中水深域空間利用構造体の開発 (その3)

— 免震システムの設計と機能評価 —

正員 吉 田 宏一郎* 正員 鈴 木 英 之*
正員 鈴 木 裕 子** 正員 岡 徳 昭*
中 居 隆** 菅 又 康 倫***

Development of a New Type Structure for Ocean Space Utilization of Middle Water (3rd report)

— Design of Relief System from Earthquake and Evaluation of Its Function —

by Koichiro Yoshida, *Member* Hideyuki Suzuki, *Member*
Hiroko Suzuki, *Member*, Noriaki Oka, *Member*
Takashi Nakai, Yasumitsu Sugamata

Summary

A concept on a ring-like semisubmersible for ocean space utilization of middle water region was proposed in the 1st and 2nd papers.^{1),(2)} Principal concepts of this structure are summarized by the following items: semisubmersible, ring-like shape in plan supporting structures and connection system. The structure is anchored by supporting structures at several points and a special connection system between a semisubmersible and supporting structures is adopted, which enables such a function that the structure is almost rigidly connected with supporting structures in case of severe storm but almost completely released in case of severe earthquake.

In this paper, in order to prove the above concept on the connection system, several elements of the system are properly designed and computer simulations and simplified, small scale model tests on a full connection system are carried out by using the numerical data based on the time history records of accelerations of actual severe earthquakes. The results are discussed and a way of release of the connection system is suggested to avoid transferring earthquake motions from the supporting structures to the semisubmersible.

1. はじめに

人口の増加や人間社会の活動度の高まりによるスペースの不足、海の持つアメニティへの憧れから海洋空間、特に沿岸域海上空間の利用に対するニーズは今後着実に増大してゆくであろう。従来、海洋に空間を創出する方法としては圧倒的に埋立が採用されて来たが、これは海洋環境に過大な負荷をかけ、現状への復帰も不可能である。

これに対し、必要なのは土地ではなくスペースであるとの観点から、埋立に代えて構造物、特に浮体により海上空

間を創出することにより、海洋環境に与える負荷を最小にしつつ、有効にスペースを確保することを考える。

本研究の初報および（その２）において、伊勢湾内津浦東南東13 [km] の海域を選定し、昼間人口3万人の海上ビジネス空間を、半潜水式浮体を重力式の支持構造物で碇着させることにより創出する構想を提案し、その技術的可能性について検討を加えた。

本報では、この構想の中で、概念が提案されている免震システムについて基本設計を行うとともに、免震システムとしての機能に関し、計算機シミュレーションと実験により検討を加え工学的評価を行ったので報告する。

2. 構造体の基本コンセプトと地震入力

2.1 基本コンセプト

本構造体は3万人規模のビジネス都市を目的にし、伊勢湾津沖東南東約13[km]の地点を設置場所としている。本

* 東京大学工学部

** 東京大学工学系研究科

*** (株)リクルート

原稿受理 平成4年7月10日

秋季講演会において講演 平成4年11月9, 10日

構造体の基本コンセプトは、半潜式、リング状、重力式の支持構造体、可変的な接続システムの4点に要約される。

半潜式構造体はカラムとローハルとからなる浮力体によって構造体重量および積載物重量を支えるものである。これにより水線部分がスパスになり、風、潮流、波による荷重が小さくなる。また波による上下方向荷重を小さくするような浮力体の形状を選択することができる。潮位の変動に対しては浮力体内のバラスト水を制御することで相殺することができる。

埋立方式やケーソン工法による土地造成では空間を生み出すためには高層建築物を建設することになる。これに対して半潜式では土地に当たるのが浮力体であり、これが上部構造と一体化されているため、スペースの確保が低層によって可能であり、また耐風性にも優れているとともに周囲の環境と適合することにより居住空間として心理面にもよい影響を与える。

一般に低層の構造物を海上に建設する場合、矩形あるいは正方形といった形状が考えられる。例えば海上空港を作るといった目的の場合は機能的、経済的な面から矩形のほうが有利である。

しかし本研究は海上にビジネス空間を造るという新しい可能性の追求という目的から、機能面で長所の多い線状の構造体を採用する。また、内部における移動の容易さ、リング状という閉じている形状が与える安心感、建造上の容易さ、海面を面的に大きく覆う場合に比べて自然環境に対する影響が小さい、全ての空間において海のアメニティ性、景観を楽しむことができるといった長所から直線構造に対してリング状の上部構造を採用した。

沖合に単独で建造される半潜式構造物を支持する方法としては、一般にチェーン、ワイヤ等を利用した弛緩係留あるいは緊張係留にするか、ドルフィンを建造してフェンダー、機械的継手で接続する方法が考えられる。しかし前者については風、潮流、波による動揺が避けられず、今回のビジネス空間というコンセプトには不適切である。またその強度評価の信頼性にも疑問がある。

