

論文 ビニロン繊維が添加された低品質再生骨材コンクリートを用いた場所打ちコンクリート杭の耐荷力

師橋 憲貴*1・小川 敦久*2

要旨: 本論文は、ビニロン繊維が添加された低品質再生骨材コンクリートを用いた場所打ちコンクリート杭の耐荷力について検討を行ったものである。実験結果として、低品質再生骨材コンクリートを用いた場所打ちコンクリート杭の軸力方向の載荷試験下の耐荷力は、ビニロン繊維を添加した場合は添加していない場合と比較し若干上昇する傾向が認められた。荷重-軸方向変位関係における剛性は低品質再生骨材コンクリートは普通コンクリートと比較し低くなる傾向が認められた。また、最終破壊形状はコンクリートの種類によらず同様となったが、ビニロン繊維が添加された場合はひび割れの発生が分散する傾向が認められた。

キーワード: 低品質再生骨材コンクリート, ビニロン繊維, 場所打ちコンクリート杭, 耐荷力, ひずみ分布

1. はじめに

日本建築学会から平成 26 年に「再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)」¹⁾(以下、指針(案)という)が発行されている。この指針(案)の第 11 章には鉄筋コンクリート部材に用いる再生骨材コンクリート L という章が設けられており、資源循環型社会の推進の観点から低品質の再生骨材 L を普通骨材と混合使用し調合に工夫を加えて鉄筋コンクリート部材に適用する方法が示されている。一方、中品質の再生骨材を対象とした再生骨材コンクリート M は、再生骨材の吸水率が高い性質を考慮して乾燥収縮を受けにくい地下構造部材などに用途が制限されているが、平成 30 年の JIS 改正では再生骨材コンクリート M²⁾の中に低品質の再生骨材 L と普通骨材とを混合したものも認められるようになっている。この改正についても低品質の再生骨材 L の利用拡大に向けての検討成果の表れと考える。しかし、経済産業省製造産業局素材産業課の砕石等統計四半期報³⁾により骨材の出荷の実態をみると、令和元年 7 月から 9 月の砕石の出荷量は 39,843 千トンに対し、再生骨材の出荷量は 4,059 千トンとなっており再生骨材の出荷量は砕石の 1 割程度で大変少ない。また再生骨材の出荷量のうち道路用は 4,036 千トンに対し、コンクリート用は 22 千トンとなっておりコンクリート用の出荷量は道路用の 0.55%で出荷量としては非常に少ない。砕石は天然資源である岩石を砕いて製造されるが、天然資源の枯渇の観点から低い品質の再生骨材であっても普通骨材と混合利用することで構造用部材に用いるコンクリート用としての適用が可能となれば、再生骨材の普及につながり天然資源の維持に貢献できるものとする。その際、構造学的な観点から実験を行うことで構造設計に再生骨材 L を用いたコンクリート(以下、低品質再生骨材コンクリート

という)を適用する際の安全性が示されれば併せて再生骨材の積極的な利用が可能となり需要拡大につながるものとする。そこで本論文では、地下構造部材となる場所打ちコンクリート杭に低品質再生骨材コンクリートを使用し、さらに構造耐力上の補強効果を期待してビニロン繊維を添加した円柱試験体(以下、試験体という)の軸力方向の載荷試験を行い、耐荷力について検討を行ったものである。本論文では場所打ちコンクリート杭の基礎的研究としてコンクリートの種類が異なる場合の軸力方向の載荷試験における耐荷力についてコンクリートの種類による差異が生じるかを検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体計画および形状

表-1 に試験体に使用したコンクリートの種類を示す。本実験は、1. はじめに で述べた平成 30 年の JIS 改正よりも前に計画を行っていたことから、指針(案)に示され

表-1 コンクリートの種類

試験体名	シリーズ 混合割合	ビニロン 繊維混入率 (vol.%)
1) CN	CN, CNV シリーズ: 普通粗骨材100%・ 再生粗骨材0%	0.0
2) CNV	普通細骨材100%・ 再生細骨材0%	1.0
3) CL	CL, CLV シリーズ: 普通粗骨材70%・ 再生粗骨材30%	0.0
4) CLV	普通細骨材85%・ 再生細骨材15%	1.0

