

論文 プレパックドコンクリートを用いた道床の水平耐力に関する研究

高橋 貴蔵*1・伊藤 耆記*2・桃谷 尚嗣*3

要旨: 鉄道のバラスト軌道では、列車の通過によって生じるバラストの沈下に対する定期的な保守が求められていることから、高強度の急硬性モルタルをバラスト間に注入してプレパックドコンクリートとすることで、保守の省力化を行うこととした。これまで筆者らは鉛直方向の作用である輪重に対する検討を進めてきたが、水平方向の作用に対する検討を行っていなかった。そこで、本研究ではまくらぎの端部から道床に伝わる荷重を対象とした実験を実施し、プレパックドコンクリートを道床に適用するためには道床肩幅を200mm以上にする必要を確認した。

キーワード: プレパックドコンクリート, 水平耐力, 道床, バラスト

1. はじめに

鉄道のバラスト軌道は、レール、まくらぎ、バラストと称する砕石で構成される最も一般的な軌道構造である。まくらぎを支持し、まくらぎから伝わる列車荷重を広く路盤に伝達する機能を有する構造を道床と呼び、バラスト軌道の砕石を用いた道床を、一般的にバラスト道床と呼ぶ。バラスト軌道は、建設費が安く、容易にレール面の高さを調整できる等といった利点を有しているが、列車が繰り返し通過することによってバラストが沈下するため、定期的な保守を必要とする。

このようなバラスト軌道の保守量の低減を行える有効な手法の一つとして、筆者らは鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物)¹⁾に準じて設計されたアスファルト路盤を有する新幹線用のバラスト軌道を対象とし、単粒度砕石を代用したバラストの間に高強度で急硬性のモルタルを注入して形成するプレパックドコンクリートを道床に用いることとした(図-1)。これまでの検討で、モルタルの施工性、プレパックドコンクリートの強度、実物大軌道模型を用いた輪重に対する耐力・変形に関する検討を実施し、バラストを骨材としたプレパックドコンクリートは道床として十分な性能を有してい

ることを確認した²⁾³⁾。

一方、列車の通過によってレールには鉛直方向の作用である輪重の他に、水平方向の作用である横圧が発生する。さらに、レールの長さが200m以上であるロングレール区間では、レール締結装置でレールの温度上昇による伸びを拘束するため、レールの軸力の増加にともない水平方向に座屈する荷重が発生する。これらの水平方向の荷重に対して、これまでプレパックドコンクリートを用いた道床の耐力は評価されていなかった。

そこで、本研究ではまくらぎ端部から伝わる水平方向の荷重に対するプレパックドコンクリートの水平耐力を実験により確認し、鉄筋コンクリート構造の道床の設計に用いる荷重と比較検討した結果について示す。

2. 実験概要

2.1 事前検討

プレパックドコンクリートを施工する場合、既設バラストは経年による細粒化のためモルタルの注入が困難となることから、新品の砕石へ入れ替えることを想定している。新品の砕石への入れ替え時およびモルタルの注入時には、レール面を所定の高さに合わせた状態で、まく

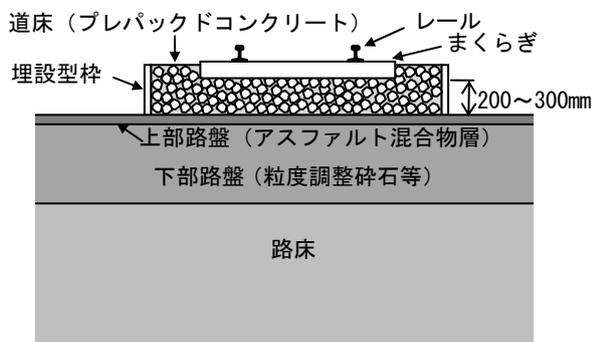


図-1 プレパックドコンクリートを用いた構造例



図-2 タイタンパーつき固め試験中状況

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工修(正会員)
 *2 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工修
 *3 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工博(正会員)

らぎ底部の砕石をタイタンパーと呼ばれる機械を用いてつき固める必要がある。この場合、まくらぎ側面と施工目地の間隔によってはタイタンパーによる作業が困難になる可能性がある。そこで、事前検討としてまくらぎ側面と施工目地を想定した型枠との間隔を 50, 90, 120, 180mm とした実物大模型に対して、図-2 に示すようにタイタンパーによる作業性を確認した。試験の結果、適切なつき固めを行うためには 90mm 以上の間隔が必要であることを確認した。

