

海底パイプラインの暴風時耐波安定性に関する一考察

高谷富也¹・Daniel Brooker²

本研究は, 100 年の再現期間を有する暴風時の波浪や潮流によりパイプラインに作用する抗力や揚力を算定し, これらの繰り返し荷重作用下でのパイプラインの耐波安定性評価を行ったものである。これらの繰り返し荷重に対して, 有効応力に基づいたパイプライン-地盤系の 2 次元動的非線形応答解析を行い, 地盤剛性および細粒分含有率の観点より繰り返し载荷中におけるパイプラインの移動挙動, その周辺地盤内部の応力-ひずみの履歴応答特性および間隙水圧応答を求めた。その結果, パイプラインの初期埋設深さが浅い場合には, 深い場合に比べて繰り返し载荷中のパイプラインの水平移動量や沈下量が大きくなる傾向を示すことが明らかとなった。

1. はじめに

日本近海における天然ガスや石油などの海洋資源の利用を考えた場合, 天候や経済性の面から海底パイプラインによる輸送形態が望ましい。この場合, 台風による暴風波浪や地震に対する安全対策が必要となるため, 海底パイプラインの耐波・耐震安全性の評価と対策が設計を行う上で非常に重要な課題と言えよう。特に, パイプラインが台風時における波浪や潮流などの影響を受ける場合, パイプラインには繰り返しの抗力や揚力が作用する。この繰り返しの荷重のもとで, パイプラインは沈下や水平移動を生じる。この場合, 海底地盤の条件によっては, パイプライン周辺地盤に間隙水圧の上昇あるいは蓄積が生じ, 地盤剛性の低下をもたらす (PCRI, 2000)。これまで, 筆者は繰り返し水平载荷を受けるパイプラインの変位挙動およびその周辺地盤の応力-ひずみの履歴応答や間隙水圧応答を求めてきている (高谷ら, 2003, 2004, 2005; Takatani ら, 2003, 2004, 2005)。

これまでの研究成果を踏まえて, 本研究はパイプラインに作用する暴風時の波浪や潮流による抗力や揚力を評価し, 繰り返し荷重作用下でのパイプラインの耐波安定性評価を行うことを目的としている。

本研究では, Sorensen ら (1986) の手法を用いて 100 年の再現期間を有する暴風時における波浪として最大有義波高 13.2 m, 周期 13.5 s の規則波に対して, 海底パイプライン周辺の流速を評価することでパイプラインに作用する抗力や揚力を算定している。これらの繰り返し荷重に対して, 有効応力に基づいたパイプライン-地盤系の動的応答解析を行い, 繰り返し荷重を受けるパイプラインの変位およびその周辺地盤内部の応力・ひずみの履歴応答および間隙水圧応答を求めた。この応答解

析では, パイプラインに揚力として繰り返し鉛直荷重の载荷下で繰り返し水平荷重となる抗力を与えて, パイプラインの移動量, 地盤の変形, 応力, ひずみおよび間隙水圧を求めている。また, 水深 60 m における直径 1 m の海底パイプラインを, パイプラインの初期埋設深さ z_0 として 0.1 m および 0.25 m を想定し, パイプラインの初期埋設深さや海底地盤条件の違いがパイプラインや地盤の応答特性に及ぼす影響について検討している。なお, 地盤は砂質地盤とし, N 値および細粒分含有率 F_c の観点より, パイプラインおよびその周辺地盤の応答解析を行っている。

2. 解析方法

本研究では, 土の応力-ひずみの非線形関係を考慮した有効応力に基づいたパイプライン-地盤系の液状化解析 (Iai ら, 1990) を行い, 暴風時における波浪や潮流による繰り返し载荷を受けるパイプラインの移動挙動, その周辺地盤内部の応力・ひずみの履歴応答および間隙水圧応答を求める。この応答解析を通じて, パイプラインの移動量, 周辺地盤内部の応力, ひずみおよび間隙水圧応答に及ぼす地盤特性の影響を調べる。

図-1 に示すように, パイプライン-地盤系の動的応答解析では, パイプライン周辺の流速より求められた揚力を鉛直荷重 V として, また抗力を水平荷重 H として与えることにより, パイプラインの移動量, 地盤の変形, 応力, ひずみおよび間隙水圧を求める。なお, 地盤は砂

