特集

超高強度鋼とその溶接技術

溶接構造用 1000N 鋼について —ペンストックおよび建築分野における 技術開発／実用状況と課題—*

有 持 和 茂**

1000MPa Strength Class Steel Plate for Welded Structures (Present State of Technical Developments and Plactical Applications for Penstocks and Steel Buildings Use)*

by ARIMOCHI Kazushige**

キーワード HT1000, 溶接構造, ペンストック, 建築鉄骨, 脆性破壊, 耐震, 溶接性

1. はじめに

構造物の素材としての鉄鋼は、その高い強度や剛性と良好な加工、施工性を兼ね備えるオールラウンドな素材として、きわめて多くの分野で広く使用されている。鉄鋼材料のより高強度化へのニーズは経済規模の拡大に伴う構造物の大型化に伴い古くから存在し、これに応じて現在では多種多様な高強度鋼が実用されている。また最近では構造物建造トータルコストの低減あるいは地球環境問題の視点からも、より以上の高強度鋼へのニーズが顕在化しており、さらには地震多発期に入った我が国では、地震時における国民生活のより以上の安全安心の確保と経済損失の極少化の観点からも、新しい耐震設計概念のもと、その積極的な適用が検討され始めている。

本稿では、現時点で溶接構造物用鋼材として実用されている鉄鋼材料としては最高の強度を有する、引張り強さ 980MPa 級の厚鋼板（以下 HT1000 と称する）の諸特性と、その実用あるいは今後の新しい適用を狙った開発活動等について紹介する。

2. 水圧鉄管（ペンストック）用 HT1000

図 1¹⁾には多様な構造物分野での使用鋼材の強度と板厚面での変遷の概要を、70 年代と 90 年代を比較して示す。いずれの分野でも高強度化、厚肉化の傾向が見て取れる

図 1 各種構造物分野における使用鋼材の高強度化、厚肉化の状況

が、特にその傾向の著しいのが水圧鉄管（以下ペンストックと称する）の分野である。この分野は図 1 からわかるように、従来からもっとも板厚の厚い、かつ高強度な鋼材を使用してきた分野である。ペンストックの概要の一例を図 2²⁾に示すように、発電規模の増大とともに、落差および管径は拡大し、増大する内圧に耐える為、使用する鋼材の板厚や強度は増加の一途をたどる。この傾向は大規模揚水式発電所の登場とともによりいっそう顕著となり、図 3³⁾に示すように、板厚 200mm を超える引張り強さ 780MPa 級鋼（以下 HT800 と称する）が、さらには海外を皮切りに、国内においても HT1000 級の鋼材を用いた大規模なペンストックが建設されるに至っている。

*原稿受付 平成 21 年 6 月 18 日

**正 員 住友金属工業(株) Member, Sumitomo Metal Industries, Ltd.

図2 ペンストック断面形状概要(例)

図3 ペンストック大容量化の状況

表1 ペンストック用 HT1000/800 鋼材, 溶接部に要求される耐脆性破壊特性

母材	0℃で脆性き裂の伝播を停止すること
溶接部	0℃で脆性破壊が発生しないこと

2.1 ペンストック用 HT1000 に必要とされる鋼材特性

我が国においては、この分野に使用される HT800 級以上の高強度鋼とその溶接部に対して、表 1⁴⁾に示す耐脆性破壊特性が要求されるが、これは構造物の安全性確保の観点からとられる、諸外国にはみられない独特の要求である。

よく知られているように、一般には鋼材の高強度化は保

図4 板厚と Ni 含有量の関係

図5 ΔT に及ぼす Ni 添加量の影響

有靱性値の低下を招き、特にこの傾向は、特性としては脆性き裂伝播停止特性が、また部位としてはその溶接部に於いてより顕著である。一方で当然ながら高強度鋼は高い作用応力のもとで使用されるのであるから、必要とされるこれらの特性もより高度なものとなるのは明らかで、この相反する状況で、構造物の安全性確保に十分な特性を具備するには高度な鋼材設計、製造技術および施工技術が必要とされる。加えて高強度鋼といえども溶接施工が適用され、かつペンストックの場合狭隘なトンネル内での現地施工が必須であるため、可能な限りの優れた溶接施工性の付与も極めて重要である。HT1000 級鋼はすでに欧州でも製造、実用されているが、上記の諸要求を満たす事を鋼材設計の最重要理念に据え、基本的に低 C、多添加元素系にて製造される低 P_{CM} タイプの我が国の高強度鋼は、より施工裕度と信頼性の高い溶接構造用鋼材とすることができよう。

