

高性能 590N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管の構造性能

その1 機械的性質と溶接部性能

正会員 ○伊藤 大樹^{*3} 西澤 淳^{*4} 鈴木 一介^{*2}
正会員 二階堂 真人^{*1} 有田 政樹^{*1} 平山 博巳^{*1}

冷間成形 角形鋼管 TMCP
機械的性質 溶接部性能

1. はじめに

本報は、原板に TMCP 鋼板を用いた高性能 590N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管の性能について、その1で機械的性質と溶接部性能、その2で実大曲げ実験の結果を記したものである。その1は平板部及び角部について、母材及び通しダイアフラム溶接継手の引張試験、硬さ試験、シャルピー衝撃試験の結果について報告をする。

2. 母材の化学成分と機械的性質

試験材は板厚 t=32, 50, 60mm の冷間プレス成形角形鋼管で、角部の外側曲げ半径は一般的な建築構造用冷間プレス成形角形鋼管と同じく板厚の3.5倍である。

試験材の化学成分およびその規格を表1に示す。SA440¹⁾と比べて、TMCPによって強度は同等のまま炭素量を抑え、溶接割れ感受性組成(P_{CM})を低減して、予熱なしとできるなど溶接性を向上している。

試験材の平板部および角部の引張試験結果およびその規格を表2に示す。なお、表2においては、試験片形状は、板厚が32mmを超える場合はJIS Z 2241 4号、板厚32mm以下の場合には平板部にJIS Z 2241 1A号、角部にJIS Z 2241 14B号を用いた。角部は冷間加工の影響を受け、平板部に比べ降伏点、引張強さとも上昇している。丸棒試験片を用いたT60, T50の方が全厚試験片を用いたT32より若干強度が高いのは、板厚の大きなTMCP鋼板において表層側ほど強度が高い傾向があり、角部は冷間加工による加工硬化も表層側ほど大きいためである。

シャルピー衝撃試験の採取位置を図1に、試験結果を図2、表3に示す。ここで、試験片形状はJIS Z 2242のVノッチ試験片とし、図1に示すように、外表面から6mm内側の位置を中心とし、管軸方向を長手方向とする断面ノッチとした。冷間加工を受ける角部のシャルピー吸収エネルギーは、平板部に比べて下がる傾向にはあるものの、いずれの試験体も平板部、角部ともに試験温度0℃において試験片3片の平均で200Jを超えていることを確認した。

3. 溶接部性能確認試験

3.1 試験計画

試験体は角形鋼管一通しダイアフラムの溶接継手とし、通しダイアフラムには590N/mm²級鋼のC材を、溶接材料には690N/mm²級溶接材料(JIS Z 3312:2009 G69A2UC3MIT相当)を使用し、予熱なし、入熱30kJ/cm

表1 化学成分

試験体	断面 D _外 (mm)	C	Si	Mn	P	S	N	C _{eq}	P _{CM}
T60	□700x60	0.08	0.27	1.55	0.012	0.003	0.004	0.42	0.18
T50	□600x50	0.08	0.26	1.54	0.012	0.003	0.003	0.41	0.18
T32	□450x32	0.09	0.22	1.57	0.008	0.003	0.003	0.37	0.19
F32	□450x32	0.09	0.22	1.55	0.007	0.002	0.004	0.36	0.18
規格		≤0.12	≤0.55	≤1.60	≤0.020 (B種)	≤0.008	≤0.006	≤0.44(t≤40mm) ≤0.47(t>40mm)	≤0.22

*1: C_{eq}=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14

*2: P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

表2 機械的性質

試験体	平板部					角部			
	試験片	YP or YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	YR (%)	試験片	YP or YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR (%)
T60	4	484	622	30.6	78	4	704	761	92
T50	4	482	644	31.9	75	4	707	776	91
T32	1A	455	626	23.5	73	1B	663	746	89
規格	—	440≤ ≤540	590≤ ≤740	26≤(t≤40mm) ^{*1} 20≤(t>40mm) ^{*2}	≤ 80	—	—	—	—

*1: JIS Z 2241 5号試験片

*2: JIS Z 2241 4号丸棒試験片(板厚の1/4位置が中心になるよう採取)

