盛土地盤変状解析結果を踏まえた耐震対策

令和８年１０月８日

国土交通省　航空局

第15回 空港内の施設の維持管理等に係る検討委員会

国土交通省

空港内の施設の維持管理等に係る検討委員会（以降、「検討委員会」という。）は、平成24年12月の設置以降、空港内の施設の維持管理等のあり方を継続的に検討

令和6年能登半島地震による能登空港での被災を踏まえた耐震対策（盛土地盤変状対策）の検討※にあたり、同検討委員会において、維持管理の一環として実施する応急復旧（事後対策）と地盤改良（事前対策）の対策範囲を合理的に設定するための検討を実施

※盛土で造成した新千歳、釧路、函館、広島、高松、熊本及び鹿児島（７空港）を対象

【第13回検討委員会（令和7年7月）】
耐震対策範囲の検討に必要となる地盤変状解析手法の検討を実施

【第14回検討委員会（令和8年2月）】
①応急復旧（事後対策）の検討を実施
②合理的な対策範囲の設定について、事後対策と事前対策を組み合わせて設定する方針を確認

今回の第15回検討委員会では、鹿児島空港及び熊本空港における地盤変状解析結果等を報告するとともに、地盤変状対策範囲の妥当性及び今後の対応についてご議論いただきたい。

【報告】
１．鹿児島空港の地盤変状解析等の結果と対策案
２．熊本空港の地盤変状解析等の結果と対策案

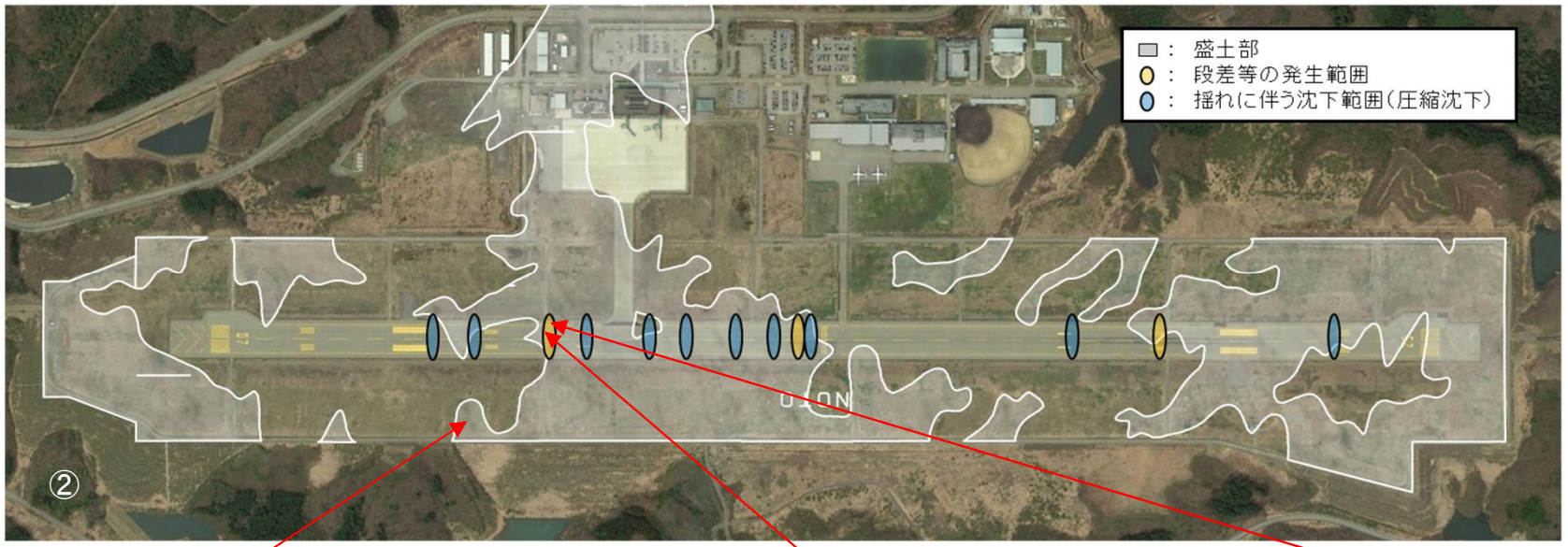
【議題】
地盤変状対策範囲の妥当性と今後の対応

能登空港被災状況

国土交通省

○ 能登半島地震により、能登空港の切盛土境界部周辺において滑走路に大きな亀裂、着陸帯に最大75㎝の段差等が生じている。盛土法面の亀裂、はらみ、崩落は確認されていないことから、亀裂や段差の発生は、盛土部の沈下(ゆすりこみ沈下、盛土法面の水平変位に伴う鉛直変位等)が要因と想定している。

○ 能登空港と同じく盛土で造成された空港(新千歳、釧路、函館、広島、高松、熊本、鹿児島)について、同様の事象が生じる可能性について検証し、必要な対策を実施する。





着陸帯において最大75cmの段差



切盛境界で段差発生　滑走路で最大10cm以上



ひび割れ幅2cm以上

※第13回空港内の施設の維持管理等に係る検討委員会 再掲

被災メカニズムの検証

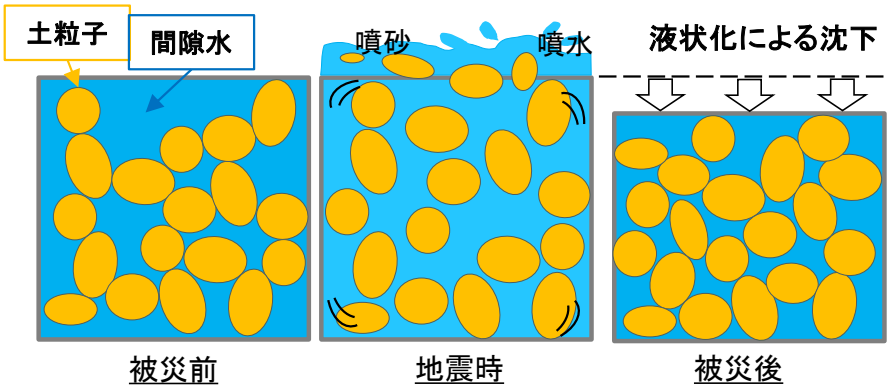
被災メカニズムの検証

能登空港の滑走路等の亀裂や段差の要因と想定している盛土地盤の沈下（ゆすり込み沈下）は、地震動による盛土地盤への繰り返しせん断によって地盤の体積が収縮され、地盤変形が生じるものであるため、“盛土地盤の体積収縮を考慮した解析方法”について検討かつ能登空港の地盤変形の照査をし、盛土部における被災メカニズムの検証を行う。

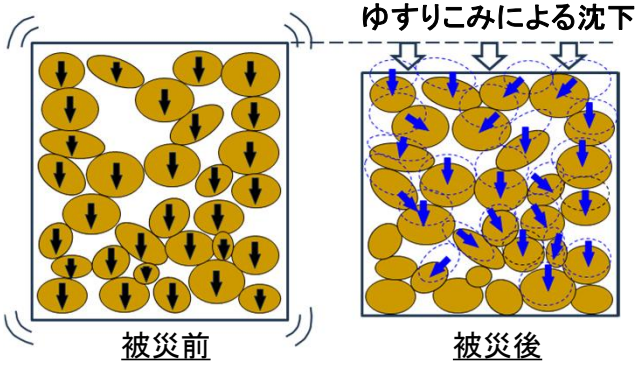
体積収縮を考慮した解析（プログラム構築）のプロセス

1. 能登空港の地盤変形について地震応答解析（FLIP）による検討を行う。
   - ✓ 地震動の設定は、能登半島地震の再現地震動を設定
   - ✓ 解析モデルは、既往資料を基に盛土構成及び断面位置を設定
   - ✓ 地盤の変形特性（せん断抵抗角等）は、能登空港建設当時の調査資料を基に設定
2. 盛土地盤の液状化による地盤沈下の影響検討を行う。
   - ✓ 地震応答解析（FLIP）により液状化する地盤の範囲を特定し、盛土地盤の沈下量を算定
3. 盛土地盤の体積収縮による沈下を解析するプログラムを構築する。
   - ✓ 液状化地盤とは別の範囲で、ゆすりこみにより生じる盛土地盤の沈下量を評価する機能を構築する。

盛土地盤の液状化による沈下の解析



盛土地盤の体積収縮による沈下の解析



・地震により盛土箇所が揺らされて地盤の体積が収縮したことが原因で、盛土箇所で沈下（ゆすり込み沈下）が発生したものと想定

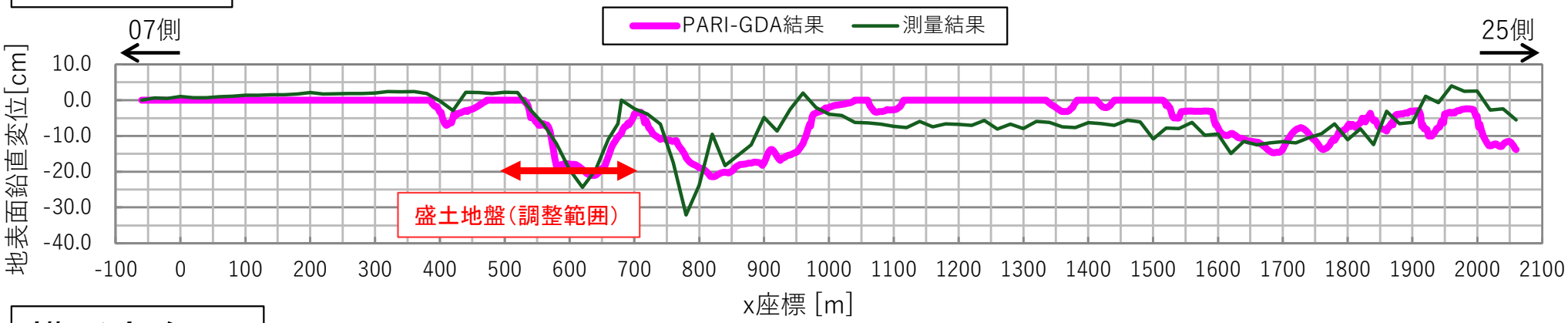
※第13回空港内の施設の維持管理等に係る検討委員会 再掲

盛土地盤の体積収縮を考慮した変形解析　解析結果

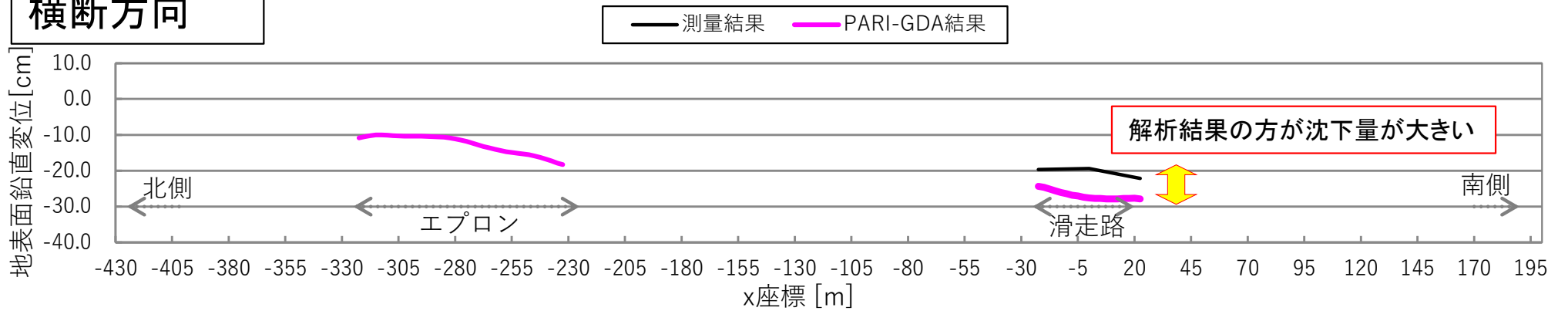
盛土（土砂）の“累加せん断ひずみと体積ひずみの関係”調整後の解析結果と測量結果を比較したところ、滑走路の段差が発生箇所であり、地盤定数を調整する際のターゲットとした縦断方向500～700m区間の盛土地盤位置において沈下量の傾向が近いことがみられた。このことから、『PARI-GDA※』による盛土地盤の体積収縮を考慮した変形解析により盛土地盤の沈下量と範囲は概ね評価できるものと考える。ただし、今回の解析に用いた地盤定数は体積ひずみを調整したものであるため、全体的な変形を確認するためには原地盤の地盤定数を用いて解析する必要がある。

