

環境配慮コンクリートの場所打ち杭への適用性検討

「T-eConcrete®/建築基準法対応型」の多段拡大杭への打設実験

濱 健太郎*¹・加藤 雅樹*¹・渡邊 徹*¹・山本 佳城*¹・
渡邊 悟士*^{1, 2}・加藤 優志*¹・今井 和正*¹

Keywords : environment-friendly concrete, type-C Portland blast-furnace slag cement, cast-in-place pile, multi-belled pile, field test

環境配慮コンクリート, 高炉セメントC種相当, 場所打ち杭, 多段拡大杭, 現場実験

1. はじめに

2050年までのカーボンニュートラルに向け、建設分野での温室効果ガス排出量削減への取り組みは喫緊の課題である。当社では、使用するポルトランドセメント（以降、セメントと呼称）量を削減し、CO₂排出量を抑えた環境配慮コンクリート「T-eConcrete」シリーズを開発してきている。このうち、セメントの高炉スラグ微粉末への置換率（高炉スラグの使用率と呼称）が60~70%であり、建築基準法の指定建築材料として使用できる「建築基準法対応型（高炉セメントC種相

当を用いたコンクリート、以降、BCCと呼称¹⁾」については、その材料特性（低水和熱、化学抵抗性など）を活かし、場所打ち杭へ適用することで、CO₂排出量の大幅削減と杭コンクリートの品質向上が期待される。今回、当社開発の場所打ち多段拡大杭工法「T-EAGLE®杭²⁾」への適用性を検討するため、実大試験杭によるコンクリート打設実験を行ったので報告する。

2. 実験概要

図-1に試験体と地盤概要を示す。試験体は、杭の中

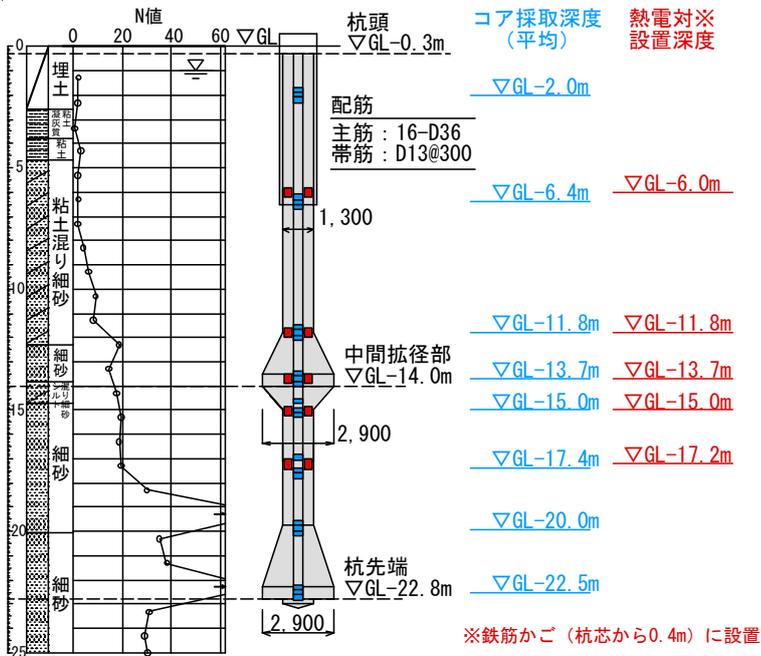


図-1 試験体と地盤概要

Fig.1 Outline of test pile and soil profile

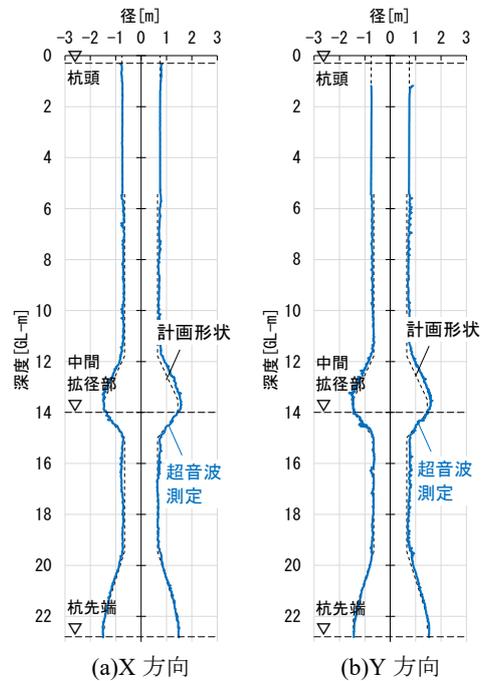


図-2 超音波孔壁測定結果

Fig.2 Results of ultrasonic measurement

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室
*2 技術センター T-eConcrete実装プロジェクトチーム

