

免震・免波構造の有効性の評価に 関する三次元解析について

有賀 義明¹・松橋 勇輝²・斗内 陸人³・渡辺 高志⁴・
内山 不二男⁵・西本 安志⁶・坂下 克之⁷・堀 宗朗⁸

¹フェロー会員 弘前大学 大学院理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)
E-mail: y-a-arig@hirosaki-u.ac.jp

²正会員 (株) 日水コン 構造設計部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)
E-mail: matsunashi_y@nissuicon.co.jp

³非会員 札幌市水道局 (〒060-0041 札幌市中央区大通東11)
E-mail: rikuto.tonai@city.sapporo.jp

⁴正会員 (株) 構造計画研究所 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3)
E-mail: takashi-watanabe@kke.co.jp

⁵正会員 (株) 構造計画研究所 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3)
E-mail: uchiyama@kke.co.jp

⁶正会員 シバタ工業 (株) 技術部 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾1058)
E-mail: Yasushi_Nishimoto@sbt.co.jp

⁷正会員 大成建設 (株) 技術センター 都市基盤技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: katsuyuki.sakashita@sakura.taisei.co.jp

⁸正会員 東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)
E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

沿岸域に位置する構造物に関しては、強震動と津波の双方に対する安全性の確認と確保が必要になる。そこで、免震・免波構造という概念を提案し、その有効性を評価するための三次元解析について検討した。解析モデルは、無対策モデルを2ケース、免震・免波対策モデルを2ケース設定し、免震効果については三次元動的解析により、免波効果については三次元静的解析により検討した。その結果、免震材を活用して構造物の変位挙動を発生し易くすることによって強震時および津波時に構造物に発生する応力を低減することが可能であるとの成果を得ることができた。

Key Words: water cycle facility, seismic isolation, tsunami isolation, stress reduction, 3D analysis

1. まえがき

水循環施設は、日常生活や産業活動の維持等に必要不可欠なライフライン施設である。水循環施設の内、下水処理を担う浄化センターは、下水が自然流下によって収集されるため沿岸域や河川下流域に多く立地されている。そのため、大地震時には、強震動および津波による被害を受ける危険性がある。

2011年東北地方太平洋沖地震では、沿岸域に建設された多くの下水道施設で大きな地震被害が発生し¹⁾、仙台市南蒲生浄化センターは、10m以上の津波により大き

な被害を受けた²⁾。東日本大震災での被害事例を踏まえ、国³⁾、地方自治体⁴⁾、学協会⁵⁾等から下水道施設の地震・津波対策に関する調査研究成果が発表されている。将来的には、南海トラフ巨大地震等の発生が想定されており、沿岸域に位置する下水道施設の地震対策技術の合理化と実効性の向上が必要である。このような必要性から、強震動に対する免震効果と津波に対する免波効果を併せ持つ、免震・免波構造を研究対象とし、免震・免波効果の解析評価法について検討した。高度成長期に建設された多くの施設が、建設後数十年を迎え高経年化が進みつつあり、今後、既存施設の更新の必要性が益々増大すると

考えられ、免震・免波構造の考え方は、新規の構造物に対してのみならず、老朽化した既設の構造物の更新においても有効に役立てることができると考えられる。

2. 研究目的

(1) 検討の主眼

沿岸域に位置する水循環施設のための合理的な地震・津波対策技術の開発を目的として、ここでは、免震・免波構造の有効性の評価に関して、構造物と地盤および免震材の接触面の非連続的挙動の影響、構造物の底面の免震材の有無の影響に着目して解析的な検討を行った。

(2) 免震・免波技術の考え方

沿岸域に位置する構造物のための強震動に対する免震対策としては、表-1に示したように、地下化による地震動の低減、免震材の活用による地震作用の低減が考えられる。また、津波に対する免波対策としては、津波からの回避、津波からの隔離・遮断、構造物の表面形状等の工夫による津波波圧の低減、免震材の活用による津波波圧の吸収等の方法が考えられる。免震材の活用に関しては、免震効果と免波効果の両立が可能であると考えられ、本研究では免震材を活用した免震・免波構造を研究対象とした。

(3) 免震・免波構造の概念

免震・免波構造は、地震動や津波が構造物に作用した場合に、構造物の回転・並進を許容することによって構造物内に発生する応力を低減し、構造物の損傷・破壊を抑止軽減する考え方である⁹⁾。

免震・免波構造は、構造物の底面および構造物と周辺地盤と間に免震材⁷⁾を介在させる構造としている。これまでの研究⁹⁾では、最初に、図-1(1)に示したように、構造物の底面を曲面とし構造物の底面に積層ゴム（嵩上げゴム）を配置した構造について検討した。その後、津波が作用した際の構造物の回転・並進をより発生し易くするために、図-1(2)に示したように、構造物の底面を平面とし構造物の底面に免震ゴム（嵩上げゴム）を配置した構造について検討した。構造物の回転に着目した場合、当初は、構造物の底面形状が曲面である方が回転が発生し易くなると考えたが、この場合、構造物の底面に配置された免震ゴム（嵩上げゴム）が回転を抑制することが考えられた。そこで、構造物の底面形状を曲面から平面に改良した。なお、構造物の並進（水平移動）に着目した場合でも、構造物の底面形状は曲面よりも平面の方が効果的であると考えた。

このような研究の経過を踏まえ、ここでは、施工性と維持管理性の向上を勘案し、より合理的な構造とするため、図-1(3)に示したように、構造物の底面形状は平面とし、構造物の底面に免震材を層状に配置した構造を検討対象とした。

表-1 免震・免波技術の考え方

1. 強震動対策⇒免震構造
(1) 地下化による地震動の低減効果
(2) 免震材による地震動の低減効果
2. 津波対策
(1) 津波の回避
◇津波が到達しない場所での立地
◇新設：土地利用の防災化⇒抜本的津波対策
◇既設：高経年化による再開発に伴う移転
(2) 津波からの隔離
◇地下化による隔離
◇ドーム構造等による被覆
◇壁構造による遮断
(3) 津波波力の低減
◇構造物の表面形状の効果（平面、曲面）（鉛直面、水平面）
◇津波の到来方向を考慮した構造物の配置
◇構造物の表面材料の効果（エネルギー吸収型の材料）
(4) 免震材の活用⇒免震・免波構造
◆津波波圧の吸収⇒免波効果
◆構造物の回転・並進による応力の低減⇒免波効果
◆免震材による免震効果と免波効果の両立

