

3. UCAS 工法およびエコセメントのコンクリート構造部材への適用に関する基礎的研究

井上 武

1. 目的

近年、環境問題への関心の高まりからエコセメントが注目されている。エコセメントとは、都市ゴミなどの焼却灰や下水汚泥に含まれる塩素等は除去し、ダイオキシンなどの有害物質は高温分解することで製作されるセメントであり、製作段階で廃棄物を一切出さない環境負荷低減型セメントである。しかしながらこのエコセメントは塩素含有量が高く、特に速硬形エコセメントは耐食性材料との組合せや無筋コンクリートでしか利用できず、鉄筋とは不適である。

そこで、著者らが提案する UCAS 工法と組合せることで、環境に適した新しい構造部材の創生が考えられる。この UCAS 工法とは、*Uni-directional Carbon-fibers Assembly System* の略称であり、連続炭素繊維を樹脂などで部分的に硬化し、繊維素線の平行弦集合ケーブルをコンクリート部材の補強筋として自動配筋ロボットにより設置する工法である。また、これまでの研究により、曲げ挙動は RC 理論を準用できることなどがわかっている。

ところで、連続炭素繊維をコンクリート部材の補強筋として用いる場合、同繊維は高強度であるため、コンクリートも高強度である方が力学的に有利である。そこで本研究ではまず、高強度エコセメントの配合を決定した。次に、鉄筋比に着目したエコセメントおよび普通セメントを用いてコンクリートはりを作製し、その曲げ挙動を比較、検討した。

加えて、UCAS 工法により製作されたはり特有の曲げ挙動について FEM 解析を行うことで、その挙動の解明と既存の設計法の妥当性を検討した。

表 - 1 打設時の結果と圧縮強度(45N/mm²)

(A) <Step-1>

W/C (%)	添加率		スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度平均 (N/mm ²)			
	SP	AE			4日	7日	14日	28日
35	1.20%	0.5A	20.0	3.4	42.0	50.0	61.5	67.6
40	0.80%	0.2A	15.5	4.9	43.8	43.8	55.4	56.8
45	0.75%	0.2A	21.0	5.8	36.7	36.7	44.7	48.3

A:C×0.003%

(b) <Step-2>

W/C (%)	添加率		スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)			
	SP	AE			4日	7日	14日	28日
35	1.20%	0.5A	19.4	2.3	48.5	55.7	63.4	64.0
40	0.80%	0.2A	20.5	5.0	39.0	43.6	53.0	55.7
45	0.75%	0.2A	21.4	3.9	30.2	35.3	44.1	48.0

A:C×0.003%

2. 内容

2.1 配合選定

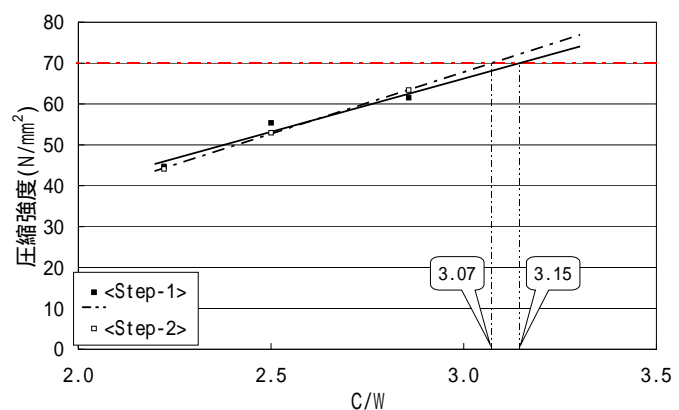
2.1.1 概要

まず 45N/mm²(14 日)の配合選定を行った。その結果と圧縮強度 - セメント水比(C/W)関係を表 - 1, 図 - 1 に示す。

この結果から、70N/mm²を発揮する C/W は 3.1 程度であることが分かる。そこでまず、配合選定を 2 回に分けて行い、<Step-1>では目標強度を発現する水セメント比(W/C)について、<Step-2>では施工性について検討した。

<Step-1>

目標スランブ 18cm, 目標空気量 4.5 ± 1.5% 程度とし, C/W=3.1 を挟むように, C/W=2.5, 3.0, 3.5 の 3 種類で配合を行った。なお, 今回の配合は JASS5 による建築の調合で

