP波伝播時間

図8は、地下16mと32mの間の伝播時間について、EW方向の解析結果を示している。これによると、概ね正しい値を示していると考えられるR法(赤点)と地下16mを基準としたC法(緑点)は概ね500秒時点まで一致しており、この辺りまで地表層の液状化は断続的に継続していると思われる。これまでの時点について、地表基準のC法から算定した伝播時間(紫点)を赤点や緑点と比較すると、地下16mの観測点より上の地表層地盤はS波到来直後に液状化し、180秒時点で回復、220秒時点で再び液状化、260秒時点で回復し、そのまま本震記録終了まで継続していることが窺われる。その後390秒時点の余震で再び液状化し450秒時点で回復している。500秒時点以後は、R法による伝播時間は、地下16mを基準とした伝播時間と乖離して、地表を基準にしたC法により算定した伝播時間(紫点)と一致するようになる。

4.5 減衰性状

C法では、伝播時間のみならず減衰性状についても算定することができる。以下、距離減衰について述べる。NS方向波形は少し異常と考えられるので、ここではEW方向成分のみについて検討する。

図9は地表と地下16m、地下16mと地下32mおよび地下32mと地下83mの間の、EW方向成分の波動伝播に伴う距離減衰性状の変化を示したものである。これには、地表を基準に求めた各深度までの減衰から算定したもの(C:0-16、diff0C:16-32、およびdiff0C:32-83)ならびに地下16mを基準に求めた各深度までの減衰から算定したもの(C:16-32、diff16C:32-83)を示している。前述の如く、液状化した地層は情報伝達が不十分と考えられるので、概ね500秒時点を境に前半は地下16m基準のC法を用い、後半は地表基準のC法を用いるのが適当である。

