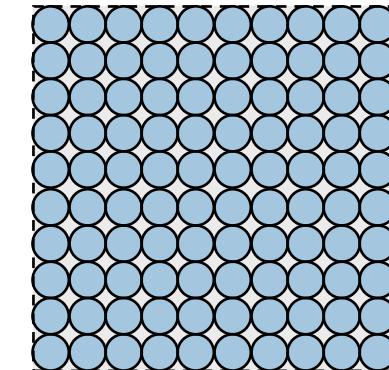
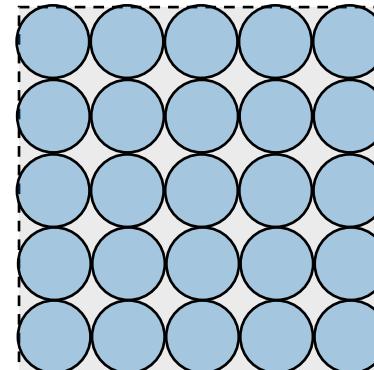
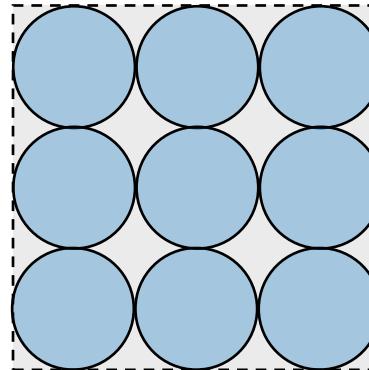


# 多数の円形荷重により矩形荷重を模擬した 舗装の多層弾性解析手法

空港研究部 ○坪川将丈, 河村直哉, 荒井淳希

## 背景・目的

- ・ 港湾荷役機械のアウトリガーのような矩形荷重による舗装応答解析には、三次元有限要素解析が必要。
- ・ 一方、舗装工学分野で広く普及している多層弾性解析プログラムGAMESは非常に扱いやすいという利点があるものの、矩形荷重に対応していない。
- ・ 矩形荷重を、多数の円形荷重に模擬する多層弾性解析手法の確立を目的として本研究を実施した。



# GAMESとは

- 2004年に東京電機大学・松井邦人教授が開発し公開した舗装構造解析用の多層弾性解析プログラム。
- 土木学会舗装工学委員会／NPO法人舗装診断研究会がWEBでGAMESを無料配布しているが、サポートは行っていない。
- 舗装工学分野で認知度が非常に高い。

**NPO法人 舗装診断研究会**  
Pavement Diagnosis Researchers Group (PDRG)

|  舗装診断研究会PDRG |  舗装診断装置 |  その他 |  会員専用

**ダウンロード**

以下のソフトウェアと資料等をダウンロードできます。

**ソフトウェア**

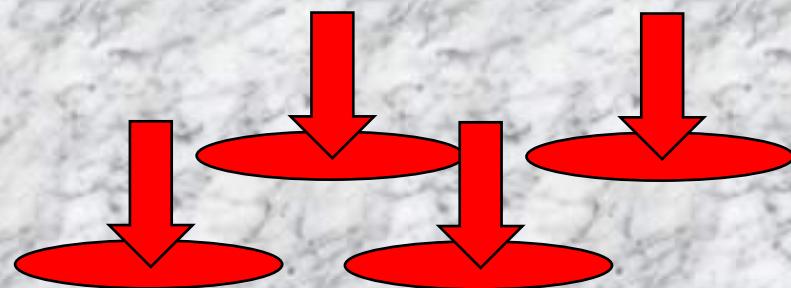
タイトル	GAMES for Windows (日本語版) >> <a href="#">Download</a>
開発日	2004年9月17日
バージョン	2.3
ファイル名	games_win_j23.zip
形式	ZIP
ファイルサイズ	2.54MB
開発者	松井邦人(東京電機大学)
URL	<a href="#">東京電機大学 理工学部 理工学科 創造工学系 松井研究室</a>
備考	ウィルスバスターーコーポレートエディション(バージョン5.467.00)でウィルスチェックしました。
お願い	当研究会は、松井教授よりGAMESの再配付許可のみをいただいているものであり、GAMESのサポート等は一切行っておりません。ご質問をいただいても返答しかねますこと、あらかじめご了承ください。 GAMESを用いた計算事例などについては、「舗装工学ライブラリー3 多層弾性理論による舗装構造解析入門—GAMES(General Analysis of Multi-layered Elastic Systems)を利用して—」を参考にしてください。

舗装診断研究会のダウンロードサイト

# 多層弾性解析とは

- 多層に積み重なった弾性体の表面・内部の変位・ひずみ・応力を計算する手法.
- 半無限弾性体のため境界条件設定が不要. FEMのようなメッシュ分割も不要.
- GAMESでは100個までの円形荷重を考慮することが可能.

←水平方向は無限



## 作用条件

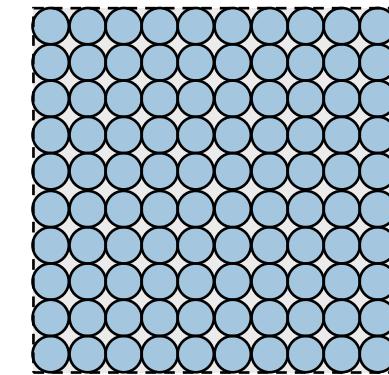
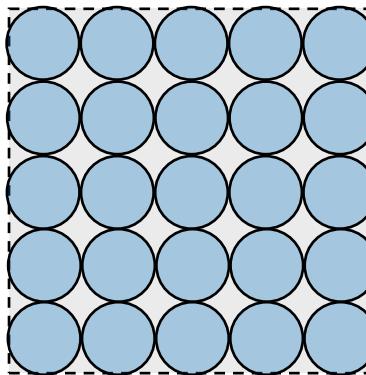
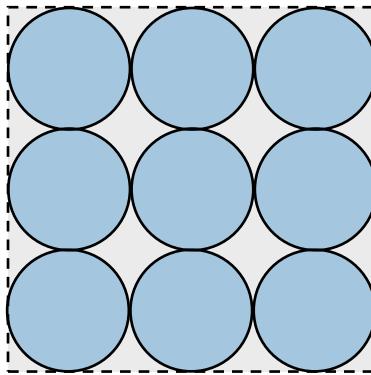
- ・円形荷重
- ・接地半径
- ・中心座標

↓深さ方向は無限

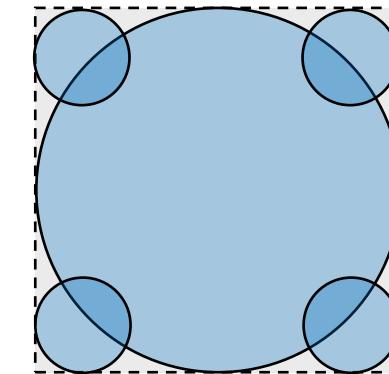
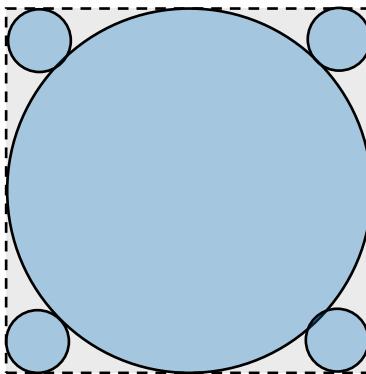
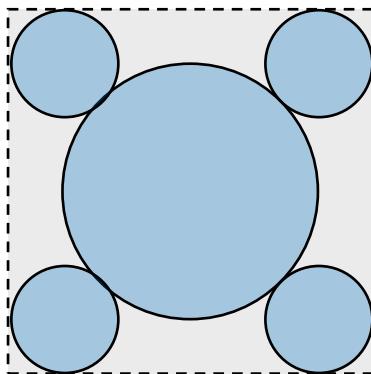
## 構造条件

- ・厚さ
- ・弾性係数
- ・ポアソン比
- ・層間付着の有無

どの程度の小さい円形荷重を敷き詰めればよい？？



中央に大きな円形荷重を配置した方が(中央に隙間の無い方が)よい？？



研究の手法

- ・円形荷重の半径や位置を変えて多層弾性解析を行った.
- ・設定が煩雑だが、真値とみなせる値を算出する方法としてA法を用意した.
- ・アスファルト舗装ではB法、コンクリート舗装ではC法・D法を検討した.

