

フレキシブルパイプを用いた津波被害低減法に関する研究

鈴木 博善	大阪大学大学院工学研究科
加藤 直三	大阪大学大学院工学研究科
竹内 昂平	大阪大学大学院工学研究科
奥林 拓也	大阪大学大学院工学研究科

A study about the method of reducing damages by tsunami by using Flexible Pipes

Hiroyoshi SUZUKI	Graduate School of Engineering, Osaka University E-mail: suzuki_h@naoe.eng.osaka-u.ac.jp
Naomi KATO	Graduate School of Engineering, Osaka University
Kohei TAKEUCHI	Graduate School of Engineering, Osaka University
Takuya OKUBAYASHI	Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract

By the Tohoku Earthquake in March, 2011, in the north-east region in Japan, the industrial facilities like nuclear power plants and petroleum complexes near Pacific Ocean coast were heavily damaged. As the results, pollutions by radiation leakage and fire disasters by oil leakage as in those areas. As the secondary disasters, a lot of serious problems have occurred for reconstructions are delaying.

Recently, it is supposed that Nankai Trough Earthquake will happen in near future, and Industrial complexes placed along Osaka Bay will be damaged by this earthquake and tsunami.

To reduce these damages by tsunami, several new structures are developed like a flap gate breakwater, a buoyancy-driven vertical piling breakwater, and so on. But these structures have some disadvantages. For example, they disturb ships traffics, destroy the scenery or environment around them, and so on.

To solve these problems, the structures that reduce tsunami energy by using flexible pipes have been started to developed at Osaka University now.

In this paper, the outline of the flexible pipe system and the part of the result to investigate the effect of the flexible pipes are introduced.

1. 諸言

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震および津波による、東日本大震災では、Figs1,2に示すように、東北地方太平洋沿岸の原子力発電所や石油コンビナートなどの産業施設が被害を受けた。この結果、原子力発電所では核燃料のメルトダウンによる放射能もれによる汚染が発生したり、石油コンビナートでは、石油類の流出により火災が発生したりしたことによる、甚大な二次災害が広がった。この二次災害のため、震災後の復興が遅れるなど非常に大きな問題となっている。

近い将来、南海トラフ地震の発生が想定されている。同時に、これによる直接的被害および津波の発生による被害も想定されている。このとき、大阪湾沿岸に面する石油コンビナートなどの施設もその被害を受けることが予想される。東日本大震災と同様に、大阪府やその周辺の地域において前述のような二次災害への対策が急がれる。



Fig.1 Damage of the nuclear power plants



Fig.2 Disasters by oil leakage

これまでも、地震やそれを起源とする津波、あるいは、高波、高潮に対応するために、防波堤が建設されている。

既存の防波堤として、よく知られているものに、Figs.3,4 に示すような防波壁や、消波ブロックによるものがある。

これらは平時の高波や高潮に対して十分な効果を有しているが、津波対策として、これらを太平洋沿岸に増設するなどの方法では、船舶の航行の妨げになるほか、環境破壊・景観破壊の要因になるなど、多くの欠点を有するものと考えられる。



Fig.3 Bank protection by concrete



Fig.4 Embankment by tetra pods

一方、予想される南海トラフ巨大地震およびこれによる津波に対し、単に手をこまねいているだけではなく、津波被害を低減するための様々な技術が考案され、適用されつつある。

例として、近年 Figs.5,6 に示すような直立浮上式防波堤¹⁾やフラップゲート式防波堤²⁾などの可動式の防波堤が考案され、実証実験や模型試験が行われている。直立浮上式防波堤は、津波・高波の来襲時に海底から上部鋼管が浮上する可動式防波堤である。海底に壁状に設置した下部鋼管の中に、それより直径の小さい上部鋼管が格納されている。津波・高波のときに送気管から上部鋼管内部に空気を送り込むと、浮力で上部鋼管が海面上に浮上する。排気すると浮力が小さくなり、上部鋼管が海底へと沈降する。フラップゲート式可動防波堤は平時時には海底に一列に配置した扉体を、津波や高潮の来襲時に浮力を利用して旋回起立させることで、連続した防波堤を形成する可動式の構造物で、津波や高潮による背後域の水位変動を抑制することができる。この方式の最大の特長は、津波や高潮の力を最大限に利用することであり、安価な防御施設の建造を追求している。

