

空港土木施設設計要領
(耐震設計編)

平成31年4月

国土交通省航空局

序

背景

空港土木に関する技術基準は、昭和43年9月に「空港土木施設設計施工基準作成委員会」を設置して検討を開始し、「空港アスファルト舗装構造設計要領」及び「空港コンクリート舗装構造設計要領」を作成した後、昭和48年3月に最初の「空港土木施設設計基準」をとりまとめ、その後、航空輸送需要の増大などの航空界の発展に伴う空港を取りまく情勢の変化を踏まえ、昭和56年3月に「空港土木に関する技術問題協議会」及びその下部機関の「空港土木技術基準等整備委員会」を設置して技術基準の整備体系の強化を図り、昭和57年10月に「空港土木施設設計基準」を全面的に見直し、昭和59年10月には「空港舗装補修要領（案）」を、昭和60年8月には「空港排水施設・地下道・共同溝設計要領」を作成し、その後も、新型航空機の導入や国際民間航空条約第14付属書の改正に呼応して、平成11年4月に「空港舗装構造設計要領」を作成し、適時「空港土木施設設計基準」等の一部改訂を実施している。

平成20年3月、WTO（世界貿易機構）における「政府調達協定」や、TBT協定（貿易の技術的障害に関する協定）などを背景とした国際規格との整合を図りつつ、「土木・建築にかかる設計の基本」に基づく性能設計に沿った設計手法（性能規定）を導入するため、外部有識者で構成する「空港土木施設の設計手法検討委員会」を設置し、平成20年6月に、空港土木施設の要求性能を示す基準（航空法施行規則第79条）と性能の照査に必要な事項を定めた告示（国土交通省告示第800号）を定め、これまでの「空港土木施設設計基準」を、基準（航空法施行規則第79条）の解説書と位置付けて「空港土木施設の設置基準解説」に改め、性能の照査の方法の例などを示す「空港舗装設計要領」、「空港土木施設構造設計要領」及び「空港土木施設耐震設計要領」をとりまとめ、抜本的な技術基準の体系の見直しを図っている。

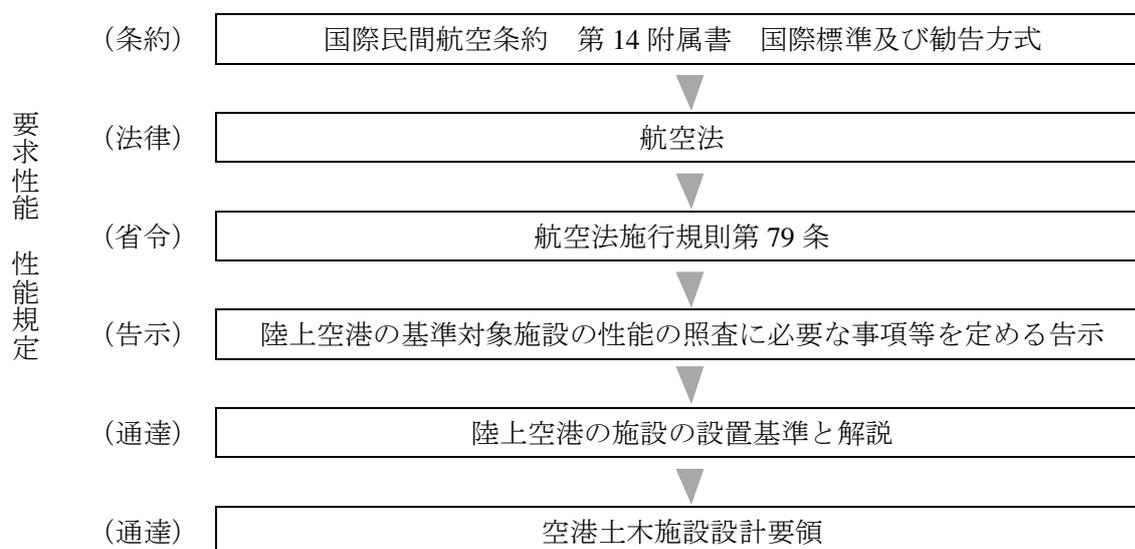
基準（航空法施行規則第79条）の解説書の「空港土木施設の設置基準解説」は、空港土木施設の設計に際して各施設が具備すべき位置、形状、強度等を決定するための事項を示すとともに設計の合理化並びに効率化を図ることを目的として定めたものであるが、近年、国際民間航空機関（ICAO）では、ICAO USOAP（国際航空安全監視監査プログラム）等を導入して、さらなる航空の安全の確保や規制の強化に取り組んでおり、このような国際的な動向を踏まえ、航空機の航行の安全の確保ために最低限遵守しなければならない事項をより明確に示すことを目的として、平成31年3月に規制の内容に特化した基準（航空法施行規則第79条）の解説書となる「陸上空港の施設の設置基準と解説（以下「基準解説」という。）」が策定された。

「基準解説」の策定に伴い、これまで設計の合理化並びに効率化を図ることを目的として作成した「空港土木施設の設置基準解説」は、「基準解説」の規定や、計画・設計上の留意事項等を示す「空港土木施設設計要領（施設設計編）」に改め、また、施設に求められる性能の照査方法の例などを示す「空港舗装設計要領・空港舗装補修要領」、「空港土木施設構造設計要領」及び「空港土木施設耐震設計要領」は、「空港土木施設設計要領（舗装設計編）」、「空港土木施設設計要領（構造設計編）」及び「空港土木施設設計要領（耐震設計編）」に改め、全4編で構成する「空港土木施設設計要領（以下「設計要領」という。）」を定めて、基準と要領の明確化を図ることとした。

基準体系

わが国の空港土木に関する基準は、下図に示すとおり、国際民間航空条約の規定並びに同条約の附属書として採択された国際標準及び勧告方式に準拠して定めた航空法、陸上空港等の設置の基準を規定する航空法施行規則第79条、陸上空港の基準対象施設の性能の照査に必要な事項等を定める告示、「基準解説」により構成している。

「設計要領」は、「基準解説」の下部に位置付けられているが、その内容は、空港土木施設の計画・設計の合理化並びに効率化を図ることを目的とし、これまでの実績を踏まえた標準的な考え方や推奨する方法、施設に求められる性能の照査方法の例などを示すものであって、計画・設計の方法等を拘束するものではない。



要領の構成

「設計要領」は、次の4編により構成する。

施設設計編：「基準解説」の規定（施設の要求性能、性能規定）、計画・設計上の留意事項等

舗装設計編：舗装の設計方法、性能照査の方法の例等

構造設計編：構造物の設計方法、性能照査の方法の例等

耐震設計編：空港の施設等の耐震設計方法等

施設設計編は、「基準解説」の規定を明記した上で、計画・設計上の留意事項等を併記する構成を基本とし、実線枠囲いに【基準】を、その下に【解説】と【要領】を示している。なお、「基準解説」に規定されていない施設については、「設計要領」のみの記載となるが、この場合の実線枠囲いには、設計上の原則や基本的な事項を示している。また、舗装設計編、構造設計編及び耐震設計編については、実線枠囲いに設計上の原則や基本的な事項を示し、枠囲いの下に、細部の手法や考え方を示している。

字句の意味

「設計要領」で用いる字句の意味は、下表に示すとおりとする。

分類	適用上の位置づけ	末尾に置く字句の例
必須	技術的に明確であり遵守すべき事項	～とする（こと）。 ～である（こと）。
考え方	目的や概念、考え方を記述した事項	～としている。 ～必要がある。
標準	条件によって一律に規制することはできないが、特段の事情がない限り記述に従い実施すべき事項	～を標準とする。 ～による。
推奨	条件によって実施することがよい事項	～望ましい。 ～することができる。 ～としてもよい。
例示	<ul style="list-style-type: none">・適用範囲や実施効果について確定している段階ではないが、条件等によっては導入することが可能な技術等の例示・条件等によって限定的に実施できる技術等の例示・具体的に例示することにより、技術的な理解を助ける事項	～場合がある。 ～に示している。 例えば～。

目次

第1章 総則	
1.1 目的	1
1.2 適用範囲	1
1.3 用語	1
第2章 耐震設計の基本	
2.1 総説	2
2.2 輸送形態に応じた空港土木施設の耐震性能	3
2.3 空港土木施設の耐震性能	3
第3章 耐震性能の照査方法	
3.1 総説	7
3.2 設計限界値	8
3.3 地震動	14
3.3.1 レベル一地震動	14
3.3.2 レベル二地震動	14
3.4 液状化の予測・判定	15
3.5 土圧	15
3.6 設計応答値	16
第4章 液状化対策	
4.1 総説	17
4.2 対策範囲	17
4.3 対策レベル	17
4.4 液状化対策の照査	18
参考文献	19

付録

付録-1	地盤の地震応答解析法の種類と概要	付-1
付録-2	構造物の耐震解析法の種類と概要	付-6
付録-3	二次元地盤の等価線形解析と 舗装構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法	付-14
付録-4	空港で利用される可能性の高い液状化対策工法の概要	付-17
付録-5	液状化対策工法の選定・照査	付-24
付録-6	二次元地盤の有効応力解析と 橋梁構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法の例	付-30
付録-7	空港舗装直下地盤への格子状地盤改良の適用	付-34

第1章 総則

1.1 目的

耐震設計編は、空港土木施設の設計を行うにあたって、空港全体の総合的な耐震性を確保するために、空港を構成する各施設の標準的な耐震設計の手順を体系的に示し、設計の合理化並びに効率化を図ることを目的としている。

- (1) 空港がその機能を発揮するためには、空港を構成する各施設が十分機能することが必要であり、空港に求められる機能（地震災害時においても確保すべき輸送機能）に応じて、各施設の耐震性能が定められることとなる。耐震設計編では、空港に求められる機能に応じた各施設の耐震性能の考え方を示すとともに、各施設の耐震性能の照査に係る基本的な考え方を示している。

1.2 適用範囲

耐震設計編は、空港土木施設設計要領（施設設計編）¹⁹⁾（以下「施設設計編」という。）を適用する施設を対象としている。

- (1) 耐震設計編は、「施設設計編」¹⁹⁾を適用する施設を対象としているが、地震動を含め、様々な作用が複合的に働く場合については、耐震設計編以外の視点も含めて検討が必要なことから、総合的な性能及びその照査の基本的な考え方は、「施設設計編」¹⁹⁾、「空港土木施設設計要領（構造設計編）」²⁾（以下「構造設計編」という。）を参照することができる。

1.3 用語

耐震設計編における主な用語の意味は以下のとおりである。

- ・ 液状化 : 飽和した砂質地盤において、地震動により間隙水圧が急激に上昇し、地盤のせん断強度が著しく低下する現象をいう。
- ・ 応答変位法 : 地震時の表層地盤のせん断変形の影響を考慮して地中施設等の変位量や断面力を計算する方法をいう。
- ・ 動的解析法 : 地震時における構造物及び地盤の挙動を動力的に解析して部材の応力・ひずみ等の応答値を算定する方法をいう。
- ・ 設計供用期間 : 施設の設計にあたって、当該施設の要求性能を満足し続けるものとして設定される期間をいう。
- ・ レベル一地震動 : 空港において発生するものと想定される地震動のうち、地震動の再現期間と当該施設の設計供用期間との関係から当該施設の設計供用期間中に発生する可能性の高いものをいう。
- ・ レベル二地震動 : 空港において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するものをいう。
- ・ 震源特性 : 震源断層の破壊過程が地震動に与える影響をいう。
- ・ 伝播経路特性 : 震源から当該地点の地震基盤に至る伝播経路が地震動に与える影

響をいう。

- ・ サイト特性 : 地震基盤上の堆積層等が地震動に与える影響をいう。

第2章 耐震設計の基本

2.1 総説

空港土木施設の設計にあたっては、空港に求められる機能に応じた耐震性能を確保するとともに、この機能に拘わらず、レベル一地震動、レベル二地震動それぞれに対し、以下の基本的な耐震性能を有するものとする。

- (1) レベル一地震動に対して、航空機の運航に必要な機能に影響を与えないこと。
- (2) レベル二地震動に対して、人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を与えないこと。

- (1) 空港の主な機能としては、公共交通機関として果たす本来の機能の他、大規模地震発生時における緊急物資・人員等の輸送や救急・救命活動の拠点としての機能がある。地震災害時においてどの程度の輸送機能を確保すべきかは、航空ネットワークにおける役割、背後圏経済活動における役割及び緊急物資輸送形態等を踏まえて総合的に検討する必要がある。
- (2) 空港土木施設は、レベル一地震動による損傷等が当該施設の機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさない使用性を確保するものとする。
- (3) 空港土木施設は、基本施設の被災に伴い空港の運用を停止する場合や、施設上に滑走路等の基本施設が存在する場合には、当該施設の被災が滑走路等の施設にも影響を与え、緊急救命活動や緊急物資等輸送の拠点としての役割が損なわれ、周辺地域の人命や財産の損失に重大な影響を及ぼす可能性がある。また、当該空港が航空ネットワークや背後圏経済活動において重要な役割を果たしている場合には、当該施設の被災に伴う空港の運用停止により、緊急救命活動や緊急物資等輸送の拠点としての役割が損なわれるだけでなく、社会経済活動に重大な影響を及ぼす可能性があることから、レベル二地震動に対しても小規模な修復による施設機能の迅速な回復が求められる。なお、地下道及び橋梁等、人、車両が通行する施設は、被災により構造の安定性が損なわれた場合に、人命に重大な影響を及ぼす可能性があることから、レベル二地震動に対しても構造の安定性を確保するものとする。この他、空港の施設でレベル一地震動のみの性能を示している施設であっても、高盛土で構成される盛土地盤のように、被災による修復が長期間にわたる可能性がある、又は高盛土の崩壊によって空港周辺の民家等に重大な被害が及ぶ可能性がある等、当該施設の被災によって、その影響が長期又は広範に及ぶ可能性がある場合においては、レベル二地震動等に対する安全性についても確保するものとする。
- (4) 空港の施設において、その基礎となる地盤及び地下構造物は、空港の施設に求められる機能を損なわない性能を有する必要がある。
- (5) 空港土木施設は、地震動以外にも様々な作用が複合的に働く場合があり、この場合には、耐震性能を含めた総合的な性能を適切に設定する必要がある。
- (6) 耐震設計編は、「施設設計編」¹⁹⁾を適用する施設の耐震性能の考え方を示しているため、空港機器関係の耐震性能の考え方を示すものではない。ただし、空港機器関係（管制機器

等)が設置されている基礎等の土木施設は、空港機器関係の機能確保の観点から、耐震設計編で示す以上の耐震性能が求められる場合もある。

2.2 輸送形態に応じた空港土木施設の耐震性能

空港土木施設の設計にあたっては、空港を構成する各施設が、地震発生後の想定される輸送形態に対応できる耐震性能を有するものとする。

- (1) 空港土木施設は、施設自体の損傷が人命に直接影響を及ぼすものと、施設の損傷により、航空機が運航できずに人命、財産又は社会的活動に影響を与えるものがある。このため、人命に直接影響を及ぼす施設は、それに応じた耐震性能が必要であり、それ以外の施設については地震発生直後(地震発生後3日間程度)において確保すべき輸送機能に応じて耐震性能が必要である。
- (2) 地震発生後において確保すべき輸送機能によって、固定翼機による旅客輸送、緊急物資輸送、回転翼機による緊急物資輸送等の輸送形態が想定される。空港土木施設は、これら輸送形態に応じて、所要の耐震性能を満たすことが必要となるが、一般に、緊急物資輸送に比べ旅客輸送の方が、高い耐震性能が必要となる他、これら輸送形態をどの程度確保する必要があるかに留意する必要がある。なお、大量の緊急輸送を行える緊急輸送機等は、一般に民間航空機より短い滑走路長で離着陸できるものの、地理的条件や輸送形態等を踏まえて検討する必要がある。

2.3 空港土木施設の耐震性能

空港土木施設の設計にあたっては、地震発生後に空港に求められる基本的な耐震性能及び輸送機能に応じた耐震性能を踏まえ、地震規模及び施設に応じて求められる性能を設定するものとする。また、これら性能の評価項目は、地震規模や施設の構造特性に応じて適切に設定するものとする。

- (1) 空港の施設は、レベル一地震動に対して、機能を損なわず、継続して使用することが必要である。また、レベル二地震動に対しては、被災により人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を及ぼす可能性のある施設について、修復性を確保することが必要である。
- (2) その他の施設については、レベル一地震動に対して、機能を損なわず、継続して使用することが必要である。また、空港全体の総合的な耐震性能を確保するために、レベル二地震動に対しても技術的に可能でかつ経済的に妥当な範囲で継続的な使用を可能とする性能、いわゆる修復性が求められる場合には、各施設の構造等について十分な強度を有する必要がある。
- (3) 空港土木施設の耐震性能の評価項目は、「陸上空港の施設の設置基準と解説」¹⁾(以下「基準解説」という。),「施設設計編」¹⁹⁾,「構造設計編」²⁾に準じて適切に設定するものとするが、一般的には表-2.1に示すとおりである。また、その際、以下の施設はこれに加えて他の基準・指針等も参考とすることができる。

- 1) 滑走路，過走帯，誘導路，エプロン，着陸帯，滑走路端安全区域，誘導路帯の護岸等
「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾
「埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）」⁴⁾
- 2) GSE 通行帯等
橋梁構造の場合
「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」⁵⁾
地下構造物の場合
「トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説」⁶⁾
「コンクリート標準示方書 設計編」⁷⁾
「道路土工 擁壁工指針」⁸⁾
「道路土工 カルバート工指針」⁹⁾
- 3) 道路・駐車場
「駐車場設計・施工指針 同解説」¹⁰⁾
橋梁構造の場合
「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」⁵⁾
地下構造物の場合
「トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説」⁶⁾
「コンクリート標準示方書 設計編」⁷⁾
「道路土工 擁壁工指針」⁸⁾
「道路土工 カルバート工指針」⁹⁾
- 4) 排水施設
「コンクリート標準示方書 設計編」⁷⁾
「下水道施設の耐震対策指針と解説」¹¹⁾
「水道施設耐震工法指針・解説」¹²⁾
「河川砂防技術基準（案）同解説」¹³⁾
- 5) 共同溝
「コンクリート標準示方書 設計編」⁷⁾
「共同溝設計指針」¹⁴⁾
- 6) 進入灯橋梁
「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾
「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」⁵⁾

表-2.1(1) レベラー地震動に対する空港土木施設の耐震性能（評価項目）

施設	評価項目
滑走路	① 地盤の液状化の有無 ② 地盤の変形（勾配・段差）※1 ③ 地盤の支持力※1 ④ ひび割れ発生状況
誘導路	
エプロン	
過走帯	
着陸帯	① 地盤の液状化の有無 ② 地盤の変形（勾配・段差）※1
滑走路端安全区域	
誘導路帯	① 地盤の液状化の有無 ② 地盤の変形（段差）※1
飛行場標識施設	—
GSE 通行帯等	イ) 当該施設が地下構造物の場合, ① 地盤の液状化の有無 ② 構造の損傷 ロ) 当該施設が橋梁構造の場合, ① 構造の損傷
道路・駐車場	
排水施設	イ) 当該施設が地下構造物※2及び調節池の場合, ① 地盤の液状化の有無 ② 構造の損傷
共同溝	① 地盤の液状化の有無 ② 構造の損傷
消防水利施設	
場周柵	① 構造の倒壊
ブラストフェンス	
土構造物・護岸	① 地盤の液状化の有無 ② 護岸, 高盛土を含む場合, 地盤の変位
進入灯橋梁	① 構造の損傷

