

(2) 鉄道構造形式の検討について

ラーメン高架橋形式における 検討状況

断層変位解析

3径間 ϕ 1500完全支持杭
 ϕ 1.5m \times 28.5m \times 8本

検討の概要

前回の委員会で概略設計を実施した、3径間1柱1杭式のラーメン高架橋に断層変位が生じた場合の影響について、3次元静的非線形骨組解析により検討を実施した。

- **部材に過大な断面力が発生し、高架橋が倒壊するような大きな損傷が生じないか？
あるいは、倒壊しない限界の断層変位はどの程度か？**
- **高架橋全体が剛体的に挙動することを保証する基礎スラブ厚はどの程度か？**

1. 解析モデルの概要

■ 解析モデル

- 橋軸方向と断層ラインとが斜めに交差する場合も想定されることから、高架橋全体をモデル化する。
- 断層ラインが高架橋ブロックを跨いで生じる場合が想定されるため連続した高架橋2ブロックをモデル化する。

■ 断層変位の入力

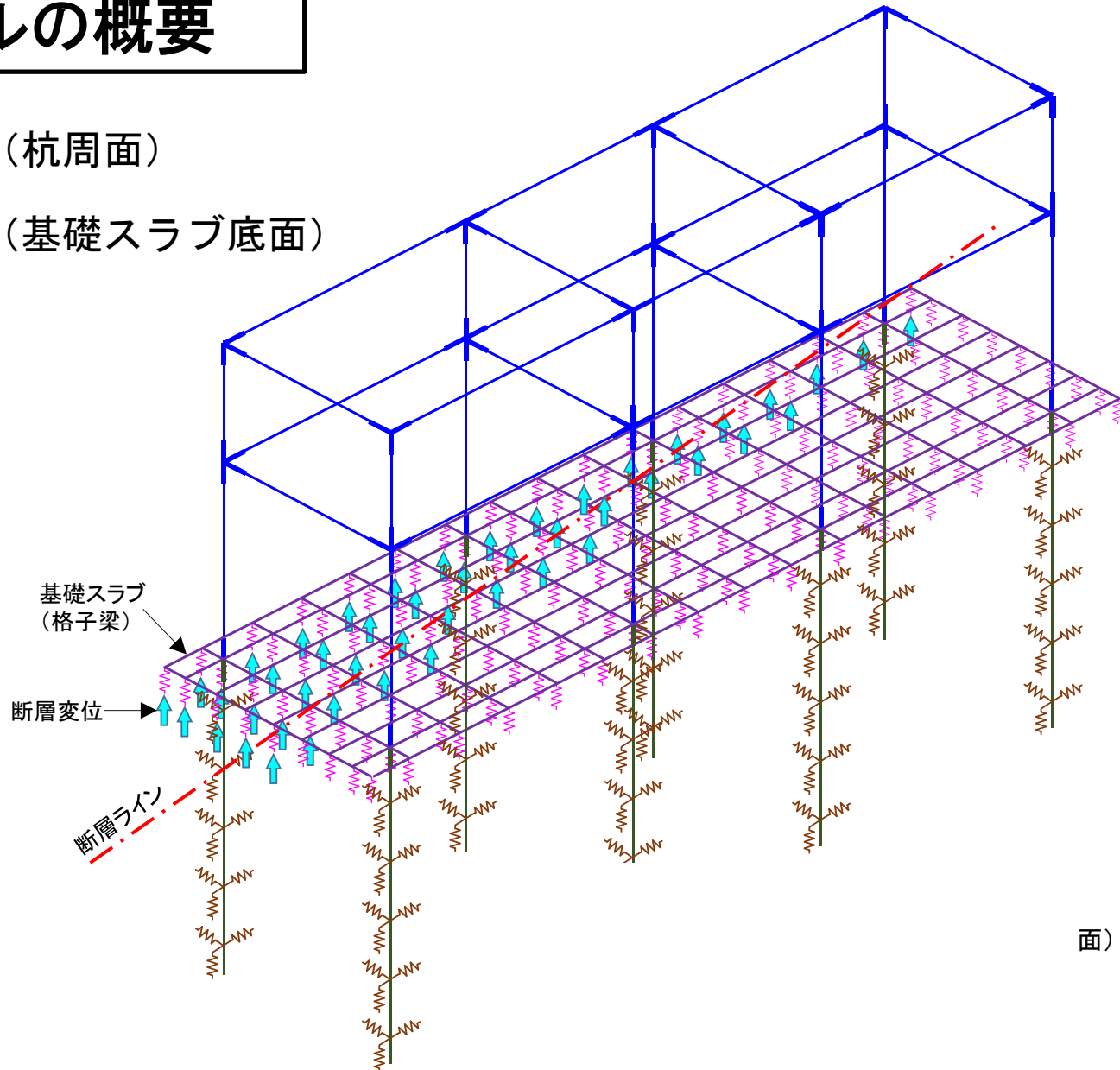
- 断層変位の入力は、基礎位置に強制変位として与える事となるが、地盤と構造物との相互作用を考慮するため、周辺地盤をばねによりモデル化し、ばねを介して入力する。

解析モデルおよび解析手法

解析モデルの概要

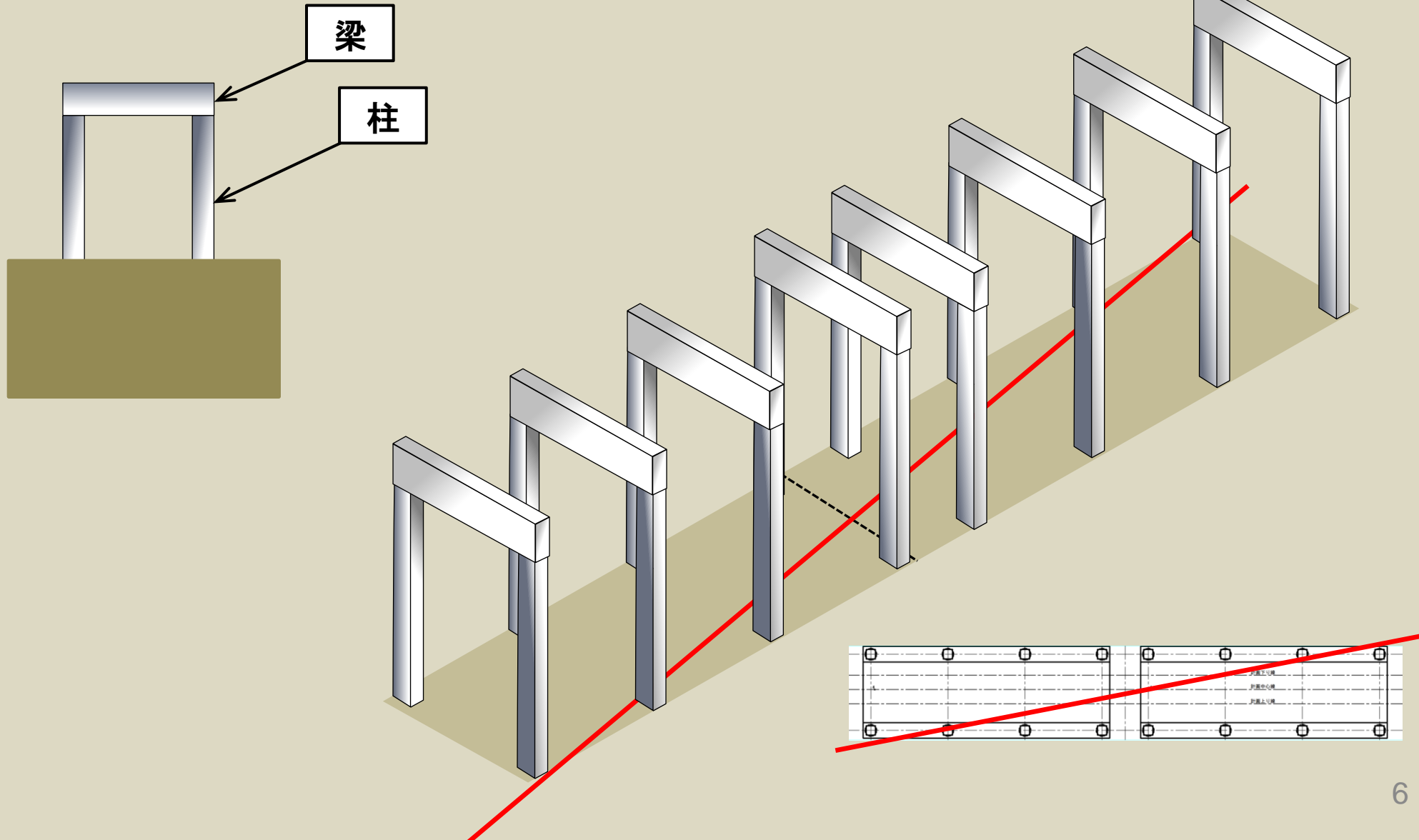
— : 地盤ばね (杭周面)

— : 地盤ばね (基礎スラブ底面)



