

# 일본의 플라스틱 보드 드레인 발달의 역사와 과제(I)

嘉門 雅史 (KAMON Masashi)\*1

諏訪 靖二 (SUWA Seiji)\*2

이번 호의 기술초대석은 嘉門雅史 교수와 諏訪靖二 고문의 원고인 “일본의 플라스틱 보드 드레인 발달의 역사와 과제”를 이번호와 다음호로 나누어 게재합니다. 국내에서도 연약지반의 압밀축진을 위해서 플라스틱 보드 드레인이 많이 사용되고 있는 실정이므로 일본의 보드 드레인에 관한 실정과 과제를 참고로 하면 국내에서 아직 해결되지 않은 기술적 문제들을 해결하기 위한 좋은 참고 자료가 되리라고 생각합니다.

편집자주

## 1. 머리말

일본에서는 1988년부터 플라스틱 보드 드레인 연구회(회장 : 嘉門雅史, 京都대학교수)가 조직되어, 플라스틱 보드 드레인(이하 PBD로 표기)공법의 계통적인 연구가 개시됨과 함께 PBD의 성능 평가를 위한 시험법의 개발과 PBD재의 개량이 진행되어 왔다. 이들 일련의 연구성과가 PBD재의 개량에 활용되어 현재 일본의 PBD에 의한 지반개량을 떠받치고 있다.

본 논문은 일본에서 연약지반 개량공법의 하나인 PBD공법 발전의 역사적 경과와 현재 어떤 과제를

가지고 있는가를 정리한 것이다. 또, 최근에는 자연 섬유를 재료로 한 드레인재가 사용되고 있는데 이 재료의 문제점과 한계에 대해서도 언급하고자 한다. 더욱이 최근 연구가 진행되고 있는, 타설 후 시간이 경과하면 생분해 되어 무해한 물질로 변화하는 생분해 PBD에 대해서도 현황을 소개하고자 한다.

연약한 점성토의 지반개량 공법 중에서도 압밀 원리·이론에 충실한 버티칼 드레인(이하 VD로 표기) 공법은 다수의 실적이 뒷받침되어 현재도 많이 이용되고 있다. 예를 들면, 간사이 국제공항 공사의 층적 점토의 지반개량에 있어서 샌드 드레인(이하 SD로 표기)의 사용은 1기 공사에서 약 100만본, 2기 공사에서 약 120만본이다. 한편 일본 국내에서의 해사의 채취규칙 등으로 SD용 양질의 모래를 얻기 힘들어

\*1 京都大学 교수 (kamon@geotech.gec.kyoto-u.ac.jp)

\*2 (財)地域地盤環境研究所 기술고문

## 일본의 플라스틱 보드 드레인 발달의 역사와 과제(1)

지고 있고, SD공법의 적용은 모래의 공급 문제로 영향을 받고 있다. 또, SD공법 이상으로 소비하는 샌드 매트용 모래도 부족할 것이 예상된다.

일본에서는 PBD<sup>3)</sup>라고 일컫는 판상 드레인도 VD의 일익을 담당하고 있으며, 준설 매립된 초연약지반과 연약한 충적점토지반의 개량에 중요한 일각을 차지하고 있다. 최근에는 육상으로부터의 타설 뿐 아니라 해상에서의 타설선도 건조되어 SD용 양질의 모래 입수가 곤란하게 됨에 따라 해상 타설이 증가하는 경향에 있다. 간사이 국제공항 1기 공사의 호안 공구와 매립공구에서도 사용되었고, 2기 공사에서도 일부의 매립 공구에서 시공되었다. 해외에서도 prefabricated 드레인(Prefabricated Vertical Drain or Prefabricated Band-Shaped Drain)이라고 불리며 많이 사용되고 있다. 특히, 중국에서는 일본의 몇 배~10배 정도의 시공량이며, 한국에서도 연약지반의 개량에는 SD보다 PBD가 자주 이용되고 있는 것으로 사료된다.

