

大スパンを有する被覆施設の構造設計指標の研究

南遼太 * 高原伸一 ** 北川麻記 *** 仙葉香織 *

今後一定規模の建設が見込まれる管理型最終処分場では、上部構造となる被覆構造は、実供用期間が十数年と短く、供用終了後は解体を想定される例が多い。一方、廃棄物の管理の観点から供用期間中は、高い耐震性能や耐雪荷重性能が要求される。この相反する条件に対して、建築基準法で要求される性能で設計される構造体について、想定される外力の検討とそれに対する余裕度、倒壊に及ぶ性状を地震時の時刻歴応答解析、積雪に対する静的荷重増分解析により把握し、合理的な構造設計を行うための指標の研究を行った。

キーワード：管理型最終処分場、長大平面、大スパン構造、地震動評価、耐雪荷重性能

1. はじめに

産業廃棄物最終処分場は、環境保全の観点から汚水の外部流出、地下水汚染、廃棄物の飛散・流出、ガス発生、そ（鼠）族昆虫の発生等を防止しながら、所要量の産業廃棄物を安全に埋立処分する構造物で、埋立処分できる廃棄物別に廃棄物処理法によって、構造・維持管理基準が設けられ、遮断型最終処分場、安定型最終処分場および管理型最終処分場の三つに分類されている。また、埋立処分する産業廃棄物の危険度別に、それぞれ基準が設けられており、その区分を Table 1 に示す。

その中で、管理型最終処分場は、危険度が高く遮断型最終処分場でしか処分できない産業廃棄物以外のものを埋立処分できる最終処分場であり、埋立容量規模が大きく、河川、山林への不法廃棄物や災害時に発生する瓦礫廃棄物などの幅広い廃棄物の受け入れが出来る。また、その基準から、廃棄物中の有害物質を周囲の環境から隔離するために、屋根等の覆い（被覆構造）により処分場内への雨水流入防止措置等がとられるため、安全性が高い処分場として、今後建設を計画、運営関与する自治体が増えることが予測される²⁾。

本研究では、この屋根等の覆いが設けられた管理型最終処分場（クローズド処分場）における上部構造となる被覆構造について、以下の観点から設計用外力と構造方法について、実際に建設されている例などから状況を想定して検討を行った。

① 山間地の造成地形での地震力の評価

最終処分場は、施設の性格上都市部から離れた郊外に設けられ、近年は起伏のある山間地を掘削、盛土造成して建設される例が多い。これに対して、盛

* 建築事業本部 設計本部 構造設計部第2グループ
 ** 建築事業本部 設計本部
 *** 建築事業本部 設計本部 耐震設計部

土層厚による地震動増幅の影響程度の検討を行った。

② 構造物形状による地震時水平力の評価

対象とする処分場は、250m×150m等大きな平面の埋立地を掘削造成した容器を屋根で被覆する形状をしおり、埋立容量の確保と場内への廃棄物搬入の障害から、埋立地を少ない柱、大スパンで覆う必要がある。また、被覆構造を支持する柱は、初期状態では、埋立地内部と外周部で20m程度の違いがあり、被覆構造の中間一部に見学者スペース等“中間階”が設けられるため、建築物としての高さ、階設定が明確でない。さらに、埋立が進むと埋立地内部の柱長さが短くなり性状が変化する。これらに対し、構造体の振動特性を把握し、静的地震力の設定の妥当性を検証した。

③ 構造物平面形状に起因する外力評価

250m×150mを越える大きな平面形状の被覆構造に

Table 1 最終処分場の特徴的な構造基準と維持管理基準¹⁾

最終処分場の種類	構造基準	維持管理基準
遮断型最終処分場	<ul style="list-style-type: none"> ・外周・内部仕切り設備などの貯留構造物の仕様を設定 ・一区画の埋立面積（50m²以下）と埋立容量（250m³以下）の規模を設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・雨水流入防止措置 ・周縁モニタリングの実施
管理型最終処分場	<ul style="list-style-type: none"> ・浸出液処理施設の設置 ・二重の遮水層の設置 	<ul style="list-style-type: none"> ・雨水流入防止措置 ・周縁モニタリングの実施 ・放流水水質の排出基準の遵守 ・発生ガスの適正管理
安定型最終処分場	<ul style="list-style-type: none"> ・浸透水採取設備の設置 	<ul style="list-style-type: none"> ・搬入廃棄物の展開検査の実施 ・浸透水の水質検査の実施 ・周縁モニタリングの実施

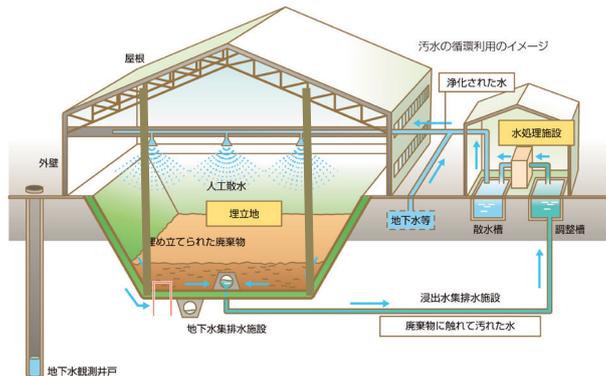


Fig.1 クローズド処分場の概要イメージ³⁾

対して、地震動の位相差の影響について検討を行った。

④ 地震時、積雪時の要求性能に対する検証

最終処分場の供用期間は、埋立後の管理期間を含め十数年程度と想定されることが多く、埋立終了および管理期間終了後は、上部被覆構造は解体撤去され、表層は緑地化される設定となっており、一般建築物に対して実供用期間が短い、使用期間中は、廃棄物管理から高い耐震性能や耐雪荷重性能が要求される。この一般的に相反する条件に対して、設計される構造物の倒壊に及ぶ性状を時刻歴応答解析や静的荷重増分解析により把握し、合理的な構造体の設計へ反映を行う予定である。