一方後者について、より信頼性は高いと思われるがドルフィンの数が膨大になり経済的に問題がある。そこでここではドルフィンを多数集約して海底に埋設された数カ所の重力式支持構造体で支持することとしている。以上のコンセプトに基づく概念図を Fig.1 に示す。

本構造体特有のもう一つ重要な概念として、可変的な接続システムを持つことが挙げられる。海底に直結した支持構造体による支持のため、大地震が起こった場合、リング状構造体は地震波の入力を直接に受け、場合によっては、破壊にいたることになる。そこで、これに対応した接続システムが必要になる。すなわち、半潜式リング状構造体と、重力式の支持構造体とは大地震時以外はほぼ剛接に近い状態で接続する。これに対し地震時には両者が離れてある程

度自由にその変形を許す。

このような接続システムの実現のために、本構造体では積層ゴムと空気シリンダーの組合せを採用している。積層ゴムは Fig.2 の両構造物間の鉛直方向の相対変位の拘束

Fig.1 Conceptual configuration of ring-like semisubmersible

Fig.2 Conceptual configuration of gravity foundation and supporting device

に、空気シリンダは水平方向の相対変位を拘束するように配置される。大地震時には、センサーからの信号により空気シリンダ内の圧縮空気が解放され、水平方向の空気シリンダによる支持剛性は0になる。こうすることで水平方向に関しては、両構造物はほぼ自由に運動できるような機構になる。

2.2 地震入力

次に設定地震波について述べる。まず Fig.3 は設置場所である伊勢湾周辺で起こった主な地震の震央分布を表している。これから設置地点に影響を及ぼす地震としては次のようなものが考えられる。

- 南海トラフ沿いでおこる M8 級の地震 (南海地震)
- 内陸部で起こる M8 級の地震 (濃尾地震)
- 近傍で起こる M5~6 級の地震 (三河地震)

これらの地震から設置地点で起こる地震動の最大値は以下に示ようになる。

最大加速度	212.5[cm/s ²]
最大速度	23.7[cm/s]
最大変位	6.3[cm]
最大継続時間	29.0[s]

これらから遠州灘沖で起こる M8 級の地震、さらに設置地点近くで起こる M7 に近い地震に対応する地震波を応答解析の入力波とすることにする。しかし、容易に手に入られる継続時間の長い強震記録波形の種類は限られたものである。今回は、港湾構造物の応答解析にしばしば用いられている 1968 年の十勝沖地震の八戸港湾における強震

記録を用いることにする。この地震では、

最大加速度	200[cm/s ²]
継続時間	35[s]

であり、上記の条件に近い地震波である。

3. 接続システムの設計

3.1 ピストン・シリンダ機構の設計

ここでは、通常時と地震対応時とで変化する接続システムの中心部をなすシリンダ機構を設計する。

前報により、支持構造体 1 つ当たりのシリンダによる半径方向のばね定数は、 1.0×10^{10} [kgf/m] である。よって、このばね定数を満たし、波浪時の水平支持反力 1.89×10^7 [kgf] に耐えるようなシリンダ機構をつくる。

シリンダ内の圧力は、50 [atm] 以下になるように設計する。これは、シリンダ機構の場合、圧力容器と異なり、ある程度以上の高圧力になると、内部の気体が可動部から漏れてしまうからである。また、シリンダ長さは、地震時の上部構造と支持構造体の間の水平距離の最小値よりも長いものとし、130 [cm] 以上取ることとする。これは、地震時の振動で、上部構造と支持構造体が衝突して、衝撃力を与えることを避けるためである。また、このときの支持状態で波浪がきた場合の変位は、設定波高 8.1 [m] で 52 [cm] であるから、地震時に空気シリンダの支持を外した状態で波浪がきても、上部構造と支持構造体が衝突することはない。

シリンダ自体をばねとして使うと、設計基準を満足し、しかも内圧の限界値 50 [atm] 以下に抑えるためには、シリンダの断面積を大きくしなければならない。断面積をあまり大きくすると、シリンダ間の隙間が狭くなり、メンテナンスなどがしにくくなる。そこで、Fig.4 の様なモデルを採用することにした⁴⁾。このモデルでは、シリンダ自身はばねとして働かず、ピストンロッドの部分がばねとしての働きを担う。また、地震発生を観測してシリンダ内の空気を抜いた場合を除いては、ピストンが動かないように作る。ピストンロッドと上部構造との間は結合せず、ピストンロッドの初期縮みによる圧縮力によって、ピストンロッドが常に上部構造を押している状態にしておくことにより、シリンダ機構と上部構造との間で力を伝達するようにする。シリンダ自身はばねとして働かないため、シリンダの長