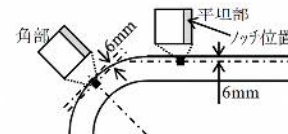


図1 シャルピー衝撃試験片採取位置

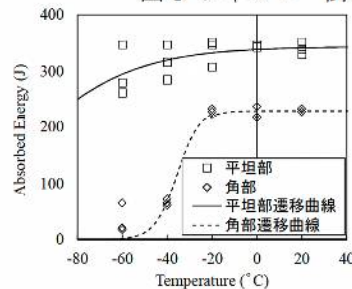


図2 遷移曲線(T60)

表3 母材のシャルピー衝撃試験結果(単位: J, 0℃, 3片の平均値)

	平坦部	角部
T60	344	225
T50	264	204
T32	336	273

以下、パス間温度250℃以下の管理でロボット溶接した。試験体の溶接施工記録を表4、T60の積層図と入熱、パス間温度の履歴を図3に示す。T60試験体のパス間温度は20パス目以降管理上限値に張り付いている。

この試験体を用いて、溶接部の断面マクロ観察、硬さ試験、引張試験、シャルピー衝撃試験を行った。硬さ試験の測定位置は図4(a)に示すように外表面から2mm内側の位置とし、試験力は98Nとした。溶接金属および溶接

継手の引張試験の試験片形状はそれぞれ JIS Z 3111 A2 号, JIS Z 3131 4 号相当とし, 溶接金属引張試験片は平板部の図 4(b)に示す位置から, 溶接継手引張試験片は平板部と角部から製作した。シャルピー衝撃試験の試験片の採取位置は図 4(c)に示すように外表面から 6mm 内側の位置を中心とし, ノッチ位置は溶接融合線(FL), 溶接金属中央位置(WM), FL から HAZ 側に 1mm 進んだ位置(FL+1mm)の 3 種類とし, それぞれのノッチ位置で 3 片試験を行った。

3. 2 試験結果

写真 1 に平板部の溶接継手の断面マクロ観察結果を示

表 4 溶接施工記録

試験体	最大入熱(kJ/cm)		最大パス間温度(°C)		パス数
	実績	管理値	実績	管理値	
T60	27.9	≤30	256	≤250	40
T50	30.4		218		30
T32	28.0		205		15

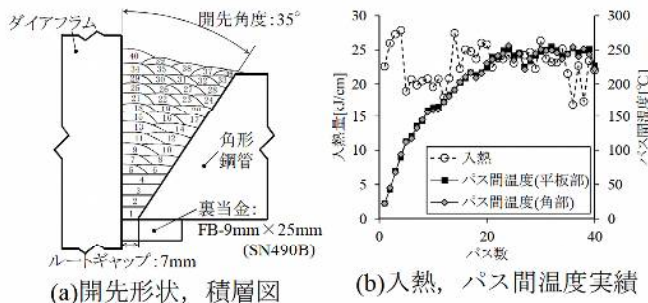
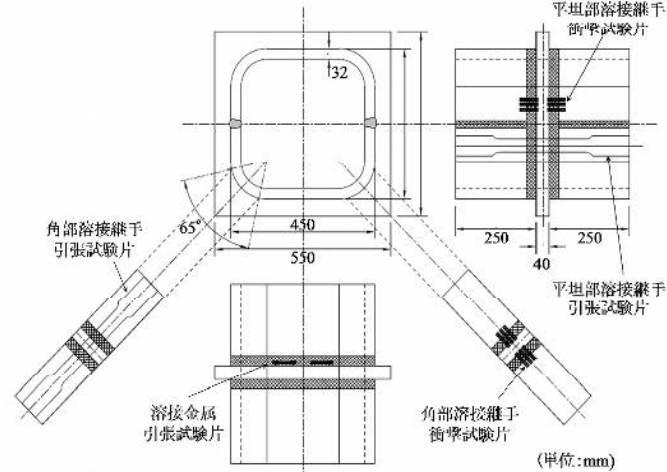
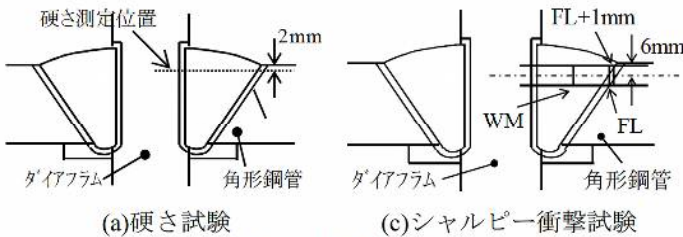


