

実大重力式岸壁の地震時挙動計測

FIELD OBSERVATION OF THE BEHAVIOR OF LARGE-SCALED QUAY WALLS DURING EARTHQUAKE

笹島隆彦¹・梅沢信敏²・三浦均也³・大塚夏彦⁴・菅野高弘⁵

Takahiko SASAJIMA, Nobutoshi UMEZAWA, Kinya MIURA, Natsuhiko Otsuka, Takahiro SUGANO

¹正会員 工学 国土交通省 北海道開発局 函館開発建設部 (〒040-8501 北海道函館大川町 1-27)

²正会員 工学 独立行政法人 北海道開発土木研究所 港湾研究室 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1-3-1-32)

³正会員 工博 豊橋技術科学大学 建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯字雲雀ヶ丘 1-1)

⁴正会員 工博 株式会社 北日本港湾コンサルタント 技術部 (〒003-0029 札幌市白石区平和通り 2)

⁵正会員 工博 独立行政法人 港湾・空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

The project for the field observation of the behavior of quay walls at West District of Kushiro Port, Hokkaido, Japan is introduced. Two caissons with the same dimension were prepared and the backfill ground of the one was treated with sand compaction piles against liquefaction; the backfill ground of the other was not treated. Accelerometers, velocimeters, pore water pressure cells, and earth pressure cells were installed for the observation of the behavior of the quay walls, that is the caissons and backfill grounds. It is planned that the behavior of the quay walls during construction process and earthquake vibrations are observed with special attention to the effect of liquefaction of backfill ground.

In this paper the test site of this project and the outline of the observation system are introduced. And a result of a verification test on the system of measurement is presented.

Key Words : gravity type quay wall, in-situ observation, earthquake, earth pressure,

1. まえがき

大規模な地震が発生するたびに港湾地域では広範囲にわたる埋立地盤が液状化し、種々の港湾施設に甚大な被害を生じてきた。岸壁、特に重力式岸壁では背後の埋立地盤の液状化に関連した被害が、ケーソン迫出し、沈下、傾斜、背後地盤との間の段差という形式で頻繁に見られる。1993年・94年に相次いで発生した釧路沖地震と北海道東方沖地震でも釧路港ではいくつかの重力式岸壁に大きな被害が発生した。しかし、同港における同様な水深と地盤条件で同じような設計断面を有する岸壁においては背後地盤に液状化対策を施した岸壁だけが被害を免れ、地震後も機能を維持することができたという事実も明らかになった¹⁾。このことは、地盤の液状化によって岸壁に作用する地震時土圧のメカニズムが異なることを示しており、慣性力と動的土圧の相対的な作用が液状化発生の有無によって異なることが室内の模型実験でも確認された²⁾。さらに、震度法にとらわれない力学原理に基づき、液状化対策の効果を取り入れたより合理的で経済的な耐震設計を確立することが可能であることを示唆している。

このような経緯を受けて、北海道釧路港西港区第

4埠頭では実物大の試験岸壁を設置し、地震時の挙動観測を開始した。このプロジェクトの目的は、地震時の挙動を詳細に観測するとともに、観測結果の分析により、合理的な地震時土圧算定法・耐震設計

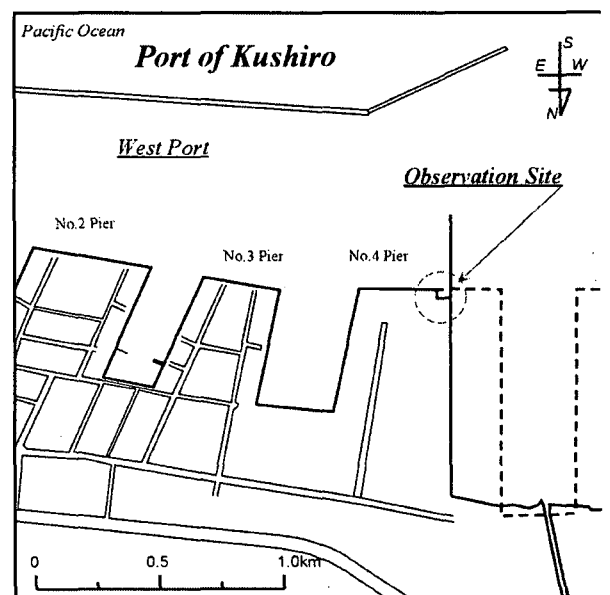


図-1 釧路港西港第4埠頭

Port of Kushiro (West Port)