# 本資料の構成

## 2章 予備解析

既往文献の解析結果と、考案したA法・B法の比較

## 3章 矩形荷重に対するアスファルト舗装の解析手法

B法について詳細検討

## 4章 矩形荷重に対するコンクリート舗装の解析手法

C法・D法について詳細検討

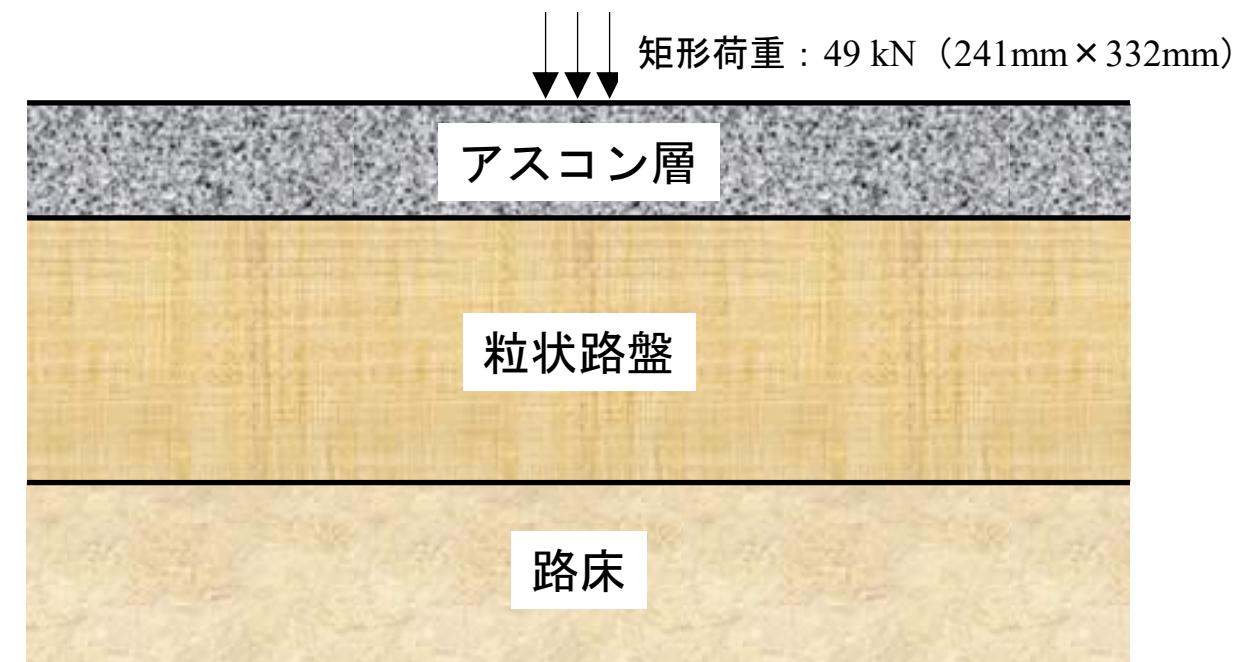
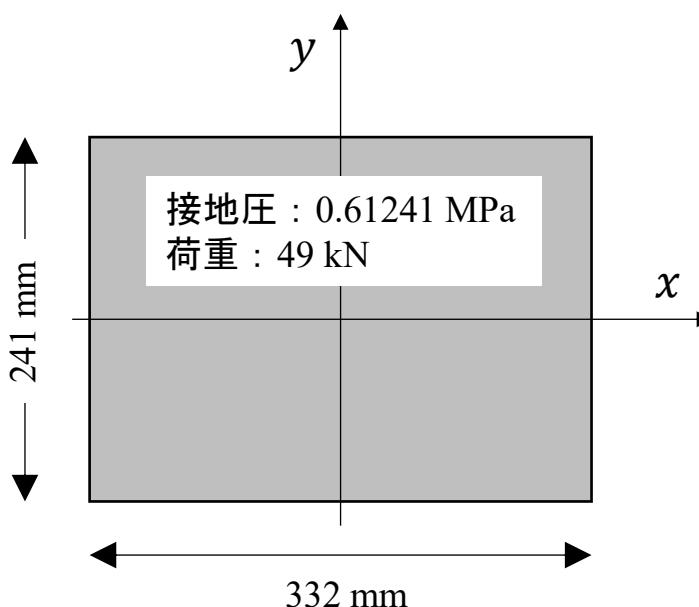
## 5章 結論

## 6章 おわりに

# 予備解析

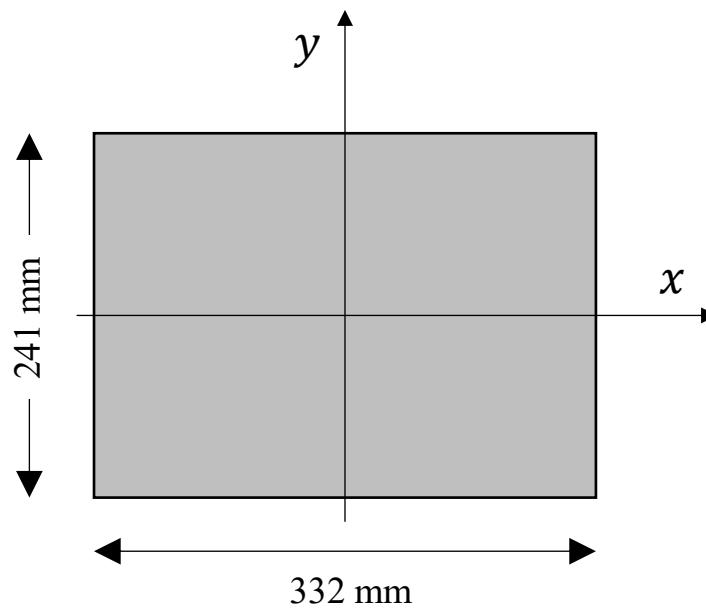
## 予備解析

- GAMESを開発した松井らの多層弾性解析の論文の矩形荷重による解析結果と一致するか検証.
- 既往論文と同じ241mm × 332mmの小さな矩形荷重を、以降のA法・B法で模擬.

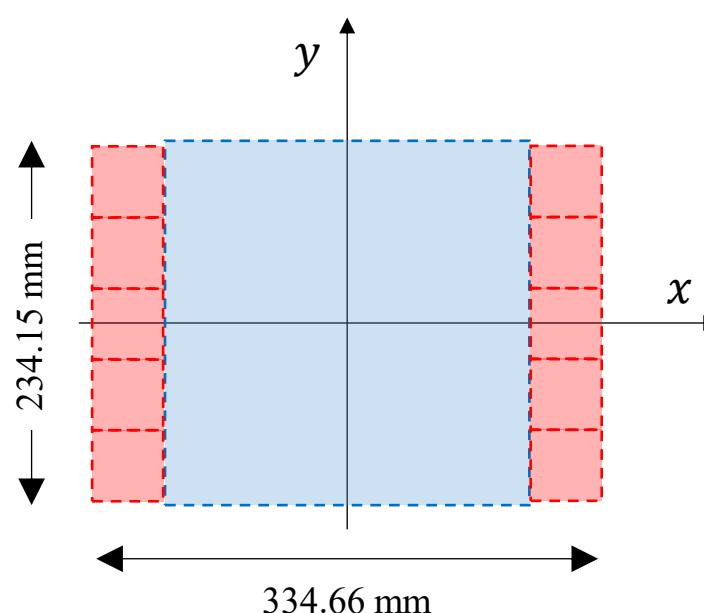


# 予備解析

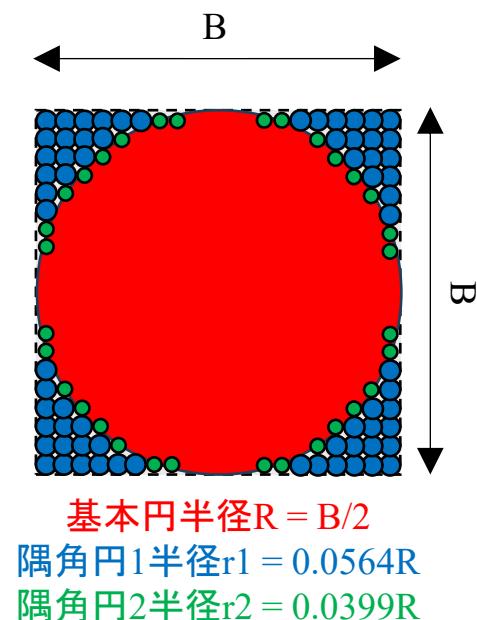
A法： 設定が面倒だが、検証用の真値とみなせる方法。



設定したい矩形荷重  
(松井らの論文)



11個の正方形荷重に  
分割した矩形荷重



101個の円形荷重による  
正方形荷重ユニット

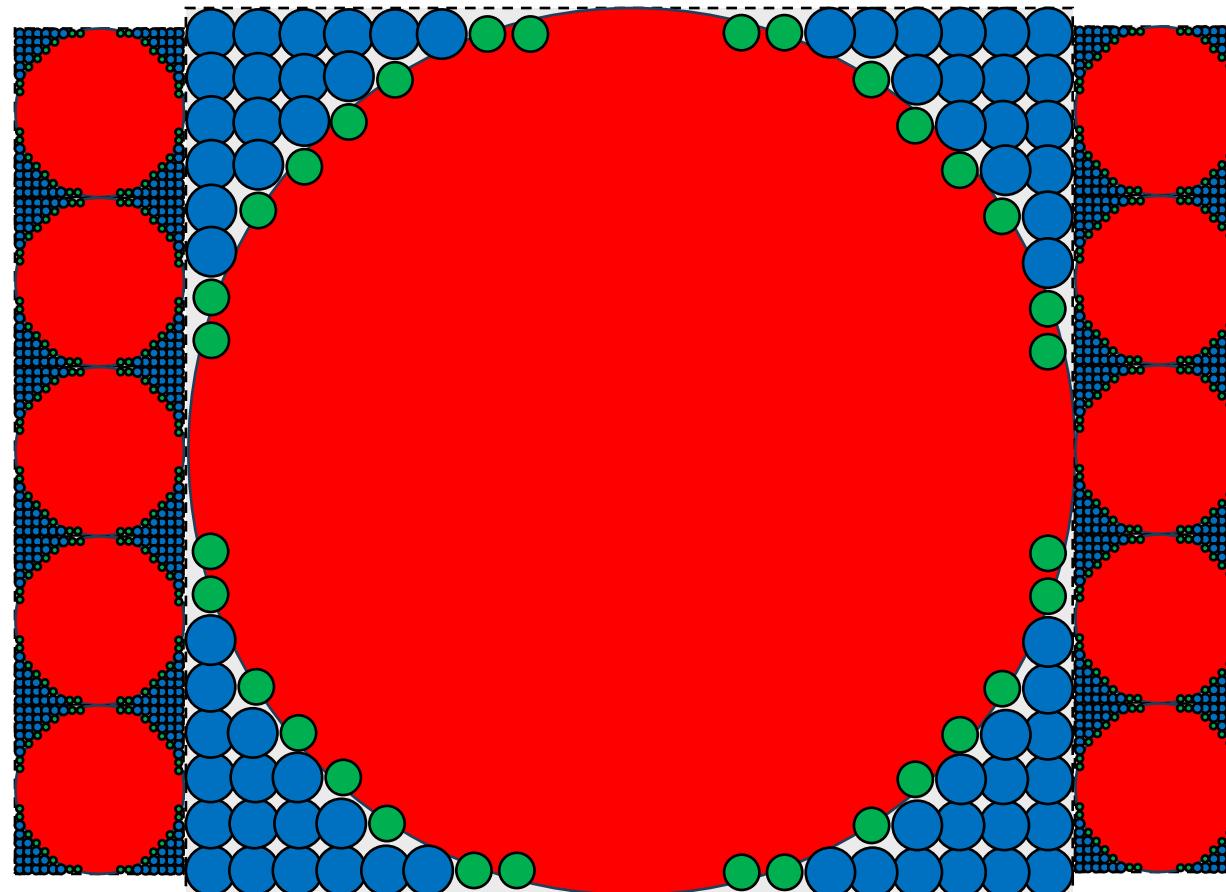
# 予備解析

A法:

前頁を正確に図化すると以下の通り.