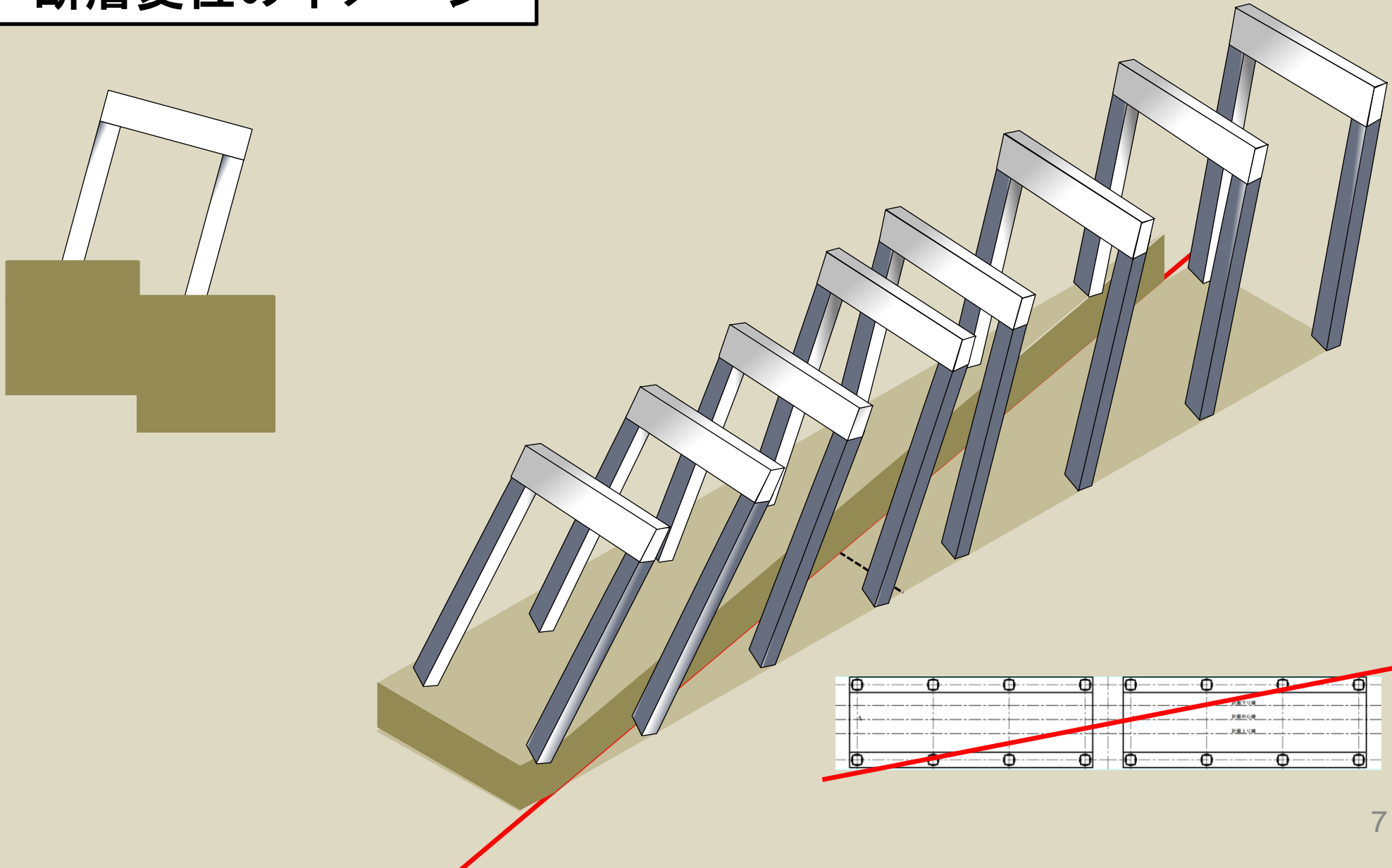
解析モデルおよび解析手法

断層変位のイメージ



解析モデルおよび解析手法

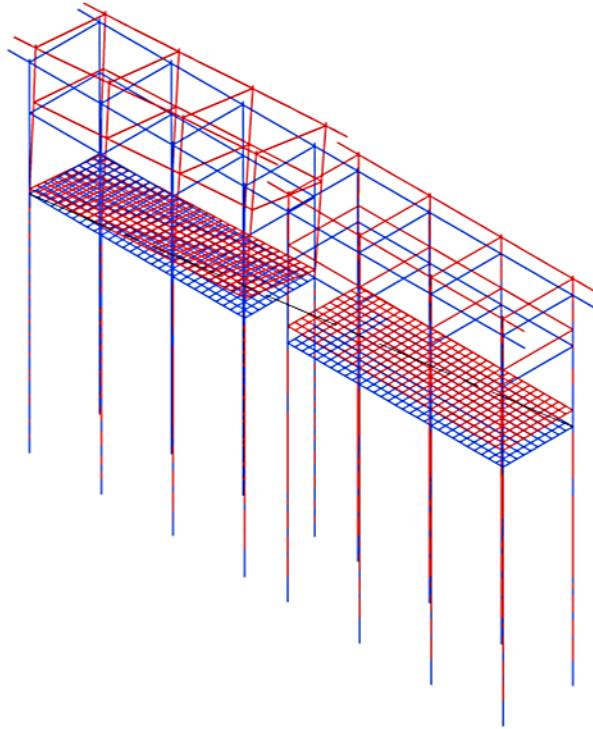
断層変位のイメージ



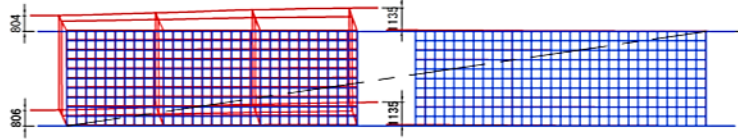
解析結果

変形図 (入力変位量: 1000mm) (基礎スラブ厚: 3.5m)

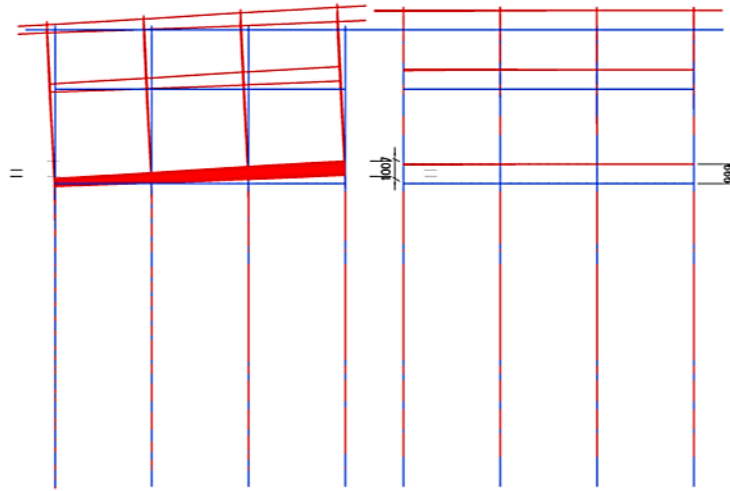
全体図



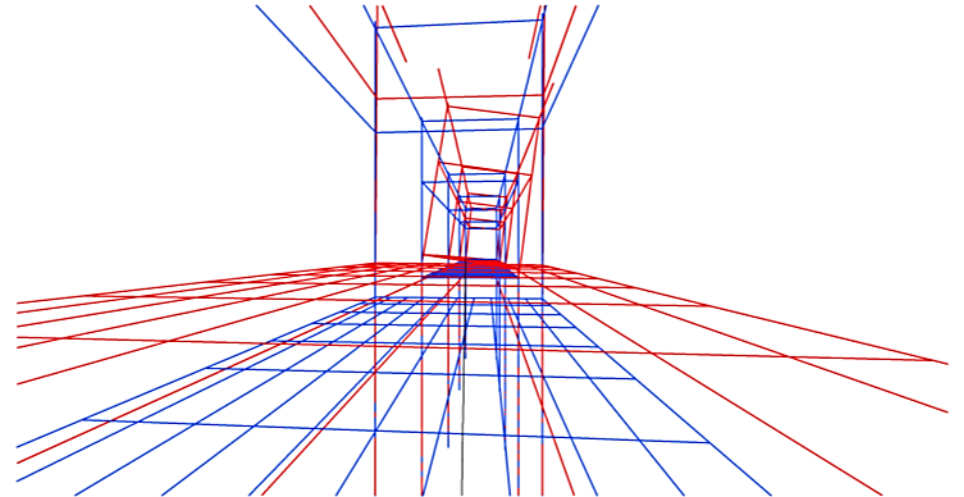
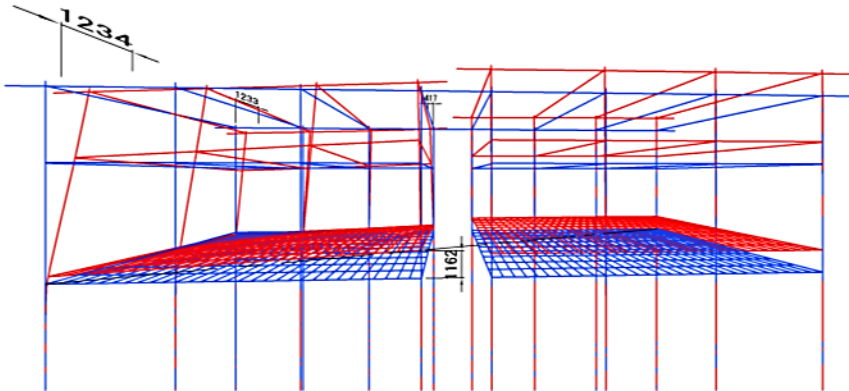
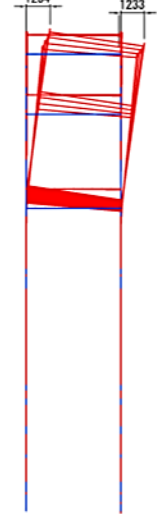
平面図



側面図



断面図



2. 基礎スラブの設計

- ➡ 本検討は、基礎スラブ厚を2.5mおよび3.5mと仮定し、各々の限界断層変位について検討した
- ➡ 基礎スラブを2.5m以上とすることにより、断層変位を受けても高架橋の梁柱に損傷は生じない結果となった
- ➡ その代わりに基礎スラブには大きな断面力が発生することになり、基礎スラブの耐力照査を満足する変位量が、高架橋の抵抗できる変位量となる

