

シリーズ「新・強震観測の最新情報」

(第7回) 港湾地域強震観測

港湾空港技術研究所 野津 厚・長坂陽介

はじめに

港湾地域強震観測は、港湾空港技術研究所（以下、当所と言う）の前身である運輸省港湾技術研究所が中心となり1962年に開始され、国の機関や地方自治体が参画して実施されてきた。観測の目的は多岐にわたるが、代表的な目的として以下のようなものが挙げられる。

1. 被害を伴う地震が発生した場合、構造物被害のメカニズム解明や復旧工法選定の参考資料として用いるための強震記録を取得すること。
2. 港湾毎に異なる地震動特性を解明すること。
3. 将来の大地震による揺れの予測に役立つような中小地震の観測記録を得ること。
4. 地盤の地震応答特性を解明すること。
5. 港湾構造物の地震応答特性を解明すること。

港湾地域強震観測の初期の歴史については、1965年から1980年まで運輸省港湾技術研究所で強震観測を担当されていた土田肇さんが「港湾地域強震観測物語 (I) - (V)」を残されている。記録紙の回収に苦労した様子など、当時の興味深いエピソードが語られている。港湾地域強震観測のホームページ¹⁾でも見るできるので^{例えは2)}一読をお勧めしたい。

観測網

観測網は日本全国の海岸線をカバーしており、2019年末の時点では全国61港湾の160地点で観測が行われている(図1)。160という数は、地表と地中に設置されている場合を2つと数えた数である。このうち3地点が当所の所有する強震計であり、残りは国や自治体が所有する強震計である。

観測網には3種類の観測地点がある。1つ目は地表面の加速度を記録するもの、2つ目はボアホールを使用し地中の加速度を記録するもの、3つ目は構造物の地震応答を記録するものである。地表と地中で観測を行っているいわゆる鉛直アレーは43箇所が存在する³⁾。観測地点の地盤条件は当所から定期的に刊行されている強震観測年報⁴⁾の付録DVDもしくは港湾地域強震観測のホームページ¹⁾で確認できる。

観測機器とデータ伝送方式

2019年末の時点では、160の観測地点のうち28地点にERS型強震計が、79地点にSMAC-MDU型強震計が、33地点にOmni型強震計が、6地点にBasalt型強震計が、6地点にCV-374型強震計が、8地点にSAMTAC型強震計が設置されている。これらはいずれもサーボ型加速度計(フォースバランス型または速度帰還型)⁵⁾である。A/D変換はERS型以外は24bitである。各強震計の仕様について詳しくは強震観測年報⁴⁾の付録DVDもしくは港湾地域強震観測のホームページ¹⁾を参照していただきたい。

強震計の大半は通信機能を有しており、観測点から当所へのデータ転送が可能である(160地点のうち153地点)。通信方式は比較的最近までダイヤルアップ方式であったが、地震直後に強震計から当所サーバまで波形データを自動で転送できる新しいシステム(地震動情報即時伝達システムと呼んでいる)が2011年に開発され、2019年末の時点では138地点に導入されている。この新しいシステムの詳細については文献⁶⁾を参照していただきたい。

データの公開

港湾地域強震観測で得られた記録は、1963年の分から強震観測年報として公表されてきた。初期の年報^{例えは7)}では「港湾地域強震観測物語 (IV)」でも紹介されているように、0.01秒間隔で読み取った数字がびっしりと印刷されている。しかし、本稿の第1著者が担当した1999年以降の年報では、電子媒体が比較的気軽に利用できるようになったことを受け、CSV形式のデータを収録したCDまたはDVDを添付している。したがって、ユーザーはこれらのCDまたはDVDからデータを入手できる。

また、これに加え、2002年から港湾地域強震観測のホームページ¹⁾が運営されており、1960年代から今日までの強震記録(数値化されているものはすべて)の波形データをダウンロードすることができる。こちらのデータもCSV形式である。