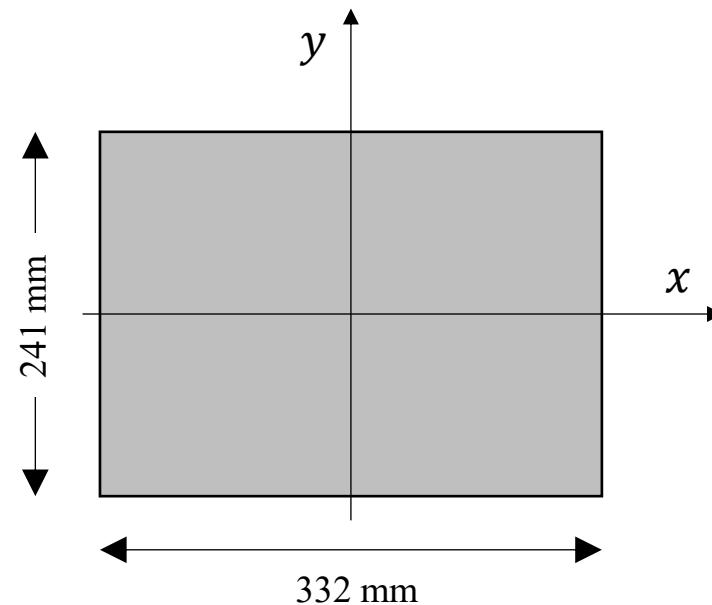
11個の荷重ユニット = 1111個の円形荷重.

隙間面積が小さいため、円形荷重の接地圧は矩形荷重と同じとする.

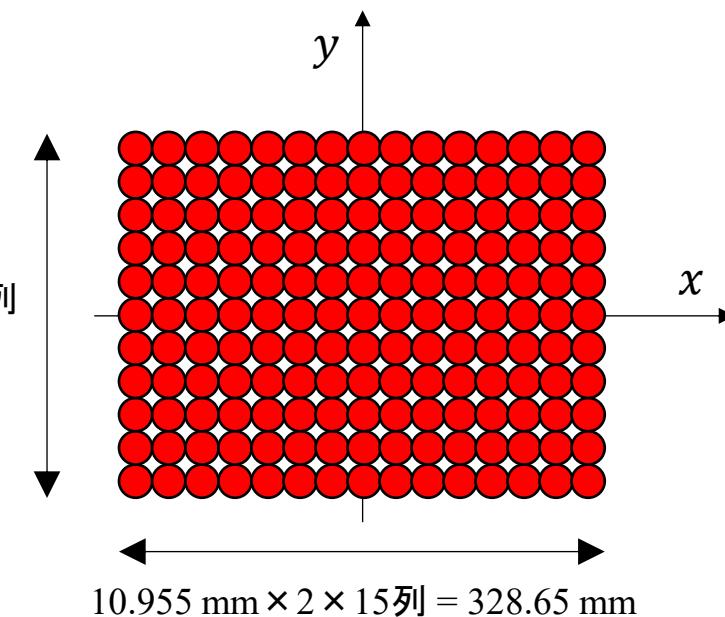


# 予備解析

B法：単純に1種類の円形荷重を敷き詰める方法。  
隙間面積が大きいため、面積による換算で接地圧を調整する。



$$10.955 \text{ mm} \times 2 \times 11 \text{ 列} = 241.01 \text{ mm}$$



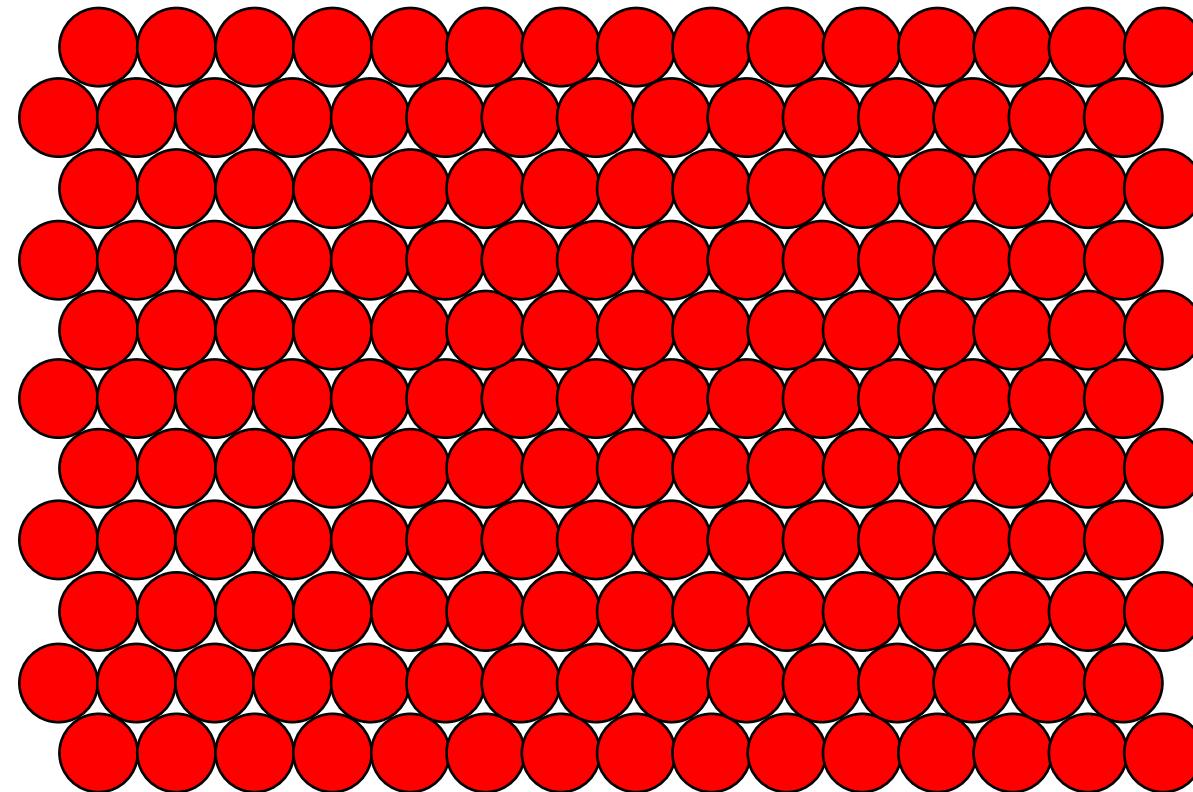
$$10.955 \text{ mm} \times 2 \times 15 \text{ 列} = 328.65 \text{ mm}$$

# 予備解析

B法:

