

空港工学講座

空港舗装

～ 現状と課題 ～

フジタ道路株式会社

中央区晴海一丁目8番10号

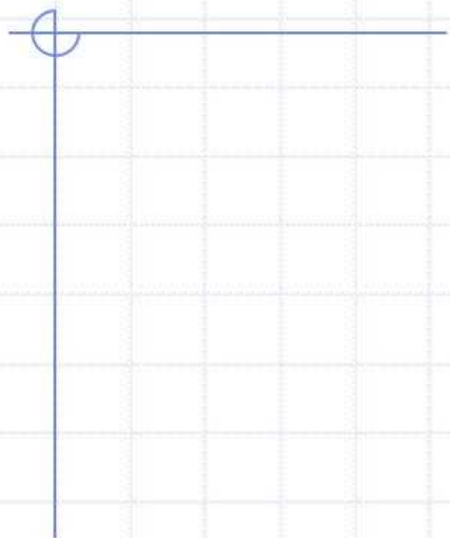
トリトンスクエア オフィスタワーX

TEL: 03-5859-0670(代表)

<http://www.fujitaroad.co.jp/>

内容

- ◆ 空港
- ◆ 航空機
- ◆ 空港舗装の性能
 - 走行安全性能
 - 荷重支持性能
 - ◆ 空港用地／空港舗装／空港舗装の構造設計
- ◆ 空港舗装の評価
- ◆ 空港舗装の課題
 - 地盤関連
 - 舗装関連



空港舗装

空港

空港の定義

◆ 空港vs.飛行場

- 航空旅客の乗降, 貨物の積み降ろしの有無による

◆ 法規

- 条 約: 国際民間航空条約
- 国内法: 航空法

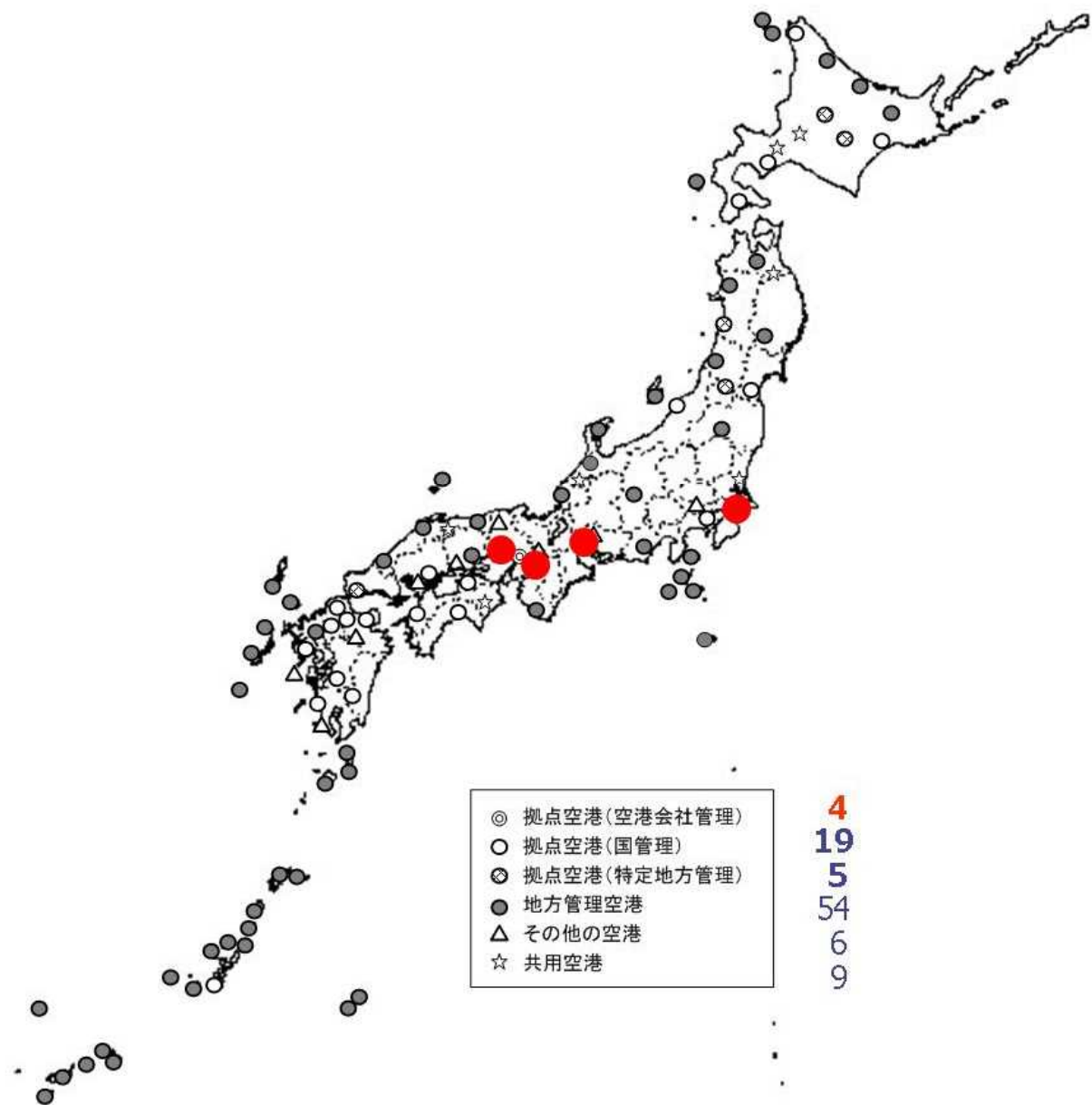
◆ 組織

- 国際民間航空機関(ICAO, International Civil Aviation Organization)が国際連合の専門下部機関として設置

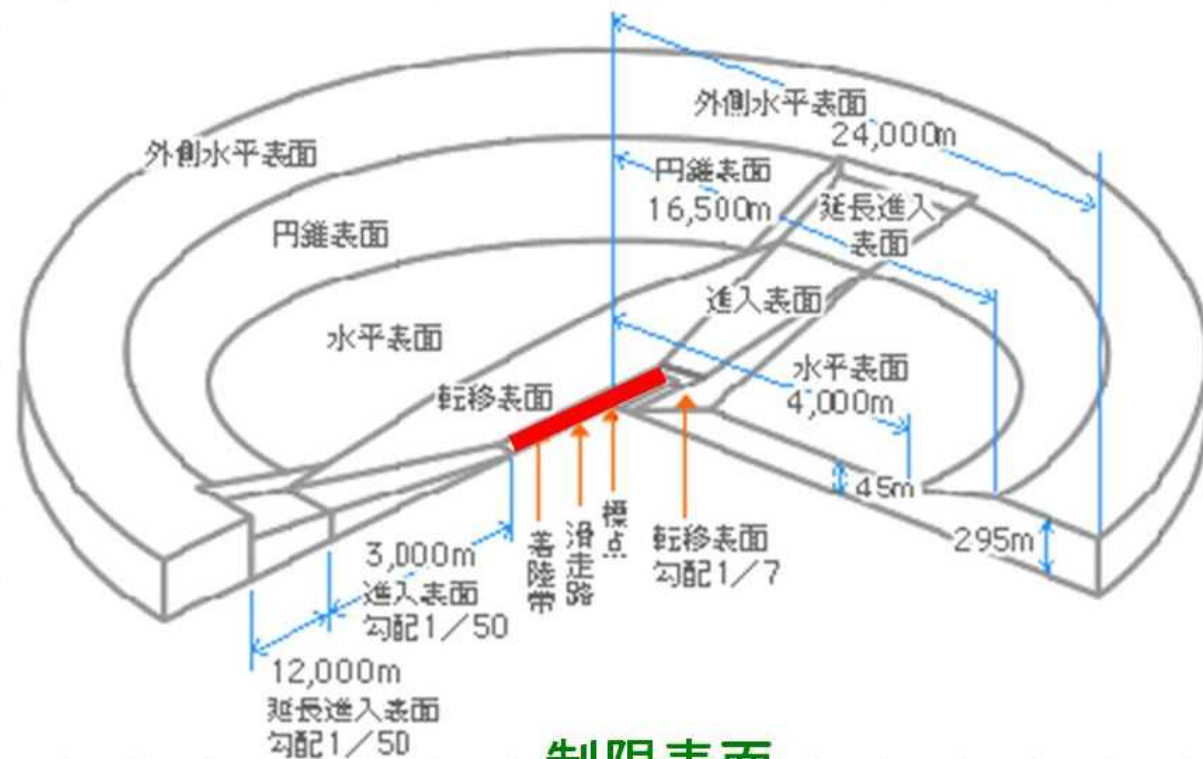
◆ 基準

- 様々な規定は条約附属書として整備
- 空港に係る規定は第14附属書「飛行場」

わが国の空港の分布



空域・空港の広さ



制限表面

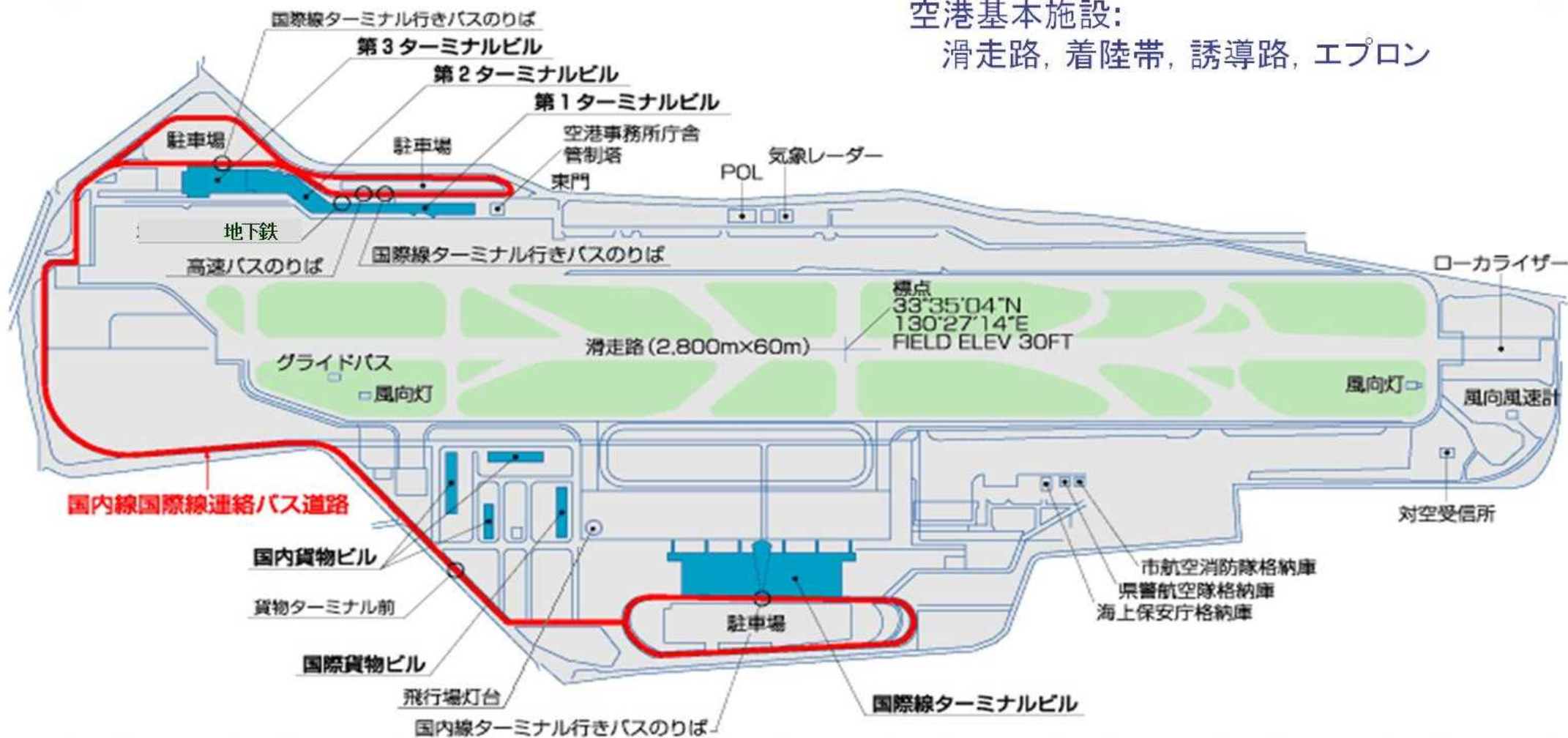


空港vs.野球場

空港内の舗装とその他の施設

空港基本施設:

滑走路, 着陸帯, 誘導路, エプロン



空港基本施設の平面形状

◆ 滑走路

- 長さは航空機の離陸距離，加速停止距離と着陸距離により決定
- 幅員は30mから60mの範囲

就航航空機	滑走路の標準長さ (m)
大型ジェット機	2,500
中小型ジェット機	2,000
プロペラ機	1,500
小型機	800～1,000

◆ 誘導路

- 幅員は最大で30m

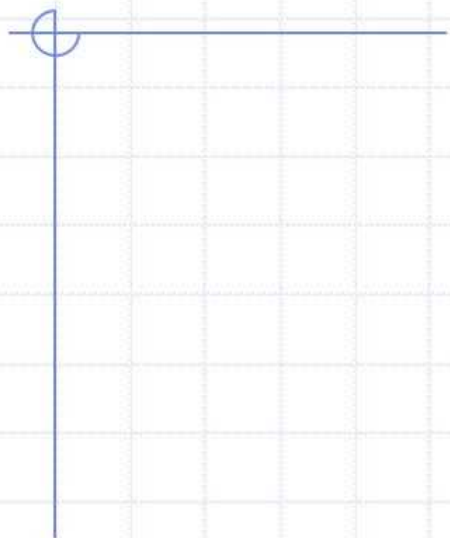
◆ エプロン

- 幅70m，奥行190または130mの広さ
(大型ジェット機・1スポット)