※1 ①の評価の結果, 液状化が想定される場合, 及び護岸, 高盛土を含む場合の評価項目

※2 排水施設の地下構造物: 暗渠 (ボックスカルバート・剛性管・とう性管), 接続部 (マンホール)

表-2.1(2) レベルニ地震動に対する空港土木施設の耐震性能（評価項目）

施設	大規模地震発生後に必要とされる輸送形態		
	固定翼機による 旅客輸送	固定翼機による 緊急物資輸送	回転翼機による 緊急物資輸送
滑走路	① 地盤の液状化の有無 ② 地盤の変形（勾配・段差）※ ¹ ③ 地盤の支持力※ ¹ ④ ひび割れ発生状況		①（護岸，高盛土を含む場合）地盤の変形
誘導路			
エプロン			① 地盤の液状化の有無 ② 地盤の変形（勾配・段差）※ ¹ ③ 地盤の支持力※ ¹
過走帯	—		
着陸帯			
滑走路端安全区域			
誘導路帯			
飛行場標識施設			
GSE 通行帯等	イ) 当該施設が地下構造物の場合， ① 地盤の液状化の有無 ② 構造の損傷		
道路・駐車場	ロ) 当該施設が橋梁構造の場合， ① 構造の損傷・変位		
排水施設	イ) 当該施設が地下構造物※ ² 及び調節池の場合， ① 地盤の液状化の有無 ② 構造の損傷	—	
共同溝	① 地盤の液状化の有無 ② 構造の損傷		
消防水利施設	① 地盤の液状化の有無 ② 構造の損傷	—	
場周柵	—		
ブラストフェンス	① 構造の倒壊		
土構造物・護岸	② 地盤の液状化の有無 ③ 地盤の変位※ ¹		
進入灯橋梁	① 構造の損傷・変位		—

※1 ①の評価の結果，液状化が想定される場合，及び護岸，高盛土を含む場合の評価項目

※2 排水施設の地下構造物：暗渠（ボックスカルバート・剛性管・とう性管），接続部（マンホール）

第3章 耐震性能の照査方法

3.1 総説

空港土木施設の耐震性能の照査は、施設の構造特性に応じた地震応答解析法に基づいて行うものとする。また、液状化について考慮が必要な施設については、適切な方法に基づいて液状化判定を行い、必要に応じてその影響を考慮して設計するものとする。

(1) 耐震性能の照査手順の例を図-3.1に示す。

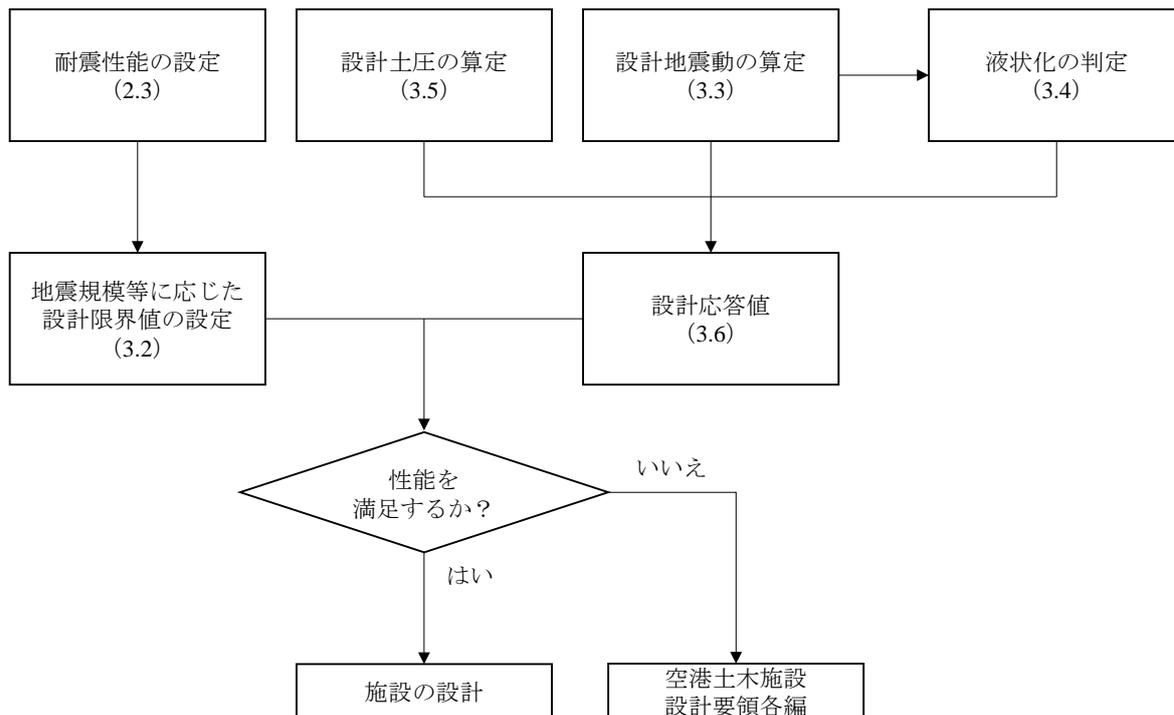


図-3.1 照査手順

(2) 空港土木施設の耐震性能の照査方法のうち、耐震設計編に記述されていない事項については、「基準解説」¹⁾、「施設設計編」¹⁹⁾の他に以下を参考とすることができる。ただし、これらの照査にあたっては、特別な場合を除き航空機等による載荷重を作用として考慮しない。

「構造設計編」²⁾

「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」⁵⁾

「トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説」⁶⁾

「コンクリート標準示方書 設計編」⁷⁾

「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」¹⁵⁾

「共同溝設計指針」¹⁴⁾

「駐車場設計・施工指針 同解説」¹⁰⁾

「道路土工 擁壁工指針」⁸⁾

「道路土工 カルバート工指針」⁹⁾

- 「道路土工 切土工・斜面安定工指針」¹⁶⁾
- 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾
- 「埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）」⁴⁾
- 「下水道施設の耐震対策指針と解説」¹¹⁾
- 「水道施設耐震工法指針・解説」¹²⁾
- 「河川砂防技術基準（案）同解説」¹³⁾

3.2 設計限界値

性能照査に用いる設計限界値は、当該施設の要求性能や地震規模、構造特性に応じて適切に設定するものとする。

- (1) 設計限界値は、当該施設の要求性能に応じて設定する限界状態を具体的な数値として表したものである。一般には、性能照査に用いる設計限界値は**表-3.1～3.4**を参考とすることができる。

表-3.1 レベラー地震動に対する空港の施設の設計限界値の例

施設	設計限界値の例
滑走路	① 地盤が液状化する場合 ^{※1} もしくは護岸・高盛土を含む場合、 a) 地盤の変形 ・航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配 ・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配 ^{※2} までの変形を許容する b) 地盤の支持力 間隙水圧比の経時変化 ② 運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ
誘導路	① 地盤が液状化する場合 ^{※1} もしくは護岸・高盛土を含む場合、 a) 地盤の変形 ・航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配 ・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配 ^{※2} までの変形を許容する b) 地盤の支持力 間隙水圧比の経時変化 ② 運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ
エプロン	① 地盤が液状化する場合 ^{※1} もしくは護岸・高盛土を含む場合、 a) 地盤の変形 ・最大勾配が1%以下 ・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配 ^{※2} までの変形を許容する b) 地盤の支持力 間隙水圧比の経時変化 ② 運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ
過走帯	① 地盤が液状化する場合 ^{※1} もしくは護岸・高盛土を含む場合、 a) 地盤の変形 ・滑走路と同様に航空機が常時使用し、接続する滑走路の強度と同じ強度を有する過走帯は、航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する滑走路の最大縦断勾配及び最大横断勾配 ・航空機が滑走路内で停止できない場合に備え、接続する滑走路の強度より小さい強度の過走帯は、航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する着陸帯の最大縦断勾配及び最大横断勾配 ・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配 ^{※2} までの変形を許容する b) 地盤の支持力 間隙水圧比の経時変化 ② 運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ
着陸帯	① 地盤が液状化する場合 ^{※1} もしくは護岸・高盛土を含む場合、 a) 現地盤面との段差30cm以内、最大勾配1/2以内の変形
滑走路端安全区域	
誘導路帯	① 地盤が液状化する場合 ^{※1} もしくは護岸・高盛土を含む場合、 a) 現地盤面との段差30cm以内の変形
飛行場標識施設	—

※1 地盤が液状化しなければ、レベラー地震動が作用しても、地盤上の舗装に勾配や段差等が発生する可能性は少ないことが、例えば、「1993年釧路沖地震港湾施設被害報告」¹⁷⁾などに示されている。護岸・高盛土を含む場合には、地盤が液状化しない場合においてもa)の照査を行う必要がある。

※2 「制限区域内工事実施指針 IV工事実施要領 1 一般 (3)工事期間中における舗装面のすり付け及び地盤面の処理」に示されている。

※3 通常的设计による場合、液状化が発生しなければ、レベラー地震動が作用しても、設計対象車両が通行不能となる程度の段差は発生する可能性は少ないことが、例えば「1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告」¹⁸⁾に示されている。

注) 表中の勾配は地震後の勾配を意味している。

表-3.2 レベルー地震動に対するその他の施設の設計限界値の例

施設	設計限界値の例
GSE 通行帯等※1	イ) 当該施設が地下構造物の場合, a) 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない b) 損傷を許容しない
道路・駐車場※1	ロ) 当該施設が橋梁の場合, a) 損傷を許容しない
排水施設	イ) 構造物がボックスカルバート, 剛性管, マンホールの場合, a) 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない b) 構造部材の応答が弾性限界内 ロ) 構造物がとう性管の場合, a) 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない b) 構造部材の応答が弾性限界内, たわみ率が許容値内 ハ) 構造物が調節池の場合, a) 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない b) 堤体がすべり破壊を生じない
共同溝	① 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない
消防水利施設	② 構造の損傷を許容しない
場周柵	① 倒壊を許容しない
ブラストフェンス	
土構造物・護岸	① 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない ② 護岸, 高盛土を含む場合は継続的な使用に影響を及ぼす変位を許容しない
進入灯橋梁	① 損傷を許容しない

※1 通常の設計による場合, 液状化が発生しなければ, レベルー地震動が作用しても, 設計対象車両が通行不能となる程度の段差は発生する可能性は少ないことが, 例えば「1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告」¹⁸⁾に示されている。

表-3.3 レベルニ地震動に対する空港の施設の設計限界値の例

施設	大規模地震発生後に必要とされる輸送形態		
	固定翼機による 旅客輸送	固定翼機による 緊急物資輸送	回転翼機による 緊急物資輸送
滑走路	<p>① 地盤が液状化する場合^{※1※2}</p> <p>a) 地盤の変形 旅客輸送に使用する機材の離着陸に必要な滑走路長について、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・航空法施行規則第 79 条第 1 項第 3 号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配 ・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配^{※3}までの変形を許容する <p>b) 地盤の支持力 (過剰間隙水圧の消散による) 必要な地盤の支持力の確保に影響を及ぼさない程度の間隙水圧比の経時変化</p> <p>② 短期間で復旧可能な程度のひび割れ</p>	<p>① 地盤が液状化する場合^{※2}</p> <p>a) 地盤の変形 緊急物資輸送に使用する機材の離着陸に必要な滑走路長について、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・航空法施行規則第 79 条第 1 項第 3 号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配 ・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配^{※3}までの変形を許容する <p>緊急物資輸送に使用する機材の離着陸に必要な滑走路長以外について、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・比較的短期間で復旧可能な程度の変形 <p>b) 地盤の支持力 (過剰間隙水圧の消散による) 必要な地盤の支持力の確保に影響を及ぼさない程度の間隙水圧比の経時変化</p> <p>② 比較的短期間で復旧可能な程度のひび割れ</p>	<p>① 地盤の変形 護岸、高盛土の全体系が崩壊するような変形を許容しない</p>
誘導路	<p>① 地盤が液状化する場合^{※2}</p> <p>a) 地盤の変形</p> <ul style="list-style-type: none"> ・航空法施行規則第 79 条第 1 項第 3 号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配 ・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配^{※3}までの変形を許容する <p>b) 地盤の支持力 (過剰間隙水圧の消散による) 必要な地盤の支持力の確保に影響を及ぼさない程度の間隙水圧比の経時変化</p> <p>② 短期間で復旧可能な程度のひび割れ</p>	<p>① 地盤が液状化する場合^{※2}</p> <p>a) 地盤の変形 緊急物資輸送に使用する必要な誘導路について、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・航空法施行規則第 79 条第 1 項第 3 号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配 ・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配^{※3}までの変形を許容する <p>緊急物資輸送に使用する機材の離着陸に必要な誘導路長以外について、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・比較的短期間で復旧可能な程度の変形 <p>b) 地盤の支持力 (過剰間隙水圧の消散による) 必要な地盤の支持力の確保に影響を及ぼさない程度の間隙水圧比の経時変化</p> <p>② 比較的短期間で復旧可能な程度のひび割れ</p>	

エ プ ロ ン	① 地盤が液状化する場合 ^{※2} a) 地盤の変形 ・最大勾配が1%以下 ・部分的な勾配については、 舗装面のすり付け及び地盤 面の処理の最大勾配 ^{※3} まで の変形を許容する b) 地盤の支持力 (過剰間隙水圧の消散によ る) 必要な地盤の支持力の確 保に影響を及ぼさない程度の 間隙水圧比の経時変化 ② 短期間で復旧可能な程度のひ び割れ	① 地盤が液状化する場合 ^{※2} a) 地盤の変形 輸送機の駐機エリア及び誘導 路へ連絡する経路について、 ・最大勾配が1%以下 ・部分的な勾配については、 舗装面のすり付け及び地盤 面の処理の最大勾配 ^{※3} まで の変形を許容する b) 地盤の支持力 (過剰間隙水圧の消散によ る) 必要な地盤の支持力の確 保に影響を及ぼさない程度の 間隙水圧比の経時変化 ② 比較的短期間で復旧可能な程 度のひび割れ	① 地盤が液状化する場合 ^{※2} a) 地盤の変形 回転翼機の発着スペース及び 駐機エリアについて、 ・最大勾配が1%以下 ・部分的な勾配については、 舗装面のすり付け及び地盤 面の処理の最大勾配 ^{※3} まで の変形を許容する b) 地盤の支持力 (過剰間隙水圧の消散によ る) 必要な地盤の支持力の確 保に影響を及ぼさない程度の 間隙水圧比の経時変化
	過走帯	—	
	着陸帯		
	滑走路端安全区域		
	誘導路帯		
飛行場標識施設			

※1 旅客輸送に使用する機材の離着陸に必要な滑走路長は、通常全長である。しかし、耐震性能を向上する場合にあっては、地震災害時の滑走路運用方法や対策費用を検討し決定することが望ましい場合もある。護岸・高盛土を含む場合には、地盤が液状化しない場合においても a)の照査を行う必要がある。

※2 地盤が液状化しなければ、レベルII地震動が作用しても、地盤上の舗装に勾配や段差等が発生する可能性は少ないことが、例えば、「1993年釧路沖地震港湾施設被害報告」¹⁷⁾などに示されている。

※3 「制限区域内工事实施指針 IV工事实施要領 1 一般 (3)工事期間中における舗装面のすり付け及び地盤面の処理」に示されている。

注) 表中の勾配は地震後の勾配を意味している。

表-3.4 レベル2地震動に対するその他の施設の設計限界値の例

施設	大規模地震発生後に必要とされる輸送形態		
	固定翼機による 旅客輸送	固定翼機による 緊急物資輸送	回転翼機による 緊急物資輸送
GSE 通行帯等	イ) 当該施設が地下構造物の場合, a) 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない b) ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷 ロ) 当該施設が橋梁の場合, a) 速やかに機能を回復できる程度の限定的な損傷		
道路・駐車場	イ) 当該施設が地下構造物の場合, a) 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない b) 人命、財産又は社会的経済活動に重大な影響を及ぼすおそれのある場合には、ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷 c) 上記以外の地下道については、構造の安定に重大な影響を及ぼさない程度の損傷 ロ) 当該施設が橋梁の場合, a) 人命、財産又は社会的経済活動に重大な影響を及ぼすおそれのある場合（B種の橋相当）については、速やかに機能を回復できる程度の限定的な損傷 b) 上記以外の橋梁（A種の橋相当）については、構造の安定に重大な影響を及ぼさない程度の損傷		
排水施設	ボックスカルバート	① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない ② 構造部材の応答が保有断面耐力以下	
	剛性管渠	① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない ② 構造部材の応答が保有断面耐力以下。継手部の変形は、水密性保持が可能な範囲内	
	とう性管渠	① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない ② 構造部材の応答が保有断面耐力以下。継手部の変形は、水密性保持が可能な範囲内	
	マンホール	① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない ② 構造部材の応答が保有断面耐力以下。管渠との接続部の変形は、水密性保持が可能な範囲内	
	調節池	① 地盤の液状化は許容する ② 調節池の機能を速やかに補修できる程度の損傷や変形	
共同溝	① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない ② ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷		
消防水利施設	① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない ② ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷		—
場周柵	—		
ブラストフェンス	イ) ブラストフェンスの倒壊が人命に影響を与える場合, a) 倒壊を許容しない		
土構造物・護岸	① 護岸、高盛土の全体系が崩壊するような変形を許容しない ^{※1}		
進入灯橋梁	イ) 人命、財産に重大な影響を及ぼすおそれのある場合、構造の安定に重大な影響を及ぼさない程度の損傷 ^{※2} ロ) 空港の機能確保が必要で、その機能確保に進入灯が必要な場合、短期間で補修できる程度の損傷 ^{※2}		—

※1 土構造物・護岸のうち、燃料供給施設用地を設置している地盤等、当該用地に整備する施設が特に重要である場合は、地盤の液状化を許容しないことや地盤の変形を短期間で補修できる程度にとどめる必要がある。

※2 イ) 及びロ) の場合、落橋防止システムの設置は有効である。

3.3 地震動

地震動としてレベル一及びレベル二地震動の2段階の地震動を設定するものとする。

- (1) 耐震設計に用いる地震動は、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性などを踏まえて、工学的基盤面における時刻歴波形として適切に設定するものとする。
- (2) 地震の評価方法については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾を参考とすることができる。

3.3.1 レベル一地震動

レベル一地震動は、地震動の実測値をもとに、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮して、確率論的時刻歴波形を適切に設定するものとする。

