

図-3 外環道（千葉県区間）縦断面図

外環道（千葉県区間）の道路構造設計においては、特殊な道路構造であることを踏まえ、「安全・安心・快適」な道路空間の創出や地震、災害に強い道路づくりを目指し、道路構造の検討を進めてきた。

本論文は、外環道（千葉県区間）に関する道路構造等の設計概要について紹介するものである。

2. 耐震設計

(1) 基本方針

a) 掘割構造物の耐震目標

掘割構造物の耐震目標は、表-1に示す。供用期間中に発生する確率が高い地震動（レベル1地震動）

に対して、地震直後にも通常の供用が可能であることを目標とした。

また、本区間の掘割構造物は重要度が極めて高く、供用期間中に発生する確率は小さいが大きな強度を持つ地震動（レベル2地震動）に対しても一定の機能維持が要求されるため、兵庫県南部地震の地下鉄駅舎の被災経験を踏まえて内空が確保され、地震直後にも緊急車両の通行が可能で、補修・補強により建設当初の機能回復が図れることを目標とした。

(2) 耐震設計の手順

掘割構造物の耐震設計の基本的な検討項目とその手順は、図-4に示す。

表-1 掘割構造部の耐震目標

項目	内容	レベル1地震動	レベル2地震動
構造安全性	人命の危機回避	人命に危害を与えない	同左
供用性	地震後に必要な機能の維持	地震直後にも通常の供用が可能である	地震直後にも緊急車両の通行が可能である
復旧性	当初の機能を回復する容易さ	耐久性を確保するためのクラックの補修等で対処可能である	補修・補強により建設当初の機能回復を図れる

※レベル2地震動としては、プレート境界型の大規模な地震を想定したタイプIの地震動及び内陸直下型地震を想定したタイプIIの地震動を考慮した。

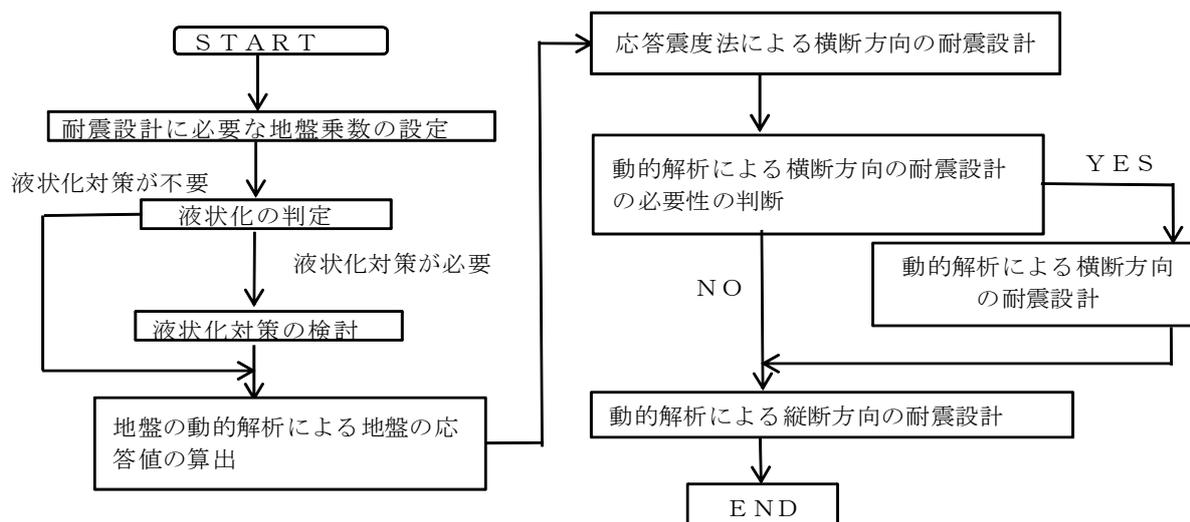


図-4 耐震設計の手順

(3) 横断方向の耐震設計

a) 横断方向の耐震設計の方針

横断方向の耐震計算は、応答震度法を基本とし、耐震計算を行うこととした。

耐震安全性の判定は、常時荷重に対して設定した断面寸法と配筋に対して、「隅角部に隣接する側壁の耐震安全性の判定」及び「中壁及び中柱の耐震安全性の判定」を行った。

せん断に対して耐震安全性が確保されていない場合には、せん断補強筋を増加させてせん断力を確保し、レベル2地震動の曲げに対して耐震安全性が確保されていない場合でもできる限りせん断補強筋を増加させて変形性能を向上させた。

