

開削トンネル縦断方向における構造継手に関する検討事例

神戸第二建設部 設計課 徳 永 法 夫
神戸第二建設部 設計課 今 田 康 博
神戸第二建設部 設計課 伊 藤 学 之
神戸第二建設部 設計課 吉 田 高 之

要 旨

神戸山手線(南伸部)は延長約1.4kmの1層2連もしくは2層2連のトンネルであり横断方向の耐震設計は既に取り入れられている。一方、縦断方向の地震時の影響については、その検討手法が明確になっていない。また、構造継手間隔についても縦断方向の地震時の影響検討と同様に明確な設置間隔の検討手法はないため既設構造物との交差部・荷重戴荷部等による断面急変部に構造継手を配置することにとどまっている。しかしながら、実務レベルにおいて構造継手の設置間隔が問題点として上げられており、現時点での一つの方向性を打ち出す必要に迫られた。そこで、路線を神戸山手線(南伸部)に限定し、横断方向の耐震設計で実際に使用されている諸条件を用いた縦断方向の地震時の影響検討を行い構造継手間隔の設定を行った。

縦断方向の検討には、横断方向の耐震設計の中で行われた静的FEM解析、地盤応答変位解析の結果である地盤ばね、波長・振幅を採用した。また、入力地震波については『開削トンネル耐震設計指針(案)』に準拠し、L2のみにて検討を行うこととした。その結果、神戸山手線(南伸部)標準断面区間における構造継手間隔は、40mとすることを提案するに至った。

本稿は開削トンネルの構造継手間隔の設定例の一つとして、神戸山手線(南伸部)の構造継手間隔の設定手法と設定結果について述べるものである。

キーワード：開削トンネル、応答変位法、縦断方向耐震設計、L2地震、構造継手

はじめに

阪神大震災の地下構造物の事例を見ても、トンネル縦断方向の地震の影響に起因すると見られる損傷はほとんど報告されていない。ただし、共同溝において継手部で段差が生じ、止水板の損傷により浸水被害を受けたものもあり、地震の影響は弱点である構造継手に発生しやすいことも事実として明らかである。

神戸山手線(南伸部)は、既に工事を行っている区間から予備設計段階の区間まで進捗状況は異

なるものの鋭意事業を進めている路線である。設計作業の中での懸案事項の一つとして縦断方向の構造継手間隔が問題視されてきており、現時点における構造継手間隔の考え方を整理しておく必要がある。

横断方向の耐震設計法については基準等を設けている団体もあり、阪神公団においても『開削トンネル耐震設計指針(案)』を作成した。しかし、縦断方向の構造継手に関する検討手法については、地盤条件、構造物の戴荷条件、トンネル構造条件、地震の影響等を勘案する必要があり、その

影響評価をどのように行うか不明な点が多い。

そこで、本検討では、神戸山手線（南伸部）の中から連続化が可能である標準的な工区を抽出し、引張鉄筋が降伏に達したときの耐力を用いてトンネル縦断方向の構造継手の検討を行い、山手線における構造継手間隔の提案を行った。

1. 神戸山手線の概要と検討断面の抽出

神戸山手線（南伸部）は、神戸市長田区川西通1から神戸市長田区駒栄町間を結ぶ延長約1.4 km間を新湊川右岸沿いに開削トンネルにて計画されている。途中に、JR・国道2号・3号神戸線・湊川出入路と交差物件を非常に多く含んだ路線となっている。

地質状況は、砂礫層を主体としており、粘性土と砂・砂礫層の互層となっている。（図-1参照）耐震設計上の基盤面は神戸山手線（南伸部）全区

間でDg4（砂れき）層とした。

構造形式はボックス構造（1層2連および2層2連）を採用しており、都市内トンネルであるため交差鉄道、橋台、橋脚、出入路ボックス等の戴荷区間が多い。このような交差物件や構造物の戴荷箇所は必然的に構造継手を設置せざるを得ない。表-1に上記諸条件により、構造継手を配置した上で連続化させることが可能である区間を示す。この表からも明らかなように長区間連続化できる区間は少なく、200 mを超える区間は起点部の①一般部（1層2連ボックス）区間と終点部の①一般部（2層2連ボックス）区間である。本検討では、200 m程度連続化が可能であり、かつ、1層2連、2層2連と構造的に剛性の異なる上記2区間について縦断方向の検討を行った。