図 3 溶接施工記録(T60)



(b)試験片採取方法



(a)硬さ試験 (c)シャルピー衝撃試験

図 4 試験片採取要領

す。写真 1 からは, 欠陥はなく, 溶け込みも良好であることが確認できる。

図 5 に溶接部のビッカース硬さ試験結果を示す。溶接継手の硬さの最大は 350 を下回っている。

図 6 に引張試験結果を示す。試験体角部において溶接金属の引張強さは母材角部の引張強さを下回る一方で, 十字継手の引張強さは, 母材角部の引張強さと同等であることが確認できる。

表 6 に試験温度 0°C での溶接部の衝撃試験結果を示す。ここで, 表 6 中の数値は衝撃試験片 3 片の平均値を示している。T60 試験体の HAZ のシャルピー吸収エネルギーは 3 片の平均値で平板部・角部ともに 140J を上回っており, T32, T50 試験体との差は殆どない。

4. まとめ

高性能 590N/mm² 級冷間プレス成形角形鋼管の母材および溶接部性能を確認した。母材は高い靱性を有すること, 溶接継手は予熱なしで一般的なロボット溶接の管理値上限で施工しても有害な硬化はなく, 靱性, 引張強さも規格値に対し十分であることを確認した。

参考文献

[1]日本鉄鋼連盟: 日本鉄鋼連盟製品規定 MDCR0013-2004 建築構造用高性能 590N/mm² 級鋼材 (SA440), 2015 年 3 月

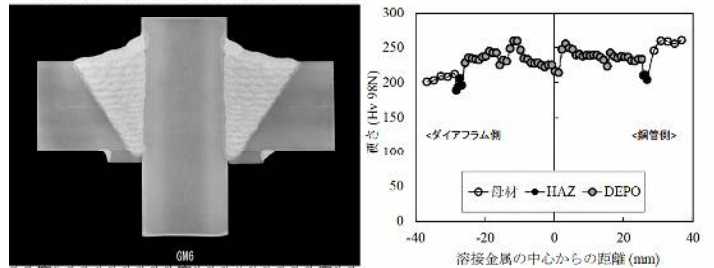
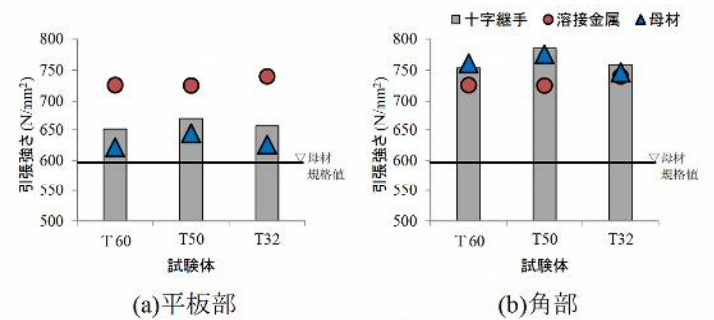


写真 1 断面マクロ観察結果

図 5 硬さ試験結果(160)



(a)平板部

(b)角部

図 6 引張試験結果

表 6 溶接部のシャルピー衝撃試験結果 (単位: J, 0°C)

試験体	柱-ダイアフラム継手				
	平板部			角部	
	FL+1mm	FL	WM	FL+1mm	FL
T60	239	142	75	187	120
T50	-	-	-	177	136
T32	-	-	-	184	174

*1 新日鐵住金 鋼構造研究部
*2 新日鐵住金 建材開発技術部
*3 日鐵住金建材
*4 角藤

*1 Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp. Steel Structures Research Lab.
*2 Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp. Construction Products Development Div.
*3 Nippon Steel & Sumikin Metal Products CO.,LTD.
*4 KAKUTO Corp.