※PARI-GDA：盛土地盤の体積収縮を考慮した変形解析プログラム

縦断方向



横断方向



※現地測量結果は、地震による能登空港の地殻変動量(23cmの隆起)を引いたものである。

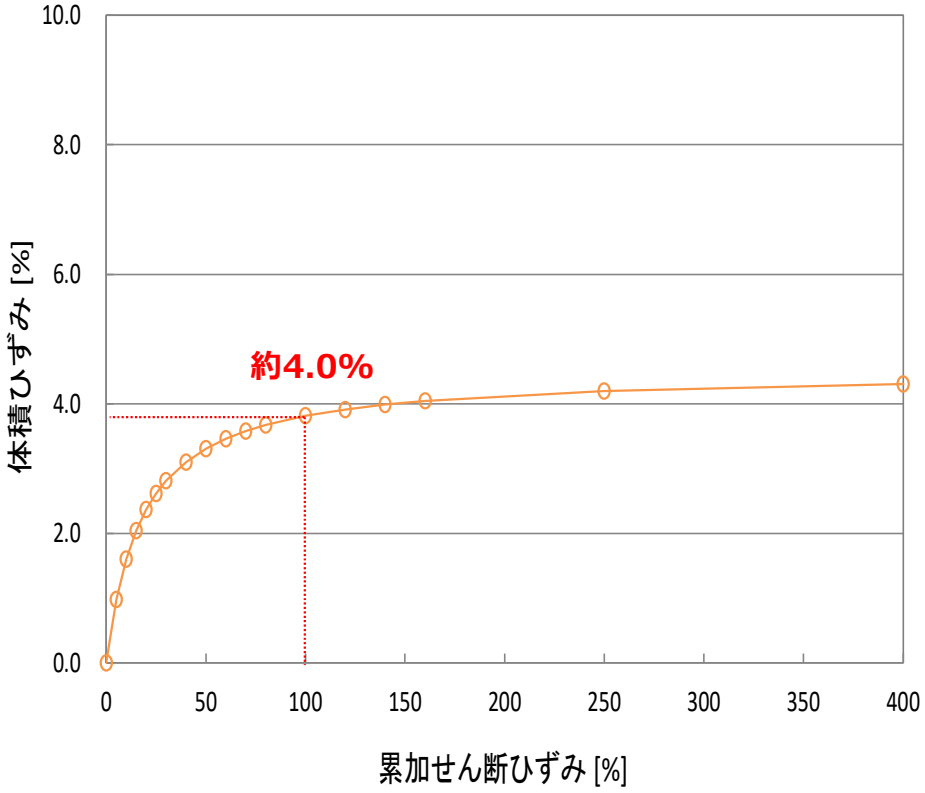
※第13回空港内の施設の維持管理等に係る検討委員会 一部加筆

【参考】能登空港土質調査結果報告

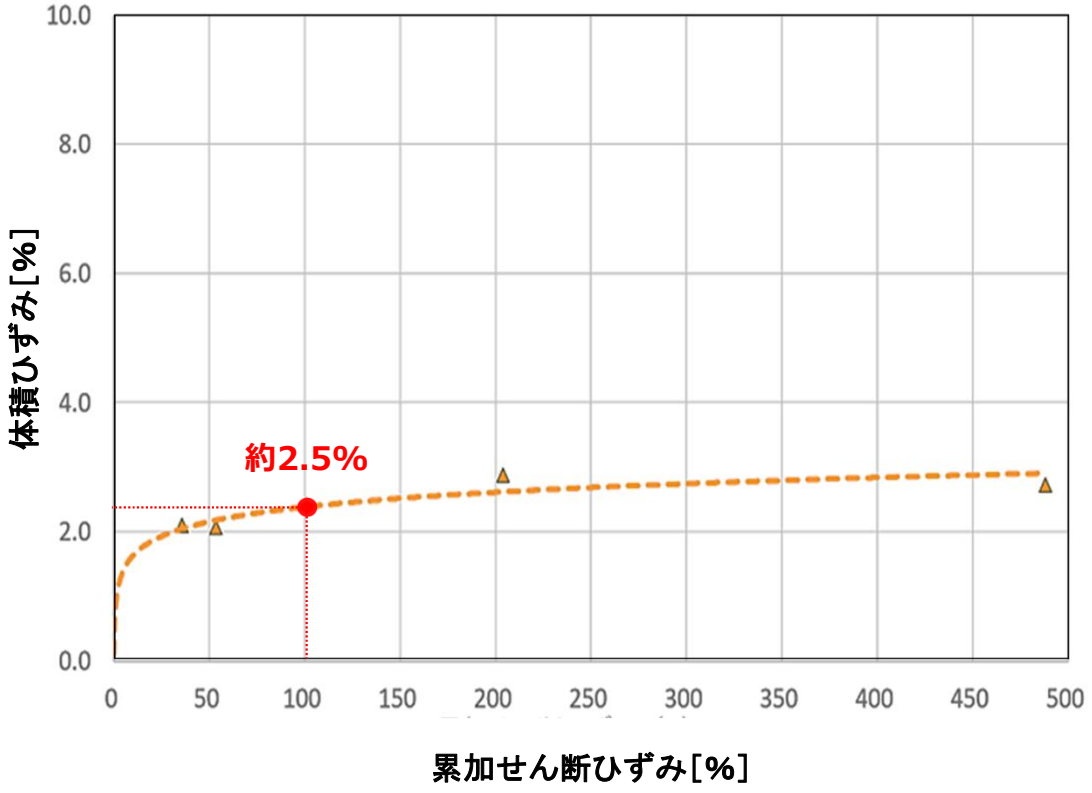
国土交通省

地盤変形解析プログラム（PARI-GDA）に用いる地盤材料の“累加せん断ひずみと体積ひずみの関係”（繰返しせん断により生じる地盤の変形累積量に応じて生じる地盤の体積変化量）について、第13回検討委員会では、能登空港の土質調査データがないことから、通常、実験で用いる「きれいな砂（珪砂）」の試験結果を仮定値として利用したが、今年度、能登空港の土質調査が完了したので、その結果を報告する。

⇒ 累加せん断ひずみ100%時の体積ひずみは、仮定値約4.0%に対し、能登空港盛土部は約2.5%であった。
この結果、前ページで示す解析結果の沈下量は、再度解析を実施することにより減少する可能性がある（今年度、解析実施予定）。



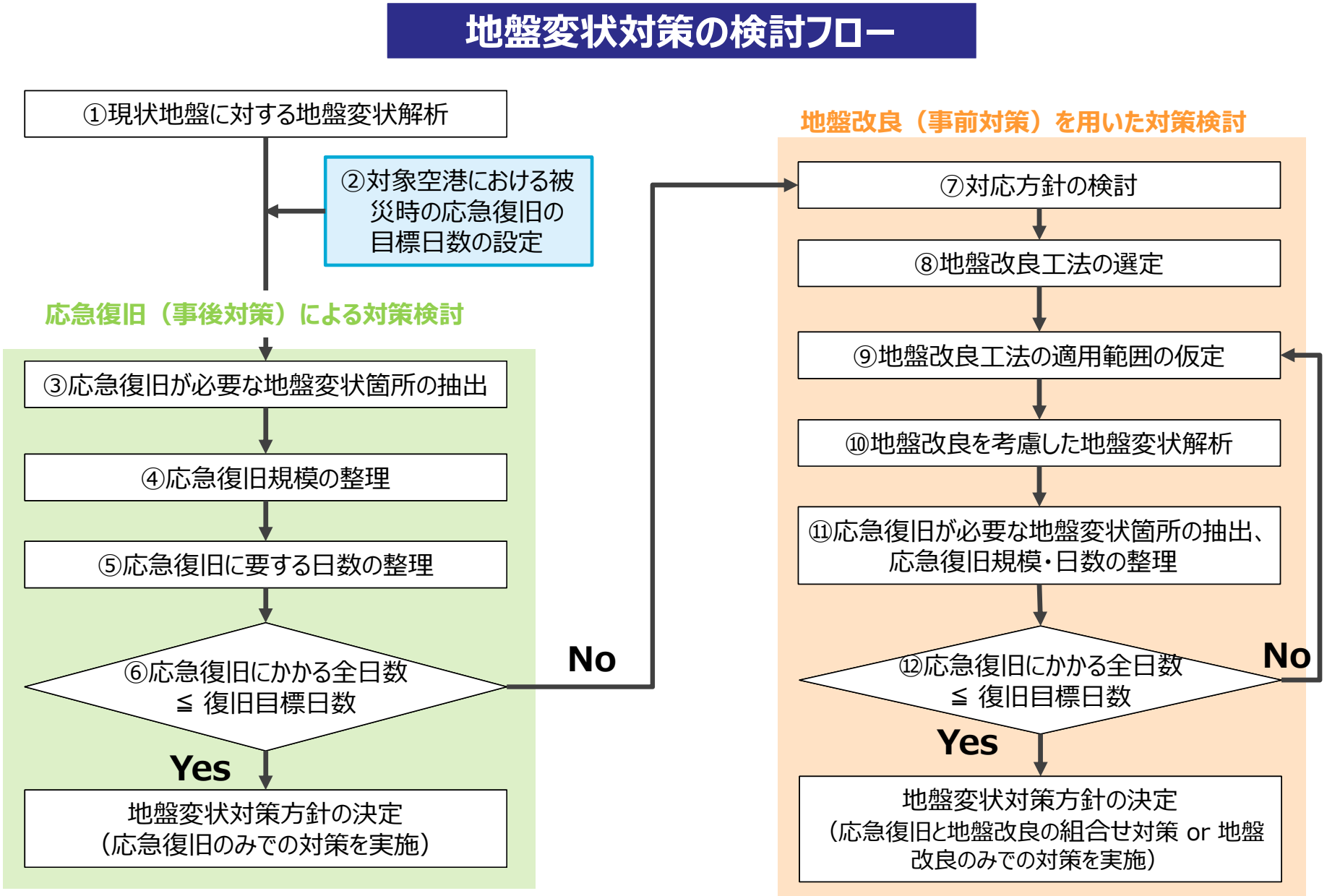
累加せん断ひずみと体積ひずみの関係（1）
実験で用いる「きれいな砂（珪砂）」



累加せん断ひずみと体積ひずみの関係（2）
能登空港土質（盛土部中層帯）

地盤変状対策の検討フロー

地盤変状対策の検討は、地盤変状解析の結果に基づき、次のフローにより実施する。



※第14回空港内の施設の維持管理等に係る検討委員会 再掲

鹿児島空港・熊本空港の地盤変状対策の検討

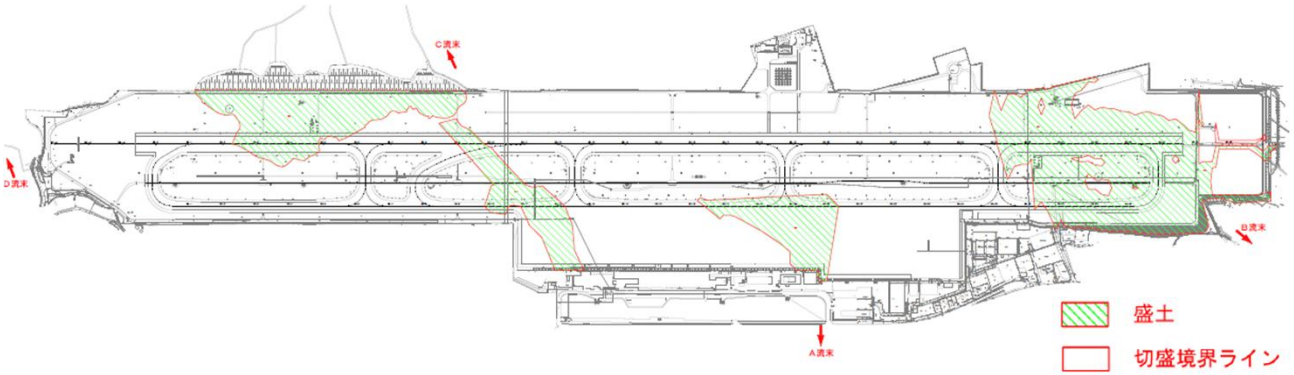
国土交通省

九州地方整備局において、鹿児島空港及び熊本空港の土質調査、地震応答解析（FLIP）及び地盤変形解析（PARI-GDA）等を実施し、地盤変状対策の検討をした。

(1) 資料収集・整理	→	(2) 土質調査位置・試験項目の検討	→	(3) 土質調査・土質条件の設定	→	(4) 地震応答解析（FLIP） 各空港3断面を選定し、地震応答解析を実施	→	(5) 地盤変形解析（PARI-GDA） 各断面の体積収縮を考慮した地盤変形解析を実施	→	(6) 耐震性照査・対策方法の検討