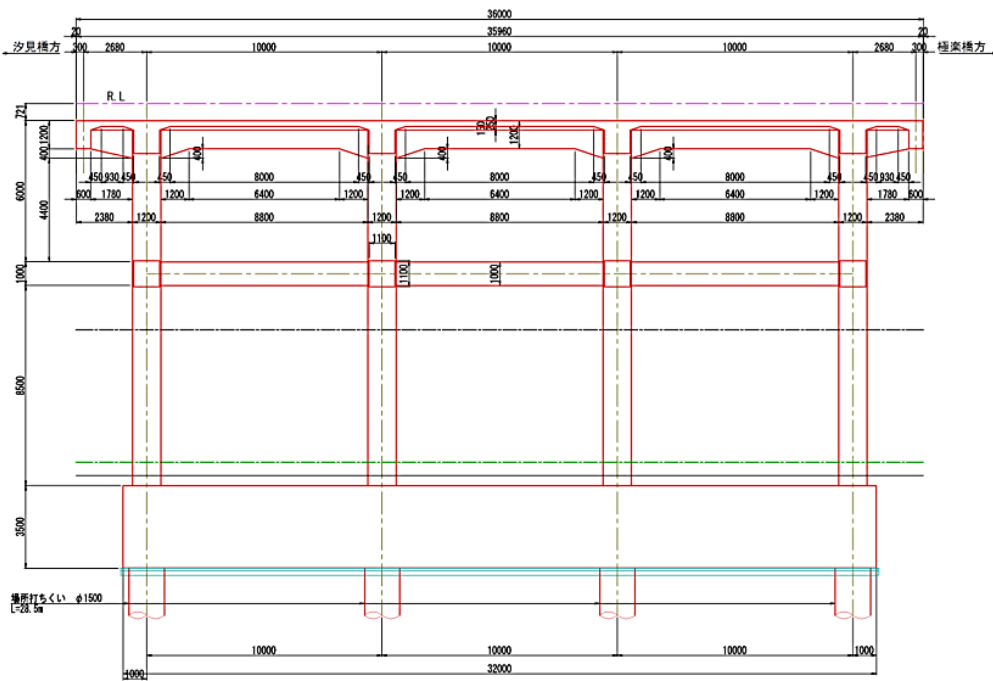
基礎スラブ厚の検討結果

基礎スラブ厚	高架橋が抵抗できる断層変位量
2.5 m	200mm 程度
3.5 m	500mm 程度

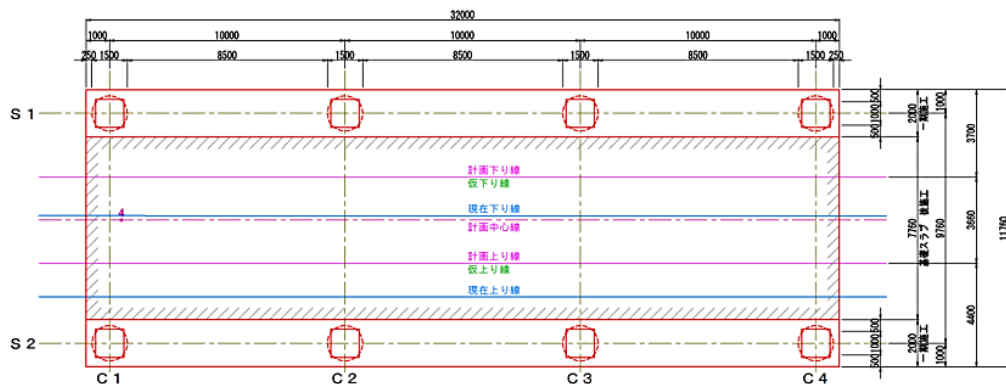
構造一般図

完全支持杭φ1500-28.5m-8本 s=1/100
(過年度設計)

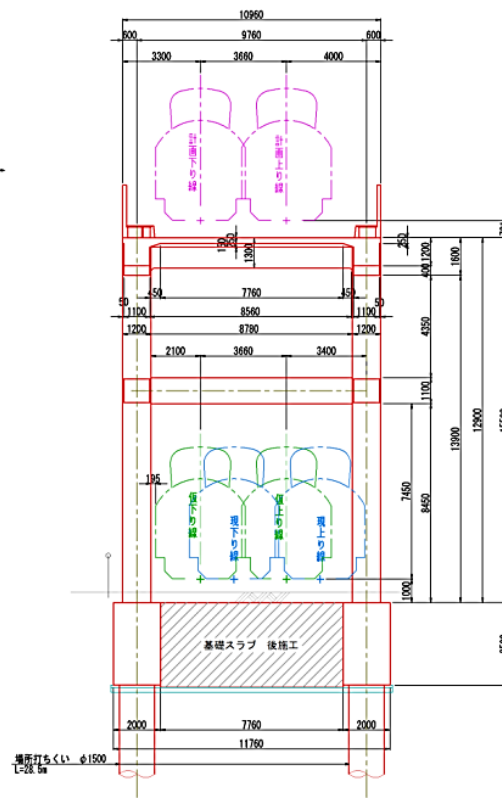
側面図



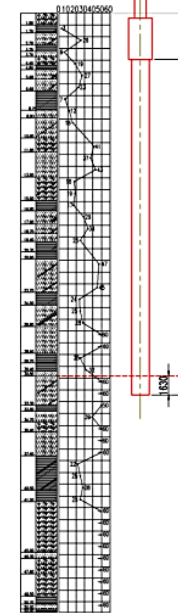
基礎平面図



断面図



柱状図 (S=1/200)



■ 結果について

- ❖ 3径間1柱1杭式のラーメン高架橋が追従できる断層変位量は、本解析結果から数十cm程度であると考えられる
- ❖ 本事業区間における考慮すべき断層変位量および形状、断層変位の位置については、今後の地質検討の結果と整合させながら検証していき、その結果から最終的な構造形式を決定する

パイルド・ラフト基礎の概略設計

3径間 $\phi 800$ 摩擦杭
 $\phi 0.8\text{m} \times 18.0\text{m} \times 30\text{本}$

1. 検討の概要

基礎形式は、断層変位に対して容易に追従できる形式が有利と考えられ、その候補としてパイルド・ラフト基礎が挙げられた

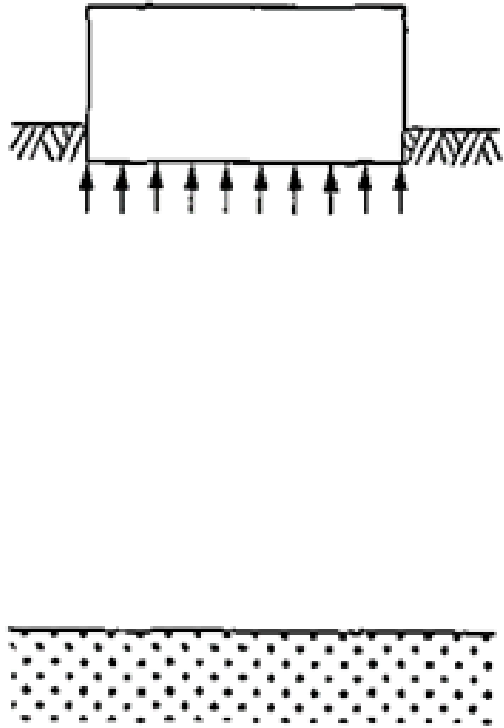
パイルド・ラフト基礎とは…？

直接基礎と杭基礎が複合してその両方で上部構造を支持する基礎形式である

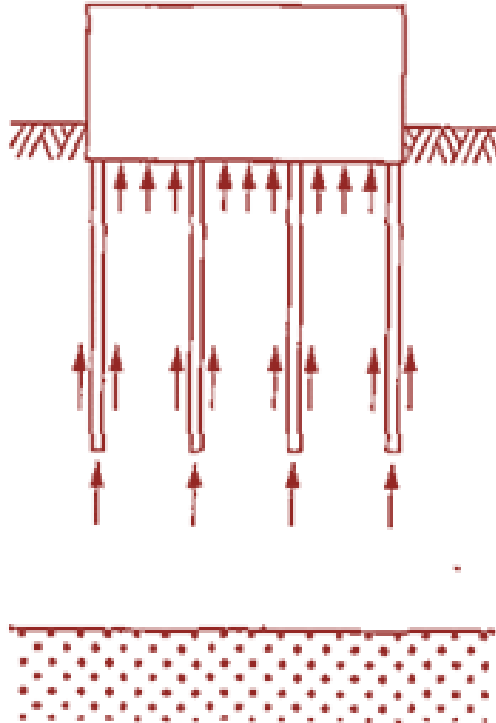
ある程度の沈下を許容したときに基礎底面における地盤の抵抗力が期待できる場合について、この抵抗力を積極的に利用して基礎の合理化を図る、直接基礎と杭基礎の中間にあたる基礎形式である

パイルド・ラフト基礎の概略設計

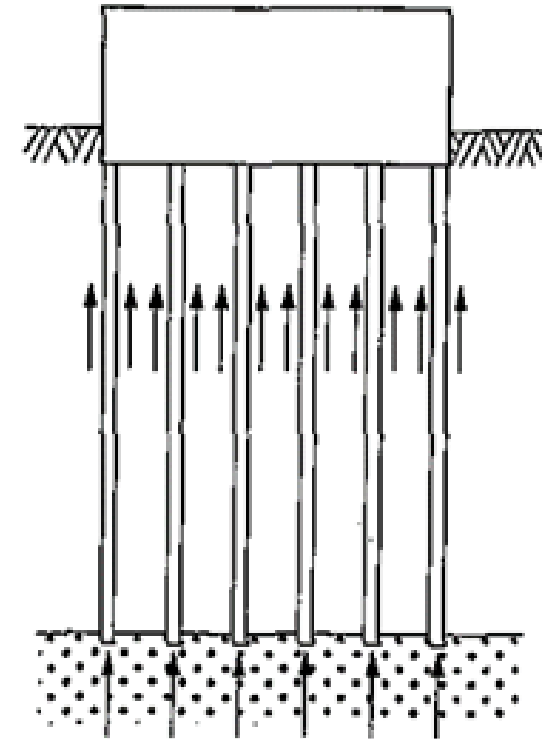
パイルド・ラフト基礎の概念



【a: 直接基礎】



【b: パイルド・ラフト基礎】



【c: 杭基礎】

パイルド・ラフト基礎の概略設計

1. 検討の概要

- 土木構造物である鉄道高架橋での採用実績は無く、設計方法が確立されていない
- ある程度の沈下を想定したパイルド・ラフト基礎の適用にあたっては、より精緻な沈下量の評価が必要