（備考）接触面：構造物と地盤および免震材との接触面

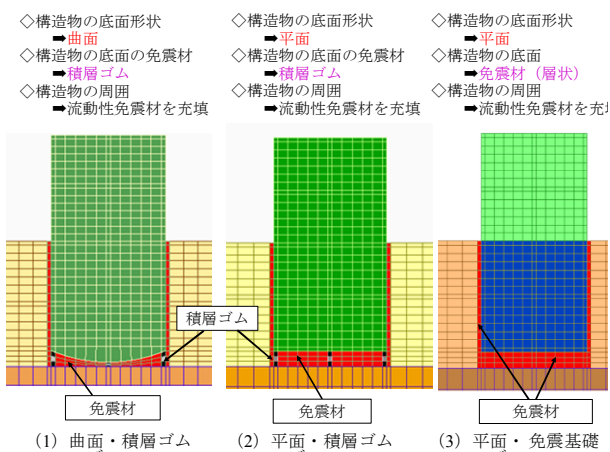


図-1 免震・免波構造のバリエーション

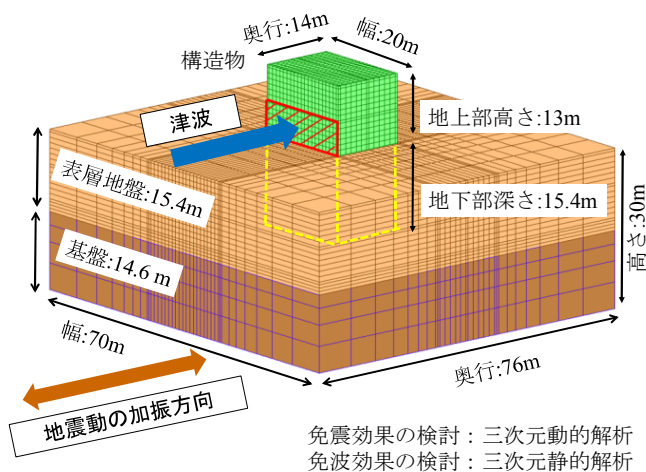


図-2 免震・免波構造の検討のための三次元解析モデル

3. 免震・免波構造に関する三次元解析方法

(1) 概要

免震・免波構造に関して、強震動に対する免震効果は三次元動的解析により、津波に対する免波効果は三次元静的解析により検討した。構造物底面の形状は平面とし、表-2 に示したように、無対策モデルを 2 ケース、免震・免波対策モデルとして免震材充填モデルを 2 ケース、計 4 ケースの解析モデルを設定した。無対策モデルと無対策ジョイントモデルの比較解析により、構造物と地盤の接触面の非連続的挙動の影響について検討した。無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)の比較解析により、免震・免波構造の効果について検討した。そして、免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)の比較解析により、構造物底面の免震材の有無の効果について検討した。解析には、汎用解析プログラム ISCEF を使用した。

(2) 免震・免波構造の解析対象

東日本大震災における浄化センターの被害事例を参考に図-2 に示したような解析モデルを設定した。解析対象は、地上 2 階・地下 2 階の 4 階建の鉄筋コンクリート構造物とし、地上部の高さ 13m、地下部の深さ 15.4m、幅 20m、奥行 14m、壁と床の厚さ 0.5m とした。地盤は軟質地盤を仮定し、二層の水平成層地盤とし、幅 76 m、奥行 70 m、深さ 30 m の領域をモデル化した。構造物は、鉄筋コンクリート造とし、基礎地盤 (S 波速度 330m/s) に直接基礎として設置されている状況を設定した。地盤と構造物は 8 節点 (6 面体) のソリッド要素でモデル化した。構造物の壁厚方向のメッシュ分割は 1 層とした。境界条件は、側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤とした。解析対象周波数は、0.1~30Hz とした。

(3) 解析モデル

a) 無対策モデル

無対策モデルは、図-3 に示したように、構造物と地盤をソリッド要素を用いて連続体としてモデル化したものである。

b) 無対策ジョイントモデル

無対策ジョイントモデルは、図-4 に示したように、構造物と地盤の接触面の剥離・滑動といった非連続的挙動の影響を検討するために構造物と地盤の接触面をジョイント要素でモデル化したものである。

c) 免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)

免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)は、図-5 に示したように、構造物の周囲と底面に免震材(アスフ

ルト系免震材)⁷⁾を配置したモデルである。構造物底面の免震層の厚さは1.5mとした。

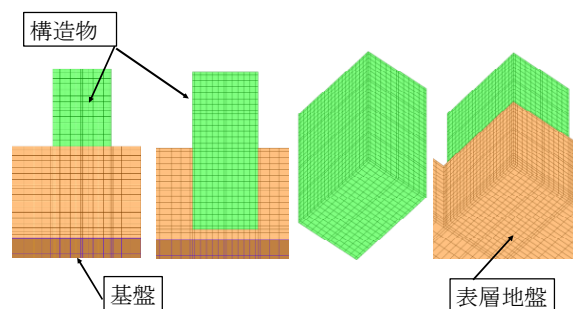
d) 免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)

免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)は、図-6 に示したように、構造物の周囲に免震材を配置し、構造物の底面は直接地盤に接触しているモデルである。

表-2 解析ケース

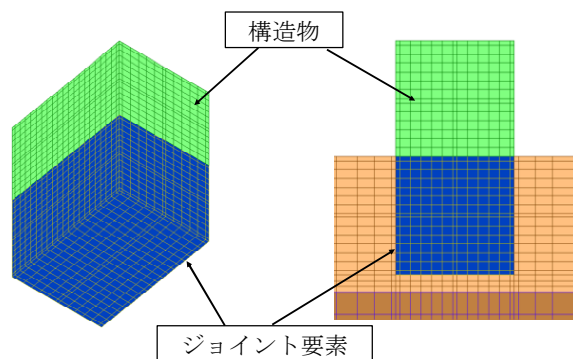
No.	解析モデル名
1	無対策モデル ・構造物の地盤の接触面：連続体 (ソリッド要素)
2	無対策ジョイントモデル ・構造物と地盤の接触面：ジョイント要素
3	免震材充填モデル (構造物底面に免震材あり) ・構造物の底面に免震材あり ・構造物の周囲に免震材あり ・接触面：非連続体モデル
4	免震材充填モデル (構造物底面に免震材なし) ・構造物の底面に免震材なし ・構造物の周囲に免震材あり ・接触面：非連続体モデル