空港舗装の特徴

<道路舗装との比較>

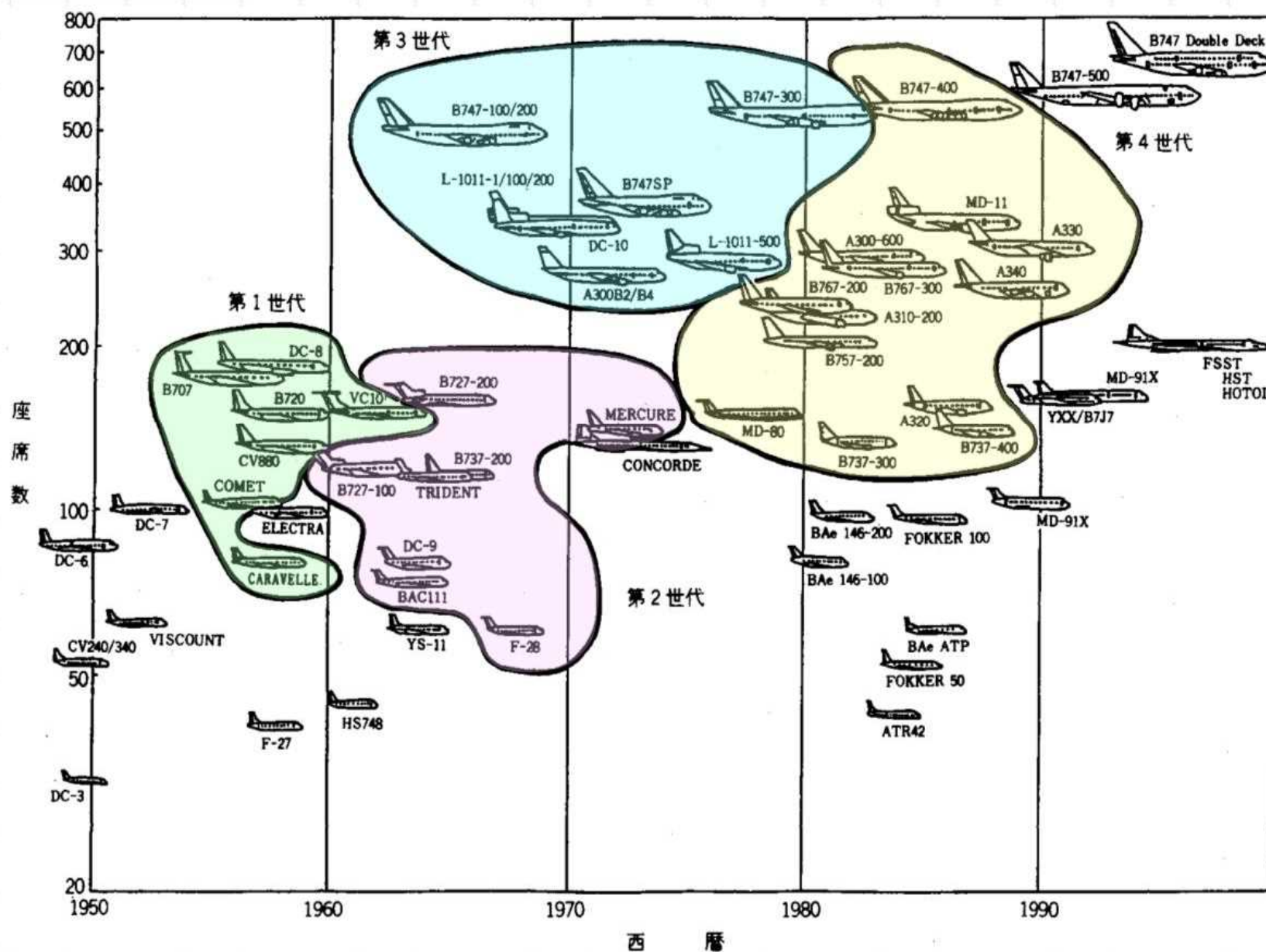
- ◆ タイヤ圧（接地圧）が高い
- ◆ 輪荷重が大きい
- ◆ 走行速度が大きい（滑走路）
- ◆ ジェットエンジンからのブラスト・高熱
- ◆ 舗装損傷による破片は、機体に損傷を与える恐れ
→ FOD (Foreign Object Debris: 異物)



空港舗装

航空機

航空機の変遷



● A380

● B777

● B767

● B767

● A320

● B737

● CRJ

● SAAB 340B

着陸時の衝撃荷重

◆ 滑走路への接線着陸を前提

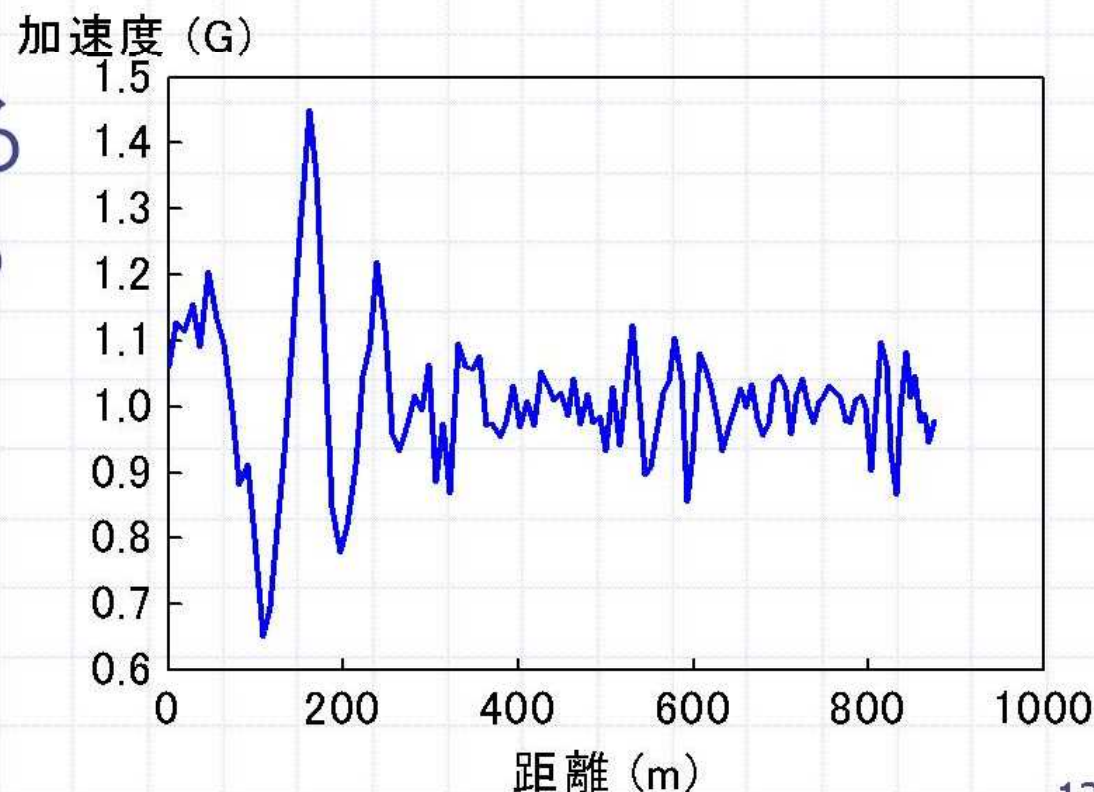
$$F = \frac{W_v}{g} p_v v_0$$

W_v : 航空機重量, g : 重力加速度,
 p_v : 固有振動数(1.1Hz),
 v_0 : 航空機の降下速度(6ft/s).

