

PC エlementによる地下構造物の耐震設計

大信田 秀治*1・木村 礼夫*2・獅子目 修一*3・清原 勝司*4

1. はじめに

PCR 工法とは交差する上部路面を共用しながら、プレストレスを導入した方形断面の桁 (PC エlement) を並列推進し、構造物を構築する非開削工法の一つである。この工法の特徴として推進方向の直交方向に PC ケーブルを用いて横締めを行い、推進後の桁を一体化することが上げられる。

鉄道構造物に用いる一般的な地下トンネルの耐震設計は鉄道構造物設計標準・同解説 (耐震設計)⁹⁾ (以下耐震標準という) に準拠することを基本としているが、PCR 工法により構築された地下トンネルの耐震性能の照査については、これまで明確な指標が示されていない。

そこで、本稿では交差部の支間、横断距離および土被りなどによって、下路桁、スラブ桁、箱形トンネルおよび円形トンネルの各形式に大別される構造の中で、近年の施工実績が多い箱形トンネル形式と下路桁形式とを対象とした耐震設計の考え方について一例を述べる。

箱形トンネル形式は、上下床版および側壁を PC エlementにより構築し、PC ケーブルを用いて箱形に一体化した構造であり、下路桁形式は床版および側壁を PC エlementにより構築し、PC ケーブルを用いて一体化したうえで RC 橋台で支持した構造である。

箱形トンネル形式、下路桁形式構造の概略図を図 - 1 および図 - 2 に示す。



図 - 1 箱形トンネル形式

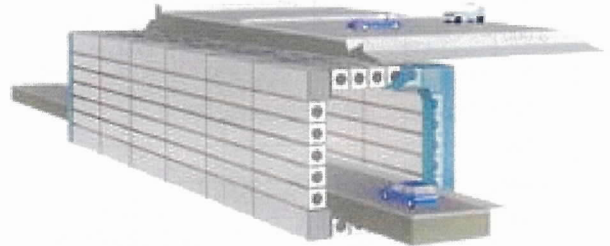


図 - 2 下路桁形式

2. 耐震設計の考え方

2.1 耐震設計

構造や周辺環境が複雑でない PCR 工法による構造物の耐震設計は、地盤と構造物とを一体でモデル化した非線形解析により耐震性能の照査を行うことを基本とした。耐震設計の照査フローを図 - 3 に示す。

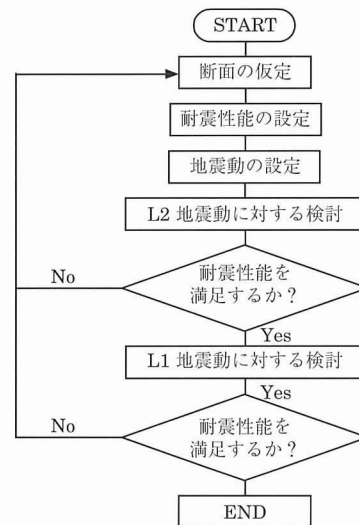


図 - 3 照査フロー

耐震性能の照査項目は破壊形態、損傷レベルおよび安定レベルの判定とし、L1, L2 地震動を対象に照査を行うこととした。

2.2 耐震性能の設定

耐震標準では構造物の重要性・復旧性を考慮して耐震性

*1 Hideharu OOSHIDA : オリエンタル建設 (株) 東京支店技術部

*2 Ayao KIMURA : (株) ジェイアール総研エンジニアリング 構造技術事業部

*3 Shyuichi SHISHIME : (株) ジェイアール総研エンジニアリング 構造技術事業部

*4 Shoji KIYOHARA : オリエンタル建設 (株) 本社技術部

能を設定している。耐震性能、損傷レベルおよび安定レベルを表-1、表-2および表-3に示す。

表-1 構造物の耐震性能

耐震性能Ⅰ	地震後にも補修せずに機能を維持できる
耐震性能Ⅱ	地震後に補修を必要とするが、機能が短期間に回復できる
耐震性能Ⅲ	地震によって構造物体系が崩壊しない

