

ファイバーモデルを用いた鋼製ラーメン橋脚と 逆L型偏心鋼製橋脚の耐震設計

九州支店 技術部 大森貴行

 株式会社 オリエンタルコンサルタツツ



1. 本日本日お伝えすること

- 
- 
- ・技術論
 - ・設計実務者の日々仕事の状況

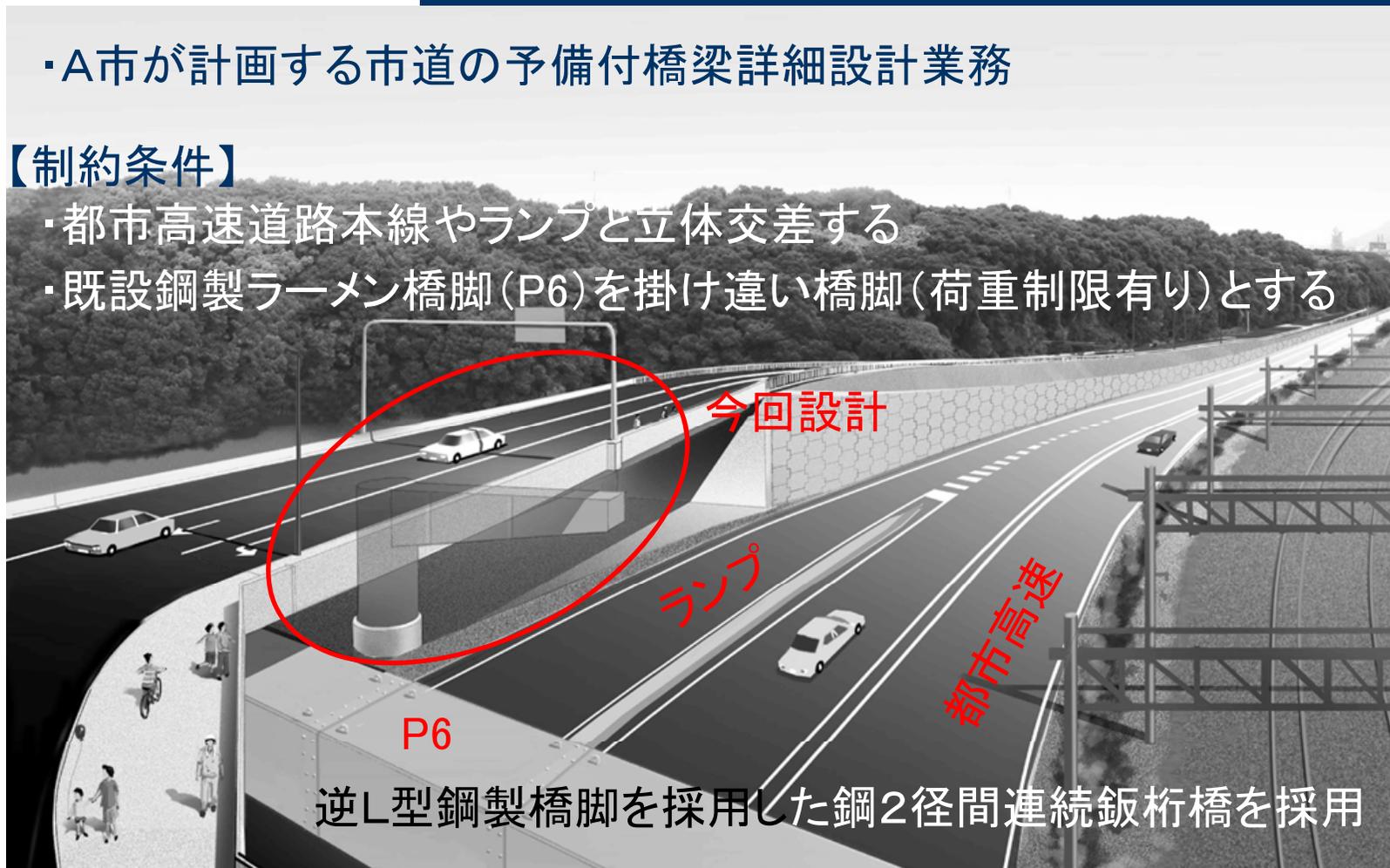
1. はじめに

1.1 業務概要

- ・A市が計画する市道の予備付橋梁詳細設計業務

【制約条件】

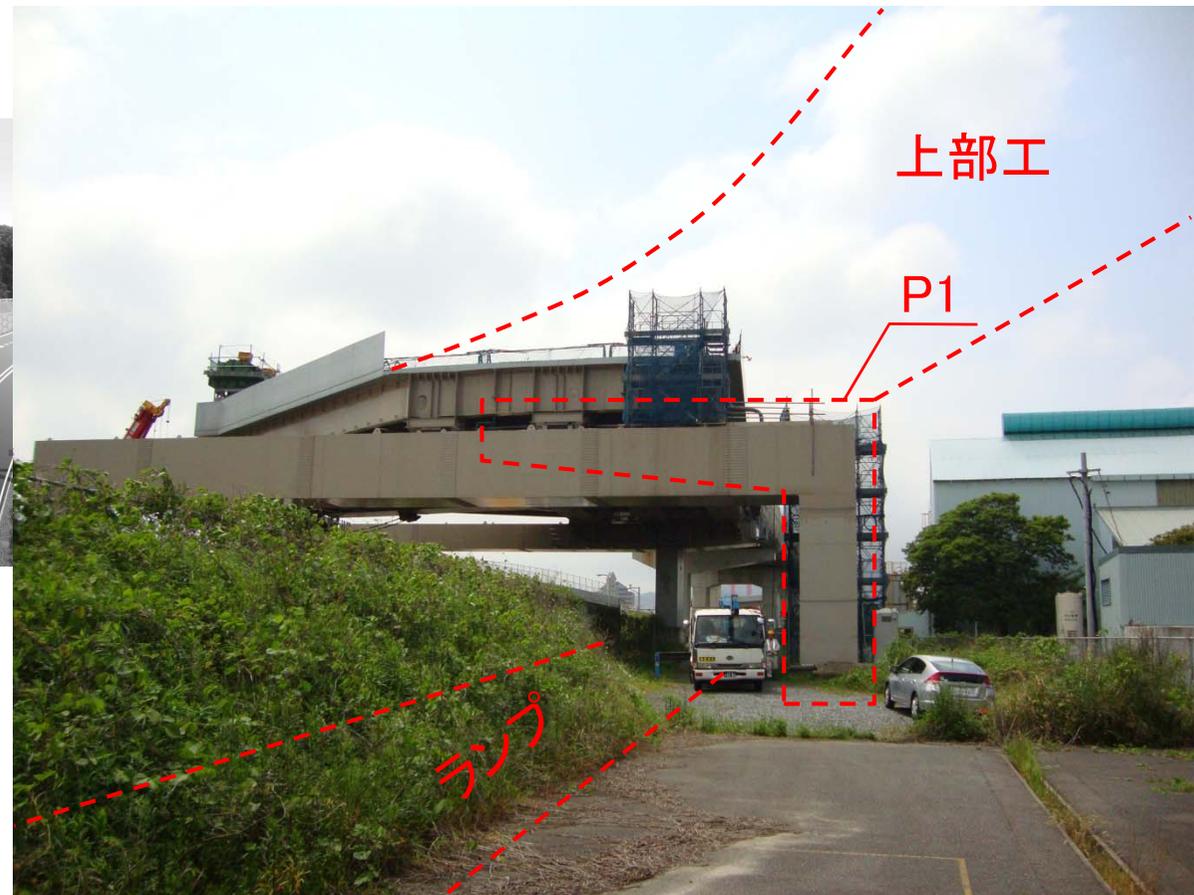
- ・都市高速道路本線やランプと立体交差する
- ・既設鋼製ラーメン橋脚(P6)を掛け違い橋脚(荷重制限有り)とする