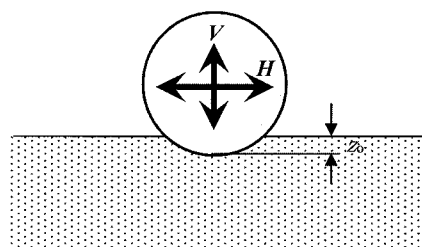


図-1 パイプラインと作用荷重

1 正会員 学博 舞鶴工業高等専門学校教授 建設システム工学科

2 Ph.D. The University of Western Australia, School of Oil and Gas Engineering

質地盤とし、地盤特性の影響を調べるために N 値および細粒分含有率 F_c の観点より、パイプラインおよびその周辺地盤の動的応答解析を行っている。 N 値は地盤の初期せん断剛性や体積弾性係数に大きく関係し、細粒分含有率 F_c は過剰間隙水圧の発生の抑制に関与することになる。なお、地盤の力学的諸定数および液状化に関する解析パラメータ等の設定方法や詳細な説明は、紙面の都合上森田ら (1997) および高谷 (2005) の文献に譲る。

図-2は、パイプラインの初期埋設深さ z_0 を 0.1 m とした場合における解析領域 $3.5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ の有限要素メッシュを示したものである。同図において、パイプライン直径 D は 1.0 m とし、パイプラインと地盤との接触面にはすべりを考慮してジョイント要素を配置している。また、これまでの研究成果 (高谷ら 2004, 2005; Takatani ら, 2004, 2005) を踏まえて、ジョイント要素の垂直方向接線剛性 K_n を $1.0 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 、せん断方向接線剛性 K_s を $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$ としている。なお、紙面の都合上同図中には初期埋設深さ z_0 を 0.25 m とした場合のメッシュ図も併せて図示しておいた。

次に、本研究で用いた 100 年の再現期間を有する暴風時における最大有義波高 13.2 m、周期 13.5 s の規則波による海底パイプラインに作用する抗力や揚力の算定方法について述べる。

一般に、海底パイプラインに作用する抗力および揚力は、Morison Force Model, Peak Force Model, Wake Model および Fourier Force Model 等によって求めることができる (Neil ら, 1998)。本研究では、Sorensen ら (1986) の手法を用いて、水深 60 m における直径 1 m

の海底パイプラインに作用する抗力および揚力を算定する。この算定手法は、規則波によりパイプラインに作用する荷重 $F(t)$ を次式に示すようにフーリエ級数で表示するものである。

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^M F_n \cos(n\omega t - \phi_n) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ω は規則波の周波数である。

一方、パイプラインに作用するフーリエ級数表示による水平および鉛直方向の荷重係数は、 $1/2\rho D U_{wave}^2$ で正規化された実験データを用いて次式によって計算される。

$$C_H(t) = \frac{F_D(t)}{1/2\rho D U_{wave}^2} = C_{H0} + \sum_{n=1}^9 C_{Hn} \cos(n\omega t - \phi_{Hn}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_V(t) = \frac{F_L(t)}{1/2\rho D U_{wave}^2} = C_{V0} + \sum_{n=1}^9 C_{Vn} \cos(n\omega t - \phi_{Vn}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ は流体密度、 U_{wave} は水平方向の最大速度振幅である。また、 $F_D(t)$ および $F_L(t)$ はそれぞれパイプラインに作用する抗力および揚力であり、上式に見られるフーリエ級数の荷重係数 (C_{Hn} , C_{Vn}) および偏角 (ϕ_{Hn} , ϕ_{Vn}) は、フーリエ変換と最小自乗法によって決定され、 K_c (Keulegan-Carpenter Number) または α (Current Ratio) の関数として表される。ここに、 $K_c = U_{wave} T / D$, $\alpha = U_{current} / U_{wave}$, $U_{current}$ はパイプライン上における定常状態の潮流速度、 T は規則波の周期である。