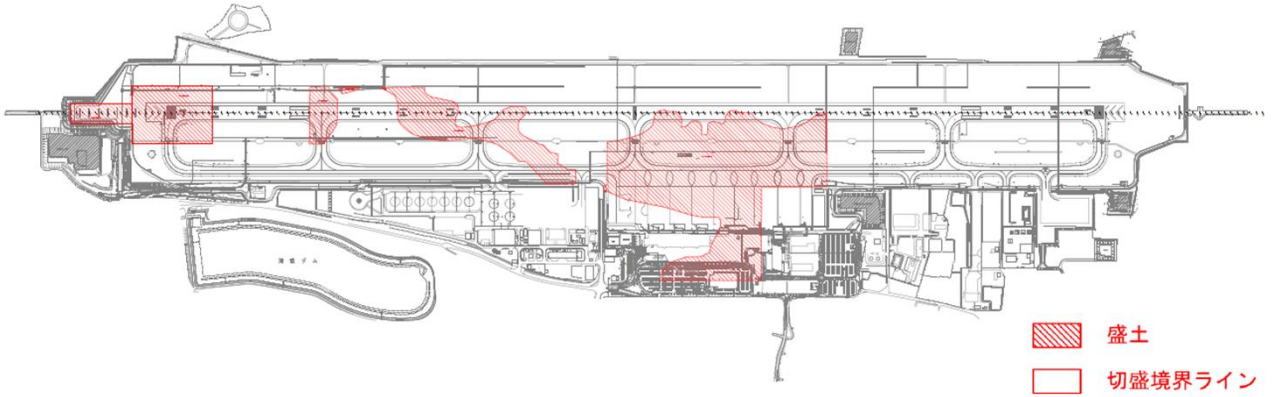
鹿児島空港





熊本空港





１．鹿児島空港の地盤変状解析等の結果と対策案

鹿児島空港　地震応答解析断面の設定

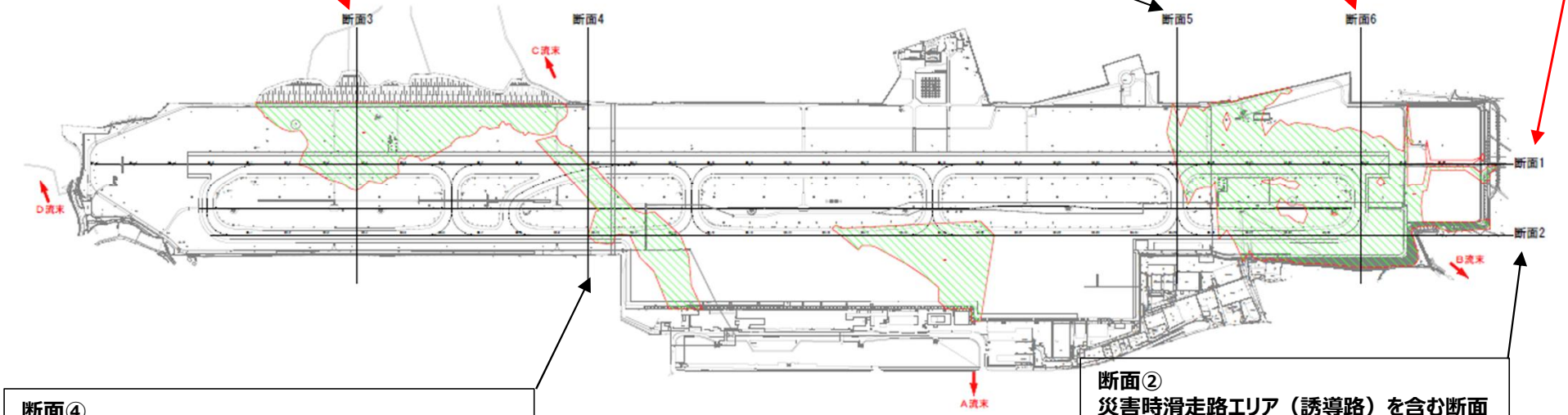
国土交通省

断面①
災害時滑走路エリア（滑走路）を含む断面

断面③
盛土厚（31.6m）が最大と想定される断面

断面⑥
災害時滑走路エリア（誘導路）を含む断面
盛土厚約2.98m

断面⑤
滑走路中央部に切土境界が存在すると推定される断面
盛土厚2.98m



断面④
滑走路中央部に切盛境界が存在すると推定される断面
盛土厚3.56m

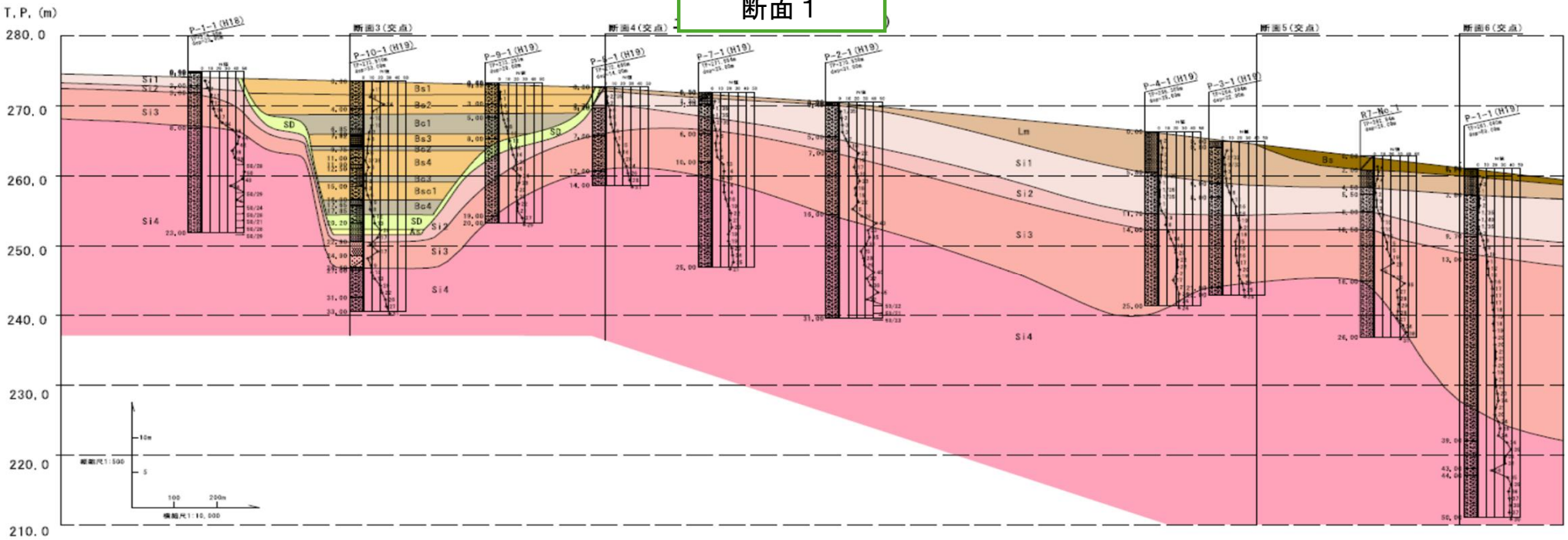
断面②
災害時滑走路エリア（誘導路）を含む断面
盛土厚2.98m

採用断面	法線名	選定理由	推定最大盛土厚	推定切盛境界の有無			
				滑走路	誘導路	エプロン部	その他
○	断面①	・災害時対応活動エリア（滑走路）を含む断面	—	—	—	—	—
×	断面②	・災害時対応活動エリア（誘導路）を含む断面 ・平行誘導路の法線方向	約 2.98m	×	×	—	平行誘導路内
○	断面③	・災害時対応活動エリア（滑走路）の横断方向 ・盛土厚が最大と想定される断面	31.6m	×	×	—	滑走路～平行誘導路間
×	断面④	・災害時活動エリア（滑走路）の縦断方向と切盛境界線が交差するため	約 3.56m	○	×	—	平行誘導路内
×	断面⑤	・災害時活動エリア（滑走路）の縦断方向と切盛境界線が交差するため	約 2.98m	○	×	—	—
○	断面⑥	・災害時対応活動エリア（誘導路）を含む断面 ・空港南側の盛土を含む、誘導路の法線方向	約 2.98m	×	×	—	—

