

オンライン動的応答実験による 氷海構造物基礎地盤の地震時挙動の評価

山根祐輔¹・兵動正幸²・吉本憲正³・長山秀昭⁴

¹学生会員 山口大学大学院 社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

³正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁴正会員 工修 NKK(株) (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)

全世界の石油埋蔵量の約 16%に当たる原油が氷海域に存在すると推定されている。陸域、海域における巨大油田が発見し尽くされた現状において、今後氷海域における油田の開発が期待されている。本研究は、氷海域に重力式構造物を建造する場合を想定し、氷荷重と地震力が同時に作用する場合の構造物基礎地盤の安定性について検討するため、オンライン動的応答実験を行った。その結果、主要な波が数波しかない不規則波よりも、一定の大きさで長期間繰返す規則波の方がより大きな残留変形を与えることが明らかになり、衝撃的な直下型地震よりも継続時間の長い海洋型地震の方がより大きなダメージを与えることが確認された。

Key Words : on-line dynamic response test, shake down, ice load, seismic load, offshore structure

1. まえがき

陸域、海域における巨大油田が発見し尽くされた現状において、新しい資源確保のために厳しい環境下にある氷海域での開発を行なわざるを得ない状況にある。しかし、氷海域において地震が海洋構造物及び基礎地盤に及ぼす影響に関するデータはほとんどなく、地震時に構造物及び基礎地盤が如何なる挙動を起こすか十分に解明されていない。そこで、本研究では氷海構造物基礎地盤の地震時挙動を把握することを目的とし、最も危険と思われる条件（海氷移動に伴う氷荷重と地震外力が同時に作用する条件）で、地震外力として不規則波及び規則波を用いたオンライン動的応答実験を行なった。

2. オンライン動的応答実験の概要

(1) オンライン動的応答実験の概念

本研究では、海洋構造物基礎地盤の挙動を正確に表現する目的で、オンライン動的応答実験を実施した。オンライン動的応答実験の原理を図-1に示す。このシステムは日下部ら^{1),2)}により開発されたものである。そのアル

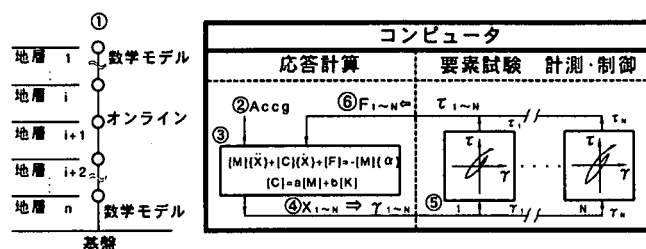


図-1 オンライン動的応答実験の概念

ゴリズムは以下の通りである。まず、①解析対象地盤を質点系にモデル化し、②基礎面から地震動を入力する。そして、③コンピュータにより質点系の振動方程式を解き、④各質点の応答変位を求める。次に⑤得られた変位に相当するせん断ひずみをコンピュータ制御により供試体に与え、⑥その時自動計測された復元力（せん断応力）を用いて次のステップの応答変位を計算する。この過程を地震動が継続する間繰返す。この方法によれば複雑な土の構成式に頼らず、土の実際の挙動を評価した動的応答解析が可能となる。