2.2 試験ケースおよび供試体

水平載荷試験の試験ケースを表-1 に示す。水平載荷試験では、図-3 に示すように水平方向の作用によってまくらぎ端部からプレパックドコンクリートによる道床に伝わる荷重を想定し、試験ではまくらぎの端部を模擬した実物大模型供試体を用いた。実物大模型供試体の外形寸法は図-4 に示すとおりであり、Type1 および Type2 の2種類とした。水平載荷試験は各供試体の4辺で行うものとし、載荷面から縁端までの距離である道床肩幅および鉄筋による補強の有無をパラメータとした。Type1 は施工目地間の中央部を想定する一般的な区間（以下、

一般部とする）を、Type2 は施工目地部（以下、目地部とする）を対象としている。したがって、Type1 の載荷位置は4辺の中央とし、Type2 の載荷位置は「2.1 事前検討」の結果をもとに載荷方向右側の辺から 90mm 離れた位置とした。

鉄筋による補強は、Type1 で1ケースとし、Type2 で2ケースとした。主鉄筋は D16 を4本とし、せん断補強鉄筋は D13 を配置間隔が主として 200mm になるように配筋した。なお、タイタンパーによる作業を考慮し、まくらぎ間に相当する位置には配筋していない。

実物大模型供試体の断面の模式図を図-5 に示す。実物大模型供試体は、水平耐力に及ぼす底面の摩擦の影響を極力小さくするため、ビニールシート上に作製した。

土構造物上の新幹線におけるまくらぎ下の道床の最小厚さは、一般に 300mm である。ただし、高架橋上への適用も考慮して、実物大模型供試体の道床の厚さは 200mm とした。また、プレパックドコンクリートの高さは、まくらぎ上面から 50mm 下がった位置までとし、営業線での作業空間を確保することとした。したがって、今回は 150mm の厚さのまくらぎの使用を想定している

表-1 水平載荷試験ケース

	実物大模型 供試体種別	道床肩幅 (mm)	補強鉄筋の 有無
Case1-1	Type1	200	なし
Case1-2	Type1	300	なし
Case1-3	Type1	400	なし
Case1-4	Type1	300	あり
Case2-1	Type2	300	なし
Case2-2	Type2	400	なし
Case2-3	Type2	300	あり
Case2-4	Type2	400	あり

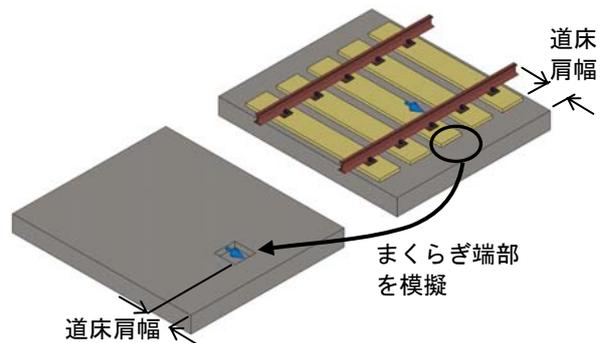
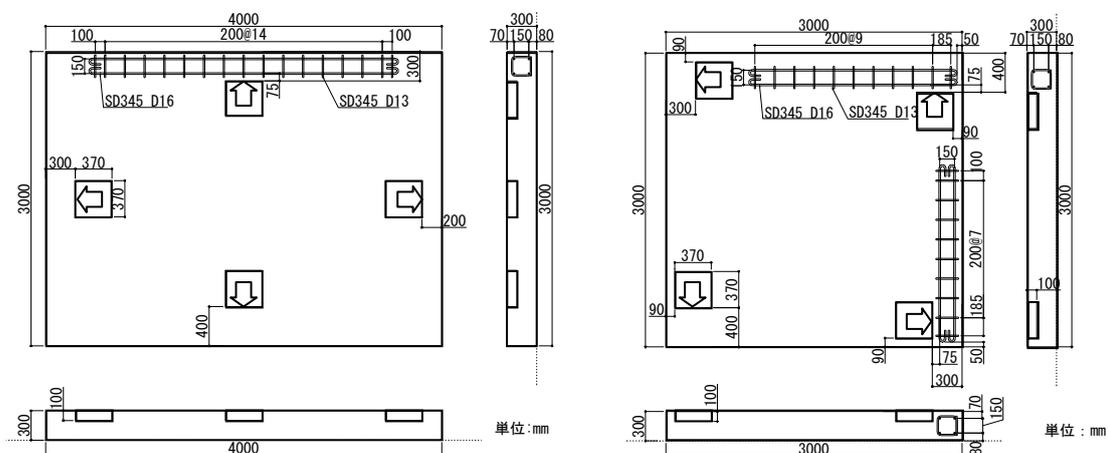