1. はじめに

1.1 業務概要

【現地踏査】 現況状況



1. はじめに

1.1 業務概要

【現地踏査】 現況状況



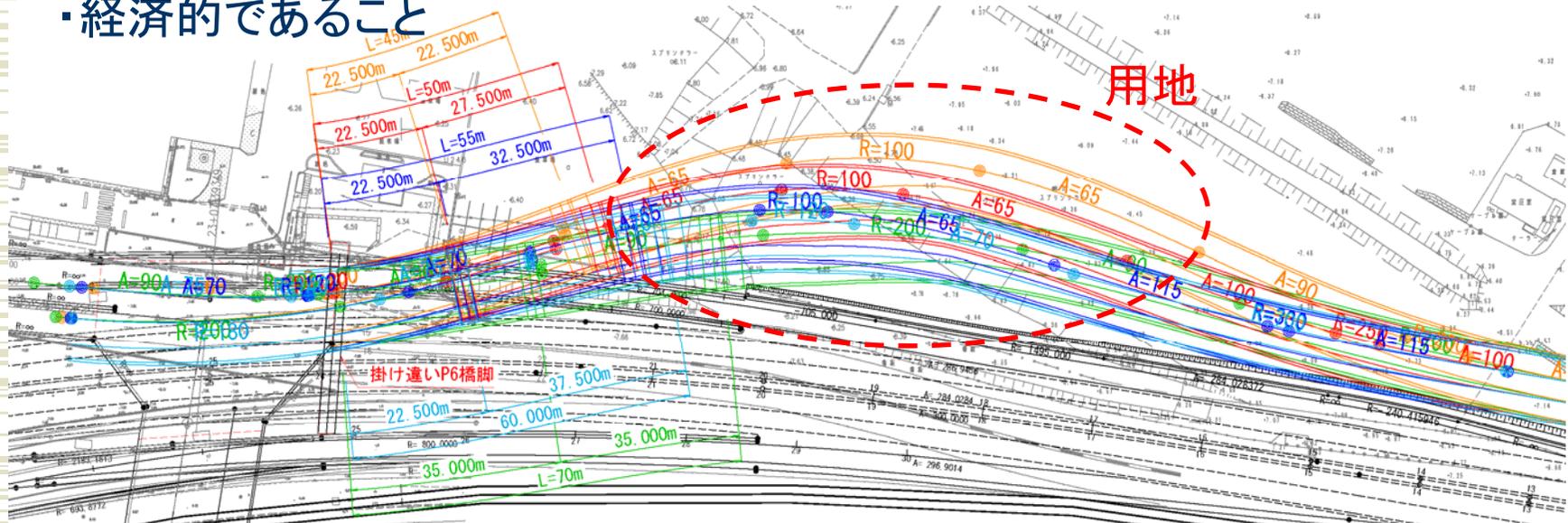
1. はじめに

1.1 業務概要

【橋梁計画する上での補足】

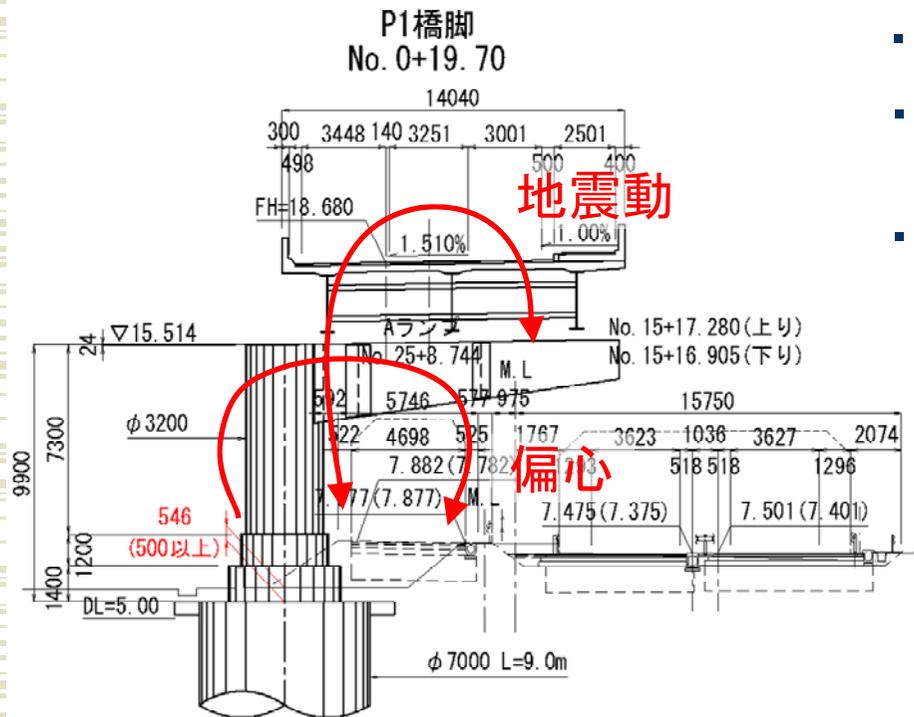
- ・道路構造令を満足すること
- ・用地条件(買収費用)
- ・構造上の問題をクリアできること。
- ・経済的であること

→逆L型の偏心鋼製橋脚が不可避



1. はじめに

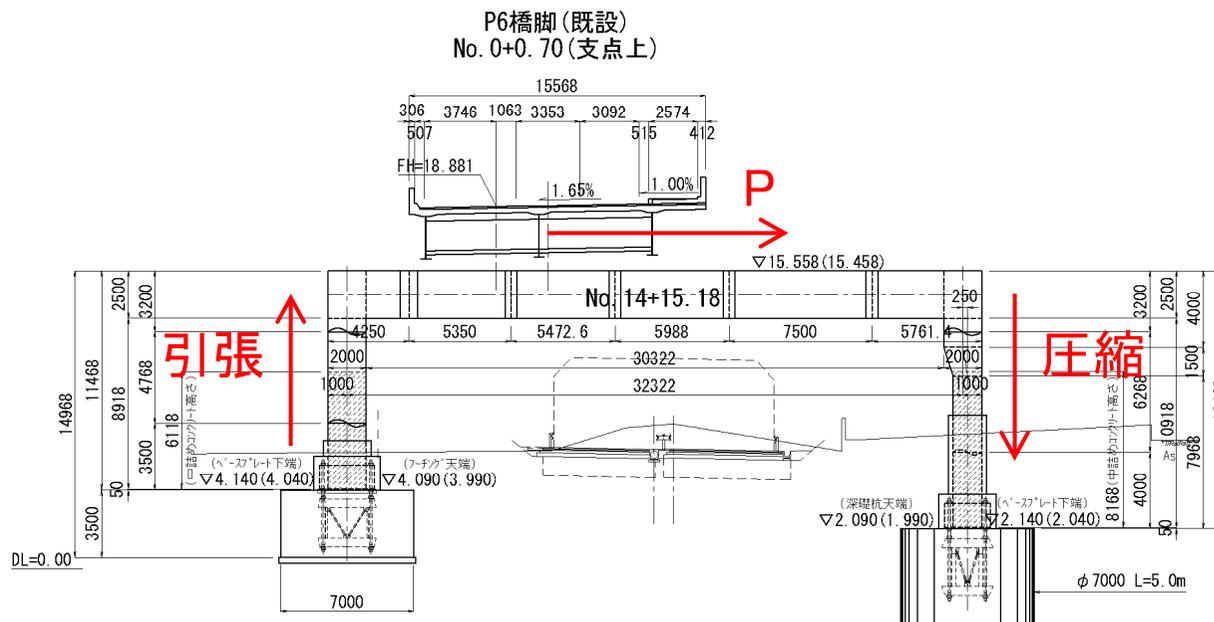
1.1 業務概要



- ・梁長は10m以上
- ・常時 柱基部偏心モーメント
60,000kN・m
- ・地震時は
偏心曲モーメント
+地震力による曲モーメント
= 2軸曲げ状態

1. はじめに

1.1 業務概要



一方、既設橋と掛け違い橋脚となる鋼ラーメン式橋脚(P6)

- ・地震による正負交番作用により軸力変動が生じる。
- ・時々刻々と変わる断面性能を評価した解析が必要
- ・P6、P1共、道路橋示方書(以下道示)の適用範囲外
→ 耐震設計手法や性能の評価方法が ???