高性能 590N/mm²級冷間プレス成形角形鋼管の構造性能 その2 実大曲げ実験

正会員 ○有田 政樹*¹ 二階堂 真人*¹ 平山 博巳*¹
正会員 伊藤 大樹*³ 西澤 淳*⁴ 鈴木 一弁*²

冷間成形 角形鋼管 変形性能
通しダイアフラム TMCP 延性き裂

1. はじめに

その2には、引張強さ 590N/mm²級、板厚 32~60mm の TMCP 鋼板を用いた冷間プレス成形角形鋼管の通しダイアフラム形式接合部の耐力及び変形性能を、実大 3 点曲げ実験により検証した結果を記す。曲げ実験に用いた材料の化学成分、機械的性質はその 1 に示すとおりである。

2. 実験計画

試験体は、外径 $D=450\sim 700\text{mm}$ 、板厚 $t=32\sim 60\text{mm}$ の全 4 体とする (表 1)。幅厚比は平板部の降伏応力度 Y_P により補正した値を記載した。 E は鋼材の縦弾性係数 (205000N/mm²)である。角形鋼管角部が最外縁となるよう 45° 方向に荷重する 3 点曲げ実験とする (図 1)。荷重振幅は、全塑性耐力計算値 ($Y_P \times$ 塑性断面係数) M_p に対応する弾性部材角 θ_p に対して、 $\pm 0.5\theta_p$ で予備荷重した後、 $2\theta_p$ 、 $4\theta_p$ 、 $6\theta_p$ 、…の変形量を正負各 2 回ずつ与える正負交番漸増繰返しとする。終局状態は破断または荷重が最大荷重の 90%以下に低下した時点とする。

試験体中央の接合部は通しダイアフラム形式とし、ダイアフラムには 590N/mm²級鋼の C 材を用いた。T60、T32 について、角形鋼管とダイアフラム溶接部の積層図を図 2 に、入熱・パス間温度の実績値を図 3 に示す。組立て溶接は YGW11 $\phi 1.2\text{mm}$ 、本溶接は 690N/mm²級溶接材料 $\phi 1.2\text{mm}$ を組み合わせて予熱なしで施工している。E32 は、T32 に対しパス間温度を 100°C 低く管理して溶接金属の強度を向上させることを狙った比較用の試験体である。図 3 に示す通り、E32 のパス間温度の実績は T32 に比べ最大で 50°C 低くなっている。

3. 実験結果

T60、T32、E32 の $M/M_p - \theta/\theta_p$ 関係を図 4 に示す。全ての試験体で $4\theta_p$ のサイクルで溶接止端部のき裂が開口しつつ板厚方向に進展し始め、 $6\theta_p$ のサイクルで延性き裂を起点に母材で破断して板厚を貫通し、同時に周方向に伝播して平板部に至り、最大耐力が決定した。

4. 考察

M_p に対する実験から得られた最大曲げモーメントの正負の小さい方の値との比 M_{max}/M_p 、最大塑性変形倍率 μ_{max} の正負の小さい方の値、及び試験体の左右のうち、破断が生じた部位の累積塑性変形倍率 η_A を表 2 に示す。 η_A は、破断が生じた点を変形限界として算定している。本実験で得られた η_A は、既往の 590N/mm²級鋼を用いた冷間プレス成形角形鋼管^[1-3]の実験結果の分布範囲と概ね同等で

表 1 試験体一覧

試験体 No.	断面 $D \times t$ [mm]	部材長さ L [m]	入熱・パス間温度管理 理値	ダイアフラム材質	荷重方向	シアスパン比	等価幅厚比	
							$E/Y_P \cdot (\phi/D)^2$	ランク
T60	□700×60	10	入熱 30kJ/cm 以下、 パス間 250°C 以下	590N/mm ² 級鋼材	45°	6.1	3.11	FA
T50	□600×50	10				7.1	2.96	
T32	□450×32	6				入熱 30kJ/cm 以下、 パス間 150°C 以下	5.5	
E32								

