

## 委員会活動報告(令和3年4月～令和5年3月)

### 鋼部材の施工・製作における情報技術利用に関する調査委員会

委員名	所属	分野	WG
倉田 真宏(2年度委員長)	京都大学	建築	曲線部材
北根 安雄(幹事)	京都大学	土木	情報
石川 敏之(幹事)	関西大学	土木	曲線部材
飯島 憲一	大阪電気通信大学	建築	情報
大崎 純(初年度委員長)	京都大学	建築	情報
大家 貴徳	巴コーポレーション	ファブリケータ	曲線部材・情報
新村 裕志	北陸建工	ファブリケータ	曲線部材
鈴木 健太郎	IHIインフラシステム	土木	曲線部材
西村 学	パシフィックコンサルタンツ	土木	情報
和多田 遼	大阪産業大学	建築	情報

1

## はじめに

- 建設分野における鋼構造の設計・施工において、BIM、CIMの利用が進められているが、鋼構造の設計から部材の施工と製作までの一貫した利用には至っていない。
- 複雑な形状の接合部や曲線部材の製作のためのロボットやNC加工の利用についても、十分に普及しているとは言えない。さらに、3Dプリンターの利用は近い将来には難しい状況である。

本調査研究では、

- 前述の情報技術と製作技術の利用に関する現状を把握し、利用の推進を妨げている要因を分析。
- 情報技術と新しい製作技術の利用推進のための方策を検討。

2

2

## JSSCテクニカルレポート 絶賛発売中！

調査体制(2年度)

- 情報技術利用WG(情報WG)：
- 曲線部材の製作普及WG(曲線部材WG)

活動内容をテクニカルレポートにて報告



調査体制の維持・向上に資する情報技術利用に関する報告

鋼構造の施工・製作における  
情報技術利用と3次元造形

2024年3月

一般社団法人 日本鋼構造協会

3

3

## 第1部 施工・製作における情報技術の利用について

第2章: 鋼部材の施工・製作におけるBIM/CIMの利用

第3章: 情報技術を利用した3次元部材の製作技術

第4章: VR/ARの利用事例

## 第2部 曲線部材の製作と普及について

第5章: 3次元造形を構成する曲線部材の製作施工と情報技術

第6章: 曲線部材の製作

第7章: 曲線部材の力学と弾塑性挙動

4

4

## 2章: 鋼部材の施工・製作におけるBIM/CIMの利用

- 本章では、鉄骨ファブリケータにおける現状のBIMへの取組みを調査し、設計事務所や総合建設業から広まった国内BIMの普及を観測及び考察。

年月	内容
2009	我が国のBIM元年。担い手は一部の設計事務所と施工会社に限定。
2019	国土交通省が建築BIM推進会議を発足させ、国内のBIM運用について広く意見交換。
2023.3	建築BIM推進会議より「建築分野におけるBIMの標準ワークフローとその活用方策に関するガイドライン(第2版)」のリリース。
2025	BIMを用いた建築確認の開始決定。黎明期を遠く脱し、普及・利用の段階へ。

5

5

## 今後に向けて

- 「鉄骨部材BIMデータを元に鉄骨製作用BIMデータを作成すること」について、
  - 「賛成」は32.1%、「反対」は7.5%。
  - 44.9%の回答者が「設計または施工用の鉄骨部材BIM/CIMデータの作成者と、モデルの作成方法等について事前に協議すること」を検討しても良いと回答
  - 39.7%の回答者が「設計または施工モデルの作成・検討段階での鉄骨BIMモデルの作成を、追加契約等で合わせて請負う」ことを検討しても良いと回答
- BIM/CIMの活用に期待する業務の効率化
  - 「3次元でのモデル確認による作図・製作間違いの防止」
  - 「標準ディテールの自動入力による接合部等の作図省力化」
  - 「設計者・施工者のチェック・承認でのBIMモデル利用による承認図作図工数の削減と期間短縮」
- 今後の課題
  - 「BIMモデルの活用を軸とする業務フローの再構築」
  - 「協業のタイミング・体制づくりについて」