 **常時：施工ステップを考慮した3次元FEM解析**
地震時：3次元動的的非線形骨組み解析

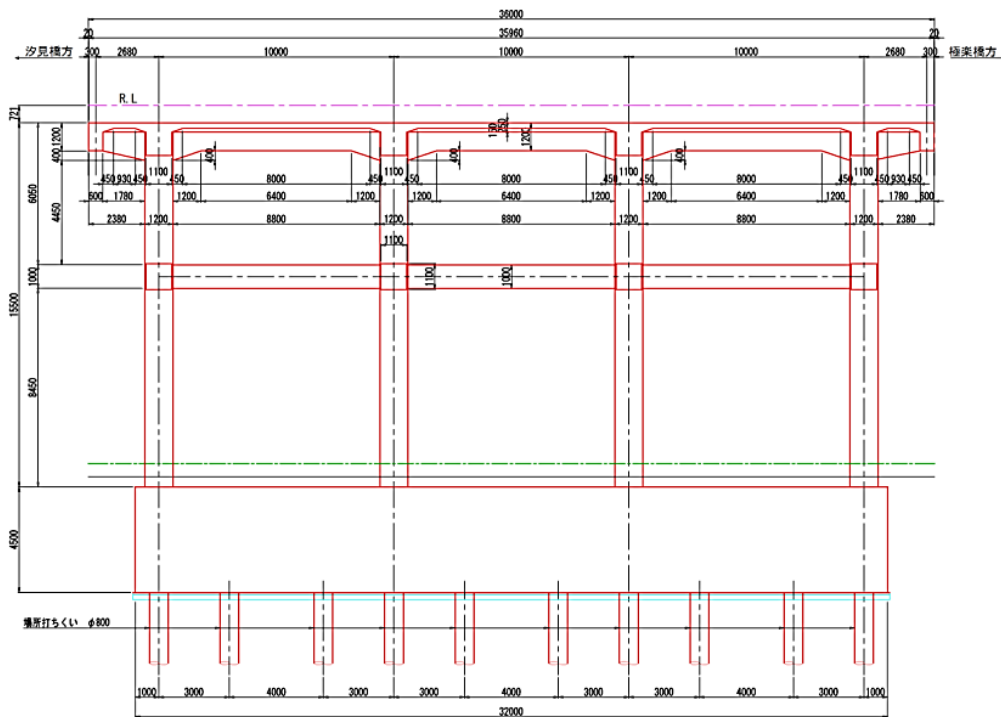
杭諸元は、杭径 ϕ 800mm・杭長18mの場所打ち杭とし、高架橋全重量と杭の支持力との比較による検討で概略的に本数を設定

パイルド・ラフト基礎の杭長・杭本数			
杭長L (m)	杭本数(本)		
	暫定供用時	完成時	合計
18	20	10	30

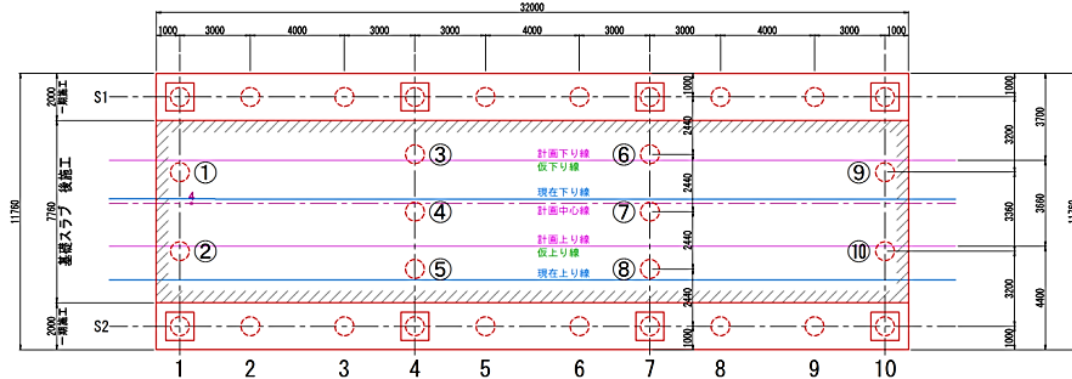
構造一般図

パイルドラフト基礎 S=1/100
(摩擦杭φ800-18m-30本+直接基礎)

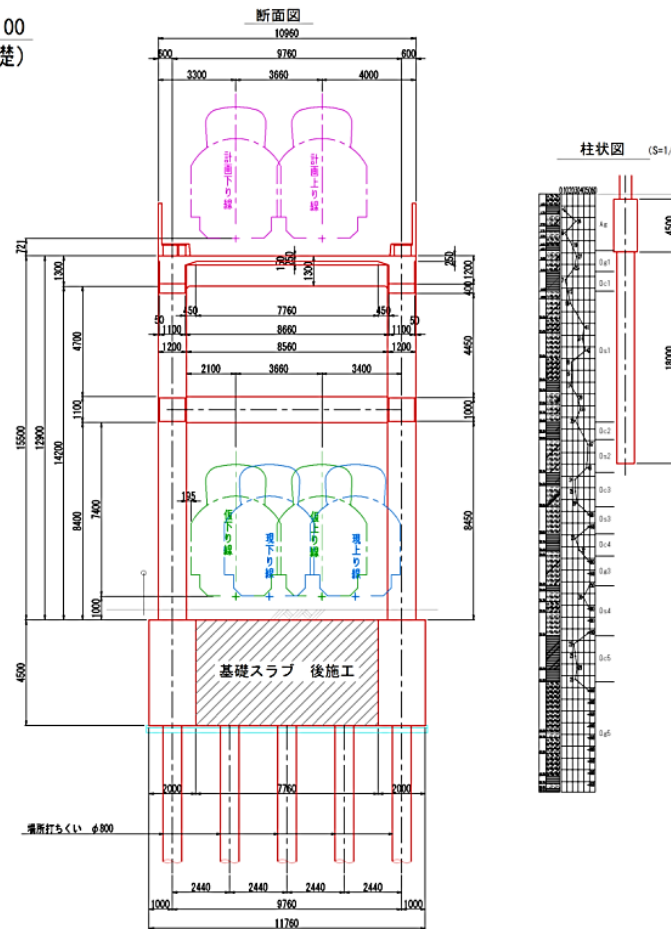
側面図



基礎平面図



柱状図 (S=1/200)



杭径D=800mmの必要本数, 杭長

杭長L (m)	杭本数(本)	
	暫定供用時	完成時
18	20	10

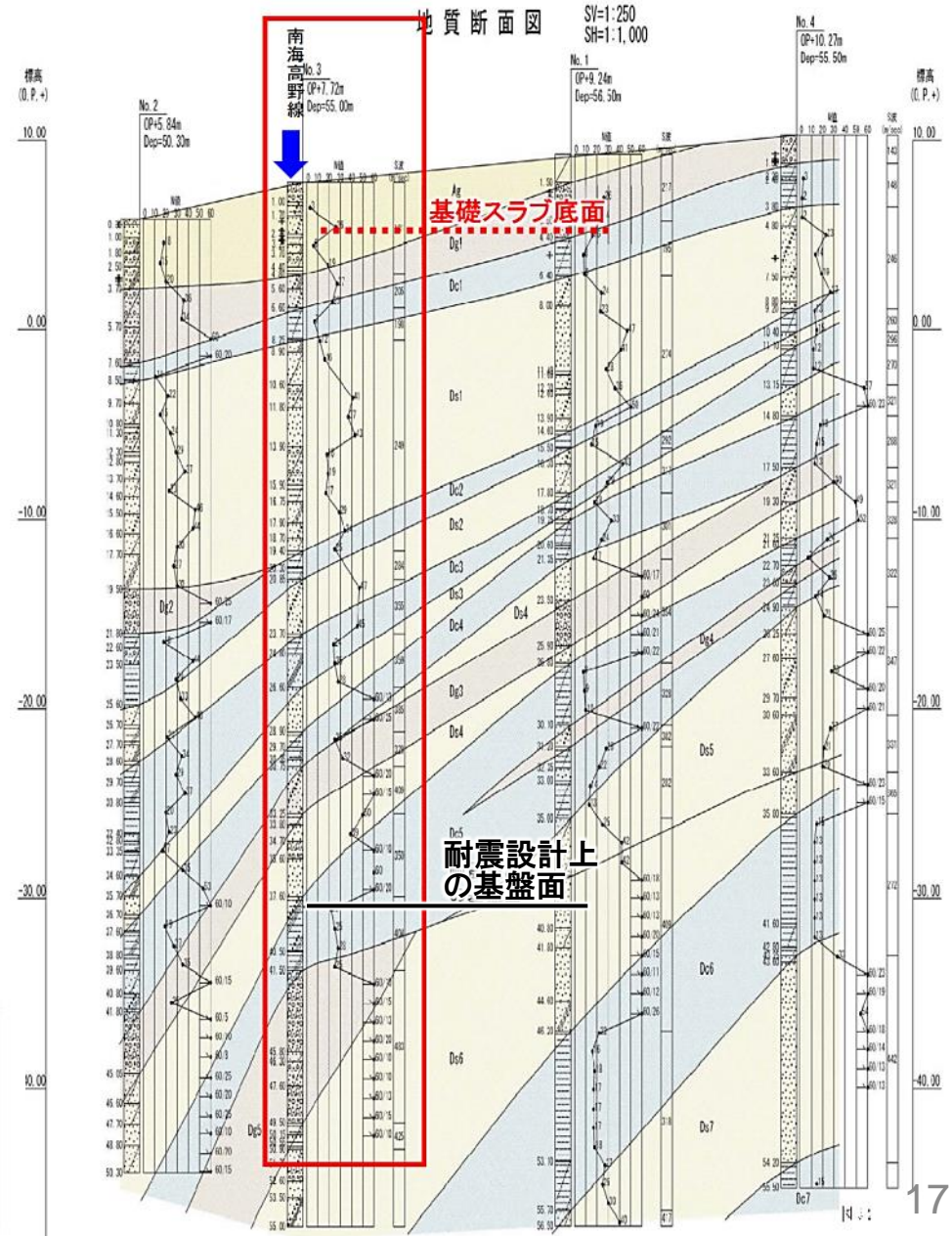
パイルド・ラフト基礎の概略設計

2. 地盤条件

地層	土質	層下端 標高 OP(m)	層下端 深度 GL-(m)	層厚 h (m)	平均 N値	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	粘着 力度 c (kN/m ²)
Ag	砂礫	2.92	4.80	4.80	13	19	0
Dg1	砂礫	1.12	6.60	1.80	25	19	0
Dc1	粘性土	-0.53	8.25	1.65	7	16	43
Ds1	砂質土	-11.68	19.40	11.15	28	20	0
Dc2	粘性土	-13.13	20.85	1.45	(18)	18	112
Ds2	砂質土	-15.98	23.70	2.85	46	19	0
Dc3	粘性土	-18.88	26.60	2.90	25	17	156
Ds3	砂質土	-21.18	28.90	2.30	60	20	0
Dc4	粘性土	-23.03	30.75	1.85	28	17	175
Dg3(支持層)	砂礫	-25.53	33.25	2.50	56	20	0
Ds4	砂質土	-29.88	37.60	4.35	54	19	0
Dc5	粘性土	-33.78	41.50	3.90	25	17	156
Dg5(基盤)	砂礫	-41.78	49.50	8.00	60	20	0