間部と先端部に拡大部を有する場所打ち多段拡大杭である。軸部径は1.3 m、拡大部径は2.9 m、杭長は約23 mであり、一部粘土質が混在する砂質地盤に施工されている。地下水位はGL-約1 mである。アースドリル工法に分類されるT-EAGLE杭工法による掘削・スライム処理後、鉄筋かごを挿入し、コンクリート打設を行った。図-2にスライム処理後の超音波孔壁測定の結果を示す。XY各方向とも、所定の形状を確保できていることがわかる。コンクリートの調合については、事前の試し練りにおいて、水結合材比、混和剤の使用量などを検討した(次章で詳述)。

表-1に本実験における確認事項を示す。強度発現性の確認のため、打設後の杭体から鉛直コア供試体を採取し、圧縮強度試験を行った。鉄筋かごには熱電対を貼付し、打設後の温度変化を計測することで、BCCの水和発熱抑制効果を確認した。超音波孔壁測定の結果とコンクリート打設状況との関係から、生コンクリートの流動性・流動保持性について検討した。

3. コンクリートの試し練り

レディーミクストコンクリート工場にて小型ミキサ試し練りおよび実機ミキサ試し練りを行い、BCCの調合を検討した。調合条件は、呼び強度45(目標強度54 N/mm²)、スランプ21 cm、高炉スラグの使用率65.0%とし、単位水量は工場の実績から175 kg/m³で計画した。

小型ミキサ試し練りは、水結合材比(以降、W/Bと呼称)の異なる3調合について行った。表-2に使用材料を、表-3に調合表を示す。高性能AE減水剤は、時間経過によるスランプ低下に配慮し、既往の検討³⁾において120分後までスランプ保持性が得られた混和剤を選定した。図-3に圧縮強度試験結果(標準養生)を示

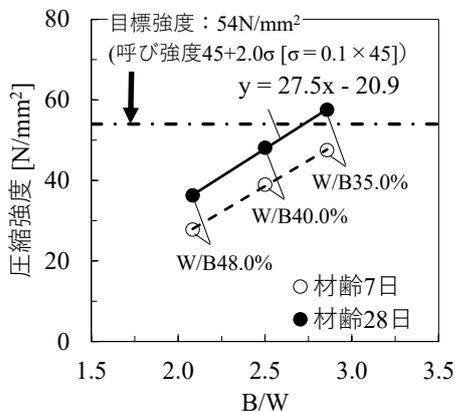


図-3 圧縮強度試験結果(小型ミキサ試し練り)
Fig.3 Results of compressive strength tests (trial mixing with portable concrete mixer)

表-1 本実験における確認事項
Table 1 Contents of field placement test

確認事項	確認内容	確認方法
強度発現性	杭体コンクリートの圧縮強度	鉛直コア供試体の圧縮強度試験
水和発熱抑制効果	打設後の温度変化	熱電対による温度計測
生コンクリートの流動性・流動保持性	掘削形状に対する生コンクリート打設量の妥当性	超音波測定結果とコンクリート打設状況との比較

表-2 使用材料
Table 2 Materials used for concrete

記号	材料種類	密度・主成分
N	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 g/cm ³
BF	高炉スラグ微粉末 4000	密度 2.89 g/cm ³
S1	砕砂(石灰石)	表乾密度 2.66 g/cm ³
S2	陸砂	表乾密度 2.60 g/cm ³
G	砕石(石灰石)	表乾密度 2.70 g/cm ³
Ad	高性能 AE 減水剤 遅延形	主成分: ポリカルボン酸エーテル系化合物