混合割合: 普通骨材を再生骨材
で置換する容積の割合

*1 日本大学生産工学部建築工学科 教授 博士(工学)(正会員)

*2 株式会社クラレ 繊維資材事業部 博士(工学)(正会員)

る特殊配慮品と定義される低品質再生骨材コンクリートを用いた。指針（案）において低品質再生粗骨材と低品質再生細骨材を併用する場合の混合割合の上限値は品質低下の度合を制御するため、低品質再生粗骨材は 30%、低品質再生細骨材は 15%の混合割合としている。実験に使用した低品質再生骨材コンクリートはこの混合割合の上限値を適用した CL, CLV シリーズと称する低品質再生骨材コンクリートを使用した。CL, CLV シリーズと比較するため、普通骨材を用いたコンクリート（以下、普通コンクリートという）の CN, CNV シリーズを計画した。それぞれのシリーズにはビニロン繊維 1.0vol.%を添加した試験体と添加していない試験体を計画し、ビニロン繊維の添加の有無の影響について検討を行った。

図-1 に試験体形状を示す。試験体の寸法は高さ 900mm、断面の直径 300mm、かぶりコンクリートの厚さ 25mm である。せん断補強筋（以下、フープという）はフラッシュバット溶接を用いた閉鎖型で最外径（直径）は 250mm である。主筋は D13 を 9 本配筋し、フープは D10 を使用した。フラッシュバット溶接の位置は主筋と主筋の間に配置した。測定区間のフープ間隔は 100mm とした。これらの鉄筋の配筋により、コンクリート全断面積に対する主筋全断面積の割合は 1.62%、せん断補強筋比は 0.48%となっている。

2.2 コンクリートの使用材料および調査

表-2 にコンクリートの調合を、表-3 に使用した骨材の特性を示す。指針（案）に示される低品質再生骨材コンクリートの設計基準強度は 18N/mm^2 を標準としていることから、実験時のコンクリート強度はあまり高くないようコンクリートの圧縮強度 σ_B が 21N/mm^2 程度となるような水セメント比（W/C）を再生骨材コンクリート工場の出荷実績により決定し、CL, CLV シリーズは $W/C=65.0\%$ とした。コンクリートは、試験体上部から打設し、また、コンクリートが鉄筋の周囲や型枠の隅まで充填されるようバイブレーターを用いて締固めを行った。型枠には紙管（ボイド）を用いた。

再生骨材は、コンクリート塊をジョークラッシャーで一次破碎し分級して、コンペラプレーカーで二次破碎して製造されたものを用いた。再生骨材の品質は、骨材試験成績表による吸水率 5.06%の再生粗骨材 L および吸水率 11.22%の再生細骨材 L である。