図-3 実物大模型供試体のイメージ



(1) Type1

(2) Type2

図-4 水平載荷試験に用いる実物大模型供試体の形状寸法

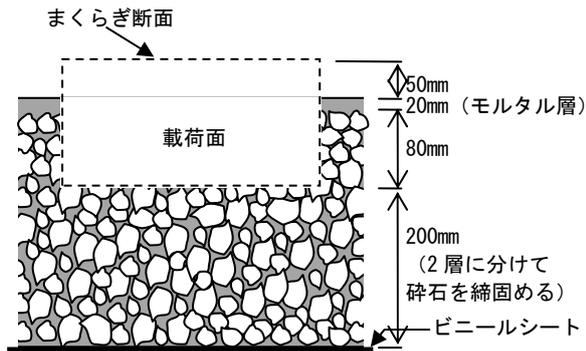


図-5 実物大模型供試体の断面の模式図

表-2 砕石の物性

JIS A 1104		JIS A 1110		JIS A 1103
単位容積質量 (kg/m ³)	実積率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)
1510	59.3	2.61	1.90	0.32

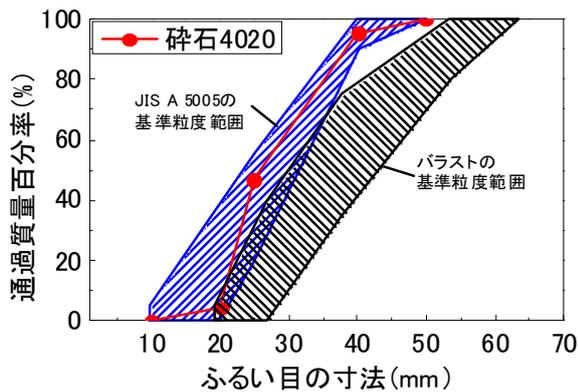


図-6 骨材の粒度分布

ことから、まくらぎの下側 100mm がプレパックドコンクリートに埋まることとなる。なお、プレパックドコンクリート表面に砕石が露出しないよう、まくらぎ下面からの砕石の厚さは 80mm 程度とし、上面 20mm 程度はモルタルのみの層とした。砕石は、後に示す表-2 の単位容積質量を参考として、締め密度が 1.50g/cm³ となるように、下側から 100mm, 100mm, 80mm の 3 層に分け、プレートコンパクターで転圧しながら構築した。モルタルのてん充は供試体の隅から開始し、順次片押しで移動しながら砕石の上面から行った。

プレパックドコンクリートの養生期間は 7 日とし、両供試体の強度を比較するため、水平載荷試験の終了後に中央部から φ150×300mm のコアを 3 本ずつ採取し、水平載荷試験と同日に JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して圧縮強度と静弾性係数を測定した。

表-3 モルタルのフレッシュ性状

実物大模型 供試体種別	試験時期	気温 (°C)	練上り温度 (°C)	JA 漏斗流下 時間(秒)
Type1	開始時	16.8	21.0	20.4
	終了時	14.4	19.8	19.5
Type2	開始時	14.0	17.0	23.1
	終了時	15.5	17.0	23.2