表-3 調合表
Table 3 Mix proportions of concrete

調合	BF 使用率 [%]	W/B [%]	単位量[kg/m ³]					
			W	B		S1	S2	G
				N	BF			
BCC-48	65.0	48.0	175	128	237	614	205	940
BCC-40		40.0	175	153	285	566	189	940
BCC-35		35.0	175	175	325	527	175	940

*単位粗骨材かさ容積 0.580 m³/m³

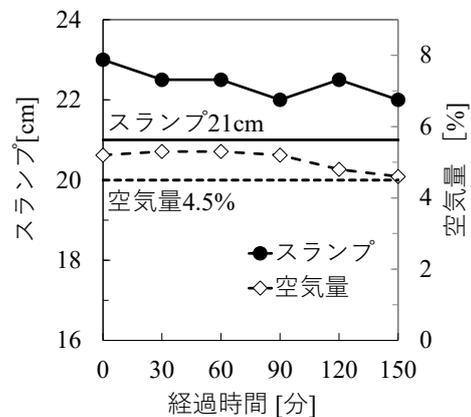


図-4 スランプ・空気量の経時変化(実機ミキサ試し練り)
Fig.4 Time histories of slump and air content (trial mixing with practical concrete mixer)

す。材齢 28 日の圧縮強度試験結果から、打設実験で使用する調合は BCC-35 (W/B = 35.0%) とした。

実機ミキサ試し練りでは BCC-35 について、スランプ・空気量の経時変化と圧縮強度の確認を行った。スランプ・空気量の測定は練上がり後 0 分として、30 分毎にアジテータ車から必要な量の試料を採取して実施した。図-4 にスランプ・空気量の経時変化を示す。本検討では、練上がり後 150 分まで試験を行ったが、スランプは 1 cm、空気量は 0.6% の低下であり、選定した混和剤で施工に十分な保持性能が確保できることを確認した。また、実機ミキサ試し練り時の標準養生による材齢 28 日強度は 54.8 N/mm² であり、小型ミキサ試し練りの結果 (図-3, B/W = 2.86) と同等の値が得られた。

4. 現場打設実験

4.1 コンクリート打設状況

写真-1 に現場打設実験の状況を示す。前述の通り、試験杭の掘削・スライム処理後、鉄筋かごを挿入し、コンクリート打設を行った。打設時期は 11 月末であり、日中の外気温は最高約 12℃であった。生コンクリートは上述の通り呼び強度が 45、調合は BCC-35 (W/B = 35.0%) であり、混和剤使用量は実機ミキサ試し練りでの使用量と同じとした。表-4 に受入れ試験 (3 回) の結果を示す。スランプはいずれも 21 cm 前後と所定の流動性を有していた。

表-5 に打設前の安定液の性状を示す。安定液の配合は CMC (カルボキシメチルセルロース) が主体であり、砂分は 1% 以下であった。打設に用いたトレミー管は内

径 200 mm であり、杭先端および杭頭付近を長さ 1 m の短尺もので構成した。打設開始時にはトレミー管先端を孔底より 0.2 m 上方に位置させ、以降はコンクリート内に 2 m 以上、根入れさせながら引き上げた。コンクリートの打設総量は約 59 m³ であり、アジテータ車 14 台により約 2 時間 40 分で打設した。いずれも、練上がり後 120 分以内に打設を完了している。図-5 にコンクリートの打設量と天端深度の関係 (赤実線) を示す。ボリュームの大きい拡大部の打設時には生コン天端の上がり量が鈍化する傾向が確認できる。

4.2 圧縮強度試験結果

打設後の試験体の中心位置から鉛直コア供試体を採取し、材齢 91 日で圧縮強度試験を行った。写真-2 に供試体採取の状況を、図-6 に圧縮強度およびヤング係数の深度分布を示す。圧縮強度はいずれも呼び強度 45 を上回っており (平均 59.3 N/mm²)、材齢 28 日の標準養生供試体の圧縮強度と同等であることが確認された。

表-4 受入れ試験結果

Table 4 Results of acceptance inspections

受入れ試験	練上り後時間 [min]	スランプ [cm]	スランプ フォー [cm]	空気量 [%]	コンクリート 温度 [°C]	塩化物含有量 [kg/m ³]
1 車目	45	21.5	36.5*34.5	5.3	17	0.025
5 車目	55	21.0	38.5*38.0	5.6	17	0.026
10 車目	43	22.5	39.0*37.5	5.0	16	0.024