表-2 損傷レベル

損傷レベルⅠ	無損傷
損傷レベルⅡ	場合によっては補修が必要
損傷レベルⅢ	補修が必要
損傷レベルⅣ	補修が必要で、場合によっては部材の取り替えが必要

表-3 安定レベル

安定レベルⅠ	無損傷（作用荷重が降伏支持力以下）
安定レベルⅡ	場合によっては補修が必要な損傷
安定レベルⅢ	補修が必要で、場合によっては補強や構造物の矯正等が必要な損傷

3. 変形性能と損傷レベル

3.1 変形性能について

耐震標準では非線形性を考慮した解析を基本としている。RC部材に関しては数多くの実験が実施され、その非線形性はテトラリニア型のモデルで表現されている。しかしPCR部材の非線形性は明確にされていないため、過去に実施した載荷実験の結果をもとに非線形性を確認した。

3.2 PCR部材の載荷実験

PCR工法によって構築された部材の非線形性は、これまでに実施した載荷実験の結果をもとに設定した。載荷実験の概要を図-4に、測定項目および測定位置を図-5に示す。載荷実験の結果、得られた荷重-変位曲線を図-6に示す。

載荷実験は荷重により、横締めめに用いたPCケーブルに生じた引張応力がPCに導入された緊張力に達するまでのステップを曲げ載荷としている。その後せん断載荷として載荷点のスペンを変更し、コンクリートが破壊するまで加力している。

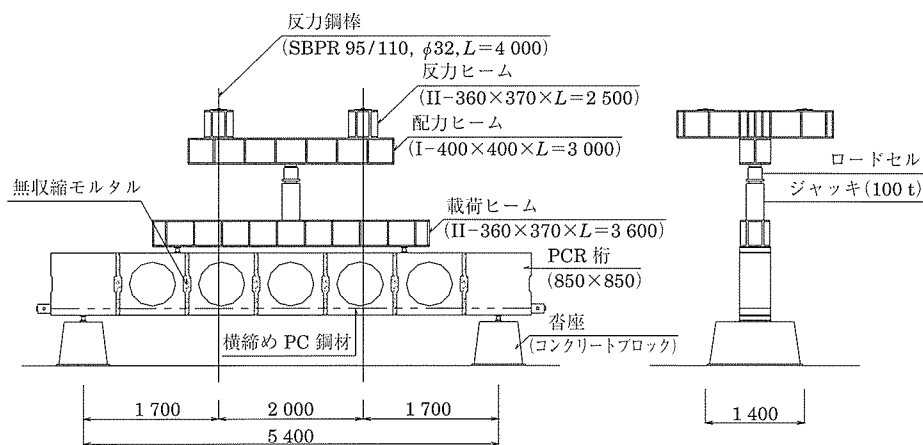
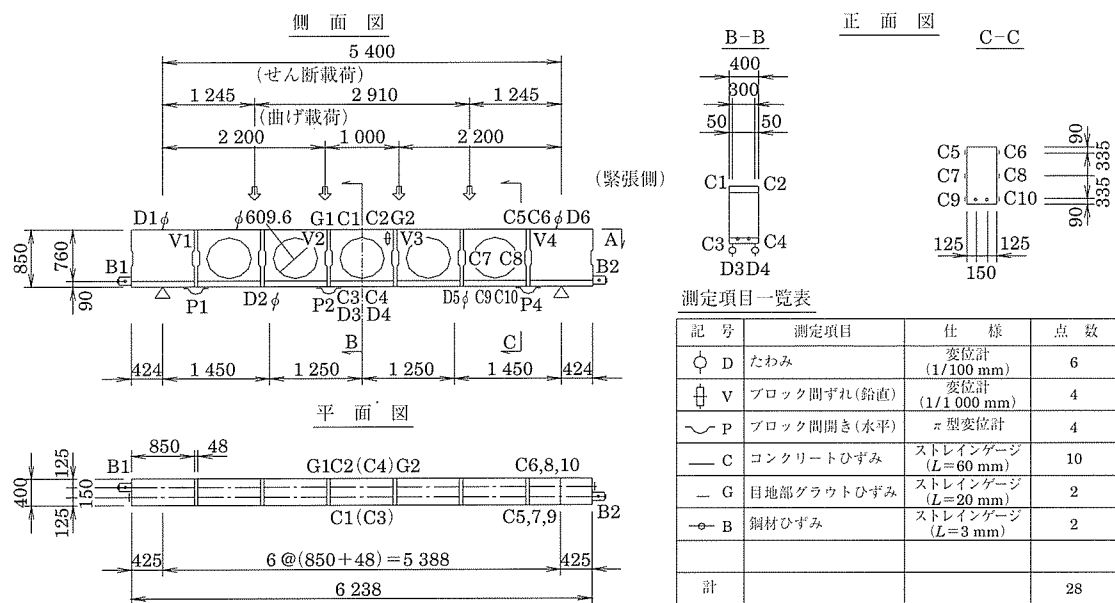