図-2に①区間、図-3に②区間の検討断面を示す。

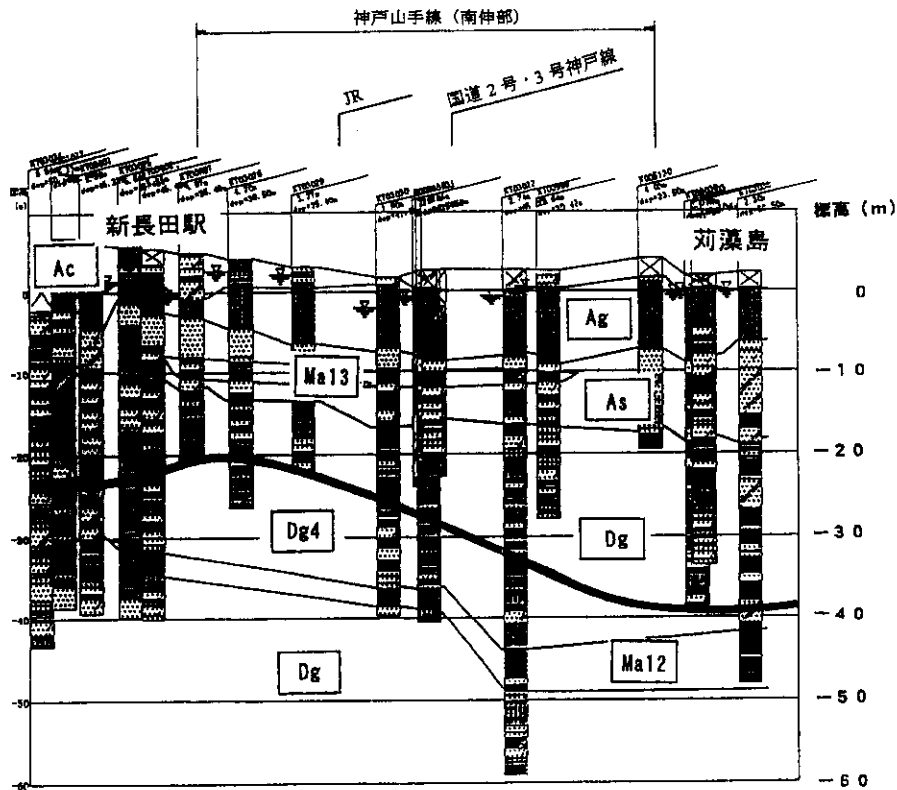


図-1 山手線の地質概要

表-1 神戸山手線南伸部区間の分割

①一般部(1層2連ボックス)	No280+12.000~No291+14.500	L=222.500	
②地下連続壁区間	No291+14.500~No299+8.800	L=154.300	
③鉄道交差区間	No299+8.800~No302+15.000	L=66.200	JR 山陽本線
④連絡路交差区間	No302+15.000~No303+4.000	L=9.000	
⑤一般部(2層2連ボックス)	No303+4.000~No312+7.000	L=183.000	
⑥橋台載荷区間	No312+7.000~No324+8.000	L=241.000	
⑦一般部(2層2連ボックス)	No324+8.000~No329+0.000	L=92.000	
⑧ランプ出入路区間	No329+0.000~No332+0.000	L=60.000	神戸→山手線連絡路北行き入路ノーズ
	No332+0.000~No334+0.000	L=40.000	駒栄出路ノーズ
	No334+0.000~No335+0.000	L=20.000	駒栄出路ノーズ
⑨一般部(2層2連ボックス)	No335+0.000~No341+0.000	L=120.000	
⑩連絡路交差区間	No341+0.000~No343+10.000	L=50.000	駒栄入路ノーズ
⑪一般部(2層2連ボックス)	No343+10.000~No353+10.000	L=200.000	

