

今後の鉄筋コンクリート構造

今後の鉄筋コンクリート構造のあるべき姿、進むべき道のいくつかを下記の資料を参考に述べる。

日本建築センター
「鉄筋コンクリート構造の技術的変遷」

2021 年日本建築学会大会
構造部門（RC 構造）パネルディスカッション
「RC 構造の性能規定型耐震設計の現状と将来—性能規定化から約 2 0 年—」
構造部門（振動）パネルディスカッション
「地震災害のレジリエンスを支える共振観測と建物モニタリング」

1. 耐震設計基準について
- 性能規定化する前の耐震設計では、1 次設計として「稀に起こる地震」に対しては大規模な修復の必要なく継続利用が出来ること、2 次設計として「極めて稀に起こる地震」に対しては、人命の保護を目的として、この 2 つの地震荷重に対して所要の性能を有しているかを確認してきた。例えば 2 次設計では、図 1 に示すように、異なる強度と変形性能を有する建物 A～建物 B に対して、極めて稀に起こる地震に対して点まで変形できる靱性能を有していれば、全て要求性能を満たすこととなる。しかし、より発生頻度の高い少し小さな地震荷重を考えると、点まで建物は変形することとなり、建物 A および建物 B ではほとんど目立った被害は生じないが、建物 C および建物 D では一定の被害が生じることとなる。
- 今日では、極めて大きな地震に対しても、地震後の建築物の継続利用が求められる場合が多い。この場合は、単に 2 つの地震荷重に対する要求性能を満足するだけではなく、所有者が期待する性能がどの程度の地震の大きさまで必要なかを明確にし、その要求を満足させる設計、いわゆる性能規定型の設計が必要となる。

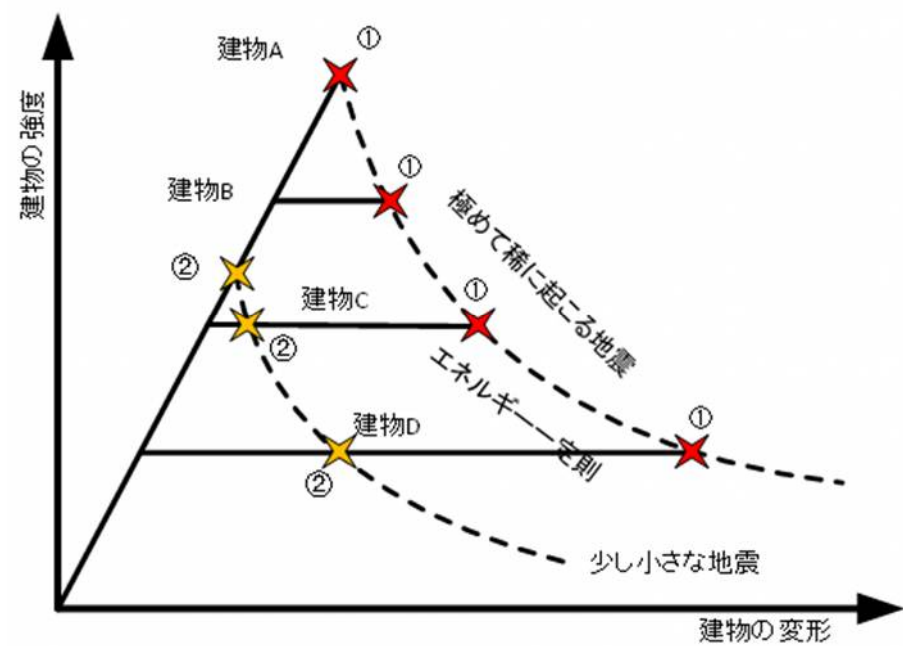


図1 建築物の変形性能、地震荷重の大きさと被害

今后的钢筋混凝土结构

今后的钢筋混凝土结构应有的形态和应该前进的道路，参考以下资料叙述。

日本建筑中心
「钢筋混凝土结构的技术变迁」

2021 年日本建筑学会大会
结构部门（RC 构造）小组讨论
「RC 结构的性能规定型抗震设计的现状和将来—性能规定化后约 20 年—」
结构部门（振动）小组讨论
「支持地震灾害 Resilience 的共振观测和建筑物监测」