図-4 載荷実験概要



測定項目一覧表

記号	測定項目	仕様	点数
○ D	たわみ	変位計 (1/100 mm)	6
⊕ V	ブロック間ずれ(鉛直)	変位計 (1/1000 mm)	4
~ P	ブロック間開き(水平)	π型変位計	4
— C	コンクリートひずみ	ストレインゲージ (L=60 mm)	10
— G	目地部グラウトひずみ	ストレインゲージ (L=20 mm)	2
⊖ B	鋼材ひずみ	ストレインゲージ (L=3 mm)	2
計			28

図-5 測定項目および測定位置

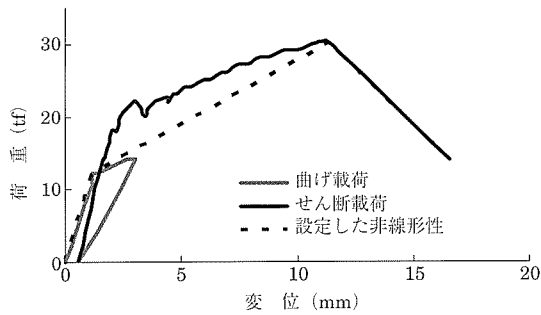


図-6 載荷実験結果

実験の結果、PCR 部材の荷重-変位曲線は 2 箇所の変化点を有するトリリニア型を示すことが分かった。第一変化点は荷重により PC ケーブルに生じた引張応力と PC ケーブルへの緊張力（プレストレス）とが等しくなる点となる。第二変化点は PCR 部材の破壊および部材間に充てんした無収縮モルタルが破壊する点であった。

RC 部材における荷重-変位曲線と損傷レベルとの関係を図-7、PCR 部材の荷重-変位曲線と損傷レベルとの関係を図-8 に示す。一般的な RC 部材はひび割れの発生、軸方向鉄筋の降伏、最大荷重程度の維持、降伏荷重の維持を変

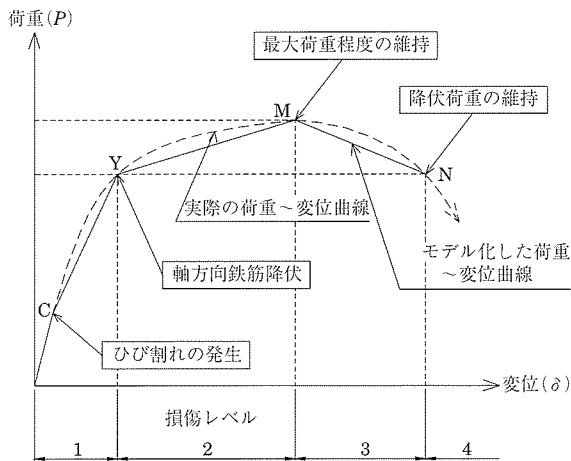


図-7 荷重-変位曲線と損傷レベルとの関係 (RC 部材)

