

偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究

Experimental Study on Deformation Mechanism of Caisson Type Breakwater Subject to Extreme Wave Load

宮田正史¹・吉田 誠²・安野浩一朗³・三好俊康⁴・三藤正明⁵・熊谷健蔵⁶

Masafumi MIYATA, Makoto YOSHIDA, Koichirou ANNO, Toshiyasu MIYOSHI
Masaaki MITO and Kenzo KUMAGAI

Regarding unexpected attack of extreme waves exceeding design waves, the mechanism of large deformation of a marine structure has not been studied in conventional studies. In this study, the fundamental mechanism of large deformation of caisson type breakwaters, which is caused by failure of bearing rubble mound, is elucidated by conducting a hydraulic experiment in a wave flume and a static-load experiment. In particular, remarkable failure modes are found for the development of evaluation method on the deformation of a caisson type breakwater subject to extreme wave load.

1. はじめに

2007年に港湾の技術基準が改正され、性能規定型の基準へと移行した(日本港湾協会, 2007)。人命や社会経済活動等に重大な影響を及ぼすと判断された防波堤については、施設にとって最も危険な波浪として定義される偶発波浪による性能照査が規定された。しかしながら、我が国の防波堤の設計で考慮すべき偶発波浪の定義については現在検討中の段階にある(例えば, 平石ら, 2008)。さらに、防波堤の安定性について多くの研究が行われているが(例えば, 下迫ら, 2003)、設計で想定された波力を超過するような波力(ここでは、港湾基準の規定に従い偶発波浪荷重と呼ぶ)を受けて防波堤に大きな変形が発生する場合の変形メカニズムについては十分な知見がない状況にある。

本研究では、近年の大規模被災におけるケーソン式防波堤のケーソン本体の変形特性の特徴を整理するとともに、防波堤の大変形過程を再現する水理模型実験および静的載荷実験を実施した。これらの実験から、ケーソンの変位特性を把握し、被災事例と同様の特徴を有することを確認した。さらに捨石マウンドの破壊形態およびケーソンの変位特性と捨石マウンドの破壊形態との関係を詳細に把握し、ケーソンの大変形メカニズムに関する基礎的な検討を行った。また偶発波浪荷重を受けるケーソン

式防波堤の終局状態の変形量照査手法の構築に向けた課題や見通しについて考察した。なお水理模型実験によるケーソンの変形を考慮した波力特性の検討結果は宮田ら(2009)を参照されたい。

2. 水理模型実験および静的載荷実験の概要

(1) 水理模型実験の概要

実験は、造波水路(長さ50m, 幅0.6m, 高さ1.2m)にて実施した(図-1)。模型縮尺は1/30とし、ケーソン形状及びマウンドの高さは、大変形破壊に至った防波堤の被災事例(宮井ら, 1993)を参考に設定した。捨石マウンドおよび被覆石は、概ね相似粒径となる単粒度砕石6号(粒径5-13mm)および1号(粒径60-80mm)を使用した。ケーソン模型は箱型の鋼製(幅0.466m, 高さ0.483m, 奥行き0.56m)で、水中重量は1.47kNである。ケーソンとマウンドの摩擦係数を調整するために、ケーソン底面に不織布を貼付した。

ケーソンおよびマウンドの変形量を詳細に計測するために、ターゲットとして着色した石(ターゲット砕石)を使用した(図-1)。ターゲット砕石をデジタルビデオカメラで撮影し、画像解析により各々の変位量を算出した。

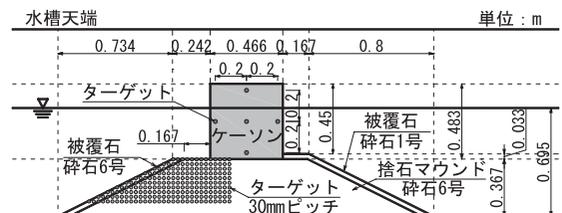


図-1 実験断面

- | | | |
|-------|------|-------------------|
| 1 正会員 | 工修 | 国土技術政策総合研究所港湾研究部 |
| 2 正会員 | 修(工) | 五洋建設株式会社 技術研究所 |
| 3 正会員 | | 五洋建設株式会社 技術研究所 |
| 4 正会員 | 工修 | 五洋建設株式会社 技術研究所 |
| 5 正会員 | 工博 | 五洋建設株式会社 技術研究所 |
| 6 正会員 | 修(工) | パシフィックコンサルタンツ株式会社 |