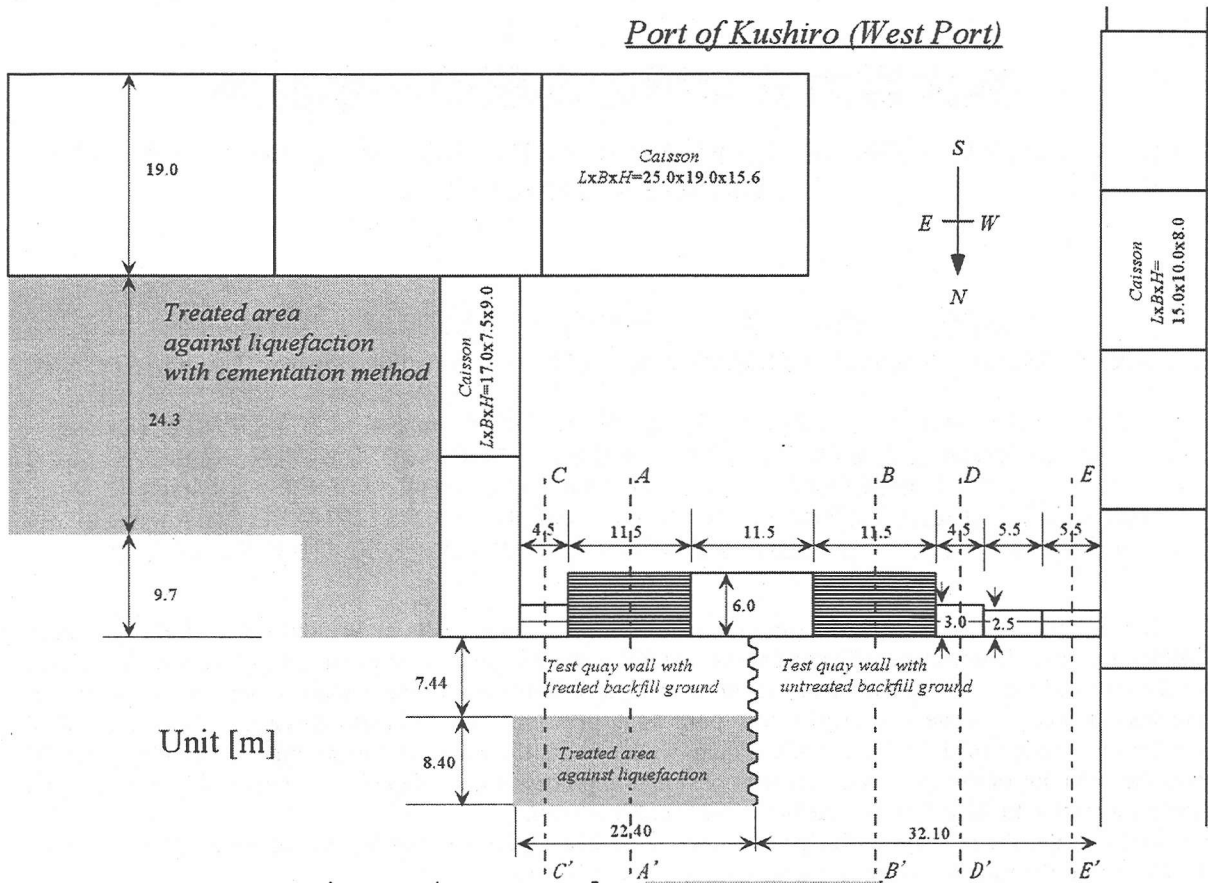


図-2 観測地点・試験岸壁平面図

法を提案することである。

本論文ではプロジェクトの概要を紹介するとともに、試験岸壁の構造と建設、各種測定器の配置と観測システムの詳細について報告する。また、これまでに実施した観測システムを検証するための実験結果についても報告する。