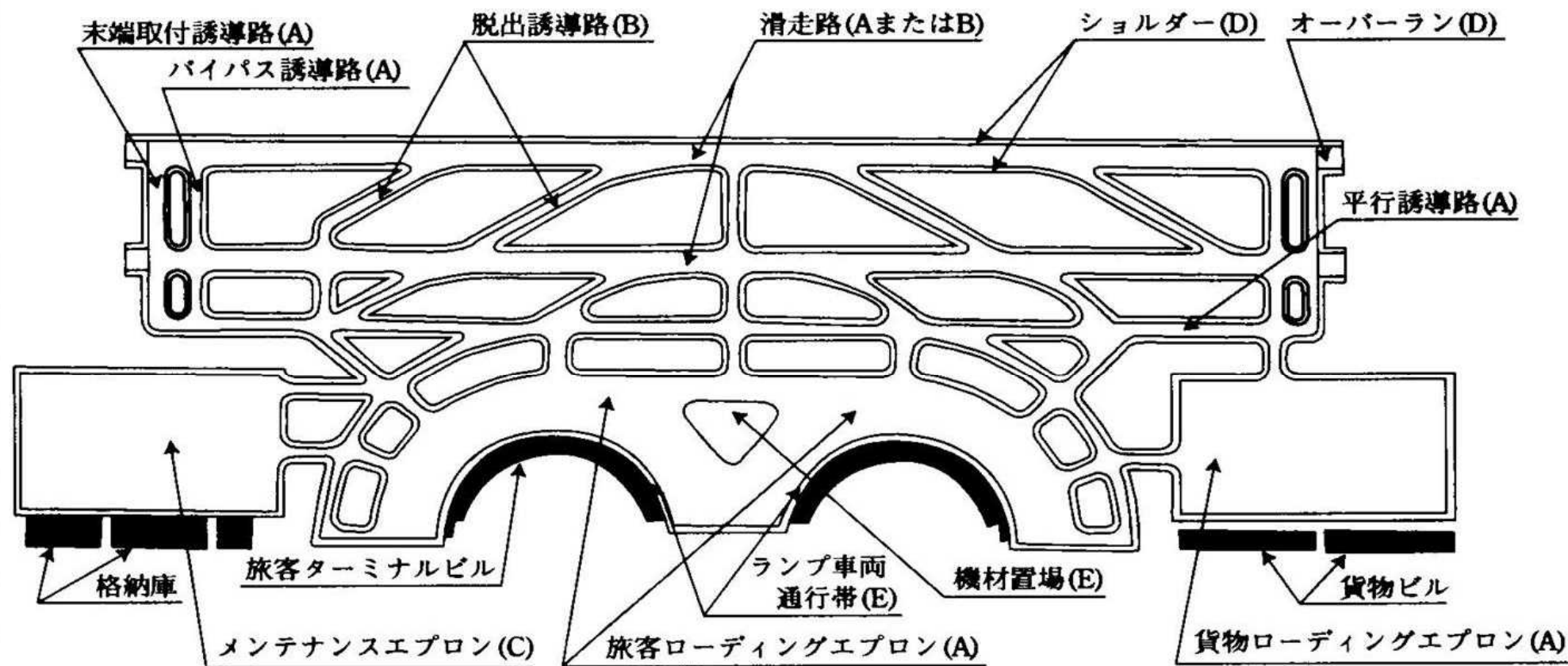
◆ 着陸時には燃料が
ほとんど消費されている

◆ 実測では重力加速度の
1.5倍を超える場合も

➡ 実際には満載時の
1.3倍程度



舗装構造の違い

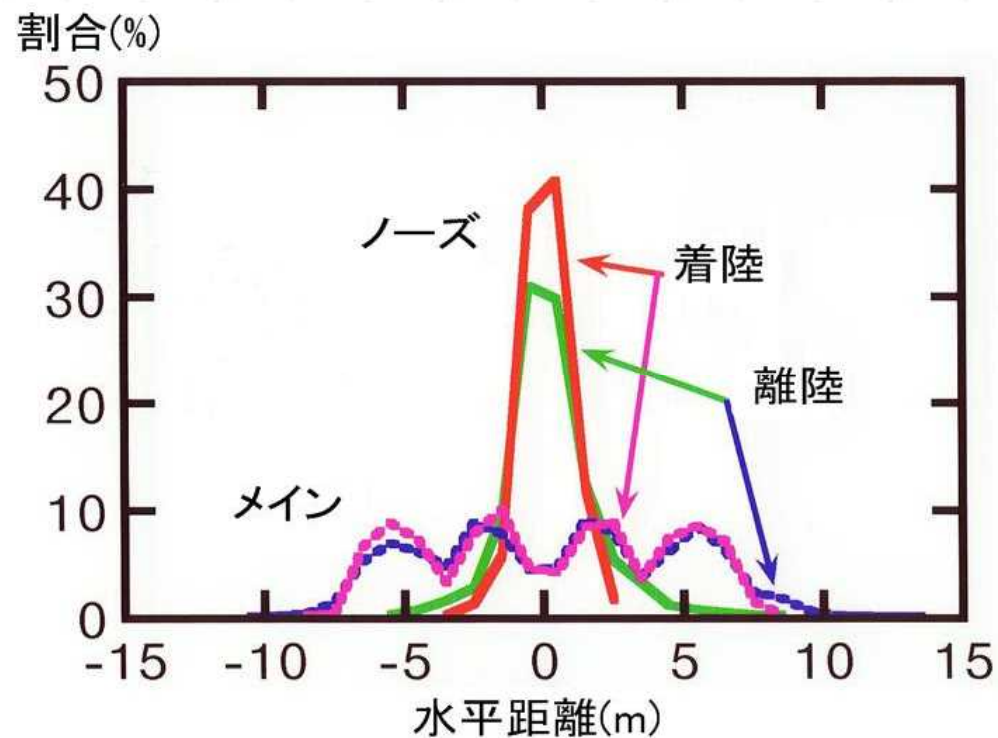


舗装区域	航空機重量	走行速度	走行頻度	舗装区域	航空機重量	走行速度	走行頻度
A	大	中	大	C	小	小	中
B	中	大	大	D	中～大	小～大	小

航空機の横断方向走行位置

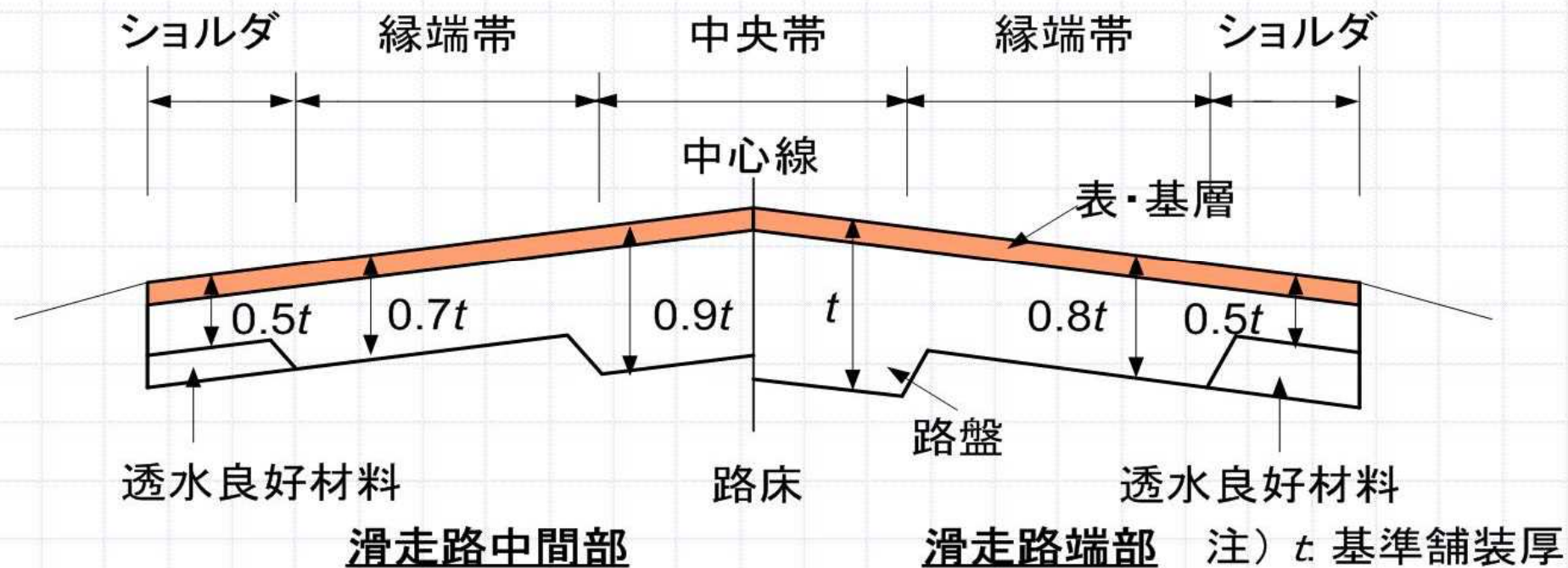


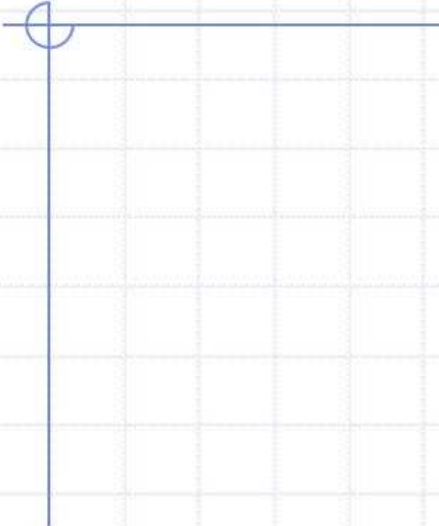
滑走路中心線延長にすえたカメラで撮影



航空機脚の横断方向位置

滑走路の横断方向断面

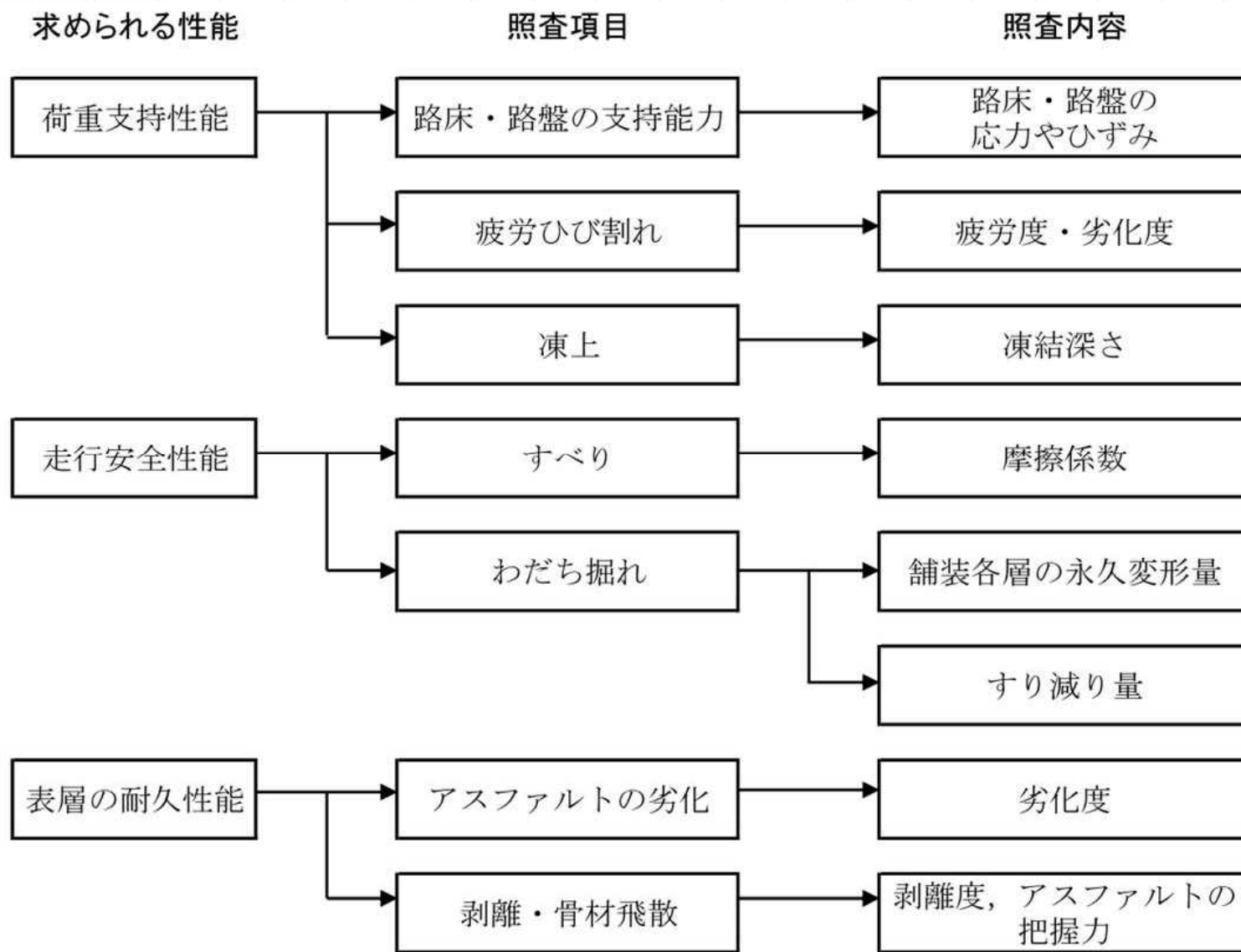




空港舗装

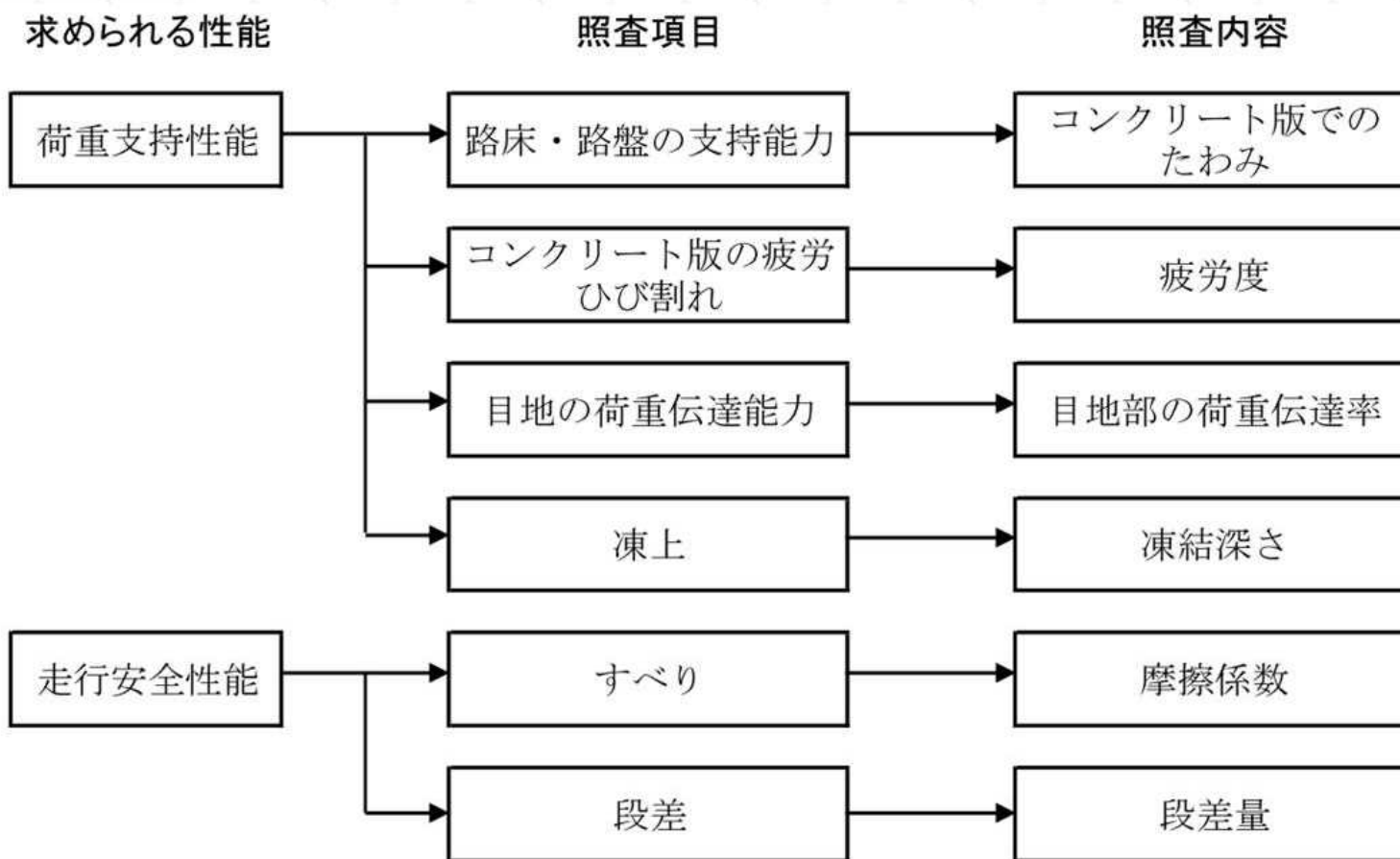
空港舗装の性能

空港舗装の性能と照査 (AS)

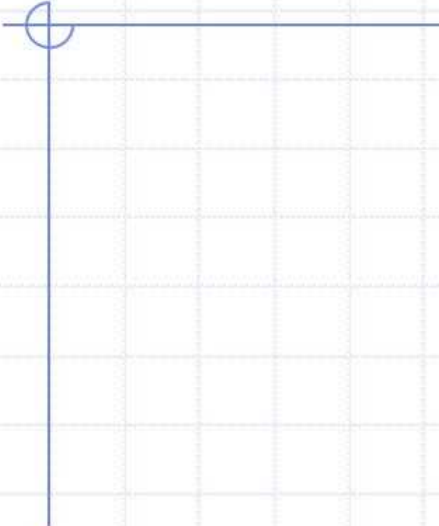


空港
アスファルト舗装

空港舗装の性能と照査 (CO)



空港
コンクリート舗装



空港舗装

空港舗装の性能： 走行安全性能

平坦性

◆ 滑走路・誘導路：高速走行性，排水性の観点から

◆ 滑走路の縦断形状

- パイロットの操縦しやすさに関わる観点
- 乗客も含めた乗心地の観点
- 縦断勾配，視距離，縦断勾配の変化量と勾配変化点間隔と
いった項目
- 舗装建設時の平坦性に関する項目

滑走路長 (m)	縦断勾配 (%)	勾配変化量 (%)
1,500以上	1.0以下	1.5以下
900以上1,500未満	1.0以下	1.5以下
900未満	1.5以下	2.0以下

◆ 滑走路の横断形状

- 排水性能に関わる観点。
中心線から左右へ1.5%の勾配

◆ エプロン：排水性，駐機安定性の観点から

- 排水上から0.5%が最小値，
駐機安定性から1.0%が最大値

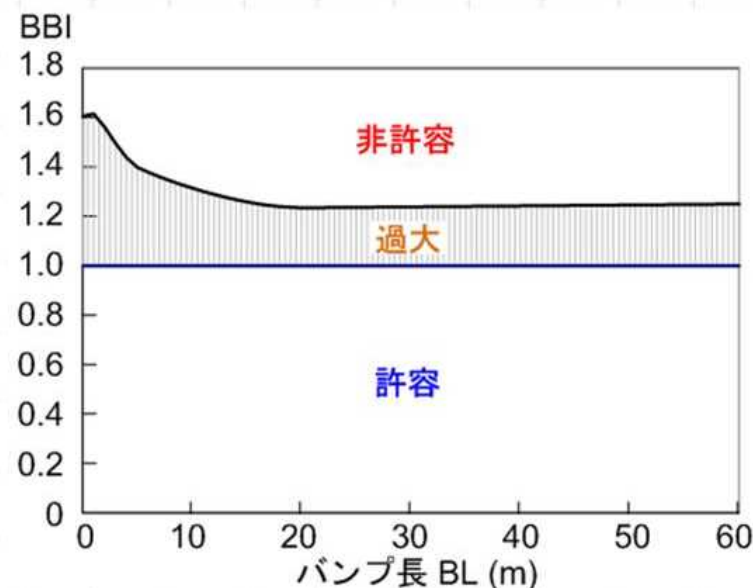
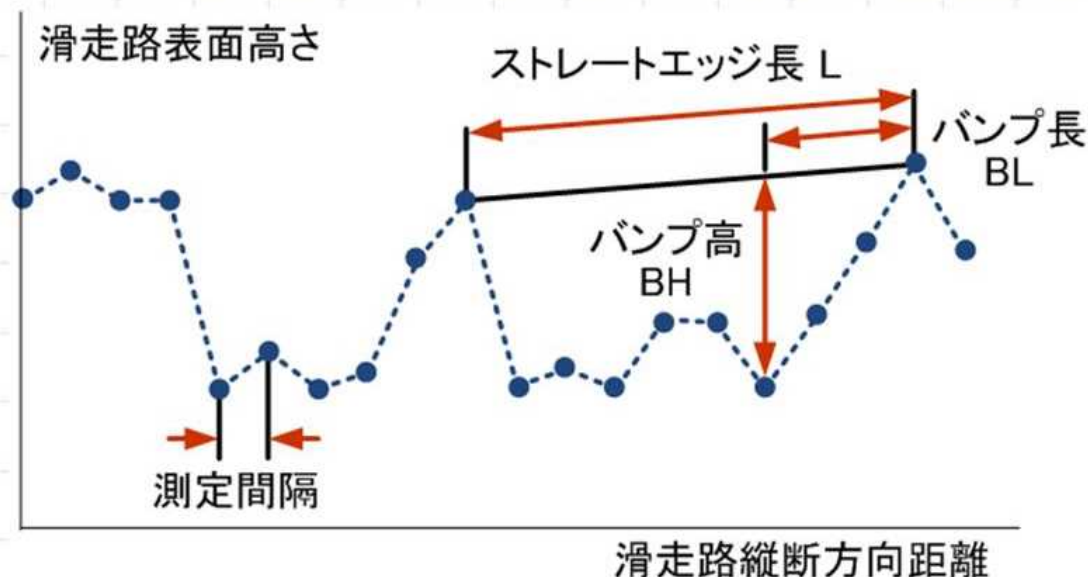
BBI (Boeing Bump Index)