Fig. 3 Distribution of important epi centers surrounding the Ise Bay

Fig. 4 Air cylinder model

さを長く取ることが可能となり、シリンダ内の圧力を抜いた後の上部構造とシリンダ機構との間の距離を長く取ることができ、また、シリンダ内の圧力も低くすることができる。

シリンダ内の圧力を P 、シリンダの断面積を A 、ピストンロッドの初期縮みを x_0 、上部構造の水平方向の変位量を x 、ピストンロッドをばねと考えたときのばね定数を k 、上部構造を支持する力を f とする。

静的に考えて平衡方程式を作ると、

$$PA - T_1 - k(x_0 - x) = 0$$

$$k(x_0 - x) + f - k(x_0 + x) = 0$$

$$k(x_0 + x) + T_2 - PA = 0$$

ピストンが動かないための条件として、 $T_1 \geq 0, T_2 \geq 0$ であるから、

$$PA \geq f_{\max}/2 + kx_0$$

ピストンロッドと上部構造の間が離れないために、 $x_0 \geq x_{\max}$ を考えると、

$$kx_0 \geq f_{\max}/2$$

となる。

内径3[m]のシリンダを、1つの支持構造体につき片側に3行7列並べるものとする、シリンダ1個当りのばね定数を k 、支持反力の最大値を $f_{\max}$ とすると、

$$k \geq 2.38 \times 10^8 \quad [\text{kgf/m}]$$

$$f_{\max} \geq 9.0 \times 10^5 \quad [\text{kgf}]$$

となる。ピストンロッドの直径を0.5[m]、長さを1.5[m]とすると、材質を鋼として、このピストンロッドによるばね定数は、

$$k_p = 2.75 \times 10^9 \quad [\text{kgf/m}]$$

となり、 k についての条件は満足している。よって、 $k = k_p$ として、

$$x_0 \geq 1.64 \quad [\text{mm}]$$

となる。これによるピストンロッドの初期応力は、4.2 [kgf/mm²]、また $f_{\max}$ によるピストンロッドの応力を計算すると、4.6 [kgf/mm²] となる。

これらの結果より、シリンダーの内圧は、

$$P \geq 1.80 \times 10^5 \quad [\text{kgf/m}^2] = 17.4 [\text{atom}]$$

となる。 x_0 が0.1 [mm] ずれることによる内圧の要求値の増加量は、3.76 [atom]であることを考え、余裕を取って、 $P = 30.0 [\text{atom}]$ とする。

いま、シリンダの肉厚を t 、内径を D 、引き張り強さを $\sigma_B = 45 [\text{kgf/mm}^2]$ とすると、JISのシリンダーチューブの肉厚決定式 $t = PD/2(\sigma_B/3)$ より、 $t = 30.0 [\text{mm}]$ の肉厚のシリンダーチューブを用いばよい。

3.2 積層ゴムの設計

地震対策の一つとして、地盤から建物へ直接地震波が伝わらないようにする免震設計がある。この方法で近年よく用いられているのが、積層ゴム支承である。積層ゴム支承とは、薄いゴム板と鉄板を交互に積層して接着したもので

あり、鉛直方向の剛性に比べて水平方向の剛性を小さくすることで免震効果を得るものである。水平剛性を鉛直剛性の1/1000以下にすることができるが、ここではこの比がリング状構造体の応答計算で仮定した1/300程度になるように設計する。

積層ゴムのばね定数は次の式で求められる^{8),9)}。

水平ばね定数：

$$K_H = \frac{P^2}{2QK_B \tan(Qh/2) - Ph}$$

ただし、

$$Q^2 = \frac{P}{K_B} \left(1 + \frac{P}{K_S} \right)$$

鉛直ばね定数：

$$K_V = \frac{K_C A}{n T_R}$$

ここで、

P ：鉛直荷重 D ：ゴム直径

$h = n T_R + (n-1) T_S$ ：全高さ

n ：ゴム層数

T_R ：ゴム1層高さ T_S ：中間鉄板1層厚さ

$S_1 = D/(4 T_R)$ ：1次形状係数

$S_2 = D/(n T_R)$ ：2次形状係数

$A = \pi D^2/4$ ：断面積

$I = \pi D^4/64$ ：断面2次モーメント

$$K_B = \frac{E_B I}{E_B + B} \cdot \frac{T_R + T_S}{T_R}$$

：鉄板の影響を考慮したゴム1層の曲げ剛性

ただし、 $E_B = 3G(1+2/3KS)$

$$K_S = GA \frac{T_R + T_S}{T_R}$$

：鉄板の影響を考慮したゴム1層のせん断剛性

$$K_C = \frac{E_C B}{E_C + B}$$

：ゴム1層の縦弾性係数

ただし、 $E_C = 3G(1+2KS)$

K ：ゴム硬度による係数

G ：ゴムのせん断弾性係数

B ：ゴムの体積弾性係数

ゴムの材料定数を考慮すると $K_H/K_V = 1/300$ にするには、形状係数 S_1 を11程度にしなければならない。ゴムの材料定数としては、ゴム硬度 (IRHD) 65程度のものを考えて $K = 0.54$, $G = 0.014 [\text{tonf/cm}^2]$, $B = 20.4 [\text{tonf/cm}^2]$ とする。