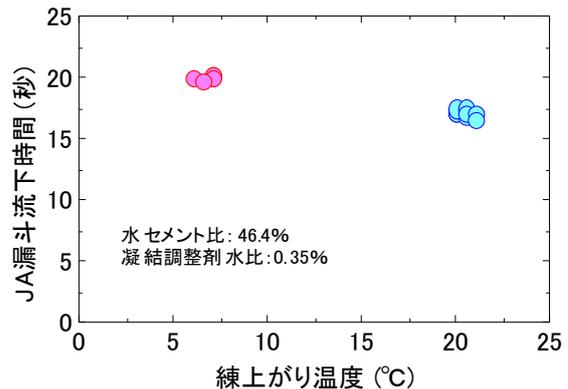


図-7 恒温恒湿槽で実施した JA 漏斗流下時間

2.3 使用材料

一般的なパラストには最大粒径が 63mm の砕石を用いている。しかし、プレパックドコンクリートの骨材とした場合、道床の断面寸法に対してパラストは大きい。また、パラストの石質としてアルカリ骨材反応性は要求されないことからアルカリ骨材反応性試験において無害と判定されるパラストを入手できない可能性もある。そこで、パラストより粒径が小さく、無害と判定される可能性が高い JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」に示される砕石 4020 を使用することとした。試験に用いた砕石の物性を表-2 に、粒度分布を図-6 に示す。なお、30~50mm の粒径の砕石をパラストとして用いた軌道の試験結果⁴⁾を考慮すれば、モルタルをてん充するまでの間、本試験で使用する砕石をパラスト道床に使用しても軌道の沈下に対しては問題ないと考えられる。

プレパックドコンクリートの施工は夜間に行い、始発列車通過時には十分な強度を確保し、硬化後の収縮ひび割れの発生を抑制する必要があることから、急硬性と無収縮性を有するプレミックス材(セメント系無収縮モルタル)を用いた。プレミックス材のセメントと細骨材の質量の比率は 1 : 1 である。モルタルの水セメント比は 46.4%とし、JIS A 1181「レジンコンクリートの試験方法」に準じた触感法による可使時間が 40 分程度になるように練混ぜ水に対する凝結調整剤の比率を 0.35%とした²⁾。モルタルの注入時の外気温、練上がり温度および JA 漏斗流下時間を表-3 に示す。ここで、配合が同じにもか

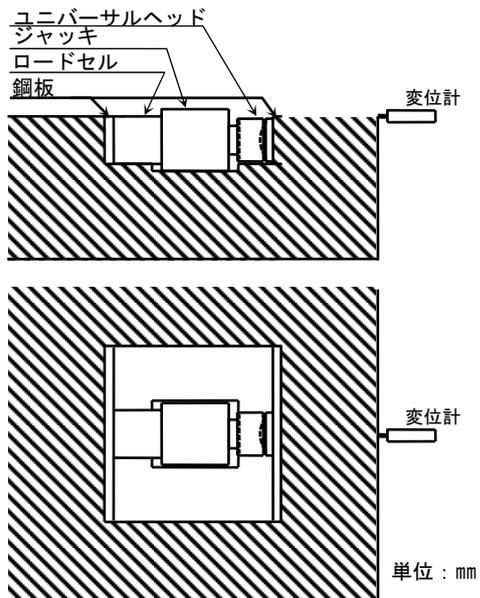


図-8 油圧ジャッキおよびセンサの位置



Type1 Type2

図-9 コアの側面状況

表-4 コアの圧縮強度と静弾性係数 (平均値)

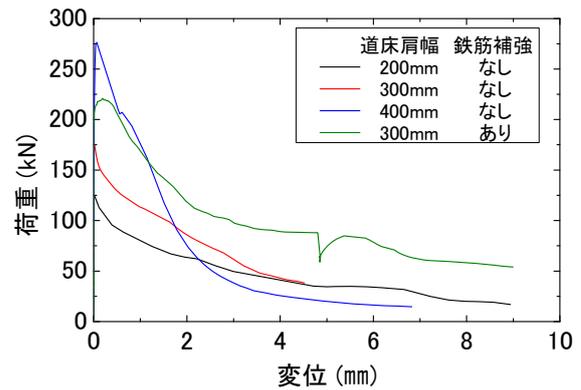
	圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数(kN/mm ²)
Type1	28.2	22.3
Type2	27.9	20.5

かわらず JA 漏斗流下時間が異なる結果となった。別途、同配合のモルタルの JA 漏斗流下時間を恒温恒湿槽内にて練上がり温度を変えて測定した結果、図-7 に示すように練上がり温度が高いほど流下時間は短くなった。実物大模型供試体作成時と恒温恒湿槽内での流下時間は異なる結果となったものの、表-3 において流動性が異なった主な要因は練上がり温度によるものと考えられ、実施工においては注意を要する。