これらはある程度の水深を有する沖合の海底を掘削して建造するため、莫大なコストや建造に時間がかかる上、複雑で高度な技術が要求されるため、現時点で、実現は難しいと考えられる。現に、直立浮上式防波堤は、諸般の事情で開発中止となった。

以上のような状況から、上記のような問題を解決でき、かつ大地震の際の津波にも対応できるような防波堤あるいは、防波堤に準じる構造物を開発する必要がある。

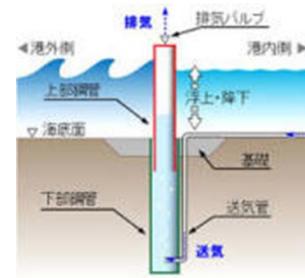


Fig.5 Buoyancy-driven vertical piling breakwater

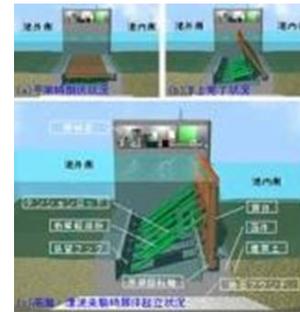


Fig.6 Flap gate breakwater

そこで、大阪大学では、フレキシブルパイプを用いた津波エネルギー低減装置を考案し、これの津波被害低減効果を検討することとした。

本研究では、このうち、フレキシブルパイプの選定及び性能調査、模型による津波エネルギー低減効果の確認、数値シミュレーションに用いる数値モデルの作成を目指すこととした。

本論では、ここまで得られた結果の一部を紹介する。

2. フレキシブルパイプを用いた津波エネルギー低減装置

この装置は、従来のコンクリートなどを用いた防波堤と違って、柔らかい素材で作られたパイプ状の構造物を海底に設置し、津波の来襲時にはパイプ内に空気を封入して起立させることで、津波の有する運動エネルギーを低減し、さらには、津波による被害の低減を目的とした津波制御構造物である。

この外観と作動原理は、以下の概念図 (Figs.7,8) に示すとおりである。平常時には柔軟な素材で作成したパイプを圧縮空気タンクが入った土台に接続し、折りたたんだ状態を取り付け、これを海底に設置しておく。津波の発生時に電磁弁を開き、パイプに空気を流し込むことによって硬化・起立させ、津波のエネルギーを減衰することを狙ったものである。利点としては、以下のようなものが挙げられる。

1. コンクリートによる防波壁や消波ブロックと違い、平常時は海底に沈んでいるために船舶などの海上交通を妨げることがなく、景観破壊もない。
2. 可動式の防波堤と比較して構造が簡単で使用する素材も安価なため、よりコストを低く抑えることができる上、建設時間も短縮できる。
3. パイプの長さを長くすることによって、他の防波堤と比べて技術的に容易に構造物の高さを伸ばすことが出来るため、大きな低減効果を期待できる。