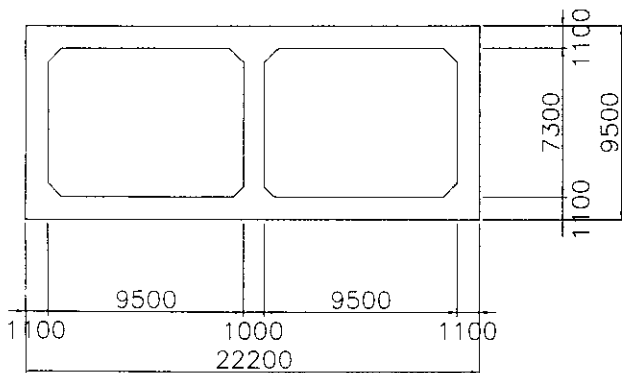


図-2 検討断面-1 (①一般部)

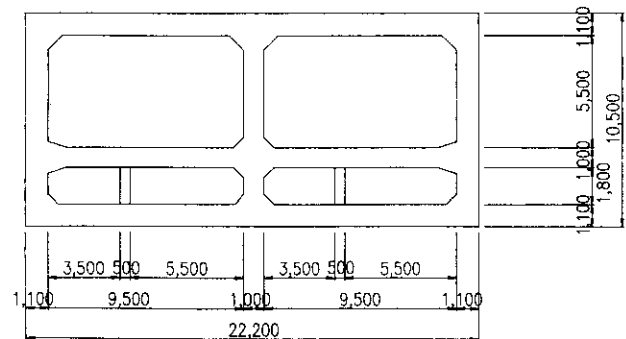


図-3 検討断面-2 (⑪一般部)

2. 検討手法

本検討では『開削トンネル耐震設計指針(案)』の考え方をベースに『共同溝設計指針』等の考え方をとりいれ神戸山手線(南伸部)をケーススタディーとし実施する。

検討は、(a)函体の縦断方向発生断面力、(b)構造継手の目開き量に着目し、構造継手間隔をパラメータとして行なった。また、構造継手部では、(c)止水性を確保した伸縮継手の設定、(d)ブロック相互のせん断ずれ防止機構について検討した。比較検討を行う構造継手間隔は、20 m、40 m、60 mとした。

3. 検討内容

3-1 検討モデル

図-4に示すようにばねにより支持された棒部材に応答変位法に基づく地震時地盤変位を外力として与えた。ここで入力する地盤変位は地震応答解析から振幅、波長を算定し、図-5のように断面力、継手部目開き量が各々最大となると考えられる入射角が 0° 、 45° を考慮するものとする。また、地盤応答解析に用いる入力地震動は『開削トンネル設計指針(案)』にしたがいL2標準加速度波形を使用した。(図-6参照)