2. 試験岸壁

(1) 位置

観測地点は図-1 に示す現在整備中の釧路港西港区第4埠頭南側に位置している（平面図では慣習により南を上とす）。図-2 には詳細な平面図を示す。釧路港を観測地点に選んだ理由は、これまでの港湾整備において液状化対策・耐震性強化が精力的に進められ、知識と経験が蓄積されてきていることに加えて、全国的に見ても釧路地方は地震の活性度が極めて高いレベルにあるからである。過去70年間における地震環境を統計的に整理すると、釧路港では震度3の地震が年に3・4度、震度4が4年に3度、震度5の地震が10年に1度の割合で期待できることが分かっている。2001年4月1日に観測を開始して以来これまでに、震度2の地震が6回、震度3の地震が2度発生し、震度2の地震1回を除く地震について観測データを得た。

将来、南へ伸びている防波堤を取り除いて南側岸壁はさらに西へ延長される計画であるが、整備途上

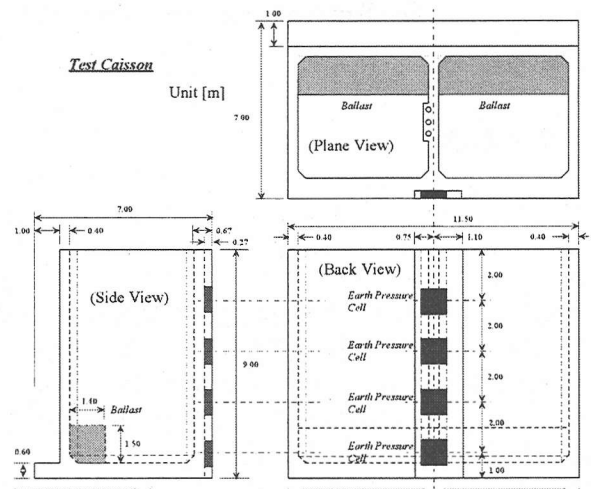
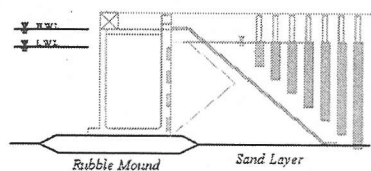


図-3 試験ケーソン

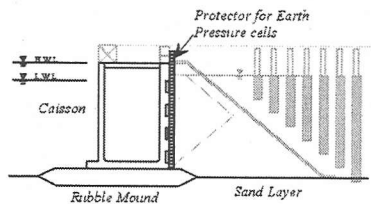
の段階でその防波堤との接合部において北へくぼんだ部分にL字型に仮護岸を設置した。試験ケーソンとして観測の対象としたのは、この部分のうち東西方向の護岸である。水深約8mのこの地点に、図-3に示す寸法のケーソンを3函設置し、中央を除く東西2つのケーソンとその背後の地盤に種々の計測器を設置した。

ケーソンの設計は100Gal相当の地震動に対して滑動安全率が1となるように震度法に基づいた耐震設計によって決定し、転倒に対する安全率が滑動に対

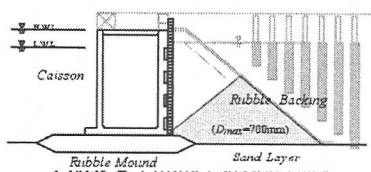
Phase 1. Setting Rubble Mound



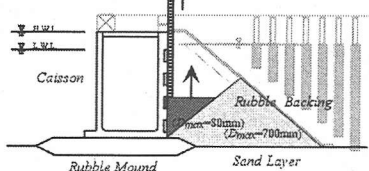
Phase 2. Placing Caisson



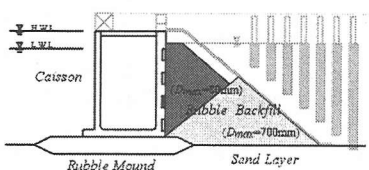
Phase 3-a. Piling Backing Material (Rubble Backing $D_{max}=700mm$)



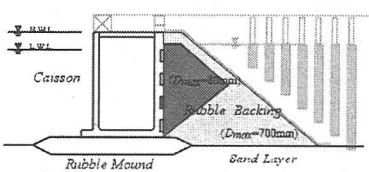
Phase 3-b. Piling Backing Material (Rubble Backing $D_{max}=80mm$)