b) 隅角部に隣接する側壁の耐震安全性の判定

隅角部に隣接する側壁の耐震安全性の判定は、以下のとおりとした。

- ① レベル1地震動に対して、各部材が降伏しないこと。
- ② レベル2地震動に対して、各部材の曲率が許容曲率を超えないこと
- ③ 各部材のせん断力は、せん断耐力を上回らないこと
- ④ レベル2地震動に対して、隅角部の層間変形角がレベル2地震動に対して、タイプIで1/50、タイプIIで1/30の許容層間変形角を超えないこと

なお、許容層間変形角は、外環掘割構造の1/4モデルの供試体を用いた載荷実験を実施して、側壁と底版を接合する隅角部の判定基準を定めた。

c) 中壁及び中柱の耐震安全性の判定

中壁及び中柱の耐震安全性の判定は、以下のとおりとした。

- ① レベル1地震動に対し、中壁及び中柱が降伏しないこと
- ② レベル2地震動に対し、中壁及び中柱の曲率が許容曲率を超えないこと
- ③ 中壁及び中柱のせん断力は、せん断耐力を上回らないこと
- ④ 中壁及び中柱については、曲げ破壊型とする。曲げ破壊型とするには、式-1を満足すること

$$M_d/M_u > P_d/P_s \quad (\text{式-1})$$

ここに、 M_d ：発生曲げモーメント

M_u ：終局曲げモーメント

P_d ：発生せん断力

P_s ：せん断耐力

- ⑤ 耐震安全性の判定にあたっては、各地震動の波形の応答値により判定する。
- ⑥ 常時設計で設定した中柱の配筋で、せん断補強筋を増やしても許容曲率を超える場合には、上記②の曲率による曲げ性能の判定を省略し、層間変形角で耐震安全性を判定する。ただし、この場合、許容層間変形角は、レベル2地震動に対して、タイプIで1/30、タイプIIで1/15とする。

なお、中柱は、RC橋脚と異なり軸力が保持できれば、水平耐力は期待されないことから、載荷実験に基づいた軸力保持に着目した判定基準を設定した。

(4) 縦断方向の耐震設計

a) 縦断方向の耐震設計の方針

縦断方向の耐震性は、連結継手構造を用いた構造目地により確保することとした。

地中構造物の縦断方向の挙動は、地中構造物の軸線に沿った地盤条件や構造条件の影響を受けるため、縦断方向の耐震設計は、地盤条件と構造条件を適切に評価した解析モデルを用いた動的解析により実施する。図-5に掘割構造物の縦断方向の解析モデル例を示す。