1. 关于抗震设计标准
- 在性能规定化之前的抗震设计中，作为 1 次设计，对于“罕见的地震”不需要大规模的修复就可以继续使用，作为 2 次设计，对于“极少数发生的地震”，以保护人命为目的，对这两个地震负荷是否具有所需性能进行了确认。例如，在 2 次设计中，如图 1 所示，对于具有不同强度和变形性能的建筑物 A～建筑物 B，如果具有对于极少数发生的地震能够变形到点①的韧性性能，则全部满足要求性能。但是，考虑到发生频率较高的较小的地震负荷，建筑物会变形到点②，建筑物 A 和建筑物 B 几乎不会发生明显的灾害，但是建筑物 C 和建筑物 D 会产生一定的损失。
- 现在，对于非常大的地震，很多情况下也要求继续利用地震后的建筑物。在这种情况下，不仅需要满足对两个地震负荷的要求性能，还需要明确所有者所期待的性能需要到多大的地震大小，满足其要求的设计，即所谓的性能规定型的设计。

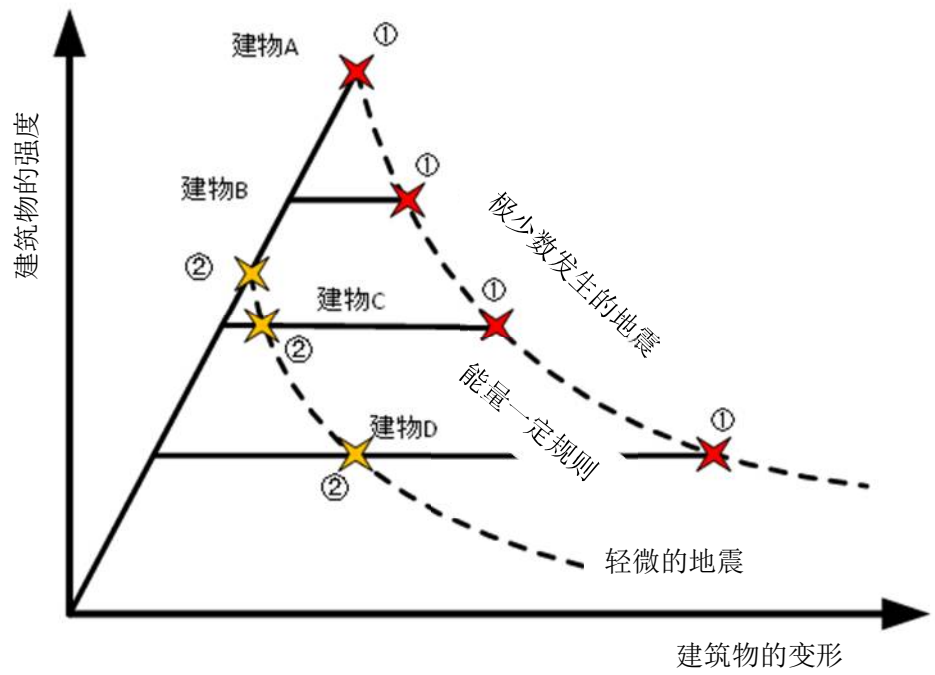
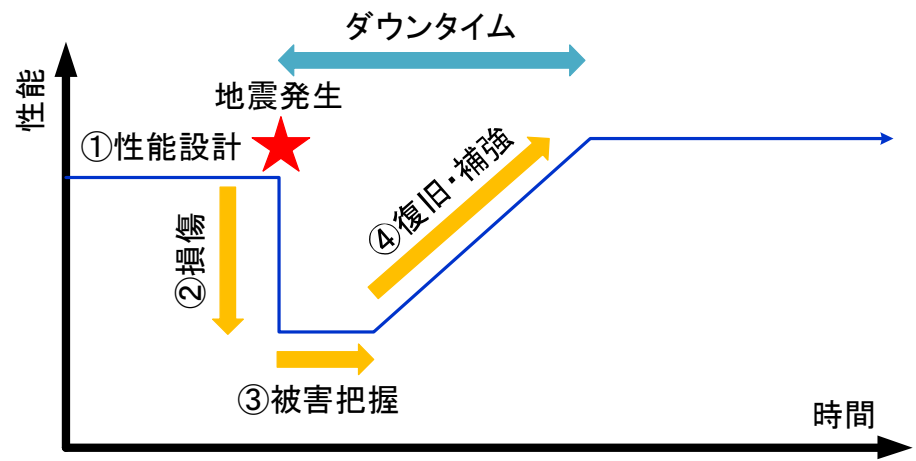
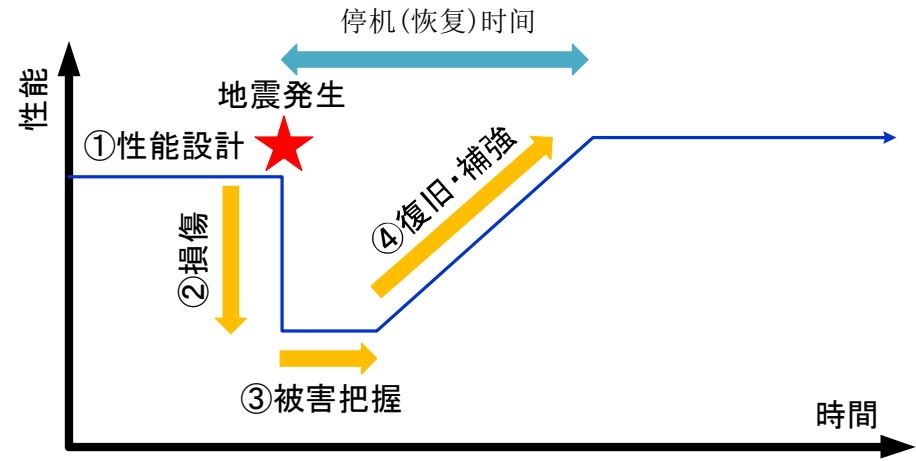
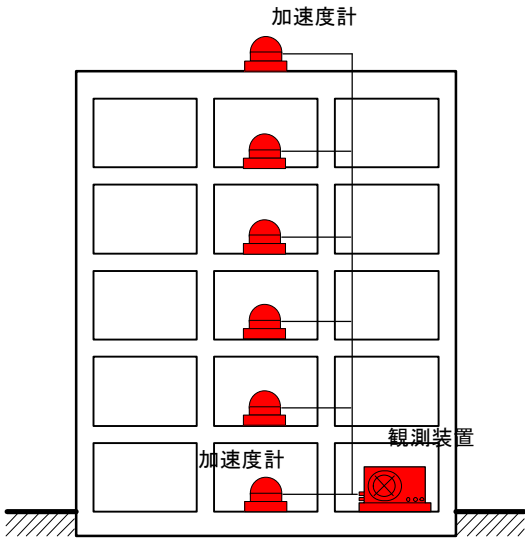
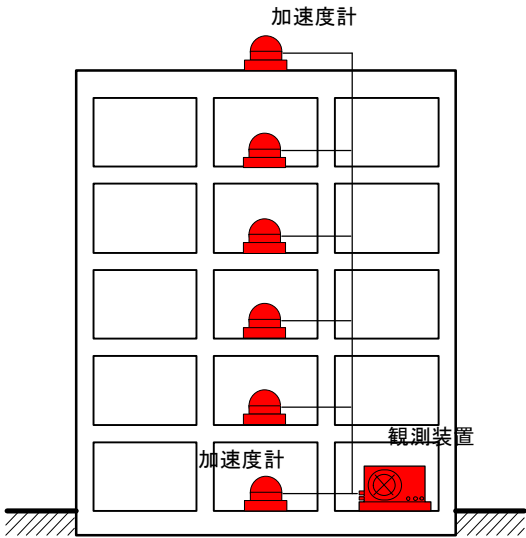