- (1) 想定地震に対する地震動評価に統計的グリーン (G.Green) 関数法を用いる場合、サイト増幅特性としては、対象空港で得られた地震観測記録から推定されるサイト増幅特性を用いることが望ましい。
- (2) 対象とする空港で地震観測記録が得られていない場合には、まず、近傍（空港から2km以内）の観測点におけるサイト増幅特性を利用できないか検討する必要がある。それが出来ない場合には、対象空港で短期間の地震観測を行い、サイト増幅特性を評価することが望ましい。
- (3) 当該空港において十分な地震観測期間が取れない場合には、周辺の観測点におけるサイト増幅特性から、経験的な関係を利用して対象空港でのサイト増幅特性を推定することができる。ただし、その場合の地震動の評価精度は地震観測に基づく場合と比較して大きく低下することに注意する必要がある。
- (4) 地盤の応答加速度は、適切な地盤モデルを用いた地盤の応答解析により求めることができる。震度法等の静的解析手法を用いて設計応答値を算出する場合、検討に用いる震度は、対象施設の構造形式、基礎地盤の特性、地震規模等を考慮して、適切に設定する必要がある。これらの方法として、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」⁵⁾では、加速度応答スペクトルを重力加速度で除する設計水平震度の算出方法が示されており、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾では、地盤の加速度を重力加速度で除する水平震度の算出方法が示されている。個々の空港土木施設に対する震度について十分な知見が得られていないため、関連する基準等を参考に適切に設定するものとする。

3.3.2 レベル二地震動

レベル二地震動は、地震動の実測値、想定される地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、時刻歴波形を適切に設定するものとする。

- (1) レベル二地震動は、過去の地震に関する情報を総合的に考慮し、以下に示す地震動の中で対象空港に最大級の強さの地震動をもたらす地震を選定するものとする。
 - (a) 過去に大きな地震をもたらした地震の再来
 - (b) 活断層の活動による地震

- (c) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震
 - (d) 中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震
 - (e) 地域防災計画の想定地震
 - (f) M6.5 の直下地震
- (2) レベル二地震動の設定に用いる地震動の実測値は、対象施設の構造形式、基礎地盤の特性等を考慮して、適切に観測機器を設置して観測する必要がある。

3.4 液状化の予測・判定

地盤の液状化の予測及び判定は、一般に以下により行うものとする。

- (1) 地盤が緩く詰まった飽和砂質土等においては、地盤が液状化するか否かの予測及び判定を行うこと。
- (2) 地盤が液状化するか否かの予測及び判定は、粒度と標準貫入試験値又は繰返し三軸試験を用いる等適切な方法によって行うこと。

- (1) 液状化の予測・判定の対象とする土層は地表面（海面下では海底面）から深さ 20m 以浅とすることができる。ただし、20m 以深でもその層で液状化が発生した場合に構造物に重大な損傷が生じると判断される場合や、明らかに上部 20m 以浅の土層と連続する層であると判断される場合には、これらの層も含めて液状化の予測・判定を行うことを標準とする。
- (2) 液状化の予測・判定法には、粒度と N 値による方法と繰返し三軸試験結果を用いる方法の 2 種類がある。粒度と N 値による方法は簡易な方法で一般的に使用できるが、これによる予測・判定が困難な場合、より詳細な方法である繰返し三軸試験結果を用いるのが一般的であり、これら方法については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾及び「埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）」⁴⁾を参考とすることができる。
- (3) レベル一地震動に対する地盤の液状化の検討においては、液状化が生じると予測・判定された場合には、液状化による構造物に及ぼす影響を勘案するとともに、対象施設の周辺状況等を考慮し、必要となる地盤の液状化対策を実施するものとする。
- (4) レベル二地震動に対する地盤の液状化の検討においては、対象施設の周辺の施設の状況等を考慮した総合的な検討に基づき、液状化対策の手法及び実施の必要性について判断するものとする。

3.5 土圧

地震時に考慮すべき土圧は、地盤特性や構造の種類等を考慮して、適切に設定するものとする。

- (1) 地震時に考慮すべき土圧は、地盤特性や構造の種類等に応じた適切な土圧算定式により設定する必要がある。土圧の算定に必要な水平震度の設定は、3.3.1 を参照することができる。
- (2) 護岸等の港湾構造物に対する地震時土圧の算定は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾参考とすることができる。
- (3) 護岸等の港湾構造物に対する見掛けの震度の算定は、「港湾の施設の技術上の基準・同解

説」³⁾を参考とすることができる。

3.6 設計応答値

空港土木施設の地震時の設計応答値は、一般に、施設の構造形式、基礎地盤の特性、地震規模等を考慮して、適切な解析手法を用いて算出するものとする。

- (1) 空港土木施設の耐震解析手法には、主に、地盤又は地中構造物を対象とした動的解析法、及び地盤構造物、地中構造物の相互作用を対象とした応答変位法があり、施設の特性や、想定される状況に応じ、**表-3.5**を参考とすることができる。
- (2) 地盤の耐震解析手法は、せん断ひずみが0.5～1%程度以下と想定される場合には等価線形解析法が、また、地盤が軟弱な場合や地震動レベルが大きく、地盤内のせん断ひずみが1%を超える可能性もあると想定される場合には、非線形有効応力地震応答解析法の適用性があるとされている。地盤の耐震解析法の種類を**付録-1**に示す。
- (3) 構造形式が一般的な橋梁等の耐震解析を行う場合、1自由度系としてモデル化して良いが、高さのある構造物、規模の大きい構造物あるいは複雑な形状を有する構造物等は、多自由度系としてモデル化を行うのが望ましい。構造物の耐震解析法の種類を**付録-2**に示す。また、二次元地盤の等価線形解析と舗装構造の弾性解析を組み合わせた解析法を**付録-3**に示す。

表-3.5 耐震解析手法の例

対象施設	レベル一地震動	レベル二地震動
地盤 (滑走路、誘導路、エプロン、過走帯、着陸帯、滑走路端安全区域、誘導路帯)	<ul style="list-style-type: none"> <通常の地盤> ・等価線形解析法 <軟弱な地盤> ・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法） 	<ul style="list-style-type: none"> ・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法）
一般構造物 (GSE 通行帯、道路・駐車場、排水施設、共同溝、消防水利施設、場周柵、プラストフェンス、進入灯橋梁)	<ul style="list-style-type: none"> ・動的解析法（線形時刻歴応答解析法） ・応答スペクトル法 ・応答変位法 ・震度法^{※1} 	<ul style="list-style-type: none"> <橋梁等・坑土圧構造物> ・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法） ・地震時保有水平耐力法 <基礎構造物・地下構造物> ・応答変位法 ・静的2次元FEM解析法 ・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法）
土構造物 (高盛土、調節池（排水施設） ・護岸)	<ul style="list-style-type: none"> ・震度法^{※1}（円弧すべり解析） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ニューマーク法 ・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法）

※1 地盤が液状化する場合震度法を用いてはならない。

第4章 液状化対策

4.1 総説

液状化対策として地盤改良を行う場合には、基礎地盤の特性、施設の特性、施工性、経済性等を考慮して、適切な方法を選定するものとする。

- (1) 一般的な液状化対策工法としては**表-4.1**のようなものがあるが、空港土木施設の液状化対策は、施設を供用しつつ実施しなければならない場合が多く、空港運用に支障が生じない方法を選定する必要がある。なお、液状化対策の具体的な工法を**付録-4**に示す。

表-4.1 一般的な地盤改良工法

工法	原理	概要
密度増大工法	密度の増大	地盤の密度を増加し、地盤の液状化強度を増大させる
固結工法	固結	地盤改良等により土粒子骨格を安定させることにより、液状化強度を増大させる
置換工法	粒度の改良	地盤を液状化しにくい粒度の材料に置き換え、液状化強度を増大させる
地下水位低下工法	飽和度の低下	地盤の飽和度を低下させて液状化しない地盤とする
密度増大工法 地下水位低下工法	有効応力の増大	せん断応力の初期有効応力に対する比を低下させる
間隙水圧消散工法	間隙水圧の抑制・消散	地震時に発生する過剰間隙水圧を速やかに消散させる
間隙水圧消散工法 せん断変形抑制工法	間隙水圧の遮断	周辺からの間隙水圧の伝播を遮断する
密度増大工法 せん断変形抑制工法	せん断変形の抑制	地震動によって生じるせん断変形を小さくする

4.2 対策範囲

液状化対策範囲は、対象施設の構造形式や地震発生時に求められる性能、基礎地盤の特性、対策工法等を考慮して、適切に設定するものとする。

- (1) 滑走路や誘導路に関しては、地震発生時に機能を確保できるような範囲を対策する必要がある。また、エプロンに関しては、その空港が地震後に求められる機能を確保するために必要な駐機スペースを確保できるような範囲を対策する必要がある。

4.3 対策レベル

液状化対策のレベルは、対象施設の構造形式や地震発生時に求められる性能、基礎地盤の特性、対策工法等を考慮して、適切に設定するものとする。

- (1) 液状化対策レベルは、工法によって改良率、改良厚が異なるため、工法に応じた耐震解析手法により、適切に設定する必要がある。なお、液状化対策のレベルについて実物大液状化実験で得られた知見を**付録-5**に示す。

4.4 液状化対策の照査

液状化対策の照査は、対象施設の構造形式、基礎地盤の特性、対策工法、地震規模等を考慮して、適切に実施するものとする。

- (1) 液状化対策の照査は、動的解析法によって行うことができる。このとき、対策後の地盤定数は適切に設定する必要がある、**表-4.2**を参考とすることができる。

表-4.2 対策後の地盤定数の設定方法例

工法	地盤定数の設定方法
密度増大工法	対策範囲の密度の上昇に合うように液状化強度を大きく設定する。
固結工法	対策範囲を固化させるため、非液状化地盤として設定する。また、設計基準強度等を用いて弾性体として設定することもできる。
置換工法	対策範囲について、置換材料の液状化特性を適切に評価して設定する。
地下水位低下工法	対策範囲の地下水位を低下させ、非液状化地盤として設定する。
間隙水圧消散工法	対象範囲で過剰間隙水圧の上昇を抑制するよう液状化特性を適切に評価して設定する。
せん断変形抑制工法	対策工の剛性を適切に評価し、弾性体として設定する。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省航空局(2019)：陸上空港の施設の設置基準と解説
- 2) 国土交通省航空局(2019)：空港土木施設設計要領（構造設計編）
- 3) （公社）日本港湾協会(2018)：港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 4) （財）沿岸開発技術研究センター(1997)：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）
- 5) （公社）日本道路協会(2017)：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編
- 6) （公社）土木学会(2016)：トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説
- 7) （公社）土木学会(2016)：コンクリート標準示方書 設計編
- 8) （公社）日本道路協会(2012)：道路土工 擁壁工指針
- 9) （公社）日本道路協会(2010)：道路土工 カルバート工指針
- 10) （公社）日本道路協会(1992)：駐車場設計・施工指針 同解説
- 11) （公社）日本下水道協会(2014)：下水道施設の耐震対策指針と解説
- 12) （公社）日本水道協会(2009)：水道施設耐震工法指針・解説
- 13) （公社）日本河川協会(1998)：河川砂防技術基準（案）同解説
- 14) （公社）日本道路協会(1986)：共同溝設計指針
- 15) （公財）鉄道総合技術研究所(2012)：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計
- 16) （公社）日本道路協会(2009)：道路土工 切土工・斜面安定工指針
- 17) 上田茂・稲富隆昌・上部達生・井合進・風間基樹・松永康男・藤本健幸・菊池喜昭・宮井真一郎・関口信一郎・藤本義則(1993)：1993年釧路沖地震港湾施設被害報告，港湾技研資料 No.766
- 18) 稲富隆昌・善功企・外山進一・上部達生・井合進・菅野高弘・寺内潔・横田弘他(1997)：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技研資料 No.857
- 19) 国土交通省航空局(2019)：空港土木施設設計要領（施設設計編）

付録-1 地盤の地震応答解析法の種類と概要

耐震設計編 3.6 に示した各空港土木施設の耐震解析手法のうち，地盤の地震応答解析法の種類とその概要について以下に示す。

地盤の地震応答解析プログラムは，数多く提案されているが，現在，設計実務において比較的広く普及しているものは，表-付 1.1 に示すとおりである。

表-付 1.1 代表的な地震応答解析プログラムの特徴

モデル化・解析法		解析コード	SHAKE	FLUSH	FLIP
モデルの自由度	1次元		○	○	○
	2/3次元		—	○	○
地盤応力	全応力		○	○	○
	有効応力		—	—	○
地盤の非線形性	等価線形		○	○	—
	非線形		—	—	○
応答解析	時刻歴応答解析		—	—	○
	振動数領域応答解析		○	○	—

1.1 全応力の一次元応答解析（等価線形解析）

この方法は、重複反射理論に基づき、多層地盤を一次元モデルとして解析を行うものである。重複反射理論は、**図-付 1.1**に示すような半無限の多層弾性体の一次元せん断振動を考えるもので、波動方程式は以下ようになる。

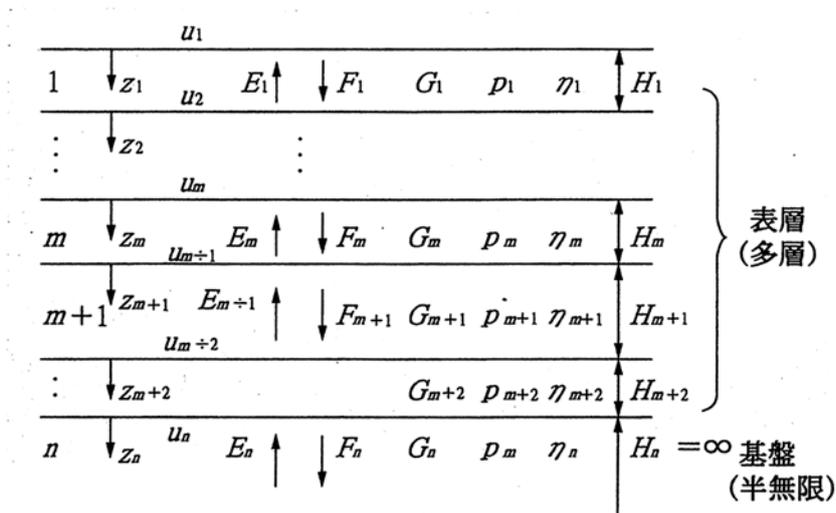
$$\rho_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} = G_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial z_m^2} + \eta_m \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 u_m}{\partial z_m^2} \right)$$

ここで、

- ρ_m : m 層の密度
- G_m : せん断弾性係数
- η_m : 粘性係数
- u_m : m 層水平変位

地盤の非線形性の考慮方法としては、あらかじめ与えるせん断弾性係数 (G) 及び減衰定数 (h) のせん断ひずみ (γ) に対する曲線 ($G/G_0 - \gamma$ 曲線, $h - \gamma$ 曲線) より、有効ひずみに対する G 及び h を収束計算により求める。

この解析法はせん断ひずみが 0.5~1% を越える場合は解析精度に問題がある可能性があることより、レベルII地震動のような大ひずみ領域での解析には適していない場合もある。代表的な解析コードとして SHAKE¹⁾ がある。



z : 深度, E : 上昇波, F : 下降波, G : せん断弾性係数, ρ : 密度, η : 粘性係数, H : 層厚

図-付 1.1 一次元せん断振動を行う地盤モデル

1.2 全応力の二次元応答解析（等価線形解析）

この方法は、有限要素に分割した地盤モデルの多自由度の運動方程式を、複素応答解析法により振動数領域で応答計算をおこなうものである。多自由度系の運動方程式は次式のように与えられる。

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = -\{m\}\ddot{Y}$$

ここで、

- $[M]$: 質量マトリクス
- $\{\ddot{U}\}$: 加速度ベクトル
- $\{U\}$: 変位ベクトル
- $[K]$: 剛性マトリクス
- $\{m\}$: 質量ベクトル
- \ddot{Y} : 入力地震動

減衰を複素剛性係数で表し、上式を振動数領域に変換すると次式が得られる。

$$(-\omega_n^2[M] + [K^*])\{u_n\} = -\{m\}\ddot{y}_n$$

ここで、

- $[K^*]$: 複素剛性マトリクス
- $\{u_n\}$: 変位ベクトル (ω_n に対する複素振幅)
- \ddot{y}_n : 入力地震動 (ω_n に対する複素振幅)
- ω_n : 入力地震動に含まれる振動数成分 ($n=0, 1, 2, \dots, N/2$)

複素応答解析を用いて多自由度系の応答解析を行う場合の手順を**図-付 1.2**に示す。地盤の非線形性の考慮方法としては、SHAKEと同様に等価線形化法によるものである。よってSHAKEと同様にせん断ひずみが0.5~1%を越える場合は解析精度に問題がある可能性があることより、レベルII地震動のような大ひずみ領域での解析には適していない場合もある。代表的な解析コードとしてFLUSH²⁾がある。

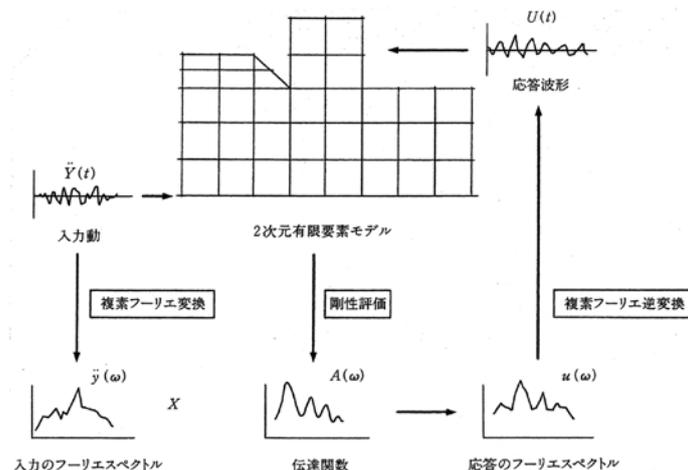


図-付 1.2 複素応答解析法の手順

1.3 有効応力解析（非線形解析）

この解析手法は、運動方程式の復元力項に非線形モデルを適用し、直接積分法による時刻歴応答解析により非線形解析を行うものである。特徴として、液状化に伴う大ひずみ領域まで追従できる反面、解析パラメータが多く、その設定に高度な技術が要求されることもある。代表的な解析コードとして FLIP^{3)~6)} がある。

FLIP は運輸省港湾技術研究所で開発された「液状化による構造物被害予測プログラム」であり、従来の全応力解析では困難であった地盤や構造物の詳細な挙動、特に液状化現象を伴う場合の残留変位、残留応力を精度よく解析することができる。

解析の特徴を以下に示す。

- ① 土のせん断応力-せん断ひずみモデルとして、多数の仮想的な双曲線型ばねで構成されているマルチスプリング・モデルを、履歴減衰の大きさを任意に調節可能なように拡張している。これにより、排水条件におけるせん断応力-せん断ひずみの履歴曲線が既往の室内試験データとよく適合する。また多数のばねで構成されているため、任意の主応力軸に対するせん断面の双曲線型非線形のモデル化が可能となる（**図-付 1.3** 参照）。

