



笹谷 眞通 (ササタニ マサミチ)

東京電機大学 未来科学部 建築学科 教授

プロフィール

1995年 東京電機大学大学院工学研究科建築学専攻修士課程修了，博士（工学）

1995年より建設会社設計部勤務ののち

2000年よりオーヴ・アラップ・アンド・パートナーズ・ジャパン・リミテッドにて構造設計実務に従事

2017年4月より東京電機大学未来科学部建築学科に着任現在に至る

これからの耐震技術 — 想定外地震時代に向けて —

1. 過去の地震被害と耐震技術の変遷

日本の耐震技術は、過去の大きな地震被害から学び進化してきた。1923年の関東大震災の翌年、市街地建築物法が改正され、これが世界初の耐震関連法規の基盤となった。1948年の福井地震を踏まえ、1950年には建築基準法が公布された。さらに、1964年新潟地震、1968年十勝沖地震の被害を受け、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準が改定され、地震に対する構造的備えは次第に高度化していった。鋼構造においても柱梁接合部の脆性破断や溶接部の不具合など、鋼材特有の損傷モードが明らかになった。1970年代以降、日本建築学会では鋼構造設計規準や鋼構造接合部設計指針の整備が進み、塑性設計法の適用範囲の明確化や、柱梁接合部の靱性確保に関する知見が積み重ねられた。これらの規準整備は、鋼構造の塑性変形能力を的確に評価するための基盤となり、応答制御デバイスを含む鋼構造の高度な耐震要素の発展につながる契機となった。1978年宮城県沖地震は、特に鉄筋コンクリート造の層崩壊の危険性を改めて示し、1981年の新耐震設計法の導入へとつながった。本設計法は、一定の塑性化を許容しても崩壊に至らない設計思想を基本としており、実際に1981年以降の建物では、致命的な崩壊に至る例は大幅に減少した。

2000年代に入ると性能規定型設計の導入により、これまで以上に建物の構造計画上のコンセプトを重視し、構造設計者の意図が明確に表現される時代へと移行した。その結果、大地震時の人命保護だけでなく、機能維持、事業継続、非構造部材の損傷抑制など、多角的な観点から建物性能を議論する必要性が認識された。この時代の背景には建物の社会的ニーズが多様化、複雑化していたことも要因として挙げられ、これに応える構造設計者にも幅広い知識や高い専門性、建築のデザインに対する造詣や構造デザインへの貢献など、求められるものは枚挙に暇がない。

ちょうどこの時期からは免震構造の普及により被害は大きく軽減されたものの、2011年東北

地方太平洋沖地震では長周期地震動により免震層が想定外の大変位を記録し、2016年熊本地震では設計クライテリアを大きく上回る地震動が観測された。これらの事例は、想定外地震に対して構造物がどこまで余裕度を確保できるのかという課題を浮き彫りにした。靱性に依存した従来の耐震設計だけでは塑性集中のリスクを完全には解消できず、補修困難や残存性能評価の不確実性が依然として課題として残っている。

このような背景から、大地震時でも構造性能を保持し、特定層への損傷集中と部材破断を抑制する「フェールセーフ型」構造要素への関心が高まっている。

2. 変位制御型機構の研究開発の動向

想定外地震に対して建物を保全するため、様々な研究者のもとで、架構の靱性を維持しつつ剛性を段階的に発揮する「変位制御型機構」の研究が進められてきた。変位制御型機構は、架構の初期挙動では柔らかく、所定の変形に到達した時点で急激に強度や剛性を発揮する特徴を併せ持つ。このデバイスが各層各所に最適配置されることにより、建物の構造全体として、塑性集中を抑えつつ大変位を許さない応答が実現する。

既往の研究としては、例えばワイヤロープをブレース部材の代わりに用い、常時はワイヤロープを弛緩させ、ある程度の層間変形が生じた時に剛性材として作用させ、過度な層間変形を抑制するような変位制御型ワイヤブレース構造 1)、ターンバックルを用いたテンションロッドの端部リングジョイントに初期変位を与えた変位制御型ブレース 2)、想定を超えるレベルの地震動に対しては高強度材を用いた変位制御型ブレース 3)、ブレース材の早期破断を抑制し、部材靱性能の確保を目的とした変位制御型座屈拘束ブレース 4)、架構と耐震壁の間にギャップを設けて柔構造物的にふるまうギャップ連層耐震壁 5)、ギャップ機構を設けた損傷分散型架構 6)などが挙げられる。