이 PBD공법의 전신은 페이퍼 드레인(이하 PD라고 표기)공법 혹은 카드보드 드레인 공법으로 불리던 것이다. 드레인 재료는 종이이며, 면내 통수성을 확보하기 위해 설치되어 있는 통수 홈이 토압에 의해 눌러 찌그러지는 등의 약점이 있고, 통수성능을 높이는 개량도 실시되었다<sup>2)</sup>. 또한 지중에서의 휨과 토압에 의한 통수성능의 저하를 방지하는 것은 종이 재료로는 곤란하다는 것이 인식되어, 플라스틱에 의한 드레인재의 개발이 진행되게 되었다. 그래서 시공 예가 증가됨에 따라, 개량효과가 의심스러운 사례<sup>35)</sup>가 여기저기서 보이게 되어 PD는 사용되지 않게 되었다.

이 PD의 발명으로부터 일본으로의 도입, 실제 공사로의 적용과 그 성과, 그리고 PD에서 현재 유통되

고 있는 PBD에 이르기까지의 경과를 포함한 일본에서의 역사적 변천을 이해하는 것은 이 공법의 장래를 생각하는데 중요하다고 필자는 인식하고 있다. 그것은 현재 유통되고 있는 PBD의 실태를 이해하는데 빼놓을 수 없는 역사적 경과이며, 왜 현재와 같은 PBD가 되었는지를 이해할 수 있으면, PBD의 미래상도 저절로 그려질 것이기 때문이며, 자연섬유의 드레인재의 문제와 한계도 이해할 수 있을 것이다. 따라서, PD공법에서 PBD공법으로의 변천을 더듬어 감으로써 PBD공법이 지니고 있는 기술적 과제를 정리하고, 이제부터 지향해야 할 PBD공법의 미래상을 전망한다.

이 논문은 SD 공법의 양질의 모래를 얻기 어려운 상황에 있는 한국에서 지반개량에 관계하고 있는 기술자들에게도 참고가 될 것으로 확신하고 있다.

## 2. 페이퍼 드레인 공법의 발명으로부터 일본으로의 도입<sup>4)~7)</sup>

W. Kjellman(스웨덴)이 1937년경 고안하고, W. Kjellman과 T. Kallstenius가 시공장비를 개발하였고 드레인 재료는 크래프트지를 사용했다. 그 성과가 1948년 제2회 국제 토질기초 공학회에서 발표되었다.

일본에서 PD공법은 (주)水野組(현재의 오양건설(주))가 히로시마대학 網干교수의 지도를 받아 기술을 도입하고, (주)가토제작소와 동양펄프(주)의 협력을 얻어 시공장비와 PD재를 제작하여 시공을 개시한 것이다. 같은 해 가을에 후쿠야마시의 일본강관(주)신제철소 매립에 시공된 것이 최초이다.

### 3. 페이퍼 드레인 시대<sup>7)</sup>

PD는 두께 3~3.5mm, 폭 100mm 정도로 종방향으로 8~10공의 통수공을 갖고 있다. 종이의 투수계수는  $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm/sec}$ 인데, 종방향은 통수공이 있으므로  $5 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 종이의 투수계수에 비해 큰 값이었다.

시공장비는 프랭키사(벨기에)로부터 기술도입을 하여 제작한 맨드릴형 타설장비(케이싱타설, 크롤러형, 중량 50t)이다. 타설심도에 따라 3종의 타설장비가 준비되어 있고, 1970년 경에는 오사카 남향에서 25m의 대심도 PD의 시공이 실시되었다<sup>8)</sup>.

그러나, 준설매립한 초연약지반에서는 맨드릴형 타설기는 중량이 크므로, 경량형(직접타설식, 레일식, 중량 3~5t)의 타설장비도 초연약지반용으로 개발·제작되고, 얇은 개량에 자주 이용되었다. 직접타설식이란, 선단이 역T자 형의 로드에서 PBD를 직접 감아 타설하는 방법으로 앵커는 사용하지 않았기 때문에, 타설 로드를 뺄 때에 PBD도 함께 들려 올라오는 경우가 발생하거나, 직접타설로 인해 PD·PBD 재에 상처를 입히는 경우가 있다. 그 후, PBD를 타설한 굴착 현장에서 이 PBD가 함께 올라온 경우가 실제 대량으로 확인 되는 등, 1985년경부터 사용이 급속하게 감소하였다. 그러나, 지금도 시공상의 제약으로 높은 PBD타설기를 이용할 수 없는 현장(예를 들면, 고압선 아래 등)등에서는 연결타설이 가능한 공법으로서 이용되고 있다. 한국에 30년 전에 처음으로 기술이 도입된 PBD의 시공법은 '직접타설식'였다.