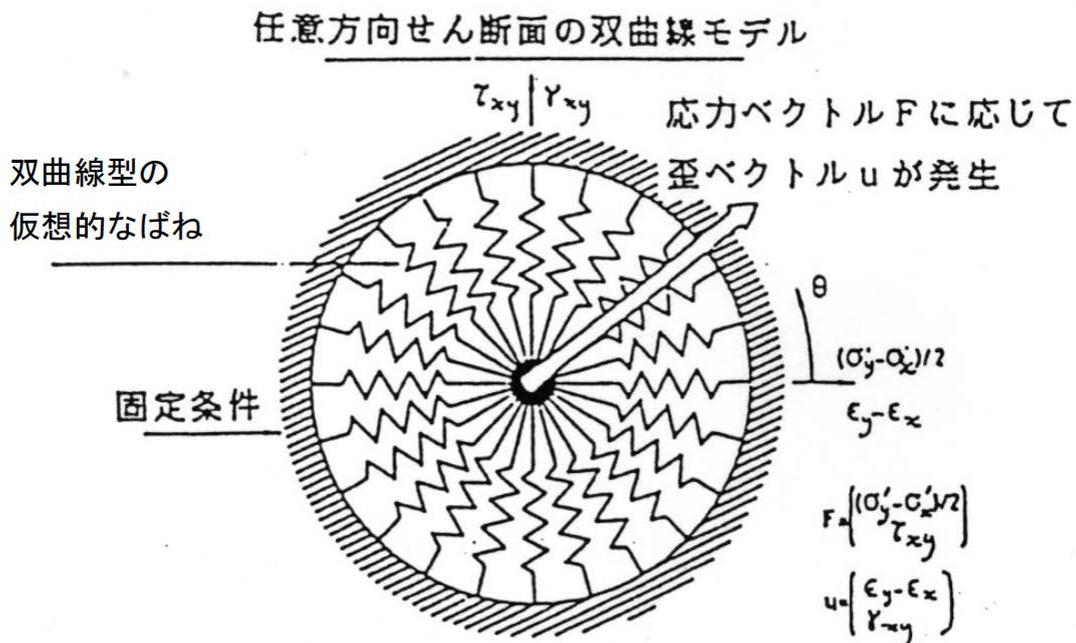


図-付 1.3 マルチスプリング・モデルの概念図

- ② 過剰間隙水圧発生モデルとして、井合モデルを用いている。このモデルでは非排水条件下における有効応力経路を **図-付 1.4** に示すような液状化フロントを用いて表す。図中の S_0 は液状化の進行の度合いを表すパラメータであり、正規化した塑性せん断仕事の関数である。さらに、液状化の進行に伴ってせん断ひずみのスケールを拡大することにより、数%程度以上のひずみを数値解析上安定的に求めることが可能である。

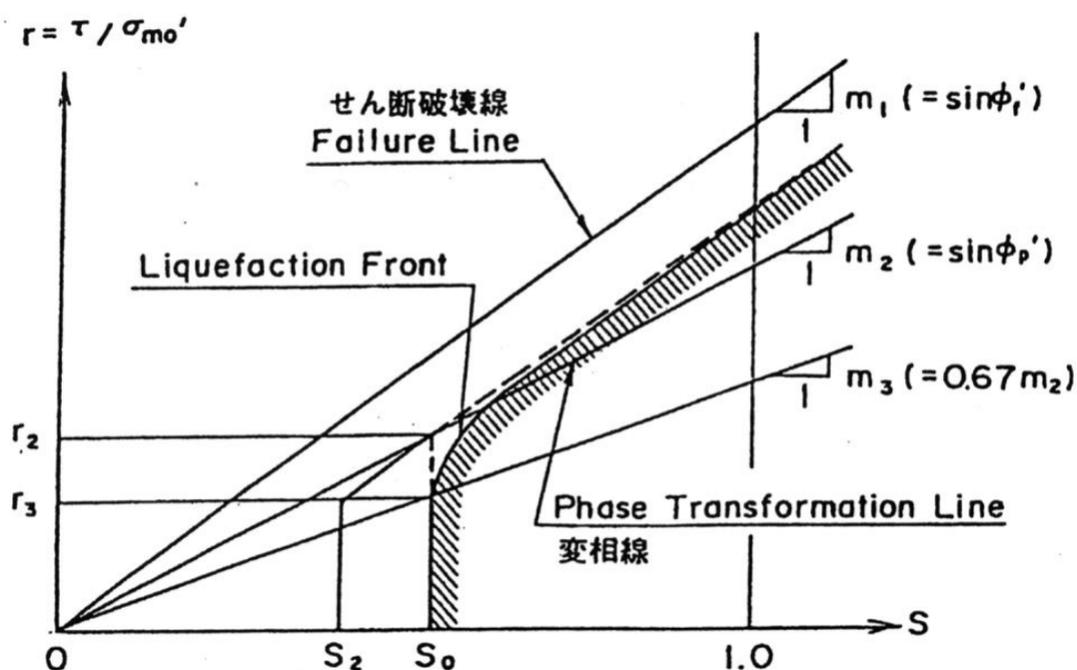


図-付 1.4 液状化フロント，状態変数 S 及びせん断応力比の概念

参考文献

- 1) Schnabel, P. B., Lysmer J. and Seed H. B.: SHAKE-A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 2) Lysmer J., Udaka T., Tsai C. F. and Seed H. B.: FLUSH-A Computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problem, Report No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, 1975.
- 3) 井合進・松永康男・亀岡知弘：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル，港湾技術研究所報告，第29巻，第4号，pp.27-56，1990.
- 4) 井合進・松永康男・亀岡知弘：サイクリックモビリティのモデルのパラメータの同定，港湾技術研究所報告，第29巻，第4号，pp.57-83，1990.
- 5) Susumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEDA: Strain space plasticity model for cyclic mobility, SOIL AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.1-15, 1992.
- 6) Susumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEDA: Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, SOIL AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.16-20, 1992.

付録-2 構造物の耐震解析の種類と概要

耐震設計編 3.6 に示した各空港土木施設の耐震解析手法のうち、一般構造物と土構造物の地震応答解析の種類とその概要について以下に示す。

表-付 2.1 構造物の地震応答解析法

対象施設		解析法
一般構造物	地上 (GSE 通行帯, 道路・駐車場, 場周柵, プラストフェンス, 進入灯橋梁)	震度法
		応答スペクトル法
		地震時保有水平耐力法
		動的解析法 (線形時刻歴応答解析法)
	動的解析法 (非線形時刻歴応答解析法)	
	地下 (GSE 通行帯, 道路・駐車場, 排水施設, 共同溝, 防水利施設)	応答変位法
擬似静的 2 次元 FEM 解析法		
土構造物 (高盛土, 調節池 (排水施設)) ・護岸	震度法 (円弧すべり解析)	
	ニューマーク法	
	動的解析法 (非線形時刻歴応答解析法)	

2.1 一般構造物 (地上) の地震応答解析法

2.1.1 震度法

震度法は、地震力を静的な荷重 (慣性力) として構造物に作用させる静的な耐震計算法である。慣性力を作用させて構造物の応答値を算定し、構造物の耐震性を照査する。

2.1.2 応答スペクトル法

応答スペクトル法は、ある地震動に対する一自由度系の最大応答を固有周期、減衰係数をパラメータとして示したものであり、加速度応答スペクトル、速度応答スペクトル、変位応答スペクトルとして表される。応答スペクトルの適用においてはモード解析により各次振動に分解する必要がある。各次振動モードに対する応答を応答スペクトルから求めると、振動系の最大応答を合成できる。ただし、この応答値は直接地震応答解析に比べて大きな値を与える。このため各次モード応答の二乗和平均応答を求める方法等により応答の精度を増やすような合成手法が試みられている。

2.1.3 地震時保有水平耐力法¹⁾

道路橋示方書に示される地震時保有水平耐力法は、エネルギー一定則を基本とした設計法である。エネルギー一定則の概念を再記すると**図-付 2.1**のようになる。弾性体とした場合の最大応答は線形応答スペクトルより求められ $k_{hc}W$ となる。構造物の降伏荷重を P_y とすると、応答塑性率及び耐震性評価は下式で表される。

$$\begin{cases} \mu_r = (k_{hc}/k_{hy})^2 + 1 \\ \mu_r < \mu_a \end{cases}$$

道路橋示方書では等価水平震度 k_{he} を導入し、下式で判定しているが、上式によるものと等価である。ここで、等価水平震度 k_{he} は、許容塑性率が μ_a の橋脚に作用する震度ではないことに注意する必要がある。

$$\begin{cases} k_{he} = k_{hc}/\sqrt{2\mu_a - 1} \\ P_a > k_{he}W \end{cases}$$

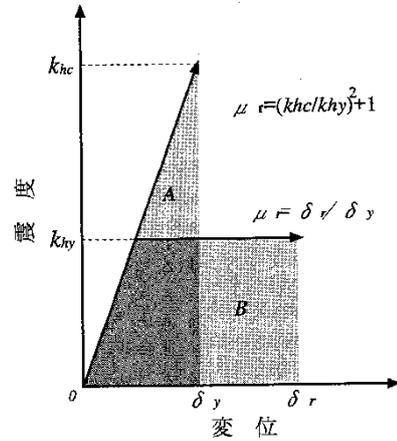


図-付 2.1 エネルギー一定則

構造物の許容じん性率は、橋脚断面の諸元をもとにコンクリート圧壊時（RC 橋脚の場合）の終局じん性率を計算し、それに安全率を考慮して設定する。

2.1.4 動的解析法（線形時刻歴応答解析法）

線形時刻歴応答解析法は、弾性域における構造物の動的特性を表現する場合に用いる解析手法である。耐震性能の照査は、動的解析の結果得られた各構造部材に生じる断面力、変位等の最大応答値が、それぞれの許容値以下となるように行う。

2.1.5 動的解析法（非線形時刻歴応答解析法）

非線形時刻歴応答解析法は、構造物の非線形性を直接非線形履歴モデルに取り込んで解析する手法である。構造物の非線形履歴モデルには各種のモデルが提案されているので、構造特性や解析目的に応じて適切な非線形履歴モデルを用いることが望ましい。耐震性能の照査は、動的解析の結果得られた各構造部材に生じる断面力、変位等の最大応答値が、それぞれの許容値以下となるように行う。

2.2 一般構造物（地下）の地震応答解析法

2.2.1 横断方向の解析法

(1) 応答変位法（横断方向）

応答変位法は、地震時の地盤変位、周面せん断力等を地中施設横断面に入力して、断面の耐震性を擬似静的解析するものである。応答変位法は、元来は地中線状構造物の縦断方向の耐震解析法として用いられていたが、近年では、地中施設の横断方向の解析にも適用されるようになってきた。地震時の地盤変位は、1次元の地盤地震応答解析又は設計速度応答スペクトルに基づいて算定し、地盤ばねを介して地中施設横断面に入力する。本解析法は、地中施設の地震応答解析法の中で最も簡易な方法であり、各種耐震設計指針類等にも採用されつつあるが、地盤ばねの設定には高度の工学的判断が要求されることから十分な検討を行う必要がある。

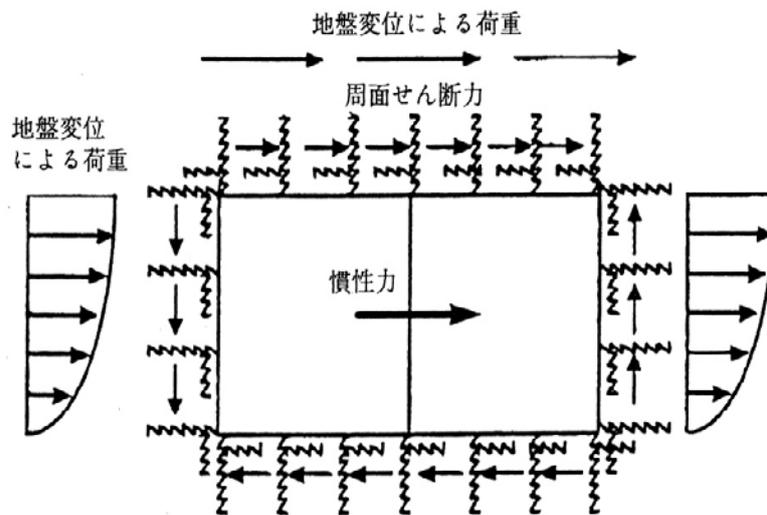


図-付 2.2 解析モデル概念図

(2) 擬似静的2次元FEM解析法

擬似静的2次元FEM解析は、地震時の地盤変位が地中施設横断面に最も厳しい条件となる時の地盤状態が再現されるような等価な地震荷重を、地盤を含む2次元FEM解析対象領域の全域に入力して、地中施設横断面の耐震性を擬似静的解析するものである。等価な地震荷重の算定は、1次元の地盤地震応答解析に基づき、通常、地中施設横断面の上端・下端深さに位置する地盤の相対変位が最大となる瞬間の地盤内加速度分布や地盤内変位分布などに基づき算定する。その算定の考え方によって、「応答震度法²⁾」、「地盤応答法³⁾」、「FEM応答変位法⁴⁾」などの呼称がある。本解析法は、次項に述べる動的解析よりは簡易な方法であるが、応答変位法における地盤ばねの設定に関する高度の工学的判断を解析的に解消できる点で、近年では、各種地中施設の横断方向解析に用いられることが多くなっている。

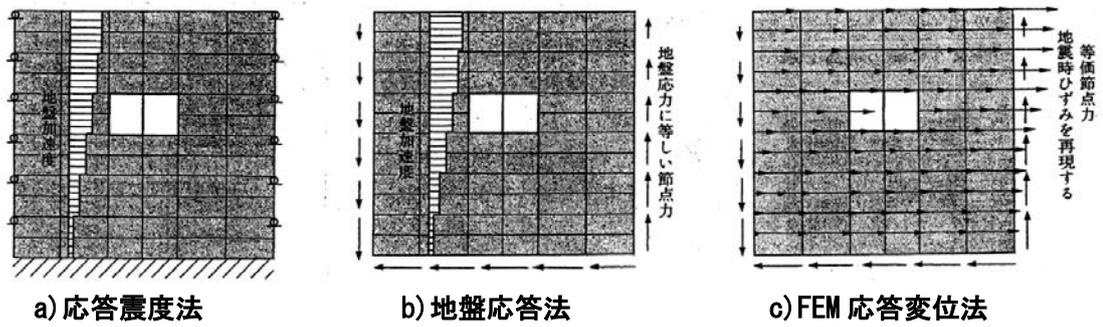


図-付 2.3 擬次静的 2次元 FEM 解析モデル概念図

(3) 動的 2次元 FEM 解析法

動的 2次元 FEM 解析法は、地中施設及び周辺地盤を一体として動力学モデルに基づいて解析するもので、地中施設の地震時挙動を最も忠実に再現しようとする方法である。応答変位法、擬似静的 2次元 FEM 解析法に比べ、解析結果の精度化が期待できる反面、地盤や地中施設の解析モデルやパラメータなどに解析結果が影響されるようになるため、高度な技術が要求される。地盤のひずみレベルが小さく（1%程度以下）、かつ、地中施設が弾性的な挙動を示すことが要求されている場合には、線形解析（等価線形解析を含む）により、比較的簡易な動的解析法（例えば FLUSH）の適用が可能である。しかし、これ以外の場合には、地盤及び構造物の解析モデルとして非線形モデル（例えば FLIP）を用いる必要があり、解析時間、技術上の難易度が增大することも多い。本解析法は、応答変位法、擬似静的 2次元 FEM 解析法によって決定された耐震設計断面の最終的な照査などに用いられることが多くなっている。

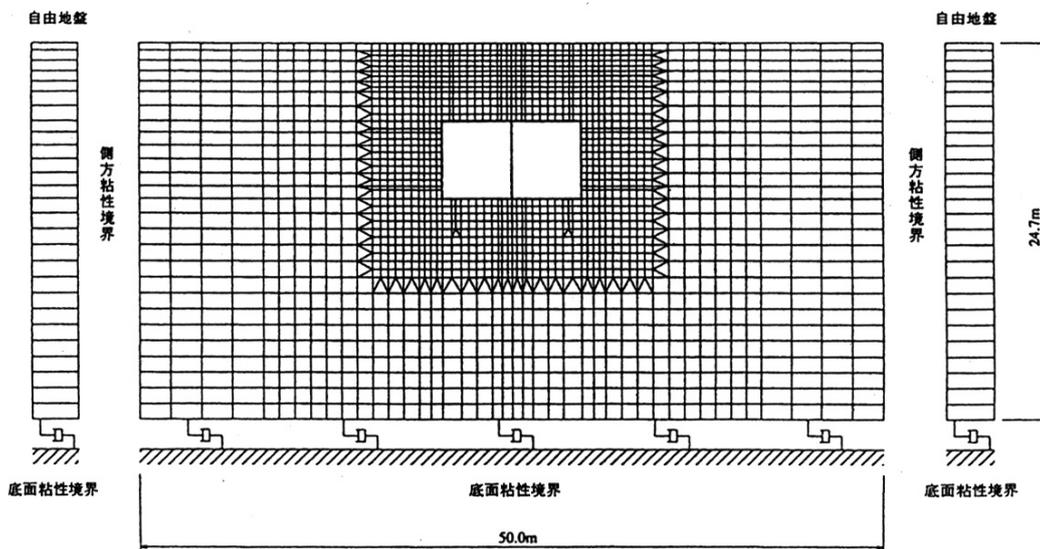


図-付 2.4 動的 2次元 FEM 解析モデル概念図

2.2.2 縦断方向の解析法

(1) 応答変位法（縦断方向）

縦断方向の解析法としての応答変位法は、線状地中施設の軸線に沿った地盤の地震時変位が正弦波状の分布をするものと考え、これを地盤ばねを介して地中施設に入力する。応答変位法は、縦断方向地中施設の地震応答解析法の中で最も簡易な方法であり、各種耐震設計指針類等にも採用されているが、設計で考慮する地盤変位を規定する種々の係数は未だ確立されておらず、各指針類によって相違がある点に注意する必要がある。なお、地盤変位を算定する際に、各種指針類によらず、地盤の地震応答解析によって地盤変位を算出する方法もある。