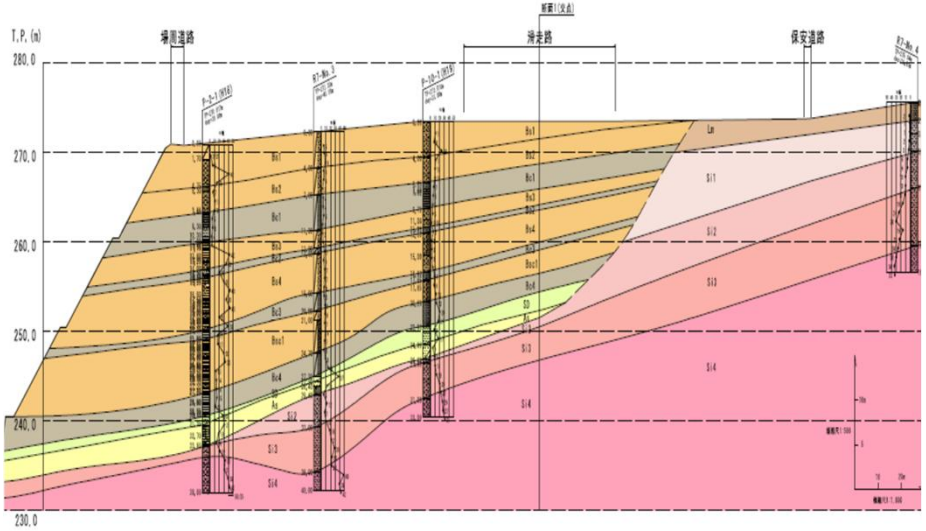
鹿児島空港　解析断面の土層

国土交通省

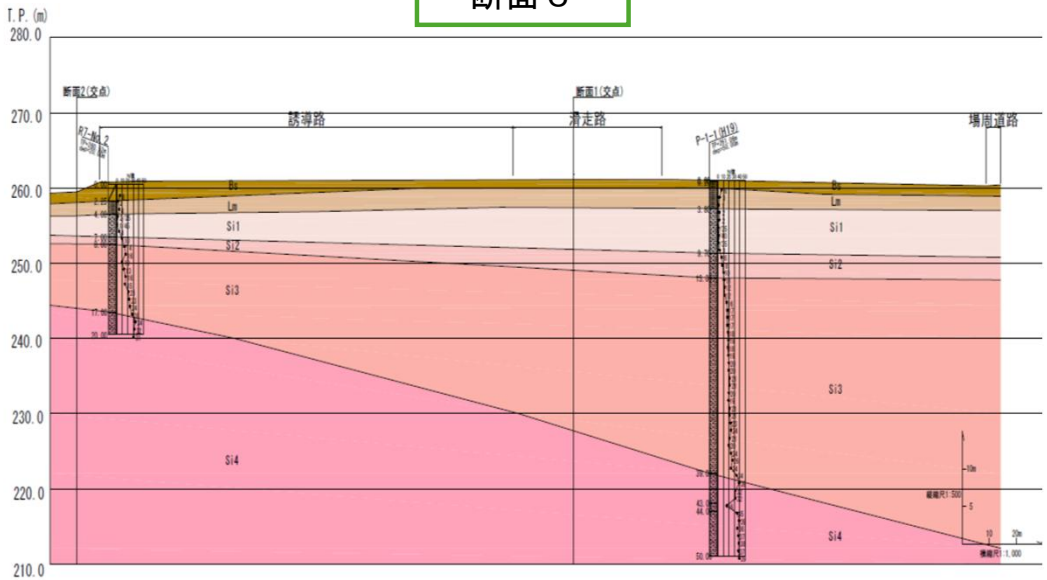
断面１



断面３



断面６



鹿児島空港　地震応答解析（断面１）の解析モデル

国土交通省

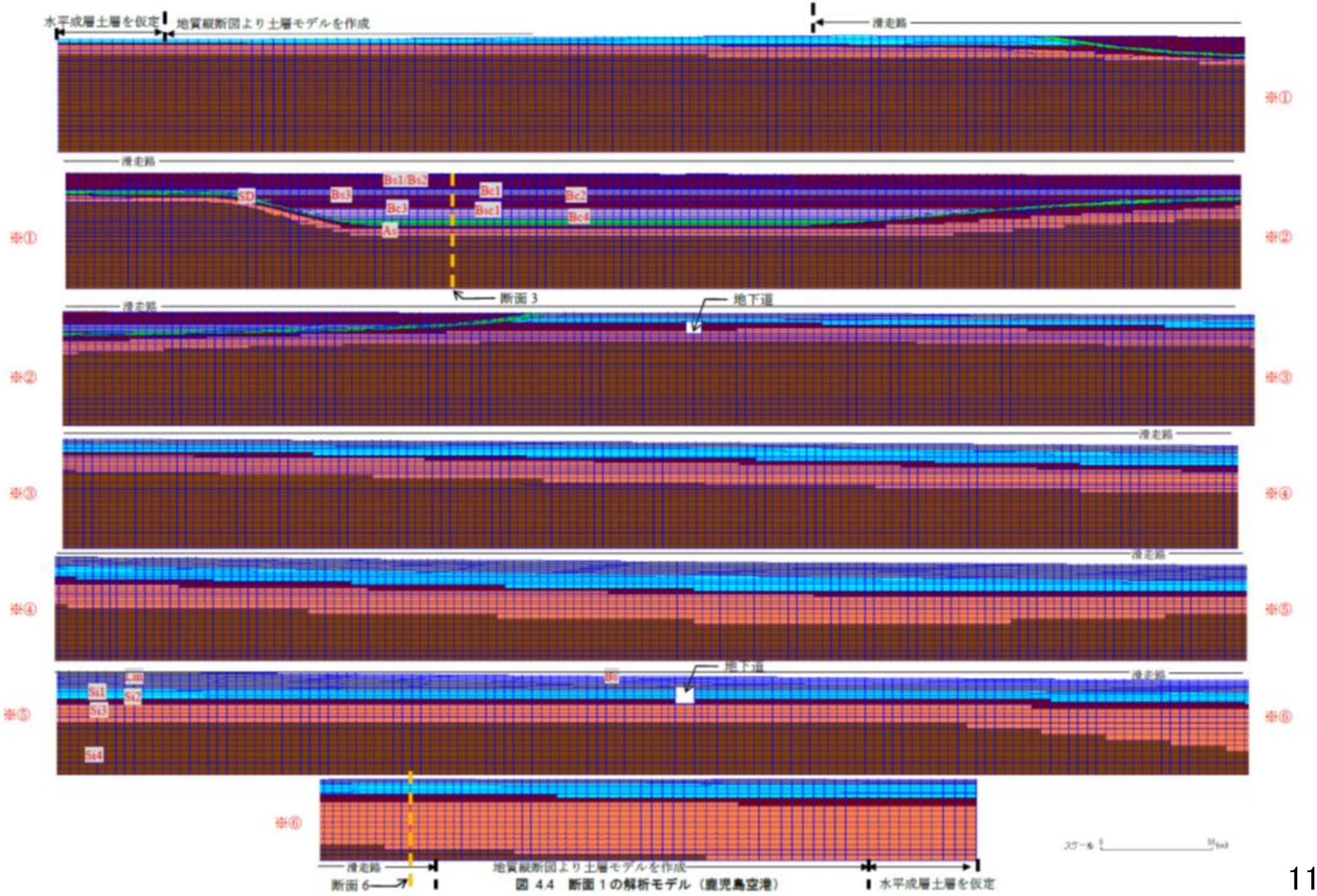
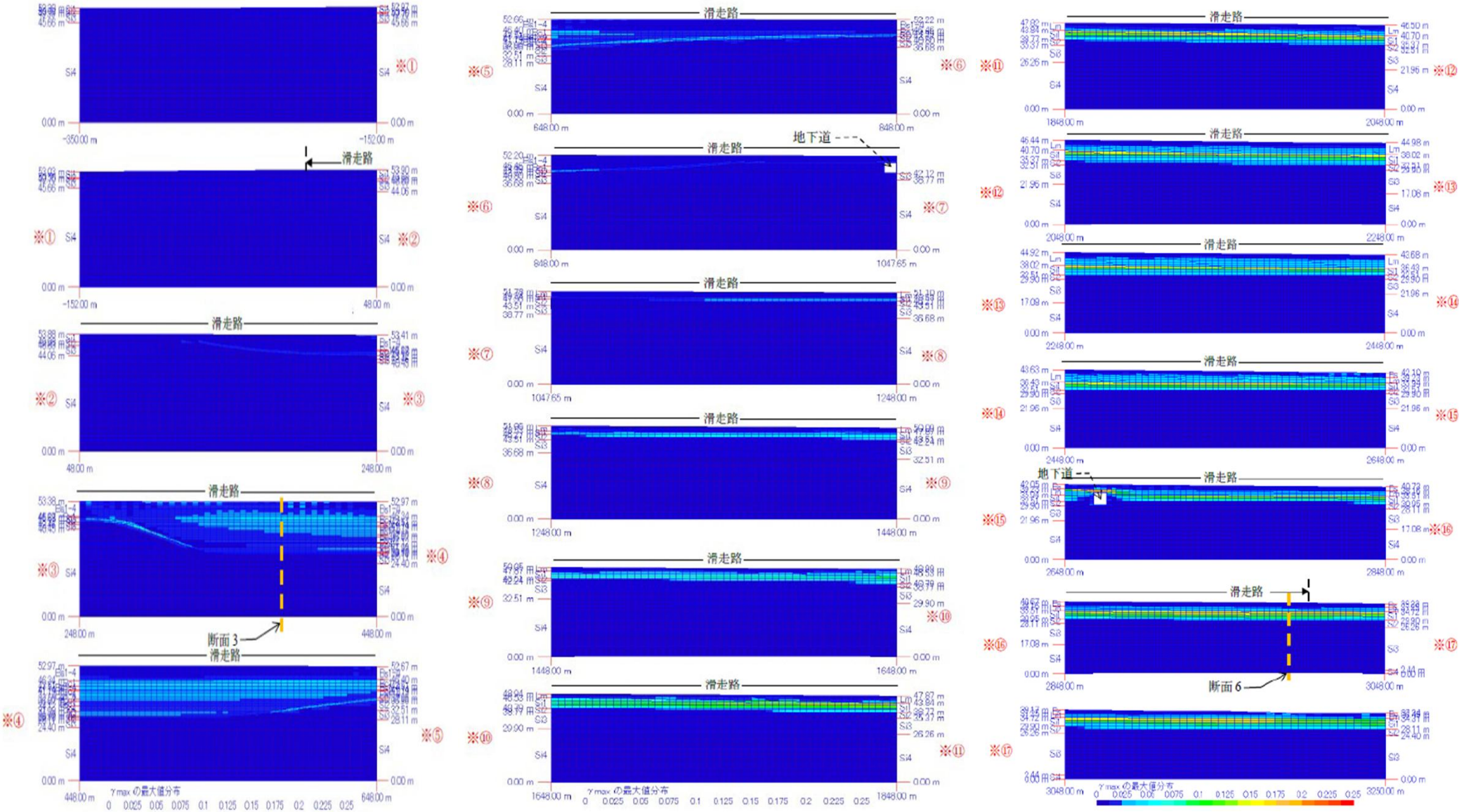


図 4.4　断面１の解析モデル（鹿児島空港）

鹿児島空港　地震応答解析(断面１)の結果

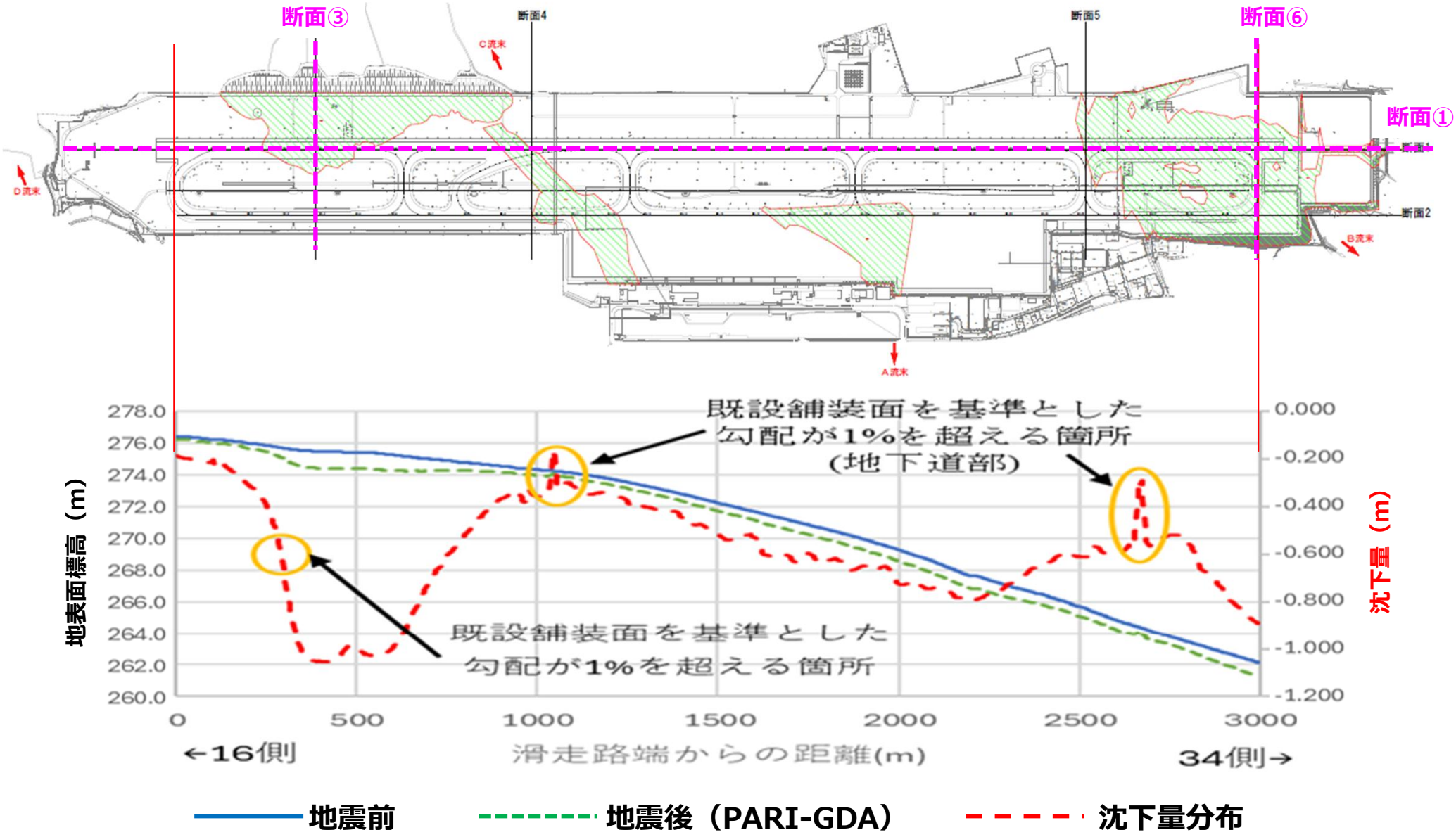
国土交通省

地震応答解析(FLIP)解析結果(最大せん断ひずみの最大分布図)