PD공법의 시공 예 중에서 성공사례로서는 후쿠야마·히로시마 매립지<sup>9), 7)</sup>, 얇은 개량(15m정도까지) 등에서의 예<sup>8)</sup>가 있다. 그러나, 성공사례라고 하

는 후쿠야마 매립지의 예에서도 상세하게 분석하면 깊은 부분에서의 강도 증가가 크게 늦어지는 등의 문제가 있다는 것이 밝혀졌고<sup>9)</sup>, 타설심도가 10m를 넘는 것에서는 소정의 개량 효과의 발현이 보이지 않는 사례가 나왔다<sup>8)</sup>.

예를 들면, 오사카시 남향의 준설매립 점토와 층적점토를 대상으로 하여, 약 25m의 대심도 PD를 타설한 사례에서는 당초 예정하고 있었던 것 같은 효과가 보이지 않았다<sup>8)</sup>. 따라서, 실측침하와 강도발현의 지연을 吉國가 제안한 우물 저장손실 수두이론으로 평가하면 실측침하의 지연을 설명할 수가 있었다. 그 해석결과와 실측 침하를 그림 1에 나타내었다<sup>8)</sup>. 그림에 x표시가 실측침하이고 가장 아래의 실선이 당초 예측한 이론 계산치이며, 타설 직후부터 설계치와는 크게 달라 압밀이 늦어지는 것을 알 수 있다. 상측의 실선은 실측침하가 크게 늦으므로, 吉國의 이론에서 드레인재의 투수계수를  $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 가정하여 계산한 결과이며, 800일째 정도까지의 실측과의 대비에서 잘 일치하고 있다고 평가한 것이다. 그러나 그 후, 20년에 걸쳐 침하를 측정한 결과, 800일 이후에는 이론치 보다 4배 정도 더 늦어짐을 알 수 있다. 이와 같이, 당초 설계는 물론 손실수두를 고려한 재검토 결과보다도 더욱 실측침하는 늦어있고, 무처리와 다르지 않은 침하경향을 나타내고 있다. 확실히 PD공법은 이론대로의 효과를 발휘하지 않은 것이다. 그러면, 왜 'PD는 효과가 있었다'라고 믿고 있었는가 하면, 당시의 타설장은 길어야 10~15m 정도가 많고, 10m이하라는 것이 대다수였기 때문에 드레인재의 수두손실 문제가 개량효과에 큰 영향을 미치지 않았기 때문이 아닌가 추측된다.

오사카항에서의 PBD와 PD의 실측 데이터를 木山가 정리한 분석결과를 그림 2에 나타내었다<sup>9)</sup>. 그

일본의 플라스틱 보드 드레인 발달의 역사와 과제(1)

