ケーススタディによる基礎杭のCO₂排出量の検討

CASE STUDIES ON CO₂ EMISSION OF FOUNDATION PILES

中川太郎 — *1 小川 敦 — *2
桂 豊 — *3 堀田洋之 — *4
青島一樹 — *5 椿原康則 — *6
伊勢本昇昭 — *7 佐野大作 — *7
西 正晃 — *8

Taro NAKAGAWA — *1 Atsushi OGAWA — *2
Yutaka KATSURA — *3 Hiroyuki HOTTA — *4
Kazuki AOSHIMA — *5 Yasunori TSUBAKIHARA — *6
Noriaki ISEMOTO — *7 Daisaku SANO — *7
Masateru NISHI — *8

キーワード：
CO₂ 排出量, 鋼管杭, 既製コンクリート杭, 場所打ちコンクリート杭,
資材, 施工, 運搬, 支持力

Keywords:
CO₂ emission, Steel pipe pile, Precast concrete pile, Cast in place
concrete pile, Material, Execution of work, Transportation, Bearing
capacity

To investigate the environmental impact from the construction of foundation piles, we estimated CO₂ emissions for several scenarios. We investigated emissions for steel pipe piles, precast concrete piles and cast in place concrete piles. The lower CO₂ emission from piles which were developed in recent years was shown. The relative CO₂ emissions of pile materials, which occupy greater part during foundation pile construction and of the number of floors of buildings were approximated using linear functions. In short, the possibility of estimating of CO₂ emissions using simple formulae was shown.

1. 目的

近年の環境に対する意識の高まりは著しいものがある。このことを背景に、杭製造に係る環境負荷の現状を把握すべく、ケーススタディにより CO₂ 排出量の定量評価を行った。

環境負荷としては、例えば杭施工時の地盤掘削に伴う排土搬出など他にも重要な項目が挙げられるが、本報では、特に最近注目度が高いこともあり CO₂ 排出量に限定して検討を行った。

杭製造の過程を杭資材製造、輸送、施工に分けた場合、CO₂ 排出量は、杭資材製造の過程が最も大きいという結果が示されている¹⁾。このことから、筆者等は建物、地盤を設定して杭の一次設計を行い、杭資材製造の際の CO₂ 排出量を検討した²⁾。本報では、主に地震時の水平力を考慮した場合の杭資材の CO₂ 排出量に関して検討した。

また、運搬、施工の CO₂ 排出量に関して、資材製造時との比較と、杭種、工法に対する N 値、建物階数の違いによる比較検討を行った³⁾。

2. 杭資材製造に関する CO₂ 排出量算定の課題設定

杭種は鋼管杭、既製コンクリート杭、場所打ちコンクリート杭を対象とした。

CO₂ 排出量の算定対象は杭体と杭固定に用いるセメントミルクとし、パイルキャップ、基礎梁は含まないとした。

2.1 建物・地盤

図1に建物平面と杭を示す。建物は建築面積が 15m×30m=450m² の RC 造の事務所ビルとした。杭は各柱下に設けた。中杭4箇所、側杭10箇所、隅杭4箇所の計18箇所である。表層は一般的な砂地盤とし、支持層は N 値 50 の砂礫地盤とした。杭体の長さは支持地盤への根入れ長さも含めて 20m とした。

表1に検討ケースを示す。建物階数は5, 10, 20階、表層地盤の N 値も5, 10, 20の場合を想定した。なお、表層地盤の液化化は考

慮しないとした。

図1 建物平面と杭

表1 検討ケース

建物階数 表層 N 値	5 階	10 階	20 階
5	N5-5F	N5-10F	N5-20F
10	N10-5F	N10-10F	N10-20F
20	N20-5F	N20-10F	N20-20F

2.2 荷重

設計で考慮する荷重は、鉛直荷重の場合と鉛直+水平荷重の2通り設定した。建物自重は長期荷重に各階での積載荷重を加算して設定した⁴⁾。水平荷重は剛床仮定として各杭頭の水平変位が等しくなるように、杭頭の水平剛性を表す定数 EI/β^3 に比例して各杭に分担させた⁵⁾。表2に杭頭の総荷重を示す。

表2 杭頭の総荷重 (×10³kN), (括弧内数字は箇所数)

階数 荷重	5 階			10 階			20 階		
	中 (4)	側 (10)	隅 (4)	中 (4)	側 (10)	隅 (4)	中 (4)	側 (10)	隅 (4)
鉛直	18.3	23.0	4.6	35.2	44.2	8.9	58.6	73.7	14.8
水平	7.26			15.45			27.39		

¹⁾ ㈱フジタ技術センター 工学修士
(〒243-0125 厚木市小野2025-1)

²⁾ ㈱熊谷組技術研究所 工学修士

³⁾ 清水建設㈱技術研究所 博士(工学)

⁴⁾ 清水建設㈱技術研究所 博士(環境科学)

⁵⁾ 大成建設㈱技術センター 工学修士

⁶⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 博士(工学)

⁷⁾ 戸田建設㈱技術研究所 工学修士

⁸⁾ ㈱間組技術研究所

¹⁾ Technology Development Division, Fujita Corporation, M. Eng.