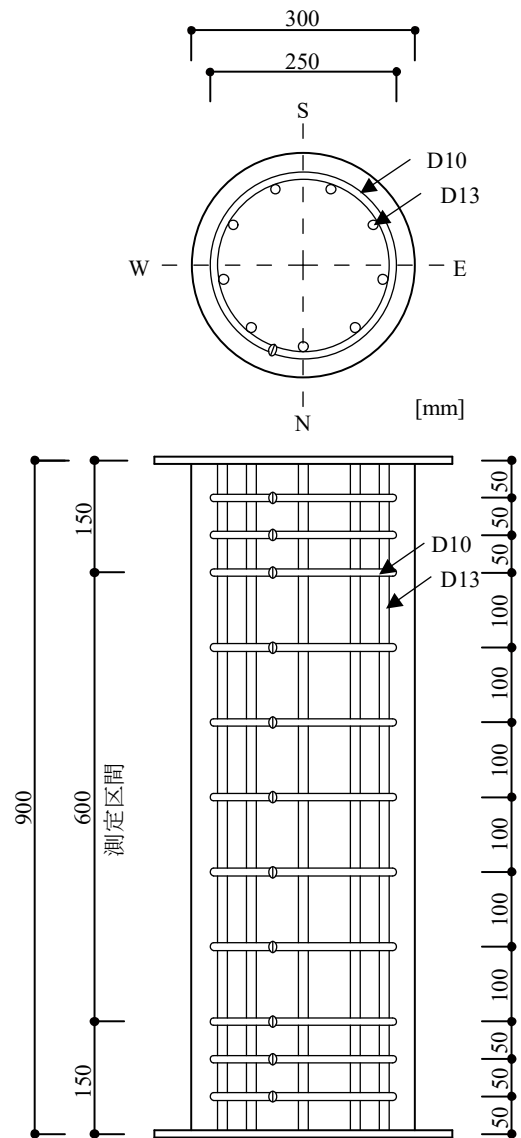


図-1 試験体形状

表-2 コンクリートの調合

シリーズ	指定スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位質量 (kg/m^3)								
				水	セメント	粗骨材		細骨材		混和剤		
						普通粗骨材	再生粗骨材	普通細骨材		再生細骨材	AE 減水剤	AE 剤
								天然砂	砕砂			
CN	18.0	4.5	67.0	184	275	932	-	612	264	-	2.75	-
CNV												
CL	21.0	4.5	65.0	180	277	642	253	764	-	116	-	2.40
CLV												

各シリーズとも 呼び強度： 18N/mm^2 、粗骨材の最大寸法：20mm

打設時のスランブ CNシリーズ：18.0cm、CNVシリーズ：9.0cm、CLシリーズ：21.5cm、CLVシリーズ：13.5cm

打設時の空気量 CNシリーズ：4.7%、CNVシリーズ：4.5%、CLシリーズ：4.7%、CLVシリーズ：4.6%

本実験で使用したビニロン繊維は、ポリビニルアルコールを原料として得られた合成繊維である。ビニロン繊維の形状および標準物性は、採用したメーカーのコンクリート用製品としてのサイズが最大である直径 $660\mu\text{m}$ 、標準長 30mm 、引張強度 $900\text{N}/\text{mm}^2$ 、引張ヤング係数 $2.30 \times 10^4\text{N}/\text{mm}^2$ で、コンクリートの全体積に対して $1.0\text{vol.}\%$ 添加した。添加量はトラックアジテータのコンクリート投入口（ホッパ）から後添加した際にビニロン繊維の均一な分散が可能となる量に設定した。

図-2 にコンクリートの圧縮強度の推移を示す。圧縮強度を測定したテストピース（直径 100mm 、高さ 200mm ）は現場封かん養生とした。普通コンクリートの工場出荷実績で決定した水セメント比（W/C）は低品質再生骨材コンクリートの W/C より高く設定したが、普通コンクリートの CN、CNV シリーズは低品質再生骨材コンクリートの CL、CLV シリーズと比較して圧縮強度が増加した。普通コンクリートおよび低品質再生骨材コンクリートともに、ビニロン繊維を添加した CNV、CLV はビニロン繊維を添加していない CN、CL と比較して圧縮強度の差異は、さほど認められなかった。なお、実験時の圧縮強度は材齢 5 週時と材齢 7 週時の圧縮強度を基に補完して求めた。

表-4 に鉄筋の材料特性を示す。フープは鉄筋コンクリート用棒鋼 D10（SD295A）を加工工場において円形に曲げ加工したものを使用した。

2.3 加力および測定方法

図-3 に加力方法および測定方法を示す。加力は 1 軸圧縮単調載荷で日本大学生産工学研究所管構造物試験機自動計測制御システムを用いた。試験体は下部を固定、上部を球座を介して試験機にセットした。変位は試験体中央部（検長 600mm ）における軸方向変位を試験体に埋め込んだボルトに 2 本ずつ東西に変位計を取り付け、その平均値を軸方向変位とした。加力は 500kN を 1 サイクルとする 1 方向の繰り返し載荷とした。

3. 実験結果

表-5 に実験結果一覧を示す。表中の σ_B は図-2 に示したテストピースのコンクリートの圧縮強度の推移から求めた実験時のコンクリートの圧縮強度である。 $P_{cal.}$ は国土交通省国土技術政策総合研究所および国立研究開発法人建築研究所監修の建築物の構造関係技術基準解説書⁴⁾ に示される軸方向の圧縮終局強度の算定式により求めた。 $P_{cal.}$ はコンクリート全断面と全主筋断面の断面積を考慮して、式 (1) により導出した。また、 P_{max} は試験体の最大荷重である。以降ではこの最大荷重を試験体の耐力として評価を行う。