凡例

Ag	沖積砂礫土層
Dc	洪積粘性土層
Ds	洪積砂質土層
Dg	洪積砂礫土層

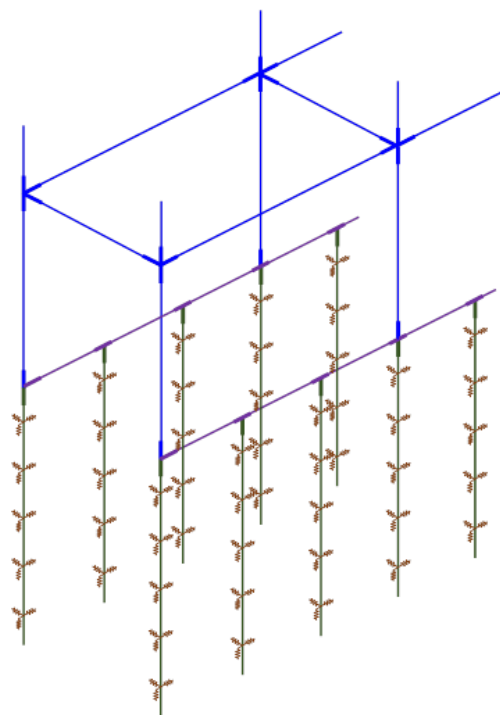


パイルド・ラフト基礎の概略設計

3. 常時の検討結果

検討モデルの概要

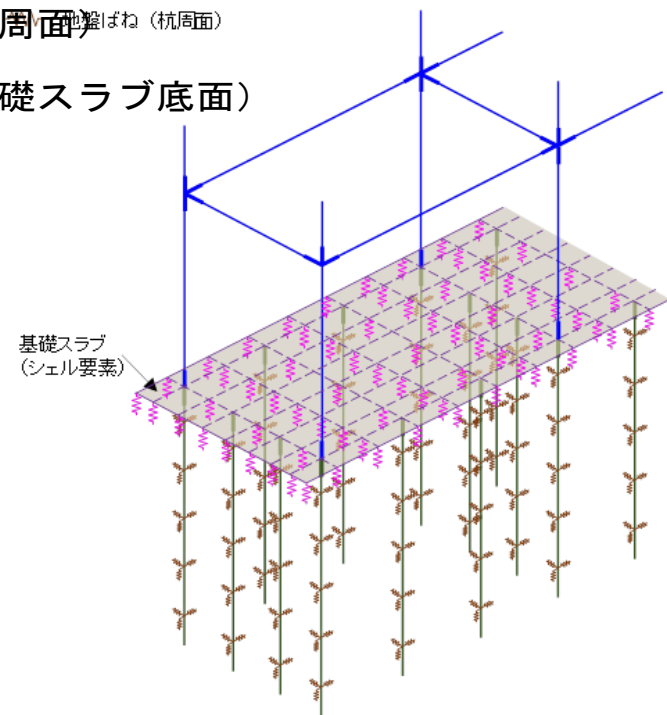
基礎スラブおよび杭を後施工する段階施工を考慮した、3次元弾性FEM解析を行い、杭および直接基礎の荷重分担を検討



【STEP1：暫定供用時】

—〰— : 地盤ばね（杭周面）

—〰— : 地盤ばね（基礎スラブ底面）



【STEP2：暫定供用時】

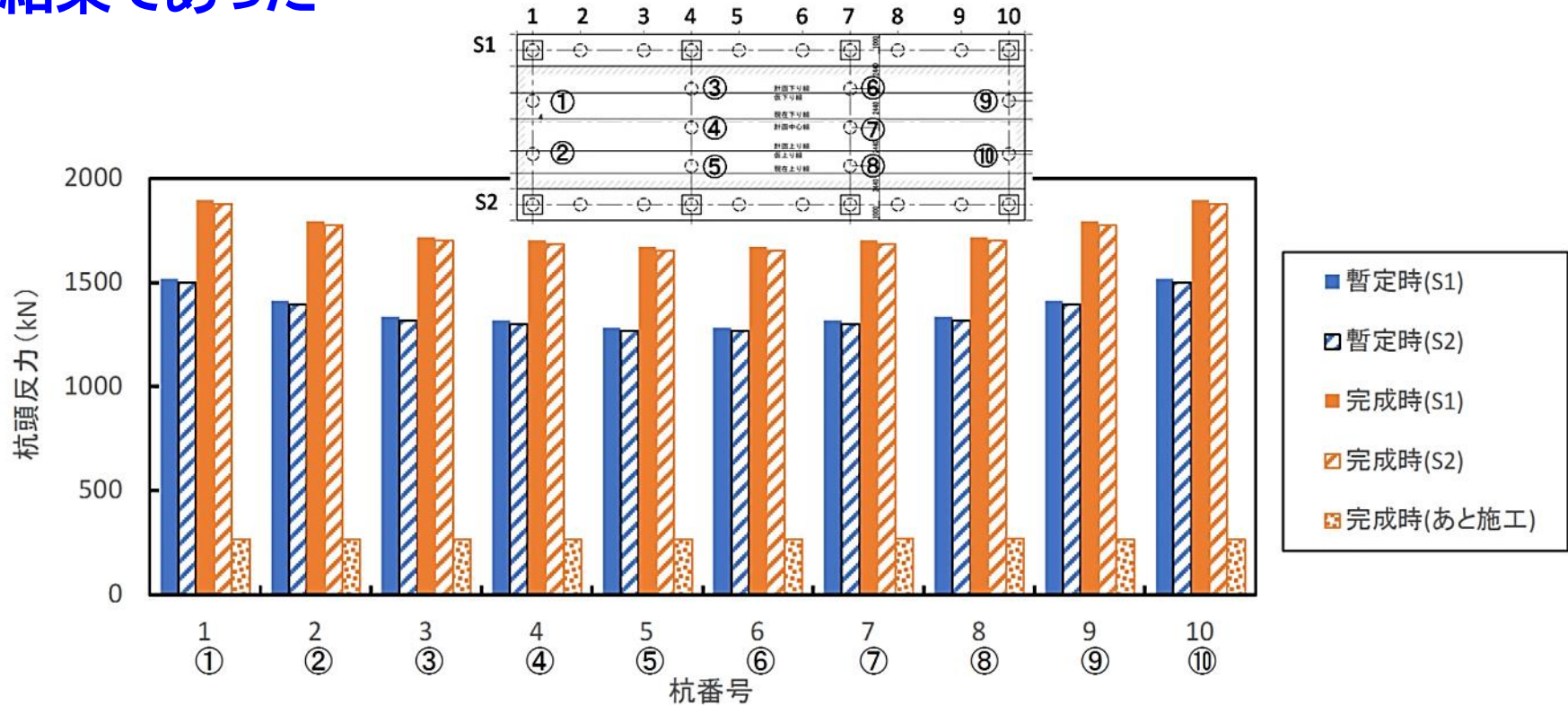
【STEP3：完成時（列車荷重・複線載荷）】

パイルド・ラフト基礎の概略設計

3. 常時の検討結果

杭頭反力の解析結果

杭頭反力の解析結果を示す。後施工する杭の杭頭反力が、先施工する杭(S1、S2列)よりもかなり小さく、**後施工する杭が荷重をあまり負担しない結果であった**



＜杭頭反力の解析結果＞

パイルド・ラフト基礎の概略設計

3. 常時の検討結果

杭と直接基礎の荷重分担率

- 完成時における杭と直接基礎部の荷重分担率については、高架橋の全重量(完成時)の80%程度は先施工される杭で支持されている
- 後施工される直接基礎の分担率は10%程度であったことから、**直接基礎の支持性能も期待したパイルド・ラフト基礎として機能していない**

沈下量の解析結果

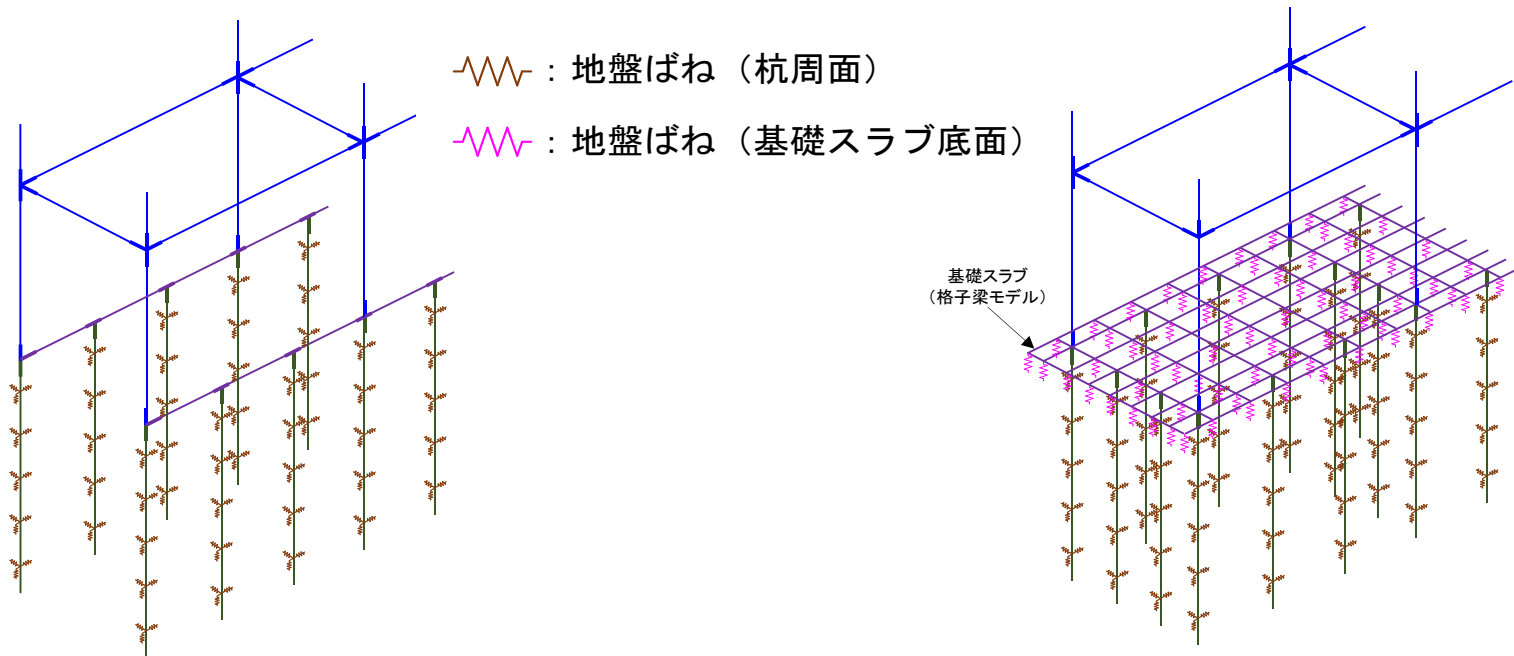
沈下量の解析結果(mm)				
	(今回検討)			(過年度:参考)
	パイルド・ラフト基礎0.8m×18m×30本			1柱1杭式完全支持杭1.5m×28.5m×8本
	暫定供用時	完成時		完成時
	死荷重時	死荷重時	列車荷重時	列車荷重時
上層目地部	12.0	14.6	15.7	5.0
杭頭部	11.3	13.9	14.6	6.6