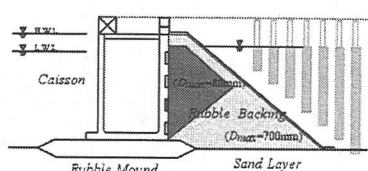
Phase 3-c. Piling Backing Material (Rubble Backing $D_{max}=80mm$)



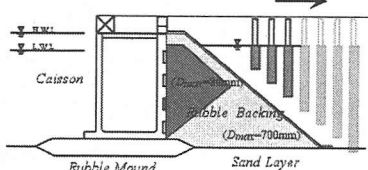
Phase 3-d. Piling Backing Material (Rubble Backing $D_{max}=700mm$)



Phase 4. Filling Caisson Back



Phase 5-a. Installing Sand Compaction Piles (in Treated Area from sea side)



Phase 5-b. Installing sand Compaction Piles (in Treated Area)

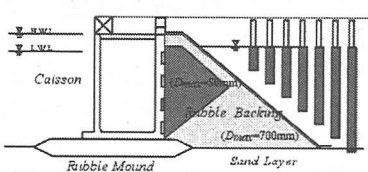


図-4 試験護岸の建設過程

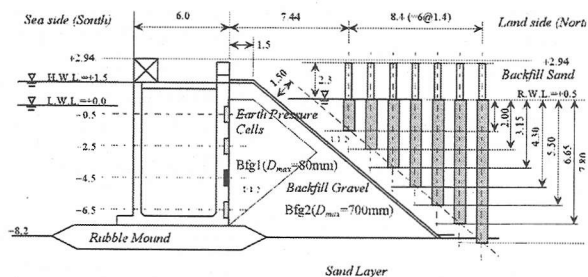


図-5 液状化対策 (サンドコンパクションパイル)

する安全率を下回らないように、ケーソンの海側下部に張出し部を設けた。ケーソンの背面には4セットのパネル式土圧計 (受圧面 $1m \times 1m$) を配置した。

(2) 施工手順と液状化対策

図-4 には試験護岸の施工手順を模式化して示している。1999年7月にケーソンの製作を開始し、土圧計や加速度計、速度計、水圧計、水位計を陸上で取付けた。裏込め栗割石の投入時の衝撃に備えて、土圧計は陸上で所定の剛性を持った鋼板でカバーした。捨石マウンド設置後 (Phase 1)、ケーソンを台船から吊下ろして設置し (Phase 2)、カバーを引き抜きながらケーソン背後の栗割石を設置した (Phase 3)。3函のケーソンの中央にはシートパイル (深度 9m) を一列打設した後、土圧測定精度をあげるために実施した予備試験の検討結果³⁾に基づき、土圧計受圧面寸法 $1m$ に対して最大粒径を

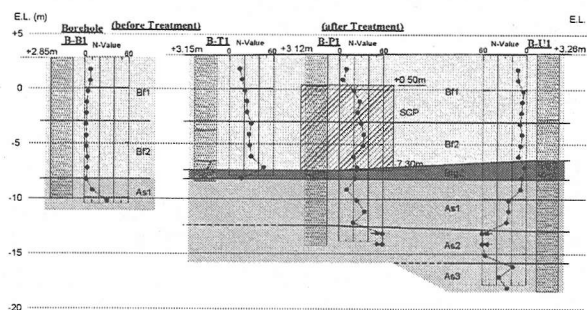


図-6 埋立地盤の地質構造 (液状化対策の効果)

80mm の比較的細かい材料を土圧計の周辺に、それ以外の部分は最大粒径を 700mm (200kg 相当) を材料の基準とした。その後、2000年10月に浚渫土により埋立地盤の造成を完了した (Phase 4)。矢板の東側のみサンドコンパクションパイルによる液状化対策を施工した (Phase 5, 図-2 参照)。これにより、東側と西側の岸壁の挙動を比較することによって液状化の影響を評価することが可能になる。背後地盤への計測器 (加速度計、間隙水圧計) の設置は、液状化対策施工後に実施した。

液状化対策は埋立地盤が完成した段階で、埋立地盤でボーリング孔において標準貫入試験、PS検層、不攪乱試料に対する非排水繰返し三軸試験を実施し、基盤最大加速度 350Gal の複数の地震動に対して応答解析を行い、目標 N 値、目標密度を算定し、埋立地盤全深度に対して圧入率 0.19 以上を得た。これ