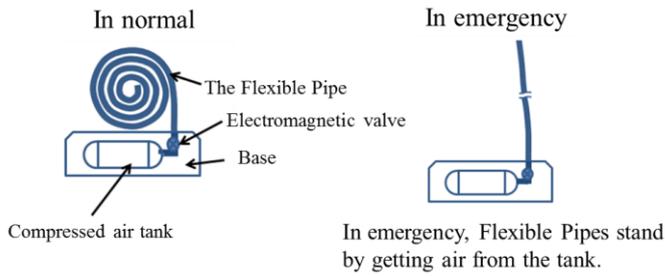


Fig.7 Conceptual diagram of Flexible pipes

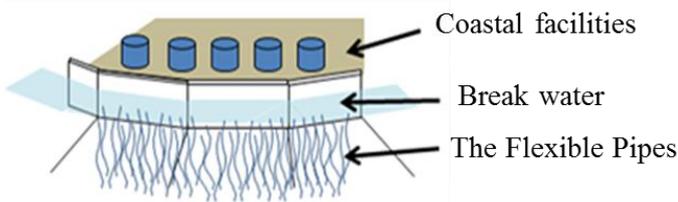


Fig.8 Layout drawing of Flexible pipes

以下では、フレキシブルパイプと、津波の運動エネルギー低減効果について述べる。

3. フレキシブルパイプの選定

本研究の端緒として、Figs.7.8 に示すような機能を有するフレキシブルパイプを選定する必要がある。すなわち、平時には、コンパクトに収納でき、有事には空気圧にて硬化できるような素材である。これには、一般の消防ホースを基礎として選定をすることとした。消防ホースは、二層構造になっており、表面は布で覆われ高圧下でも伸びないようになっており、内側は水密性を保つためゴム引きとなっている。このため、水密性のみならず気密性にも優れ、高圧にも耐えられる。以上から、本研究に使用するフレキシブルパイプとして適していると判断したからである。消防ホースは、呼び径の異なる3種類を検討対象としたが、これは呼び径の違いによる曲げ剛性や撓み量の変化等を調査するためである。消防ホースの写真と、直径等の情報を Fig.9 及び Table.1 に示す。



Fig.9 Fire Hoses which have different diameters

Table.1 Principals of Flexible Pipes

呼び径[mm]	40	65	100
内径[mm]	38.7	63.7	98.7
肉厚[mm]	1.3	1.3	1.3
質量[kg/m]	0.157	0.282	0.393
気密時の密度[kg/m ³]	119.4	85.0	50.0

消防ホースに高圧空気を封入し、これにより消防ホースを硬化させることを考えているが、このときの消防ホースの曲げ剛性 EI を知る必要がある。このため陸上において、消防ホースに高圧空気を封入し、曲げ剛性 EI を計測した。消防ホースの直径 D 毎にまとめた結果を Fig.10 に示す。

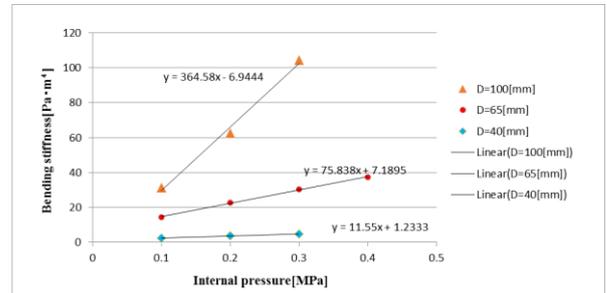


Fig.10 Relationship between deformation and bending stiffness

この結果より、いかなる直径でも消防ホースの曲げ剛性 EI は内圧に比例して大きくなると考えられる。

同時に、消防ホースの直径と曲げ剛性 EI の異なる内圧 p 毎の関係は Fig.11 に示すようになる。

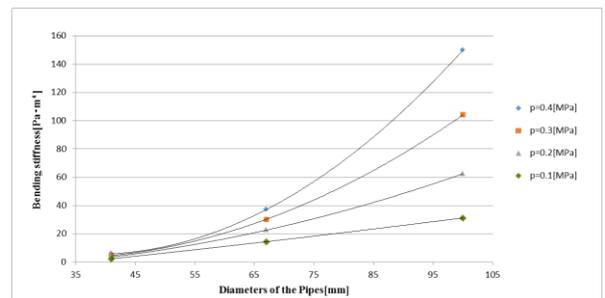


Fig.11 Relationship between diameter and bending stiffness of pipes

以上より、消防ホースの曲げ剛性 EI は直径の4乗程度、あるいは内圧の1乗に比例して大きくなることが観察できる。

計測した範囲では、曲げ剛性 EI は、予想よりも大きくなり、このままでは、フレキシブルパイプとして不適切となる可能性がある。一方で、消防ホースの曲げ剛性を大きくするためには、内圧を上げることに比べ、直径を大きくすることが非常に有効であることがわかった。

試算として、海底に設置した消防ホースを片持ち梁と考えて、一様流中での自由端での撓みを計算した。流体抵抗は、十分長い3次元円柱の C_D を用いて推定することとした。この場合、自由端での撓みは、片持ち梁に荷重が作用した際の式³⁾を用いて、

$$\delta = \frac{\rho v^2 d C_D l^4}{16EI} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 ρ は流体の密度[kg/m³]、 v は流体の速度[m/s]、 S は代表面積[m²]、 C_D は抗力係数、 l は梁状物体の長さ[m]、 d は梁状物体の直径[m]である。