直径 D としては、ゴムにかかる面圧から考えればこのように大きな値は必要ないが、リング状構造体と支持構造体のクリアランスを大きくし、水平許容変位を大きくするため、 $D = 200 [\text{cm}]$ にする。 $S_1 = 10.8$, $S_2 = 2.8$ にとり、

$$n = 16, T_R = 4.6 [\text{cm}], T_S = 0.6 [\text{cm}], h = 82.6 [\text{cm}]$$

$$K_H = 5.93 [\text{tonf/cm}], K_V = 1800 [\text{tonf/cm}]$$

Fig. 5 Size of laminated rubber

が得られ、Fig.5のような形状になる。

積層ゴムの総数は、ばね定数として $10^6[\text{tonf/cm}]$ を考えているから、17行17列、289個の積層ゴムを上下両面に設置することにする。

最大水平許容変位 X_H は、

$$\frac{X_H}{nT_R} + \frac{6S_1P}{A_{er}K_C} = \frac{\epsilon_b}{2}$$

ただし、

$$A_{er} = \{D^2 \sin^{-1}((D^2 - X^2)^{1/2}/h) - X(D^2 - X^2)^{1/2}\}/2 : \text{有効支持面積}$$

ϵ_b : ゴムの引き張り破断ひずみ

左辺第1項は公称せん断ひずみ、第2項は鉛直荷重による局所せん断ひずみである。ここでは $\epsilon_b = 5.0$ として、水平最大許容変位は、 $X_H = 128[\text{cm}]$ となる。

4. 実験による検討

4.1 実験の目的とその方法

(1) 実験の目的

この実験の目的は、シリンダによる切り離し機構の実現の可能性を調べることにある。

切り離し装置が有効に作動するためには、切り離し後に上部構造よりも速い速度で、シリンダが切り離される必要がある。そこで切り離し後の両者の挙動に注目する。「半潜水式リング状構造体の支持機構 (宮崎・横澤)」⁴⁾では、シリンダ弁が130 [cm] のストロークを動かすための時間として10 [s] を想定していた。しかしこれでは上部構造とシリンダ弁が衝突してしまう可能性が考えられる。そこでシリンダをどの程度の速度で動かすことができるのか、また衝突を避けるにはどの程度の速度があれば充分なのかを検証する。また上部構造についても切り離し後どのような挙動を示すか調べてみる。

(2) 実験システム

ここでは前に示したリング状構造体と支持構造体との接続部を、1自由度に限定してモデル化した実験装置を用いる。この概略図を Fig.6 に示す。実験装置は以下の要素からなっている。鋼鉄製の箱型梁、及びその支持機構 (支持枠とその中に設置される2個の空気ジャッキ)、箱型梁と支持枠を接続するスプリングからなる。これらは、それぞれ、リング状構造体の上部構造の一部、支持構造体の一部と空気シリンダ、積層ゴムに対応する。システムの特徴としては支持構造体に対する加振を支持枠に直接連結されたス

Fig. 6 Arrangement of experimental model

テップモーターによる変位制御としていること、リングの法線方向の1自由度のモデルとしていること、シリンダの切り離し時間を調整可能としたということがあげられる。

シリンダの切り離しについては、一室から圧縮空気を抜くと同時に別室から空気を注入することでその速度を速められるようになっている。また注入管の途中にニードルバルブを取り付けることで、シリンダ速度を調整できるように設計されている。

(3) 入力地震波データの作成

前述のように今回の実験装置は水平方向の1自由度のモデルとしているため、地震波についても水平方向成分のみを用いることにする。

本実験においては、前述の地震波形として十勝沖地震(八戸記録)を用いることとした。これを入力のための変位波形に変換する。誤差の蓄積を避ける目的から、フーリエ変換によるデジタルフィルタリングの方法を用いることにした。

まず加速度の原波形をフーリエ変換して周波数領域において積分計算を行ない変位に変換してから、最後に逆フーリエ変換するというものである。フーリエ変換にはFFT (高速フーリエ変換) のプログラムを用いた。また積分計算は加速度を $A \sin \omega t$ (ω : 周波数) とおくと、

$$\iint A \sin \omega t \, dt \, dt = -[1/\omega^2] A \sin \omega t + at + b$$

より加速度の値を ω^2 でわってから逆フーリエ変換し最後に t の1次式を適当に選んで加えた。但しこのとき

$$\omega = 2\pi f_k$$

$$f_k = k/N\Delta t \quad (N: \text{全標本数} \quad \Delta t: 0.02[\text{s}])$$

である。この方法によりえられた波形に、最終的に t の2次式まで加えて補正して得られたものを使うことにする。

十勝沖地震のデータは0.02 [s] 間隔であるがこれではステップモータは対応しきれず、0.1 [s] 間隔の入力では微妙な振動が再現できないためデータに修正を行い入力した。