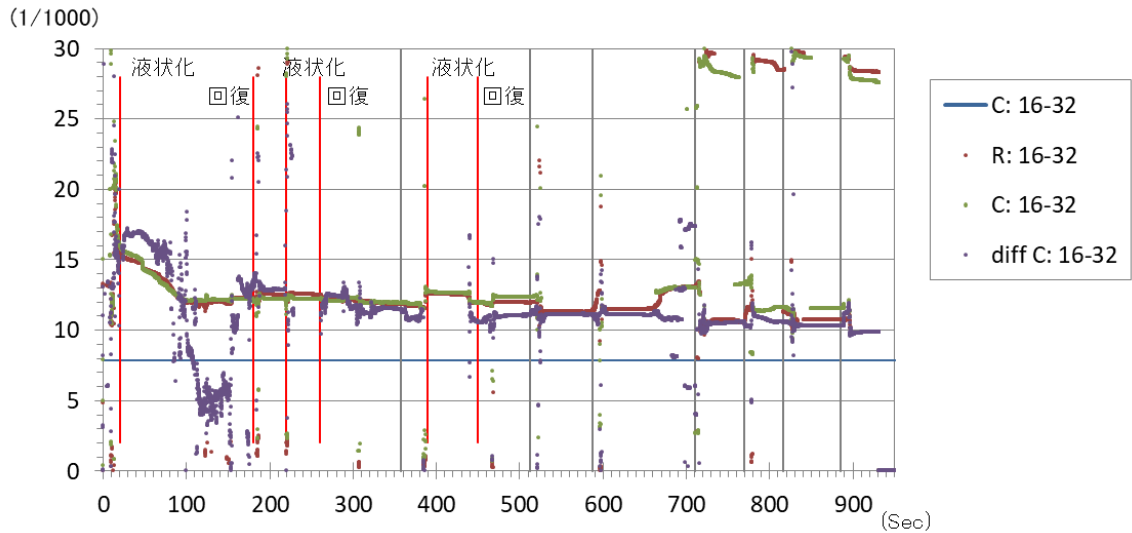


図8 C法（地表基準と地下16m基準）とR法による地下16mと32mの間の波動伝播時間（EW方向）の比較

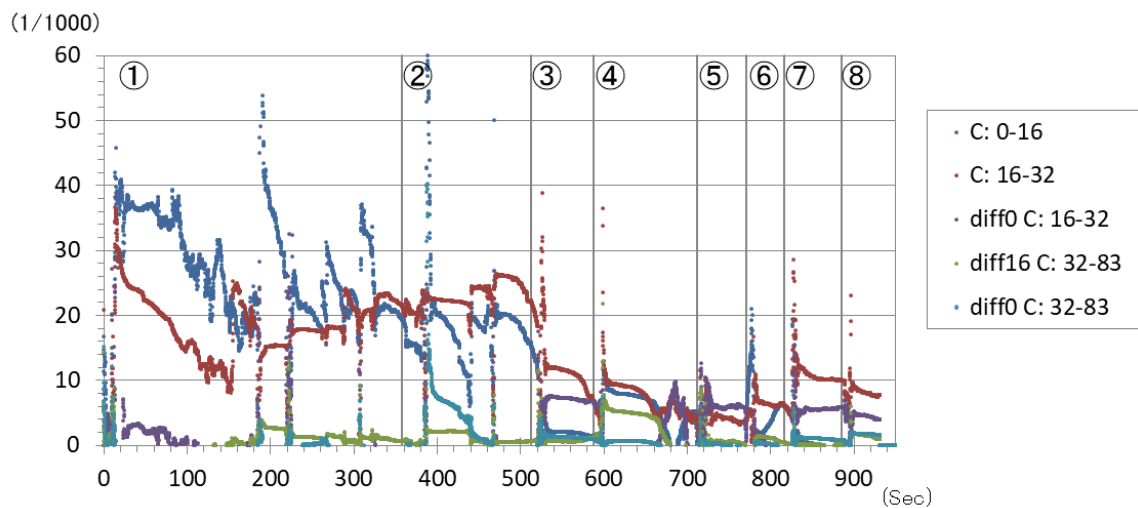


図9 波動伝播に伴う観測点間地盤の距離減衰特性（EW方向）

図9によれば、液化化層（地表-地下16m間）のEW成分の距離減衰は、本震で40/1000（1/m）程度まで急激に大きくなり、60秒時点まで37/1000程度を維持した後、160秒時点で16/1000程度まで減少している。その後、余震が発生する毎に一時的に大きくなるものの、直ちに17/1000程度まで減少することを繰り返す。3時間後の余震以後は、余震で多少大きくなる（10/1000前後）もののその後は2/1000程度まで減少することを繰り返している。

地下16mと32mの間の距離減衰は、地表と地下16mのそれと比べて多少小さいものの、概ね同様の減衰傾向を示す。また地下32mと83mの間の距離減衰は、地下32mより浅い地層の減衰と比べてかなり小さな値となっている。

5. まとめ

ここでは、新たに提案されたCERS法群のうち、C法とR法を用いて、ポートアイランド地盤の非線形

挙動を解析した。その結果、本震のS波到達後、地表と地下16mの間の波動伝播時間が急激に増大して液状化に至ったことが推察され、その後指数関数的に伝播時間は通常の数値まで回復していく様子を詳細に把握することができた。伝播時間のみならず波動伝播に伴う距離減衰の効果も定量的に把握できることを確認した。しかしながら、解釈上の課題も見出されたので、その解決に努力するとともに、今後は、さまざまな対象についてCERS法群の適用事例を報告していきたい。

謝 辞

本研究で用いた強震記録は、独立行政法人 港湾空港技術研究所から提供された「港湾地域強震観測」のデータである。野津 厚博士はじめ関係の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 中村 豊：伝播時間と減衰のリアルタイム算定法群CERSについて、日本地震工学会年次大会講演梗概集、2017（投稿中）。
- 2) M. Sugito, K. Sekiguchi, A. Yashima, F. Oka, Y. taguchi, and Y. Katyo: Correction of Orientation Error of Borehole Strong Motion Array Records obtained during the South-Hogo Earthquake of Jan. 17, 1995, 土木学会論文集, No.531/I-34, pp.51-63, 1996.