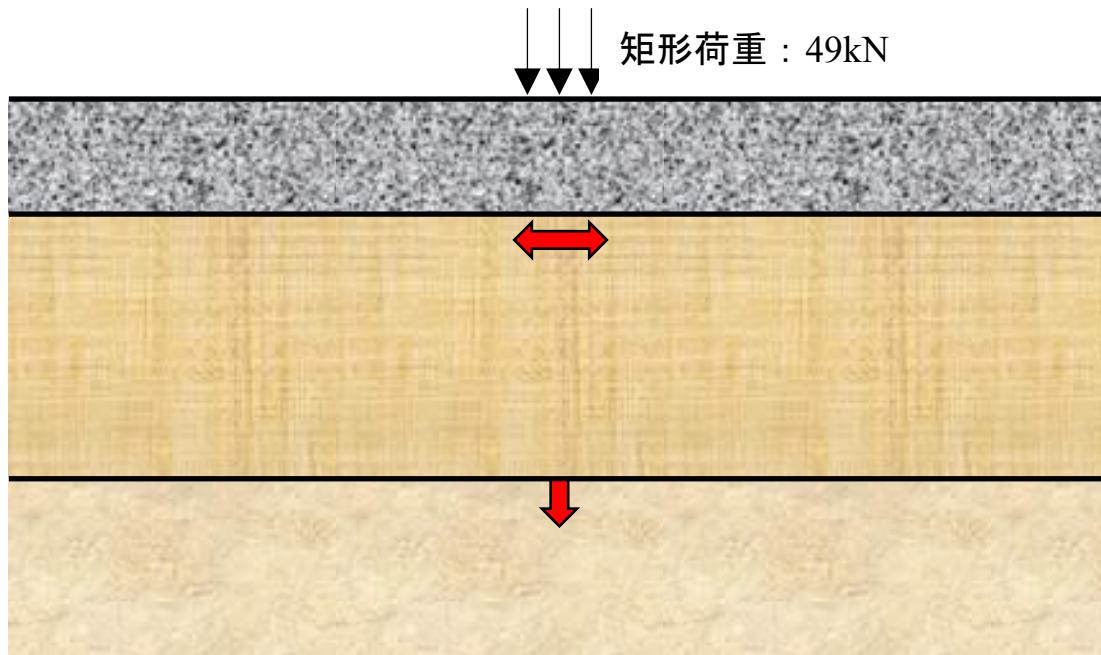
隙間面積がやや小さくなる千鳥配置は採用しなかった。

- GAMESにおけるx座標・y座標の入力が面倒で、誤入力が発生しやすい。
- 左右の端部が不揃いとなるため扱いにくい。



# 予備解析

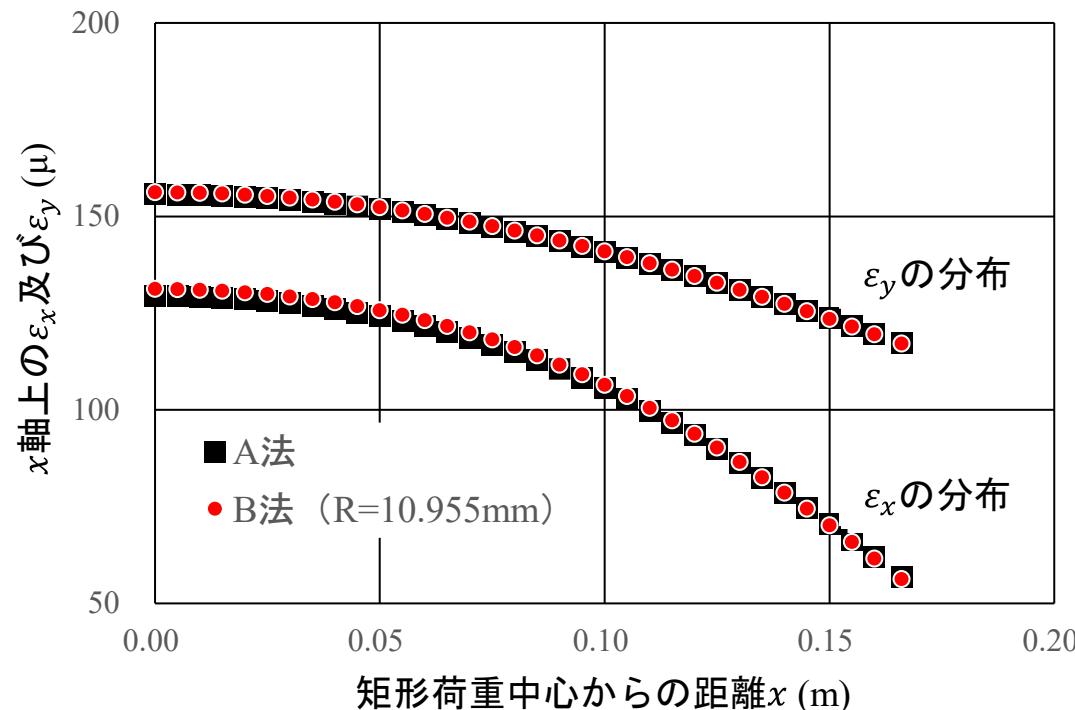
- 既往文献, A法, B法の解析結果は一致した.
- A法のように1111個もの円形荷重を設定しなくても, B法の165個で問題ない.



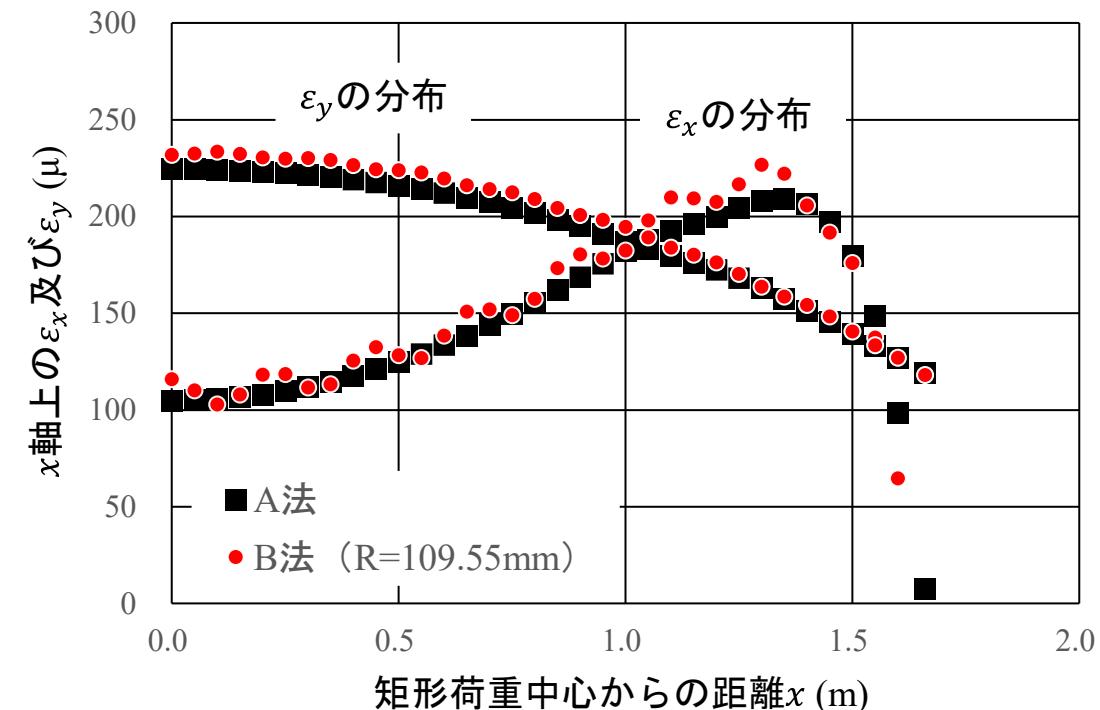
	既往文献	A法	B法
アスコン層 下面ひずみ $\varepsilon_x$ 最大	130 $\mu$	129.42 $\mu$	131.23 $\mu$
アスコン層 下面ひずみ $\varepsilon_y$ 最大	156 $\mu$	155.71 $\mu$	156.23 $\mu$
路床 上面ひずみ $\varepsilon_z$ 最大	-370 $\mu$	-369.38 $\mu$	-370.12 $\mu$

# 予備解析

- 既往論文の小さな矩形荷重の場合, A法■とB法●のひずみ分布は一致.
- 寸法を10倍した大きな矩形荷重では, A法■とB法●がのひずみ分布は乖離する.
- ただし, この現象が現れるのは浅い位置(アスコン層下面)のひずみのみ.



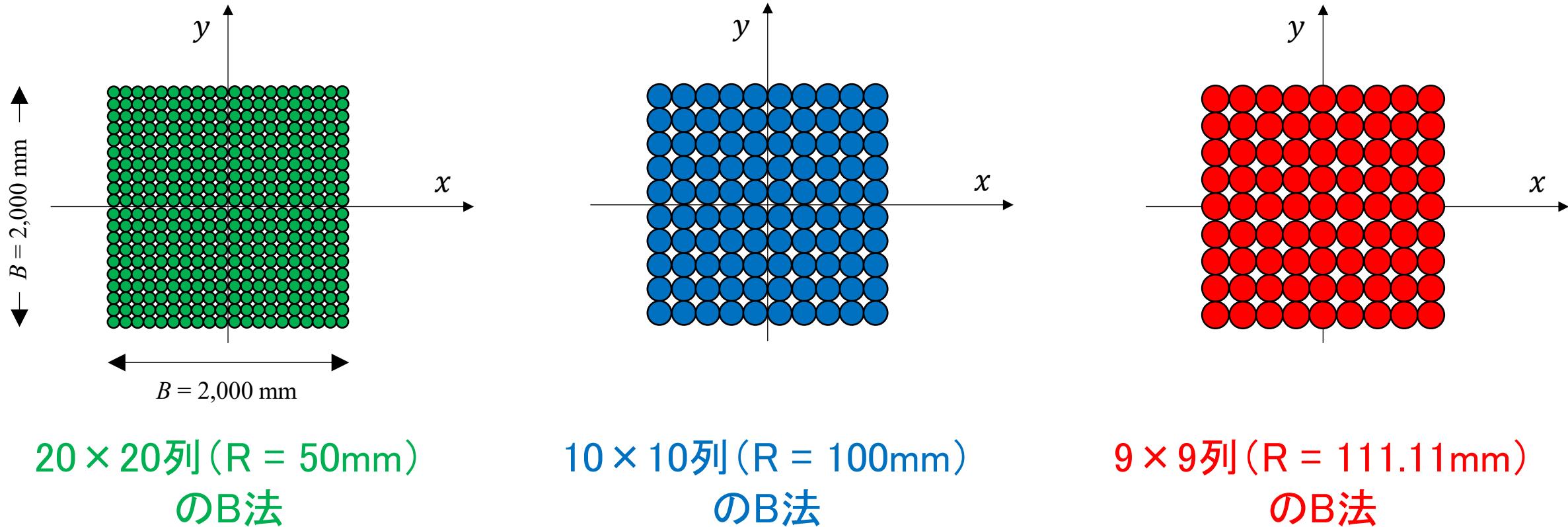
小さな矩形荷重による  
アスコン層下面ひずみ  
基本円半径 = 10.955 mm



大きな矩形荷重による  
アスコン層下面ひずみ  
基本円半径 = 109.55 mm

# 矩形荷重に対する アスファルト舗装の解析手法

# 矩形荷重に対するアスファルト舗装の解析手法

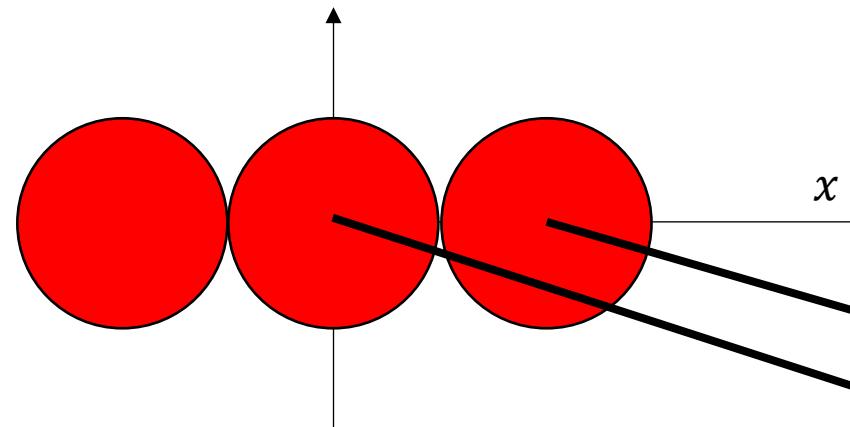


$n$ 列 ×  $n$ 列とした場合の

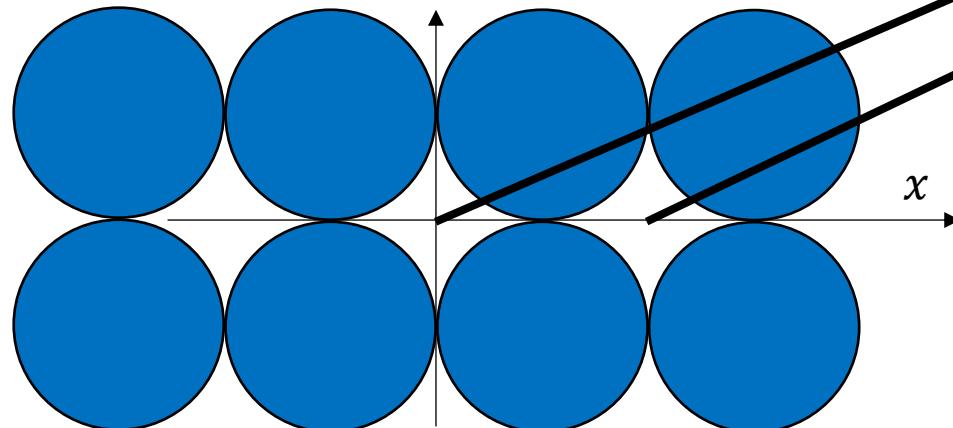
- 基本円半径は  $B/(2 \cdot n)$
- 1つの円形荷重面積は  $\pi \cdot B^2/(4 \cdot n^2)$
- 円形荷重合計面積は  $\pi \cdot B^2/4$  ( $n$ によらない)