4.2 実験の結果

(1) シリンダ速度

まず少量ずつ空気の注入を行いながら、シリンダの切り離しを行ったところ、5秒以上かかった。

次にニードルバルブによるスピードコントローラーによって、別室への空気の流入量を増やししながら、シリンダの弁の切り離し速度を変化させていった。流入量を増やすにしたがって時間は短縮され、8.0[atom]にした時、最短で0.25[s]でシリンダが切り離された。

これからシリンダに空気を注入して、シリンダの切り離し速度を早める方法は、非常に有効な方法であるということが分かった。

ここで理論的には本実験システムにおいて、シリンダの質量 $m=0.5[\text{kg}]$ 、シリンダ半径 $d=6.3[\text{cm}]$ 、シリンダストローク $L=5[\text{cm}]$ である。シリンダの断面積を A とすれば

$$A=\pi d^2$$

いま加速度 a を一定とすれば

$$L=1/2 at^2$$

$$PA=ma$$

である。これらを解いて $t=0.005[\text{s}]$

となる。0.25[s] となっているのは摩擦の影響であり、実機を考える上でこのことが必要となるであろう。

(2) 切り離し後の上部構造の速度および変位

いま、シリンダの弁の切り離し速度は可変に設定できることが分かった。次にどの程度の切り離し時間であれば充分なのかを考える。ここでは切り離し後の上部構造の速度が問題になりこれを示したのが Fig.7 である。これから分かるように、上部構造は切り離し後シリンダと衝突することなくすぐに振動が止まった。

今回の実験装置については、切り離し後の上部構造に対する減衰が大きすぎたため(2)についてはあまり実機に近い結果が得られたとは言えない。切り離し後の上部構造の挙動については、次のシミュレーションで検証することにする。

Fig.7 Displacement of cylinder and upper structure

5. シミュレーション計算による検討

5.1 シミュレーションの目的とその方法

(1) 概要

リング状構造体の動的特性を知るためにコンピュータを使ったシミュレーション計算を行う。ここでは東京大学大型計算機センターの、有限要素法による総合構造解析システム ISAS II をつかう。そして固有値解析と、過渡応答解析の2つの方法によりリングの動的応答特性を調べることにする。

まず支持構造体に接続されている場合と切り離されている場合のリングの応答特性を固有値解析によって調べる。次に実際の地震波(加速度で入力)に対する過渡応答解析を行う。ここではまず応力の軽減化が達成されているかどうかを確認する。

次に切り離し後にリングがどのような挙動を示すか、地面に対する相対変位に注目して調べる。ここでは特に切り離す瞬間のリングの変形状態によってその後の挙動が大きく変わってくると思われるため、切り離すタイミングをいろいろ変えてシミュレーションしてみることにする。まず第一に考えなくてはならないのは切り離された後のリングが、支持構造体と衝突することで破壊されないようにするという点である。

また通常、建築物の外乱に対する応答解析では加速度応答が問題となる。これはその居住性を考える上での基準となるものであるが、今回は地震という短い時間の中での特殊な状況を考えるため考えないことにする。

(2) 解析モデル

有限要素法の要素分割の方法は、「半潜式リング状構造体の工学的最適化に関する研究」(鈴木)⁵⁾に習った。その概要は以下の通りである。

① リング状構造体を線状構造と見なし中心角 7.5° おきに48個の節点を取り(Fig.8)、各節点間を直線の梁で近似した。また各節点において局所座標系を設定した。(X軸はリングの法線方向、Y軸は接線方向、Z軸は鉛直上向き)

② 各節点には6方向の自由度を与える。但し次に示すように特殊な節点にはある拘束条件を与える。

支持構造体と海底がつながる節点(節点16, 48)では、Fig.8に示す地震波方向の変位のみ可能。

③ 支持部の支持剛性については、あるバネ定数を持つ

Fig.8 Structural model for FEM analysis

たバネと見なした。支持構造体と上部構造は積層ゴムによって接続しているので、鉛直方向に積層ゴムによるばね定数のみを、また水平方向には積層ゴムのせん断ばね定数と空気シリンダばねによるばね定数を用いた。さらに積層ゴムと空気シリンダばねを面状に配置することによって生ずるそれぞれの軸回りの回転ばねもとりに入れた。これらの値をTable 1に示す。同時にX方向に 1.08×10^8 [kgf・s/m], Y方向に 1.57×10^8 [kgf・s/m]のダンパーを入れた場合も計算した。