(2) 実験条件

本研究では、図-2に示すように氷海における重力式構造物及び基礎地盤を、集中質量法により1次元8質点系

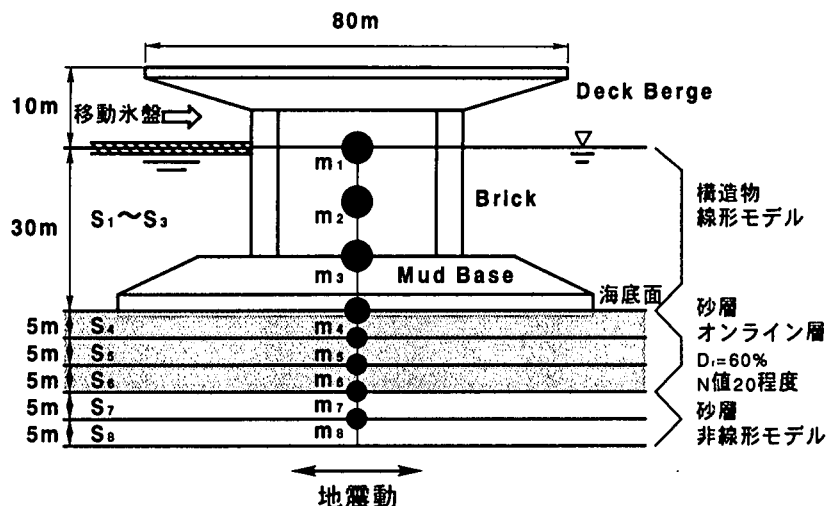


図-2 解析対象モデル図

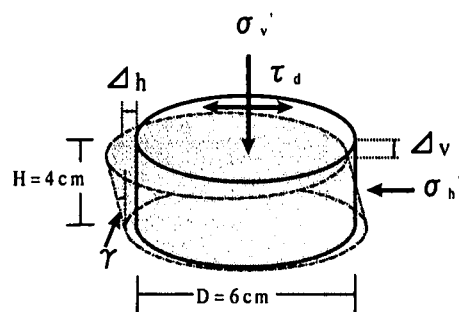


図-3 供試体の変形モード

表-1 地盤のモデルパラメータ

深度 GL-(m)	層名	地層	層厚 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)	G ₀ (kPa)	地盤モデル	σ_v' (kPa)	τ_f (kPa)	β	α
構造物	S1~S3	—	30	17.15	130000	線形モデル	60	20000	1.00	1.00
0~5	S4	砂質土	5	18.62	オンライン	オンライン	85	—	—	—
5~10	S5	砂質土	5	18.62	オンライン	オンライン	130	—	—	—
10~15	S6	砂質土	5	18.62	オンライン	オンライン	175	—	—	—
15~20	S7	砂質土	5	19.6	460	修正R-O	222	186	1.92	1.88
20~25	S8	砂質土	5	19.6	460	修正R-O	272	228	1.92	1.88

にモデル化した。図中、変形が大きく非線形的挙動が予想される構造物直下の S4~S6 層をオンライン層として直接せん断試験⁴⁾を行い、その他の層は修正 R-O モデルによる数値シミュレーションにより行なった。移動水盤による水荷重は構造物の最上部の質点から、地震力は基盤から入力を行なった。加振中、基礎地盤が重力式構造物による揺れ込み沈下することを想定し、変形モードを非排水状態(体積一定)で鉛直変形及び側方変形を許容するシェイクダウンモードで行なった(図-3)。入力地震動には、不規則波として兵庫県南部地震において神戸ポートアイランドで SMAC 強震計により観測された最大加速度 $\alpha_{max}=570\text{Gal}$ の波形及び規則波として構造物の固有周期をもとに作製した周期 0.71Hz、最大加速度振幅 $\alpha_{max}=200\text{Gal}$ の正弦波を用いた。水荷重には、地震時に層厚 2m の移動水盤が、貫入速度 1.0m/sec で構造物に作用した場合を想定して作製した加速度波形⁵⁾を用いた。なお、地震動及び水荷重の継続時間は 15 秒とした。試料として豊浦標準砂を用い、供試体は直径 6cm、高さ 4cm の円柱形で相対密度 $D_r=60\%$ を目標に水中落下法で作製した。対象断面において設定した地盤モデルのパラメータを表-1 に示す。

3. 実験結果

図-4 は入力加速度と各質点における応答加速度の時刻歴を示したものである。図(a)に不規則波、図(b)に規則波の結果をそれぞれ掲げ、入力波形の違いによる影響を調べた(以後図(a)に不規則波、図(b)に規則波の結果を示す)。両者とも質点 m1 では水荷重の影響を直接受けるため、応答値に短周期成分が見られ、加速度応答波形が水荷重作用方向にシフトしている様子が観察される。また、質点 m5 から質点 m4 にかけて加速度応答波形が急激に減衰し、長周期化している様子が認められる。これは、土要素の変形の非線形によるものと考えられる。図-5、図-6 は、S4 層(構造物直下地盤)の初期有効鉛直応力が正規化した有効応力径路、せん断応力比-せん断ひずみ関係を示している。図-6 より両者ともさほど有効鉛直応力比の減少が見られないが、図-7 に見られるように規則波では不規則波の最大せん断応力比と同程度のせん断応力比が繰返し作用しているため、不規則波に比べ有効鉛直応力比の減少が多い。また、図-7 では両者共に非線形なヒステリシスを描いており、せん断ひずみが水荷重の作用方向に残留している様子が観察される。そして、不規則波ではせん断ひずみの発生が 5% 弱で留まっているのに対し、規則波では有効鉛直応力比のさほど減少していないにもかかわらずせん断ひずみが 10% 程度発生している。シェイクダウンモードでは、有効鉛直応力がさほど減少しないが、一定のせん断応力が繰返し作用することで土の剛性が低下するためと考えられる。