構造種別は鉄骨造、架構形式は外周部分にブレースを配置したブレース付ラーメン構造としている。部材断面は、柱が埋立部で○-900~1000の鋼管、外周部はH-440×300~H-600×300のH型鋼による組立て柱とし、鋼管の柱脚部はコンクリートを充填し、耐力を向上している。メイントラスの弦材は、H-250×250~350×350、斜材、束材はH-150×150~300×300のH型鋼で構成している。



Fig.2 メイントラスー柱接合部詳細図 (A部)

2. 検討モデルの概要

2.1 被覆構造の概要

検討する被覆構造の概要をFig.2, 3に示す。平面形状は280m×180mの長方形で、およそ短辺方向60mスパン、長辺方向37mスパンで柱を配置し、その間をせい3mのトラスを1.5m間隔で平行に配した二重架構によるメイントラスにより繋ぎ、屋根構造を支持している。また、屋根はシングル折半屋根を想定する。

埋立部分の高さは20m、埋立部分の底から被覆構造の棟部最高高さまで32m、外周部分の軒高は10mであり、初期状態では、埋立部分の内部と外周部で22mの柱長さに差がある。

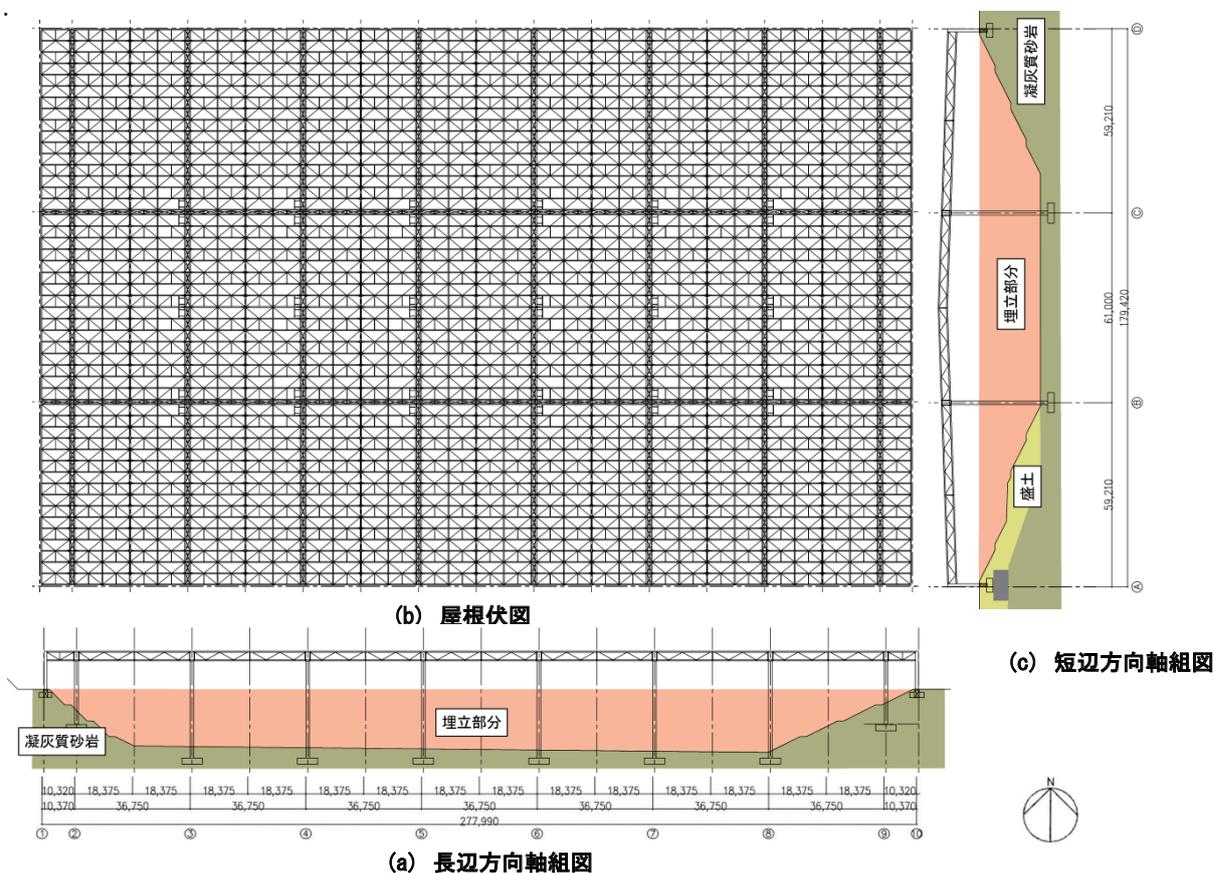


Fig.3 検討構造物の概要

2.2 敷地地盤、基礎構造の概要

検討モデルの敷地は、多雪区域外の北関東郊外の丘陵地帯にあり、南側が開けた緩やかな斜面の中腹で、北、東西側の三方から流れ込む沢の砂質土の堆積によって作られた平坦部を有する地形とした。Fig. 3 及び 4 に示すように、周辺一帯の地盤は、表層から 2m 程度の砂質堆積層があり、その下に強固な凝灰質砂岩層が続く構成としている。

被覆構造体の基礎形式は、独立フーチングによる直接基礎で、外周部分の北、東西側の三方および埋立部分では、直接凝灰質砂岩層で支持され、外周部分南側は、支持層の起伏傾斜のため、5m 程度地盤改良（ラップルコンクリート）を行った上に基礎フーチングを設けている。

検討モデルの地盤特性の設定

- 支持層となる凝灰質砂岩層は、S 波速度 500m/s で、解放工学的基盤とした。
- ラップルコンクリートによる地盤改良を行う部分の周囲は、実施工では、凝灰質砂岩の掘削造成時の岩塊をこぶし大程度としたものによる締め固め造成となり、地震動伝播時の増幅はほぼ無いと想定される。ここでは、N 値 20 相当の性状を有している礫質土による造成とし、表層地盤の増幅を考慮した場合との比較検討を行った。
- 礫質土の増幅特性は参考文献⁴⁾により設定し、層厚さは 5m と 10m の場合 2 ケースを設定した。