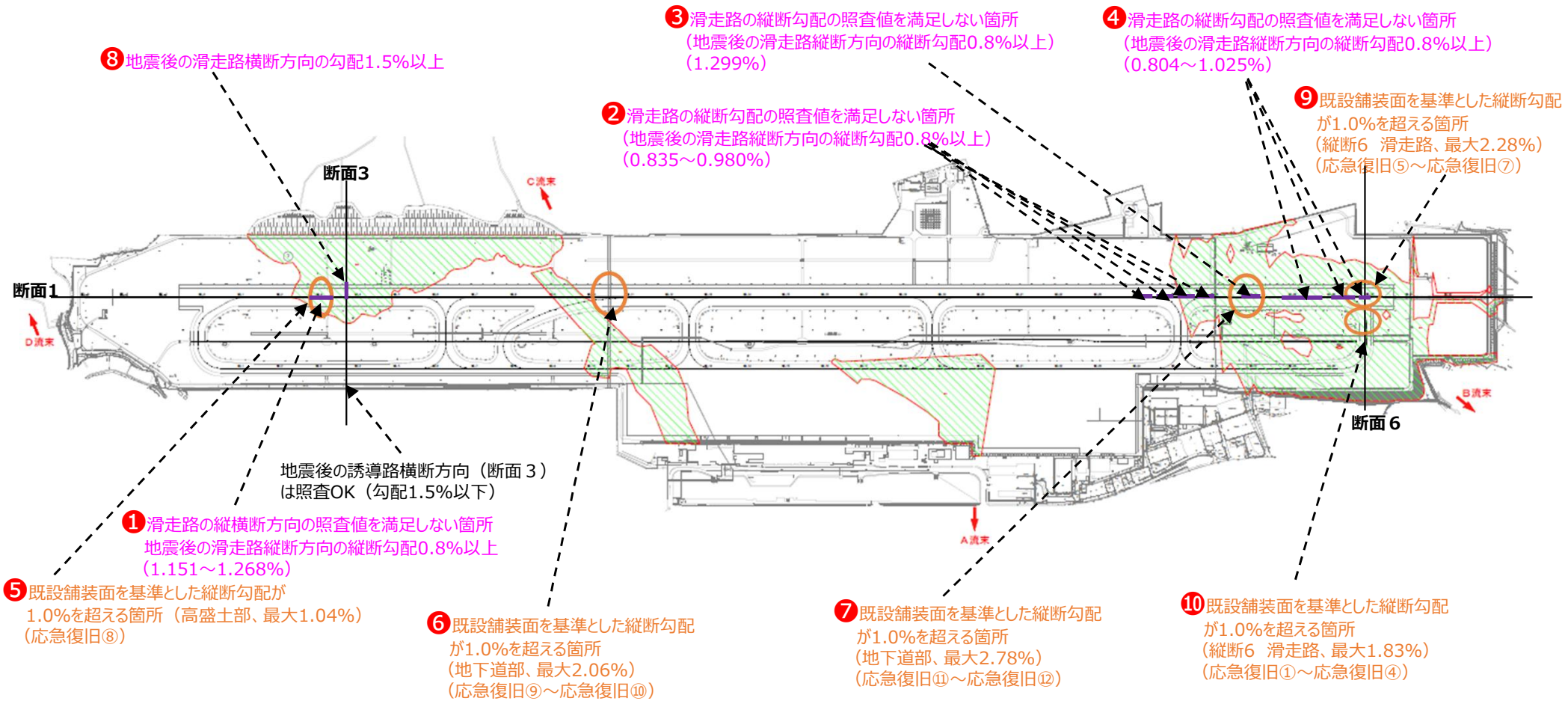
鹿児島空港　地盤変形解析（断面１）の結果

国土交通省



鹿児島空港　耐震性照査の結果

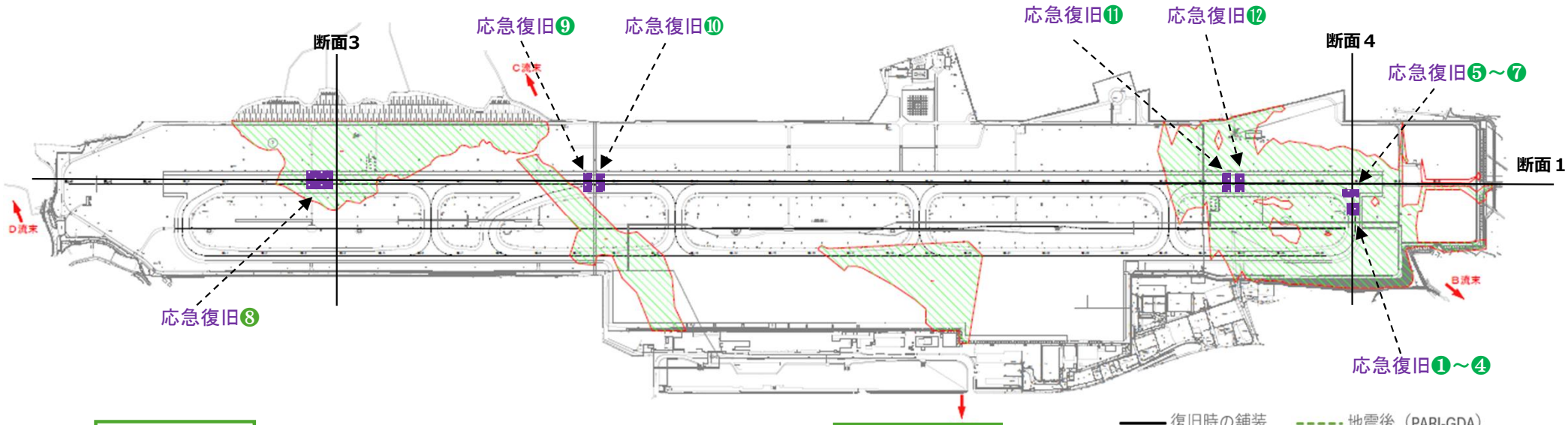
国土交通省

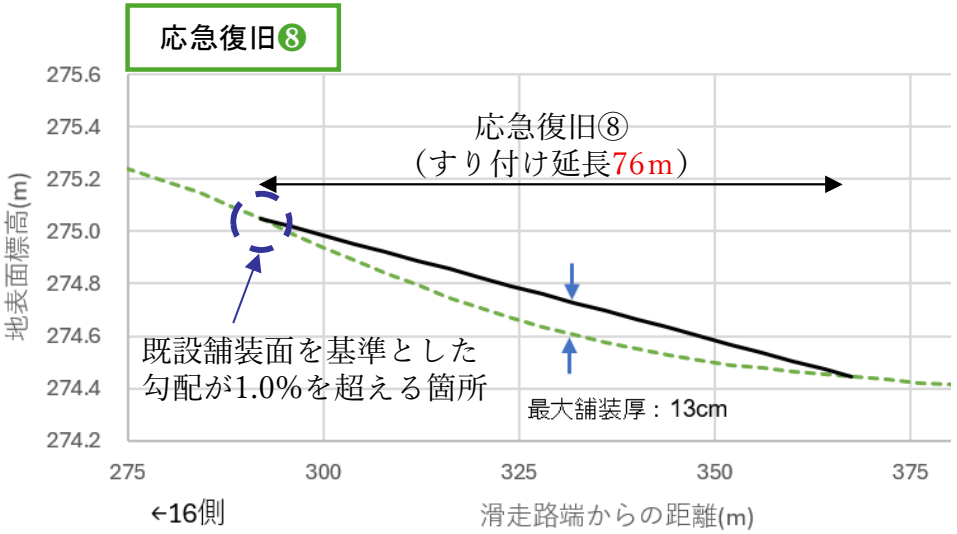


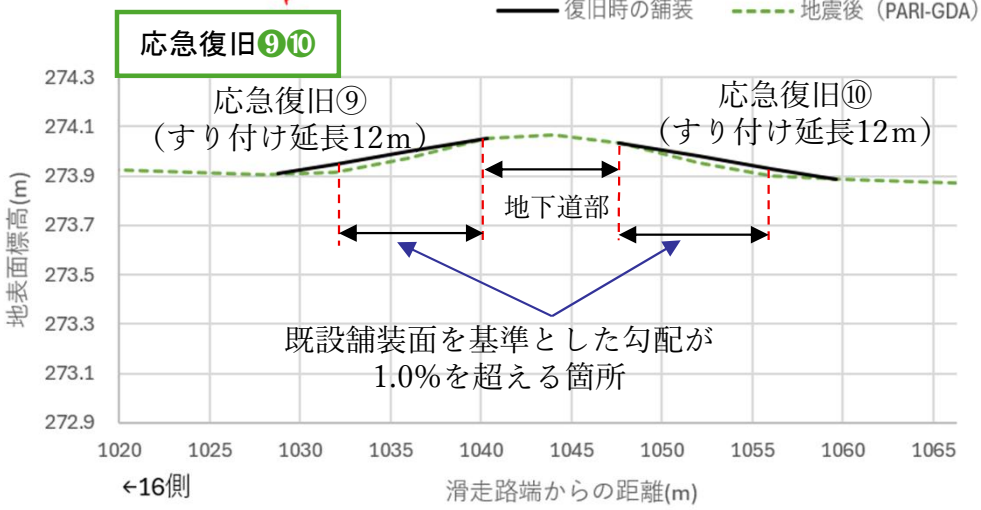
	規定値	応急復旧対策
滑走路	航空法施行規則第79条（滑走路1,800m以上を対象） ・最大縦断勾配 滑走路末端から滑走路の長さの１／４以下の範囲：　0.8%以下 上記範囲以外　：1.25%以下 ・　最大横断勾配：1.5%以下	舗装面のすり付け最大勾配（既設舗装面を基準） ・縦断勾配：1.0% ・横断勾配：1.5%
	制限区域内工事実施指針（既設舗装面を基準とした勾配） ・縦断方向：1.0%以下 ・横断方向：1.5%以下	

鹿児島空港　地盤変状対策(案)　応急復旧(事後対策)

国土交通省







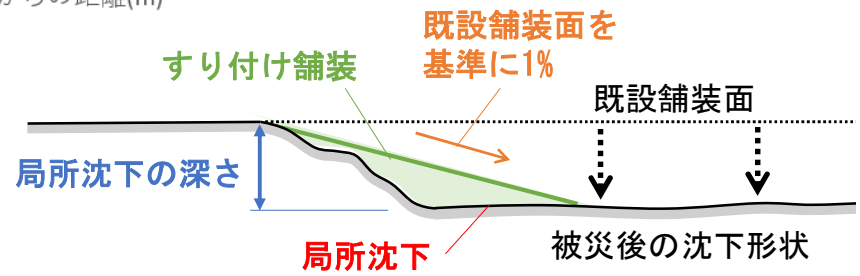
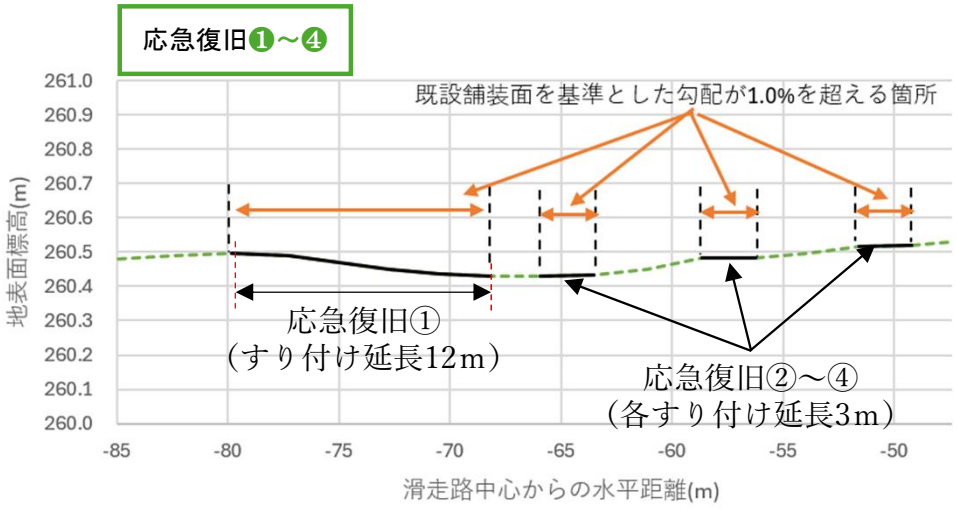
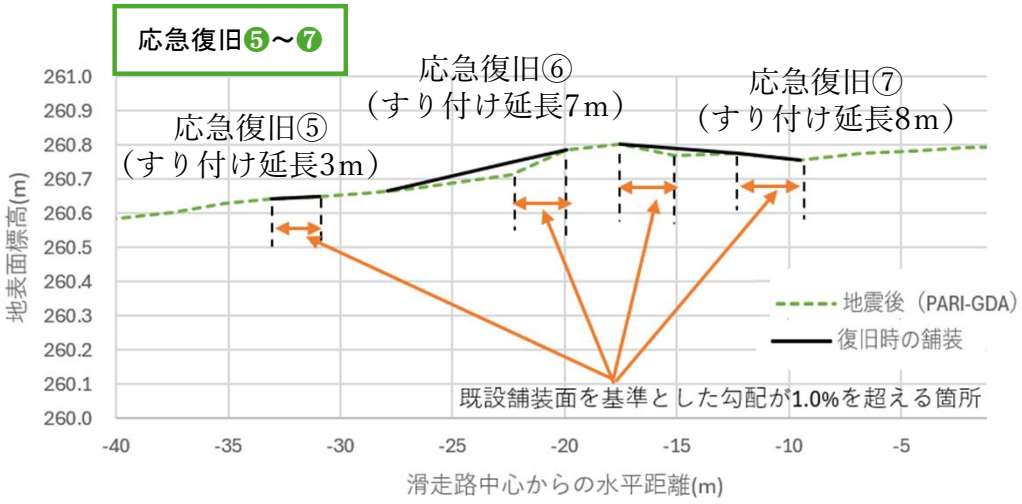