表-3 骨材の品質

シリーズ		絶乾密度 (g/cm^3)	実積率(%) 又は 粗粒率	吸水率 (%)
CN CNV	普通粗骨材	砕石	2.70	61.0%
	普通細骨材	天然砂	2.56	2.10
		砕砂	2.64	3.70
CL CLV	普通粗骨材	砕石	-	1.89
	再生粗骨材		2.37	59.5%
	普通細骨材	天然砂	2.53	-
再生細骨材			2.02	-

微粒分量：再生粗骨材 0.4%、再生細骨材 5.3%
不純物量：再生粗骨材、再生細骨材とも 0.0%

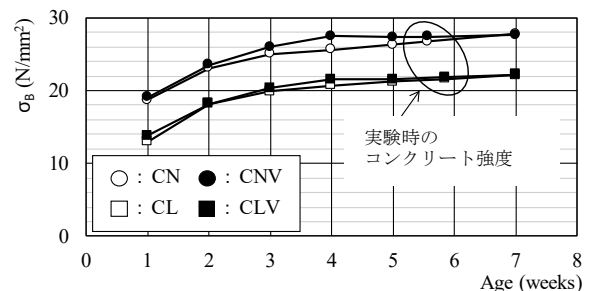


図-2 コンクリートの圧縮強度の推移

表-4 鉄筋の材料特性

使用箇所	使用鉄筋	σ_y (N/mm^2)	ϵ_y (%)	σ_{max} (N/mm^2)	E (N/mm^2)
主筋	D13 (SD345)	377	0.20	551	1.84×10^5
横補強筋	D10 (SD295A)	356	0.19	509	1.88×10^5

σ_y : 降伏応力度 σ_{max} : 引張強度
 ϵ_y : 降伏ひずみ E : ヤング係数

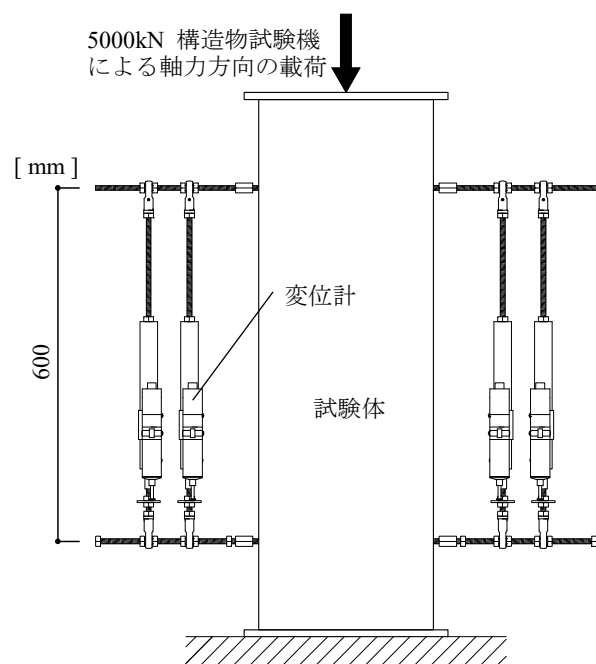


図-3 加力および軸方向変位測定方法

$$P_{cal.} = a_c \sigma_B + a_g \sigma_y \quad (1)$$

ここで

a_c : コンクリート全断面積 (mm²)

$$a_c = 150\text{mm} \times 150\text{mm} \times \pi = 70650\text{mm}^2$$

σ_B : 実験時のコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

a_g : 主筋全断面積 (mm²), 9-D13 (1143mm²)