パイルド・ラフト基礎の概略設計

4. 地震時の検討

検討モデルの概要

- ◆ 暫定供用時および完成時で各々別のモデルにより応答値を算定
- ◆ 地盤ばね定数は常時と同様の地盤物性を用い、非線形特性を考慮して設定



※部材および地盤ばねには、非線形特性（鉄道標準）を考慮する

【a：暫定供用時の解析モデル】

【b：完成時の解析モデル】

4. 地震時の検討

検討モデルの概要

■ 設計地震動

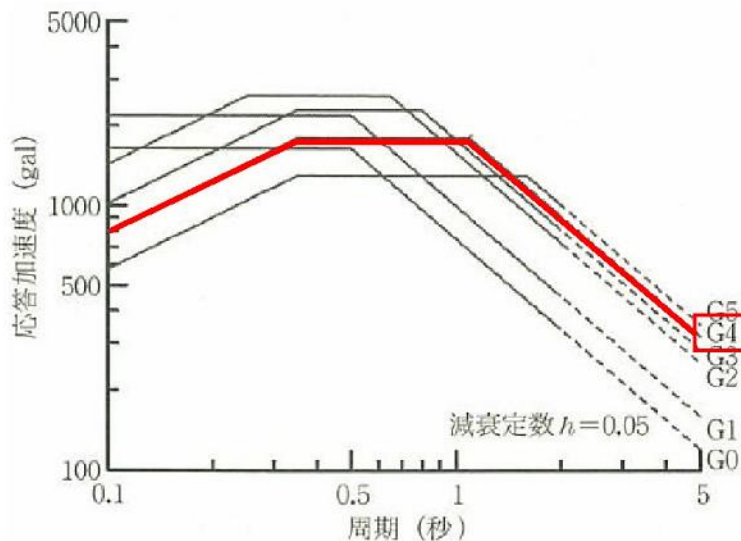
- 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(以下【耐震標準】)より **L2地震動スペクトルⅡ**とし、当該地点の地盤種別である、**G4地盤の地表面設計地震動**を用いた

地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル (G4地盤)

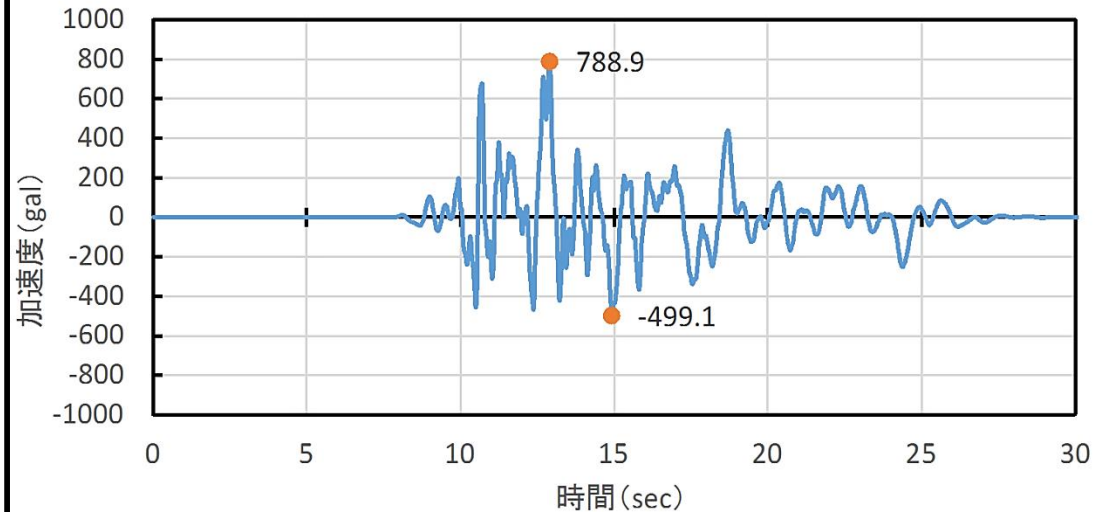
設計地震動	地盤種別	固有周期 $T(\text{sec})$	応答加速度値(gal) (減衰5%)
L2地震動 (スペクトルⅡ)	G4地盤	$0.1 \leq T < 0.35$	$3561.46 \times T^{0.65}$
		$0.35 \leq T \leq 1.1$	1800
		$1.1 < T \leq 2.0$	$2006.02 \times T^{0.137}$

パイルド・ラフト基礎の概略設計

地表面設計地震動の 弾性加速度応答スペクトル



設計地表面加速度波形



4. 地震時の検討

検討結果

パイルド・ラフト基礎に対する地震時の検討において、杭は長期支持性能に対して設定した諸元(杭径、杭長、本数)で耐震性能を満足した

パイルド・ラフト基礎の概略設計 ～まとめ～

- ❖ 常時に対する3次元弾性FEM解析の結果は、高架橋全重量の約80%が先施工する杭で支持され、後施工する直接基礎が負担する荷重は高架橋全重量の11%と小さく、**ほぼ基礎杭で支持されるもの(摩擦杭基礎の支持形態)であった**
- ❖ 常時における、高架橋(上層目地部)の沈下量は、過年度に検討した完全支持杭高架橋の沈下量5mmに対して、約3倍の沈下量である



➡ 本事業における基礎の構造形式としては、パイルドラフト基礎の適用性は低い

細径完全支持杭の概略設計

3径間 $\phi 800$ 完全支持杭
 $\phi 0.8\text{m} \times 28.0\text{m} \times 20$ 本

細径完全支持杭の概略設計

1. 検討の概要

(1) 1柱1杭式完全支持杭 ($\phi 1.5\text{m} \times 28.5\text{m} \times 8\text{本}$)

杭1本あたりの剛性・耐力および引抜き支持力が大きく、断層変位に対する抵抗が大きい(追従性が低い)と考えられる。

➡ **基礎スラブに発生する断面力が大きくなり、非常に厚い基礎スラブとなることで不経済になる可能性が考えられる。**

(2) パイルド・ラフト基礎(摩擦杭) ($\phi 0.8\text{m} \times 18\text{m} \times 30\text{本}$)

後施工部分の支持力性能が合理的に発揮できないことに加え、**通常の使用状態における沈下の発生による列車走行安全性への影響が課題**となる。

細径完全支持杭の概略設計

1. 検討の概要

そこで、(1)1柱1杭式完全支持杭と(2)パイルド・ラフト基礎(摩擦杭)の中間的な基礎形式として**(3)細径完全支持杭**についても比較案として追加し、概略設計を行った

(3) 細径完全支持杭

列車荷重に対する確実な支持性能と、断層変位に対する追従性を確保することを意図し、剛性・耐力の小さい細径杭を多本数配置した形式である

【検討内容】

- 常時の支持力を満足する杭本数
- 耐震性能(杭の損傷、基礎の安定)を満足する杭本数

杭径はφ800mm、杭長は支持層までの28mの場所打ち杭とした

細径完全支持杭の概略設計

3. 検討結果

■ 1) 常時の支持力を満足する杭本数

常時(長期支持性能)を満足する杭本数(φ800mm)				
	杭1本当りの鉛直支持力(kN) (長期支持性能)	高架橋全重量 (kN)	全重量/支持力 (必要本数)	配置する 杭本数
暫定供用時	3990	19461	5	8
完成時		42511	11	12