◆ 計算方法

$$BBI = \text{Max} \left\{ \left(\text{BH}_{\text{測定値}} / \text{BH}_{\text{許容値}} \right), L = 0.5 \sim 100 \text{m} \right\}$$

◆ 判定方法

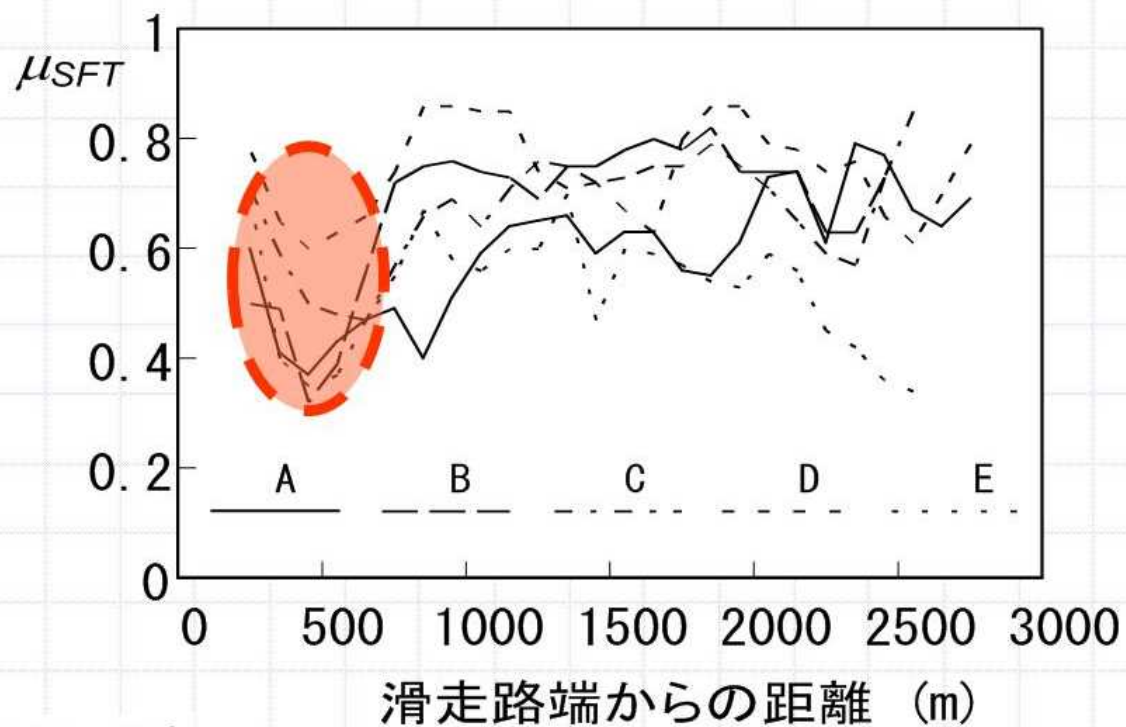
- 許容: 新設時. パイロット不平・脚疲労(上限時)
- 過大: 乗員・乗客不平. 補修実施すべき
- 非許容: 滑走路閉鎖. 補修必須



すべり抵抗性



時間経過



路面のすべり抵抗性(規準)

降雨時

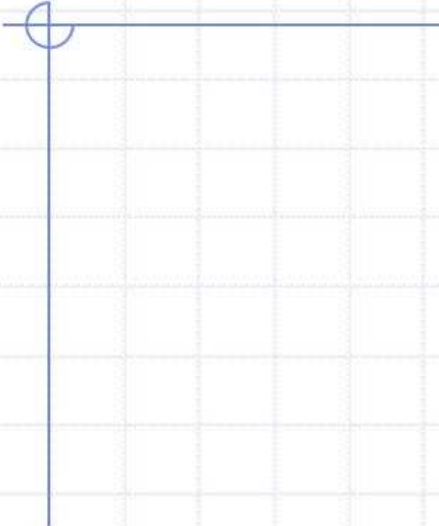
装置	速度 (km/h)	タイヤ	グルーピング	
			あり	なし
μ-メータ	65	RL-2	0.60	0.50
SFT	95	RL-2	0.55	0.45
		AERO	0.45	0.40

管理目標
(提案値)

降・積雪時

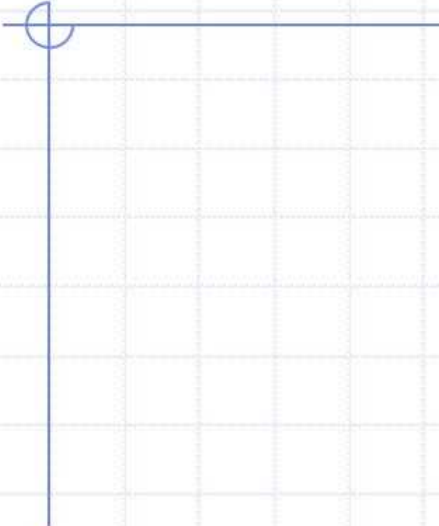
測定値	ブレーキング アクション	コード
0.40以上	Good	5
0.39-0.36	Medium~Good	4
0.35-0.30	Medium	3
0.29-0.26	Medium~Poor	2
0.25以下	Poor	1

最大積雪深と横風
速度により最終判断



空港舗装

空港舗装の性能： 荷重支持性能



空港舗装

荷重支持性能： 空港用地

空港用地

◆ 面的

↔ 道路・鉄道用地は線的

◆ 平坦・水平な表面

↔ 道路・鉄道は凹凸・勾配許容

- 時速300kmもの速さで航空機が離着陸

◆ 建設時点からの長期安定必要

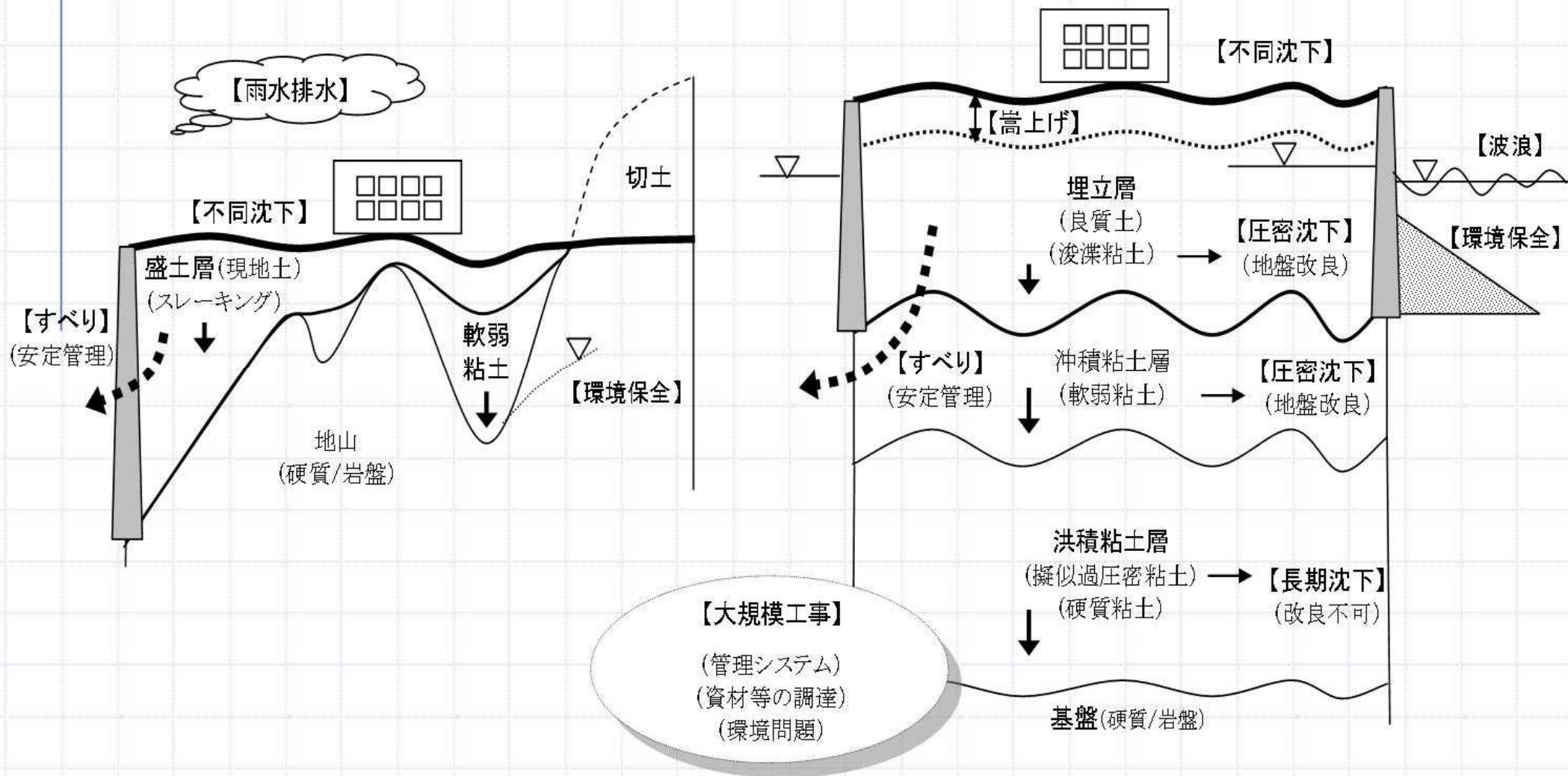
↔ 道路では段階的な施工可能

- 不同沈下等に対する厳しい条件付与

◆ 造成

- 切土・盛土（山岳地域）
- 埋立（海上）

空港用地造成の課題



山岳空港

海上空港

山岳高盛土空港／海上埋立空港



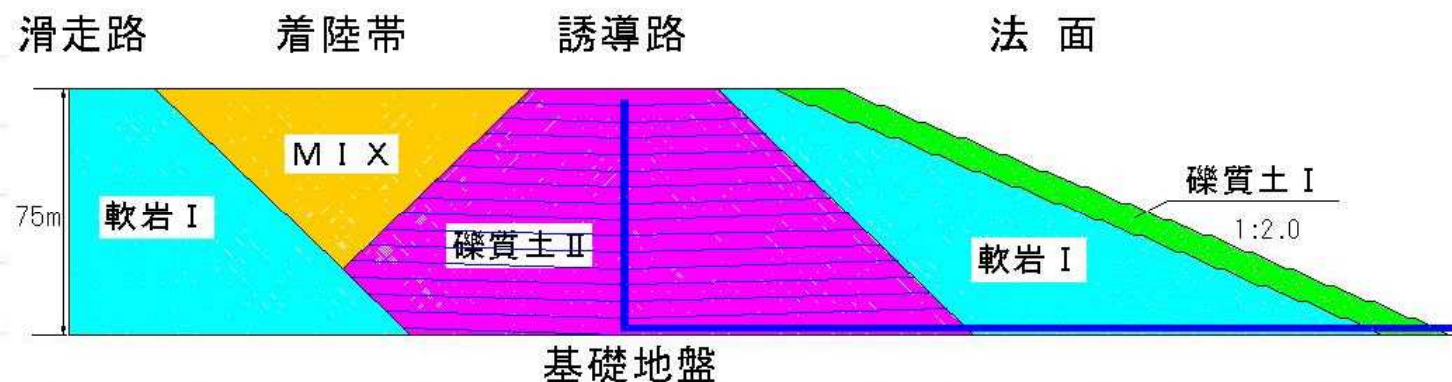
山岳高盛土空港

西

東

山岳高盛土空港の特徴

- ◆ 切盛土量のバランス
 - 土量変化率(L値とC値)を考慮して計画作成
- ◆ 盛土の安定検討
 - ゾーニング



- 常時: 計画安全率は1.2以上
- 地震時: 計画安全率は1.0以上
 - ◆ レベル1地震動: 空港の継続的な使用が可能
 - ◆ レベル2地震動: 盛土全体が崩壊しない
- ◆ 高盛土の残留沈下対策
 - 軟岩盛土: 締固め度の増加
 - 高含水比粘性土盛土: 二次圧密量の事前検討

建設中の海上埋立空港



海上埋立空港の特徴

◆ 海底地盤

- 千差万別：水深，土層構成，沈下量

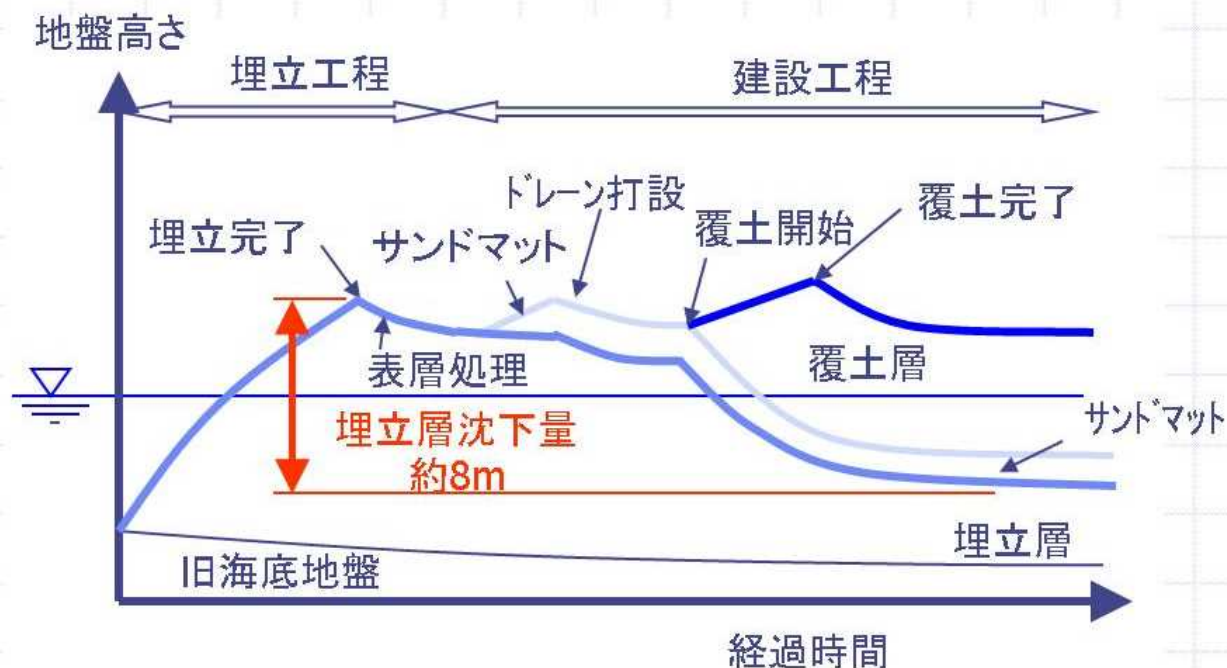
◆ 用地造成工法

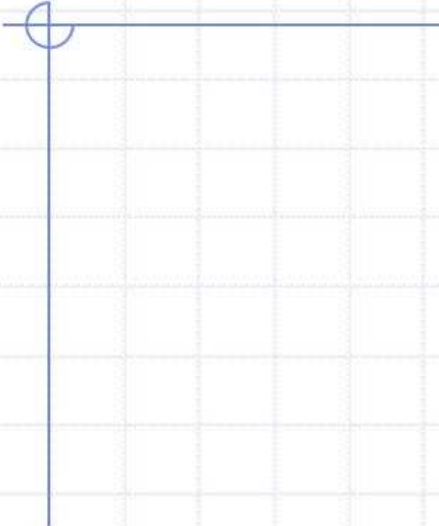
- 立地条件（水深，波高，海底地盤，潮流等）

施工技術
経済性

◆ 長期的な沈下

- 沈下予測
埋立かさ上げ
建設後維持管理





空港舗装

荷重支持性能： 空港舗装

荷重支持性能:ICAOの基準

◆ $ACN \leq PCN$: OK

- ACN: Aircraft Classification Number
- PCN: Pavement Classification Number

◆ 過大航空機への対応

- 質量
 - ◆ $< 1.1PCN$: アスファルト
 - ◆ $< 1.05PCN$: コンクリート
- 交通量
 - ◆ $< \text{全体の} 5\%$