表-5 打設前の安定液の性状

Table 5 Properties of drilling slurry just before placement

配合	ファンネル粘性 [sec]	比重	pH	砂分率 [%]
CMC 主体	24.8	1.02	9	< 1.0



(a)掘削機械



(b)スランプ試験(1車目受入れ時)



(c)コンクリート打設

写真-1 現場打設実験の状況

Photo.1 State of field placement test

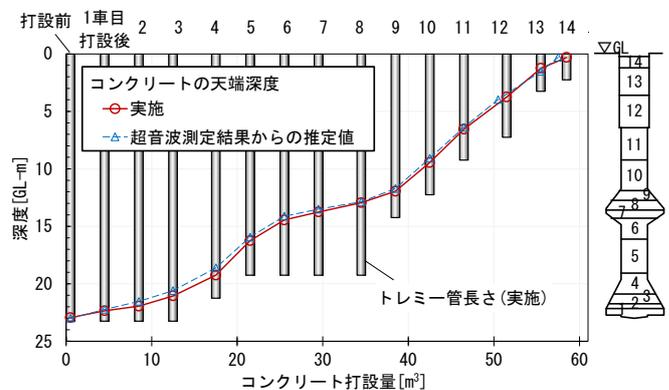


図-5 コンクリートの打設量と天端深度の関係

Fig.5 Relation between volume and depth of top of placed concrete

杭深部ほど強度がやや高くなる傾向が見られ、コンクリートの自重による圧力の影響と推察される。コア供試体のヤング係数の平均値 (36.5 kN/mm²) は、New RC 式⁴⁾ (石灰岩碎石の係数 1.2 と高炉スラグ微粉末の係数 0.95 を適用) により圧縮強度と気乾単位体積重量から求まる推定値の平均値 (37.5 kN/mm⁴) と同等の値となっている。

図-7 にコア供試体の圧縮強度の統計量を示す。図中には普通ポルトランドセメントのみを使用したコンク



(a)採取状況 (b)コア供試体
写真-2 鉛直コア供試体の採取
Photo.2 Sampling of core specimens

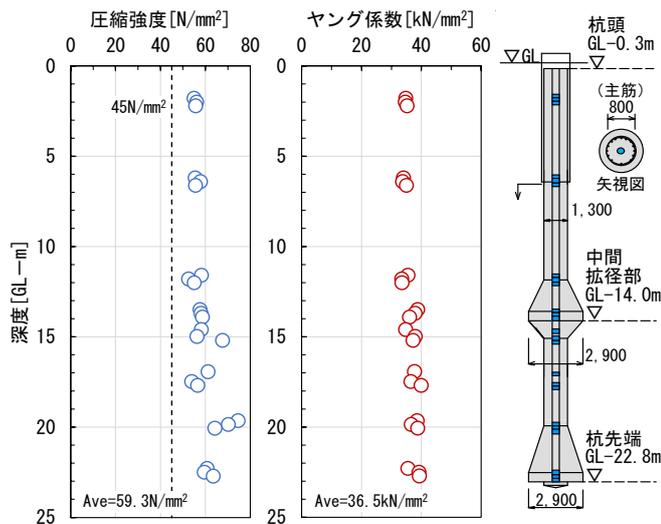


図-6 コア供試体の圧縮強度およびヤング係数の分布
Fig.6 Depth distributions of compressive strengths and Young's moduli of core specimens