図 - 1 圧縮強度 - C/W 関係(45N/mm²)

行い、また AF 剤と SP 剤は打設時に空気量の調整を行うため、適宜混入した。

その結果 C/W=3.4 程度で目標強度となることがわかった。しかしながら、C/W が高すぎると施工性に問題が生じるため、空気量 2%程度として今回の試験結果に補正を加えた。(空気量 1%減少で圧縮強度 5%増加)図 - 2 に補正後の圧縮強度 - C/W 関係を示す。これより C/W = 3.1 程度が適当であることがわかった。

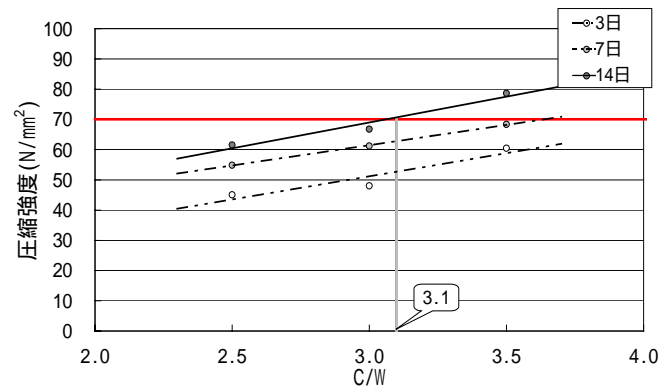


図 - 2 圧縮強度 - C/W 関係(空気量補正)

<Step-2>

<Step-1>で求めた C/W=3.1 を基にコンクリートの調合を行い、目標スランプ 18cm、目標空気量 2.0%として、選定を行った。また、打設後ある程度時間が経過しても施工性を維持しておくことが望まれるため、スランプの経時変化を確認した。

2.1.2 結果

打設時の結果と圧縮強度を表 - 2 に示す。同表から SP 剤 3.5%、AF 剤 4.0T で配合したものが施工性も良好で目標強度を達成できることがわかった。今回決定した配合を表 - 3 に示す。

2.2 曲げ試験

2.2.1 概要

鉄筋比の異なった Over および Under-Reinforced 断面のほりで行った。表 - 4 に今回使用した連続炭素繊維とセメントの物性値を示す。実験パラメータは、Over-Reinforced 断面ほりではセメント(エコセメント、普通セメント)および主筋(鉄筋、連続炭素繊維)の違いとし、UCAS 工法により製作されたエコセメントほり(E-O-34)、普通セメントほり(N-O-34)、鉄筋コンクリートほり(RC)とした。また、Under-Reinforced 断面ほりは、セメントおよび鉄筋比の違いとし、UCAS 工法を用いたエコセメントほり(E-U-44、E-U-24)および普通セメントほり(N-U-44、N-U-24)とした。表 - 5 に供試体一覧、図 - 3 に供試体概略図を示し、各供試体 2 体を作製した。主筋とせん断補強筋との交点には浸透性の良いエポキシ樹脂を交差点に塗布した後、接着部補強および機械的付着を目

表 - 2 打設時の結果と圧縮強度

W/C (%)	混和剤添加量		スランプ(cm)				空気量 (%)	施工性	圧縮強度 (N/mm ²)
	SP(C×%)	AF	0min.	15min.	30min.	60min.			
32.0	1.4	3.0T	10.0	-	-	-	2.2	×	69.6
	1.8	3.5T	19.5	7.0	4.5	-	1.8	×	71.6
	2.5	4.0T	23.0 (455×435)	16.0	12.0	-	1.3		72.3
	3.5	4.0T	(660×620)	23.0	18.0	12.0	1.1		71.8

1T=C×0.002%
()の値はフロー

表 - 3 決定した配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	空気量 (%)	セメント水比 C/W	水セメント比 W/C(%)	単用量(kg/m ³)			添加率	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AF
20	18	2.0	3.13	32.0	168	525	751	960	4.0T 3.5

1T=C×0.002%

表 - 4 連続炭素繊維とセメントの物性値

使用材料	強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)	断面積 (mm ²)
	圧縮	引張	曲げ				
連続炭素繊維	-	1680	-	230	-	1.82	0.46
エコセメント	39.2	2.49	4.24	32.4	0.20	2.40	-
	74.9	5.10	9.70	41.7	0.19	2.50	-
普通セメント	37.5	3.00	4.68	28.6	0.20	2.30	-
	64.3	4.90	7.40	40.7	0.19	2.40	-