データの利用にあたってのお願い事項として、港湾地域強震観測は最初に述べたように港湾関係諸機関が共同で実施しているものであり、当所はリーダーシップをとってはいるものの、当所が観測の実施主体であるとは言い難い。したがって、論文等では、当所のデータとしてではなく、

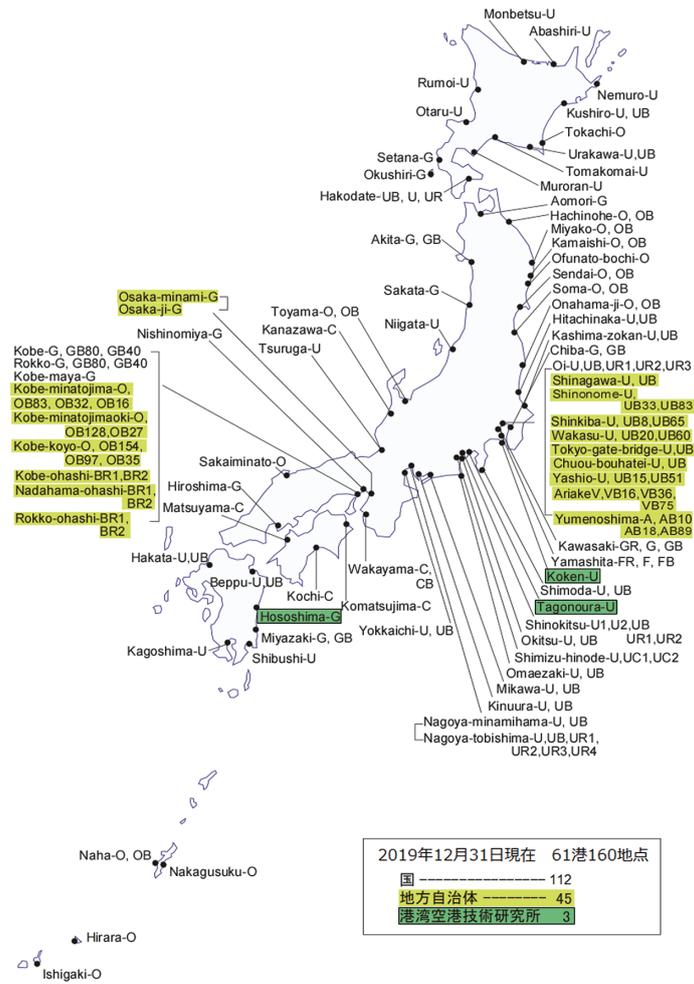


図 1 港湾地域強震観測の実施地点

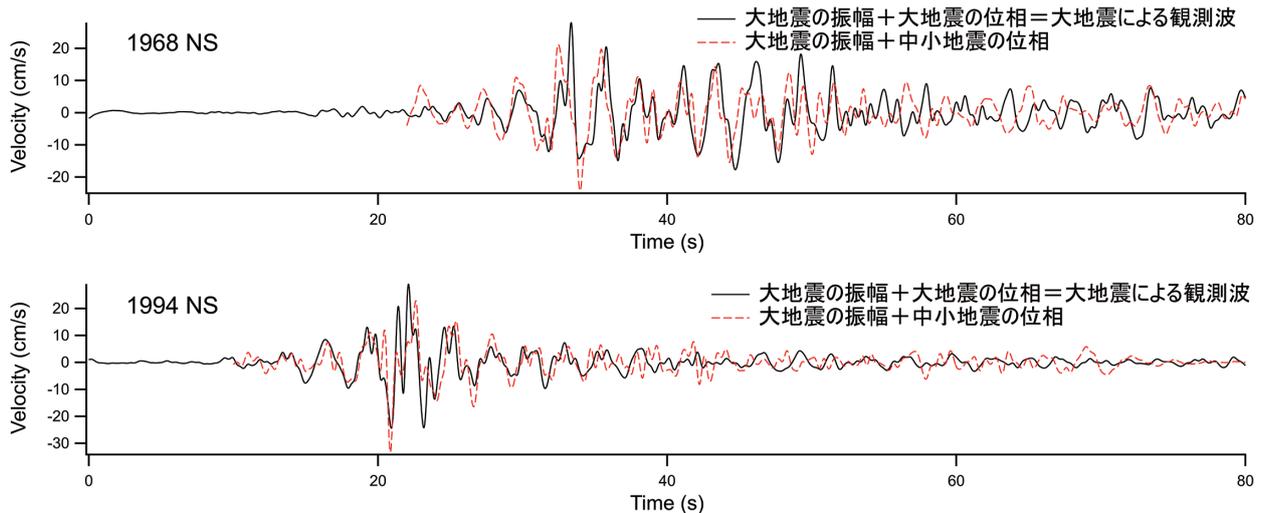


図 2 1968 年十勝沖地震（上）と 1994 年三陸はるか沖地震（下）による八戸港における加速度記録（NS 成分）を積分して速度波形（0.2-2Hz）にしたもの（黒線）。赤線（モノクロの場合は破線）は、これら大地震の記録において、フーリエ振幅はそのままにし、フーリエ位相を同じ地点の中小地震記録のフーリエ位相に置き換えた位相交替波であり、1968 年十勝沖地震の場合は 2003 年 12 月 8 日の地震の位相に、1994 年三陸はるか沖地震の場合は 2004 年 8 月 10 日の地震の位相に、それぞれ置き換えた。これらの地震の震央を図 3 に示す。

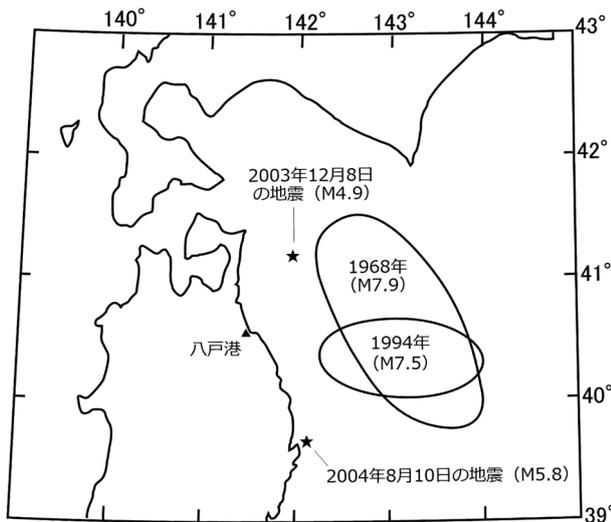


図 3 1968 年十勝沖地震と 1994 年三陸はるか沖地震の震源域⁸⁾ および 2003 年 12 月 8 日の地震と 2004 年 8 月 10 日の地震の震央

港湾地域強震観測のデータとして紹介していただければ幸いである。

印象的な強震記録