1. はじめに

1.2 耐震設計における本業務の課題

道示V編11章より、軸力変動と二軸曲げについての記述

「門型の鋼製ラーメン橋脚の面内方向に対しては、柱部に生じる変動軸力が式(中省略)の適用範囲にある場合には、(中省略)非線形履歴モデルを作成してよい。(道示VP202)」

ここで適用範囲とは $0 \leq N/N_y \leq 0.2$

「上部構造の死荷重が偏心している鋼製橋脚においては、 $M-\phi$ 関係において偏心モーメントの影響を考慮する他、必要に応じて幾何学的非線形の影響を考慮して動的解析を行う(以下省略。道示VP203)」

本橋はこの記述に当てはまる。

1. はじめに

1.2 耐震設計における本業務の課題

以上から本橋設計における課題を以下の通りとした。

- ・軸力変動や偏心モーメントの影響を考慮できる解析モデルの作成
- ・その耐震性能の評価手法

2. 設計対象橋梁の諸元

表1 対象橋梁の諸元

設計諸元		
道路区分等	市道・第4種1橋(V=50km/h)	
上部工形式	鋼2径間連続少数合成鈑桁橋	
下部工形式	P6: 鋼製ラーメン橋脚(掛違い) P1: 逆L型(偏心)鋼製橋脚 A2: 逆T式橋台(直接基礎)	
基礎形式	P6: 深礎杭, 直接基礎 P1: 深礎杭(ϕ 7000 L=9.0m)	
橋長/支間長	L=58.5m (=19.0m+38.2m)	
有効幅員/斜角	9.0m+ α / P6=79°, P1・A2=90°	
荷重・地盤種別	B活荷重・I種地盤	
鋼材	上部工	SM490Y, SM400(普通鋼材)
	下部工	SM570, SM570-H, SM490
適用示方書	道路橋示方書H14	

2. 設計対象橋梁の諸元

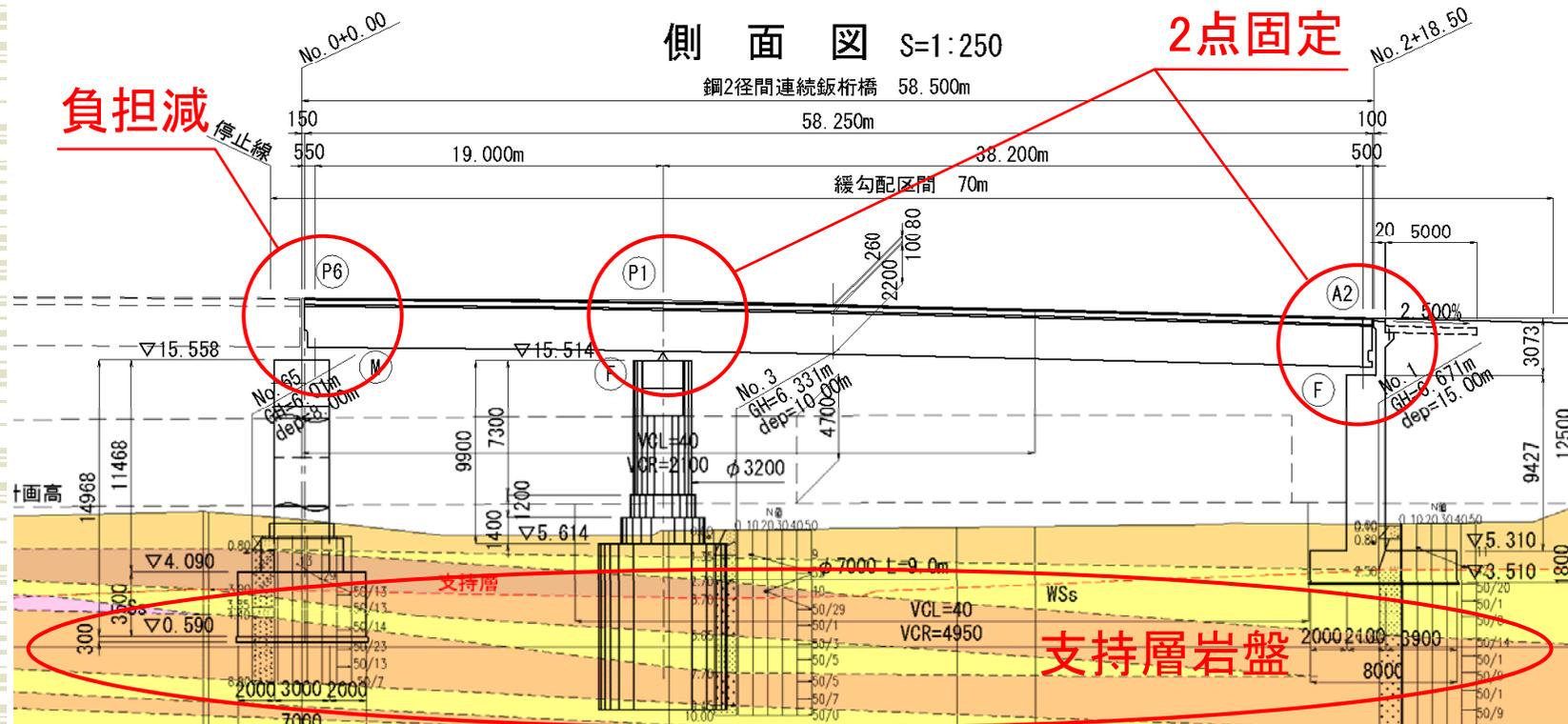


図1 橋梁一般図(側面図)

2. 設計対象橋梁の諸元

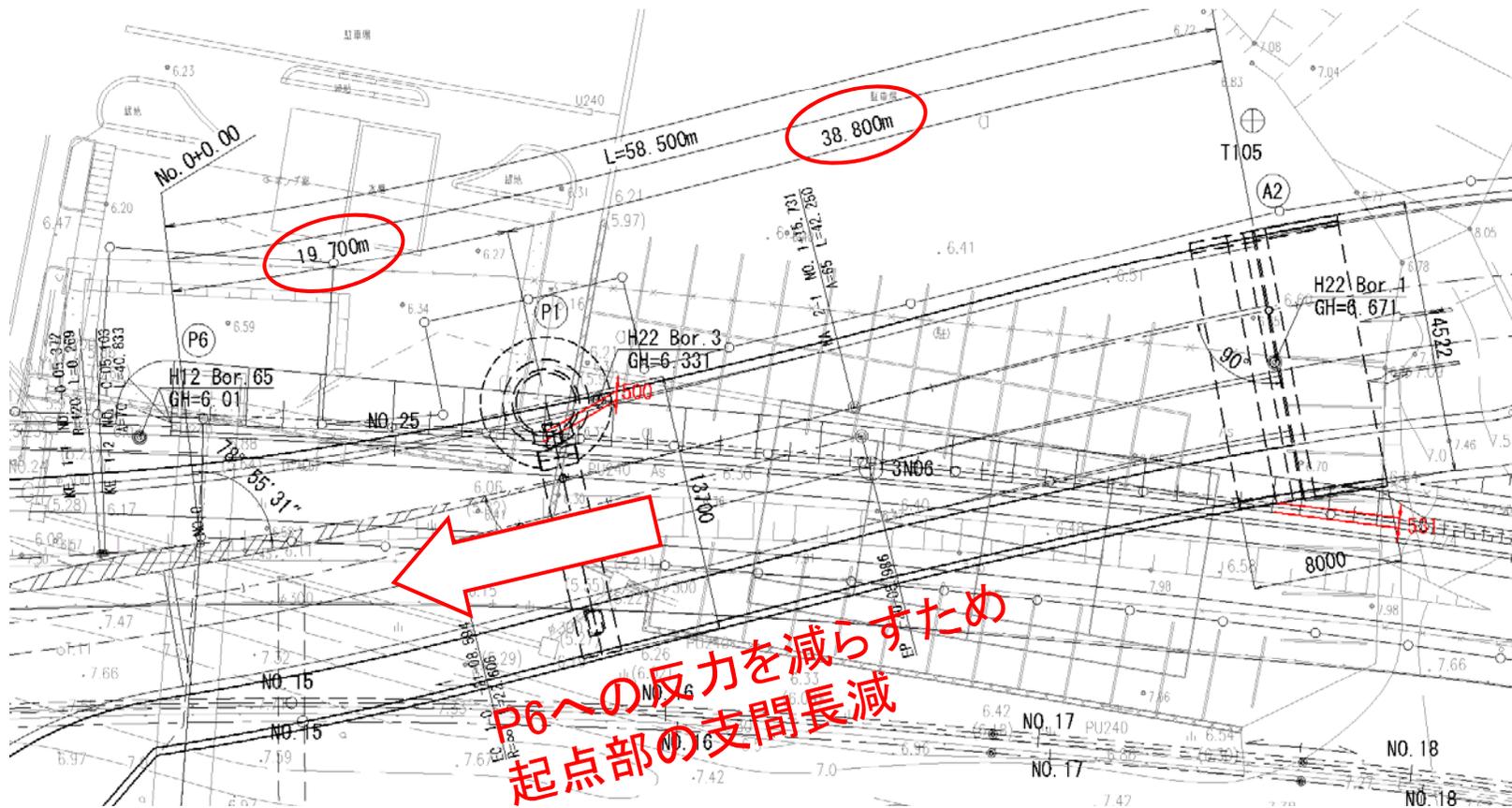


図1 橋梁一般図(平面図)