3. 数値解析結果とその考察

本研究では、図-2 に示す水平および鉛直方向の繰り返し荷重 H および V として、パイプラインに作用する

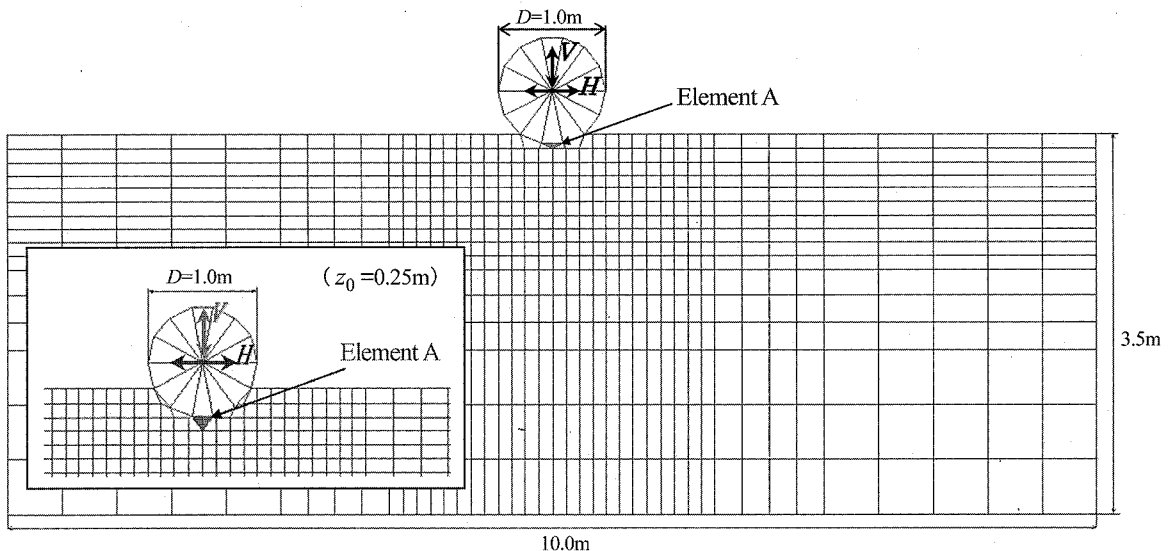


図-2 FEM 解析メッシュ ($z_0=0.1\text{m}$)

抗力および揚力を用いて有効応力に基づいた海底パイプライン-地盤系の動的応答解析を行う。図-3に示すパイプラインに作用する抗力および揚力は、前節で述べたSorensenら(1986)の手法を用いて、水深60mにおける直径1mの海底パイプラインに対してパイプライン周辺の流速を評価することで得られたもので、JONSWAPスペクトル(Hasselmannら, 1973)を基にしてLewisら(1990)が求めた100年の再現期間を有する暴風時における波浪として最大有義波高13.2mおよび周期13.5sの規則波の条件としている。なお、表-1に抗力および揚力を算定した場合の条件を示しておく。図-3に示すパイプラインに作用する揚力については、パイプライン周辺の流速による発生する揚力とパイプラインの自重との釣り合い関係によって約3kN/mほどプラス側にずれていることがわかる。

表-1 抗力・揚力の算定条件(規則波)

Maximum Wave Velocity, U_{wave} (m/s)	2.55
Steady Current Velocity, $U_{current}$ (m/s)	0.58
Wave Frequency (Hz)	0.47
Keulegan-Carpenter Number, K_c	34.34
Current Ratio, α	0.23

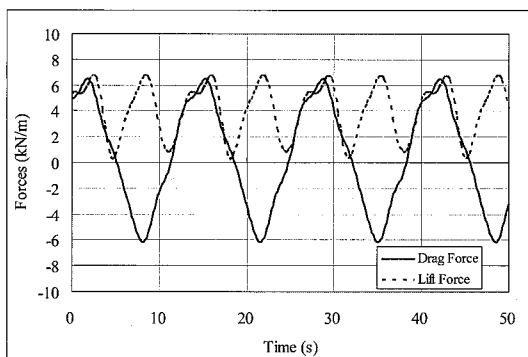
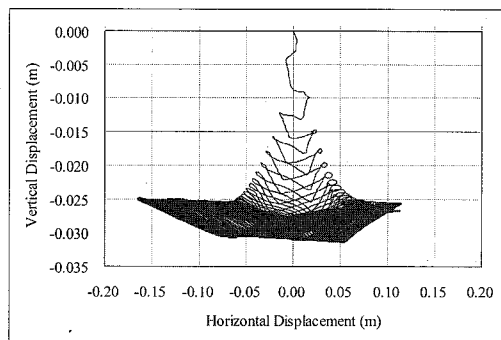