2.2 ペンストック用 HT1000 鋼材設計の概要と諸特性

このような HT1000 鋼の材質設計、製造技術については多くの文献⁵⁻¹²⁾に紹介されているので、ここではそのエッセンスだけを記述する。

HT1000 級の高強度鋼の製造技術の基本は、焼き入れ焼

き戻しの熱処理であるので、まずは板厚中心まで十分な焼きの入る成分設計を基本に、板表面での焼きの入りすぎによる性能低下を防ぎ、また板厚方向各位置でできるだけ均質かつ優れた機械的性質が得られるように、これら高強度鋼の機械的性質が特に結晶粒径に敏感なことを利用して、スラブの製造や添加元素の工夫、および圧延条件の精密制御で、板厚全域にわたってきわめて細粒な金属組織を得るようにしている。もちろん熱処理タイプの高強度鋼の特性は、P、Sといった不純物元素に敏感なため、製鋼過程でこれらの徹底した低減が図られる。なお熱処理工程においても十分な焼き入れ効果を得るため、極厚鋼では多段の焼き入れプロセスが採用されることもある。

図6 HT1000のアレスト性に与えるTMCPの効果

また、特に脆性き裂伝播停止特性にはNiの効果が顕著であるが、それによる十分な特性を確保するには、図4⁵⁾に示すように、高強度鋼ほど多量の添加を必要とするので、鋼材コストの点からは高価となるものの、一方でこのNi添加は図5⁹⁾に示すように、鋼材の溶接施工性の改善に効果があるので、結局溶接施工も含めたトータルコストの観点からは、それほどのコストアップにはつながらない。

このような高強度鋼の製造においても、TMCP技術の適用により図6¹³⁾に示すように、一段の結晶粒の微細化を通じ、特に高価なNiの添加量を低減してもむしろ優れた脆性き裂伝播停止特性が得られることが判明しており、上述の溶接施工性との兼ね合いで、Niの低減をはかった経

図7 TMCPによるHT1000のアレスト性改善例

表2 HT1000 母材、溶接継手の諸特性 (例)

板厚 (mm)	化学成分(%)			母材特性				溶接性	溶接継手特性				
	C	Ni	Ceq	位置	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	vTrs (℃)	Kca@0℃ (Mpm ^{1/2})	予熱温度 (℃)	溶接法	入熱 (kJ/mm)	TS (N/mm ²)	vEr (J)
50	0.11	1.04	0.53	1/4t	927	988	-91	355	75	SAW	3.9	966	169@-10℃
				1/2t	889	962	-78						
100	0.11	2.32	0.58	1/4t	955	1017	-98	287	100	SAW	3.8	994	58@-12℃
				1/2t	925	991	-64						
150	0.13	3.90	0.66	1/4t	915	971	-106	437	75	SAW	3.6	979	99@0℃
				1/2t	907	964	-109						
200	0.11	4.89	0.67	1/4t	914	986	-101	460	100	SAW	4.0	1014	92@0℃
				1/2t	912	973	-105						

$$Ceq = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

表3 溶接条件の比較

項 目		溶接法	HT1000 (200mm厚)	HT800 (200mm厚)
仮付け 溶 接	予熱温度	SMAW	150℃	150℃
本溶接	シールドガス	GMAW	Ar+20%CO ₂	——
		SAW	150～200℃	150～230℃
	パス間温度	GMAW	同 上	——
		溶接入熱	SAW	1.8～4.0kJ/mm
	GMAW		1.0～4.0kJ/mm	——
	後熱条件	SAW	150℃×2時間	150℃×2時間
GMAW		150℃×2時間	——	

表4 ペンストックにおける高張力鋼使用による一般的効果

項 目	1次効果	2次効果
設 計	管厚の低減	岩盤負担率の増加と 管厚の低減(相乗効果)
施 工	重量の低減 溶接量の低減	仮設備の低減 工期の短縮

済性に優れた HT1000 が国内で実用化されている。

上述のような考え方を基本に我が国で製造された HT1000 鋼とその溶接部の諸特性を表 2⁵⁻¹²⁾に、また TMCP 適用による脆性き裂伝播停止特性の顕著な改善効果の例を図 7⁹⁾に示す。