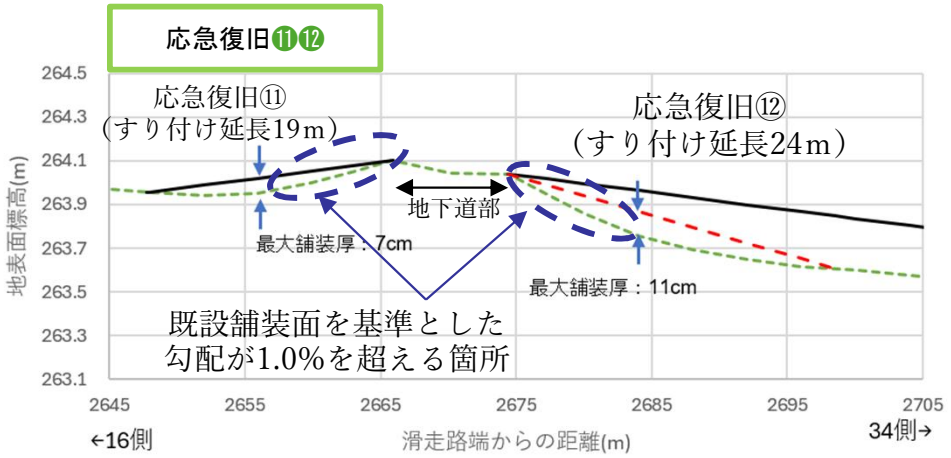
図　すり付け舗装による応急復旧イメージ

鹿児島空港　地盤変状対策（案）応急復旧（事後対策）

国土交通省







※応急復旧⑫を規定勾配0.8%で復旧すると滑走路端までの広範囲が対象（黒実線）になるため、本復旧を前提として、暫定的に工事期間中の許容限度である1.0%（赤破線）で実施することとした。

地震後（PARI-GDA）　復旧時の舗装　復旧時の舗装（縦断勾配1.8%）

鹿児島空港　応急復旧の日数

国土交通省

	応急復旧 ①	応急復旧 ②～⑤	応急復旧 ⑥	応急復旧 ⑦	応急復旧 ⑧	応急復旧 ⑨	応急復旧 ⑩	応急復旧 ⑪	応急復旧 ⑫	計
①すり付け延長（m）	12	3	7	8	76	12	12	19	24	173
②施工幅（m） （解析結果を基に設定）	28.5	28.5	40	40	45	45	45	45	45	
③舗装面積（m^2） （＝①×②）	342	85.5	280	320	3420	540	540	855	1080	7,463
④最大舗装厚（cm） （解析結果を基に設定）	5※	5※	5※	5※	13	5※	5※	7	22	
⑤最小舗装厚（cm） （骨材20mmと設定）	5									
⑥平均舗装厚（cm） （＝（④＋⑤）／２）	5	5	5	5	9	5	5	6	13.5	
⑦舗設量（m^3） （＝③×⑥）	18	5	14	16	308	27	27	52	146	
⑧切削面積（m^2） （＝③／２と仮定）	171	43	140	160	1710	270	270	428	540	
⑨切削日数	0.2日	0.1日	0.1日	0.1日	1.1日	0.2日	0.2日	0.3日	0.4日	2.7日
⑩舗設日数 （標準的な施工能力の場合）	0.2日	0.1日	0.1日	0.2日	2.5日	0.2日	0.2日	0.4日	1.2日	5.1日
⑪切削日数＋舗設日数 （標準的な施工能力の場合）	**0.4日**	**0.2日**	**0.2日**	**0.3日**	**3.6日**	**0.4日**	**0.4日**	**0.7日**	**1.6日**	7.8日

※解析で得られた最大舗装厚<最小舗装厚5cm（骨材20mm）のため、5cmで設定

※昼間（8時間）に1パーティで施工した場合で算出している。

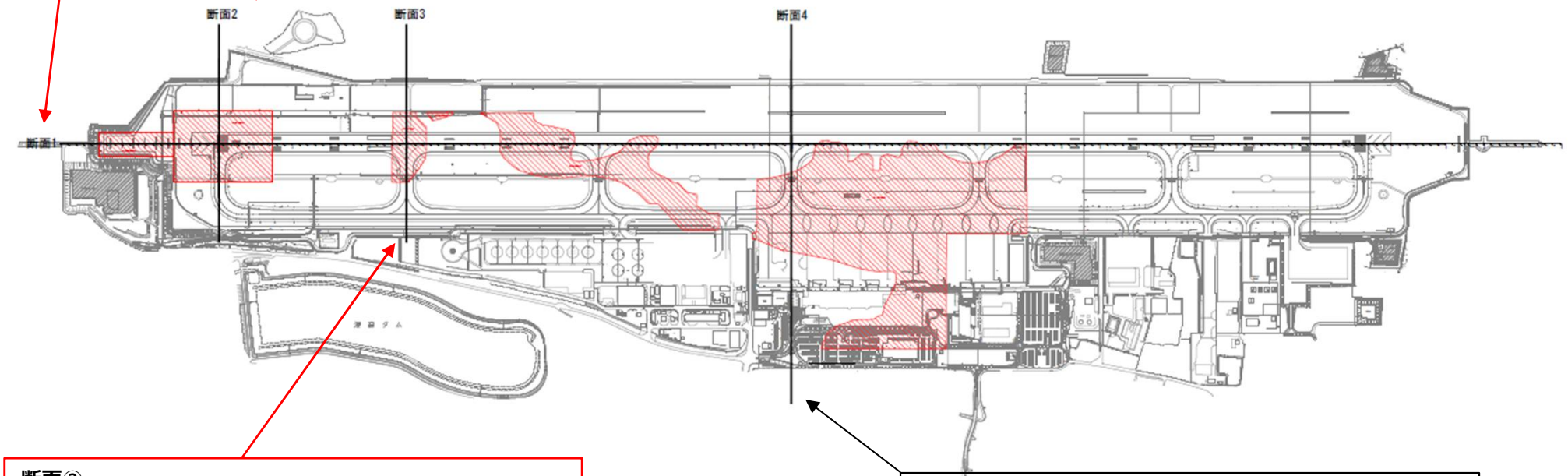
２．熊本空港の地盤変状解析等の結果と対策案

熊本空港　地震応答解析断面の設定

国土交通省

断面①
災害活動エリア（滑走路）を含む断面

断面②
盛土厚（8.0m）が最大と想定される断面



断面③
表面波探査の結果、滑走路端部に切盛境界が確認されている
盛土厚4.4m

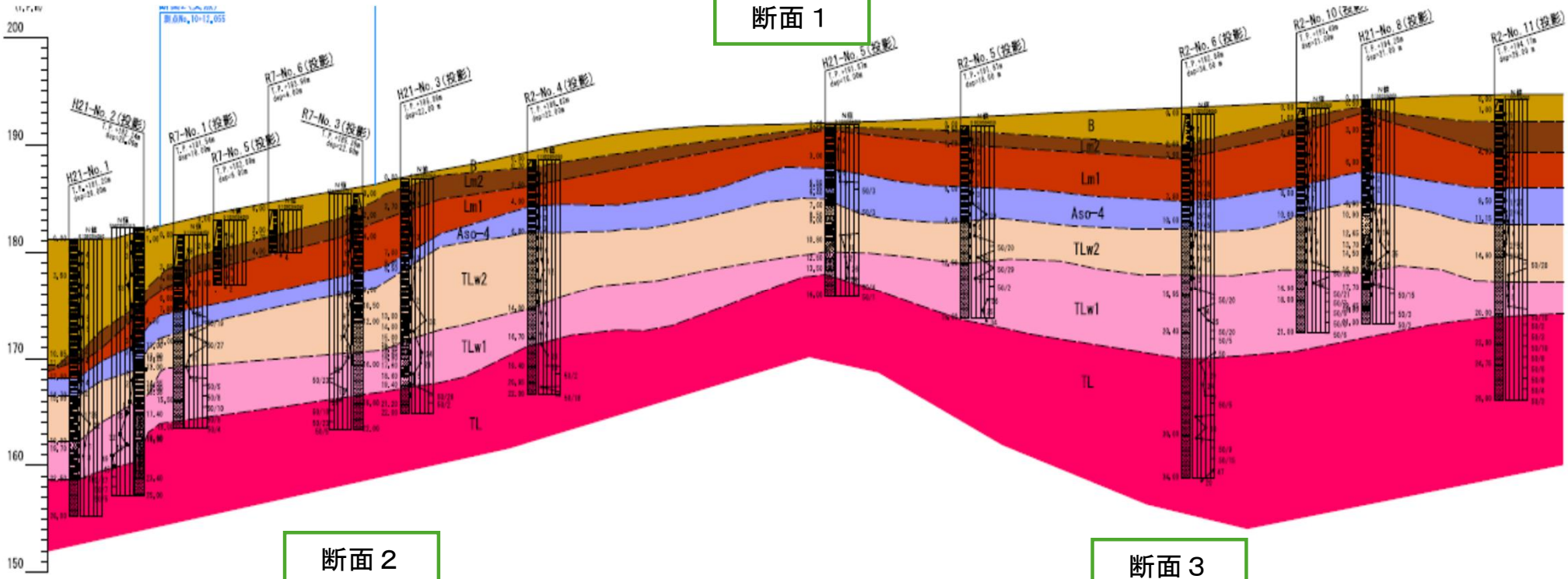
断面④
災害時滑走路エリア（誘導路･エプロン）を含む断面
表面波探査の結果、滑走路端部に切盛境界が確認されている
盛土厚4.4m

採用断面	法線名	選定理由	推定最大盛土厚	推定切盛境界の有無			
				滑走路	誘導路	エプロン部	その他
○	断面①	・災害時活動エリア（滑走路）を含む断面	—	—	—	—	—
○	断面②	・災害時活動エリア（滑走路）の横断方向 ・盛土厚が最大と想定される断面	8.0m	×	×	—	—
○	断面③	・災害時活動エリア（滑走路）の横断方向 ・表面波探査の結果、滑走路端部に切盛境界が存在すると推定される断面	4.4m	○	×	—	—
×	断面④	・災害時活動エリア（誘導路、エプロン）を含む断面	1.7m	○	×	×	エプロンより南側に切り盛り境界が存在すると推測される