²⁾ Technical Research & Development Institute, Kumagai Gumi Co., Ltd., M. Eng.

³⁾ Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

⁴⁾ Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Env. Sci.

⁵⁾ Technology Center, Taisei Corporation, M. Eng.

⁶⁾ Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

⁷⁾ Technical Research Institute, Toda Corporation, M. Eng.

⁸⁾ Technical Research Institute, Hazama Corporation

2.3 杭

表3に検討対象杭の一覧を示す。近年、性能評価機関により評定を受けた、いわゆる高支持力杭（以下、評定杭と称する）が開発されてきており、本報で検討対象とするが、相対比較のための杭(S-1、PHC-1、RC-1)を設定した。鋼管杭は中掘り工法による、評定によらない埋込み杭⁶⁾を相対比較のための杭(S-1)とした。既製コンクリート杭は、東京都の指針⁷⁾に準じて設計した杭(PHC-1)とした。場所打ちコンクリート杭は、東京都の指針⁷⁾に準じて設計した直杭(RC-1)とした。また、RC-2～RC-5は拡底率3程度の拡底杭とした。

表3 検討対象杭一覧（V：鉛直荷重、H：水平荷重）

杭種	記号	工法	荷重
鋼管杭	S-1	一般鋼管杭(中掘り工法)($\alpha=250$, $\beta\bar{N}_s=15$)	V, V+H
	S-2	鋼管ソイルセメント杭($\alpha=150$, $\beta=10$)	〃
	S-3	先端拡大根固め鋼管杭($\alpha=196$, $\beta=4.11$)	〃
	S-4	先端翼付き回転貫入鋼管杭($\alpha=200$, $\beta=2$)	〃
既製コンクリート杭	PHC-1	一般既製コンクリート杭($\alpha=200$, $\beta=3.3$)	〃
	PHC-2	プレボーリング拡大根固め杭1($\alpha=400$, $\beta=6.2$)	〃
	PHC-3	プレボーリング拡大根固め杭2($\alpha=425$, $\beta=4.4$)	〃
場所打ちコンクリート杭	RC-1	直杭(東京都の指針 ⁷⁾ に準拠)	〃
	RC-2	拡底杭1(東京都の指針 ⁷⁾ に準拠)	V
	RC-3	拡底杭2(杭体強度で支持力が決まる場合)	〃
	RC-4	拡頭拡底杭	V+H
	RC-5	鋼管巻き拡底杭	〃

2.4 CO₂原単位

表4に建築資材のCO₂原単位を示す。杭資材の原単位は、LCA指針の品目内容⁸⁾に準じて決定した。鋼管杭の原単位は、現状用いられている高炉材と、比較のための電炉材について、LCA指針を参考に別途算定した。セメント系の単位体積重量は23.0kN/m³とし、鋼材の単位体積重量は77.0kN/m³とした。

表4 建築資材の単位物量あたりのCO₂原単位

資材		CO ₂ (ton-CO ₂ /ton)	関連する杭資材
生コン		0.205	場所打ちコンクリート杭
セメント製品		0.342	既製コンクリート杭
セメント		0.816	根固め、杭周固定液
普通鋼小棒（鉄筋）		0.941	鉄筋
普通鋼鋼管	高炉材	1.608	鋼管
	電炉材	0.779	鋼管

2.5 設計条件

- ・1箇所あたりの杭本数は最小となるよう設計した
- ・群杭効果は考慮しない
- ・鉛直のみ、鉛直＋水平の場合とも鉛直荷重は長期軸力とした
- ・杭は弾性とし、水平地盤反力係数の非線形性は考慮しない

3. 鋼管杭の検討

3.1 算定方法

S-1～S-4のそれぞれについて、全ケースに関し、次式を用いて長期許容鉛直支持力の計算を行い、杭断面を算定した。

$$R_a = \frac{1}{3}(\alpha\bar{N}A_p + \beta\bar{N}_sL_s\psi) \quad (1)$$

ここに、 $\bar{N}$ ：杭の先端付近地盤の平均N値、 A_p ：杭先端（S-2はソイルセメント柱、S-3は根固め球根；S-4は先端翼）の有効断面積（m²）、 $\bar{N}_s$ ：杭周囲砂質地盤の平均N値、 L_s ：杭が砂質地盤に接する

長さの合計(m)、 ψ ：杭（S-2はソイルセメント柱）の周長(m)である。 α, β は杭工法に応じた係数で、S-1では $\alpha=250$ 、 $\beta\bar{N}_s=15$ である。S-2～S-4では該当する評定杭工法の中から各1工法を選び、 α, β の値はそれぞれの設計法に従った。鋼管の最大径は $\phi 1200\text{mm}$ とした。

水平力に関する検討は、最大曲げモーメントに対する杭体応力が短期許容応力度315N/mm²（SKK490材）に収まるように必要に応じて上部5m（上杭）の鋼管厚を増加させた。S-3において鋼管厚のみで対応できない場合には拡頭杭とした。