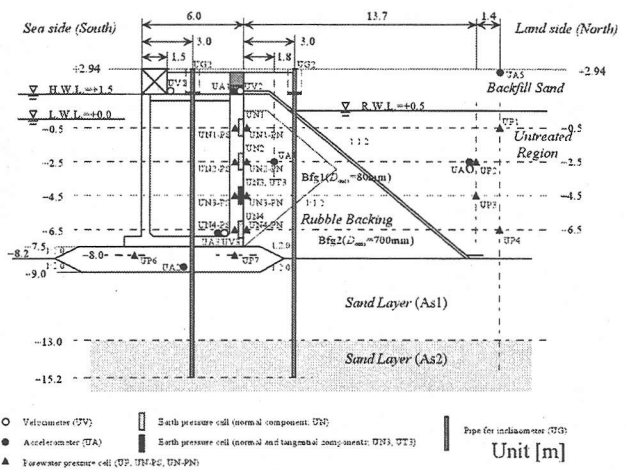
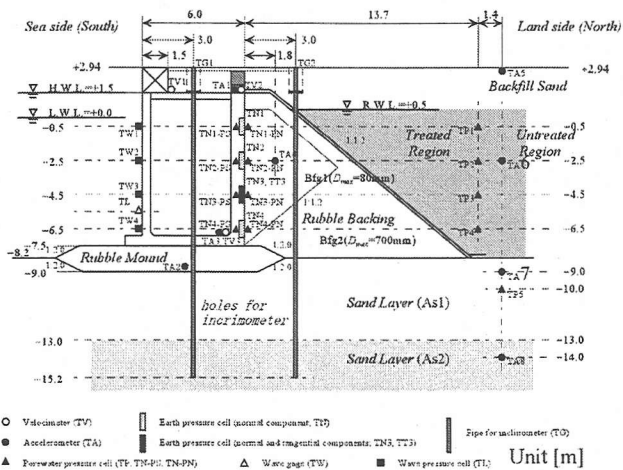


図-7 計測器の配置状況 (a) 液状化対策領域, (b) 液状化未対策領域

に対応して、サンドコンパクションパイルの打設は直径70cm, 正方形配置で杭間1.4mを得た。

液状化対策の施工断面を図-5に示す。液状化対策終了後には液状化対策領域と未対策領域の両方に対して、標準貫入試験, PS 検層と不攪乱試料についての非排水繰返し試験を実施して液状化対策の効果を検証した。図-6には埋立地盤の土質柱状図とN値の分布を示す。液状化対策実施前にはN値は高々5程度であったが, 対策後は杭間と杭芯において20以上を達成していることが分かる。図示はしていないが, 弾性波速度と液状化特性にも液状化対策による顕著な改善が認められた。

3. 観測システム

(1) 計測器の配置

図-7に両試験護岸(液状化対策領域と液状化未対策領域)の断面図を示し, 各種の計測器の配置も示している。図中の装置を判別する記号の1文字目, 「T」は液状化対策領域(Treated)、「U」は液状化未対策領域(Untreated)を表している。

液状化対策領域のケーソンでは海側壁に鉛直方向に等間隔で4個の波圧計と1個の波高計を配置している。これは, ケーソンの挙動に影響を与えるであろう波高をモニターするためと, 地震時に発生する動水圧の特性を明らかにするためである。動水圧の影響は大水深のケーソンにおいてはより顕著になると考えられ, 今後耐震設計において考慮する必要がある。

ケーソンと背後地盤の振動特性を分離して観測するために, 合計14個の3成分加速度計を配置した。最深部に位置する加速度計TA8は中間基盤層As2に設置している。釧路港では標高-70m付近に地震工学的基盤と見なせる厚い砂礫層が確認されており, そこでの加速度記録は北海道開発局釧路港建設事務所の敷地内で別個に計測が続けられている。