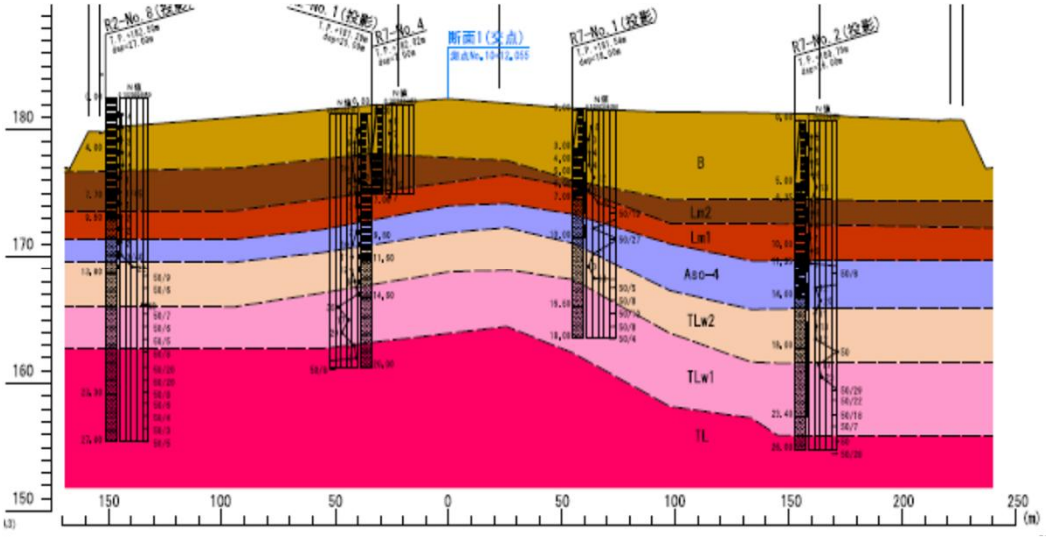
熊本空港　解析断面の土層

国土交通省

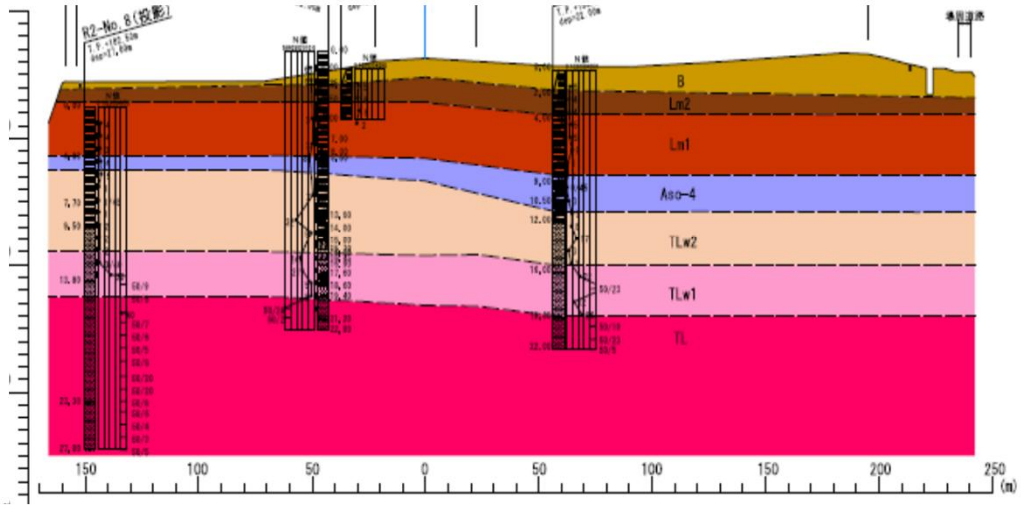
断面１



断面２

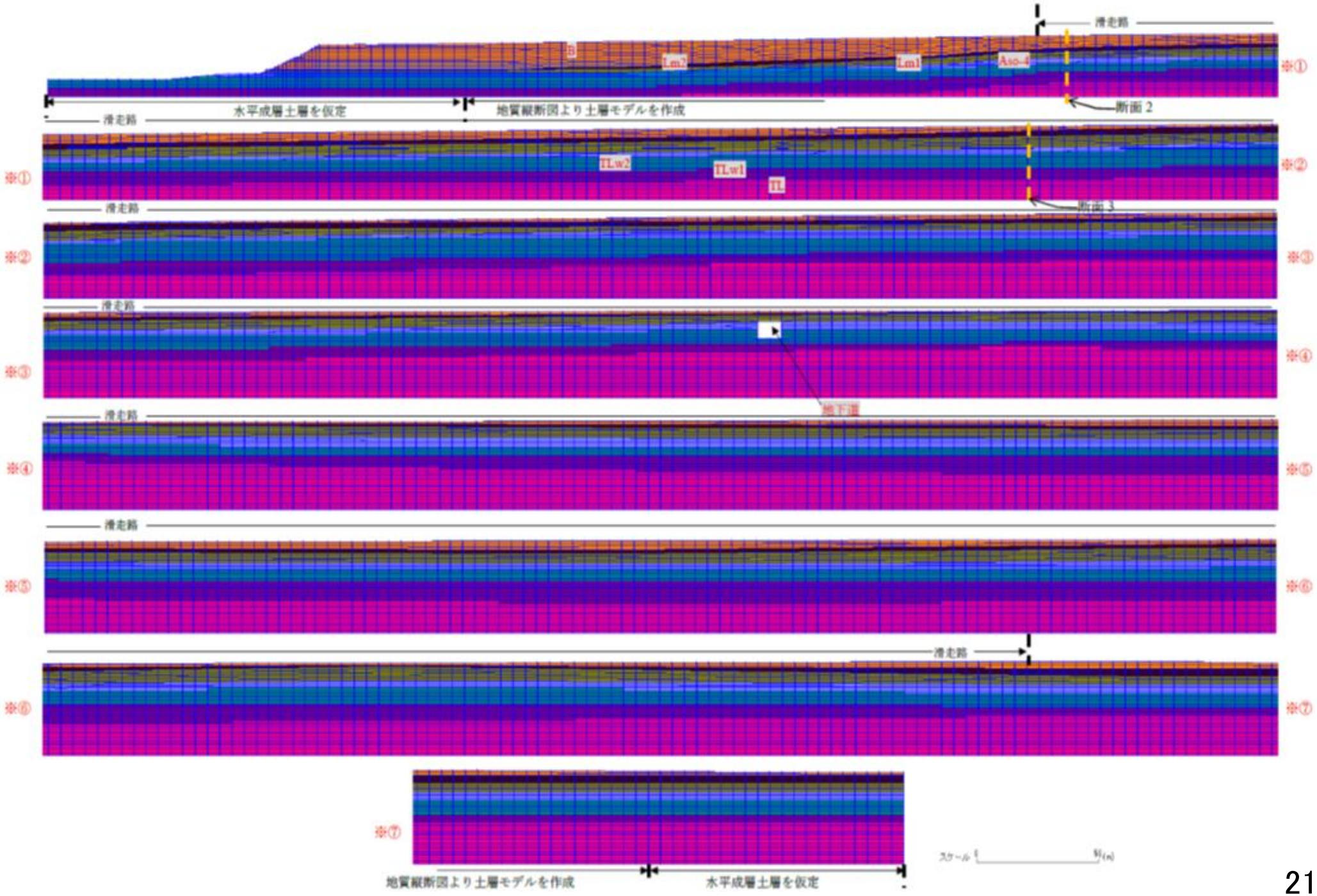


断面３



熊本空港　地震応答解析（断面１）の解析モデル

国土交通省



熊本空港　地震応答解析（断面１）の結果

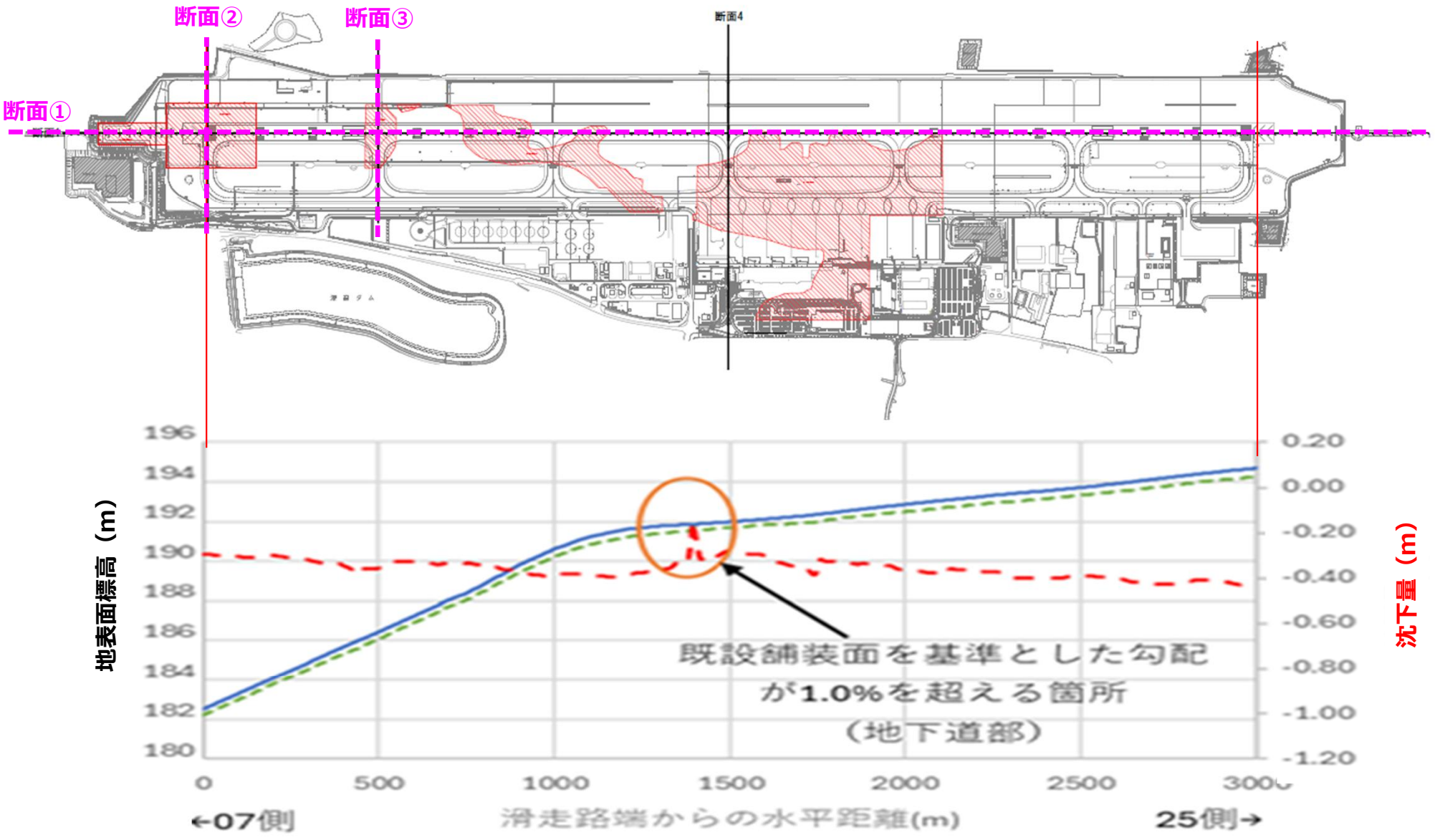
国土交通省

地震応答解析(FLIP)解析結果(最大せん断ひずみの最大分布図)