CO₂排出量の算定には杭本体の鋼材、及び根固め液（S-1、S-3）・ソイルセメント柱（S-2）・杭周固定液（S-3）に含まれるセメントを考慮した。原単位は表4のものを用いた。鋼材としては高炉材と電炉材の両方について検討を行った。実際には $\phi 300\text{mm}$ を超える鋼管に電炉材は用いられていないが、鋼材のリサイクルを考慮した場合を想定し、比較のために検討を実施している。

3.2 算定結果

表5に、鉛直＋水平力を考慮して設計した杭と、杭の各構成資材に表4の原単位を乗じて算出したCO₂排出量の一覧を示す。

表5 鋼管杭の算定結果一覧（V+H）

工法	建物階数	杭位置	表層N値 5							表層N値 10							表層N値 20						
			杭の軸径 (mm)	一柱の杭本数	CO ₂		S-1に対する比 比高炉電炉	杭の軸径 (mm)	一柱の杭本数	CO ₂		S-1に対する比 比高炉電炉	杭の軸径 (mm)	一柱の杭本数	CO ₂		S-1に対する比 比高炉電炉						
					全体 (ton)	セメント%				全体 (ton)	セメント%				全体 (ton)	セメント%							
																		高炉	電炉	高炉	電炉	高炉	電炉
S-1	5	中杭	1200	2	346	215	—	1100	2	278	172	—	1000	2	245	148	—						
		側杭	700	1	(26%)	(42%)	—	700	1	(26%)	(42%)	—	700	1	(23%)	(39%)	—						
		隅杭	700	1	4	564	352	—	1100	4	564	352	—	1118	3	466	286	—					
	10	中杭	1100	2	(27%)	(43%)	—	1100	2	(27%)	(43%)	—	1000	2	(26%)	(41%)	—						
		側杭	700	1	1	—	—	700	1	1	—	—	700	1	1	—	—						
		隅杭	700	1	1	—	—	700	1	1	—	—	700	1	1	—	—						
S-2	5	中杭	1200	6	1066	663	—	1100	6	860	535	—	1100	5	735	450	—						
		側杭	700	3	(27%)	(43%)	—	700	3	(26%)	(43%)	—	1000	3	(25%)	(40%)	—						
		隅杭	1000	2	1	—	—	1000	2	1	—	—	900	2	1	—	—						
	10	中杭	800	2	226	165	0.65	0.65	900	2	181	132	0.65	700	1	157	110	0.74					
		側杭	700	1	(58%)	(79%)	0.77	700	1	(47%)	(64%)	0.77	700	1	(43%)	(61%)	0.64						
		隅杭	700	1	2	394	291	0.70	900	2	302	231	0.54	1100	1	207	151	0.44					
S-3	5	中杭	900	2	(49%)	(67%)	0.83	900	2	(54%)	(71%)	0.66	700	1	(47%)	(65%)	0.53						
		側杭	700	1	1	—	—	700	1	1	—	—	700	1	1	—	—						
		隅杭	700	1	1	—	—	700	1	1	—	—	700	1	1	—	—						
	10	中杭	4	716	549	0.67	0.70	900	3	442	336	0.51	900	2	334	251	0.56						
		側杭	700	1	(55%)	(71%)	0.83	700	2	(53%)	(70%)	0.63	900	1	(51%)	(69%)	0.45						
		隅杭	1000	2	1	—	—	900	1	1	—	—	900	1	1	—	—						
S-4	5	中杭	800	1	113	69	0.33	700	1	103	62	0.37	600	1	96	54	0.39						
		側杭	500	1	(24%)	(39%)	0.32	500	1	(22%)	(37%)	0.36	400	1	(15%)	(26%)	0.36						
		隅杭	400	1	220	144	0.39	1000	1	208	133	0.37	1000	1	183	110	0.39						
	10	中杭	1100	1	(33%)	(51%)	0.41	700	1	(30%)	(46%)	0.38	400	1	(22%)	(37%)	0.38						
		側杭	700	1	1	—	—	500	1	1	—	—	400	1	1	—	—						
		隅杭	500	1	2	397	266	0.37	900	2	339	222	0.39	800	2	311	194	0.42					
S-5	5	中杭	1000	1	(36%)	(54%)	0.40	600	1	(33%)	(50%)	0.42	900	1	(27%)	(43%)	0.43						
		側杭	700	1	1	—	—	600	1	1	—	—	500	1	1	—	—						
		隅杭	700	1	1	—	—	600	1	1	—	—	500	1	1	—	—						
	10	中杭	1000	1	113	55	0.33	900	1	104	51	0.38	900	1	99	48	0.41						
		側杭	600	1	(25%)	(39%)	0.25	400	1	(22%)	(37%)	0.29	600	1	(15%)	(26%)	0.36						
		隅杭	406	1	216	104	0.30	400	1	209	101	0.37	800	2	181	88	0.39						
S-6	5	中杭	900	2	(25%)	(39%)	0.25	900	2	(22%)	(37%)	0.29	800	2	(15%)	(26%)	0.36						
		側杭	600	1	1	—	—	1000	1	1	—	—	600	1	1	—	—						
		隅杭	600	1	1	—	—	1000	1	1	—	—	600	1	1	—	—						
	10	中杭	1000	3	340	164	0.32	800	2	316	153	0.37	900	3	297	144	0.40						
		側杭	800	2	(25%)	(39%)	0.25	800	2	(22%)	(37%)	0.29	800	2	(15%)	(26%)	0.36						
		隅杭	406	1	216	104	0.30	400	1	209	101	0.37	800	2	181	88	0.39						