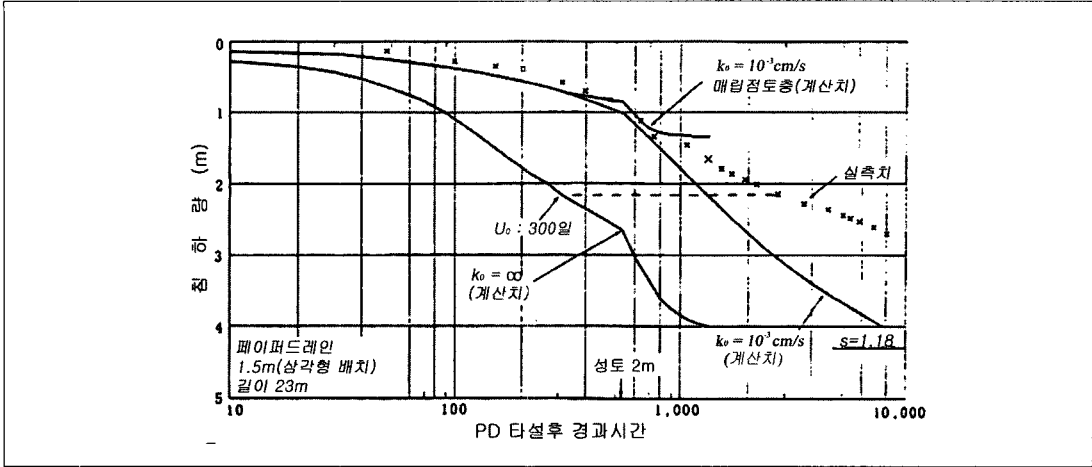


그림 1. 페이퍼 드레인 공법의 실측침하와 계산치의 비교<sup>9)</sup>

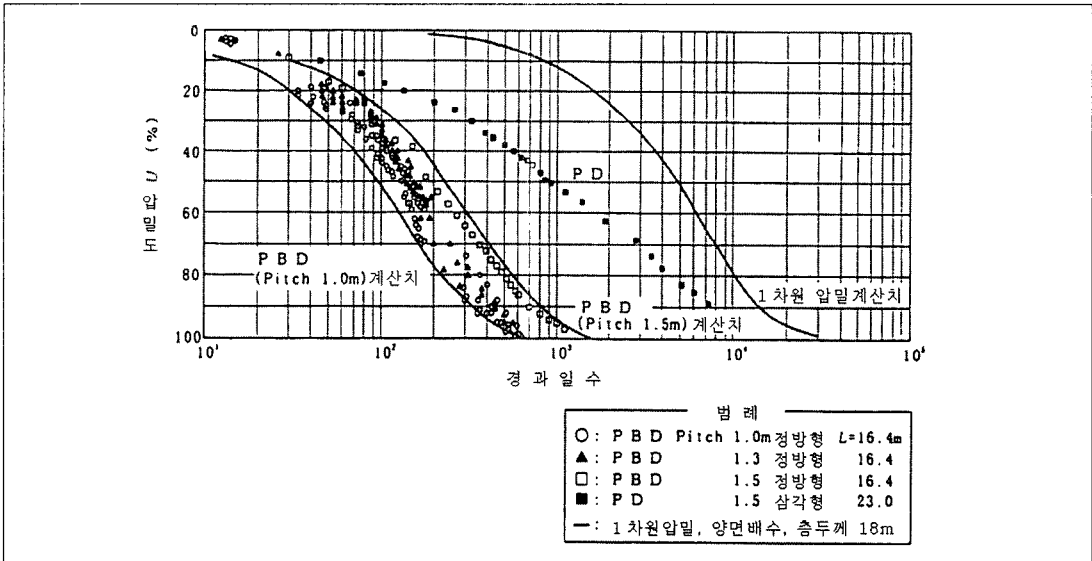


그림 2. 플라스틱 보드 드레인과 페이퍼 드레인의 비교<sup>9)</sup>

림 왼쪽의 2줄 실선은 PBD의 타설 피치 1.0m와 1.5m의 이론치이고 드레인 피치 1.0m, 1.3m, 1.5m의 PBD의 실측치는 모두 이 이론의 범위에 들어 있으며, PBD가 충분히 가능하다는 것을 나타내고 있다. 또, PD는 PBD에 비해 지연이 현저하며, 마지막

에는 1차원 압밀의 이론선에 가까워져 있다. 타설 후 20년을 경과해도 무처리와 마찬가지로 침하가 계속되고 있는 것이 명백해졌다.

#### 4. 플라스틱 보드 드레인 개발(1960년대 후반부터 1970년대)

PD의 다양한 문제점(꺾임에 의한 통수공의 막힘, 토압에 의한 통수공의 막힘, 연직방향의 통수능력 부족, 부식)이 명백해지고, 1964년경에는 통수성의 확보와 부식대책을 위한 개량이 일본 독자적으로 진행되었다. 그러나 종이를 고집하는 한 성능(면내 통수성능) 확보를 바랄 수 없으므로, 1966년경부

터 고분자 화학재료에 의한 드레인재의 개발이 시작되었다.