2. 設計対象橋梁の諸元

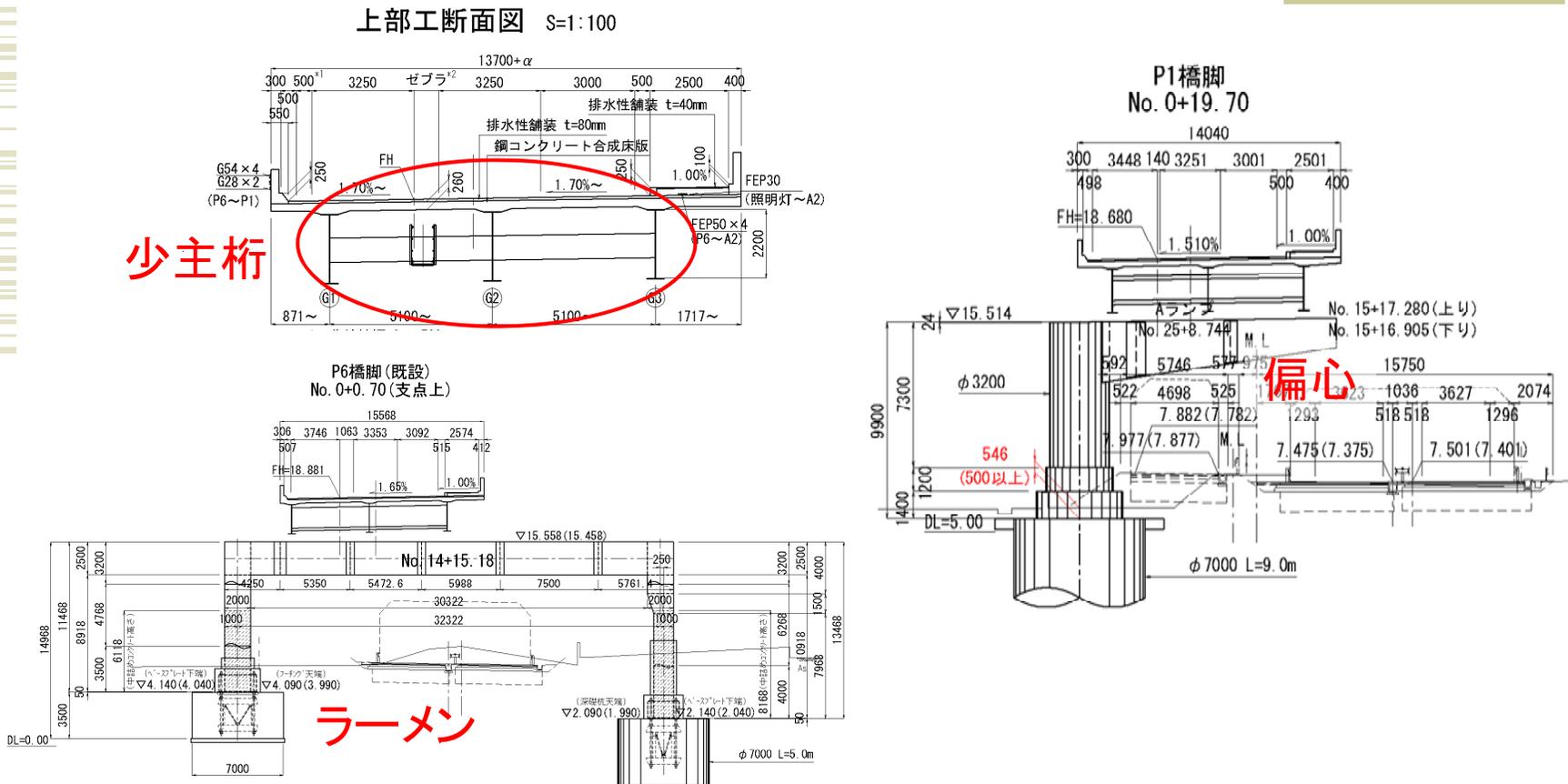


図1 橋梁一般図(断面図)

3. 耐震設計方針

3.1 過去の事例と文献等

1. 社内調査

職場の同僚(上司)、他支店の同僚(上司)、全社ヒアリング類似(鋼製ラーメン橋脚と偏心鋼製橋脚)の鋼製橋脚の設計事例はあったものの、基本設計レベル
詳細設計レベルの耐震設計事例はなかった(H22時点)。

2. 文献調査

学会、高速道路等特殊法人(鋼製橋脚の施工実績あり)の基準類
民間の文献

3. 実績調査(3社以上)

メーカー・ソフト会社・同業他社等へのヒアリング

3. 耐震設計方針

3.1 過去の事例と文献等

表2 基準・文献等調査結果

文献/団体	耐震設計方針等
道示V H14/日本道路協会	適用範囲外
橋の動的耐震設計H15/土木学会	軸力変動、二軸曲げの対応方法としてファイバーモデルにより影響を考慮できることを記述
設計基準H14/福北公社	鋼製橋脚の非線形履歴モデルはファイバーモデルを前提として記述。 ※福岡高速5号線動解要領(案)
鋼製橋脚の耐震設計H15/阪神公団	道示耐震編に従って動的照査を行うことを原則としている。(従って本橋は適用範囲外)
名古屋高速道路非線形動的解析実施要領 H15/名高速公社	鋼製橋脚はM-φモデルとファイバーモデルの何れかを用いることを記述。ラーメン構造の面内解析については特にファイバーモデルを指定。
橋梁構造物設計施工要領H15/首都公団	動的解析(L2)に係わる記述無し
鋼橋の耐震・制振設計ガイドラインH18/鋼構造協会	ラーメン構造の面内解析については、M-N-φモデルとファイバーモデルについて記述。現在の計算機環境を考慮してファイバーモデルを推奨。

3. 耐震設計方針

3.1 過去の事例と文献等

表3 ファイバー要素を用いた設計実績調査概要

構造形式	発注者
鋼上路アーチ橋	国土交通省(東北地整、関東地整、北陸地整、中部地整)、宮城県、岐阜県、東京都、三重県、大阪府、兵庫県、熊本県
鋼中路アーチ橋	長野県、山口県
鋼方杖ラーメン橋	国土交通省(中部地整、近畿地整)、福島県、東京都、熊本県、NEXCO
鋼上路トラス	国土交通省(近畿地整)、NEXCO
RCラーメン橋脚	国土交通省(北陸地整、中部地整、近畿地整、中国地整)、北海道開発局、宮城県、新潟県、千葉県、石川県、大阪府、熊本県、JR西日本、NEXCO
鋼製橋脚	国土交通省(中国地整)、福北公社、北九州市

3. 耐震設計方針

3.1 過去の事例と文献等

表4 ファイバー要素を用いたときの照査方法(その1)

文献/団体	照査基準値
道示VH14/日本道路協会	記述無し
橋の動的耐震設計H15 /土木学会	安全性能; ひずみ照査 ※許容ひずみ: $\frac{\epsilon_m}{\epsilon_y} = \frac{1.41}{(R_f \lambda_s^{-0.18} - 0.21)^{0.462}} + 0.38 \leq 20.0$ $2\epsilon_y$ (耐震設計例より) 修復性能; 残留変位の照査 ※許容残留変位: 橋脚下端から上部構造の慣性力作用位置までの高さの1/100
設計基準H14/福北公社	安全性能; ひずみ照査 ※許容ひずみは名高速 修復性能; 残留変位の照査 ※許容残留変位は上記(土木学会)と同様。 ただし算出式は名高速と同様。
鋼製橋脚の耐震設計・・・ H15/阪神公団	記述無し

※許容値は各文献にて提示されたものの一部であり、耐震性能やある構造物条件下におけるものであるため、ここでは参考値とする。

3. 耐震設計方針

3.1 過去の事例と文献等

表4 ファイバー要素を用いたときの照査方法(その2)