今回は実際に津波が発生した場合を想定し、 $v = 12.5$ [m/s]、 $l = 16$ [m]、 $\rho = 1000$ [kg/m³]、 $C_D = 1.2$ 、内圧 $p = 1.0$ [MPa]にて計算を行った。Table.2 にその結果を示す。

Table.2 Results of calculation of deformations

呼び径[mm]	40	65	100
曲げ剛性[Pa・m ⁴]	12.9	83.0	357.6
撓み[m]	2.3・10 ⁷	6.0・10 ⁶	2.1・10 ⁶

この結果、今回考えている消防ホース 3 種では、強度的に不十分であることがわかった。

別に、消防ホースの C_D を求めるため、水槽での曳航試験を実施し、その挙動を調査することとした。ただし、Fig.13 に示すように、浮力の影響が実際とは天地逆になるため、下端に浮力の 2 倍相当分の重量を付加し、これと条件を合わせた。

さらに、大変形が考慮できる ANC 法⁴⁾を用い、流体力を考慮できるように拡張し、実験と同様の計算を行い、実験と変位、変形形状が一致する C_D を求めると、 $C_D=2.0$ が得られた。



Fig.12 The towing experiment

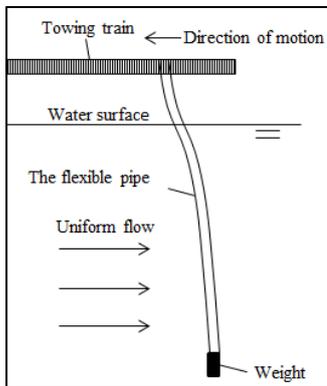


Fig.13 The concept of the experiment

Table.3 The condition of the experiment

全長	3[m]
直径	41[mm]
内圧	0.4[MPa]
曲げ剛性	0.32[GPa]
曳航速度	0.4[m/s]

以上の結果より、前述のように、消防ホースをそのままフレキシブルパイプとして適用することは困難であることがわかった。そこで、本研究では、3 種の消防ホースの機械的性質から外挿を行うことで、推定精度に問題を有する可能性があるし、現状では実在しないが、適度な柔軟性と剛性を有するような直径の消防ホースを検討することとした。

Fig.14 に、直径 D を 0.1m (既存) ,0.5m,1.0m,1.5m,2.0m,3.0m

とした場合の曲げ剛性 EI を Fig.12 の実測値から外挿し、推定した場合の、津波想定の一様流速中での消防ホースの撓みを ANC 法を使用して求めたものを示す。 C_D は、前述の値を用いている。

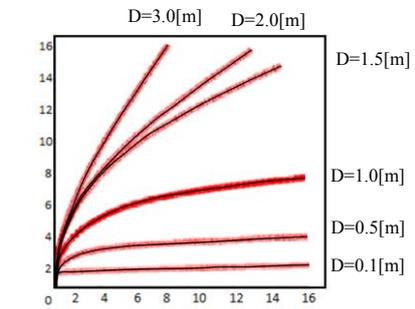


Fig.14 Results of the simulation

外挿に用いた消防ホース群は、使用している素材およびその肉厚等は変わらないため、外挿値も単純に消防ホースの直径のみが大きくなったものとして取り扱う。実際に想定しているフレキシブルパイプの全長などの条件は、Table.2 に示すとおりである。これは、数百年から数千年に 1 度の頻度で発生する、所謂レベル 2 津波の流速(12.5[m/s])とその際の波高(16[m])を想定している。

この結果から、消防ホースの直径が 1.0m 程度までの範囲では、ホースの撓みが大きく、津波のエネルギーを減衰するのに有効ではないと考えられる。一方、直径が 1.5m を越えると、撓みはそれまでと比較して小さくなり、津波のエネルギーを減衰させるために有効であると考えられる。

4.フレキシブルパイプ群の配置の検討

以上のように、フレキシブルパイプに用いる消防ホースとして、津波エネルギー減衰に有効な直径である、1.5m のものを考える。本来的に、消防ホースを 1 本、あるいは、直立浮上型防波堤のように一列に設置しての使用を想定しているわけではなく、Fig.8 に示すように、複数本を重層的に設置して、これらによって、津波の運動エネルギーを減衰することを目指している。