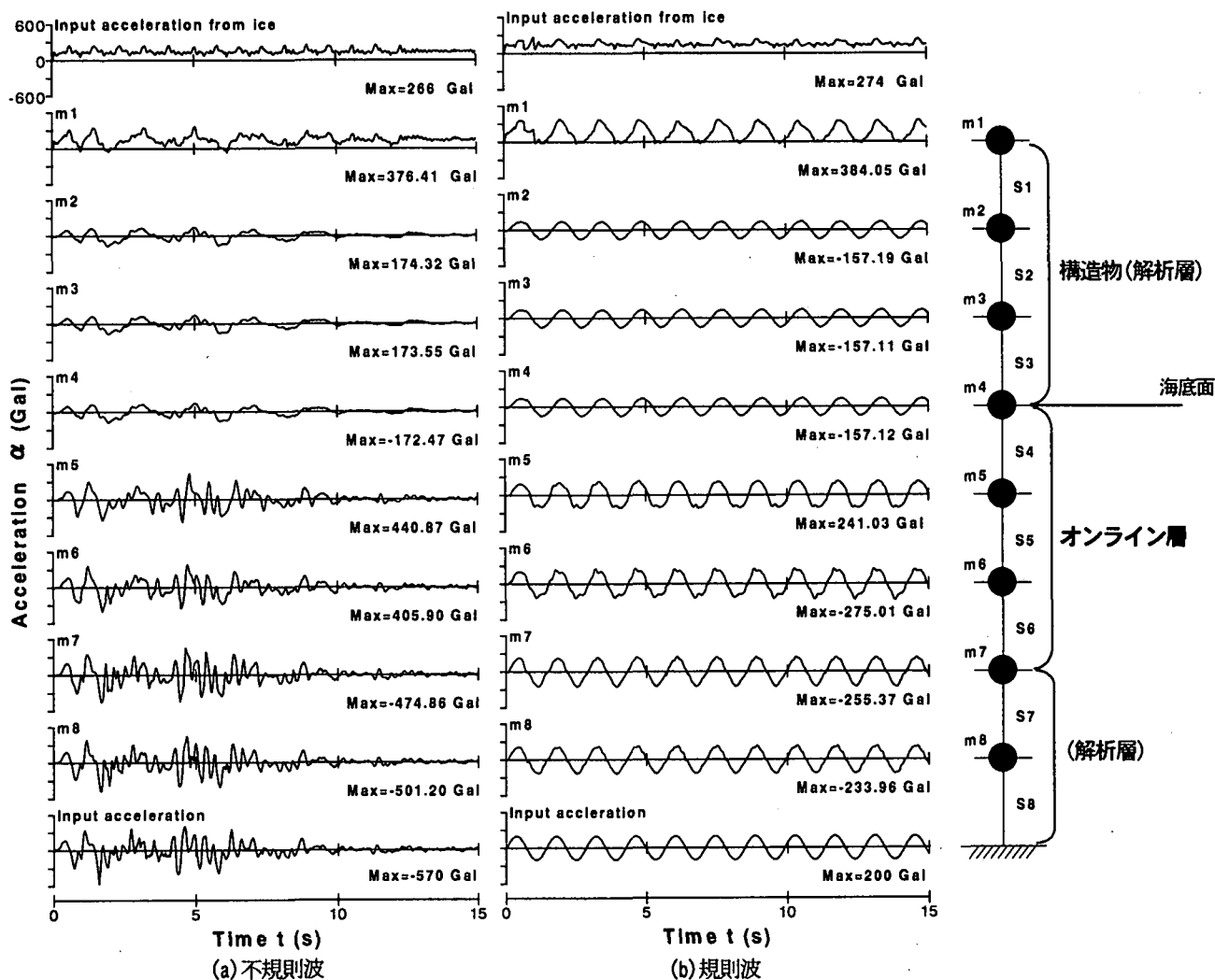
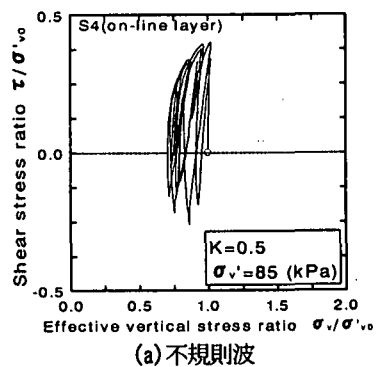
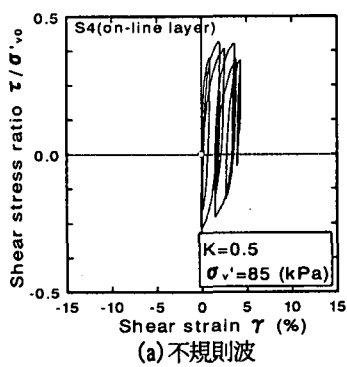