■ 2) 3次元動的解析による耐震性能照査

解析モデルや手法等の解析条件については、前述したパイルド・ラフト基礎の場合とほぼ同様であるので省略する

耐震性能照査の結果

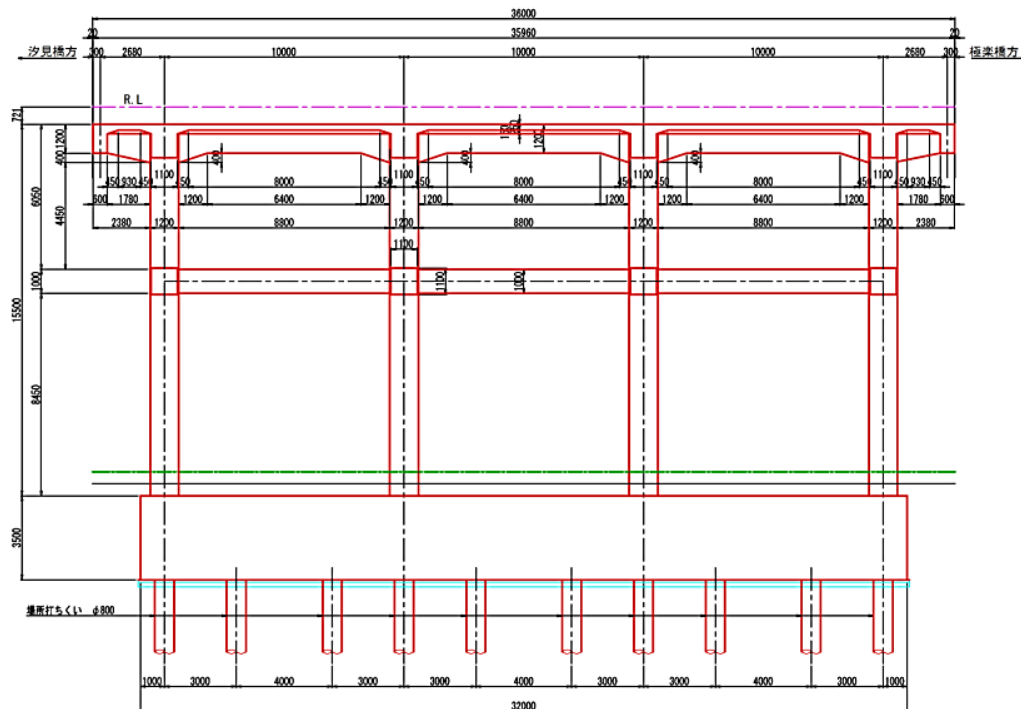
耐力照査の結果、杭は20本必要となった

その他の照査項目については、想定した部材で所用の要求性能を満足することが確認できた

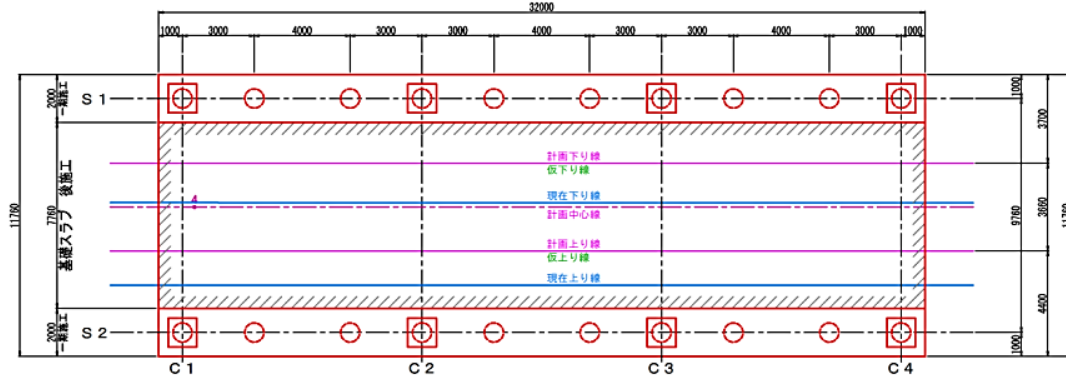
構造一般図

細径完全支持杭 $\phi 800$ -28m-20本 $S=1/100$

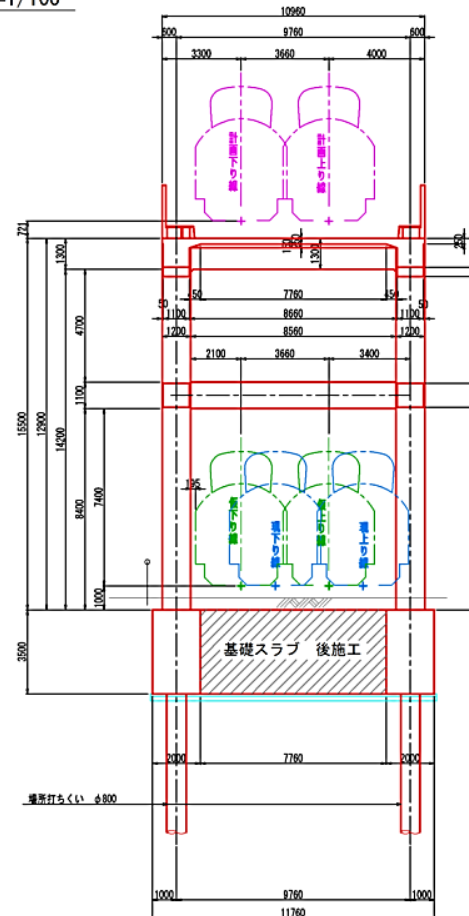
側面図



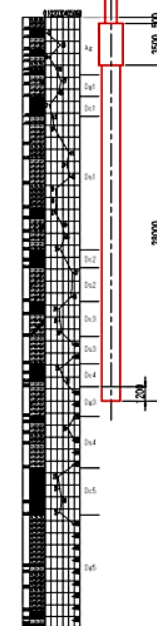
基礎平面図



断面図



柱状図 (S=1/200)



杭径D=800mmの必要本数, 杭長

杭長L (m)	杭本数(本)	
	暫定供用時	完成時
28	20	20

4. 細径完全支持杭形式の設計結果に対する考察

列車荷重に対する高い支持性能を有し、かつ断層変位に対する追随性を確保することを意図した基礎形式の概略設計を行った

- ✳ 1柱1杭式完全支持杭の場合よりも細径の杭を用いる
- ✳ 杭1本当りの支持力および耐力・剛性を小さくすることで断層変位に対する抵抗を小さくし、追随性の向上を図るもの

暫定供用時の耐震性能を確保するために20本の杭が必要となったが、この杭本数で意図したとおり、断層変位に対する抵抗を小さくできているかについて、これまで概略設計を実施した他の基礎構造案と比較検討を実施した

細径完全支持杭の概略設計 ～まとめ～

4. 細径完全支持杭形式の設計結果に対する考察

- (3) 細径完全支持杭の引抜き支持力は、(1)1柱1杭式完全支持杭の1.3倍程度であるため、意図したような断層変位に対する追随性が得られない可能性があるが、今後詳細な解析を実施し検証する
- 細径杭を用いることは、狭隘箇所での施工性や経済性に優れることから、(3)細径完全支持杭も比較案として採用する

杭の引抜き支持力の比較

	全本数	引抜き支持力(kN) L2地震時	
		1本当り	全本数当り
(1)1柱1杭式完全支持杭 (φ1.5m×28.5m)	8	16195.2	129561.6
(2)パイルド・ラフト基礎 (φ0.8m×18.0m)	30	3776.5	113295.0
(3)細径完全支持杭 (φ0.8m×28.0m)	20	8644.3	172886.0

断層変位の影響に関する 簡易検討

断層変位の影響に関する簡易検討

1. 検討の概要

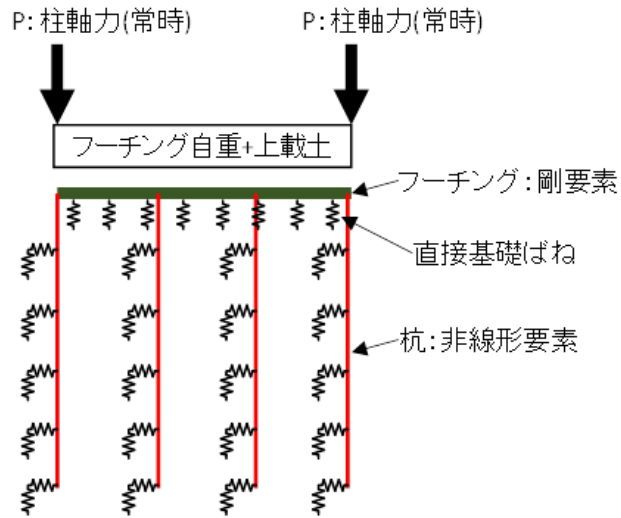
これまで概略設計を行った基礎形式3案について、どの形式が断層変位対策として有効かを把握する目的で、簡略化した2次元骨組み解析を用いた断層変位解析による比較検討を行った

2. 検討の方法

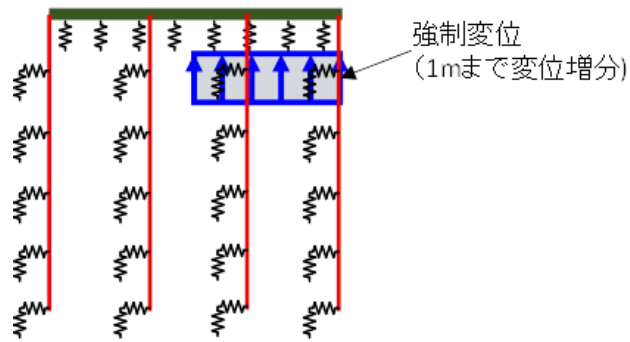
簡易な2次元骨組みモデルを用いた静的解析により実施する

基礎種別3ケースに対して解析を行い、フーチングの断面力を比較することにより、断層変位による構造物への影響程度の差を確認する

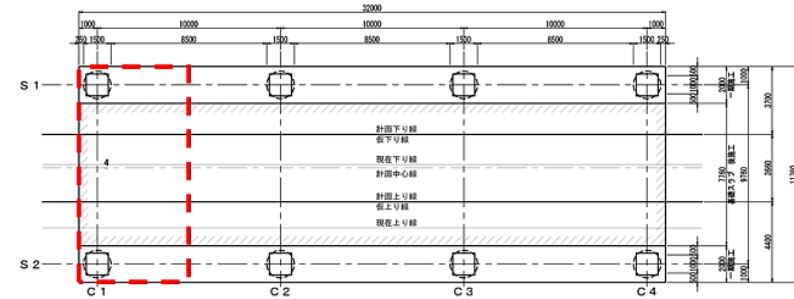
断層変位の影響に関する簡易検討



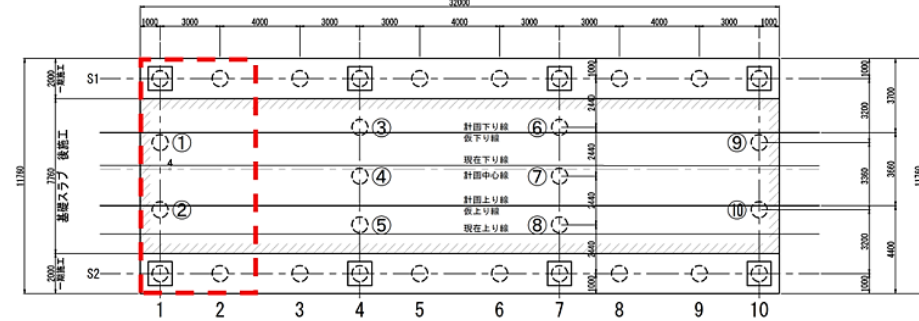
Step0 (初期応力解析)