(備考) 接触面：構造物と地盤および免震材との接触面



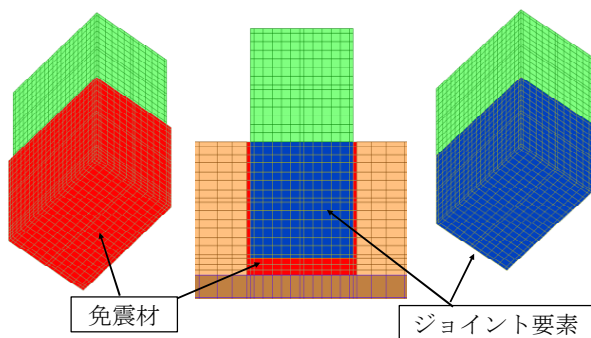
◆構造物と地盤をソリッド要素によりモデル化し
構造物と地盤の接触面を連続体としてモデル化

図-3 無対策モデル



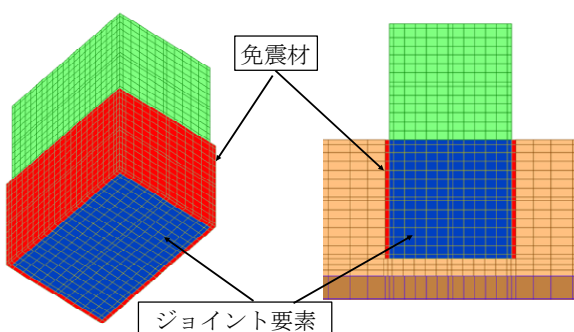
◆構造物と地盤の接触面をジョイント要素でモデル化し
接触面の非連続的挙動 (剥離・滑動) を模擬

図-4 無対策ジョイントモデル



- ◆ 構造物の側面の周囲に免震材を配置
- ◆ 構造物の底面にも免震材を層状に配置
- ◆ 構造物と免震材の接触面にはジョイント要素を配置

図-5 免震材充填モデル（構造物底面に免震材あり）



- ◆ 構造物の側面の周囲に免震材を配置
- ◆ 構造物の底面の免震材はなし。地盤と直接接触
- ◆ 構造物の側面と底面にはジョイント要素を配置

図-6 免震材充填モデル（構造物底面に免震材なし）

(4) 解析用物性値

解析に用いた、構造物と免震材の物性値を表-3に、地盤の物性値を表-4に示す。構造物の回転・並進については、構造物が剛体的な変位挙動を示すことを想定して、ここでは、構造物のせん断剛性の値を高めに仮定した。地盤については、表層地盤はS波速度90m/s、基盤はS波速度330m/sを仮定した。

表-3 構造物と免震材の物性値

項 目	せん断剛性 N/mm ²	密度 t/m ³	ポアソン比
構造物	14600	2.40	0.20
免震材	0.24	1.00	0.49

表-4 地盤の物性値

層	層厚 m	せん断剛性 N/mm ²	S波速度 m/s	密度 t/m ³	ポアソン比
表層	15.4	16	90	2.0	0.40
基盤	14.6	240	330	2.2	0.35

表-5 ジョイント要素の物性値

項目	剛性 N/mm ²		引張強度 N/mm ²	せん断強度 N/mm ²
	法線方向	せん断方向		
接触面	35040	14600	0.1	0.1

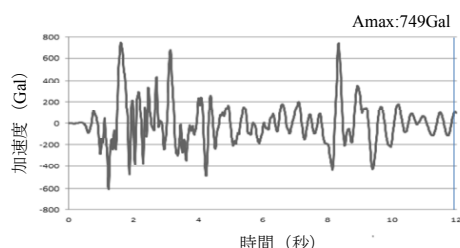


図-7 免震効果の検討に用いた入力地震動⁹⁾

ジョイント要素（接触面要素）は、2つの平面で構成され、所定以上の引張応力が作用すれば剥離し、所定以上のせん断応力が作用すれば滑動するものであり、物性値は表-5のように仮定した。

(5) 津波の波圧

免波効果の評価に際して、津波の波圧の大きさは、SPH法による評価結果⁹⁾を踏まえて400kPaとした。その高さ方向の分布形は四角形分布とし、高さ方向に一定の波圧を構造物正面の高さ0m～6.5m、幅20mの矩形のエリアに作用させた。

(6) 入力地震動

免震効果の評価に用いた入力地震動を図-7示す⁹⁾。加振方向は、図-2に示したように構造物の短軸方向とし、下方入力基盤から入力した。

4. 免震・免波構造に関する三次元解析結果

(1) 構造物と地盤の接触面の非連続的挙動の影響

a) 概要

構造物と地盤の接触面の非連続的挙動（剥離・滑動）を考慮した場合としない場合で構造物に発生する応力等がどの程度異なるかを検討するために、無対策モデルと無対策ジョイントモデルの解析結果の比較を行った。一般的に、構造物と地盤の連成系の解析を行う場合、構造物と地盤の接触面は連続体としてモデル化する場合が多い。しかし、免震・免波構造の解析では構造物と免震材および地盤の接触面の非連続的挙動の考慮が必要であり、免震・免波構造の有効性を評価する際の比較対象として無対策モデルで良いのか、それとも無対策ジョイントモデルでなければいけないのか、この点を判断するため、この検討を行った。