表 3⁵⁾には溶接施工条件を HT800 と比較して示す。強度で約 200MPa 増加しているにもかかわらず、HT800 級鋼とほぼ同等の条件で溶接施工が可能となることがわかる。

HT1000 の適用によるペンストック建設工事全体に及ぼすメリットについては、表 4¹²⁾に示すような建設コストの低減や建設工期短縮効果に加え、さらに特に分岐管部分の合理的構造の実現による水理特性の改善を通じて、発電効率の向上も期待されるとしている。更に構造体の薄肉化、軽量化を通じて、建設工事全工程での CO₂排出抑制効果も期待できると考えられている。

このようにペンストック建設への HT1000 鋼の適用で、直接、間接に様々な効果が期待できるため、現在までに国内外で 15000 トンを超える適用実績がある。折しも地球環境問題意識の高まりの中、電力源としての水力発電の効用に期待が集まり、東南アジアを中心に大型のペンストック建設工事が多数計画されていると言われており、これらも含め、今後この分野への HT1000 鋼の適用はさらに進むものと期待される。

3. 建築鉄骨用 HT1000

最近、我が国の建築鉄骨分野では、高強度鋼の使用を前提とした、斬新な研究開発活動が活発になされるようになってきた。

よく知られているように、大規模な地震時にも建物の安全性と人命確保を目的に、法律で決められた規模以上の建物には耐震設計が義務づけられているが、その実現にあたっては、大規模地震時には架構の一部に塑性変形を許容することにより地震エネルギーを効果的に吸収し、建物の倒壊を防ぎ、もって人命を守る事を最も基本的考え方としている。従って極端に言えば、地震時にこの設計概念通りの挙動をした建物には永久変形が残存し、元の状態には戻らないと言うことで、その程度によっては、引き続いての居住や利用が困難になる事も止むを得ないものと考えられていた。しかしすでに地震多発期に入った我が国の建物の多くが、そのような地震を経た後には継続使用が困難になるという事態は、あまりにも国民生活や経済活動への影響が甚大であるとの考えが起こるのも当然であり、建築鉄骨に関わる様々な分野の最新技術を結集して、大規模地震時にも架構を弾性に保ちつつ、建物の安全と人命の確保、さらには国内経済活動へのダメージの軽減を目指した先進的かつ大規模な技術開発活動が開始されている。

<地震時>

図8 地震時の鉄骨骨組みの概念図(例)

その一つは平成 16 年に官民一体となって開始された、「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発プロジェクト」¹⁴⁾で、その構成は官が 1 府 4 省、民間は日本鉄鋼連盟等の 3 団体、協会および各々の組織傘下の研究機関、建設、鉄鋼分野での多数の民間会社等、きわめて大規模なもので、府省連携プロジェクトと称されている。内容は建物のリユース化や飛躍的な長寿命化を可能とする広範な技術開発をターゲットとして掲げているが、その実現の為の基本である構造性能として、震度 7 弾性、主要構造体無損傷の実現を目標としてあげている。これらの目標を実現するに当たって、使用鋼材としては従来鋼の 2 倍の強度を有する革新的鋼材を全面的に使用した構造を前提としている。なお部材断面の組み立てや部材同士の接合については、リユース性実現の為、基本的に溶接を使用せず、ボルトやはめ込み等の乾式接合を主たる接合法に据えており、そのため使用される高強度鋼にたいしても、必ずしも溶接性の具備を求めない内容となっている。

本プロジェクトは、平成 20 年度に実大規模の試験建物を建設、所期の構造コンセプトを実証し、終了している。今後はいよいよ府省連携の効果を発揮し、具体的モデル事業の推進を通じて、本プロジェクトの事業化、産業化のフェーズに進む計画であるとされている。

一方、同様に大規模地震下での鉄骨建物の無損傷化技術の開発を目指して、大阪大学を中心に 3 民間企業が参加した産学連携研究グループが結成され、平成 15 年より活動を開始している。本研究グループの場合は、地震により建物に投入されるエネルギーは制振デバイス等の専用の機構で吸収させ、柱、梁等の架構は弾性に保つ事を基本コン