文献/団体	照査基準値
<p>名古屋高速道路非線形動的解析実施要領 H15 /名高速公社</p>	<p>安全性能; ひずみ照査 ※許容ひずみ</p> $\frac{\epsilon_{u,c}}{\epsilon_y} = \frac{0.8(1 - N/N_y)^{0.94}}{(R_r \cdot \bar{\lambda}_s^{0.18} - 0.168)^{1.25}} + 2.78(1 - N/N_y)^{0.59} \leq 20.0$ $R_r = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_r}} = 0.526 \frac{b}{nt} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \leq 0.5$ $\bar{\lambda}_s = \frac{1}{\sqrt{Q}} \frac{a}{r_s} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$ $Q = \frac{1}{2R} (\beta - \sqrt{\beta^2 - 4R}) \leq 1.0$ <p>D_c : コンクリート充填部の損傷度 D_s : 中空断面部の損傷度 $\epsilon_{u,c}$: コンクリート最縁端に生じる圧縮ひずみの、コンクリート充填部の有効破壊長領域での平均値 $\epsilon_{u,s}$: 中空鋼断面フランジに生じる圧縮ひずみの、中空鋼断面の有効破壊長領域での平均値 $\epsilon_{u,c}$: コンクリートの限界ひずみ(=0.011) $\epsilon_{u,s}$: 中空鋼断面フランジの限界ひずみ</p> <p>修復性能; 残留変位の照査 許容残留変位は上記(土木学会)と同様</p> $\delta_R = 34.9 \tan \left\{ 0.00786 \left(\frac{\delta_{max}}{\delta_y} - 1 \right) \right\} \delta_y \quad (6.3-2)$ <p>δ_{max} : 橋脚の最大応答変位 δ_y : 橋脚の降伏水平変位</p>

※許容値は各文献にて提示されたものの一部であり、耐震性能やある構造物条件下におけるものであるため、ここでは参考値とする。

3. 耐震設計方針

3.1 過去の事例と文献等

表4 ファイバー要素を用いたときの照査方法(その3)

文献/団体	照査基準値
橋梁構造物設計施工要領 H15/首都公団	記述無し
鋼橋の耐震・制振設計ガイドラインH18 /鋼構造協会	安全性能;応答変位の照査 ひずみ照査 ※許容ひずみ 2 ϵ_y (鋼), 0.004(コン充填鋼) 修復性能; 残留変位の照査 ($<h/300$)

※許容値は各文献にて提示されたものの一部であり、耐震性能やある構造物条件下におけるものであるため、ここでは参考値とする。

3. 耐震設計方針

3.1 過去の事例と文献等

以上の調査の結果より以下のことが確認できる。

- ・ 軸力変動や二軸曲げを考慮する場合、**ファイバー要素**を採用したケースが多く、またソフトもある程度充実している。
- ・ ファイバー要素を使用した設計(解析)実績は全国的に多いが、鋼製橋脚への適用実績はアーチ橋やRCラーメン橋に比べ少ない。
- ・ ファイバー要素を用いた場合、安全性能は**ひずみ照査**、修復性能は**残留変位の照査**により設計している実績が多い。
- ・ ひずみ照査を実施したときの**許容値は各文献**によって異なる。

3. 耐震設計方針

3.2 耐震設計方針

①解析モデル・・・ラーメン橋脚(P6)、逆L型偏心橋脚(P1)

軸力変動や2軸曲げの影響を評価するため、
3次元立体骨組みモデルとし、部材断面の材料非線形性は
ファイバーモデル(σ - ε モデル・バイリニア型移動硬化則モデル)を用いる
(斜角があるため、橋軸直角方向共にファイバーモデル)。

表5 解析モデル

部材名	部材断面のモデル化
上部工・下部工(A2)	線形梁要素
下部工(P6,P1)	ファイバー要素
支承	バネ(可動or固定)
基礎	集約バネモデル

3. 耐震設計方針

3.2 耐震設計方針

②解析方法と照査方法

【解析】

道示Vに基づく時刻歴応答解析

【照査方法】

安全性: **ひずみの照査**(P6,P1対象)

修復性: **残留変位**(P6,P1対象)

※上部工、A2アバット、支承、基礎については道示に基づき、弾性域内に収まっていることを照査する

(今回は説明省略)

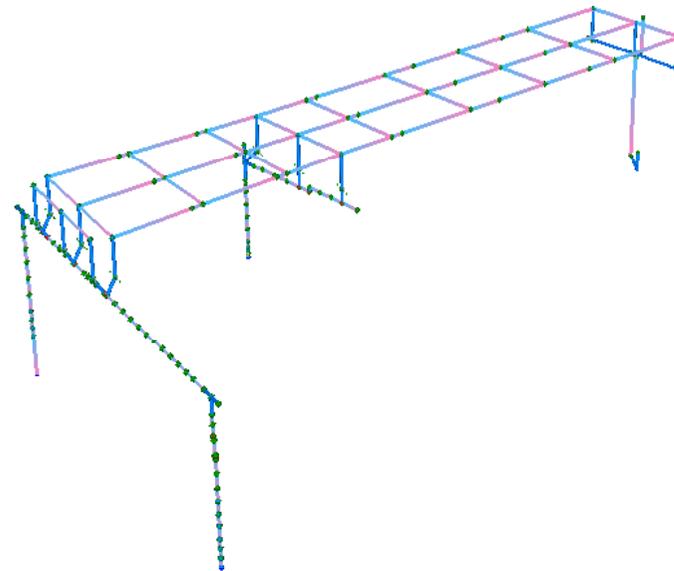


図2 解析モデル・FRAME3D

3. 耐震設計方針

3.3 ファイバー要素

～ファイバー要素～

- ・部材断面をメッシュ状に分割
- ・メッシュ毎の要素の材料非線形性を応力度～ひずみ関係により考慮したモデル
- ・M- ϕ 履歴モデルが確立されていない構造部材にも適用可
(軸力のみが変動することにより塑性化する部材など)
- ・分割した要素ごとにモデル化するため、断面のM-N相関関係や、2軸曲げ問題を解析することが出来る。

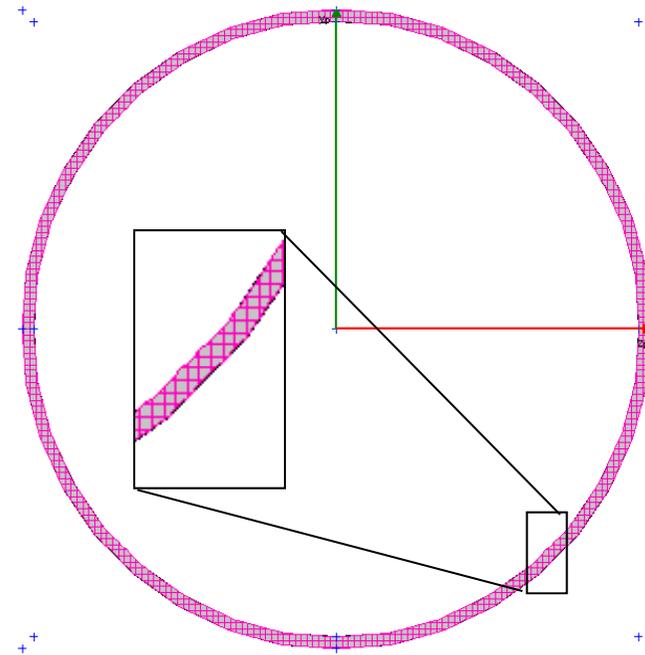


図3 P1橋脚断面(断面メッシュの状況)

3. 耐震設計方針

3.3 ファイバー要素

～ファイバー要素～

- ・道路橋示方書に適用されていないため、実務レベルの耐震設計における使用頻度は低い
- ・日本国内における解析ソフトも充実してきており、 $M-\theta$ モデルや $M-\phi$ モデルと同様サポート
- ・最近実績が増えつつある解析モデルである。

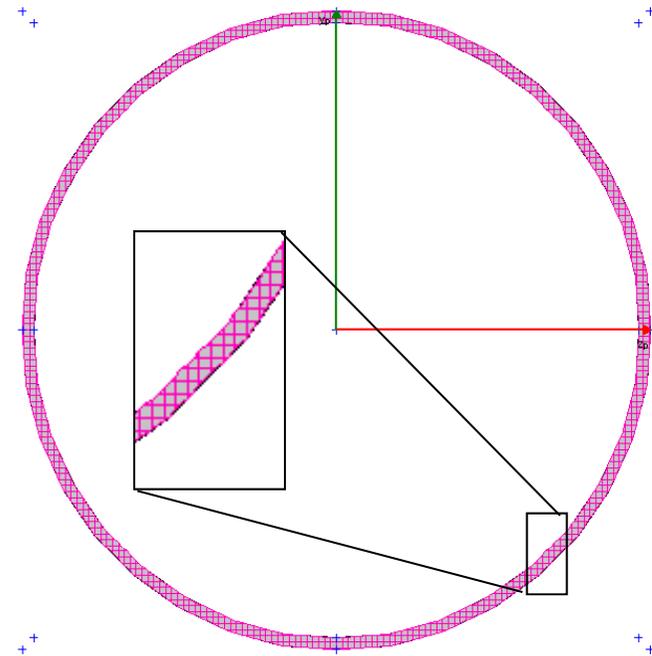


図3 P1橋脚断面(断面メッシュの状況)