b) 津波の波圧による変位・変形

津波の波圧が構造物に作用した時の構造物の変位・変形について無対策モデルと無対策ジョイントモデルの解析結果の比較を図-8に示す。また、図-9に示した代表出力位置の変位量を表-6に示す。無対策モデルでは、構造物と地盤をソリッド要素でモデル化し、構造物と地盤は連続体としてモデル化している。一方、無対策ジョイントモデルでは、構造物と地盤の接触面の全面にジョイント要素を配置し、接触面で引張強度を超える引張応力が発生した場合には剥離、せん断強度を超えるせん断応力が発生した場合には滑動の模擬を可能にしている。図-8より、無対策モデルでは、構造物の地上部と地下部で変位・変形の傾向が異なり、地下部では周辺地盤の影響が現れていることが分かる。無対策ジョイントモデルでは、構造物の底面を中心に構造物が変位挙動（回転）を示していることが分かる。構造物の上端部での最大変位は、無対策モデルでは4.4cm、無対策ジョイントモデルでは4.5cmとなり、変位の値に大差は出なかった。無対策モデルでは、地盤の影響を受けて位置5（構造物背面の地表面位置）で4.5cmの変形が生じた。図-8より明らかにように、無対策モデルと無対策ジョイントモデルでは、構造物の変位・変形の分布状況に相違が見られた。

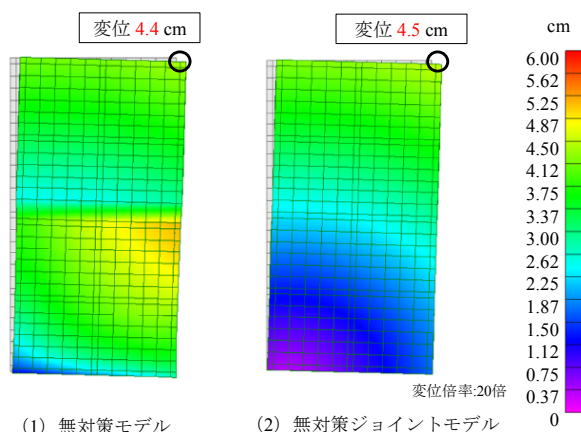


図-8 津波の波圧による変位・変形に関する無対策モデルと無対策ジョイントモデルの比較

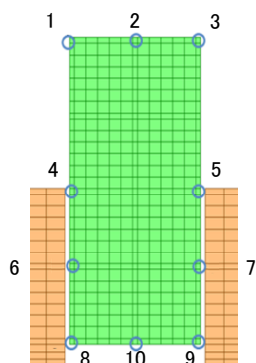


図-9 構造物の変位の代表出力位置

表-6 津波の波圧による変位・変形に関する無対策モデルと無対策ジョイントモデルの比較

津波の波圧 四角形分布 400kPa		
代表位置	無対策モデル	無対策ジョイントモデル
位置 1	4.13 cm	4.20 cm
位置 2	4.17	4.26
位置 3	4.40	4.52
位置 4	3.50	2.29
位置 5	4.50	2.84
位置 6	2.81	1.29
位置 7	3.82	2.09
位置 8	1.20	0.41
位置 9	2.57	1.66
位置 10	1.57	0.81

(備考) 代表出力位置は図-9参照

c) 津波の波圧による構造物内の応力

津波の波圧が作用した時の構造物での主応力について、無対策モデルと無対策ジョイントモデルの解析結果の比較を図-10に示す。また、図-11に示した代表出力位置の最大引張応力の値を表-7に示す。津波が作用した構造物正面の引張応力は、無対策モデルでは3.60N/mm²、無対策ジョイントモデルでは3.67N/mm²となった。

構造物と地盤の接触面の非連続的挙動を考慮した場合としない場合では応力の値に大きな差が見られなかったが、概して、接触面の非連続的挙動を考慮した場合の方が応力の値が大きい傾向となった。

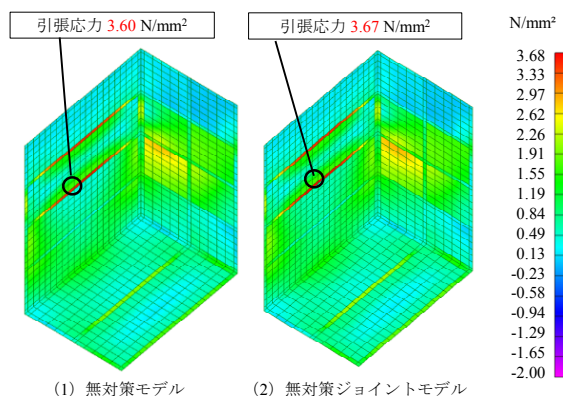


図-10 津波の波圧による応力に関する無対策モデルと無対策ジョイントモデルの比較

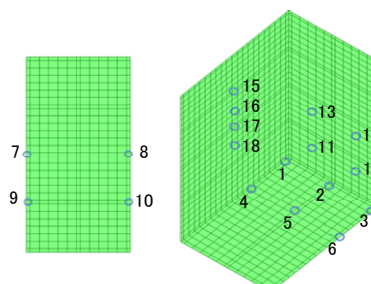


図-11 構造物の応力の代表出力位置

表-7 津波の波圧による引張応力に関する無対策モデルと
無対策ジョイントモデルの比較

津波の波圧 四角形分布 400kPa		
出力位置	無対策モデル	無対策ジョイントモデル
位置 1	0.27 N/mm ²	0.26 N/mm ²
位置 2	0.69	0.69
位置 3	1.19	1.22
位置 4	1.25	1.27
位置 5	1.97	2.09
位置 6	1.70	1.80
位置 7	0.45	0.50
位置 8	0.08	0.08
位置 9	1.63	1.68
位置 10	0.09	0.09
位置 11	0.77	0.64
位置 12	0.41	0.47
位置 13	2.42	2.26
位置 14	1.44	1.27
位置 15	3.48	3.50
位置 16	0.47	0.47
位置 17	3.60	3.67
位置 18	0.51	0.58