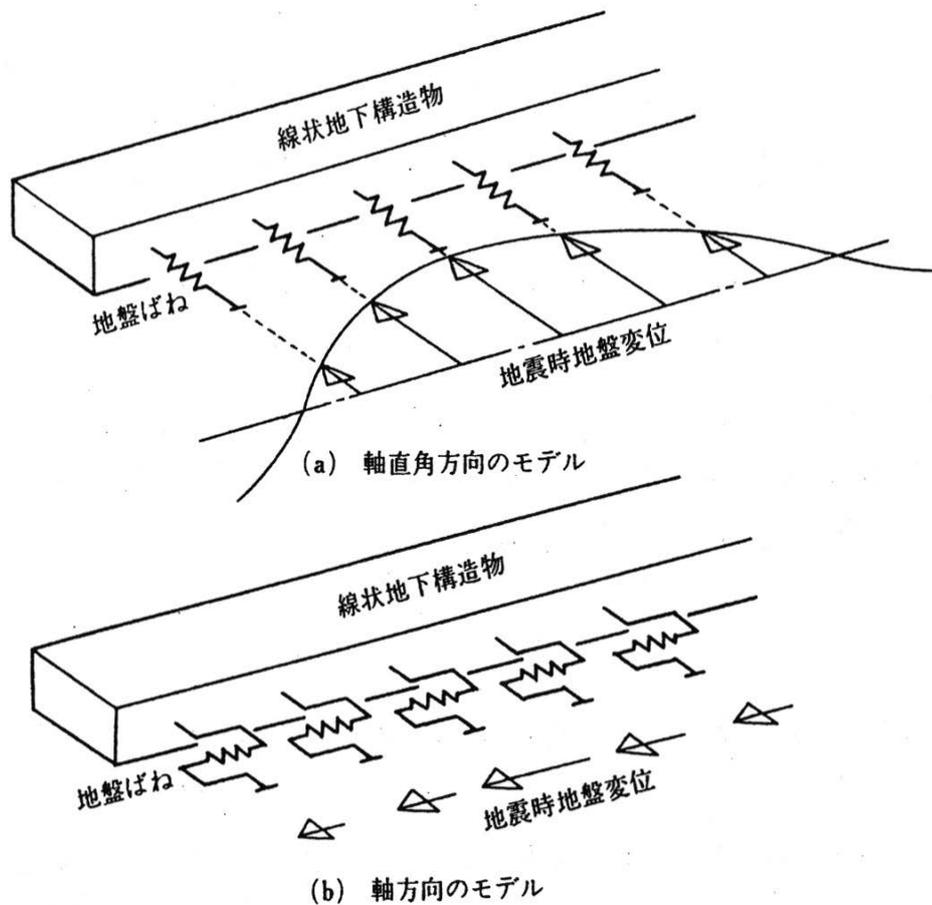


図-付 2.5 応答変位法（縦断方向）解析モデル概念図

(2) 動的解析法（縦断方向）⁵⁾

縦断方向の解析法としての動的解析法は、線状地中施設の軸方向の地盤条件の変化を解析に反映して地震時変位分布を算定しようとするものである。地中施設の周辺地盤を2次元又は3次元的にモデル化し、FEM又は質点・ばね系として解析する方法が一般的であり、従来から沈埋トンネルの耐震設計などに用いられている。

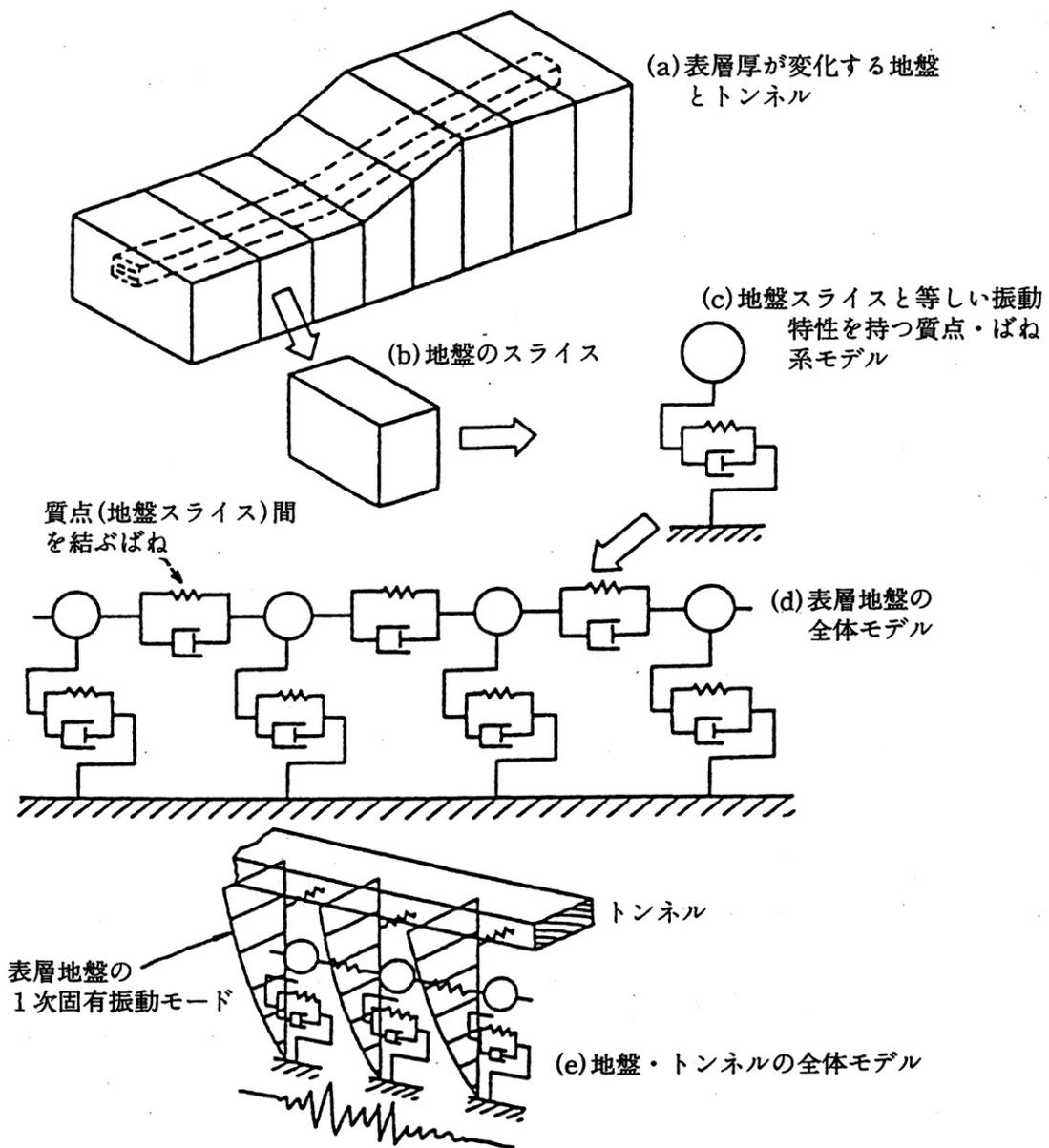


図-付 2.6 動的解析法（縦断方向）解析モデル概念図

2.3 土構造物の地震応答解析法

2.3.1 震度法（円弧すべり解析）⁶⁾

地震時の安定検討のうち最も簡便な手法として、円弧すべり面を仮定した震度法による安定計算法がある。震度法（円弧すべり解析）の概念図を以下に示す。

地盤の液状化が盛土の安定性を損なう可能性が高い場合、地震動によって発生する過剰間隙水圧を設計震度より算定して安定検討を行う。また、地盤に液状化の恐れがなく地震時に土の強度低下がないような場合には、設計震度をすべり土塊に作用させて安定検討を行う。

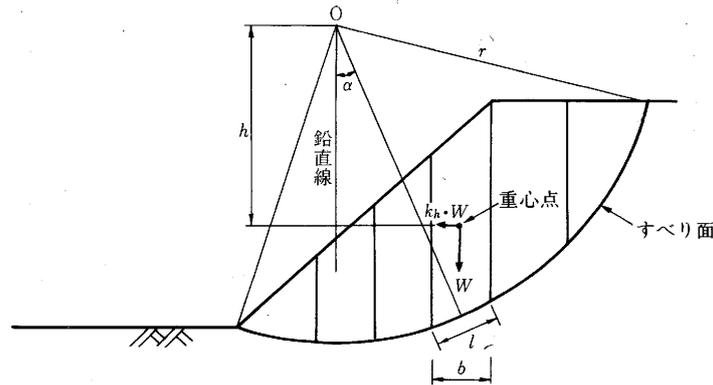


図-付 2.7 震度法（円弧すべり解析）の概念図

2.3.2 ニューマーク法

ニューマーク法は、すべり土塊を剛体、すべり面における応力-ひずみ関係を剛塑性関係と仮定し、すべり土塊に作用する加速度とすべり面のせん断抵抗との釣り合いからすべり土塊と地山部との相対運動方程式を立て、土塊のすべり量を算定する手法である。ニューマーク法による解析の概念図を以下に示す。

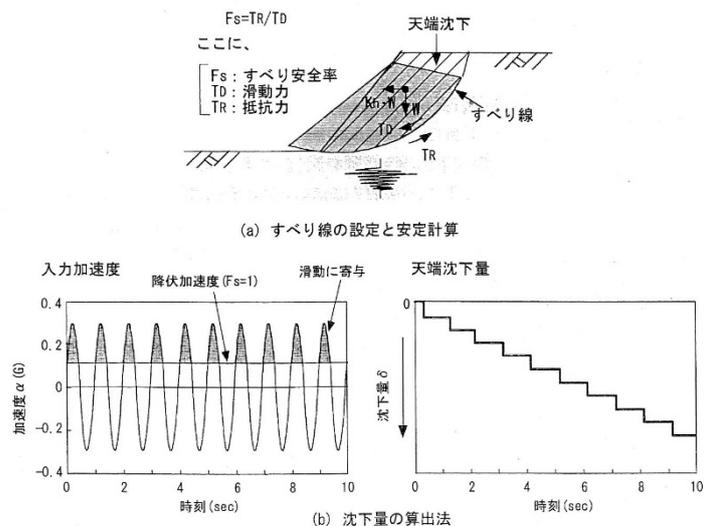


図-付 2.8 ニューマーク法の概念図

2.3.3 動的解析法（非線形時刻歴応答解析）

地震後の残留変形量を算定する方法として、非線形性を考慮した地盤モデルに地震動を逐次入射して地盤の応答を求める動的解析法（非線形時刻歴解析）がある。この解析手法については、**付録-1**を参照することができる。

動的解析法（非線形時刻歴解析）は、残留変形量を照査する場合に有効な解析手法である。

参考文献

- 1) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2017.
- 2) 片山幾夫・足立正信・嶋田穰・都築富雄・瀬下雄一：地下埋設構造物の実用的な準動的解析法「応答震度法の提案」，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，pp.737-738，1985.
- 3) 立石章：静的 FEM を用いた地中構造物横断方向の耐震設計法における地震荷重の作用方法の研究，土木学会論文集，No.529，pp.139-148，1995.
- 4) 太田擴・西田允俊・北嶋武彦・佐藤忠信：応答変位法を用いた地下構造物の耐震設計について，第2回阪神・淡路大震災に関する学術論文集，pp.437-444，1997.
- 5) Earthquake Engineering Committee, Japan Society of Civil Engineers: Earthquake resistant Design for Civil Engineering structure in Japan, Japan Society of Civil Engineers, pp.195-259, 1992.
- 6) （公社）日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針，2009.

付録-3 二次元地盤の等価線形解析と舗装構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法

液状化が発生しない場合の舗装構造のひび割れ発生状況について、二次元地盤の等価線形解析と舗装構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法¹⁾が提案されている。この解析法の概要を以下に示す。

3.1 滑走路の構造

図-付 3.1 の左図に示すように、滑走路の構造は表層地盤上に路床と路盤を施工し、その上に舗装版を設置する構造となる。舗装版は、コンクリート、アスファルト混合物もしくはプレストレストコンクリートで製作される。舗装版の厚さは通常 20~50cm であり、鉄筋コンクリート舗装版では 0.65% の鋼材が舗装版表面より 1/3 の箇所に配置される。舗装版には、5~15m 間隔に施工目地が設置され、100~200m 間隔に膨張目地が設置されている。施工目地は、ダウエルバーにより伸縮が自由となっている。一方、アスファルト舗装は連続して施工され施工目地は設置されていない。

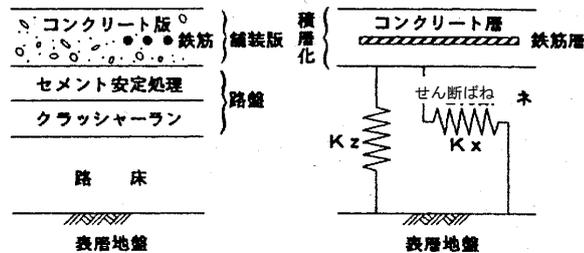


図-付 3.1 滑走路の構造とモデル化

3.2 計算モデル

計算モデルは、舗装版が表層地盤の水平せん断振動によりどの程度の断面力と変形が計算されるか調べるために作成する。液状化と上下動による影響は考慮していない。舗装版は表層地盤全体から比較すると薄い膜状であり表層地盤の振動性状にはほとんど影響を与えないと考え、計算モデルとして表層地盤と舗装版とを別々に作成する。

(1) 表層地盤

図-付 3.2 に示すように、人工島の表層地盤全体を固体要素に置換する。そして、基盤面より加速度入力を行い時刻歴の表層地盤表面の応答変位を算出する。この際、表層地盤の非線形性は地盤応答計算プログラム SHAKE により、表層地盤のせん断剛性の低下と減衰率を求め等価線形として評価する。

(2) 舗装版

鉄筋コンクリート舗装版は積層化した平面要素を用いる。図-付 3.1 の右図に積層化した平面要素の断面を示す。表層地盤のせん断振動により、主に内面力が舗装版に生じる。舗装版を形成するコンクリート、鉄筋、アスファルトは図-付 3.3 に示す材料非線形性を考慮する。

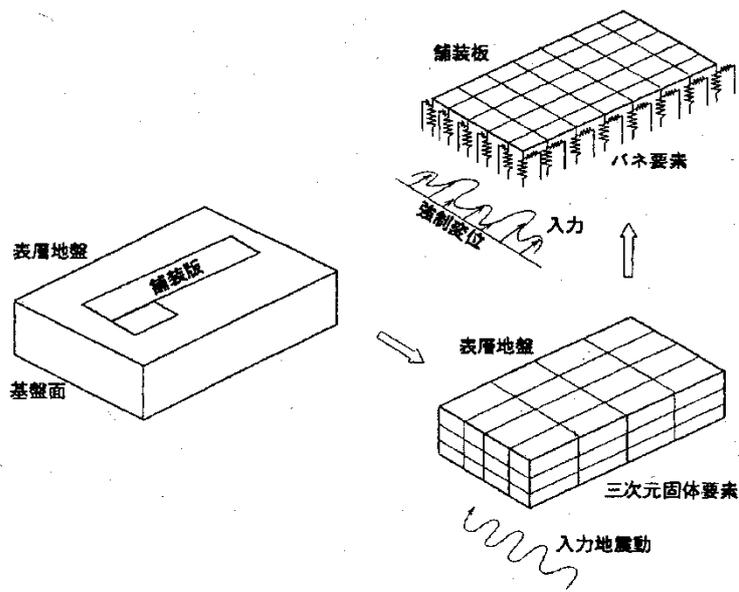


図-付 3.2 計算モデルの概要

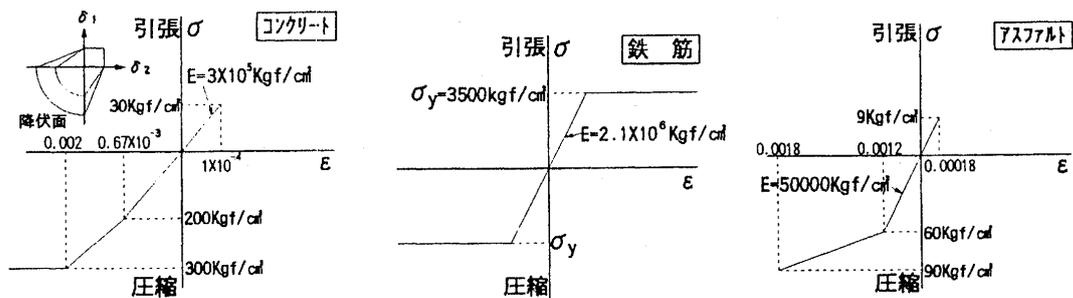


図-付 3.3 舗装材料の非線形特性

(3) 表層地盤と舗装版との連結

舗装版と表層地盤とはばねで連結されていると仮定するが、このばねは路床と地盤との剛性から求めることができる。また、このばねのせん断力が最大摩擦力以上となったら降伏すると仮定する。表層地盤と舗装版のばねのモデルを図-付 3.4 に示す。

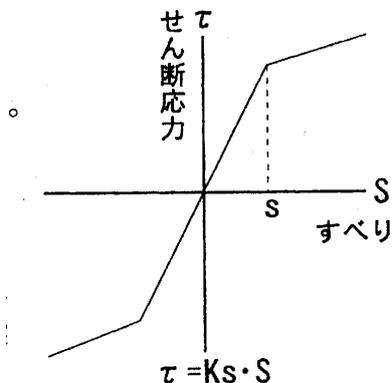


図-付 3.4 表層地盤と舗装版とのばね

(4) 施工目地

施工目地は図-付 3.5 に示すようにばねとしてモデル化する。このばねは、施工目地の軸方向とせん断方向とをモデル化する。

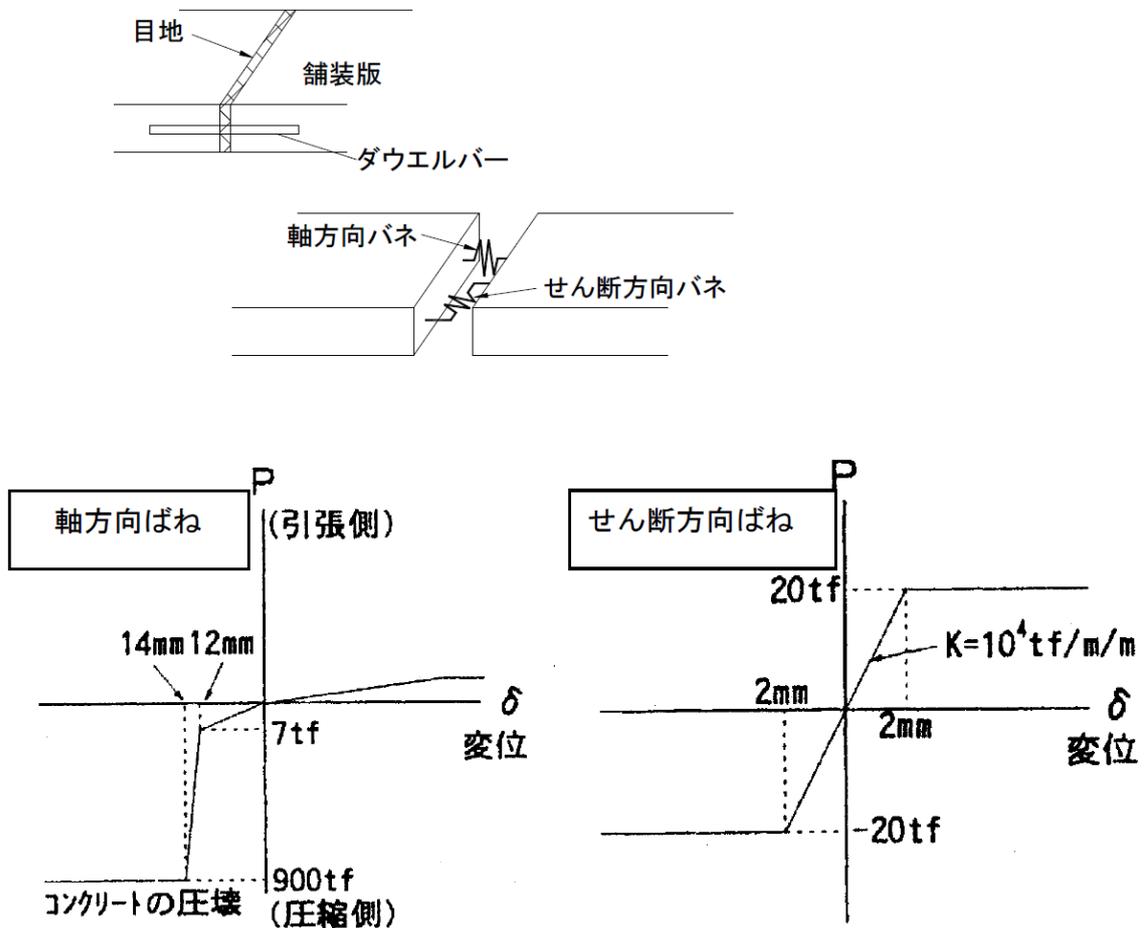


図-付 3.5 目地構造と非線形特性

(5) 舗装版の応答値

舗装版下部のばねの端部から、表層地盤のみの3次元モデルで求めた地表面の強制変位を入力して舗装版に生じる断面力と目地の開きなどを計算する。

参考文献

- 1) 清宮理・藤澤孝夫: 空港内滑走路の耐震性評価手法の開発, 第 23 回地震工学研究会発表会, 土木学会耐震工学委員会, pp.545-548, 1995.