第2章

9

9

## アンケートを踏まえた提言

- BIMの活用を前提とした協業体制の構築とコストの合意
  - 最終的に確定する鉄骨BIMモデルをファブリケータがモデリングしているケースが多く、またそれに伴い、BIMプロジェクト特有の要望への対応や調整事項も加わり、ファブリケータが疲弊
  - ①設計者・施工者が、設計時・施工計画時の段階で、製作用のディテールレベルまで考慮した鉄骨部材のモデリング
  - ②ファブリケータがプロジェクトの初期段階(設計用BIM、施工計画用BIM作成段階)からモデリングの協議に参画する、または初期段階から製作を意識したモデリングを作図業務として請負  
(「施工技術コンサルティング業務契約」)

「建築分野におけるBIMの標準ワークフローとその活用ガイドライン」(国交省、「建築BIM推進会議」)

- BIMの成功のために重要な二つのキーワード、すなわちEIR(発注者情報要件 Employer's Information Requirements)とBEP(BIM実行計画書 BIM Execution Plan)の作りこみの重要性

第2章

10

10

## アンケートを踏まえた提言

- 鉄骨BIMモデルの作成方法の標準化・システムの統一化
    - アンケートの回答の中には、設計者、建設会社、ファブリケータでのBIMシステムの統一化や、継手・仕口納まりなどの標準データベースの共有などを求める声
- 「建築分野におけるBIMの標準ワークフローとその活用ガイドライン」(国交省、「建築BIM推進会議」)
- 建築生産の各段階でのデータの受け渡し、共有や協働における、共通データ環境(Common Data Environment, CDE)の活用事例
  - BIMモデルの形状と属性情報の標準化については、「建築BIM推進会議」内の部会にて継続検討
- 業界全体での鉄骨BIM活用人材の育成と情報の水平展開
    - BIMを扱う技術者の育成は個々のファブリケータ毎の取り組みでは限界あり
    - 業界内での人材育成に向けたフォローや、BIMを利用したプロジェクトの知識・経験の水平展開必要

第2章

11

11

## 今後に向けて(橋梁用鉄骨ファブリーケータ)

- ・「データフォーマットの統一、上流から下流段階までのデータの一貫性の保持」
- ・「設計CIMモデルの鉄骨製作・生産への活用」
  - ・設計用・施工用BIM/CIMデータに求められる詳細度(詳細度200~300)と、鉄骨製作用モデルに求められる詳細度が異なる
  - ・後工程での手戻り削減のため、設計段階でのBIMモデルの作り込みによるフロントローディングと、同モデルの製作段階での活用を望むファブリーケータの意見あり。後工程での鉄骨製作の現場において、設計段階でのモデルの作り込みの不足により、従来の2次元図面でのプロジェクト遂行と比べむしろモデルの作成手間や変更対応の手間増
  - ・設計者・施工者・ファブリーケータ間での、BIM/CIMモデルや鉄骨3Dモデルの作成分担に関する密な協議と連携が必要
- ・「BIM/CIMに関する情報・技術者不足解消」
  - ・「身近に相談できる環境がなく独学で試行錯誤」している現状。業界全体で、BIM/CIMやデジタル技術を活用できる人材の育成と、情報の水平展開を進めていくことが重要。