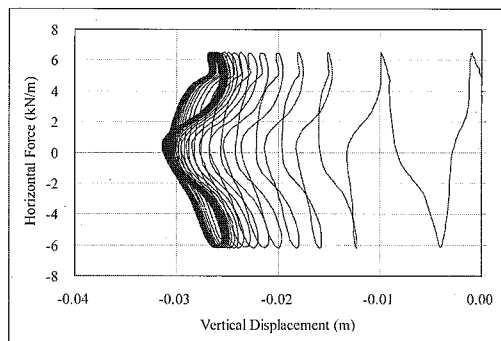
図-3 パイプラインの作用荷重

図-4および図-5は、それぞれ等価 N 値($N_{65}=5$ および10の場合について、9,000s間の繰り返し载荷中におけるパイプライン挙動を示したものである。なお、パイプラインの初期埋設深さ z_0 は0.25mとし、細粒分含有率は $F_c < 5\%$ である。図-4(a), (b)より明らかなように、数回の繰り返し载荷を経てパイプラインは沈下量0.025mから0.030mに至っており、その後は同じ荷重-変位曲線の軌跡を描いていることがわかる。また、図-4(c)に示す水平移動量の振幅は繰り返し回数が多くなるにつれて徐々に大きくなっており、パイプライン周辺地盤の剛性低下による影響が現れていることがわかる。

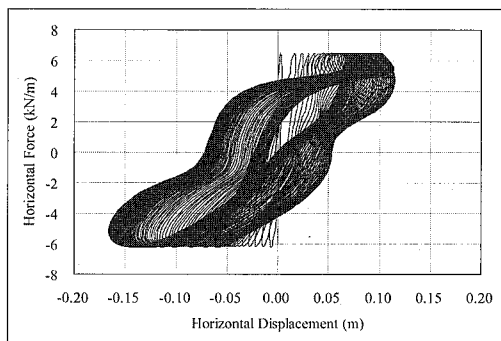
一方、図-4に比べて等価 N 値が大きい図-5(a), (b)においては、9,000s後におけるパイプラインの最終沈下量は図-4とほぼ同じ値となっているものの、繰り返し载荷の増加とともにパイプラインの水平移動の振幅や沈下量が徐々に大きくなっていくことがわかる。また、図-5(c)に示す水平移動の振幅は図-4(c)に比べて小さなものとなっている。これは、図-5の地盤剛性が図-4に比べて大きくなっているためと考えられる。この傾向は、紙面の都合上図示していないが、等価 N 値($N_{65}=15, 20$ および細粒分含有率 $F_c=10\%, 15\%$ に対する繰り返し载荷中におけるパイプライン挙動においては、図-4に比べてより小さな振幅値や沈下量となっている。また、



(a) 水平変位と鉛直変位



(b) 鉛直変位と水平荷重

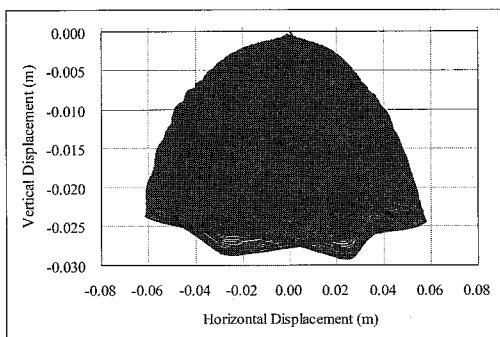


(c) 水平変位と水平荷重

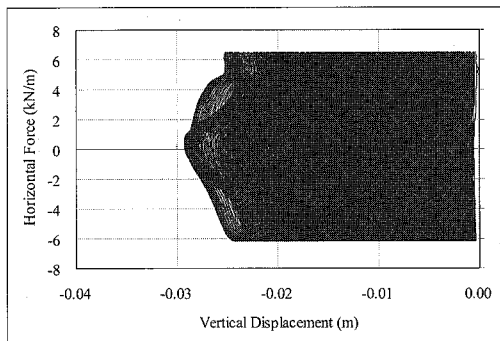
図-4 パイプラインの変位挙動(9,000s間)
($N_{65}=5, F_c < 5\%, z_0=0.25\text{m}$)

パイプラインの初期埋設深さについて、 $z_0=0.1$ mにおけるパイプラインの水平振幅と沈下量は $z_0=0.25$ mに比べて大きな値となっており、初期埋設深さの影響が現れている。これは、パイプラインの初期埋設深さが小さい場合は、パイプラインと地盤との接触領域が少ないため、パイプラインが受ける地盤からの水平抵抗が小さくなるためと考えられる。このため、初期埋設深さ $z_0=0.1$ mの場合には繰り返し载荷の増大とともにパイプラインの水平移動の振幅が大きくなり、それに伴い沈下量が大きくなるものと考えられる。