図-2に示すように、ケーソンには波圧計、加速度計および荷重計を設置した。波圧計はケーソン前面、天端および底面に設置し、加速度計はケーソン内に2箇所設置した。荷重計は、捨石マウンドからケーソン底面に作用するせん断力計測用と鉛直荷重計測用の2種類を設置した。せん断力計測用の荷重計は、ケーソン下部に5列×2個設置し、各列のロードセル下側に幅78mmの受圧版を1枚ずつ設置した。鉛直荷重計測用の荷重計は、受圧版の底面に設置し、受圧版1枚あたり2列×14個を設置した。鉛直荷重計は全136個であり、地盤反力分布を詳細に計測した。

実験は、マウンドの肩幅の大きさが防波堤の変形に与える影響について調べるために、肩幅小(0.167m)および肩幅大(0.250m)の2ケースとした。また波浪条件を決定するために、波高・周期を変えた実験を事前に実施し、防波堤が大変形破壊に至った条件として、波高0.325m、周期2.14sの規則波(重複波)を作用させることとした。このとき計測波圧から求めたケーソンの滑动安全率は0.96である。

(2) 静的載荷実験の概要

静的載荷実験は、水理模型実験と同じ模型断面を対象に、ケーソンに水平荷重を静的に載荷する2種類の実験

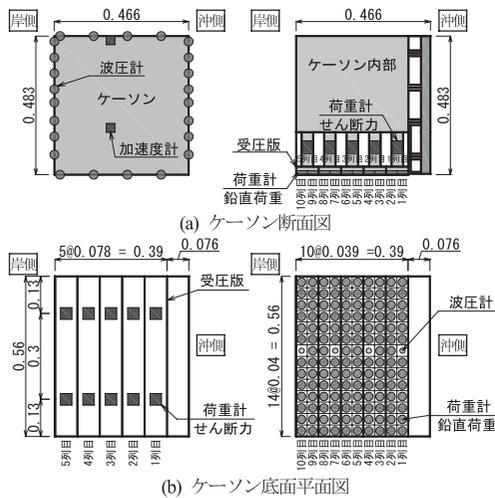


図-2 計測器の配置

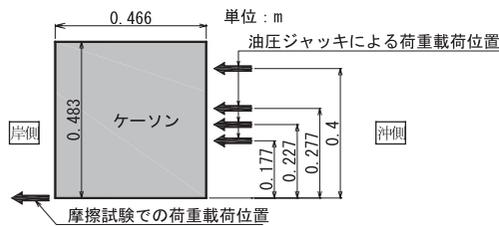


図-3 荷重載荷位置(静的載荷実験)

を行った。一つ目はケーソンと捨石マウンドとの摩擦係数の確認試験、二つ目は荷重の着力点の高さを変えて載荷し、水理模型実験との比較を行う実験である。後者の実験では、油圧ジャッキを用いて載荷を行い、載荷高さは177, 227mm, 277mmおよび400mmの4ケースとした(図-3)。

3. 実験結果

(1) 静的載荷実験の結果

図-4に静的載荷実験(肩幅小)の結果を示す。摩擦試験は3回実施しており、ケーソン下端を水平に引くときに得られる水平荷重とケーソン水中重量の比を算出し、最大値を摩擦係数とした。3回の実験で得られた摩擦係数は、各々0.66, 0.65および0.62で、平均0.64であった。なお、摩擦試験では、捨石マウンド内の碎石はほとんど移動せず、ケーソンがマウンド上を滑る移動形態であった。一方、荷重の着力点を高くした実験では、ケーソンの変位時に、捨石マウンド自体の変形が卓越していた。水平荷重とケーソン水中重量の比の最大値は、着力点が高いほど小さくなる傾向を示しており、柴田ら(1995)の結果と整合する。

(2) マウンド肩幅小の水理模型実験の結果

マウンド肩幅小の水理模型実験の結果として、図-5にケーソンに作用する前面波力とケーソンの水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴を、図-6にケーソンとマウンドの変形状況を変位ベクトル・せん断ひずみ分布と併せて示す。これらの図より、ケーソン式防波堤の大変形過程において、ケーソン本体の変位は、捨石マウンドの破壊形態に応じて、以下に示す3つの変形段階を経ていることがわかる。