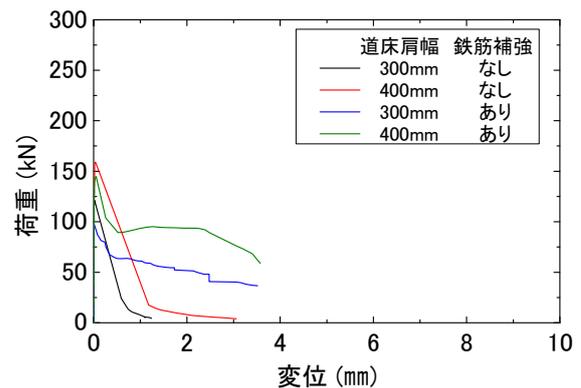
2.4 実験方法

水平載荷試験における油圧ジャッキとセンサの設置位置を図-8 に示す。水平載荷試験は、容量 500kN の油圧ジャッキを使用し、破壊が生じるまで単調載荷した。油圧ジャッキの載荷側にはユニバーサルヘッド、反力側にはロードセルを設置し、それぞれコンクリートと接する面にはまくらぎ端面から伝わる荷重を模擬するように厚さ 19mm の鋼板を設置した。

本試験における測定項目は、載荷荷重とプレパッド



(a) 一般部 (Type1)



(b) 目地部 (Type2)

図-10 荷重-変位関係

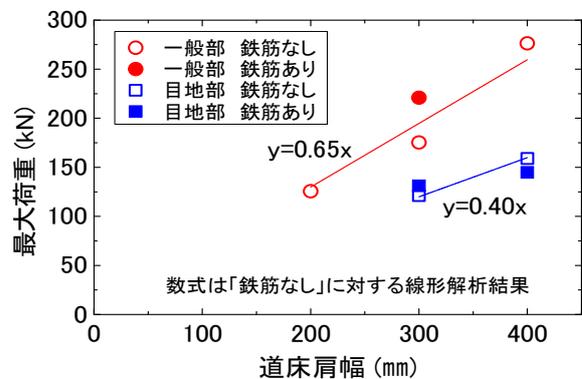


図-11 最大荷重-道床肩幅関係

コンクリートの変位である。載荷荷重は容量 500kN のロードセルで測定した。変位の測定位置は縁端部であり、載荷方向の変位を容量 50mm の変位計で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

はじめに、水平載荷試験終了後に採取したコアの側面を図-9 に、圧縮強度と静弾性係数を表-4 に示す。採取したコアの側面状況の外観は Type1 と Type2 でほぼ等しかった。また、静弾性係数は流下時間が長いモルタルで作成した Type2 の方がやや小さいものの、圧縮強度はほぼ等しかった。

一般部および目地部に対する水平載荷試験によって得

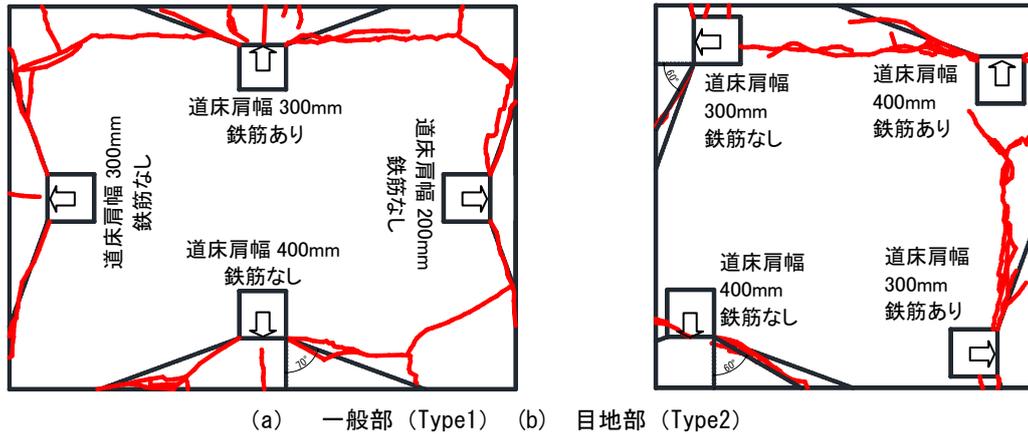


図-12 ひび割れ図

られた荷重-変位関係を図-10 に示す。荷重は、鉄筋による補強の有無にかかわらず、最大荷重に達した後、変位の進展とともに低下した。鉄筋の有無で比較すると、鉄筋がある場合のほうが最大荷重後に保持される荷重が大きくなる結果となった。

実験で得られた最大荷重と道床肩幅の関係を図-11 に示す。鉄筋による補強を行っていないケースに着目すると、道床肩幅に比例して最大荷重が大きくなることを確認した。鉄筋による補強効果の有無を比較すると、一般部では最大荷重は増加したが、目地部では必ずしも増加する結果にはならなかった。