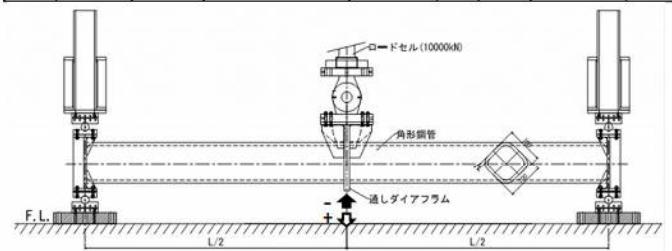


図 1 荷重セットアップ

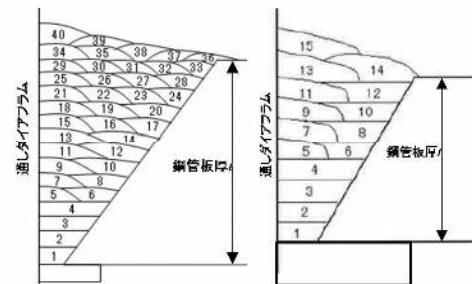


図 2 通しダイアフラム溶接部積層図(左 T60, 右 T32)

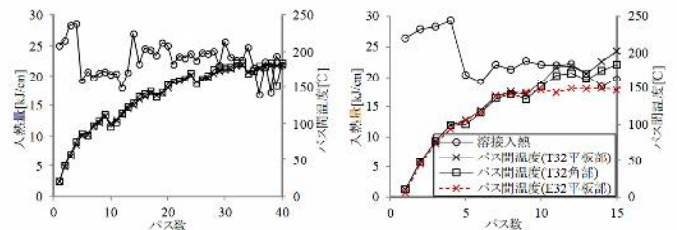


図 3 溶接入熱・パス間温度実績値(左 T60, 右 T32・E32)

あった (図 5)。T32 と E32 の η_A はほぼ同じであり、パス間温度を低くして溶接金属の強度の向上を図っても、塑性変形性能に有意な差は生じなかった。

T60、T50 の角部頂部の破断部断面マクロを図 6 に、T50 の破面を図 7 に示す。図 6 から角部溶接始端部に発生した延性き裂が母材方向に進展し、破断に至ったことがわかる。また、図 7 より角部頂部の延性き裂は最も深い位置で板厚の 1/2 まで進展している。次に微視的な破面を観察した SEM 画像を図 8 に示す。a の領域は平滑な破面

表 2 実験結果

試験体 No.	計算値*		実験結果			
	M_p [kNm]	θ_p [10 ⁻² rad]	最大耐力 上昇率 M_{max}/M_p	最大塑性 変形倍率 μ_{max}	累積塑性 変形倍率 η_A	破断 サイクル
T60	14409	1.407	1.41	6.83	25.7	6 θ_p 正側1回目
T50	8865	1.622	1.50	7.62	26.2	6 θ_p 正側1回目
T32	3147	1.179	1.50	7.75	42.7	6 θ_p 負側1回目
E32	3147	1.179	1.49	7.86	43.1	6 θ_p 正側2回目