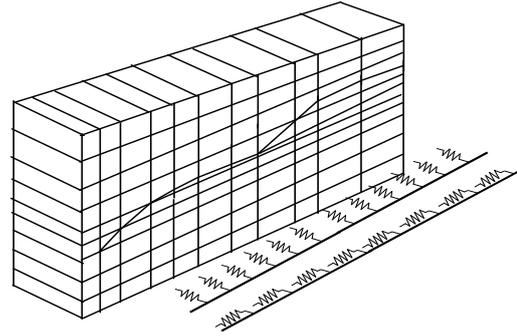


図-5 縦断方向耐震計算モデル例

b) 耐震安全性の判定

縦断方向の耐震設計における躯体及び継手部の耐震安全性の判定は、表-2、表-3のとおりとした。

表-2 躯体の耐震安全性の判定基準

項目	レベル1地震動	レベル2地震動	備考
コンクリート軸圧縮	圧縮応力度の照査： $\sigma_c \leq \sigma_{ca}$	圧縮応力度の照査： $\sigma_c \leq 0.65 \sigma_{ck}$ ($=0.85 \sigma_{ck} / 1.3$)	
配力鉄筋(クラック)	配力鉄筋のひずみ 軸引張： $\varepsilon \leq \varepsilon_y$ 曲げ： $\phi \leq \phi_y$ (地震に伴う漏水の増加はない。)	配力鉄筋のひずみ 軸引張： $\varepsilon \leq \varepsilon_{ca}$ 曲げ： $\phi \leq \phi_{ca}$ (地震に伴う漏水の増加は微小である。)	躯体の引張強度 $\sigma_{bt} = 0.5 \sigma_{ck}^{2/3}$ あるいはひび割れモーメント M_c 以下であれば左に示す許容値は満足する。
せん断(ずれ)	せん断耐力の照査： $S \leq Ps$	せん断耐力の照査： $S \leq Ps$	

表-3 継手の耐震安全性の判定基準

項目	レベル1地震動	レベル2地震動	備考
止水性	引張変形量： $\delta \leq \delta_{wla}$ (地震に伴う漏水の増加はない。)	引張変形量： $\delta \leq \delta_{wla}$ (地震に伴う漏水の増加は微小である。)	躯体との取り付け部を含めて判定
連結鉄筋	相対変位量 軸方向： $\delta \leq \delta_y$ 回転角： $\theta \leq \theta_y$ せん断(ずれ) せん断応力度： $\tau \leq \tau_a$ ($\tau_a = \sigma_y / \sqrt{3}$)	相対変位量 軸方向： $\delta \leq \delta_{ja} = \delta_y + (\delta_u - \delta_y) / \alpha$ 回転角： $\theta \leq \theta_{ja} = \theta_y + (\theta_u - \theta_y) / \alpha$ せん断(ずれ) せん断応力度： $\tau \leq \tau_a$ ($\tau_a = \sigma_y / \sqrt{3}$)	引張鉄筋ひずみが降伏ひずみ ε_y および終局ひずみ ε_u (10%) に達する相対変位量から許容値を設定する。 実験結果に基づいて軸方向や回転角と同様に許容変位量を設定してもよい。

ここに、

- σ_c : コンクリートの発生圧縮応力 σ_{ca} : コンクリートの許容圧縮応力
 σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 ε : 鉄筋の発生ひずみ ϕ : 躯体の発生曲率
 δ : 継手の発生変形量 θ : 継手の発生回転角 ε_y : 鉄筋の降伏ひずみ ϕ_y : 躯体の降伏曲率

δ_y : 継手の降伏変形量 θ_y : 継手の降伏回転角
 ε_{cra} : 地震後のクラックによって発生する漏水の増加が微小となる配力鉄筋の許容ひずみ
 ϕ_{cra} : 地震後のクラックによって発生する漏水の増加が微小となる躯体の許容曲率
 δ_{wla} : 地震に伴う漏水の増加がない継手の許容変形量
 δ_{w2a} : 地震に伴う漏水の増加が微小となる継手の許容変形量
 δ_{ja} : 連結鉄筋の ε_y および ε_u より規定される継手の許容変形量
 θ_{ja} : 連結鉄筋の ε_y および ε_u より規定される継手の許容回転角
 ε_u : 鉄筋の終局ひずみ ϕ_u : 躯体の終局曲率 δ_u : 継手の終局変形量 θ_u : 継手の終局回転角
 α : 安全係数 (タイプ 3.0、タイプ II 1.5)
 S : 躯体の発生せん断力 Ps : 躯体のせん断耐力
 τ : 連結鉄筋の発生せん断応力
 τ_a : 連結鉄筋の許容せん断応力

3. 構造細目

(1) 連結継手

掘割構造物の目地構造は、防水性、コンクリートの耐久性、耐震性を考慮し、構造継手のせん断変形性能確認実験結果・せん断変形性能の確認及び地盤の応答解析を踏まえ、外環道独自の連結継手を設置した。また、連結継手部に設ける連結鉄筋は、配力筋相当量とし、連結鉄筋をアンボンド加工することにより自由長（アンボンド長）を設けた。

連結継手の構造は、以下のとおりとした。

① 連結継手構造は、**図-6** のように、カプラーを設

けないことを基本とする。しかし、施工性を重視し、**図-7** のようにカプラーを設けてカプラーをアンボンド化することも可とする。ただし、目地部にカプラーを設けると必要な変形量を確保できない可能性があるため、連結鉄筋に曲げが生じない位置にカプラーを設置することとする。