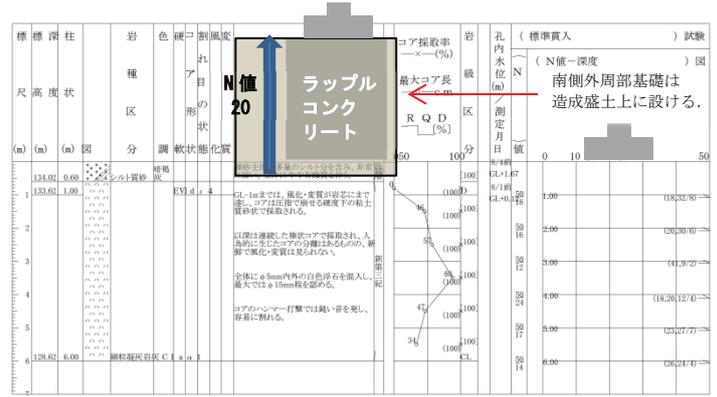


Fig. 4 敷地地盤の柱状図

2.3 レベル 2 検討用地震動波形の概要

検討用地震動波形は、告示波による模擬地震動波形とした。模擬地震動波形の位相は、観測地震動を用い、プレート境界型地震における位相情報が反映されると考えられる HACHINOHE 1968 NS によるもの(AW2)と、陸域の浅い直下型地震の位相情報が反映されると考えられる JMA KOBE 1995 NS による(AW3)を採用した。

Table 2 に 6 地震波の諸元を示す。また、加速度応答波形を Fig. 5 に、加速度応答スペクトル、擬似速度応答スペクトルを Fig. 6, 7 にそれぞれ示す。

層厚 10m の盛土造成を考慮した場合、最大加速度では AW2 波では 30%、AW3 波では 13% 大きな値となり、

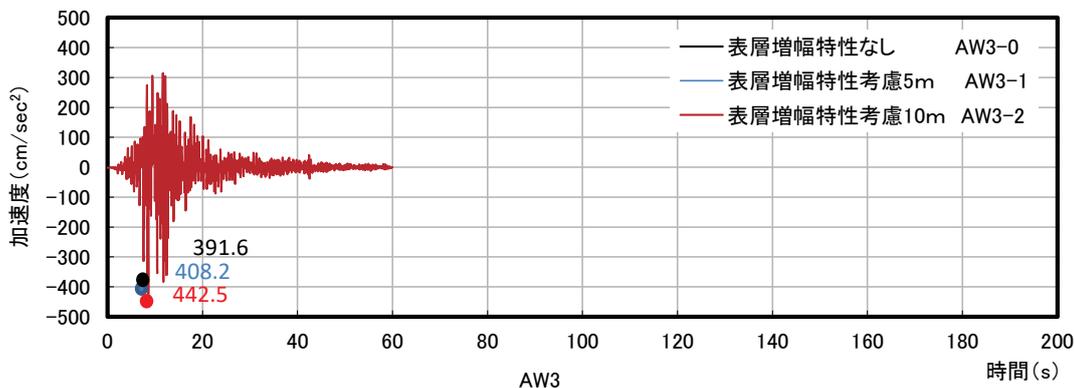
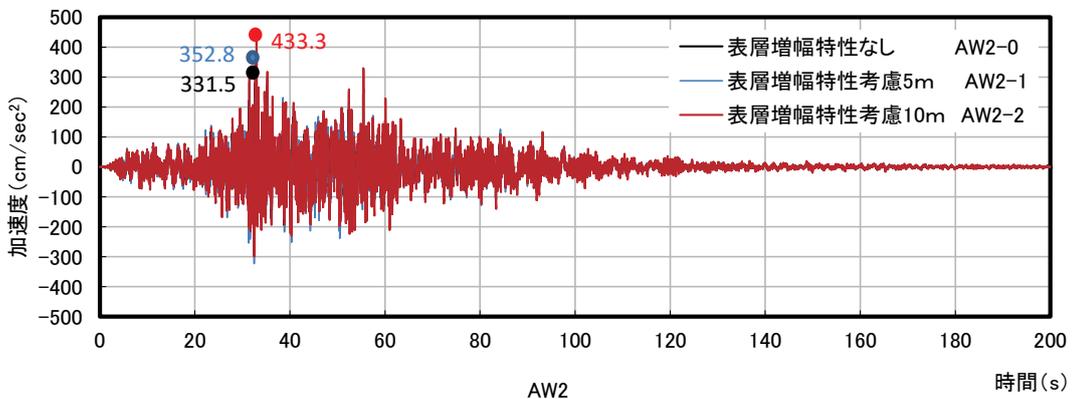


Fig. 5 加速度応答波形 (レベル 2)

Table 2 検討用地震動波形諸元 (レベル 2)

地震波	case	位相特性	継続時間 (sec)	刻み時間 (sec)	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	最大変位 (cm)
AW2	AW2-0	HACHINOHE 1968 NS	200	0.01	331.5	56.8	42.1
	AW2-1				352.8	57.5	42.2
	AW2-2				433.3	59.3	42.2
AW3	AW3-0	JMA KOBE 1995 NS	60	0.02	391.6	53.3	42.9
	AW3-1				408.2	54.7	42.7
	AW3-2				442.5	58.7	43.2