(備考) 代表出力位置は図-9参照。(＋引張、－圧縮)

d) 地震動による変位応答

地震動による構造物の変位応答について無対策モデルと無対策ジョイントモデルの解析結果の比較を図-12に示す。構造物の最大変位は、無対策モデルで30.1cm、無対策ジョイントモデルでは11.1cmとなり、無対策ジョイントモデルに比して無対策モデルで変位が大きくなった。接触面をジョイント要素でモデル化した場合、強震時には構造物と地盤の接触面で剥離・滑動が生じ構造物と地盤は分離して挙動するのに対して、接触面を連続体としてモデル化した場合は構造物と地盤は一体として挙動し、今回のように表層地盤の剛性が低い場合は表層地盤が変位し易いため地盤と構造物の連成系として変位が大きくなったものと考えられる。なお、変位の分布状況については、無対策モデルと無対策ジョイントモデルで傾向の相異は見られなかった。

e) 地震動による構造物内の応力

地震動による応力について無対策モデルと無対策ジョイントモデルの比較結果を図-13に示す。構造物での最大引張応力は、無対策モデルで16.32N/mm²、無対策ジョイントモデルでは9.81N/mm²となり、無対策ジョイントモデルでは応力が小さくなった。無対策ジョイントモデルでは、強震時に接触面で剥離・滑動が生じ、それに伴い応力解放が生じ応力が小さくなったものと考えられる。無対策ジョイントモデルに比して無対策モデルでは、構造物の地下部の正面と側面で応力が大きくなった。

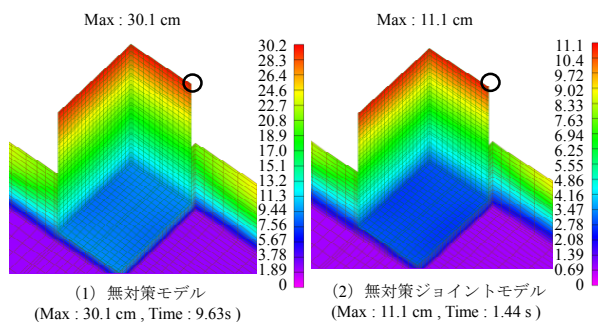


図-12 地震動による変位応答に関する無対策モデルと
無対策ジョイントモデルの比較

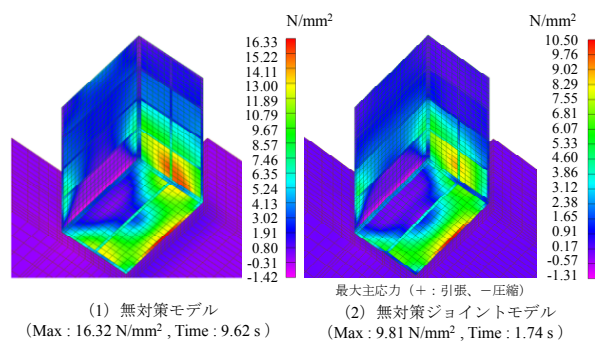


図-13 地震動による主応力に関する無対策モデルと
無対策ジョイントモデルの比較

f) 考察

地中構造物を対象にFEM解析を行う場合、地中構造物と地盤の変位挙動は同じと仮定し、地中構造物と地盤を連続体としてモデル化し解析する場合が多いと考えられる。しかし、強震動が構造物に作用した場合や大津波が構造物に衝突した場合は、地中構造物と地盤の接触面では剥離・滑動といった非連続的現象が発生するものと想定される。そこで、地盤と構造物の接触面のモデル化の影響について検討した。

津波の波力に対する変位挙動に関しては、無対策モデルで構造物の地下部で周辺地盤の影響が大きい結果となったが、無対策ジョイントモデルでは地下部に対する周辺地盤の影響は特に見られなかった。この結果から、津波の波力に対する変位挙動を評価する場合は接触面にジョイント要素を配置した解析が必要であると考察される。

強震動に対する地震時応答に関しても、強震時には接触面で剥離や滑動が発生し、それに伴って応力解放や応力再配分が生じると考えられるので、接触面での剥離・滑動の評価が可能な無対策ジョイントモデルによる解析が必要であると考えられる。安全サイドの解析という視点からは無対策モデルによる解析も考えられるが、実現象に即した合理的な解析という視点からは接触面にジョイント要素を配置した解析が合理的であると考えられる。

(2) 免震・免波効果について

a) 概要

免震・免波構造の有効性を評価するために、無対策の場合と免震・免波対策の場合について比較解析を行った。無対策の場合については無対策ジョイントモデルを用い、免震・免波対策の場合については免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)を用いて解析を行った。免震・免波構造は、免震材の活用によって構造物の変位挙動を発生し易くし、それによって構造物に発生する応力の低減を図るものであり、免震・免波構造の有効性の評価に際しては応力を主たる評価指標とした。

b) 津波の波圧による変位

津波の波圧による構造物の変位について無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)の解析結果の比較を図-14に示す。また、代表出力位置の変位量を表-8に示す。無対策ジョイントモデルでの構造物の最大変位は4.52cmであったが、免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では19.41cmとなった。構造物の回転、並進を発生し易くするのが免震・免波構造の考え方であり、意図したとおりの結果が得られた。なお、図-14より、無対策ジョイントモデルと免震材充填モデルとでは、接触面の非連続的挙動の影響を考慮した構造物の応答を同じ解析条件で比較することができるため、免震材充填モデルの比較対象としては無対策ジョイントモデルが適していることが理解できる。

c) 津波の波圧による構造物内の応力

津波の波圧による構造物内の応力について無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)の解析結果の比較を図-15に、代表出力位置の変位量を表-9に示す。位置17(構造物正面, G.L.0m)では、無対策ジョイントモデルでは最大引張応力が3.67N/mm²、免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では2.81N/mm²となった。また、位置15(構造物正面, G.L.+6.50m)では、無対策ジョイントモデルで最大引張応力が3.51N/mm²、免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)で3.58N/mm²となった。構造物の正面では、津波が作用した際に構造物の回転によって、無対策ジョイントモデルよりも免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)で応力が概ね小さくなる傾向が見られる。一方、構造物の底面と側面では、構造物の回転に伴って、無対策ジョイントモデルよりも免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)で応力が大きい傾向が見られる。ただし、応力の値に関しては、構造物の底面と側面の値は比較的小さく、構造物正面の値は大きい。そのため、構造物の損傷・破壊を考える場合は、構造物正面に着目することが重要であると考えられる。