各々のケーソンには2個の加速度計と3個の速度計が取付けられており, 大規模な地震時におけるケ

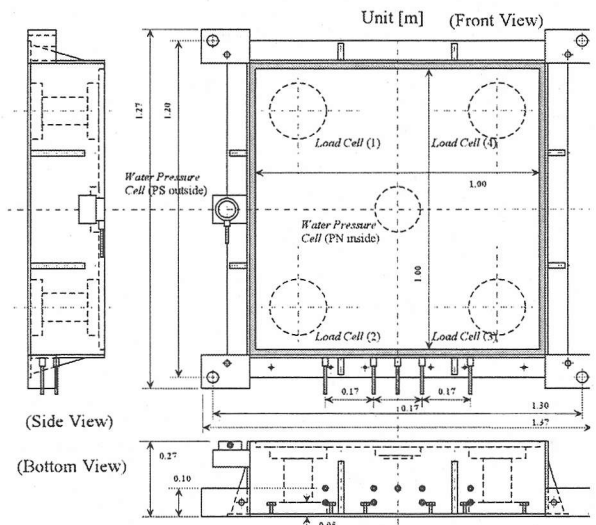


図-8 パネル式土圧計

ーソンの変位挙動をより正確に観測することを可能にしている(x方向:岸壁法線垂直方向北向き, y方向:法線方向東向き, z方向:鉛直方向上向き)。また, 大規模地震等による残留変形(変位)の測定のため, ケーソンと背後3.0mの地中には鉛直に傾斜計のための管を中間基盤層まで立て込んでいる。また, GPSによる絶対位置の測定, 三角測量と水準測量によってもケーソンの挙動を把握できるようにしている。

液状化過程で予測される過剰間隙水圧の発生・消散を捉えるために, 間隙水圧計は埋立地盤内で鉛直アレーを形成している。

本プロジェクトにおける計測の特徴の一つは, 大型のパネル式土圧計(受圧面1m×1m)を採用してケーソンに作用する土圧を直接計測することを試みている点である。ケーソンの背面には鉛直方向に4枚ずつ土圧計を取付けた。土圧計の詳細図を図-8に示す。ケーソン背面の摩擦特性が一樣になるようにモルタルで被覆した鋼製パネルを4台のロードセルで支持している。それぞれの土圧計にはパネルの