試験終了後のひび割れ状況を図-12 示す。一般部である Type1 で鉄筋による補強がない場合、載荷面の隅角部から約 70 度の方向にひび割れが発生した。また、道床肩幅を 300mm とした鉄筋による補強がある場合、はじめに約 70 度方向のひび割れが発生し、その後、主鉄筋に沿ったひび割れが発生・進展し、破断面が形成された。目地部である Type2 で鉄筋による補強がない場合、ひび割れの角度は一般部よりも小さい約 60 度となった。鉄筋がある場合は、一般部と同様にはじめに約 70 度のひび割れが形成され、その後、主鉄筋に沿ったひび割れが発生・進展し、破断面が形成された。

全ての試験終了後に、撤去可能なコンクリート片を撤去した後約 100mm ピッチで実物大模型の上面、側面、底面における破断面の位置を測定して算出した破断面積で最大荷重を除いた見掛けのせん断強度と道床肩幅の関係を図-13 に示す。実験の結果、見掛けのせん断強度は一定にはならず、明確な傾向は見られなかった。特に、鉄筋で補強した場合は見掛けのせん断強度が低い結果となった。

3.2 考察

プレパックドコンクリートの道床肩部を鉄筋で補強した結果、一般部では最大荷重が 25% 程度増加した。これは、主鉄筋によるダウエル作用や骨材のかみ合い作用

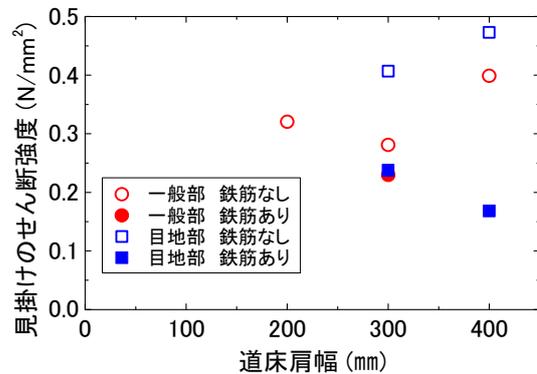


図-13 見掛けのせん断強度-道床肩幅関係

によるものと考えられる。ただし、まくらぎ間に補強鉄筋がないため、主鉄筋に沿ったプレパックドコンクリート部で破壊が進展し、道床肩部の鉄筋の効果を十分に発揮させることはできなかった。また、目地部では鉄筋による明確な最大荷重の増加は確認されなかった。これは、鉄筋による補強効果がない目地側で破壊が進行したためと考えられる。以上より、道床肩部のみの鉄筋によって耐力を増加させることは困難であることがわかった。ただし、鉄筋による補強を行わなくとも、道床をプレパックドコンクリートとすることで、水平耐力は図-11 で示したように道床肩幅に比例して増加することがわかった。通常、バラスト道床の水平耐力である道床横抵抗力は、まくらぎ 1 本当たり 10kN 程度であることから、プレパックドコンクリートとすることで大幅に向上させることが可能となる。

一般に、鉄筋コンクリート構造の水平耐力は、せん断引張鉄筋比、有効高さ、載荷周長の影響を考慮したコンクリートのせん断強度にせん断破壊面を乗じて算出する⁵⁾。しかしながら、本試験で算出したプレパックドコンクリートの見掛けのせん断強度は試験ケースによって異なる結果となった。これは、載荷試験中の観察より、最大荷重時のひび割れの長さは、試験終了時と比べると短く、破断面積は今回測定した値よりも小さいためと考え

られる。また、鉄筋による補強を行った場合は、前述したように最大荷重時のひび割れ発生個所と最終的な破壊箇所が異なることから、見掛けのせん断強度は特に小さくなったと考えられる。

したがって、設計に用いるプレパックドコンクリートを用いた道床の水平耐力は、実験式により算出するものとした。水平耐力の算定式を式(1)および式(2)に示す。水平耐力は、補強鉄筋がないことからせん断応力の影響は小さく、破壊面に生じる引張応力によって定まると考えられ、引張強度に基づく算定式としてある。ここで、プレパックドコンクリートの引張強度は普通骨材コンクリートと同様に圧縮強度の 2/3 乗に比例するものとし⁶⁾、圧縮強度は水平載荷試験時にモールドで作製した供試体によって得られた 20.8N/mm²で補正できるようにしてある。なお、この算定式はまくらぎ底部の道床の厚さが 200mm 以上の場合を対象とする。

$$\text{中間部} : V_h = 0.65 \cdot d \cdot ((f'_{ck}/\gamma_c)/20.8)^{2/3} \quad (1)$$

$$\text{目地部} : V_h = 0.40 \cdot d \cdot ((f'_{ck}/\gamma_c)/20.8)^{2/3} \quad (2)$$