# アスファルト舗装の解析手法

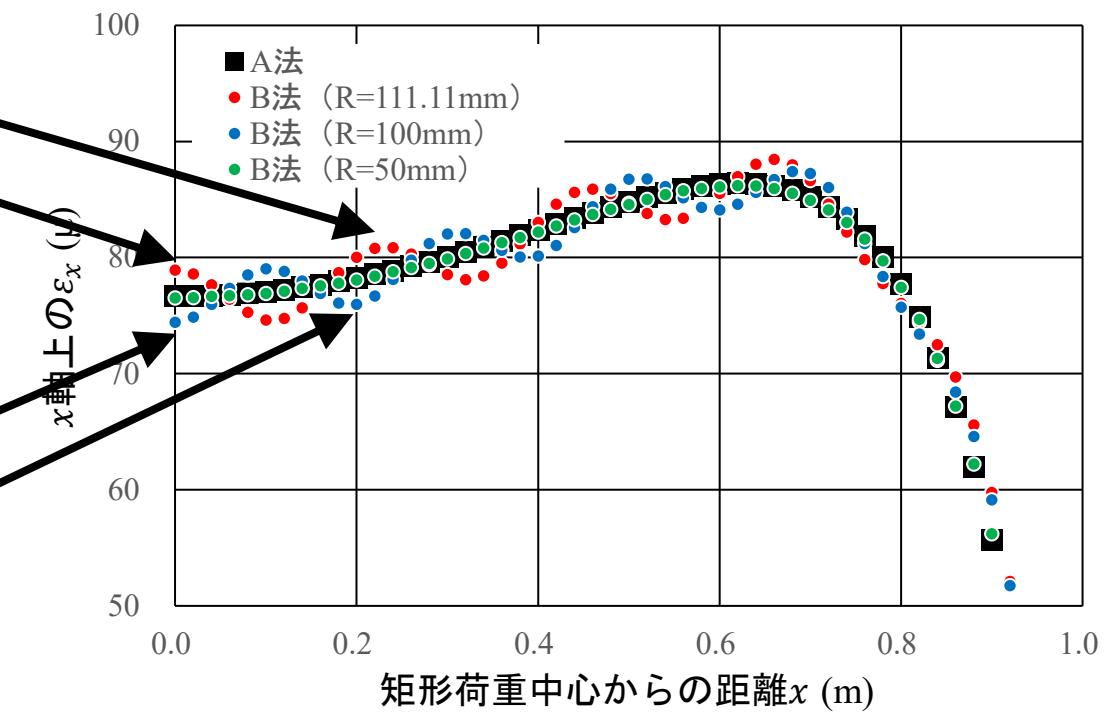
$R = 111.11 \text{ mm } (9 \times 9 \text{ 列})$



$R = 100 \text{ mm } (10 \times 10 \text{ 列})$

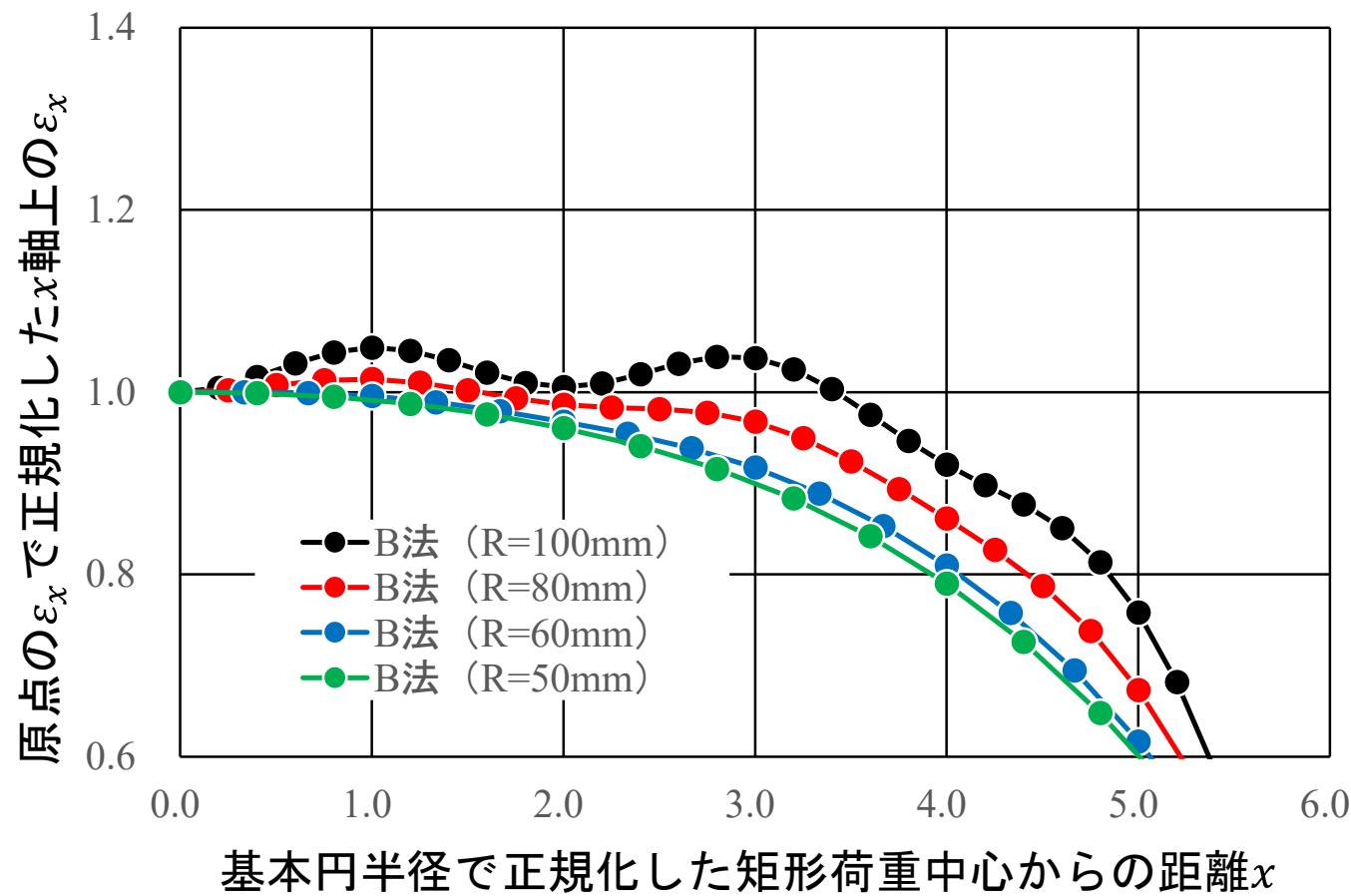
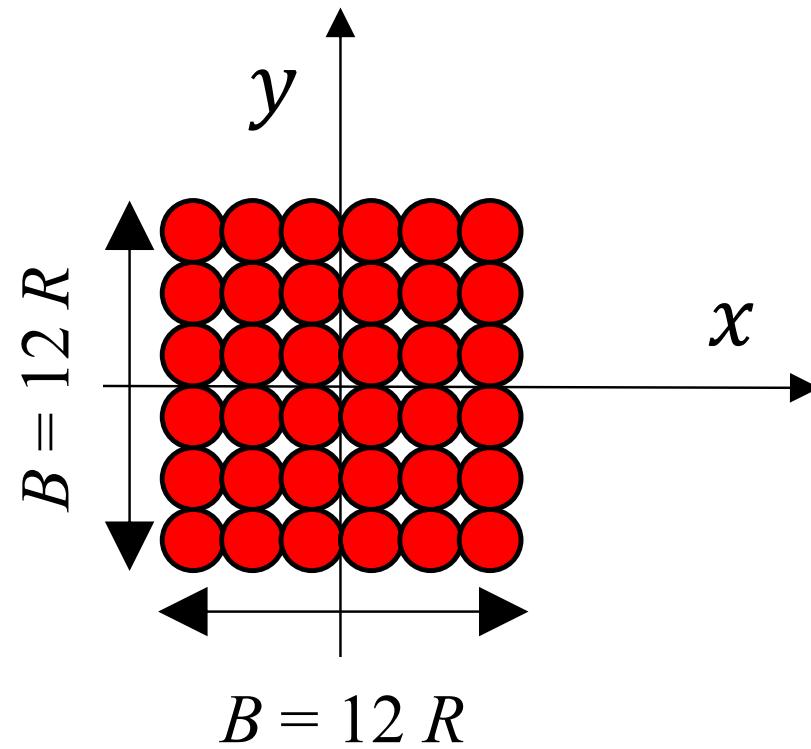


- A法■とB法( $R=50\text{mm}$ )●は一致.
- B法( $R=111.11\text{mm}$ )●とB法( $R=100\text{mm}$ )●は規則的に変動.