4. 耐震設計とその方法

4.1 目標とする耐震性能と限界状態

本橋(市道)は、都市高速道路と立体交差することから
橋の重要度区分をB種と設定

→ レベル2地震動に対する耐震性能は「耐震性能2」

表6 各部材の限界状態(L2時)

部材	限界状態
上部工	弾性域
下部工(橋脚)	損傷の修復を容易に行い得る限界状態(許容ひずみ以内)
下部工(橋台)	弾性域
基礎	副次的な塑性化にとどまる限界の状態
伸縮装置	検討の対象外(修復を前提)
支承	健全性を保つ(弾性域内, 大地震時の移動量を確保)

※レベル1地震動に対しては全部材弾性域。

※基礎は深礎杭であるため、弾性域に留める。

4. 耐震設計とその方法

4.2 耐震性能の照査方法

【耐震性能の照査】

時刻歴応答解析により確認した断面力やひずみが、
下表に示した限界状態以内に収まっていることを照査する。

部材	限界状態
上部工	弾性域
下部工(橋脚)	損傷の修復を容易に行い得る限界状態(許容ひずみ以内)
下部工(橋台)	弾性域
基礎	弾性域
伸縮装置	検討の対象外(修復を前提)
支承	健全性を保つ(弾性域内, 大地震時の移動量を確保)

4. 耐震設計とその方法

4.2 耐震性能の照査方法

【耐震性能の照査】

ファイバーモデル(P6、P1橋脚)の許容値(許容ひずみ)

→ 耐震性能2 → 統一された見解はない

※道示V11.2に示された許容値 ε_a は、M- ϕ モデルを前提

※実験で確認された範囲内において適用可(適用範囲あり)

ただし、土木学会や名高速基準など、
一部耐震性能2を満足する許容値が示されている。

4. 耐震設計とその方法

4.2 耐震性能の照査方法

【耐震性能の照査】

※P1基部 降伏ひずみ $\varepsilon_y = 1,675 \mu$

・(参考)道示式 $\varepsilon_a = 5 \varepsilon_y = 8,375 \mu$

・土木学会耐震設計例 $\varepsilon_a = 2 \varepsilon_y = 3,350 \mu$

・鋼橋の耐震・制振ガイドライン

$\varepsilon_a = 4,000 \mu$ (充填コン)

・名高速 $\varepsilon_a = 11,000 \mu$ (充填コン)