σ_y : 主筋の降伏応力度 (N/mm²), 表-4 参照

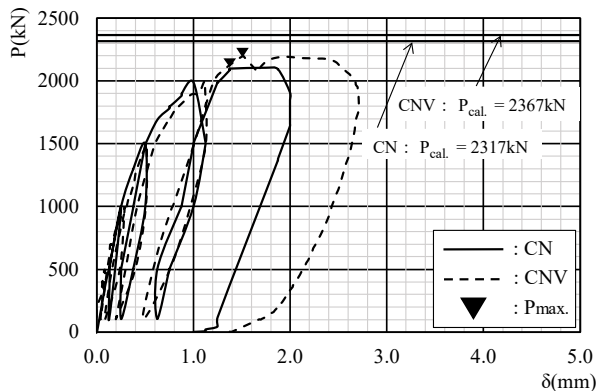
図-4 に荷重-軸方向変位関係をシリーズごと、あるいはコンクリートの種類により比較が行えるよう試験体を組み合わせて示した。同一のシリーズで比較すると、a) 図の普通コンクリートの CN, CNV シリーズでは 1500kN, b) 図の低品質再生骨材コンクリートの CL, CLV シリーズでは 1000kN までの剛性にビニロン繊維の添加の有無による差異は認められないが、ビニロン繊維を添加した試験体は耐荷力が若干上昇する傾向が認められた。ビニロン繊維を添加した試験体は最大荷重時の変位が大きく、さらに最大荷重時以降も荷重を維持して変位が増大した後に荷重が低下する靱性のある履歴を示した。c) 図および d) 図のコンクリートの種類の違いで比較すると、低品質再生骨材コンクリートの CL, CLV は、普通コンクリートの CN, CNV と比較し、剛性が低く耐荷力も低下する傾向が認められた。一方で、低品質再生骨材

表-5 実験結果

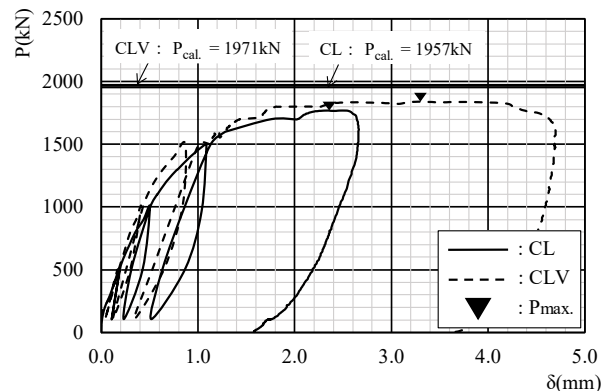
試験体名	コンクリート 圧縮強度	コンクリート ヤング係数	計算値 P _{cal.} (kN)	最大荷重 P _{max.} (kN)
	σ_B (N/mm ²)	$E\sigma_B \times 10^4$ (N/mm ²)		
1) CN	26.7	2.28	2317	2115
2) CNV	27.4	2.36	2367	2200
3) CL	21.6	1.99	1957	1768
4) CLV	21.8	2.05	1971	1838

コンクリートの CL, CLV は、普通コンクリートの CN, CNV と比較し、変位が大きい値となつてから最大荷重に至っていることから靱性のある履歴が認められた。また、表-5 の P_{cal.} と P_{max.} を比較すると最大荷重 P_{max.} は計算値 P_{cal.} に対して 1 割程度低い値となつた。このことは試験体の実験時のコンクリートの圧縮強度が、現場封かん養生としたテストピースの圧縮強度ほど強度発現していないものと推察される。

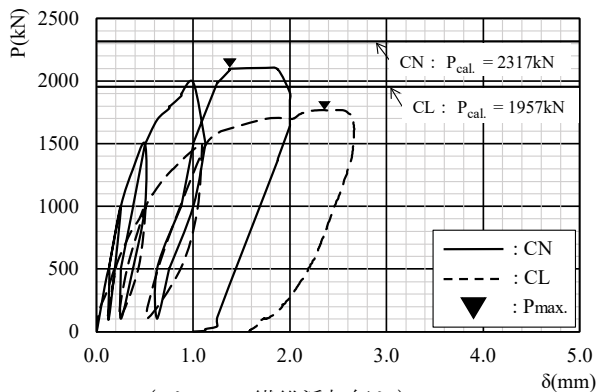
以上のことから低品質再生骨材コンクリートの CL, CLV シリーズは普通コンクリートの CN, CNV シリーズと比較し剛性は低くなるが、テストピースの圧縮強度が普通コンクリートと同等の強度となれば試験体の耐荷力の増加が見込めるものと考えられる。また、剛性が低くなつ