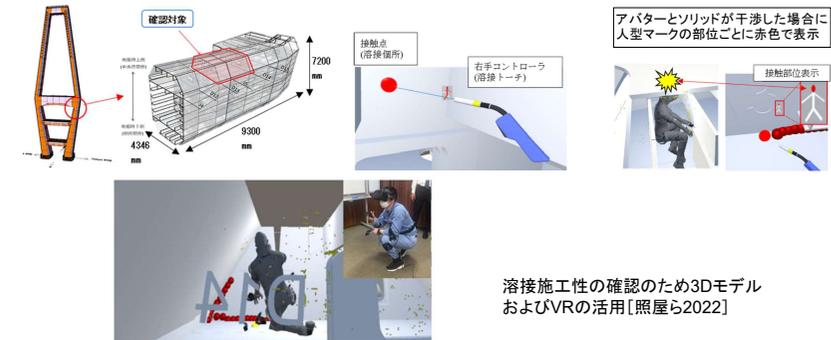
第2章

14

14

## 3Dモデルの視認性の高さを最大限活用

- ・VR技術を利用して、施工性などの確認



2-4) 照屋光輝, 新谷研人, 横山徹, 原直人: VRを活用した鋼橋の溶接施工性の確認—橋梁分野へのVR技術の適用—. 日本建築学会情報システム技術委員会第45回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集(報告), pp. 248-251, 2022. 20

第2章

20

## 3章: 情報技術を利用した3次元部材の製作技術

### 金属3Dプリンター

- ・結合剤噴射法(バインダージェット, Binder Jetting, BJT): 液状の結合剤を選択的に供給して、粉末材料を結合する付加製造プロセス。
- ・指向性エネルギー堆積法(Direct Energy Deposition, DED): 集束させた熱エネルギーを利用して材料を溶融し、結合し、堆積させる付加製造プロセス。
- ・材料押出法(Material Extrusion, MEX): ノズルまたはオリフィスから材料を押し出し、選択的に供給する付加製造プロセス。
- ・材料噴射法(マテリアルジェット, Material Jetting, MJT): 造形材料の液滴を選択的に堆積する付加製造プロセス。
- ・粉末床溶融結合法(パウダーベッドフュージョン, Powder Bed Fusion, PBF): 熱エネルギーを使用して粉末床を選択的に溶融凝固する付加製造プロセス。

建設分野ではDED法とPBF法<sup>3-5, 3-6</sup>が利用されることが多い

第3章

22

22

## 建設分野での利用例

- ・竹中工務店は、オランダのMX3D社と協業して木質構造の接合部を金属3Dプリンターで製作し(図-3.1.2)、ステンレス製の大型ベンチを製作。
- ・MX3D社は、2018年に、長さ12.5 mの鋼製橋をオランダで製作。



3Dプリンターで製作された接合部の例  
(写真提供: 竹中工務店・MX3D)

金属3Dプリント製の歩道橋

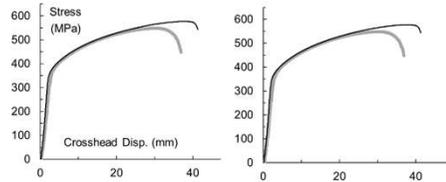
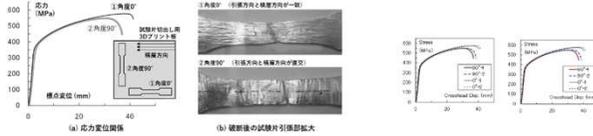
3-13) L. Gardner, P. Kyvelou, G. Herbert and C. Buchanan: Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge, J. Constructional Steel Research, Vol. 172, 106233, 2020.

第3章

26

## 材料特性

- 積層造形生成材料には異方性があるため、積層過程のシミュレーションは重要



WAAMで造形された鋼材の材料特性  
(提供: 竹中工務店)

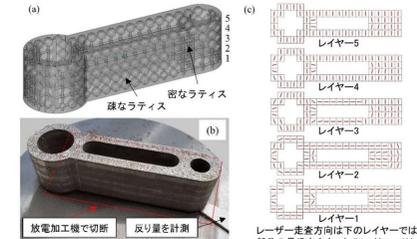
3-7) 木下拓也: 金属3Dプリントによるステンレス製大型ベンチの製作, J. Steel Structures & Construction, No. 52, pp. 30-31, 2023.