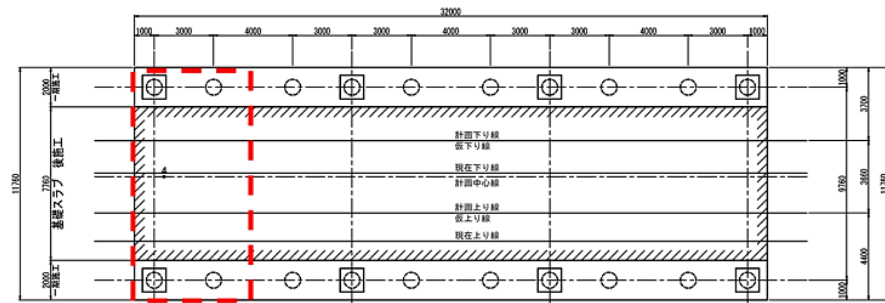
Step1 ~ (変位増分解析)



(1) 1柱1杭式完全支持杭



(2) パイルド・ラフト基礎(摩擦杭)

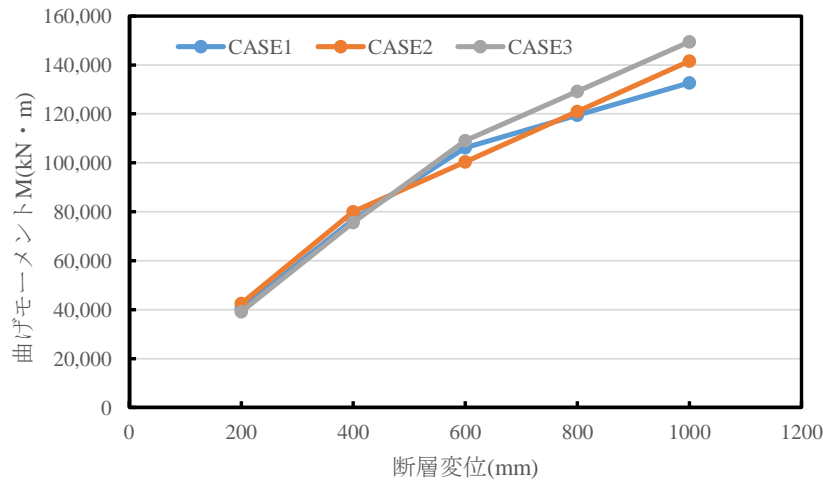


(3) 細径完全支持杭

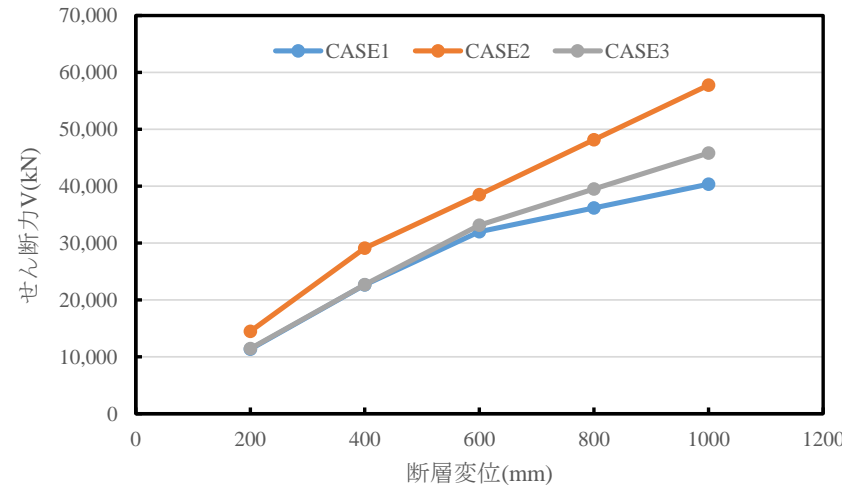
<断層変位の影響に関する簡易検討>

断層変位の影響に関する簡易検討

3. 解析結果



【a：曲げモーメント】



【b：せん断力】

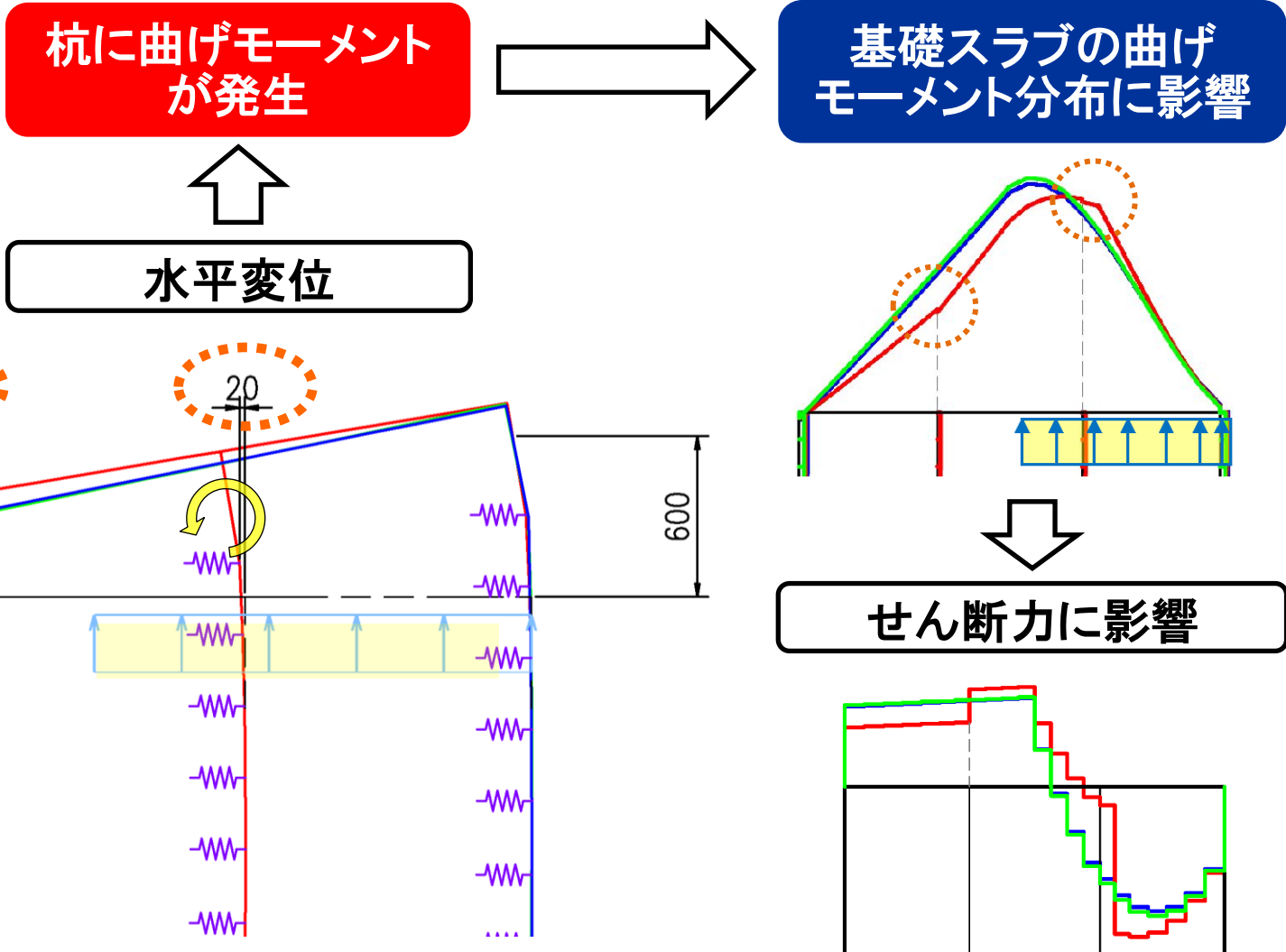
＜発生断面力の比較＞

- 最大モーメントに各基礎構造で大差はなかったが、最大せん断力については、パイルドラフト基礎が一番大きな値となった

断層変位の影響に関する簡易検討

パイルド・ラフト基礎の断面力について

- (1) 青線
- (2) 赤線
- (3) 緑線



断層変位600mm時における変形図(変位倍率3倍)

断層変位の影響に関する簡易検討

4. 基礎スラブ厚の想定

断層変位解析(3次元骨組み解析)より、(1)完全支持杭(1柱1杭式)で、500mmの断層変位時に必要な基礎スラブ厚は3.5mであったことから、簡易解析の発生断面力を比較し、基礎スラブ厚を推定した

簡易断層変位解析による必要基礎スラブ厚の推定

	杭径 (m)	杭長 (m)	本数	(1)に対する 基礎スラブ断面力	基礎 スラブ厚 (m)
(1)完全支持杭 (1柱1杭式)	1.5	28.5	8	---	3.5
(2)パイルド・ラフト基礎 (摩擦杭)	0.8	20.0	30	1.3倍程度	4.5
(3)完全支持杭 (群杭配置)	0.8	29.0	20	同等	3.5

(2)パイルド・ラフト基礎では、杭による影響を排除するために細径の短い杭を配置したが、その効果が十分に得られていないと結果なった

今後の検討方針

今後の検討方針

- **パイルド・ラフト基礎**については、本連立事業においては**適用性は低い**結果となった
- 今回実施した(1) **1柱1杭式完全支持杭** ($\phi 1.5\text{m} \times 28.5\text{m} \times 8\text{本}$)の断層変位解析結果に加えて、(3) **細径完全支持杭の3径間ラーメン高架橋**の3次元断層変位解析を実施し、断層変位に対する追随性について両者を比較する
- 比較検討の結果、断層変位に優位な基礎形式について、**1径間ラーメン高架橋**の断層変位解析を実施し、3径間ラーメン高架橋と断層変位に対する追随性について比較する
- 地質検討の結果から想定された考慮すべき断層変位量に対して、適切な高架橋構造形式を選定する