舗装の構造設計

◆ 荷重

■ 交通荷重

- ◆ 大きさ (P): 最大航空機
- ◆ 頻度 (N): 航空機便数, 横断方向ばらつき

■ 環境: 表層温度, 凍結深

◆ 地盤

■ 路床CBR

■ K値

◆ 設計法

■ 性能照査型

■ 仕様規定型

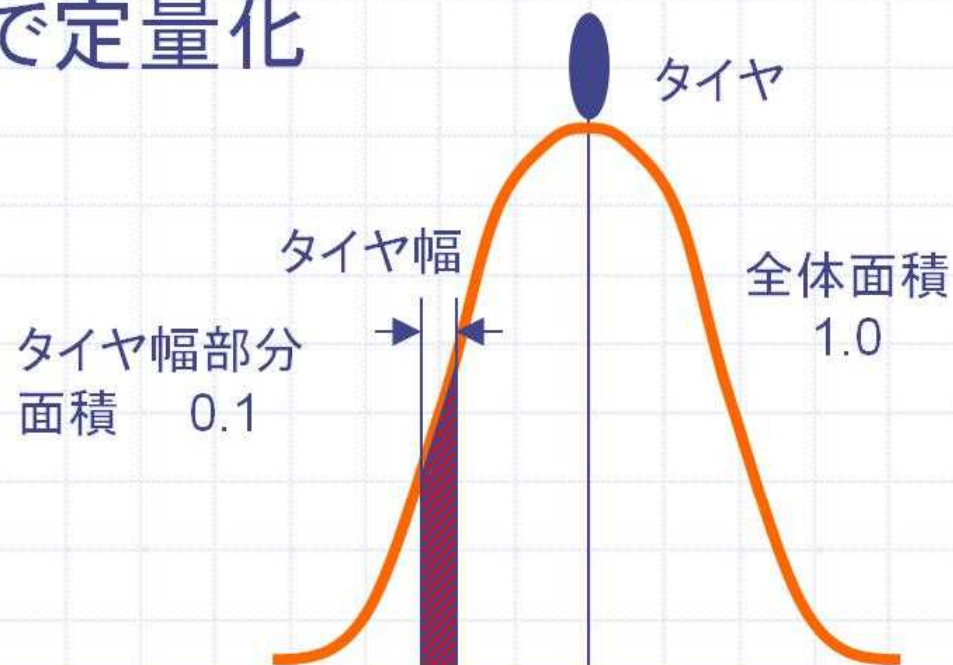
- ◆ アスファルト: CBR法, ...
- ◆ コンクリート: Westergaard式, ...

航空機：横断方向走行位置

◆ パス/カバレッジ率で定量化 (P/C)

$$P/C = 1/0.1 = 10$$

走行10回でカバレッジ1回



- 走行位置分布を正規分布式と仮定
- 標準偏差から算出

航空機 コード	滑走路 離陸時	滑走路 着陸時	平行 誘導路	高速脱出 誘導路
E, F	0.91	1.74	0.67	0.74
B~D	0.74	1.10	0.57	0.63

(単位: m)

環境

◆ 温度：アスファルト舗装

- アスファルト種類の変更

◆ 温度：コンクリート舗装

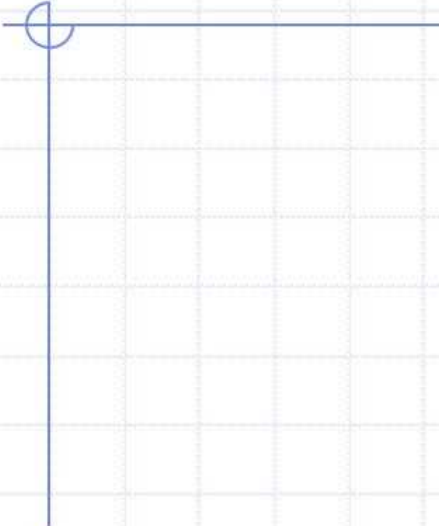
- 変形（伸縮・そり）拘束応力算定

◆ 温度：凍結深

- 非凍上材料に置換え



凍上によるひび割れ



空港舗装

荷重支持性能： 空港舗装の構造設計

性能照査型設計法（疲労ひび割れの例）

- ◆ 照査はアスファルト混合物層の底面における疲労破壊に対して行う.

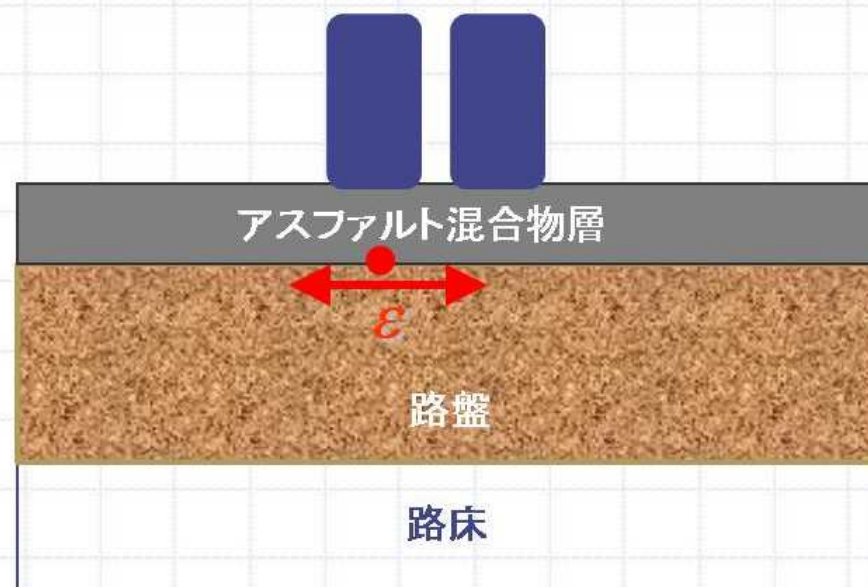
$$\gamma_i \cdot FD_d / FD_{dl} \leq 1.0$$

- ◆ FD_d : 設計疲労度 (= 構造解析係数 $\gamma_a \times$ 疲労度 FD)
- ◆ FD_{dl} : 設計疲労度の限界値 (= 疲労度の限界値 1.0 / 構造層係数 γ_b)
- ◆ γ_i : 重要度係数

$$FD = \frac{n}{N}$$

← 載荷回数 n

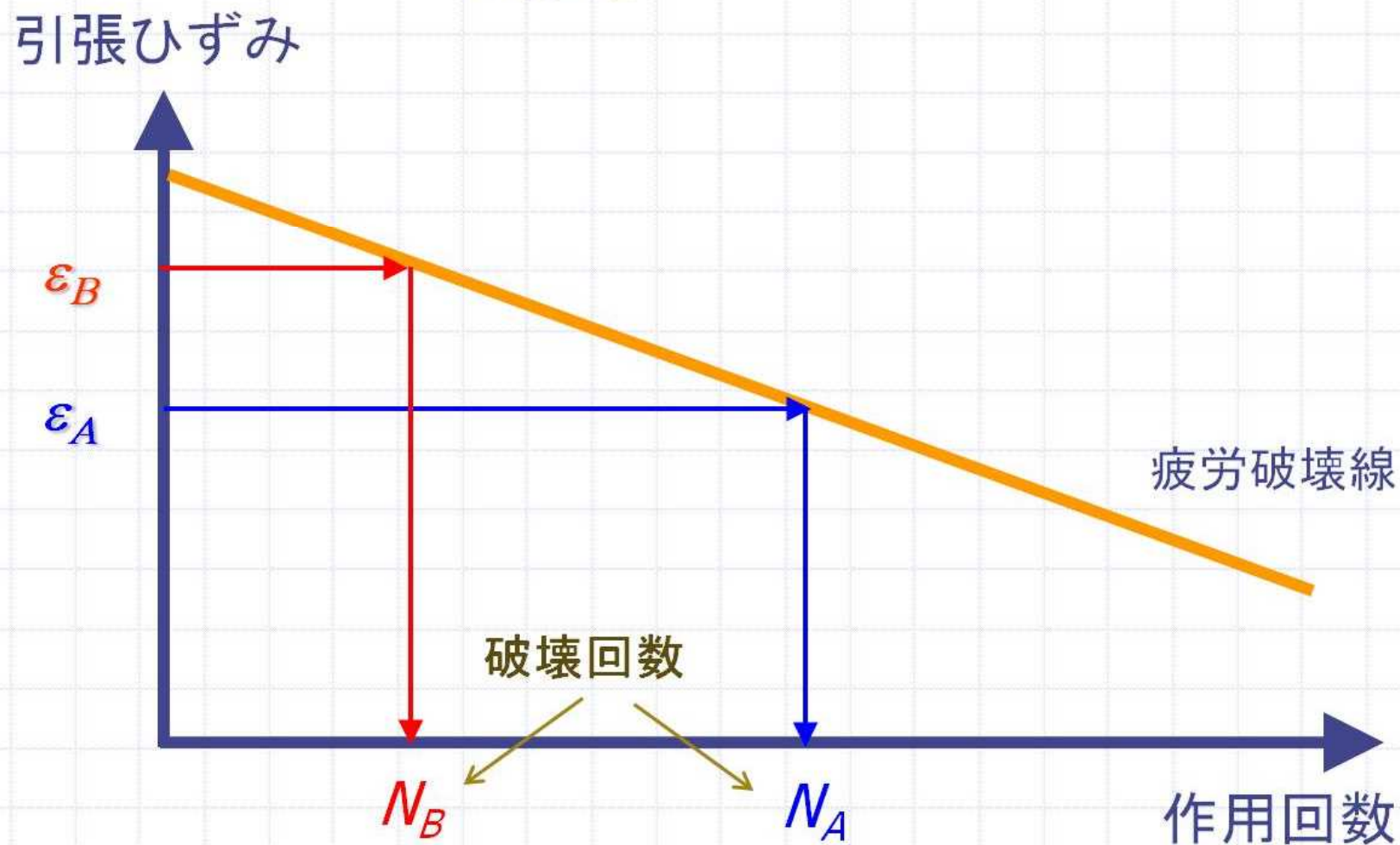
← 破壊回数 N



疲労度の計算

$$\text{疲労度 } FD = \sum \frac{n_i}{N_i}, i = A, \dots, Z \text{ (ひずみレベルの種類)}$$

↑ 载荷回数
↑ 破壊回数



仕様規定型: アスファルト舗装厚

◆ 反復作用回数 5,000回

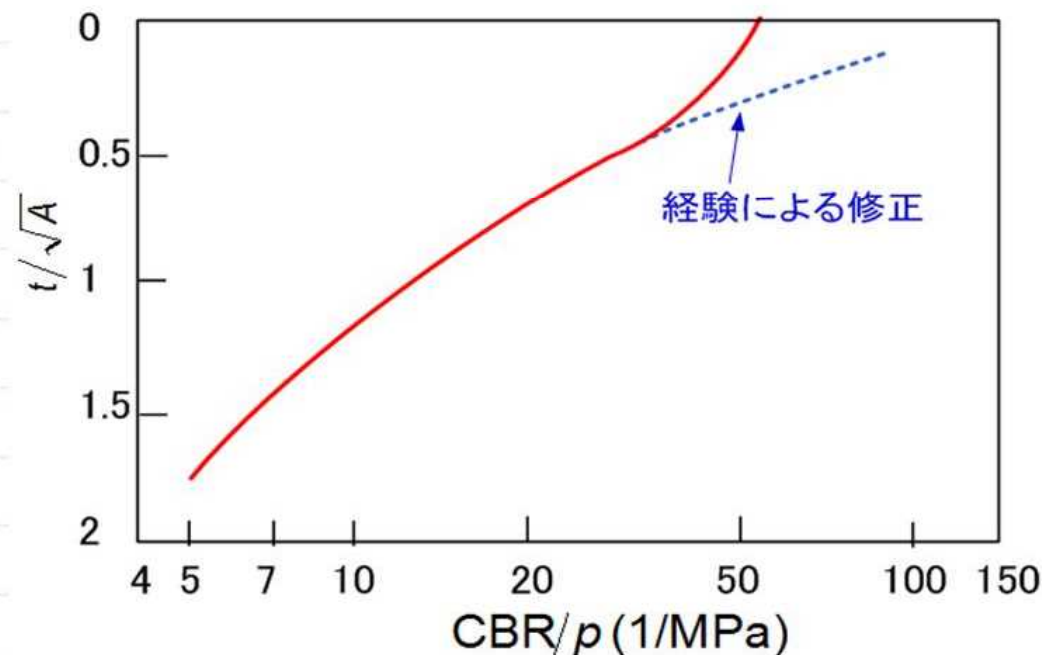
$$\frac{t}{\sqrt{A}} = \sqrt{\frac{1}{0.057 \frac{\text{CBR}}{p}} - \frac{1}{\pi}}$$

- A: 車輪接地面積 (mm²)
- t: 舗装厚 (mm)
- p: 接地圧 (MPa)