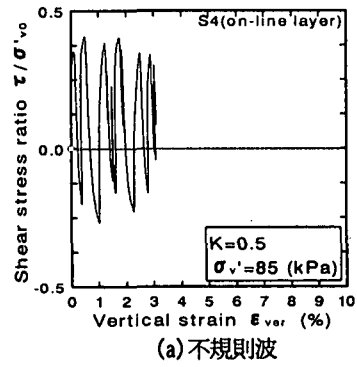
図-4 入力加速度と各質点の応答加速度の時刻歴



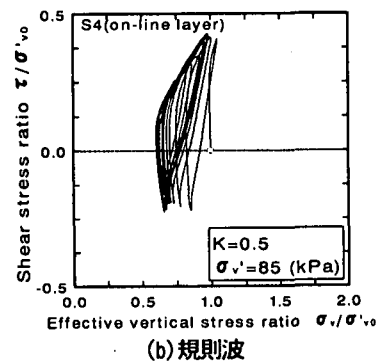
(a) 不規則波



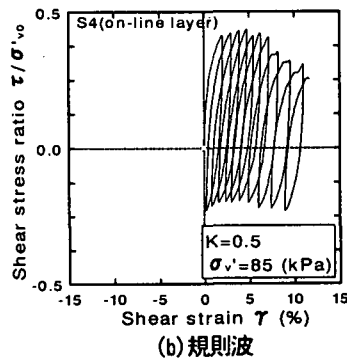
(a) 不規則波



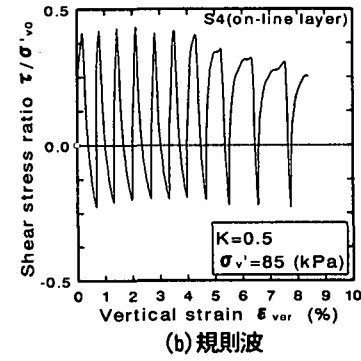
(a) 不規則波



(b) 規則波



(b) 規則波



(b) 規則波

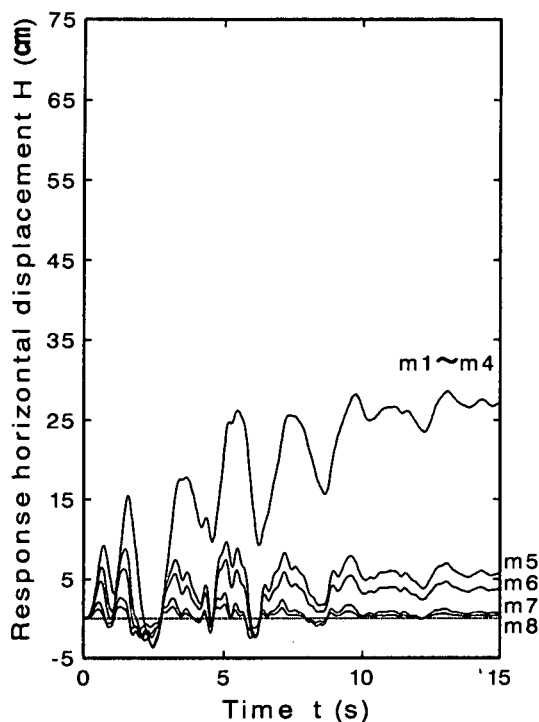
図-5 有効応力経路

図-6 せん断応力比

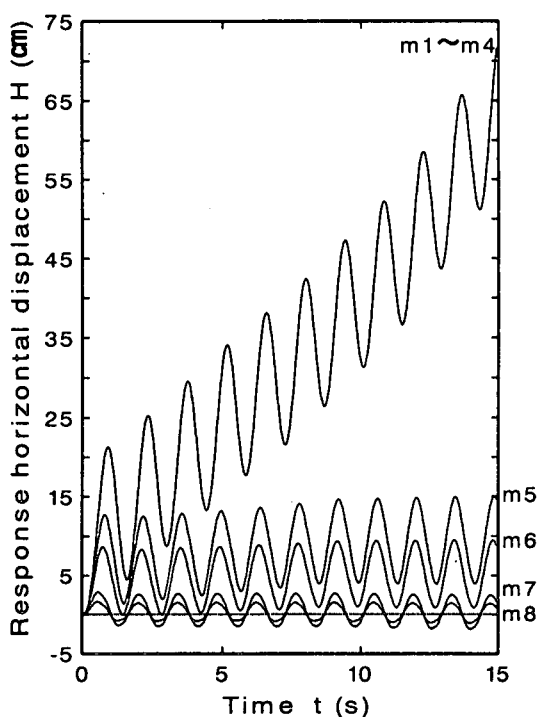
—せん断ひずみ関係

図-7 せん断応力比

—鉛直ひずみ関係



(a) 不規則波



(b) 規則波

図-8 応答水平変位の時刻歴

図-7 は、S4 層（構造物直下地盤）のせん断応力比-鉛直ひずみ関係を示している。両者共に変形モードがシェイクダウンモードであるため鉛直ひずみが徐々に発生する結果となっている。不規則波においては鉛直ひずみが 3% 程度でほぼ収束しているのに対し、規則波では鉛直ひずみが 8% 弱発生し、外力が継続すればさらに増加する傾向が見られる。図-8 は応答水平変位の時刻歴を示している。縦軸は正の方向を氷荷重が作用する方向としてい

る。氷荷重の作用により、いずれの場合も水平変位が残留していく様子が観察される。残留水平変位は、不規則波の場合 30cm 程度でほぼ収束しているのに対し、規則波では 70cm を越えてさらに増加の傾向が認められる。このように、主要な波が数波しかない不規則波よりも一定の大きさを長期間繰返す規則波の方がより顕著に残留変形を生じることが明らかになった。このことより、直下型地震よりも継続時間の長い海洋型地震の方がより大きなダメージを与えることが考えられる。

4. まとめ

本研究では氷海構造物基礎地盤の地震時挙動を把握することを目的として、最も危険と思われる条件（移動氷盤による氷荷重と地震外力が同時に作用する条件）で、オンライン動的応答実験を行なった。その結果をまとめると次のようになる。