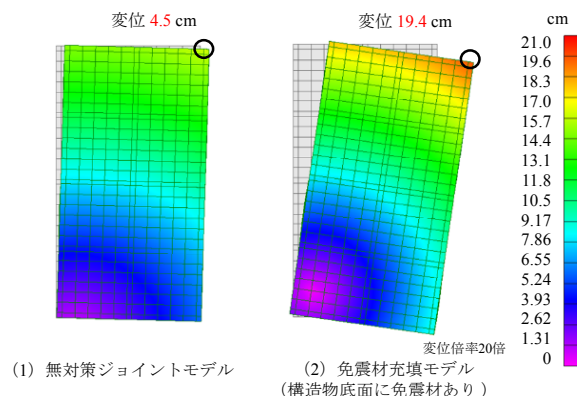


図-14 津波の波圧による変位に関する無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)の比較

表-8 津波の波圧による変位に関する無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)の比較

津波の波圧 四角形分布 400kPa		
出力位置	無対策ジョイントモデル	免震材充填モデル (構造物底面に免震材あり)
位置1	4.20 cm	17.46 cm
位置2	4.26	17.80
位置3	4.52	19.41
位置4	2.29	8.00
位置5	2.84	11.64
位置6	1.29	3.36
位置7	2.09	9.06
位置8	0.41	1.92
位置9	1.66	8.60
位置10	0.81	3.93

(備考) 代表出力位置は図-9参照

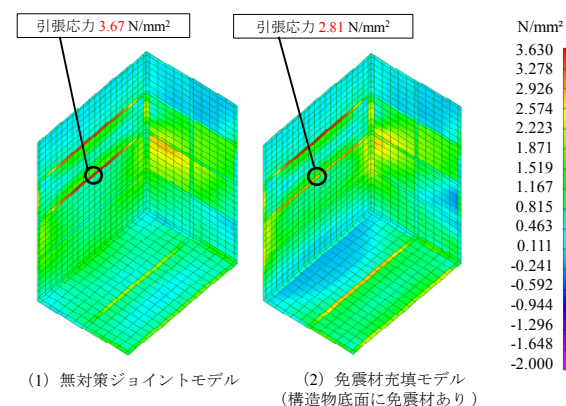


図-15 津波の波圧による構造物内の応力に関する無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)の比較

表-9 津波の波圧による最大引張応力に関する無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)の比較

津波の波圧 四角形分布 400kPa		
出力位置	無対策ジョイントモデル	免震材充填モデル (構造物底面に免震材あり)
位置 1	0.26 N/mm ²	0.17 N/mm ²
位置 2	0.69	1.53
位置 3	1.22	1.51
位置 4	1.27	0.39
位置 5	2.09	2.75
位置 6	1.80	2.02
位置 7	0.50	1.62
位置 8	0.08	0.14
位置 9	1.68	2.71
位置 10	0.09	0.06
位置 11	0.64	0.97
位置 12	0.47	0.77
位置 13	2.26	1.63
位置 14	1.27	0.03
位置 15	3.51	3.58
位置 16	0.47	0.17
位置 17	3.67	2.81
位置 18	0.58	0.90

(備考) 代表出力位置は図-9参照。(＋引張、－圧縮)

d) 地震動による変位

地震動による構造物の変位応答について無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)の解析結果の比較を図-16に示す。構造物の最大変位は、無対策ジョイントモデルでは 11.1cm となったのに対して免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では 23.5cm となった。免震材の活用により構造物の変位挙動を発生し易くできることを確認することができた。

e) 地震動による構造物内の応力

地震動による構造物内の主応力について無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)の比較結果を図-17に示す。構造物内の最大引張応力は、無対策ジョイントモデルでは9.81N/mm²となったのに対して、免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では8.22N/mm²となった。無対策ジョイントモデルでは、構造物底面で大きな応力が発生する結果となった。免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では、構造物底面の応力は小さく、構造物側面で応力が発生する結果となった。全体的には、無対策ジョイントモデルに比して免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では応力が小さくなった。

f) 考察

津波に対する変位挙動に関しては、免震材を活用することによって、構造物の回転・並進を発生し易くするこ

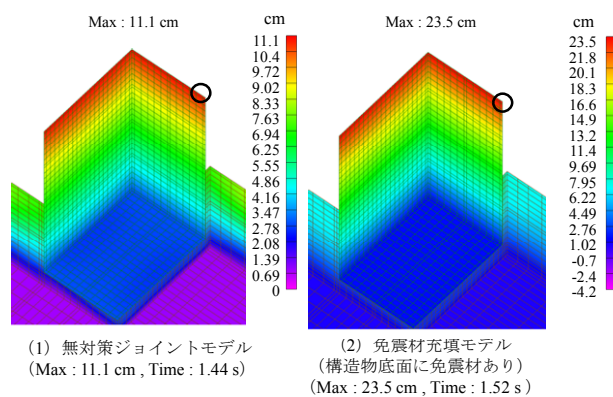


図-16 地震動による変位に関する無対策モデルと免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)の比較

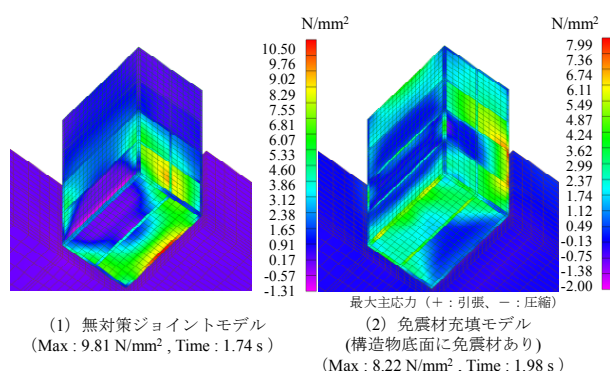


図-17 地震動による応力に関する無対策ジョイントモデルと免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)の比較

が可能であることを確認することができた。津波が作用した際の応力に関しては、構造物が回転・並進した際に、構造物の底面と側面では応力が大きくなるが、構造物の正面では応力の低減効果が期待できると考えられる。応力の値は、構造物の底面と側面では比較的小さく、正面では大きいので、構造物の損傷・破壊の評価に際しては構造物の正面が重要な部位になると考えられる。