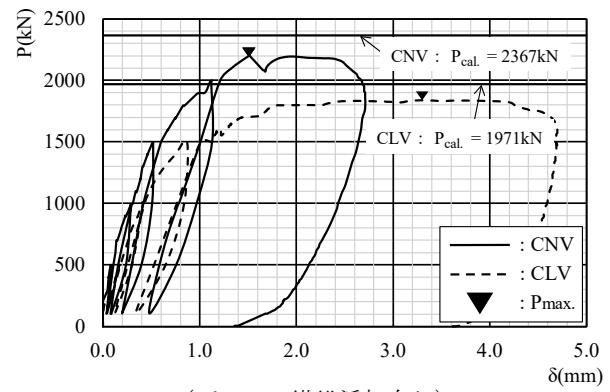
a) 普通コンクリート CN, CNV シリーズ



b) 低品質再生骨材コンクリート CL, CLV シリーズ



c) CN, CL (ビニロン繊維添加無し)



d) CNV, CLV (ビニロン繊維添加有り)

図-4 荷重-軸方向変位関係

た理由は低品質再生骨材コンクリートは単位容積質量が普通コンクリートと比較小さいためヤング係数が小さい値となっているからと考える。

次に主筋に貼り付けたひずみゲージにより主筋が負担する応力状態の基となる主筋のひずみについて検討を行う。図-5に主筋のひずみゲージの貼り付け位置を示す。図-6に試験体の測定区間中央の高さに貼り付けたひずみゲージによる荷重-主筋のひずみ関係を示す。主筋のひずみは表-4に示したように $2,000 \times 10^{-6}$ (0.20%) に達すると降伏ひずみとなるが、各試験体とも $1,900 \times 10^{-6}$ を超えるとひずみが増大して $5,000 \times 10^{-6}$ 方向に流れ始めるか、あるいは試験体が最大荷重を迎えることにもない計測不能となった。c) 図および d) 図のコンクリートの種類の違いで比較すると、低品質再生骨材コンクリートの CL, CLV は、普通コンクリートの CN, CNV と比較して低い荷重で降伏ひずみに達しており、荷重の負担がコンクリートから主筋に移行していることが推察される。

図-7に試験体の最終破壊形状を示す。最終破壊形状は1試験体につき、北(N)、東(E)、南(S)、西(W)の4方向から観察したひび割れを書き写して示した。ひび割れは実験中の観察により普通コンクリートの CN, CNV シリーズでは 1500kN、低品質再生骨材コンクリートの CL, CLV シリーズでは 1000kN までは発生しなかつ

た。この荷重以降、ひび割れは測定区間に不規則に発生した。最終的には図中に黒く塗りつぶしたかぶりコンクリートの剥落により最大荷重に至った。最終破壊形状にコンクリートの種類の違いは認められなかった。一方、ビ

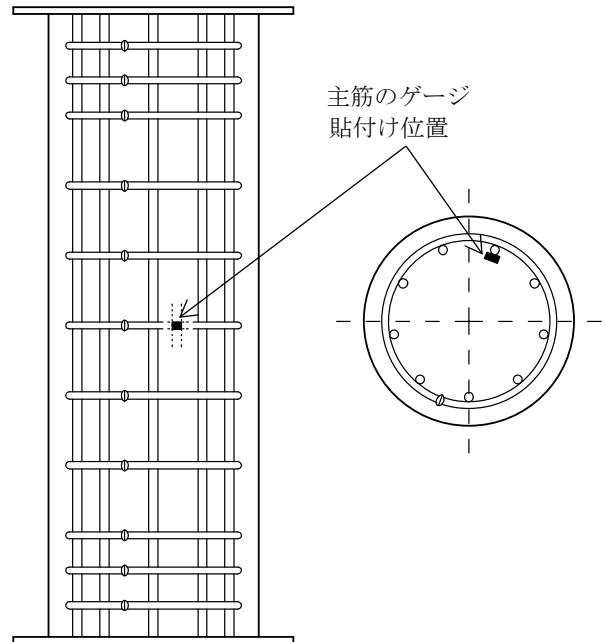
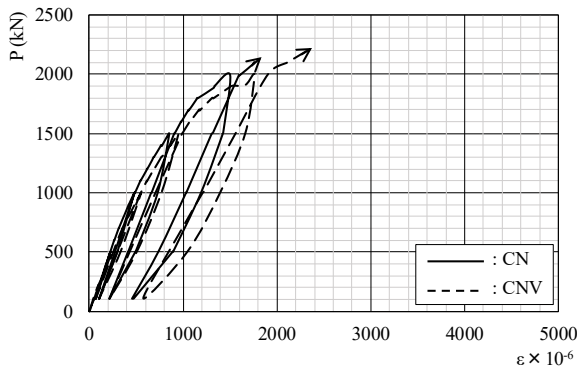
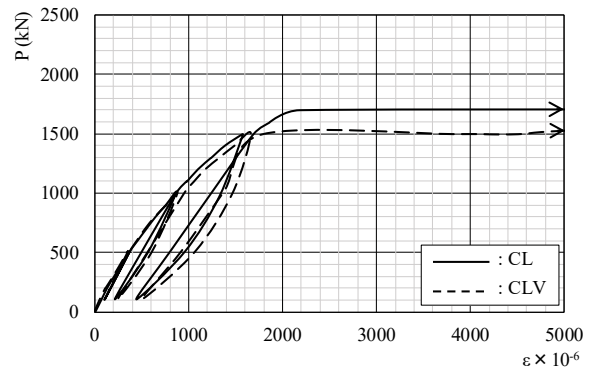