港湾地域強震観測では長期にわたり同一地点で観測を行っているため、再来大地震の記録が（ほぼ）同一地点で得られている。ここではその一例として、1968 年十勝沖地震（M7.9）と 1994 年三陸はるか沖地震（M7.5）による八戸港の記録を紹介する。これらの地震は震源域の一部を共有していたとされる⁸⁾。1968 年の記録が得られた「八戸-S」は 1994 年の記録が得られた「八戸事-S」よりも 250 m ほど南であるがサイト特性の観点からはほぼ同一地点と考えて差し支えない。1968 年の記録と 1994 年の記録のフーリエ振幅スペクトルが別な地震の記録とは思えないほど似ていることはこれまで色々な所で紹介してきた^{例えら⁹⁾}。しかし、波形の形状（位相特性）は図 2 上下に黒線で示すように異なっており、1968 年の記録の方が後続位相が発達している。興味深いのは、これら大地震の記録において、フーリエ振幅はそのままにし、フーリエ位相を同じ地点の中小地震記録のフーリエ位相に置き換えた波形を作成すると、大地震の記録とそっくりの波形が得られることである（図 2 の赤線（モノクロでは破線））。これは大地震と中小地震がフーリエ位相特性を共有していることを意味する。ただし、どのような中小地震記録でも良いわけではなく、1968 年十勝沖地震の場合は 2003 年 12 月 8 日（M4.9）の地震の位相に、1994 年三陸はるか沖地震の場合は 2004 年 8 月 10 日（M5.8）の地震の位相に、それぞれ置き換えた場合にそっくりな波形となることが確認できた。