強震動に対しても、免震材の活用により、変位挙動を発生し易くし地震時応力の低減を図ることが可能であることを確認することができた。

(3) 構造物底面の免震材の有無の影響

a) 概要

施工性、維持管理性に配慮した場合は、構造物底面の免震材を省略した構造も考えられることから、構造物底面の免震材がある場合とない場合について比較検討した。

b) 津波の波圧による変位

津波の波圧による構造物の変位について免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)と免震材充填モデル(構

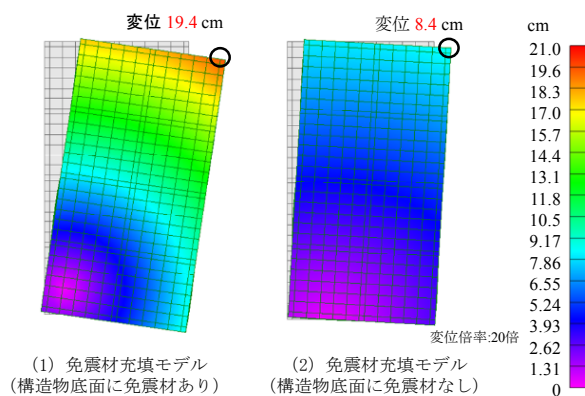


図-18 津波の波圧による変位に関する免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)の比較

表-10 津波の波圧による変位量に関する免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)の比較

津波の波圧 四角形分布 400kPa		
出力位置	免震材充填モデル (構造物底面に免震材あり)	免震材充填モデル (構造物底面に免震材なし)
位置 1	17.46 cm	8.06 cm
位置 2	17.80	8.05
位置 3	19.41	8.48
位置 4	8.00	4.35
位置 5	11.64	5.07
位置 6	3.36	2.49
位置 7	9.06	3.59
位置 8	1.92	1.09
位置 9	8.60	2.76
位置 10	3.93	0.97

(備考) 代表出力位置は図-9参照

構造物底面の免震材なし)の解析結果の比較を図-18 に、代表出力位置の変位量を表-10 に示す。構造物の底面に免震材を配置しないと構造物の回転が発生しにくくなることを反映して、免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では構造物の最大変位が 19.41cm であったのに対して免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)では 8.48cm となった。

c) 津波の波圧による構造物内の応力

津波の波圧による構造物内の応力について免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)の解析結果の比較を図-19 に、代表出力位置の変位量を表-11 に示す。位置 17 では、免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)で最大引張応力が 2.81N/mm²であったのに対して免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)では 3.62N/mm²となった。また、位置 15 では、免震材充填モデル(構造物

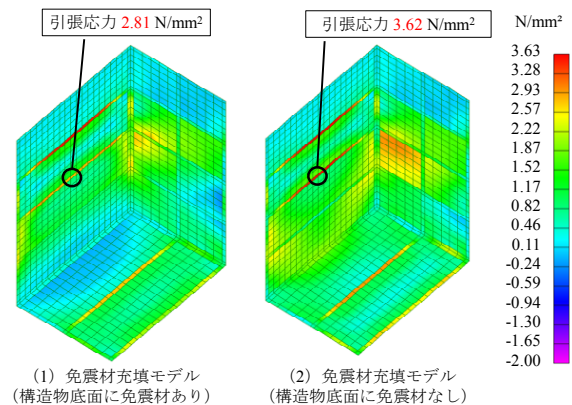


図-19 津波の波圧による応力に関する免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)の比較

表-11 津波の波圧による最大引張応力に関する免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)の比較

津波の波圧 四角形分布 400kPa		
出力位置	免震材充填モデル (構造物底面に免震材あり)	免震材充填モデル (構造物底面に免震材なし)
位置 1	0.17 N/mm ²	0.61 N/mm ²
位置 2	1.53	0.90
位置 3	1.51	1.67
位置 4	0.39	1.83
位置 5	2.75	2.96
位置 6	2.02	2.54
位置 7	1.62	0.39
位置 8	0.14	0.15
位置 9	2.71	2.36
位置 10	0.06	0.07
位置 11	0.97	1.04
位置 12	0.77	0.69
位置 13	1.63	2.69
位置 14	0.03	1.43
位置 15	3.58	3.63
位置 16	0.17	0.58
位置 17	2.81	3.62
位置 18	0.90	1.10

(備考) 代表出力位置は図-9参照。(＋引張、－圧縮)

底面の免震材あり)で最大引張応力が 3.58N/mm²であったのに対して免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)では 3.63N/mm²であった。構造物の底面に免震材が配置されている場合に比して、構造物が地盤上に直接設置されている場合は、構造物の回転が抑制されることから、全体的に免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)では応力が大きくなった。応力評価の視点からは、構造物底面の免震材の配置は、免波効果の向上に有利

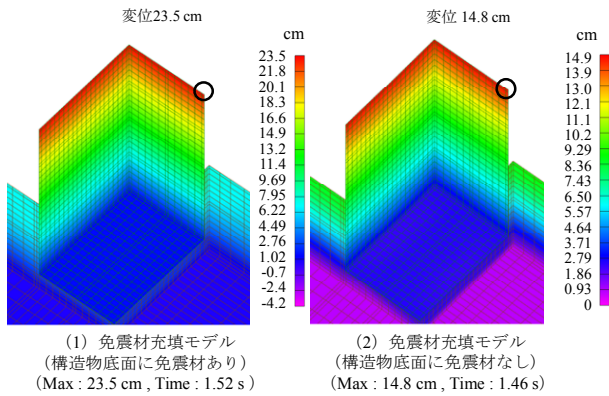


図-20 地震動による変位に関する免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)の比較

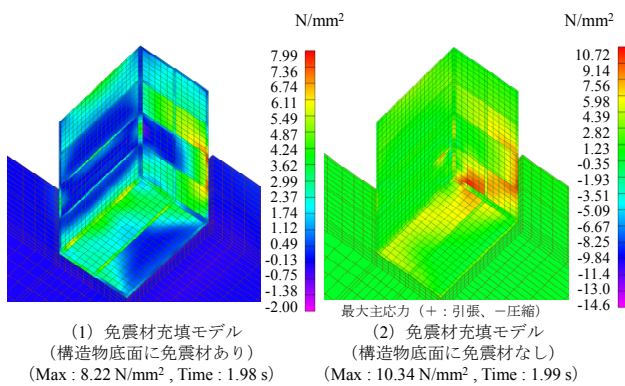


図-21 地震動による最大主応力分布に関する免震材充填モデル(構造物底面に免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面に免震材なし)の比較