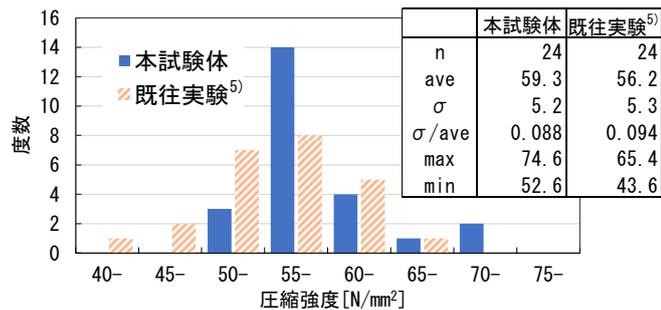
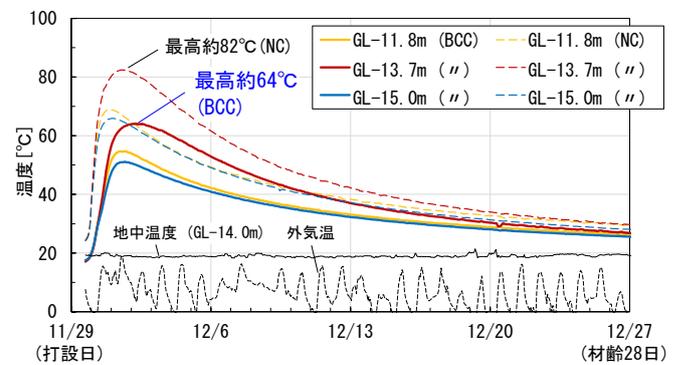
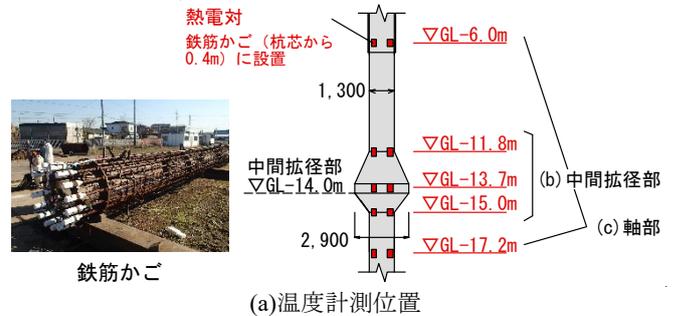


図-7 コア供試体の圧縮強度の統計量
Fig.7 Concrete strength statistics

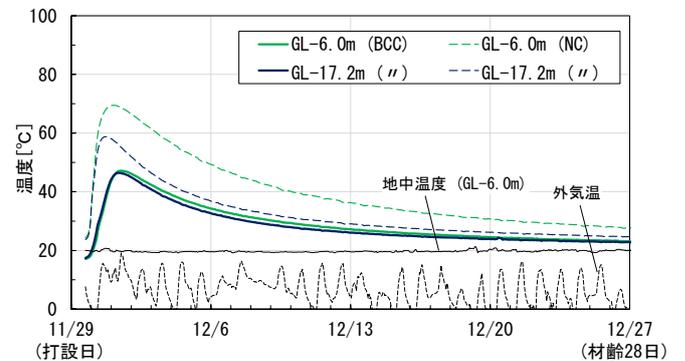
リート (以降、NC と呼称) を打設した中間拡径杭 (軸部径1.0 m, 拡大部径2.0 m, 杭長 19.5 m, 呼び強度45) の統計量⁵⁾を併記している。本試験体の標準偏差は 5.2 N/mm², 変動係数は 8.8 %であり、既往実験の結果と比較するとばらつきは同程度といえる。

4.3 温度計測結果

図-8 に、温度計測位置、および打設後の杭体の温度変化を中間拡径部と軸部に分けて示す。グラフ中には、同敷地内の地中温度、外気温、および同敷地内で施工された同形状・寸法の多段拡大杭 (呼び強度 45 の NC 使用, 11 月半ば打設, NC 打設杭と呼称) の打設後の温度変化を併記している。なお、グラフ中の杭体の温度は、各深度につき鉄筋かごの対面 2 箇所 (それぞれ杭芯から 0.4 m の位置, GL-13.7 m は 4 箇所) に設置した熱電対の平均値である。本試験体の温度計測値 (実線)



(b)中間拡径部



(c)軸部

※NC 打設杭は 11/20(打設日)~12/18(材齢 28 日)のデータを示す

図-8 コンクリートの温度変化
Fig.8 Time histories of concrete temperature

は、打設後に最高約 64℃まで上昇した後低下しており、中間拡径部の中央部でより高いことがわかる。NC 打設杭の温度変化と比較すると、本試験体の温度計測値の最高値が 18℃程度低減されており、BCC の水和発熱抑制効果が確認できる。