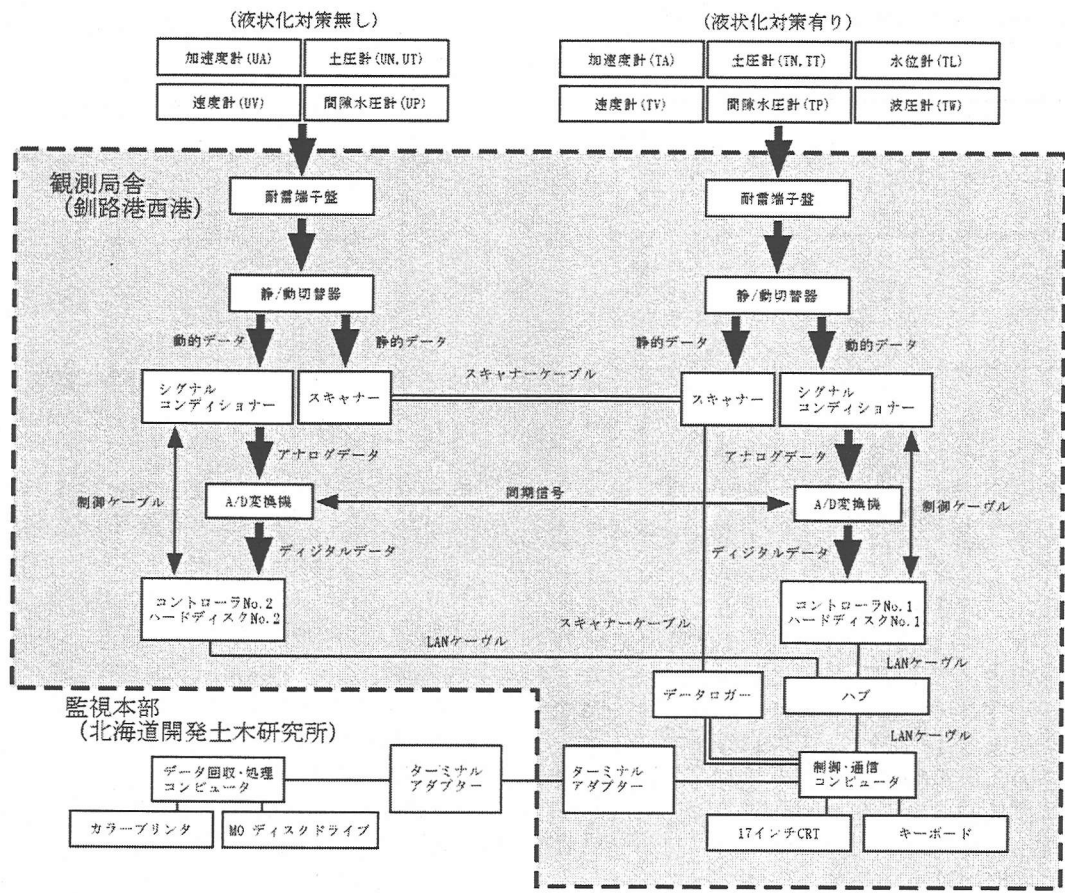


図-9 計測システム

内外に水圧計を備えている。これにより、土圧に関しては有効応力と全応力測定を分離して測定することが可能である。天端から3番目の土圧計 (TT3, UT3) に限ってはロードセルにひずみゲージを追加して工夫し、垂直方向だけでなく接線方向の土圧および発揮される壁面摩擦角の測定を可能にしている。

(2) 計測システムと計測方式

計測システムを模式的に図-9に示す。システムの監視およびデータの収集は基本的には観測地点に設置した観測基地内のコンピュータで行っている。すべての計測器は12点ずつ合計11のユニットに分けて同期を調整・管理している。また、札幌市にある北海道開発土木研究所のコンピュータとはISDN回線で接続しており、遠隔操作によってデータを転送でき、大規模な地震で想定される津波の発生に対しても早期にデータを退避できるようにしている。

環境や計測機器の状態によって変化するであろう較正値を更新するための「較正計測」は、毎日12時30分に実施し、これにより加速度計、速度計以外の測定値に対する較正データを更新している。

「静的計測」は加速度計と速度計以外を対象に毎日4回実施している。「地震時計測」はマニュアルあるいは加速度計TA8の3成分と連動したトリガーによって開始する動的計測で、トリガー信号から20秒さかのぼって100Hzでデータを取得している。こ

れらの計測値は「校正計測」の結果に基づいて補正を行い、振動成分に対しては-20秒から-10秒までのデータの中央値を原点として処理している。トリガーレベルは基本的には0.5Galと設定した。「拡張地震時計測」は、液状化対策埋立地盤地表面における鉛直加速度(TA5Z)の時刻歴から震度階が3.5以上と判断された場合に自動的に開始されるものである。この計測では地震発生後30分間に渡って、加速度計と速度計以外のデータが記録される。

(3) システムの検証

システムの作動状況(計測装置の配置と極性、トリガーの連動性)を確認するために、各種のチェックと予備的な実験を実施した。ケーソンにおいて加速度計と速度計が同じ位置に設置されている場合(例えばTA1とTV2)を対象に、速度履歴を数値微分することによって加速度履歴との照合を行い、それ以外の加速度計とはフーリエパワースペクトルの比較を行い加速度計と速度計の配置や配線の過誤に対するチェックを行った。この結果、加速度計および速度計の配置作業における過誤によって生じた、計測器の測定方向および極性の違いをいくつか発見し、計測開始前に是正することができた。

また、「土のうの落下実験」「タイヤの衝突実験」等を実施し、速度計と土圧計のチェックも実施した。図-10に土のう落下試験結果の一例を示す。

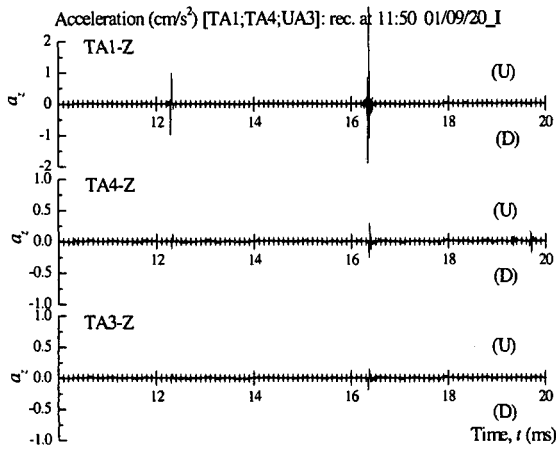


図-10 (a) 土のう落下による加速度記録
(TA1 近傍、液状化対策領域)