地盤ばねについては、躯体軸方向と躯体軸直角方向でFEM解析により算定を行い、図-7のよ

うに非線形特性を与えるものとする。

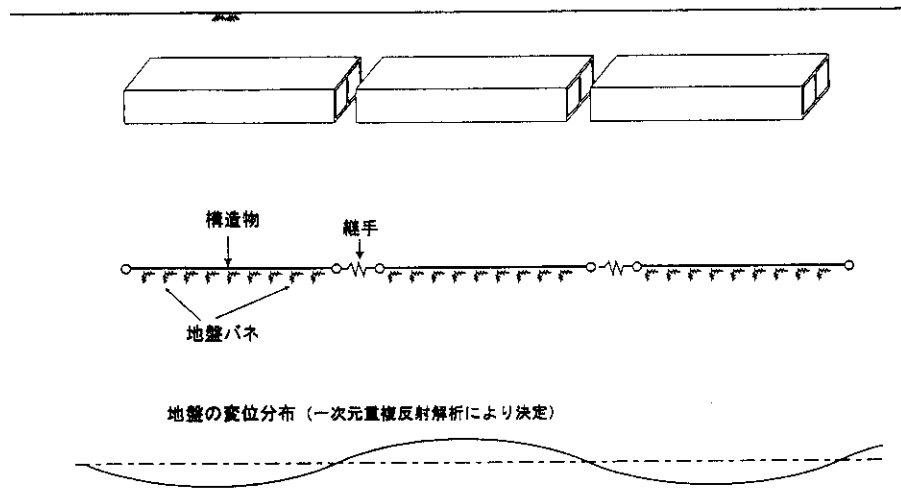


図-4 縦断方向の応答変位解析モデル

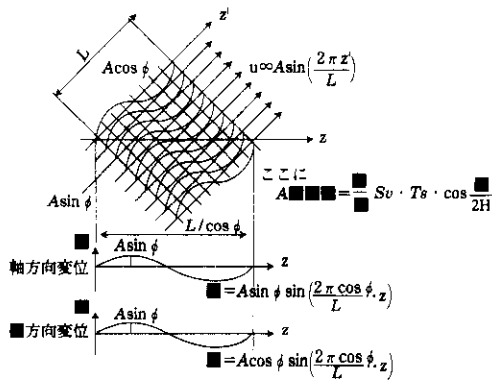


図-5 入力する地盤変位

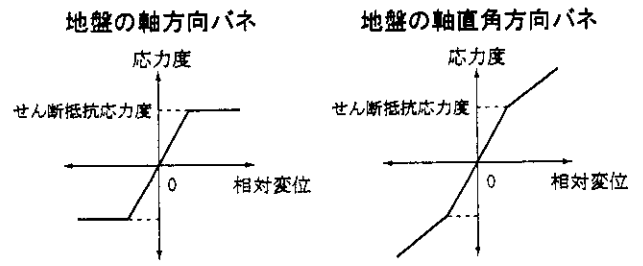


図-7 地盤ばねの非線形特性

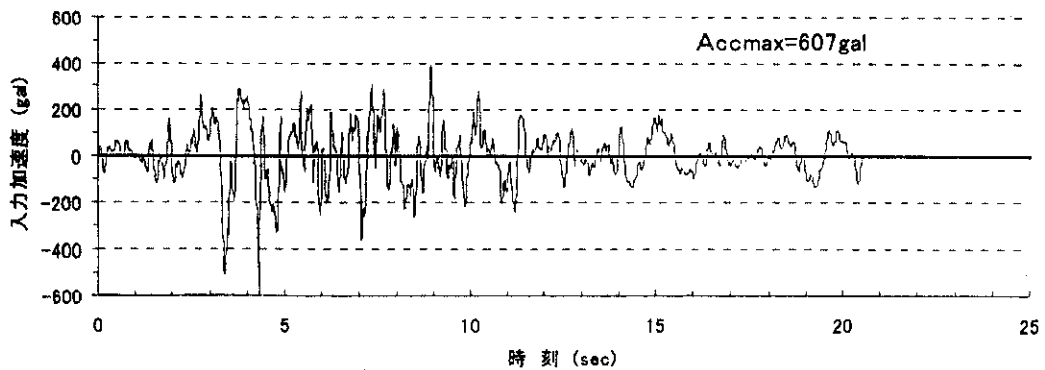


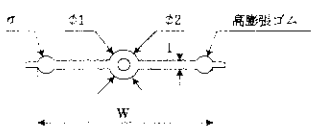
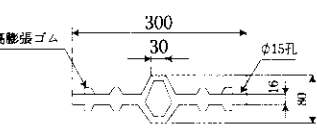
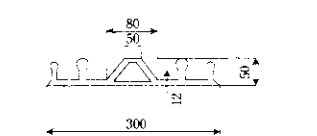
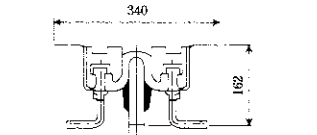
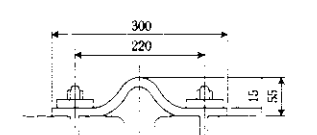
図-6 入力地震動 (レベル2 適合基盤波)

3-2 伸縮継手と許容伸縮量

トンネルの構造継手は、隣接するブロック相互のせん断ずれを防止するずれ止め鉄筋と、止水を目的とした伸縮継手より構成する。トンネルで用いられている代表的な伸縮継手と許容伸縮量を表-2に示す。

表-2中の③は、継手補修時等において後施工で取り付ける外防水型のため検討対象外とした。本検討では、取付けが容易でかつコストの安価な①センターバルブ型もしくは②伸縮可撓吸収型の伸縮継手を考慮した。

