

論文 建設汚泥骨材コンクリートを用いた T 型梁の耐震性能に関する研究

八十島 章^{*1}・加藤 隆史^{*2}・木山 邦宏^{*3}・荒木 秀夫^{*4}

要旨：産業廃棄物の建設汚泥をコンクリート用骨材として有効利用することを目指し、建設汚泥骨材コンクリートの用いる部分を変動させた鉄筋コンクリート造 T 型梁の逆対称曲げせん断加力実験を行った。建設汚泥骨材コンクリートをスラブと梁に用いた場合、スラブのみに用いた場合の構造性能を把握し、普通コンクリートの試験体と比較することで耐震性能を検討した。実験結果から、スラブのみに建設汚泥骨材コンクリートを用いた場合は、破壊性状、最大荷重、靱性能において、普通コンクリートの試験体とほぼ同等の性能を示した。また、打ち継ぎ部において明確な破壊は見られず、十分な性能であったことを確認した。

キーワード：建設汚泥, リサイクル, 軽量骨材, 打ち継ぎ, 靱性能

1. はじめに

建設汚泥の排出量は、建設廃棄物全体の排出量 7700 万トンの約 10%に過ぎないが、再資源率が 48%と極めて低い水準であるために、その最終処分量は建設廃棄物全体の最終処分量 600 万トンの約 32% (190 万トン) を占めている。他の建設廃棄物であるコンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊の再資源化率はほぼ 100%になっていることに比べ、建設汚泥のリサイクル率は向上していない状況にあり、産業廃棄物の最終処分場の残余年数を考慮すると建設汚泥を再生利用し最終処分量を削減することは重要な課題である¹⁾。

筆者らは、表-1 に示される建設汚泥の固化物をコンクリート用の粗骨材として再生利用した建設汚泥骨材コンクリートの開発を行ってきた。現状の再生利用先である工作物の埋戻しや裏込め等の土質材料および市販製品に対して、人工骨材としてコンクリート構造物に有効利用することで大量に処理でき、リサイクル率の飛躍的な拡大や砕石などの天然資源採取の低減につながり、資源循環型社会に貢献できると考えられる。これまでに、建設汚泥骨材コンクリートの材料特性²⁾³⁾、PVA 繊維補強した建設汚泥骨材コンクリート梁部材の構造性能⁴⁾を把握し、コンクリート製品や鉄筋コンクリート部材への適用および有効利用について検討してきた。

本研究では、建設汚泥骨材の特徴の一つである軽量という点に着目し、RC 造建物の地震時慣性重量 (設計用地震力) の低減に最も効果的である床スラブに建設汚泥骨材コンクリートを使用することを目的として、梁部分に普通コンクリートを用い、スラブに建設汚泥骨材コンクリートを用いた複合コンクリート T 型梁の構造実験を行い、普通コンクリートのみを用いた T 型梁と比較することにより耐震性能を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体概要を図-1 に、試験体一覧を表-2 に示す。試験体は 1/3 スケールモデルで、梁断面 200×300mm、スラブ厚 60mm、スラブ片側幅 300mm、内法スパン 1200mm、せん断スパン比 2.0 である。主筋に 4-D13、肋筋に 2-D6@110 ($p_w=0.29\%$)、スラブ筋に D6@120 を用い、配筋は全て共通とした。試験体数は計 3 体で、梁部分とスラブ部分に使用するコンクリート種類を実験因子とし、梁とスラブに普通コンクリートを使用した一体打ちの No.1 試験体、梁とスラブに建設汚泥骨材コンクリートを使用した一体打ちの No.2 試験体、梁に普通コンクリートを用い、スラブに建設汚泥骨材コンクリートを用いた打継ぎ部のある No.3 試験体である。2 種類のコンクリートを使用する複合コンクリート T 型梁である No.3 試験

表-1 建設汚泥骨材の構成材料と物性値

構成材料				物理的性質					
建設汚泥 (%)	石炭灰 (%)	セメント (%)	再生砕石 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)	破砕値*
51.7	31.1	15.6	1.6	2.08	1.82	14.4	1.15	62	23

* British Standard 812 に規定される 400kN 破砕値

*1 筑波大学大学院システム情報工学研究科 助教 博士 (工学) (正会員)

*2 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 大学院生 (正会員)