初期段階では、ケーソン後し付近のマウンド表層の局所的なせん断変形が主要因となり、ケーソンは水平変位が卓越する。このため、徐々にマウンドの肩幅が減少する。その後、ケーソンが水平に約4cm変位(現地換算で約1.2m)した時点でせん断ひずみが下方領域に進展し、マウンドが破壊して、著しく変形が増加する変形進行段階に移行する。この段階では、マウンドの法肩付近がケ

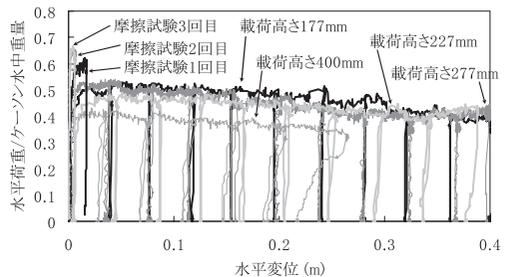


図-4 ケーソン水平変位と水平荷重に対するケーソン水中重量の比の関係(静的載荷実験:肩幅小)

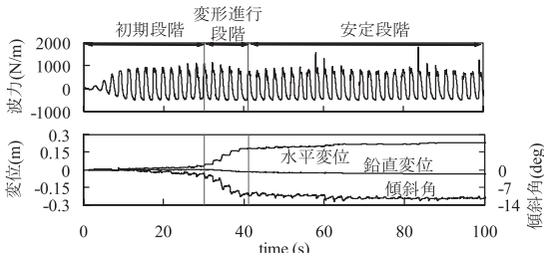


図-5 波力およびケーソン水平・鉛直変位・傾斜角の時刻歴 (水理模型実験：肩幅小)

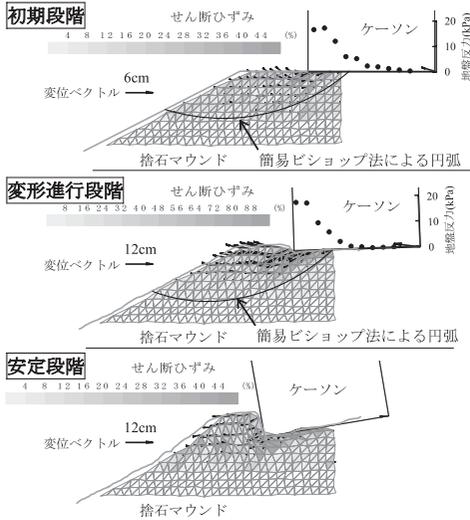


図-6 マウンド変位ベクトル・せん断ひずみ分布・地盤反力分布 (水理模型実験：肩幅小)

ケーソンによって水平方向に押し出されて隆起し、ケーソンはマウンド内に貫入しながら著しく変位する。その後、マウンドの大きく隆起した部分がケーソン背後に受動抵抗として作用するため、ケーソン変位はほとんど進行しない安定段階となる。

さらに、ケーソン変位とケーソン直下のマウンドの変形との関係を把握するために、図-7に実験開始前、初期段階終了時および変形進行段階終了時におけるケーソンの位置とケーソン直下に配置したターゲット碎石の位置を示す。なお、ターゲット碎石の位置は鉛直分布として示している。この結果、ケーソン変位はケーソン直下のマウンドの変形が主要因で発生することを明瞭に示している。さらに、マウンド表層の変形特性を把握するために、図-8にケーソン底面に最も近い深度にあるターゲット碎石の水平変位とケーソン底面の水平変位との比を、ターゲット碎石の初期水平位置との関係で示す。ケーソン直下の表層碎石は、ケーソン後しに近いほど、ケーソン底面の移動に引きずられるように移動する傾向にあることがわかる。また、ケーソン中心に向かうほど、逆に

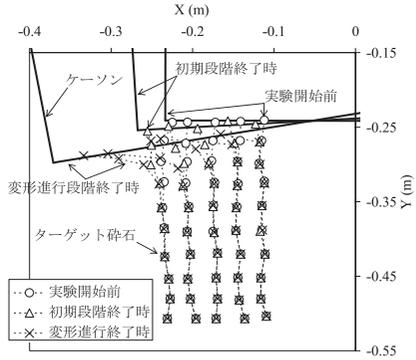


図-7 ケーソンの位置とケーソン直下のターゲット碎石の位置 (水理模型実験：肩幅小)