→ 最も安全側となる $2 \varepsilon_y$ を許容ひずみとして採用

※本来であれば許容ひずみの設定は十分な検討を経て決定すべきであるが、本橋が結果的にL2解析で弾性域に留まったことも鑑み、上記のように設定した。

これを決めたのは設計終了後

4. 耐震設計とその方法

4.2 耐震性能の照査方法

【耐震性能の照査】

残留変位

$$\delta_R = C_R \cdot (\mu_r - 1) (1 - r) \delta_y \quad (\text{道示 V 6.4.9})$$

本橋の場合橋脚天端の変位であり、解析モデルの相違により大きく異なるものではないことから、一般に安全側の評価とされる計算式によるものとした。

許容値は橋脚基部～上部工慣性力の作用位置までの距離の1/100とした(道示基準)。

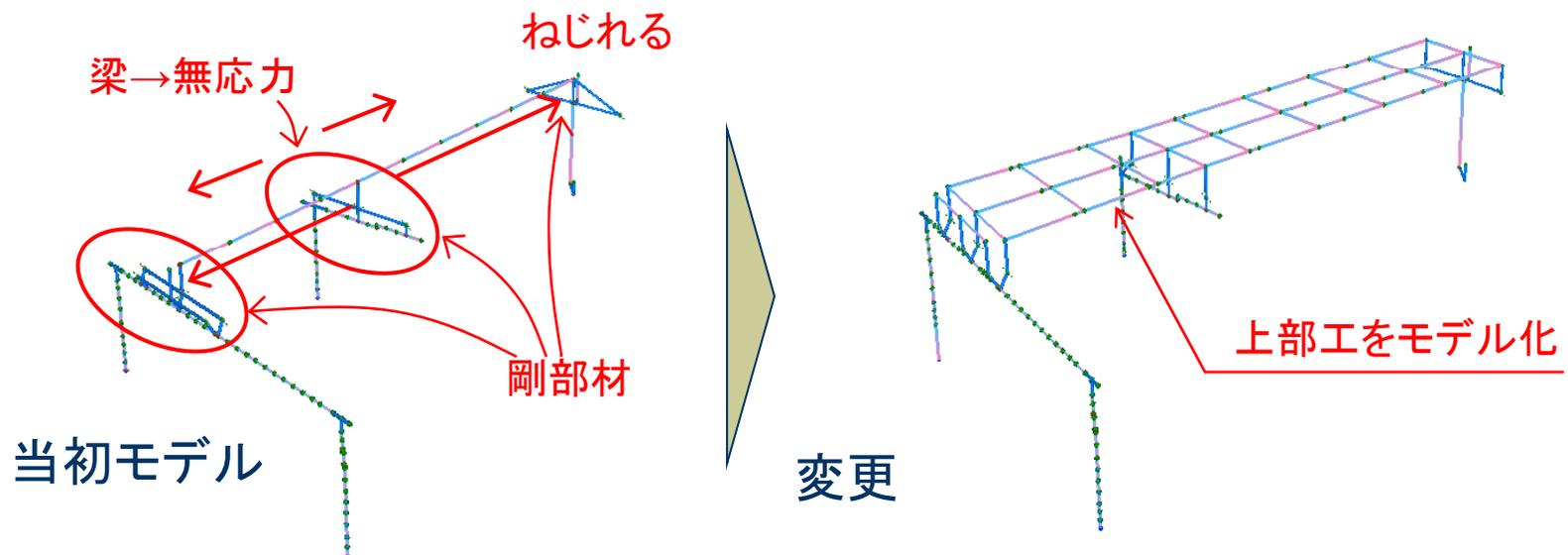
4. 耐震設計とその方法

4.3 解析モデルと工夫

①上部工

不具合発生

- ・P1橋脚梁部と平行に剛部材を設置したため梁部に応力が発生しなかった。
- ・剛部材によりP1柱のねじりが拘束され、ねじり力が生じなかった。

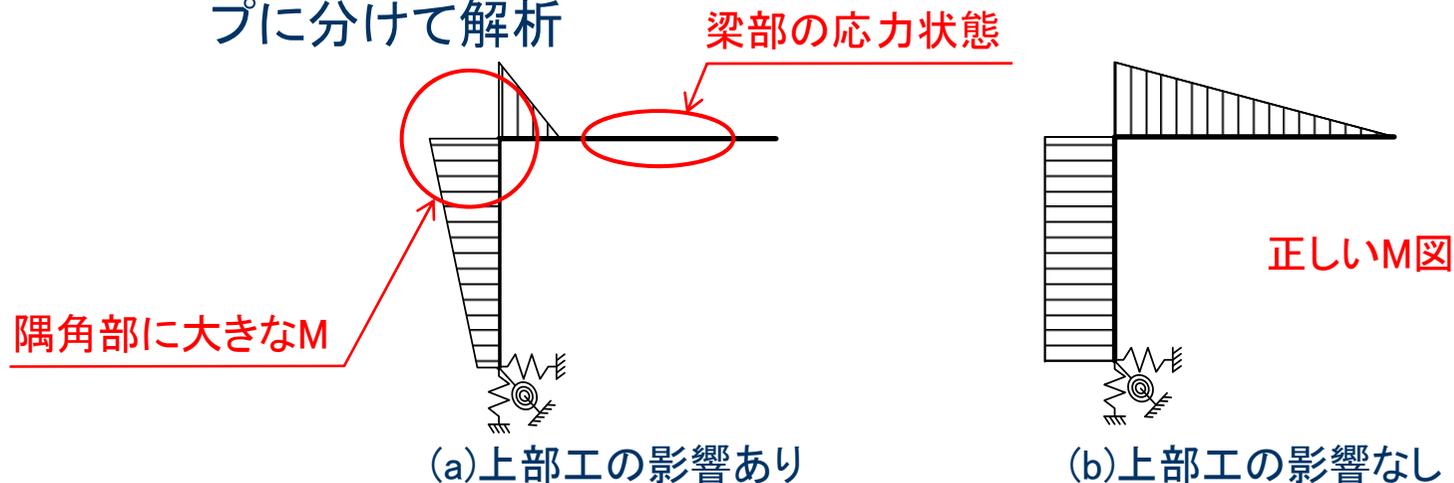


4. 耐震設計とその方法

4.3 解析モデルと工夫

②下部工（初期断面力）

- ・通常の時刻歴応答解析では、死荷重時と地震時と大きく2ステップに分けて解析



- ・上部工が橋脚の変形を拘束し、モーメント分布が不整合
→死荷重時の断面力は初期力として入力

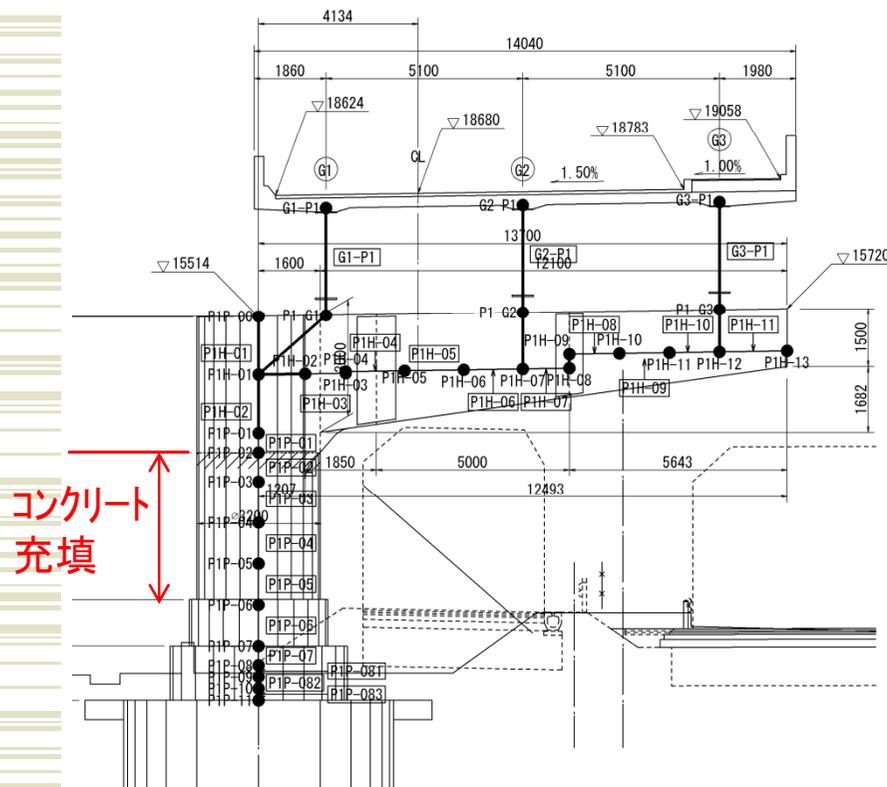
※実施工においては、上部工が竣工するまで支承による上下部工の拘束の影響は受けない

4. 耐震設計とその方法

4.3 解析モデルと工夫

②下部工

P1橋脚モデル図



【節点位置への配慮】

- ・部材の変わり目
剛域、充填コンクリート位置、断面変化位置、根巻きコンクリート位置、支承位置など
- ・部材幅の1/2程度
- ・柱基部は、有効破壊長領域 を3分割
- ・重心位置は、ファイバーモデルであることから断面中心位置→断面中心位置となる様に階段状に設定

5. 解析結果

5.1 固有値解析

支配的となる橋軸方向・橋軸直角方向のモード図

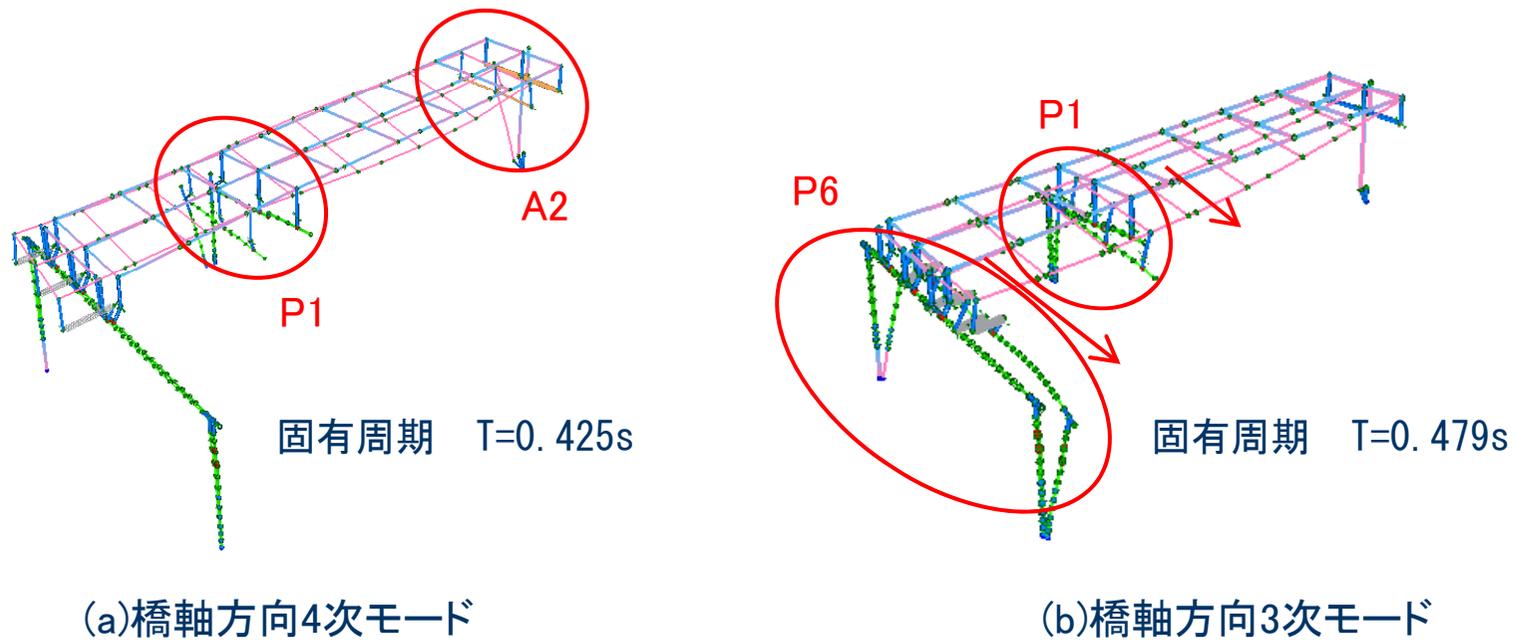


図6 モード図

5. 解析結果

5.3 地震時(L2)

L2・タイプⅡの解析結果(橋軸方向)

		橋軸方向												
		P6橋脚(左柱)			P6橋脚(横梁)			P6橋脚(右柱)			P1橋脚			
支承条件	橋軸方向	可動			可動			可動			固定			
固有周期	s	0.246(6次モード)												
残留変位	m	0			-			0			0			
許容残留変位	m	-			-			-			-			
判定		OK			-			OK			OK			
T Y P E Ⅱ	照査位置	柱頂部 SM570 面内F43mm 面外F30mm	CON充填部 直上SM490 F23mm W23mm	柱基部 SM490 F23mm W23mm	左端 SM570 F30mm W30mm	中央(最も厳し い箇所) SM490 F14~23mm W12~24mm	右端 SM570 F32 W32mm	柱頂部 SM570 面内F38 面外F32mm	CON充填部 直上SM490 F23mm W23mm	柱基部 SM490 F23mm W23mm	柱頂部 SM570-H 直上SM570-H t=60mm	CON充填部 直上SM570-H t=60mm	柱基部490 SM520-H t=59mm	
	最大ひずみ	μ	502	635	366	345	808	428	483	639	440	745	745	821
	降伏ひずみ	μ	2,150	1,775	1,775	2,250	1,775	2,250	2,250	1,775	1,775	2,150	2,150	1,675
	鋼材	降伏判定	OK	OK	OK	OK			OK	OK	OK	OK	OK	OK
	許容ひずみ	μ	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-
	判定	OK	OK	OK	OK			OK	OK	OK	OK	OK	OK	