*3 (株) 熊野技建 研究開発部 (正会員)

*4 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 准教授 工博 (正会員)

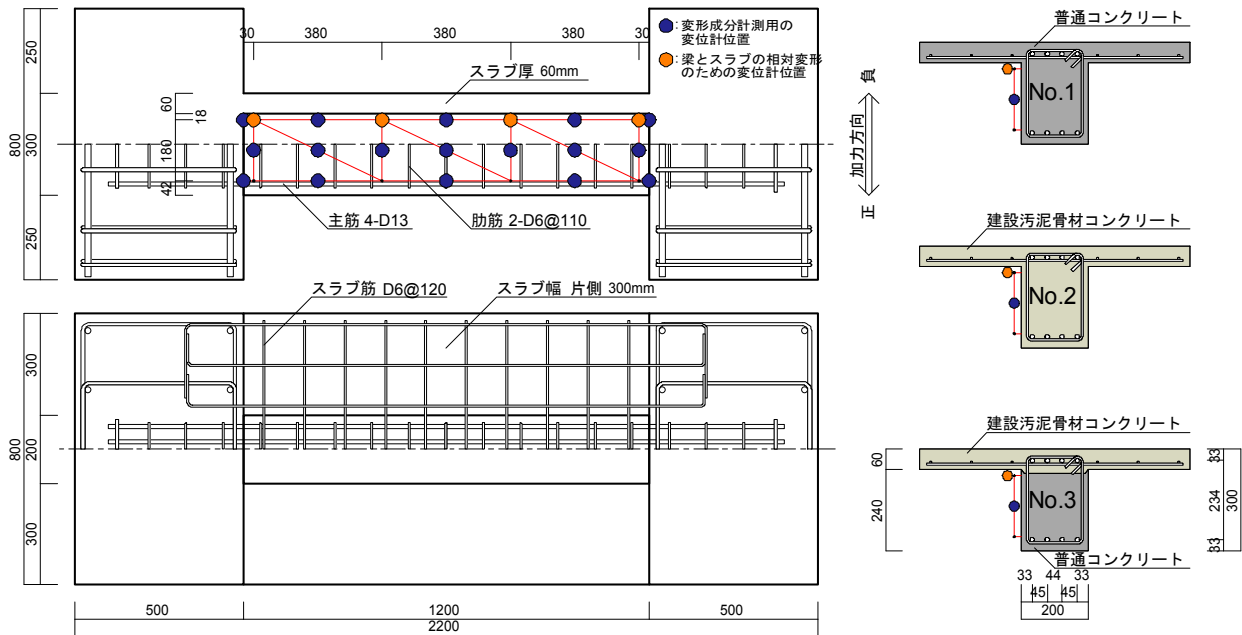


図-1 試験体概要

表-2 試験体一覧

試験体名	コンクリート種類		打継ぎの有無	梁断面 $b \times D$ (mm)	せん断 スパン比	主筋	せん断補強筋		スラブ筋
	梁	スラブ					配筋	p_w (%)	
No.1	普通	普通	無	200×300	2.0	4-D13 (SD345)	2-D6@110	0.29	D6@120
No.2	建設汚泥	建設汚泥							
No.3	普通	建設汚泥	有						

表-3 調合計画

コンクリート種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランブ (mm)	単位量 (kg/m ³)					
				セメント	水	細骨材	砕石	汚泥骨材	混和剤
普通	52	49	18.0	356	185	849	900	0	3.56
建設汚泥				356	185	849	0	900	3.56

部は、打継ぎ部の性能が重要であるため、スラブ下面から10mmほど下側において打継ぎ部を明確に設け、先打ちした梁部分の普通コンクリートの骨材が現れるように表面処理を行った後日に、スラブ部分の建設汚泥骨材コンクリートを打設した。

2.2 使用材料

使用したコンクリートの調合計画を表-3に、コンクリートの材料試験結果を表-4に、鉄筋の引張試験結果を表-5に示す。建設汚泥骨材コンクリートは、目標圧縮強度30N/mm²、スランブ18cmで設計した普通コンクリートの粗骨材を建設汚泥骨材で置換した調合計画である。建設汚泥骨材コンクリートの圧縮強度は普通コンクリートと同等で違いは見られないが、ヤング係数および割裂強度においては骨材の影響により若干小さくなっていることが確認できる。なお、材料試験結果は試験体加力時材齢で行った各々3体ずつの100φ×200mmシリンダーによる材料強度の平均値である。

2.3 加力・計測方法

加力は建研式の逆対称曲げモーメントによる正負交番繰返し载荷を行った。加力履歴は、部材角±1/400rad.