- ② アンボンド長は、2.5mを基本とする。
- ③ 連結鉄筋の最大径は、一般部の主鉄筋と同じく $\phi 51\text{mm}$ とする。
- ④ 連結鉄筋のかぶり厚は50cmを基本とし、配力鉄筋に合わせ内外2段を基本とする。

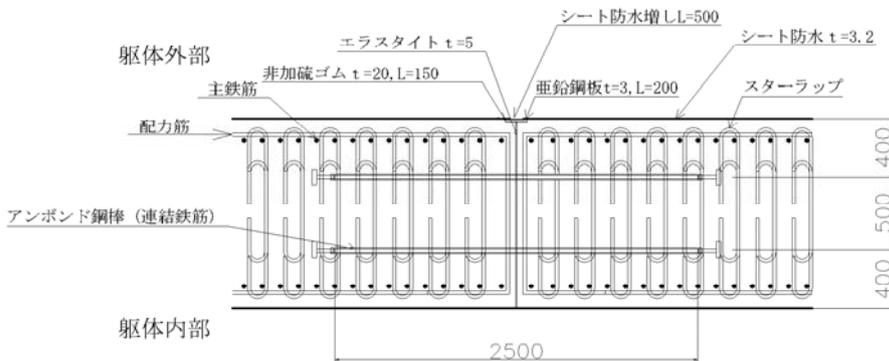


図-6 カプラーを設置しない場合

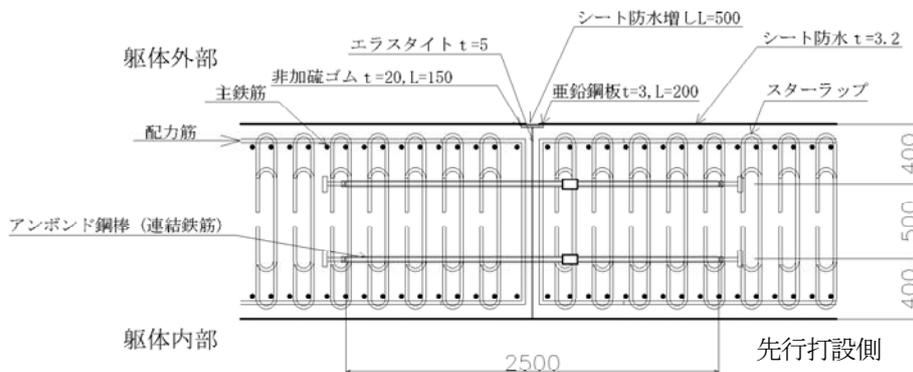


図-7 カプラーを設けてカプラーをアンボンド化した場合

(2) 継手部止水構造

連結継手部の止水構造は、変形性能、長期止水性、施工性、経済性を考慮して使用した。

a) 止水性の確認試験

止水部材は、長期止水性を確認するため、設置深度に応じた水圧を作用させた状況で想定される変形量に追従できることを止水実験により確認した。(写真-1)

実験の結果、非加硫ブチルゴムの変形性状は、所定の変形性能が得られたものの、残留変位のある(目地が開いた)状態で水圧が作用するとゴムの塑性変形が進行する状態が想定され、水圧に抵抗する処置を検討する必要があると考えられることが判明した。

b) レベル2地震(目地開き: 3 cm、せん断ずれ: 0.75 cm)において止水性能が確保できる構造の開発

加硫ゴムを使用し、表-4に示す性能を目標とした止水ゴムを開発し、変形および止水性能を止水実験により検証した結果、目標性能が検証された図-8の止水ゴム構造を採用した。