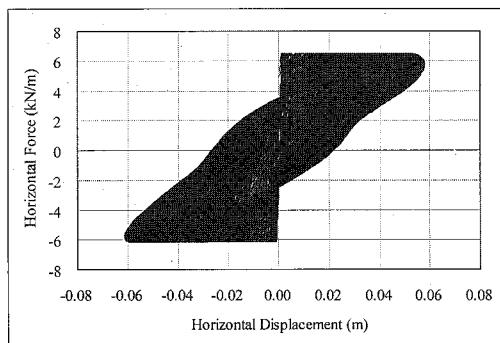
図-6 および図-7 は、それぞれ初期埋設深さ $z_0=0.1$ m および 0.25 m の場合について、繰り返し载荷中にお



(a) 水平変位と鉛直変位

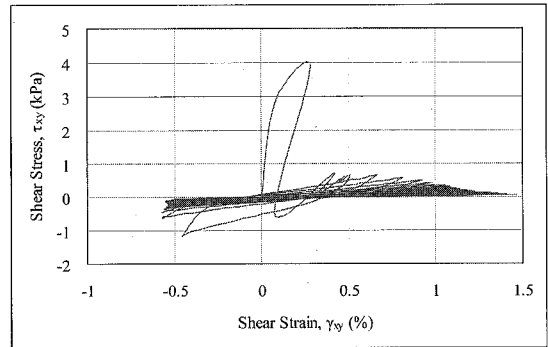


(b) 鉛直変位と水平荷重

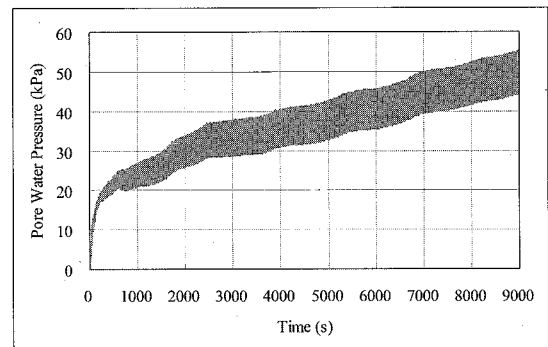


(c) 水平変位と水平荷重

図-5 パイプラインの変位挙動 (9,000s 間)
($N_{65}=10$, $F_c<5\%$, $z_0=0.25$ m)

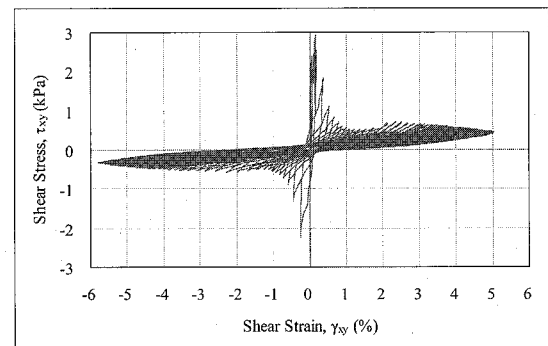


(a) せん断ひずみとせん断応力

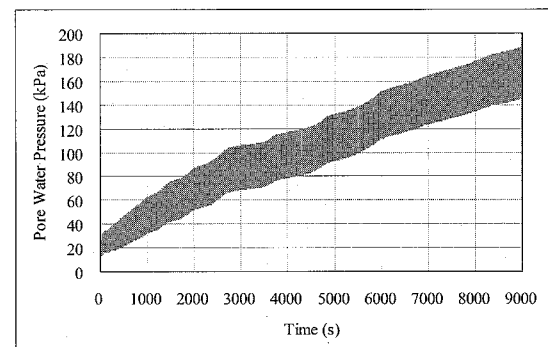


(b) 間隙水圧応答

図-6 地盤内部の応答履歴 (9,000s 間)
(Element A, ($N_{65}=5$, $F_c=10\%$, $z_0=0.1$ m)



(a) せん断ひずみとせん断応力



(b) 間隙水圧応答

図-7 地盤内部の応答履歴 (9,000s 間)
(Element A ($N_{65}=5$, $F_c=10\%$, $z_0=0.25$ m)