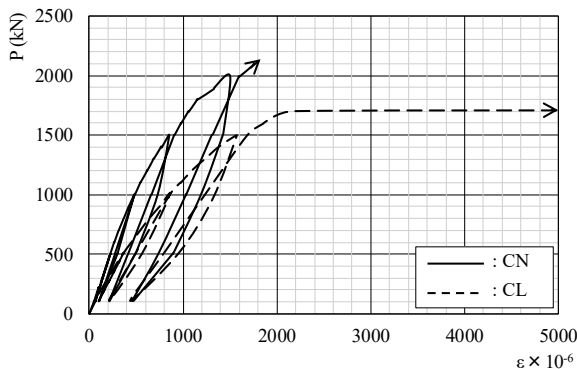
図-5 主筋のひずみゲージ貼り付け位置



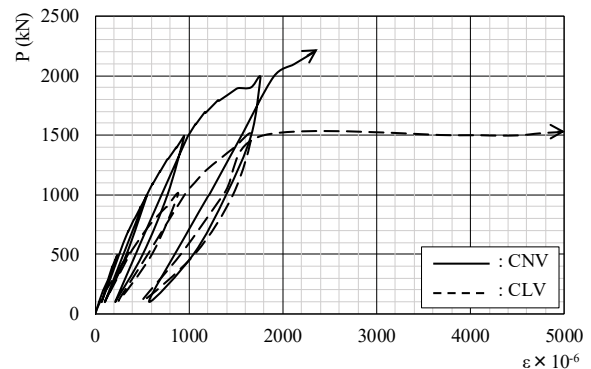
a) 普通コンクリート CN, CNV シリーズ



b) 低品質再生骨材コンクリート CL, CLV シリーズ



c) CN, CL (ビニロン繊維添加無し)



d) CNV, CLV (ビニロン繊維添加有り)

図-6 荷重-主筋のひずみ関係

ニロン繊維を添加した試験体は測定区間中央付近にひび割れが集中することなく測定区間全体にひび割れが分散する傾向が認められた。

4. 結論

ビニロン繊維が添加された低品質再生骨材コンクリートを用いた場所打ちコンクリート杭の耐力について実験的に検討を行った結果、本実験の範囲内で以下に示す知見が得られた。

- 1)荷重-変位曲線は同一シリーズのコンクリートを比較するとビニロン繊維の添加の有無による剛性の差異は認められなかった。耐力はビニロン繊維を添加した試験体は若干上昇する傾向が認められた。
- 2)低品質再生骨材コンクリートの試験体は普通コンクリートの試験体と比較しヤング係数が小さいことに起因し剛性が低くなる傾向が認められた。
- 3)主筋のひずみは低品質再生骨材コンクリートの試験体は普通コンクリートの試験体と比較し低い荷重で降伏ひずみに達した。
- 4)計算値 P_{cal} と最大荷重 P_{max} を比較すると、すべての試験体において最大荷重は計算値を下回る結果となり、試験体の実験時のコンクリートの圧縮強度の強度発現の不十分さが推測された。
- 5)コンクリートの種類によらず同様の最終破壊性状が認められた。一方、ビニロン繊維を添加した試験体はひび割れの発生が測定区間全体に分散する傾向が認められた。