であることを確認することができた。

d) 地震動による変位応答

地震動による構造物の変位応答について免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)の解析結果の比較を図-20に示す。構造物の最大変位は、免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では23.5cm、免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)では14.8cmとなった。

e) 地震動による構造物内の応力

地震動による構造物内の主応力について免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)と免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)の比較結果を図-21に示す。構造物内の最大引張応力は、免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)では8.22N/mm²となったのに対して、免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)では10.34N/mm²となった。構造物を地盤の上に直接設置する場合に比して、構造物底面に剛性の低い免震材を配置することによって地震時応力の低減効果があり免震効果が

期待できることを確認することができた。

f) 考察

構造物を地盤上に直接設置する場合に比して、構造物底面に免震材を介在させた場合は、津波に対しても強震動に対しても、構造物の回転・並進を発生し易くすることができ、それに伴い、構造物に発生する応力を低減することが可能であることを確認することができた。施工性、維持管理性の観点からは構造物底面の免震材の省略も考えられるが、免震・免波効果の観点からは免震材の配置が有用であると考えられる。なお、構造物の引張強度やせん断強度が高く、地震時および津波時に発生する引張応力やせん断応力に対して問題がない場合は、構造物底面の免震材を省いた構造も有効になるのではないかと考察される。

5. まとめ

沿岸域に位置する水循環施設のための合理的な地震・津波対策技術の実用化開発を目的として、免震・免波構造の有効性の評価に関して三次元解析により検討した。検討に際しては、①無対策モデル、②無対策ジョイントモデル、③免震材充填モデル(構造物底面の免震材あり)、④免震材充填モデル(構造物底面の免震材なし)の4つの解析モデルを設定し、免波効果の評価に関しては三次元静的解析により、免震効果の評価に関しては三次元動的解析により比較解析を行った。

免震・免波構造は、免震材を活用することによって、強震動と津波の双方に対して構造物の変位挙動(回転・並進)を発生し易くし、それによって構造物に発生する応力の低減を図るものである。三次元解析の結果、剛性の低い免震材を配置することによって構造物の変位を発生し易くすることが可能であり、それによって構造物に発生する応力を低減させることができたことを確認することができた。強震動および津波による構造物の損傷・破壊を評価するためには構造物内に発生する応力(引張応力、せん断応力)の値が重要な評価指標となる。構造物底面の免震材の配置は、応力の低減に有効であり、応力評価の観点から、免震・免波効果の向上のために有用であると考えられる。

強震動と津波の双方に対する、構造物と免震材と地盤の非連続的挙動(接触面の剥離・滑動現象、構造物の回転・並進等)の評価およびそれに伴う応力評価に際しては、ジョイント要素の活用が有効であり、今後、より精度の良い解析評価法について検討したいと考えている。

6. あとがき

免震・免波構造の解析評価に関する今後の課題としては、津波の波圧の分布形（鉛直面内の分布形、水平面内の分布形）、津波の波圧の作用方法（動的荷重としての作用方法）、構造物に対する津波の到来方向の影響、構造物の表面形状の影響、免震材の剛性の影響（最適な物性値の考え方）等の検討が必要であると考えられる。

構造物の高経年化の時代を迎え、今後、老朽化した構造物の更新の必要性が急速に増加するが、沿岸域の構造物の更新・再開発等に際しては、強震動対策と津波対策の両立が必要になる。免震・免波構造の考え方は、将来に向けて、地震対策技術の合理化、安全・安心な構造物の実現に有効に役立てることが可能であると考えられる。

謝辞：汎用解析プログラム ISCEF の使用に際しては、センチュリテクノ株式会社の中川弘明様、小沢良明様、安江卓様から多大なるご配慮とご協力をいただきました。記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹内幹雄，小黑明，大峯秀一：東日本大震災における沿岸域浄化センターの被害事例と今後の課題，土木学会地下構造物の耐震性能照査と地震対策ガイドライン（案），資料編 3.5 節，pp.394-402, 2011.9.
- 2) 南蒲生浄化センター復旧方針検討委員会：仙台市南蒲生浄化センター復旧方針に係る提言書，2011.9.
- 3) 国土交通省：下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書－東日本大震災における下水道施設被害の総括と耐震・耐津波対策の現状を踏まえた今後の対策のあり方－，2012.5.
- 4) 東京都下水道局：下水道施設の地震・津波対策整備計画，2012.12.
- 5) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，2014.5.
- 6) 有賀義明，佐藤優乃，渡辺高志，西本安志，曹増延，坂下克之，鈴木高二朗，有川太郎，浅井光輝，堀 宗朗：水循環施設における免震・免波構造の効果の評価に関する検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.73, No.4, 2017（印刷中）
- 7) 竹内幹雄，亀田茂，三澤孝史，大角恒雄，佐久間和弘，佐藤誠一，栗田明：地下構造物に適用するアスファルト系免震材の特性，土木学会論文集，No.658/IV-48, pp. 93-106, 2009.
- 8) 竹内幹雄，有賀義明，渡辺高志，川口昇平，西本安志，堀宗朗，有川太郎：流動性を有するアスファルト系免震材を用いた免震・消波構造に関する基礎的考察，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 4, pp. I_235-I_245, 2015.2.
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書耐震性能照査編，pp. 110, 2002.

(2017. 9. 1 受付)

THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS FOR EVALUATING EFFECTIVENESS OF SEISMIC AND TSUNAMI ISOLATION STRUCTURE

Yoshiaki ARIGA, Yuuki MATSUHASHI, Rikuto TONAI, Takashi WATANABE, Fujio UCHIYAMA, Yasusi NISHIMOTO, Katsuyuki SAKASHITA and Muneo HORI

As for structures located at coastal area, safety against not only earthquake motion but also tsunami should be secured. In this study, we have proposed isolation structure against strong earthquake motion and wave force of tsunami by utilizing isolator. Effectiveness of the proposed structure was examined by three-dimensional FEM analysis. As a result, it can be concluded that stress within the structure induced by earthquake motion and tsunami can be largely reduced by buffer effect of isolator.