第3章

27

## 形状最適化との連携

- Takezawa et al. は、PBF方式での機械部品の製作において、内部に最適傾斜機能ラチスを形成して剛性を不均一にし、かつレーザーの走査方向を最適化して局所残留応力の値も不均一にすることで、残留変形を低減する方法を開発



傾斜機能ラチスとレーザー走査方向の最適化による局所残留応力の低減の概要, 竹澤教授提供)

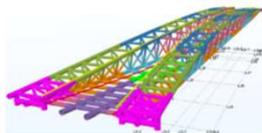
3-27) A. Takezawa, H. Guo, R. Kobayashi, Q. Chen, A. C. To: Simultaneous optimization of hatching orientations and lattice density distribution for residual warpage reduction in laser powder bed fusion considering layerwise residual stress stacking, Additive Manufacturing, Vol. 60, 103194, 2022.

第3章

28

## 情報技術を利用して3次元加工を行った事例

- レンズ形の側面形状を持つダブルデッキ構造の鋼単純パイプトラス橋
- パイプトラスの接合部は、各格点でそれぞれのパイプの交角が異なっている。そのため、上部構造の製作時には、3D原寸を採用し、BIMソフトウェアとしてTekla Structuresが使用
- Tekla Structuresと互換性があるソフトウェアで操作が可能なパイプ自動切断機パイプコースターを使用して、全てのパイプ部材を図面通りに切断すると同時に先端を3D形状に加工



3-34) 関根圭祐, 島津章, 深尾仁志, 佐藤俊介, 齊藤展生, 名城俊樹: 復興のシンボル 中橋の設計と建設, 橋梁と基礎, Vol. 55, No. 3, pp. 37-47, 2021.

第3章

29

## 4章 VR/ARの利用事例

- VR(Virtual Reality: 仮想現実)は、現実空間とは切り離された全てをデジタル空間で、あたかもそこにいるかのような感覚が体験できる技術
- AR(Augmented Reality: 拡張現実)とは、現実空間に仮想のデジタル情報(CG等)を重ね合わせることで、現実空間を拡張する技術
- 2次元図面では伝わりにくい仕上がりがイメージを立体的に共有することで、部材の取付ミスの削減や検査時間の短縮など、あらゆる場面で活用

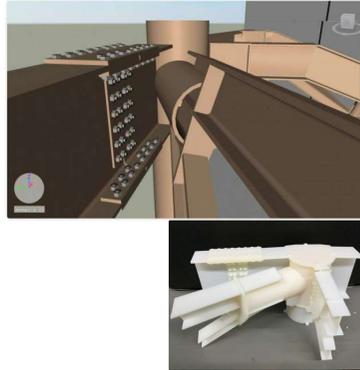
第4章

31

31

## VRや3Dプリンターで施工性を検証((株)奥村組)

- 施工BIMモデルをVRで見ると、施工計画や手順が適切か、安全性に問題ないかなどが検証可能



<https://ken-it.world/success/2018/06/okumuragumi-adsk-case.html><sup>32</sup>

第4章

32

## AR技術で施工管理を支援(清水建設(株))

- AR技術を活用して携帯型タブレットの端末上で建物のBIMデータとリアルタイムのライブ映像を合成表示し、施工中の設備配管や建物躯体の施工管理を支援するITシステム「Shimz AR Eye」を開発・実用化



<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2020060.html>

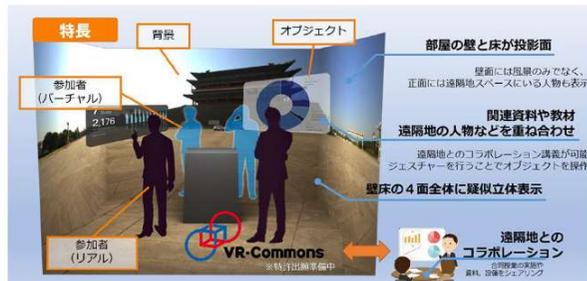
第4章

33

33

## プロジェクション型VR技術を活用した体感型共同学習システム(清水建設)

- 教育施設向けのシステムインテグレーション事業の一環として、プロジェクション型VR技術を活用した体感型共同学習システム「VR-Commons」を開発
- 利用者は、ゴーグル型ディスプレイ等のデバイスを装着せずに臨場感あふれる仮想現実の学習空間を体感でき、関連資料や教材を投影面に重ね合わせて表示