(3) 先端拡大根固め鋼管杭 (S-3)

CO₂排出量の S-1 に対する比率は 0.32~0.43 の小さな値であり、S-2 に対する比率は 0.5 程度である。セメント分の割合は杭体高炉材で 15~36%，同電炉材で 26~54%であった。

(4) 先端翼付き回転貫入鋼管杭 (S-4)

CO₂排出量の S-1 に対する比率は 0.25~0.41 であり、S-3 とほぼ同程度かやや小さく、4 種の杭工法の中で最も小さな値となっている。材料としてセメントを使用していないため、全ての CO₂ 排出量は鋼材によるものである。

図2 建物階数と CO₂ 排出量の関係 (N 値 10 の一次近似を併記)

4. 既製コンクリート杭の検討

4.1 算定方法

一般的な PHC 杭 (セメントミルク工法)，および評定によるプレボーリング拡大根固め工法を採用した場合の CO₂ 排出量を算定した。式(2)に検討に用いた長期許容支持力式を示す。一般 PHC 杭 (PHC-1) については、東京都の指針⁷⁾の支持力算定方法に準じ、最大杭径 $\phi 600\text{mm}$ と長期許容支持力の上限值 ($R_{a\max} \div 1/3 \times 250 \bar{N} \cdot A_p$ ， $R_{a\max}$: 長期許容支持力の上限值， $\bar{N}$: 杭の先端付近地盤の平均 N 値， A_p : 杭先端の面積) を設定した。プレボーリング拡大根固め杭については、支持力係数 (α, β) の異なる 2 工法について検討した。PHC-2 は、 $\alpha=400, \beta=6.2$ ，最大杭径 $\phi 800\text{mm}$ である。PHC-3 は、 $\alpha=425, \beta=4.4$ ，最大杭径 $\phi 1000\text{mm}$ である。いずれのプレボーリング拡大根固め杭も杭材には Fc105 N/mm² のコンクリートを採用し、長期許容支持力は支持力式もしくは杭材の許容応力度で決定される。

杭径と杭本数は、1 柱あたりの杭本数が最も少なくなるように計画し、長期許容支持力の検討から決定した。また、長期許容支持力から求めた杭径と杭本数に対して水平力の検討を行い、杭の最大曲げモーメントが短期許容曲げモーメント以内に収まるように、上部 5m の杭種 (SC 杭-STK490 の鋼管厚) を選定した。

CO₂ 排出量の算定には、杭材のコンクリート、鉄筋 (PC 鋼線)，SC 杭の鋼管，およびセメントミルク (根固め液と杭周固定液) に含まれるセメントを考慮した。PHC 杭の鉄筋比は、杭種に関わらず 0.4%とした。根固め液と杭周固定液のセメント量は、一般 PHC 杭については文献⁹⁾に示されるセメントミルクの配合を参考とし、高支持力杭については各工法のカatalog値から求めた。また、SC 杭の鋼管は高炉材として算定した。

$$R_a = \frac{1}{3} (\alpha \bar{N} A_p + \beta \bar{N}_s L_s \psi) \quad (2)$$

ここに、 $\bar{N}$: 杭の先端付近地盤の平均 N 値， A_p : 杭先端の有効断面積 (m²)， $\bar{N}_s$: 杭周囲砂質地盤の平均 N 値， L_s : 杭が周囲砂質地盤に接する長さの合計 (m)， ψ : 杭の周長 (m) である。 α, β は杭工法に応じた係数で、PHC-1 は $\alpha=200, \beta=3.3$ ，PHC-2 は $\alpha=400, \beta=6.2$ ，PHC-3 は $\alpha=425, \beta=4.4$ である。

4.2 算定結果

表 6 に、鉛直+水平力を考慮して設計した杭と、杭の各構成資材に表 4 の原単位を乗じて算出した CO₂ 排出量の一覧を示す。図 3 に建物階数と CO₂ 排出量の関係を示す。

表 6 既製コンクリート杭の算定結果一覧 (V+H)