# アスファルト舗装の解析手法

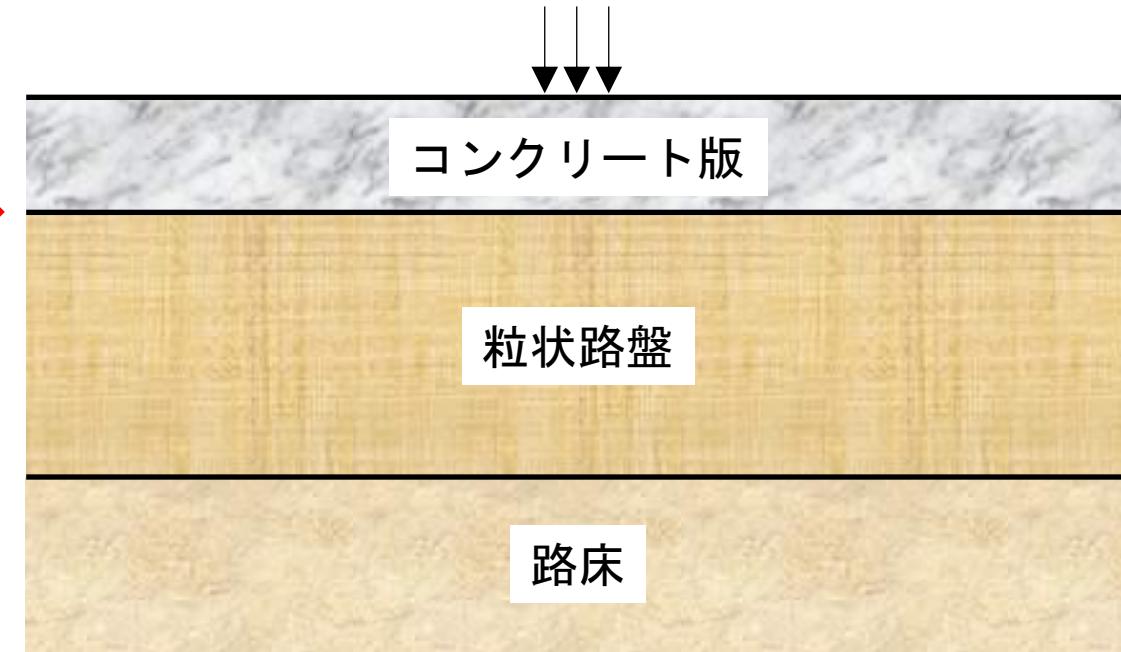
- 基本円半径を変化させた予備解析を行うことで、隙間の影響が無視できる程度のB法の基本円半径を決定することが可能。



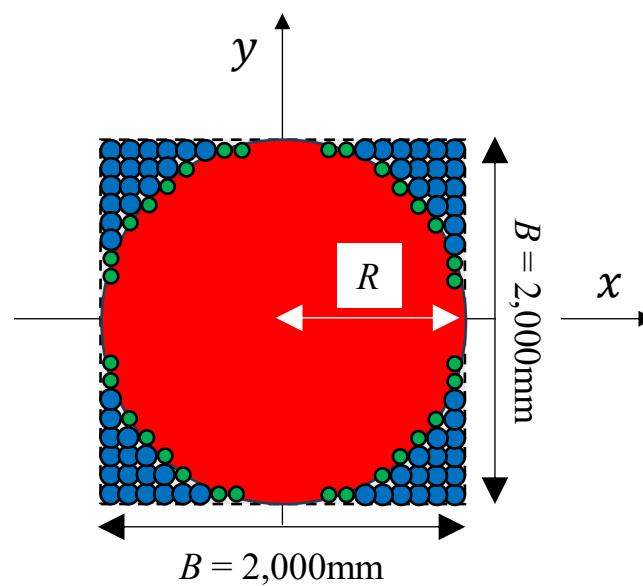
# 矩形荷重に対する コンクリート舗装の解析手法

# 矩形荷重に対するコンクリート舗装の解析手法

- ・コンクリート舗装の構造解析ではコンクリート版下面の付着を切る. 
- ・付着を切ると、アスファルト舗装のような【B法で基本円半径を小さくするほどA法に収束する】という傾向が確認できなかった.

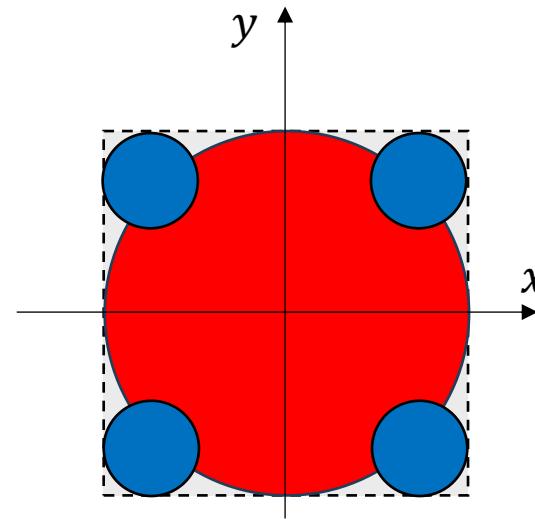


# 矩形荷重に対するコンクリート舗装の解析手法



A法(101個)

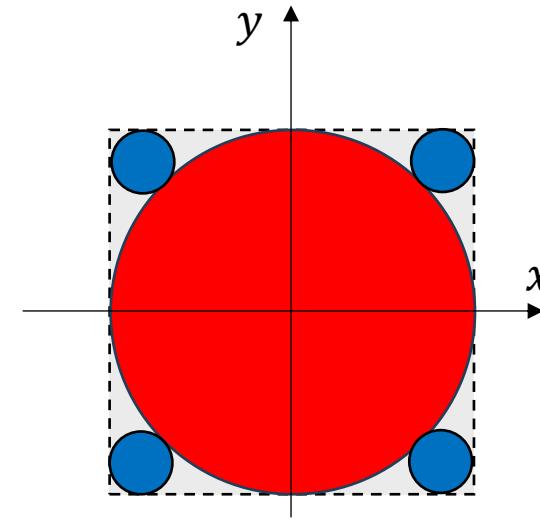
設定が煩雑なため  
実務向けではない



C法(5個)

隅角部の隙間と  
同じ面積の  
隅角円を4つ配置

接地圧の調整は不要



D法(5個)

基本円と  
荷重ユニット端に接する  
隅角円を4つ配置

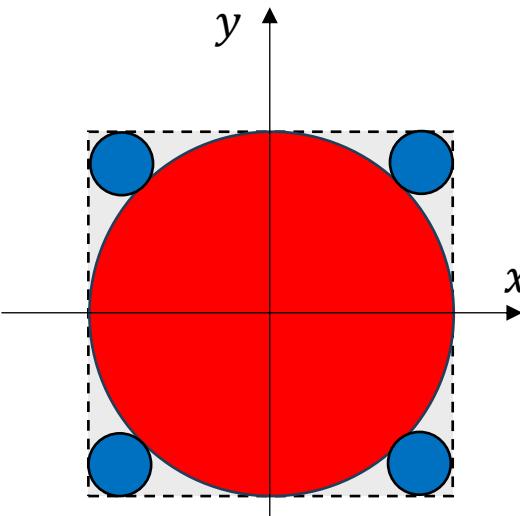
隅角円の接地圧は面積比で調整

# 矩形荷重に対するコンクリート舗装の解析手法

## A法■との比較

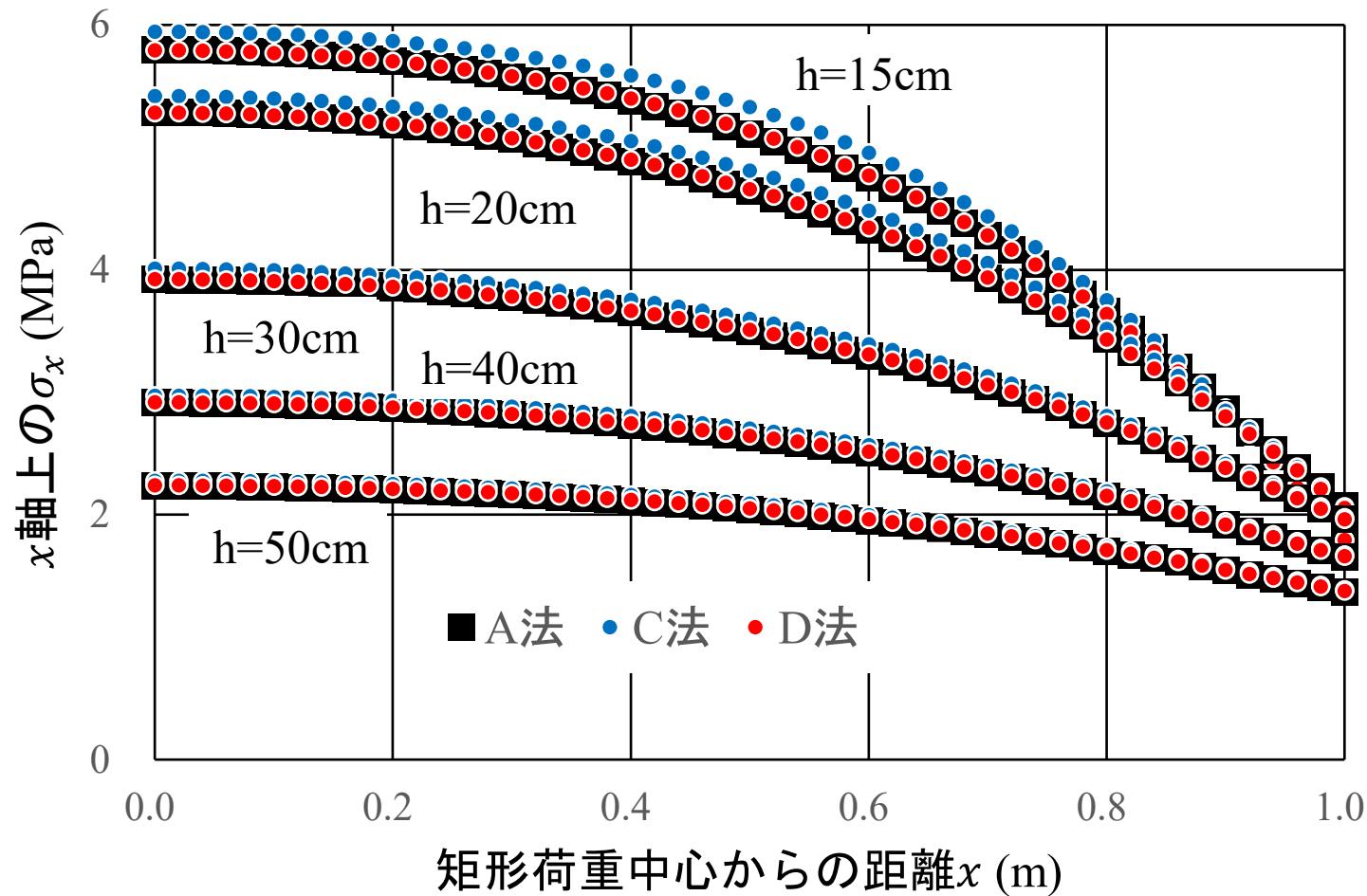
- C法●
- D法●

Co版が薄い場合に乖離する. Co版が厚い場合は一致.  
Co版厚に関わらず, Co版下面の応力を精度良く解析可能.