<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2021059.html>

34

第4章

34

## MRによる4D出来形確認の実施(株)インフォマティクス, (株)鴻池組

- KONOIKEテクノセンター新築工事で用いている、福井コンピュータアーキテクト社の日本仕様BIMシステムGLOBEの柔軟な属性管理の仕組みと4D機能を活用し、インフォマティクス社製のMRソフト GyroEye HoloとのIFC連携による、4D MR表示を実現



<https://informatix.co.jp/xr/kenchiku/#insert>

35

第4章

35

### ARによる設備工事の墨出し作業 (株)インフォマティクス, 東急建設(株), ヤマト

- インフォマティクスの「GyroEye Holo(ジャイロアイホロ)」にインポートした配管や吊りボルトなどの3Dモデルを、AR用ゴーグル「Microsoft HoloLens(マイクロソフトホロレンズ)」を通して現場を見ると、従来方式の墨出しと遜色ない精度で表示
- 従来の墨出し作業は、縦横の通り心から2カ所ずつメジャーで寸法を測りマーキングしていたので、1カ所の墨出しを行うのに5回の動作が必要。GyroEye HoloとHoloLensを使うと、インサートの位置を画面上で見ながらマーキングするだけ



<https://ken-it.world/success/2017/09/outdoor-gyroeye-holo.htm>

第4章

36

### 5章 3次元造形を構成する曲線部材の製作施工と情報技術

- 曲げ加工部材が利用された構造物の紹介

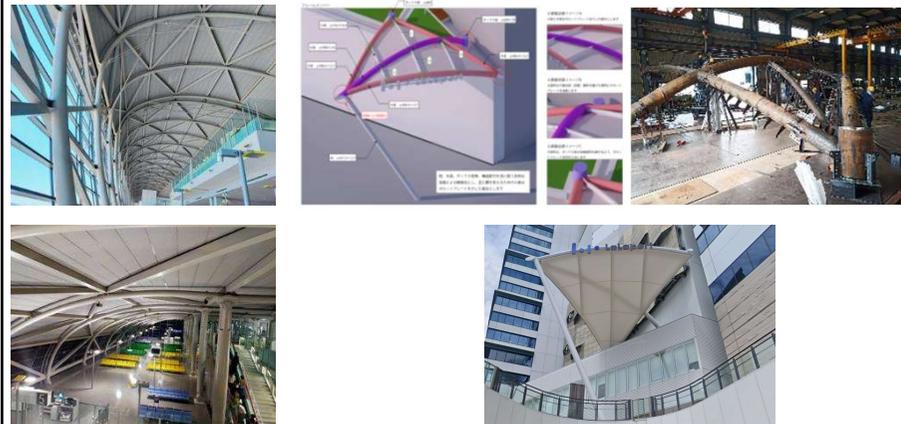


(a) あやとり橋

(b) 仁川空港の第2ターミナル屋根部材  
直線部材を組み合わせた湾曲した構造

第5章

37



関西国際空港

豊洲二丁目駅前地区第一種市街地再開発事業2-1街区

38

第5章

38

### アーチ部材に曲げ加工された鋼管部材



アイル橋(バスケットハンドル形)



中橋(木と鋼を組み合わせたアーチ構造)



海外の歩道橋

第5章

長崎の新西海橋(CFT)

42

### 曲線部材等の施工品質管理に適用可能な情報技術

#### (1) 「AR重畳システム」(巴コーポレーション+富士通)

- 概要: 3Dモデルと写真をタブレットまたはPC上で重ね合わせを行い、図面(モデル)と実物の差異を確認する方法。画面上の複数点を選択することで自動的に重畳される。
- データ形式(拡張子): \*.stl, \*.obj