工法	建物階数	杭位置	表層N値 5					表層N値 10					表層N値 20				
			杭の軸径 (mm)	一柱の杭本数	CO ₂ (ton) 全体	セメントミルク/全体 (%)	PHC-1 に対する比	杭の軸径 (mm)	一柱の杭本数	CO ₂ (ton) 全体	セメントミルク/全体 (%)	PHC-1 に対する比	杭の軸径 (mm)	一柱の杭本数	CO ₂ (ton) 全体	セメントミルク/全体 (%)	PHC-1 に対する比
PHC-1	5	中杭	600	4	158 (103)	35%	—	600	4	158 (103)	35%	—	600	4	158 (103)	35%	—
		隅杭	600	2	79 (51)	—	—	600	2	79 (51)	—	—	600	2	79 (51)	—	—
		隅杭	600	1	39 (25)	—	—	600	1	39 (25)	—	—	600	1	39 (25)	—	—
	10	中杭	600	8	316 (205)	35%	—	600	8	316 (205)	35%	—	600	8	316 (205)	35%	—
		隅杭	600	4	158 (103)	—	—	600	4	158 (103)	—	—	600	4	158 (103)	—	—
		隅杭	600	2	79 (51)	—	—	600	2	79 (51)	—	—	600	2	79 (51)	—	—
PHC-2	5	中杭	800	1	112 (54)	52%	0.71	800	1	92 (45)	51%	0.59	700	1	71 (34)	51%	0.45
		隅杭	800	1	112 (54)	—	—	800	1	92 (45)	—	—	800	1	92 (45)	—	—
		隅杭	800	1	112 (54)	—	—	800	1	92 (45)	—	—	800	1	92 (45)	—	—
	10	中杭	800	2	221 (103)	54%	0.70	800	2	214 (99)	54%	0.68	700	2	160 (78)	54%	0.51
		隅杭	800	1	112 (54)	—	—	800	1	92 (45)	—	—	800	1	92 (45)	—	—
		隅杭	800	1	112 (54)	—	—	800	1	92 (45)	—	—	800	1	92 (45)	—	—
PHC-3	5	中杭	700	1	92 (47)	49%	0.58	700	1	91 (45)	50%	0.58	700	1	89 (44)	50%	0.57
		隅杭	700	1	92 (47)	—	—	700	1	91 (45)	—	—	700	1	89 (44)	—	—
		隅杭	700	1	92 (47)	—	—	700	1	91 (45)	—	—	700	1	89 (44)	—	—
	10	中杭	700	2	187 (93)	50%	0.59	1000	1	172 (84)	51%	0.54	1000	1	170 (82)	51%	0.54
		隅杭	700	1	92 (47)	—	—	1000	1	172 (84)	—	—	1000	1	170 (82)	—	—
		隅杭	700	1	92 (47)	—	—	1000	1	172 (84)	—	—	1000	1	170 (82)	—	—

図3 建物階数と CO₂ 排出量の関係 (N 値 10 の一次近似を併記)

(1) 一般 PHC 杭 (PHC-1)

一般 PHC 杭の長期許容支持力は、表層地盤の N 値が 5 を超えるケースでは、東京都の指針の上限値に制限される。表層地盤の N 値

が5のケースについても、ほぼ上限値に達するため、結果として、表層地盤に関わらず、同一の杭径と杭本数となり、CO₂の排出量も同等となった。建物階数とCO₂排出量の関係は、階数の増加に伴い杭本数が増えるためCO₂排出量が増加する。セメントミルクに係るCO₂排出量は全体の35%となった。

(2) プレボーリング拡大根固め杭1 (PHC-2)

CO₂排出量のPHC-1に対する比率は0.45～0.71であった。水平力を考慮した場合、殆どのケースで上杭にSC杭が必要となる。セメントミルクに関わるCO₂排出量は全体の50～54%となった。

(3) プレボーリング拡大根固め杭2 (PHC-3)

CO₂排出量のPHC-1に対する比率は0.47～0.59であった。PHC-2に比較し、ばらつきは小さい。水平力を考慮すると、全てのケースでSC杭が必要となる。セメントミルクに係るCO₂排出量は全体の49～51%となった。

5. 場所打ちコンクリート杭の検討

場所打ちコンクリート杭に関しては、鉛直荷重のみ考慮したRC-2、RC-3は割愛し、鉛直+水平荷重を考慮したRC-1、RC-4、RC-5について示す。

5.1 算定方法

(1) 直杭 (RC-1)

杭径は鉛直荷重に対して求めたが、水平荷重を考慮しても一部を除いて同径になったため、杭径(鉛直)＝杭径(鉛直+水平)として比較検討を行った。

長期許容支持力 R_a は、東京都の指針(ルートA)に準じて式(3)により算定した。

$$R_a = \frac{1}{3} \left\{ 150\alpha \cdot \beta \bar{N} A_p + \frac{10}{3} \bar{N}_s L_s \psi \right\} - W \text{ (kN)} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{N}$ ：杭の先端付近地盤の平均N値、 A_p ：杭先端の有効断面積(m²)、 $\bar{N}_s$ ：杭周囲砂質地盤の平均N値、 L_s ：杭が周囲砂質地盤に接する長さの合計(m)、 ψ ：杭の周長(m)、 W ：杭体の自重(kN)、 α ：杭の先端支持地盤による係数($\alpha=1.0$ に設定)、 β ：杭先端の設計径 D (m)による係数($\beta \leq 1.0$)、 $\beta=1-0.3(D-1.5)/2.5$ ($D>1.5$ mの場合)である。

R_a は、東京都の指針の支持力度の上限値2,500 kN/m²を考慮した。杭長は20mで、支持地盤への根入れ長さは簡単のため一律2mとした。

杭資材は普通コンクリートおよび鉄筋である。コンクリートの設計基準強度 F_c はRC-1、RC-4、RC-5共通で32N/mm²とした。長期許容応力度($F_c/4$)は8N/mm²である。鉄筋比は杭上部5d(d：軸部径)の長さで1.0%、それ以降で0.4%とした。

杭径はφ800mm以上とし、100mmピッチで鉛直荷重に対して最小となる径を求めた。

(2) 拡底杭 (RC-4, RC-5)