$x$ 軸上  
の応答

D法



## アスファルト舗装

- B法で矩形荷重を模擬することが可能.
- 予備解析により周期的な変動が発生しない半径の円形荷重を用いる必要がある.

## コンクリート舗装

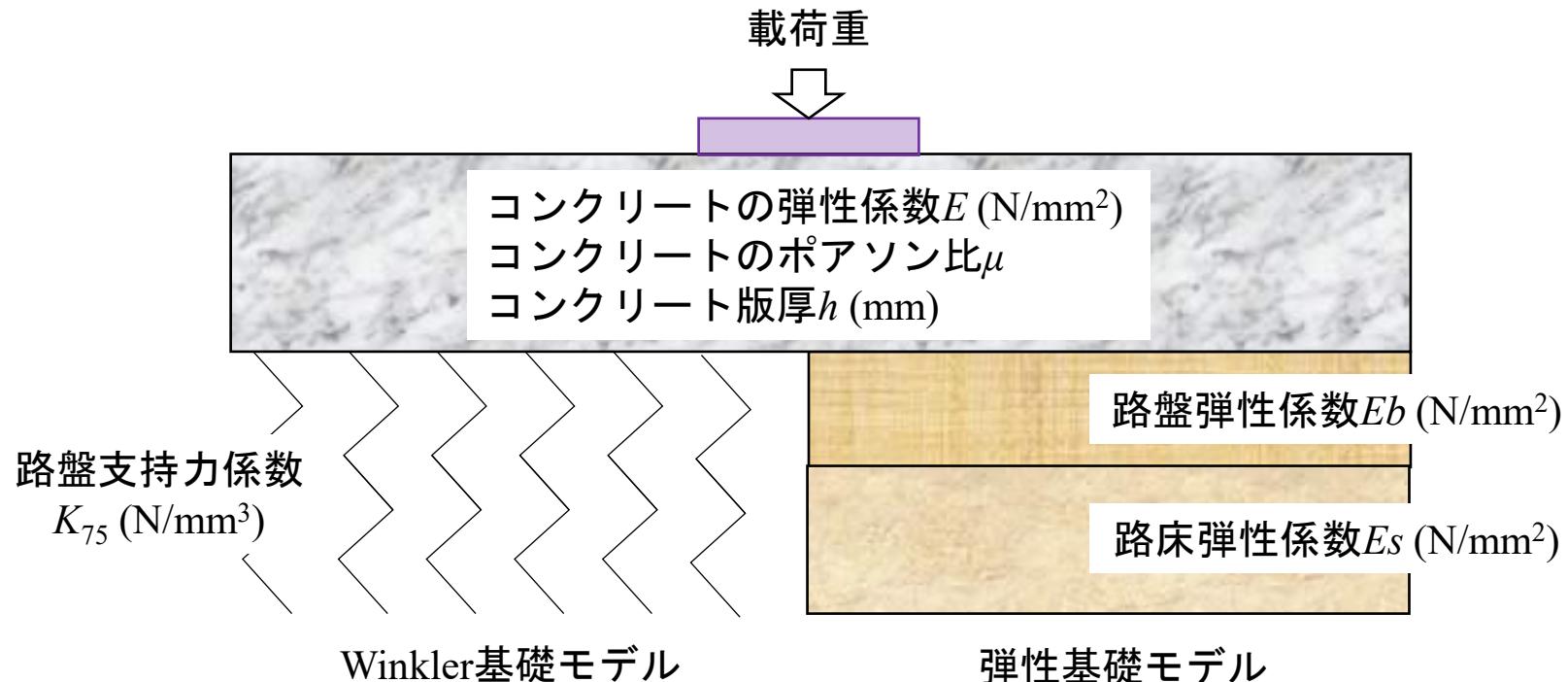
- D法で矩形荷重を模擬することが可能.
- ただし隅角円の近傍などの解析精度は低下することに留意する必要がある.

おわりに

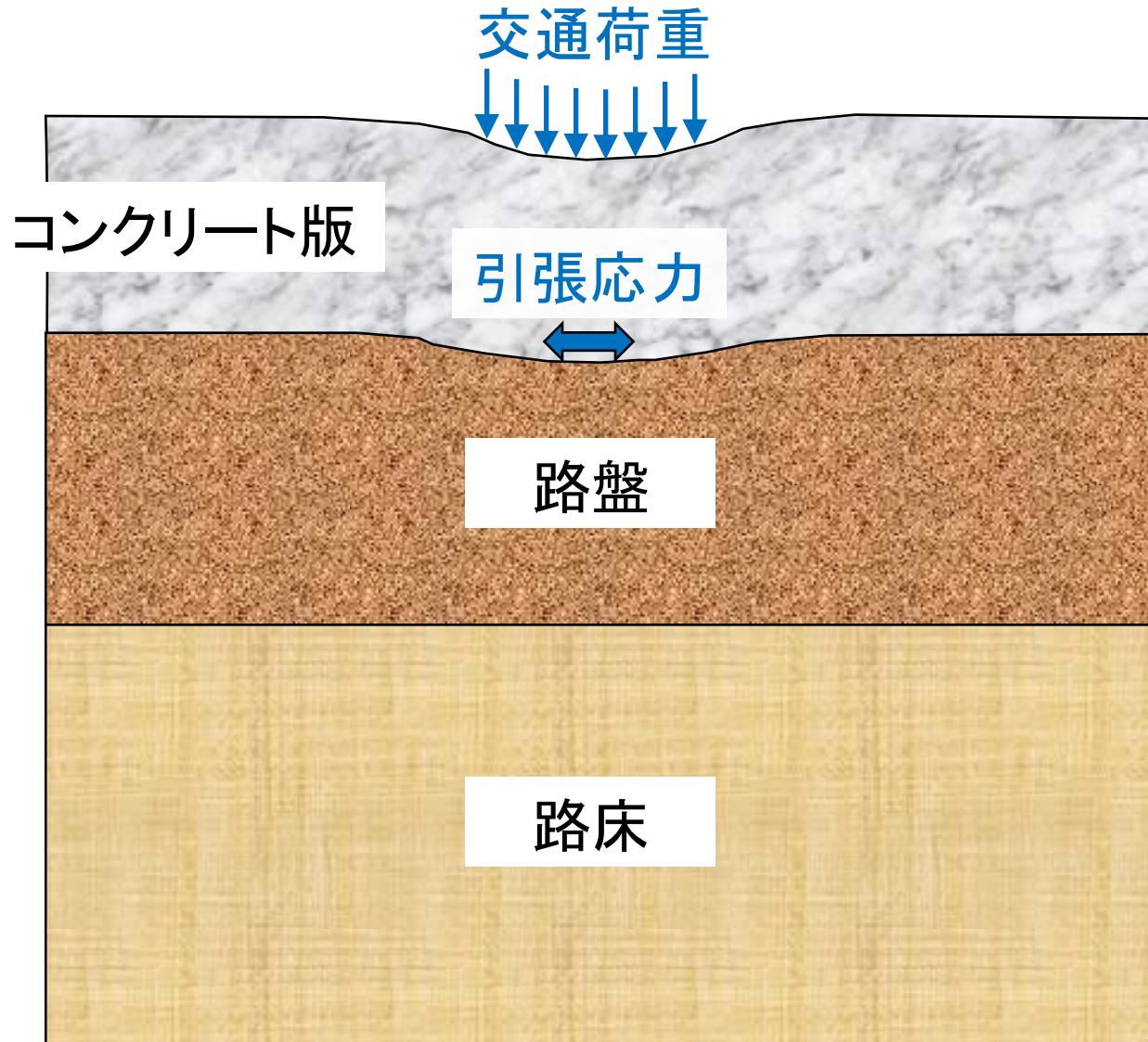
# おわりに

## コンクリート舗装の【Winkler支承モデル】と【弾性基礎モデル】

- 本資料の内容は【弾性基礎モデル】。
- 【Winkler支承モデル】は、国総研資料No.1293・1313によるWestergaard載荷プログラムを再構築したプログラムが使用可能。こちらは円形荷重・橿円形荷重・矩形荷重の設定が可能。