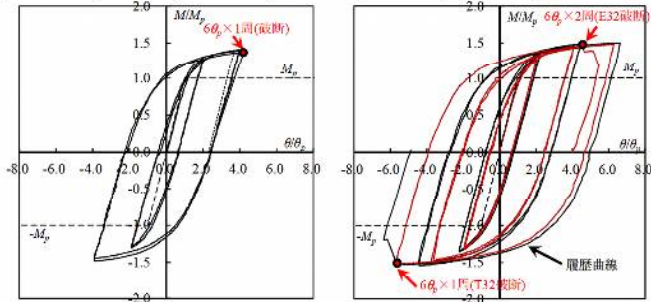


図 4 曲げモーメントと部材角の関係

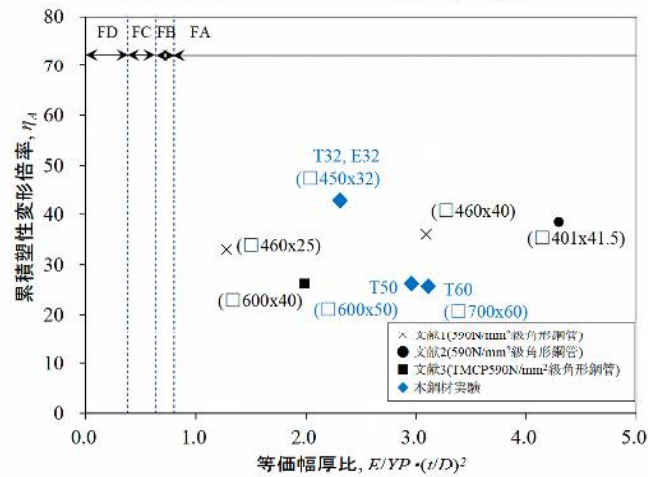


図 5 部材変形性能の比較

であることから、圧縮のサイクルで破面が潰された痕跡と考えられる。b の領域から c の領域まではディンプルが明瞭に観察され、b1 は下向き、b2 は上向きの伸長ディンプルを呈しており、面内せん断（モード II）によりき裂が生じたことがわかる。a の領域までは延性き裂が安定進展し、最終サイクルにおいて b から c の領域で延性き裂を起点とした破断が生じたことがわかる。

5. まとめ

引張強さ 590N/mm² 級の TMCP 鋼板を用いた冷間プレス成形角形鋼管の曲げ実験を行った。柱-ダイアフラム溶接部角部に発生した延性き裂は母材側に板厚の半分程度まで進展したのちに破断した。累積塑性変形倍率は、既往の 590N/mm² 級冷間成形角形鋼管と同等であることを確認した。

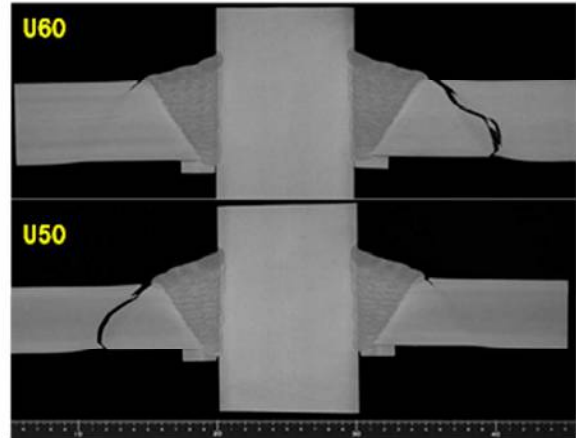


図 6 破断部マクロ (上: T60, 下: T50)



図 7 T50 破面 SEM 採取位置

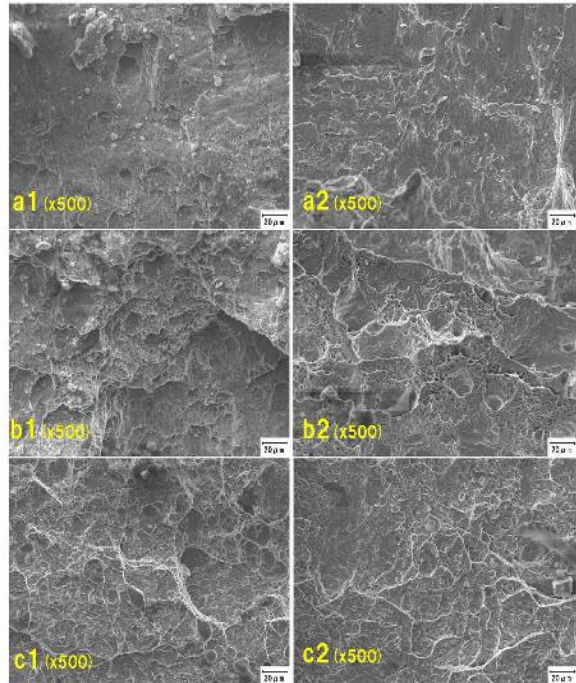


図 8 T50 破面 SEM

参考文献

[1] 中島ら：建築構造用高強度 590N/mm² 級冷間プレス成形角形鋼管の塑性変形能力に関する実験的研究, AIJ 大会梗概集, 2009.8 [2] 下川ら：590N/mm² 級角形鋼管の部材性能に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 2008.11 [3] 沖ら：TMCP 型 590N/mm² 級冷間プレス成形角形鋼管の部材性能に関する実験的研究, AIJ 大会梗概集, 2012.9

*1 新日鐵住金 鋼構造研究部
*2 新日鐵住金 建材開発技術部
*3 日鐵住金建材
*4 角藤

*1 Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp. Steel Structures Research Lab.
*2 Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp. Construction Products Development Div.
*3 Nippon Steel & Sumikin Metal Products Co., Ltd.
*4 KAKUTO Corp.