拡底部径は拡底率(=有効拡底断面積/軸部断面積；有効拡底部径＝拡底部径－100mm)が3に最も近い径を100mmピッチで設定した。拡底部の体積は、図4に従って算定した。拡底部の周面抵抗は無視している。その他の算定条件は、RC-1と同じである。

鉛直荷重に水平荷重も加えて縁応力が短期許容応力度以内に収まるように、杭頭から5d(d：軸部径)の長さを、RC-4ではコンクリ

ートで拡頭しRC-5では軸部径を変えずに鋼管巻きとした。

RC-4およびRC-5の鉄筋コンクリート部は、水平検討では鉄筋は無視し、コンクリートの剛性、耐力のみ考慮した。コンクリートの短期許容応力度($2/4 \times F_c$)は16N/mm²である。RC-5で鋼管は高炉材(SKK490)とした。曲げ剛性は鋼管コンクリートとしての等価剛性としたが、短期許容曲げモーメントは簡単のため鋼管部とコンクリート部の単純和とした。

図4 拡底部の体積の算定方法

5.2 算定結果

表7に、鉛直+水平力を考慮して設計した杭と、杭の各構成資材に表4の原単位を乗じて算出したCO₂排出量の一覧を示す。図5に建物階数とCO₂排出量の関係を示す。

表7 場所打ちコンクリート杭の算定結果一覧(V+H)

建物階数	杭位置	表層N値 5					表層N値 10					表層N値 20				
		杭の軸径 (mm)	拡底部径 (mm)	D_0 [t] (mm)	CO ₂ (ton)	RC-1に対する比	杭の軸径 (mm)	拡底部径 (mm)	D_0 [t] (mm)	CO ₂ (ton)	RC-1に対する比	杭の軸径 (mm)	拡底部径 (mm)	D_0 [t] (mm)	CO ₂ (ton)	RC-1に対する比
RC-1	5	中杭	1600	—	—	—	1600	—	—	204	—	1600	—	—	204	—
		側杭	1100	—	—	—	1100	—	—	—	—	1100	—	—	—	—
		隅杭	800	—	—	—	800	—	—	—	—	800	—	—	—	—
	10	中杭	2200	—	—	—	2200	—	—	413	—	2200	—	—	413	—
		側杭	1600	—	—	—	1600	—	—	—	—	1600	—	—	—	—
		隅杭	1100	—	—	—	1100	—	—	—	—	1100	—	—	—	—
RC-4	5	中杭	2900	—	—	—	2800	—	—	—	—	2800	—	—	—	—
		側杭	2000	—	—	—	2000	—	—	662	—	2000	—	—	662	—
		隅杭	1400	—	—	—	1400	—	—	—	—	1400	—	—	—	—
	10	中杭	900	1700	1100	120	900	1700	1000	119	0.58	900	1700	1000	119	0.57
		側杭	800	1500	900	0.59	800	1500	900	0.58	—	800	1500	—	—	—
		隅杭	800	1500	—	—	800	1500	—	—	—	800	1500	—	—	—
RC-5	5	中杭	1300	2400	1500	191	1300	2400	1500	187	0.45	1300	2400	1400	179	0.43
		側杭	900	1700	1300	0.46	900	1700	1200	0.45	—	900	1700	1100	—	—
		隅杭	800	1500	1100	—	800	1500	1100	—	—	800	1500	1000	—	—
	10	中杭	1800	3200	2000	346	1800	3200	1900	331	0.50	1700	3200	1800	307	0.46
		側杭	1200	2200	1700	0.51	1200	2200	1600	0.50	—	1200	2200	1500	—	—
		隅杭	800	1500	1500	—	800	1500	1400	—	—	800	1500	1300	—	—

図5 建物階数とCO₂排出量の関係(N値10の一次近似を併記)

(1) 直杭 (RC-1)

表7より、杭基礎全体としてのCO₂排出量は、建物階数が5、10階では R_a が支持力度の上限値で決まったため表層N値によらず一定となった。20階では中杭の R_a が式(3)で決まったため、周面抵抗の小さい表層N値5で杭径が若干大きくなりCO₂排出量も増えた。なお、 R_a は杭体強度に対しては十分余裕があった。

また、値は載せていないが、鉄筋による CO₂ 排出量はコンクリートの 1 割弱であった。

(2) 拡底杭 (RC-4, RC-5)

表 7 中で D₀ は拡頭径、[t] は鋼管厚を示す。CO₂ 排出量の RC-1 に対する比率は RC-4 で 0.43～0.59, RC-5 で 0.44～0.60 となっており、拡頭と鋼管巻きの差は殆ど見られない。また、N 値が大きくなって水平地盤反力係数が大きくなるほど、RC-4 では拡頭径が小さくなり、RC-5 では鋼管厚が薄くなり CO₂ 排出量が減少している。この傾向は、建物階数が 20 階で顕著である。建物階数が 5 階では拡底杭のケース(RC-4, RC-5)で殆ど CO₂ 排出量の違いが見られなかったが、これは最小径を φ800mm としたことが関係していると考えられる。