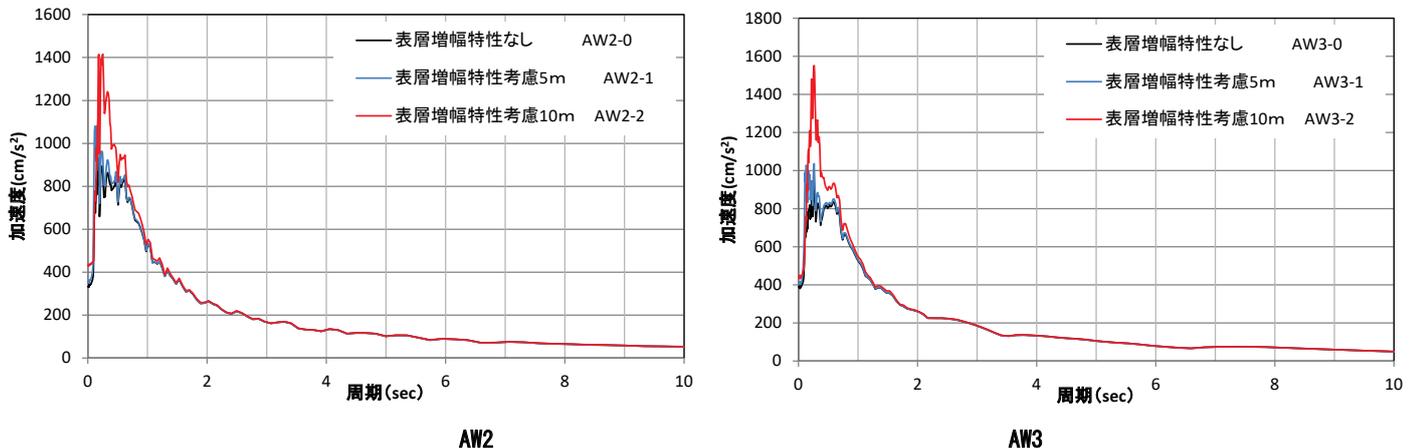


Fig. 6 加速度応答スペクトル (レベル 2)

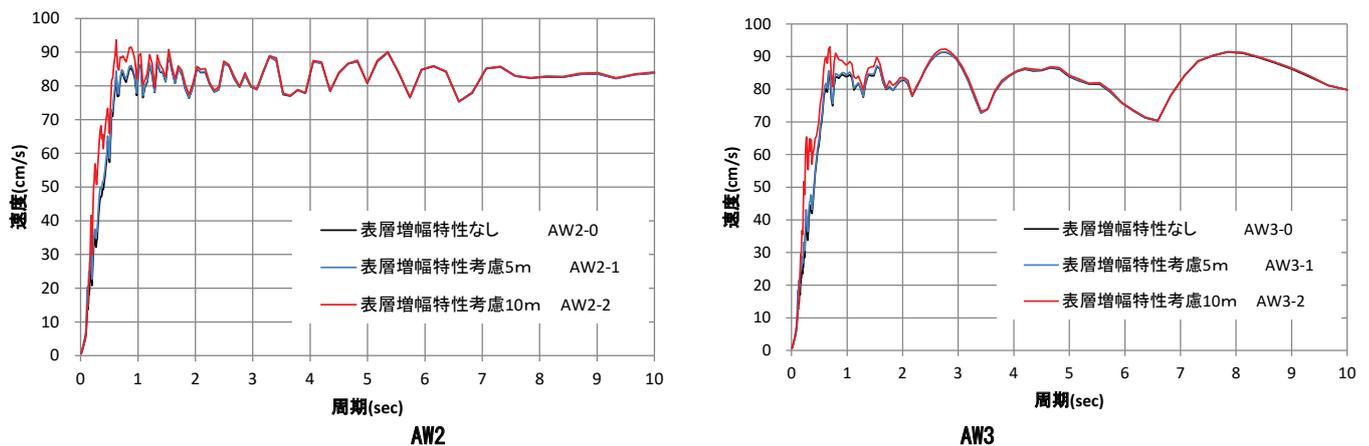


Fig. 7 擬似速度応答スペクトル (レベル 2)

最大速度では、AW2 波で 5%、AW3 波では 10% 程度大きな値となっている。

2. 4 立体解析モデルによる振動性状の検討

被覆構造の振動性状につき、立体解析モデルの固有値解析結果により、埋立前の初期状態と埋立が終了した状態で比較検討を行った。埋立終了時の状況は、比較対象が明確となるように、Fig. 8 に示すように、埋立部分にある中柱の埋立上面境界の水平変形を固定とした。

解析プログラムは、Midas iGen を使用した。Table 3 および Fig. 10 に固有値解析結果を示す。

初期状態の短辺、長辺、ねじれの各モードの 1 次固有周期は、それぞれ 0.77 秒 (1.30Hz)、0.54 秒 (1.84Hz)、0.41 秒 (2.42Hz) となっている。建築基準法令 88 条による鉄骨

造としての高さに換算すると、短辺方向は 25.6m、長辺方向は 18.2m となっている。また、埋立終了状態では、短辺方向は 24.2m、長辺方向は 17.1m となっている。

埋立終了後の短辺、長辺、ねじれの各モードの 1 次固有周期は、それぞれ 0.73 秒 (1.37Hz)、0.51 秒 (1.96Hz)、0.41 秒 (2.42Hz) となっている。建築基準法令 88 条による鉄骨造としての高さに換算すると、短辺方向は 24.2m、長辺方向は 17.1m となっている。

Table 3 検討モデルの固有値解析結果

		短辺方向	長辺方向	ねじれ
初期状態	周期 (s)	0.77	0.54	0.41
	換算高さ (m)	25.6	18.2	-
埋立終了	周期 (s)	0.73	0.51	0.41
	換算高さ (m)	24.2	17.1	-