付録-4 空港で利用される可能性の高い液状化対策工法の概要

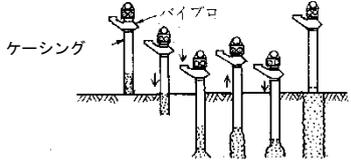
一般的な液状化対策工法¹⁾，原理をまとめて表-付 4.1 に示す。

空港土木施設の液状化対策は，施設を供用しつつ，実施しなければならない場合が多く，空港運用に支障が生じない方法を選定する必要がある。対策工法の概要¹⁾及び空港土木施設での適用性について表-付 4.2 に示す。

表-付 4.1 液状化対策工法の一覧

具体的工法	工法	対策の原理
サンドコンパクション工法	密度増大工法	密度の増大 有効応力の増大
振動棒工法		
バイブロフローテーション工法		
重鎮落下締固め工法		
静的圧入締固め工法		
深層混合処理工法	固結工法	固結 せん断変形の抑制
注入固化工法		
生石灰パイル工法		
事前混合処理工法		
置換工法	置換工法	粒度の改良
ディープウェル工法	地下水位低下工法	飽和度の低下 有効応力の増大
柱状ドレーン工法	間隙水圧消散工法	間隙水圧の抑制・消散 間隙水圧の遮断
周辺巻き立てドレーン工法		
連続地中壁による工法	せん断変形抑制工法	間隙水圧の遮断 せん断変形の抑制
格子状地盤改良工法		

表-付 4.2(1) 液状化対策工法の概要

工法名	サンドコンパクションパイル工法	
工法の概要	<p>鋼管ケーシングを先端閉塞の状態 で地中に貫入させる。所定の深さに達したところでケーシング内に砂を入れ、砂を地中に圧入しながらケーシングを引き抜く。締固められた砂杭を形成する。このとき、周辺地盤を側方に圧縮するとともに、振動締固めを行う。(補給材: 砂, 碎石)</p>	
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・大深度・高密度化が可能 ・対象地盤に細粒分が多いと改良後の N 値が上昇しにくい。 ・粘性土地盤にも適用可能。 	
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・振動により締固めるため、既設構造物との間には一定の距離が必要。 	
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。 ・一般的に大型の施工機械を用いるため滑走路を供用しながらの施工は困難であるが、小型の施工機械を用いることで滑走路を供用しながら施工できる工法もある。 	

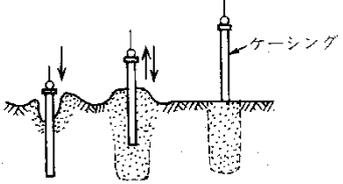
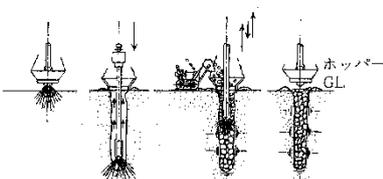
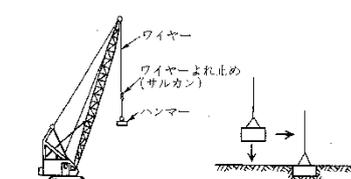
工法名	振動棒工法	
工法の概要	<p>各種の特殊圧入ロッドを振動圧入することにより、緩い砂地盤を締固める工法で、その先端及び側面の突起には各種のものがある。ケーシングには鋼管あるいは H 鋼を使用する。(補給材: 砂, 砂利, 碎石)</p>	
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・振動締固め効果を大きくするためロッドに特殊加工が施してある。 ・対象地盤に細粒分が多いと改良後の N 値が上昇しにくい。 ・施工機械が機動性に富み、施工能率がよい。 ・補給材として現地土砂の使用も可能。 	
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・振動・騒音は、サンドコンパクションパイルよりやや少ない。 	
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。滑走路等の舗装下の改良はできない。 	

表-付 4.2(2) 液状化対策工法の概要

工法名	パイプロフローテーション工法
工法の概要	<p>パイプロフロッツと呼ばれるパイプブレータを内蔵した鋼管を先端ノズルから水を噴出させながら地中に鉛直に貫入させる。所定の深さに達したらパイプブレータにより、管を振動させながら徐々に引き上げる。振動によって地盤が締固められた結果、パイプロフロッツの周囲にできた間隙に砂利、鉍さい、砂などの粗流材を流し込む。(補給材：砂利、鉍さい、砂)</p> 
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・水締め効果も期待できる。 ・対象地盤に細粒分が多いと改良後のN値が上昇しにくい。
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・水平振動が主体。 ・振動・騒音は比較的少ない。
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。滑走路等の舗装下の改良はできない。

工法名	重鎮落下締固め工法
工法の概要	<p>10～30tfのおもり（ハンマー）を自由落下させることにより発生する衝撃力で地盤を締固める工法。</p> 
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・細粒分が多いと改良効果が低下する。 ・振動・衝撃が大きいので、影響を受ける構造物が周辺にない場合に使用される。 ・通常は、10m以浅の改良に用いられることが多い。 ・10m以上の改良には、大重量（25tf以上）のハンマーによるタンピングが必要。
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺構造物との間には、かなりの距離が必要。
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物近傍や舗装下では適用できない。

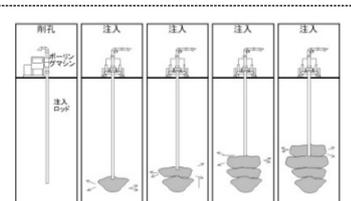
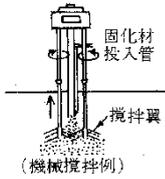
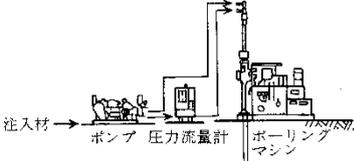
工法名	静的圧入締固め工法
工法の概要	<p>極めて流動性の低いモルタルなどを地盤に注入し固結体を造成し地盤を押し広げることにより締固め密度を増大させる。</p> 
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・設備が小規模で狭い空間でも施工可能。 ・土層に応じた改良率の設定が可能で、中間に改良を必要としない層(粘土層等)がある場合にも対応可能。
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・振動・騒音は少ない。 ・既設構造物との間には一定の距離が必要。
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・滑走路等の舗装の下の改良が可能。 ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。

表-付 4.2(3) 液状化対策工法の概要

工法名	深層混合処理工法
工法の概要	<p>固化材と原地盤を攪拌混合し、地盤を固化させる。</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>深層混合</p> <ul style="list-style-type: none"> ├── 機械攪拌 <ul style="list-style-type: none"> ├── スラリー系 └── 粉体系 └── 高圧噴射 (流体切削) <ul style="list-style-type: none"> ├── グラウト系 └── エアー・グラウト系 └── 水・エアール・グラウト系 </div>  </div>
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・土粒子の骨格が結合するため改良部分は液状化しない。
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・騒音・振動は少ない。 ・施工時に周辺地盤に変位が生じる場合がある。
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。 ・一般的に鉛直方向に施工するため滑走路等の舗装下の改良はできないが、水平方向・斜め方向へ施工可能な工法もあるため滑走路下への適用も可能。

工法名	注入固化工法
工法の概要	<p>ボーリング孔を利用し、セメントグラウトなどを注入し、地盤を固化する。</p> 
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・設備が小規模で狭い空間でも施工可能で騒音・振動に対する問題が少ない。
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・隣接構造物への注入圧の影響と流出。
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。 ・ボーリング孔を任意の角度に取れ、滑走路下への適用も可能。

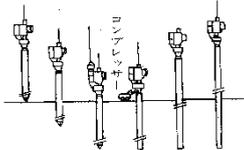
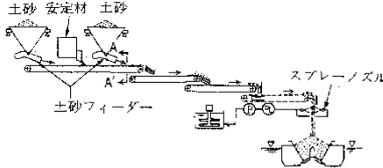
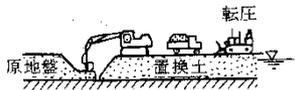
工法名	生石灰パイル工法
工法の概要	<p>生石灰による吸水脱水硬化反応により固化する。吸水膨張時の周辺土の締固め効果も期待できる。</p> 
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・生石灰による吸水膨張による周辺地盤の締固め、側圧増大効果が期待できる。
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・騒音・振動は少ない。 ・粉塵が生じる。
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。滑走路等の舗装下の改良はできない。

表-付 4.2(4) 液状化対策工法の概要

工法名	事前混合処理工法
工法の概要	埋立て土にセメントなどの改良材をあらかじめ混合した改良土をそのまま運搬し搬入する。 
工法の特徴	・埋立造成後の地盤改良が不要。
周辺への影響	・騒音・振動は少ない。 ・水質汚濁に注意する必要がある。 ・施工時に水質防止処置を施せば影響は低減される。
空港での適用性	・供用中の空港では適用できない。 ・空港の造成に埋立土を用いる場合に適用できる。

工法名	置換工法
工法の概要	液状化の発生しにくい材料(例えば碎石)で置換する。 
工法の特徴	・良質材で置換。 ・改良すべき地層が地表近くにあり広さも限られている場合に用いる。
周辺への影響	・少ない。
空港での適用性	・広範囲を改良する場合や深層まで改良する場合には適さない。

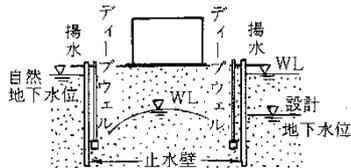
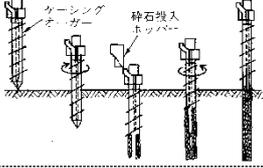
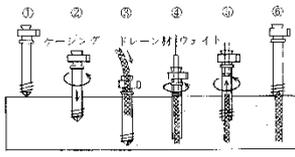
工法名	ディープウェル工法
工法の概要	構造物の周囲を止水壁で囲いその内部の地下水位をディープウェルなどにより低下させる。 
工法の特徴	・構造物直下に対策工が不可能な場合に適用。
周辺への影響	・地下水位低下により地盤沈下が生じる。
空港での適用性	・空港施設での適用も可能であるが、地盤沈下を適切に評価する必要がある。

表-付 4.2(5) 液状化対策工法の概要

工法名	柱状ドレーン工法（グラベルドレーン）	
工法の概要	ケーシングオーガーを所定の位置に回転貫入させた後砕石を地中に排出させながらケーシングを引き上げ地中に砕石パイルを造成する。地震時に発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制する。	
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・低振動・低騒音の施工可能 ・周辺地盤の地盤変状を発生させることがないので、既設構造物近傍での施工が可能。 	
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・少ない 	
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。滑走路等の舗装下の改良はできない。 	

工法名	柱状ドレーン工法（人工材料）	
工法の概要	ケーシングを圧入あるいは回転貫入させ人工材料のドレーン材を地中に設置する。ドレーン材の周辺はフィルター材で覆い目詰まりなどを防止する。過剰間隙水圧の上昇を抑制する。	
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・人工材料を使用するため品質が一定している。 ・低振動・低騒音の施工可能。 ・近接施工に適する。 ・施工機械が小型。 	
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・少ない。 	
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・滑走路等の舗装下の改良はできない。 	

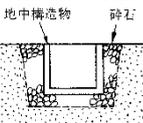
工法名	周辺巻き立てドレーン工法	
工法の概要	地中構造物の周辺埋戻しに礫・砕石材料を用いて構造物直下の地震時の過剰間隙水圧の上昇を抑制し、浮上りを防止する。	
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的容易に施工可能。 ・液状化時に浮上る可能性のある軽量地下構造物に適用される。 	
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・少ない。 	
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・地下構造物の建設時に施される工法であるため、既設構造物に対しては適用できない。 	

表-付 4.2(6) 液状化対策工法の概要

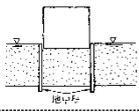
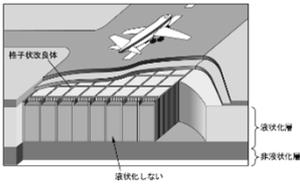
工法名	連続地中壁	
工法の概要	建物の外周に剛性の大きい連続地中壁を設置し、せん断変形を抑制する。杭と併用して地震時の変形を抑える。	
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺からの間隙水圧の伝播を遮断することが可能。 ・地震時の変形を抑えることが可能。 ・地下水位低下工との併用も考えられる。 	
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・少ない。 	
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。 	

表-付 4.2(7) 液状化対策工法の概要

工法名	格子状地盤改良工法	
工法の概要	<p>固化材と原地盤を攪拌混合し、格子状に安定処理土の壁を作る。</p> <p>内部の原地盤の地震時せん断変形を抑止することによって間隙水圧の上昇を抑制し、液状化を防止する。</p>	
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・施工深度として 20m 程度まで対応可能である。 ・細粒分の多い土質に対しても適用が可能である。 ・格子状の改良形態であるため、液状化地盤全体を固化改良する場合と比較し経済的である。 	
周辺への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・騒音・振動は少ない。 ・基礎杭や周辺構造物に対し、変位などの影響を与えにくい。 	
空港での適用性	<ul style="list-style-type: none"> ・既設構造物への影響等の施工状況に応じて、施工方法として機械式攪拌工法（新設対応）及び高圧噴射式攪拌工法（既設対応）を使い分けることで適用可能である。 	

参考文献

1) (社)地盤工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで， pp.138-152， 1993.

付録-5 液状化対策工法の選定・照査

本付録は、既往の調査・実験・解析結果を基に、既に実績のある既存空港施設を対象とした密度増大工法¹⁾及び薬液注入工法²⁾を対象とした液状化対策工法の改良範囲、改良率を縮減するための方法を説明するものである。地盤調査から液状化対策工法の選定・照査のフロー及び留意点を以下に示す。なお、液状化対策工法の選定・照査に先立ち、検討対象地点におけるレベル、レベル地震動の作成及び地震時、地震後に求められる当該空港の耐震性能の設定が必要である。

地形・地質的要因の把握

- ① 地形図上では判別し難い微細な起伏を表した微地形図及び既往ボーリング調査の結果を基に、液状化対策が必要なエリアの絞り込み及び施工上問題となるような既存構造物を把握する（**図-付5.1**）。

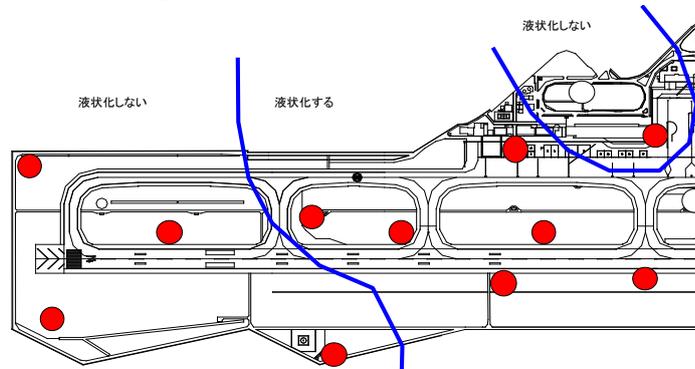


図-付5.1 液状化・非液状化領域のゾーニング

地盤調査（基本条件の整理）

- ② ボーリング調査により液状化層厚及び工学的基盤までの地層構成の把握を行う（**図-付5.2**）。この際、液状化予測・判定のため、 N 値、粒度、弾性波速度の調査及び液状化試験等を実施する³⁾。特に、ボーリング調査は、GL-20.0mの深さで打ち止めることが一般的ではあるが、液状化に関する検討深度については、検討対象施設への影響を考慮して決定するものとする。

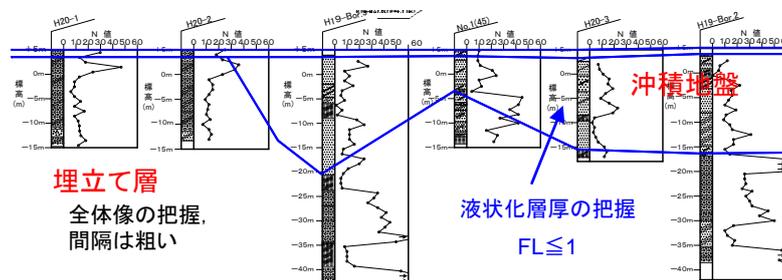


図-付5.2 液状化判定、液状化層の概略把握

- ③ 上記に加え、表面波探査、小規模アレイ等の物理探査手法を用い⁴⁾、ボーリング調査地点間の空間補間を実施し、液状化層の連続性・分布範囲を確認する（**図-付5.3**）。