を1回、±1/200、±1/100、±1/66、±1/50、±1/33rad.を2回ずつ、±1/25、±1/20、±1/15rad.を1回の計14サイクルの加力を行った。計測項目は、せん断力、スタブ間相対変位、曲げ・せん断・拔出し変形成分、スラブと梁の相対変形、主筋、肋筋、スラブ筋の主な位置におけるひずみ値である。

表-4 コンクリートの材料試験結果

コンクリート	養生条件	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
普通	封緘	27.4	2.74	28.2
	気中	23.4	2.15	23.3
建設汚泥	封緘	27.1	2.12	22.3
	気中	25.1	2.09	18.3

表-5 鉄筋の引張試験結果

鉄筋種別	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
D13 (SD345)	383	190	534	23.7
D6 (SD295)	306*	180	491	20.6

* 0.2%オフセット耐力

3. 実験結果

3.1 破壊性状と荷重－変形関係

せん断力－部材角関係を図-2に、部材角 1/50rad の破壊状況および最終破壊状況を図-3に示す。各試験体とも部材角 1/400rad.までに梁部およびスラブ上面に曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れが発生し、1/200rad.の加力サイクルでせん断ひび割れが発生したが、曲げひび割れの進展に伴い主筋の降伏が確認された。No.1 試験体では 1/100rad.の 2 回目の加力サイクルで、No.2, No.3 試験体では、1/100rad.の 1 回目の加力サイクルでスラブ上面の主筋位置に部材軸方向ひび割れが発生した。また、No.2 試験体では 1/100rad.の加力サイクルでスラブと梁の境界面に沿ってひび割れが発生した。No.1 試験体は、1/66rad.の加力サイクルで主筋に沿った付着ひび割れが生じ始め、1/50rad.の加力サイクルで付着ひび割れが拡大し、最終的に下端主筋に沿った付着割裂破壊を起こして耐力低下し、最終破壊に至った。No.2 試験体は、1/66rad.の加力サイクルでスラブと梁の境界面に沿った付着ひび割れが拡大し、1/50rad.の加力サイクルで下端主筋に沿った付着ひび割れが生じ始め、最終的に上端および下端主筋に沿った付着割裂破壊を起こして耐力低下し、最終破壊に至った。No.3 試験体は、1/50rad.の加力サイクルで主筋に沿った付着ひび割れが生じ始め、1/33rad.の加力サイクルで付着ひび割れが拡大し、打継ぎ部のひび割れが若干見られたが、最終的に下端主筋に沿った付着割裂破壊を起こして耐力低下し、最終破壊に至った。

3.2 最大荷重および変形能

実験結果の一覧を表-6に示す。曲げ強度計算値はスラブ筋が全て有効であるとして HFW 指針式^{5),6)}から求め、せん断強度計算値は AIJ の終局強度型耐震設計指針式 A 法⁷⁾で求め、付着割裂強度は AIJ の靱性保証型耐震設計指針⁸⁾により算出した。なお、材料強度は鉄筋の引張試験結果およびコンクリートの現場封緘養生における材料試験結果を用いた。

No.1～No.3 のいずれの試験体とも曲げ降伏が先行しており、最大荷重実験値は曲げ強度計算値の 1.12 倍～1.17 倍である。普通コンクリートのみを使用した No.1 試験体の最大耐力と、スラブに建設汚泥骨材コンクリートを用い、梁に普通コンクリートを用いた No.3 試験体の最大耐力は同等であり、2 種類のコンクリートを使用し複合コンクリート T 型梁として打継ぎ部を設けた影響はほとんど見られない。一方、スラブと梁に建設汚泥骨材コンクリートを使用した No.2 試験体の最大耐力は、No.1 および No.3 試験体より若干小さくなっており、骨材強度に起因した割裂強度の低下が部材耐力に影響していると考えられる。限界変形および限界塑性率においても最大耐力と同様な傾向が見られ、建設汚泥骨材コンクリートのみを使用した No.2 試験体は普通コンクリートの No.1 試験体よりも若干劣る結果となっているが、スラブのみに建設汚泥骨材コンクリートを使用した No.3 試験体は普通コンクリートの試験体と比較しても遜色ない結果となっている。