大地震と中小地震の規模は全く異なっており、フーリエ振幅は当然ながら全く異なっている。それに関わらず、フーリエ位相特性が類似していることは興味深い。フーリエ位相特性の類似は、ここに示す周波数帯域（0.2-2Hz）において、大地震の震源断層の破壊過程が位相特性に対して決定的な影響を及ぼしていないことを意味する。海溝型大地震による強震動予測のための震源のモデル化においてはこのような特性を考慮すべきである。一方、上述のフーリエ位相特性の類似は、大地震と中小地震が伝播経路特性とサイト特性を共有していることを意味するだろう。2003 年 12 月 8 日の地震は八戸港よりも北で、2004 年 8 月 10 日の地震は八戸港よりも南で発生している（図 3）。したがって、1968 年と 1994 年の地震は、震源域は重なっていても、強震動を生成した領域は異なっていたとも考えられる。

いずれにしても、港湾地域強震観測のデータを活用することで、このような様々な検討が可能となる。

おわりに

1968 年十勝沖地震による八戸港の記録は何度か数値化が行われており、最も新しいものとしては翠川・三浦¹⁰⁾によるものがある。なお、紙幅の関係で紹介できなかったが、1983 年日本海中部地震による秋田港の記録は、液状化予測・判定手法の開発と検証に用いられ¹¹⁾、その後の設計実務に大きな影響のあった記録であった。また、1993 年釧路沖地震による釧路港の記録は、サイクリックモビリティが実験室だけでなく実地盤でも生じる現象であることを印象づけた記録であった¹²⁾。

強震観測データは地震時の行政機関による対応、被災原因の究明、施設整備の際の設計地震動の設定などに必要不可欠であることから、今後も、いつ発生するかわからない大地震に備えて、観測網を適切に維持していくことを心がけたい。

参考文献

- 1) 港湾地域強震観測ホームページ, <https://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>
- 2) 土田肇, 港湾地域強震観測物語 (I), <https://www.eq.pari.go.jp/kyosin/doc/story/story1.pdf>.
- 3) Nozu, A. and Y. Nagasaka, 2018, Borehole vertical arrays in Japanese ports, *Proc. 16th European Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 12175.
- 4) 長坂陽介・野津厚, 2019, 港湾地域強震観測年報 (2017), 港湾空港技術研究所資料, No. 1356.
- 5) 木下繁夫, 1998, サーボ型地震計, *地震*, **50**, 471-483, https://doi.org/10.4294/zisin1948.50.4_471.

- 6) 若井 淳・野津 厚・菅野高弘・長坂陽介, 2015, 港湾地域強震観測におけるデータ伝送方法の改良—地震動情報即時伝達システムの開発—, 港湾空港技術研究所資料 No. 1310.
- 7) 土田 肇・山田通一郎・倉田栄一・須藤克子, 1968, 港湾地域強震観測年報 (1963・1964), 港湾技研資料, No. 55.
- 8) 永井理子・菊地正幸・山中佳子, 2001, 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究—1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較—, 地震2, **54**, 267-280, https://doi.org/10.4294/zisin1948.54.2_267.
- 9) 野津 厚, 2019, 土木分野における設計入力地震動—特にサイト波について, 第47回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 65-74.
- 10) 翠川三郎・三浦弘之, 2010, 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化, 日本地震工学会論文集, **10**, 12-21, https://doi.org/10.5610/jaee.10.2_12.
- 11) 井合 進・小泉勝彦・土田 肇, 1986, 粒度とN値による新しい液状化予測法, 港湾技術研究所報告, **25**, 125-234.
- 12) Iai, S., T. Morita, T. Kameoka, Y. Matsunaga and K. Abiko, 1995, Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-oki earthquake, *Soils and Foundations*, **35**, 115-131, <https://doi.org/10.3208/sandf1972.35.115>.