したがって、これの効果を検証するためには、実機試験あるいは模型試験、または数値シミュレーションの実施が必要となる。実機試験は、本質的に実施不可能であり、数値シミュレーションでは、複数本のフレキシブルパイプの挙動を含めて海洋シミュレーションと連成計算させるのも、消防ホース同士の干渉も含めると、不可能に近い。よって、残る方法は、模型試験となる。本研究では、フルード則を基礎として、150 分の 1 にスケールダウンを行い、模型試験を行うこととした。

このとき、前章で選定した消防ホースは、海上技術安全研究所の模型試験⁵⁾の際に用いられたフルード則に従うと、Table.4 に示す表のようにスケールダウンされる。流速もフルード則に従い $1/\sqrt{150}$ にスケールダウンし、1[m/s]で行った。

Table.4 Principals dimensions of pipes model

	実機の パイプ	模型の パイプ
長さ[m]	16	0.107
直径[m]	1.5	0.01
質量[kg]	78.89	0.0055
曲げ剛性 [MPa・m ⁴]	201.7	2.3・75 ⁻⁸

これに対応する消防ホースの模型として, Fig.15 に示すような市販のエアホースが使用可能であることがわかったので, これを適当な長さで切断し, 使用することとした。



Fig.15 Air hose used for model

この実験では, 消防ホースの重層的な配置によって津波の運動エネルギー低減をねらっているため, 流れに垂直方向の, ホースの間隔を 10mm (=1D) で固定し, 流れに平行な方向の, ホースの列間隔を 1D から 4D まで, 1D 毎に変化させて行った。また, ホースの列は 0 (パイプなし) から 5 列までを考え, 隣り合う列は 1D ずらして設置し, 実験を行った。 Figure.16 に, ホースの列数 5, 列間隔 3D で実験を行っている様子(図の左が上流)を, Fig.17 にその概念図を示す。

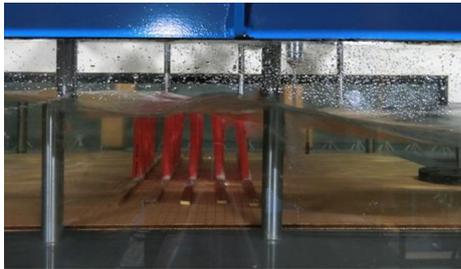


Fig.16 Photo of model experiment (Side view)

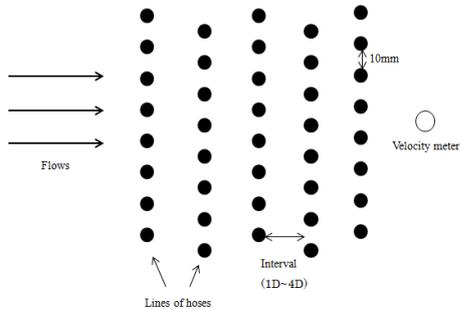


Fig.17 Arrangement of the model pipes (Top View)

Table.5 及び Fig.18 に, 図中, 流速計の設置位置である, ホースの列中央, 最後列より 30mm 後方, 水深 50mm の位置での流速[m/s]を示す。

Table.5 Water velocity of the model tests (m/s)

	0 列	1 列	2 列	3 列	4 列	5 列
10(1D)	1.01	0.88	0.86	0.79	0.55	0.54
20(2D)			0.88	0.72	0.64	0.56
30(3D)			0.82	0.68	0.56	0.39
40(4D)			0.82	0.60	0.45	0.35

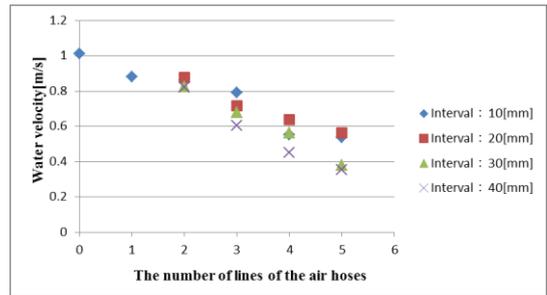


Fig.18 Relationship between water velocity and model lines

Table.6 及び Fig.19 に, この模型試験結果から再びフルード則を用いて算出した実際の流速[m/s]を以下に示す。

Table.6 Water velocity of the actual situation (m/s)