图1 建筑物的变形性能、地震负荷的大小和损害

日語	中文
図2は地震被害に対する建築物のレジリエンス曲線を示している。地震発生時に構造性能は低下するが、地震後速やかにその性能を地震前と同等、あるいはそれ以上に回復させる必要がある。この回復が終了し、建築物の利用を再開できるまでがダウンタイムとなる。今後の耐震設計では、建築物のレジリエンス、例えばダウンタイムが性能評価の1つの指標となりえるだろう。このダウンタイムを許容値以下とするためには、性能設計により適切な性能を予め付与する（図中）とともに、地震発生時の損傷をできるだけ限定的とする設計（図中）が望まれる。また、迅速な構造被害の状況把握と復旧計画の立案（図中）が必要となる。更に、なるべく早く復旧・補強を達成する新しい技術開発も必要となろう（図中）。 性能設計では、2000年に追加された限界耐力計算があげられる。しかし、いまだこの計算方法の適用は限定的であり、保有水平耐力計算に比べて実被害による検証が十分ではない。また、限界耐力計算では、特に低層建物では極めて大きな変形性能か、ベースシヤ係数で1.2を超えるような極めて高い強度を有する必要がある。一方、保有水平耐力計算では整形な建物の場合に、設計用ベースシヤ係数は最大でも0.55である。設計用ベースシヤ係数0.55を用いて設計された建築物では、実被害例は極めて限定的である。このように、低層建物では限界耐力計算による耐震性能評価の結果と実被害の間には乖離がある。この原因としては地盤と建物の相互作用、設計用スペクトルと実効入力之差などがあげられよう。今後、性能設計の合理化を図るためには、これらの項目についてはさらなる研究が必要である。  図2 地震被害に対する建築物のレジリエンス曲線	图2示出了建筑物相对于地震灾害的Resilience曲线。地震发生时虽然结构性能会下降，但是需要在地震后迅速将其性能恢复到与地震前相同或更高的程度。这个恢复结束了，建筑物的使用恢复之前是停机(恢复)时间。在今后的抗震设计中，建筑物的Resilience，例如停机(恢复)时间可以成为性能评价的一个指标。为了使该停机(恢复)时间小于容许值，需要通过性能设计预先赋予适当的性能（图中①），并且尽量限定地震发生时的损伤的设计（图中②）。另外，需要迅速把握结构损害的状况和制定恢复计划（图中③）。而且，需要尽早实现修复和强化的新技术开发（图中④）。 在性能设计方面，日本的建筑基准法在2000年追加了极限耐力计算。但是，这种计算方法至今仍然是有限的，与保有水平耐力计算相比，实际受害的验证还不够。另外，在极限耐力计算中，特别是在低层建筑中，需要具有极大的变形性能或在基础剪切系数中超过1.2的极高强度。另一方面，在保有水平耐力计算中，整形建筑物的设计用基础剪切系数最大为0.55。使用设计用基础剪切系数0.55设计的建筑物，实际受害例极其有限。这样，在低层建筑中，根据界限耐力计算的抗震性能评价的结果和实际受害之间有背离。原因可能是地基与建筑物的相互作用、设计用光谱与实际输入的差异等。今后，为了谋求性能设计的合理化，需要对这些项目进行进一步的研究。  図2 建築物相对于地震灾害的Resilience曲线