4.4 打設時の流動性・流動保持性に関する検討

コンクリート打設時に所定の杭形状を確保するには、生コンクリートの流動性・流動保持性が重要となる。

これに関し、次のような検討を行った。

- ① スライム処理後の超音波孔壁測定結果（図-2）から掘削孔の立体形状を仮定し、その体積を算定。
- ② 孔底からアジテータ車 1 台分の容積（4.25 m³）で順に区切り、1 台毎の生コン天端の上がり量を推定。
- ③ 実際の打設実績と比較。

超音波孔壁測定結果から推定したコンクリートの打設量と天端深度の関係を、図-5 に併記している（青点線）。実際の打設結果（赤実線）がこの推定値とほぼ一致していることから、生コンクリートが掘削孔に充填されながら打設されていたと推測できる。このことから、打設時の生コンクリートの流動性・流動保持性には問題が無かったと考えられる。

5. CO₂ 排出量の試算

本実験で用いた BCC の材料製造に起因する CO₂ 排出量を試算した。調合は表-3 に示す BCC-35 である。また比較用に、BCC-35 の呼び強度 45 と同じ呼び強度の調合（W/B = 37.0 %，単位水量 175 kg/m³）の NC についても同様に試算した。各材料の CO₂ 排出量原単位は日本建築学会の指針⁶⁾を参照した。試算結果を表-6 に示す。BCC-35 では、コンクリート 1 m³ 当たりの CO₂ 排出量が 154 kg-CO₂/m³ と試算され、NC と比較して CO₂ 排出量を約 60 %削減できることがわかる。なお、杭施工時の CO₂ 排出要因としては材料製造の他に施工・運搬が挙げられるが、その割合は小さい⁷⁾ため、本試算では無視した。

6. おわりに

「T-eConcrete/建築基準法対応型（高炉セメント C 種相当を用いたコンクリート）」の場所打ち杭（T-EAGLE 杭）への適用性を検討するため、現場打設実験を行った。実験で用いたコンクリートは、ポルトランドセメントの 65 %を高炉スラグ微粉末に置換しており、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合と比較

表-6 CO₂ 排出量の試算
Table 6 Calculations of CO₂ emission

調査	高炉スラグ微粉末 使用率 [%]	W/B [%]	CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂ /m ³] (削減率[%])
BCC-35	65.0	35.0	154 (59)
NC	—	37.0	372 (—)

して CO₂ 排出量を約 60%削減できることを確認している。実験で得られた主な知見を以下に述べる。

- 1) 事前の試し練りにおいて時間経過によるスランプ低下に配慮した調合を決定するなど、適切に品質・施工管理を行うことで、所定の強度を有する杭を構築できる。
- 2) 場所打ち杭においても、当該コンクリートの水和発熱抑制効果が発揮される。

T-EAGLE 杭工法では、高炉セメント C 種相当を用いたコンクリートを使用する際、当該材料が JIS 規格へ適合することを確認するための品質管理方法を定めている。上記実験結果より、当品質管理方法および施工管理方法の妥当性が認められ、一般財団法人ベターリビングより、T-EAGLE 杭工法としての建設技術審査証明（BL 審査証明-043）を 2022 年 5 月に取得した。

参考文献

- 1) 大脇英司，荻野正貴：カーボンリサイクル・コンクリート™の開発，大成建設技術センター報，第 54 号，03，2021。
- 2) 濱健太郎，渡邊徹，堀井良浩，秋月通孝，岩田暁洋，村松晃次，中西義隆，小座間琢也：多段拡径場所打ちコンクリート杭工法「T-EAGLE®杭工法」の開発，大成建設技術センター報，第 52 号，30，2019。
- 3) 加藤優志，渡邊悟士，山本佳城，黒岩秀介：高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの基礎物性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1097-1102，2020。
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2018。
- 5) 一般財団法人ベターリビング：建設技術審査証明事業（住宅関連技術）報告書 T-EAGLE®杭工法（中間拡径部と拡底部の両方またはいずれかを有する場所打ちコンクリート杭工法），2022。
- 6) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説，2017。
- 7) 中川太郎，小川敦，桂豊，堀田洋之，青島一樹，椿原康則，伊勢本昇昭，佐野大作，西正晃：ケーススタディによる基礎杭の CO₂ 排出量の検討，日本建築学会技術報告集，第 15 巻，第 31 号，pp.701-706，2009。