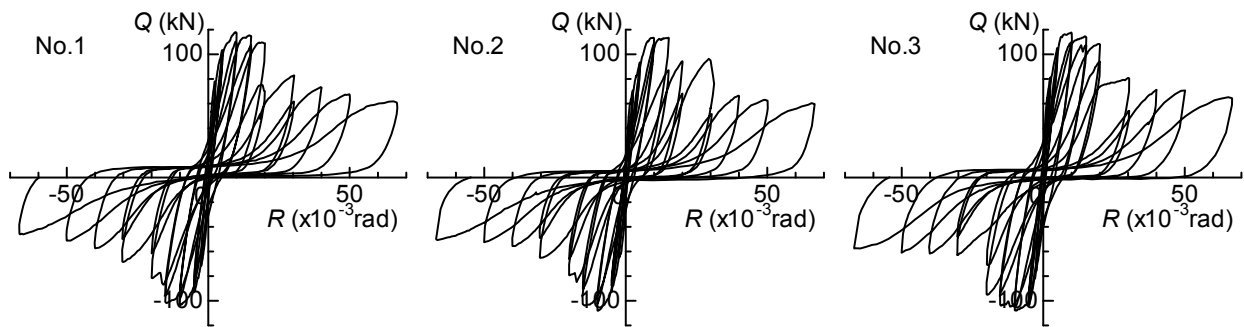


図-2 せん断力－部材角関係

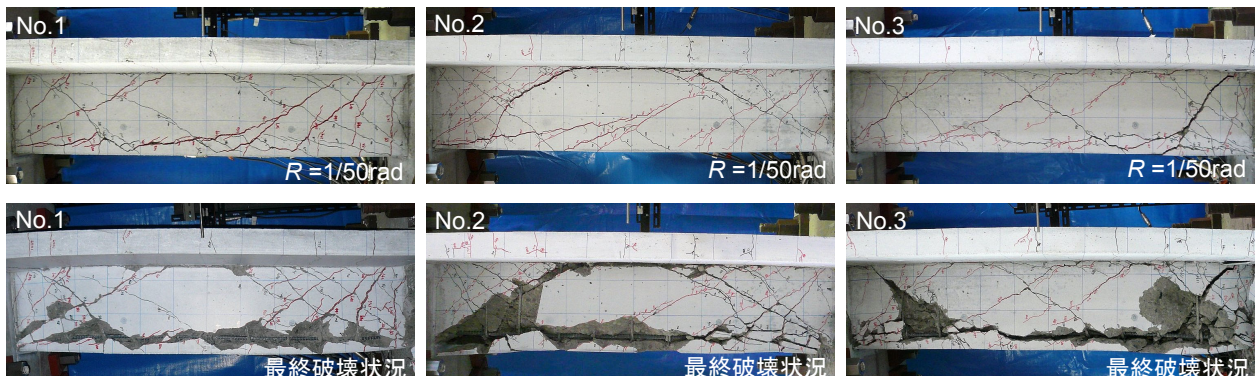


図-3 破壊状況

表-6 実験結果一覧

試験体名	計算値			実験値					
	曲げ強度*1 cQ_{mu} (kN)	せん断強度*2 cQ_{su} (kN)	付着強度*3 cQ_{bu} (kN)	最大荷重 eQ_{max} (kN)	eQ_{max} / cQ_{mu}	降伏変形角 R_y ($10^{-3}rad.$)	限界変形角*4 R_u ($10^{-3}rad.$)	限界塑性率 $\mu = R_u/R_y$	破壊形式*5
No.1	101	123	120	118	1.17	5.0	25.8	5.2	FB
No.2	101	123	120	114	1.12	6.7	22.3	3.3	FB
No.3	101	123	120	118	1.16	4.8	25.2	5.2	FB