(第8回) 国土技術政策総合研究所の土木構造物の強震観測

国土交通省国土技術政策総合研究所 石井洋輔・片岡正次郎

はじめに

国土交通省国土技術政策総合研究所(旧建設省土木研究所)による土木構造物の強震観測は、昭和33年(1958年)に開始された¹⁾。その後、建設省土木研究所(以下、土研)は強震観測網の整備拡充のため、昭和35年(1960年)に「構造物と地盤に対する強震計配置計画」を立案のもと観測が拡大した²⁾。そして、昭和39年(1964年)新潟地震が発生し、地震被害の解明に強震記録が大きく貢献したことが契機となり、土研を中心として建設省で強震計の配置計画を策定し²⁾、土研が強震記録を蓄積する体制を構築した。土研の強震計設置に対する技術指導の下、地方建設局のほか北海道開発局、建設省関係公団及び地方自治体で土木構造物の強震観測網の拡充が行われた²⁾。

国土技術政策総合研究所(以下、国総研)では、その施策を引き継ぎ、公共土木施設の耐震設計技術の向上などを目的とし、全国の堤防、堰などの河川構造物および橋などの道路構造物において強震観測を行ってきた。これまでに実際に発生した地震の際に多くの観測記録が得られている。これらの観測記録は、土木構造物の耐震性能照査指針などをはじめとした各種設計基準に反映され、土木構造物の耐震設計技術の向上に寄与³⁾するとともに、ウェブサイトなどを通じて情報提供がなされてきた。

土木構造物ではダム⁴⁾、港湾地域⁵⁾、砂防施設等でも強震観測が行われているが、以下では筆者らが観測計画に関わってきた河川・道路構造物の強震観測を中心に述べる。

現在の観測状況

令和2年(2020年)3月31日時点で、河川構造物51箇

所、道路構造物24箇所が強震観測が実施されている。現在は、機器の保守・管理を継続するとともに、道路橋全体の挙動データの取得が可能なモニタリングシステムを開発し、従来観測をしていた地点で更新を順次進めているところである。

また、土木構造物の強震観測の他、地震の発生機構、伝播経路、局所的条件が地震動特性に及ぼす影響の解明を目的とした、高密度強震観測⁶⁾も行っている。現在は相良、焼津、沼津、松崎、幕張・習志野、館山、小田原、神戸の8地区の全76地点で観測している。

河川・道路構造物の強震観測と高密度強震観測の観測点分布図を図1に示す。

強震観測機器および収集方法

河川構造物の強震観測は、一つの構造物に対し、構造物の複数箇所および耐震設計において基盤層とみなす地盤($V_s=300\text{m/s}$ 程度以上)で一体観測している。観測は、地震によるトリガ方式で、100Hzサンプリングで3成分(構造物の軸方向、軸直角方向、鉛直方向)の加速度を記録している。また、液状化層に間隙水圧計を合わせて設置しているのが特徴である。観測された記録は、現地にある収録装置のCFカード等に保存され、観測記録の回収を現地で実施している。時刻校正はGPSを用いている。

道路構造物の強震観測は、構造物の複数箇所にバッテリー駆動の小型センサを設置し、無線通信で記録の収集を行うことで全体系の挙動を観測している(図2)。観測は、100Hzサンプリングで3成分(構造物の軸方向、軸直角方向、鉛直方向)の加速度を記録している。観測した記録