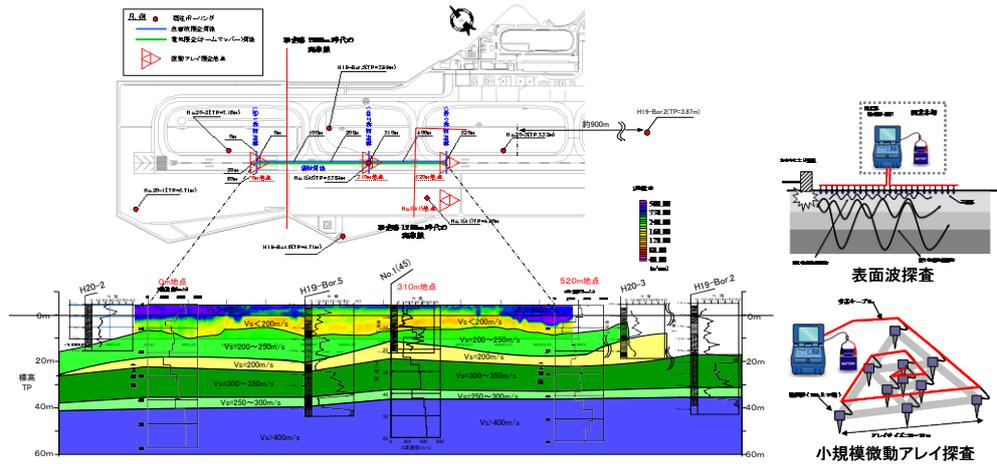


図-付 5.3 ボーリング・表面波探査・微動アレイによる地層断面図

- ④ ボーリング調査だけでは把握し得ない詳細な地層構成を把握した上で、液状化対策範囲を含め、未対策の場合の変形予測を実施し、耐震性能を満足するかの検討を実施する。

液状化対策工法の選定条件（一般）

- ⑤ 液状化対策工法の選定にあたっては、単なる土質との相性だけでなく、以下に示す施工性等を考慮する必要がある。
- a. 資機材の搬入・搬出及び施工が日々の作業サイクルの中で実施できること
 - b. 所定の改良効果（施設の耐震性能を含む）が確実に期待できること
 - c. 対策工法の施工等が既存施設に影響を及ぼさないこと
 - d. 設計・施工マニュアルが整備されていること

上記について、a.に関しては、空港毎に日々の作業可能時間が異なるため注意する必要がある。b.に関しては、低改良率の場合に注意する必要がある。また、c.に関しては、地震時以外の常時の供用性についても検討することが望ましい。d.に関しては、改良率を縮減する液状化対策工法であっても、施工管理等については通常の施工方法に準拠する必要があるため、マニュアル等が整備されている工法に限定しているが、試験施工等で施工方法を確認した場合はこの限りではない。

液状化対策工法の改良範囲等の縮減

液状化対策工法の改良範囲等の縮減とは、地盤改良工事における地盤改良範囲（余改良，部分改良）の縮小（図-付 5.4）及び低改良率の採用を意図しており⁵⁾、各工法の改良範囲の設定方法，留意事項，確認方法等について以下に示す。

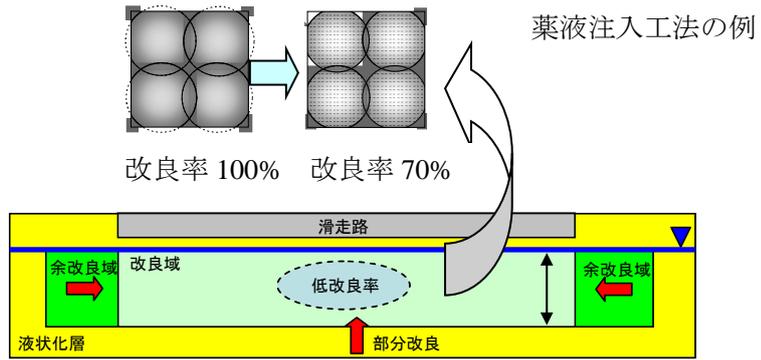


図-付 5.4 改良範囲及び形状のイメージ

⑥-1 密度増大工法における考え方

a. 余改良域縮小

従来、静的圧入締固め工法では、液状化層厚の $0^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で余改良域を設定していたが、変形照査次第で縮小が可能である (図-付 5.5)。余改良域の縮小は、周辺地盤の液状化により、過剰間隙水圧が改良体内に侵入するため、改良域中央部であっても消散に伴う沈下が生じる可能性がある。特に端部においてはその傾向が顕著であることが予想されるため、数値解析 (動解-圧密解析) あるいは模型実験により、過剰間隙水圧の伝搬状況を確認し、横断方向の滑走路端部の不等沈下 (勾配) を照査した上で、 $0^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で適切に設定する必要がある。なお、液状化後における沈下量の簡易的な算定方法としては、液状化地盤については Ishihara and Yoshimine⁶⁾ (図-付 5.6a)、過剰間隙水圧の伝搬後、消散するような場合には、菅野ら⁷⁾が実施した要素試験による過剰間隙水圧-体積ひずみ (背圧のみ負荷) 関係 (図-付 5.6b) を用いた算出方法もある。

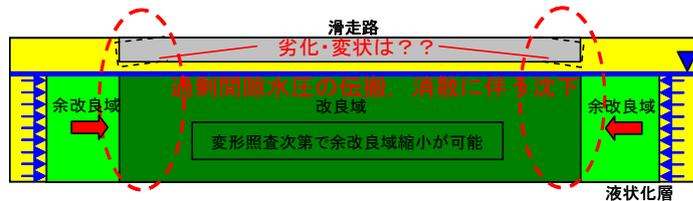


図-付 5.5 余改良域の縮小のイメージ

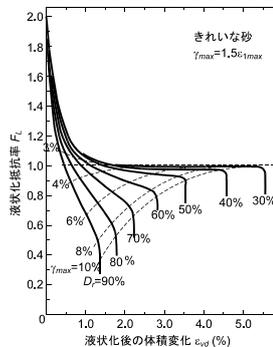


図-付 5.6a 体積ひずみと F_L の関係 (参考文献 6 を修正)

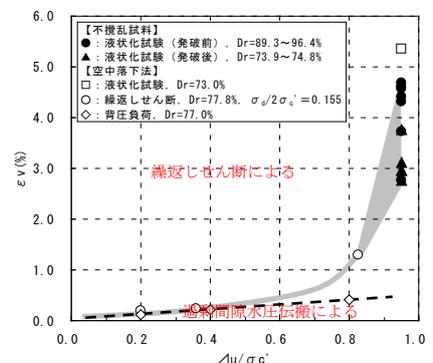


図-付 5.6b 過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係 (参考文献 7 を修正)

b. 改良率の低減

採用した工法で定められている最低改良率を更に下回る改良率で施工する場合、あるいは施工ピッチを通常よりも拡げて施工する場合、事前に試験施工を実施し改良効果を確認する。この際、 N 値（あるいは K 値）及び液状化強度の増加を確認する必要があるが、低改良率であることから、改良効果にバラツキがみられる場合もある。改良効果の確認として、ボーリング 1 本では改良域全体の平均値として評価することは難しいため、最近用いられている PDC、ミニラム等の簡易なサウンディング試験^{8),9)}により、改良体物性を平面、深度方向に連続的かつ空間的に確認し、品質をチェックする必要がある（**図-付 5.7**、**図-付 5.8**）。

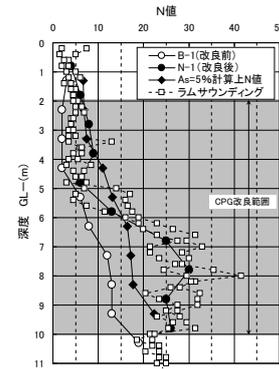
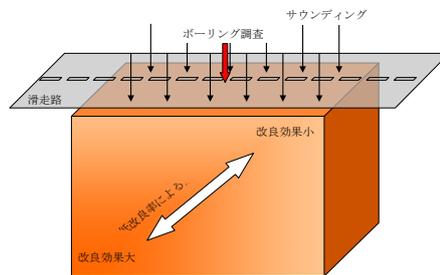


図-付 5.7 改良効果確認のイメージ

図-付 5.8 SPT とミニ・ラムサウンディングによる改良効果の調査事例⁸⁾

c. 部分改良

深度方向の部分改良については、深度方向の余改良域の検討や概念が元々ないため、液状化層全体を改良する必要がある。

➔ ⑥-2 薬液注入工法・セメント改良系の地盤改良工法における考え方

a. 部分改良

図-付 5.9 に示すように、部分改良率は 70%以上を確保する必要があり、設定にあたっては液状化層の分布範囲、連続性を十分に把握する必要がある。これについては、②、③等で示す調査結果を十分に活用する。なお、部分改良率の設定にあたり、数値解析（動解+圧密解析）、模型実験により、縦横断方向の滑走路端部の不等沈下（勾配）で照査を行う必要がある¹⁰⁾。また、改良効果確認については、サンプリング等により供試体が自立することが最低限の判断基準であり、施工後改良範囲の確認としては、不透水層・液状化層の判断が可能な三成分コーンや PDC 等のサウンディングにより改良範囲の確認を行う必要がある¹¹⁾。

b. 改良率の低減

現場実験において、70%までは確認済みであるため、対象地点の地盤条件によっては改良率を 70%まで低減できる可能性がある。ただし、改良率 100%では改良域全体を不透水層水と見なせるため、数値解析におけるパラメータの設定が比較的容易であるが、**図-付 5.10** に示す様に改良率を低下させると、改良体が過剰間隙水圧の伝搬の影響を受け、過剰間隙水圧が発生することが現場実験で確認さ

れている。したがって、改良率を低減させる場合には、若干ではあるが、過剰間隙水圧消散に伴う体積ひずみについても考慮しなければならない場合もある。簡易な手法として、要素試験による過剰間隙水圧-体積ひずみ（背圧のみ負荷）関係¹²⁾（図-付 5.11）を用いた算出方法もある。

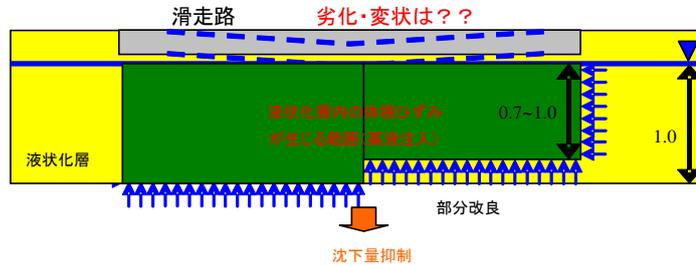


図-付 5.9 部分改良のイメージ

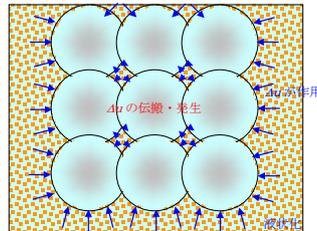


図-付 5.10 改良率 100%未満の場合の過剰間隙水圧伝搬のイメージ

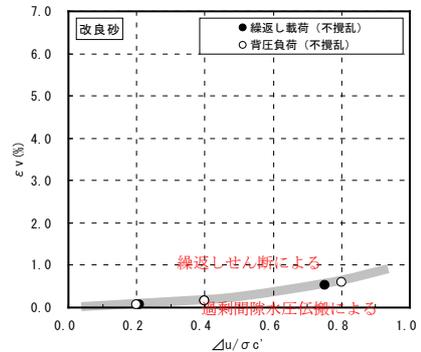


図-付 5.11 溶液型薬液注入供試体における過剰間隙水圧-体積ひずみの関係（参考文献 12 を修正）

c. 液状化層の基盤が傾斜している場合

基盤が傾斜の場合、地盤改良域直下の液状化層が流動する可能性があり（図-付 5.12）、現状では部分改良率 100%とすることが望ましい。例えば、横断方向の流動を抑えるため、滑走路端部直下のみ、部分改良率を 100%とする門型着底構造のような改良仕様が考えられるが、現状では周辺からの過剰間隙水圧の伝搬の影響を否定できないため、改良率は 100%とするか、変形照査について十分かつ慎重な検討を実施し、耐震性能を満足することを確認する必要がある。

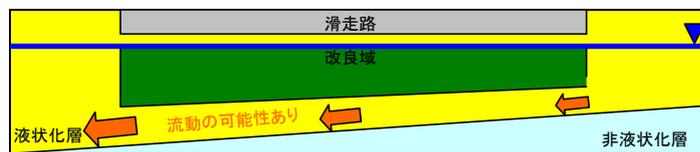


図-付 5.12 基盤が傾斜している場合のイメージ

変形照査（液状化対策工法選定・仕様決定後）

- ⑦ 本付録は、液状化対策工法の改良範囲，改良率を縮減するための方法を示しているが，選定した液状化対策工法の設計・施工の詳細については，各種工法マニュアルに従って実施する必要がある。また，最終的には，設計要領で定められている滑走路縦横断方向の管理規定値（変形勾配）について照査する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば, (一財)沿岸技術研究センター:液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアルーコンパクトシヨングラウチング工法ー, 2013.
- 2) 例えば, (一財)沿岸技術研究センター:浸透固化処理工法技術マニュアル, 2010.
- 3) (公社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018.
- 4) 例えば, 村上弘行, 比留間誠之, 菅野高弘, 中澤博志:空港滑走路下の液状化対象層の連続性把握に関する一考察, 第 63 回土木学会年次学術講演会, III-191, pp.381-382, 2009.
- 5) 中澤博志, 菅野高弘:空港における滑走路を対象とした液状化対策に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.27-43, 2010.
- 6) Ishihara. K and Yoshimine. M: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 7) 菅野高弘, 中澤博志, 藤井照久, 山田和弘, 木村康隆:過剰間隙水圧とせん断剛性および体積ひずみの関係に関する考察, III-159, pp.317-318, 第 63 回土木学会年次学術講演会, 2009.
- 8) 澤田俊一, 吉澤大造, 比留間誠之, 長瀬雅美, 菅野高弘, 中澤博志:間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法ーその 10 不同沈下評価ー, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.187-188, 2008.
- 9) 規矩大義, 菅野高弘, 中澤博志, 山口和也, 及川綾子, 多田守夫, 日比野七生, 村上実嘉子, 山口恵美:液状化した地盤の水圧消散と地盤強度の回復に関する原位置試験, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.1829-1830, 2008.
- 10) 中澤博志, 菅野高弘, 藤井照久, 山田和弘, 木村康隆:液状化による臨海部埋立空港滑走路の残留変形に関する現場実大実験および再現解析, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.269-274, 2009.
- 11) 池野勝哉, 吉田誠, 菅野高弘, 中澤博志:滑走路直下における人工液状化地盤の RI-CPT 調査報告, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.1837-1838, 2008.
- 12) 中澤博志, 菅野高弘, 池野勝哉, 三藤正明:溶液型薬液注入供試体の非排水変形特性(変形・強度特性), III-487, pp.973-974, 第 63 回土木学会年次学術講演会, 2009.

付録-6 二次元地盤の有効応力解析と橋梁構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法の例

本付録では、レベルII地震時に周辺地盤の変位の影響を受ける橋梁構造の耐震照査法の概要を示す。ここでは、進入灯橋梁を対象に説明するが、解析法は杭基礎や杭式栈橋などに応用できる。

6.1 進入灯橋梁の構造及び設置状況

進入灯橋梁の橋梁形式は、設置される空港が海上空港か、又は山岳空港かによって大きく2つに分けることができる。表-付 6.1 に進入灯橋梁の設置状況と地震時に進入灯橋梁が受ける影響を空港形式毎に分けて示す。

表-付 6.1 進入灯橋梁の設置状況と地震時の影響要因

①海上空港
設置状況：護岸に接続 
影響要因 1. 橋梁の地震時慣性力 2. 海水の動水圧 3. 地盤変位（海底地盤の液状化による流動変位など） 4. 護岸変位（埋立土、置換砂の液状化に起因する変位など）
②山岳空港
設置状況：高盛土に接続 
影響要因 1. 橋梁の地震時慣性力 2. 地盤変位（高盛土の変位など）

海上空港に設置される進入灯橋梁は、海上の空港島の護岸に橋台を設け、海上に伸び出しており、橋脚の基礎地盤は軟弱な海成堆積層となっていることが少なくない。また、フーチングを設けずに橋脚と基礎杭が一体となったパイルベントやジャケットを含む多柱式基礎とな

っている例が多い。地震時には護岸から海底にかけて液状化に伴う地盤流動が発生するリスクを抱えている。

一方、山岳空港に設置される進入灯橋梁は、盛土の肩部に橋台を設け、盛土斜面から法先に橋脚を設置する構造となっている。盛土は高盛土となっていることが多く、橋脚の高さが大きく変化する。橋脚はトレススル構造が用いられ、基礎形式は杭基礎あるいは深礎杭となっている例が多い。基礎地盤となっている盛土の地震時の安定が、進入灯橋梁の耐震性能の確保の前提条件となる。

6.2 地震時挙動

過去に進入灯橋梁が地震による被害を受けた事例はほとんど無い。したがって、ここでは数値解析によって予測した進入灯橋梁の地震時挙動を示す。

前述のように海上空港であれば護岸、山岳空港であれば高盛土に橋台を設け、そこから張り出す形で進入灯橋梁は設置される。それゆえ、進入灯橋梁の地震時挙動は高盛土、護岸及び周辺地盤の変位の影響を受ける。図-付 6.1 及び図-付 6.2 に、それぞれ地震時に海上空港に設置された進入灯橋梁の被災する主な要因及び被災例を示す。

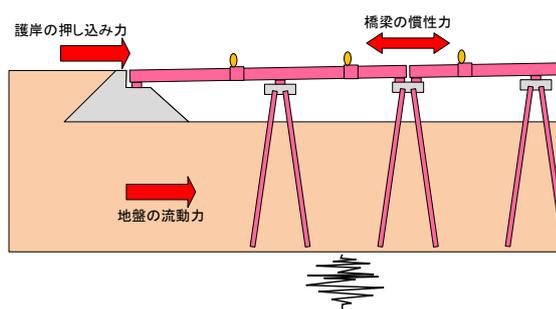


図-付 6.1 被災する主な要因

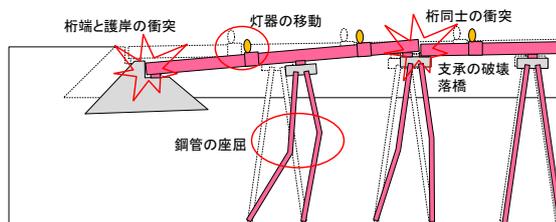


図-付 6.2 被災例

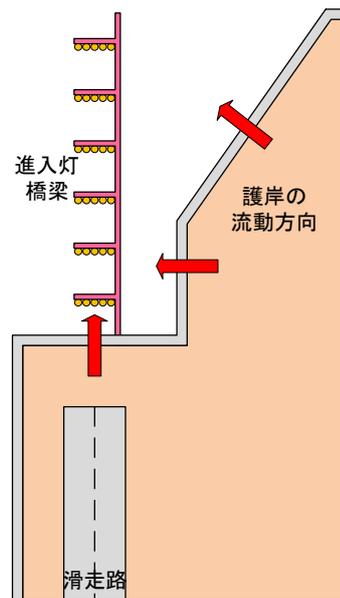


図-付 6.3 多方向からの影響
(平面図)