表-2 伸縮継手の種類と許容伸縮量

	断面形状	性能		備考(用途他)
		伸縮量	沈下量	
伸縮継目用 ゴム止水版	①センターバルブ型(エキスパンション型) 	+15 mm * -20 mm * *センターバルブ内径の1/2	30 mm	継ぎ目部における段差、曲げ、開きに対応できるよう開発されたもの。 止水版として壁厚の中央に設置する。一般の止水版(フラット型)より形枠組に若干手間がかかる。軟弱地盤に構築される水路の継ぎ目等に採用される。 ・建設省他事例多い。 ・目地幅 標準 t=20 mm ・耐水圧 1.0 kgf/cm ² (15,400 円/m 材工共)
	②伸縮可撓吸収型(M 300 B) 	-50 mm -50 mm	60 mm	継ぎ目部における段差、曲げ、開きに対応できるよう開発されたもの。 止水版として壁厚の中央に設置する。一般の止水版(フラット型)より形枠組に若干手間がかかる。耐震用止水版として、建設省共同溝設計において多く採用されている。 水膨張ゴムを装着したもの。 ・建設省、関空 ・標準目地幅 t=30 mm ・標準耐水圧 1.5 kgf/cm ² (42,700 円/m 材工共)
	③アクアストッパー 	+30 mm -30 mm	60 mm	コンクリート構造物の外周に取り付けられる外防水型止水版。 センターバルブ型より大型のセンターバルブで、より大きな継目変位に追従できる。 中部電力のニーズにより開発。一般的な使用例は少ない。 ・農林水産省、水資源開発公団での実績有 ・標準目地幅 t=30 mm ・標準耐水圧 2.0 kgf/cm ² (56,000 円/m 材工共)
ボックス伸縮可撓継手	④ピーシージョイント U 100 型 	+80 mm -15 mm * *目地幅の1/2で設定	100 mm	新設工事で不等沈下対策用として使用される。内挿式であるので、止水の維持管理が容易。大きな変位に追従する必要性のある場合に採用する。 ゴム止水版に比べコストは大幅に増加する変位に応じて、U 100~U 300 型まである。 ・建設省、都道府県、関空(株)、日本下水事業団他実績は多い。 ・標準目地幅 t=30 mm ・標準耐水圧 1.0 kgf/cm ² (~2.0 kgf/cm ²) (272,000 円/m 材工共)
	⑤ピーシージョイント RE 50 型 	+30 mm -10 mm * *目地幅の1/2で設定	50 mm	新設工事で、耐震用または小沈下吸収用として使用される。内挿方式であるので、止水の維持管理が容易。変位に応じて、RE 30~200 型までがある。 ・日本下水事業団、都道府県他 ・標準目地幅 t=20 mm ・標準耐水圧 1.0 kgf/cm ² (240,000 円/m 材工共)

※工費については参考

4. 検討結果

4-1 構造継手間隔の違いによる発生断面力

継手間隔を 20 m, 40 m, 60 m とした場合の発生断面力を図-8 に示す。この図から構造継手間隔が長くなれば発生断面力が大きくなることが分かった。

4-2 水平面内と鉛直面内での発生断面力の比較

図-9 に構造継手間隔が 40 m の計算ケースを例として、水平面内と鉛直面内での発生断面力の比較結果を示す。水平面内と鉛直面内で発生断面力を比較すると断面力の最大値は水平面内、鉛直面内の両方に現れている。これは、振幅と地盤ば

ね条件によるものであると考えられ、水平面内と鉛直面内の両ケースについて検討を行う必要があることが分かった。

4-3 地震波の入射角の違いによる目開き量

地震波の入射角が 0° と 45° の場合の構造継手部での目開き量を表-3 に示す。この表からも明らかのように、入射角が 45° の場合の方が構造継手

表-3 入射角の違いによる継手部目開き量(mm)

構造継手間隔	検討断面-1		検討断面-2	
	入射角 0°	入射角 45°	入射角 0°	入射角 45°
20 m	6.5	10.4	16.1	26.6
40 m	12.0	19.7	28.3	50.1
60 m	16.6	26.4	41.1	71.3