また切り離しによる支持の変化を、節点 48, 16 における剛性（バネ定数）の変化により与えた。

④ 浮力体の質量、慣性モーメント（付加質量も含む）は節点での集中質量として換算した。

⑤ 梁要素の剛性に関してはTable 2の通りである。これは上部構造の主構造材によるもののみを考慮し、浮力体の剛性は無視している。

（3）設計基準

応力基準 15 [kgf/mm²]（安全性に影響）とする。また変位については切り離し後のリングと支持構造体との衝突を避けるという意味から、支持点での変位の許容値を 1.3 [m] とする。

（4）過渡応答解析の方法

地震波の入力は支持構造体に対して強制加速度として与える。入力とその応答解析の計算方法については次の通りである。

① 強制加速度は支持構造体に対して、海底と接続する点からのみ伝わると考えた。但し、強制加速度の支持部に対する入力は、Fig. 8において48から24の方向に伝わるため、節点16の支持部には節点48の支持部に対して遅れて伝わる。この時間遅れを、前述のように地震の伝播速度 4 [km/s] として考慮した。

② 変位について、ここではリング（上部構造）の変形を知ることが目的であるため、人工島（海底）に対する上部構造の相対変位を考えることにする。

今回のシミュレーションで、ISAS IIでは支持方法を変えるという剛性の変化を時系列で与えることができないため次のように計算した。

① まず空気シリンダを切り離す前までの計算を行う。

② 次に切り離す時刻における各節点での変位、速度を初期値として与え剛性を変えて、切り離した後の応答を計算し、最後に切り離し前後をあわせて時系列とした。

今回の目的の1つである支持方法を変えるタイミングについてであるが、まずまったく離さずにおいて変位、応力を計算してみる。この結果に対していくつかのタイミングで切り離してみ、その後の各節点における変位、応力がどの様に変化するかを比較してみ、最適なものを考えて行くことにする。ここではランダムに $0.48, 2.96, 4.96, 7.84$,

8.64 [s] という5つのタイミングで切り離しをおこない、その後の応答をシミュレーションしてみることにする。

変位についてはX方向（各節点におけるリングの法線方向）の成分のみを扱うことにする。これは他に比べて大きく、また切り放し後の支持構造体との衝突を避けるという問題にも関わってくるためである。

5.2 シミュレーションの結果

まず応力について、全く切り離さずにおいたとき、切り

Table 1 Parameters of beam elements

Cross-sectional area	$5.68E+2$ [m ²]
Moment of inertia of cross-sectional area. X-axis	$9.86E+3$ [m ⁴]
Moment of inertia of cross-sectional area. Y-axis	$4.91E+4$ [m ⁴]
Moment of inertia of cross-sectional area. Z-axis	$5.64E+3$ [m ⁴]
Payloads per meter	$3.93E+4$ [kg/m]
Young's modulus	$2.10E+10$ [kgf/m ²]
Shear modulus	$8.10E+9$ [kgf/m ²]
Poisson's ratio	0.3
Mass density	$7.96E+2$ [kgf・s ² /m ⁴]
Structural damping coefficient	0.01

Table 2 Spring constants

Direction	Connected [Air cylinder +Laminated rubber]	Disconnected [Laminated rubber]
X	$1.03E+10$ [kgf/m]	$3.33E+8$ [kgf/m]
Y	$3.33E+8$ [kgf/m]	$3.33E+8$ [kgf/m]
Z	$1.00E+11$ [kgf/m]	$1.00E+11$ [kgf/m]
R _x	$5.35E+13$ [kgf・m]	$5.35E+13$ [kgf・m]
R _y	$8.47E+13$ [kgf・m]	$8.34E+13$ [kgf・m]
R _z	$6.14E+12$ [kgf・m]	$8.11E+11$ [kgf・m]

Table 3 Maximum stress

	No damper	With Damper
Connected	19.1 [kgf/mm ²]	
Disconnected at 0.48[s]	9.7 [kgf/mm ²]	6.22 [kgf/mm ²]
Disconnected at 2.96[s]	11.9 [kgf/mm ²]	8.71 [kgf/mm ²]
Disconnected at 4.96[s]	13.2 [kgf/mm ²]	8.91 [kgf/mm ²]
Disconnected at 7.84[s]	35.0 [kgf/mm ²]	28.9 [kgf/mm ²]
Disconnected at 8.64[s]	1.64 [kgf/mm ²]	11.5 [kgf/mm ²]

離しをおこなったときの応力の最大値をそれぞれ Table 3 にしめす。これは各節点における応力の時系列中の最大値を比較して一番大きな値をとったものである。ここからいえることとしては次のようなことが挙げられる。