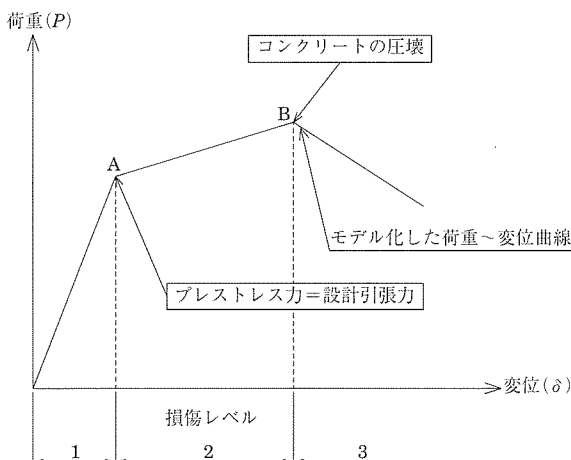


図-8 荷重-変位曲線と損傷レベルとの関係 (PCR 部材)

化点としたテトラリニア型でモデル化し、軸方向鉄筋の降伏までを損傷レベル 1、最大荷重程度の維持する点までを損傷レベル 2、降伏荷重の維持までを損傷レベル 3、それ以降を損傷レベル 4 としている。PCR 部材は載荷実験の結果より、プレストレス力=引張応力となる点、コンクリートが破壊する点を変化点としたトリリニア型でのモデル化ができるので、第一変化点までを損傷レベル 1、第二変化点までを損傷レベル 2 に設定した。

PCR 構造はその多くが土中構造物であることや、構造物の外周に生じた変状の補修が困難であることも考慮してレベル 3 は許容しないこととした。

4. 箱形トンネル形式

4.1 基本

トンネル形式の構造物は耐震標準の開削トンネルに準拠することを原則とした。解析手法は形状が複雑な場合や、構造物が近接している、あるいは地質が特殊であるなどの場合を除いて、応答変位法を用いた 2 次元の静的非線形解析によることとした。

4.2 耐震性能の設定

箱形トンネル形式の耐震性能および損傷レベルは耐震標準を参考に、部材の重要性、復旧性を考慮して設定した。図-9 に損傷部位を表-4 に耐震性能と損傷レベルを示す。

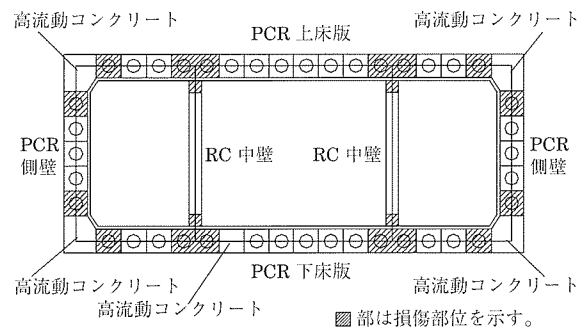


図-9 箱形トンネル形式の損傷部位

表-4 トンネル形式の耐震性能と損傷レベルの設定

想定地震動		L1 地震動	L2 地震動
耐震性能		耐震性能 I	耐震性能 II
レ 損 傷 レ ベル	上・下床版 (PCR 部材)	損傷レベル 1	損傷レベル 2
	側 壁 (PCR 部材)	損傷レベル 1	損傷レベル 2
	中 壁 (RC 部材)	損傷レベル 1	損傷レベル 3

4.3 解析モデル

4 周面に Winkler 型のバネを設置し、地震時荷重として地盤バネを介して地盤変位、周面せん断力、慣性力を載荷する解析モデルとする。ただし上床版の地盤バネは土被りに応じて考慮することとした。解析モデルを図-10 に示す。

4.4 地震の影響

地盤の評価は表層地盤の固有周期から地表面の最大水平変位量を算定する方法か、等価線形化法や逐次積分法などの動的解析により地盤のモデル化を行い、その水平変位量

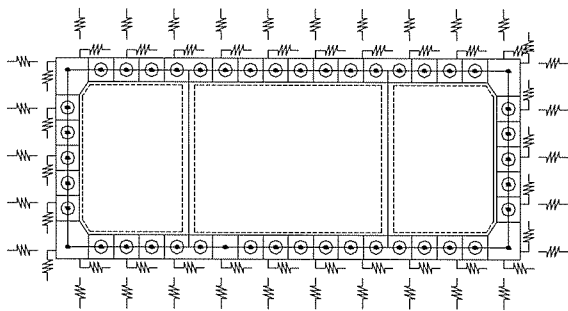


図 - 10 解析モデル図

を算定する方法により評価する。動的解析における土の非線形特性は $G/G_0 \sim \gamma$ (G :せん断弾性係数、 G_0 :初期せん断弾性係数)、 $h \sim \gamma$ (h :減衰定数、 γ :ひずみ) 関係によって設定した。耐震検討を行う際に考慮する荷重のうち永久荷重を図 - 11 に、地震時の荷重を図 - 12 に示す。構造物の慣性力を算定する際の加速度は、構造物の重心位置での加速度を用いた。