第5章

44

44

### 6章 曲線部材の製作

#### ローラーによる冷間曲げ加工

- 常温~720°C以下の状態で加工
- 型から外した時にある程度元の形に戻ることも考慮した精度管理
- 低コスト

冷間曲げ加工した鋼板を溶接接合



第6章

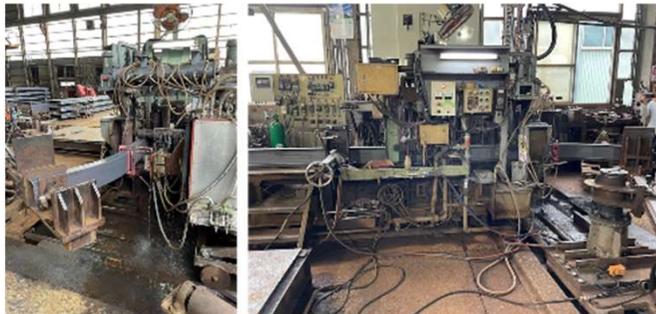
46

46

### 6章 曲線部材の製作

#### 高周波誘導加熱曲げ加工

- 金属の再結晶温度以上の900~1200°Cの熱を加えた状態で加工
- 高い寸法精度を維持し、断面の変形や残留応力の発生を最小減に
- 高コスト



第6章

47

47

### 誘導加熱成形

- 構造用鋼管
- H形鋼
- 溝形鋼
- I形鋼

6.3.2 構造用角形鋼管

表-6.2.7 一般構造用角形鋼管の標準最小曲げ半径(mm)

角形鋼管寸法	標準最小曲げ半径	
	冷間曲げ	熱間曲げ
40	40	100
45	45	110
50	50	120
55	55	130
60	60	140
65	65	150
70	70	160
75	75	170
80	80	180
85	85	190
90	90	200
95	95	210
100	100	220
105	105	230
110	110	240
115	115	250
120	120	260
125	125	270
130	130	280
135	135	290
140	140	300
145	145	310
150	150	320
155	155	330
160	160	340
165	165	350
170	170	360
175	175	370
180	180	380
185	185	390
190	190	400
195	195	410
200	200	420
205	205	430
210	210	440
215	215	450
220	220	460
225	225	470
230	230	480
235	235	490
240	240	500
245	245	510
250	250	520
255	255	530
260	260	540
265	265	550
270	270	560
275	275	570
280	280	580
285	285	590
290	290	600
295	295	610
300	300	620
305	305	630
310	310	640
315	315	650
320	320	660
325	325	670
330	330	680
335	335	690
340	340	700
345	345	710
350	350	720
355	355	730
360	360	740
365	365	750
370	370	760
375	375	770
380	380	780
385	385	790
390	390	800
395	395	810
400	400	820
405	405	830
410	410	840
415	415	850
420	420	860
425	425	870
430	430	880
435	435	890
440	440	900
445	445	910
450	450	920
455	455	930
460	460	940
465	465	950
470	470	960
475	475	970
480	480	980
485	485	990
490	490	1000
495	495	1010
500	500	1020
505	505	1030
510	510	1040
515	515	1050
520	520	1060
525	525	1070
530	530	1080
535	535	1090
540	540	1100
545	545	1110
550	550	1120
555	555	1130
560	560	1140
565	565	1150
570	570	1160
575	575	1170
580	580	1180
585	585	1190
590	590	1200
595	595	1210
600	600	1220
605	605	1230
610	610	1240
615	615	1250
620	620	1260
625	625	1270
630	630	1280
635	635	1290
640	640	1300
645	645	1310
650	650	1320
655	655	1330
660	660	1340
665	665	1350
670	670	1360
675	675	1370
680	680	1380
685	685	1390
690	690	1400
695	695	1410
700	700	1420
705	705	1430
710	710	1440
715	715	1450
720	720	1460
725	725	1470
730	730	1480
735	735	1490
740	740	1500
745	745	1510
750	750	1520
755	755	1530
760	760	1540
765	765	1550
770	770	1560
775	775	1570
780	780	1580
785	785	1590
790	790	1600
795	795	1610
800	800	1620
805	805	1630
810	810	1640
815	815	1650
820	820	1660
825	825	1670
830	830	1680
835	835	1690
840	840	1700
845	845	1710
850	850	1720
855	855	1730
860	860	1740
865	865	1750
870	870	1760
875	875	1770
880	880	1780
885	885	1790
890	890	1800
895	895	1810
900	900	1820
905	905	1830
910	910	1840
915	915	1850
920	920	1860
925	925	1870
930	930	1880
935	935	1890
940	940	1900
945	945	1910
950	950	1920
955	955	1930
960	960	1940
965	965	1950
970	970	1960
975	975	1970
980	980	1980
985	985	1990
990	990	2000
995	995	2010
1000	1000	2020