6. 杭種による比較検討

図 6 に、N 値が 10 で、鉛直荷重のみを考慮した場合の建物階数に対する各杭種の工法ごとの CO₂ 排出量の算定結果と近似式を示す。杭種に関わらず同程度の数値になっており、相対評価のための杭と比較して、評定杭、拡底杭は CO₂ 排出量が 50%程度になっている。また、建物階数と CO₂ 排出量の関係は一次関数で良く近似できている。N 値が 5, 20 のときも同様の傾向であることを確認している。

図 7 に、全杭種の鉛直荷重と、鉛直+水平荷重のときの CO₂ 排出量の比を示す。各杭種とも比率は 1.0～1.2 に収まっており、また、建物階数にはほとんど依存しない結果となっている。

図 6 CO₂ 算定評価式の例 (N 値 10, 鉛直荷重)

図 7 鉛直荷重と鉛直+水平荷重の CO₂ 排出量比率

表 8 に、中杭、側杭、隅杭の負担面積比と、N 値 10 で、10 階建てのときの各杭種での CO₂ 排出量比率の平均と標準偏差を示す。鉛直+水平荷重の場合と鉛直荷重で差がほとんどなく、概ね各箇所の杭の負担面積比となっており、工法の違いによるばらつきは小さい。なお、これらの傾向は N 値が 5, 20 のときも同様で、階数が多いほど各杭位置でのばらつきが小さくなることを確認している。

表 8 は、CO₂ 排出量が建築面積に比例することを示している。よって、ケーススタディで用いたモデルにおいて単位面積あたりの CO₂ 排出量が算定できる。また図 6 より、任意階数の CO₂ 排出量の算定が可能であることから、検討対象の杭について、任意建築面積、任

意階数の建物の CO₂ 排出量が概算できる。

また、鉛直+水平荷重で設計された杭の CO₂ 排出量を考える場合、鉛直荷重のみ考慮した杭の CO₂ 排出量を 1.2 倍することで上限値を算定できるため、支持力算定式で一次設計時の CO₂ 排出量を概算することができる。

表 8 杭位置による CO₂ 排出量比率 (%) (N10-10F)

階数	荷重	各杭種の平均			各杭種の標準偏差		
		中杭	側杭	隅杭	中杭	側杭	隅杭
鋼管杭	V	40.3	49.6	10.2	1.0	0.6	1.0
	V+H	39.6	49.8	10.6	0.4	0.4	0.7
既製コンクリート杭	V	39.4	51.2	9.4	2.1	1.2	0.7
	V+H	38.9	51.2	9.9	2.6	1.3	1.6
場所打ちコンクリート杭	V	39.4	48.7	11.9	2.1	2.5	3.0
	V+H	38.6	46.9	14.5	0.3	0.0	0.2
負担面積比		40.0	50.0	10.0	—	—	—

7. 施工および運搬時の CO₂ 排出量検討

杭施工時の CO₂ 排出量の検討を行う。検討の目的は下記の通りである。

- ・杭資材製造時との相対比較
- ・建物階数, N 値, および杭種工法に対する傾向の把握

7.1 検討対象

- ・運搬, 施工時の CO₂ 排出量については、電気の使用もあるが、車両および重機等の燃料である軽油に比較して小さいと考えられる¹⁰⁾ことから、ここでは軽油のみを対象とした。
- ・運搬にかかる CO₂ 排出量は重機の運搬および、鋼管杭、既製コンクリート杭については工場と建設地までの杭の運搬、場所打ちコンクリート杭は鉄筋の運搬とし、それぞれ往復の距離で算定した。場所打ちコンクリート杭に係る生コンの運搬は施工に含まれるとした。

7.2 条件設定

(1) 運搬距離

- ・場所打ちコンクリート杭に用いる生コンの運搬に関して、生コンプラントまでの距離を 5km とした。
- ・S-4 を除いて、残土が発生する場合、処分場までの距離を 20km とした。
- ・鋼管杭および既製コンクリート杭の製造工場までの距離を 20km とした。

(2) 施工能率

- ・1 日の実質の作業時間 6h
- ・鋼管杭、既製コンクリート杭 100m/日
- ・場所打ちコンクリート杭の施工 60m³/日

(3) 重機, 運搬車両¹¹⁾

- ・重機は共通とし、杭打ち機 (燃料消費率 90ℓ/h), クレーン 35t (同 210ℓ/h), プラントゼネレータ (同 900ℓ/h), バックホウ (40ℓ/h) を用いた。
- ・杭運搬車両は 10t トレーラー (燃料消費率 17.90ℓ/h) とし、杭は幅 2m, 2 段まで積載できるとした。

7.3 CO₂ 排出量算定例

場所打ちコンクリート杭のアースドリル工法を例に CO₂ 排出量を算定した結果を示す。なお、軽油の CO₂ 原単位は 2.64kg/ℓ⁸⁾である。

表 9 に施工に用いた重機、表 10 に 1 日あたりの CO₂ 排出量を示す。

表 9 工事種別と使用重機および台数

工事種別	使用重機	台数(台)
①掘削工事	アースドリル杭打ち機	1
②掘削工事	クレーン 35t	1
③掘削工事	プラントゼネレータ	1
④生コン打設	4.5m ³ トラックミキサー	60(m ³)×1.08/4.5(m ³)=15
⑤掘削残土搬出	10t ダンプトラック	60(m ³)/6.7(m ³ /台)=9
⑥残土場内移動	バックホウ	1