4.5 耐震性能の照査

耐震性能の照査は L2 地震動に対する耐震性能を確認した後、L1 地震動に対する照査を実施する。L2 地震動に対する照査は材料修正係数 ($\rho_m = 1.2$) を考慮した非線形解析を実施し、すべての部材が曲げ破壊モードであることを

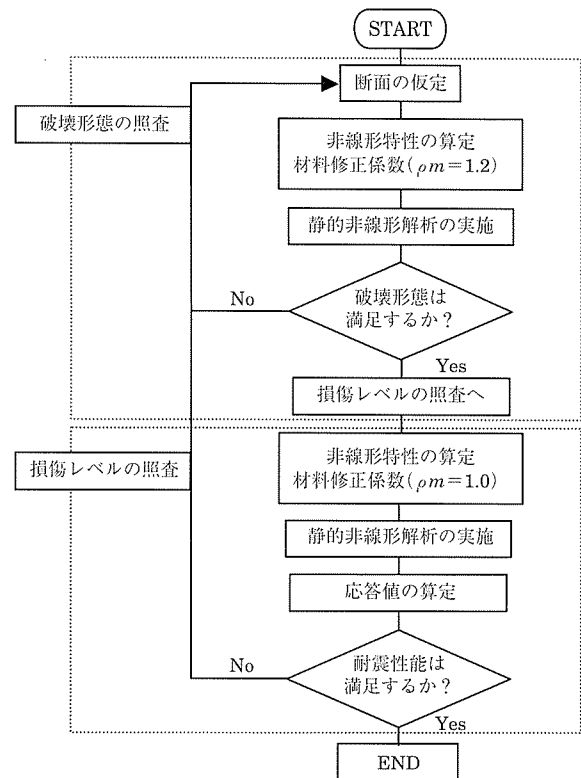


図 - 13 照査のフロー

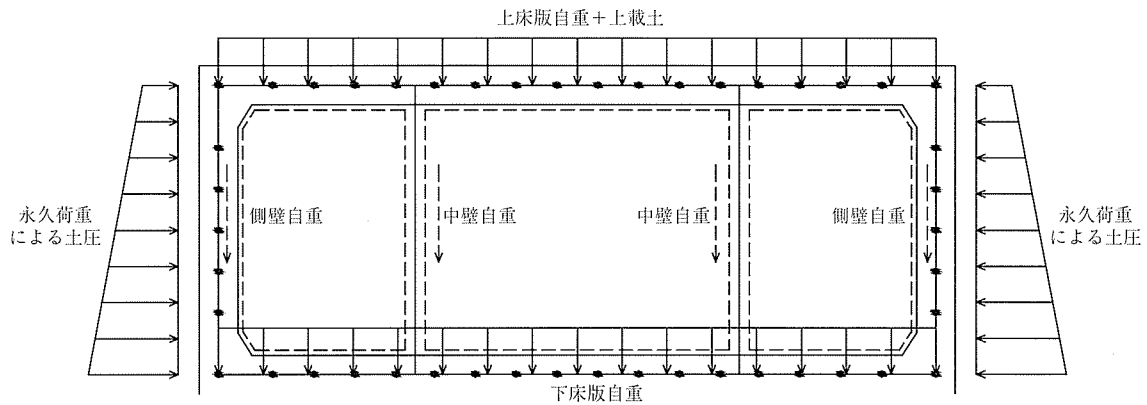


図 - 11 永久荷重作用状態

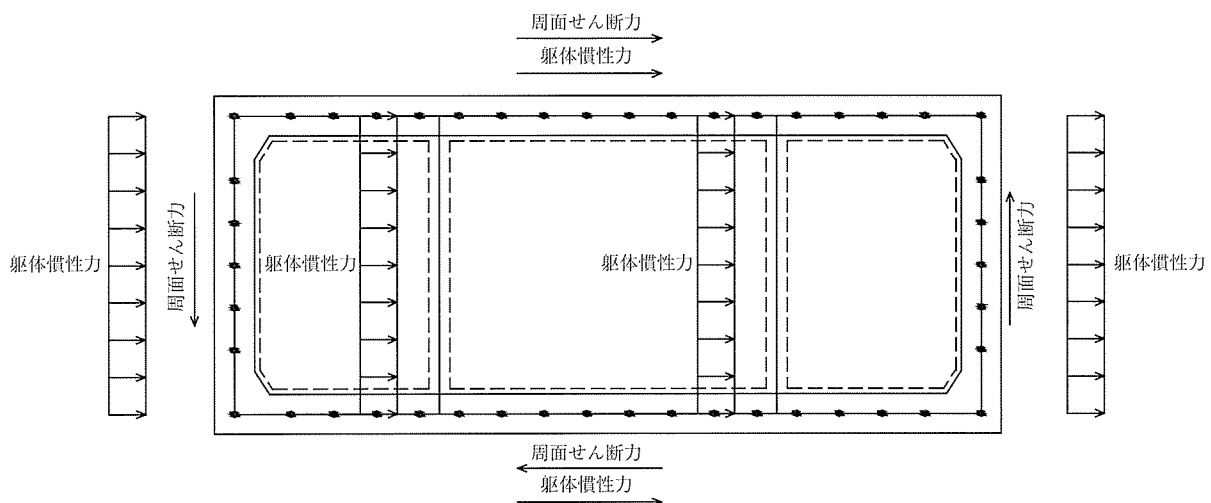


図 - 12 地震時荷重作用状態

確認する（破壊形態の照査）。次に $\rho_m = 1.0$ で非線形解析を実施し部材の損傷レベルに対する照査を行う（損傷レベルの照査）。

L1地震動に対する照査はL1地震動を考慮した表層地盤の評価を行い、得られた結果を基に耐震性能を満足することを確認する。

以上の照査項目を満足することで所定の耐震性能を有すると考えられる。

照査のフローを図-13に示す。

5. 下路桁形式

5.1 基本