- ① 本研究のモデルでは、構造物直下の S4 層が最も残留変形し氷荷重及び地震外力の影響を受けることが分かった。
- ② シェイクダウンモードでは有効応力はさほど減少しないが、一定の繰返しせん断応力が作用することにより、土の剛性が低下し、せん断ひずみが発達する。
- ③ 主要な波が数波しかない不規則波よりも一定の大きさを長期間繰返す規則波の方がより顕著に残留変形を生じることが明らかになった。このことより、直下型地震よりも継続時間の長い海洋型地震の方がより大きなダメージを与えることが考えられる。

謝辞：本研究は、社団法人日本海洋開発産業協会(JOIA)の氷荷重基礎研究委員会(委員長:佐伯浩北海道大学)のもとで行ったものである。また、氷荷重の波形は NKK(株)から提供して頂いたものである。本研究にご支援およびご協力して頂いた方々に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日下部伸, 森尾敏, 有本勝二: 地盤系オンライン地震応答実験システムの開発(その 2), 第 23 回土質工学研究発表会, pp. 741-744, 1988.
- 2) 日下部伸, 森尾敏, 有本勝二: オンライン地震応答実験による 2 層系砂地盤の液状化挙動, 土質工学論文報告集, Vol. 30, No3, pp. 174-184, 1990.
- 3) 日下部伸, 森尾敏, 岡林巧, 藤井照久, 兵動正幸: 簡易単純せん断試験装置の試作と種々の液状化試験への適用, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp. 299-304, 1999.
- 4) Kamesaki, K. Yamauchi, Y. and Karna, T.: "Ice force as a function of structural compliance" Proceedings of the 13th IAHR Ice Symp., Beijing, Vol. 1, pp. 395-402, 1996.