◆ カバレッジ C 回

$$t_C = f \cdot t_{5000}$$

$$f = 0.23 \log C + 0.15$$



仕様規定型:コンクリート舗装厚

◆ Westergaard中央載荷公式により荷重応力算定

- コンクリート曲げ強度5MPa
- 路盤支持力係数70MPa/m

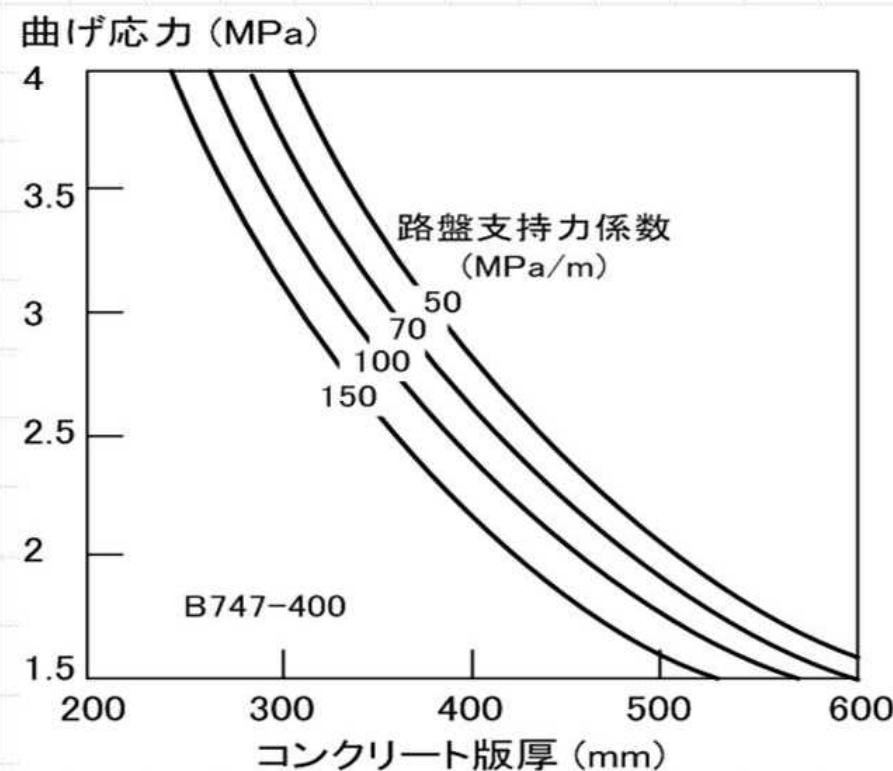
◆ 目地荷重伝達機能十分

◆ 温度応力は安全率にて考慮

- 1.7 (6,000回)
- 2.0 (10,000～40,000回)
- 2.2 (80,000回)

設計荷重の区分 (代表航空機)	設計カバレッジ		
	3,000	5,000～20,000	40,000
LA-1 (B-747)	37	42	45
LA-12 (A-300)	32	36	39
LA-2 (A-320)	30	34	36
LA-3 (DC-9)	27	30	32

(単位: cm)

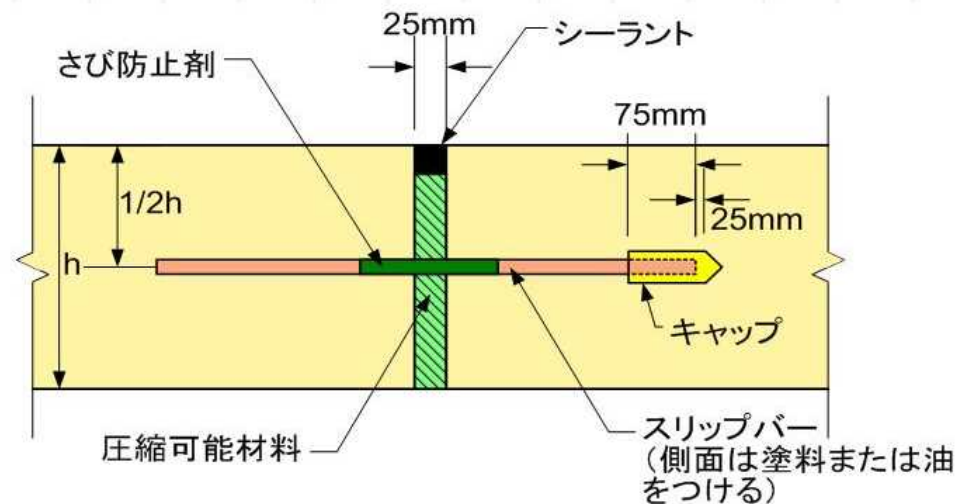
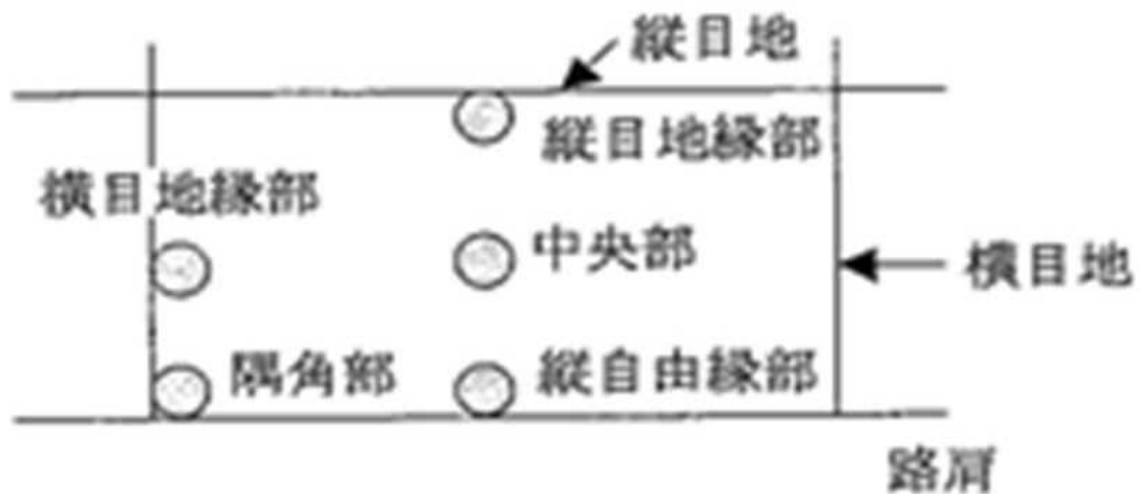


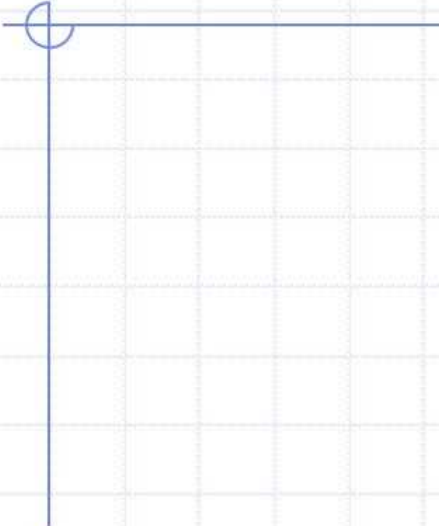
◆ 荷重応力

- 中央部＜隅角部＜目地部＜縁部

◆ 目地が必要

- ## ■ 施工目地, 収縮目地, 膨張目地

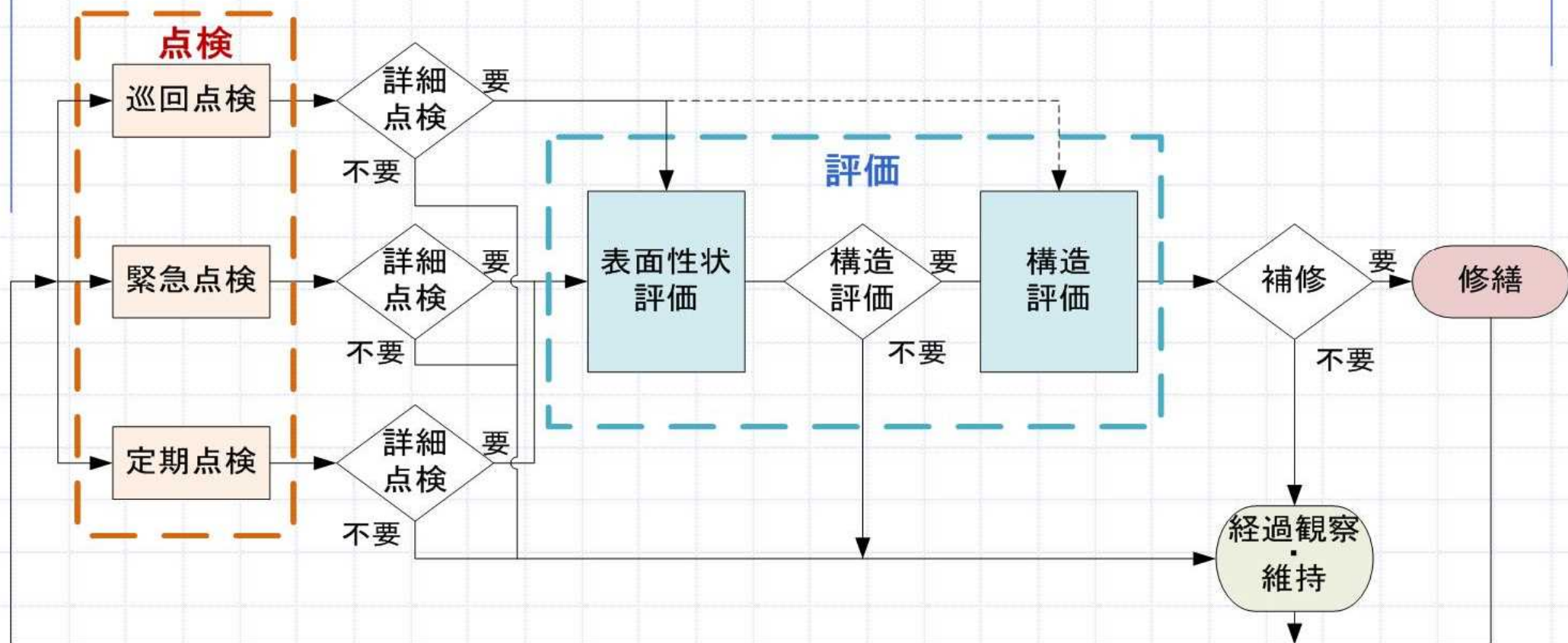




空港舗装

空港舗装の評価

空港舗装の保全システム



点検の種類

◆ 巡回点検

- 異常の有無, 異常箇所, 損傷の進行状況の把握
 - ◆ ひび割れ, 変形, 段差, 摩耗, 崩壊, グルーピングの異常, 目地破損, 座屈, 表面状況, 標識, 舗装表面

◆ 緊急点検

- 被害状況, 異常の有無, 供用の適否の確認
 - ◆ 緊急事態の状況に応じて巡回点検の点検項目から選定

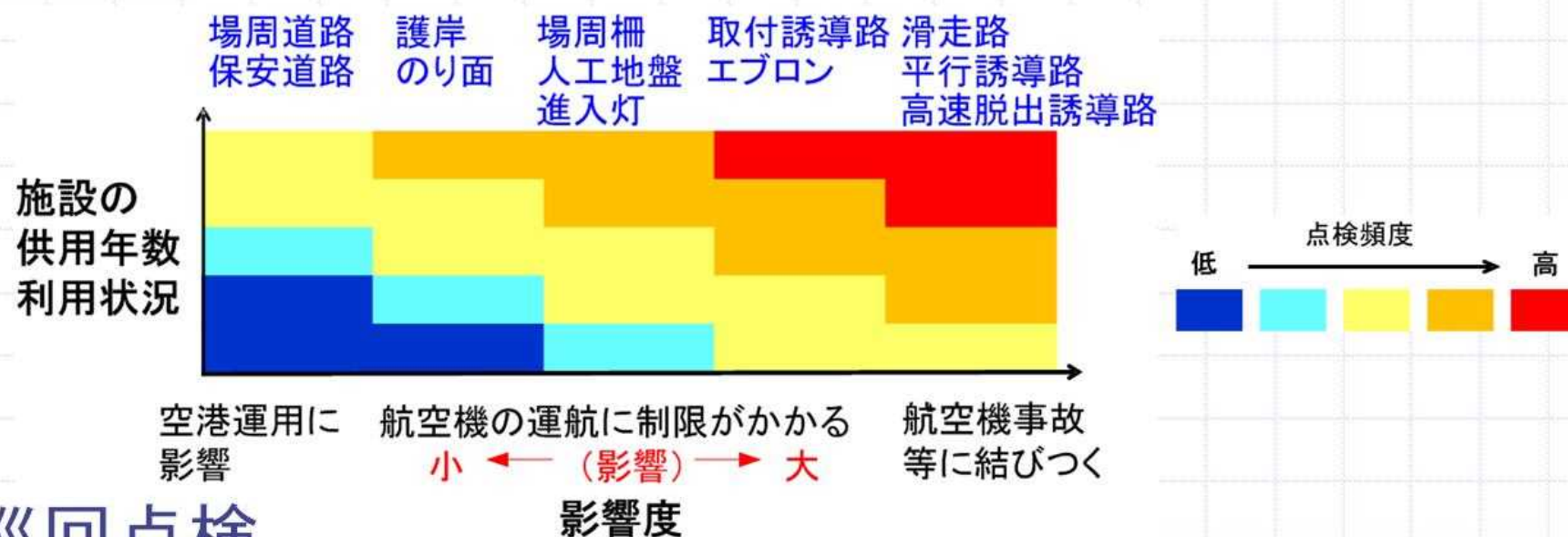
◆ 定期点検

- 異常の程度や状態, 劣化の進行状況等の確認・評価
 - ◆ 湿潤時摩擦係数, 縦横断勾配, ひび割れ・わだち掘れ・平坦性(AS), ひび割れ・目地部破損・段差(CO)

◆ 詳細点検

- 異常原因の詳細調査・対策等検討に必要な情報の取得
 - ◆ 舗装の用途, 構造, 異常の形態や程度等に応じて選定
 - 空港の建設状況, 立地条件, 運航状況を考慮

点検の頻度



巡回点検

- 12回／年(標準). うち3回は徒歩, 残りは車上から

緊急点検

- 震度4以上, 台風等被害想定時, 航空機事故時(目安)

定期点検

- 摩擦係数-1回／1年, その他-1回／3年(標準)