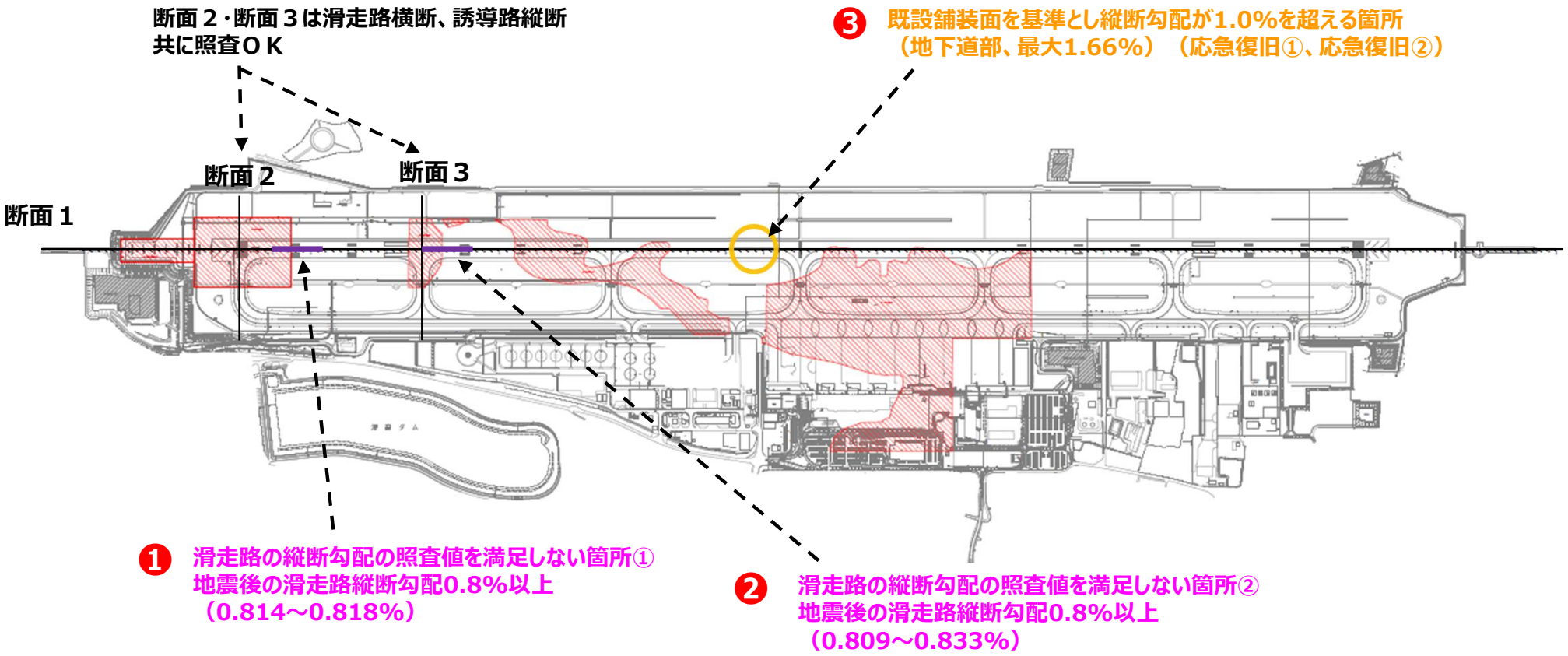
熊本空港　地盤変形解析（断面１）の結果

国土交通省



熊本空港　耐震性照査の結果

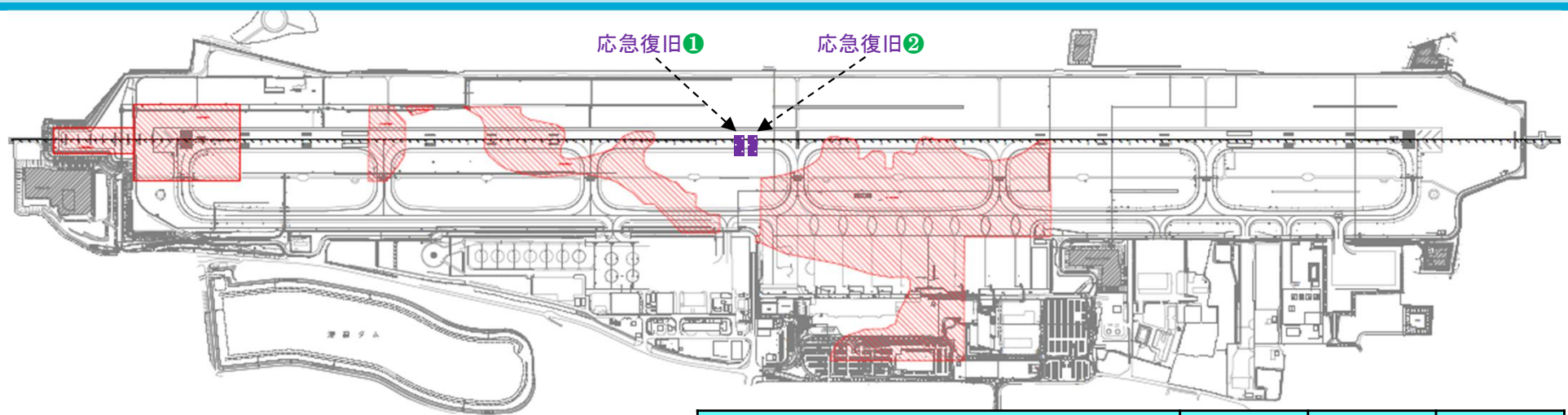
国土交通省

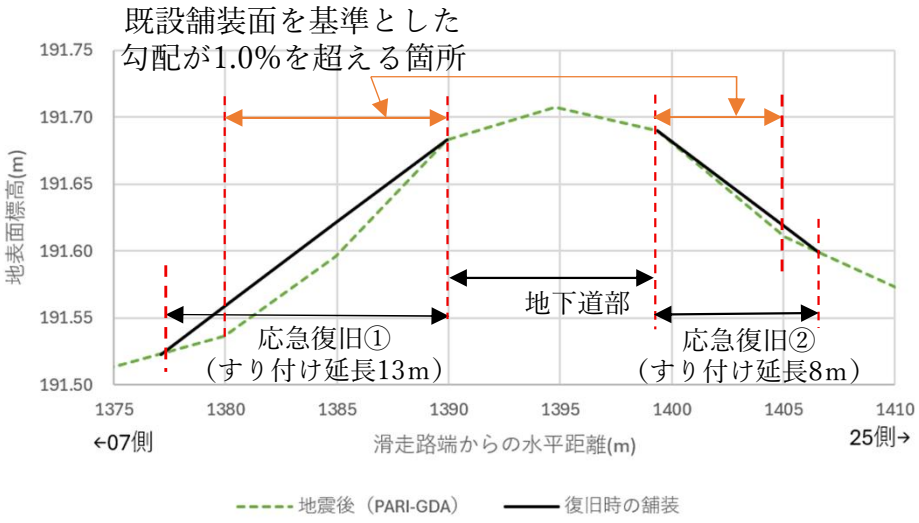


	規定値	応急復旧対策
滑走路	航空法施行規則第79条（滑走路1,800m以上を対象） ・最大縦断勾配 滑走路末端から滑走路の長さの１／４以下の範囲：　0.8%以下 上記範囲以外　：1.25%以下 ・　最大横断勾配：1.5%以下	舗装面のすり付け最大勾配（既設舗装面を基準） ・縦断勾配：1.0% ・横断勾配：1.5%
	制限区域内工事実施指針（既設舗装面を基準とした勾配） ・縦断方向：1.0%以下 ・横断方向：1.5%以下	

熊本空港　地盤変状対策（案）　応急復旧（事後対策）

国土交通省





	応急復旧①	応急復旧②	計
①すり付け延長（m）	13	8	21
②施工幅（m） （解析結果を基に設定）	45	45	
③舗装面積（m^2） （＝①×②）	585	360	900
④最大舗装厚（cm） （解析結果を基に設定）	5※	5※	
⑤最小舗装厚（cm）	5	5	
⑥平均舗装厚（cm） （＝（④+⑤）／２）	5	5	
⑦舗設量（m^3） （＝③×⑥）	30	18	
⑧切削面積（m^2） （＝③／２と仮定）	293	180	
⑨切削日数	0.2日	0.1日	0.3日
⑩舗設日数 （標準的な施工能力の場合）	0.3日	0.2日	0.5日
⑪切削日数＋舗設日数 （標準的な施工能力の場合）	**0.5日**	**0.3日**	0.8日

※昼間（8時間）に1パーティで施工した場合で算出している。

地盤変状対策範囲の妥当性と今後の対応

応急復旧（事後対策）範囲の設定について

国土交通省

現状の課題

地盤変状対策の検討フローでは、地盤変状対策方針の決定にあたり応急復旧の目標日数を設定し、算定された応急復旧日数との比較により、地盤改良等による事前対策の必要性を判断することとしているが、応急復旧目標日数の設定に関する具体的な考え方を整理する必要がある。

復旧目標日数の設定案

復旧目標日数は、「A2－BCP」ガイドラインに示されている「72 時間以内に民間航空機の運航が可能となる状態まで滑走路等の空港施設を復旧させることを標準的な目安とするが、空港毎の状況に応じて実現可能な目標を設定」を参考とし、暫定目標日数として3日（応急復旧の施工期間）として設定する。

解析結果に基づく応急復旧日数

鹿児島空港及び熊本空港の応急復旧日数は、それぞれ以下のとおり算定された。

・熊本空港　　応急復旧日数　0.8日　＜　3日　⇒　応急復旧のみとすることができる。
・鹿児島空港　応急復旧日数　7.8日　＞　3日　⇒　応急復旧と事前対策の組み合わせを検討する。

上記について、鹿児島空港の応急復旧日数は、復旧目標日数を大幅に超過しているものではないため、復旧計画の内容を詳細検討し、目標日数以内とすることも可能であると考えられる。

応急復旧の効率的な施工計画検討

被災時における応急復旧において必要な資機材や作業員を重点的に投入できる場合には、標準的な施工能力を前提とした現行の試算よりも短期間での復旧が可能と考えられる。
このような条件における効率的な被災時応急復旧計画（資機材の調達計画、最適復旧ユニットの考え方）を検討し、この計画により算定した復旧日数を基に、事前対策の必要性を判断することが望ましいと考える。

地盤改良（事前対策）範囲の設定について

国土交通省

現状の課題

第14回検討委員会では、空港で適用実績のある耐震対策工法（液状化対策）を提示している。しかし、盛土空港における滑走路等の基本施設では、航空機荷重に対応する強度を求めるため、滑走路下の地盤は軟岩盛土（軟岩や礫混じり土）が用いられている。一方、一般的な液状化対策工法は砂質土、粘性土を対象としていることから、盛土空港への適用が困難となる可能性がある。

また、九州地方整備局による地盤変状解析では、地震時の地盤変状（ゆすり込み沈下）が広範囲に及ぶ結果が得られていることから、対策範囲の考え方も整理する必要がある。さらに、地下構造物周辺に発生する勾配逸脱（地下構造物による地盤沈下の抑制が要因と推定）への対策については、局所的な地盤改良工事を実施した場合、類似した現象が改良範囲の境界部に発生する可能性があり、効果的な対策になり得ないことが想像される。このため、対策工の選定やその工法による変状抑制効果に加え、対策範囲外の影響も考慮した効果的な地盤変状対策について検討する必要がある。

対策工法及び範囲の検討

ゆすり込み沈下に対して高い抑制効果が期待できる地盤改良工法について文献調査及び事例調査を実施するとともに、軟岩や礫混じり土からなる地盤に対しても適用可能な工法について整理を行う。

その上で、各工法の施工性、経済性、対策効果等を踏まえ、盛土空港における地盤変状対策への適用性について検討を行う。また、広範囲に発生する地盤変状や地下構造物周辺の変状特性（改良範囲境界部の変状発生リスク）を踏まえ、対策範囲の考え方について整理し、効果的な事前対策について検討する。

全体の検討状況と今後のスケジュール

国土交通省

次回検討委員会での検討事項

応急復旧（事後対策）範囲の設定

応急復旧の効率的な施工計画を検討するため、復旧作業における復旧ユニットの考え方、投入する建設機械の台数や資機材調達方法の前提条件を整理し、応急復旧日数の算定に用いる復旧能力の妥当性について検討（予定）

地盤改良（事前対策）範囲の設定

ゆすり込み沈下に対して高い抑制効果が期待できる地盤改良工法について、文献調査及び事例調査の結果を報告し、軟岩・礫混じり土からなる地盤への適用性や、盛土空港における地盤変状対策としての有効性について検討（予定）

解析プログラム（PARI-GDA）の改良・検証

能登空港の地盤データを用いた再現解析を実施し、解析結果の再現性等について報告（予定）

地盤変状対策の検討スケジュール