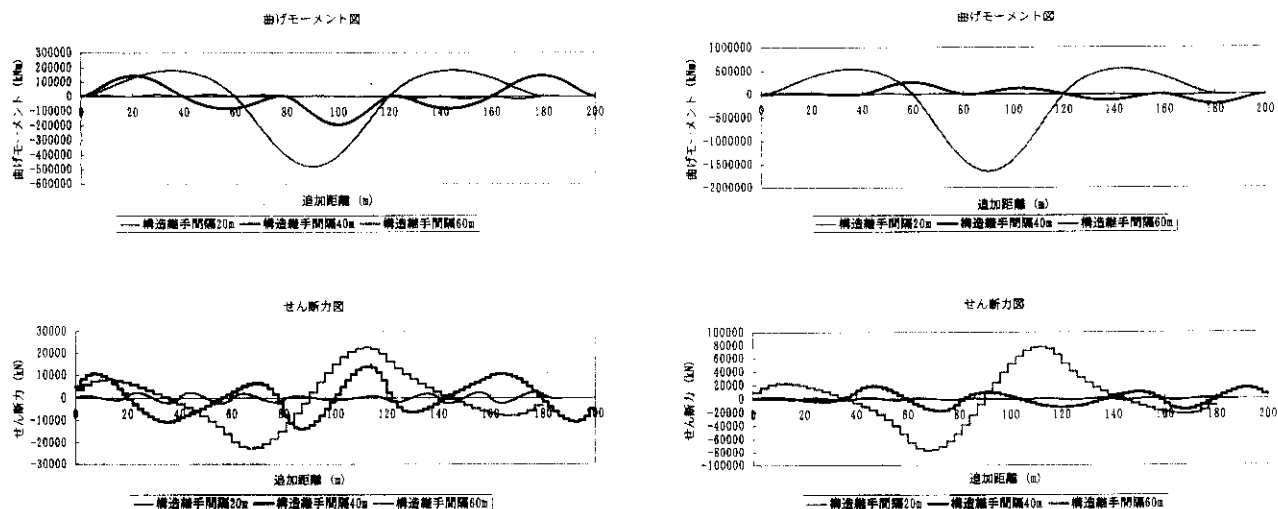


図-8 構造継手間隔の違いによる発生断面力分布図

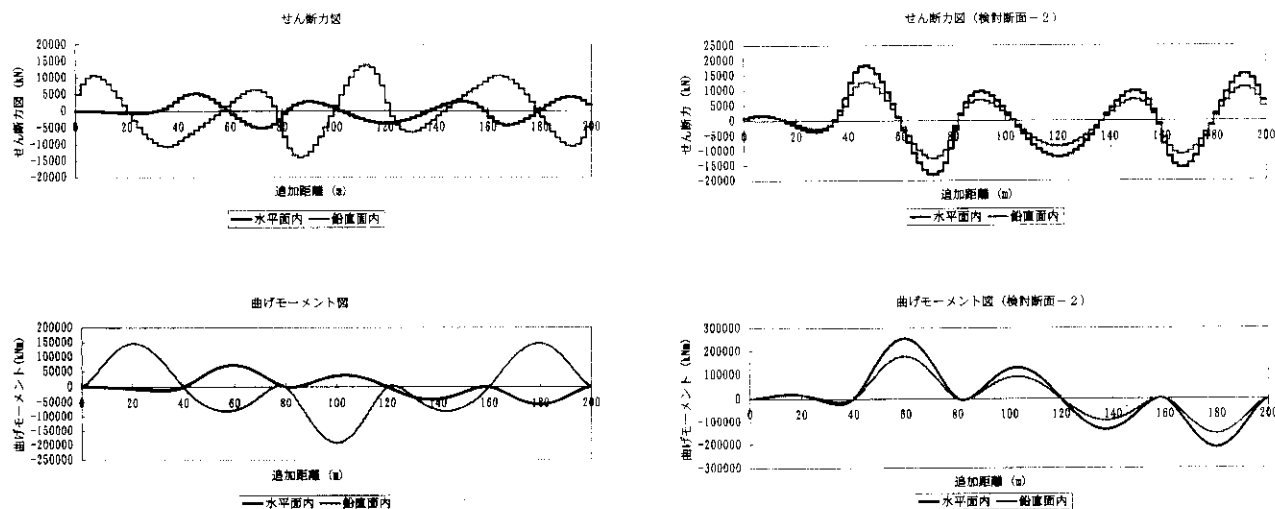


図-9 水平面内と鉛直面内での発生断面力分布図 (構造継手間隔 40 m のケース)