- ① 0.48, 2.96 [s] といった早い時刻で切り離したもののについては応力は小さい値をとっている。これは切り離さなかった場合と比較しても、小さく「切り離し機構による応力の軽減」という目的が達せられていることが確認される。
- ② 全ての時刻で切り離したもののについて、ダンパーを入れたときの方が応力は小さい値に抑えられている。
- ③ 切り離し時刻の遅いときについてはむしろ切り離さなかった場合と比べても応力は大きな値をとっている。しかし 7.48 [s] と 8.64 [s] とを比較してわかるように一概に切り離し時刻の遅いほど応力が大きくなるとはいえない。

次に変位について、まずまったく切り離さなかった場合の節点 16, 48 の X 方向の変位を Fig.9 にしめす。ここでは切り離し後に支持構造体と衝突しないようにすることが第一の目的であり、いろいろと切り離すタイミングを変えてシミュレーションしてみる。

切り離し後の節点 16, 48 の変位を、上記の 5 通りに切り離すタイミングを変えて、それぞれについてダンパーを入れた場合、入れない場合でシミュレーションした。ここではそのうち一部を示す。(Fig.10~Fig.12) これらの結果からいえることをいくつか挙げてみる。まず全ての場合について

- ① 切り離し前の変位 Fig.9 と比較して非常に滑らかな曲線を描いていて、切り離し以後は地震波の短い周期の振動の影響は受けていないように思われる。またそれぞれの場合について同じくらいの長い周期を持った緩やかな振動をしているように見える。
- ② 切り離し後の変位には、2.5[s] 前後の短い周期のモードの振動と、長い周期のモードの振動とが含まれている。このうち短い周期のものについてはダンパーによって減衰するが、長い周期のものについてはほとんどその影響を受けていない。

また 2.5 [s] の周期のモードについては、固有値解析の結果とも一致していて、切り離し前にはなく切り離し後に表れてきた。

次に各々の結果を比較してみる。

- ③ 非常に微妙な離すタイミングの違いで、その後のリングの挙動が大きく変わってきた。
- ④ 一般的には切り離し時刻が遅くなるとその後の変位は大きくなってしまっている。(Fig.12 参照) しかし、一概に切り離し時刻の遅いほど変位が大きくなるともいえず切り離し時刻が遅くてもあまり大きな変位

Fig. 9 Displacement of node 16, 48 (connected)

Fig. 10 Displacement of node 16, 48 (disconnected at 2.96 [s], with damping)

Fig. 11 Displacement of node 16, 48 (disconnected at 2.96 [s], without damping)

Fig. 12 Displacement of node 16, 48 (disconnected at 7.84 [s], with damping)

のでないこともあった。(このことは応力の場合と同じである。)

4[s]前後までの早い時刻で切り離した場合には、応力は小さい値に抑えられ、切り離し機構の目的は達せられている。特にダンパーを入れるとその効果は大きくなることがわかった。また変位についても設計基準内に抑えられ、シリンダーとの衝突は避けられる。これに対してそれ以上遅くなってから切り離した場合には、切り離さなかった場合と比較しても、応力は大きな値をとり設計基準値を超えてしまっている。また変位についても設計基準値を超えてしまい、シリンダーと衝突してしまうことになる。

6. 免震システムの構想

本構造体では、リング状構造体上とその周囲におかれた地震波センサーが大地震を感知すると信号をリング状構造体に送り、支持構造体の空気シリンダー内の圧縮空気を瞬時に開放し、リング状構造体と支持構造体は積層ゴム支承のみによる接続となり、免震となるようにしている。圧縮空気の開放にかかる時間を考えると、地震波を検知してからその危険性を判断するのにかかる時間は短くなければならない。

このような目的で最近実用化されている地震波センサーとしては鉄道総研により開発されたユレダス(Urgent Earthquake Detection Alarm Systm)がある^{10),11)}。これの大きな特徴としては、地震波をP波、すなわち初期振動の早い時点で検知し、地震の加害性を判断し、警報を出すということである。また、単一観測点のデータのみに基づいて、地震諸元を即時に推定するので、初期微動の到来から2~5秒後までに第1次警報を出すことができる。

また、その危険性の推定機能の原理は次のようである。

- ・地震規模は地震断層が大きい程大きくなるが、断層がずれるのに要する時間も長くなり、従って、初期微動の卓越周期から地震の規模が推定できる。
- ・地震波動のうち最も早く観測点に到達するP波は振動の方向と波動の伝播方向とが一致している。従って、水平面に投影した初期微動の振動方向から震央方位を推定することができる。
- ・一般には、地震規模は初期微動の振幅と震源距離から求めることができる。初期微動の振幅を測定し、初動の周期から地震規模を推定すれば、これらの情報から逆に震源距離を求めることができる。精度はあまり良くないものの、主要動到着後に初期微動継続時間を用いて推定し直すことができる。