多くの護岸は、レベル2地震時には基礎地盤の塑性化や液状化により大きく海側に変位すると考えられる。進入灯橋梁は護岸上の橋台に設置されている場合が多く、橋台に押されるように護岸とともに変位する。また、護岸より深いところにおいても、地盤が海側へ流動しようとするので、海底面より深いところで鋼管杭などの基礎が被害を受ける。また、図-付 6.3 に示す

ように進入灯橋梁の設置位置によっては、多方向からの護岸やその周辺地盤の影響を受ける。このように、周辺地盤の変位の影響が大きいと予想される場合は、進入灯橋梁自身の慣性力とあわせて地盤変位の影響評価が必要である。

6.3 解析手法

構造物の基礎と地盤との相互作用を考慮した解析手法として、様々な方法が提案されている¹⁾。ここでは、地震時において基礎地盤の軟化（液状化を含む）による地盤変位、橋梁構造の非線形特性を考慮できる解析手法の概要を示す。

前述の地盤変位の影響を考慮するため、進入灯橋梁の耐震性能照査は、上部構造（桁）、橋脚、基礎まで含めた橋梁全体系で実施する必要がある。また、慣性力と地盤変位の作用は一般に位相が異なることが多いため、静的解析でなく動的解析を用いることが望ましい。橋梁全体系を対象とした動的解析による照査法として、次の2つの方法が考えられる。

①一体モデル

地盤と橋梁が一体の有限要素モデルで耐震性能を照査する方法である。図-付 6.4 に解析モデルの概略を示す。地震時における地盤の挙動を精度良く求める場合、複雑な地盤の構成モデルを用いる必要がある。一般的に、このような地盤の構成モデルは2次元平面モデルのみ利用可能で、解析プログラムも2次元モデルに限られる場合も多く、一体モデルとすれば橋梁も2次元のモデルとなる。それゆえ、平面的な挙動のみ表現可能で橋軸直角方向の照査はできない。

地盤と杭の節点を同一とすると杭は壁のような挙動となり、地盤が杭間をすり抜ける挙動を表現することができない。それゆえ、地盤と杭の間には相互作用ばねを設けることが望ましい。

②分離モデル（多入力解析）

地盤だけの地震応答解析より進入灯橋梁の基礎位置の応答を求め、基盤の加速度とあわせて橋梁と基礎をモデル化した骨組みモデルへ入力する方法である。入力は地盤ばねを介してされるが、地盤ばねの位置によって地盤応答は異なるため、解析では地盤ばね毎に、予め求めた地盤応答を入力することになり、それゆえ多入力解析²⁾と呼ばれている（多入力モデル、多点入力とも呼ばれる）。

この方法では、図-付 6.5 に示すように地盤と橋梁を分けて解析することができる。例えば、地盤は港湾構造物を対象とした有効応力解析で広く用いられている FLIP³⁾（付-1.3 参照）、橋梁は道路橋を対象とした非線形動的解析で広く用いられている TDAP⁴⁾と、それぞれの解析分野で得意な解析プログラムを分けて用いることができる。また、先の一体解析では地盤の解析にあわせて橋梁も2次元モデルとなるが、多入力では地盤は2次元、橋梁は3次元モデルとすることができ、複雑な橋梁の3次元的な挙動を求めることができる。

また、橋軸方向に対する地盤の応答や地震波を用いれば、同一の3次元骨組みモデルで橋軸直角方向の照査も可能である。さらに、あらかじめ水平2方向の地盤応答を求め、橋梁モデルに入力すること図-付 6.3 に示す、水平2方向の地盤変位の影響を考慮した解析も可能である。

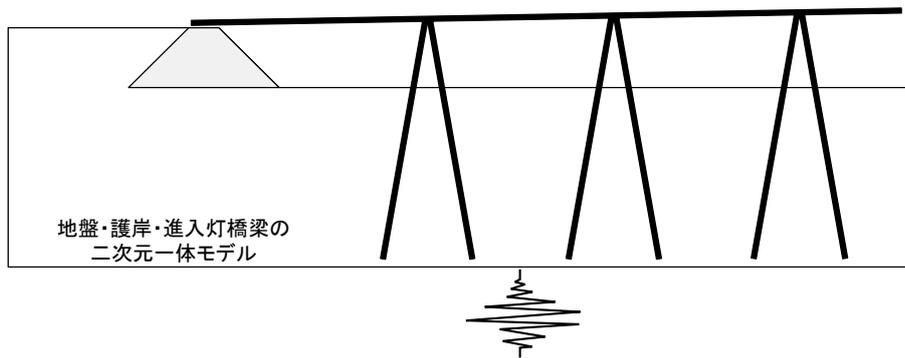


図-付 6.4 地盤・橋梁一体モデル

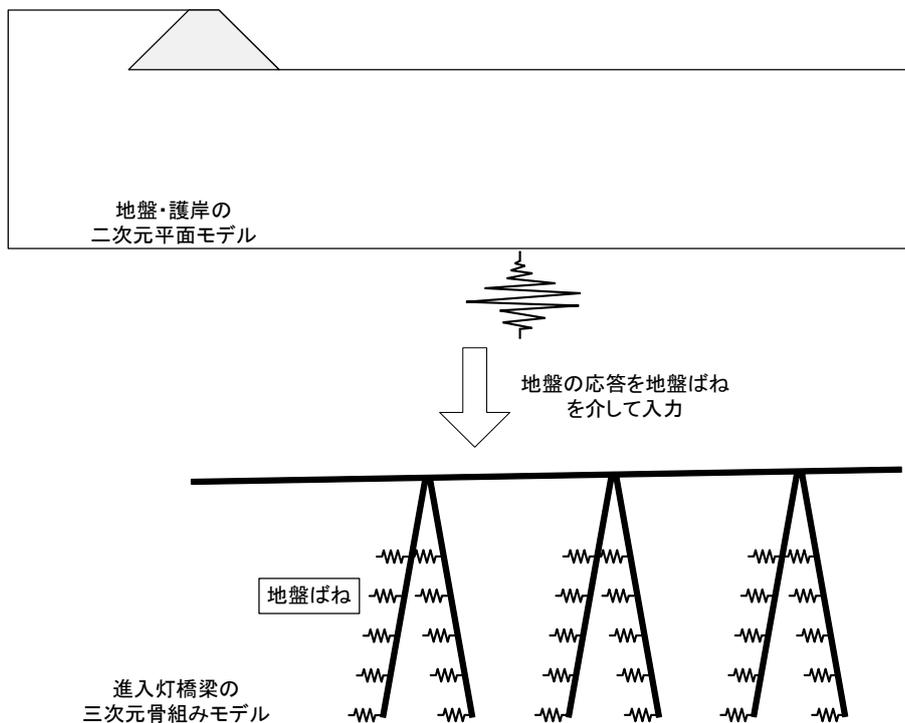


図-付 6.5 地盤・橋梁分離モデル（多入力解析）

参考文献

- 1) 日本地震工学会：基礎と地盤の動的相互作用を考慮した耐震設計ガイドライン（案），基礎—地盤系の動的応答と耐震設計法に関する研究委員会報告，164pp，2007.
- 2) 田中勉，吉田望，亀岡裕行，長谷川豊：地中構造物の多入力解析，第38回土木学会年次学術講演会講演概要集，第1部，pp.49-50，1983.
- 3) S. Iai, Y. Matsunaga and T. Kameoka: Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, Rep. of the Port and Harbour Res. Inst., Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990.
- 4) アーク情報システム：TDAPIII理論説明書 バージョン3.00，2007.

付録-7 空港舗装直下地盤への格子状地盤改良の適用

付録-4 に示した液状化対策工法のうち、格子状地盤改良を空港舗装直下地盤へ適用の際に留意すべき舗装の地震時挙動及び変形照査手法について以下に示す。

7.1 格子状地盤改良の特徴

格子状地盤改良は深層混合処理の形式の一つであり、**図-付 7.1** に示すように固化体を平面的に格子状に配置した形式である。断面を見ると地盤内に固化体の壁を作ることに対応し、地震時に発生する格子内の地盤（未改良地盤）のせん断変形を抑制することで液状化を防止できる（**図-付 7.2** 参照）。格子状地盤改良は、液状化層をすべて改良することで液状化を完全に防止できるブロック状改良とは液状化抑制メカニズムが異なり、ブロック状改良と比べて改良土量を削減できるため経済的な形式である。そのため、格子状地盤改良は固結工法である深層混合処理工法のうち改良率を低減させた工法、又は、固化体壁によりせん断変形を抑制するせん断変形抑制工法に分類される。

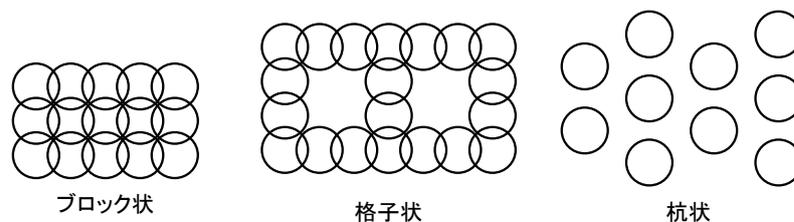


図-付 7.1 深層混合処理工法における固化体の平面配置

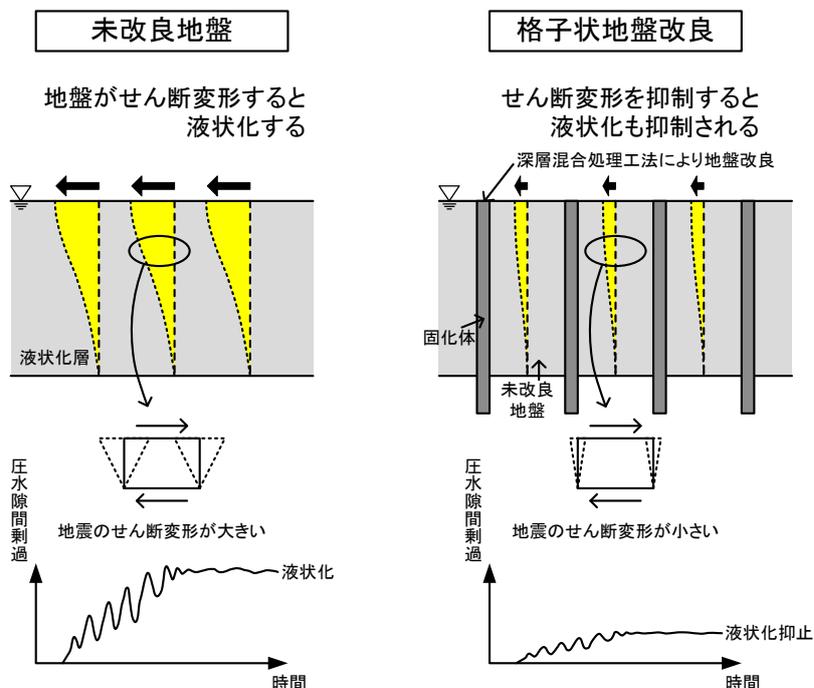


図-付 7.2 格子状地盤改良の液状化抑制メカニズム

空港舗装直下地盤に格子状地盤改良を適用する場合において、コスト縮減や工期短縮のため、固化材の量を減らせるよう格子間隔を広く設定することが有力な方法であるが、格子間隔が広くなれば改良効果は小さくなる。そのため、対象施設の要求性能に照らし合わせた格子間隔の設定が重要である。図-付 7.3 は舗装下地盤の格子間隔の違いに関する模型振動台実験の結果^{1,2)}を示すが、格子間隔が十分に狭い場合には改良地盤上の舗装は沈下しない。一方、間隔が広く改良効果が十分でない場合には格子内未改良部に過剰間隙水圧の上昇が見られ、未改良部上の舗装が沈下して固化体上との間で不陸が生じ、平坦性が損なわれる。

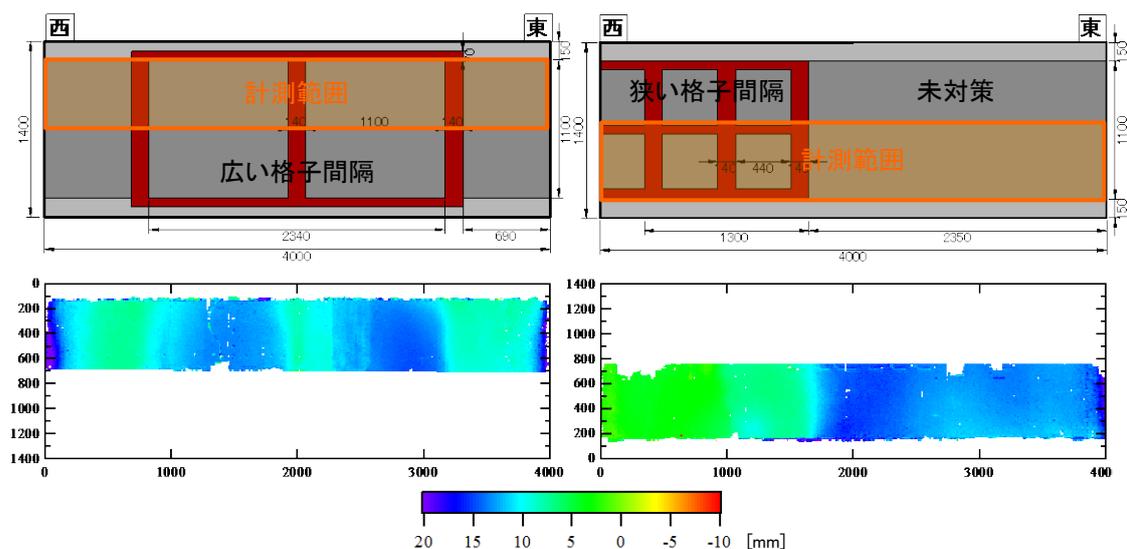


図-付 7.3 レーザースキャナーで計測した舗装表面の沈下量の色塗りコンター図

7.2 変形照査手法、格子状地盤改良のモデル化

滑走路や誘導路を対象とした耐震性能照査においては、上述のような地震後の平坦性に関する照査が必要であり、特にレベル2地震動に対する検討では、数値解析による照査が求められる。砂地盤の液状化を対象とした地震応答解析では、付録-1.3 で示した港湾分野の実務で実績が多い有効応力解析コード FLIP³⁾が広く用いられている。しかし、一般的な FLIP の解析手法は、短い地震動継続時間中の砂地盤における過剰間隙水圧の消散を無視した非排水条件を仮定したもので、過剰間隙水圧の消散による地盤の体積収縮を考慮することができない。そのため、液状化層の体積収縮を別途、室内試験結果から得られたチャート⁴⁾に照らし合わせて簡便に求める方法が広く用いられている。地震応答解析の後に、過剰間隙水圧の消散による地盤の変形を土水連成解析（以後、圧密解析と称する）より求めることで、空港舗装で必要な平坦性を評価することが可能である。

数値解析における格子状地盤改良のモデル化において、三次元モデルは計算負荷が大きく、モデル構築に十分な地盤情報も取得できないため、実務での適用は難しい。よって、図-付 7.4 に示すような、格子状地盤改良の三次元形状を疑似的に二次元でモデル化することが必要となる^{2,5)}。ここで、固化体を面外壁と面内壁に分け、前者は未改良地盤、支持層、改良範囲外の地盤と一体としてモデル化し、後者は未改良地盤と重ね合わせ、面内壁と面外壁で重複する節点

は結合している。

格子状地盤改良では、地盤内に地盤と固化体といった剛性差の大きい材料同士が隣接しているため、地盤と固化体が連続した節点で共有されていると、自重解析の際、剛性が小さく変形が大きな地盤の変形が、剛性が大きく変形の小さな固化体にぶら下がる形状となるため、地盤の応力が過小評価される。そのため、固化体と地盤の境界は二重節点として両者の鉛直変位を分離させる必要があり、その範囲は格子状地盤改良の上部に位置する表層非液状化層及び舗装を含む（**図-付 7.5** 参照）。同様に、二重節点により格子状地盤改良直上の舗装部において解析上の不連続な変形が生じないように解析内容に適した二重節点の変位拘束条件を設定する（**表-付 7.1** 参照）。

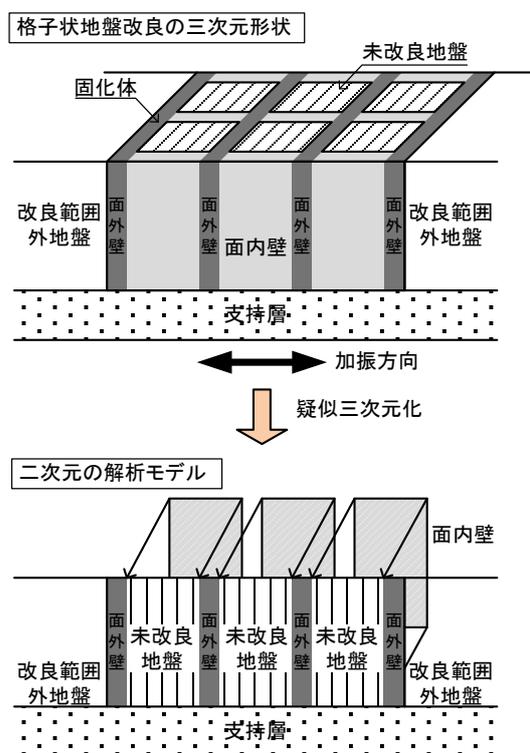


図-付 7.4 解析モデルの二次元化

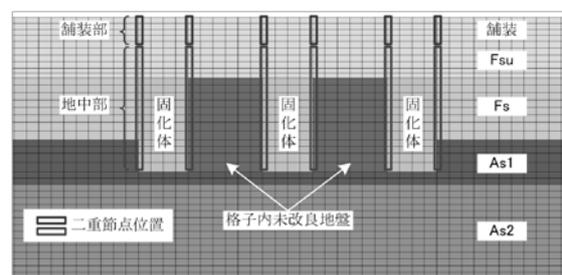


図-付 7.5 二重節点の位置

表-付 7.1 二重節点の変位拘束条件

位置	自由度	自重 解析	地震応 答解析	圧密 解析
	方向			
舗装部	鉛直	自由	接合	接合
	水平	接合	接合	接合
地中部	鉛直	自由	接合	自由
	水平	接合	接合	接合

自由：2つの節点が互いに自由に変位

接合：2つの節点の変位が同一（等変位拘束）

参考文献

- 1) 大矢陽介, 小濱英司, 菅野高弘, 今井政之, 東中邦夫, 佐伯嘉隆: 格子間隔が広い格子状改良直上のアスファルト舗装の変形に関する模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp.I-227-I_241, 2014.
- 2) 大矢陽介, 小濱英司, 菅野高弘, 今井政之, 東中邦夫, 金田一広, 本多剛: 空港舗装直下地盤への格子状地盤改良工法の適用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, 2015.
- 3) Iai S., Matsunaga Y. and Kameoka T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 4) Ishihara K. and Yoshimine M.: Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soil and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 5) 佐伯嘉隆, 大矢陽介, 小濱英司, 佐藤成: 格子状改良を施した空港基本施設における地震時の変形照査手法, 第 34 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, 論文番号 C11-679, 8pp., 2014.