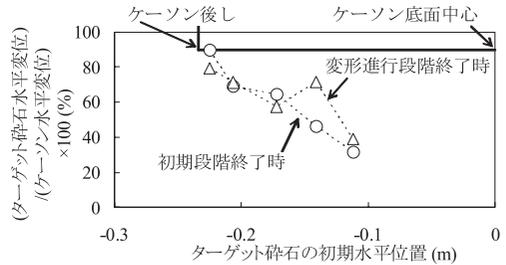


図-8 ターゲット碎石の水平変位とケーソン底面の水平変位との比 (水理模型実験：肩幅小)

碎石の変位は小さくなり、ケーソンが捨石上を滑動する量が増加する傾向にあることがわかる。この分布形状は、初期段階と変形進行段階でほぼ同じであり、ケーソン変位とマウンド表層変位との関係は、ケーソンの変位過程によらず同じであることが確認された。

次に、ケーソン底面の地盤反力の分布特性に関する実験結果を示す。図-9 (a)に前面波力最大時におけるケーソン底面の地盤反力分布 (鉛直, せん断) を初期段階および変形進行段階に分けて示す。また、前面波力最小時の同様の結果について図-9 (b)に示す。初期段階では、前面波力最大時・最小時の両者において、鉛直力は設計で想定している三角形分布 (台形分布) に近い分布となっている。せん断力は鉛直力に比例しており、鉛直力と同じ分布形状になることがわかった。変形進行段階に移行すると、波力最大時におけるケーソン後し付近の鉛直力が低下するとともに、波力最小時にケーソン中央付近の鉛直力が顕著に増加している。これは、マウンドの破壊の進行とともにケーソン中央部を支持点とした支持形態に移行し、ケーソンのロッキング挙動が卓越する変形モードに対応していることを示す結果である。なお、波力最小時のせん断力は、港内側からの波力とケーソンが港内側に傾斜することによって発生する自重分力が相殺されて、ほとんど発生しなかったと判断される。

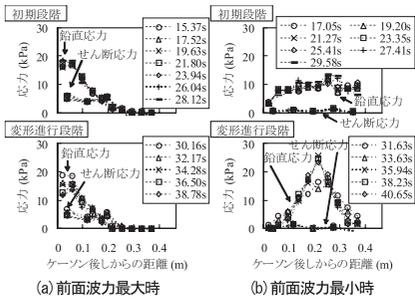


図-9 地盤反力分布 (水理模型実験：肩幅小)

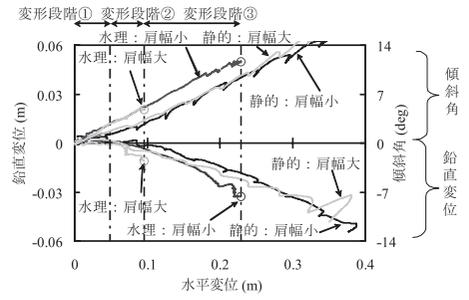


図-10 ケーソン水平変位と鉛直変位・傾斜角の関係 (模型実験)