	0 列	1 列	2 列	3 列	4 列	5 列
10(1D)	12.39	10.79	10.56	9.70	6.75	6.56
20(2D)			10.74	8.78	7.83	6.91
30(3D)			10.09	8.33	6.90	4.63
40(4D)			10.06	7.41	5.54	4.33

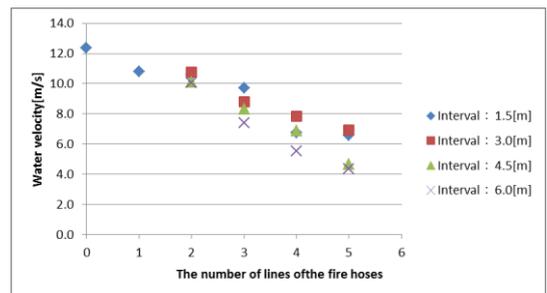


Fig.19 Relationship between water velocity and actual lines

この模型試験及びそれから求めた結果によると, ホースの列間隔が 4D までの範囲において, その間隔を大きくする程, より高い減衰効果があることが伺えた。二次災害を引き起こさない程度に津波のエネルギーを減衰させるためには, 消防ホースを 3 列以上配置することが望ましいことがわかった。

5. 結言

- 消防ホースに一定荷重や流体力を加えた場合, 消防ホースのたわみ量は内圧に反比例する。曲げ剛性 EI は内圧の 1 乗程度に, 直径の 4 乗程度に比例する。したがって, 直径を適切に与えれば, 消防ホースの津波エネルギー低減性能は内圧を大きくした場合と比較して飛躍的に向上する。
- 水中での曳航試験とシミュレーションの結果, 消防ホースの抵抗係数 C_D は $C_D=2.0$ となり, 予想される円柱の抵抗係数である 1.2 を大きく上回った。
- 津波を想定したシミュレーションの結果, 津波を有効に低減するために, 消防ホースの直径は少なくとも 1.5m 程必要であることがわかった。試算では, 内圧を 10 気圧に設定したために, 津波エネルギーの低減に必要な直径が大きくなったが, 内圧をより高くできるのであれば, より小さな直径の

消防ホースも有効である。

- ・ 模型試験及びそれから算出された結果によると、消防ホースの列数を 3 列以上にすると、津波の流速を最大 65%程度減衰でき、石油施設等への被害を防ぐのに効果的であることが予想できる。消防ホースの列間隔が 4D までの範囲において、その間隔が大きくなるほど、より高い減衰効果が期待できることがわかった。

6.今後の課題

- ・ 今回の研究では津波による流体力が大きいために津波エネルギー低減に有効な消防ホースの直径が数m程にまでなった。これでは実用的であるとはいえないので、今後はホースの肉厚を大きくしたり、より高い曲げ剛性を持つ素材を検討したりするなどして、より実用的で有効な方法を考察する予定である。
- ・ 今後、これらを基礎として、フレキシブルパイプ群の効果に関する数値モデルを作成の上、津波シミュレーションモデルに組み込み、具体的な津波の運動エネルギー低減効果および津波被害低減効果を推定、検証していく予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、消防ホースの提供をいただいた岩崎製作所、岩崎勝己様を始め、社員の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 直立浮上式防波堤
https://www.obayashi.co.jp/service_and_technology/related/tech_d001
- 2) フラップゲート式可動防波堤
<http://www.hitachizosen.co.jp/technology/hitz-tech/structure.html>
- 3) 高橋幸伯・町田進・角洋一：基礎材料力学，片持ち梁の公式を利用した梁の簡易加算解法，培風館，pp120-122, 2012
- 4) 門倉皓介，小林信之：モード合成法による ANCF3 次元梁の自由度の低次元化，日本機械学会論文集,814,pp1-12,2014
- 5) 海上技術安全研究所:メガフロートに関する研究,
http://www.nmri.go.jp/ocean2/megafloat/megafloat_j.html
浮体模型の相似則について