表 5 建築鉄骨用 HT1000 鋼、溶接継手の目標性能

	引張特性		衝撃特性
	降伏強さ (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	vE0 (J)
鋼 材	880-1060	950-1130	70
継手(全溶金含む)	≥810	≥950

図 9 建築鉄骨溶接におけるパス間温度制約と施工能率の関係の概念図

セプトとし、柱や梁に弾性変形のできるだけ大きな鋼材を使用することで制振デバイスのエネルギー吸収効果を最大限に発揮させる事とし、従って使用鋼材としては現時点で溶接構造物として使用実績のある最高強度の鋼材、HT1000 の使用を前提としている（図 8 参照）。また前者の場合と異なり、鋼材や部材の接合には全面的に溶接接合を採用することにし、そのため、使用鋼材である HT1000 およびその溶接材料には高強度で有りながら、鉄骨製作時の溶接施工の実態に即した溶接施工性も兼備させることが前提条件として設定されている。

本研究グループの具体的成果について、最近の日本建築学会の学術講演大会に連続して報告された内容をベースに、紹介する。

3.1 建築鉄骨用 HT1000 およびその溶接部に必要とされる特性

鋼材およびその溶接部に必要とされる特性を表 5¹⁰⁾ に示す。建築鉄骨に使用される鋼材に対しては、ペンストックの場合の様に脆性き裂の伝播停止特性は求められない一方、地震に際して柱梁接合部等での脆性的破断を防止するため、特に溶接部等に高いシャルピー吸収エネルギーの保有が求められ、通常建築鉄骨に用いられる中低強度鋼の場合、同表に示す値が鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説にて要求されている。一方本鋼材の場合、地震時にも弾性を保つ為此ほどの高い値が必要かどうかについては今後の検討が必要だが、鋼材強度に応じて作用応力も高いということで、ここでは同じ値を要求することにしている。また建築鉄骨の場合溶接部はオーバーマッチングが原則であるため、溶接金属の引張り強さは母材のそれと同等以上とし、降伏強さについては、本鋼材の設計基準強度の目標値 (810N/mm²) を定め、それを上回る値とした。

鋼材および溶接材料の溶接施工性については、建築鉄骨施工の実態に鑑み、ペンストック用鋼材、溶材のそれとは

大きく異なる目標を設定し、新たに開発を行っている。その内容については次節で詳述する。

3.2 建築鉄骨用 HT1000 鋼適合溶接材料の開発と溶接施工条件

一般に高強度鋼に対する溶接施工の場合、その予後熱やパス間温度等に関する施工管理条件は、多層溶接時の溶接金属の割れ防止と同部における必要機械的性質の確保を両立できる条件で決定される事が多い。一方、建築鉄骨の溶接施工の特徴の一つは、他の構造物の場合に比べて比較的溶接長が短いため、連続多層溶接時にはパス間温度の上昇が著しく、この部分の機械的性質確保の為に設定されるその制限値が溶接施工能率に与える影響がより大きいことである。しかも高強度溶接金属の場合このパス間温度の上昇はこの部分の機械的性質を低下させる傾向がより顕著なため、通常使用される低中強度鋼の場合に比べパス間温度の上限値に関してより厳しい制限が課せられる。加えて、本鋼のような高強度鋼の場合、溶接金属部あるいは熱影響部の溶接低温割れ防止の観点から、パス間温度の下限値にも制約が課せられるなど、通常の低中強度鋼の場合に比べて溶接施工上の制約が多く、これらの要因が溶接施工能率を著しく阻害することが懸念される。この事情を模式的に図 9¹⁰⁾ に示す。例えば前章の表 3 にはペンストックの場合の溶接施工条件を示しているが、上述の理由から、さらに広い適用可能溶接入熱範囲と共に、特に上下限のパス間温度の制限値を建築鉄骨溶接の実情にあわせた値に設定すると共に、その裕度をできるだけ広く、かつ予熱あるいは後熱条件を可能な限り緩和できる溶接材料が求められる。