日語	中文
2. 新しい技術の利用について 2021 年日本建築学会大会では、構造部門（RC 構造）パネルディスカッション「RC 構造の性能規定型耐震設計の現状と将来―性能規定化から約 20 年―」および構造部門（振動）パネルディスカッション「地震災害のレジリエンスを支える共振観測と建物モニタリング」では、今後の性能設計の合理化を図るためには、実建物の強震観測による現行性能設計法の検証の必要性を指摘している。非線形荷重増分解析結果を基に計算する限界耐力計算と同様に、図 3 に示すように各階に設置した加速度計を用いて等価線形化法を適用して建築物の非線形挙動を把握する技術は既に開発されようとしている。今後、実建築物へのセンサー設置の普及が望まれる。実建築物の地震時応答が観測・蓄積されると、下記の様な耐震設計上の課題に対する重要な知見を得ることが出来る。 ・ 建築物の耐力 ・ 地震時の水平力分布形 ・ 建築物の減衰特性 ・ 非線形モデルの妥当性 ・ 実効入力 ・ 地盤と建物の相互作用 ・ 地盤増幅 ・ 地域係数の妥当性  The diagram shows a five-story building with a grid of windows. Accelerometers (red dome-shaped sensors) are placed on the roof and at the center of each floor. A monitoring device (観測装置) is located on the ground floor, connected to the sensors by lines. Labels include '加速度計' (Accelerometer) and '観測装置' (Observation device). 図 3 建築物の強震観測 新しい施工技術として、3D プリンターが注目されている。これは、セメント系材料を細長く押し出したものを積層して目的の形状を形成する技術である。比較的小型の模型などの造形物に使われていた技術を実大の建物に応用したものである。建設現場に 3D プリンターを設置することにより、機械が積層していくため、自由な形状を形成できること、建設コストが安くなること、作業員が機械のオペレータだけで済むこと、24 時間稼働が可能であること、等のメリットがある。既に実施工段階に達しているものもある。 例えば大林組では、3D プリンターにより特殊なモルタルを吐出して曲面を積層造形し、内部に超高強度繊維補強コンクリートを充填して構造物を形成する技術を開発している。コンクリート系材料の弱点である引張力を負担させるために鉄筋を配筋することは煩雑であり、3D プリンターのメリットを十分に生かせなくなる問題を、繊維補強コンクリートを用いることで解決している。清水建設では、高強度・高靱性の繊維補強モルタルを 3D プリンターにより積層造形した 3D プリンティング型枠の製作技術を開発し、実現場で自由な曲面を採用した大規模なコンクリート構造物を実現している。また、大成建設では、3D プリンターにより吐出した細長い材料を積層し	2. 关于新技术的利用 2021 年日本建筑学会大会上构造部门（RC 构造）小组讨论「RC 构造的性能规定型抗震设计的现状和将来―性能规定化后约 20 年―」以及构造部门（振动）小组讨论「支持地震灾害 Resilience 的共振观测和建筑物监测」那么，为了今后的性能设计的合理化，指出了根据实建筑物的强震观测的现行性能设计法的验证的必要性。与基于非线性负荷增量分析结果计算的极限耐力计算一样，如图 3 所示，已经开发了使用设置在各层的加速度计应用等效线性化方法来掌握建筑物的非线性行为的技术。今后，希望在实际建筑物上安装传感器普及。当实际建筑物在地震时的响应被观测和积累时，可以获得对以下抗震设计方面的课题的重要知识。 ☐ ・ 建筑物的耐力 ☐ ・ 地震时的水平力分布形 ☐ ・ 建筑物的衰减特性 ☐ ・ 非线性模型的妥当性 ☐ ・ 有效输入 ☐ ・ 地盘和建筑物的相互作用 ☐ ・ 地盘增幅 ☐ ・ 地域系数的妥当性  The diagram shows a five-story building with a grid of windows. Accelerometers (red dome-shaped sensors) are placed on the roof and at the center of each floor. A monitoring device (観測装置) is located on the ground floor, connected to the sensors by lines. Labels include '加速度計' (Accelerometer) and '観測装置' (Observation device). 図 3 建筑物的强震观测 作为新的施工技术，3D 打印机备受瞩目。这是一种将水泥材料细长挤压后层叠形成目的形状的技术。将相对小型的模型等造型物所使用的技术应用于实际大的建筑物。通过在建设现场设置 3D 打印机，由于机器层叠，可以形成自由的形状、建设成本降低、作业人员只需机械操作员即可完成、24 小时工作等优点。有的已经达到了实际施工阶段。 例如，日系建设公司大林组开发出利用 3D 打印机吐出特殊的灰浆层叠造形曲面，在内部填充超高强度纤维增强混凝土形成结构物的技术。为了承担混凝土材料的弱点即拉伸力而配置钢筋是很复杂的，通过使用纤维增强混凝土解决了无法充分发挥 3D 打印机的优点的问题。清水建设方面，开发了利用 3D 打印机层叠成型的 3D 印刷模具框架的制作技术，实现了在现场采用自由曲面的大规模混凝土结构。另外，在大成建设中，利用层叠通过 3D 打印机吐出的细长材料的特征，成功地使用拓扑优化方法制作了连续地改变截面形状的桥桁。还是，使之承担张力的材料成为问题，