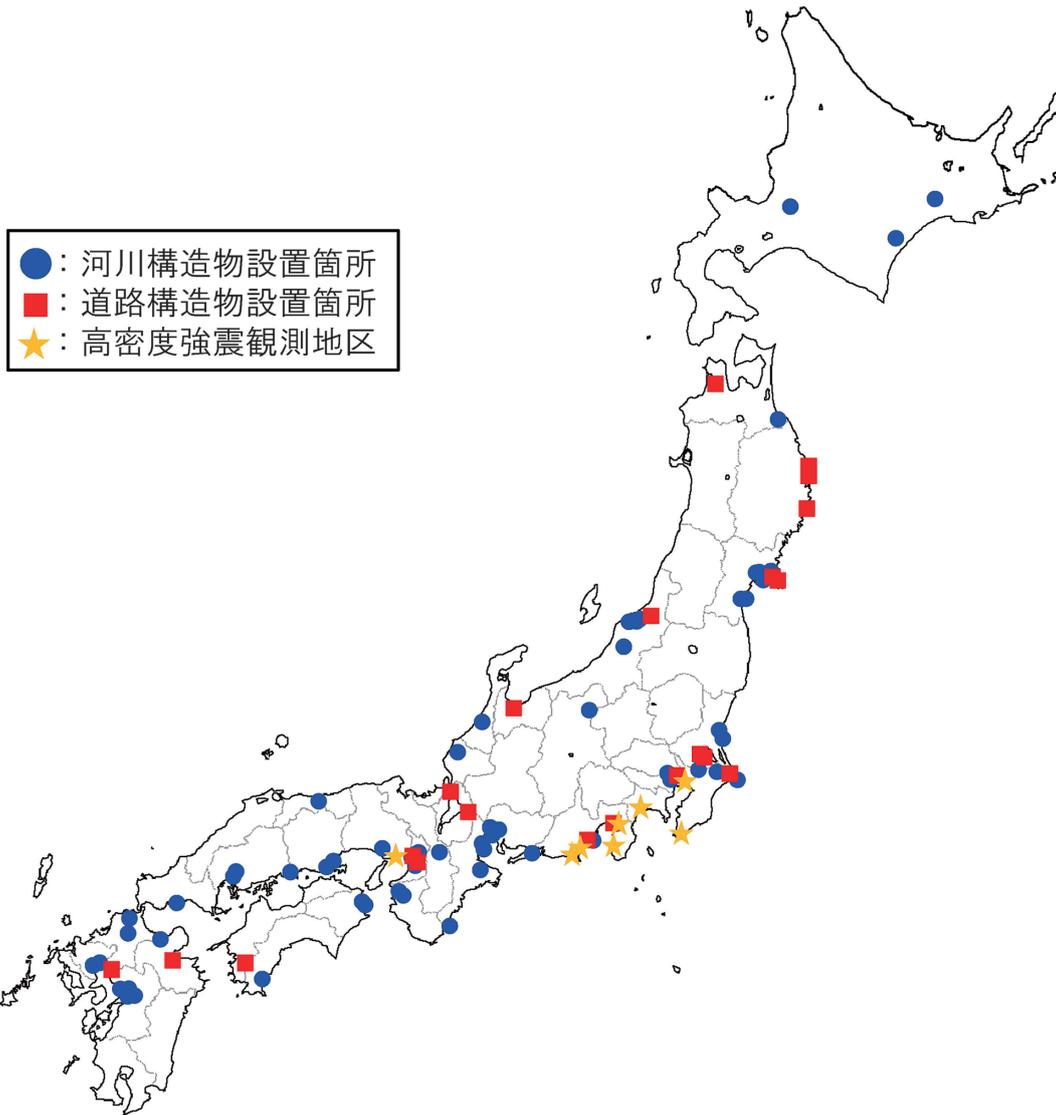


図 1 国土技術政策総合研究所の河川・道路構造物等の強震観測点分布図（令和 2 年 3 月 31 日時点）

は、リアルタイムの連続記録として現地の受信機に無線通信で集約され、受信機からクラウドサーバに送信される。なお、観測記録は、リアルタイム記録と地震によるトリガ方式の 2 パターンで保存される。時刻校正は GPS を用いている。