下路桁形式はPCR部材であるルーフ桁およびサイド桁と、これらを支持するRC部材の橋台で構成される。作用する土圧は構造物が盛土区間に設置されることを想定して主動土圧を考慮する。なお、土圧による側圧はサイド桁を介して橋台に作用する構造とし、耐震性能の照査は耐震標準の抗土圧構造物に準拠することを原則とした。

5.2 耐震性能の設定

下路桁形式の耐震性能および損傷レベルは耐震標準の抗土圧構造物を参考に、部材の重要性、復旧性などを考慮して設定した。図-14に損傷部位を、表-5に耐震性能と損傷レベルを示す。

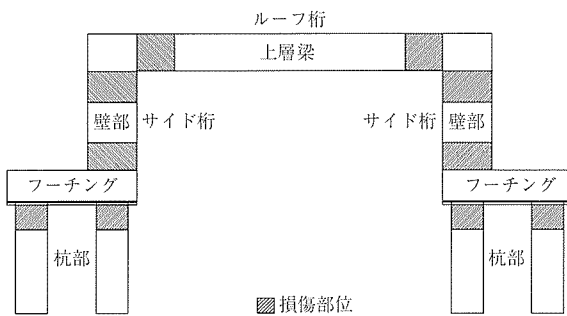


図-14 下路桁形式の損傷部位

表-5 下路桁形式の耐震性能と損傷レベルの設定

想定地震動	L1地震動	L2地震動
耐震性能	耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ
杭基礎	安定	安定レベルⅡ
	部材	損傷レベルⅡ
橋台躯体（RC部材）	損傷レベルⅠ	損傷レベルⅡ
フーチング（RC部材）	損傷レベルⅠ	損傷レベルⅠ
ルーフ桁（PCR部材）	損傷レベルⅠ	損傷レベルⅡ
サイド桁（PCR部材）	損傷レベルⅠ	損傷レベルⅠ