*1: HFW 指針式 (スラブ筋全本有効)⁵⁾, *2: AIJ 終局強度型指針式 A 法⁶⁾, *3: AIJ 靱性保証型指針式 (下端筋に対する強度)⁷⁾

*4: 包絡線上で最大荷重の80%になったときの変形角, *5: FB: 曲げ降伏後の付着割裂破壊

4. 実験結果の検討

4.1 包絡線の比較

各試験体のせん断力-部材角関係の包絡線の比較を図-4に示す。主筋が曲げ降伏した部材角 1/200rad.付近までの正側の剛性は、普通コンクリートのみを使用した No.1 と、普通コンクリートと建設汚泥骨材コンクリートを用いた No.3 試験体では大きな差は見られない。建設汚泥骨材コンクリートのみを使用した No.2 試験体においては、骨材の影響によりコンクリートのヤング係数が低下したため、No.1 および No.3 試験体よりも正側の剛性が低下していることが確認できる。No.1 試験体と No.3 試験体の荷重-変形関係は、正側の初期剛性、最大荷重、ポストピークにおいてほぼ同一の形状を示しており、建設汚泥骨材コンクリートを用いたスラブおよび打継ぎ部の影響はないことが確認できる。また、No.3 試験体は部材角-1/50rad.においても耐力を維持しており、普通コンクリートのみを使用した No.1 試験体よりも良好な性能を示している。No.2 試験体は部材角 1/50rad.において、スラブと梁の境界面に沿った付着ひび割れの影響により顕著に耐力低下しているが、部材角 1/33rad.においてはアーチ機構が卓越したために部材角 1/50rad.と同程度のせん断力になったと考えられる。なお、部材角 1/25rad.以降においては、No.1~No.3 のいずれの試験体とも同様な包絡線の傾向を示しており、大きな差は見られない。

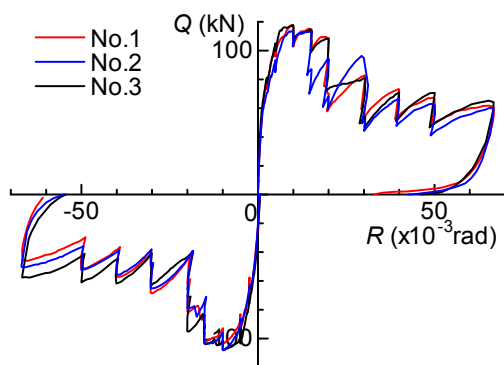


図-4 せん断力-部材角関係の包絡線

4.2 等価粘性減衰定数

各試験体における部材角 1/200~1/15rad.の1回目加力サイクルおよび部材角 1/200~1/33rad.の2回目加力サイ

クルの等価粘性減衰定数を図-5に示す。いずれの試験体とも部材角 1/66rad.までは増加傾向を示しており、等価粘性減衰定数の最大値は No.1 試験体が 16.3%, No.2 試験体が 15.5%, No.3 試験体が 19.1%で、梁に普通コンクリートを用いてスラブに建設汚泥骨材コンクリートを使用した No.3 試験体が最も大きくなっている。No.3 試験体は、普通コンクリートのみを使用した No.1 試験体とほぼ同等の靱性能を示し、スラブと梁の打継ぎ部の影響はほとんどないことが確認できる。しかし、部材角 1/66rad.以降の1回目および2回目サイクルにおいて、No.2 と No.3 試験体は No.1 よりも減少割合が若干大きく、同じような増減傾向を示していることから、建設汚泥骨材コンクリートのスラブが大変形時の等価粘性減衰定数に影響を及ぼしていると考えられる。

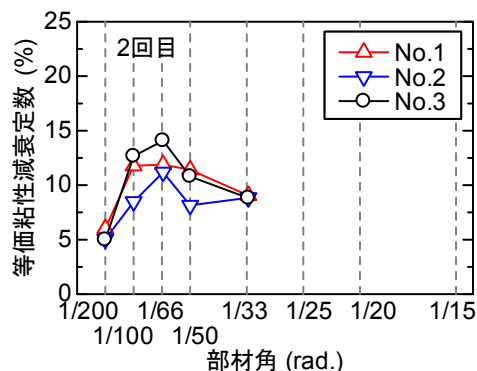
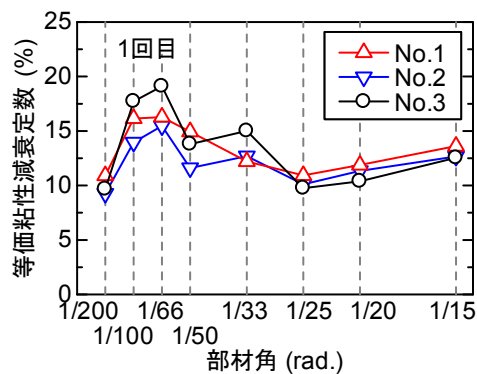