表 - 5 供試体一覧

種類	供試体名	セメント	断面	主筋		補強筋比 (%)
				種類	断面積 (mm ²)	
エコセメント はり	E-0-34	エコ	Over	連続 炭素繊維	62.6(34)	0.60
	E-U-44		Under		40.5(44)	0.23
	E-U-24		Under		22.1(24)	0.13
普通セメント はり	N-0-34	普通	Over	連続 炭素繊維	62.6(34)	0.60
	N-U-44		Under		40.5(44)	0.23
	N-U-24		Under		22.1(24)	0.13
RCはり	RC		Over	鉄筋	220	2.10

(): フィラメント数

的として粘性の高いエポキシ樹脂を塗布した。ここで、このような方法で主筋とせん断補強筋の交差部を固定することをグリッドシステムと称する。

荷重方法は、Over-Reinforced 断面はりはスパン 1400mm，荷重幅 500mm で、Under-Reinforced 断面はりはスパン 1400mm，荷重幅 300mm で 2 点線荷重とした。

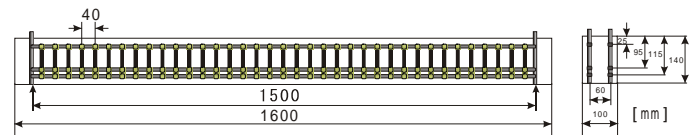
また、実験値および既存の設計法の妥当性を検討するため、2 次元 FEM 解析を行った。

2.2.2 結果

表 - 6 に耐力評価、図 - 4 に各シリーズの荷重 - 変位関係と FEM の解析値を示す。同表より E-U シリーズおよび N-U-24 以外の終局耐力は、計算値とほぼ一致していた。また FEM は、E-U シリーズ以外は全て最大荷重が実験値とほぼ同様の値となった。

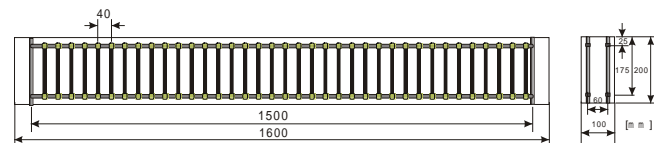
同図より、Over-Reinforced 断面はりはこれまで見られたような最大耐力前の荷重の増減はなく、終局耐力の計算値を満たしていること、FEM でも挙動を追えていることから、グリッドシステムによる付着特性が良好に機能したものと考えられる。

Under-Reinforced 断面において、E-U シリーズで終局耐力の実験値の方が 5 割程度高かったのは、せん断補強筋間隔が密であったため、主筋の硬化割合が大きくなったためである。

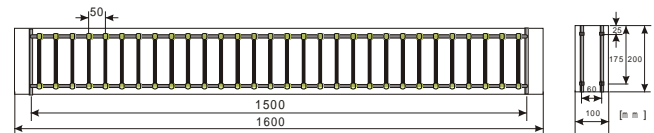


E-0-34, N-0-34, RC

(a) Over-Reinforced 断面はり



(1) E-U-24, E-U-44



(2) N-U-44, N-U-44

(b) Under-Reinforced 断面はり

図 - 3 供試体概略図

表 - 6 耐力評価

供試体名	終局耐力 (kN)			実験値	
	実験値	FEM	計算値	FEM	計算値
E-0-34	32.4	37.5	33.4	0.86	0.97
	38.3			1.02	1.15
E-U-44	57.9	43.9	37.8	1.32	1.53
	65.4			1.49	1.73
E-U-24	36.7	32.0	24.8	1.15	1.48
	34.3			1.07	1.38
N-0-34	34.7	36.2	32.2	0.96	1.08
	36.3			1.00	1.13
N-U-44	39.0	42.9	38.0	0.91	1.03
	39.2			0.91	1.03
N-U-24	21.8	31.9	25.5	0.68	0.85
	21.6			0.68	0.85
RC	36.5	30.4	30.6	1.20	1.19
	36.0			1.18	1.18