表 10 1 日あたりの工事種別ごとの軽油の量および CO₂ 排出量

工事	使用する軽油の量(ℓ/日)	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)
(1) 工事①	9(ℓ/h)×6(h)=54	54(ℓ)×2.64(kg/ℓ)=143
(2) 工事②	21.0(ℓ/h)×6(h)=126	126(ℓ)×2.64(kg/ℓ)=333
(3) 工事③	90	90(ℓ)×2.64(kg/ℓ)=238
(4) 工事④	5(km)×2×0.4(ℓ/km)×15(台)=60	60(ℓ)×2.64(kg/ℓ)=158
(5) 工事⑤	20(km)×2×0.4(ℓ/km)×9(台)=144	144(ℓ)×2.64(kg/ℓ)=380
(6) 工事⑥	4(ℓ/h)×6(h)=24	24(ℓ)×2.64(kg/ℓ)=63

一日あたりの CO₂ 排出量は(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)で 1,315kg-CO₂ となった。これに作業日数を乗じると施工時の全 CO₂ 排出量が算定できる。

7.4 運搬、施工時の CO₂ 排出量と考察

図 8 階数、N 値による CO₂ 排出量の比較(場所打ちコンクリート杭)

図 9 施工時の CO₂ 排出量の比較

図 8 に、場所打ちコンクリート杭について、N 値および階数による CO₂ 排出量を比較したものを示している。RC-1、RC-4 両者とも N 値による差はほとんどなく、階数に比例して CO₂ 排出量が多くなる結果となった。

図 9 に杭種、工法について N5-20F と N20-5F の場合の施工時の CO₂ 排出量を比較したものを示している。絶対量は異なるものの、傾向は N5-20F と N20-5F で似通っている。相対的に鋼管杭施工時の CO₂ 排出量が小さい結果である。また、評定杭、拡底杭の CO₂ 排出量の低減効果が確認できた。

図 10 に、N 値 10 の地盤に建つ 10 階建て建物の運搬、施工および資材の CO₂ 排出量算定結果を示す。図中の数字は CO₂ の総排出量で

ある。評定杭、拡底杭の CO₂ の総排出量は相対比較の杭の 50%程度以下になっている。

また、いずれの杭においても資材の割合が CO₂ 総排出量 90%以上を占めており、檀野等の結果¹⁾と整合している。

図 10 運搬・施工・資材の CO₂ 排出量(N10-10F)

8. 結論

杭資材製造、施工、運搬に関して CO₂ 排出量の定量評価を行い、以下の結果が得られた。

- ・ 評定杭、拡底杭における杭資材の CO₂ 排出量は相対比較のため設定した杭の 50%程度となり、環境負荷低減に貢献していることを確認した。
- ・ 杭資材の CO₂ 排出量は建物階数に対して一次関数で近似できること、支持力算定式で杭資材の CO₂ 排出量が概算できることを示した。
- ・ 施工、運搬の際の CO₂ 排出量は資材製造に比べ 1 割以下の値であった。また、評定杭、拡底杭は施工、運搬に関しても相対比較のために設定した杭に比較して低減していることを確認した。

本報において、資材を減らすことによる CO₂ 排出量低減効果が大きいことが示された。これは既存杭の有効利用により新設杭を減らすことで CO₂ 排出量低減に大きく貢献できることを示すものである。

謝辞

本報は、(社)建築業協会地盤基礎専門部会・環境 WG で実施した検討結果をまとめたものであり、専門部会において貴重な意見を頂きました。記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 檀野裕輔, 八尾眞太郎, 榊井健(2003): 人間の労働波及を考慮した環境負荷評価法 -杭基礎への適用-, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.405-406
- 2) 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(2008): ケーススタディによる基礎杭の CO₂ 排出量の検討(その 1~4), 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.457-464
- 3) 佐野大作, 小川敦, 桂豊, 堀田洋之, 青島一樹, 椿原康則, 伊勢本昇昭, 西正晃, 中川太郎(2009): ケーススタディによる基礎杭の CO₂ 排出量の検討(その 5,6), 日本建築学会学術講演梗概集 (投稿中)
- 4) 日本建築学会(2004): 建築物荷重指針・同解説
- 5) 日本建築学会(2001): 建築基礎構造設計指針
- 6) 大貫博史, 寺崎滋樹(2000): 中掘り鋼管杭工法の現状と施工事例, 基礎工, Vol. 28, No. 12, pp. 60~64
- 7) 建築構造設計指針(2001): 東京都建築構造行政連絡会監修, 東京都建築士事務所協会
- 8) 日本建築学会(2006): 建物の LCA 指針
- 9) 既製コンクリート杭の施工管理: (社)コンクリートパイル建設技術協会
- 10) 建築業協会(2003): 既存杭利用の手引き
- 11) 日本建設機械化協会(1998): 建設機械等損料算定表

[2009 年 2 月 19 日原稿受理 2009 年 5 月 15 日採用決定]