図-5 等価粘性減衰定数の比較

4.3 変形成分の割合

図-1に示される変位計位置で計測した、部材角 +1/400~+1/20rad.の1回目サイクルの全体変形に対する

曲げ変形の割合を図-6 に示す。なお、主筋の拔出しによる回転変形は曲げ変形として算出した。いずれの試験体においても、部材角 1/100rad.までは曲げ変形の割合が70%以上となっており、曲げ降伏が先行していることが確認できる。スラブに建設汚泥骨材コンクリートを使用した No.3 試験体は、No.1 試験体よりも曲げ変形の割合が若干大きく、変形割合の進展が同じ傾向であることから、スラブと梁の打ち継ぎ部および建設汚泥骨材コンクリートの使用による影響はほとんどないことが確認できる。建設汚泥骨材コンクリートのみを使用した No.2 試験体は、部材角 1/66rad.から曲げ変形の割合が急増しているが、スラブと梁の境界面に沿った付着ひび割れの進展に伴う回転変形の割合が増加して支配的になったためと考えられる。

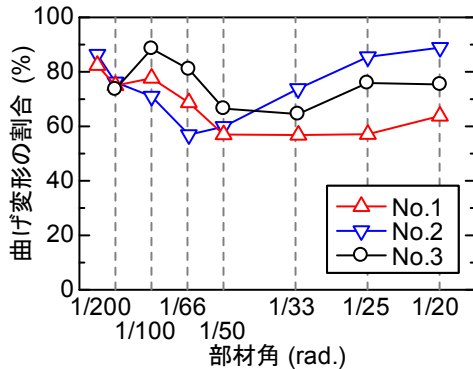


図-6 全体変形に対する曲げ変形の割合

4.4 最大付着応力度

上端主筋および下端主筋の端部 150mm 区間を除いた各ひずみ計測区間の最大付着応力度を図-7 に示す。図中には最大値に達した時の部材角による付着割裂強度の計算値⁹⁾も示している。付着応力度は、鉄筋の除荷・再載荷曲線に修正 Menegotto-Pinto モデル¹⁰⁾を用いて主筋のひずみを応力に変換し、隣接する2つのひずみ値から算出した主筋引張力の差を、その測定区間の付着表面積で除した平均付着応力度として式(1)により求めた。また、式(2)～式(9)による付着割裂強度の計算値に

おいて、上端主筋の割裂線長さ比は式(10)を用い、上端筋に対する付着割裂強度低減係数は式(11)を用いて横補強筋が直接掛かっている隅筋として計算した。なお、材料強度は梁およびスラブに使用したコンクリート種類の現場封緘養生における材料試験結果を用いた。

$$\tau_b = \Delta\sigma \cdot a_t / (\phi \cdot l_b) \quad (1)$$

$$\tau_{bu,sc} = \left[\frac{1 - k_{esc}}{2} \cdot \cos\left(\frac{l_b}{l_{esc}}\right)^2 \pi \right] + \frac{1 + k_{esc}}{2} \cdot \alpha_t \cdot \tau_{bc,max} + (s_c/s_{max}) \cdot (2 - s_c/s_{max}) \cdot \alpha_t \cdot \tau_{bs,max} \quad (2)$$

$$\tau_{bc,max} = 0.301 \cdot \sigma_t \cdot (b_{si} + 1) \cdot \cot 34^\circ \quad (3)$$

$$\tau_{bs,max} = \sigma_l \cdot \cot 56^\circ \quad (4)$$

$$\sigma_l = \sqrt{0.018 \cdot \frac{b \cdot p_w}{N \cdot d_b} \cdot \frac{h}{l_{we}} \cdot E_{st} \cdot \sigma_B} \quad (5)$$