PBD개발시의 심재와 필터의 구조 변천을 그림 3에 나타내었다<sup>10)</sup>. 처음에는 파형의 심재(염화 비닐)에 부직포를 접착제로 일체화시켰던 것이, 굴곡 저항, 부직포와 심재의 일체성, 통수공의 확보 등에 대해서 만족할 만한 제품개발이 계속되어, 1973년 경이 되어 현재의 캐슬 보드 드레인의 원형이 완성되어 사용되었다.

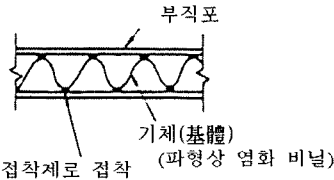
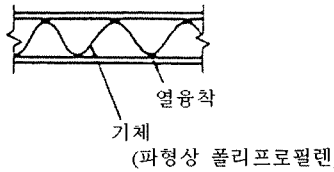
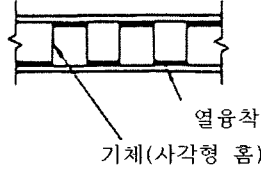
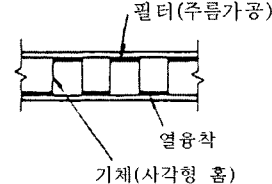
시기	개발형태	특징
초기단계	 <p>부직포 기체(基體) (파형상 염화 비닐) 접착제로 접착</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 접착제가 박리되기 쉽다.</li> <li>2. 염화비닐의 기체가 부러지기 쉽다</li> </ol>
중기단계	 <p>열융착 기체 (파형상 폴리프로필렌)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. 1, 2항에 나타난 결점은 해소했다.</li> <li>4. 파형상의 기체는 토압에 대해 약한 것이 판명되었다.</li> </ol>
근년단계 (1973~1974)	 <p>열융착 기체(사각형 홈)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. 4항의 결점은 해소.</li> <li>6. 압밀침하 시에 굴곡으로 인해 부직포의 파단이 발생한다.</li> </ol>
1975~현재	 <p>필터(주름가공) 열융착 기체(사각형 홈)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>7. 대부분의 문제는 해소되었다. 부직포의 파단에 대해서는 주름가공으로 대처한다.</li> </ol>

그림 3. 플라스틱 보드 드레인 개발시의 구조<sup>10)</sup>(참고문헌)에 기함

## 일본의 플라스틱 보드 드레인 발달의 역사와 과제(1)

이 고분자 재료에 의한 신제품의 개발에 자극을 받아 다양한 것이 제품화되기 시작했다. 그리고 다수의 신제품이 제조되어 이용된 시대이다. 1970년대 초반부터 다수의 업체에 의한 제품이 제공되고, 현장에서 사용되었다<sup>12)</sup>. 그러나, 드레인재로서 기본적으로 필요로 한 성능(집수, 배수, 휘어져도 배수성을 확보할 수 있는 등)에 대한 이해가 업체측에 충분히 없었던 점과 학식경험자와 연약지반 전문의 기술자가 제품개발에 관련되는 일이 적어, 업체 주도로 실시되었기 때문에 성능적으로 문제가 있는 제품(흠에 약한 타입이나 균질한 부직포 타입 등)도 많이 나돌았다.

한편, 대심도 PBD에서는 PD시대의 이름이 남아 압밀 지연이 우려되어, PBD는 타설장 10m정도(최대 15m)의 초연약한 지반개량에 이용하는 것이 주류가 되어 SD의 주역을 빼앗기까지는 발전하지 않았다. 오히려, 소구경 샌드 드레인, 샌드팩 드레인(이하 PSD라고 함)과 결합하는 상태가 오래 지속되었다.