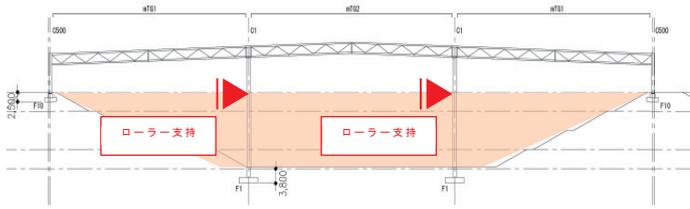


Fig. 8 埋立終了時の中柱水平変位拘束

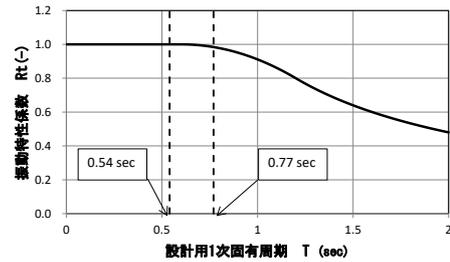


Fig. 9 レベル2地震に対する検討結果

3. 地震動に対する検討結果

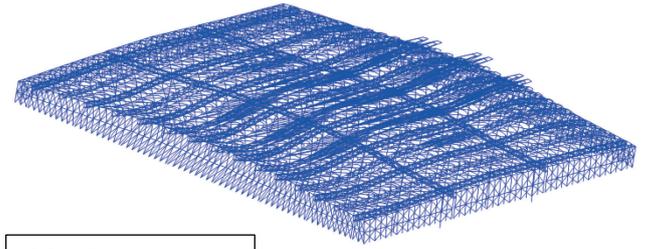
3.1 応答解析結果の概要

被覆構造の地震力に対する設計では、建築基準法令 88 条により 1 層建物、振動特性係数 $R_t=1.0$ (Fig.9 参照) として算定した水平力に対して、各構造部材の許容応力度設計を行っている。また、トラス構造により横補剛を満足しない梁によるフレームに、ブレースの水平力負担率を考慮した構造特性係数値 ($D_s=0.45\sim0.5$) により求められた必要保有水平耐力 (Q_{un}) に対して、最大層間変形が $1/100$ (建物重心位置での高さとその位置の水平変位) となった時点の保有水平耐力 (Q_u) が、公共建築物一類同等の 1.5 倍上回っていること、およびトラス部材に塑性ヒンジが生じていないことを確認している。

立体解析モデルによる弾塑性時刻歴応答解析を、前項 2.3 の地震動波形のうち、表層地盤の増幅特性なしの場合と 10m の造成盛土を考慮した場合の AW2 と AW3 について行い、静的解析結果との比較検討を行った。ただし、表層地盤の増幅特性の影響は入力地震波で考慮しているため、建物全体で一律とする。また、立体解析モデルの鉄骨各部材の復元力特性は、標準バイリニア型とした。減衰モデルは瞬間剛性比例型とし、1 次モード (振動数) に対して 2% の減衰定数を与えた。

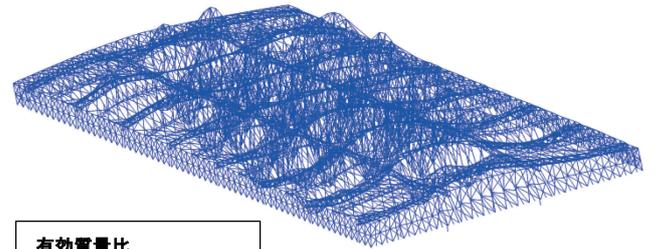
検討の結果、長辺、短辺方向とも最大応答層せん断力、変位とも表層地盤の増幅特性を考慮した場合、10% 程度大きな値を示している。

最大応答層せん断力は、保有水平耐力に比して、増幅特性を考慮した場合で 71%、考慮しない場合 64% 程度の



有効質量比	
短辺方向並進	: 63.6 %
長辺方向並進	: 0.0 %
短辺方向回り回転	: 0.0 %

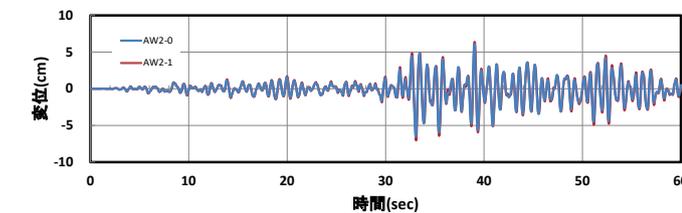
短辺方向
(短辺方向の有効質量比が最大となるモード)



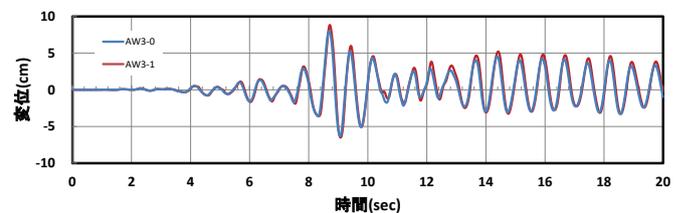
有効質量比	
短辺方向並進	: 0.0 %
長辺方向並進	: 58.2 %
短辺方向回り回転	: 0.05 %

長辺方向
(長辺方向の有効質量比が最大となるモード)

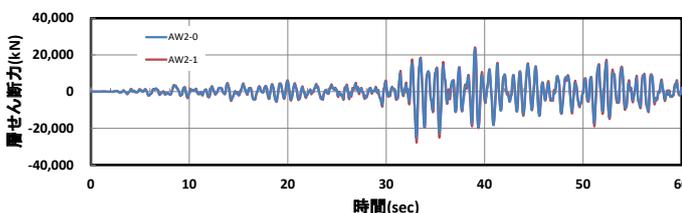
Fig. 10 立体解析モデルの振動モード図 (初期状態)



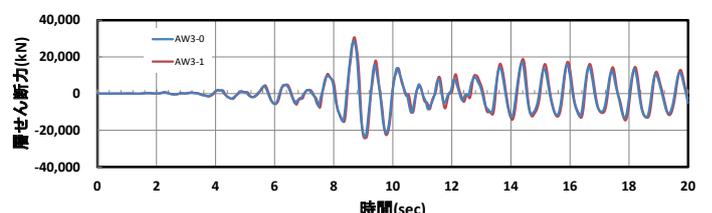
AW2 短辺方向入力時 重心位置応答変位



AW3 短辺方向入力時 重心位置応答変位



AW2 短辺方向入力時 層せん断力



AW3 短辺方向入力時 層せん断力

Fig. 11 地震動に対する時刻歴応答解析結果

Table 4 地震動に対する時刻歴応答解析結果（短辺方向）

地震動名	最大応答加速度	最大応答層せん断力	最大応答せん断力係数	最大応答変位
AW2-0	519	25.270	(0.53)	6.55
AW2-1	564	27.790	(0.58)	7.03
AW3-0	584	28.390	(0.60)	8.00
AW3-1	644	30.570	(0.64)	8.84
必要保有耐力 Q_{un}	-	25.660	(0.54)	-
保有耐力時 Q_u	-	47.577	-	11.40