部の目開き量が大きくなっていることがわかった。

4-4 発生断面力と必要鉄筋量

必用な耐震性能を得るためには、継手間隔が 60 m のときは、検討断面-1 では D 32@250, 検討断面-2 では D 35@250 では不十分で D 25@125 の配力鉄筋が必要となる。一方、継手間隔を 40 m とすれば、これまでの横断方向のみの設計で考慮していた通常の配力鉄筋量（主鉄筋の 1/6 程度）で発生断面力に対し、安全な設計となる。

4-5 目開き量

表-2 に示す②伸縮可撓吸収型を使用することにより、構造継手間隔が 40 m であれば、目開き量は 50 mm 程度に収まる結果となった（表-3 参照）。しかし、構造継手間隔を 60 m とすると検討断面-2 において目開き量が 71 mm 程度となり、安価な伸縮可撓吸収型の継手では対応が不可能となる。もし、ボックス伸縮可撓継手（表-1 の④）を使用し継手間隔を延長させたとすれば、継手工費において伸縮可撓吸収型の約 7 倍となるた

め、継手間隔も約 7 倍の 280 m（ $= 7 \times 40$ m）以上としなければならなくなる。このとき、発生断面力は増加し、配力鉄筋径を上げることが必要となり、コストはさらに増加する。

したがって、目開き量からも構造継手間隔は、40 m が適当であると判断される。

4-6 継手部のせん断すれ止め鉄筋

継手部においてせん断力によるずれが生じないように、継手部に配置するすれ止め防止鉄筋について検討した。図-11 に継手部における発生最大せん断力と、そのとき必要となるすれ止め防止鉄筋量の関係を示した。図-11 からわかるように構造継手間隔が 40 m 程度であれば D 19 以下のすれ止め鉄筋で継手部のせん断耐力は確保できる。しかし、構造継手間隔が 60 m となると検討断面-2 では D 32 でも継手部耐力の確保ができず、コストの大幅な増加を招く。したがって、継手部耐力の面からも 40 m の構造継手間隔が望ましいことがわかった。