시공장비는 1982년 경부터 중량이 20t 전후의 경량으로 타입력이 큰 케이싱을 정착한 friction 휠식 타설장비가 제작되어 사용되기 시작했다. 현재의 대부분의 타설기는 이 타입이다. 게다가, 중량 40t 정도로 최대 타설심도 40m의 것도 1988년 경부터 제작되어, 대심도와 표층이 단단한 지반(표층고화 개량)의 PBD타설에 이용되고 나리타 공항의 연안전개 사업 등에서 활약하였다.

1983년 경에는 PBD의 해상 타설 실험이 오사카 항에서 실시되었다. PBD타설선은 SD타설선을 개조하여, 수중에서도 임의의 위치에서 PBD를 자를 수 있는 PV컷터(1982년에 스웨덴 기술 도입)를 케이싱 선단에 장착하고 있다. 현장은 수심 5m정도, 타설 심도 G.L-28.0m이므로, 타설장은 약 24m가 되

었다. 샌드매트 두께는 1.2m, 성토 두께 1.0m, 합계 2.2m 두께의 하중에 대해서 소정 대로의 침하가 보여 양호한 결과를 얻을 수 있었다<sup>12), 13)</sup>. 그 후, 다이도공업(현재의 미라이 건설)이 전용선을 개발·제작하여 해상 타설을 해왔다. 그러나, 수심이 깊어지고 연약지반의 개량심도가 깊어짐에 따라, 육상에서 시공되고 있는 PBD(폭 10cm, 두께 약 3mm)로는 시공성이 나빠져서 폭 20cm, 두께 약 4mm(SD로의 환산경 10cm)의 해상용(마린) 플라스틱 보드 드레인(이하 MPD라고 함)의 개발이 MPD공법 연구회에 의해 이루어졌으며, (주)일본 해공이 MPD타설 전용선을 건조·취항시켰고 동시에 다이도 공업 소유의 타설선도 MPD전용선으로 개조되어 2척의 해상타설선(MPD전용)이 가동되고 있다.

## 참고 문헌

1. 佐々木伸(1982) : プラスチックボード・ドレーン工法, (社)土質工学会, 土と基礎, Vol.30, No.6, p.p.76-78.
2. 米倉亮三, 初見孝, 大友孝之(1967) : ペーパードレーン(ボードレーンソニカ)による埋立地の自重・密促進の効果, (社)土質工学会, 土と基礎, Vol.15, No.1, p.p.15-19.
3. 佐々木伸, 木山正明(1972) : 水位低下とペーパードレーンによる地盤改良, 土木学会 第27回年次学術講演会III部, p.p.537-540.
4. 新技術委員会(1964) : ペーパードレーン工法(軟弱地盤改良工法), 山海堂, 土木施工, Vol.5, No.8, p.p.1-7.
5. 網干寿夫, 河本勇, 稲葉晃己(1965) : ペーパードレーン工法について, (社)土質工学会, 土と基礎, Vol.13,

- No.6, p.p.3-10.
6. 河本勇(1965) : 페어바드레온공법의実施例, 山海堂, 土木施工, Vol.6, No.11, p.p.191-197.
7. 五洋建設(株)技術・研究所(1968) : 페어바드레온공법과大氣圧工法, 理工図書, p.215.
8. 高間佐太男, 佐々木伸(1969) : 페어바드레온についての実験, (社)土質工学会, 土と基礎, Vol.17, No.4, p.p.13-18.
9. 木山正明(1997) : 臨海埋立地盤の工学的評価と圧密による地盤改良に実する研究, 大阪市立大学工学博士請求論文.
10. 森本辰雄, 野村忠明, 富田与志男, 小室正人, 植山幸雄, 志賀明, 太田俊明(1976) : 新しい地盤改良工法による設計・施工一キヤツスル・ボード・ドレオン工法-, 日刊工業新聞社, 施工技術, Vol.9, No.8, p.p.6-40.
11. 佐々木伸, 山田邦喜, 谷口彰(1974) : 合成樹脂製ドレオン材の諸特性, 日刊工業新聞社, 施工技術, Vol.7, No.2, p.p.81-85.
12. 佐々木伸, 木山正明(1984) : 板状ドレオンと小口径パツクドレオンを用いた海底地盤の改良実験, (社)土木学会, 第39回年次学術講演会講演概要集, 第3部, p.p.309-310.
13. 木山正明(1985) : 大阪港における地盤改良工法の現況と展望, 総合土木研究所, 基礎工, Vol.13, No.8, p.p.30-37.