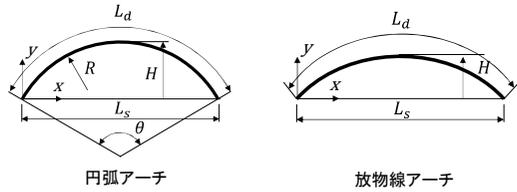


第6章

49

49

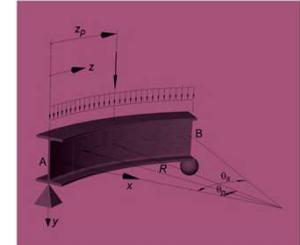
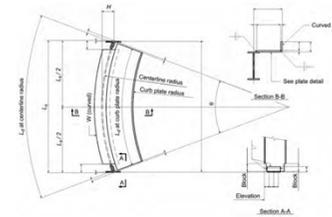
### 7章 曲線部材の力学と弾塑性挙動



### 米国鋼構造協会 (AISC) の設計マニュアル

Curved Member Design Manual (2018)

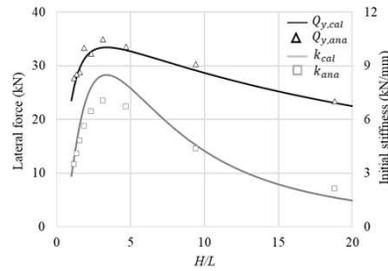
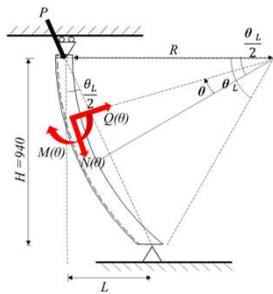
- 鉛直・水平面に曲げた曲線部材を Vertically Curved Members と Horizontally Curved Members に分類
- 曲げ加工計画, 製作方法, 弾性設計に必要な数式や接合形式などを整理



Design Guide 33  
Curved Member Design  
Bo Dowswell, Ph.D., P.E.,  
ARC International, Birmingham, AL

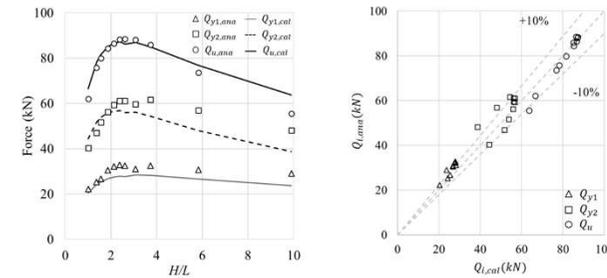
### 曲線部材の塑性領域を含めた性能検討

- ピン支持の場合: 初期剛性と初期降伏耐力はともに  $H/L=2\sim3$  の範囲で最大値を示し, この範囲の形状が構造的に効率的



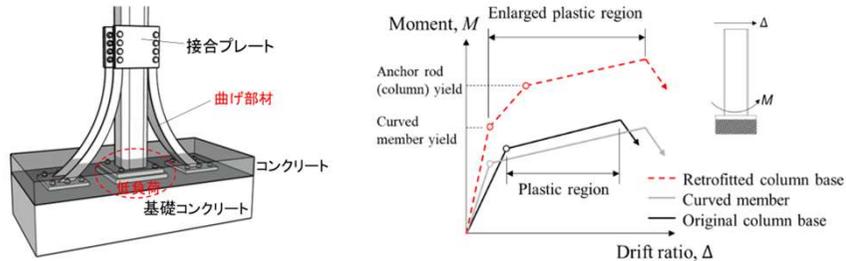
### 曲線部材の塑性領域を含めた性能検討

- 両端固定の場合: 実線および破線は推定式, マーカーは有限要素法解析結果. 形状  $H/L$  の比が  $2\sim3$  の範囲が構造的に効率が良い. 解析結果と算定結果の誤差は  $\pm 10\%$  以内で良好対応