詳細点検

- 他の点検結果から必要となる時

定期点検

◆ すべり摩擦係数

- SFT (Surface Friction Tester)による測定

◆ 表面状態

- アスファルト舗装

- ◆ ひび割れ, わだち掘れ, 平坦性
個別評価

- コンクリート舗装

- ◆ 3種類の破損に基づくPRI (Pavement Rehabilitation Index)

$$PRI = 10 - 0.290CR - 0.296JC - 0.535SV$$

CR: ひび割れ, JC: 目地部破損, SV: 段差

A, B(1~3), Cの5段階で補修必要性を判定

詳細点検

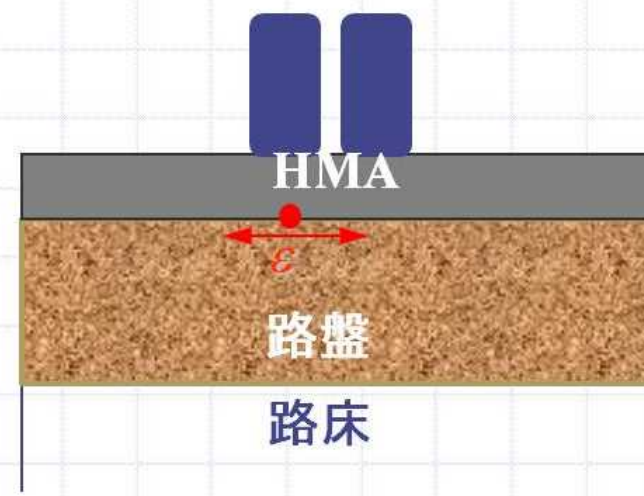
◆ 非破壊調査

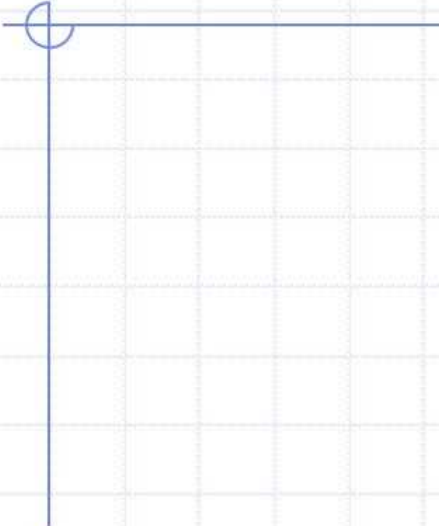
- FWD (Falling Weight Deflectometer)による構造調査
 - ◆ 「計測たわみ」と「規準たわみ」の比(たわみ比)による評価
 - たわみ比 > 1.0: 構造上問題あり
 - ◆ コンクリート舗装目地部の荷重伝達機能
- 熱赤外線カメラによる剥離探査
 - 夜間: 剥離部温度 < 健全部温度
- 累積疲労度による構造調査

$$\frac{\text{設計疲労度} \times \text{重要度係数}}{\text{設計疲労度の限界値}} < 1.0$$

◆ 解体調査

- 構造問題の可能性
 - ◆ 小: アスファルト混合物層
 - ◆ 大: アス混 + 路盤・路床
- 解体調査の項目
 - ◆ アスファルト量, 安定度, 空隙率, CBR, 含水比等

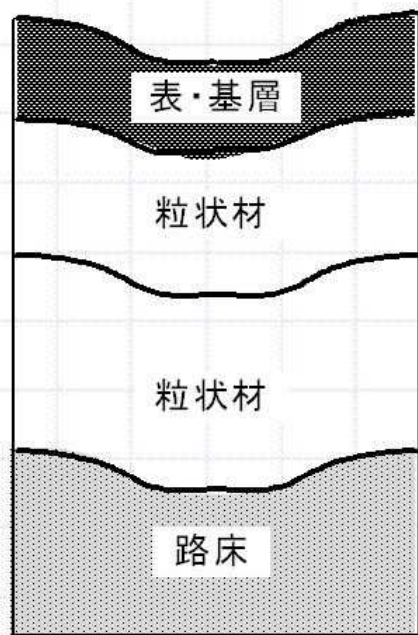




空港舗装

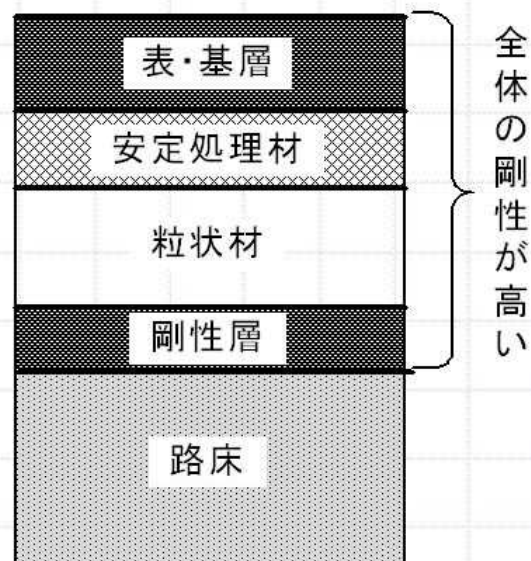
空港舗装の課題（地盤関連）

軟弱路床上のアスファルト舗装



従来舗装

軟弱地盤の影響により舗装面の沈下が著しい



サンドイッチ舗装

舗装全体の剛性が高いため舗装面の沈下の問題はない



コアサンプル

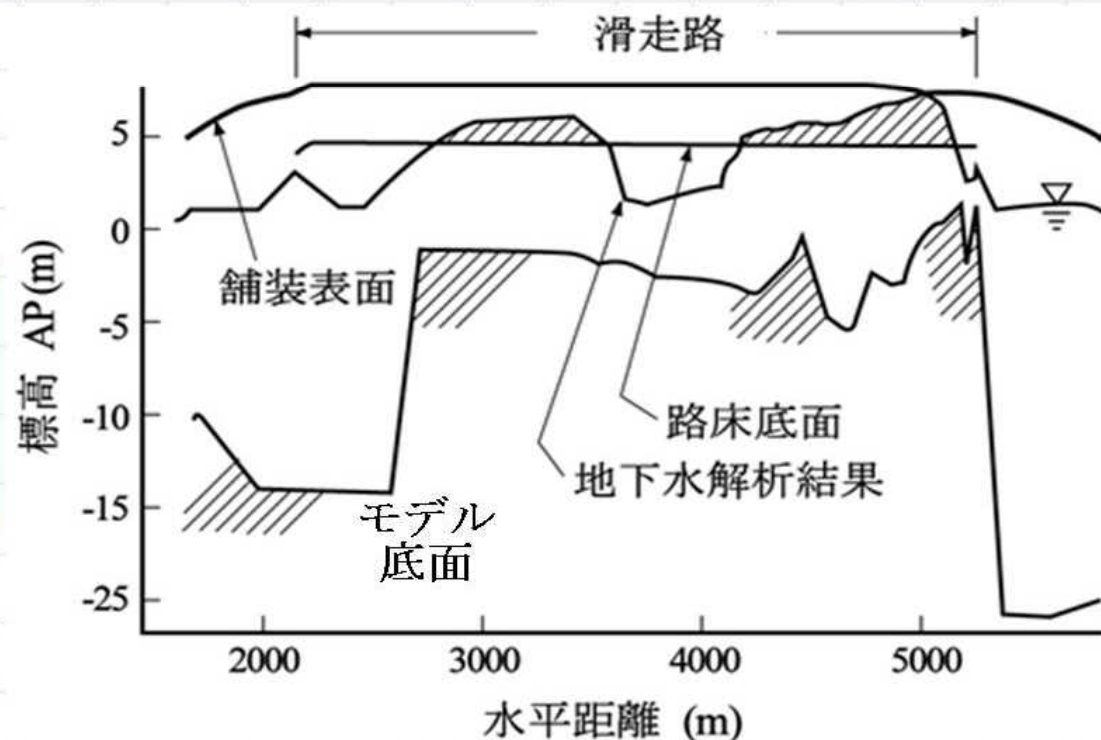
- ◆ 路床(原地盤)上に剛性の高い層を設け、それと舗装上部(表層・基層と安定処理材層)とで粒状材(砂利)層を挟み込む舗装形式.
- ◆ 航空機荷重を路床の広い範囲に分散して小さくできるので、舗装を薄くできるとともに表面の不同沈下を防止できる.

高地下水位への対応

- ◆ 滑走路供用後もかなりの部分で地下水位が路床内部に浸入
- ◆ 水で飽和された舗装は損傷を生じやすく、舗装破壊の原因となる。
- ◆ 工期の制約がある中で良好な施工性を確保する必要



路床下部に排水層を設置し、
舗装および路床全体への地
下水の浸入を防止



将来地下水位の予測結果（供用後5年）

滑走路の舗装構造設計

表層:

密粒アスファルトコンクリート(50mm厚)雨天時の表面排水性の確保, すべり抵抗性を増加させるためのグルーピング施工

基層:

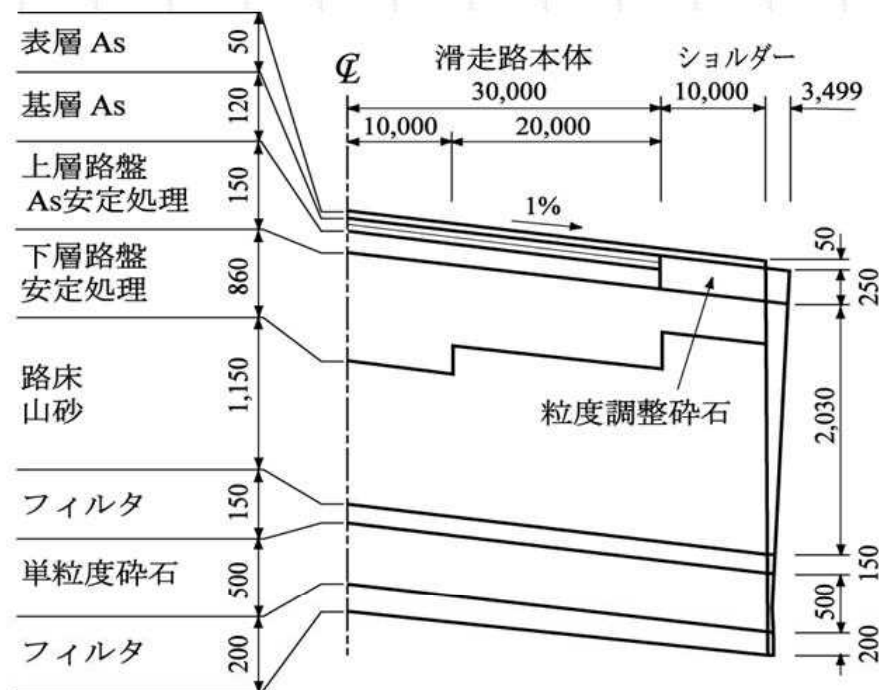
粗粒アスファルトコンクリート(120mm厚, 2層仕上げ)

上層路盤:

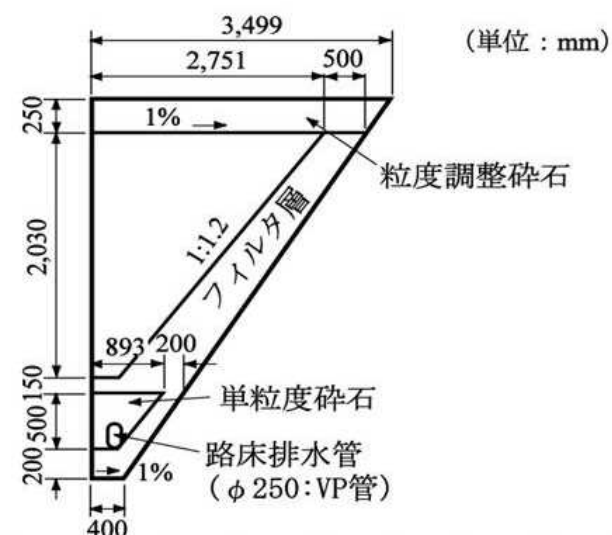
安定処理材料(150mm厚)
(粒度調整碎石の標準厚300mm)

下層路盤:

安定処理の切込碎石(860mm厚)

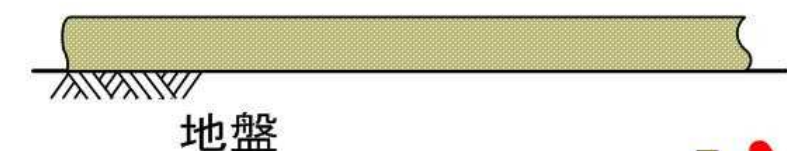


(端部詳細)

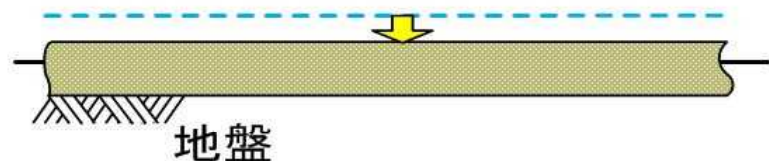


滑走路の舗装断面

地盤沈下対策

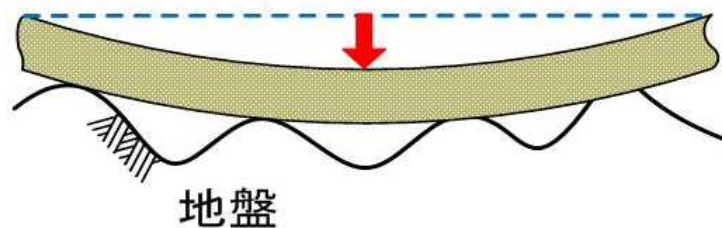


均一な沈下



平坦性問題あり, 構造問題なし

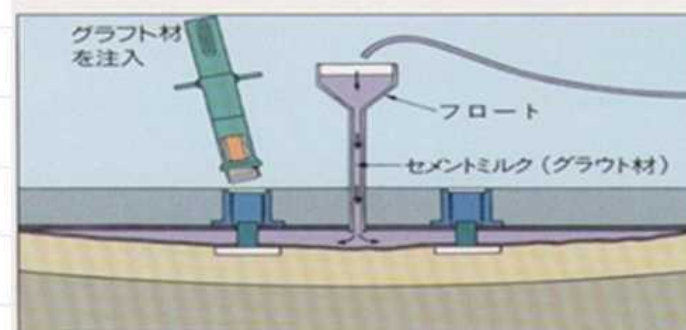
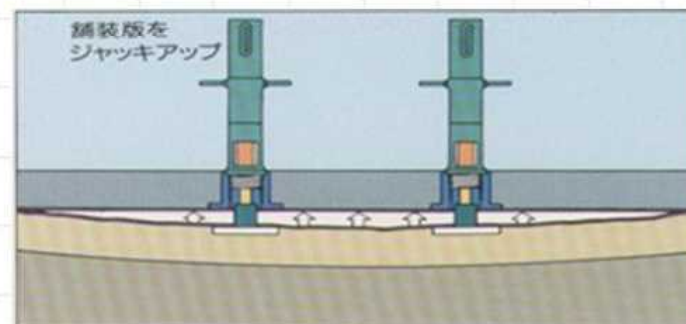
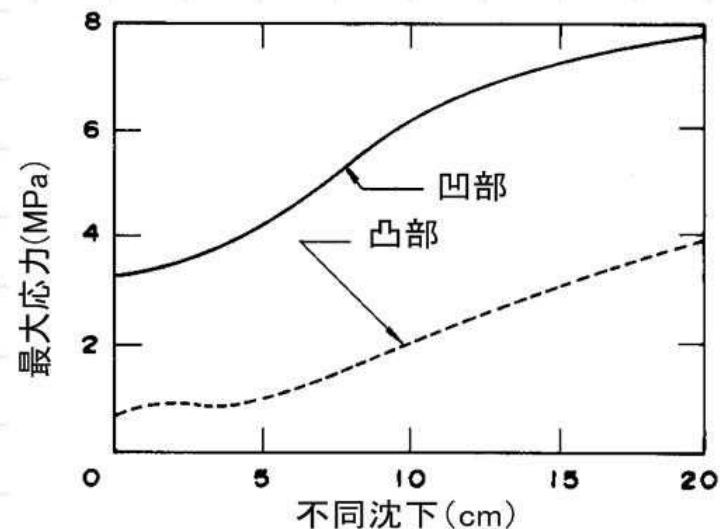
不均一な沈下