高密度強震観測は、1 箇所あたり 3 つ程度の深度で同時観測している。観測は、地震によるトリガ方式で、200 Hz サンプルングで 3 成分（NS, EW, UD）の加速度を記録している。観測された記録は、現地にある収録装置の CF カード等に保存され、観測記録の回収を現地で実施している。時刻校正は GPS および NHK の時報を用いている。

回収した観測記録は、国総研のデータベースに保存し管理している。

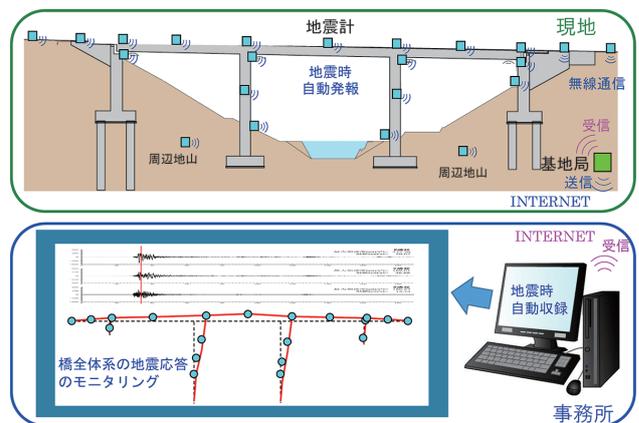


図 2 道路構造物全体系の地震時挙動の観測（図は道路橋の例）

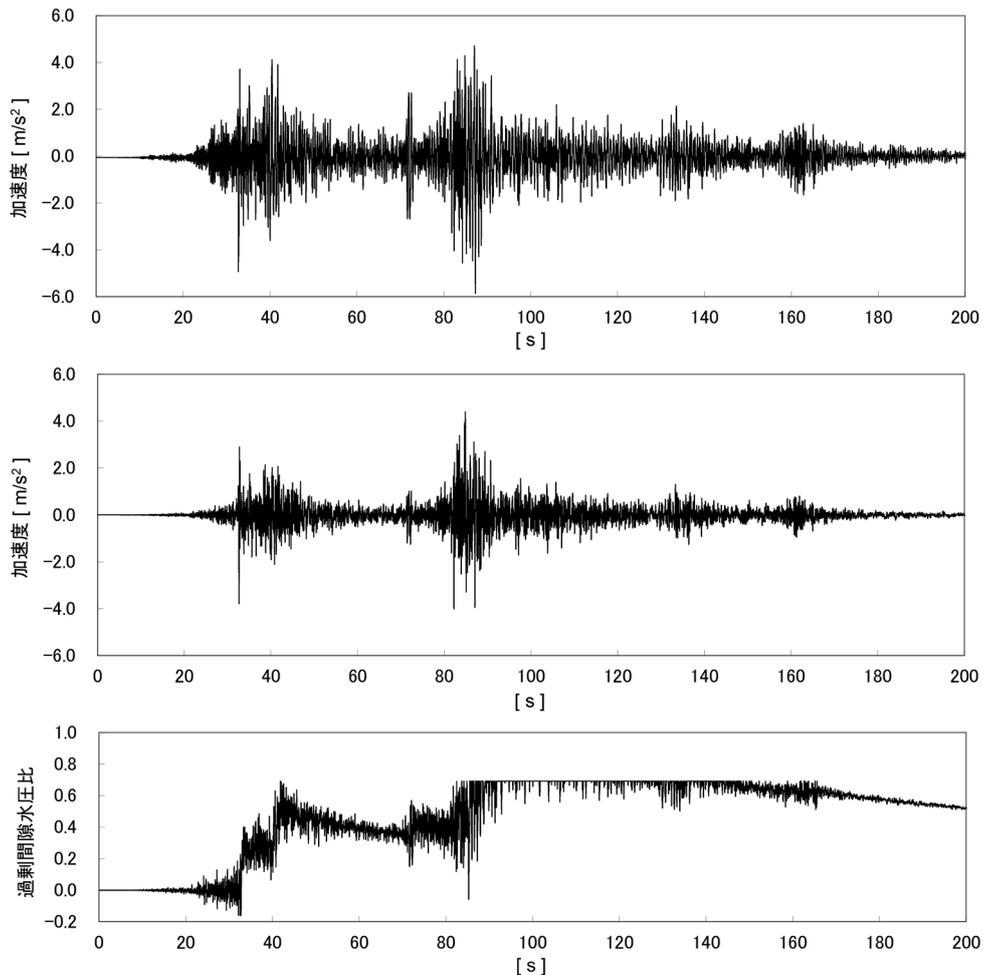


図3 東北地方太平洋沖地震の際に鳴瀬川の河川堤防で得られた観測記録
(上段 堤防天端の加速度, 中段 基盤層の加速度, 下段 液状化層の過剰間隙水圧比)

データ公開

観測記録は国土技術政策総合研究所資料⁷⁾でデータを公開している他、一部は国総研道路地震防災研究室のウェブサイト⁸⁾にアップロードしている。また、その他の観測記録については、メールアドレス (nil-jisin@mlit.go.jp) に問合せをいただき、非営利として活用すると判断できる場合にデータの提供を実施している。

顕著な記録の例

ここでは、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の際、鳴瀬川の河口より約800m上流に位置する河川堤防(宮城県東松島市)で得られた加速度記録および間隙水圧記録を紹介する。観測された記録を図3に示す。図3は堤防天端、基盤層の加速度記録(NS方向)および液状化層で観測された間隙水圧記録より過剰間隙水圧比を計算した結果である。

加速度波形は、基盤層に対して、堤防天端での観測記録が大きくなっている。また、過剰間隙水圧比は、加速度波

形のピーク時と対応していることが分かり、過剰間隙水圧については1回目のピークで生じた水圧が完全に消散する前に2回目のピークを迎えたことで、計測範囲を超える領域まで数値が上昇している⁹⁾。この観測記録は、東北地方太平洋沖地震の際の過剰間隙水圧の再現検証ができる貴重な記録であり、河川堤防の液状化対策の基準策定に貢献している。

なお、間隙水圧の記録が初期に設定された計測範囲を超えており、見るたびに計測範囲の設定を反省させられるものでもある。この観測施設は津波の浸水で観測不能になり、堤防の復旧工事の影響で機器が撤去され、現在はもともとの設置位置の対岸に移設されている。

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震では、この記録の他、約10箇所の土木構造物で強震観測記録が得られている⁷⁾。開北橋(宮城県石巻市)周辺地盤では1978年宮城県沖地震の強震観測記録も得られており、これら2つの地震の揺れが同一地点で得られた貴重な記録となっている。