3. くさび機構を用いたハードニング型制震デバイス

こうした背景のもと、国内各社において変位制御型機構の開発に取り組み、製品化に至る案件がみられるようになってきた。筆者は東京理科大学山川誠教授と熊谷組つくば技術研究所との共同で、くさび機構を用いた新しいハードニング型制震デバイスの開発に取り組んでいる。本機構は、くさび材・拘束材・鋼棒・皿ばねで構成され、段階的な剛性の切り替え（ハードニング）を可能にしている。初期状態ではくさび材は拘束材に挟まれ、皿ばねを介して鋼棒により適切に保持されている。地震時に層間変形が進み、くさび材が押し込まれると拘束材が外側へ開き、皿ばねを通して鋼棒へ力が伝達される。皿ばねが密着状態に達すると鋼棒の軸剛性が卓越し、剛性が2段階で大きくなる硬化型復元力特性である。

この段階的な剛性が発揮できる本機構は、くさび材の角度の調整や2段階の剛性を担うパーツ（皿ばね・鋼棒）の選定により、設計条件に適応した剛性のコントロールが可能であることに加えて、大地震発生後にこれらのパーツの交換が容易であるという点などが従来機構と比較してメリットとして挙げられる。

2021年度にスタートした本デバイス開発以降、試行錯誤を重ねて複数の改良案の要素実験や実大実験により、二段階剛性の発現メカニズムや復元力の予測手法が検証されてきた。また、質点系モデルによる比較解析では、ギャップ型、初期剛性付与型、従来型耐震ブレース補強の有無との比較を通じて、くさび機構を用いたハードニング特性がもたらす応答低減効果や適用範囲が明らかになりつつある。

これからの構造設計への実装を見据えて、現在はハードニング復元力のモデル化、巨大地震動に対する余裕度評価、他の制振ダンパーとの併用効果、といった検討を進めている。なお、前述の研究成果については、本編に記載の論文「テーパー付金物を用いたハードニング復元力特性要素を有する耐震構造システムの研究」にて詳細に報告されている。

4. 想定外地震時代に向けて

近年の建築物の大規模化や複合化に伴い、構造設計実務においてもより高度で多様な技術が求められている。また、地震等の自然災害からの人命や財産の保護、建物の機能維持や事業継続計画といった建築物の構造性能の重要性もさらに高まっている。免震や制震技術は成熟してきたが、一方で想定外地震動への備えや、供用期間中の性能維持など、新たな課題も浮上している。これら幅広いニーズに応えるため、構造最適化やコンピューテーショナルデザインのほか、人工知能(AI: Artificial Intelligence)や機械学習を積極的に利用した「スマート制震技術」により揺れをリアルタイムで検知・制御するシステムの実用化が検討されている。このような技術や理論は今後のハードニング型制震デバイスの開発過程においても、特にセンサーによるリアルタイムモニタリング、振動データの自動解析、異常検知や劣化推定、デバイスの最適配置や自動制御など、広範囲において大きな影響を及ぼすはずである。また、昨今議論されている「統合設計」の潮流も無視できない。構造力学、材料工学、データ科学、都市防災など複数分野を横断し、全体最適化された設計を行うアプローチは、性能規定型設計の次のステップとして重要な役割を果たすだろう。

一方、一般的な構造設計実務の現状はまだ大きな変化は見られず、建築物への高度で多様な要求に応える構造設計者の負担は依然として大きい。これも先進的な手法がまだ身近になっていない背景も要因として考える必要がある。最近の筆者の活動のひとつとして、異なる材料や部材を組み合わせることで構造性能を向上させる「ハイブリッド」から、複数の一般化された理論や技術を用いてこれらをひとつにして個々の課題に取り組む「統合」に発展させて、様々な先進的技術が身近になるきっかけ作りに取り組んでいる。

今後の耐震技術は構造材料や構造部材の開発にとどまらず、多様な技術を統合して新たな価値を創出する時代へと進むだろう。個々の理論や技術が単体では見ることができない新機軸や、さらには統合が体系化された設計(トータルデザイン)がこれからの耐震技術の新しい価値を生むために、今回の共同研究の成果が将来に向けた布石となることに期待している。

(参考文献)

- 1) 田川浩, 侯興国: ラーメン構造の耐震特性を考慮した変位制御型ワイヤブレース構造, 日本建築学会構造系論文集 第73巻 第627号, pp.843-850, 2008年5月
- 2) 竹中 皓, 田川浩: テンションロッドを用いた変位制御型ブレース構造に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.973-974, 2010年7月
- 3) 朝川剛, 山川誠, 田川浩: 変位制御型 PC 鋼棒ブレースを用いた鋼構造建物の応答制御設計, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, pp.874-881, 2016年11月
- 4) 坂井誠, 田川浩, 陳星辰, 上原誠, 西村真: 鋼構造高層建築物における変位制御型座屈拘束ブレースの制振効果, 日本建築学会技術報告集 30巻(2024) 76号, pp.1305-1310,
- 5) 渡辺宏一, 田村和夫: ギャップ連層壁架構の基本振動特性, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.2753-2758, 1998
- 6) 渡辺宏一, 中井正一: 硬化型復元力特性を有する部材により耐震補強した多層骨組の振動特性, 日本建築学会構造系論文集 第78巻 第687号, pp.931-938, 2013年5月