Table 5 地震動に対する時刻歴応答解析結果（長辺方向）

	最大応答加速度	最大応答層せん断力	最大応答せん断力係数	最大応答変位
AW2-0	736	41.910	(0.83)	4.66
AW2-1	782	42.670	(0.85)	4.77
AW3-0	606	40.290	(0.80)	4.25
AW3-1	693	41.190	(0.82)	4.84
必要保有耐力	-	28.511	(0.60)	-
保有耐力時	-	50.344	-	11.4

(ここに、カッコ内の数値は各最大応答層せん断力を Q_u で除した数値とする)

値となっており、余裕度として 1.41~1.56 程度となっている。また、この時各材に塑性化が生じないこと確認している。

3. 2 地震動の位相差入力に対する検討

被覆構造体の平面形状は、280m×180m と長大であるため、地震動（せん断波:SH）の斜め入射による位相差入力に対する検討を行った。検討方法は、位相差（時間差）を求め、時刻歴応答解析により、位相差による影響があるか検討を行った。

スネルの法則により、地盤が硬質であるほど入射角は大きくなるため、ここでは、基礎構造は凝灰質砂岩が一樣に分布した状態に支持されていると設定した。

この位相差による検討は、AW3 波にて行い、位相差 Δt を考慮した場合としない場合ケースにおいて、上部構造の中心と外周部に生じる最大変位の比較により行った。時刻歴応答解析結果を Fig. 13, 14 に示す。

- 基礎構造への入射角度 θ_s
地震基盤のせん断波速度 $V_{s1}=3000$ m/s
入射角度 $\theta_1=90^\circ$
$$\sin \theta_s = (V_s/V_{s1}) \times \sin \theta_1$$
$$= (500/3000) \times 1.0 \rightarrow \theta_s = 9.6^\circ$$
- 見かけ上の位相速度 C
$$C = V_s / \sin \theta_s$$
$$V_s = 500 \text{ m/sec}$$
$$C = 2998 \text{ m/sec}$$
- 位相差 $\Delta t = \text{距離} / C = 280 / 2998 = 0.09 \text{ sec}$

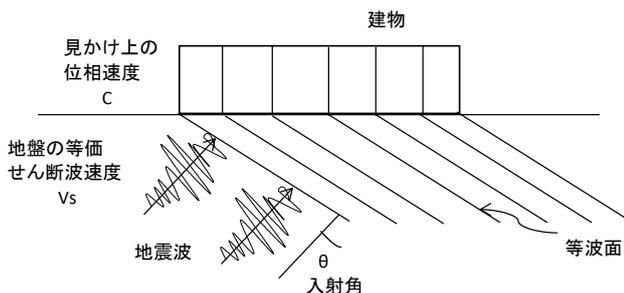


Fig. 12 せん断波の斜め入射を受ける長方形建物

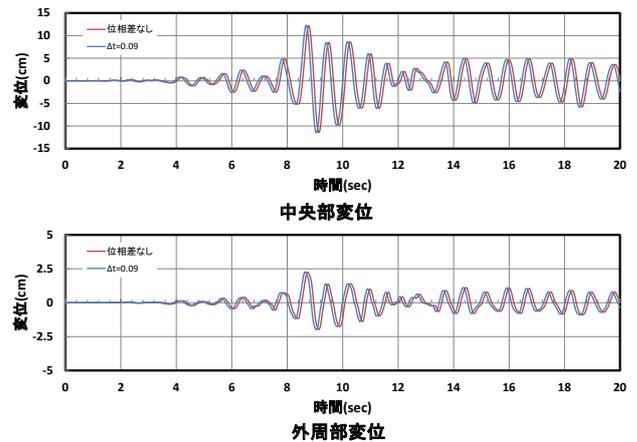


Fig. 13 上部構造の時刻歴変位 (AW3-0)

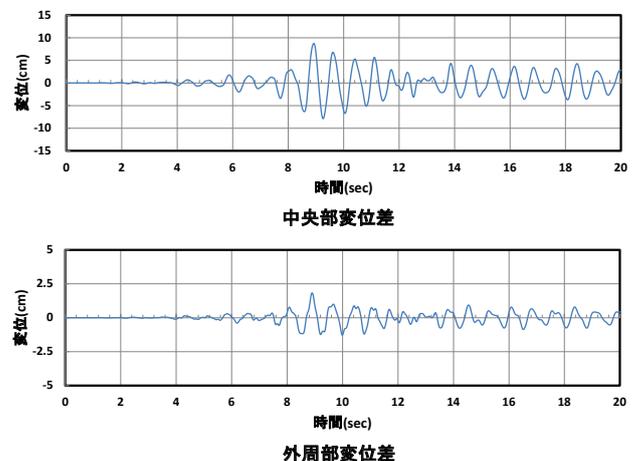


Fig. 14 上部構造の時刻歴変位差 (AW3-0)

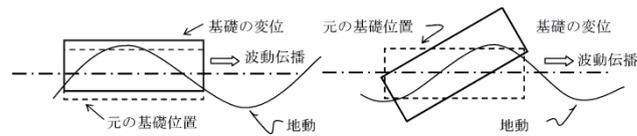


Fig. 15 位相差による変形の概要

検討の結果、変位差として約 8.8cm 生じるが、建物端部から中央までの長さ 140m に対して、 $8.8/14,000=0.063\%$ < 0.1% と微小な相対変形であり、それに伴う増分応力も小さいため、影響は小さいと判断される。