このような観点から建築鉄骨の溶接施工に多用される溶接法であるマグ溶接 (GMAW) およびサブマージーク溶接 (SAW) にたいし上記の施工事情に適合した溶接材料と、前者については最適シールドガス組成 (Ar + CO₂) が、主として厳しい拘束を付与した U 多層溶接割れ試験結果と溶接金属の機械試験結果を元に検討され、開発された溶接材料に対する実施工条件範囲が図 10¹⁰⁾ に示すように決定された。一般にペンストックの溶接施工で課せられる制限条件に比べ、特にパス間温度の制限値とその範囲が大きく拡大されていること、一方予後熱温度が高く設定されていることがわかる。

3.3 建築鉄骨用 HT1000 鋼および溶接部の諸特性

建築鉄骨用 HT1000 鋼の機械的性質は前述のペンストック用のそれとほぼ同等であるので、記述は省略する。図 11¹⁰⁾ に示す建築鉄骨の製作に採用される広範な各種溶接継手の特性を調査し、いずれも目標性能を満足する結果が得られている¹⁷⁾。その一例としてマグ溶接継手に対する調査結果を図 12 に示す。

(a) マグ溶接施工条件

(b) サブマージーク溶接施工条件

図 10 溶接施工条件範囲

図 11 溶接継手性能調査試験体

図 12 各種マグ溶接継手の性能

表 6 柱梁構造試験条件

試験体 No.	断面サイズ(mm)		梁端 仕上げ *1	試験方法
	柱	梁		载荷方法(振幅)
CJ1	BH-400×350 ×36×36 (1000N 級)	BH-380×200 ×19×36 (1000N 級鋼)	有り	一定振幅 (±1.09pδp*2レベル)
CJ2		BH-380×200 ×19×36 (1000N 級鋼)	無し	単調载荷
CJ3			有り	
CJ4		BH-380×300 ×19×36 (1000N 級鋼)	無し	漸増振幅 ±2pδp(2回), ±4pδp(2回), ±6pδp(2回), ±8pδp(2回),
CJ5*2		BH-380×200 ×19×36 (SN 490B)	無し	
CJ6		BH-380×200 ×19×36 (SN 490B)	無し	

*1 梁端溶接時は全試験体ともスチールタブを使用。

*2 pMp:全塑性モーメント、pδp:pMp時変位(いずれもσy=810MPaで計算)。

*3 CJ1試験体の梁フランジを拡幅し、更に梁端仕上げを省略したイメージ。

図 13 柱梁接合部構造試験体形状とセットアップ状況

図 14 各構造試験体の荷重変位関係の例

さらにこれらの施工条件下で製作された鉄骨柱梁接合部材の構造特性についても調査された¹⁸⁾。試験内容一覧を表 6 に、また試験体形状と試験状況の例を図 13 に示す。種々の载荷形式のもとで実施された試験結果の一例を図 14 に示すが、いずれの試験体も破断時の梁フランジの応力が母材の引張り強さレベルに達する、高い荷重負担能力を発揮していることが確認され、大地震下でも弾性状態を保つ設計下での使用にたいし、十分な継手性能を有していることが確認されている。

なお本 HT1000 鋼 (板厚 50mm まで) および新たに開発された 2 種の溶接材料については、平成 20 年に国土交通大臣の認定を取得しており、同研究グループでは、今後はこれら HT1000 鋼とその溶接技術の実用化を狙った活動に重点が移ると聞く。

4. 課 題

HT1000 クラスの高強度鋼の適用により、構造物製作のみならず関係する環境分野に至るまでの多くの優れた効果に加え、場合によっては他の素材では実現困難な新しい

機能の鋼構造物への賦与も期待できるため、今後このクラスの高強度鋼の当該 2 分野での使用実績の拡大と共に、さらに他の多くの分野への展開が望まれるが、一方でその実現に当たっては、いずれの分野の記述でも明らかなように、本鋼の場合、低中強度鋼の場合に比べて厳しい溶接施工条件の遵守が課せられている現実を考えると、まずはこの点での制約の大幅な緩和が望まれる。本文で述べたように、この厳しい制約は、主として使用される溶接材料における割れ防止と溶接金属に必要な機械的性質の両立の実現に起因する。従って今後、この面からの革新的な技術の早期開発が望まれる。折しも平成 19 年度から開始された NEDO プロジェクト「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」¹⁹⁾の主要課題の一つがこのような高強度鋼の溶接施工にあたっての大幅な制約緩和を可能とする溶接材料面からの技術の開発にあると聞く。今後本プロジェクトの進展を期待したい。