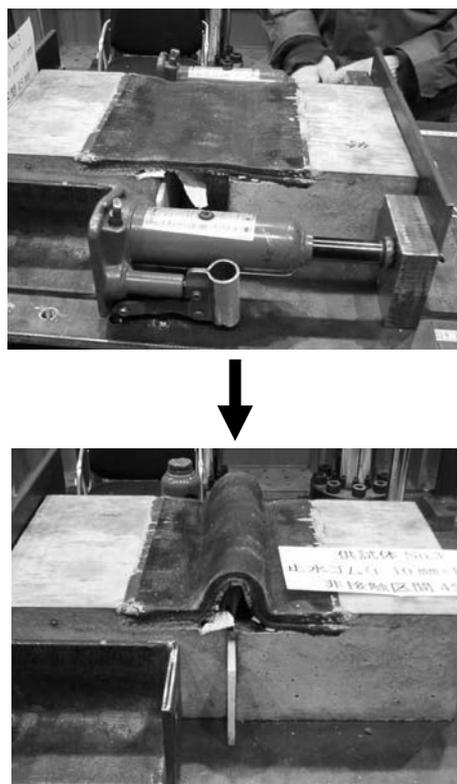


写真-1 止水性能実験

表-4 目標性能

ケース	状態	目開き	せん断ずれ	水圧	摘要
1	目開き最大 (軸方向地震)	6.0cm	0.0cm	0.1Mpa～ 0.3Mpa	止水ゴムによっては、変位量の小さい部位への適用や標準深度部のみへの適用を想定し、変位量と水圧を小さくすることもある。
2	せん断ずれ最大 (直角方向地震)	0.0cm	1.5cm	0.1Mpa～ 0.3Mpa	
3	上記の合成	6.0cm	1.5cm	0.1Mpa～ 0.3Mpa	

- ① 目開き量の最大値(6 cm)は、過年度の地盤条件急変部での応答値に2倍の余裕を考慮
- ② ずれ量の最大値(1.5cm)は、過年度の地盤条件急変部での応答値に2倍の余裕を考慮
- ③ 水圧の最大値は工区内の最深部の水深を考慮

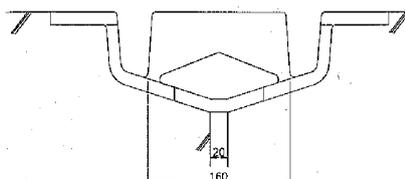


図-8 止水ゴム構造

4. チラツキ対策

(1) チラツキについて

チラツキとは、トンネル内照明等により、明暗が連続することで不快感を生じることを指し、外環道（千葉県区間）の掘割スリット構造区間は、太陽光がストラットの間から射し込む明るい部分と、ストラットの影となる暗い部分とが連続する空間を高速で走行することでチラツキが生じる。（図-9）

(2) チラツキの影響要因

チラツキが生じる条件について、明暗輝度比、明暗の周波数、明暗時間率の3つの要素が関係する。その中で最も不快の程度に影響する要素は、明暗輝度比であることが既往研究から知られている。

上記3つの要素の関係性について、表-5のとおり示されている。¹⁾

(3) 外環道（千葉県区間）におけるチラツキ要因の整理

外環道（千葉県区間）において、上記(2)に示したチラツキが生じる3つの要素を以下のとおり整理した。

① 明暗輝度比

明暗輝度比は、チラツキ光の明輝度と暗輝度の比より決まる。

表-5によれば、チラツキが生じない明暗輝度比は10以下とされており、明暗輝度比10～50の間で避けるべき周波数や時間率が個々に設定されており、明暗輝度比は50以下の条件とする必要がある。

② 明暗の周波数

明暗の周波数は、明暗のパターンが何秒ピッチに繰り返されるかで決まる。

千葉外環区間の掘割スリット構造部は、5mピッチで明暗が繰り返される。80km/h走行時においては4.4Hz（ $=1/(5m/(80km/hr \times 1,000m/3,600秒))$ ）でチラツキが生じる可能性があるが、表-5の「避けるべき明暗の周波数」によれば、明暗輝度比を30以下とすればチラツキを防止することができる。

③ 明暗時間率

明暗時間率はチラツキが発生する明の時間と暗の時間より求まる。

千葉外環区間の場合、路線の向き、太陽の位置により、ストラットに遮られる太陽光が変わる。ストラットの真上から太陽が射す場合、明時間＝暗時間より100%となるが、その他の時間帯で避けるべき明暗時間率に該当する時間帯が限定的に存在する。