$$s_{max} = 0.008 \cdot l_n \cdot \sigma_B / \sigma_l \quad (6)$$

$$s_c = 0.0238 \cdot (b_{si} + 1) \quad (7)$$

$$l_{esc} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_b \cdot a_b \cdot s_e}{\phi_b \cdot (0.643 \cdot \tau_{bc,max} + (s_c/s_{max}) \cdot (2 - s_c/s_{max}) \cdot \tau_{bs,max})}} \quad (8)$$

$$k_{esc} = \frac{0.643 \cdot \tau_{bc,max} + (s_c/s_{max}) \cdot (2 - s_c/s_{max}) \cdot \tau_{bs,max}}{\tau_{bc,max} + (s_c/s_{max}) \cdot (2 - s_c/s_{max}) \cdot \tau_{bs,max}} \quad (9)$$

$$b_{ii} = (b - 2C_s - N \cdot d_b + 2C) / (N \cdot d_b) \quad (10)$$

$$\alpha_t = 0.75 + \sigma_B / 400 \quad (\text{下端筋の場合は } 1) \quad (11)$$

ここで、 τ_b ：隣接するひずみゲージ間の付着応力度、 $\Delta\sigma$ ：主筋応力の差、 a_t ：主筋1本の断面積、 ϕ ：主筋の周長、 l_b ：隣接するひずみゲージ間の距離(150mm)、 b ：梁幅、 N ：主筋本数、 d_b ：主筋径、 C_s ：側面かぶり厚さ、 C_b ：底面かぶり厚さ、 C ：主筋と梁スラブの境界を結ぶ最短かぶり厚さ $C = \sqrt{C_s^2 + C_b^2}$

No.1～No.3 のいずれの試験体とも曲げ降伏後の付着割裂破壊に至っており、上端および下端筋の最大付着応力度の実験値はばらつきがあるものの計算値と概ね対応している。また、スラブに建設汚泥骨材コンクリートを使用し、梁に普通コンクリートを使用した打ち継ぎ部のある No.3 試験体の最大付着応力度は、普通コンクリートのみを用いて一体打ちとした No.1 試験体と同程度の付着応力度を発揮していることから、打ち継ぎ部の影響はほとんどないと考えられる。