諏訪 靖二  
SUWA Seiji

#### 학 력

1968년 3월 오사카 공업 대학 공학부 토목공학과

#### 경 력

1968년 4월 ~ 1981년 5월 나카보리 소일 코너  
1981년 11월 (재)오사카 토질시험소 Chief 엔지니어  
1986년 6월 (재) 오사카 토질시험소 부소장  
1998년 10월 기구개혁에 의해 부소장직장폐지, 기술 컨설턴트부장에 취임  
1999년 10월 ~ 2003년 4월 (재)지역 지반 환경 연구소(재단명 변경) 기술 컨설턴트 부장  
2003년 4월 정년퇴직  
2003년 4월 (재)지역 지반 환경 연구소 기술고문

#### 비상근강사 등

1991년 4월 1998년 3월 오사카 공업대학 비상근강사  
2001년 4월 대법원 오사카 지방법원소속 조정 위원  
2001년 9월 오사카 지방법원에서 감정인  
2004년 4월 대법원 오사카 지방법원소속 전문위원

#### 토질 및 기초 기술사(일본)

저 서 : 지반공학회 (2004) : 「지반조사의 방법과 해설」, 공저 외 약 27편

이외에(사)지반공학회, (사)토목학회, 일본 응용 지질학회 등의 심포지엄이나 연구 발표회에서 연구 성과를 발표 (약320편)

## 일본의 플라스틱 보드 드레인 발달의 역사와 과제(1)



嘉門 雅史  
KAMON Masashi

### 학 력

- 1968년 3월 교토대학 공학부 교통토목공학과 졸업
- 1970년 3월 교토대학 대학원 토목공학전공 석사 졸업
- 1973년 3월 교토대학 대학원 토목공학전공 박사 수료
- 1979년 7월 교토대학 공학박사 학위 취득

### 경 력

- 1973년 4월 교토대학 공학부 토목교실 조수
- 1975년 4월 교토대학 공학부 토목교실 강사
- 1977년 6월 교토대학 공학부 토목교실 조교수
- 1980년 10월 ~ 1981년 9월  
스웨덴 왕립 공과대학(Royal Institute of Technology) 객원연구원
- 1991년 4월 교토대학 방재연구소 교수
- 2001년 8월 교토대학 대학원 공학연구과 환경지구공학 전공(地圏공학 강좌 담임)교수
- 2002년 4월 교토대학 대학원 지구환경학당 지구친화기술학당(사회기반친화기술론 분야 담임)교수
- 2005년 4월 ~ 현재 교토대학 대학원 지구환경학당 지구친화기술학당 학당장 · 학사장

### 상 별

- 1991년 5월 23일 1991년도 일본재료학회 논문상 수상
- 1997년 5월 22일 1997년도 일본재료학회 논문상 수상
- 1999년 5월 일본 지반공학회 공로상 수상
- 2003년 12월 국제 지오신세틱학회 일본지부 2003년도 기술상 수상
- 2004년 5월 2003년도 일본 지반공학회 연구업적상 수상

### 기타 활동

- (1) 국토교통성, 환경성, 오사카부, 자하현, 오사카시, 기타 재단법인 등의 각종위원회 위원장 등
- (2) 토목학회, 지반공학회, 일본재료학회 등 이사, 간사장, 위원장, 위원
- (3) 국제 지오신세틱학회 이사, 아시아 지구 위원장 등

전문분야 : 토목공학-지반공학-지반재해, 환경지반공학

논 문 : 약250편

저 서 : · Environmental Geotechnics, Vols.1, 2 and 3, Balkema, Rotterdam, 1996 and 1997.

- 지반과학, 블루백, 講談社, 1995.
- 환경지반공학입문, 토질공학회, 1994.
- 흙의 역학 I, 신세계 토목공학16 技報堂출판 1988.
- 기타