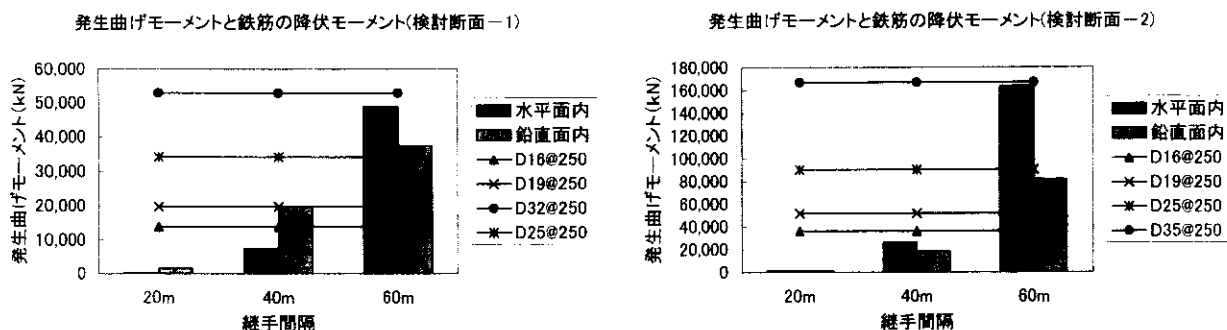


図-10 発生曲げモーメントと降伏曲げモーメント

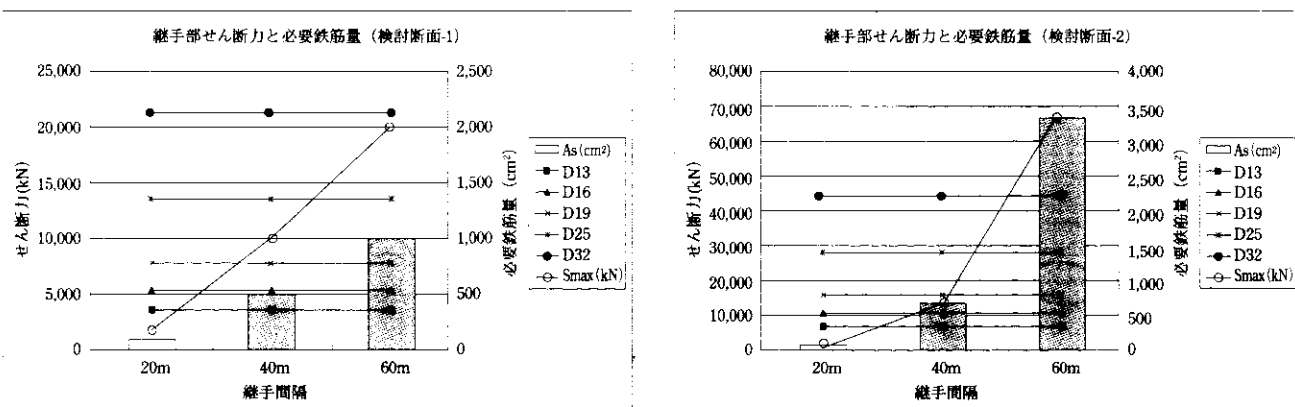


図-11 継手部のせん断力と必要鉄筋量

5. 山手線における構造継手間隔の提案

構造継手間隔を 40 m 以下とすれば D 19@250 程度の通常考慮する配力鉄筋にて発生断面力、目開き量に関して対応可能であることがわかった。しかし、構造継手間隔を 60 m まで延伸すると、発生断面力が急激に大きくなるため配力鉄筋量が増え、図-12 に示すようにコストの増加を招く。伸縮継手に関しても構造継手間隔を 40 m とすれば、60 m のときに比べ安価な伸縮可撓吸収型にて対応ができ、また、構造継手間隔が 20 m のときに比べ半分の伸縮継手コストで済む(図-12 参照)。

以上から、神戸山手線(南伸部)における構造継手間隔は 40 m を標準間隔として提案した。

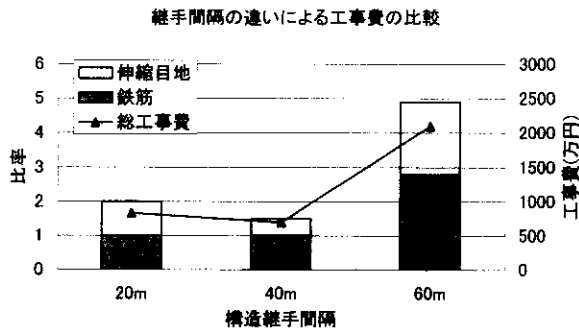


図-12 継手間隔の違いによる工事費の比較

6. まとめと今後の課題

『開削トンネル設計指針(案)』では、トンネルの函体は構造上問題とならない長さで、構造継手なしの連続した構造物とすることを原則としている。しかし、構造継手を設けずにトンネルを長く連続させると、大きな断面力が発生し、長手方向の鉄筋の破断や躯体にひび割れが入り、目開きが生じる可能性がある。これを、配力鉄筋で抵抗させる方法もあるが、本検討においては、コストを勘案して適切な間隔に止水可能な伸縮継手を設けることが望ましいと判断した。本検討で得られた主な成果をまとめると以下ようになる。

構造継手間隔は、構造物の規模や地盤条件等に大きく左右される。構造継手間隔と波長との関係でみると、波長の 1/4 を越えると函体に発生する

断面力は急激に増加することがわかった。神戸山手線の事例では、概ね波長の 1/4 程度が構造継手間隔の一つの目安と判断される。

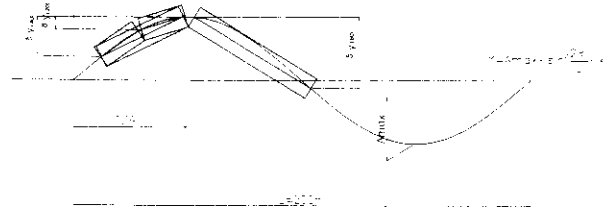


図-12 地震の波動と構造継手間隔

トンネルの縦断方向の耐震設計手法は、マスコン対策としての縦断方向鉄筋量、低鉄筋量部材の比線形性や函体接触後の継手バネの非線形特性、および部材の靱性等を考慮した耐震性能の規定など、解決すべき課題が残されている。

今後は、これらの課題に加え、交差部や構造物載荷部を含めた構造継手間隔の設定手法について、検討を行っていく必要がある。

参考文献

『共同溝設計指針』日本道路協会。