ここで、 V_h : 水平耐力(kN)

d : 道床肩幅(mm)

f'_{ck} : プレパックドコンクリートの設計基準強度(N/mm²)

γ_c : 材料係数

4. 性能照査による道床形状の検討

プレパックドコンクリートを用いた道床の設計は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造」⁷⁾に準じた性能照査型設計法によって行うこととした。設計にあたっては、解析等により求める設計応答値 (I_{Rd}) および材料の強度等から求められる設計限界値 (I_{Ld}) について、式(3)を満足するように性能照査を行うこととした。

$$\gamma_i \cdot (I_{Rd}/I_{Ld}) \leq 1.0 \quad (3)$$

ここに、 γ_i : 軌道構造係数 (一般に 1.0~1.2)

破壊に関する安全性の照査に用いる I_{Rd} であるまくらぎ 1 本当たりのせん断力は 54.1kN である。一方、文献 2) に基づき、設計基準強度を 20N/mm² としたプレパックドコンクリートの設計限界値である水平耐力は、材料係数を 1.3 とした場合、図-14 に示す値となる。したがって、プレパックドコンクリートを用いた道床には、200mm 以上の道床肩幅が必要であると考えられる。

5. まとめ

軌道に用いるまくらぎを支持する砕石を骨材としたプレパックドコンクリートを道床に適用するために実施した実物大軌道模型供試体に対する水平載荷試験によって確認したことを以下に示す。

(1) プレパックドコンクリートを用いた道床の水平耐

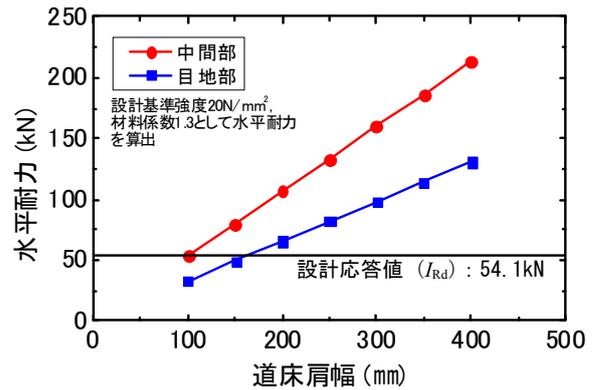


図-14 道床肩幅と水平耐力の関係

力は、70 度方向に発生するせん断ひび割れによって決定され、道床肩幅の増加に比例して大きくなることを確認した。

- (2) 道床肩部を鉄筋で補強した場合、70 度方向に発生するせん断ひび割れとは別に、主鉄筋に沿ったひび割れが発生して破壊に至ることから、一般部については耐力が増加するものの、目地部については目地側で破壊が進行するため、鉄筋による補強効果は期待できないことを確認した。
- (3) 実物大模型供試体に対する水平載荷試験の結果から、プレパックドコンクリートを道床とした場合の水平耐力の算定式を提案し、性能照査型設計法に基づいて性能を照査した結果、200mm 以上の道床肩幅が必要であると考えられた。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (土構造物), pp.210-213, 丸善, 2007
- 2) 高橋貴蔵, 伊藤孝記, 瀧上翔太, 桃谷尚嗣：バラスト軌道のプレパックドコンクリート化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.34, No.2, pp.1471-1476, 2012
- 3) 伊藤孝記, 高橋貴蔵, 関根悦夫, 瀧上翔太：プレパックドコンクリートによるバラストレス化軌道の載荷試験, 土木学会第 66 回年次学術講演会, IV-072, pp.143-144, 2011
- 4) 乾清一：中間粒度バラストの細粒劣化及び軌道沈下に及ぼす効果, 鉄道線路, Vol.24, No.11, 1976.11
- 5) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), pp.423, 丸善, 2004
- 6) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物) SI 単位版, 丸善, pp.59, 1999
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (軌道構造), 丸善, 2012