平坦性・構造問題あり

コンクリート版
増厚

PC版
リフトアップ



液状化対策



液状化による被害の状況



実大規模液状化実験による
地盤改良方法の検証



舗装応急復旧

空港舗装

空港舗装の課題（舗装関連）

アスファルト舗装のブリスタリング対策



グルーピングの湾曲



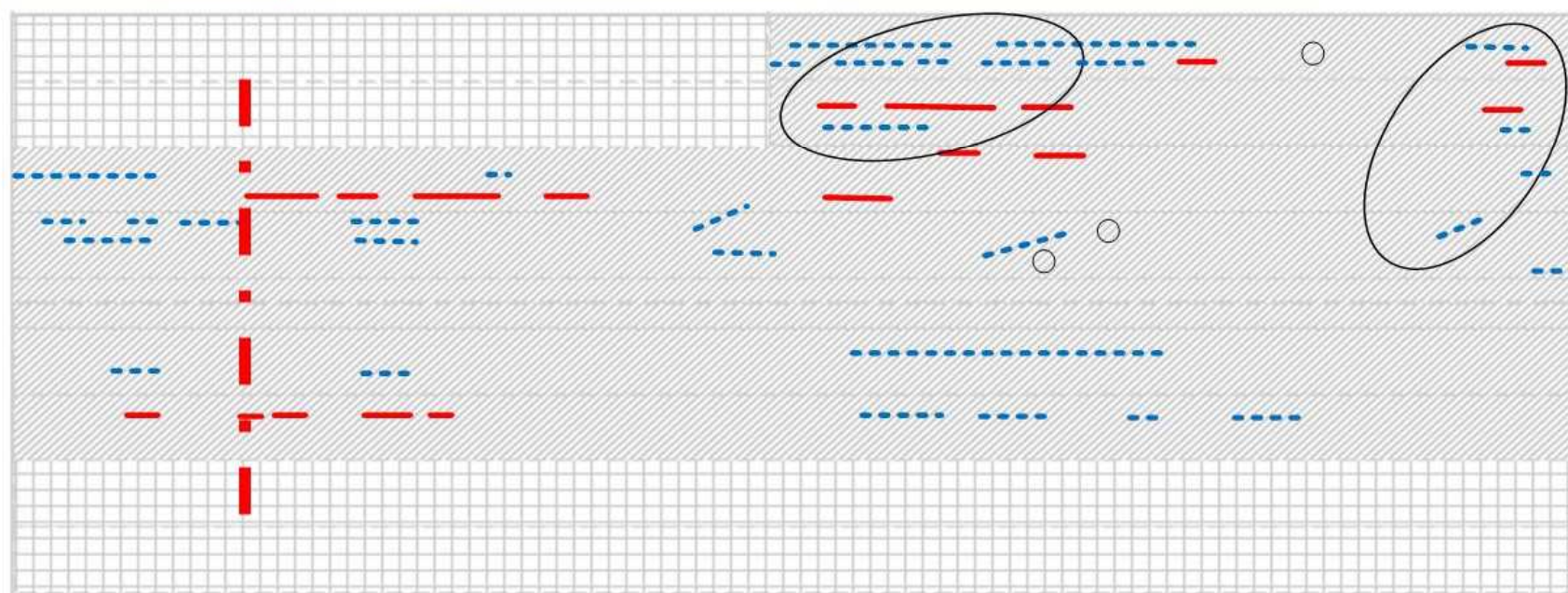
滑走路の損傷事故



改修



コンポジット舗装の改良（破損状況）



表面のくぼみ

表層施工目地のしみ

黒・白の斑点

○ 灯器周辺の流動

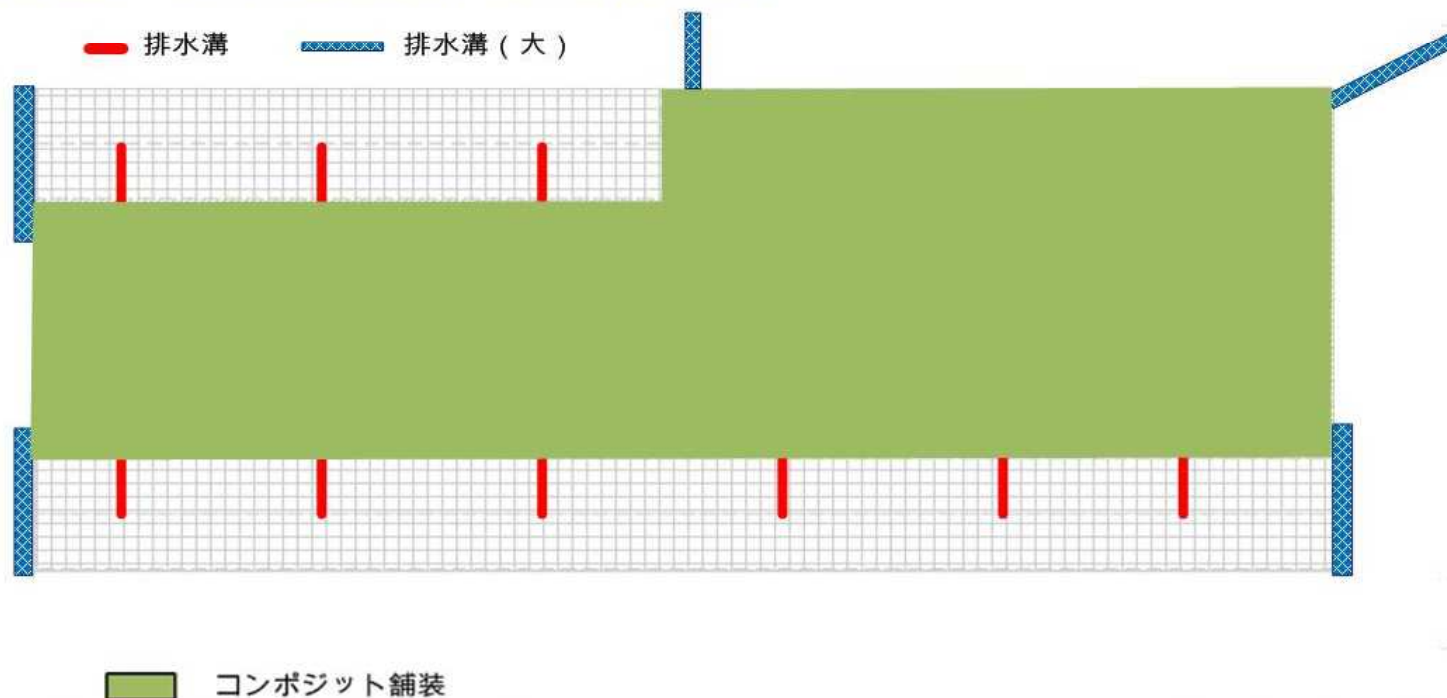
コンポジット舗装の改良(対策)

◆ アスファルト混合物打換え

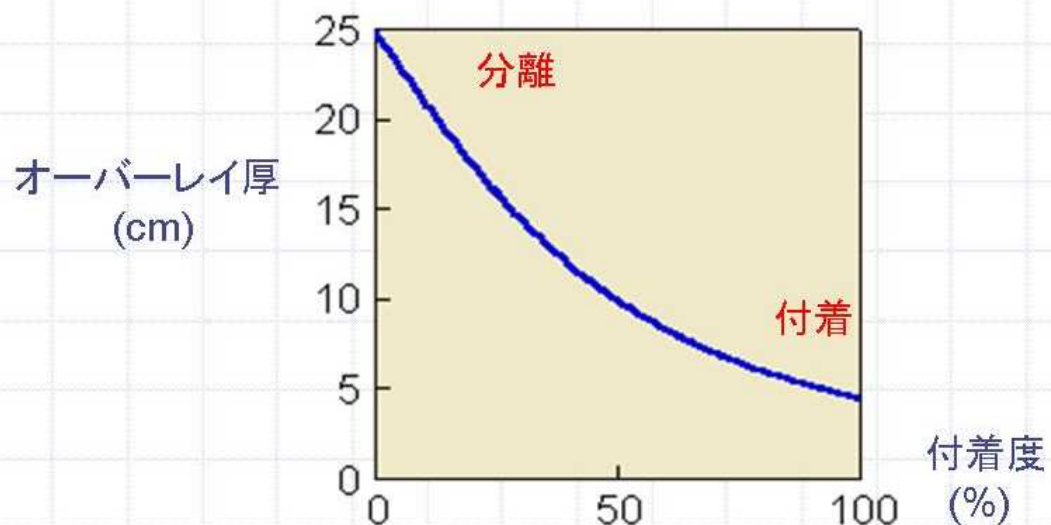
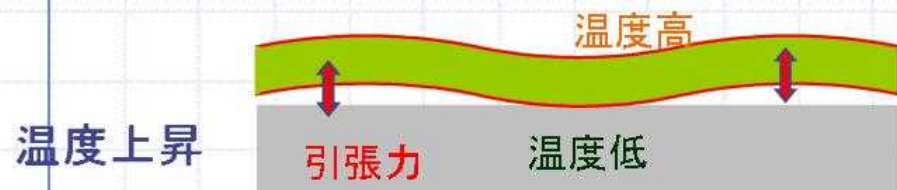
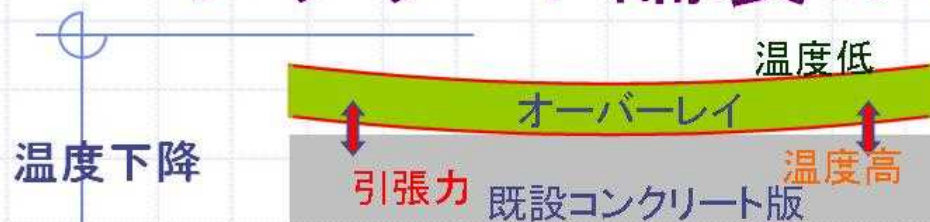
- 表層: 60mm厚, 改質II型, 密粒度, 20mmトップ
- 基層: 40mm厚, 改質H型, 排水性, 13mmトップ

◆ 排水溝の設置

- 両側コンクリート版に溝切り(幅6~10mm程度)
- 周囲に排水性舗装による排水溝



コンクリート舗装の付着オーバーレイ



ウォータージェット



ショットブラスト



接着剤

FOD Potential Rating

◆ 対象項目 : FOD

- 舗装損傷によるFODの危険性を評価
- エンジン位置の低い航空機で重要

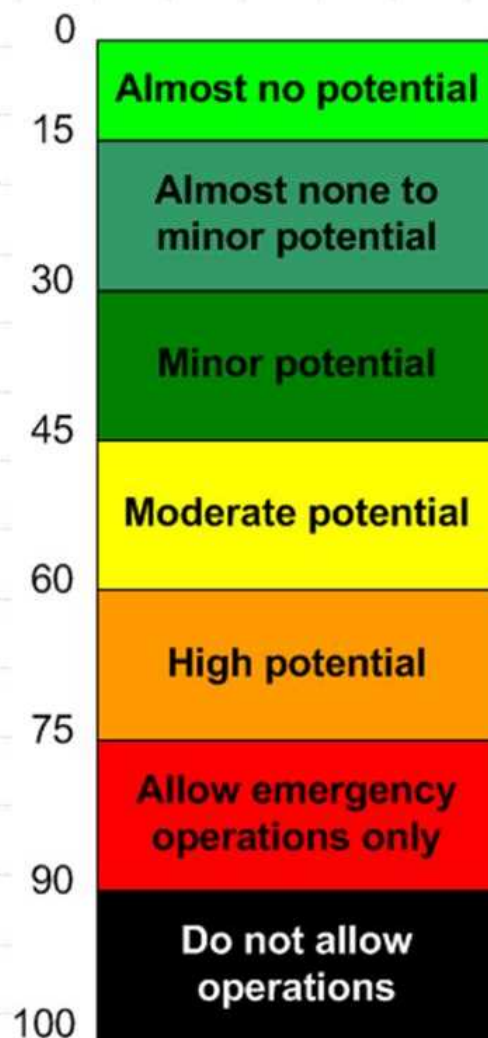
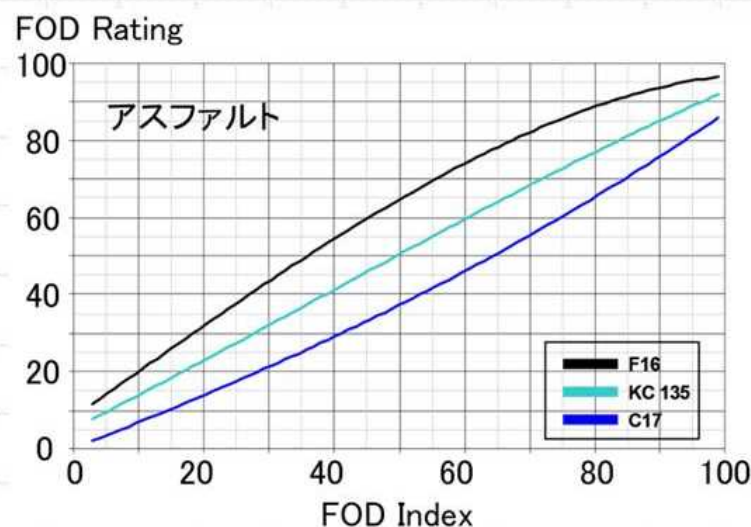
◆ 算定方法

- FOD Index, 舗装種別, 航空機種類により定量化

- FOD Rating

- ◆ 0～100点
- ◆ 問題なし

運航禁止に
ランク分け



FOD Rating