本研究では実験時のコンクリートの圧縮強度の差のため低品質再生骨材コンクリートの試験体の耐力は普通コンクリートの試験体と比較し低下する傾向があった。今後、コンクリートの圧縮強度 σ_B で荷重を徐すなどして無次元化した評価を行いたい。またビニロン繊維による補強効果の発揮は最大荷重が若干上昇する程度で僅かであったが、最大荷重以降は荷重を維持して靱性のある履歴が認められた。現在長期保存中の試験体があるので乾燥収縮率の改善効果とともに材齢にともなう耐力の増加などについて引き続き検討を行いたい。

謝辞

本研究は平成 29-31 年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号 17K06656, 代表者: 師橋憲貴)の助成を受けたものである。本研究の低品質再生骨材コンクリートに関しては東京建設廃材処理協同組合葛西再生コンクリート工場をはじめ、混和剤メーカーの株式会社フローリックにご協力を頂きました。関係各位

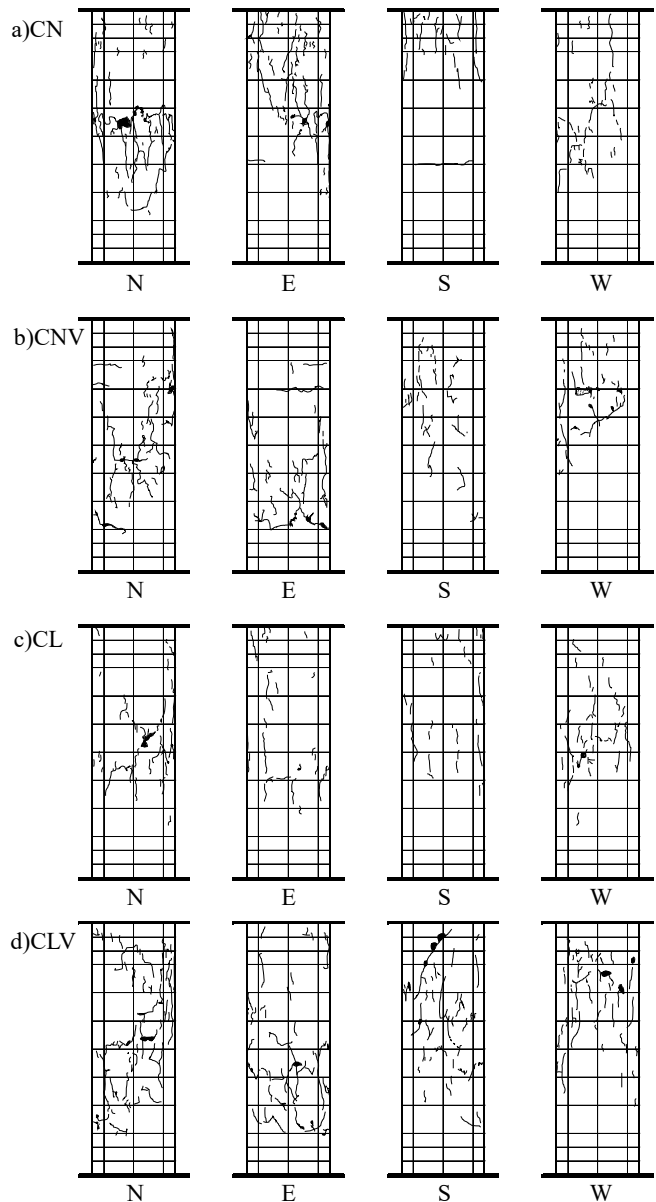


図-7 最終破壊形状

に記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)日本建築学会:再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案), 2014.10
- 2) (財)日本規格協会: JIS A 5022 再生骨材コンクリート M, 2018.5.21 改正
- 3)経済産業省製造産業局素材産業課: 砕石等統計四半期報 令和元年 7~9 月分
<https://www.meti.go.jp/statistics/sei/saiseiki/index.html>
(閲覧日: 2020 年 1 月 12 日)
- 4)国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所監修: 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2015.10