5.3 解析モデル

直接基礎形式と杭基礎形式の解析モデルを図-15および図-16に示す。

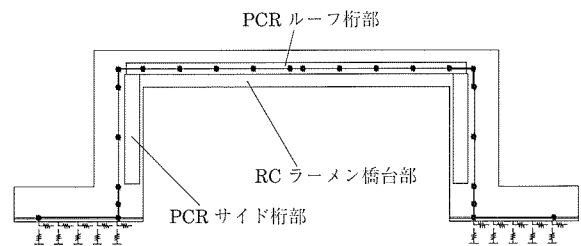


図-15 下路桁形式の解析モデル（直接基礎）

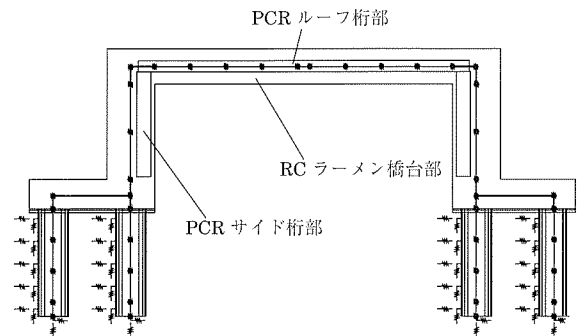


図-16 下路桁形式の解析モデル（杭基礎）

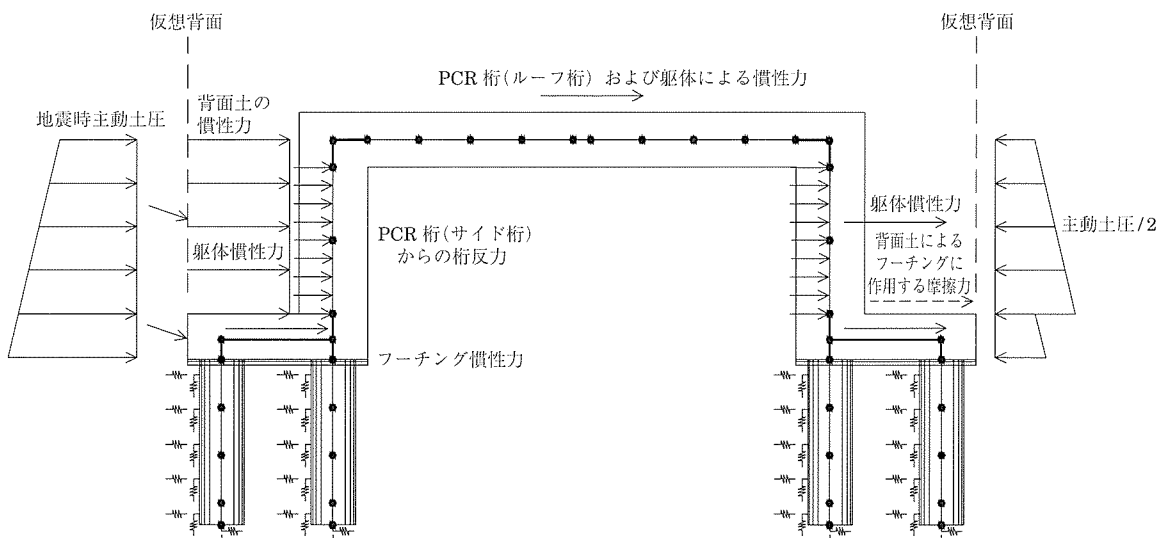


図-18 地震時荷重作用

5.4 地震の評価

地表面の最大加速度は耐震標準による入力地震動（L2・L1 適合波）を用いた地盤応答解析結果，または耐震標準付属資料の地表面最大加速度を用いる。

耐震検討を行う際に考慮する荷重のうち永久荷重を図 - 17 に，地震時の荷重を図 - 18 に示す。地震時に考慮する荷重は，躯体慣性力，地震時主働土圧力（サイド桁の反力）および基礎上の背面土の慣性力とし，受働土圧力として鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物⁶⁾付属資料 22 を参考に，永久荷重として作用する主働土圧力の 1/2 を考慮することとした。