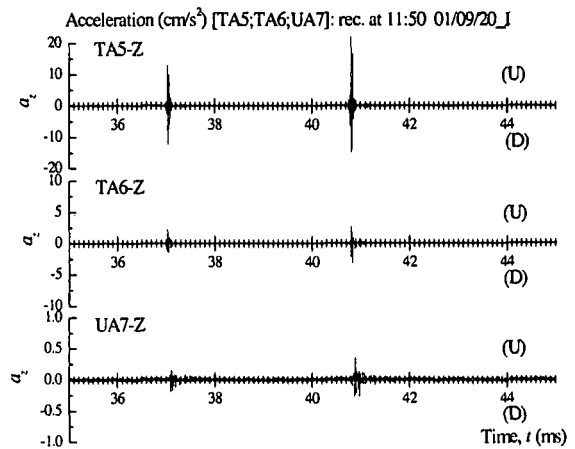


図-10 (b) 土のう落下による加速度記録 (TA 5 近傍、
液状化対策領域)

この実験では、質量約 15kg の土のうを、約 150cm の高さから、加速度計 TA1, TA5, UA1, UA5 の近くで 2 回ずつ落下させた。図には液状化対策領域の TA1 と TA5 の近傍で落下した時に観測された下方に位置する加速度計の鉛直成分を示している。各図ではスケールが違っていることから分かるように、鉛直方向で著しい距離減衰が発生していることが明らかであり、加速度計の配置が計画通り行われていることが確かめられた。図示していないが、水平方向においても距離減衰の顕著な影響が認められた。このような検証試験の結果に基づいて、加速度計の配置および結線における過誤を発見し是正することができた。

4. あとがき

現在釧路港西港区で、地震時における重力式岸壁の挙動および地震時土圧の特性を明らかにする目的で実施している実大岸壁の地震時挙動を観測するためのプロジェクトについて説明した。観測地点の状況、試験岸壁の詳細を示し、また計測器と計測システム、およびシステムの検証の結果についても説明した。本論文の内容および結論をまとめると以下のようなものである。

- 釧路港西港区第 4 埠頭の仮護岸を利用して、試験ケーソンを 2 函準備した。重力式岸壁の地震時における不安定化に及ぼす背後地盤の液状化の影響を明らかにするために、東側ケーソンの背後のみ液状化対策を実施した。その効果は、標準貫入試験、PS (弾性波) 検層、不攪乱試料についての非排水繰返し載荷試験によって確認した。
- 裏込め石を介してケーソンに作用する土圧を測定するために、試験ケーソンの背後には鉛直

方向に 4 枚ずつの大型パネル式土圧計を設置した。さらに、所定の測定精度を保証するために、裏込め石の一部の最大粒径は 80mm 程度に抑えた。

- 計器の配置や極性および計測システムのパフォーマンスを明らかにするために、加速度計と速度計の照合、フーリエスペクトルの比較、検証試験を実施した。その結果、計測器の配置および欠損時に生じた過誤をいくつか発見し、是正することができた。

これまでにはいくつかの地震時観測を実施したが、中間基盤層では最大 10Gal 弱である。今後は取得したデータの解析を進めるとともに、より大きな地震動の発生を待って、プロジェクトを推進していく予定である。

謝辞：本プロジェクトは北海道開発土木研究所の「港湾構造物の耐震性調査検討委員会：委員長井合進氏（港湾・空港技術研究所）」の議論と指導を受けながら進めている。関係各位に対して記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土質工学会, "1993 年釧路沖・能登半島沖地震災害調査報告書," (1994)
- 2) 三浦均也、小濱英司、栗田悟、大塚夏彦: "地震動を受ける重力式岸壁の振動台模型実験," 地盤工学会誌「土と基礎」, Vol.45, No.8, pp.17-20, (1997)
- 3) 三浦均也、小濱英司、明田定満、平林剛: "礫材の土圧測定方法 - 礫材の粒子寸法に対する土圧計受圧面寸法の比率の影響 -, "「土と基礎」, Vol. 46, No. 8, pp. 5-8 (1998)