4. 積雪荷重に対する検討結果の概要

検討敷地は多雪区域外で、建築基準法令 86 条による積雪荷重の条件は、垂直積雪量 30cm、単位荷重 20N/cm² である。ただし、平成 31 年 1 月 15 日から適用される、「一定規模の緩勾配屋根の積雪後の降雨を考慮した積雪荷重の割増し」により、約 1.4 倍、垂直積雪量で 50cm 相当となる。この荷重（レベル 1）に対して、各構造部材は許容応力度以下となるように設計されている。

ここでは、埋立前の初期状態の構造体に対して、屋根全体の積雪となる均等荷重と、北側のみ積雪で南側は積雪無しの偏心荷重状態の 2 ケースを設定し、それぞれ積雪量を鉛直方向荷重として漸増させた静的弾塑性解析によって、構造体の状況を検証した。

検討の結果 2 ケースとも、レベル 2 荷重となる垂直積雪深度 70cm（レベル 1 荷重の 1.4 倍）では、各部材は弾性状態である。垂直積雪深度 80cm で、メイントラスのスパン中央部で弦材の一部が塑性化する。この時のメイントラスの最大鉛直変位は 172~186mm (1/320~1/350) で、部分的にも崩壊メカニズム状態に到っていない。

レベル 1 荷重の 2.0 倍、垂直積雪量 100cm で、メイントラスのスパン中央部で弦材の塑性化範囲が広がり、最大鉛直変位は 226~233mm (1/255~1/260) となっている。

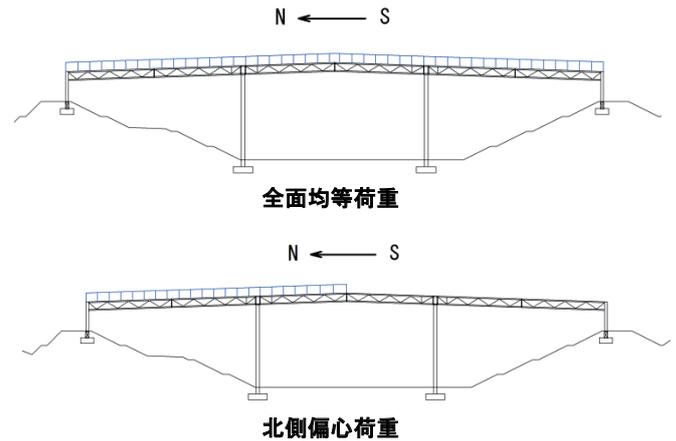


Fig. 16 積雪荷重検討ケース

この時、メイントラスと柱の接合部 (Fig.2 A 部) の束材が圧縮耐力に達しており、これ以上の荷重に対しては、メイントラスの変形が進行する崩壊形を形成していることが確認された。これより、この束材のみの耐力を向上することで、被覆構造全体の耐力が向上することとなると想定される。

積雪 80cm 均等荷重時

積雪 100cm 均等荷重時

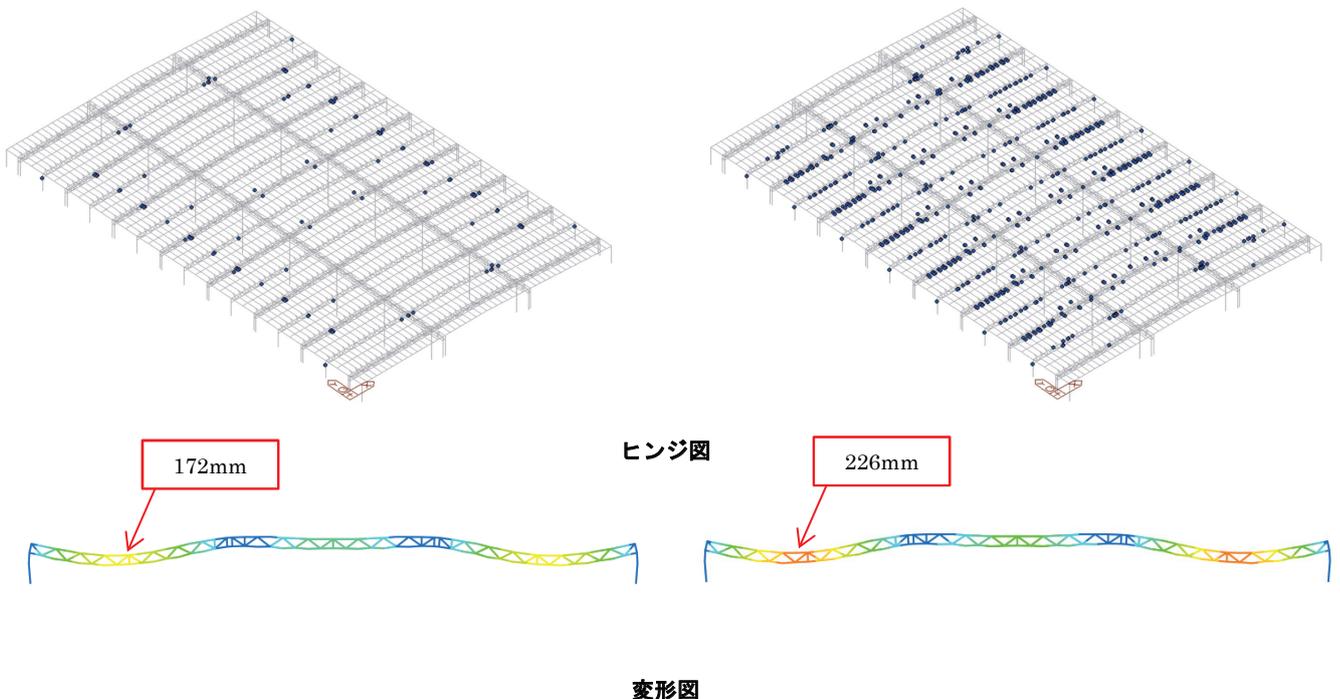


Fig. 17 レベル 2 積雪荷重に対する検討結果 (全面均等荷重)