## 鋼構造建物の柱脚補強部材としての適用

- 既存柱脚部への負荷を低減しつつ、全体性能を向上させる補強方法として、変形能力が高く、また耐力と剛性を単純曲げ半径により容易に調節できる曲線部材を利用。
- 従来の耐震補強は耐力を上昇させることに重きを置いていたのに対し、今回提案する低負荷耐震補強機構では耐力を上昇させず、柱脚部への負荷を低く抑えたまま塑性変形能力を上昇。



Lin, K.-S., Kurata, M., Kawasaki, Y. and Kitatani, Y. (2024), Investigation of low-disturbance seismic retrofit method for steel column bases using curved members. Jpn Archit Rev, 7: e12429. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12429>

第7章

59

## 結語

- 建築・土木ともに「BIMソフトが高くて買えない」「BIMを支える人材がない、育てる余裕がない」との回答が目立つ。国土交通省では「BIM加速度事業」においてBIMソフトウェアの購入費やBIMIに関する人件費などの支援制度を設けている。
- 土木に比べると建築の方がBIMの普及が低調。公共工事では国土交通省が進めるBIM/CIM推進の政策が発注に反映されやすいが、民間工事では困難。国土交通省は「官庁営繕事業におけるBIM活用」として2023年度からBIMの適用を求めているが、建築でもインセンティブが重要。
- ステークホルダー数の多さがBIM適用の逆風になっている可能性もあるが、視点を転じればICTを利用したBIMによるプロジェクト運営の方が、効率的で情報の齟齬も生じにくい。
- 3D付加造形技術は確実に発展する分野であり、部品レベルでは近い将来の実用化が可能。形状最適化手法と数値解析技術との連携により、複雑な形態の構造物や、材料特性も含めた最適化が可能。普及には、材料特性の評価法や形状・材料特性の誤差に対する敏感性と信頼性の評価が必要不可欠。
- 現時点でのVR/AR技術は、BIM/CIMで作成された3D画像を現場などで映し出し、施工手順の確認や出来形管理を行う用途に使用。現場や事務所、発注者と臨場感のある施工会議や住民説明も可能。
- 熟練した溶接技術者の不足などについても、熟練技術者が事務所から複数の現場の若手技術者に映像を共有しながら指示を与え教育することが可能。

64

64

## 結語(続き)

- 工場での品質管理や現場での施工精度管理などにAR重畳などの利用は広がっているものの、曲面、曲線状部材への適用には課題あり。端部を除いて境界が点や線では存在しないことから、曲面そのものをモデルと合わせることは難しい。今後のAI技術の進歩によって解消されることが期待される。
- 曲げ加工における曲率の限界は、部材の断面変形や破壊に対する耐性、ベンダー/ローラーが使用する装置や技術に依存するため、一般的にガイドラインは存在しない。設計の初期段階において、設計者は形状が達成可能か加工業者に問い合わせる必要があるが、参考までに最小曲げ半径をまとめた。
- 骨組解析や有限要素法解析の数値解析においても曲線幾何に適応したプログラムは多くあり、弾塑性挙動までを検討することが可能。情報技術の進歩とともに3次元造形の注目が高まりつつあるなか、塑性化部位においても曲線部材が利用可能となれば、形状の自由度が増す。
- 曲げ加工による材料特性の変化に関するデータ、変形能力に関するデータ、加工プロセスの標準化、加工精度に関する標準仕様、曲線部材の有効利用範囲や取り付く接合部の設計方法の解説書、などの整備が必要。

65

65