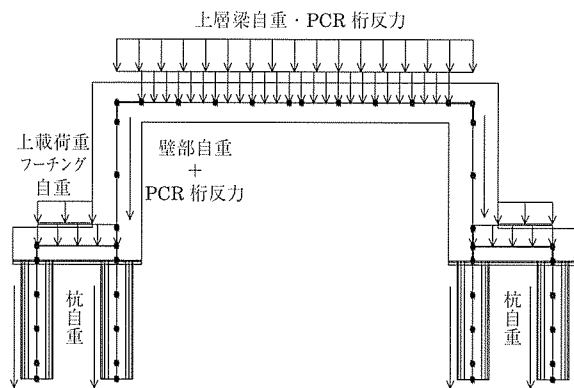


図 - 17 永久荷重作用状態

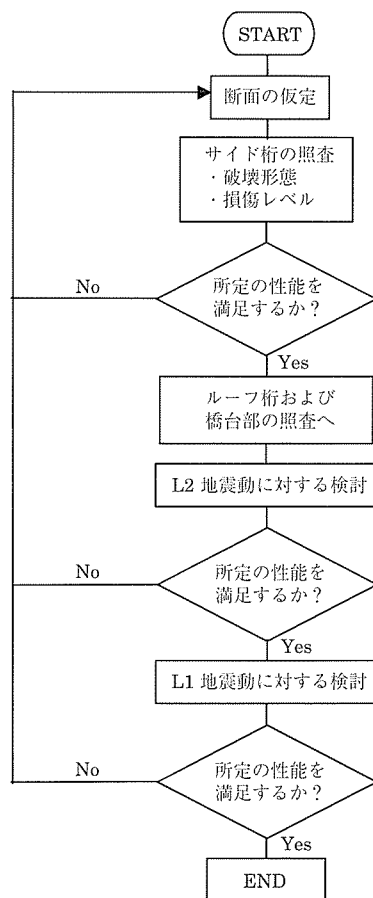


図 - 19 照査のフロー

5.5 耐震性能の照査

耐震性能の照査は L2 地震動を考慮した地震時主働土圧力に対して，サイド桁の破壊形態の照査を行い，曲げ破壊モードであることを確認する（破壊形態の照査）。次に桁の損傷レベルの照査を行い，所定の耐震性能を満足することを確認する。

次に RC 構造である橋台部の照査を行う。橋台部も破壊モードの照査を行い所定の耐震性能を満足した後に，耐震標準の抗土圧構造物に準じて損傷レベルの照査を実施することとした。

照査のフローを図 - 19 に示す。

6. おわりに

載荷実験の結果を基に PCR 部材の非線形性と，それらを用いた耐震設計の考え方について提案した。今回提案した構造形式は箱形トンネルと下路桁形式の 2 タイプなのでその他の構造形式についても今後検討を進めていきたい。また，今回提案した設計方法は直角に平面交差する構造を想定しているので，斜角を有する構造や推進方向に勾配を有する場合には別途検討が必要になる。PC ケーブルにより横締めを行った部材の非線形性，および損傷レベルについては，実験結果や参考資料が少ないこともあり，安全側の設定としている。したがって今後さらなる検証を行うことで安全性や経済性は向上されると思われる。

本稿が PCR 構造における耐震設計の参考となり，より安全かつ経済的な構造として今後も広く普及されれば幸いである。

参考文献

- 1) 松田猛：PC 鋼棒で連結した RC 中空ブロックの載荷試験（土木学会 第 40 回年次学術講演会講演概要集）
- 2) 石橋忠良：PCR 工法によるスラブ桁の設計・施工について（PC 技術協会 第 25 回研究発表会講演概要）
- 3) 石橋忠良：PCR 工法の新しい形式（鉄道土木・28-2 調査と研究）
- 4) 石橋忠良：PCR 工法による線路下横断の施工（基礎工 1986-2）
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計 平成 11 年 10 月
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 平成 12 年 6 月
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 平成 16 年 4 月
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル 平成 13 年 3 月

【2006 年 3 月 1 日受付】