おわりに

国総研の土木構造物の強震観測は、全国の地方整備局等の施設担当者によって支えられている。土木構造物の観測データは、構造物の耐震設計基準の高度化に貢献してきた。引き続き観測を行うとともに、観測方法も新技術を踏まえて見直していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 川島一彦, 2014, 地震との戦い なぜ橋は地震に弱かったのか, 鹿島出版会.
- 2) 建設省土木研究所, 1982, 土木構造物に対する強震観測, 土木研究所資料, 第 1734 号.
- 3) 石井洋輔・片岡正次郎, 2017, 道路橋における強震観測の耐震設計基準への貢献と今後の展望, 第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 263-270.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 2013, 国土交通省所管ダムの地震動計測装置, 国土技術政策総合研究所資料, No. 733.
- 5) 国土交通省港湾局ウェブサイト, 港湾地域強震観測, <https://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>
- 6) 建設省土木研究所, 1998, 土木研究所における新しい高密度強震観測施設, 土木研究所資料, No. 3567.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 2013, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による強震記録, 国土技術政策総合研究所資料, No. 726.
- 8) 道路地震防災研究室ウェブサイト, <http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/index.htm>
- 9) Unjoh, S., M. Kaneko, S. Kataoka, K. Nagaya, and K. Matsuoka., 2012, Effect of earthquake ground motions on soil liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol. 52, No. 5, pp. 830-841, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.006>.