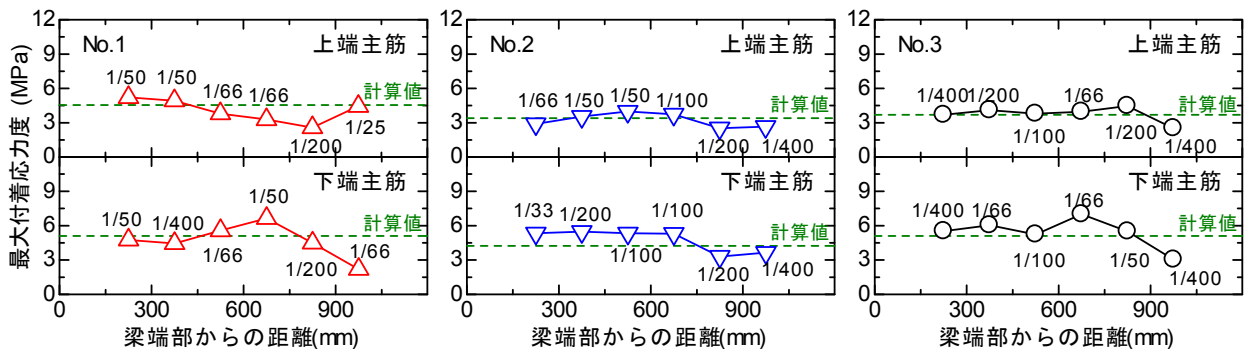


図-7 最大付着応力度

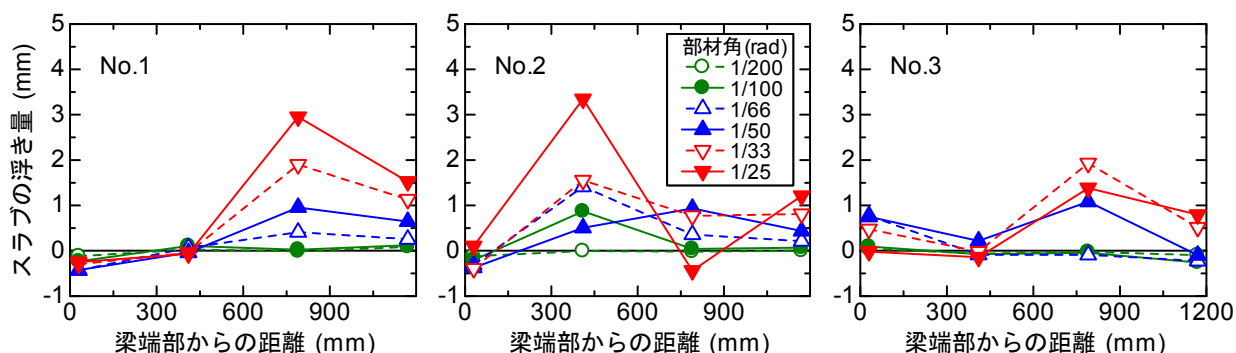


図-8 梁とスラブの相対変位

4.5 梁とスラブの相対変位

2種類のコンクリートをスラブと梁に別々に使用するT型梁において、打継ぎ部の一体性が重要であるため、図-1に示される変位計位置で梁とスラブの相対変位(スラブの浮き量)を計測し、一体打ちの試験体と比較検討した。図-8に部材角 $1/200\sim 1/25\text{rad}$ の1回目加力サイクルにおけるスラブの浮き量を示す。主筋の曲げ降伏が先行した部材角 $1/200\text{rad}$ では、いずれの試験体ともスラブの浮き量は現れていないが、最大荷重近傍の部材角 $1/100\text{rad}$ では、建設汚泥骨材コンクリートのみを使用し一体打ちしたNo.2試験体において、上端主筋の付着ひび割れの影響により部分的に 1mm 程度の浮きを確認できる。また、付着ひび割れの進展した部材角 $1/50\text{rad}$ では全ての試験体においてスラブが浮き始め、No.1およびNo.2試験体は部材角 $1/25\text{rad}$ で 3mm 程度の浮き量に達している。一方、打継ぎ部のあるNo.3試験体はスラブの最大浮き量が 2mm 程度に抑えられており、普通コンクリートの一体打ちしたNo.1試験体と概ね同じ傾向を示していることから打継ぎ部の性能は一体打ちと同等であったと考えられる。

5. まとめ

建設汚泥骨材コンクリートを用いたT型梁の曲げせん断実験を行い、曲げ降伏後に付着割裂破壊した試験体の構造性能について検討した。本実験研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 梁に普通コンクリートを用い、スラブに建設汚泥骨材コンクリートを用いたT型梁の構造性能は、剛性、最大荷重、変形能、等価粘性減衰定数において普通コンクリートのみを用いたT型梁と同等の性能を有していることが確認できた。
- (2) 建設汚泥骨材コンクリートのスラブと普通コンクリートの梁による打継ぎ部は、最大荷重時およびポストピークにおいても一体性が保持され、普通コンクリートのみで一体打ちした場合と遜色ない性能であった。
- (3) 建設汚泥骨材コンクリートのみを用いたT型梁は、

普通コンクリートのみの場合と比較して、骨材強度に起因した割裂強度低下の影響により靱性能が若干劣る結果となった。

- (4) 普通コンクリートおよび建設汚泥骨材コンクリートを用いたT型梁の上端および下端主筋の最大付着応力度は、既往の評価式による計算値と概ね良い対応を示した。

参考文献

- 1) 建設汚泥再生利用指針検討委員会：建設汚泥再生利用指針検討委員会報告書，pp.1～6，2006.3
- 2) 横田尚也ほか：建設汚泥再生骨材を用いたコンクリートの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1451～1456，2006.7
- 3) 中津紀幸，八十島章，木山邦宏，荒木秀夫：建設汚泥骨材のコンクリートへの有効利用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1735～1740，2007.7
- 4) 加藤隆史，八十島章，木山邦宏，荒木秀夫：PVA繊維補強した建設汚泥骨材コンクリート梁部材の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1423～1428，2008.7
- 5) 日本建築センター：中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説，1987.10
- 6) 日本建築学会：「高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工」，1992.12
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990.11
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1997.7
- 9) 八十島章，金久保利之：補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究(その5：横補強のある場合の付着割裂強度算定式)，日本建築学会構造系論文集，第614号，pp.91～98，2007.4
- 10) 堺淳一，川島一彦：部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正Menegotto-Pintoモデルの提案，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.159～169，2003.7