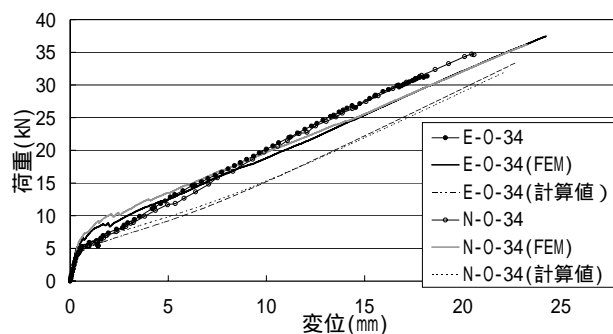
今回の FEM モデルは、主筋とコンクリートは完全付着であるが、UCAS 工法特有と考えられていた荷重の増減が再現でき、応力のコンター図で確認したところ、ひび割れが急激に進展する減少が見られた。これよりこの荷重の増減は、これまで考えてきたグリッドシステムの破壊による付着切れだけでなく、補強筋比が小さい場合、ひび割れ発生時に主筋へ引張力が急激に作用し、所定の引張力を負担できない可能性が考えられる。硬化割合が上昇したと考えられる E-U は、実験値より主筋の引張強度を逆算して FEM モデルに組み込んだところ、ある程度正確な挙動を捉えていた。

2.3 設計に関する検討

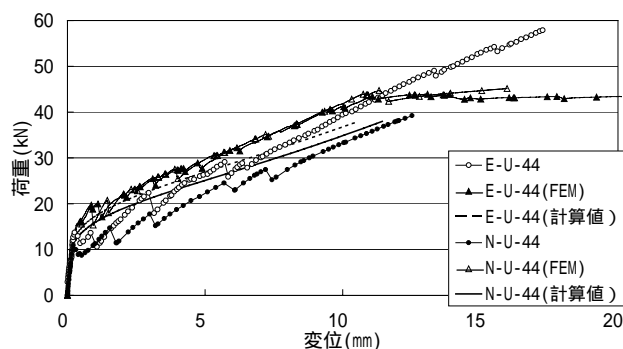
今回の曲げ試験の結果および FEM から、グリッドシステムが完全に機能しており、完全付着の状態ならば、曲げに対する設計は RC 理論における終局限界状態の設計法が適用できることがわかった。また、N-U-24 で最大耐力が計算値よりも低かったのは、最大耐力到達前にグリッドが破壊し付着切れを起こしたため、最大荷重到達前に起きる荷重の減少が大きくなったためだと考えられる。

3. 結論

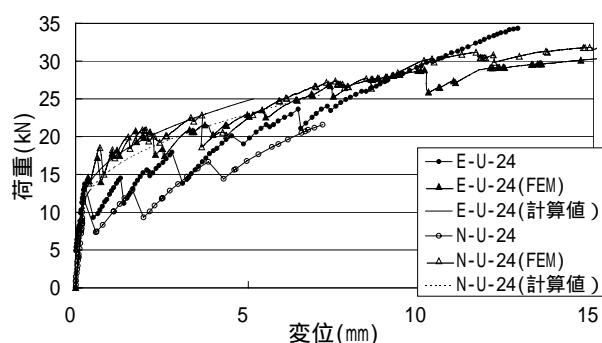
- ・エコセメントは高強度でも普通セメントと同様の挙動を示しており、高強度配合でも十分に使用でき、かつ普通セメントと同等に扱ってもよいことがわかった。
- ・Over-Reinforced 断面はりでグリッドシステムが良好であれば、荷重の増減は起こらないと考えられる。また、このグリッドの破壊により最大耐力到達前に荷重の増減が現れると考えてきたが、FEM の結果から補強筋量が鉄筋と比較して極めて小さいため、引張筋がひび割れ発生時に作用する急激な引張力を負担できないことも原因であると考えられる。
- ・グリッドシステムが良好ならば RC 理論を準用できることがわかった。その際、連続炭素繊維は繊維素線の集まりであるため、特別な手法が必要である。
- ・曲げに対する設計法はある程度確立されたと考えられるが、その他、疲労などについてはいまだ説明できておらず今後検討する必要がある。また、RC 理論を準用できる設計法はグリッドシステムが完全に機能していると仮定しているため、そのメカニズムをさらに解明する必要がある。



(a) Over-Reinforced 断面はり



(1) E-U-44, N-U-44



(2) E-U-24, N-U-24

(b) Under-Reinforced 断面はり

図 - 4 荷重 - 変位関係