(4) チラツキ対策の視点

チラツキが生じる条件の3つの要素により、外環道（千葉県区間）においては、明暗輝度比を30以下とすることとし、以下の条件より必要遮光率を算出すると、必要遮光率は約96.6%となり、ほぼ完全に遮光する必要があり、直接光が入射しない様対策することを前提とした。

① 算定条件

- 基本照明の平均路面輝度²⁾4.5cd/m²
- 明暗輝度比30以下（3）②より）
- 野外路面輝度³⁾4,000cd/m²

② 算定式

$$\begin{aligned} \text{最大許容明輝度} &: 4.5\text{cd/m}^2 \times 30 \\ &= 135\text{cd/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{必要遮光率} &: 1 - (\text{最大許容明輝度}) \\ &\quad / (\text{野外路面輝度}) \\ &= 1 - 135/4,000 \approx 96.6\% \end{aligned}$$

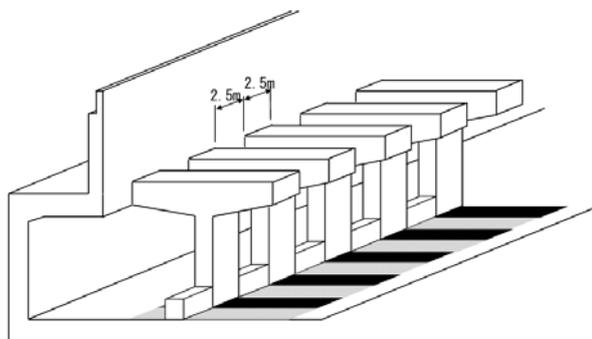


図-9 掘割スリット構造区間のストラット

表-5 チラツキによる不快感を少なくするための要素

明暗輝度比	避けるべき明暗の周波数(Hz)	避けるべき明暗時間率(%)
50	3.5~17	5~62
40	4.0~16	6~59
30	4.5~14.5	7~56
20	5.0~12.5	9~51
10	—	15~40

(注) 明暗輝度比 = (ちらつき光の明輝度) / (ちらつき光の暗輝度)

明暗時間率 = (ちらつき光の明時間) / (ちらつき光の暗時間) × 100 (%)

(5) 遮光板に求める性能

走行環境の快適性によるお客様サービスの観点から、掘割スリット構造区間におけるチラツキ対策を行うこととした。

外環道（千葉県区間）におけるチラツキ要因及びチラツキ対策の視点から、求める性能は、以下のとおりとした。

- ① 直射光の入射を避ける（走行空間は明るく保つ）
- ② 函体内の換気は自然換気ができる
- ③ 降雨による影響を無くす（雨水対策）
- ④ 耐久性がある

(6) 遮光板の設置イメージ

上記(5)の性能が満足するよう、掘割構造区間全体にわたって太陽光シミュレーション及び換気検討を行った。その結果、**図-10**に示すイメージの遮光板を選定した。

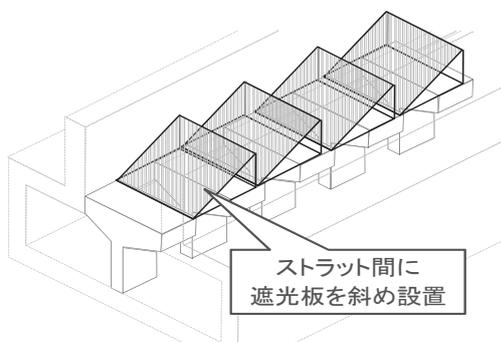


図-10 遮光板の設置イメージ

5. おわりに

外環道（千葉県区間）の掘割構造区間の設計概要について、主なものを紹介した。都市内における掘割構造のため、多種多様の制約条件があるなか、「安心・安全・快適」を重視し、各種検討や研究開発等を通じて最新の知見を取り入れて設計検討をしてきたものである。

現在、工事は最盛期を迎えているが、開通まで更なる検討を行い、「安心・安全・快適」な道路となるよう努めてまいりたい。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：「道路照明施設設置基準・同解説」,pp.74-75,2007.
- 2) (社)日本道路協会：「道路照明施設設置基準・同解説」,pp.75,2007.
- 3) (社)日本道路協会：「道路照明施設設置基準・同解説」,pp.82,2007.