→ P6、P1共に降伏しない(弾性域に留まる)

5. 解析結果

5.3 地震時(L2)

L2・タイプⅡの解析結果(橋軸直角方向)

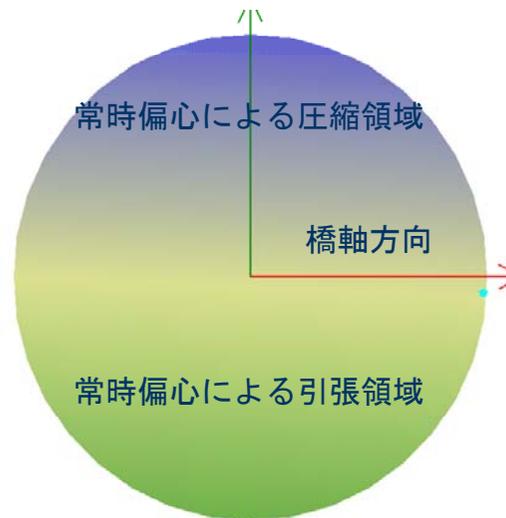
		直角方向												
		P6橋脚(左柱)			P6橋脚(横梁)			P6橋脚(右柱)			P1橋脚			
支承条件	橋軸方向	固定			固定			固定			固定			
固有周期	s	0.479 (3次モード)												
残留変位	m	0			-			0			0			
許容残留変位	m	-			-			-			-			
判定		OK			-			OK			OK			
T Y P E Ⅱ	照査位置	柱頂部 SM570 面内F48mm 面外F30mm	CON充填部 直上SM490 F23mm W23mm	柱基部 SM490 F23mm W23mm	左端 SM570 F30mm W30mm	中央(最も厳しい箇所) SM490 F14~23mm W12~24mm	右端 SM570 F32 W32mm	柱頂部 SM570 面内F38 面外F32mm	CON充填部 直上SM490 F23mm W23mm	柱基部 SM490 F23mm W23mm	柱頂部 SM570-H t=60mm	CON充填部 直上SM570-H t=60mm	柱基部 SM520-H t=59mm	
	最大ひずみ	μ	1,062	1,263	941	960	1,918	1,226	1,225	1,521	1,690	598	906	1,006
	降伏ひずみ	μ	2,150	1,775	1,775	2,250	1,775	2,250	2,250	1,775	1,775	2,150	2,150	1,675
	降伏判定		OK	OK	OK	OK	降伏	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	許容ひずみ	μ	-	-	-	-	3,550	-	-	-	-	-	-	-
判定		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	

→ P6梁部に一部降伏断面があるが、概ね弾性域

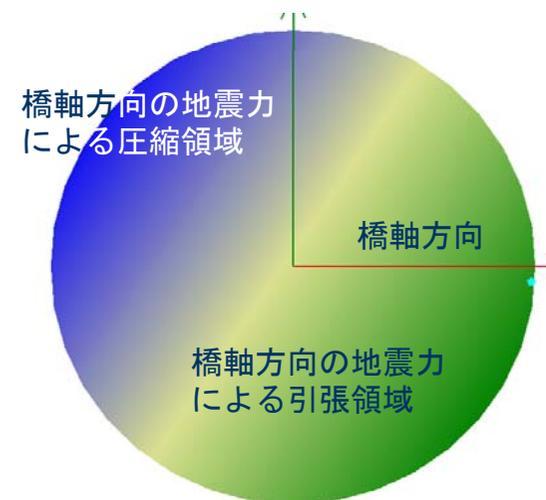
5. 解析結果

5.3 地震時(L2)

P1橋脚基部のひずみ分布



(a)P1橋脚 死荷重時のひずみ分布(参考)

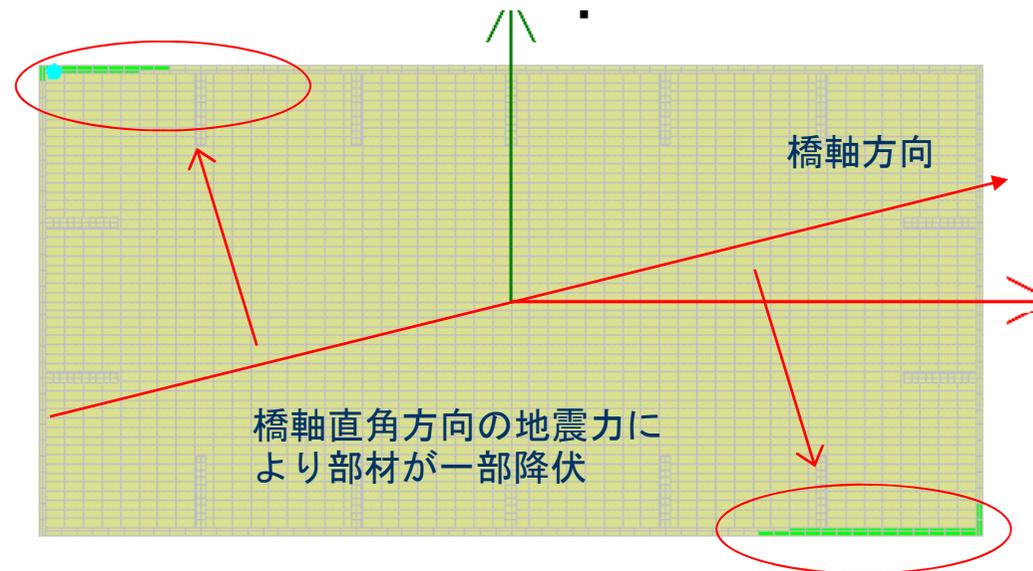


(b)P1橋脚 橋軸方向解析によるひずみ分布

5. 解析結果

5.3 地震時(L2)

P6橋脚基部(右側)のひずみ分布



(c)P6橋脚 橋軸直角方向解析による降伏範囲

6. 考察

本橋の課題

「軸力変動や二軸曲げをどの様に表現し、どのように耐震性能を検証するのか」

- ・軸力変動や二軸曲げの表現 →ファイバー要素
- ・耐震性能の検証→弾性域に留める

6. 考察

本業務の検討を経て、確認できた知見

- ①軸力変動や二軸曲げによる影響はファイバー要素を用いることで解析に取り込むことができ、実務レベルにおいては比較的容易に設計に取り込むことが出来る。また、そのソフトも充実している。
- ②軸力変動や二軸曲げによる影響はファイバー要素を用いることで解析に取り込むことができ、実務レベルにおいては比較的容易に設計に取り込むことが出来る。また、そのソフトも充実している。
- ③ファイバー要素を適用することで、部材の断面レベルでの応力状態を把握することが出来る。この局所的な応力状態を設計反映することで、設計対象の構造特性を踏まえた部材の弱点(破壊モードなど)を把握でき、より安全側の断面を決定することが出来る。

6. 考察

④部材に降伏を許容したときの限界値(例えば許容ひずみ)は、過去実績や文献をみても統一されたものではなく、名高速や福北等特殊法人を除き、各構造物で個別に判断されているケースが多い。この分野に関しては現在においても研究が進められており、設計時点における技術の動向や最新の研究結果を調査することが必要である。

⑤通常と異なる解析モデルや評価方法を採用した場合、一般的に確立された解析モデルや評価方法では表現できないケースがある。この場合は、死荷重時など比較的明確(簡易)な応力状態をチェックすることで、解析モデルの妥当性などを確認することが出来る。

7. おわりに

【施工状況写真】



H23.2

7. おわりに

【施工状況写真】



H23.4



H23.4

7. おわりに

【施工状況写真】



H23.7



H23.7

7. おわりに

【施工状況写真】



H23.8

7. おわりに

【施工状況写真】



H23.9

7. おわりに

【施工状況写真】



H23.10

最後に一番伝えたいこと

- ・技術はせっぱ詰まったプレッシャーの中で生まれる。
インフラコンサルタンツ物語
- ・いつの時代も日本を救ってきたのは技術で今後もそれは変わらないだろう。
新幹線のノーズを作った人。
胃カメラを作った人。
製鉄所を作った人
- ・土木においてもそう。
世界が、日本の基準、JAPANISE〇〇なんだ。
日本の橋。Japanisebridge
japanise engneer(日本の技術者)
- ・今回の業務について。
終わってみたら 市長表彰。会社初のファイバーを使った鋼製ピアの詳細設計
継続業務の受注。

ご静聴ありがとうございました

九州支店 技術部 大森貴行



ORICONSUL

株式会社

オリコンサル国際株式会社