日語	中文
ていくという特徴を生かし、トポロジー最適化手法を用いて連続的に断面形状が変化する橋げたの作成に成功している。やはり、引張力を負担させる材料が問題となるが、この技術では3DプリンターによりPC鋼材を通す穴を予め計画しておき、PC鋼材の緊張により長スパン構造物を実現させている。 より自由な形状の可能性や、労働力の減少に対応できることを考えると、3Dプリンターはますます現場で利用されていくであろう。今後は、現場での3Dプリンター利用技術の開発、有効に引張力を負担できる吐出可能な材料の開発、スラブなどの水平材の施工技術の開発、等が望まれる。 3. 新しいコンクリート材料について 現在、様々な異常気象・自然災害を引き起こす地球温暖化現象の抑制に向けて、世界一丸となって、地球の平均気温の上昇量を産業革命以前から1.5℃以下に抑えるための活動を進めており、2050年のカーボンニュートラル化（CO₂の排出が実質ゼロ）が至上命題となっている。現在一般に使用されているコンクリートは、骨材を繋ぐ結合材としてポルトランドセメントが用いられて製造されているが、ポルトランドセメントの生産に際して大量のCO₂が排出されており、その量は世界全体の7%にも及ぶ。そして、鉄筋コンクリート造建築物の竣工までのCO₂排出量の多くはポルトランドセメントの生産によるものとなっていることから、2050年カーボンニュートラル化への貢献を目的として、新たな結合材の開発が世界各国で精力的に進められている。これまで、ポルトランドセメントの過半を鉄鋼業の副産物である高炉スラグ微粉末や石炭火力発電の副産物であるフライアッシュに置き換えた結合材やポルトランドセメントの過半を炭酸カルシウムと焼成粘土で置き換えた結合材を用いたコンクリートの開発がなされ、建築物での実用化も進められてきている。近年、ポルトランドセメントを全く用いないジオポリマーの研究開発が世界的な規模で行われており、鉄筋コンクリート造建築物としての実用化例も見られる。さらに、カーボンマイナス（CO₂の排出量よりも吸収量の方が多いこと）を志向したコンクリートの技術開発・実用化も進められており、その例としては、CO₂を原料として人工的に製造した炭酸カルシウムを混和材および骨材として利用したコンクリート、水とは反応せずCO₂と反応して硬化する機構を有するセメントを用いたコンクリート、廃コンクリート粉末とCO₂を用いて製造した炭酸水素カルシウム溶液を型枠に詰めた再生骨材間に通水して昇温することにより炭酸カルシウムを析出させ、再生骨材同士を結合した炭酸カルシウムコンクリートなどが挙げられる。これらのコンクリートの多くは、一般的なコンクリートと同様に現場施工が可能なものであるが、プレキャスト工場での生産に向いているものもある。また、硬化体がアルカリ性を示さないものもあり、鉄筋の腐食抑制策、鉄鋼以外の補強材の利用などの検討が進められている。今後、鉄筋コンクリートという従来の構造形式の採用可否の検討が進められると考えられるが、全く新しい構造形式の出現も期待されている。 4. まとめ 鉄筋コンクリート構造の利点は、コンクリート材料は流動性があり曲面を含めて自由な形状をデザインできること、硬化すると高い剛性と強度を付与できることである。