また、当然ながら鋼材および溶接材料共に低中強度鋼の場合に比べ、コスト高でもあり、加えて上述の様な厳しい溶接条件の制約が施工コストを引き上げる要因となっている。それでもペンストック分野では、建設トータルコス

トに関して、構造物の総重量減の効果が大きく、最終的なコスト低減が期待される事が、このクラスの鋼材が、上記の厳しい施工制約条件の元でも大量に使用されている大きな要因の一つであり、同様の事情は建築鉄骨の場合にも十分期待できる可能性はある。さらに建築鉄骨の場合には、大地震のたびに多大な経済的損失を余儀なくされてきた我が国にとり、その大幅な低減の可能性が期待される新しい技術にたいする公的側面からの普及促進支援あるいは保険分野等での優遇策等が、例えば今後事業化フェーズに入る前述の府省連携プロジェクト等で検討されることが期待されるものの、これら高強度鋼の建築鉄骨のみならず他の多くの分野への展開の為に、やはり純技術面からの鋼材および溶接施工等の適用諸技術のさらなるコスト低減への努力も重要な課題ではある。特に構造物の種類を問わず建造トータルコストに占める溶接等の施工コストのウエートは大きく、このコスト低減の面からも、上述の高強度鋼の溶接施工における種々の制約緩和を狙った革新的技術開発の早期成果が期待される。

5. あとがき

現時点で実用されている溶接構造用鋼として最高の強度を有する HT1000 級鋼について、すでに国内外で豊富な実用実績を持つペンストック分野、および本鋼クラスの高強度鋼を用いて地震時無損傷建物の実現という、今後の我が国にとって極めて重要かつ喫緊の技術開発に挑む建築鉄骨分野での取り組み状況を紹介した。

いずれの分野に於いても、このような高強度鋼の適用により、従来技術では得る事が困難な種々のメリットを構造物使用者に提供できることを紹介したが、その為には鋼材とともにその特性を最大限に発揮させるだけの溶接をは

じめとする利用技術の高度化が必須であり、これらが車の両輪の様に相まって、初めて高強度鋼のメリットをフルに享受できることを強調した。しかしその技術はそれぞれの分野での従来技術の延長上にあるのではなく、大きな飛躍を必要とする新技術としてとらえるのが適当であり、今後より一層の関係分野一体となった技術開発への努力が要請され、またそれを成し遂げた暁には、我が国の鋼構造物建造技術は世界の追随を許さない、より以上の新たな高見に到達していることを確信して、本稿を閉じる。

参考文献

- 1) 有持：溶接工学夏季大学教材，溶接学会 (1992) p. 202.
- 2) 東京電力提供資料.
- 3) 有持：建材試験情報 40 (2004) p. 6.
- 4) (社) 水門鉄管協会：950N/mm²級抗張力鋼材 (HT100) の水圧鉄管適用への技術指針 (1999).
- 5) 丸山 他：住友金属 47 (1995) No.4 p.1.
- 6) 川畑 他：溶接学会全国大会講演梗概集 67 (2000) p.144.
- 7) 矢野 他：製鉄研究 322 (1986).
- 8) 松岡 他：住友金属 38 (1986) No.2 p.13.
- 9) 三宅 他：川崎製鉄技法 20 (1988) No.3 p.233.
- 10) 三瓶 他：NKK 技報 No.133 (1990) p.37.
- 11) 松川 他：住友金属 50 (1998) No.1 p.105.
- 12) 堀川 他：電力土木 No.249 (1994) p.1.
- 13) 住友金属社内資料.
- 14) 例えば最上：第 5 4 回構造工学シンポジウム (2008).
- 15) 佐々木 他：日本建築学会学術講演梗概集 (九州) C-1 構造 III (2007) p.889.
- 16) 住友金属社内資料.
- 17) 沼田 他：日本建築学会学術講演梗概集 (九州) C-1 構造 III (2007) p.891.
- 18) 佐々木 他：日本建築学会学術講演梗概集 (中国) C-1 構造 III (2008) p.579.
- 19) 例えば 平岡：配管技術 50 (2008) No.14.