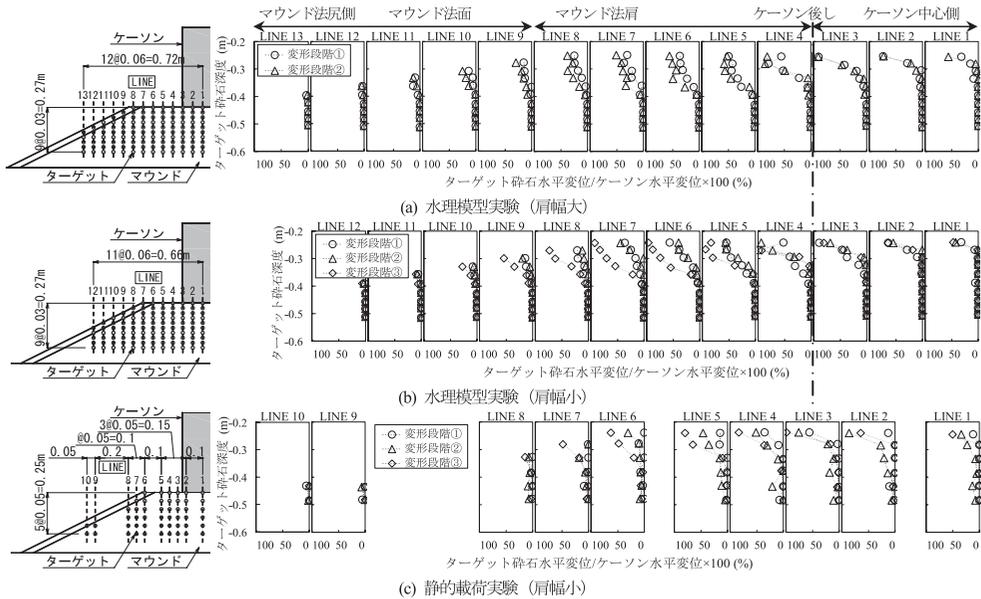


図-11 ケーソンの水平変位増分に対するターゲット砕石の水平変位増分の比の分布

(3) 水理模型実験におけるマウンド肩幅の相違の影響

図-10にマウンド肩幅大および肩幅小の実験におけるケーソン水平変位と鉛直変位・傾斜角の関係を示す。図中の○印は実験終了時を示している。肩幅が大きい場合は、変形進行段階でケーソンの変位は若干進行するものの、マウンド法肩付近の大規模な側方変位は発生せず、ケーソンの変位は大きく抑制される結果となった。マウンド肩幅の大小に関わらず、水平・鉛直変位・傾斜角の関係(以後、「骨格曲線」と呼ぶ)は、ケーソン変位が小さい範囲ではほぼ同じであることがわかる。

次に、捨石マウンドの変形挙動について比較する。図-11にケーソンの水平変位増分を基準とした場合の、ターゲット砕石の水平変位増分の比(%)を示す(以後、「基準化水平変位」と呼ぶ)。図中には、変形段階①(図中○印)、変形段階②(△印)および変形段階③(◇印)の3区間(図-10中に一点鎖線で境界を示す)ごとの結果を示している。変形段階①～③の最終変位は、それぞれ、マウンド肩幅小の実験において設定した初期段階終了時、

マウンド肩幅大の実験における実験終了時、およびマウンド肩幅小での変形進行段階終了時のケーソン水平変位と定義した。また、ターゲット砕石一列分の鉛直分布を示したグラフは、すべての実験結果について、ケーソン後しを起点として概ね同じスケールで左右に配置している。図-11によると、変形段階①ではマウンド表層付近の基準化水平変位が大きくなっており、僅かな変位であってもケーソンが変位する際は、捨石マウンドの変形も同時に伴うことを明瞭に示している。このことは、初期段階から捨石マウンドの支持力破壊が発生していることを示唆している。変形段階②(マウンド肩幅大の実験終了時の水平変位)までは、マウンド肩幅の大小に関わらずマウンド内の基準化水平変位は同様の分布を示しており、肩幅の大きさによる変形挙動の違いは見られない。変形段階③に移行し変形がさらに進行すると、ケーソンの変位に伴い港内側の肩幅が狭くなり、マウンド全体が深い領域まで大きく斜面側に水平変位し、法肩付近の一般的な水平移動を伴う破壊が発生していることがわかる。

以上のことから、偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の終局状態の変形量照査手法を構築する際には、ケーソン変位が比較的小さい場合でも、捨石マウンドの変形を伴う支持力破壊として問題を捉え、そのメカニズムを反映したモデル化が必要であると考えられる。さらに、ケーソンの変位が大きくなると、法肩付近の全般的な水平移動を伴う破壊が発生するようになるが、この大規模破壊の発生の有無によりケーソンの終局変位量が大きく影響される。このため、この大規模破壊が発生した場合の変形進展程度を再現できることが変形量照査を行う上で重要になると考えられる。これらの破壊メカニズムの詳細については、数値解析等を援用してさらに解明を進めていく必要があるが、先に示した捨石マウンドの変形挙動を再現できる手法であることを確認しながら、今後検討を実施する必要がある。