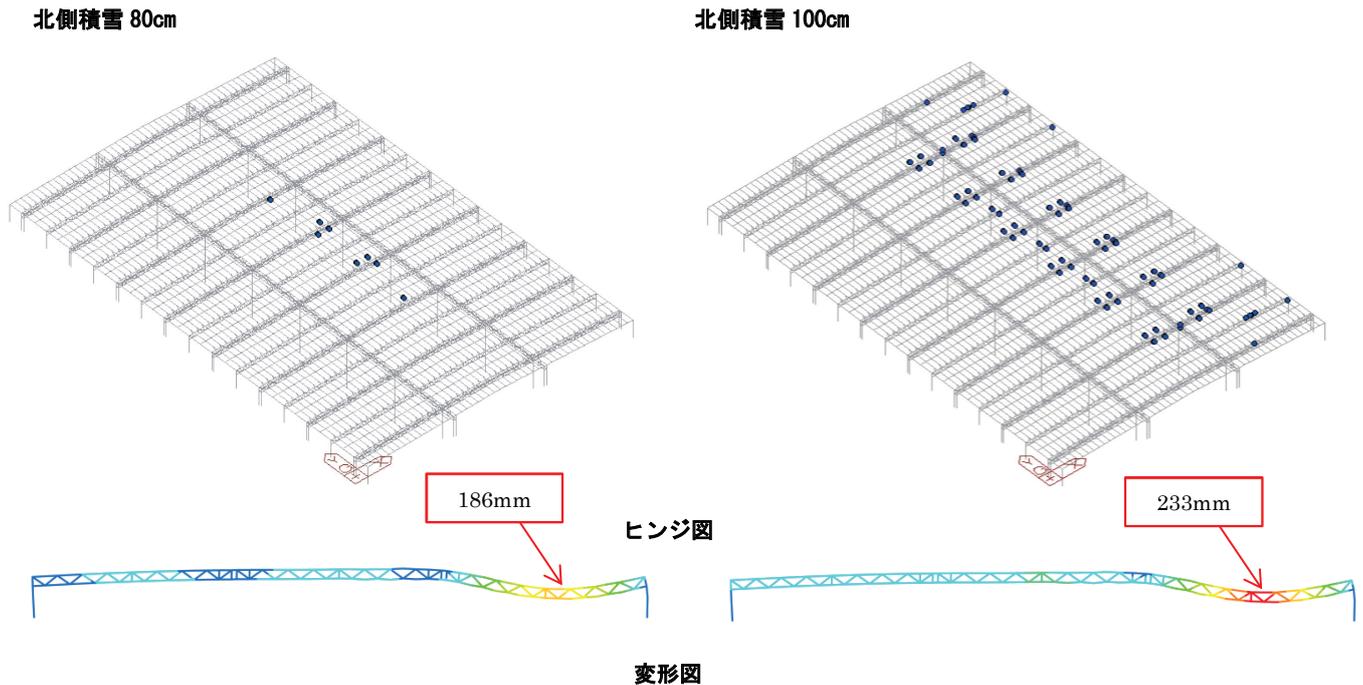


Fig. 18 レベル2 積雪荷重に対する検討結果(北側偏心荷重)

5. まとめ

本報告では大スパンを有する管理型最終処分施設の設計用外力と構造方法について検討を行った。地震力に対する造成地形での盛土の影響として、N 値 20 程度の礫質土（長期許容支持力 200kN/m^2 を有する程度）の 10m の増幅特性を考慮した。この地震動波形は増幅特性を考慮しない場合に比して、10%程度大きな加速度波形となっている。この増幅特性を考慮した地震動に対する時刻歴応答解析の結果、上部被覆構造には、塑性化する部材は無く、倒壊にいたる大きな変形が生じないことを確認した。また、 $250\text{m} \times 150\text{m}$ を超える大きな平面形状に対して懸念される地震動の位相差による影響は小さいことを確認した。

建物の供用期間を考慮すると、最も懸念される外力は、最近の気象状況から積雪荷重と考えられ、崩壊にいたる

荷重状態を検討した。垂直積雪深度 30cm の地域において、降雨の影響を考慮した荷重に対し許容応力度設計された構造体で、均等荷重、偏荷重とも垂直積雪深度 100cm が崩壊にいたる限界荷重であることを確認した。また、メイントラスと柱を接合する束材のみの耐力の向上で、構造体全体の耐力向上が図れることを確認した。

参考文献

- 1) 公益財団法人 日本産業廃棄物処理振興センター：HP 産廃知識最終処分場
- 2) 環境省：災害廃棄物対策情報サイト 自治体の災害廃棄物対策の強化に向けて
- 3) 熊本県：HP 公共関与最終処分場について(パンフレット)
- 4) 今津雅紀，福武毅芳：砂礫材料の動的変形特性，第21回土質工学研究発表会Vol. 1, 1986年
- 5) 井口道夫：地震動の位相差及び地震動の相互作用を考慮した地震応答，関東地震50周年地震工学シンポジウム，1973年

Studies on the Structural Design Index of a Large-Span Covered Facility

Ryota MINAMI, Shinichi TAKAHARA, Maki KITAGAWA and Kaori SEMBA

Abstract

Controlled final landfill sites are expected to be built to a certain extent in the future. Their covering structure, the superstructure, is in service for a short period of ten-odd years and the demolition work is assumed to be carried out after use. On the other hand, for a period of use, high seismic performance and snow load resistance performance are required from the viewpoint of waste management. Based on this contradicting conditions, we considered the assumed external force with respect to the structure which satisfies the specification required by the Building Standards Law, confirmed the margin to the external force and the characteristics leading to collapse from a time history response analysis under seismic conditions and a static incremental loading analysis of snow, and then investigated the design index for the rational structure.

Key words: Controlled final landfill site, Large span structure, Seismic evaluation, Performance of snow load