国鉄の宮古地震観測点での地震波形による動作テストでは、震央距離の推定は初期微動到着後の3秒間で終了し、地震規模の推定は1~3秒で終了している。また、気象庁や

東北大学による多点観測推定結果と比較しても十分な精度を持っている。

地震警報時点から被害が生じるような大振動に至るまでの余裕時間は、初期微動継続時間に4~5秒を加えたものに等しくなる。初期微動継続時間は震央距離[km]を1/8倍した程度[s]である。

本構造体から50[km]離れた地点にユレダスのような性能を持つ地震計を設置するものとする、その余裕時間は、南海トラフ当りを震源として、初期微動継続時間2[s]、検知点から構造体までのS波の伝播時間12.5[s]で、計14.5[s]である。これから、警報の判断時間3[s]をひくと11.5[s]の余裕時間である。いま、シリンダー内の圧縮空気を直径15[cm]のバルブを使って開放し30[atom]から17[atom]まで気圧を下げてピストンによる支持剛性を0にする所要時間は、約3[s]であるので、上記の余裕時間内で十分間に合う。

よって、このようなP波検知地震計を遠方と支持構造体上に設置することにより、南海トラフ、駿河湾近辺の地震に対応できる。

直下型地震については支持構造体上に従来の地震計を設置し、120[gal] (約震度5)以上の地震波を感知したら即座に空気を開放するという2重策をとる。シミュレーション計算の結果より、地震発生後4[s]以内に空気が抜ければよいのでこれも安全である。

以上のことにより、この免震システムを使用すれば、リング状構造体は大地震発生時に直ちに安全上危険な状況に陥ることはないと予想できる。

7. お わ り に

半潜水式浮体と重力式支持構造体との接続システムとして、上下方向は積層ゴム、左右方向はピストン-シリンダ機構を採用し、地震計で感知された情報により大地震が予測される場合に、シリンダー内の高圧空気を逃がし弁により開放することによりピストンを引き込み、浮体と支持構造体の左右方向の接続をはずす免震システムを設計、機能評価を行い、以下のような結論を得た。

(1) ピストンロッドの軸剛性により、必要な左右方向拘束バネ定数を満足し、大地震時に短時間でシリンダー内の空気を開放し、バネ定数を急減させることの出来るピストン-シリンダ機構を設計した。一方、必要な上下方向拘束バネ定数を満足し、バネ構造に発生する内部応力や左右方向変形能に関しても設計基準を満たす積層バネを設計した。

(2) 接続システムの基本機能を模した実験装置を製作し、これに実地震記録から得られた変位をスケールダウンした時刻歴を作用させる実験を行い、切り離し時に、シリンダーへ接続時と逆方向の高圧空気を送ることにより、ピストンを極めて短時間に引き込むことができ、浮体と支持構造体は切り離した後衝突しないことが判った。

(3) 実機モデルに地震時加速度の時刻歴を作用させ、種々のタイミングで接続システムを切り離すシミュレーションを行い、切り離した後、浮体に過大な変位、応力が生じないようにするためには、かなり早い時期に切り離しを行う必要がある。

(4) 50[km]程の遠隔地に地震計を設置して、その情報がケーブル等で浮体ないしは支持構造体位置に設置された、挙動監視用データセンターへ送られ、初期微動のデータにより大地震の可能性を検討し、その結果により切り離しを行おうとする場合には、地震波の伝播時間により、切り離しに関する時間的余裕が大きくなり、本論文で扱っている可変的接続システムの効果的利用が確実になる。

本報告の終りに当り、国鉄のユレダスの資料収集にご協力いただいたJR東海の中田秀幸氏に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉田宏一郎・有馬俊朗・岡徳昭：中水深域空間利用構造体の開発-半潜水式リング状構造体の検討-, 日本造船学会論文集, 第165号, 1989
- 2) 吉田宏一郎・有馬俊朗・鈴木裕子・岡徳昭：中水深

域空間利用構造体の開発(その2)-碇着, 免震システムの開発と構造体の最適化-, 日本造船学会論文集, 第170号, 1991

- 3) 有馬俊朗：中水深域空間利用構造体の開発, 東京大学博士論文集, 1989
- 4) 宮崎英剛・横澤均：半潜水式リング状構造体の支持機構, 東京大学卒業論文, 1990
- 5) 鈴木裕子：半潜水式リング状構造体の工学的最適化に関する研究, 東京大学修士論文, 1991
- 6) 活断層研究会：日本の活断層-分布図と資料, 東京大学出版会, 1982
- 7) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 1987
- 8) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和：建物免振用の積層ゴムに関する実験的研究, 日本機械学会論文集 C, 第53巻, 第485号, 1987
- 9) 日本建築学会：免震構造設計指針, 1989
- 10) 高山昭 他：地震動早期検知システムの研究, 土木学会誌, 第66巻, 1981
- 11) 中村豊：インテリジェント地震警報システム, 鉄道技術, 第43巻, 第10号, 1986