(4) 水理模型実験と静的載荷実験との比較

図-10に水理模型実験と静的載荷実験におけるケーソン水平変位と鉛直変位・傾斜角の関係を示す。静的載荷実験の結果は、水理模型実験で得られた波力最大時の地盤反力分布に最も近い、着力点277mmの結果である。両者の実験結果を比較すると、ケーソン変位の進行状況の特徴は両実験において整合的であることがわかる。さらに、静的載荷実験と水理模型実験における基準化水平変位を比較すると(図-11 (b)と図-11 (c))、各段階における分布は概ね一致していることがわかる。この結果は、静的なアプローチにより、波浪作用を受けるケーソン式防波堤の変形特性(骨格曲線)を再現できる可能性があることを示唆するものであった。

最後に、ケーソン式防波堤の大規模被災事例について、変形特性(骨格曲線)の特徴を整理した結果を示す。収集した事例は、比較的多数のケーソン函体が大変位した4つの被災事例である。この結果、ケーソンの水平変位量と傾斜角・沈下量は地点毎で概ね一つの曲線関係を示しており(図-12)、柴田ら(1995)の結果と整合する。模型実験においても同様の傾向を示しており、これらの

結果は、堤体条件に基づく骨格曲線の算出と外力の特定により、沈下と傾斜角を含めたケーソン変位の定量的な評価が可能となる見通しを与えるものであった。

4. まとめ

水理模型実験、静的載荷実験および被災事例調査を実施し、ケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する基礎的な検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) ケーソンは、水平変位が卓越する初期段階、著しく変位する変形進行段階、変位がほとんど進行しない安定段階、の3つの変形段階を経ることが確認された。
- (2) ケーソンが変位する際は、捨石マウンドの変形を必ず伴い、僅かな変位であっても捨石マウンドが支持力破壊していることを示唆するものであった。
- (3) マウンド肩幅が小さい場合、法肩付近でマウンドの全般的な水平移動を伴う破壊が発生し、ケーソンはマウンド内に貫入しながら著しく変位した。この大規模破壊の発生の有無によりケーソンの終局変位量が大きく影響される。
- (4) 水理模型実験と静的載荷実験を比較した場合、ケーソン変位の骨格曲線およびマウンドの変形形状は概ね同じであることから、静的なアプローチにより、波浪作用を受けるケーソン式防波堤の変形特性(骨格曲線)を再現できる見通しが得られた。
- (5) 被災事例によると、ケーソン変位の骨格曲線は、被災事例毎で概ね一つの曲線関係を示しており、模型実験においても同様の傾向を示していた。これらの結果は、堤体条件に基づく骨格曲線の算出と外力の特定により、沈下と傾斜を含めたケーソン変位の定量的な評価が可能となる見通しを与えるものであった。

今回は重複波について検討を行ったが、波力特性が大きく異なる碎波等の作用の場合、防波堤の変形特性が重複波と異なる可能性があるため、今後検討が必要である。

参考文献

- 柴田 徹・関口秀雄(1995):地盤の支持力, 鹿島出版会, pp.173~177.
- 下迫健一郎・土田 孝・増田慎太郎・渡部要一・藤井 敦(2003):混成防波堤におけるマウンドの支持力破壊に関する大規模水理模型実験, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.499-504.
- 日本港湾協会(2007):港湾の施設の技術上の基準・同解説 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎(2008):偶発波浪荷重による被害例とその特性, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.981~985.
- 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹(1993):被災防波堤集覧(その4), 港研資料, No.765, pp.45-128.
- 宮田正史・安野浩一郎・吉田 誠・関本恒浩・大久保陽介(2009):ケーソン式防波堤の大変形破壊に伴う作用波力の変化に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第56巻, (投稿中)

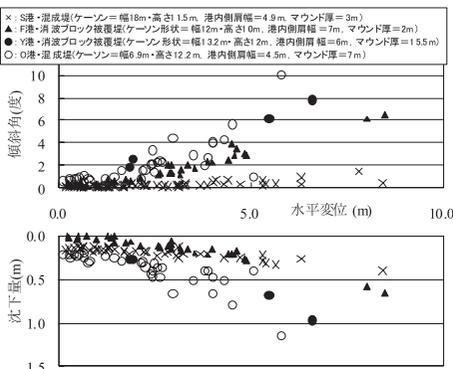


図-12 ケーソン水平変位と鉛直変位・傾斜角の関係(被災事例)