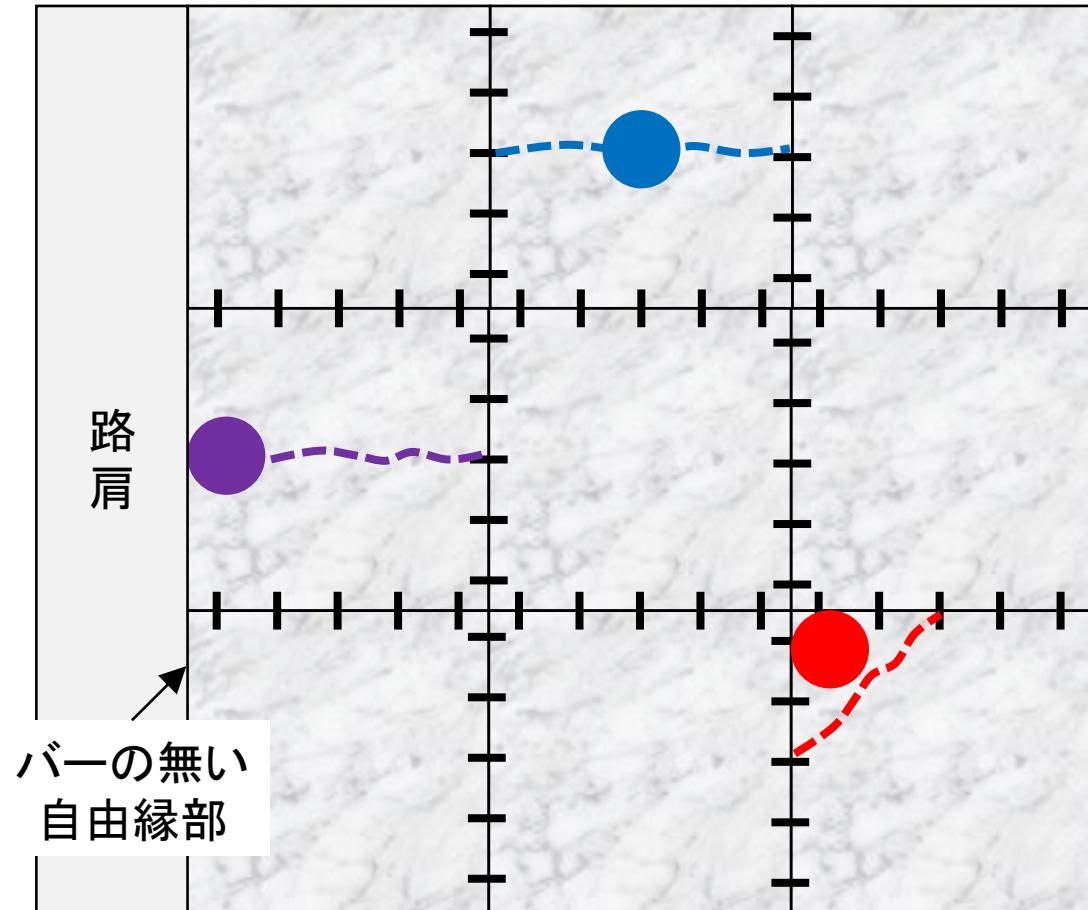
# おわりに



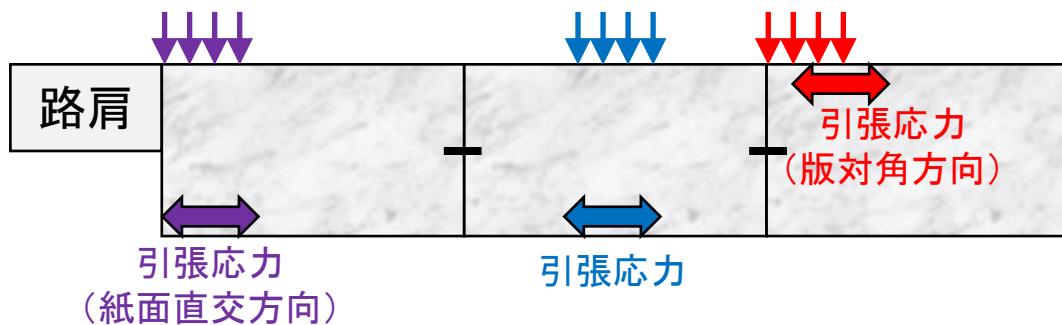
- 交通荷重によりコンクリート版に発生する引張応力を用いてコンクリート版厚を設計するのが基本.
- ただし設計法により【設計荷重が載荷される位置】が三種類.
  - 中央部
  - 自由縁部
  - 隅角部

# おわりに

平面図



断面図



## 空港舗装：中央部載荷

- 面的舗装のため、ほぼ全ての目地にバーが設置されているため

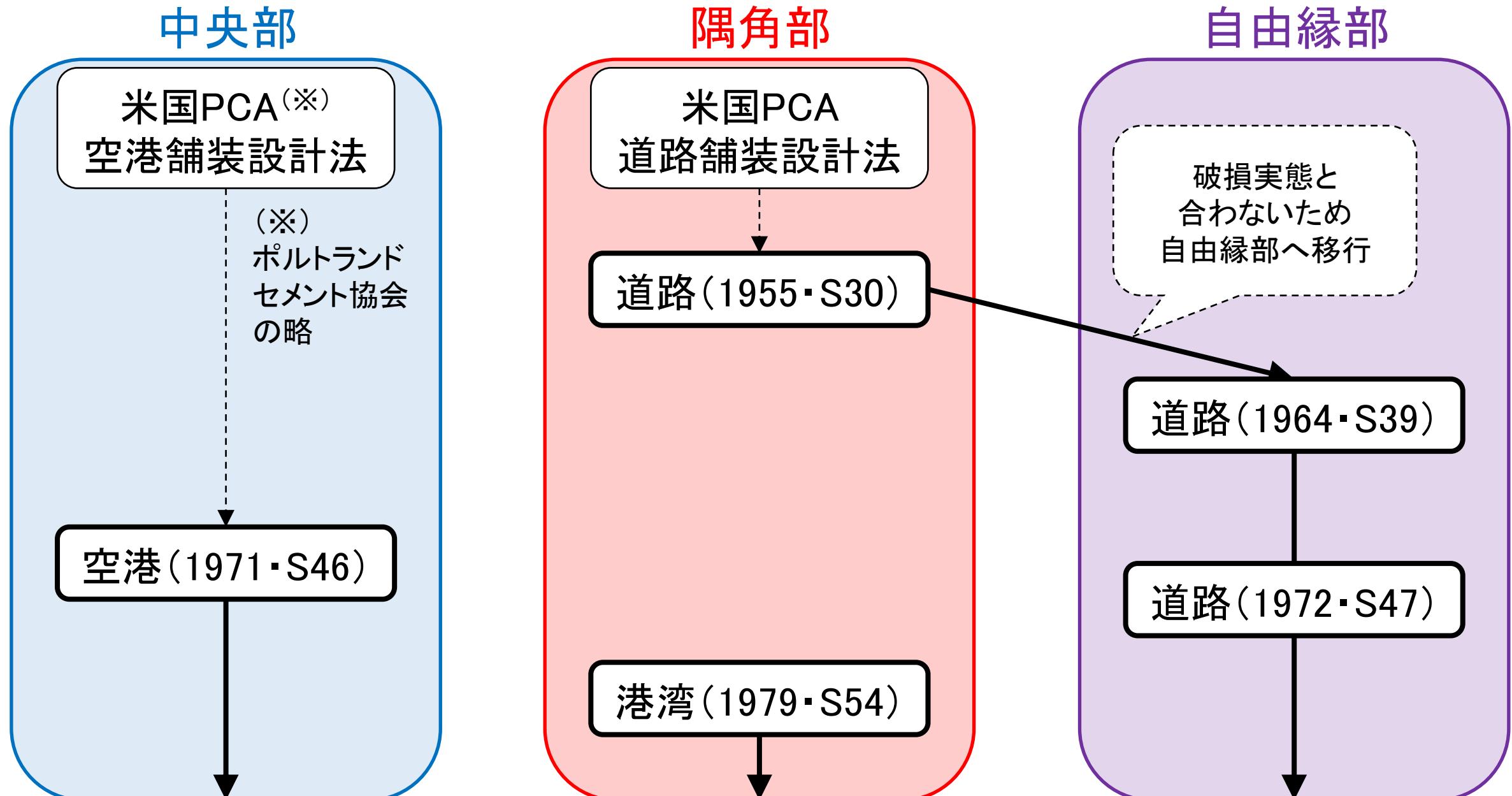
## 道路舗装：自由縁部載荷

- 自由縁部からの横ひび割れに着眼することとしたため

## 港湾舗装：隅角部載荷

- これだけが版上面引張応力
- 最初期の道路コンクリート舗装設計法が隅角部載荷だったため？
- 空港と同じ面的舗装であるため、港湾基準による版厚設計が適当でない場合は、空港の設計法を準用するとよい。

# おわりに



# おわりに

Arlington公式(Pickettの隅角公式)の本来の形は以下の通り。

$$\sigma_c = \frac{C \cdot P}{h^2} \cdot \left\{ 1 - \frac{\sqrt{\frac{a}{l}}}{0.925 + 0.22 \cdot \frac{a}{l}} \right\}$$

Pickett (1951)

$C = 4.2$  (保護しない直角隅角に対して)

$C = 3.36$  (ダウエルバーなどで保護した隅角に対して =  $4.2 * 80\%$ )

港湾基準では、N/mm<sup>2</sup>単位の隅角部応力 $\sigma_c$ をkN単位の荷重 $P$ 及びcm単位の版厚 $h$ から算出するため、便宜的に10倍して以下のように掲載されている。

$$\sigma_c = \frac{10 \cdot C \cdot P}{h^2} \cdot \left\{ 1 - \frac{\sqrt{\frac{a}{l}}}{0.925 + 0.22 \cdot \frac{a}{l}} \right\}$$

$\sigma$ : 版上面の隅角部引張応力(N/mm<sup>2</sup>)

$P$ : 荷重(kN)

$C$ : 3.36 (ダウエルバーなどで保護した隅角に対して)

$h$ : コンクリート版厚(cm)

現在、隅角部応力式が掲載されている舗装の和書・洋書は少なくなったため、

- 不揃いな単位系で使用するための変形がされていること(好ましくはない)
- 隅角部応力式は版上面の引張応力式であること

を明記しないと、誤って引用・使用される原因となる。なお、荷重の接地半径が大きい場合は圧縮応力が計算される(負の値となる)ため版厚設計に使用できない。