鉄筋コンクリート造は次の100年もきっと主要な構造種別となるであろう。しかし、社会のニーズは変化しており、建築構造にはその構造性能だけではなく、環境的側面や経済的側面も考慮したサステナブルな社会の構築への貢献が今後強く望まれるであろう。そういった要望に応えるためには、環境的側面や経済的側面も考慮しコンクリート材料の研究開発が不可欠である。このように社会の要求に対して絶え間ない技術開発を継続するとともに、その成果を柔軟に社会に反映できる制度を維持し、必要に応じて今後も基標準の改訂を行っていく必要がある。	不过，这个技术预先计划通过3D打印机通过PC钢材的孔，由于PC钢材的紧张使之实现长跨度构造物。 考虑到更自由的形状的可能性和劳动力的减少能够对应的话，3D打印机会越来越被现场利用吧。今后，希望能够开发现场的3D打印机利用技术，开发能够有效负担拉伸力的可吐出材料，开发平板等水平材料的施工技术等。 3. 关于新的混凝土材料 现在，为了抑制引起各种异常气象、自然灾害的全球变暖现象，正在团结全世界，推进将地球平均气温的上升量从产业革命前控制在1.5℃以下的活动2050年的碳中性化（CO₂的排出实质为零）成为了最大的命题。现在一般使用的混凝土，作为连接骨材的结合材料，使用波特兰水泥制造，在波特兰水泥生产时排出了大量的CO₂，其量达到了全世界的7%。而且，到钢筋混凝土建筑竣工为止的CO₂排放量多是由波特兰水泥生产而成，2050年以对碳中性化的贡献为目的，新的结合材料的开发在世界各国都被大力推进。到目前为止波尔特兰水泥的过半部分是钢铁业的副产品高炉炉渣微粉末和煤炭火力发电的副产品，用油炸灰代替的结合材料和波尔特兰水泥的过半部分用碳酸钙和烧成粘土代替的结合材料进行混凝土的开发建筑物的实用化也在推进。近年来，完全不使用波特兰水泥的地球聚合物的研究开发在世界范围内进行，作为钢筋混凝土建筑的实用化实例也被看到。此外碳精棒负数（吸收量比CO2的排放量多）为目标的混凝土的技术开发和实用化也在进行中，作为例子，将以CO₂为原料人工制造的碳酸钙作为混合材料和骨材利用的混凝土，与水无反应，与CO₂反应后硬化用混凝土、废混凝土粉末和CO₂制造的碳酸氢钙溶液，通过在再生骨材之间通水升温，使碳酸钙析出可以列举再生骨材相互结合的碳酸钙混凝土等。这些混凝土大多和一般的混凝土一样可以现场施工，但也有适合在预制厂生产的。另外，也有硬化体不显示碱性的，正在研究抑制钢筋腐蚀、钢铁以外的强化材料的利用等。今后，虽然可以考虑是否采用以往的钢筋混凝土结构形式，但也期待着出现全新的结构形式。 4. 总结 钢筋混凝土结构的优点是混凝土材料具有流动性，可以设计包括曲面的自由形状，硬化后可以赋予高刚性和强度。钢筋混凝土结构100年后也一定会成为主要的结构类别。但是，社会的需求正在变化，在建筑构造上不仅要考虑其结构性能，还要考虑环境方面和经济方面，今后强烈希望为构建可持续社会做出贡献。为了满足这样的要求，考虑到环境方面和经济方面，混凝土材料的研究开发是不可缺少的。这样，在不断地对社会要求进行技术开发的同时，必须维持能够灵活反映社会成果的制度，根据需要今后也必须进行基准的修订。