けるパイプライン直下における Element A の応力・ひずみおよび間隙水圧の履歴応答を示したものである。なお、等価 N 値 (N)₆₅=5 および細粒分含有率は $F_c=10\%$ としている。パイプラインの変位挙動における傾向からも明らかのように、地盤剛性が小さい場合には数回の繰り返し载荷によってせん断応力の低下とともにせん断ひずみの増加が見られ、それ以後の繰り返し载荷中の履歴応答は同じ応力-ひずみ曲線を通っていることがわかる。また、間隙水圧応答は繰り返し载荷とともに徐々に増加する傾向を示していることがわかる。一方、 $z_0=0.25\text{ m}$ の場合を示した図-7 については、繰り返し载荷の増加に伴い応力-ひずみ関係においては徐々に地盤剛性の低下が見られると同時に、図-6 に比べて非常に大きな間隙水圧の蓄積が見られる。このことは、地盤剛性が大きい地点にパイプラインを設置する場合には非常大きな間隙水圧の蓄積が見られることを意味しており、これに伴う地盤剛性の低下やパイプラインの急激な水平移動が生じる可能性を示唆しているものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、海底パイプラインに作用する暴風時の波浪や潮流による抗力や揚力を算定し、繰り返し荷重下でのパイプラインの耐波安定性評価として、有効応力に基づいたパイプライン-地盤系の動的応答解析を行い、海底地盤条件の違いがパイプラインや地盤の応答特性に及ぼす影響についても検討したものである。本研究で得られた結果を以下に示しておく。

- 1) 同じ繰り返し荷重を作用させた場合、パイプラインの初期埋設深さが浅い場合 ($z_0=0.1\text{ m}$) には、深い場合 ($z_0=0.25\text{ m}$) に比べて繰り返し载荷中のパイプラインの繰り返し水平移動量 (振幅) や沈下量が大きくなる傾向を示す。
- 2) いずれのパイプラインの初期埋設深さにおいても、 N 値および細粒分含有率 F_c が小さい海底地盤上に設置されたパイプラインについてはパイプラインの沈下量および水平移動の振幅量は大きいものの、繰り返し回数が大きくなるにつれてある範囲内の値に収束し、その後の繰り返し荷重に対してはその範囲内での応答となる。また、パイプライン直下地盤内部のせん断ひずみや間隙水圧は一定の範囲内の値となる。
- 3) N 値や細粒分含有率 F_c が大きい海底地盤について、繰り返し载荷に応じてパイプラインの沈下や水平移動の振幅は小さく地盤剛性の低下は小さい。また、繰り返し回数が増えるにつれてパイプライン直下地盤の

応力・ひずみ履歴応答はあるループに収束する。一方、パイプラインの初期埋設深さが浅い場合 ($z_0=0.1\text{ m}$) には、深い場合 ($z_0=0.25\text{ m}$) に比べてパイプライン近傍における地盤内部における間隙水圧応答は繰り返し载荷とともに徐々に大きくなる傾向を示す。

参考文献

- 高谷富也・M.F. Randolph (2003) : 繰り返し水平载荷を受けるパイプライン直下地盤内の間隙水圧応答について, 海洋開発論文集, Vol.19, pp. 505-510.
- 高谷富也・小河史枝 (2004) : 繰り返し载荷を受けるパイプライン周辺地盤の間隙水圧応答について, 海洋開発論文集, Vol.20, pp. 449-454.
- 高谷富也 (2005) : 繰り返し载荷を受けるパイプライン挙動と地盤特性の関係について, 海洋開発論文集, Vol.21, pp. 957-962.
- 森田年一・井合 進・Hanlong Liu・一井康二・佐藤幸博 (1997) : 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易推定法, 港湾技術研究所資料, No.869.
- Hasselmann, K., Barneft, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olders, D.J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. (1973) : Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsche Hydr. Zeit, No.12, pp. 9-95.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1990) Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp. 27-56.
- Lewis, A.W. and Allos, R.N. (1990) : JONSWAP's Parameters : Sorting Out the Inconsistencies, Journal of Ocean Engineering, Vol.17, No.4, pp. 409-415.
- Neill, I.A.R. and Hinwood, J.B. (1998) : Wave and Wave-Current Loading on a Bottom-Mounted Circular Cylinder, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.8, No.2, pp. 122-129.
- PRCI (2000) : Submarine Pipeline On-Bottom Stability - Volume 1, Pipeline Research Council International Inc..
- Sorensen, T., Bryndum, M. B. and Jacobsen, V. (1986) : Hydrodynamic Forces on Pipelines - Model Tests, Pipeline Research Council International Inc..
- Takatani, T. and Randolph, M.F. (2003) : Experimental Study of Pore Pressure Build Up Due to Horizontal Cyclic Loading of Pipeline, Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.31-37.
- Takatani, T. and Ogawa, F. (2004) : Pore Pressure Build Up Response Due to Horizontal Cyclic Loading of Pipeline, Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, S6C.
- Takatani, T. (2005) : Pipeline-Seabed Interaction Analysis for Horizontal Cyclic Loading of Pipeline, Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Vol.2, pp. 115-122.